ISSN 1346-7328
国総研資料　第931号
平 成 ２ ８ 年 ９ 月

国土技術政策総合研究所資料

TECHNICAL NOTE of
National Institute for Land and Infrastructure Management

No. 931　　September 2016

直杭式横桟橋の船舶接岸時のレベル１信頼性設計法に関する諸考察（その２）

勝俣優・竹信正寛・宮田正史・村上和康

Considerations of Level 1 Reliability Design Method
for Vertically Pile-Supported Wharves under Berthing Condition
(Part 2)

Masaru KATSUMATA, Masahiro TAKENOBU, Masafumi MIYATA, Kazuyasu MURAKAMI

国土交通省　国土技術政策総合研究所

National Institute for Land and Infrastructure Management
Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, Japan

国土技術政策総合研究所資料
No.931 2016 年 9 月
(YSK-N-351)

直杭式横桟橋の船舶接岸時のレベル１信頼性設計法に関する諸考察（その２）

勝俣 優*・竹信正寛**・宮田正史***・村上和康****

要　旨

「港湾の施設の技術上の基準・同解説（平成19年）」[1)]（以下，現行港湾基準という）において，防波堤や係留施設の全体安全性の照査に対して，レベル１信頼性設計法（部分係数法）が導入された．著者らは，現行港湾基準の次期改訂に向けて，船舶接岸時における直杭式横桟橋の鋼管杭の応力照査を対象とした部分係数の再構築を目指している．

これに対し，既報[2)]では基準別の安全性水準の評価や，杭部材力の関数化による応力照査の簡便化が行なわれた．本稿はその成果を踏まえ，部分係数の再構築に向けて以下の検討を行った．

①船舶接岸時における桟橋の杭の応力照査に係る確率変数について，現行港湾基準以降に得られた知見を収集整理し，その確率分布を再設定した．また，接岸力の確率分布は，使用する防舷材の性能により異なるため，国内に流通する各防舷材の性能を整理することで，標準的な性能を有するモデル防舷材を設定した．

②異なる設計条件を有する複数の検討断面に対し信頼性解析を実施することで，船舶接岸時における直杭式横桟橋の杭の応力照査について，様々な設計条件を包括した荷重抵抗係数アプローチに基づく部分係数を構築した．

キーワード：レベル１信頼性設計法，目標安全性水準，直杭式横桟橋，船舶接岸，応答曲面法，荷重抵抗係数アプローチ，モンテカルロシミュレーション

* 港湾研究部 港湾施設研究室 交流研究員（中央復建コンサルタンツ株式会社）
** 港湾研究部 主任研究官
*** 港湾研究部 港湾施設研究室長
**** 港湾研究部 港湾施設研究室 元交流研究員（日本工営株式会社）
〒239-0826　横須賀市長瀬3-1-1　国土交通省国土技術政策総合研究所
電話：046-844-5019　Fax：046-842-9265　　e-mail：ysk.nil-kikaku@ml.mlit.go.jp

Technical Note of NILIM
No. 931 September 2016
(YSK-N-351)

Considerations of Level 1 Reliability Design Method for Vertically Pile-Supported Wharves under Berthing Condition (Part 2)

Masaru KATSUMATA*
Masahiro TAKENOBU**
Masafumi MIYATA***
Kazuyasu MURAKAMI****

Synopsis

Level 1 reliability design method (partial factor design method) was introduced as a performance verification method for whole stability of breakwaters and mooring facilities, according to the Japanese design standards for port facilities, titled "Technical Standards and Commentaries for Port and Harbor Facilities in Japan (2007)" [1]. For next revision of the standards, the authors strive to reassign the partial safety factors for performance verifications of pile stress of vertically pile-supported wharves under berthing conditions.

In the first report [2], the authors evaluated the target safety level of the past and current standards, and simplified the calculation method of estimating the stresses by the response surface method. In this study, based on the results of the past report, the authors examined the issues shown below.

① The authors reassigned the probability distributions of random variables for performance verifications of pile stress under berthing conditions by collecting knowledge after the current standards. Then, because the probability distribution of berthing impact force is affected by the performance of fenders, we strived to standardize the performance of fenders by organizing the published information of fenders in the domestic market.

② By Reliability Analysis of piles that have various conditions, the authors calculated partial safety factors based on Load and Resistance Factor Approach, which contained various conditions, for performance verifications of pile stress of vertically pile-supported wharves under berthing conditions.

Key Words: Level 1 reliability design method, Target safety level, Pile-supported wharf, ship berthing, response surface method, Load and Resistance Factor Approach, Monte Carlo Simulation

---

* Exchanging Researcher, Port Facilities Division, Port and Harbor Department, NILIM
(CHUO FUKKEN CONSULTANTS Co., Ltd.)
** Senior Researcher, Port and Harbor Department, NILIM
*** Head, Port Facilities Division, Port and Harbor Department, NILIM
**** Former Exchanging Researcher, Port Facilities Division, Port and Harbor Department, NILIM
(NIPPON KOEI Co., Ltd.)
3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan
Phone : +81-468-44-5019 Fax : +81-468-42-9265 e-mail : ysk.nil-kikaku@ml.mlit.go.jp

目　次

1. はじめに

1.1. 分析の目的

「港湾の施設の技術上の基準・同解説（平成19年）」[1)]（以下，「現行港湾基準」とする）において，複数の構造形式の全体安定性・部材安全性の照査に対し，レベル1信頼性設計法（部分係数法）が導入されており，直杭式横桟橋に関する設計もこれに含まれる．

一方で，現行港湾基準の改訂に向けて，各構造形式において部分係数の見直しが検討されている．これについて，竹信ら[3)]は，現行の部分係数の特徴やそれに対する設計実務者からの意見を踏まえ，ケーソン式岸壁の永続状態における全体安定性（滑動および転倒）を対象として，部分係数法の見直しの方向性を示している．竹信ら[3)]が示した見直しの方向性は，主として以下の2つである．

①基準毎の安全性水準の推移の整理・考察と目標安全性水準の再設定
②荷重抵抗係数アプローチによる部分係数の提案

また，現行港湾基準の部分係数は，杭列数や基礎捨石の有無等については唯一つの設計条件の下でのみ検討がなされており，設計条件によっては，部分係数法により設定した断面が目標安全性水準と大きく異なる断面となる可能性を残すこととなった．したがって，直杭式横桟橋について，様々な設計条件の下で設計法の変遷による所要断面規模の変化を俯瞰するとともに，荷重抵抗係数アプローチに基づく部分係数の再構築を図る必要がある．

このため，本研究は直杭式横桟橋の船舶接岸時の部材安定性を対象に，現行港湾基準の次期改訂における新たな部分係数を提示することを目的とし，以降に示す検討を実施した．なお，本研究における部材安定性は，杭の安定性を指す．また，杭の安定性に関する照査は応力照査と支持力照査があるが，本研究では応力照査のみを対象とする．

1.2. 分析の全体手順と本稿の構成

本研究は，直杭式横桟橋の船舶接岸時の部材安定性に係る新たな部分係数の提案を目指すものであるが，既に村上ら[2)]が基準別の安全性水準の再評価，並びに応答曲面法による杭部材力の関数化を図っている．このため，村上ら[2)]の検討も含めた研究全体を「本研究」と表記し、本資料単独は「本稿」と表記する．

本稿は，村上ら[2)]の検討内容を踏まえ，各設計条件の変化が杭の性能照査値に与える影響の考察，信頼性解析による部分係数の提案などを実施したものである．本研究の検討内容と資料構成を以下に示す．

(1) 研究の全体手順

本研究全体を通しての検討手順を**図-1**のフローに示す．本稿における検討内容は，**図-1**中のハッチングで示す範囲(手順③～⑧)である．また，未ハッチング範囲(手順①，②)が，村上ら[2)]の検討内容である．以下に，本研究の全体手順の概要を述べる．

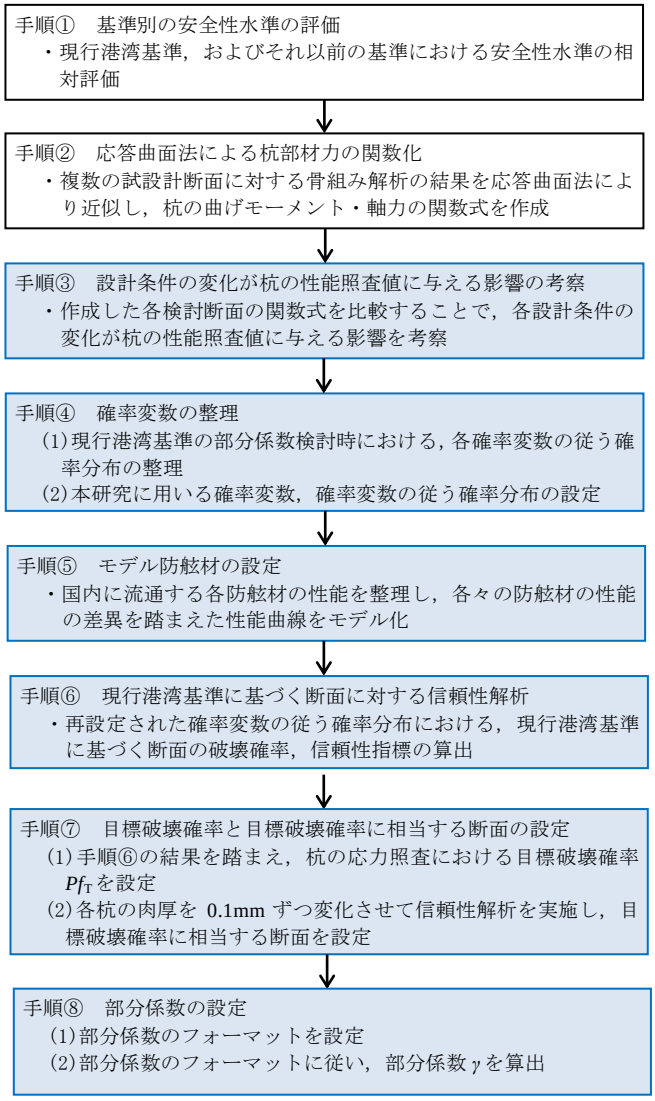


図-1　本研究の全体フロー

a) 基準別の安全性水準の評価(手順①)

部分係数の算定にあたっては，構造物の目標安全性水準を決定する必要がある．桟橋構造では，船舶の接岸力が主要な作用となりうるため，船舶接岸に対する目標安全性水準の設定は重要といえる．また，その設定にあたっては，現行港湾基準または過去の基準類が有していた安全性水準を評価する必要がある．なお，現行港湾基準の船舶接岸時の部分係数は，期待費用最小化の考えに基づき設定され

ているため，それ以前の設計法（許容応力度法）とは安全性の目標設定の考え方が異なる．

このため，村上ら[2)]は，基準間の安全性水準の違いを様々な条件下で相対的に評価しており，船舶接岸時における基準別の安全性水準の位置関係を**図-2**に示している．すなわち，平成11年度基準においては，船舶接岸時の許容応力度の割増率が明記されておらず，船舶接岸時を常時と同等(割増率1.0)とするか，地震時と同等(割増率1.5)とするかで，安全性水準が大きく異なるとしている．

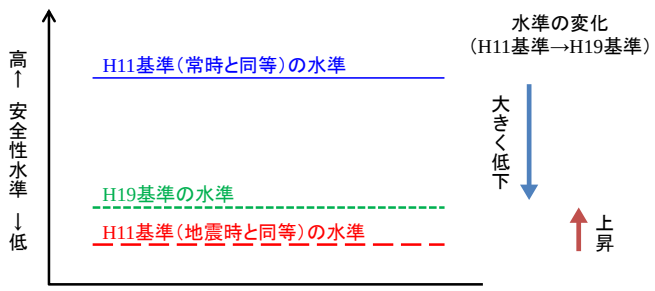


図-2　安全性水準の位置関係 [2)]

なお，村上ら[2)]は，平成11年度基準(許容応力度法)における安全率が降伏強度を許容応力度で除したものであり，杭縁部の降伏限界に対する安全余裕を意味していることから，現行港湾基準(部分係数法)により求めた杭の断面諸元についても，下式により実質的な安全率を算出することができるとしている．

$$F_s = \left(\frac{\sigma_{ck}}{\sigma_{cy}} + \frac{\sigma_{bck}}{\sigma_{by}}\right)^{-1} \qquad (1.1)$$

ここに，

F_s　：実質安全率
σ_{ck}　：軸力による圧縮応力度の特性値（N/mm^2）
σ_{bck}　：曲げモーメントによる圧縮応力度の特性値（N/mm^2）
σ_{cy}　：軸方向圧縮降伏応力度の特性値（N/mm^2）
σ_{by}　：曲げ圧縮降伏応力度の特性値（N/mm^2）

である．

村上ら[2)]は，地震時および船舶接岸時について，現行港湾基準における実質安全率と，平成11年度基準における安全率を比較しており，船舶接岸時については，現行港湾基準の実質安全率を1.2～1.3程度，平成11年度港湾基準における船舶接岸時の実質安全率を1.68(常時同等)，もしくは1.12(地震時同等)としている．

なお，収集した過去の基準，教科書や，安全性水準の比較に用いた検討ケースについては，村上ら[2)]を参照されたい．

b) 応答曲面法による杭部材力の関数化（手順②）

本研究の信頼性解析手法としては，竹信ら[3)] の研究を踏襲し，モンテカルロシミュレーションを採用する．しかしながら，通常の杭の応力照査において，発生部材力（曲げモーメント・軸方向力）は骨組み解析によって算出されるため，杭の発生応力を単純な関数式で表現することはできない．したがって，この部材力の評価方法をどのような手法に基づいて実施するかという点が，信頼性解析を円滑に実施する上での課題となる．

これに対し，村上ら[2)]は，代表的な設計条件（船舶接岸力・基礎地盤の地盤反力係数）から部材力を算出することができる近似式を，応答曲面法を用いて作成し，近似値と骨組み解析による解析値との比較を行っている．本稿では，村上ら[2)]が作成した近似式を用いて，以降の検討を行なう．

なお，応答曲面法による近似式の作成手順については，2.2に概要を記載するが，詳細については村上ら[2)]を参照されたい．

c) 設計条件の変化が杭の性能照査値に与える影響の考察（手順③）

村上ら[2)]は，応答曲面法による杭部材力の近似式の入力変数を，船舶接岸力および地盤反力係数としている．これは，応答曲面法による近似では，入力変数のある入力パターンに対する応答結果が既知のデータとして必要であるが，入力変数の種類を多く設定するほど近似関数式が高次元となるため，近似に必要なデータ数が多くなり，近似式の作成が困難となることによる．したがって，これ以外の設計条件(海底勾配，杭列数，設計水深等)については，設計条件の変化が杭の性能照査値にどの程度影響するかについて評価することはできない．

このため，本稿では設計条件の異なる検討断面の組合せを抽出し，近似式の出力値を比較する．これにより，近似式の入力値でない設計条件についても，杭の性能照査値がどの程度変化するかについて検討する．

d) 確率変数の整理（手順④）

信頼性解析の実施に先立ち，船舶接岸時における直杭式横桟橋の杭の応力照査に関わる確率変数や確率変数の従う確率分布を設定する．これらの設定にあたっては，まず現行港湾基準の部分係数検討時に用いられた確率変数と確率変数の従う確率分布を整理する．次いで，確率変数の

従う確率分布についての最新の知見を収集整理し，本稿に用いる確率変数，および確率変数の従う確率分布を新たに設定する．

e) モデル防舷材の設定（手順⑤）

船舶接岸力は防舷材からの反力として桟橋に作用するが，この反力は防舷材の性能に依存する．このため，複数の防舷材製品の性能を包括的にとらえた反力モデルの作成を試み，信頼性解析に反映させる．

f)現行港湾基準に基づく断面に対する信頼性解析（手順⑥）

上述のとおり，本稿に用いる確率変数や確率変数の従う確率分布，防舷材の反力特性は，現行港湾基準の検討時とは異なるものとした．これらの変更が，現行港湾基準を満足する断面の破壊確率に与える影響を評価するため，現行港湾基準に基づいて設定した検討断面に対し，本稿で新たに設定した確率変数や確率変数の従う確率分布を用いて信頼性解析を実施し，破壊確率や信頼性指標が現行港湾基準の目標破壊確率や目標信頼性指標からどの程度推移するかについて検討する．

これらの結果を踏まえ，破壊確率や部分係数に与える影響が大きいと考えられる要因について検討する．

g) 目標破壊確率と目標破壊確率に相当する断面の設定（手順⑦）

評価結果を踏まえた上で，既往の設計事例などを参照しつつ，目標破壊確率を再設定する．また，各検討断面の杭肉厚を0.1mmずつ変化させて信頼性解析を実施することで，目標破壊確率に相当する断面を設定する．

h) 部分係数の設定（手順⑧）

部分係数のフォーマットを設定し，目標破壊確率に相当する断面の信頼性解析結果より，各検討断面の部分係数 γ を算出する．

各断面の部分係数を比較・整理することで，適切な部分係数のフォーマットについて検討し，直杭式横桟橋の部材安定性に係る部分係数を提案する．

(2) 本稿の構成

第 2 章では，手順②について応答曲面法を用いた近似式の作成方法や近似式の精度について村上ら[2)]を引用して述べる．また，手順③について，各検討断面における近似式を比較し，各設計条件の変化が杭の性能照査値に与える影響を考察する．

第 3 章では，手順④について，現行港湾基準および本稿に用いる確率変数を整理する．

第 4 章では，手順⑤について，既往防舷材の整理や，モデル防舷材の設定方法について述べる．

第 5 章では，手順⑥について，現行港湾基準に基づいて設定した検討断面に対する信頼性解析の結果を示し，破壊確率や信頼性指標が現行港湾基準の目標破壊確率や目標信頼性指標からどの程度推移するかについて記述する．

第 6 章では，手順⑦について，目標破壊確率を設定するとともに，各杭の肉厚ごとの破壊確率を整理することで，目標破壊確率に相当する断面を設定する．また，手順⑧について，目標破壊確率に相当する断面の信頼性解析結果や，新しい部分係数の提案についても，第 6 章で詳述する．

2. 直杭式桟橋における応答曲面法の評価

2.1. 検討方法

本稿の目的は，船舶接岸時に対する安全性水準について検討した上で，直杭式桟橋構造における船舶接岸時の発生応力の照査に適用する部分係数を構築することであり，信頼性解析に基づく杭の破壊確率の算出が不可欠である．しかし，杭の応力照査に用いる杭の曲げモーメントや軸力は，骨組み解析により求めることが一般的であり、性能関数を定式化することは容易でない．一方で，信頼性解析では一回の解析に数十万回から数百万回のサンプリングを行うため，骨組み解析を直接信頼性解析に組み込むことは，計算負荷の観点から困難である．この課題を解決するため，村上ら[2)]は応答曲面法により杭毎の発生部材力の近似関数式を立式し，モンテカルロシミュレーション(以下，MCSとする)に組み込むことで，杭の応力照査における信頼性解析の簡便化を図った．

本分析では，村上ら[2)]の近似式を用いて信頼性解析を実施するため，2.2に村上ら[2)]を引用してこれらの近似式について概説する．詳細については村上ら[2)]を参照されたい．

また，これらの近似式は，その入力値を船舶接岸力および地盤反力係数としており，これ以外の設計条件(海底勾配，杭列数，設計水深等)については，設計条件の変化が杭の性能照査値にどの程度影響するかについて評価できない．このため，本稿では各設計条件について近似式の感度分析を行い，各設計条件の変化に対し，杭に生じる曲げモーメントや軸力がどのように推移していくか考察する．これについては，2.3，2.4に記載する．

2.2. 応答曲面法を用いた近似式の作成法[2)]

村上ら[2)]を引用し，応答曲面法を用いた近似式の作成法について概説する．

(1) 応答曲面法の概要と近似式の変数

応答曲面法とは，複数の入力変数から予測される応答を関数で近似化したものである(式(2.1))．この近似には，変数のある入力パターンに対する応答結果が既知のデータとして必要であり，変数の種類が多く，近似関数が高次元であるほど，必要データ数は多くなる．なお，応答曲面法において，この近似式の関数形には，特に制約はない．

$$y = f(x_1, x_2, \cdots, x_n) + \varepsilon \qquad (2.1)$$

ここに，

y　：応答
x_n　：説明変数（$n > 1$）
f　：近似関数
ε　：誤差

本研究では，応答曲面法を杭の部材力の近似式の作成に用いるため，杭の曲げモーメントおよび軸力を近似式の目的変数（式(2.1)における応答）とする．また，杭の部材力に影響を与える要素として，桟橋にかかる船舶接岸力と杭にかかる地盤反力係数を式(2.1)における説明変数とする．

したがって，本研究に用いる近似式では，目的変数および説明変数は**表-1**に示すとおりとなる．なお，捨石マウンドを有する断面モデルに関しては，地盤反力係数を捨石層のもの（k_{CH1}）とその直下の砂層のもの（k_{CH2}）とで区別し，別の変数として使用する．

表-1　近似式に用いる変数

近似式の変数		記　号
目的変数	曲げモーメント	M
	軸力	N
説明変数	接岸力	H
	地盤反力係数	砂層：k_{CH}
	（捨石マウンドを有する場合）	捨石層：k_{CH1} 砂層：k_{CH2}

(2) 検討断面

検討断面を以下のとおり設定し，**表-2**に一覧として整理する．また，**図-3**に検討断面の概略図を示す．

【前面水深】　-7.5m，-12.0m，-18.0mの3パターン
【杭 本 数】　水深および杭間隔（5mもしくは10m）に応じて3,4,5,6本の4パターン
【捨石マウンド】　有り（勾配は1：2），無しの2パターン
【上 部 工】　水深-7.5mの場合は21.0kN/m^2（現行港湾基準記載[1)]），水深-12.0m・-18.0mの場合は30.0 kN/m^2（設計事例集記載値[12)]）の自重
【地盤反力】　基礎地盤は砂層とし，N値は5,15の2パターンで，地盤反力係数はそれぞれ7,500kN/m^{3}と22,500kN/m^3
捨石の地盤反力係数は一律3,500kN/m^3

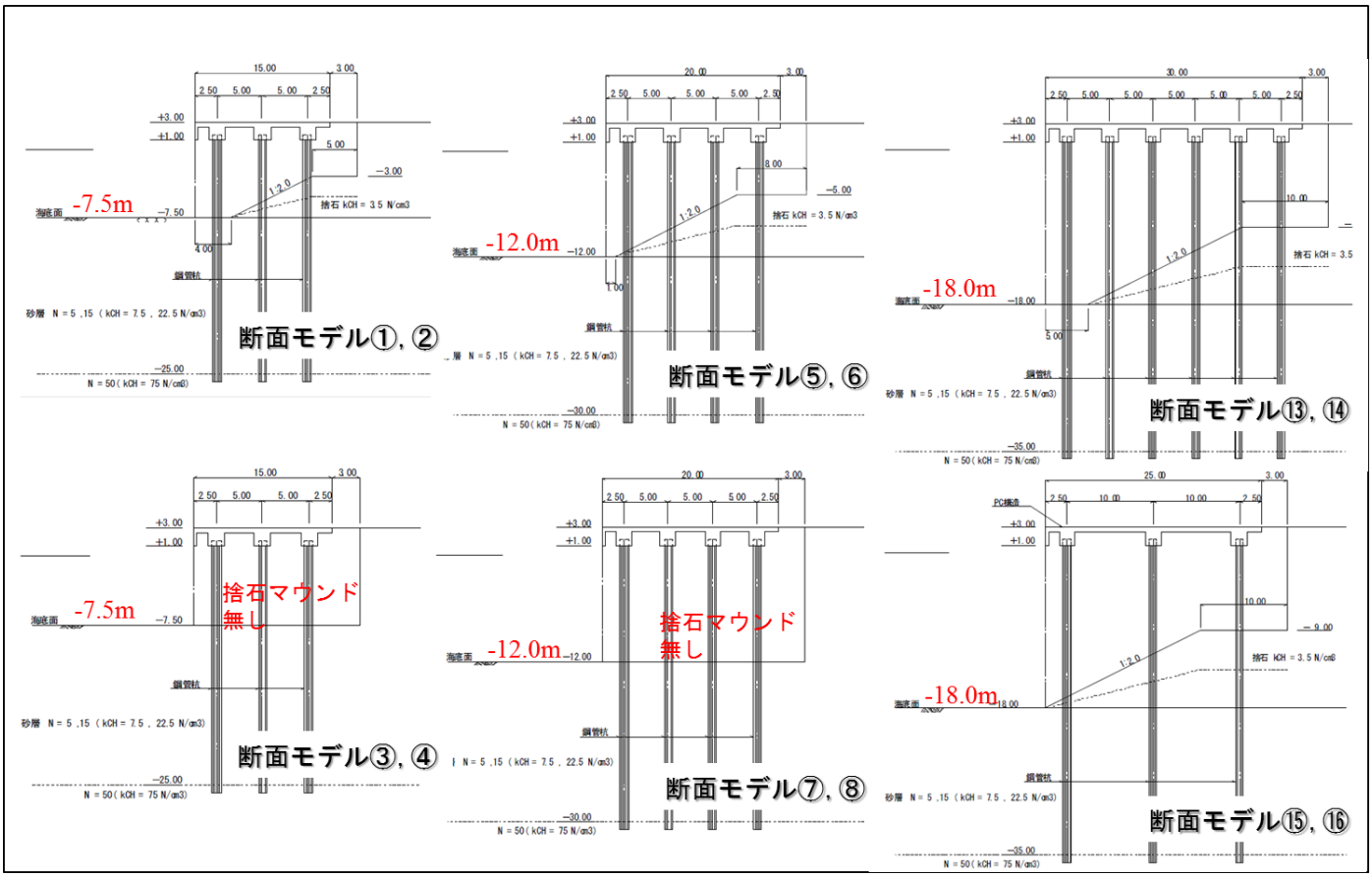
(3) 近似のための入力・応答データ

前述のとおり，応答曲面法による近似では，複数の入力パターンに対する応答結果が既知のデータとして必要である．つまり，**表-1**に示す説明変数の入力の組合せに対応する曲げモーメントと軸力の解析値が必要となる．

本研究では，入力値は$\mu \pm n\sigma$（μ：平均，n：正の整数，σ：標準偏差）で変化させた．現行港湾基準の杭の応力照査に係る部分係数法においては，水平力と地盤反力係数の平均の偏り（$=\mu/X$，X：特性値）および変動係数（$=\sigma/\mu$）が**表-3**のとおり設定されているため，これらを用いて，本研究における入力値の目安を**表-4**とおりに設定した．

表-2　検討断面モデル一覧

断面モデルNo.			①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧
前面水深		－m	7.5	7.5	7.5	7.5	12.0	12.0	12.0	12.0
捨石マウンド			有	有	無	無	有	有	無	無
背面水深		－m	3.0	3.0	7.5	7.5	5.0	5.0	12.0	12.0
杭本数 ※法線直角方向		本	3	3	3	3	4	4	4	4
杭間隔		m	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0
上部工	幅	m	15.0	15.0	15.0	15.0	20.0	20.0	20.0	20.0
	自重	kN/m^2	21.0	21.0	21.0	21.0	30.0	30.0	30.0	30.0
上載荷重		kN/m^2	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0
地盤反力係数k_{CH}	捨石層 k_{CH1}	kN/m^3	3,500	3,500			3,500	3,500		
	砂層 k_{CH2}	kN/m^3	7,500	22,500	7,500	22,500	7,500	22,500	7,500	22,500
断面モデルNo.			⑨	⑩	⑪	⑫	⑬	⑭	⑮	⑯
前面水深		－m	12.0	12.0	12.0	12.0	18.0	18.0	18.0	18.0
捨石マウンド			有	有	無	無	有	有	有	有
背面水深		－m	5.0	5.0	12.0	12.0	9.0	9.0	9.0	9.0
杭本数 ※法線直角方向		本	5	5	5	5	6	6	3	3
杭間隔		m	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	10.0	10.0
上部工	幅	m	25.0	25.0	25.0	25.0	30.0	30.0	25.0	25.0
	自重	kN/m^2	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0
上載荷重		kN/m^2	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0
地盤反力係数k_{CH}	捨石層 k_{CH1}	kN/m^3	3,500	3,500			3,500	3,500	3,500	3,500
	砂層 k_{CH2}	kN/m^3	7,500	22,500	7,500	22,500	7,500	22,500	7,500	22,500



※断面モデル⑨～⑫は，断面モデル⑤～⑧の杭本数を 5 本としている

図-3　検討断面図

表-3　各変数の確率分布

変数	平均の偏り μ/X	変動係数 $V\ (=\sigma/\mu)$	分布形
水平力	0.87	0.25	正規
地盤反力係数	1.333	0.76	対数正規

表-4　近似に用いる入力値の目安

変数		特性値 X	平均 μ	標準偏差 σ	μ-σ	$\mu+\sigma$	$\mu+2\sigma$	$\mu+3\sigma$
接岸力（kN/ﾗｰﾒﾝ）	7.5m岸壁	268.0	233.2	58.3	174.9	291.5	349.7	408.0
	12.0m岸壁	419.8	365.2	91.3	273.9	456.5	547.8	639.1
	18.0m岸壁	877.8	763.7	190.9	572.8	954.6	1,145.5	1,336.5
地盤反力係数（kN/m^3）	砂層 N=5	7,500	9,998	7,598	2,399	17,596	25,194	32,792
	砂層 N=15	22,500	29,993	22,794	7,198	52,787	75,581	98,375
	捨石層	3,500	4,666	3,546	1,120	8,211	11,757	15,303

(4) 近似関数式の形式

近似関数式は，目的変数である曲げモーメント，軸力それぞれについて，各検討断面の杭列毎に作成する．また，検討断面の捨石マウンドの有無により，説明変数が異なることから，これらについても近似関数式の形式が区分される．

したがって，近似関数式の形式は**表-5**に示す4パターンとなる．なお，各検討断面および杭列毎の近似関数式の回帰係数については，村上ら[2)] を参照されたい．

表-5　近似関数式一覧

目的変数	近似関数式	
	捨石マウンド有り（断面モデル①,②,⑤,⑥,⑨,⑩,⑬,⑭,⑮,⑯）	捨石マウンド無し（断面モデル③,④,⑦,⑧,⑪,⑫）
曲げモーメント	$M = X_1 + X_2 \cdot H$ $X_1 = A_1 \times k_{CH1}{}^{B_1}$ $X_2 = A_2 \times k_{CH1}{}^{B_2}$ $A_1 = a_1 \times k_{CH2}{}^{b_1}$ $B_1 = a_2 \times k_{CH2}{}^{b_2}$ $A_2 = a_3 \times k_{CH2}{}^{b_3}$ $B_2 = a_4 \times k_{CH2}{}^{b_4}$	$M = X_1 + X_2 \cdot H$ $X_1 = A_1 \times k_{CH}{}^{B_1}$ $X_2 = A_2 \times k_{CH}{}^{B_2}$
軸　力	$N = X_3 + X_4 \cdot M$ $X_3 = A_3 \times k_{CH1}{}^{B_3}$ $X_4 = A_4 \times k_{CH1}{}^{B_4}$ $A_3 = a_5 \times k_{CH2}{}^{b_5}$ $B_3 = a_6 \times k_{CH2}{}^{b_6}$ $A_4 = a_7 \times k_{CH2}{}^{b_7}$ $B_4 = a_8 \times k_{CH2}{}^{b_8}$	$N = X_3 + X_4 \cdot M$

記　号		
M	杭の曲げモーメント（kN・m）	
N	杭の軸力（kN）	
H	接岸力（kN/ﾗｰﾒﾝ）	
k_{CH1}	捨石層の地盤反力係数（kN/m^3）	
k_{CH2}	砂層の地盤反力係数（kN/m^3）	
k_{CH}		砂層の地盤反力係数（kN/m^3）
X_i, A_i, B_i, a_i, b_i	回帰係数	

2.3. 各設計条件に対する近似式の感度分析

村上ら[2)]が作成した近似式の入力値は，接岸力と地盤反力係数のみであり，それ以外の設計条件(N値，海底勾配，設計水深，杭列数等)は杭列毎に固定している．一方で，信頼性解析および部分係数の設定においては，様々な設計条件を概ね網羅した検討断面を設定する必要がある．

したがって，信頼性解析を実施する前に，本節において各設計条件に対する近似式の感度を分析し，直杭式桟橋の発生部材力について支配的な要因を考察する．設計条件に対する近似式の感度が小さければ，その設計条件が大きく変化したとしても，杭に発生する部材力はそれほど変化しない．このため，信頼性解析において検討パターン数を少なく設定することができる．本検討では，各設計条件について近似式の感度を整理することで，各設計条件の変化に対し，杭に生じる曲げモーメントや軸力がどのように推移していくか考察する．

(1)考察対象となる設計条件と分析手法

考察対象となる設計条件は，以下のとおりである．

・接岸力
・原地盤，捨石の地盤反力係数
・海底勾配の有無(捨石基礎による勾配の有無)
・杭列数
・設計水深

このうち，接岸力と地盤反力係数は近似式の入力値であるため，連続的に変化させることが可能である．一方で，それ以外の設計条件は，近似式ごとに固定しており，同一の近似式においては変化させることができない．

(2)分析手法

前述のとおり，接岸力と地盤反力係数を除く設計条件は，近似式ごとに固定されており，同一の近似式においては変化させることができない．このため，比較対象とする設計条件のみ異なり，それ以外の設計条件は同一となるような断面の組合せを抽出し，近似式の出力値を比較することで感度分析を行う．分析の手法としては，主に以下の2手法が考えられる．

①入力値(接岸力，地盤反力係数)を特性値とした際の，各断面の出力値(曲げモーメント，軸力)の比較
②各断面の入力値の変化に対する出力値の推移の比較

なお，各近似式の想定する杭径と肉厚は，現行港湾基準を満たす断面性能となるように杭径を100mm刻み，肉厚を0.1mm刻みで設定している(以下，適合杭とする)ため，近似式ごとに想定する適合杭の諸元は全く異なっており，桟橋全体の剛性も検討断面ごとに異なっている．したがって，本節の検討は，杭や桟橋全体の剛性が全く異なる断面同士の比較であることに留意する必要がある．

(3)入力値を特性値とした際の各断面の出力値の比較

接岸力と地盤反力係数を特性値で固定し，それ以外の設計条件について断面同士の近似式出力値を比較することで，各設計条件の差異が杭の発生部材力に与える影響について整理する．なお，ここでは海底勾配の有無についての比較のみ示し，全設計条件に対する比較は**附録A**に記載する．

海底勾配の有無についての杭の発生部材力の比較を**図-4**，**図-5**，**表-6**，**表-7**に示す．なお，本稿では最も海側の杭列を第1列とする．また，最も海側の杭列を海側杭，最も陸側の杭列を陸側杭，それ以外の杭列を中央杭群とする．一般的に，直杭式横桟橋の杭に生じる曲げモーメントは，海側杭で小さく，陸側杭で大きくなるが，海底勾配を有する断面はその傾向がより顕著であることが**図-4**より確認できる．このため，**表-6**に示すように，海底勾配を有する断面と有さない断面とでは，曲げモーメントに0.8(海側杭)～1.2(陸側杭)倍程度の差が生じる．

また，海底勾配を有する断面は，有しない断面と比較して海側杭での軸力が大きくなることがわかる．これは，海底勾配を有する断面では海側杭の曲げモーメントが小さくなり，引抜力が低下するためである．

各設計条件に対する比較結果は**表-8**に示すとおりであり，各設計条件の差異は，曲げモーメントに影響を与えると判断できる．ただし，後述の検討より，接岸力と比較するとその影響は限定的である．一方で，軸力については，上載荷重や上部工面積と杭列による影響が大きく，その他の設計条件の影響は比較的小さい．詳細は**附録A**を参照されたい．

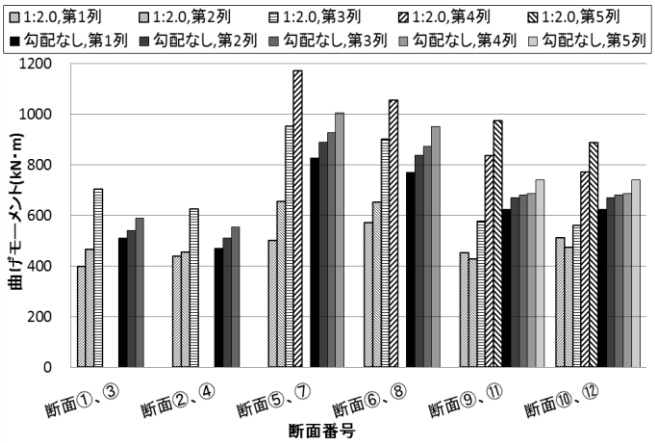


図-4　海底勾配に対する曲げモーメントの比較

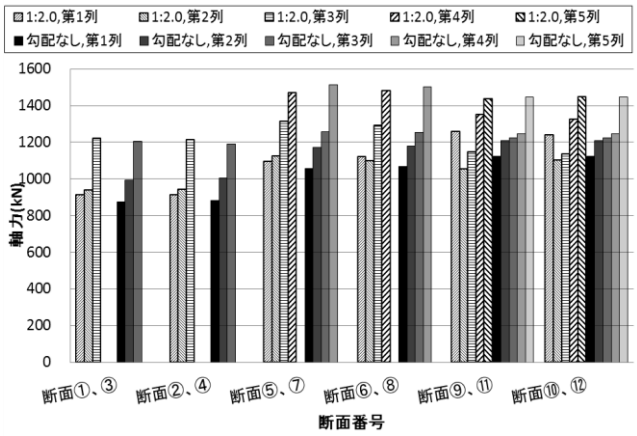


図-5　海底勾配に対する軸力の比較

表-6　海底勾配に対する曲げモーメントの比較

断面番号	設計水深対象船舶	接岸力	砂質土地盤N値	杭列	曲げモーメント 海底勾配 1:2.0	海底勾配 なし	比($M_{1:2.0}/M_{勾配なし}$) 杭毎	比($M_{1:2.0}/M_{勾配なし}$) 平均
1,3	−7.5m 5,000DWT	268.0 (kN/ﾗｰﾒﾝ)	5	第1列	M= 398.38	M= 512.14	0.78	0.94
				第2列	M= 465.21	M= 541.22	0.86	
				第3列	M= 704.48	M= 588.96	1.20	
					合計 1568.07	合計 1642.32	0.95	
2,4			15	第1列	M= 439.16	M= 469.12	0.94	0.98
				第2列	M= 455.40	M= 510.11	0.89	
				第3列	M= 624.95	M= 555.17	1.13	
					合計 1519.52	合計 1534.40	0.99	
5,7	−12.0m 30,000DWT	419.8 (kN/ﾗｰﾒﾝ)	5	第1列	M= 500.26	M= 826.54	0.61	0.88
				第2列	M= 656.72	M= 890.85	0.74	
				第3列	M= 953.53	M= 928.99	1.03	
				第4列	M= 1171.67	M= 1005.49	1.17	
					合計 3282.18	合計 3651.87	0.90	
6,8			15	第1列	M= 571.06	M= 770.75	0.74	0.92
				第2列	M= 653.93	M= 837.19	0.78	
				第3列	M= 902.18	M= 872.41	1.03	
				第4列	M= 1056.70	M= 952.97	1.11	
					合計 3183.87	合計 3433.32	0.93	
9,11			5	第1列	M= 453.45	M= 669.15	0.68	0.89
				第2列	M= 428.75	M= 707.40	0.61	
				第3列	M= 576.93	M= 719.58	0.80	
				第4列	M= 837.22	M= 736.55	1.14	
				第5列	M= 974.82	M= 779.81	1.25	
					合計 3271.17	合計 3612.49	0.91	
10,12			15	第1列	M= 511.57	M= 625.80	0.82	0.94
				第2列	M= 475.38	M= 669.21	0.71	
				第3列	M= 561.57	M= 681.62	0.82	
				第4列	M= 772.30	M= 686.75	1.12	
				第5列	M= 889.17	M= 740.52	1.20	
					合計 3209.99	合計 3403.90	0.94	

表-7　海底勾配に対する軸力の比較

断面番号	設計水深対象船舶	接岸力	砂質土地盤N値	杭列	軸力 海底勾配 1:2.0	海底勾配 なし	比($M_{1:2.0}/M_{勾配なし}$) 杭毎	比($M_{1:2.0}/M_{勾配なし}$) 平均
1,3	−7.5m 5,000DWT	268.0 (kN/ﾗｰﾒﾝ)	5	第1列	N= 911.34	N= 876.59	1.04	1.00
				第2列	N= 938.77	N= 993.60	0.94	
				第3列	N= 1222.45	N= 1205.07	1.01	
					合計 3072.56	合計 3075.26	1.00	
2,4			15	第1列	N= 914.03	N= 882.28	1.04	1.00
				第2列	N= 944.14	N= 1004.05	0.94	
				第3列	N= 1214.23	N= 1189.15	1.02	
					合計 3072.41	合計 3075.48	1.00	
5,7	−12.0m 30,000DWT	419.8 (kN/ﾗｰﾒﾝ)	5	第1列	N= 1094.29	N= 1056.85	1.04	1.00
				第2列	N= 1125.94	N= 1171.07	0.96	
				第3列	N= 1313.94	N= 1257.54	1.04	
				第4列	N= 1471.08	N= 1514.94	0.97	
					合計 5005.25	合計 5000.39	1.00	
6,8			15	第1列	N= 1122.28	N= 1068.44	1.05	1.00
				第2列	N= 1100.31	N= 1178.32	0.93	
				第3列	N= 1293.40	N= 1252.34	1.03	
				第4列	N= 1480.73	N= 1501.55	0.99	
					合計 4996.71	合計 5000.65	1.00	
9,11			5	第1列	N= 1260.03	N= 1120.89	1.12	1.00
				第2列	N= 1054.12	N= 1199.29	0.88	
				第3列	N= 1147.61	N= 1216.01	0.94	
				第4列	N= 1351.04	N= 1264.48	1.07	
				第5列	N= 1436.81	N= 1449.54	0.99	
					合計 6249.61	合計 6250.20	1.00	
10,12			15	第1列	N= 1240.30	N= 1124.51	1.10	1.00
				第2列	N= 1101.42	N= 1208.71	0.91	
				第3列	N= 1134.30	N= 1224.38	0.93	
				第4列	N= 1326.51	N= 1246.97	1.06	
				第5列	N= 1446.32	N= 1445.76	1.00	
					合計 6248.85	合計 6250.34	1.00	

表-8　各設計条件が曲げモーメント・軸力に与える影響

設計条件	曲げモーメントに与える影響	軸力に与える影響
原地盤N値	海底勾配を有する断面では有り	小
	・海底勾配を有する断面に限り，N値が小さい断面では海側杭の曲げモーメントが小さく，陸側杭の曲げモーメントが大きくなる傾向がある．	―
海底勾配の有無	有	有
	・海底勾配を有する断面は，有さない断面と比較して，海側杭の曲げモーメントが小さく，陸側杭の曲げモーメントが大きくなる．	・海底勾配を有さない断面では，海側杭の軸力が最も小さく，陸側杭に近くなるほど軸力が大きくなるが，海底勾配を有する断面では，海側杭の軸力が，中央杭と比較して大きくなる傾向にある．
杭列数	有	有
	・杭列数の差は，各杭における曲げモーメントの合計値にはほとんど影響しない． ・杭毎の比較では，杭列数が多い方が，杭毎に生じる曲げモーメントが均等化される．このため，杭列数が少ないほど，杭列数以外の要因に伴う影響を強く受けるといえる．	・杭列数が多い断面では，桟橋全体の軸力は増加する傾向にある．ただし，これは杭列数が多い断面ほど，上部工が大型化するためである． ・したがって，上部工面積が同一であれば，杭列数は個々の杭列における軸力には影響するが，桟橋全体としては一定である．
設計水深	有	小
	・同一の接岸力であれば，水深が浅い断面ほど海底面から上部工下端までの杭長が短くなるため，曲げモーメントは小さくなる．	・設計水深と上部工面積に相関性があるため，桟橋全体の軸力は，設計水深が深いほど大きくなる傾向にある． ・ただし，杭列数も増加する傾向にあるため，杭毎の軸力は，設計水深との相関性は小さい．このため，設計水深そのものは，軸力への影響は小さいといえる．

(4)近似式の入力値の変化に対する出力値の比較

近似式の入力値(接岸力，地盤反力係数)を特性値で固定した状態での，各設計条件が発生部材力に与える影響の比較は前述したとおりである．ここでは，断面毎に近似式の入力値を特性値から増減させ，出力値の推移を比較することで，各設計条件に対する近似式の感度を分析する．なお，出力値の推移の比較を容易とするために，入出力値を以下の式により無次元化する．

$$x^* = (x - x_k)/x_k \qquad (2.2)$$
$$y^* = (y - y_k)/y_k \qquad (2.3)$$

ここに，

x^*：無次元化入力値

x ：入力値

x_k：基準値(入力値の特性値)

y^*：無次元化出力値

y ：出力値

y_k：基準値(入力値を特性値とした際の出力値)

なお，ここでは比較結果についてのみ整理して述べる．詳細な検討過程や，全断面における入力値に対する出力値の推移は**附録B**に記載する．

a) 曲げモーメントの推移

表-10では，入力を接岸力，出力を曲げモーメントとし，捨石基礎による海底勾配の有無，杭列数，設計水深が異なる断面における入出力の推移を一例ずつ示している．**表-10**より，各設計条件が異なっても，特性値により無次元化した入出力の推移はほぼ一定であることがわかる．すなわち，いずれの断面や杭であっても，接岸力の増減率と曲げモーメントの増減率は基準値に対して概ね一定である．

一方で，入力を地盤反力係数とすると，特に海底勾配の有無と杭列により入出力の推移が一定とならない．ここでは，原地盤の地盤反力係数については断面①～④，捨石の地盤反力係数については断面①②を例として，地盤反力係数と曲げモーメントの推移を**図-6**，**図-7** に示す．なお，各断面の設計条件は**表-9** のとおりである．

表-9　各断面の設計条件

断面	設計水深(m)	杭列(本)	海底勾配	原地盤の地盤反力係数の特性値(kN/m^3)	捨石の地盤反力係数の特性値(kN/m^3)
①	-7.5	3	1:2.0	7,500	3,500
②	-7.5	3	1:2.0	22,500	3,500
③	-7.5	3	なし	7,500	-
④	-7.5	3	なし	22,500	-

図-6に示すとおり，海底勾配を有する断面①②は，無勾配の断面③④と比較して，海側杭ほど原地盤の地盤反力係数に伴い曲げモーメントが大きく減少する．また，**図-7**より，基礎捨石の地盤反力係数の変化に対し，海側杭の曲げモーメントは高い感度を有するが，陸側杭の曲げモーメントはほぼ一定であることがわかる．つまり，海底勾配を有する断面では，地盤反力係数の変化に対する曲げモーメントの推移が杭列により全く異なる傾向を持っている．

ただし，**図-6**や**図-7**では，入力値(原地盤，捨石の地盤反力係数)は特性値の0.3～4.5倍程度まで変化させているが，曲げモーメントの増減は最も感度の高い断面②の第1列(海側杭)でも基準値比-20%～10%程度に過ぎない．**表-**に示した接岸力の変化に対する曲げモーメントの変化と比較すると，地盤反力係数の変化が曲げモーメントに与える影響は限定的であると考えられる．また，実際の設計において，横桟橋式係船岸の基礎捨石勾配は無勾配～1:1.5 程度であるため，本検討の勾配(無勾配，1:2.0)は，概ね基礎捨石の取り得る勾配を網羅していると判断できる．

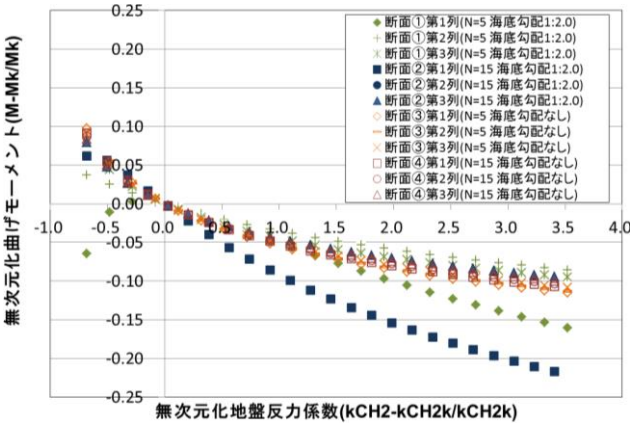


図-6　無次元化した原地盤の地盤反力係数の変化に対する曲げモーメントの推移(断面①～④)

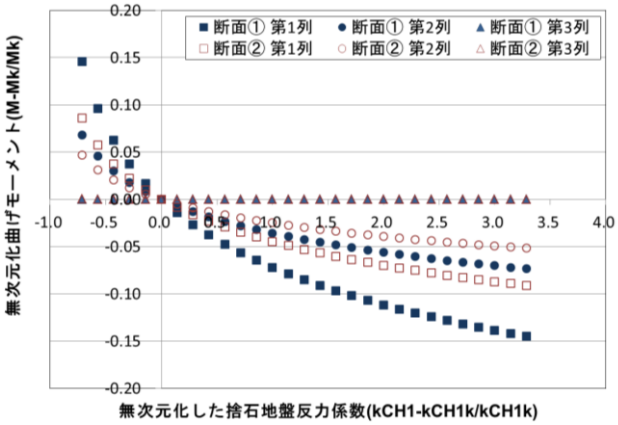
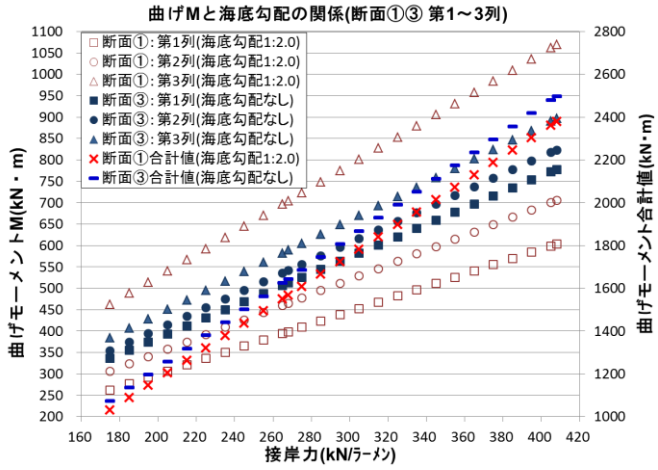
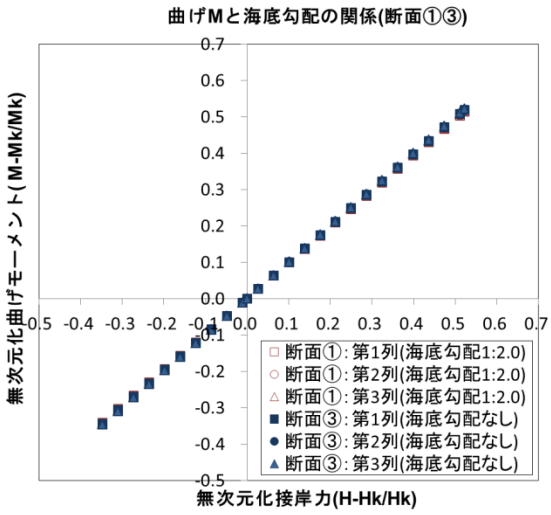
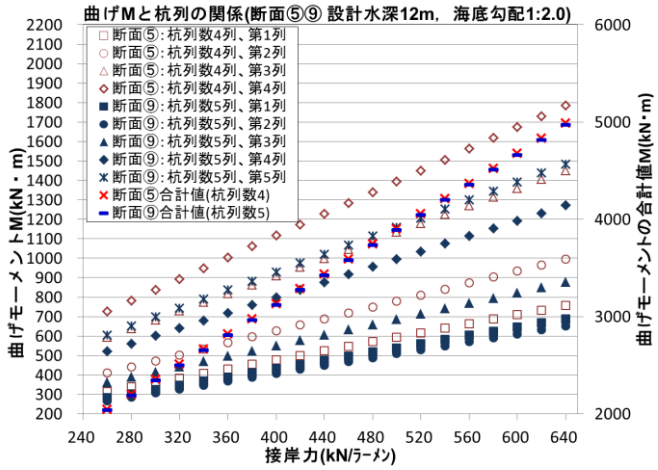
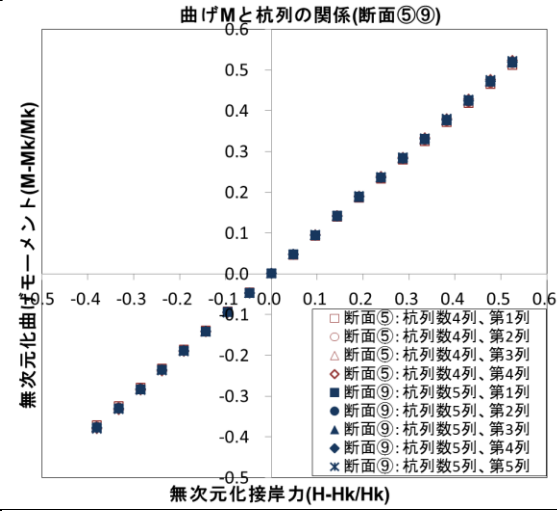
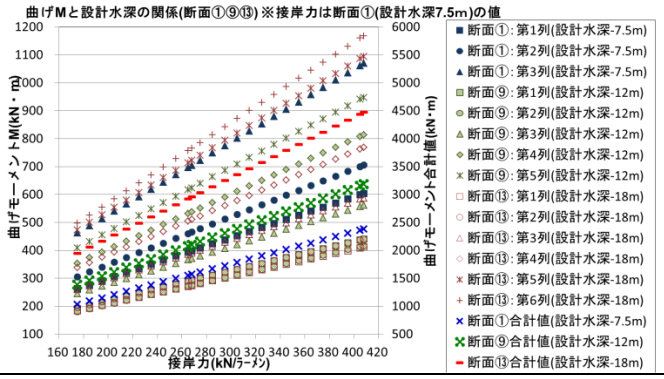
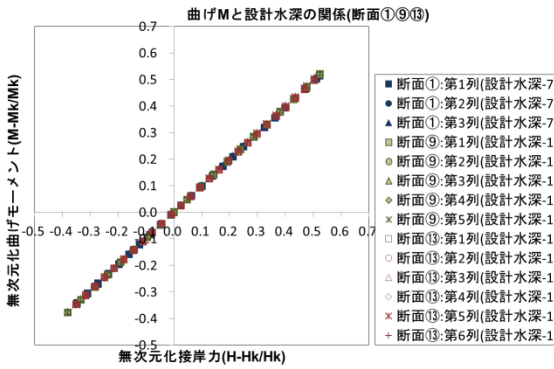


図-7　無次元化した捨石地盤反力係数の変化に対する曲げモーメントの推移(断面①②)

表-10　海底勾配が異なる断面における接岸力の変化に対する曲げモーメントの推移の比較

	非無次元化	無次元化
海底勾配		
杭列数		
設計水深		

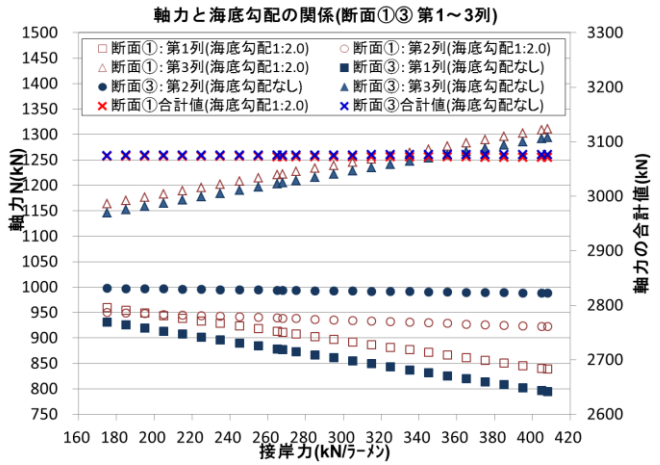
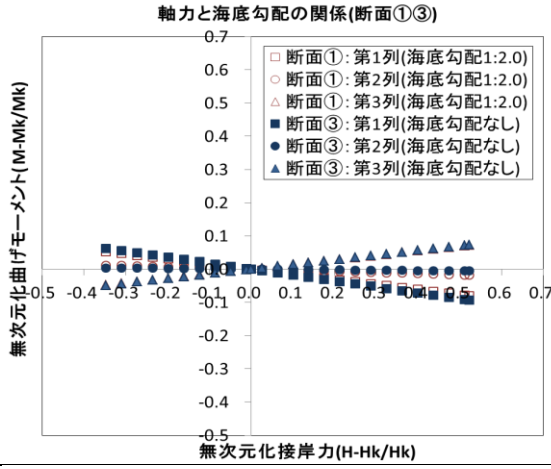
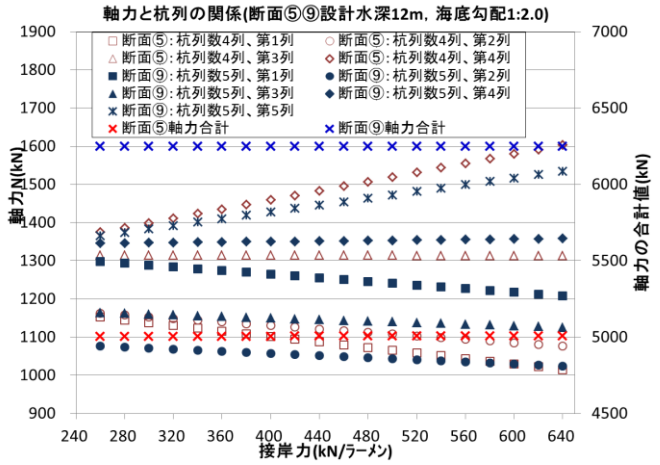
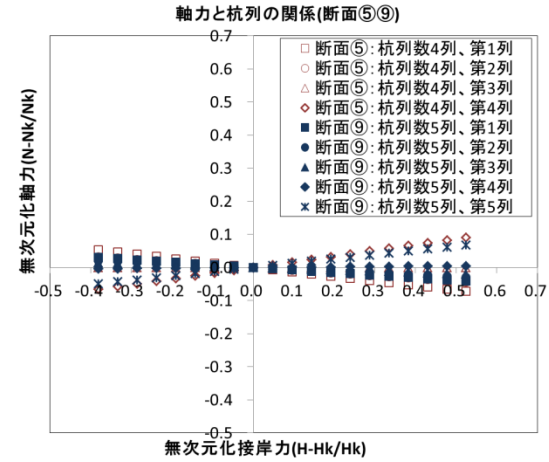
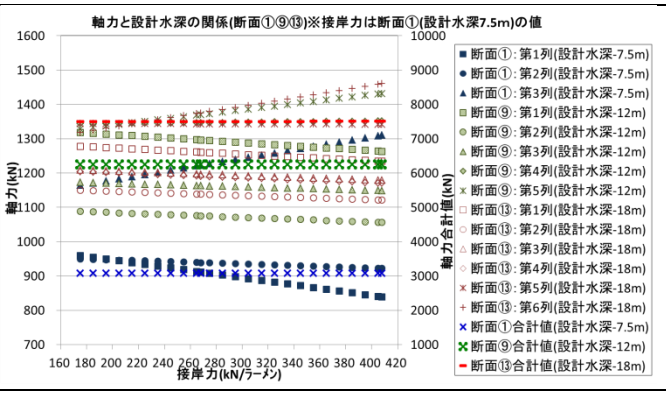
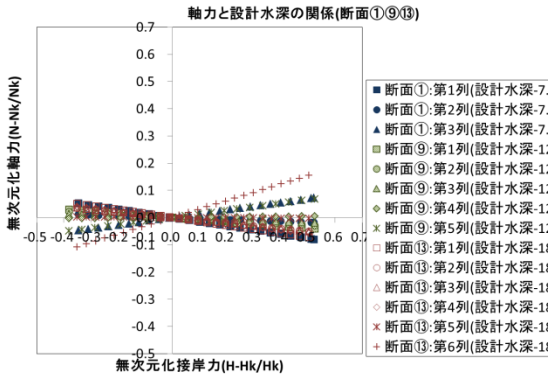
b) 軸力の推移

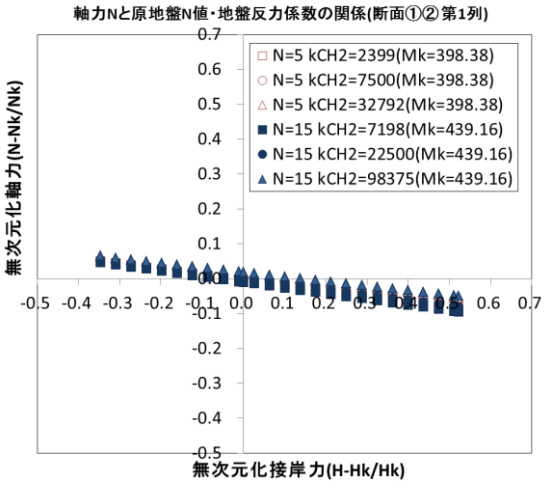
表-11に，入力を接岸力，出力を軸力とし，捨石基礎による海底勾配の有無，杭列数，設計水深が異なる断面における入出力の推移を一例ずつ示す．

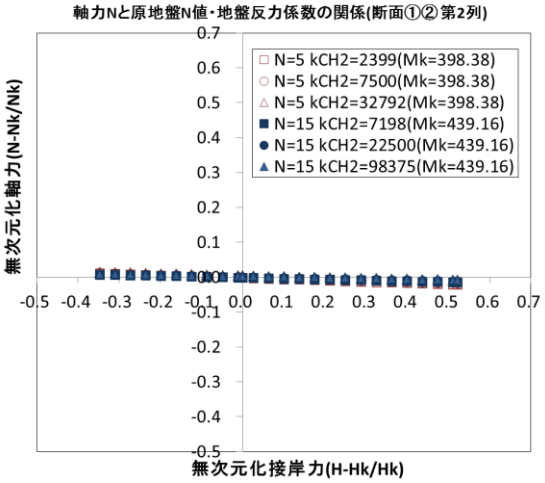
軸力については，設計条件に関わらず，接岸力の増加に対し，海側杭では軸力は漸減し，陸側杭では漸増する傾向がある．これは，接岸力の増加に伴い，海側杭では引抜き，陸側杭では押込みの作用が働くためである．しかしながら，軸力は接岸力に対する感度そのものが低く，接岸力が特性値に対し0.6倍～1.6倍程度まで増減しても，軸力の増減は基準値比で-10%～10%程度とほとんど変化しない．ただし，杭列数や設計水深が異なると，僅かながら感度に差が生じることが確認できる．

これは，地盤反力係数の変化についても同様である．図-8 に，異なる地盤反力係数を入力した際の，接岸力の変化に対する軸力の推移を示すが，地盤反力係数や接岸力の増減に関わらず，軸力はほぼ一定である．

表-11　接岸力の変化に対する軸力の推移

	非無次元化	無次元化
海底勾配		
杭列数		
設計水深		





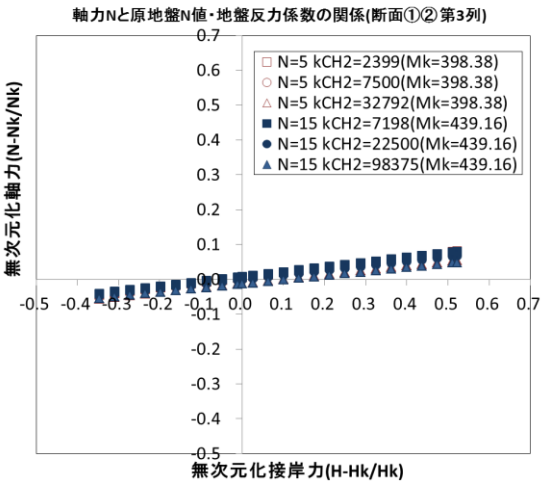


図-8　無次元化した軸力と原地盤Ｎ値，および地盤反力係数の関係（断面①②）

c) 比較結果の整理

比較結果を整理すると，各設計条件に対する近似式の感度は**表-12**，**表-13**に示すとおりとなる．

前述したとおり，海底勾配の有無により，地盤反力係数の増減に対する曲げモーメントの感度が杭列毎に異なっており，海側杭で感度が高くなる．ただし，原地盤や捨石の地盤反力係数が特性値の0.3～4.5倍程度まで変化しても，曲げモーメントの増減は基準値比-20%～10%程度に過ぎず，接岸力の変化に対する曲げモーメントの変化と比較すると非常に小さい．また，実際の設計において，横桟橋式係船岸の基礎捨石勾配は無勾配～1:1.5 程度であるため，本検討の勾配(無勾配，1:2.0)は，概ね基礎捨石の取り得る勾配を網羅していると判断できる．

軸力については，杭列数や設計水深が異なると，僅かながら感度に差が生じることが確認できるが，接岸力に対する感度そのものが低く，接岸力が増減しても，軸力はほとんど変化しない．また，地盤反力係数の変化に対しても，軸力の感度は非常に低く，ほぼ一定である．

以上より，接岸力と地盤反力係数を確率変数として評価することが可能であれば，海底勾配等の設計条件は断面毎に固定しても，信頼性解析の精度確保は可能と考えられる．また，本検討で設定した各検討断面により，横桟橋の接岸力に対する杭応力の照査について，ある程度網羅的な信頼性解析が可能であると判断できる．

表-12　各設計条件に対する近似式の感度（曲げモーメント）

設計条件	入力値	
	接岸力	地盤反力係数
原地盤Ｎ値	低	低
海底勾配の有無	低	海側杭が他列と比較して高い． ※ただし，接岸力と比較して僅少
杭列数	低	低
設計水深	低	低

表-13　各設計条件に対する近似式の感度（軸力）

設計条件	入力値	
	接岸力	地盤反力係数
原地盤のＮ値	低	低
海底勾配の有無	低	低
杭列数	低	低
設計水深	低	低

2.4. 接岸力の増加に対する性能照査値の変化

前節では，近似式の入出力を基準値により無次元化することで，ほとんどの断面および杭に対して，接岸力や地盤反力係数と，部材力とを一定の関係式で表せることが示された．

しかしながら，接岸力がどの程度増加すると，各設計断面の杭が降伏するかについては，前節の検討では整理していない．断面に関わらず接岸力と発生部材力の増減が一定であっても，接岸力の増加に対する各杭の安全率が断面毎に異なっていると，設計断面や杭毎に破壊確率が大きく変化することが考えられる．

したがって，本節では，接岸力がどの程度増加すると，各断面における杭の降伏応力に達するかについて整理する．これにより，どのような設計条件において，杭が接岸速度の増加に対し降伏しやすくなるか把握する．

(1)性能照査式

直杭式桟橋においては，杭に発生する応力に関する性能照査は以下の式により行う．なお，以降の式において，添え字 d，k はそれぞれ設計用値および特性値を示す．

$$\left.\begin{array}{l}\text{①軸方向力が引張の場合}\\ \quad \left(\sigma_{t_d}+\sigma_{bt_d}\right)\le\sigma_{ty_d} \quad \text{かつ}\\ \quad \left(-\sigma_{c_d}+\sigma_{bc_d}\right)\le\sigma_{by_d}\\ \\ \text{②軸方向力が圧縮の場合}\\ \quad \left(\sigma_{c_d}/\sigma_{cy_d}+\sigma_{bc_d}/\sigma_{by_d}\right)\le 1.0\end{array}\right\} \quad (2.4)$$

ここに，

σ_t，σ_c：断面に作用する軸方向引張力による引張応力度，及び軸方向圧縮力による圧縮応力度(N/mm^2)

σ_{bt}，σ_{bc}：断面に作用する曲げモーメントによる最大引張応力度，及び最大圧縮応力度(N/mm^2)

σ_{ty}，σ_{cy}：引張降伏応力度，及び弱軸に関する軸方向圧縮降伏応力度 (N/mm^2)

σ_{by}：曲げ圧縮降伏応力度 (N/mm^2)

式(2.4)中の設計用値は，式(2.5)により算出する．

$$\left.\begin{array}{l}\sigma_{t_d}=\frac{P_d}{A}\quad,\ \sigma_{c_d}=\frac{P_d}{A},\\ \\ \sigma_{bt_d}=\frac{M_d}{Z}\quad,\ \sigma_{bc_d}=\frac{M_d}{Z},\\ \\ \sigma_{ty_d}=\sigma_{ty_k}\quad,\ \sigma_{cy_d}=\sigma_{cy_k}\\ \\ \sigma_{by_d}=\sigma_{by_k}\end{array}\right\} \quad (2.5)$$

A：杭の断面積(mm^2)

P：杭の軸方向力(N)

Z：杭の断面係数(mm^3)

M：杭の曲げモーメント(N･mm)

本研究で設定した検討断面では，全ての杭において軸方向力が圧縮にかかる．このため，杭に発生する応力の性能照査式は以下のとおりである．

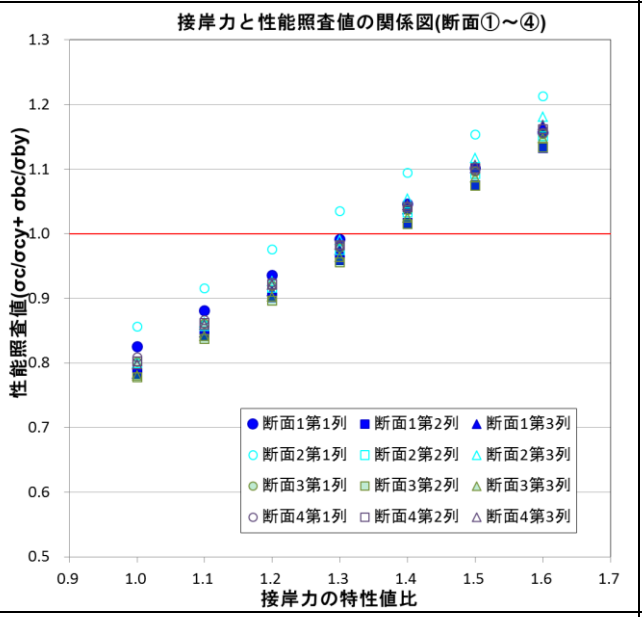
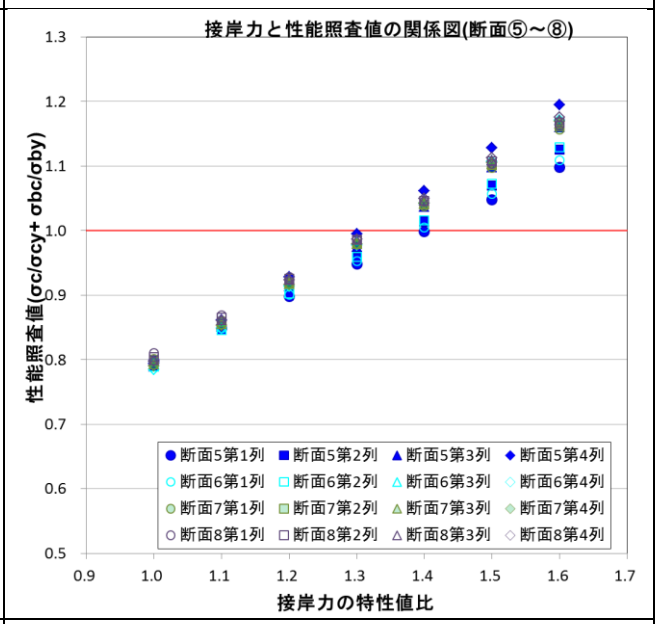
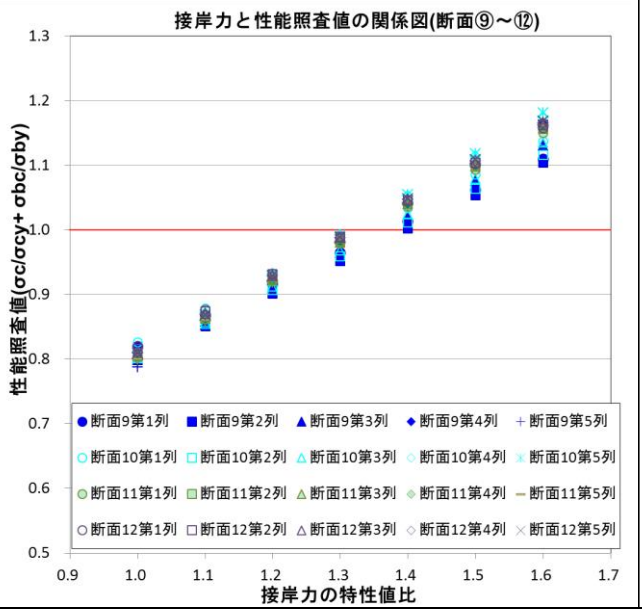
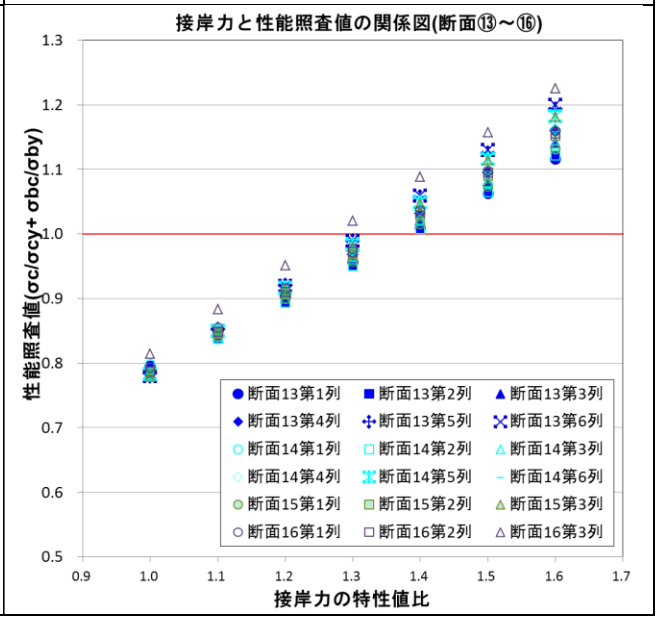
$$\left(\sigma_{c_d}/\sigma_{cy_d}+\sigma_{bc_d}/\sigma_{by_d}\right)\le 1.0 \qquad (2.6)$$

(2)接岸力と性能照査値の関係

接岸力と性能照査値の関係図を**表-14** に示す．この表内の各図は，接岸力を特性値から特性値の 1.6 倍まで変化させた際の性能照査値の推移を表したものであり，縦軸は性能照査値，横軸は入力した接岸力と接岸力特性値との比を示している．

表-14 より，ほぼ全ての杭において，接岸力が特性値の 1.3～1.4 倍程度となると，杭が降伏することがわかる．したがって，接岸力の増加に対し，各杭が有する余裕度は，設計断面に関わらず概ね同程度であると判断できる．また，杭毎に若干の差があるものの，接岸力の増加に対する性能照査値の傾きはほぼ一定であり，接岸力に対する性能照査値の感度も，設計断面に関わらず概ね同程度であると判断できる．

表-14　接岸力の変化に対する性能照査値($\sigma_c/\sigma_{cy}+\sigma_{bc}/\sigma_{by}$)の推移

断面	①～④	⑤～⑧
関係図		
断面	⑨～⑫	⑬～⑯
関係図		

(3) 曲げ圧縮応力度比と軸方向圧縮応力度比の変化

接岸速度に対する性能照査値の感度は，設計断面に関わらず概ね同程度であるが，各断面と杭毎に，接岸力の増加に対する性能照査値の傾きに若干の差がある．このため，**図-9** に示すように，性能照査値を曲げ圧縮応力度比と軸方向圧縮応力度比に分けて評価することで，接岸力の変化に対する両者の変化を比較した．

図-9 は，接岸力に対する曲げ圧縮応力度と曲げ圧縮降伏応力度の比($\sigma_{bcd}/\sigma_{byd}$)を横軸，軸方向圧縮応力度と軸方向圧縮降伏応力度の比(σ_{cd}/σ_{cyd})を縦軸とし，接岸力が特性値から特性値の 1.6 倍まで変化した際の，曲げ圧縮応力度比と軸方向圧縮応力度比の推移を示したものである．したがって，分布図における各点は性能照査値($\sigma_{bcd}/\sigma_{byd}$+ σ_{cd}/σ_{cy})を示しており，性能照査値が 1 を超過すると($\sigma_{bcd}/\sigma_{byd}$+ σ_{cd}/σ_{cyd}=1 の線の右上側に達すると)，杭は降伏に至ることとなる．

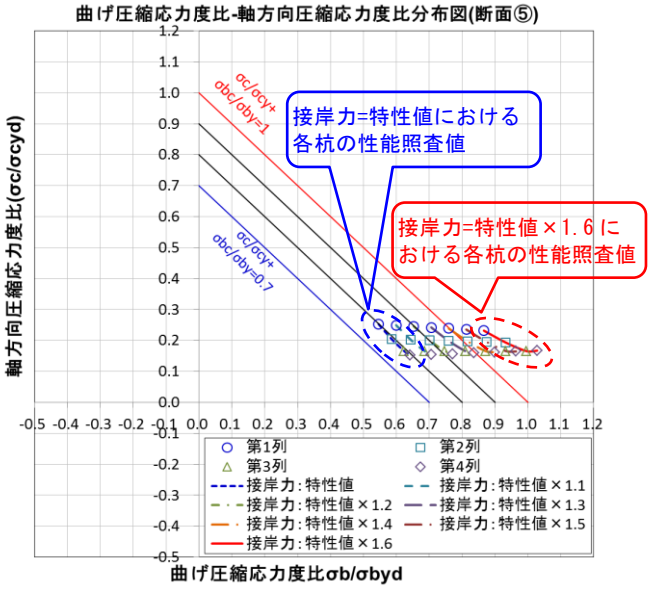


図-9 曲げ圧縮応力度比-軸方向圧縮応力度比分布図

a) 海底勾配の有無，杭列数，設計水深

表-15～表-17 に，海底勾配の有無，杭列数，設計水深の異なる断面の比較を一例ずつ示す．なお，全断面の分布図および詳細な検討は**附録 C** に記載するため，そちらを参照されたい．

ほぼ全ての断面や杭列において，接岸力が特性値の 1.3～1.4 倍程度となると，杭が降伏することは**表-14** に示したとおりであるが，接岸力の増加に対する軸方向圧縮降伏応力度比と曲げ圧縮降伏応力度比の推移を比較すると，主に曲げ圧縮降伏応力度比が増加し，軸方向圧縮応力度比はほとんど変化しないことがわかる．また，杭列毎の軸方向圧縮応力度比の推移を比較すると，接岸力の増加に対し，僅かながらであるが海側杭の軸方向圧縮応力度比は減少し，陸側杭は増加していくことがわかる．これは，接岸力の増加に従い，海側杭に作用する引抜力，陸側杭に作用する押込力が増加するためである．

なお，**表-15** に例示するように，性能照査値がほぼ同値であっても，曲げ圧縮応力度比や軸方向圧縮応力度比は，断面や杭列により異なっている．

表-15 海底勾配が異なる断面における曲げ圧縮応力度比・軸方向圧縮応力度比分布図の比較

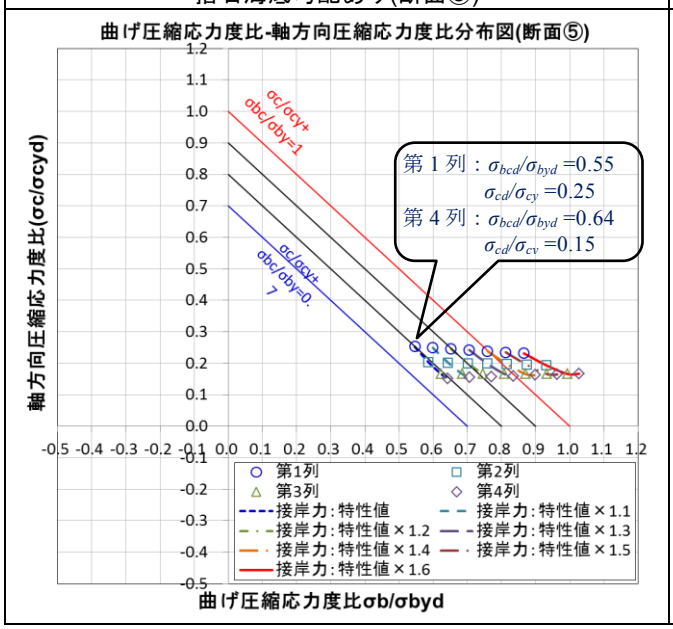
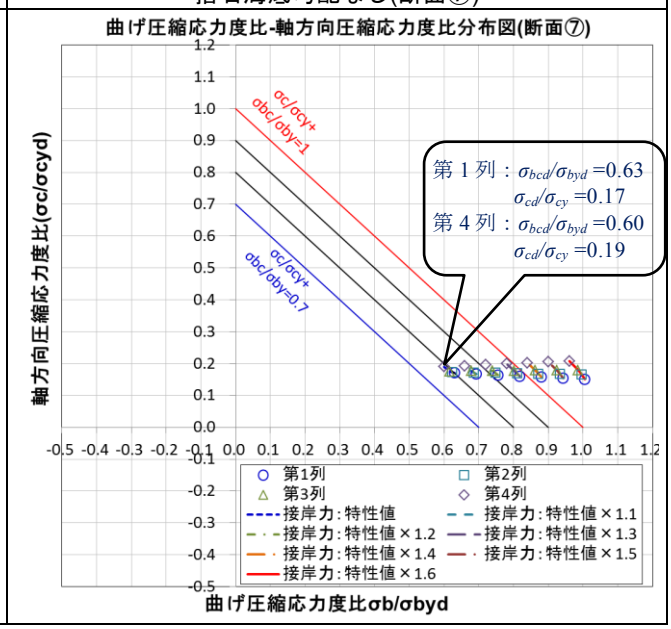
捨石海底勾配あり(断面⑤)	捨石海底勾配なし(断面⑦)
	

表-16　杭列数が異なる断面における曲げ圧縮応力度比・軸方向圧縮応力度比分布図の比較

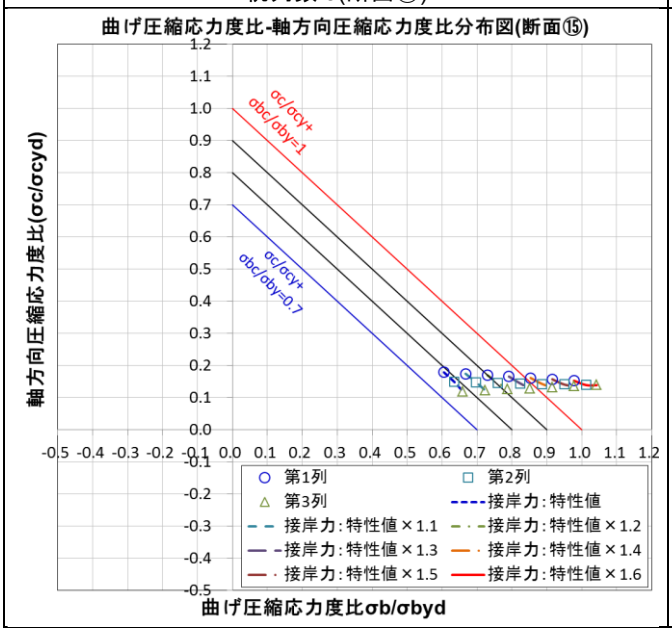
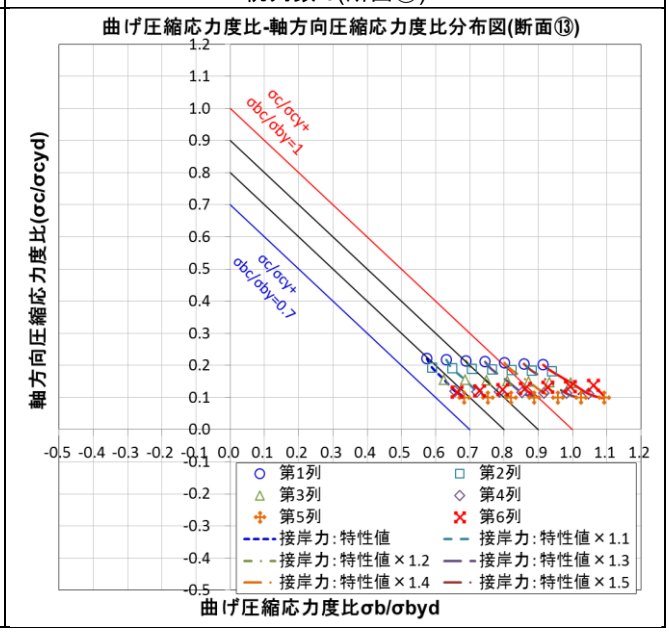
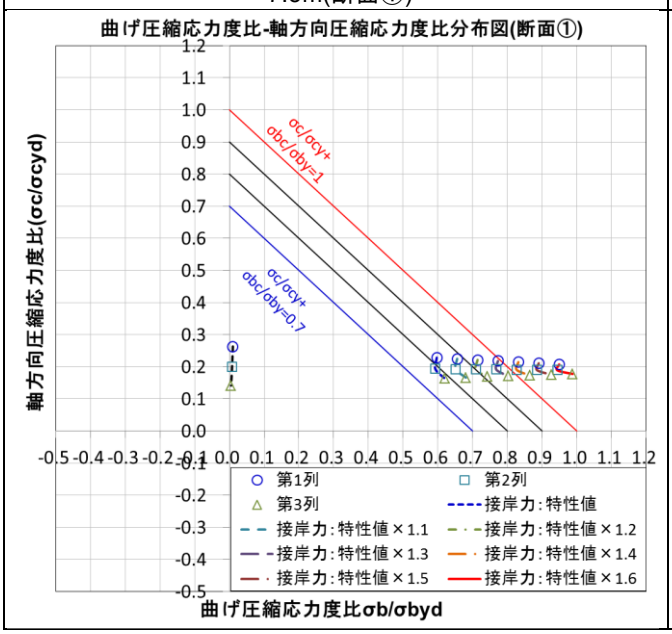
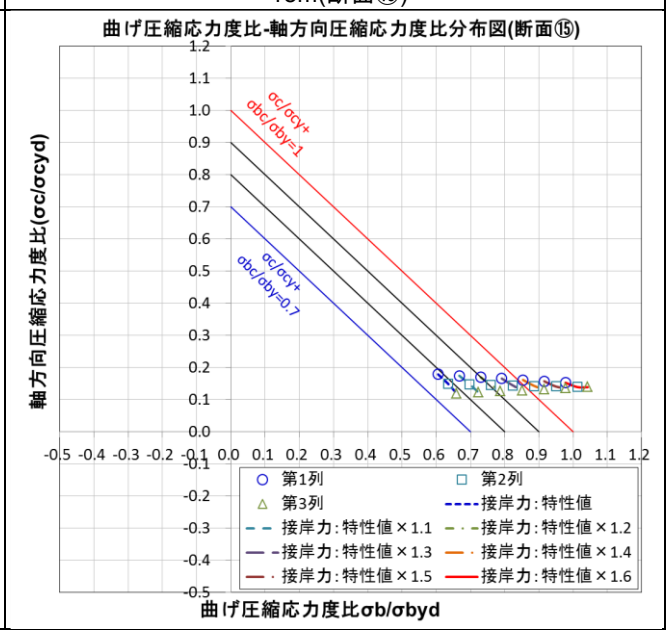
杭列数 3(断面⑮)	杭列数 6(断面⑬)
	

表-17　設計水深が異なる断面における曲げ圧縮応力度比・軸方向圧縮応力度比分布図の比較

-7.5m(断面①)	-18m(断面⑮)
	

b) 原地盤の地盤反力係数

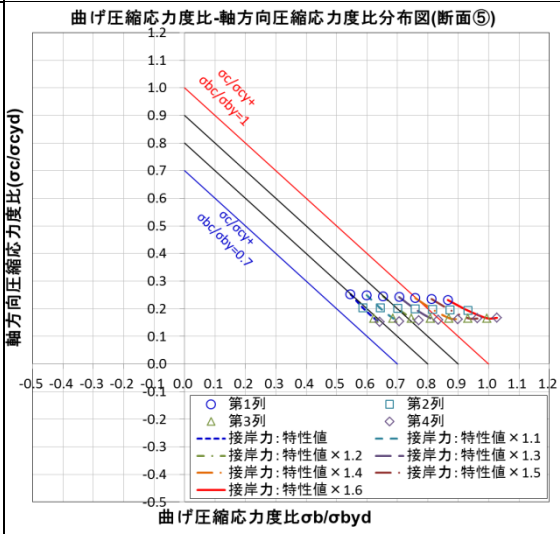
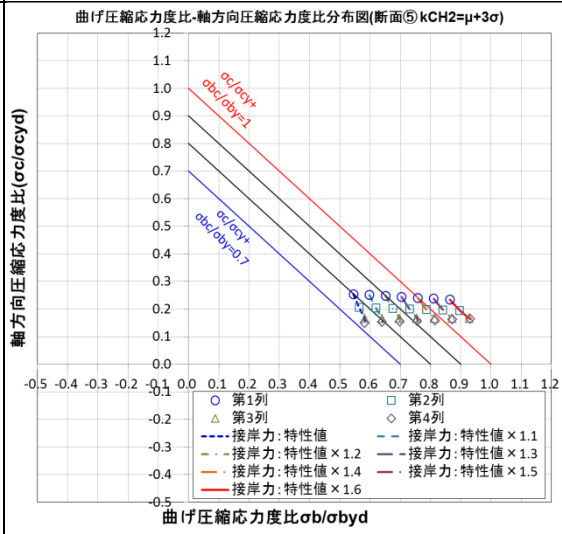
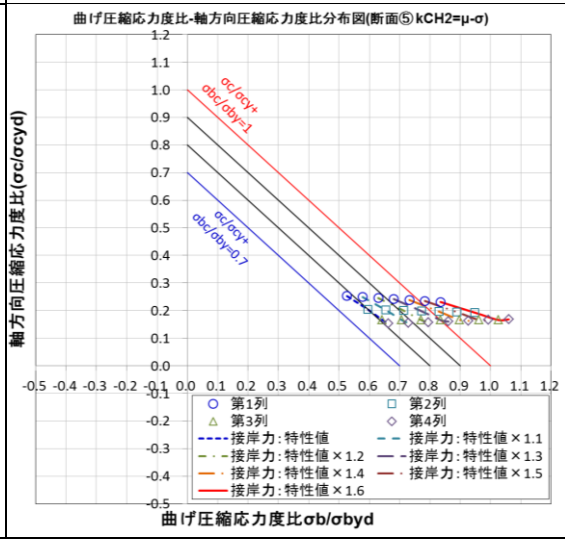
断面⑤を例に，原地盤の地盤反力係数を**表-4** に示した特性値 X，および μ-σ，μ+3σ とした際の，曲げ圧縮応力度比-軸方向圧縮応力度比分布図を**表-18** に示す．

表-18 より，原地盤の地盤反力係数を μ-σ と特性値 X より小さい値にすると，接岸力の変化に対し曲げ圧縮応力度比が増加しやすくなることがわかる．特に，陸側杭は原地盤の地盤反力係数の変化に対する性能照査値の感度が高く，より小さな接岸力でも杭が降伏する．

また，原地盤の地盤反力係数を μ+3σ と特性値 X より大きい値にすると，接岸力の変化に対し，特に陸側杭の性能照査値が増加しにくくなる．一方で，海側杭については，地盤反力係数が特性値と異なる値をとっても，性能照査値にはほとんど影響していない．

すなわち，原地盤の地盤反力係数が特性値と異なる値であると，その影響は陸側に近い杭ほど顕著に表れるといえる．これは，各検討断面において，陸側杭が海側杭より剛性が高いことや，捨石基礎を有する断面では，陸側杭ほど捨石層に埋まっている杭長が長いことに起因すると考えられる．

表-18　接岸力および原地盤反力係数を変化させた際の曲げ圧縮・軸方向圧縮応力度比分布図（断面⑤）

原地盤の地盤反力係数	X	μ+3σ
関係図		
原地盤の地盤反力係数	μ-σ	
関係図		

3. 確率変数の整理

3.1. 本検討における確率変数

現行港湾基準における確率変数および確率変数の従う確率分布を**表-19**に示し，本検討で再設定した値を**表-20**に示す．なお，現行港湾基準における確率変数の設定過程は，**附録D**に詳述する．また，水平力(船舶接岸時においては防舷材反力)の確率分布については，**表-21**に示す船舶に係る各確率変数より設定する．すなわち，信頼性解析においては，船舶に係る各確率変数を基に接岸力を変化させ，その接岸力から防舷材反力を算出することで，水平力の確率分布を設定する．

なお，**表-21**中の各式は，以下のとおりである．

接岸速度 V の中央値　V=0.563DW $T^{-0.260}$　(3.1)

仮想質量係数 C_m の特性値

$$c_{mk} = 1 + \frac{\pi}{2C_b}\frac{d}{B} \quad (3.2)$$

$$c_b = \nabla / L_{pp} B d \quad (3.3)$$

偏心係数 C_e の特性値　$c_{ek} = 1/\{1 + (l/r)^2\}$　(3.4)

仮想質量係数 C_m の平均値　C_m = -3.403×10^{-7} DWT + 1.776　(3.5)

偏心係数 C_e の平均値　C_e = 1.840×10^{-7} DWT + 0.616　(3.6)

ここに，

Cb：ブロック係数
∇：船舶の排水体積(m^3)　※$\nabla = DT/\rho$
Lpp：垂線間長
B：型幅(m)
d：満載喫水(m)
ρ：海水の単位体積質量 (t/m^3) (=1.03)
l：船舶の接触点から係留施設の法線に平行に測った当該船舶の重心までの距離(m)
r：船舶の重心を通る鉛直軸回りの回転半径(m)

表-19　確率変数の従う確率分布の一覧（現行港湾基準）

確率変数	平均値の偏り μ/X_k	変動係数 V	分布形	備考
水平力 P_H	0.870	0.25	対数正規	防舷材反力 牽引力 クレーン水平力
地盤反力係数 k_{CH}(kN/m^3)	1.333	0.76	対数正規	
鋼材降伏強度 σ_y(N/mm^2)	1.260	0.08	正規	

表-20　確率変数および確率変数の従う確率分布の一覧（本検討）

確率変数		特性値 X	平均値の偏り μ/X_k	変動係数 V	分布形	出典
地盤反力係数 k_{CH} (kN/m^3)	砂層 N=5	7,500	1.333	0.76	対数正規	構造工学論文集『桟橋式係船岸のレベル１地震動に対する信頼性設計法』(長尾ら[4]) 土木学会第59回年次学術講演会『N値からの杭の水平地盤反力係数の統計的評価』(菊池ら[5])
	砂層 N=15	22,500				
	捨石層	3,500				
船舶の排水トン数(DT)		**表-21** 参照				
接岸速度 V(m/s)						
仮想質量係数 C_m						
偏心係数 C_e						
鋼材降伏強度 σ_y(N/mm^2)		235	1.20	0.09	正規	土木研究所資料 第4090号『鋼材料・鋼部材の強度等に関する統計データの調査』(村越ら[6])

表-21　船舶に係る確率分布の一覧（本検討・貨物船の確率分布）

確率変数			特性値 X		平均値 μ または中央値 Me		標準偏差 σ	分布形	出典
船舶の排水トン数 DT(t)	-7.5m (5,000(DWT))		1.174DWT =5,870(DT)		1.139DWT =5,695(DT)		0.052DWT =260	正規	港空技研資料 No.1115『防衝工の信頼性設計法における部分係数の提案』(米山ら[7])
	-12.0m (30,000(DWT))		1.174DWT =35,220(DT)		1.139DWT =34,170(DT)		0.052DWT =1560		
	-18.0m (120,000(DWT))		1.174DWT =140,880(DT)		1.139DWT =136,680(DT)		0.052DWT =6240		
接岸速度 V(m/s)	関係式使用時	-7.5m	0.10 (m/s)		0.061 (m/s)	式(3.1) ※中央値	0.034	対数正規	国総研資料No.864『船舶の接岸速度の特性に関する基礎的分析』(村上ら[8])
		-12.0m			0.039 (m/s)		0.022		
		-18.0m			0.027 (m/s)		0.015		
仮想質量係数 C_m	-7.5m		2.118	式(3.2)	1.77	式(3.5)	0.105	正規	港空技研資料 No.1115『防衝工の信頼性設計法における部分係数の提案』(米山ら[7])
	-12.0m		1.866		1.77				
	-18.0m		1.816		1.74				
偏心係数 C_e	-7.5m		0.665	式(3.4)	0.62	式(3.6)	0.023	正規	港空技研資料 No.1115『防衝工の信頼性設計法における部分係数の提案』(米山ら[7])
	-12.0m		0.660		0.62				
	-18.0m		0.663		0.64				

3.2. 水平地盤反力係数の確率変数

水平地盤反力係数の平均値の偏りや変動係数は，以下の検討を踏まえて現行港湾基準と同値とした．なお，現行港湾基準におけるこれらの値は，長尾ら[4]から求められているが，長尾ら[4]は菊池ら[5]よりこれらの値を設定している．

(1) 平均値の偏り

平均値の偏りについては，長尾ら[4]が**表-22** に示す確率変数を設定しており，平均値の偏りは 2000/1500=1.333 である．なお，平均値(kh=2000N)は，横山の関係図(**図-10**)に依り，特性値(kh=1500N)は**図-10** の下限値と平均値の中間である．いずれも平成 11 年度港湾基準において，既に採用されている．

表-22 確率分布一覧

確率変数	平均値	特性値	変動係数	分布形
鋼材降伏強度(SKK400)	296	235	0.08	正規
水平地盤反力係数	2000N	1500N	0.76 (N=5) 0.77 (N=10)	対数正規
震度(B 級)	1.000	平均値	0.20	対数正規
震度(A 級)	0.833	平均値	0.20	対数正規
震度(特定)	0.667	平均値	0.20	対数正規

注：鋼材降伏強度は N/mm², 水平地盤反力係数は kN/m³

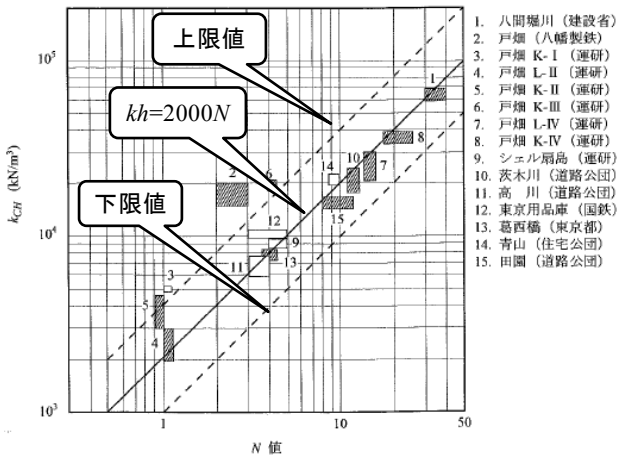
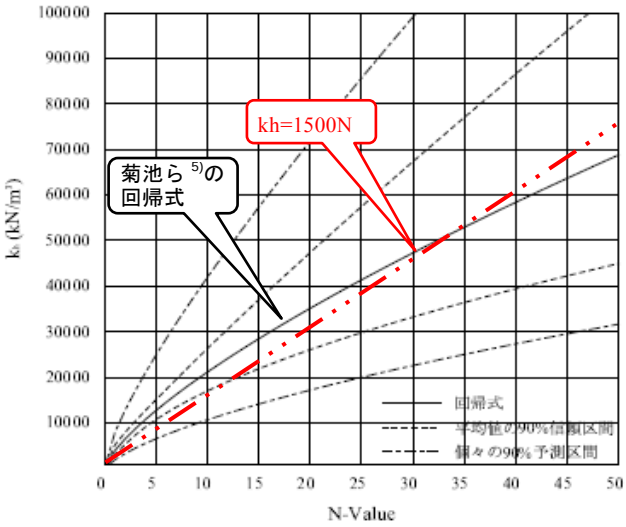


図-10 横山の関係図

一方で，菊池ら[5]は，**表-22** の水平地盤反力係数の平均値では，変動係数が非常に大きく不経済な断面となることから，より変動係数の小さい回帰式を提案している．ただし，この回帰式では杭の単位幅あたりの断面剛性や地表面変位量が変数として含まれ，N 値のみからの推定と比較すると複雑な計算式となる．**図-11** に菊池ら[5]による地盤反力係数の回帰分析結果に kh=1500N を示す線を加筆した図を示すが，各 N 値における水平地盤反力係数は**表-23** のとおりであり，N=5～25 においては，回帰式と 1500N との kh の比は 1.6～1.12 程度である．したがって，平均値の偏り 1.333 は，これらの平均的な値であるといえるが，変動係数が大きくなることが伺える．



※kh=1500N を示す線は加筆したもの

図-11 kh と N 値の回帰分析結果

表-23 回帰式[5]と特性値の比較

N 値	回帰式 kh	kh=1500N	比
5	12000	7500	1.6
10	21000	15000	1.4
15	28000	22500	1.244
20	35000	30000	1.167
25	42000	37500	1.12

(2) 変動係数

変動係数については**表-22** に示すとおりであり，N 値により変動するものとしている．これは，菊池ら[5]の回帰分析により，地盤反力係数の変動係数は δ=0.754(N=4)を極小値とし，N 値の増減に伴い変動係数が増加することが示されているためである．

ところで，菊池ら[5]は，地盤反力係数の変動係数が原地盤の N 値により変化することを示しているが，現行港湾基準では，変動係数を 0.76 で固定している．これは，原地盤 N 値が N=5 であるときの変動係数である．本検討においては，現行港湾基準に合わせ，地盤反力係数の変動係数は 0.76 とする．

3.3. 船舶に係る確率変数

(1)船舶質量

船舶質量の特性値，平均値，標準偏差は，米山ら[7]より設定する．同資料では，防衝工のレベル 1 信頼性設計法において，船種に対応した防衝工の性能照査式の部分係数を設定するため，船種・船型ごとに船舶質量と接岸速度との関係を整理している．

このなかで，貨物船の船舶載貨重量トン数(DWT)と，船舶質量(DT)の平均的な関係式として，以下を示している．

平均値：$\mu_{\mathrm{DT}} = 1.139DWT$ (3.7)

標準偏差：$\sigma_{\mathrm{DT}} = 0.052DWT$ (3.8)

また，現行港湾基準において，船舶質量の確率分布において，超過確率が 25%(カバー率 75%)となる回帰式として以下が示されている．

特性値：$DT_k = 1.174DWT$ (3.9)

したがって，本検討断面における船舶質量の平均値，特性値，標準偏差は以下のとおりである．

表-24 船舶質量の確率分布

設計水深	特性値 X(DT)	平均値 μ(DT)	平均値の偏り	標準偏差 σ	変動係数
-7.5m (5,000DWT)	5,870	5,695	1.03	260	0.046
-12.0m (30,000DWT)	35,220	34,170	1.03	1560	0.046
-18.0m (120,000DWT)	140,880	136,680	1.03	6240	0.046

(2)接岸速度

船舶接岸速度の従う確率分布は，村上ら[8]の提案した船舶質量との関係式に従うものとした．同資料は，国内における既往の接岸速度の実測データや設計接岸速度の設定事例を収集・再整理し，船舶の接岸速度を船種と船型により統計処理することで，接岸速度の信頼性水準値を評価し，接岸速度と船型の関係式を提案したものである．

a) 平均値の偏り

村上ら[8]は，各船種における船舶質量と接岸速度の関係式を示している．村上ら[2]は，貨物船の接岸を想定して検討断面を設定していることから，本稿においても接岸速度の従う確率分布は貨物船のものを設定する．なお，貨物船におけるカバー率別の接岸速度と船型の関係図を**図-12** に示す．

したがって，船舶質量と接岸速度の関係式は，以下のとおりである．

・カバー率 50%

$$V = 0.563X^{-0.260} \quad (3.10)$$

・カバー率 99%

$$V = 0.563e^{1.214}X^{-0.260} \quad (3.11)$$

ここに，

V：接岸速度(m/s)

X：船舶質量(DWT)

接岸速度の中央値は，カバー率 50%での回帰式(3.10)の接岸速度の算出結果であり，**表-25** に示すとおりとなる．なお，本検討における接岸速度の特性値は設計水深に関わらず 0.1m/s としているため，設計水深が大きくなるほど，接岸速度の中央値と特性値との差が大きくなる．

表-25 接岸速度の平均値と偏り

設計水深と船舶質量	中央値(m/s)
-7.5m(5,000DWT)	0.0614
-12.0m(30,000DWT)	0.0386
-18.0m(120,000DWT)	0.0269

ところで，村上ら[8]は，接岸速度が対数正規分布に従うと仮定し，回帰式(3.10)，(3.11)の両辺を自然対数化することで，以下の直線回帰式を得ている．

・カバー率 50%

$$\ln(V) = \ln(0.563) - 0.260\ln X \quad (3.12)$$

・カバー率 99%

$$\ln(V) = (\ln(0.563) - 0.260\ln X) + 1.214 \quad (3.13)$$

自然対数化された接岸速度は，対数軸上において正規分布に従うため，信頼性解析における確率変数としては，接岸速度の分布形は対数正規とすることが適切である．すなわち，信頼性解析においては，接岸速度の対数値を確率変数として変動させ，各々の接岸速度対数値を接岸速度に変換することで，接岸エネルギーや接岸力の変動を設定する．

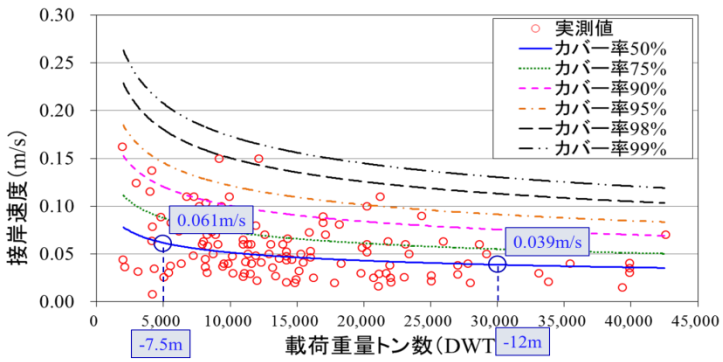


図-12 カバー率別の接岸速度と船型の関係（貨物船）

b) 標準偏差

標準偏差については，回帰直線まわりの標準偏差を ξ とすると，式(3.14)より算出できる．

$$\xi = \sqrt{\frac{n}{n-2}\left(\sigma_v{}^2 - \frac{\sigma_{xv}{}^2}{\sigma_x{}^2}\right)} \qquad (3.14)$$

ここに

σ_x^2 ：変数x（＝ln$X$）の分散

σ_v^2 ：変数v（＝ln$V$）の分散

σ_{xv} ：変数x,vの共分散

n ：データ数

なお，村上ら[8]は，貨物船における回帰直線まわりの標準偏差を ξ≒0.522 としている．したがって，本検討における接岸速度の分布形は(3.12)に従い，その標準偏差は ξ≒0.522 とする．

(4) 仮想質量係数

船舶の仮想質量係数の特性値は，現行港湾基準より下式により算出する．

$$C_{mk} = 1 + \frac{\pi}{2C_b}\frac{d}{B} \qquad (3.15)$$

$$C_b = \nabla / L_{pp}Bd \qquad (3.16)$$

ここに，

Cb：ブロック係数

∇：船舶の排水体積(m^3)　※$\nabla = DT/\rho$

Lpp：垂線間長

B：型幅(m)

d：満載喫水(m)

DT：船舶質量 (t)

ρ：海水の単位体積質量 (t/m^3) (=1.03)

米山ら[7]は，船舶諸元より仮想質量係数を求め，統計解析により載荷荷重トン数(DWT)または総トン数(GT)と仮想質量係数の線形回帰式を求めている．貨物船の場合の回帰式は，以下のとおりである．

平均値：C_m = -3.403×10^{-7} DWT + 1.776　(3.17)

標準偏差：σ = 0.105　(3.18)

したがって，本検討断面における仮想質量係数の平均値，特性値，標準偏差は以下のとおりである．

表-26 船舶の仮想質量係数の確率分布

設計水深と船舶質量	特性値	平均値	標準偏差
-7.5m(5,000DWT)	2.118	1.77	0.105
-12.0m(30,000DWT)	1.866	1.77	0.105
-18.0m(120,000DWT)	1.816	1.74	0.105

(5) 偏心係数

船舶の偏心係数の特性値は，仮想質量係数と同様に，現行港湾基準より式(3.19)により算出する．また，平均値および標準偏差は，米山ら[7]より，(3.20)，(3.21)のように設定する．

特性値：$C_{ek} = 1/\{1 + (l/r)^2\}$　(3.19)

平均値：C_e = 1.840×10^{-7} DWT + 0.616　(3.20)

標準偏差：σ = 0.023　(3.21)

ここに，

l：船舶の接触点から係留施設の法線に平行に測った当該船舶の重心までの距離(m)

r：船舶の重心を通る鉛直軸回りの回転半径(m)

したがって，本検討断面における偏心係数の平均値，特性値，標準偏差は以下のとおりである．

表-27 船舶の偏心係数の確率分布

設計水深と船舶質量	特性値	平均値	標準偏差
-7.5m(5,000DWT)	0.665	0.62	0.023
-12.0m(30,000DWT)	0.660	0.62	0.023
-18.0m(120,000DWT)	0.663	0.64	0.023

3.4. 鋼材降伏強度の確率変数

鋼材降伏強度の確率変数については，村越ら[6)]の鋼種板厚分類別確率分布表(**表-29**)から設定する．本検討では SM 材の確率分布を用いるが，ここでは各鋼種における平均値の偏りの最小値，変動係数の最大値を，鋼材降伏強度の確率分布として設定した．すなわち，本稿における鋼材降伏強度の確率分布は**表-28** に示すとおりとする．

なお，桟橋鋼管杭の鋼材は，一般的には SKK400 もしくは SKK490 であるが，本稿においては，全ての検討断面において SKK400 を用いるものとし，鋼材降伏強度の規格下限値を特性値として検討断面を設定する．

表-28　鋼材降伏強度の確率分布

特性値 X	平均値の偏り μ/X_k	変動係数 V
235	1.20	0.09

表-29　鋼材降伏強度の鋼種板厚分類別確率分布[6)]

No.	鋼種	板厚 区分	板厚 範囲(mm)	規格下限値 [N/mm2]	分類別の統計値特性調査結果 N：データ数 μ：平均値 σ：標準偏差 V：変動係数 鋼種及び板厚区分分類		JIS規格下限値分類		鋼種	
1	SS400 SM400	Ⅰ	6≦t≦12	245	N=16236	μ=1.27 σ=0.12 V=0.09	N=22483	μ=1.25 σ=0.11 V=0.09	N=31579	μ=1.25 σ=0.10 V=0.08
2	SS400 SM400	Ⅱ	12<t≦16		N=6247	μ=1.19 σ=0.08 V=0.07				
3	SS400 SM400	Ⅲ	16<t≦25	235	N=6207	μ=1.26 σ=0.08 V=0.06	N=9096	μ=1.25 σ=0.08 V=0.06		
4	SS400 SM400	Ⅳ	25<t≦32		N=1827	μ=1.24 σ=0.08 V=0.06				
5	SS400 SM400	Ⅴ	32<t≦40		N=1062	μ=1.22 σ=0.06 V=0.05				
6	SS400 SM400	Ⅵ	40<t≦100	215	データ無し					
7	SM490	Ⅰ	6≦t≦12	325	N=618	μ=1.26 σ=0.11 V=0.09	N=1010	μ=1.25 σ=0.11 V=0.09	N=2448	μ=1.26 σ=0.11 V=0.09
8	SM490	Ⅱ	12<t≦16		N=392	μ=1.24 σ=0.10 V=0.08				
9	SM490	Ⅲ	16<t≦25	315	N=686	μ=1.25 σ=0.10 V=0.08	N=1040	μ=1.25 σ=0.10 V=0.08		
10	SM490	Ⅳ	25<t≦32		N=219	μ=1.24 σ=0.09 V=0.07				
11	SM490	Ⅴ	32<t≦40		N=135	μ=1.23 σ=0.10 V=0.08				
12	SM490	Ⅵ	40<t≦100	295	N=398	μ=1.32 σ=0.10 V=0.08	N=398	μ=1.32 σ=0.10 V=0.08		
13	SM490Y	Ⅰ	6≦t≦12	365	N=6650	μ=1.20 σ=0.09 V=0.08	N=13559	μ=1.20 σ=0.08 V=0.07	N=30013	μ=1.20 σ=0.08 V=0.07
14	SM490Y	Ⅱ	12<t≦16		N=6909	μ=1.19 σ=0.08 V=0.07				
15	SM490Y	Ⅲ	16<t≦25	355	N=7693	μ=1.20 σ=0.07 V=0.06	N=14915	μ=1.19 σ=0.07 V=0.06		
16	SM490Y	Ⅳ	25<t≦32		N=3898	μ=1.18 σ=0.07 V=0.06				
17	SM490Y	Ⅴ	32<t≦40		N=3324	μ=1.18 σ=0.06 V=0.05				
18	SM520	Ⅵ	40<t≦100	335, 325	N=1539	μ=1.23 σ=0.11 V=0.09	N=1539	μ=1.23 σ=0.11 V=0.09		
19	SM570	Ⅰ	6≦t≦12	460	N=403	μ=1.29 σ=0.07 V=0.05	N=1489	μ=1.28 σ=0.07 V=0.05	N=9449	μ=1.22 σ=0.08 V=0.07
20	SM570	Ⅱ	12<t≦16		N=1086	μ=1.28 σ=0.06 V=0.05				
21	SM570	Ⅲ	16<t≦25	450	N=2287	μ=1.25 σ=0.08 V=0.06	N=5465	μ=1.22 σ=0.08 V=0.06		
22	SM570	Ⅳ	25<t≦32		N=1633	μ=1.20 σ=0.07 V=0.06				
23	SM570	Ⅴ	32<t≦40		N=1545	μ=1.19 σ=0.06 V=0.05				
24	SM570	Ⅵ	40<t≦100	430, 420	N=2495	μ=1.19 σ=0.08 V=0.07	N=2495	μ=1.19 σ=0.08 V=0.07		

※上表は村越ら[6)]から書き起こしたもの

4. モデル防舷材の設定

4.1. モデル防舷材設定の経緯

前章では，船舶接岸時における直杭式横桟橋の杭の応力照査にかかる確率変数および確率変数の従う確率分布を再設定した．

一方で，桟橋に作用する接岸力は，船舶より与えられる接岸エネルギーに加え，防舷材の性能や設置数等を考慮して設定される(**図-13**).

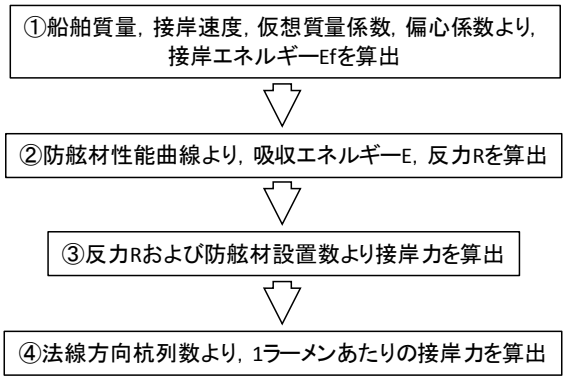


図-13　接岸力の算出過程

信頼性解析においては，船舶に係る各確率変数を変動させるため，接岸エネルギーが変動する．しかしながら，接岸エネルギーの変動に対する防舷材の反力特性は，防舷材のゴム質や形状，寸法により異なるため，接岸エネルギーの従う確率分布が同一であっても，使用する防舷材により接岸力の確率分布は全く異なるものとなる．したがって，本章では信頼性解析に適用する防舷材の性能を設定する．また，防舷材の性能設定にあたっては，信頼性解析の簡素化を図るため，国内に流通する各防舷材の性能を整理し，各々の防舷材の性能の差異を踏まえた性能曲線をモデル化する．

4.2. 接岸力の特性値の設定

一般的な座屈型ゴム防舷材の性能曲線の模式図を**図-14** に示すが，防舷材の反力は圧縮変形がある程度進むと横ばいであり，さらに変形が進むと再び漸増傾向である性質を持つ．これに対し，圧縮変位に対する吸収エネルギーの関係は，ほぼ一貫して漸増傾向である．

通常，防舷材の設計では，接岸エネルギーと防舷材製造者が公表する1基当たりの吸収エネルギーの性能値（以下，「公表値」とする）を比較し，吸収エネルギーの公表値が接岸エネルギーを上回ることを確認する．また，船舶が複数の防舷材に接触するよう接岸する場合は，接岸エネルギーをそれぞれの防舷材で分担して吸収することになるが，

例えば**図-14**をみると，吸収するエネルギーが公表値の半分になっても反力は大きく変わらない．そのため，複数の防舷材からの反力に対する安定性を検討する場合，対象の防舷材全てに公表値と同じ反力を想定して照査が行われる．本稿は岸壁法線に対して船舶が水平に接岸することを想定し，上部工1ブロックの全ての防舷材で接岸力が生じるものとする．よって，防舷材3基からの反力を法線平行方向5列（フレーム）の杭列で分担する(**図-15**)．なお，一般的に，防舷材はその性能に対して±10%の公差を有するとされており，設計に用いられる吸収エネルギーは公表値の90%，反力は110%とされることが多い．

本稿においては，杭応力に関する近似式を村上ら[2)]に依ることから，検討断面および使用防舷材も村上ら[2)]と同一とする必要がある．これより，接岸力の特性値や使用防舷材は**表-30**のとおり設定した．なお，**表-30**の断面モデルの番号は，**表-2**，および**図-3**に示した各検討断面のモデル番号である．

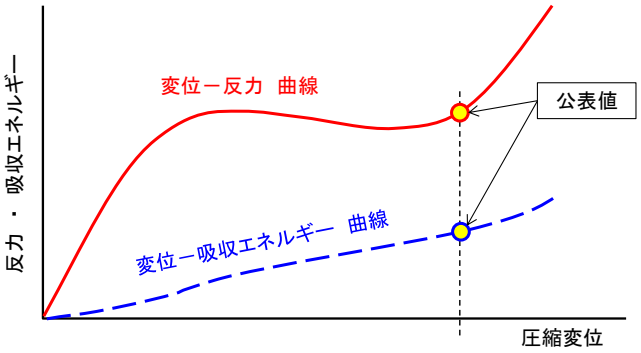


図-14 ゴム防舷材の性能曲線

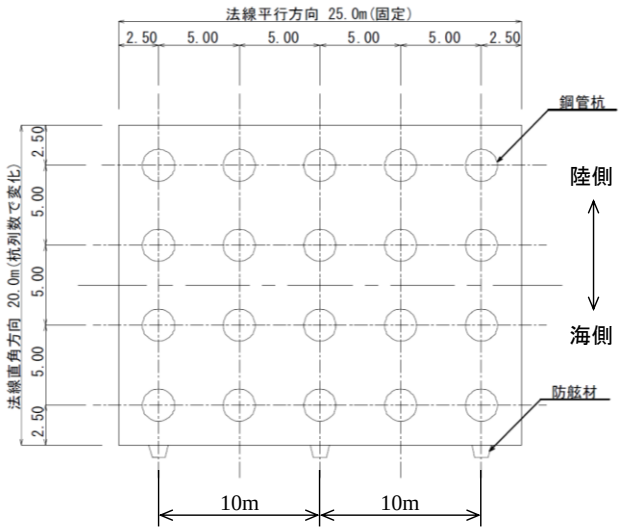
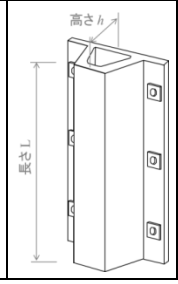
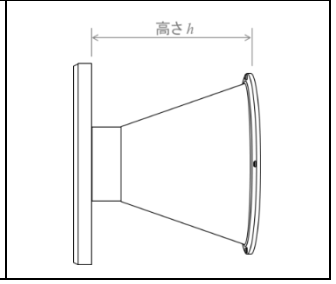


図-15 上部工形状（例：断面モデル⑤,⑥,⑦,⑧）

表-30 接岸力の特性値

断面モデル	①～④	⑤～⑫	⑬～⑯
設計水深(-m)	7.5	12.0	18.0
船型(DWT)	5,000	30,000	120,000
接岸力 (kN/ﾌﾞﾛｯｸ)	1339.8	2098.8	4389.0
接岸力 (kN/rﾗｰﾒﾝ)	268.0	419.8	877.8
使用防舷材	高性能Ｖ型 h:400mm L:1500mm	中空円錐台形型 h:900mm	中空円錐台形型 h:1300mm
使用防舷材の形状			

4.3. 既存防舷材の整理

モデル防舷材の性能は，国内主要製造者の防舷材に対し，平均的な性能を持つことが望ましいと考えられる．このため，**表-30** で図示した形式の既存防舷材の有する設計圧縮率や吸収エネルギー，反力等を整理する．

(1) 高性能Ｖ型

a) 圧縮率公表値

高性能Ｖ型防舷材の設計圧縮率，限界圧縮率を**表-31** に示す．なお，設計圧縮率は，防舷材の吸収エネルギーや反力の公表値となる圧縮率を指している．また，限界圧縮率は，防舷材が取り得る最大の吸収エネルギーにおける圧縮率に相当する．

設計圧縮率は，国内主要 5 社全てにおいて 52.5%である．一方で，限界圧縮率や最大圧縮率は，現行港湾基準では接岸力の算定に用いられない諸元であるため，公表していない製造者もある．公表値が確認できる製造者は全て 55%としている．

表-31 既存防舷材の設計圧縮率・限界圧縮率

	設計圧縮率	限界圧縮率・最大圧縮率
A 社	52.5%	（限界圧縮率）55%
B 社	52.5%	（限界圧縮率）記載無し
C 社	52.5%	（限界圧縮率）記載無し
D 社	52.5%	（最大圧縮率）55%
E 社	52.5%	（最大圧縮率）55%

b) 吸収エネルギー・反力公表値

高性能 V 型防舷材の吸収エネルギーと反力は，防舷材の寸法(高さ H，長さ L)に対して以下の関係を持つ．なお，係数 α，β は製品により異なる係数であり，標準的なゴム質を用いた場合は，製造者ごとに**表-32** のとおりとなる．

吸収エネルギー：$E = \alpha H^2 L$

反力：$R = \beta HL$

表-32　係数一覧

係数	A 社	B 社	C 社	D 社	E 社
α	284.0	284.5	283.4	257.9	284.1
β	676.5	678.7	675.0	613.3	677.0

したがって，防舷材寸法と，吸収エネルギーおよび反力の関係は，**図-16**，**図-17** に示すとおりである．なお，縦軸は公表値であり，性能公差は考慮していない．

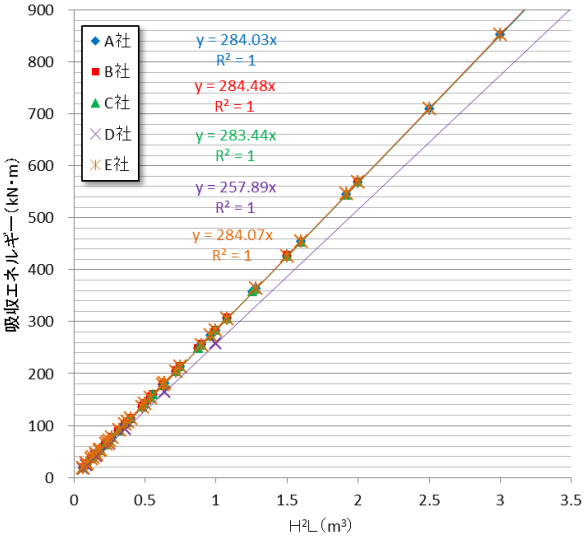


図-16　防舷材寸法ごとの吸収エネルギー（公表値）

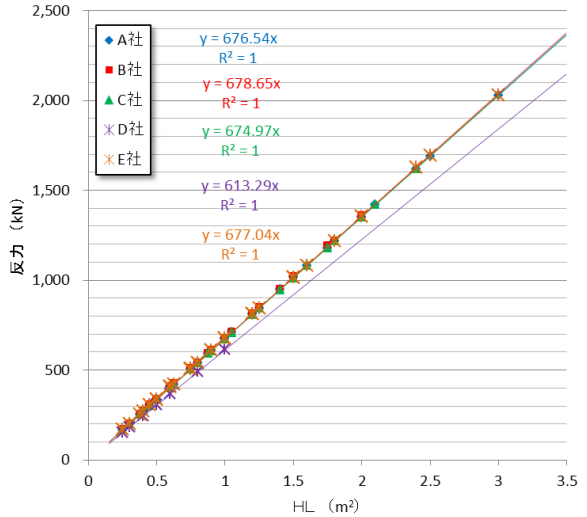


図-17　防舷材寸法ごとの反力（公表値）

c) 吸収エネルギーと反力の関係

公表値が示されている全寸法における吸収エネルギーと反力の関係は**図-18** に示すとおりであり，製造者間で吸収エネルギーに対する反力に多少差異がある．ただし，同程度の吸収エネルギーであっても，防舷材の寸法により反力は異なり，製造者ごとに公表値を示している寸法が異なることから，**図-18** は完全な比較ではない．

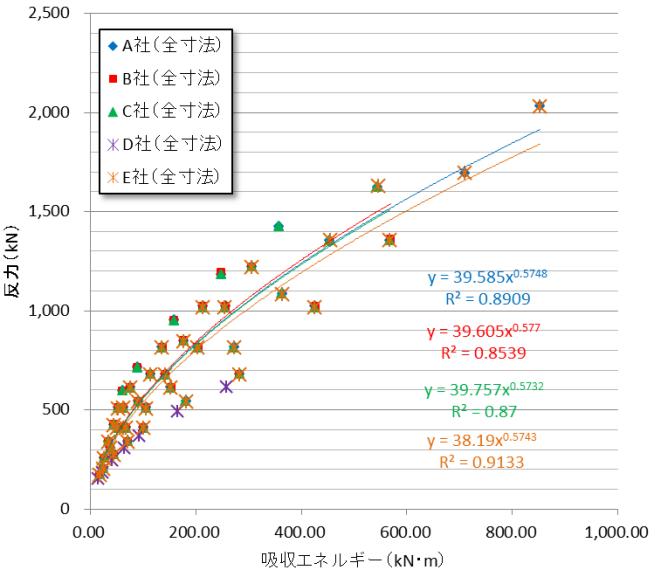


図-18　吸収エネルギーと反力の関係

d) 設計圧縮率から限界圧縮率までの反力増加率

防舷材の圧縮率が，設計圧縮率から限界圧縮率に遷移した場合の，防舷材反力の増加率を整理する．すなわち，限界圧縮率時の防舷材反力は，設計圧縮率時の防舷材反力に対して以下のように表せる．

$$R_{lim} = C_R R_{max}$$

ここに，

R_{lim}：限界圧縮率時の防舷材反力

C_R　：反力増加率

R_{max}：設計圧縮率時の防舷材反力

限界圧縮率は**表-31** より 55%とする．また，限界圧縮率における吸収エネルギーと反力は，性能曲線表からの読み取り値である．

防舷材の長さを 1000mm とすると，防舷材の圧縮率が設計圧縮率から限界圧縮率に増加した際の，反力の増加率は**表-33** に示すとおりとなる．

表-33 より，防舷材の高さが異なっていても，製造者が同一であれば，設計圧縮率から限界圧縮率までの反力増加

率は大差ない．一方で，製造者間では設計圧縮率から限界圧縮率までの反力増加率が大きく異なる．すなわち，船舶の接岸エネルギーが特性値を超過した際に，接岸力がどの程度増加するかは，防舷材の製造者により異なるといえる．

表-33　設計圧縮率から限界圧縮率までの反力増加率

H (mm)	係数C_R					
	A社	B社	C社	D社	E社	平均値
250	1.60	1.24	1.38	1.10	1.60	1.38
300	1.60	1.23	1.39	1.09	1.60	1.38
400	1.59	1.25	1.38	1.09	1.59	1.38
500	1.59	1.24	1.39	1.09	1.60	1.38
600	1.60	1.24	1.38	1.10	1.59	1.38
800	1.59		1.39	1.10	1.59	1.42
1,000	1.60	1.24	1.39	1.09	1.60	1.38

(2) 中空円錐台形型

a) 圧縮率公表値

中空円錐台形型防舷材の設計圧縮率，限界圧縮率を**表-34** に示す．設計圧縮率は，国内主要 5 社全てにおいて 70%である．また，限界圧縮率・最大圧縮率は D 社のみ公表値を 72.5%と記載している．

表-34　既存防舷材の設計圧縮率・限界圧縮率

	設計圧縮率	限界圧縮率・最大圧縮率
A 社	70%	（限界圧縮率）記載無し
B 社	70%	（限界圧縮率）記載無し
C 社	70%	（限界圧縮率）記載無し
D 社	70%	（最大圧縮率）72.5%
E 社	70%	（限界圧縮率）記載無し

b) 吸収エネルギー・反力公表値

中空円錐台形型防舷材の特性として，吸収エネルギーと反力は防舷材の寸法(高さ H)に対して式(4.1)，(4.2)の関係を持つ．なお，係数 α, β は製品により異なる係数であり，標準的なゴム質を用いた場合は，製造者ごとに**表-35** のとおりとなる．

吸収エネルギー：$E = \alpha H^3$　　(4.1)

反力：$R = \beta H^2$　　(4.2)

表-35　係数一覧

係数	A 社	B 社	C 社	D 社	E 社
α	437.9	416.3	437.6	437.7	437.9
β	785.5	793.9	786.0	784.2	785.5

したがって，防舷材寸法と，吸収エネルギーおよび反力の関係は，**図-19**，**図-20** に示すとおりとなる．なお，縦軸は公表値であり，性能公差は考慮していない．

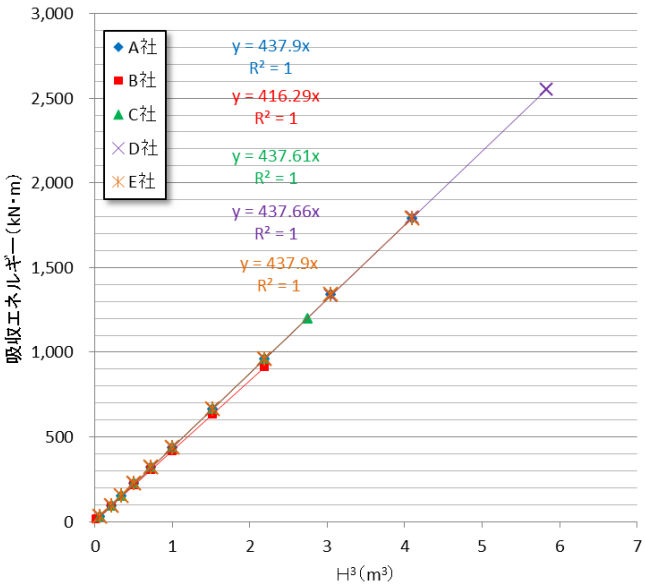


図-19　防舷材寸法ごとの吸収エネルギー（公表値）

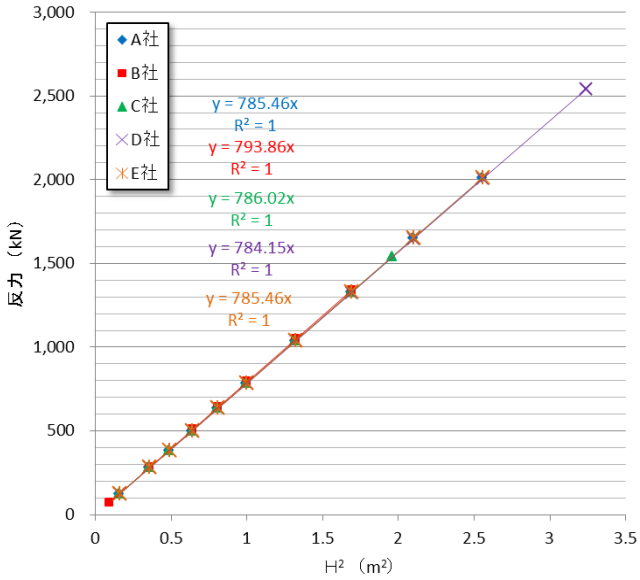


図-20　防舷材寸法ごとの反力（公表値）

c) 吸収エネルギーと反力の関係

図-21 に，公表値が示されている全寸法における吸収エネルギーと反力の関係をプロットする．**図-21** より，防舷材の吸収エネルギーに対する反力は製造者に依らず概ね同値であることが分かる．

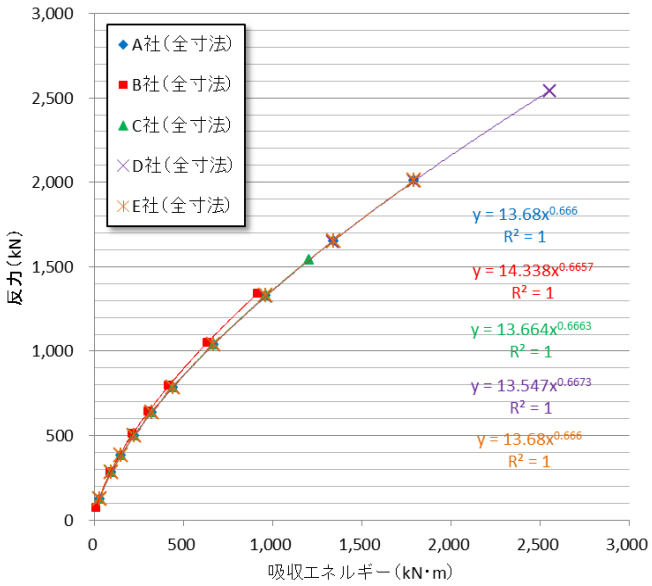


図-21　吸収エネルギーと反力の関係

d) 限界圧縮率における吸収エネルギーと反力の関係

防舷材の圧縮率が，設計圧縮率から限界圧縮率に遷移した場合の，吸収エネルギーや反力の増加率を整理する．なお，設計圧縮率は全製造者において 70%と同値であるが，限界圧縮率は D 社の公表値である 72.5%とする．ただし，C 社は圧縮率 70%を超える範囲の性能曲線が示されていることから，D 社と同じく限界圧縮率を 72.5%と考えて整理する．A，B，E 社については，限界圧縮率や設計圧縮率を超えた性能曲線が示されていないため，本検討では除外する．

吸収エネルギー・反力の増加率は**表-36** に示すとおりである．**表-36** より，吸収エネルギーについては，設計圧縮率を超過した場合でも製造者による違いはないが，反力の増加率は製造者間で異なっていることが分かる．

表-36　設計圧縮率と限界圧縮率における性能差の比較

	圧縮率			増減率	
	設計		限界	ｴﾈﾙｷﾞｰ	反力
C社	70%	⇒	72.5%	1.05	1.10
D社	70%	⇒	72.5%	1.05	1.22

4.4. モデル防舷材の設定手順

前項に示した国内に流通する各防舷材の性能差を考慮し，性能曲線のモデル化を図る．なお，本節は性能曲線のモデル化の手法について述べているため，基本的な寸法の防舷材を事例としている．したがって，本節で設定する反力特性の直線モデルは，信頼性解析において各検討断面に適用するモデルとは異なるものである．各検討断面に適用する反力特性の直線モデルについては **4.5** に示す．

(1) モデル概要

製造者により防舷材の性能曲線が異なるため，本検討では，簡素化のためにモデル防舷材の反力 R と圧縮率 ε の関係式を直線化する(**図-22**).

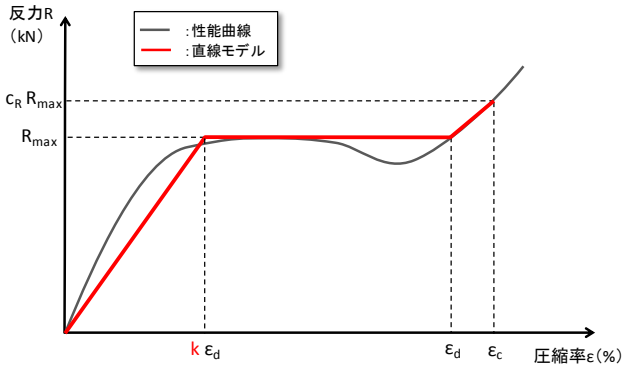


図-22　性能曲線の直線モデル化

本検討においては，モデル防舷材は**図-23** に示す手順により設定する．

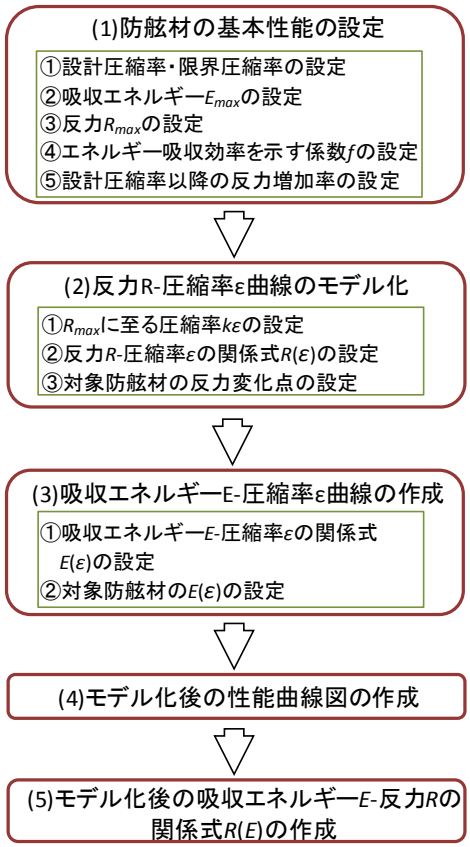


図-23　モデル防舷材の設定手順

以下に，高さ 0.4m，長さ 1.0m の高性能 V 型防舷材を対象としたモデル防舷材の設定例を示す．

(2)防舷材の基本性能の設定

a) 設計圧縮率・限界圧縮率の設定

設計圧縮率，限界圧縮率の公表値を**表-37** に示す．高性能 V 型防舷材においては，全製造者が設計圧縮率を 52.5%としており，モデル防舷材の設計圧縮率は 52.5%とする．

一方で，限界圧縮率は公表値が全て 55.0%であることから，モデル防舷材の限界圧縮率も 55.0%とする．

表-37 設計圧縮率と限界圧縮率の公表値

	圧縮率 (%)						
	A社	B社	C社	D社	E社	平均値	採用値
設計	52.5	52.5	52.5	52.5	52.5	52.50	52.50
限界	55.0	—	—	55.0	55.0	55.00	55.00

b) 吸収エネルギーE_{max}の設定

設計圧縮率における吸収エネルギーE_{max}の公表値を**表-**に示す．本節では，防舷材高さを 0.4m としているため，全社平均値である 44.58kNm を，設計圧縮率における吸収エネルギーE_{max}とする．

表-38 設計圧縮率における吸収エネルギーE_{max}の公表値

H (mm)	吸収ｴﾈﾙｷﾞｰEmax (kNm)						
	A社	B社	C社	D社	E社	平均値	採用値
150							
200							
250	17.80	17.80	17.80	16.10	17.80	17.46	
300	25.60	25.60	25.50	23.20	25.60	25.10	
400	45.40	45.50	45.40	41.20	45.40	44.58	44.58
500	71.00	71.10	70.90	64.40	71.10	69.70	
600	102.00	102.00	102.00	92.70	102.00	100.14	
800	182.00		181.00	165.00	182.00	177.50	
1,000	284.00	284.00	284.00	258.00	284.00	278.80	

c) 反力 R_{max} の設定

設計圧縮率における反力 R_{max} の公表値を**表-39** に示す．本節では，防舷材高さを 0.4m としているため，全社平均値である 265.6kN を，設計圧縮率における反力 R_{max} とする．

表-39 設計圧縮率における反力 R_{max} の公表値

H (mm)	反力Rmax (kN)						
	A社	B社	C社	D社	E社	平均値	採用値
150							
200							
250	169	169	169	153	169	165.80	
300	203	203	202	184	203	199.00	
400	271	271	270	245	271	265.60	265.6
500	339	339	337	307	338	332.00	
600	406	407	405	368	406	398.40	
800	542		540	491	542	528.75	
1,000	677	678	675	613	677	664.00	

d) エネルギー吸収効率を示す係数 f の設定

エネルギー吸収効率を示す係数 f の公表値を**表-40** に示す．なお，係数 f は下式を満たす係数であり，性能曲線としては，**図-24** に示すように，面積 A'' と面積 A''' の比である．

$$E_{max} = f \cdot R_{max} \cdot \delta_d \qquad (4.3)$$

$$\delta_d = \varepsilon_d \cdot H/100 \qquad (4.4)$$

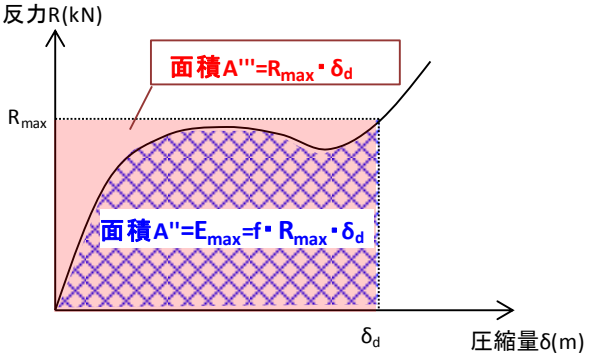


図-24 エネルギー吸収効率を示す係数 f

表-40 に示すように，係数 f は製造者や防舷材高さにより僅かな差が生じるものの，概ね同値である．本節では，防舷材高さを 0.4m としているため，全社平均値である 0.80 を，エネルギー吸収効率を示す係数 f とする．

表-40 エネルギー吸収効率を示す係数 f の公表値

H (mm)	係数f						
	A社	B社	C社	D社	E社	平均値	採用値
150							
200							
250	0.802	0.802	0.802	0.802	0.802	0.802	
300	0.801	0.801	0.802	0.801	0.801	0.801	
400	0.798	0.800	0.801	0.801	0.800	0.800	0.800
500	0.798	0.799	0.801	0.799	0.801	0.800	
600	0.798	0.796	0.800	0.800	0.798	0.798	
800	0.800		0.798	0.800	0.800	0.800	
1,000	0.799	0.798	0.801	0.802	0.799	0.800	

e) 設計圧縮率以降の反力の増加率の設定

防舷材の圧縮率が，設計圧縮率から限界圧縮率に遷移した際の反力増加率 C_R を**表-41** に示す．なお，設計圧縮率と限界圧縮率は上述の検討よりそれぞれ 52.5%, 55%である．また，限界圧縮率における反力は，性能曲線表からの読み取り値である．

先述したとおり，製造者が同一であれば，防舷材の高さが変わっても，反力増加率 C_R はほぼ同一であるが，製造者が異なると，防舷材の高さが同一でも，反力増加率 C_R に大きな差が生じる．したがって，反力増加率 C_R の設定方法については，各製造者の平均値や最大値など複数の手法が考えられる．本章では，反力増加率 C_R は全製造者の最大値を用いるものとし，1.59 とする．なお，反力増加率 C_R の設定方法については，次章および**附録 F** においてより詳細な検討を加える．

表-41　設計圧縮率以降の反力増加率 C_R

H (mm)	係数C_R						
	A社	B社	C社	D社	E社	平均値	採用値
150							
200							
250	1.60	1.24	1.38	1.10	1.60	1.384	
300	1.60	1.23	1.39	1.09	1.60	1.382	
400	1.59	1.25	1.38	1.09	1.59	1.380	1.590
500	1.59	1.24	1.39	1.09	1.60	1.382	
600	1.60	1.24	1.38	1.10	1.59	1.382	
800	1.59		1.39	1.10	1.59	1.418	
1,000	1.60	1.24	1.39	1.09	1.60	1.384	

(3)反力-圧縮率曲線の直線モデル化

a) R_{max} に至る圧縮率 $k\varepsilon$ の設定

簡素化においては，性能曲線と直線モデルとで，設計圧縮率 ε_d における防舷材の吸収エネルギー E_{max} が同値となるように設定する．

防舷材の吸収エネルギーは，**図-25** に示す反力 R-圧縮量 δ 曲線の面積に相当することから，**図-27** に示すように，防舷材反力が設計反力となる係数 k を仮定し，設計圧縮率内の性能曲線面積 A と，直線モデル面積 A' が等しくなるように係数 k を調整することで，性能曲線の直線モデル化を図る．なお，直線モデルにおける反力は，圧縮率が $k\varepsilon_d$～ε_d において反力の公表値で一定とする．これにより，性能曲線と直線モデルとで，設計圧縮率 ε_d における防舷材の吸収エネルギー E_{max} を同値とすることができる．

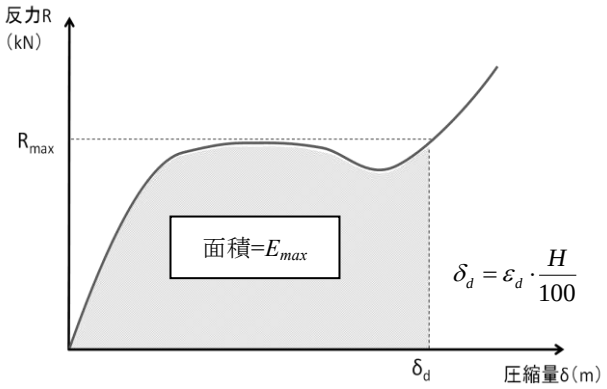


図-25　反力 R-圧縮量 δ 曲線と吸収エネルギーの関係

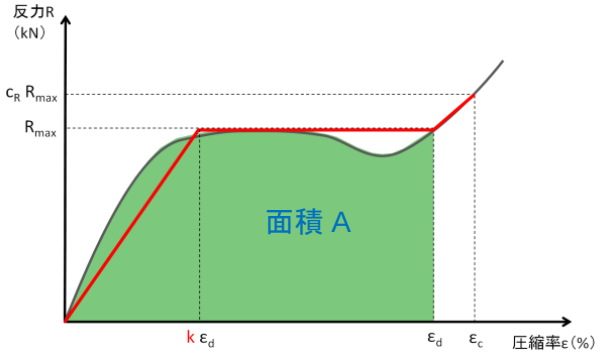


図-26　性能曲線面積 A

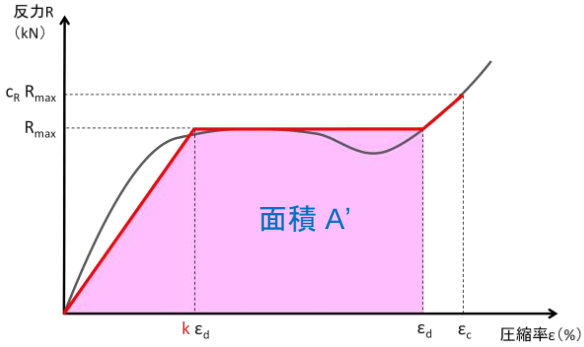


図-27　直線モデル面積 A'

さて，設計圧縮率における吸収エネルギー E_{max} は，式(4.3)および式(4.4)に示したとおりである．一方で，**図-26** に示す面積 A は式(4.5)により表すことができるため，吸収エネルギー E_{max} と面積 A は式(4.6)の関係を示せる．

$$A = f \cdot R_{max} \cdot \varepsilon_d \qquad (4.5)$$

$$E_{max} = A \cdot H/100 \qquad (4.6)$$

これに対し，**図-27** に示す面積 A' は下式により表すことができる．

$$A' = R_{max} \cdot \varepsilon_d - R_{max} \cdot k\varepsilon_d/2$$

$$= \left(1 - \frac{k}{2}\right) \cdot R_{max} \cdot \varepsilon_d \qquad (4.7)$$

係数 k は，A=A' とするように設定することから，吸収エネルギー E_{max} と A' は式(4.8)の関係を示すことができ，式(4.3)～(4.7)により，係数 k を式(4.9)に示すことができる．

$$E_{max} = A' \cdot H/100 \qquad (4.8)$$

$$f \cdot R_{max} \cdot \varepsilon_d \cdot H/100 = \left(1 - {}^{k}/_{2}\right) \cdot R_{max} \cdot \varepsilon_d \cdot H/100$$

$$f = \left(1 - {}^{k}/_{2}\right)$$

$$k = 2(1 - f) \qquad (4.9)$$

表-40 に示したとおり，エネルギー吸収効率を示す係数を f=0.80 としたことから，式(4.9)より，反力 R_{max} となる圧縮率の位置を示す係数 k は 0.40 となる．

b) 反力 R - 圧縮率 ε の関係式 $R(\varepsilon)$ の作成

防舷材の長さを 1.0m としているため，直線モデルにおける反力 R と圧縮率 ε の関係式は以下のように示すことができる．

$0 \leqq \varepsilon \leqq k\varepsilon_d$ の場合

$$R(\varepsilon)_1 = \varepsilon \cdot R_{max}/k\varepsilon_d \tag{4.10}$$

$k\varepsilon_d < \varepsilon \leqq \varepsilon_d$ の場合

$$R(\varepsilon)_2 = R_{max} \tag{4.11}$$

$\varepsilon_d < \varepsilon \leqq \varepsilon_c$ の場合

$$R(\varepsilon)_3 = \frac{(C_R - 1)R_{max}}{\varepsilon_c - \varepsilon_d}(\varepsilon - \varepsilon_d) + R_{max} \tag{4.12}$$

なお，防舷材の長さが 1.0m を超える場合は，防舷材の反力 R と長さ L は正比例の関係にあることから，式(4.10)～(4.12)の各式に対して，長さ L(m)を乗じる．

c) 対象防舷材の反力変化点の設定

対象防舷材(高性能 V 型，高さ 0.4m，長さ 1.0m)においては，式(4.10)～(4.12)の各項は，以下のとおり算出される．

表-42　対象防舷材における各項の値

$k\varepsilon_d$	$R_{max} \cdot L$	$\frac{c_R - 1}{\varepsilon_c - \varepsilon_d}$	$\frac{R_{max} \cdot L}{k\varepsilon_d}$	$\frac{(c_R - 1)R_{max} \cdot L}{\varepsilon_c - \varepsilon_d}$	$R_{max} \cdot L - \frac{(c_R - 1)\varepsilon_d R_{max} \cdot L}{\varepsilon_c - \varepsilon_d}$
%	kN	1/%	kN/%	kN/%	kN
21.0	265.6	0.24	12.65	62.68	-3025.184

したがって，対象防舷材において，反力 R - 圧縮率 ε の関係式 $R(\varepsilon)$は以下のとおりとなり，直線化モデルは**図-28**のとおり示すことができる．

0.0% $\leqq \varepsilon \leqq$ 21.0% の場合

$$R(\varepsilon)_1 = 12.65\varepsilon \tag{4.13}$$

21.0%$< \varepsilon \leqq$ 52.5%の場合

$$R(\varepsilon)_2 = 265.6 \tag{4.14}$$

52.5%$< \varepsilon \leqq$ 55.0%の場合

$$R(\varepsilon)_3 = 62.68\,\varepsilon - 3025.184 \tag{4.15}$$

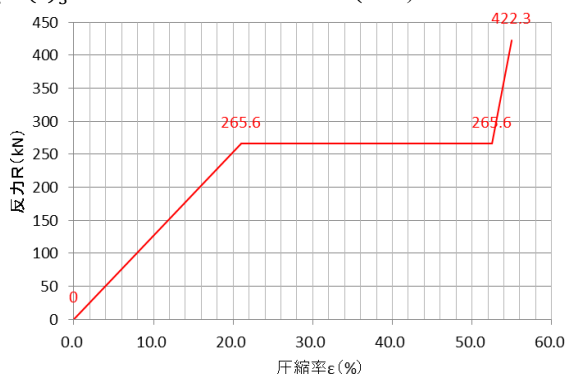


図-28　直線化した反力 R - 圧縮率 ε の関係式 $R(\varepsilon)$

(4) 吸収エネルギーE-圧縮率 ε 曲線の作成

式(4.13)～(4.15)のある圧縮率 ε における面積を $A(\varepsilon)$とすると，式(4.8)より $A(\varepsilon)$に H/100 を乗じることで，吸収エネルギー$E(\varepsilon)$を求めることができる．

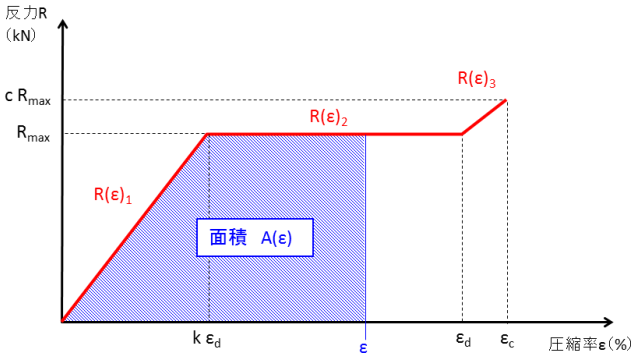


図-29　圧縮率 ε と面積 $A(\varepsilon)$の関係

このため，$E(\varepsilon)$を以下のように表記できる．

$0 \leqq \varepsilon \leqq k\varepsilon_d$ の場合

$$E(\varepsilon)_1 = \int_0^{\varepsilon} R(\varepsilon)_1 d\varepsilon \times \frac{H}{100} \tag{4.16}$$

$k\varepsilon_d < \varepsilon \leqq \varepsilon_d$ の場合

$$E(\varepsilon)_2 = \int_{k\varepsilon_d}^{\varepsilon_d} R(\varepsilon)_2 d\varepsilon \times \frac{H}{100} + E(k\varepsilon_d)_1 \tag{4.17}$$

$\varepsilon_d < \varepsilon \leqq \varepsilon_c$ の場合

$$E(\varepsilon)_3 = \int_{\varepsilon_d}^{\varepsilon} R(\varepsilon)_3 d\varepsilon \times \frac{H}{100} + E(\varepsilon_d)_2 \tag{4.18}$$

ここで，$R(\varepsilon)$における傾き，切片を A～D とすると，

$$R(\varepsilon)_1 = A\varepsilon \tag{4.19}$$

$$R(\varepsilon)_2 = B \tag{4.21}$$

$$R(\varepsilon)_3 = C\varepsilon + D \tag{4.20}$$

式(4.16)～(4.18)中の積分は以下のとおりとなる．

$$\int_0^{\varepsilon} R(\varepsilon)_1 d\varepsilon = \frac{A}{2}\varepsilon^2$$

$$\int_{k\varepsilon_d}^{\varepsilon} R(\varepsilon)_2 d\varepsilon = B\varepsilon - Bk\varepsilon_d$$

$$\int_{\varepsilon_d}^{\varepsilon} R(\varepsilon)_3 d\varepsilon = \frac{C}{2}\varepsilon^2 + D\varepsilon - \left(\frac{C}{2}\varepsilon_d^{\,2} + D\varepsilon_d\right)$$

以上を踏まえると，$E(\varepsilon)$を以下のように表記できる．

$0 \leqq \varepsilon \leqq k\varepsilon_d$ の場合

$$E(\varepsilon)_1 = \frac{H}{100} \cdot \frac{A}{2} \varepsilon^2 \tag{4.22}$$

$k\varepsilon_d < \varepsilon \leqq \varepsilon_d$ の場合

$$\begin{aligned} E(\varepsilon)_2 &= \frac{H}{100}\left\{B\varepsilon - Bk\varepsilon_d + \frac{A}{2}(k\varepsilon_d)^2\right\} \\ &= \frac{H}{100}\left\{B\varepsilon + k\varepsilon_d\left(\frac{A}{2}k\varepsilon_d - B\right)\right\} \end{aligned} \tag{4.23}$$

$\varepsilon_d < \varepsilon \leqq \varepsilon_c$ の場合

$$\begin{aligned} E(\varepsilon)_3 &= \frac{H}{100}\left\{\frac{C}{2}\varepsilon^2 + D\varepsilon - \varepsilon_d\left(\frac{C}{2}\varepsilon_d + D\right) + B\varepsilon_d + k\varepsilon_d\left(\frac{A}{2}k\varepsilon_d - B\right)\right\} \\ &= \frac{H}{100}\left\{\frac{C}{2}\varepsilon^2 + D\varepsilon + \varepsilon_d\left(B - \frac{C}{2}\varepsilon_d - D\right) + k\varepsilon_d\left(\frac{A}{2}k\varepsilon_d - B\right)\right\} \end{aligned} \tag{4.24}$$

対象防舷材(高性能 V 型，高さ 0.4m，長さ 1.0m)においては，式(4.22)～(4.24)の各項は，以下のとおり算出される．

【E(ε)$_1$について】

$\frac{H}{100}$	$\frac{A}{2}$	$\frac{H}{100} \cdot \frac{A}{2}$
0.004	6.324	0.025

【E(ε)$_2$について】

$\frac{H}{100} B$	$\frac{H}{100} k\varepsilon_d\left(\frac{A}{2}k\varepsilon_d - B\right)$
1.062	−11.155

【E(ε)$_3$について】

$\frac{H}{100}\frac{C}{2}$	$\frac{H}{100} D$	$\frac{H}{100} \varepsilon_d\left(B - \frac{C}{2}\varepsilon_d - D\right)$
0.125	−12.101	345.532

以上より，対象防舷材の $E(\varepsilon)$は以下のとおりとなる．

0.0% $\leqq \varepsilon \leqq$ 21.0% の場合

$$E(\varepsilon)_1 = 0.025\varepsilon^2 \tag{4.25}$$

21.0%$< \varepsilon \leqq$ 52.5%の場合

$$E(\varepsilon)_2 = 1.062\varepsilon - 11.155 \tag{4.26}$$

52.5%$< \varepsilon \leqq$ 55.0%の場合

$$E(\varepsilon)_3 = 0.125\varepsilon^2 - 12.101\varepsilon - 334.377 \tag{4.27}$$

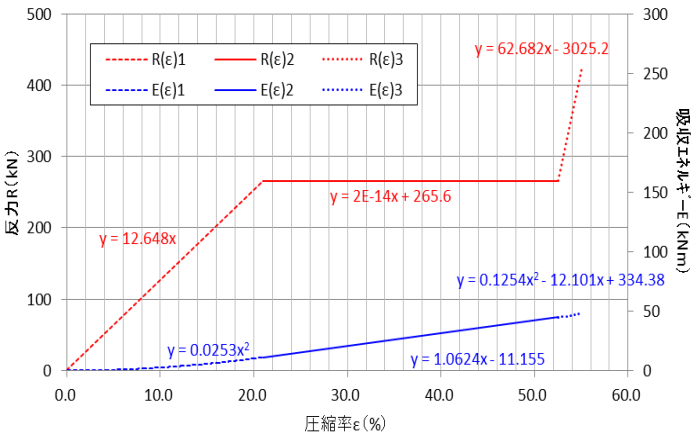
なお，設計圧縮率のとき，すなわち $\varepsilon=\varepsilon_d$ のときは，直線モデルの吸収エネルギー$E(\varepsilon_d)_2$ と，吸収エネルギーの公表値（E_{max}・L）は近い値となることが想定される．ただし，本検討では，反力 R を積分することで吸収エネルギーE を求めており，このときの反力 R や係数 f は製造者間の平均値を採用していることから，両者の値が完全に一致することはない．これについて，$E(\varepsilon_d)_2$ と E_{max}・L を比較すると以下のとおりであり，比較的近い値を取っている．したがって，本検討のモデルは概ね妥当なものと判断できる．

$E(\varepsilon_d)_2$ = 44.62kNm

E_{max}・L = 44.58kNm

(5)モデル化した性能曲線の設定

モデル化した関係式 $R(\varepsilon)$，$E(\varepsilon)$より，モデル化後の対象防舷材の性能曲線は**図−30** のように図示できる．



図−30　モデル化後の性能曲線図

(6)吸収エネルギーE−反力 R の関係式の設定

信頼性解析においては，接岸エネルギーE_fが変動するため，接岸エネルギーE_fと反力 R の関係式を作成する必要がある．そこで，ある圧縮率における吸収エネルギーE と反力 R の関係式 $R(E)$を作成する．

a) $0 \leqq \varepsilon \leqq k\varepsilon_d$ での関係

式(4.22)より，$E(\varepsilon)_1$ における各係数を以下のように整理する．

$$E(\varepsilon)_1 = I\varepsilon^2 \tag{4.28}$$

$$I = \frac{H}{100} \cdot \frac{A}{2} \tag{4.29}$$

この場合，対象範囲内のある圧縮率 ε における吸収エネルギーおよび反力をそれぞれ E，R とすると，式(4.19)，(4.28)，(4.29)より，$R(\varepsilon)_1$，$E(\varepsilon)_1$ の関係は下式により示される．

$$\varepsilon = \sqrt{E/I} \quad (E/I > 0, \varepsilon > 0) \tag{4.30}$$

$$R = \frac{A}{\sqrt{I}}\sqrt{E} \tag{4.31}$$

よって，この範囲における $R(E)_1$ は下式のように表すことができる．

$0 \leqq E \leqq E(k\varepsilon_d)_1$ の場合

$$R(E)_1 = \frac{A}{\sqrt{I}}\sqrt{E} \tag{4.32}$$

b) $k\varepsilon_d \leqq \varepsilon \leqq \varepsilon_d$ での関係

この範囲での反力は，吸収エネルギーや圧縮率に依らず一定である．したがって，この範囲における $R(E)_2$ は下式のとおり表すことができる．

$E(k\varepsilon_d)_2 \leqq E \leqq E(\varepsilon_d)_2$ の場合

$$R(E)_2 = B \tag{4.33}$$

c) $\varepsilon_d \leqq \varepsilon \leqq \varepsilon_c$ での関係

$R(\varepsilon)_3$，および $E(\varepsilon)_3$ における各係数を以下のように整理する．

$$R(\varepsilon)_3 = C\varepsilon + D \tag{4.34}$$

$$E(\varepsilon)_3 = J\varepsilon^2 + K\varepsilon + L \tag{4.35}$$

この場合，対象範囲内のある圧縮率 ε における吸収エネルギーおよび反力をそれぞれ E，R とすると，両者の関係は下式により示される．

$$J\varepsilon^2 + K\varepsilon + (L - E) = 0 \tag{4.36}$$

$$\varepsilon = \frac{-K \pm \sqrt{K^2 - 4J(L-E)}}{2J} \tag{4.37}$$

$$R = \frac{-CK \pm C\sqrt{K^2 - 4J(L-E)}}{2J} + D$$

$$= \pm\frac{C}{2J}\sqrt{4JE + (K^2 - 4JL)} + D - \frac{CK}{2J} \tag{4.38}$$

ここで，式(4.24)より，K，J は C，D より以下のとおり示される．

$$J = HC/200 \tag{4.39}$$

$$K = HD/100 \tag{4.40}$$

$$D - \frac{CK}{2J} = D - \frac{C}{2}\cdot\frac{HD}{100}\cdot\frac{200}{HC}$$

$$= 0 \tag{4.41}$$

よって，この範囲における $R(E)_3$ は下式のように表すことができる．

$E(\varepsilon_d)_3 \leqq E \leqq E(\varepsilon_c)_3$ の場合

$$R(E)_3 = \frac{C}{2J}\sqrt{4JE + (K^2 - 4JL)} \tag{4.42}$$

対象防舷材(高性能 V 型，高さ 0.4m，長さ 1.0m)においては，式(4.22)～(4.24)の各項は，以下のとおり算出される．

【$R(E)_1$について】

$\frac{A}{\sqrt{I}}$
79.522

【$R(E)_2$について】

B
266

【$R(E)_3$について】

$2J$	$\frac{C}{2J}$	$4J$	$\sqrt{K^2 - 4JL}$
0.251	250.000	0.501	−21.247

以上より，対象防舷材の吸収エネルギーE－反力 R の関係式 $R(E)$は以下のとおりとなる．

0.0kNm $\leqq E \leqq$ 11.2kNm の場合

$$R(E)_1 = 79.522\sqrt{E} \tag{4.43}$$

11.2kNm $\leqq E \leqq$ 44.6kNm の場合

$$R(E)_2 = 265.6 \tag{4.44}$$

44.6kNm $\leqq E \leqq$ 48.1kNm の場合

$$R(E)_3 = 250.0\sqrt{0.501E - 21.247} \tag{4.45}$$

限界圧縮率までであれば，接岸エネルギーEfと吸収エネルギーEは同値と考えられるため，接岸エネルギーEfと反力 R の関係は図-31 のとおり示すことができる．

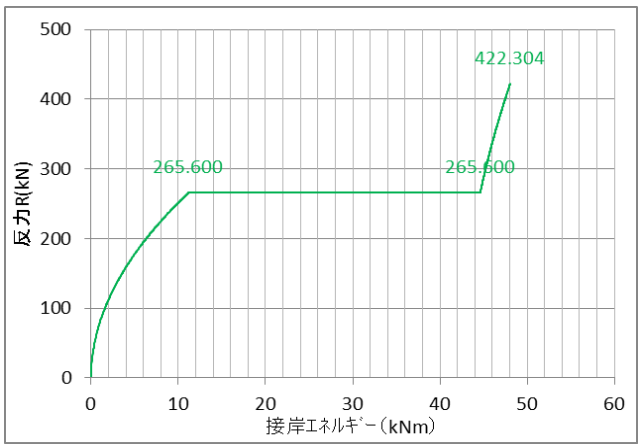


図-31　モデル化後の接岸エネルギーEfと反力 R の関係

d) $\varepsilon_c < \varepsilon$ での関係

図-31 は，モデル化された防舷材の限界圧縮率までの反力特性を示している．しかし，信頼性解析においては，各確率変数の分布により，防舷材の限界圧縮率を超過する接岸エネルギーが生じることが想定される．したがって，限界圧縮率以降の防舷材反力を設定する必要があるが，限界圧縮率を超過した際の反力特性については，根拠となり得る資料が確認できない．このため，本検討においては，限界圧縮率以降のモデル防舷材の反力特性は，限界圧縮率時の値を準用する．

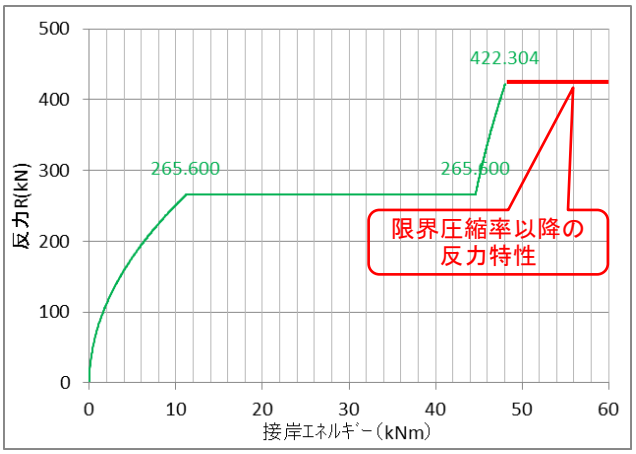


図- 32　限界圧縮率以降の反力特性の設定

4.5. 各設計水深におけるモデル防舷材の設定

本節においては，前節に示した手法を用いて，各検討断面に適用するモデル防舷材を設定する．

(1) 接岸力の特性値の設定

本検討では，直杭式桟橋の各杭に生じる応力を村上ら[2)]の近似式により算出する．これらの近似式は，その近似過程において桟橋に作用する接岸力の特性値を固定しているため，この近似式を用いて信頼性解析を実施するためには，防舷材の性能や形状を変更したとしても，接岸力の特性値は常に同一とする必要がある．

村上ら[2)]は，近似式を作成する過程で，接岸力の特性値を設計水深および船舶載荷荷重トン数ごとに設定しており，**表-43** のとおりである．接岸力の大小は，反力 R により決定されるため，**4.4** に示した手順に基づき，設計圧縮率における反力 R が同値となるようにモデル防舷材を設定する．

表-43　各設計水深に対する接岸力の特性値

設計水深(m)		-7.5m	-12m	-18m
船型(DWT)		5,000	30,000	120,000
防舷材名称		高性能 V 型	中空円錐台形型	中空円錐台形型
設計圧縮率(%)		52.5	70.0	70.0
性能（公表値）	吸収エネルギー E(kNm)	68.2	319.0	962.0
	反力 R(kN)	406.0	636.0	1330.0
性能（公差考慮）	吸収エネルギー E'(kNm)	61.4	287.1	865.8
	反力 R'(kN)	446.6	699.6	1463.0
接岸力(kN/ブロック)		1339.8	2098.8	4389.0
接岸力(kN/ラーメン)		268.0	419.8	877.8

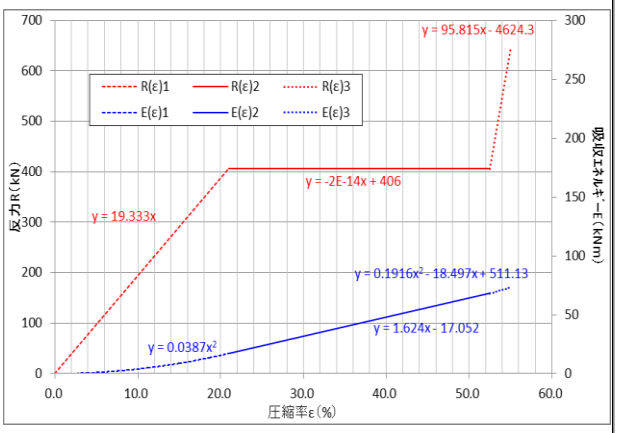
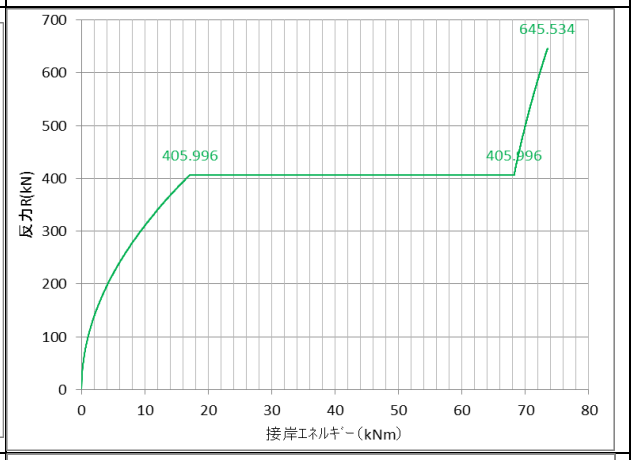
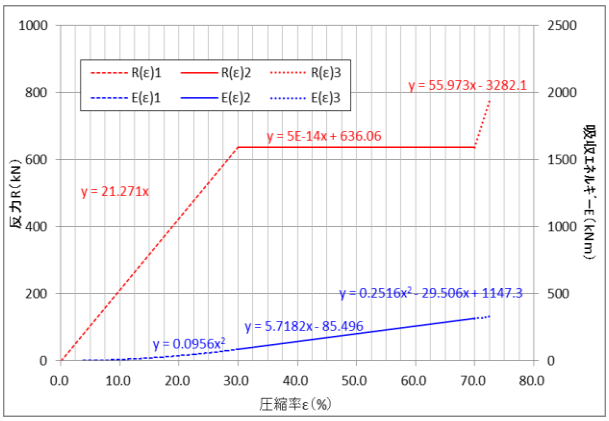
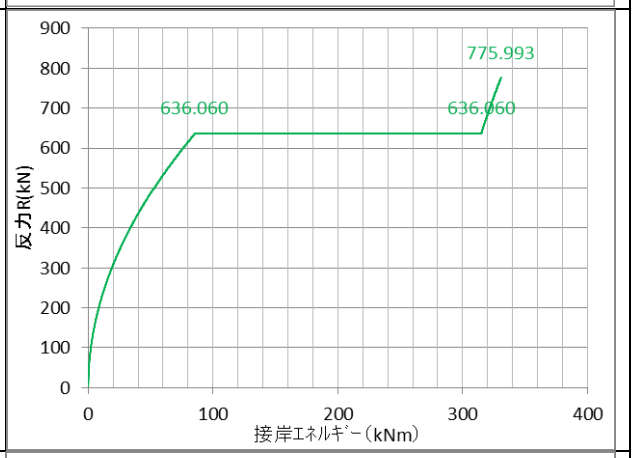
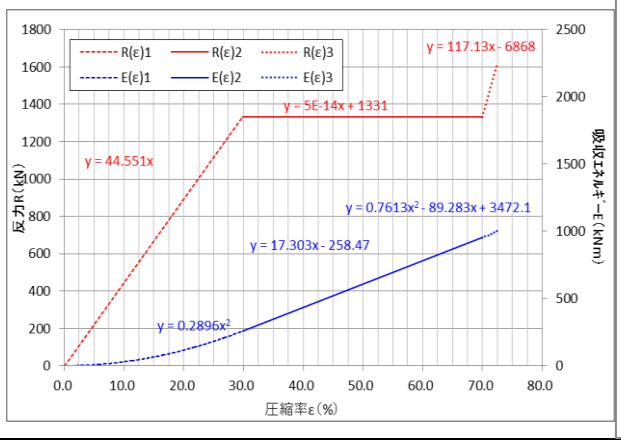
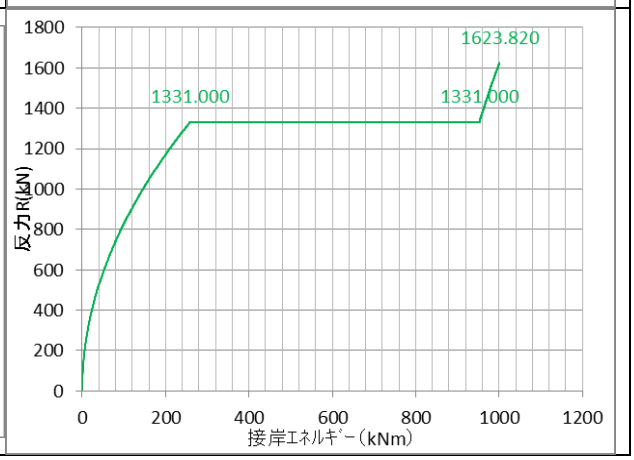
(2) 各設計水深におけるモデル防舷材

各設計水深におけるモデル防舷材の性能を**表-44** に示し，性能曲線図と接岸エネルギー-反力関係図を**表-45** に示す．なお，各設計水深におけるモデル防舷材の性能の導出過程は，**附録 E** に記載する．

表-44　各設計水深に対するモデル防舷材の性能

設計水深(m)		-7.5m	-12m	-18m	備考
船型(DWT)		5,000	30,000	120,000	
防舷材名称		高性能 V 型	中空円錐台形型	中空円錐台形型	
寸法	高さ H(m)	0.4	0.899	1.30	モデル防舷材の反力が，検討断面の反力特性値と一致する寸法
	長さ L(m)	1.5286	-	-	
設計圧縮率(%)		52.5	70.0	70.0	各製造者の平均値
限界圧縮率(%)		55.0	72.5	72.5	各製造者の平均値
吸収ｴﾈﾙｷﾞｰ E(kNm)		68.21	314.86	952.60	各製造者の平均値
反力 R(kN)		406.0	636.1	1331.0	各製造者の平均値
ｴﾈﾙｷﾞｰ吸収効率係数 f		0.80	0.787	0.787	各製造者の平均値
限界圧縮時反力増加率 C_R		1.59	1.22	1.22	各製造者の最大値

表-45　各設計水深に対するモデル防舷材の性能曲線，接岸エネルギーEf-反力 R 関係図

設計水深	性能曲線	接岸エネルギーEf-反力 R 関係図
7.5m		
12m		
18m		

5. 現行港湾基準に基づく断面に対する信頼性解析

3 章に示したとおり，本稿で用いる確率変数や確率変数の従う確率分布，防舷材の反力特性は，現行港湾基準の部分係数設定時とは異なるものである．

本章では，これらの数値の差異が現行港湾基準を満足する断面の破壊確率に与える影響を評価する．すなわち，現行港湾基準に基づいて設定した検討断面に対し，本稿で新たに設定した確率変数や確率変数の従う確率分布，防舷材反力特性を用いて信頼性解析を実施する．これにより，各検討断面の破壊確率や信頼性指標が現行港湾基準の目標破壊確率や目標信頼性指標からどの程度推移するか検討する．

5.1. 性能照査式

杭応力の性能照査式は以下のとおりであり，性能照査値は，曲げ圧縮応力度比と軸方向圧縮応力度比の和である．

$$\frac{\sigma_c}{\sigma_{cy}}+\frac{\sigma_{bc}}{\sigma_{by}}\leq 1$$

$$\Rightarrow \quad \mathrm{Z}'=1-\left(\frac{\sigma_c}{\sigma_{cy}}+\frac{\sigma_{bc}}{\sigma_{by}}\right)\geq 0 \qquad (5.1)$$

σ_c ；圧縮応力度(=*N/A*)
N ；軸力
A ；杭の断面積
σ_{bc} ；曲げ引張応力度(=*M/Z*)
M ；曲げモーメント
Z ；断面係数
σ_{cy} ；圧縮降伏応力度
σ_{by} ；曲げ引張降伏応力度
Z' ；性能関数

なお，本検討における信頼性解析では，性能関数 *Z'*を作用 *S* と抵抗 *R* に分離して評価するが，杭応力の性能照査値は曲げと軸方向のそれぞれに生じる部材力と杭の耐力との比を足し合わせたものであるため，性能関数 *Z'*を厳密に作用 *S* と抵抗 *R* に分離することができない．

このため，**表-46** に示す低減係数を介し，以下に示すように杭の耐力が曲げ引張降伏応力度のみとなるように性能照査式を書き換えた．したがって，性能関数 *Z''*の作用 *S* と抵抗 *R* は，現行港湾基準の杭の照査式における作用や抵抗とは異なる概念であることに留意する必要がある．

$$\mathrm{Z}'=1-\left(\frac{\sigma_c}{\sigma_{cy}}+\frac{\sigma_{bc}}{\sigma_{by}}\right)\geq 0$$

$$=1-\left(\frac{\sigma_c}{red\times\sigma_{by}}+\frac{\sigma_{bc}}{\sigma_{by}}\right)\geq 0$$

$$=1-\left(\frac{\frac{\sigma_c}{red}+\sigma_{bc}}{\sigma_{by}}\right)\geq 0 \qquad (5.2)$$

$$\sigma_{by}\cdot \mathrm{Z}'=\sigma_{by}-(\sigma_c/red+\sigma_{bc})\geq 0$$

$$\Rightarrow \mathrm{Z}''=\sigma_{by}-(\sigma_c/red+\sigma_{bc})\geq 0$$

$$=R-S\geq 0 \qquad (5.3)$$

red ；圧縮降伏応力度の低減係数（**表-46**）
l ；杭の有効座屈長
r ；杭の断面二次半径
Z'' ；性能関数
R ；抵抗
S ；作用

表-46 低減係数 [1)]

	SKK400	SKK490
圧縮降伏応力度	$\frac{\ell}{r}\leq 18$ のとき 235 $18<\frac{\ell}{r}\leq 92$ のとき $235-1.38\left(\frac{\ell}{r}-18\right)$ $\frac{\ell}{r}<92$ のとき $\frac{2.01\times10^6}{6.7\times10^3+\left(\frac{\ell}{r}\right)^2}$	$\frac{\ell}{r}\leq 16$ のとき 315 $16<\frac{\ell}{r}\leq 79$ のとき $315-2.04\left(\frac{\ell}{r}-16\right)$ $\frac{\ell}{r}<79$ のとき $\frac{2.04\times10^6}{5.0\times10^3+\left(\frac{\ell}{r}\right)^2}$
低減係数	$\frac{\ell}{\mathrm{r}}\leq 18$ $r=1.0$ $18<\frac{\ell}{\mathrm{r}}\leq 92$ $red=1-\frac{0.82}{140}\times\left(\frac{\ell}{\mathrm{r}}-18\right)$ $\frac{\ell}{\mathrm{r}}>92$ $red=\frac{1.2\times10^6}{6.7\times10^3+(\ell/r)^2}/140$	$\frac{\ell}{\mathrm{r}}\leq 16$ $r=1.0$ $16<\frac{\ell}{\mathrm{r}}\leq 79$ $red=1-\frac{1.20}{185}\times\left(\frac{\ell}{\mathrm{r}}-16\right)$ $\frac{\ell}{\mathrm{r}}>92$ $red=\frac{1.2\times10^6}{5.0\times10^3+(\ell/r)^2}/185$

5.2. 検討断面

検討断面については 2.2 に示した 16 断面であり，以下の設計条件を有する．各検討断面の設計条件は**表-2** に一覧として整理しており，**図-3** に概略図を示している．

【前面水深】 -7.5m，-12.0m，-18.0mの3パターン
【杭 本 数】 水深および杭間隔（5mもしくは10m）に応じて3,4,5,6本の4パターン
【捨石マウンド】 有り（勾配は1：2），無しの2パターン
【上 部 工】 水深-7.5mの場合は21.0kN/m^2（H19基準記載値[1)]），水深-12.0m・-18.0mの場合は30.0 kN/m^2（設計事例集記載値[10)]）の自重
【地盤反力】 基礎地盤は砂層とし，地盤反力係数は式(3)より求め，N値は5,15の2パターンでそれぞれ7,500kN/m^{3}と22,500kN/m^3
捨石の地盤反力係数は一律3,500kN/m^3

杭の応力照査には，杭の断面諸元（杭径・肉厚）を設定する必要がある．本稿では，以下に示す項目を基本として杭の断面諸元を設定した．

【杭　径】　全ての杭で同一径（外径）とし，100mm間隔で変化させる．

【肉　厚】　腐食は考慮せず0.1mm間隔で変化させる．肉厚については，杭毎に異なる場合もある．

すなわち，各検討断面について，上述のとおり杭径，杭肉厚を変化させつつ，現行港湾基準に基づいて骨組み解析による照査を行った．そして，(5.1)に示した性能関数Z'が1を超過しない最大値となる杭径，および肉厚の組合せを，現行港湾基準を満たす断面における杭の所要断面諸元とした．

5.3. 重点サンプリング法による信頼性解析結果

(1)　計算条件

信頼性解析は，試行回数 20 万回の MCS(モンテカルロシミュレーション)を行い，MCS により導出した破壊点周りにおいて，20 万回×3 サイクルの IS(重点サンプリング)法を適用することで実施した．確率変数および確率変数の従う確率分布は，3.1 の**表-20**，**表-21** に示したとおりであり，検討断面は**表-2** に示した 16 断面である．また，防舷材の反力特性は 4.5 の**表-44**，**表-45** に示したとおりである．

(2)　抵抗と作用の分布

検討断面①，⑬における抵抗-作用分布図を**表-47**，**表-48** に示す．なお，サンプリング結果の凡例は下記のとおりであり，全断面の抵抗-作用分布図は**附録 F** に記載する．

黒点；MCS 法のサンプリング結果
灰点；IS 法 3 サイクル目のサンプリング結果
⊕；MCS 法における平均値
△；MCS 法により導出された破壊点
✡；IS 法により導出された破壊点

表-47，**表-48** より，作用の算出値は特性値と破壊点を中心とした二極分布をとることがわかる(**図-33**)．これは，本検討で採用したモデル防舷材の性能曲線は，設計圧縮率時と限界圧縮率時の反力で一定となるためである(**図-34**)．

また，限界圧縮率以降は船舶接岸力が増加せず，作用側に上限値が生じることから，抵抗側の破壊点が特性値より小さい値をとる傾向が生じる(**図-35**)．この傾向は，防舷材の設計圧縮率から限界圧縮率までの反力増加率が小さいほど顕著になるため，**表-48** に示すような中空円錐台形型防舷材を想定している断面は，**表-47** に示すような高性能 V 型防舷材を想定する断面と比較して，抵抗の破壊点が特性値から大きく減少する．

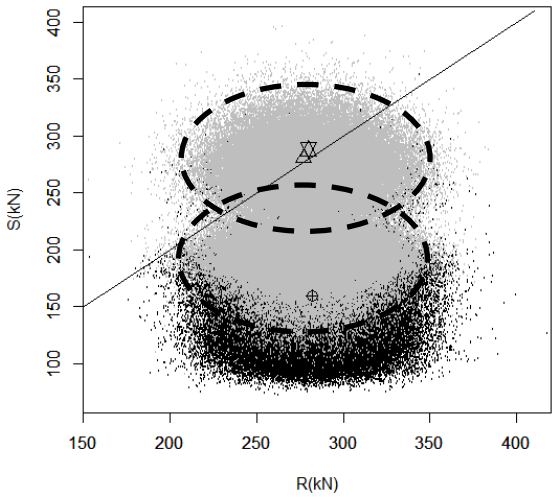


図-33　信頼性解析におけるサンプリング結果の二極分布

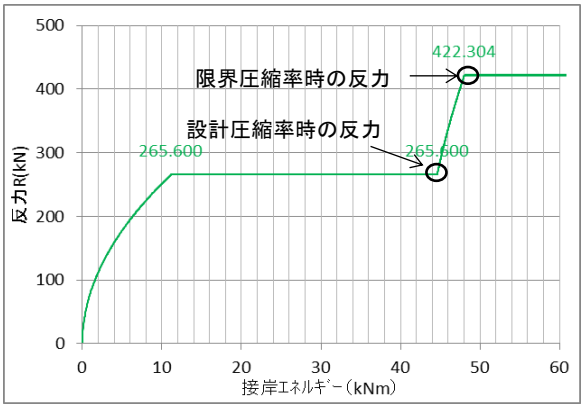
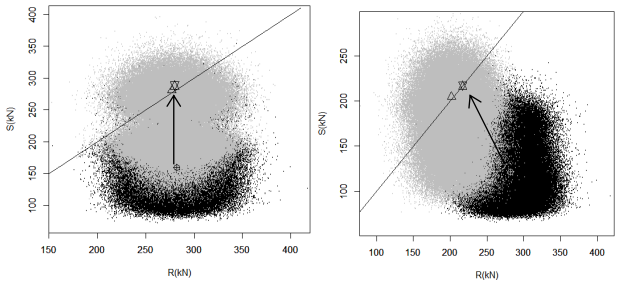


図-34　モデル防舷材の接岸エネルギー-反力関係式



断面①第 1 列　　断面⑬第 1 列

図-35　平均値と破壊点の関係

表-47　抵抗-作用分布図(断面①)

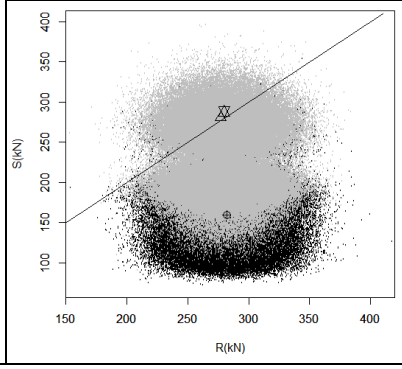
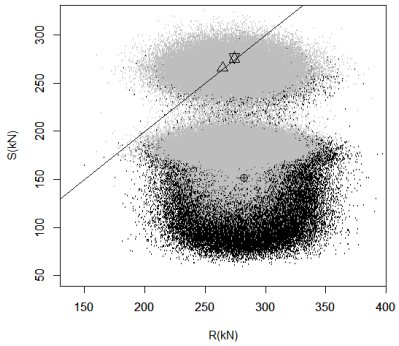
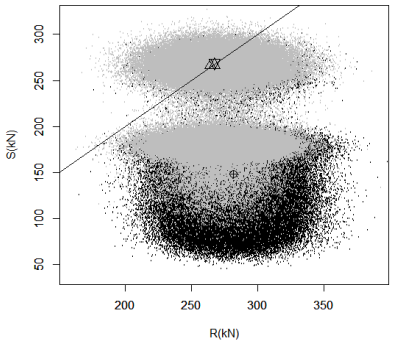
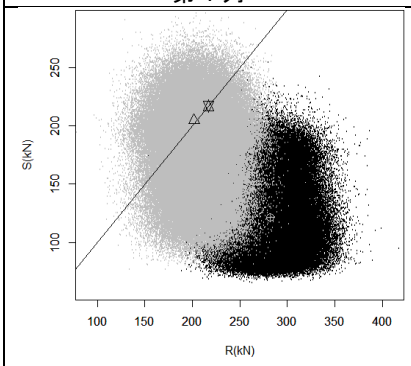
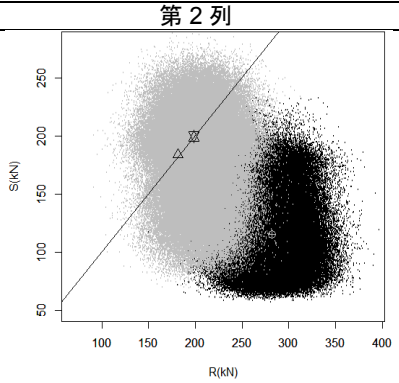
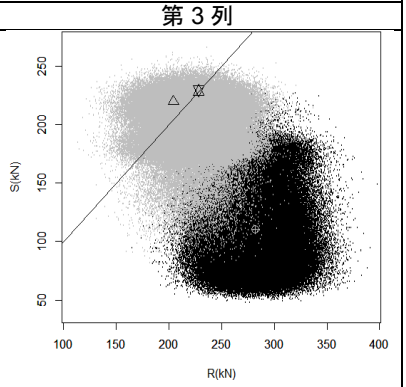
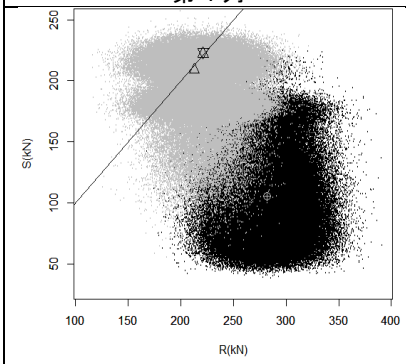
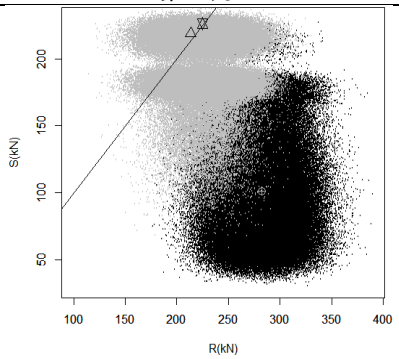
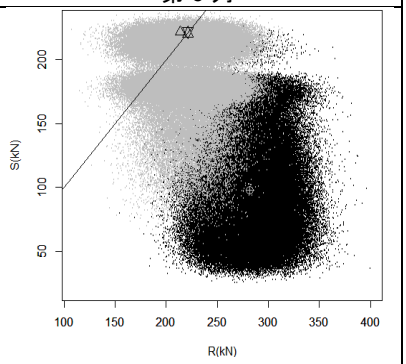
断面	断面①		
	第１列	第２列	第３列
抵抗-作用分布図			

表-48　抵抗-作用分布図(断面⑬)

断面	断面⑬		
	第１列	第２列	第３列
抵抗-作用分布図			
	第４列	第５列	第６列
			

(3) 圧縮応力度比の分布

前述の抵抗-作用分布図では，曲げ圧縮応力度比と軸圧縮応力度比の分布が不明なため，**表-49**，**表-50** に曲げ圧縮応力度比-軸圧縮応力度比分布図を示す．なお，サンプリング結果の凡例は下記のとおりである．

灰点；MCS 法のサンプリング結果

黒点；IS 法 3 サイクル目のサンプリング結果

表-49，**表-50** より，いずれの杭においても軸圧縮応力度比はほとんど一定値であり，曲げ圧縮応力度比のみが大きく変化することが分かる．これは，本検討において，上部工荷重や上載荷重は固定値であり，接岸力の変化に伴う押込力や引抜力の変化のみが，軸力に変動を及ぼすためである．この傾向は，全断面，杭列でほぼ共通である．

なお，全断面における分布図は**附録 F** に添付する．

表-49 曲げ圧縮応力度比-軸方向圧縮応力度比分布図(断面①)

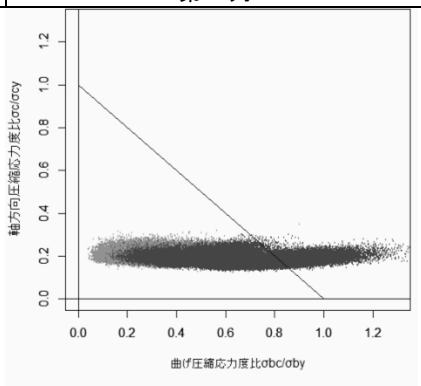
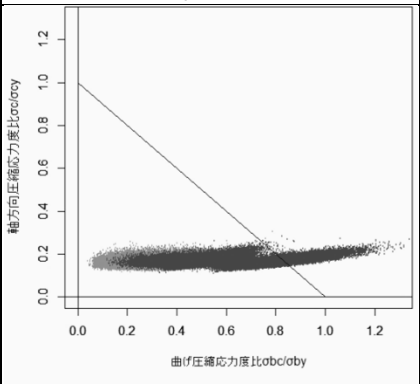
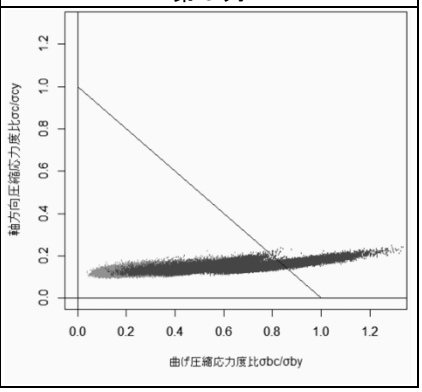
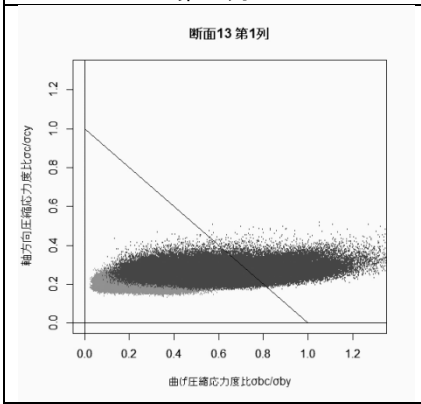
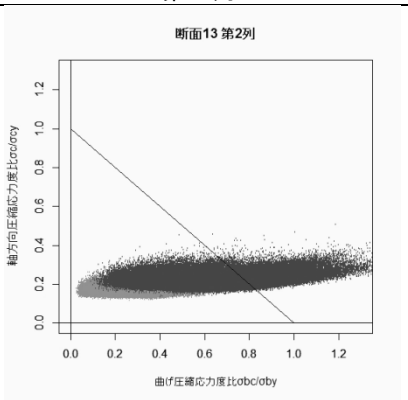
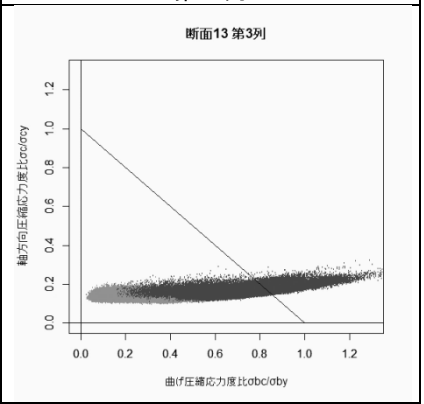
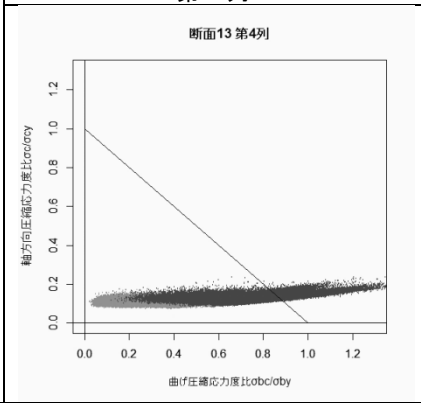
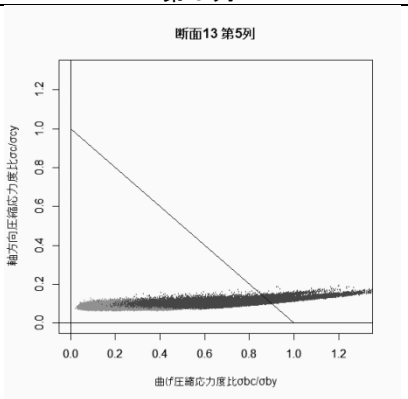
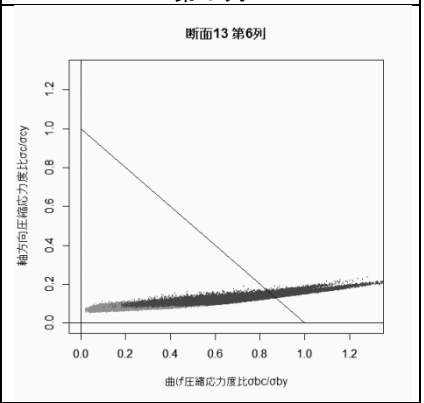
断面	断面①		
杭列	第 1 列	第 2 列	第 3 列
応力度比分布図			

表-50 曲げ圧縮応力度比-軸方向圧縮応力度比分布図(断面⑬)

断面	断面⑬		
	第 1 列	第 2 列	第 3 列
応力度比分布図			
	第 4 列	第 5 列	第 6 列
			

5.4. 破壊確率・信頼性指標の比較

各断面における破壊確率を**図-36** に示し，信頼性指標を**図-37** に示すが，設計水深の増加に伴い破壊確率が低下する傾向が確認できる．これについては，以下の 2 つの要因が考えられる．

①設計水深ごとの接岸速度の確率分布
②防舷材の設計圧縮率から限界圧縮率までの反力増加率

すなわち，本検討で採用した接岸速度の確率分布では，**表-51** に示すように設計水深が大きい断面ほど平均値が低下する．一方で，接岸速度の特性値は，現行港湾基準に従い全ての検討断面において 10cm/s としている．このため，設計水深の増加に従い破壊確率が低下したと考えられる．

また，防舷材の反力増加率については，**表-52** に示すように，高性能 V 型防舷材と中空円錐台形型では，設計圧縮率から限界圧縮率までの反力増加率が異なっていることから，断面①～④(設計水深-7.5m)と断面⑤～⑯(設計水深-12m，-18m)とで破壊確率や信頼性指標に差が生じたと考えられる．これについては，次節でより詳細に検討する．

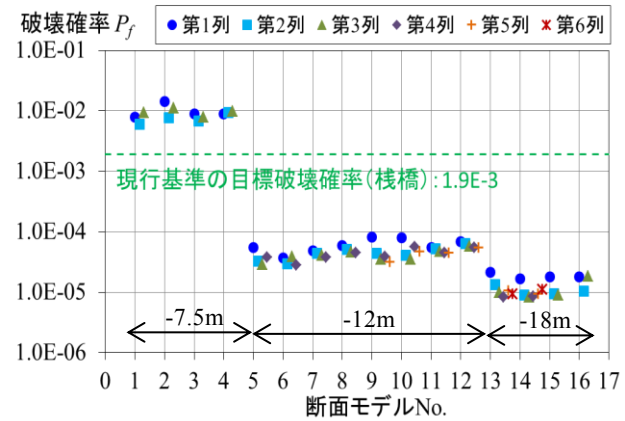


図-36　現行港湾基準を満たす断面の破壊確率

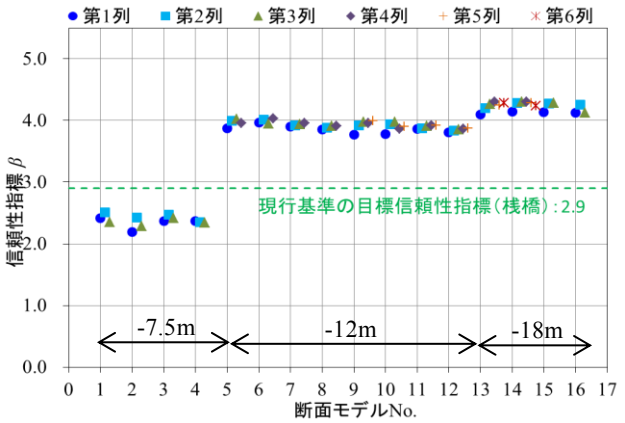


図-37　現行港湾基準を満たす断面の信頼性指標

表-51　設計水深と接岸速度の確率分布

設計水深 (m)	接岸速度(m/s)	
	平均値	標準偏差
-7.5	0.061	0.034
-12	0.039	0.022
-18	0.027	0.015

表-52　設計圧縮率から限界圧縮率までの反力増加率

設計水深	-7.5m	-12m	-18m
形状	高性能 V	中空円錐台形	
設計圧縮率	52.5	70.0	
限界圧縮率	55.0	72.5	
反力増減率	1.59	1.22	

なお，**図-38** に示すとおり，各検討断面の破壊点における実質安全率は，設計水深や防舷材の性能に関わらず 1.2～1.3 程度である．これは，村上ら [2)]が示した現行港湾基準に基づいて設計された断面の有する実質安全率とほぼ同値である．

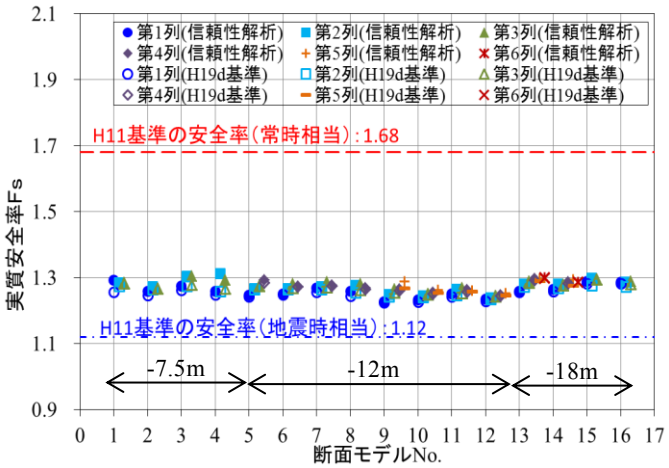


図-38　破壊点における実質安全率と現行港湾基準に基づく断面の実質安全率

5.5. 信頼性解析における防舷材反力特性の影響評価

前節で示したとおり，断面①～④(設計水深-7.5m)と断面⑤～⑯(設計水深-12m，-18m)では，破壊確率や信頼性指標に大きな差が生じる．これは，設計水深により，接岸速度の確率分布が異なることに加え，使用する防舷材の形状により，設計圧縮率から限界圧縮率までの反力増加率が異なることに起因すると考えられる．

このため，本節では防舷材の設計圧縮率以降の反力特性の差異が，各検討断面の破壊確率に与える影響について評価する．

(1)　設計圧縮率以降の反力増加率の設定

本節の検討においては，各検討断面の破壊確率や信頼性指標と，現行港湾基準の目標破壊確率，目標信頼性指標とを比較するため，設計圧縮率以降の反力増加率を現行港湾基準の検討時と同一にする．

現行港湾基準検討時における防舷材の反力特性は，長尾ら[9]より**図-39** に示すとおりであり，設計圧縮率は 45%，限界圧縮率は 50%である．ただし，限界圧縮率における反力は 594kN であるが，設計圧縮率における反力は記載されていない．このため，ここでは設計圧縮率における反力を 450kN と想定し，設計圧縮率から限界圧縮率までの反力増加率 C_R を 1.32 とした．

以上より，モデル防舷材の反力増加率を**表-53** のように再設定し，現行港湾基準を満足する断面に対し信頼性解析を実施した．なお，現行港湾基準の検討時は，限界圧縮率以降の防舷材反力を限界圧縮率時と同値としているため，本節の検討においても，限界圧縮率以降の防舷材反力は限界圧縮率時と同値とする．

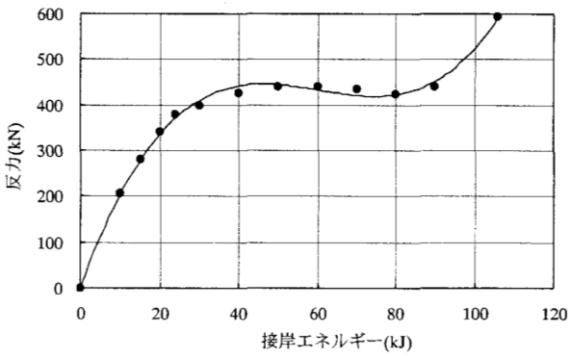


図-39　現行港湾基準検討時の防舷材反力特性

表-53　現行港湾基準検討時の反力増加率 C_R に合わせたモデル防舷材の設定

設計水深	-7.5m	-12m	-18m
形状	高性能 V	中空円錐台形	
設計圧縮率	52.5	70.0	70.0
限界圧縮率	55.0	72.5	72.5
反力増加率	1.59 ↓ 1.32	1.22 ↓ 1.32	1.22 ↓ 1.32

(2)　解析結果

各杭の破壊確率，信頼性指標，および実質安全率を**表-54** に示す．

表-54 より，各検討断面における防舷材の設計圧縮率から限界圧縮率までの反力増加率を同値とすると，破壊確率や信頼性指標が一定値に収束する傾向が生じることがわかる．一方で，各検討断面の破壊確率が変化しているにもかかわらず，実質安全率はほとんど変化しない．これは，各検討断面の実質安全率は，設計圧縮率における防舷材反力により決定されるため，設計圧縮率以降の反力特性の差異は影響しないためである．すなわち，桟橋の形状や実質安全率が全く同一であっても，防舷材の反力特性，特に設計圧縮率以降の反力特性の差異により，破壊確率や信頼性指標が大きく変化することが示唆されている．

5.6. 解析結果の総括

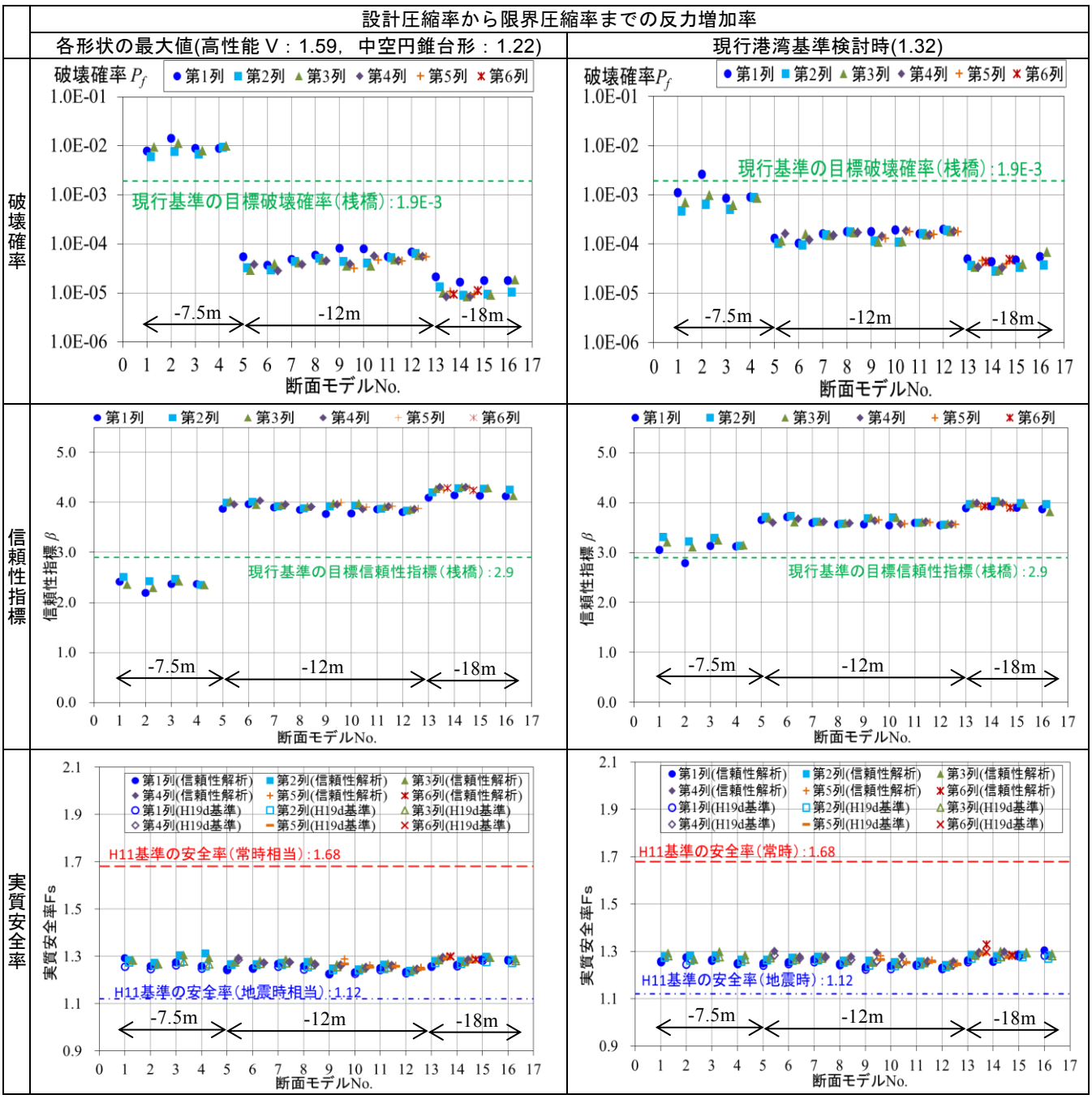
本章では，現行港湾基準を満足する検討断面に対し，信頼性解析を実施し，その破壊確率や信頼性指標を整理した．検討結果として，下記の事項が挙げられる．

○各検討断面の破壊確率は，設計水深の増加に伴い破壊確率が低下する傾向がある．
これは，本検討で採用した確率分布では，設計水深が大きい断面ほど接岸速度の平均値が低下するのに対し，接岸速度の特性値は現行港湾基準に従い設計水深に関わらず一定としたためである．

○各検討断面の破壊確率や信頼性指標は，防舷材の設計圧縮率以降の反力特性の影響を受ける．すなわち，設計圧縮率以降の反力増加率が小さいほど，破壊確率は小さくなる傾向がある．

○実質安全率については，設計水深や設計圧縮率以降の反力増加率の影響をほとんど受けず，概ね 1.2～1.3 程度と一定となる．

表-54　各杭の破壊確率，信頼性指標，実質安全率



6. 目標破壊確率の設定と部分係数の算定

本章では，目標破壊確率を設定し，目標破壊確率に相当する杭の諸元を求めることで，各検討断面における部分係数を算定する．

また，算定した部分係数をフォーマットごとに整理することで，直杭式横桟橋の船舶接岸力時における杭の応力照査を対象とした部分係数の構築を図る．

6.1. 本章における防舷材反力増加率の設定

前章に示したとおり，各検討断面の破壊確率や信頼性指標は，同一の断面であっても想定する防舷材の設計圧縮率以降の反力増加率により変化する．このため，本章においては，防舷材の設計圧縮率から限界圧縮率までの反力増加率は，各製造者や防舷材形状の平均的な値を用いるものとした．すなわち，**表-55** に示す各製造者の高性能 V 型防舷材，および中空円錐台形型防舷材の反力増加率の平均値である 1.32 とした．なお，高性能 V 型については，防舷材高により増加率が僅かに異なるが，本稿では H=400mm における反力増加率を用いて平均値を算出した．

表-55 防舷材の反力増加率

【高性能Ｖ型】

H (mm)	係数f				
	A社	B社	C社	D社	E社
150					
200					
250	1.60	1.24	1.38	1.10	1.60
300	1.60	1.23	1.39	1.09	1.60
400	**1.59**	**1.25**	**1.38**	**1.09**	**1.59**
500	1.59	1.24	1.39	1.09	1.60
600	1.60	1.24	1.38	1.10	1.59
800	1.59		1.39	1.10	1.59
1,000	1.60	1.24	1.39	1.09	1.60

【中空円錐台形型】

反力増減率				
A社	B社	C社	D社	E社
		1.10	**1.22**	

6.2. 目標破壊確率の設定

現行港湾基準に基づく断面の破壊確率が設計水深により大きく異なる．このため，本稿ではいずれかの設計水深をターゲットとし，その平均破壊確率を目標破壊確率として適用するものとした．

ターゲットとする設計水深(以下，ターゲット設計水深とする)ごとの目標破壊確率は**表-56**，**図-40** に示すとおりである．いずれの目標破壊確率を採用しても，部分係数の構築に得失があるため，本章では全ての目標破壊確率に対し部分係数を算出し，これまでの基準の安全性水準と比較することで，採用すべき目標破壊確率について総合的に検討する．

表-56 ターゲット設計水深と目標破壊確率

ターゲットとする設計水深	ターゲットとする検討断面	目標破壊確率
-7.5m	①～④	9.27×10^{-4}
-12m	⑤～⑫	1.52×10^{-4}
-18m	⑬～⑯	4.15×10^{-5}

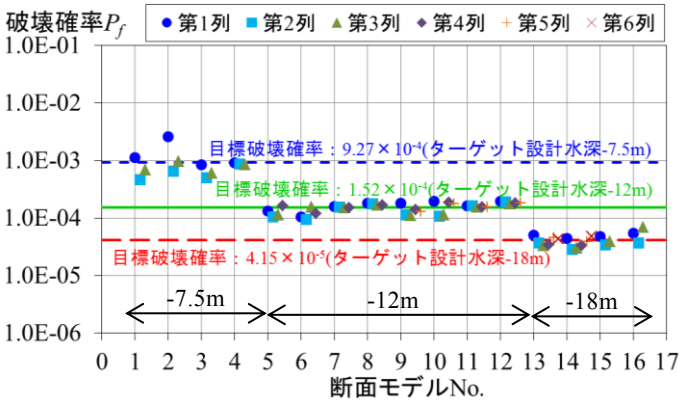


図-40 ターゲット設計水深と目標破壊確率

6.3. 目標破壊確率における設計点の算定

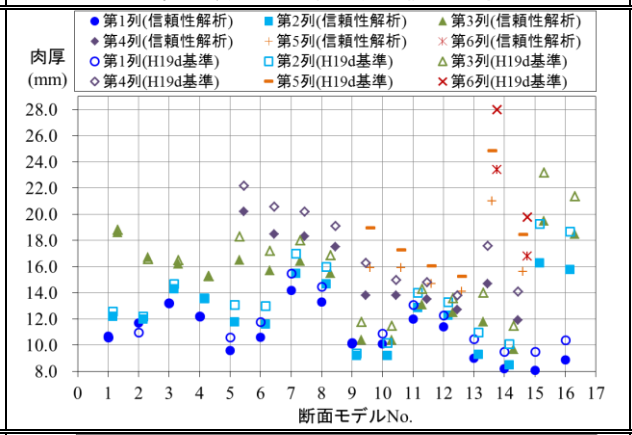
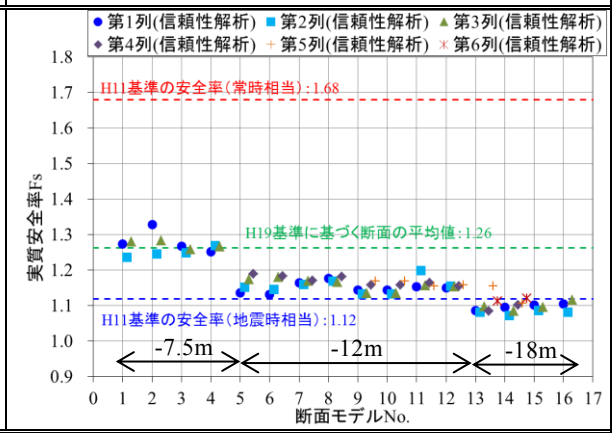
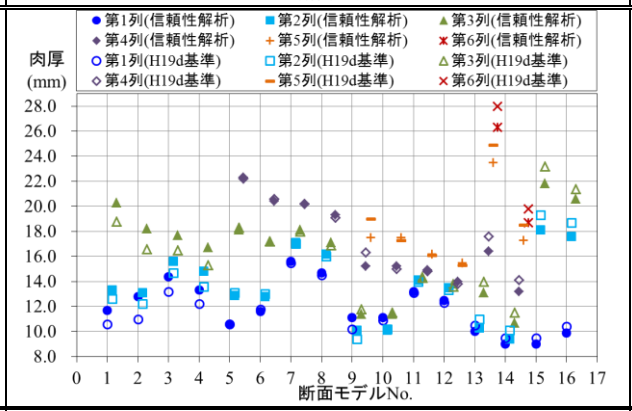
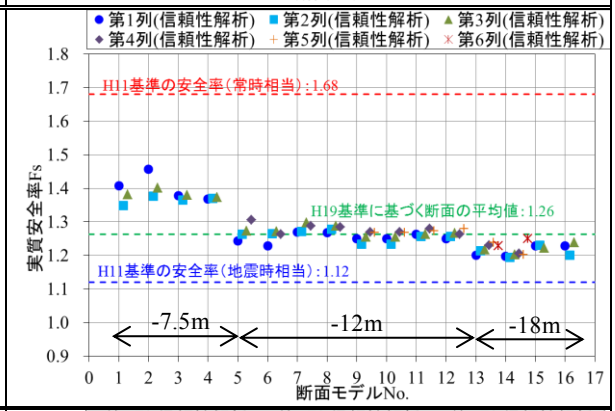
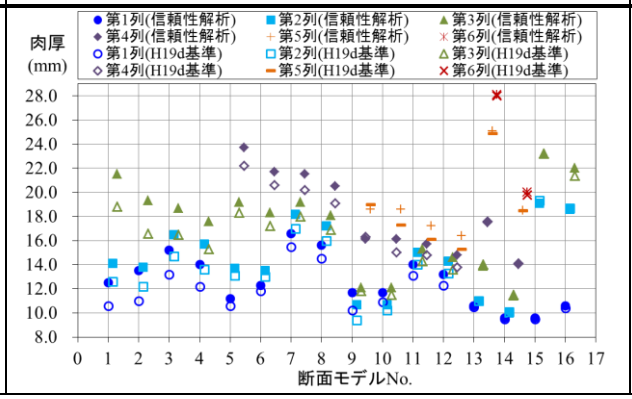
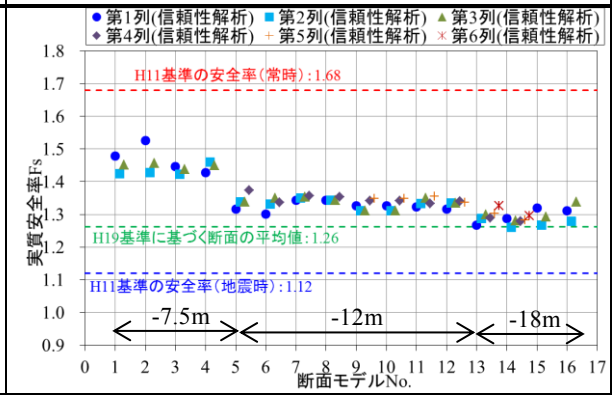
各検討断面の目標破壊確率における設計点は，目標破壊確率に相当する肉厚を有する杭の破壊点とする．目標破壊確率に相当する杭の肉厚は，各検討断面について肉厚を 0.1mm ずつ変化させ，目標破壊確率を下回る最小肉厚を求めることで算定した．したがって，厳密には目標破壊確率より僅かに小さい破壊確率となる杭諸元より部分係数を求めている．なお，全ての杭の肉厚ごとの破壊確率の推移と，各目標破壊確率に相当する杭の肉厚の算出結果は**附録 G** に記載する．

現行港湾基準に基づく断面の各杭，および目標破壊確率に相当する各杭の肉厚，実質安全率を**表-57** に示す．**図-40** に示したとおり，本検討では設計水深をターゲットとして目標破壊確率を設定している．このため，ターゲット設計水深と同じ設計水深を有する検討断面は，目標破壊確率に相当する杭と，現行港湾基準を満たす杭の肉厚はほぼ同一である．そして，断面の設計水深がターゲット設計水深から離れるほど，現行港湾基準に基づく断面の杭と目標破壊確率に相当する杭の肉厚の乖離が大きくなり，実質安全率も異なる値となる．

なお，現行港湾基準を満たす断面は，設計水深が小さい断面ほど破壊確率が増加することから，ターゲット設計水

深より設計水深が大きい断面の所要肉厚は現行港湾基準より小さくなり，実質安全率も低下する．しかしながら，ターゲット設計水深を-7.5m に設定しても，設計水深-18m における実質安全率は，断面や杭列により異なるが 1.07～1.12 である．これは，平成 11 年度基準の安全率 1.12(地震時相当)と比較して同等か僅かに下回る程度であり，過去の基準類と比較して特段に小さな実質安全率となることはない．

表-57　目標破壊確率に相当する杭の肉厚および実質安全率

目標破壊確率	現行港湾基準における杭の肉厚と目標破壊確率に相当する杭の肉厚	目標破壊確率に相当する杭の実質安全率
9.27×10^{-4} (ターゲット設計水深-7.5m)		
1.52×10^{-4} (ターゲット設計水深-12m)		
4.15×10^{-5} (ターゲット設計水深-18m)		

6.4. 部分係数の算定

前節に示した目標破壊確率に相当する各杭より，各検討断面における部分係数を求める．なお，部分係数の導出方法は以下のとおりとする．

γ = 設計値/特性値

(1)　部分係数のフォーマットの設定

部分係数のフォーマットについては，既に竹信ら[3)]がケーソン式岸壁の滑動・転倒照査のレベル 1 信頼性設計法を対象として，荷重抵抗係数アプローチと材料係数アプローチに関する両者の得失に関する整理と考察を行っており，地盤や基礎が関係する港湾構造物の全体安定性に対する照査に対しては，荷重抵抗係数アプローチによる部分係数法による設計法へ移行することを提案している．

本研究では，竹信ら[3)]に倣い，荷重抵抗係数アプローチによる部分係数を設定するが，比較のために材料係数アプローチに基づく部分係数についても検討する．したがって，検討する部分係数のフォーマットは**表-58** に示すとおりとし，材料係数アプローチについて 1 手法，荷重抵抗係数アプローチについて 2 手法を設定する．また，検討断面により杭列数が異なることから，本稿では，海側杭，陸側杭，中央杭群のそれぞれについて部分係数を整理する．

表-58　部分係数のフォーマット

手法名	部分係数を設定する変数	性能照査式
A	材料係数アプローチ ・水平力 H ・地盤反力係数 K_{CH1}，K_{CH2} ・杭の降伏強度 σ_{by}	骨組み解析 (信頼性解析では，応答曲面法による近似式により照査)
B	荷重抵抗係数アプローチ① ・軸力 N ・曲げモーメント M ・降伏強度 σ_{by}	$Z'=\sigma_{by}\text{-}(N/A/red+M/Z)$ A；杭の断面積 red；低減係数（表-46） Z；断面係数
C	荷重抵抗係数アプローチ② ・作用 S ・抵抗 R	$Z''=R-S$ (5.1 参照)

(2)　各検討断面における部分係数の算出結果

各検討断面において，目標破壊確率に相当する杭より算出した部分係数の分布を**表-59**，**表-60** に示す．

なお，各検討断面の部分係数は，目標破壊確率や杭列により異なる値を取るため，それぞれ分けて整理する．また，全断面における部分係数の算出結果およびその分布図は**附録 H** に記載する．

表-59　断面毎の部分係数(1)

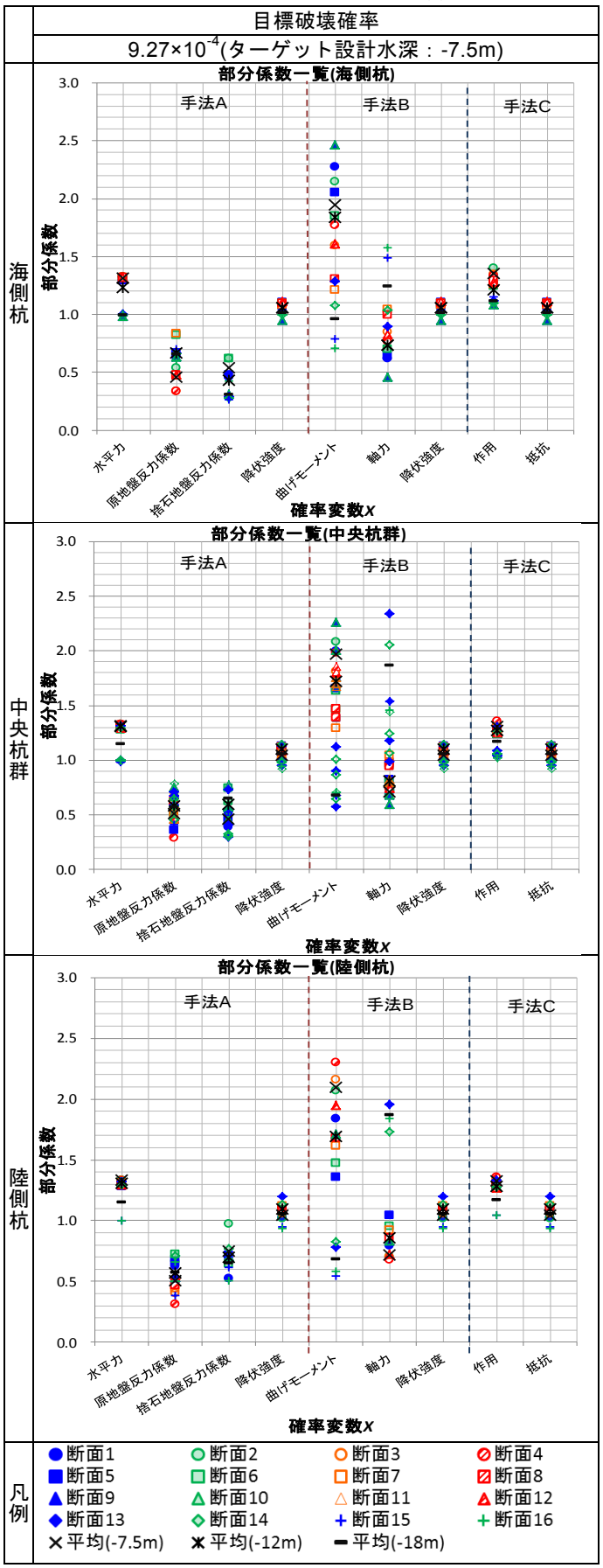
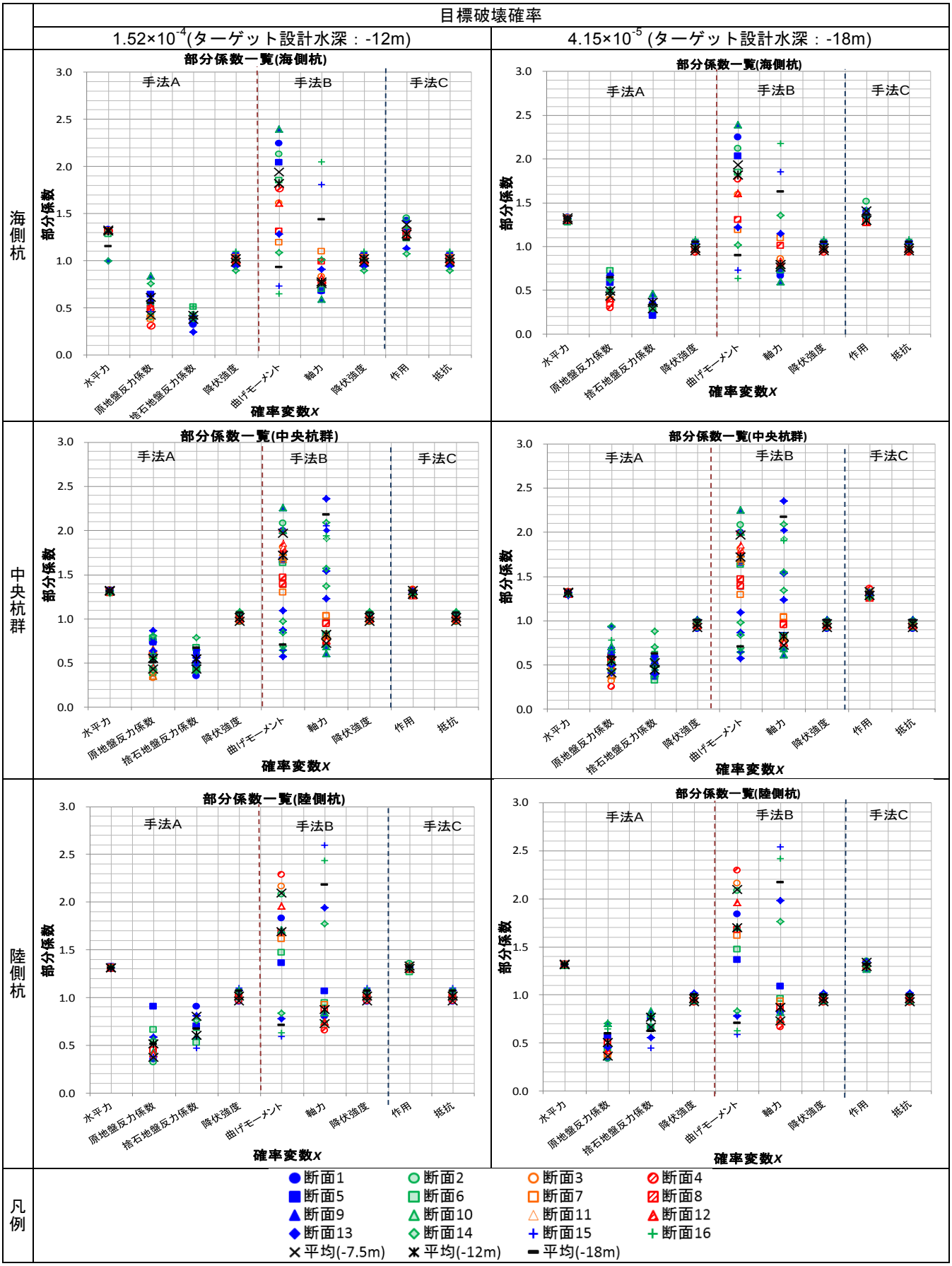


表-60　断面毎の部分係数(2)



(3) 部分係数のフォーマットの評価

表-59，**表-60** に示した部分係数を用いることで，各断面において目標破壊確率に相当する杭を求めることができる．しかしながら，**表-59**，**表-60** では，目標破壊確率や杭列が同一であっても，断面毎に各確率変数の部分係数が異なっており，杭の破壊確率を厳密に一定にするためには，設計条件により異なる部分係数を設定する必要があることが示される．逆に言うと，部分係数を設計条件に関わらず一定の値に設定すると，設計条件によっては杭の破壊確率が目標破壊確率から乖離することになる．

実用性を考慮すると，部分係数は可能な限り設計条件に関わらず一定であることが望ましい．このため，本項では設計条件の差異による影響を受けにくいフォーマットについて検討する．

比較の手法としては，**表-59**，**表-60** に示した部分係数について，断面や杭列によるばらつきを比較することで行う．各フォーマットの傾向は以下のとおりである．

a) 手法 A(材料係数アプローチ)

手法 A は材料係数アプローチにより設定した部分係数であり，現行港湾基準と同様の部分係数フォーマットである．

目標破壊確率における部分係数を整理すると，水平力および降伏強度に係る部分係数は，断面毎の差が小さいものの，地盤反力係数に係る部分係数は，断面毎に大きく異なっている．これは，**図-41** に示すように，検討断面が捨石基礎を有するか否かにより，原地盤の地盤反力係数に係る部分係数に差異が生じるためである．したがって，材料係数アプローチにより部分係数を設定する場合は，捨石基礎による海底勾配の有無により，破壊確率が大きく変化する可能性があるといえる．

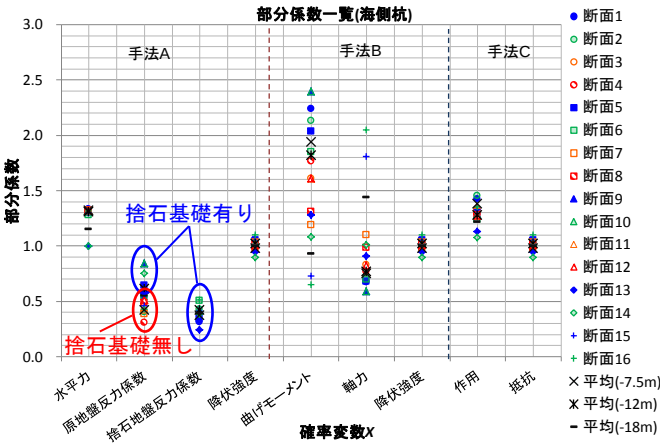


図-41 手法 A における部分係数のバラツキ
(目標破壊確率 1.52×10^{-4}，ターゲット設計水深-12m)

また，設計水深および杭列ごとに部分係数を平均すると，**表-61**，**表-62** に示すとおりとなるが，設計水深だけでなく，杭列によっても地盤反力係数に係る部分係数がばらついている．

表-61 設計水深ごとの部分係数
(基礎捨石あり，目標破壊確率 1.52×10^{-4})

設計水深	杭列	手法A			
		水平力	原地盤反力係数	捨石地盤反力係数	降伏強度
-7.5m (捨石あり)	海側杭	1.32	0.47	0.37	1.00
	中央杭群	1.32	0.51	0.43	0.97
	陸側杭	1.31	0.34	0.80	0.96
	平均値	1.32	0.44	0.53	0.98
-12m (捨石あり)	海側杭	1.30	0.71	0.42	1.03
	中央杭群	1.19	0.54	0.49	0.92
	陸側杭	1.31	0.60	0.60	1.01
	平均値	1.27	0.62	0.50	0.99
-18m (捨石あり)	海側杭	1.15	0.55	0.39	1.00
	中央杭群	1.31	0.64	0.53	1.06
	陸側杭	1.32	0.52	0.68	1.08
	平均値	1.26	0.57	0.53	1.05

表-62 設計水深ごとの部分係数
(基礎捨石なし，目標破壊確率 1.52×10^{-4})

設計水深	杭列	手法A			
		水平力	原地盤反力係数	捨石地盤反力係数	降伏強度
-7.5m (捨石なし)	海側杭	1.32	0.36	-	0.97
	中央杭群	1.32	0.35	-	0.97
	陸側杭	1.32	0.41	-	0.96
	平均値	1.32	0.38	-	0.97
-12m (捨石なし)	海側杭	1.31	0.51	-	1.01
	中央杭群	1.31	0.51	-	1.01
	陸側杭	1.31	0.42	-	1.02
	平均値	1.31	0.48	-	1.01

b) 手法 B(荷重抵抗係数アプローチ①)

手法 B は，荷重抵抗係数アプローチによる部分係数フォーマットであり，骨組み解析の出力値である曲げモーメントおよび軸力を作用とし，杭の降伏強度を抵抗としたものである．

表-59，**表-60** より，手法 B により部分係数を構築すると，曲げモーメントおよび軸力の部分係数が検討断面ごとに大きくばらつくことがわかる．これは，**2.4 接岸力の増加に対する性能照査値の変化**に示したとおり，性能照査値は同値であっても，検討断面毎に曲げ圧縮応力度比と軸方向圧縮応力度比が異なることによる．各検討断面における曲げ圧縮応力度比と軸方向圧縮応力度比の比率は，杭列数や杭間距離，設計水深，海底勾配などにより全く異なるため，この手法に基づいて部分係数を構築すると，設計条件により破壊確率が大きく異なる可能性があるといえる．

c) 手法 C(荷重抵抗係数アプローチ②)

手法 C は，荷重抵抗係数アプローチによる部分係数フォーマットであり，部分係数を作用 S と抵抗 R に取りまとめて設定したものである．

表-59，**表-60** より，手法 C により部分係数を構築すると，検討断面毎の部分係数のばらつきが比較的小さいことが確認できる．手法 B においては，作用側である曲げモーメントおよび軸力の部分係数が大きくばらついたが，本手法のように性能照査値として評価すると，検討断面毎の部分係数のばらつきが抑えられるようである．

また，設計水深および杭列ごとに部分係数を平均すると，目標破壊確率ごとに**表-63**～**表-65** に示すとおりとなるが，設計水深については部分係数を区分する必要があるものの，杭列については部分係数にほとんど差異が無いため，杭列間の平均値を部分係数として採用することが可能である．

表-63　設計水深ごとの部分係数

(目標破壊確率 9.27×10^{-4}，ターゲット設計水深-7.5m)

設計水深	杭列	手法C		
		作用γ_S	抵抗γ_R	γ_S/γ_R
-7.5m	海側杭	1.35	1.06	1.28
	中央杭群	1.31	1.04	1.25
	陸側杭	1.32	1.04	1.27
	平均値	1.33	1.05	1.27
-12m	海側杭	1.21	1.05	1.15
	中央杭群	1.27	1.10	1.16
	陸側杭	1.28	1.09	1.17
	平均値	1.25	1.08	1.16
-18m	海側杭	1.11	1.01	1.10
	中央杭群	1.09	1.00	1.10
	陸側杭	1.17	1.05	1.11
	平均値	1.12	1.02	1.10

表-64　設計水深ごとの部分係数

(目標破壊確率 1.52×10^{-4}，ターゲット設計水深-12m)

設計水深	杭列	手法C		
		作用γ_S	抵抗γ_R	γ_S/γ_R
-7.5m	海側杭	1.38	0.98	1.41
	中央杭群	1.32	0.97	1.36
	陸側杭	1.33	0.96	1.39
	平均値	1.34	0.97	1.38
-12m	海側杭	1.28	1.02	1.25
	中央杭群	1.28	1.01	1.27
	陸側杭	1.30	1.01	1.29
	平均値	1.29	1.01	1.28
-18m	海側杭	1.22	1.00	1.22
	中央杭群	1.29	1.06	1.22
	陸側杭	1.32	1.07	1.23
	平均値	1.28	1.04	1.23

表-65　設計水深ごとの部分係数

(目標破壊確率 4.15×10^{-5}，ターゲット設計水深-18m)

設計水深	杭列	手法C		
		作用γ_S	抵抗γ_R	γ_S/γ_R
-7.5m	海側杭	1.40	0.95	1.47
	中央杭群	1.32	0.92	1.43
	陸側杭	1.34	0.92	1.45
	平均値	1.35	0.93	1.45
-12m	海側杭	1.30	0.98	1.32
	中央杭群	1.28	0.96	1.33
	陸側杭	1.29	0.96	1.35
	平均値	1.29	0.97	1.34
-18m	海側杭	1.36	1.05	1.30
	中央杭群	1.29	1.00	1.28
	陸側杭	1.32	1.00	1.31
	平均値	1.32	1.02	1.30

d) フォーマットの評価結果

上述の検討より，断面毎の部分係数のばらつきは，手法 C(荷重抵抗係数アプローチ②)が最も小さく，設計条件の差異による影響を受けにくいフォーマットであるといえる．

(4) 設計水深ごとの部分係数の設定

前述したとおり，本稿では部分係数のフォーマットを手法 C(荷重抵抗係数アプローチ②)とした．このフォーマットにおいては，部分係数は設計水深にのみ区分され，目標破壊確率毎に**表-66**～**表-68** に示すとおりとなる．

表-66　設計水深ごとの部分係数

(目標破壊確率 9.27×10^{-4}，ターゲット設計水深-7.5m)

設計水深	作用γ_S	抵抗γ_R	γ_S/γ_R
-7.5m	1.33	1.05	1.27
-12m	1.25	1.08	1.16
-18m	1.12	1.02	1.10

表-67　設計水深ごとの部分係数

(目標破壊確率 1.52×10^{-4}，ターゲット設計水深-12m)

設計水深	作用γ_S	抵抗γ_R	γ_S/γ_R
-7.5m	1.34	0.97	1.38
-12m	1.29	1.01	1.28
-18m	1.28	1.04	1.23

表-68　設計水深ごとの部分係数

(目標破壊確率 4.15×10^{-5}，ターゲット設計水深-18m)

設計水深	作用γ_S	抵抗γ_R	γ_S/γ_R
-7.5m	1.35	0.93	1.45
-12m	1.29	0.97	1.34
-18m	1.32	1.02	1.30

6.5. 部分係数の提案

前節において，目標破壊確率毎の部分係数を設定した．本節では，目標破壊確率毎の部分係数の得失を比較し，いずれの目標破壊確率を採用することが最も適切であるか検討する．また，前節まででは，設計水深を-7.5m，-12m，-18m とした場合の部分係数を構築したが，これ以外の設計水深については検討していない．このため，部分係数の適用範囲についても検討する．

(1)　目標破壊確率の選定

目標破壊確率毎の作用および抵抗の部分係数の比(γ_S/γ_R，以下，部分係数比とする)を**表-70** に示す．なお，部分係数比 γ_S/γ_R は，設計点における作用 S と抵抗 R の比であり，杭縁部の降伏限界に対する余裕と考えて良い．このため，部分係数比 γ_S/γ_R は，現行港湾基準に基づく断面の実質安全率や，安全率法における安全率との比較指標として用いることが可能である．

目標破壊確率は設計水深をターゲットとして設定しているため，ターゲット設計水深において部分係数比 γ_S/γ_R は現行港湾基準の実質安全率と同程度となり，杭の所要肉厚も同程度となる．また，ターゲット設計水深より浅い断面では所要肉厚は大きくなり，深い断面では所要肉厚は小さくなる．これを踏まえた上で，過去の基準における安全率と比較することで，各目標破壊確率の得失を以下に整理する．

a) 目標破壊確率 9.27×10^{-4}(ターゲット設計水深-7.5m)

浅水深での係船岸構築においては，一般的に桟橋式より矢板式が経済性に優位となるため， 7.5m 未満の設計水深を有する直杭式横桟橋の施工事例はさほど多くない．

したがって，ターゲット設計水深を-7.5m とすると，ほとんどの直杭式横桟橋の所要肉厚は，現行港湾基準より小さくなり，特に設計水深が大きい断面では，現行港湾基準との乖離が大きくなる．ただし，設計水深が大きい断面であっても，部分係数比 γ_S/γ_R は 1.10 であり，平成 11 年度港湾基準の安全率 1.12(地震時相当)とほぼ同程度の安全性水準である(**表-70**). 船舶接岸力により杭が破壊した事例が皆無であることを考慮すると，ターゲット設計水深を-7.5m とし，大水深の横桟橋の船舶接岸力に対する実質安全率が平成 11 年度港湾基準と同程度となったとしても，大きな問題は生じ得ないと考えられる．

ただし，老平ら [10] は，平成 4 年までの直杭式横桟橋の設計事例 105 例において，船舶接岸力により断面諸元が決定された設計事例は全体の 26%に過ぎないとしている(**図-42**). したがって，多くの既往の直杭式横桟橋は船舶接岸力に対して基準以上の安全率を有しており，船舶接岸力により杭が破壊した事例がないことが，過去の基準の船舶接岸力に対する安全性水準が過大なものであることを示すわけではない．

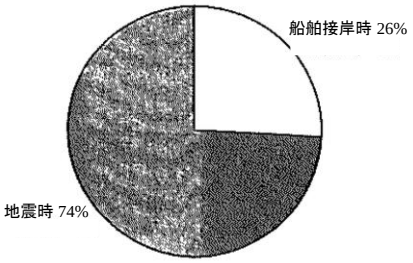


図-42　杭の断面応力度の決定条件

b) 目標破壊確率 1.52×10^{-4}(ターゲット設計水深-12m)

横桟橋式係船岸の一般的な設計水深は-9m～-15m 程度と考えられ，ターゲット設計水深-12m は，直杭式横桟橋において一般的な設計水深である．

村上ら [8]は，貨物船におけるカバー率別の接岸速度と船型の関係を**図-43** のように示している．この関係図では，船舶質量が概ね 18,000DWT(満載喫水 9.8m)を下回ると，現行港湾基準において一般的な設計接岸速度である 0.10m/s のカバー率が 95%以下となり，超過確率が高くなることを示している．また，浅水深の岸壁においては，接岸速度が急激に増加することが示されている．一方で，本検討では，設計水深-7.5m 未満の直杭式横桟橋について部分係数を検討しておらず，実用上は-7.5m での部分係数を準用せざるを得ない．

浅水深の岸壁では接岸速度が急激に増加することや，実用上は，設計水深が-7.5m 未満の断面であっても，設計水深-7.5m で設定した部分係数を準用せざるを得ないことを踏まえると，浅水深において安全性水準を高く設定する必要がある．したがって，ターゲット設計水深を-12m とし，一般的な設計水深では現行港湾基準と同等の安全性水準を保ちつつ，浅い設計水深では安全性水準を高くすることは，比較的適切な設定といえる．

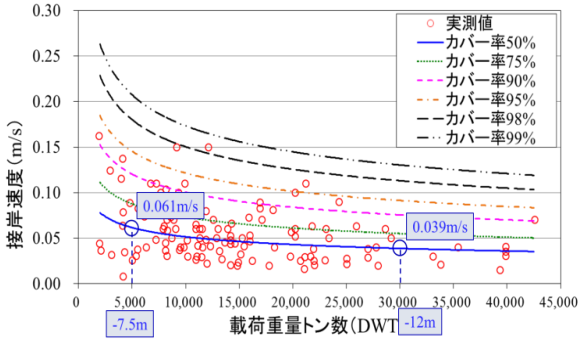


図-43　カバー率別の接岸速度と船型の関係（貨物船）

c) 目標破壊確率 4.15×10^{-5}（ターゲット設計水深-18m）

18m 以上の設計水深を有する直杭式横桟橋の施工事例は非常に少ない．したがって，ターゲット設計水深-18m は直杭式横桟橋のほぼ上限値であり，ほとんどの直杭式横桟橋の所要肉厚は，現行港湾基準より大きくなり，最も安全側に見込んだ部分係数となる．

しかしながら，施工事例が僅少な設計水深をターゲットとし，より一般的な設計水深の横桟橋に大きな安全性水準を見込むことは，船舶接岸力により破壊した杭の事例が存在しない現状において妥当性を欠くといえる．

d) 目標破壊確率の選定

上述の検討より，ターゲット設計水深は-12m とすることが最も妥当性を有すると判断し，目標破壊確率は 1.52×10^{-4} とした．

(2) 部分係数の適用範囲の検討

本検討では，特定の設計水深のみ部分係数を算定したため，設計水深に対する部分係数の適用範囲を検討する．

検討対象としなかった設計水深の部分係数は，安全側に設定することが適切である．ただし，設計水深を-18m とした直杭式横桟橋の施工事例がほとんどないことを踏まえると，本検討で算出した-18m 断面の部分係数を採用することは適切ではない．したがって，部分係数の適用範囲は**表-69**，**図-44** に提案したとおりとすることが適切であろう．

表-69　部分係数の適用範囲

(目標破壊確率 1.52×10^{-4}，ターゲット設計水深-12m)

設計水深	作用	抵抗	部分係数比 γS/γR
-7.5m～-12m	1.34	0.97	1.38
-12m 以深	1.29	1.01	1.28

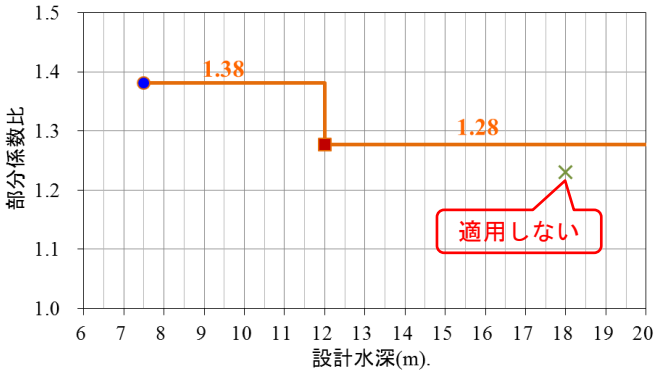
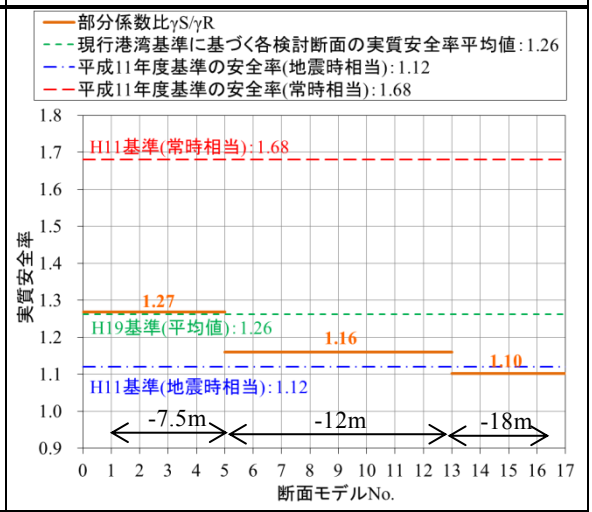
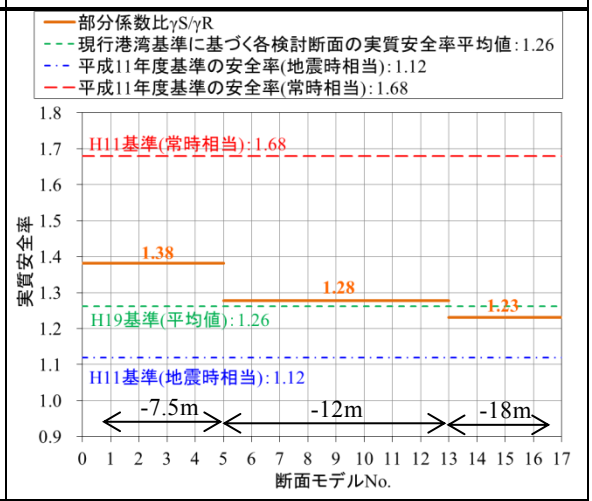
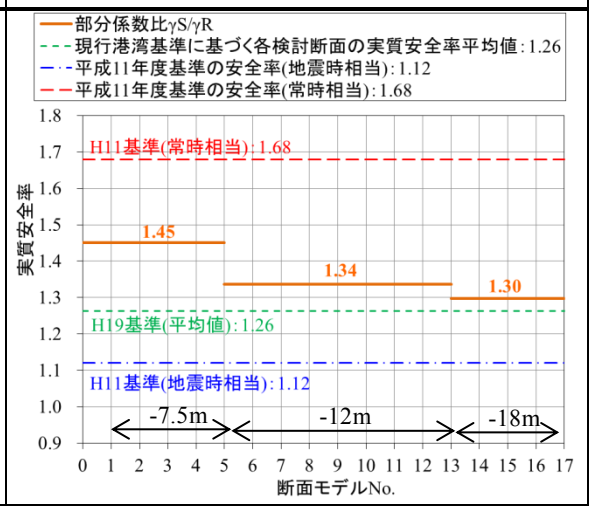


図-44　部分係数の適用範囲

(目標破壊確率 1.52×10^{-4}，ターゲット設計水深-12m)

表-70　各断面の部分係数比

目標破壊確率	各断面の部分係数比 γ_S/γ_R
9.27×10^{-4} (ターゲット設計水深-7.5m)	
1.52×10^{-4} (ターゲット設計水深-12m)	
4.15×10^{-5} (ターゲット設計水深-18m)	

6.6. 提案した部分係数による試設計

表-69 で提案した部分係数に基づき，各検討断面に対し骨組み解析による試設計を行う．すなわち，提案した部分係数に基づいて各杭の所要肉厚を算出し，その肉厚における杭の破壊確率や信頼性指標，実質安全率を求めることで，試設計に基づく断面と現行港湾基準に基づく断面とを比較する．

なお，試設計では市販の骨組み解析ソフトを用いるが，当然ながらこれらの骨組み解析ソフトでは，従来の材料係数アプローチによる部分係数を前提としており，荷重抵抗係数アプローチに基づく部分係数は設定できない．このため，試設計においては，杭応力の照査における部分係数を全て 1.0 とし，出力した帳票より荷重 S および抵抗 R を再計算し，それらに部分係数 γ_S，γ_R を乗じることで，杭の応力を照査する．また，試設計による断面の破壊確率を厳密に算出するためには，試設計断面の各杭について応答曲面法を用いた発生部材力に関する近似式を作成し，信頼性解析を行う必要があるが，本検討では **6.3 目標破壊確率における設計点の算定**と同様に，現行港湾基準に基づく断面に対し作成した近似式を用いて試設計断面の破壊確率を算出する．

試設計における各杭の所要肉厚や破壊確率，信頼性指標，実質安全率は**表-71** に示すとおりであり，それぞれの傾向を以下に示す．

(1) 所要肉厚

試設計および現行港湾基準における各断面の杭肉厚を**図-45** に示す．

本稿で提案した部分係数は，断面⑤～⑫の各杭の破壊確率平均値を目標破壊確率としている．このため，これらの断面では試設計と現行港湾基準とで，所要肉厚はほとんど変化しない．また，断面⑬～⑯の部分係数も断面⑤～⑫と同一であるため，試設計と現行港湾基準とでは肉厚に大きな変化は生じない．

ただし，試設計の所要肉厚は現行港湾基準より大きくなる傾向が見られる．これは，部分係数を設定する際に，目標破壊確率を下回る最小肉厚を目標破壊確率相当の肉厚と定義したことや，部分係数を小数点第 2 位で端数切りしたことによる．なお，この傾向は特に海側杭で顕著である．

一方で，設計水深が浅い断面①～④は所要肉厚が 1～2mm 程度大きくなる．

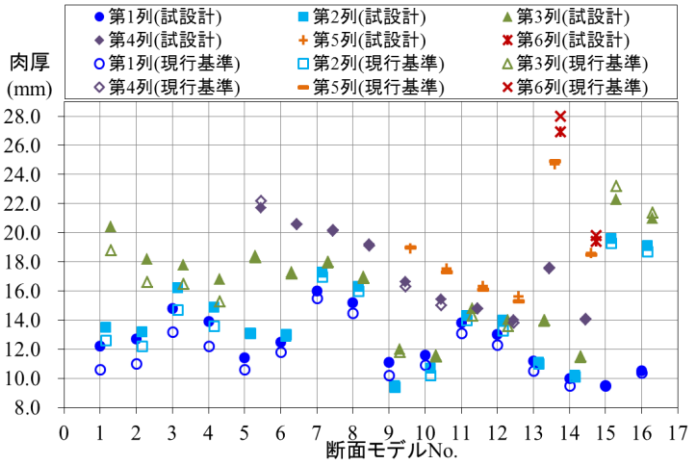


図-45 試設計および現行港湾基準での杭肉厚

(2) 破壊確率，信頼性指標

試設計における各断面，杭列の破壊確率や信頼性指標は**図-46**，**図-47** に示すとおりである．

部分係数は，部分係数法に基づき設定された断面の破壊確率が，目標破壊確率と一致するように設定するが，**図-46** より，ほぼ全ての断面や杭列において，試設計断面の破壊確率は目標破壊確率を下回ることが確認できる．これは，前述したとおり，部分係数を設定する際に，目標破壊確率を下回る最小肉厚を目標破壊確率相当の肉厚と定義したことや，部分係数を小数点第 2 位で端数切りしたことにより，全体的に所要肉厚が現行港湾基準から増加したためである．特に海側杭は目標破壊確率からの乖離が大きく，僅かな部分係数の差が所要肉厚や破壊確率に大きく影響している．

なお，**図-44** に示したように，本検討では部分係数の適用範囲を-7.5m～-12m，-12m 以深の 2 区分としており，それぞれ設計水深-7.5m，-12m での部分係数を適用している．このため，断面⑬～⑯(設計水深-18m)の破壊確率は，目標破壊確率より小さい値となる．同様に設計水深が本検討の対象水深である-7.5m，-12m と異なると，提案した部分係数に基づいて設定される断面の破壊確率は，目標破壊確率より小さな値を取る．

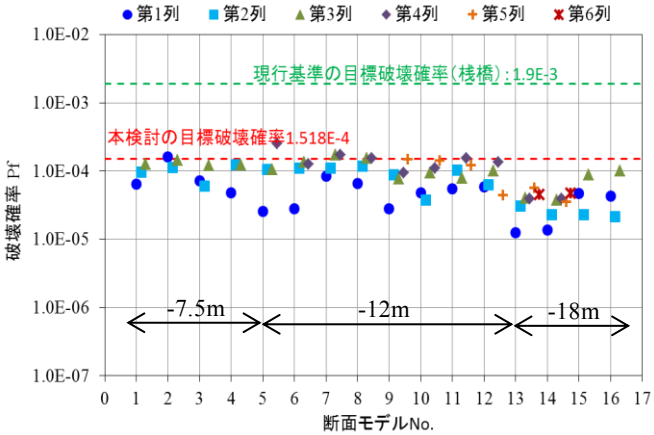


図-46　試設計断面の破壊確率

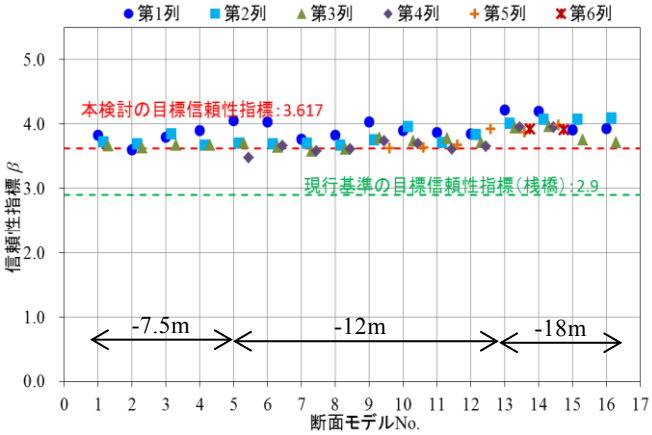


図-47　試設計断面の信頼性指標

(3)　実質安全率

試設計に基づく断面の実質安全率を図-48 に示す．荷重抵抗係数アプローチでは，実質安全率(Fs=R/S)と部分係数比 γ_S/γ_R は一致するため，図-48 でも各断面の実質安全率と部分係数比 γ_S/γ_R は同値となっている．

本来であれば，各検討断面において目標破壊確率に相当する杭の部分係数は，表-59，表-60 に示したように，設計条件や杭列により異なる値を取る．つまり，各断面の破壊確率を厳密に一致させるためには，断面や杭列毎に異なる部分係数を設定する必要があるが，本稿では設計者の利便を図るために，設計条件や杭列に関わらず，部分係数を設計水深ごとに同値としている．このため，試設計に基づく断面は，実質安全率については図-48 に示すように同値となる一方で，破壊確率については図-46 に示したように断面や杭列により差が生じている．

なお，下に示すように，荷重抵抗係数アプローチ②の性能関数における荷重 S や抵抗 R は，現行港湾基準の性能照査値($\sigma_c/\sigma_{cy}+\sigma_{bc}/\sigma_{by}$)における荷重や抵抗とは異なる概念である(5.1 性能照査式に詳述).

現行港湾基準の性能照査式

$$\sigma_c/\sigma_{cy}+\sigma_{bc}/\sigma_{by}\leq 1 \qquad (5.1\ 再掲)$$

本検討における性能関数

$$Z''=\sigma_{by}-(\sigma_c/red+\sigma_{bc})\geq 0$$
$$=R-S\geq 0 \qquad (5.3\ 再掲)$$

このため，現在市販の横桟橋の骨組み解析ソフトから性能関数 Z”を算出するためには，解析結果に基づいて，荷重 S や抵抗 R を再算出する必要がある．

しかしながら，表-71 に示すように，試設計断面の荷重と抵抗の比 S/R は，部分係数比の逆数(γ_R/γ_S)や現行港湾基準における性能照査値($\sigma_c/\sigma_{cy}+\sigma_{bc}/\sigma_{by}$)とほぼ一致する．実務上は杭の肉厚を 1mm 刻みで設計することを踏まえると，現行港湾基準の性能照査値($\sigma_c/\sigma_{cy}+\sigma_{bc}/\sigma_{by}$)と部分係数比の逆数($\gamma_R/\gamma_S$)から性能照査を行っても，大きな問題は生じないといえる．

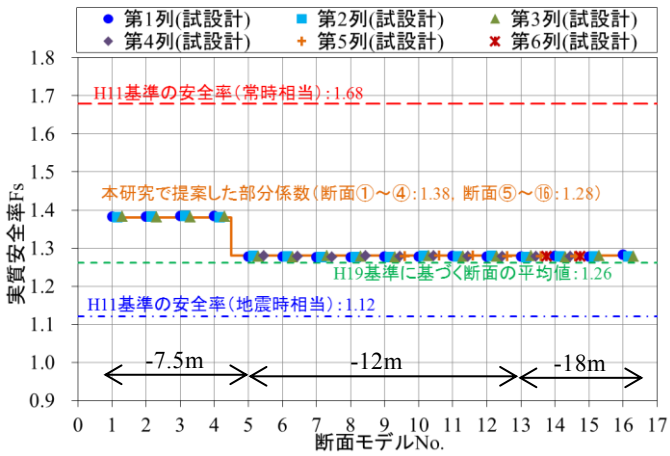


図-48　試設計断面の実質安全率

表-71　試設計結果一覧

断面モデル	杭列	杭径 (mm)	現行港湾基準				試設計：荷重抵抗係数アプローチ									
			肉厚 (mm)	破壊確率 P_f	信頼性指標 β	実質安全率 Fs=R/S	肉厚 (mm)	S/R	性能照査値 σc/σcy ＋σbc/σby	作用部分係数 γ_S	抵抗部分係数 γ_R	部分係数比の逆数 γ_R/γ_S	$\gamma_S S/\gamma_R R$	実質安全率 Fs=R/S	破壊確率 P_f	信頼性指標 β
①	1列目	600	10.6	1.116E-03	3.0575	1.255	12.2	0.723	0.724	1.34	0.97	0.724	0.999	1.382	6.427E-05	3.8292
	2列目	600	12.6	4.668E-04	3.3098	1.274	13.5	0.724	0.724	1.34	0.97	0.724	1.000	1.382	9.711E-05	3.7264
	3列目	600	18.8	6.936E-04	3.1973	1.282	20.4	0.723	0.723	1.34	0.97	0.724	0.999	1.383	1.244E-04	3.6634
②	1列目	600	11.0	2.628E-03	2.7909	1.246	12.7	0.723	0.723	1.34	0.97	0.724	0.999	1.383	1.598E-04	3.5989
	2列目	600	12.2	6.492E-04	3.2163	1.263	13.2	0.723	0.723	1.34	0.97	0.724	0.999	1.383	1.113E-04	3.6919
	3列目	600	16.6	9.706E-04	3.0991	1.267	18.2	0.724	0.724	1.34	0.97	0.724	1.000	1.382	1.424E-04	3.6287
③	1列目	600	13.2	8.535E-04	3.1370	1.263	14.8	0.722	0.722	1.34	0.97	0.724	0.998	1.385	7.255E-05	3.7993
	2列目	600	14.7	5.081E-04	3.2860	1.273	16.2	0.722	0.722	1.34	0.97	0.724	0.998	1.384	6.059E-05	3.8437
	3列目	600	16.5	6.053E-04	3.2364	1.278	17.8	0.724	0.724	1.34	0.97	0.724	1.000	1.382	1.192E-04	3.6745
④	1列目	600	12.2	9.073E-04	3.1190	1.248	13.9	0.723	0.723	1.34	0.97	0.724	0.998	1.384	4.817E-05	3.8996
	2列目	600	13.6	8.692E-04	3.1316	1.259	14.9	0.724	0.724	1.34	0.97	0.724	1.000	1.381	1.224E-04	3.6677
	3列目	600	15.3	8.522E-04	3.1374	1.266	16.8	0.723	0.723	1.34	0.97	0.724	0.999	1.383	1.223E-04	3.6678
⑤	1列目	700	10.6	1.316E-04	3.6490	1.243	11.4	0.782	0.782	1.29	1.01	0.783	0.999	1.278	2.582E-05	4.0481
	2列目	700	13.1	1.037E-04	3.7099	1.264	13.1	0.782	0.782	1.29	1.01	0.783	0.998	1.279	1.057E-04	3.7049
	3列目	700	18.3	1.145E-04	3.6847	1.273	18.4	0.782	0.782	1.29	1.01	0.783	0.999	1.278	1.062E-04	3.7038
	4列目	700	22.2	1.614E-04	3.5963	1.284	21.7	0.782	0.782	1.29	1.01	0.783	0.999	1.279	2.517E-04	3.4789
⑥	1列目	700	11.8	1.034E-04	3.7105	1.248	12.5	0.783	0.783	1.29	1.01	0.783	1.000	1.277	2.805E-05	4.0286
	2列目	700	13.0	9.532E-05	3.7311	1.263	12.9	0.782	0.782	1.29	1.01	0.783	0.999	1.278	1.110E-04	3.6925
	3列目	700	17.2	1.558E-04	3.6055	1.267	17.3	0.783	0.783	1.29	1.01	0.783	1.000	1.277	1.340E-04	3.6444
	4列目	700	20.6	1.207E-04	3.6713	1.271	20.6	0.783	0.783	1.29	1.01	0.783	1.000	1.278	1.246E-04	3.6631
⑦	1列目	700	15.5	1.610E-04	3.5969	1.257	16.0	0.783	0.783	1.29	1.01	0.783	1.000	1.277	8.374E-05	3.7636
	2列目	700	17.0	1.541E-04	3.6083	1.264	17.3	0.783	0.783	1.29	1.01	0.783	1.000	1.277	1.088E-04	3.6977
	3列目	700	18.0	1.509E-04	3.6137	1.270	17.9	0.782	0.783	1.29	1.01	0.783	0.998	1.279	1.716E-04	3.5803
	4列目	700	20.2	1.501E-04	3.6152	1.274	20.1	0.783	0.783	1.29	1.01	0.783	1.000	1.277	1.737E-04	3.5771
⑧	1列目	700	14.5	1.804E-04	3.5673	1.245	15.2	0.783	0.783	1.29	1.01	0.783	1.000	1.277	6.638E-05	3.8213
	2列目	700	16.0	1.756E-04	3.5743	1.254	16.3	0.783	0.783	1.29	1.01	0.783	1.000	1.277	1.187E-04	3.6754
	3列目	700	16.9	1.678E-04	3.5862	1.261	17.0	0.782	0.782	1.29	1.01	0.783	0.999	1.278	1.525E-04	3.6111
	4列目	700	19.1	1.681E-04	3.5856	1.265	19.2	0.782	0.782	1.29	1.01	0.783	0.999	1.279	1.534E-04	3.6095
⑨	1列目	700	10.2	1.803E-04	3.5674	1.225	11.1	0.783	0.783	1.29	1.01	0.783	1.000	1.278	2.803E-05	4.0288
	2列目	700	9.4	1.142E-04	3.6853	1.243	9.5	0.783	0.783	1.29	1.01	0.783	1.000	1.277	8.817E-05	3.7507
	3列目	700	11.8	1.102E-04	3.6944	1.253	12.0	0.783	0.783	1.29	1.01	0.783	1.000	1.277	7.694E-05	3.7847
	4列目	700	16.3	1.414E-04	3.6306	1.259	16.6	0.783	0.783	1.29	1.01	0.783	1.000	1.278	9.458E-05	3.7331
	5列目	700	19.0	1.306E-04	3.6511	1.267	18.9	0.782	0.782	1.29	1.01	0.783	0.999	1.278	1.464E-04	3.6215
⑩	1列目	700	10.9	1.942E-04	3.5478	1.227	11.6	0.782	0.782	1.29	1.01	0.783	0.999	1.278	4.778E-05	3.9016
	2列目	700	10.2	1.083E-04	3.6989	1.239	10.7	0.782	0.782	1.29	1.01	0.783	0.998	1.279	3.722E-05	3.9617
	3列目	700	11.5	1.132E-04	3.6876	1.247	11.6	0.782	0.782	1.29	1.01	0.783	0.999	1.279	9.400E-05	3.7346
	4列目	700	15.0	1.857E-04	3.5596	1.250	15.4	0.781	0.781	1.29	1.01	0.783	0.998	1.280	1.101E-04	3.6946
	5列目	700	17.3	1.771E-04	3.5721	1.254	17.5	0.782	0.782	1.29	1.01	0.783	0.998	1.279	1.413E-04	3.6307
⑪	1列目	700	13.1	1.614E-04	3.5962	1.242	13.8	0.782	0.782	1.29	1.01	0.783	0.998	1.280	5.465E-05	3.8690
	2列目	700	14.0	1.633E-04	3.5933	1.246	14.3	0.783	0.783	1.29	1.01	0.783	1.000	1.278	1.024E-04	3.7130
	3列目	700	14.3	1.544E-04	3.6077	1.252	14.8	0.782	0.783	1.29	1.01	0.783	0.999	1.278	7.895E-05	3.7783
	4列目	700	14.8	1.535E-04	3.6093	1.257	14.8	0.783	0.783	1.29	1.01	0.783	1.000	1.277	1.554E-04	3.6060
	5列目	700	16.1	1.565E-04	3.6044	1.258	16.3	0.782	0.782	1.29	1.01	0.783	0.999	1.279	1.204E-04	3.6719
⑫	1列目	700	12.3	1.975E-04	3.5435	1.228	13.0	0.783	0.783	1.29	1.01	0.783	1.000	1.277	5.874E-05	3.8513
	2列目	700	13.3	1.898E-04	3.5539	1.235	14.0	0.781	0.782	1.29	1.01	0.783	0.998	1.280	6.235E-05	3.8367
	3列目	700	13.6	1.771E-04	3.5720	1.242	14.0	0.782	0.782	1.29	1.01	0.783	0.999	1.279	1.012E-04	3.7160
	4列目	700	13.8	1.806E-04	3.5670	1.244	14.0	0.783	0.783	1.29	1.01	0.783	1.000	1.278	1.335E-04	3.6453
	5列目	700	15.3	1.807E-04	3.5668	1.246	15.6	0.783	0.783	1.29	1.01	0.783	1.000	1.277	4.401E-05	3.9214
⑬	1列目	900	10.5	5.013E-05	3.8900	1.255	11.2	0.782	0.782	1.29	1.01	0.783	0.999	1.279	1.242E-05	4.2163
	2列目	900	11.0	3.654E-05	3.9660	1.272	11.1	0.783	0.783	1.29	1.01	0.783	1.000	1.277	3.074E-05	4.0071
	3列目	900	14.0	3.354E-05	3.9864	1.283	13.9	0.782	0.782	1.29	1.01	0.783	0.999	1.279	4.015E-05	3.9435
	4列目	900	17.6	3.383E-05	3.9844	1.291	17.5	0.782	0.783	1.29	1.01	0.783	0.999	1.278	3.916E-05	3.9495
	5列目	900	24.9	4.572E-05	3.9123	1.289	24.7	0.782	0.782	1.29	1.01	0.783	0.999	1.279	5.618E-05	3.8622
	6列目	900	28.0	4.342E-05	3.9247	1.298	26.9	0.782	0.783	1.29	1.01	0.783	0.999	1.278	4.461E-05	3.9182
⑭	1列目	1,000	9.5	4.373E-05	3.9230	1.257	10.0	0.781	0.782	1.29	1.01	0.783	0.998	1.280	1.366E-05	4.1947
	2列目	1,000	10.1	2.849E-05	4.0250	1.268	10.2	0.783	0.783	1.29	1.01	0.783	1.000	1.277	2.279E-05	4.0772
	3列目	1,000	11.5	2.972E-05	4.0150	1.277	11.4	0.783	0.783	1.29	1.01	0.783	1.000	1.277	3.762E-05	3.9591
	4列目	1,000	14.1	3.316E-05	3.9891	1.283	14.0	0.783	0.783	1.29	1.01	0.783	1.000	1.278	3.955E-05	3.9471
	5列目	1,000	18.5	3.924E-05	3.9490	1.276	18.6	0.783	0.783	1.29	1.01	0.783	1.000	1.277	3.511E-05	3.9756
	6列目	1,000	19.8	4.816E-05	3.8997	1.285	19.4	0.783	0.783	1.29	1.01	0.783	1.000	1.278	4.732E-05	3.9039
⑮	1列目	1,300	9.5	4.771E-05	3.9020	1.281	9.5	0.783	0.783	1.29	1.01	0.783	1.000	1.278	4.677E-05	3.9068
	2列目	1,300	19.3	3.368E-05	3.9854	1.277	19.6	0.782	0.782	1.29	1.01	0.783	0.999	1.279	2.268E-05	4.0783
	3列目	1,300	23.2	3.866E-05	3.9525	1.293	22.3	0.781	0.781	1.29	1.01	0.783	0.998	1.280	8.825E-05	3.7505
⑯	1列目	1,300	10.4	5.490E-05	3.8679	1.283	10.5	0.779	0.779	1.29	1.01	0.783	0.995	1.283	4.334E-05	3.9252
	2列目	1,300	18.7	3.726E-05	3.9614	1.272	19.1	0.782	0.782	1.29	1.01	0.783	0.999	1.279	2.148E-05	4.0910
	3列目	1,300	21.4	6.903E-05	3.8116	1.280	21.0	0.782	0.782	1.29	1.01	0.783	0.999	1.278	1.012E-04	3.7159
	平均値 −7.5m	海側杭	11.8	1.376E-03	3.0261	1.253	13.4	0.723	0.723	1.34	0.97	0.724	0.999	1.384	8.619E-05	3.7818
		中央杭群	13.3	6.233E-04	3.2359	1.267	14.5	0.723	0.723	1.34	0.97	0.724	0.999	1.383	9.784E-05	3.7324
		陸側杭	16.8	7.804E-04	3.1676	1.273	18.3	0.723	0.724	1.34	0.97	0.724	0.999	1.382	1.271E-04	3.6586
	平均値 −12m	海側杭	12.4	1.637E-04	3.5973	1.239	13.1	0.783	0.783	1.29	1.01	0.783	1.000	1.278	4.915E-05	3.9140
		中央杭群	14.4	1.455E-04	3.6287	1.254	14.6	0.782	0.783	1.29	1.01	0.783	0.999	1.278	1.072E-04	3.7132
		陸側杭	18.7	1.556E-04	3.6078	1.265	18.7	0.782	0.782	1.29	1.01	0.783	0.999	1.278	1.445E-04	3.6468
	平均値 −18m	海側杭	10.0	4.912E-05	3.8957	1.269	10.3	0.781	0.782	1.29	1.01	0.783	0.998	1.280	2.905E-05	4.0607
		中央杭群	16.0	3.512E-05	3.9774	1.279	16.0	0.783	0.783	1.29	1.01	0.783	0.999	1.278	3.454E-05	3.9891
		陸側杭	23.1	4.982E-05	3.8971	1.289	22.4	0.782	0.782	1.29	1.01	0.783	0.999	1.279	7.036E-05	3.8221

7. 本稿の結論

本稿では，直杭式横桟橋の船舶接岸時における杭の応力照査を対象に，港湾基準の次期改訂における新たな設計法を提示するために，様々な設計条件を包括した部分係数を構築した．本稿における成果を以下に示す．

(1)応答曲面法による杭の応力状態の把握

本稿では，信頼性解析の簡便化を目的として，村上ら[2)]が構築した応答曲面法による杭応力の近似関数式を導入した．これにより，杭の応力に対する信頼性解析の計算負荷を大幅に低減することができた．

また，応答曲面法を用いることで，特性値とは異なる船舶接岸力や地盤反力係数においても，桟橋の杭の曲げ圧縮応力度比や軸方向圧縮応力度比といった応力状態を容易に評価できることを示し，応答曲面法が信頼性解析以外でも有効に活用できる可能性を示した．

(2)防舷材の反力特性及び確率変数の再設定

①防舷材の標準的な反力特性の構築

船舶接岸時において，防舷材を介して桟橋に作用する接岸力の確率分布は，使用する防舷材の性能により異なるものとなる．このため，国内に流通する各防舷材の性能を整理することで，幅広い条件で平均的な性能となる防舷材の反力特性を設定した．これにより，本来は形状やゴム質，寸法により反力特性が全く異なる防舷材に対し，収集した情報に基づき平均的な性能となる防舷材の設置を想定した信頼性解析を実施することが可能となった．

②確率変数の再設定

船舶接岸時における直杭式横桟橋の杭の応力照査に関わる確率変数や確率変数の従う確率分布を整理し，現行港湾基準以降に得られた知見を収集・整理し，最新の知見を踏まえてこれらを再設定した．

(3)部分係数の構築

(1)，(2)の結果を用い，異なる設計条件を有する複数の検討断面に対する信頼性解析を実施した．これにより，船舶接岸時における直杭式横桟橋の杭の応力照査について，様々な設計条件を包括した荷重抵抗係数アプローチに基づく部分係数を構築した．

本稿で提案する目標安全性水準や性能照査式，及び部分係数を以下に示す．

【目標安全性水準】

・目標破壊確率：1.52×10^{-4}

・目標信頼性指標：3.617

【性能照査式】

$$Z' = \gamma_R \cdot \sigma_{by} - \gamma_S \cdot (\sigma_c/red + \sigma_{bc}) \geq 0$$
$$= \gamma_R \cdot R - \gamma_S \cdot S \geq 0$$

Z' ；性能関数
σ_{by} ；曲げ引張降伏応力度
σ_c ；圧縮応力度(=N/A)
N ；軸力
A ；杭の断面積
red ；圧縮降伏応力度 σ_{cy} の低減係数
σ_{cy} ；圧縮降伏応力度(=$red\times\sigma_{by}$)
σ_{bc} ；曲げ引張応力度(=M/Z)
M ；曲げモーメント
Z ；断面係数
γ_R ；抵抗に係る部分係数
γ_S ；作用に係る部分係数

【部分係数】

設計水深	作用 γ_S	抵抗 γ_R	部分係数比 γ_S/γ_R
-7.5m～-12m	1.34	0.97	1.38
-12m 以深	1.29	1.01	1.28

（2016年8月31日受付）

謝辞

本稿をとりまとめるにあたり，信頼性解析について，岐阜大学の本城勇介名誉教授，新潟大学の大竹雄准教授より，様々な御指導，御助言を賜りました．また，港湾施設研究室の交流研究員である松原弘晃氏，佐藤健彦氏，西岡悟史氏，川俣秀樹氏，高野向後氏，および松本英雄港湾新技術研究官，福永勇介主任研究官には，本稿の執筆方針および検討内容に対して貴重なご意見を頂きました．ここに記して，深く感謝の意を表します．

参考文献

1）日本港湾協会:港湾の施設の技術上の基準･同解説, 2007.
2）村上和康，竹信正寛，宮田正史：直杭式横桟橋の船舶接岸時のレベル１信頼性設計法に関する諸考察（その１），国土技術政策総合研究所資料，No.899，2016.
3）竹信正寛，西岡悟史，佐藤健彦，宮田正史：荷重抵抗係数アプローチによるレベル１信頼性設計法に関する基礎的研究～永続状態におけるケーソン式岸壁の滑動および転倒照査を対象に～，国土技術政策総合研究所資料，No.880，2015.
4）長尾 毅，菊池喜昭，藤田宗久，鈴木 誠，佐貫哲朗：桟橋式係船岸のレベル１地震動に対する信頼性設計法，構造工学論文集，Vol.52A，2006.
5）菊池喜昭，安間 清，鈴木 誠，辻岡信也，吉浪康行：N値からの杭の水平地盤反力係数の統計的評価，土木学会第59回年次学術講演会，2004.
6）村越 潤，梁取直樹，有馬敬育，清水英樹，小森大資：鋼材料・鋼部材の強度等に関する統計データの調査，土木研究所資料，第4090号，2008.
7）米山治男，高橋宏直，後藤文子：防衝工の信頼性設計法における部分係数の提案，港湾空港技術研究所資料，No.1115，2008.
8）村上和康，竹信正寛，宮田正史，米山治男：船舶の接岸速度の特性に関する基礎的分析，国土技術政策総合研究所資料，No.864，2015.
9）長尾 毅，佐貫哲朗，尾崎竜三：防舷材反力の確率分布に関する研究，海洋開発論文集，第20巻，2004.
10）老平武弘，塩見雅樹：直ぐい式横桟橋の構造諸元の統計的分析，港湾技術研究所資料，No.749，1993.
11）日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説，1999.
12）沿岸開発技術研究センター：港湾構造物設計事例集，1999.
13）沿岸技術研究センター:港湾構造物設計事例集, 2007.
14）長尾　毅，藤森修吾，築地健太朗：直杭式桟橋の信頼性指標の応答曲面法等による評価に関する研究，海洋開発論文集，第24巻，2008.
15）高橋宏直，後藤文子，安部智久：統計解析による船舶諸元に関する研究，，国土技術政策総合研究所資料，No.31，2006.

以下に附録を示す．なお，本研究の一部の検討は，全体や詳細を附録に述べ，その一部や概略を本文に示す体裁をとっている．このため，一部の図表は附録と本文とで全く同一であることに留意されたい．

附録 A 近似式の入力値を特性値とした際の近似式の出力値の比較

接岸力と地盤反力係数を除く設計条件は，近似式ごとに固定され，同一の近似式では変化させることができない．このため，比較対象とする設計条件のみ異なり，それ以外の設計条件は同一となる断面の組合せを抽出し，近似式の出力値を比較することで感度分析を行う．ここでは，接岸力と地盤反力係数を特性値で固定し，それ以外の設計条件について断面同士の出力値を比較することで，各設計条件の差異が杭の発生部材力に与える影響について整理する．

なお，本研究では最も海側の杭列を第1列とし，最も海側の杭列を海側杭，最も陸側の杭列を陸側杭，それ以外の杭列を中央杭群とする．

(1) N 値(地盤反力係数)

①曲げモーメント

原地盤の N 値が異なり，その他の条件は同一な断面同士の比較を**付表 A-1**，**付図 A-1** に示す．なお，本表では，比較する断面の組合せを「断面番号」欄に記載し，原地盤 N 値が 5，もしくは 15 であるときの曲げモーメントのを杭列毎に比較している．

海底勾配を有する断面では，N 値が小さい断面は海側杭の曲げモーメントが小さく，陸側杭の曲げモーメントが大きくなる．ただし，杭毎の発生曲げモーメントの比は 0.9～1.1 程度と小さく，N 値の大小が各杭列の曲げモーメントに与える影響は比較的小さい．一方で，海底勾配を有さない断面では，N 値が小さい断面は杭列に関わらず一貫して曲げモーメントが大きくなる傾向がある．ただし，その比は 1.06 程度とほぼ同値となる．

以上より，原地盤の N 値が 5，15 以外であったとしても，曲げモーメントはさほど変化しないと想定される．

②軸力

原地盤 N 値のみ異なり，その他の条件は同一である断面同士の比較を**付表 A-2**，**付図 A-2** に示す．

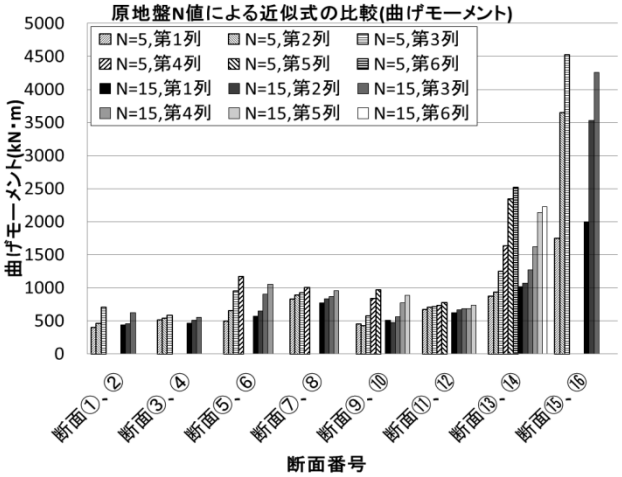
各杭に生じる軸力の比はほぼ 1.0 であり，原地盤 N 値が軸力に与える影響は小さいことが確認できる．これは，軸力は上部工の自重や上載荷重の影響が大きく，原地盤 N 値の差異は殆ど影響しないことによると考えられる．

付表 A-1 N 値に対する曲げモーメントの比較

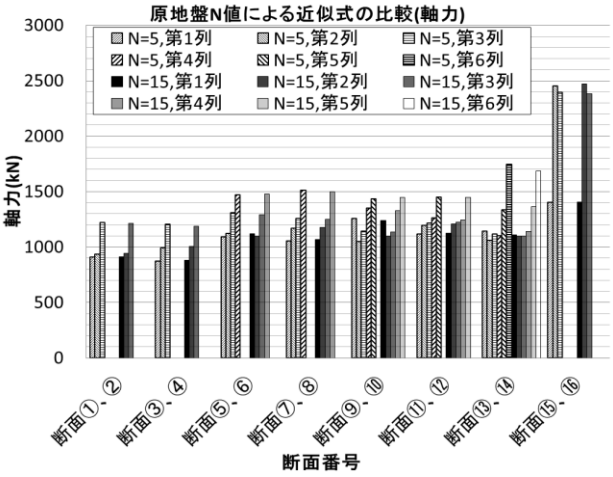
断面番号	設計水深 対象船舶	接岸力	海底勾配	杭列	曲げモーメント 砂質土地盤N値 N=5	N=15	比($M_{N=5}/M_{N=15}$) 杭毎	平均
1,2	−7.5m 5,000DWT	268.0 (kN/ﾗｰﾒﾝ)	1:2	第1列	M= 398.38	M= 439.16	0.91	1.02
				第2列	M= 465.21	M= 455.40	1.02	
				第3列	M= 704.48	M= 624.95	1.13	
					合計 1568.07	合計 1519.52	1.03	
3,4			なし	第1列	M= 512.14	M= 469.12	1.09	1.07
				第2列	M= 541.22	M= 510.11	1.06	
				第3列	M= 588.96	M= 555.17	1.06	
					合計 1642.32	合計 1534.40	1.07	
5,6	−12.0m 30,000DWT	419.8 (kN/ﾗｰﾒﾝ)	1:2	第1列	M= 500.26	M= 571.06	0.88	1.01
				第2列	M= 656.72	M= 653.93	1.00	
				第3列	M= 953.53	M= 902.18	1.06	
				第4列	M= 1171.67	M= 1056.70	1.11	
					合計 3282.18	合計 3183.87	1.03	
7,8			なし	第1列	M= 826.54	M= 770.75	1.07	1.06
				第2列	M= 890.85	M= 837.19	1.06	
				第3列	M= 928.99	M= 872.41	1.06	
				第4列	M= 1005.49	M= 952.97	1.06	
					合計 3651.87	合計 3433.32	1.06	
9,10			1:2	第1列	M= 453.45	M= 511.57	0.89	1.00
				第2列	M= 428.75	M= 475.38	0.90	
				第3列	M= 576.93	M= 561.57	1.03	
				第4列	M= 837.22	M= 772.30	1.08	
				第5列	M= 974.82	M= 889.17	1.10	
					合計 3271.17	合計 3209.99	1.02	
11,12			なし	第1列	M= 669.15	M= 625.80	1.07	1.06
				第2列	M= 707.40	M= 669.21	1.06	
				第3列	M= 719.58	M= 681.62	1.06	
				第4列	M= 736.55	M= 686.75	1.07	
				第5列	M= 779.81	M= 740.52	1.05	
					合計 3612.49	合計 3403.90	1.06	
13,14	−18.0m 120,000DWT	877.8 (kN/ﾗｰﾒﾝ)	1:2	第1列	M= 870.88	M= 1016.11	0.86	0.99
				第2列	M= 935.42	M= 1073.25	0.87	
				第3列	M= 1248.41	M= 1271.68	0.98	
				第4列	M= 1637.09	M= 1618.82	1.01	
				第5列	M= 2347.01	M= 2139.34	1.10	
				第6列	M= 2522.15	M= 2230.05	1.13	
					合計 9560.96	合計 9349.25	1.02	
15,16			1:2	第1列	M= 1749.85	M= 2000.01	0.87	0.99
				第2列	M= 3652.61	M= 3534.05	1.03	
				第3列	M= 4523.79	M= 4255.31	1.06	
					合計 9926.25	合計 9789.37	1.01	

付表 A-2 N 値に対する軸力の比較

断面番号	設計水深 対象船舶	接岸力	海底勾配	杭列	軸力 砂質土地盤N値 N=5	N=15	比($N_{N=5}/N_{N=15}$) 杭毎	平均
1,2	−7.5m 5,000DWT	268.0 (kN/ﾗｰﾒﾝ)	1:2	第1列	N= 911.34	N= 914.03	1.00	1.00
				第2列	N= 938.77	N= 944.14	0.99	
				第3列	N= 1222.45	N= 1214.23	1.01	
					合計 3072.56	合計 3072.41	1.00	
3,4			なし	第1列	N= 876.59	N= 882.28	0.99	1.00
				第2列	N= 993.60	N= 1004.05	0.99	
				第3列	N= 1205.07	N= 1189.15	1.01	
					合計 3075.26	合計 3075.48	1.00	
5,6	−12.0m 30,000DWT	419.8 (kN/ﾗｰﾒﾝ)	1:2	第1列	N= 1094.29	N= 1122.28	0.98	1.00
				第2列	N= 1125.94	N= 1100.31	1.02	
				第3列	N= 1313.94	N= 1293.40	1.02	
				第4列	N= 1471.08	N= 1480.73	0.99	
					合計 5005.25	合計 4996.71	1.00	
7,8			なし	第1列	N= 1056.85	N= 1068.44	0.99	1.00
				第2列	N= 1171.07	N= 1178.32	0.99	
				第3列	N= 1257.54	N= 1252.34	1.00	
				第4列	N= 1514.94	N= 1501.55	1.01	
					合計 5000.39	合計 5000.65	1.00	
9,10			1:2	第1列	N= 1260.03	N= 1240.30	1.02	1.00
				第2列	N= 1054.12	N= 1101.42	0.96	
				第3列	N= 1147.61	N= 1134.30	1.01	
				第4列	N= 1351.04	N= 1326.51	1.02	
				第5列	N= 1436.81	N= 1446.32	0.99	
					合計 6249.61	合計 6248.85	1.00	
11,12			なし	第1列	N= 1120.89	N= 1124.51	1.00	1.00
				第2列	N= 1199.29	N= 1208.71	0.99	
				第3列	N= 1216.01	N= 1224.38	0.99	
				第4列	N= 1264.48	N= 1246.97	1.01	
				第5列	N= 1449.54	N= 1445.76	1.00	
					合計 6250.20	合計 6250.34	1.00	
13,14	−18.0m 120,000DWT	877.8 (kN/ﾗｰﾒﾝ)	1:2	第1列	N= 1145.28	N= 1108.86	1.03	1.00
				第2列	N= 1063.32	N= 1101.31	0.97	
				第3列	N= 1117.62	N= 1102.05	1.01	
				第4列	N= 1102.46	N= 1138.82	0.97	
				第5列	N= 1336.66	N= 1366.35	0.98	
				第6列	N= 1746.34	N= 1685.95	1.04	
					合計 7511.67	合計 7503.35	1.00	
15,16			1:2	第1列	N= 1404.21	N= 1404.22	1.00	1.00
				第2列	N= 2456.49	N= 2473.46	0.99	
				第3列	N= 2394.92	N= 2381.59	1.01	
					合計 6255.62	合計 6259.27	1.00	



付図 A-1　N 値に対する曲げモーメントの比較



付図 A-2　N 値に対する軸力の比較

(2) 海底勾配の有無

①曲げモーメントの特性値

海底勾配を有さない断面と，海底勾配を 1:2.0 とした断面との曲げモーメントの比較を**付表 A-3**，**付図 A-3** に示す.

直杭式横桟橋では，通常，海側杭の曲げモーメントが小さく，陸側杭の曲げモーメントが大きくなるが，海底勾配を有する断面はその傾向がより顕著である．このため，海底勾配を有する断面と有さない断面とでは，曲げモーメントに比で 0.8(海側杭)～1.2(陸側杭)程度の差が生じる．ただし，横桟橋において基礎捨石の取り得る勾配は概ね 1:1.5 未満であるため，本研究において設定した検討断面の海底勾配(勾配なし，1:2.0)は，この範囲をある程度網羅していると考えられる.

②軸力の特性値

海底勾配を有さない断面と，海底勾配を 1:2.0 とした断面との軸力の比較を**付表 A-4**，**付図 A-4** に示す.

各杭に生じる軸力の合計値の比はほぼ 1.0 であり，海底勾配の有無が軸力に与える影響は僅少である.

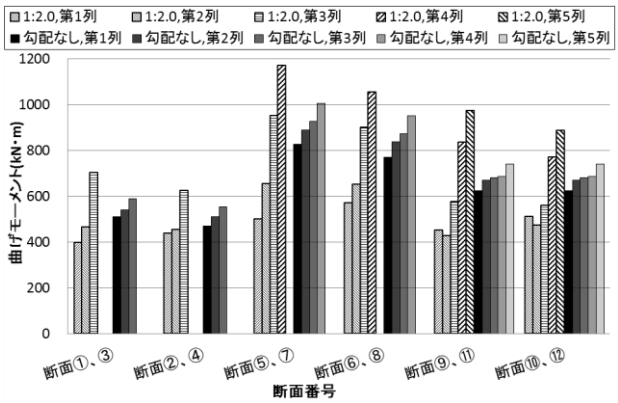
なお，杭列毎の軸力は，海底勾配を有さない断面は海側杭が最も小さく，陸側ほど大きくなる傾向が認められる．一方で，海底勾配を有する断面では，**付図 A-4** に示すように海側杭の軸力が中央杭と比較して大きくなる傾向がある．これは，海底勾配を有する断面では海側杭の曲げモーメントが小さくなり，引抜力が低下するためである.

付表 A-3　海底勾配に対する曲げモーメントの比較

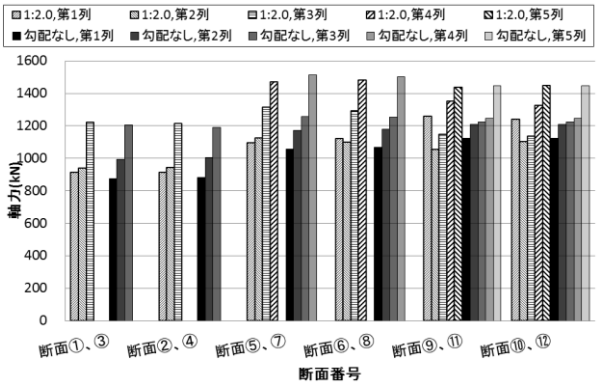
断面番号	設計水深対象船舶	接岸力	砂質土地盤N値	杭列	曲げモーメント 海底勾配 1:2.0	曲げモーメント 海底勾配 なし	比($M_{1:2.0}/M_{勾配なし}$) 杭毎	比($M_{1:2.0}/M_{勾配なし}$) 平均
1,3	−7.5m 5,000DWT	268.0 (kN/ラーメン)	5	第1列	M= 398.38	M= 512.14	0.78	0.94
				第2列	M= 465.21	M= 541.22	0.86	
				第3列	M= 704.48	M= 588.96	1.20	
					合計 1568.07	合計 1642.32	0.95	
2,4			15	第1列	M= 439.16	M= 469.12	0.94	0.98
				第2列	M= 455.40	M= 510.11	0.89	
				第3列	M= 624.95	M= 555.17	1.13	
					合計 1519.52	合計 1534.40	0.99	
5,7	−12.0m 30,000DWT	419.8 (kN/ラーメン)	5	第1列	M= 500.26	M= 826.54	0.61	0.88
				第2列	M= 656.72	M= 890.85	0.74	
				第3列	M= 953.53	M= 928.99	1.03	
				第4列	M= 1171.67	M= 1005.49	1.17	
					合計 3282.18	合計 3651.87	0.90	
6,8			15	第1列	M= 571.06	M= 770.75	0.74	0.92
				第2列	M= 653.93	M= 837.19	0.78	
				第3列	M= 902.18	M= 872.41	1.03	
				第4列	M= 1056.70	M= 952.97	1.11	
					合計 3183.87	合計 3433.32	0.93	
9,11			5	第1列	M= 453.45	M= 669.15	0.68	0.89
				第2列	M= 428.75	M= 707.40	0.61	
				第3列	M= 576.93	M= 719.58	0.80	
				第4列	M= 837.22	M= 736.55	1.14	
				第5列	M= 974.82	M= 779.81	1.25	
					合計 3271.17	合計 3612.49	0.91	
10,12			15	第1列	M= 511.57	M= 625.80	0.82	0.94
				第2列	M= 475.38	M= 669.21	0.71	
				第3列	M= 561.57	M= 681.62	0.82	
				第4列	M= 772.30	M= 686.75	1.12	
				第5列	M= 889.17	M= 740.52	1.20	
					合計 3209.99	合計 3403.90	0.94	

付表 A-4　海底勾配に対する軸力の比較

断面番号	設計水深対象船舶	接岸力	砂質土地盤N値	杭列	軸力 海底勾配 1:2.0	軸力 海底勾配 なし	比($M_{1:2.0}/M_{勾配なし}$) 杭毎	比($M_{1:2.0}/M_{勾配なし}$) 平均
1,3	−7.5m 5,000DWT	268.0 (kN/ラーメン)	5	第1列	N= 911.34	N= 876.59	1.04	1.00
				第2列	N= 938.77	N= 993.60	0.94	
				第3列	N= 1222.45	N= 1205.07	1.01	
					合計 3072.56	合計 3075.26	1.00	
2,4			15	第1列	N= 914.03	N= 882.28	1.04	1.00
				第2列	N= 944.14	N= 1004.05	0.94	
				第3列	N= 1214.23	N= 1189.15	1.02	
					合計 3072.41	合計 3075.48	1.00	
5,7	−12.0m 30,000DWT	419.8 (kN/ラーメン)	5	第1列	N= 1094.29	N= 1056.85	1.04	1.00
				第2列	N= 1125.94	N= 1171.07	0.96	
				第3列	N= 1313.94	N= 1257.54	1.04	
				第4列	N= 1471.08	N= 1514.94	0.97	
					合計 5005.25	合計 5000.39	1.00	
6,8			15	第1列	N= 1122.28	N= 1068.44	1.05	1.00
				第2列	N= 1100.31	N= 1178.32	0.93	
				第3列	N= 1293.40	N= 1252.34	1.03	
				第4列	N= 1480.73	N= 1501.55	0.99	
					合計 4996.71	合計 5000.65	1.00	
9,11			5	第1列	N= 1260.03	N= 1120.89	1.12	1.00
				第2列	N= 1054.12	N= 1199.29	0.88	
				第3列	N= 1147.61	N= 1216.01	0.94	
				第4列	N= 1351.04	N= 1264.48	1.07	
				第5列	N= 1436.81	N= 1449.54	0.99	
					合計 6249.61	合計 6250.20	1.00	
10,12			15	第1列	N= 1240.30	N= 1124.51	1.10	1.00
				第2列	N= 1101.42	N= 1208.71	0.91	
				第3列	N= 1134.30	N= 1224.38	0.93	
				第4列	N= 1326.51	N= 1246.97	1.06	
				第5列	N= 1446.32	N= 1445.76	1.00	
					合計 6248.85	合計 6250.34	1.00	



付図 A-3　海底勾配に対する曲げモーメントの比較



付図 A-4　海底勾配に対する軸力の比較

(3) 杭列数

①曲げモーメント

杭列数が異なり,その他の条件は同一とした断面での,曲げモーメントの比較を**付表 A-5**，**付図 A-5** に示す．なお,表中では比較断面毎の杭列数の差異を按分するため,各杭の曲げモーメントを杭列数により加重平均した比を特性値比として示している．

付図 A-5 に示すように，各杭列に生じる曲げモーメントの合計値は，杭列数が異なってもほぼ同一である．一方で，杭毎に発生する曲げモーメントについては，当然のことながら，杭列数が多い断面ほど杭毎に生じる曲げモーメントが均等化される．ただし，加重平均比としては，杭列間での曲げモーメントの差は小さく，特に海底勾配のない断面ではほぼ 1.0 である．このことから，海側杭と陸側杭とで生じる曲げモーメントの差については,杭列数に関わらずほぼ同一の傾向があると判断できる．

なお，海底勾配を有する断面では，杭列数が少ない断面ほど中央杭群の曲げモーメントが大きくなる傾向にある．これは，海底勾配を有する断面は海側杭の曲げモーメントが小さく，陸側杭の曲げモーメントが大きくなる傾向にあるが，その一方で杭列数が多いほど杭列間の曲げモーメントは均等化されるため，結果として杭列数が少ない断面ほど，海底勾配の影響を顕著に受けることによると考えられる．

②軸力

杭列数が異なり,その他の条件は同一とした断面での,軸力の比較を**付表 A-6**，**付図 A-6** に示す．

杭列数が多い断面では，軸力の合計値が大きくなる傾向にあるが，これは各検討断面における杭間を 5m(断面 15，16 は 10m)としているため，杭列数が多いほど上部工面積が広く，上部工重量と上載荷重の総計が大きくなるためである．

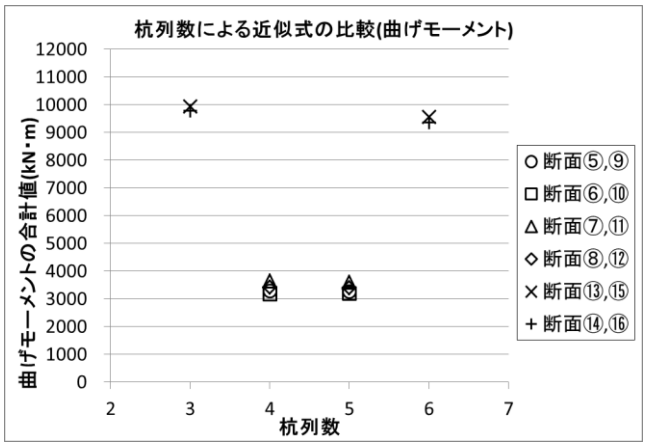
実際のところ，杭列数が 4 列の断面と 5 列の断面では軸力の合計値の比が 0.8，6 列の断面と 3 列の断面では 1.25 であり,上部工面積の比とほぼ一致している.また,加重平均をせずに各杭に生じる軸力を比較すると，ほぼ同一の値をとっている．

したがって，杭列数そのものは，軸力に影響を与える要因ではなく，仮に上部工面積が同一であれば，杭列数に関わらず軸力の合計はほぼ同一となり，各杭に発生する軸力に差異が生じると考えられる．

付表 A-5　杭列数に対する曲げモーメントの比較

断面番号	設計水深対象船舶	接岸力	海底勾配	砂質土地盤N値	曲げモーメント 杭列数 4本	曲げモーメント 杭列数 5本	加重平均の比 ($M_{4本}/M_{5本}$) 杭毎	加重平均の比 ($M_{4本}/M_{5本}$) 平均
5,9	−12.0m 30,000DWT	419.8 (kN/ラーメン)	1:2.0	5	第1列M= 500.26	第1列M= 453.45	0.88	1.02
					第2列M= 656.72	第2列M= 428.75	1.15	
					第3列M= 953.53	第3列M= 576.93	1.12	
					第4列M= 1171.67	第4列M= 837.22	0.96	
						第5列M= 974.82	0.96	
					合計 3282.18	合計 3271.17	1.00	
6,10			1:2.0	15	第1列M= 571.06	第1列M= 511.57	0.89	1.00
					第2列M= 653.93	第2列M= 475.38	1.07	
					第3列M= 902.18	第3列M= 561.57	1.11	
					第4列M= 1056.70	第4列M= 772.30	0.97	
						第5列M= 889.17	0.95	
					合計 3183.87	合計 3209.99	0.99	
7,11			なし	5	第1列M= 826.54	第1列M= 669.15	0.99	1.01
					第2列M= 890.85	第2列M= 707.40	0.99	
					第3列M= 928.99	第3列M= 719.58	1.01	
					第4列M= 1005.49	第4列M= 736.55	1.03	
						第5列M= 779.81	1.03	
					合計 3651.87	合計 3612.49	1.01	
8,12			なし	15	第1列M= 770.75	第1列M= 625.80	0.99	1.01
					第2列M= 837.19	第2列M= 669.21	0.98	
					第3列M= 872.41	第3列M= 681.62	1.00	
					第4列M= 952.97	第4列M= 686.75	1.04	
						第5列M= 740.52	1.03	
					合計 3433.32	合計 3403.90	1.01	

断面番号	設計水深対象船舶	接岸力	海底勾配	砂質土地盤N値	曲げモーメント 杭列数 6本	曲げモーメント 杭列数 3本	加重平均の比 ($M_{6本}/M_{3本}$) 杭毎	加重平均の比 ($M_{6本}/M_{3本}$) 平均
13,15	−18.0m 120,000DWT	877.8 (kN/ラーメン)	1:2.0	5	第1列M= 870.88	第1列M= 1749.85	1.00	0.97
					第2列M= 935.42		1.07	
					第3列M= 1248.41	第2列M= 3652.61	0.68	
					第4列M= 1637.09		0.90	
					第5列M= 2347.01	第3列M= 4523.79	1.04	
					第6列M= 2522.15		1.12	
					合計 9560.96	合計 9926.25	0.96	
14,16			1:2.0	15	第1列M= 1016.11	第1列M= 2000.01	1.02	0.96
					第2列M= 1073.25		1.07	
					第3列M= 1271.68	第2列M= 3534.05	0.72	
					第4列M= 1618.82		0.92	
					第5列M= 2139.34	第3列M= 4255.31	1.01	
					第6列M= 2230.05		1.05	
					合計 9349.25	合計 9789.37	0.96	

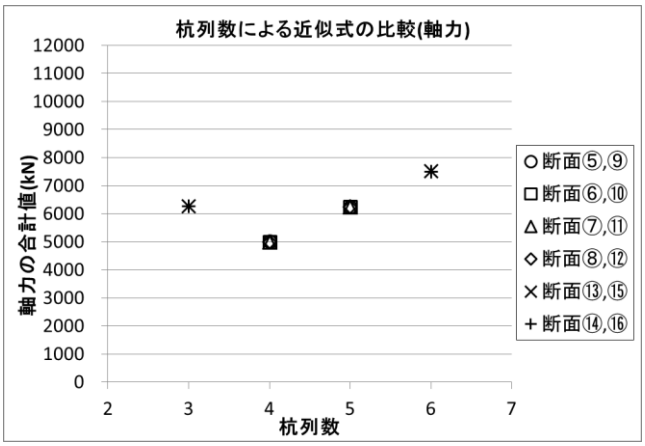


付図 A-5　杭列数に対する曲げモーメントの比較
（曲げモーメントの合計値）

付表 A-6　杭列数に対する軸力の比較

断面番号	設計水深対象船舶	接岸力	海底勾配	砂質土地盤N値	軸力 砂質土地盤N値 4本	軸力 砂質土地盤N値 5本	加重平均の比 ($M_{4本}/M_{5本}$) 杭毎	加重平均の比 ($M_{4本}/M_{5本}$) 平均
5,9	−12.0m 30,000DWT	419.8 (kN/ラーメン)	1:2.0	5	第1列N= 1094.29	第1列N= 1260.03	0.69	0.80
					第2列N= 1125.94	第2列N= 1054.12	0.85	
					第3列N= 1313.94	第3列N= 1147.61	0.85	
					第4列N= 1471.08	第4列N= 1351.04	0.80	
						第5列N= 1436.81	0.82	
					合計 5005.25	合計 6249.61	0.80	
6,10			1:2.0	15	第1列N= 1122.28	第1列N= 1240.30	0.72	0.80
					第2列N= 1100.31	第2列N= 1101.42	0.80	
					第3列N= 1293.40	第3列N= 1134.30	0.84	
					第4列N= 1480.73	第4列N= 1326.51	0.81	
						第5列N= 1446.32	0.82	
					合計 4996.71	合計 6248.85	0.80	
7,11			なし	5	第1列N= 1056.85	第1列N= 1120.89	0.75	0.80
					第2列N= 1171.07	第2列N= 1199.29	0.76	
					第3列N= 1257.54	第3列N= 1216.01	0.80	
					第4列N= 1514.94	第4列N= 1264.48	0.84	
						第5列N= 1449.54	0.84	
					合計 5000.39	合計 6250.20	0.80	
8,12			なし	15	第1列N= 1068.44	第1列N= 1124.51	0.76	0.80
					第2列N= 1178.32	第2列N= 1208.71	0.76	
					第3列N= 1252.34	第3列N= 1224.38	0.79	
					第4列N= 1501.55	第4列N= 1246.97	0.84	
						第5列N= 1445.76	0.83	
					合計 5000.65	合計 6250.34	0.80	

断面番号	設計水深対象船舶	接岸力	海底勾配	砂質土地盤N値	軸力 砂質土地盤N値 6本	軸力 砂質土地盤N値 3本	加重平均の比 ($N_{6本}/N_{3本}$) 杭毎	加重平均の比 ($N_{6本}/N_{3本}$) 平均
13,15	−18.0m 120,000DWT	877.8 (kN/ラーメン)	1:2.0	5	第1列N= 1145.28	第1列N= 1404.21	1.63	1.25
					第2列N= 1063.32		1.51	
					第3列N= 1117.62	第2列N= 2456.49	0.91	
					第4列N= 1102.46		0.90	
					第5列N= 1336.66	第3列N= 2394.92	1.12	
					第6列N= 1746.34		1.46	
					合計 7511.67	合計 6255.62	1.20	
14,16			1:2.0	15	第1列N= 1108.86	第1列N= 1404.22	1.58	1.25
					第2列N= 1101.31		1.57	
					第3列N= 1102.05	第2列N= 2473.46	0.89	
					第4列N= 1138.82		0.92	
					第5列N= 1366.35	第3列N= 2381.59	1.15	
					第6列N= 1685.95		1.42	
					合計 7503.35	合計 6259.27	1.20	



付図 A-6　杭列数に対する軸力の比較（軸力の合計値）

(4) 岸壁の設計水深

①曲げモーメント

岸壁水深のみ異なり，その他の条件は同一とした断面での比較を**付表 A-8**，**付図 A-7** に示す．なお，設計水深により接岸力の特性値は異なるが，ここでは全ての断面に対して，設計水深-7.5m における接岸力の特性値(268.0kN/ﾗｰﾒﾝ)を与えている．つまり，設計水深-12m，-18m の各検討断面については，それぞれの設計水深における接岸力特性値より遥かに小さな接岸力に対する出力値であるが，ここでは近似式の傾向を確認するために，設計水深-7.5m における接岸力特性値を用いて，各設計水深における出力値を比較する．なお，各近似式を作成する際に，近似に用いた入力値は**付表 A-7** に示すとおりであり，特に設計水深-18m の断面は近似式の適用範囲外である．

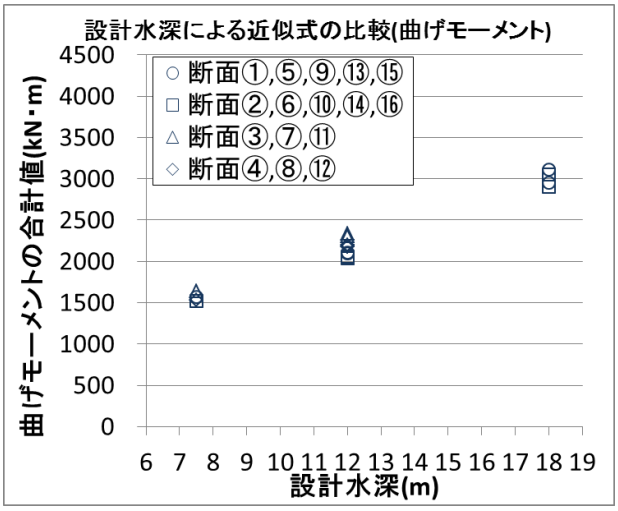
接岸力が同一であれば，設計水深が大きい断面ほど，海底面から上部工下端までの杭長が長くなるため，曲げモーメントは大きくなる．このため，接岸力が同一であっても，設計水深-18m の各断面と，設計水深-7.5m の各断面とでは，各杭列に生じる曲げモーメントの合計値に 2 倍近い差が生じる．

付表 A-7　近似に用いる入力値の目安

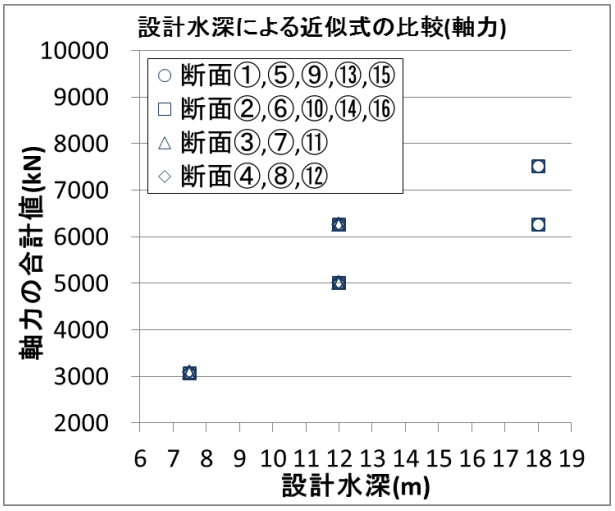
変数		特性値 X	平均 μ	標準偏差 σ	$\mu-\sigma$	$\mu+\sigma$	$\mu+2\sigma$	$\mu+3\sigma$
接岸力 (kN/ﾗｰﾒﾝ)	7.5m岸壁	268.0	233.2	58.3	174.9	291.5	349.7	408.0
	12.0m岸壁	419.8	365.2	91.3	273.9	456.5	547.8	639.1
	18.0m岸壁	877.8	763.7	190.9	572.8	954.6	1,145.5	1,336.5
地盤反力係数 (kN/m^3)	砂層 N=5	7,500	9,998	7,598	2,399	17,596	25,194	32,792
	砂層 N=15	22,500	29,993	22,794	7,198	52,787	75,581	98,375
	捨石層	3,500	4,666	3,546	1,120	8,211	11,757	15,303

②軸力

設計水深が大きい断面ほど杭列数が多くなり，上部工面積が広くなる．このため，**付表 A-9**，**付図 A-8** に示すとおり，設計水深が大きい断面ほど，各杭列に生じる軸力の合計値も増加する傾向にある．しかしながら，設計水深そのものは軸力に影響を与えるものではなく，仮に上部工面積等が同一であれば，設計水深による軸力の差は僅少となると考えられる．



付図 A-7　設計水深に対する曲げモーメント合計値の比較



付図 A-8　設計水深に対する軸力合計値の比較

付表 A-8　設計水深に対する曲げモーメントの比較

断面番号	海底勾配	砂質土層N値	曲げモーメント 断面番号・水深・接岸力																	
			断面① −7.5m 268.0(kN/ラーメン)		断面⑤ −12m 268.0(kN/ラーメン)		加重平均の比 ($M_{-7.5m}/M_{-12m}$)		断面⑨ −12m 268.0(kN/ラーメン)		加重平均の比 ($M_{-7.5m}/M_{-12m}$)		断面⑬ −18m 268.0(kN/ラーメン)		加重平均の比 ($M_{-7.5m}/M_{-18m}$)		断面⑮ −18m 268.0(kN/ラーメン)		加重平均の比 ($M_{-7.5m}/M_{-18m}$)	
1,5,9, 13,15	1:2.0	5	第1列 M=	398.4	第1列 M=	323.6	0.92	0.77	第1列 M=	290.9	0.82	0.77	第1列 M=	274.2	0.73	0.57	第1列 M=	503.8	0.79	0.56
			第2列 M=	465.2	第2列 M=	423.1	0.79		第2列 M=	275.1	0.92		第2列 M=	293.2	0.68		第2列 M=	1128.9	0.41	
					第3列 M=	611.5	0.67		第3列 M=	370.9	0.75		第3列 M=	391.0	0.59		第3列 M=	1475.2	0.48	
			第3列 M=	704.5	第4列 M=	748.4	0.71		第4列 M=	537.5	0.70		第4列 M=	510.0	0.46					
									第5列 M=	623.7	0.68		第5列 M=	721.5	0.49					
													第6列 M=	765.0	0.46					
			合計	1568.1	合計	2106.7	0.74		合計	2098.1	0.75		合計	2954.9	0.53		合計	3107.9	0.50	

断面番号	海底勾配	砂質土層N値	曲げモーメント 断面番号・水深・接岸力																	
			断面② −7.5m 268.0(kN/ラーメン)		断面⑥ −12m 268.0(kN/ラーメン)		加重平均の比 ($M_{-7.5m}/M_{-12m}$)		断面⑩ −12m 268.0(kN/ラーメン)		加重平均の比 ($M_{-7.5m}/M_{-12m}$)		断面⑭ −18m 268.0(kN/ラーメン)		加重平均の比 ($M_{-7.5m}/M_{-18m}$)		断面⑯ −18m 268.0(kN/ラーメン)		加重平均の比 ($M_{-7.5m}/M_{-18m}$)	
2,6,10, 14,16	1:2.0	15	第1列 M=	439.2	第1列 M=	367.8	0.90	0.76	第1列 M=	327.4	0.80	0.76	第1列 M=	318.6	0.69	0.55	第1列 M=	565.1	0.78	0.55
					第2列 M=	420.2	0.80		第2列 M=	304.2	0.88		第2列 M=	334.6	0.66					
			第2列 M=	455.4	第3列 M=	578.2	0.66		第3列 M=	360.3	0.76		第3列 M=	396.7	0.57		第2列 M=	1089.9	0.42	
									第4列 M=	495.6	0.69		第4列 M=	504.0	0.45					
			第3列 M=	625.0	第4列 M=	675.1	0.69		第5列 M=	569.1	0.66		第5列 M=	658.2	0.47		第3列 M=	1399.0	0.45	
													第6列 M=	685.5	0.46					
			合計	1519.5	合計	2041.4	0.74		合計	2056.5	0.74		合計	2897.7	0.52		合計	3054.0	0.50	

断面番号	海底勾配	砂質土層N値	曲げモーメント 断面番号・水深・接岸力																	
			断面③ −7.5m 268.0(kN/ラーメン)		断面⑦ −12m 268.0(kN/ラーメン)		加重平均の比 ($M_{-7.5m}/M_{-12m}$)		断面⑪ −12m 268.0(kN/ラーメン)		加重平均の比 ($M_{-7.5m}/M_{-12m}$)		断面④ −7.5m 268.0(kN/ラーメン)		断面⑧ −12m 268.0(kN/ラーメン)		加重平均の比 ($M_{-7.5m}/M_{-12m}$)		断面⑫ −12m 268.0(kN/ラーメン)		加重平均の比 ($M_{-7.5m}/M_{-12m}$)	
3,7,11	なし	5	第1列 M=	512.1	第1列 M=	530.0	0.72	0.70	第1列 M=	429.1	0.72	0.71	第1列 M=	469.1	第1列 M=	494.5	0.71	0.70	第1列 M=	401.6	0.70	0.71
			第2列 M=	541.2	第2列 M=	570.0	0.70		第2列 M=	452.6	0.69		第2列 M=	510.1	第2列 M=	535.9	0.69		第2列 M=	428.3	0.68	
					第3列 M=	593.5	0.70		第3列 M=	459.7	0.71				第3列 M=	557.4	0.71		第3列 M=	435.5	0.70	
									第4列 M=	470.2	0.73								第4列 M=	438.4	0.74	
			第3列 M=	589.0	第4列 M=	641.1	0.69		第5列 M=	496.9	0.71		第3列 M=	555.2	第4列 M=	607.6	0.69		第5列 M=	471.9	0.71	
			合計	1642.3	合計	2334.6	0.70		合計	2308.5	0.71		合計	1534.4	合計	2195.4	0.70		合計	2175.6	0.71	

付表 A-9　設計水深に対する軸力の比較

断面番号	海底勾配	砂質土層N値	軸力 断面番号・水深・接岸力																	
			断面① −7.5m 268.0(kN/ラーメン)		断面⑤ −12m 268.0(kN/ラーメン)		加重平均の比 ($N_{-7.5m}/N_{-12m}$)		断面⑨ −12m 268.0(kN/ラーメン)		加重平均の比 ($N_{-7.5m}/N_{-12m}$)		断面⑬ −18m 268.0(kN/ラーメン)		加重平均の比 ($N_{-7.5m}/N_{-18m}$)		断面⑮ −18m 268.0(kN/ラーメン)		加重平均の比 ($N_{-7.5m}/N_{-18m}$)	
1,5,9, 13,15	1:2.0	5	第1列 N=	911.3	第1列 N=	1149.1	0.59	0.61	第1列 N=	1296.1	0.42	0.49	第1列 N=	1260.4	0.36	0.41	第1列 N=	1640.2	0.56	0.51
			第2列 N=	938.8	第2列 N=	1160.2	0.60		第2列 N=	1075.1	0.51		第2列 N=	1138.5	0.40		第2列 N=	2661.1	0.35	
					第3列 N=	1314.4	0.59		第3列 N=	1163.0	0.48		第3列 N=	1196.7	0.39					
									第4列 N=	1346.2	0.50		第4列 N=	1190.5	0.39					
			第3列 N=	1222.5	第4列 N=	1379.7	0.66		第5列 N=	1369.2	0.54		第5列 N=	1343.0	0.46		第3列 N=	1950.1	0.63	
													第6列 N=	1374.5	0.44					
			合計	3072.6	合計	5003.4	0.61		合計	6249.8	0.49		合計	7503.6	0.41		合計	6251.4	0.49	

断面番号	海底勾配	砂質土層N値	軸力 断面番号・水深・接岸力																	
			断面② −7.5m 268.0(kN/ラーメン)		断面⑥ −12m 268.0(kN/ラーメン)		加重平均の比 ($N_{-7.5m}/N_{-12m}$)		断面⑩ −12m 268.0(kN/ラーメン)		加重平均の比 ($N_{-7.5m}/N_{-12m}$)		断面⑭ −18m 268.0(kN/ラーメン)		加重平均の比 ($N_{-7.5m}/N_{-18m}$)		断面⑯ −18m 268.0(kN/ラーメン)		加重平均の比 ($N_{-7.5m}/N_{-18m}$)	
2,6,10, 14,16	1:2.0	15	第1列 N=	914.0	第1列 N=	1180.2	0.58	0.61	第1列 N=	1279.1	0.43	0.49	第1列 N=	1241.0	0.37	0.41	第1列 N=	1657.0	0.55	0.51
			第2列 N=	944.1	第2列 N=	1130.2	0.62		第2列 N=	1121.6	0.49		第2列 N=	1179.9	0.39		第2列 N=	2633.8	0.36	
					第3列 N=	1289.4	0.60		第3列 N=	1145.5	0.49		第3列 N=	1167.7	0.40					
									第4列 N=	1318.3	0.51		第4列 N=	1202.9	0.39					
			第3列 N=	1214.2	第4列N=	1398.2	0.65		第5列 N=	1384.8	0.53		第5列 N=	1345.0	0.45		第3列 N=	1961.5	0.62	
													第6列 N=	1366.5	0.44					
			合計	3072.4	合計	4997.9	0.61		合計	6249.3	0.49		合計	7503.0	0.41		合計	6252.3	0.49	

断面番号	海底勾配	砂質土層N値	軸力 断面番号・水深・接岸力																	
			断面③ −7.5m 268.0(kN/ラーメン)		断面⑦ −12m 268.0(kN/ラーメン)		加重平均の比 ($N_{-7.5m}/N_{-12m}$)		断面⑪ −12m 268.0(kN/ラーメン)		加重平均の比 ($N_{-7.5m}/N_{-12m}$)		断面④ −7.5m 268.0(kN/ラーメン)		断面⑧ −12m 268.0(kN/ラーメン)		加重平均の比 ($N_{-7.5m}/N_{-12m}$)		断面⑫ −12m 268.0(kN/ラーメン)		加重平均の比 ($N_{-7.5m}/N_{-12m}$)	
3,7,11	なし	5	第1列 N=	876.6	第1列 N=	1131.0	0.58	0.61	第1列 N=	1172.2	0.45	0.49	第1列 N=	882.3	第1列 N=	1137.6	0.58	0.61	第1列 N=	1172.4	0.45	0.49
			第2列 N=	993.6	第2列 N=	1198.7	0.60		第2列 N=	1221.2	0.45		第2列 N=	1004.1	第2列 N=	1204.6	0.60		第2列 N=	1229.8	0.45	
					第3列 N=	1241.7	0.64		第3列 N=	1219.0	0.49				第3列 N=	1237.4	0.65		第3列 N=	1227.1	0.49	
									第4列 N=	1247.1	0.55								第4列 N=	1230.5	0.55	
			第3列 N=	1205.1	第4列 N=	1428.0	0.63		第5列 N=	1390.2	0.52		第3列 N=	1189.2	第4列N=	1419.5	0.63		第5列 N=	1389.7	0.51	
			合計	3075.3	合計	4999.4	0.62		合計	6249.7	0.49		合計	3075.5	合計	4999.2	0.62		合計	6249.6	0.49	

附録 B　近似式の入力の変化に対する出力の比較

断面毎に近似式の入力値を特性値から変化させ，出力値の推移を比較することで，各設計条件に対する近似式の感度を分析する．

なお，出力値の推移の比較を容易とするために，入出力値は無次元化して整理する．無次元化した入出力値は以下のとおり定義する．

$$x^* = (x - x_k)/x_k$$
$$y^* = (y - y_k)/y_k$$

ここに，

x^*：無次元化入力値
x　：入力値
x_k：基準値(入力値の特性値)
y^*：無次元化出力値
y　：出力値
y_k：基準値(入力値を特性値とした際の出力値)

(1) 原地盤の N 値と地盤反力係数

①曲げモーメント

近似式の入力値を原地盤の地盤反力係数とし，断面①～④(N=5，15 設計水深 7.5m，杭列数 3 列)において地盤反力係数が変化した際の曲げモーメントの推移を**付図 B-1**，**付図 B-2** に示す．なお，各断面の設計条件は**付表 B-1** のとおりである．また，地盤反力係数の変化量は**付表 B-2** に基づき，μ-σ から μ+3σ までとし，接岸力については，特性値(268.0kN/ﾗｰﾒﾝ)で固定している．

付表 B-1　各断面の設計条件

断面	設計水深(m)	杭列(本)	海底勾配	原地盤の地盤反力係数の特性値(kN/m^3)	捨石の地盤反力係数の特性値(kN/m^3)
①	-7.5	3	1:2.0	7,500	3,500
②	-7.5	3	1:2.0	22,500	3,500
③	-7.5	3	なし	7,500	-
④	-7.5	3	なし	22,500	-

原地盤の地盤反力係数の特性値は，N 値の特性値から $kCH2$=1500N(kN/m^3) として算定しており，**付図 B-2** は，N 値や接岸力は特性値で固定したまま，原地盤の地盤反力係数のみ変化させた際の曲げモーメントの変化を示している．同図より，接岸力や杭列，原地盤 N 値が同値であっても，地盤反力係数が特性値より高い値であると，曲げモーメントが減少することが確認できる．なお，曲げモーメントは，地盤反力係数の増加に伴い漸減しつつ収束するが，海底勾配を有する断面の海側杭では収束しない．

一方，曲げモーメントと地盤反力係数を基準値により無次元化すると**付図 B-3** に示すとおりとなる．**付図 B-3** より，各杭列の地盤反力係数と曲げモーメントの基準値からの変動比がほぼ一致することがわかる．ただし，海底勾配を有する断面の第 1 列や，地盤反力係数が特性値を下回る場合では，この傾向は見られない．

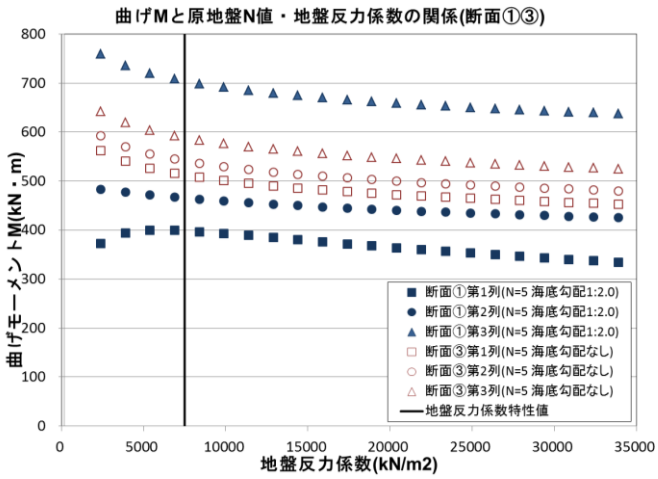
以上より，曲げモーメントの算出における原地盤の N 値と地盤反力係数について以下の事項がいえる．

①地盤反力係数が特性値より高い値であると，曲げモーメントは減少する．ただし，一定値に収束する傾向にある．

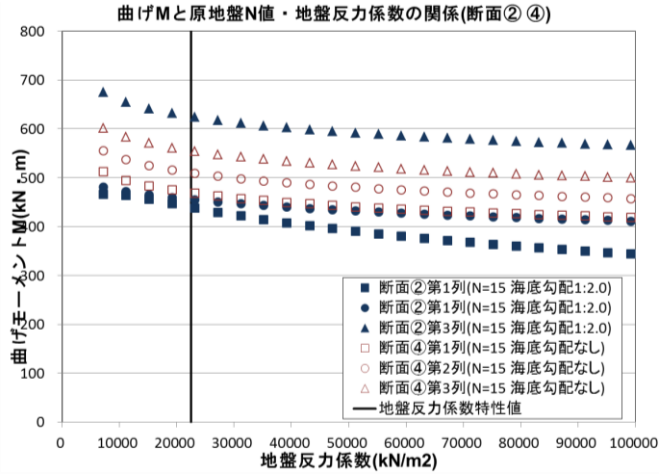
②無次元化した地盤反力係数と曲げモーメントの関係式は，杭列や原地盤 N 値，海底勾配によらずほぼ一定である．ただし，海底勾配を有する断面の海側杭や，地盤反力係数が特性値を下回る場合は，この限りではない．

原地盤の地盤反力係数は，N 値との関係式から求めることが一般的であり，直接的な計測値ではない．このため，特性値と実際の地盤反力係数に大きな差が生じる可能性は十分にあり，地盤反力係数の変動に伴い，曲げモーメントが変化することに留意する必要がある．

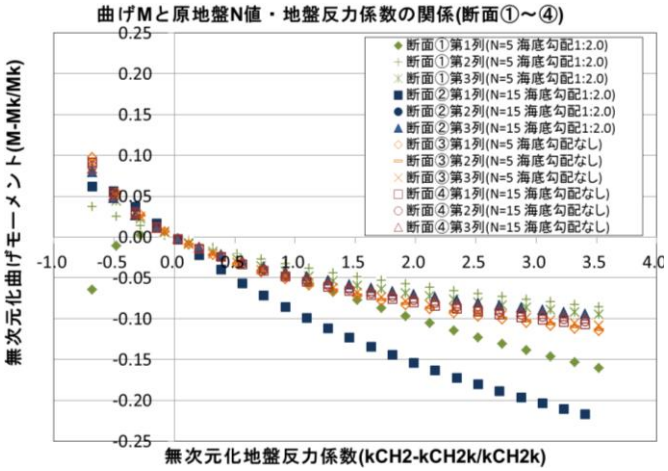
ただし，**付図 B-3** では，入力値(原地盤の地盤反力係数)は特性値の 0.3～4.5 倍程度まで変化させているが，曲げモーメントの増減は最も感度の高い断面②の第 1 列(海側杭)でも基準値比-20%～10%程度に過ぎない．



付図 B-1　原地盤の地盤反力係数の変化に対する曲げモーメントの推移(断面①③，N=5)



付図 B-2　原地盤の地盤反力係数の変化に対する曲げモーメントの推移(断面②④，N=15)



付図 B-3　無次元化した原地盤の地盤反力係数の変化に対する曲げモーメントの推移

ところで，上述の検討は，地盤反力係数の変化が曲げモーメントに与える影響についてのものであり，接岸力の変化は考慮されていない．このため，地盤反力係数を固定し，接岸力を変化させた際の曲げモーメントの推移を付表 B-3 に示す．なお，両図は接岸力，曲げモーメントを無次元化して示している．また，接岸力は μ-σ～μ+3σ まで変化させ，地盤反力係数は各断面における μ-σ，X，μ+3σ で固定している．

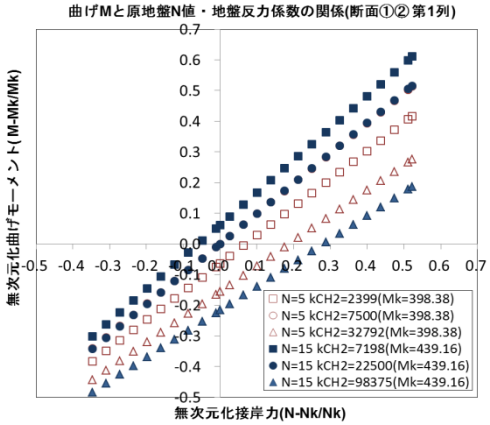
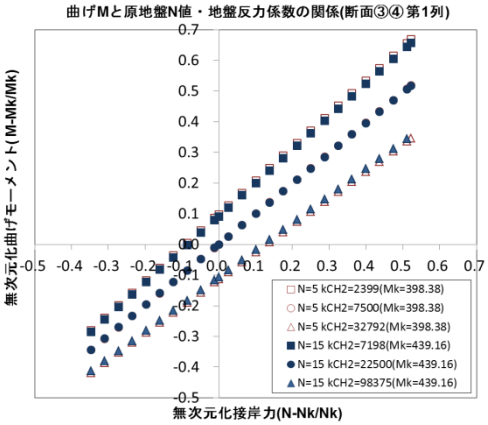
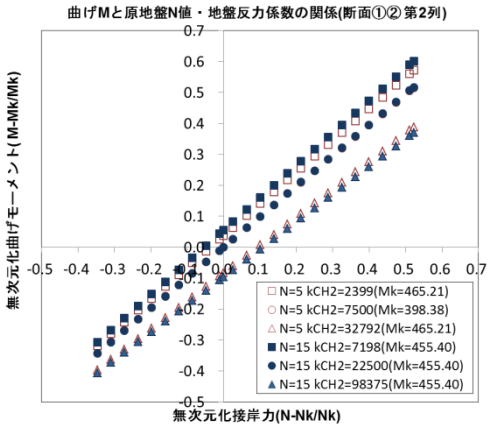
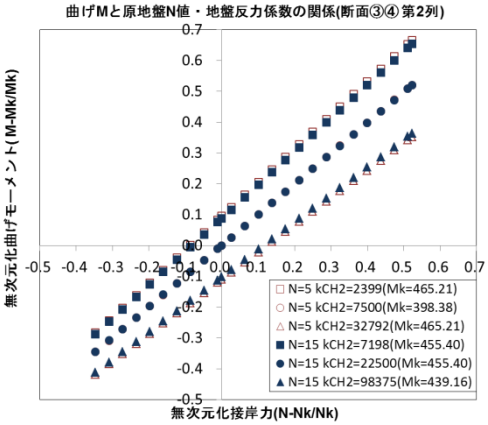
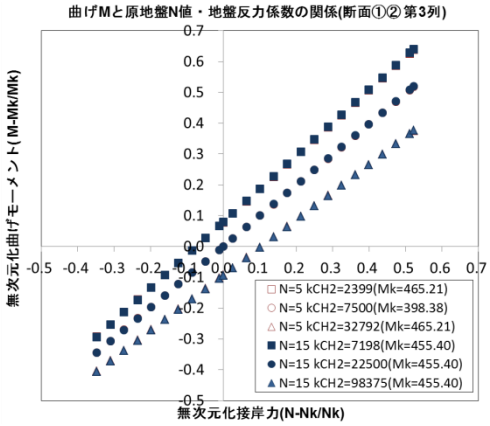
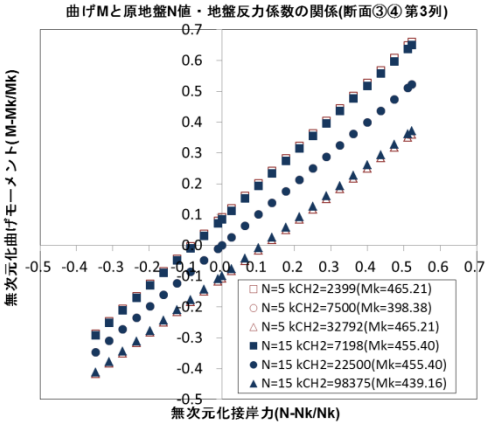
付表 B-3 は断面①②(設計水深：7.5m，原地盤 N 値：5，15，海底勾配：1:2.0)，および断面③④(設計水深：7.5m，原地盤 N 値：5，15，海底勾配なし)の比較である．したがって，図中では異なる原地盤 N 値の断面同士を比較しているが，断面①②の第 1 列を除いて，曲げモーメントの推移はよく一致しており，地盤反力係数が特性値であれば，N 値に依らず曲げモーメントの推移は完全に一致する．

また，無次元化接岸力と無次元化曲げモーメントはほぼ正比例となっており，接岸力の変化が曲げモーメントに与える影響は，地盤反力係数と比較して遥かに大きいことが確認できる．

付表 B-2　近似に用いる入力値の目安

変数		特性値 X	平均 μ	標準偏差 σ	μ-σ	μ＋σ	μ＋2σ	μ＋3σ
接岸力 (kN/ラーメン)	7.5m岸壁	268.0	233.2	58.3	174.9	291.5	349.7	408.0
	12.0m岸壁	419.8	365.2	91.3	273.9	456.5	547.8	639.1
	18.0m岸壁	877.8	763.7	190.9	572.8	954.6	1,145.5	1,336.5
地盤反力係数 (kN/m^3)	砂層 N=5	7,500	9,998	7,598	2,399	17,596	25,194	32,792
	砂層 N=15	22,500	29,993	22,794	7,198	52,787	75,581	98,375
	捨石層	3,500	4,666	3,546	1,120	8,211	11,757	15,303

付表 B-3　接岸力の変化に対する曲げモーメントと原地盤 N 値，および地盤反力係数の関係(断面①②，および断面③④)

杭列	断面①② (設計水深：7.5m，原地盤 N 値：5，15，海底勾配：1:2.0)	断面③④ (設計水深：7.5m，原地盤 N 値：5，15，海底勾配なし)
1		
2		
3		

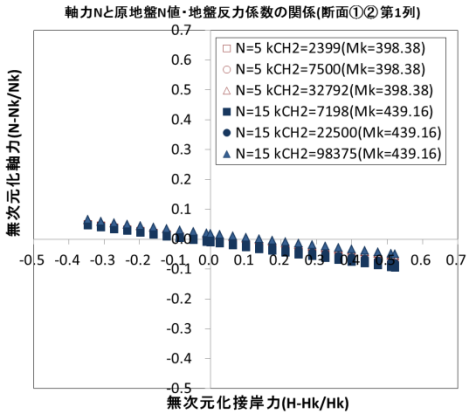
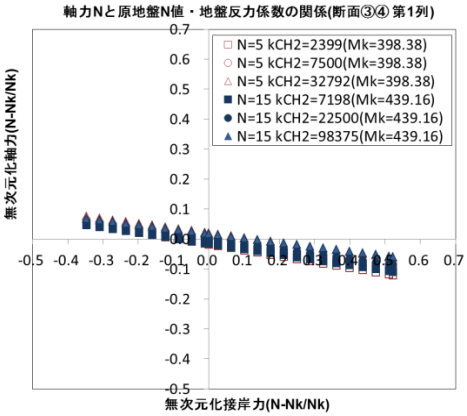
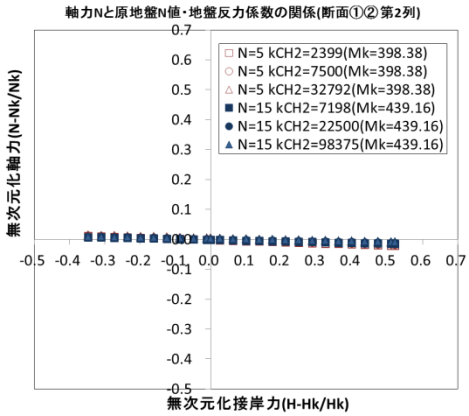
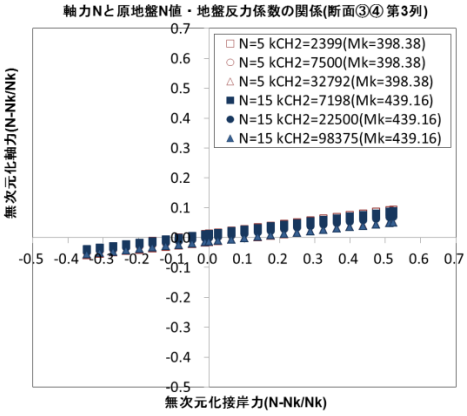
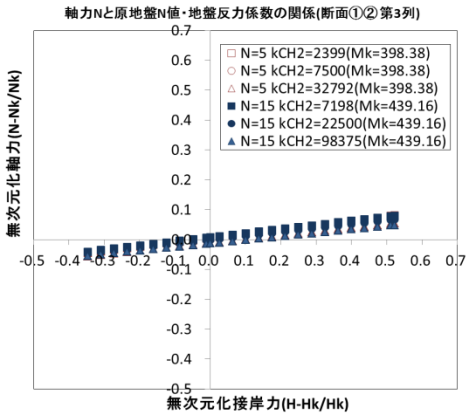
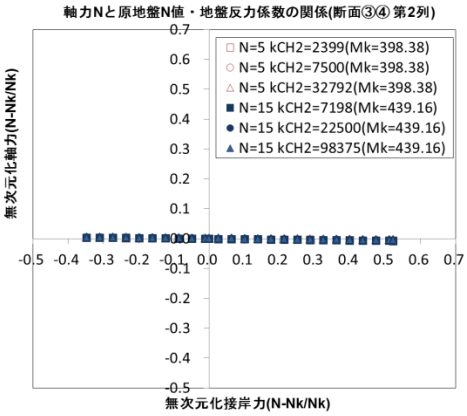
②軸力

前節の検討により，原地盤 N 値や接岸力の変化は，軸力の変化にほとんど影響しない ことを確認しているが，ここでは地盤反力係数の変化についても検討する．

特性値により無次元化した接岸力と軸力の推移を**付表 B-4** に示す．なお，接岸力は μ-σ～μ+3σ まで変化させ，地盤反力係数は各断面における μ-σ，X，μ+3σ で固定している．**付表 B-4** に示されるとおり，原地盤 N 値や地盤反力係数に関わらず，接岸力の変化に対して軸力はほぼ一定である．したがって，これらの要素は軸力にほとんど影響していないと判断できる．

一方で，杭列については，杭列間で関係式の傾向が変わっており，海側杭では接岸力の増加に伴い軸力が漸減，陸側杭では接岸力の増加に伴い軸力が漸増する傾向にある．ただし，曲げモーメントと比較すると，僅かな増減に過ぎず，杭列が軸力の部分係数に影響を与えるとは考えにくい．

付表 B-4　接岸力の変化に対する軸力と原地盤 N 値，および地盤反力係数の関係(断面①②，および断面③④)

杭列	断面①② (設計水深：7.5m，原地盤 N 値：5，15，海底勾配：1:2.0)	断面③④ (設計水深：7.5m，原地盤 N 値：5，15，海底勾配なし)
1		
2		
3		

(2) 捨石の地盤反力係数

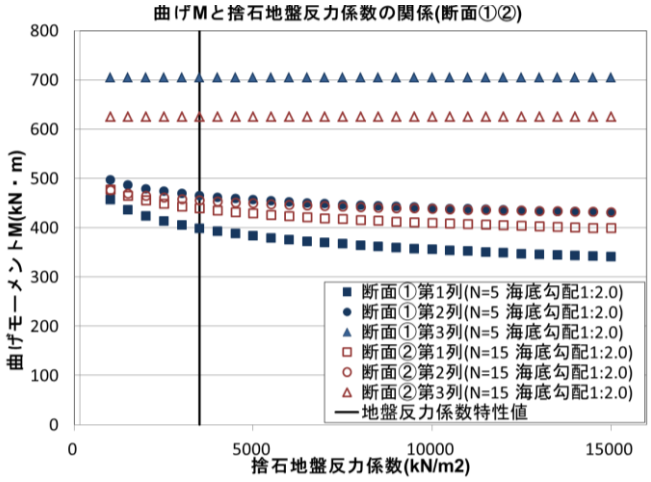
①曲げモーメント

断面①②(設計水深 7.5m，杭列数 3 列，海底勾配 1:2.0)における原地盤 N 値，および捨石の地盤反力係数が変化した際の発生部材力を**付図 B-4** に示す．なお，各断面の設計条件は**付表 B-1** に示したとおりであり，地盤反力係数の変化量は**付表 B-2** に示す μ-σ から μ+3σ までである．また，接岸力は特性値(268.0kN/ﾗｰﾒﾝ)で固定している．

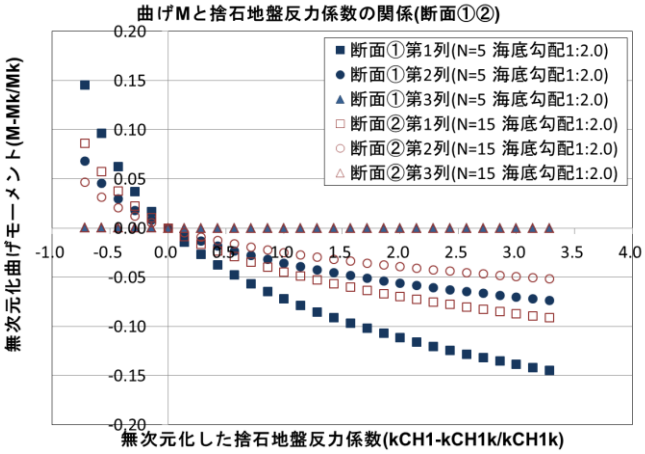
基本的に原地盤の地盤反力係数と同様の傾向であり，捨石地盤反力係数の増加に伴い，曲げモーメントが減少する．ただし，原地盤反力係数と比較すると，曲げモーメントの変化量は小さく，特に陸側杭では捨石地盤反力係数の変化は曲げモーメントにほぼ影響しない．

曲げモーメント，捨石地盤反力係数を無次元化すると**付図 B-5** に示すとおりとなるが，捨石地盤反力係数の変化に対する曲げモーメントの推移は，杭毎に明確に異なることがわかる．すなわち，陸側杭では捨石地盤反力係数の変化に関わらず，曲げモーメントはほぼ一定であるのに対し，海側杭に近づくほど，曲げモーメントは捨石地盤反力係数の変化による影響を受ける．また，原地盤 N 値が小さい断面ほど，より顕著に影響を受ける．したがって，捨石地盤反力係数の変化に対する曲げモーメントの感度は，杭列により異なるといえる．なお，捨石地盤反力係数が μ+3σ まで変化した際の曲げモーメントの変化量は，最も変化量が 大きい断面①第 1 列杭でも，特性値の 85%程度であり，絶対量としてはそれほど影響しないともいえる．

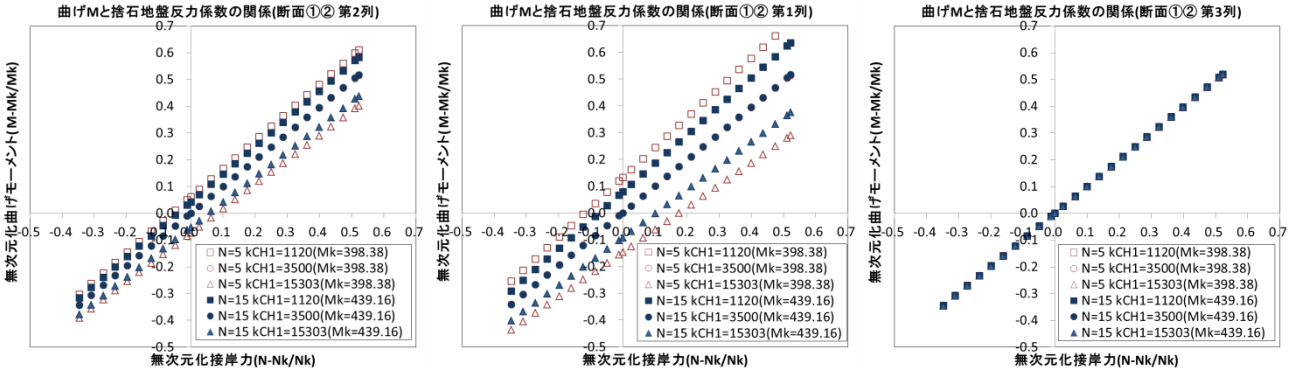
一方，捨石地盤反力係数を固定し，無次元化した接岸力の変化に対する無次元化した曲げモーメントの推移を**付図 B-6** に示すが，陸側杭では原地盤 N 値，捨石地盤反力係数に関わらず，各関係式はほぼ一致し，海側杭に近づくほど，原地盤 N 値および捨石地盤反力係数による影響を受けていることが分かる．ただし，捨石地盤反力係数が特性値である場合は，杭列も曲げモーメントの推移に影響しない．また，原地盤 N 値や捨石地盤反力係数に関わりなく，無次元化接岸力と無次元化曲げモーメントはほぼ正比例であり，接岸力の変化が曲げモーメントに与える影響は，捨石地盤反力係数と比較して遥かに大きいことが確認できる．



付図 B-4　曲げモーメントと捨石地盤反力係数の関係



付図 B-5 無次元化した捨石地盤反力係数の変化に対する曲げモーメントの推移(断面①②)

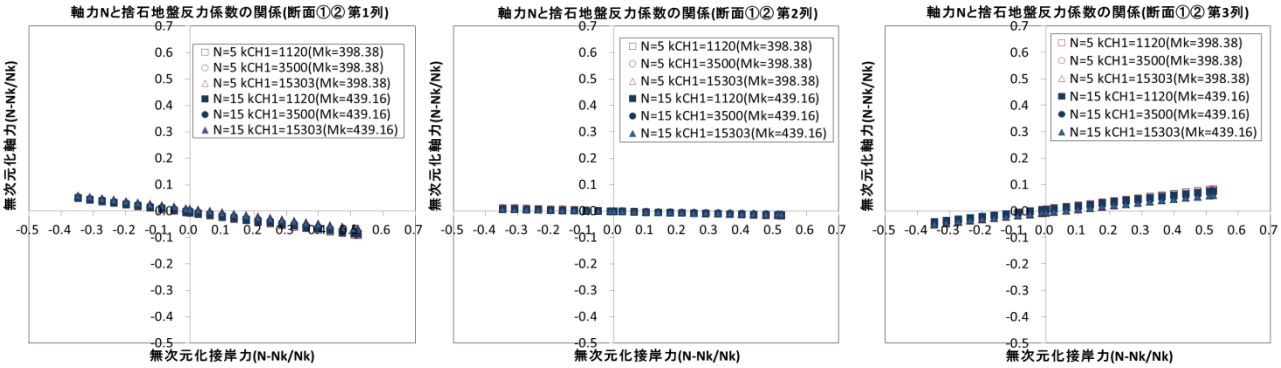


付図 B-6　接岸力の変化に対する無次元化した曲げモーメントと捨石地盤反力係数の関係(断面①②)

②軸力

特性値により無次元化した接岸力の変化に対する軸力の推移を**付図 B-7** に示す．なお，接岸力は μ-σ～μ+3σ まで変化させ，捨石地盤反力係数は各断面における μ-σ, X, μ+3σ で固定している．

傾向としては，原地盤反力係数と同様であり，原地盤 N 値や捨石地盤反力係数，接岸力に関わらず，無次元化した接岸力と軸力の関係式はほぼ一定となっている．このため，これらの要素は軸力にほとんど影響していないことが分かる．また，杭列についても，杭列間で関係式の傾向が変わっており，海側杭では接岸力の増加に伴い軸力は漸減，陸側杭では接岸力の増加に伴い軸力は漸増する傾向にある．ただし，曲げモーメントと比較すると，僅かな増減に過ぎず，杭列が軸力の部分係数に影響を与えるとは考えにくいといえる



付図 B-7　接岸力の変化に対する無次元化した曲げモーメントと捨石地盤反力係数の関係（断面①②）

(3) 海底勾配の有無

①曲げモーメント

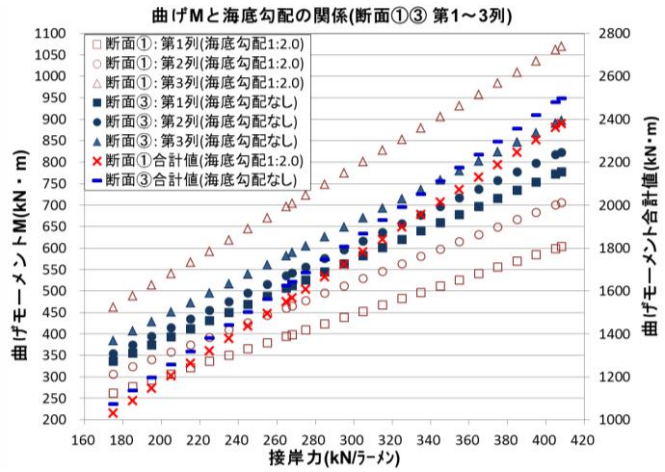
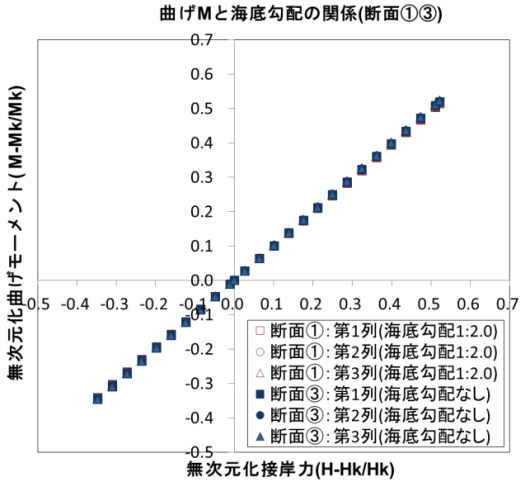
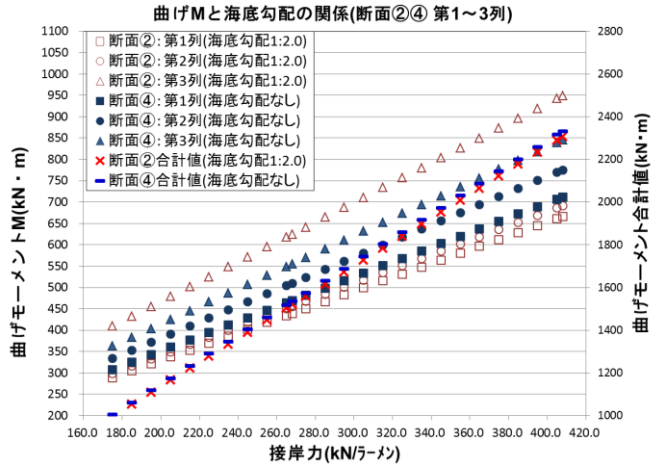
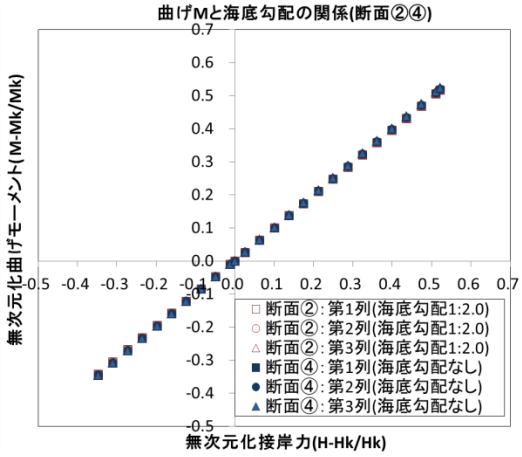
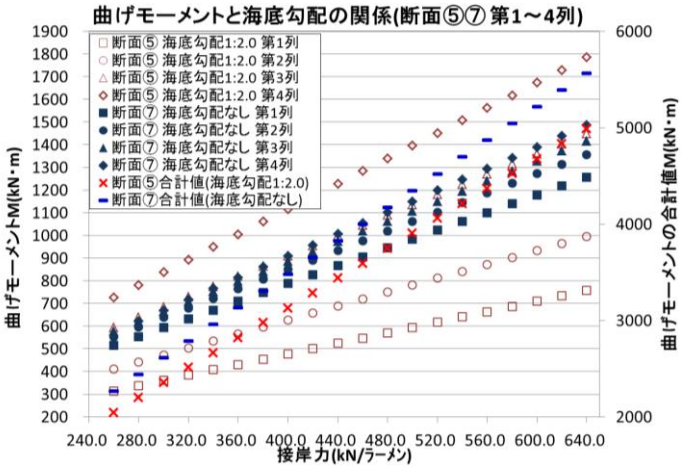
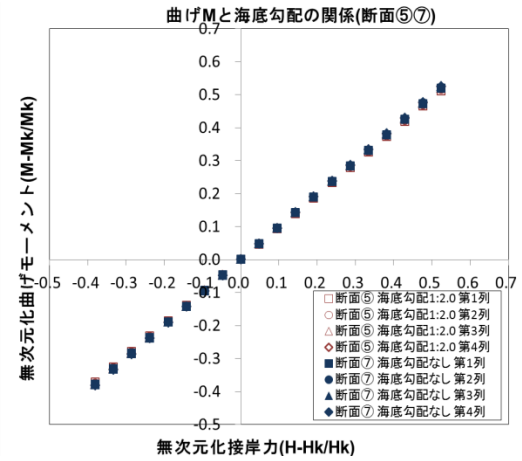
以下の断面における海底勾配，および接岸力が変化した際の曲げモーメントを**付表 B-5** の左列に示す．なお，**付表 B-5** における各断面の設計条件は以下のとおりである．

・断面①③：設計水深 7.5m，杭列数 3，原地盤 N 値=5
・断面②④：設計水深 7.5m，杭列数 3，原地盤 N 値=15
・断面⑤⑦：設計水深 12m，杭列数 4，原地盤 N 値=5

付表 B-5 より，海底勾配を有する断面は，杭列間で曲げモーメントに大きな差が生じることが分かる．なお，杭列間に生じる曲げモーメントの差は，原地盤 N 値の影響を受けており，N 値が小さい断面では杭列間での曲げモーメントの差はより大きくなる．一方で，水深の影響はそれほど大きくない．また，各杭における曲げモーメントの合計値は，海底勾配を有する断面では，無勾配の断面より小さい値となる．これは，基礎捨石により陸側杭では水深が小さくなるためと考えられる．したがって，水深が深い断面ほど，海底勾配の有無により曲げモーメントの合計値に生じる差は大きくなる傾向がある．

しかしながら，特性値により無次元化した接岸力の変化に対する曲げモーメントの推移(**付表 B-5** 右列)は，杭列や海底勾配の有無に関わらずほぼ一致する．つまるところ，**附録 A** に示したように，海底勾配が変化すると接岸力が特性値である時の曲げモーメントは異なる値となるが，海底勾配が異なっていても，無次元化した接岸力の変化に対する無次元化した曲げモーメントの推移はほとんど変化しない．

付表 B-5　接岸力の変化に対する曲げモーメントと海底勾配の関係

断面	非無次元化	無次元化
①③		
②④		
⑤⑦		

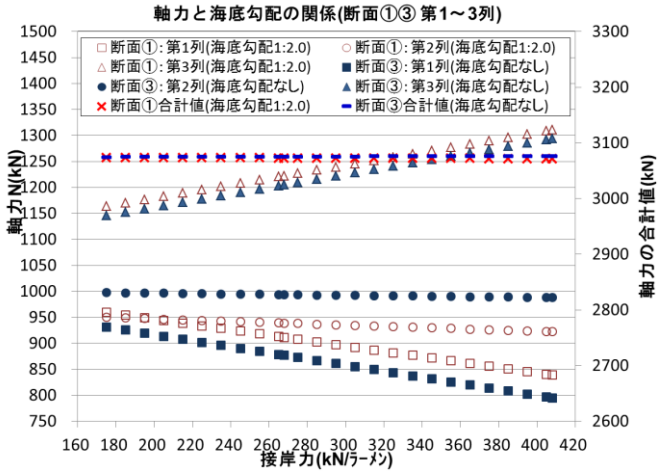
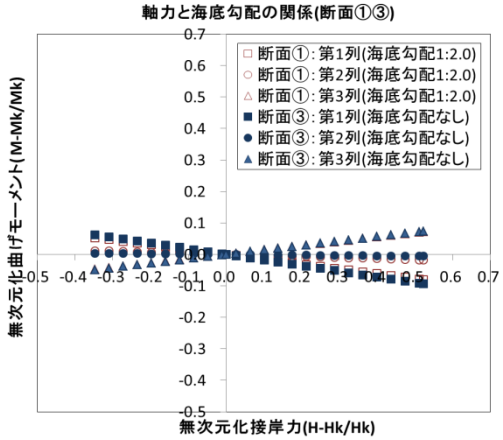
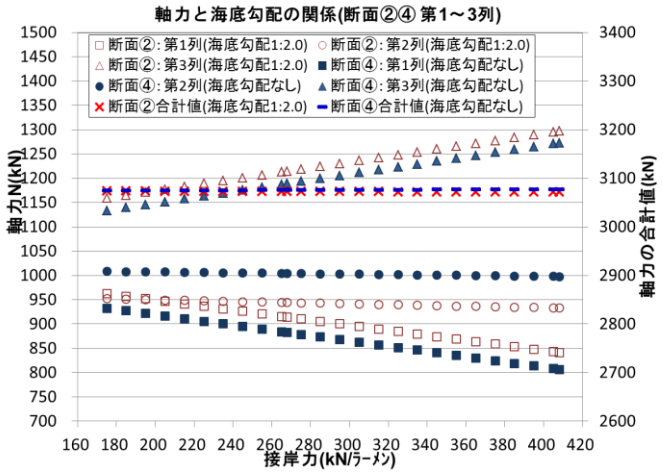
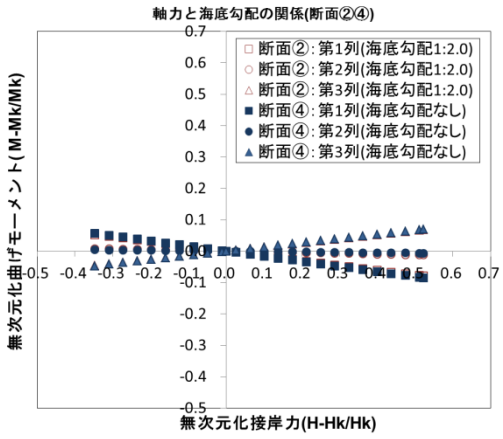
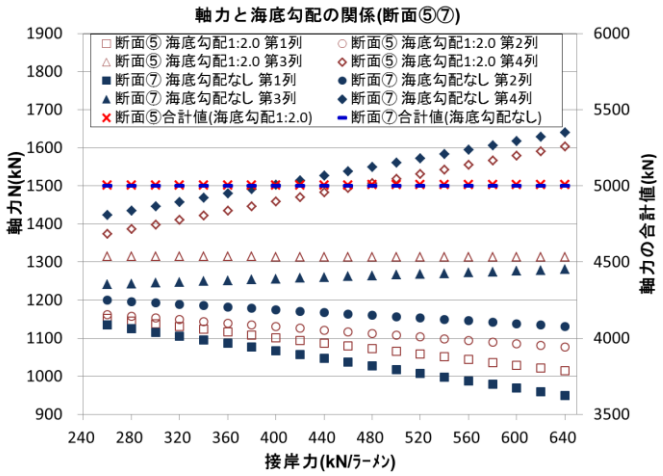
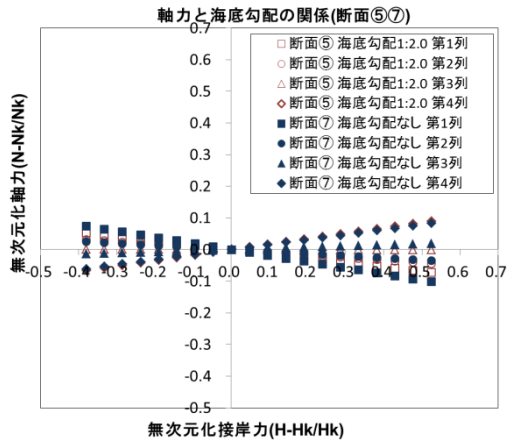
②軸力

曲げモーメントと同様の各断面に対し，海底勾配および接岸力が変化した際の軸力の推移を**付表 B-6** 左列に示す．**付表 B-6** より，海底勾配を有する断面は，海側杭における軸力が大きくなり，中央杭に近い値をとることが分かる．また，杭列ごとに接岸力の変化に対する軸力の推移の傾向が異なり，海側杭では漸減，陸側杭では漸増となる．ただし，海底勾配の有無に伴い各杭列に生じる軸力の差は僅かであり，海底勾配が軸力に与える影響は小さいといえる．また，各杭に生じる軸力の合計値は，海底勾配の有無や接岸力に関わらず一定である．

これを踏まえ，軸力および接岸力を無次元化すると，付表 B-6 右列に示すとおりとなり，海底勾配は接岸力と軸力の関係性に対してほとんど影響しない．

実際の設計において，桟橋式係船岸における基礎捨石は無勾配～1:1.5 程度であるため，本検討の勾配(無勾配，1:2.0)は，概ね基礎捨石の取り得る勾配を網羅している．接岸力に対する軸力の感度の低さもあり，実設計において用いられる海底勾配の範囲では，軸力にほとんど影響しないと判断される．

付表 B-6　接岸力の変化に対する軸力と海底勾配の関係

断面	非無次元化	無次元化
①③		
②④		
⑤⑦		

(4) 杭列数

①曲げモーメント

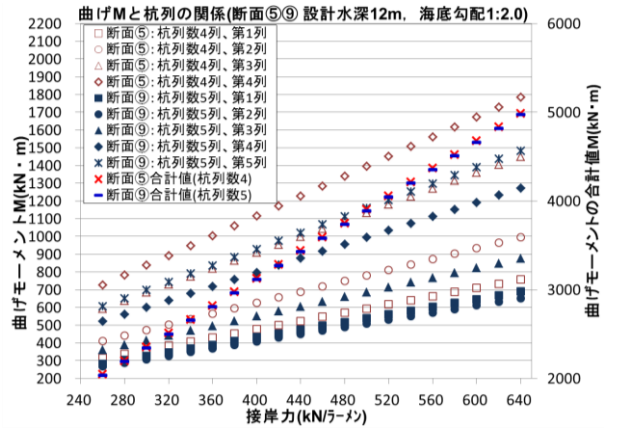
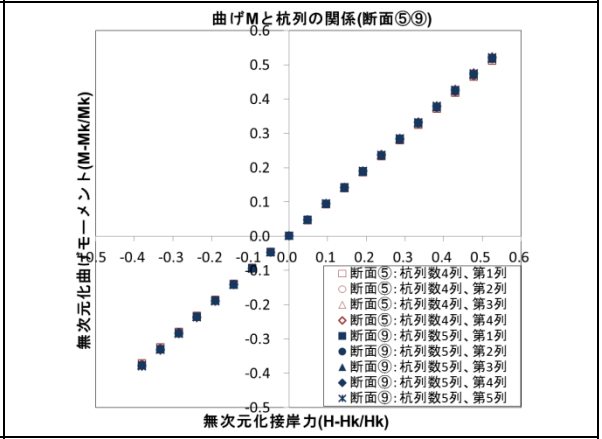
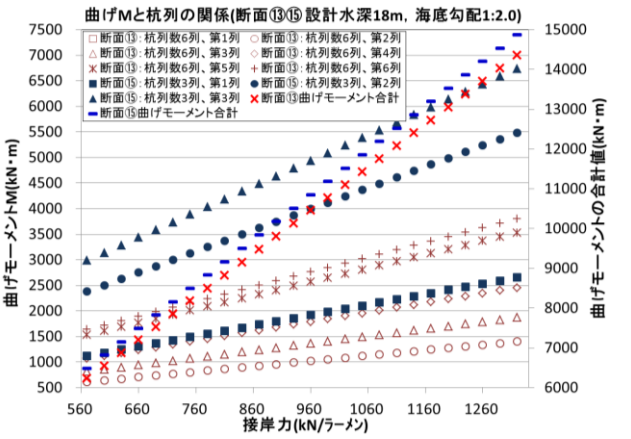
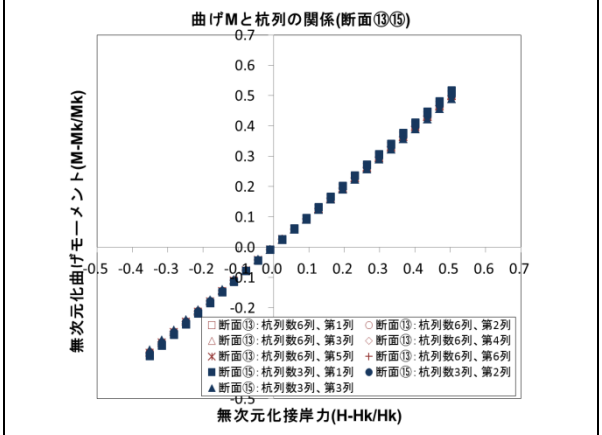
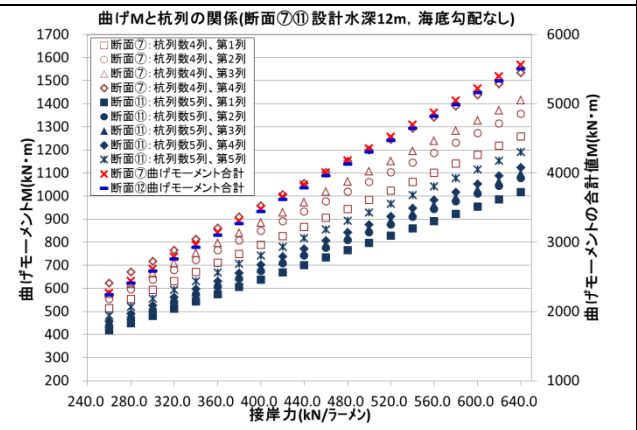
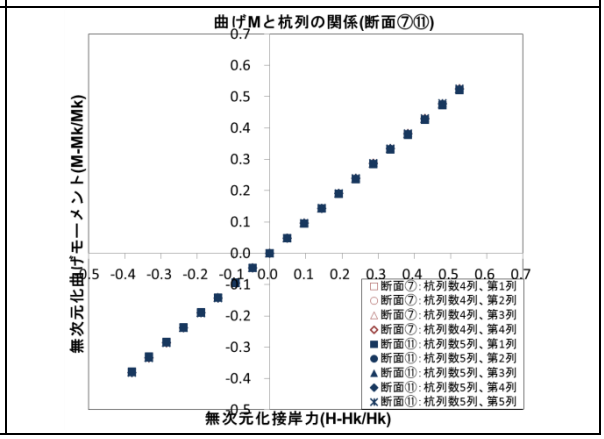
以下の断面における杭列および接岸力が変化した際の曲げモーメントを**付表 B-7** 左列に示す．なお，全ての断面において原地盤 N 値=5 であり，その他の諸元は以下のとおりである．

・断面⑤⑨：水深 12m，杭列数 4 or 5，海底勾配 1:2.0
・断面⑬⑮：水深 18m，杭列数 6 or 3，海底勾配 1:2.0
・断面⑦⑪：水深 12m，杭列数 4 or 5，海底勾配なし

当然のことながら，杭列数の差が大きいほど，杭列間での曲げモーメントの差は大きくなる．しかし，各断面における桟橋杭の剛性や上部工重量が異なるにもかかわらず，各杭に生じる曲げモーメントの合計値は，杭列数の影響を受けずほぼ一定である．

杭列数により杭間で生じる曲げモーメントの差は異なるが，無次元化した接岸力との関係式は杭列数の差に関わらず一定である(**付表 B-7** 右列)．したがって，杭列数の差は，基準値からの接岸力の変化に対する曲げモーメントの推移に対してはほとんど影響しないといえる．

付表 B-7　接岸力の変化に対する曲げモーメントと杭列の関係

断面	非無次元化	無次元化
⑤⑨		
⑬⑮		
⑦⑪		

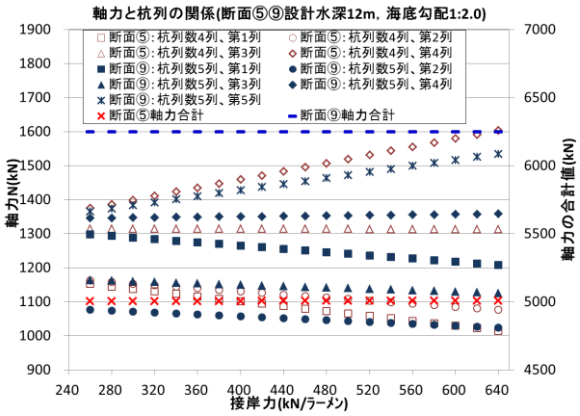
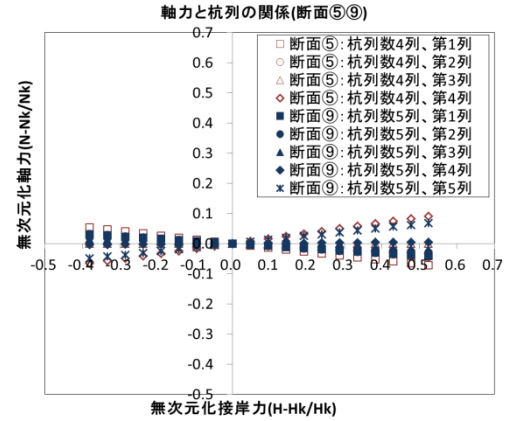
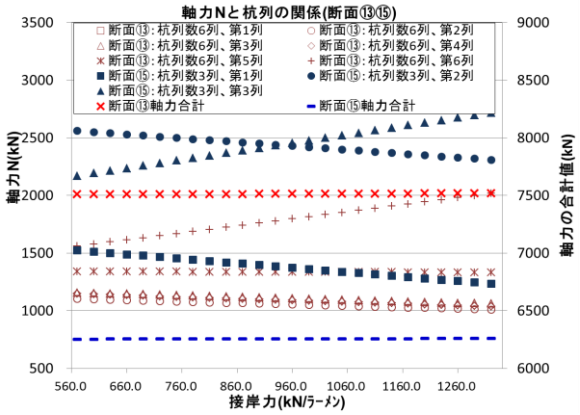
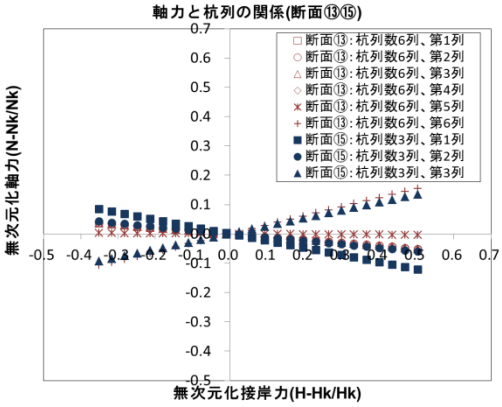
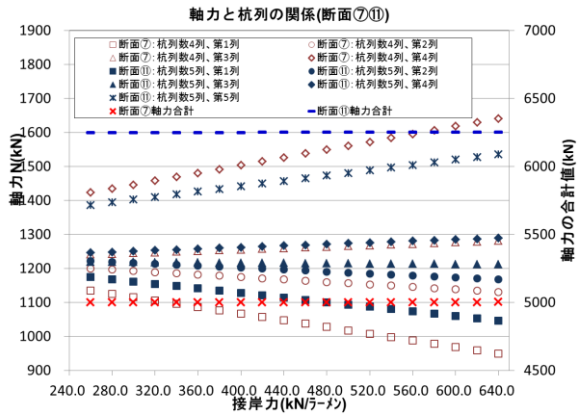
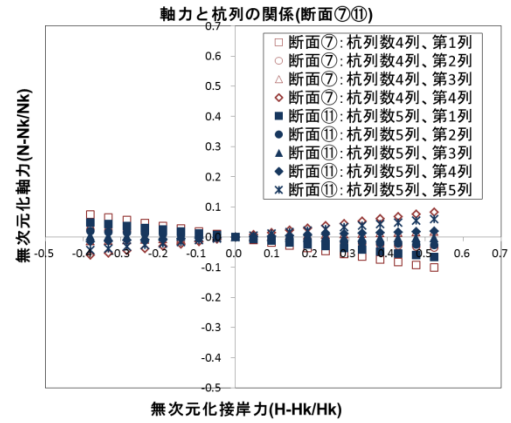
②軸力

曲げモーメントと同様の各断面に対し，杭列数および接岸力が変化した際の軸力を**付表 B-8** 左列に示す．前節で示したとおり，軸力は上部工重量の影響を強く受けるため，杭列数が多い断面では，上部工面積の増加に伴い発生軸力の合計値が大きくなる．

個々の杭に生じる軸力については，基本的な傾向として，杭列数に関わらず，接岸力の増加に対して陸側杭の発生軸力は漸増し，海側杭の発生軸力は漸減する．これは，接岸力が増加すると陸側杭で押込力，海側杭で引抜力が発生するためであるが，この傾向は軸力および接岸力を基準値により無次元化するとより明確となる(**付表 B-8** 右列)．したがって，杭列数を増やすと，海側杭は接岸力の増減に対する軸力の感度が顕著に低減するが，陸側杭では感度が変化しにくいといえる．

つまり，杭列数の多少は，特に海側杭において，接岸力の変化に対する軸力の推移に影響すると考えられ，RC 桟橋と PC 桟橋のように，杭列数が大きく異なる構造形式では，接岸力の変化に対する軸力の推移の傾向が異なってくる．

付表 B-8　接岸力の変化に対する軸力と杭列の関係

断面	非無次元化	無次元化
⑤⑨		
⑬⑮		
⑦⑪		

(5) 岸壁の設計水深

①曲げモーメント

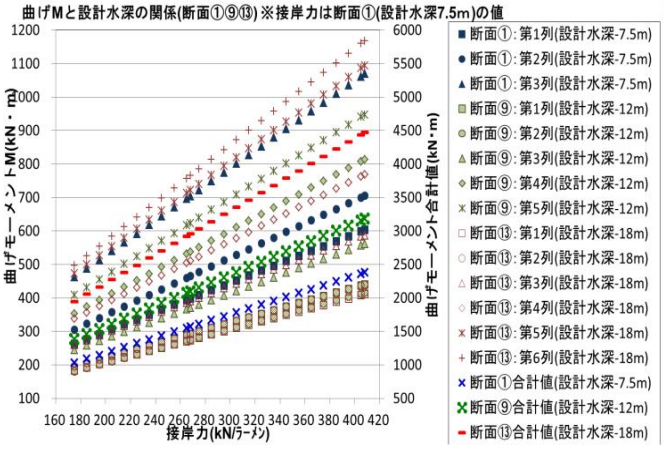
以下の断面における杭列および接岸力が変化した際の曲げモーメントを**付図 B-8** に示す．なお，接岸力の特性値は設計水深により異なるが，**付図 B-8** では比較のために断面①の接岸力を用いている．また，全ての断面において原地盤 N 値=5 である．

・断面①：水深 7.5m，杭列数 3，海底勾配 1:2.0
・断面⑨：水深 12m，杭列数 5，海底勾配 1:2.0
・断面⑬：水深 18m，杭列数 6，海底勾配 1:2.0

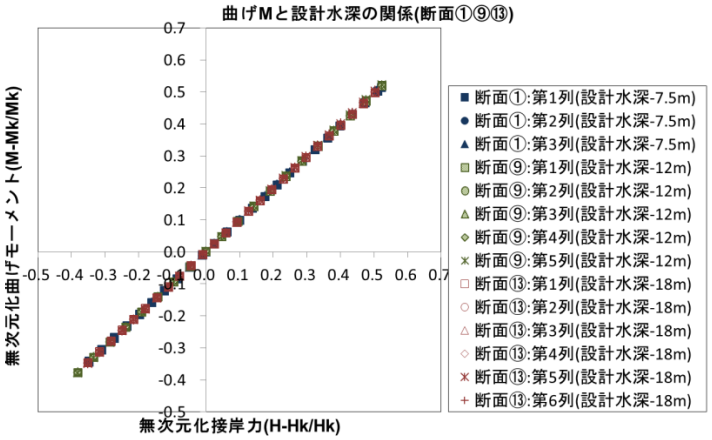
附録 A でも示したとおり，設計水深が増加すると桟橋杭の杭長が長くなるため，接岸力が同値であっても，設計水深が大きい断面ほど曲げモーメントは大きくなる．このため，各杭で発生する曲げモーメントの合計値は，断面①(7.5m)と断面⑬(18m)とでは 2 倍近い差が生じる．

一方で，個々の杭に発生する曲げモーメントについては，各断面の杭列数が異なり直接の比較が難しいことから，基準値により無次元化する(**付図 B-9**)．なお，接岸力の無次元化に用いた接岸力特性値は，**付図 B-8** と異なり，各断面の設計水深に対応した特性値である．

付図 B-9 に示すように，無次元化した接岸力の変化に対する曲げモーメントの推移は，各断面間で防舷材の性能が異なるにも関わらず，設計水深に関わらず一定であることが分かる．



付図 B-8　接岸力の変化に対する曲げモーメントと設計水深の関係



付図 B-9　無次元化した接岸力の変化に対する曲げモーメントと設計水深の関係

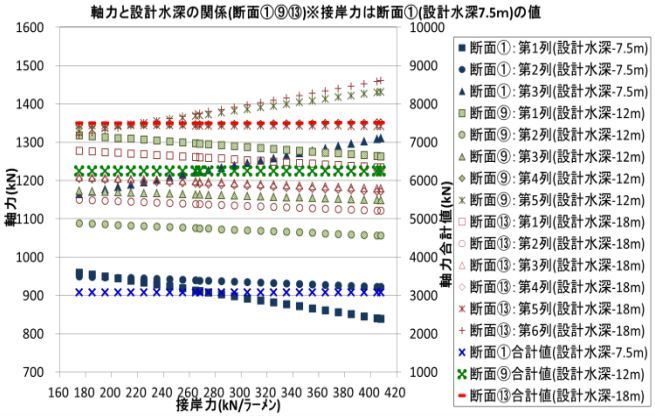
②軸力

曲げモーメントと同様の各断面に対し，設計水深および接岸力が変化した際の軸力の推移を**付図 B-10** に示す．**附録 A** で示したとおり，軸力は上部工重量の影響を強く受けるため，設計水深が大きい断面は，杭列数が多くなり，発生軸力の合計値も大きくなる．

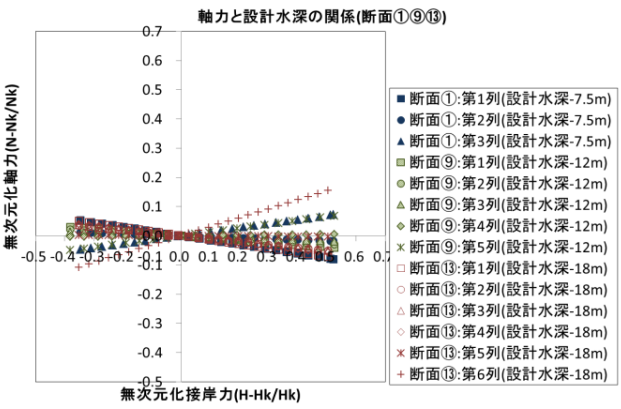
個々の杭の発生軸力については，基本的な傾向として，設計水深に関わらず，接岸力の増加に対して陸側杭の発生軸力は漸増し，海側杭の発生軸力は漸減する．しかしながら，発生軸力の合計値は，接岸力に関わらず一定である．

一方，軸力および接岸力を基準値により無次元化すると**付図 B-11** に示すとおりとなる．海側杭については，設計水深が変化しても，接岸力の増減に対する軸力の感度はほとんど変化しないが，陸側杭については，水深が大きい断面ほど接岸力の増減に対する軸力の感度が鋭敏となる．つまり，設計水深の大小は，特に陸側杭に対し，接岸力と発生軸力との関係性に影響を与えるといえ，設計水深が異なる断面同士では，信頼性解析における発生軸力の傾向が変化する可能性がある．

ただし，上載荷重や上部工重量が変化しない限り，接岸力に対する発生軸力の感度は非常に低い．このため，桟橋式係船岸の信頼性解析において，設計水深の大小により，発生軸力に対する破壊確率が大きく変化する可能性は低いと考えられる．



付図 B-10　接岸力の変化に対する軸力と設計水深の関係



付図 B-11　無次元化した接岸力の変化に対する軸力と設計水深の関係

(6) まとめ

これまでの検討を取り纏めると，各設計条件に対する近似式の感度は付表B-9，付表B-10に示すとおりとなる．

曲げモーメントについては，海底勾配を有する断面において，海側杭のみ無次元化した地盤反力係数の増減に対する曲げモーメントの推移が一定とならない．ただし，原地盤や捨石の地盤反力係数が特性値の0.3～4.5倍程度まで変化しても，曲げモーメントの増減は基準値比-20%～10%程度に過ぎず，接岸力の変化に伴う曲げモーメントの推移と比較すると非常に小さい変化量である．また，実際の設計において，横桟橋式係船岸の基礎捨石勾配は無勾配～1:1.5程度であるため，本研究において設定した検討断面の改訂勾配(無勾配，1:2.0)は，概ね基礎捨石の取り得る勾配を網羅していると判断できる．

軸力については，杭列数や設計水深が異なると，僅かながら感度に差が生じることが確認できるが，接岸力に対する感度そのものが低く，接岸力が増減しても，軸力はほとんど変化しないといえる．また，地盤反力係数の変化に対しても，軸力の感度は非常に低く，ほぼ一定である．

以上より，接岸力と地盤反力係数を確率変数として評価することが可能であれば，海底勾配等の設計条件は断面毎に固定しても，信頼性解析の精度確保は可能と考えられる．また，本検討で設定した各検討断面により，横桟橋の接岸力に対する杭応力の照査について，ある程度網羅的な信頼性解析が可能であると判断できる．

付表 B-9　各設計条件に対する近似式の感度(曲げモーメント)

設計条件	入力値：接岸力	入力値：地盤反力係数
原地盤の N 値	少	少
海底勾配の有無	少	海側杭が他列と比較して高い． ※ただし，接岸力と比較して僅少
杭列数	少	少
設計水深	少	少

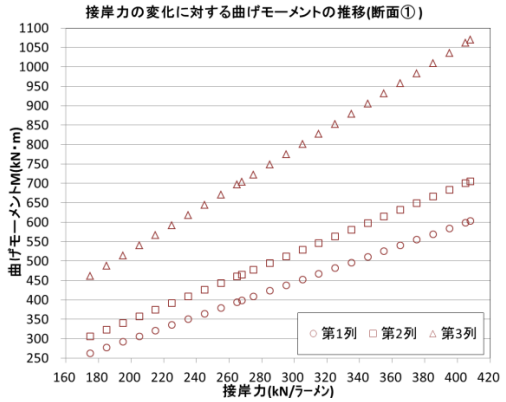
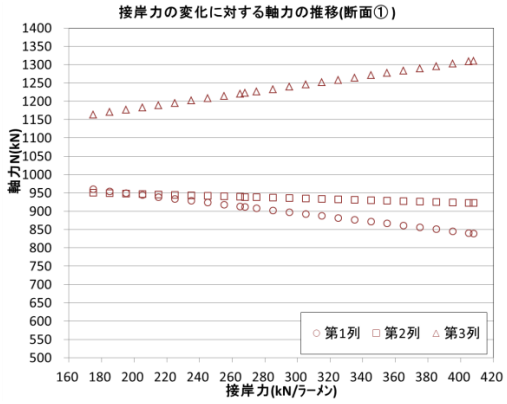
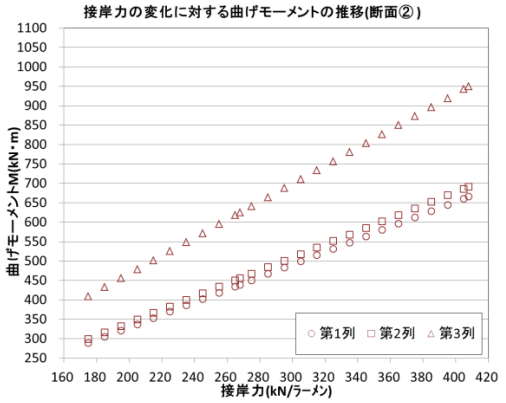
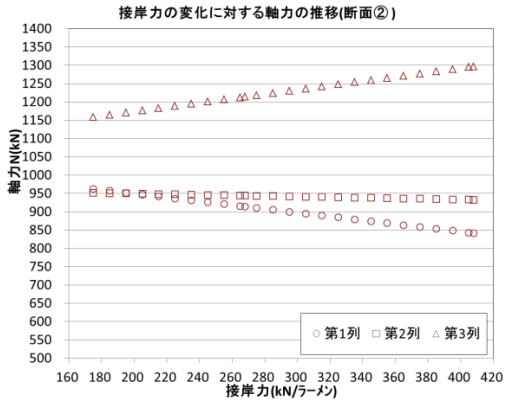
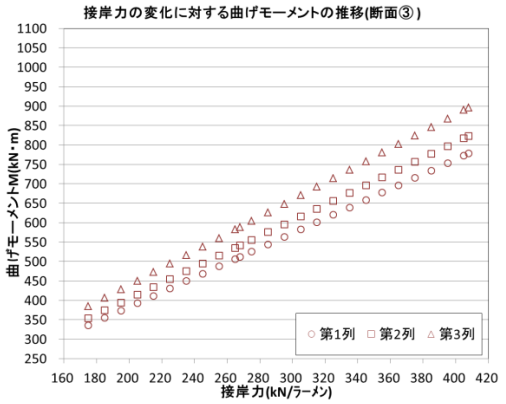
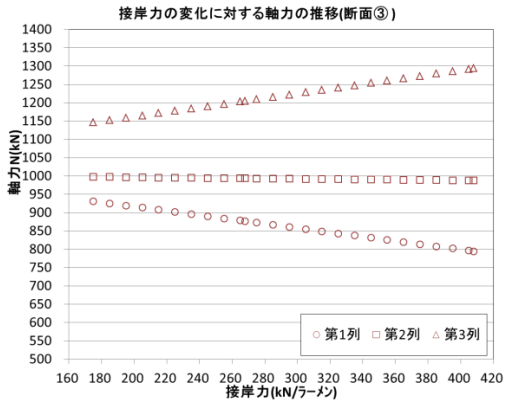
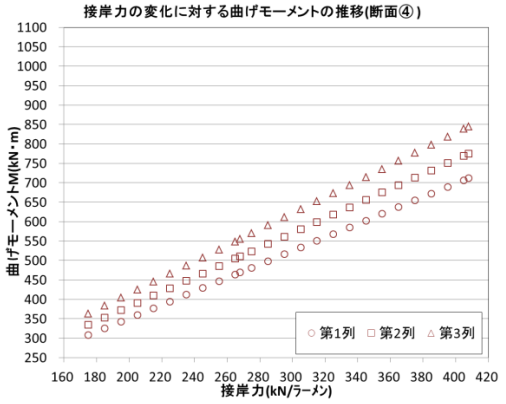
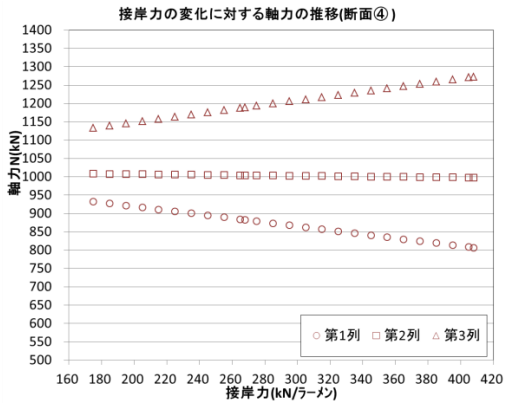
付表 B-10　各設計条件に対する近似式の感度(軸力)

設計条件	入力値：接岸力	入力値：地盤反力係数
原地盤の N 値	少	少
海底勾配の有無	少	少
杭列数	少	少
設計水深	少	少

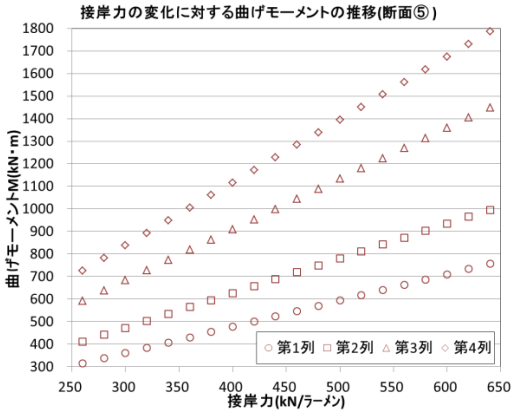
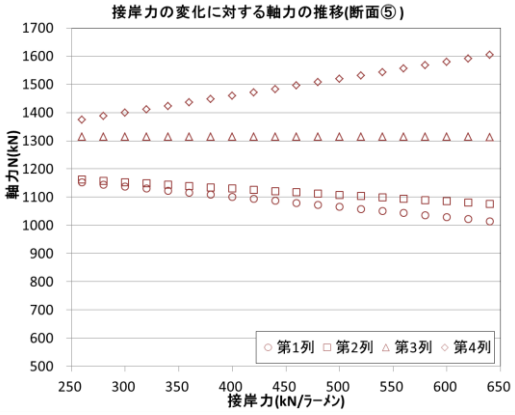
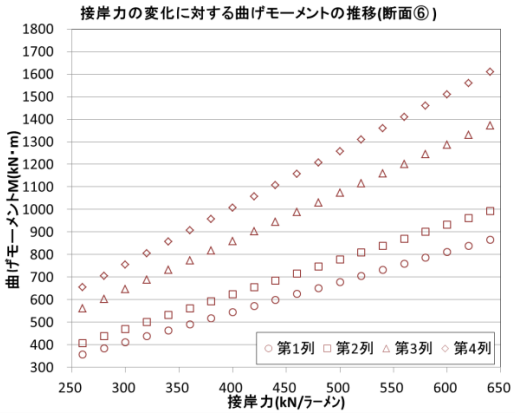
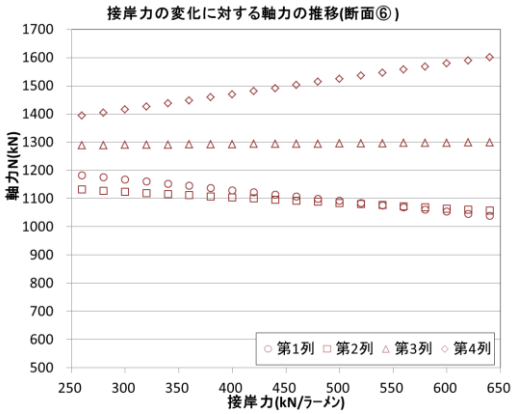
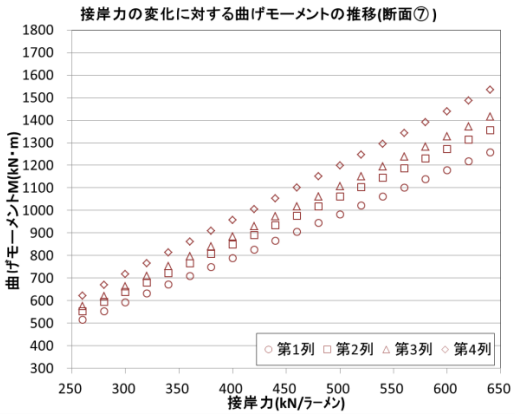
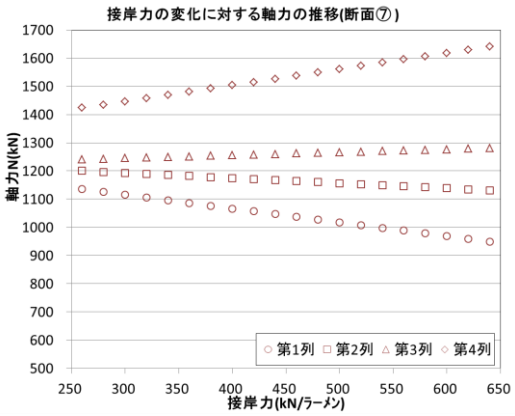
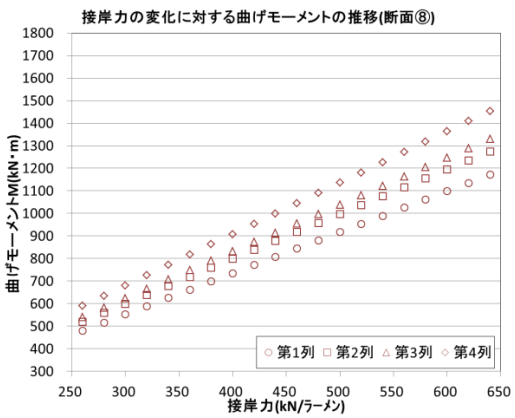
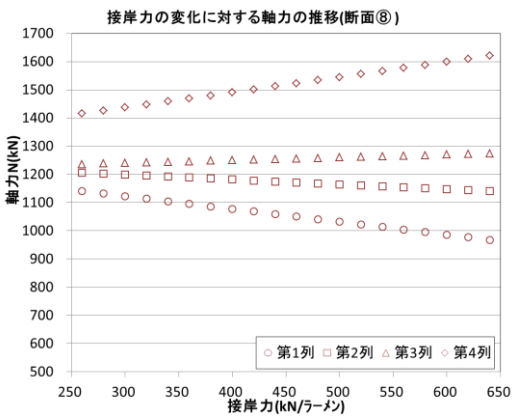
なお，全断面における発生部材力の算出結果は次頁以降に示す．

①接岸力の変化に対する近似式出力値の推移

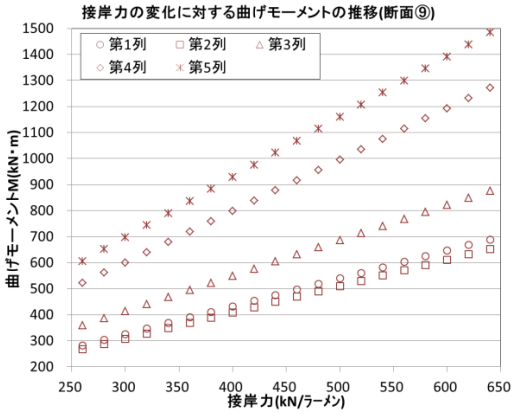
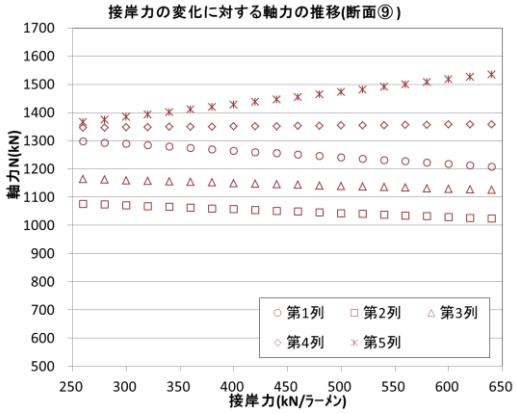
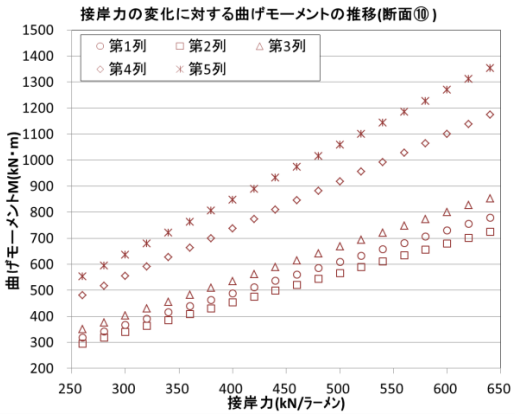
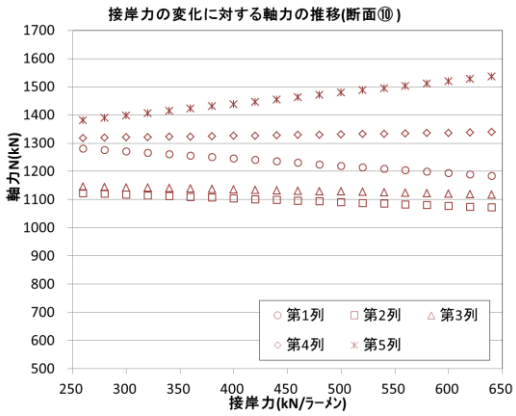
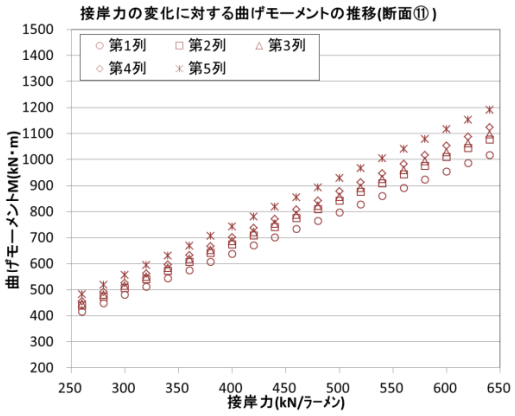
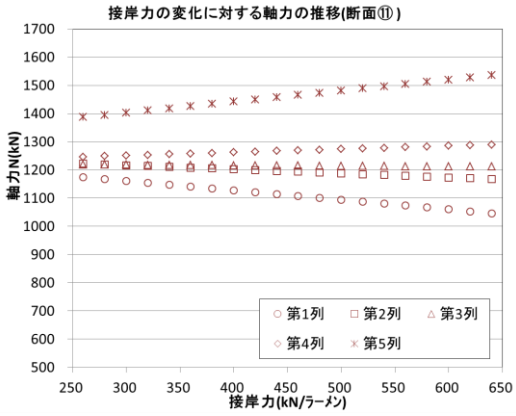
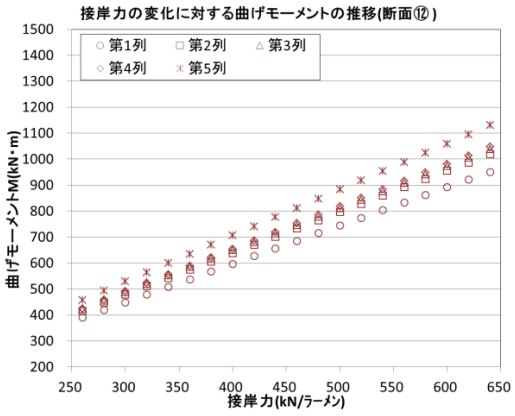
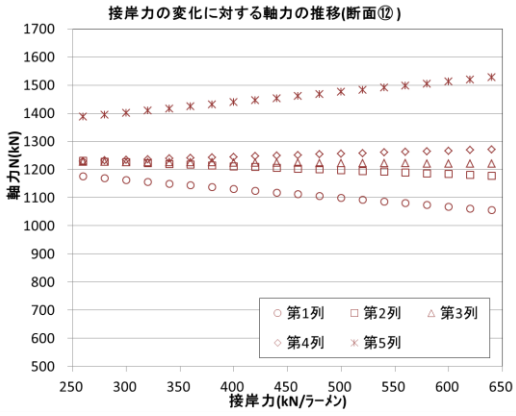
付表 B-11　接岸力の変化に対する近似式出力値の推移(断面①～④)

	発生部材力	
	曲げモーメント	軸力
断面①		
断面②		
断面③		
断面④		

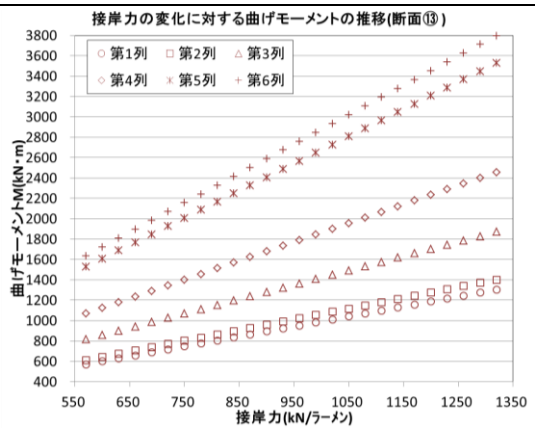
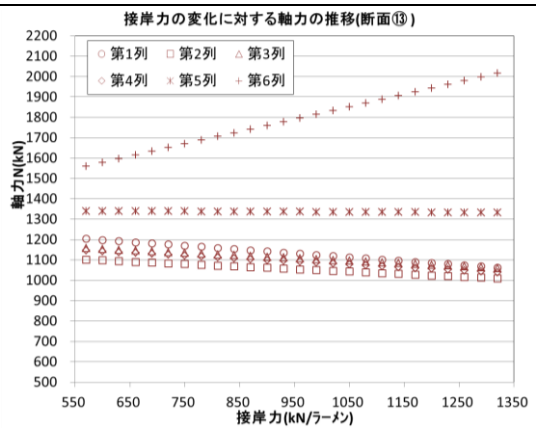
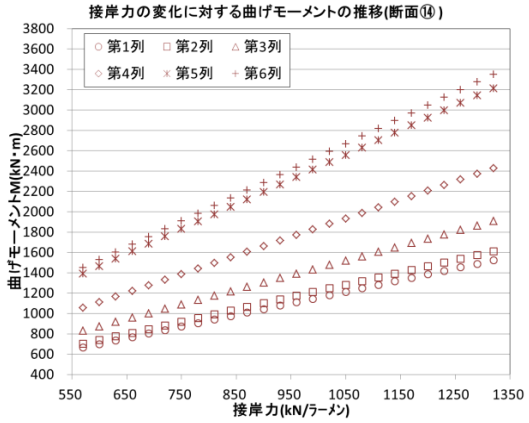
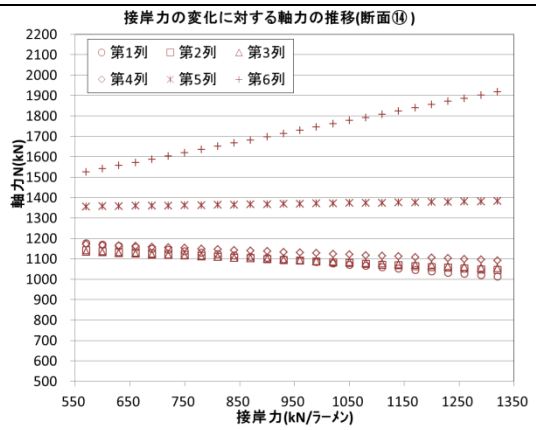
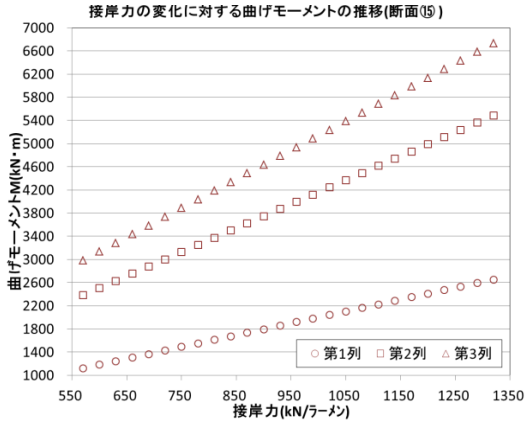
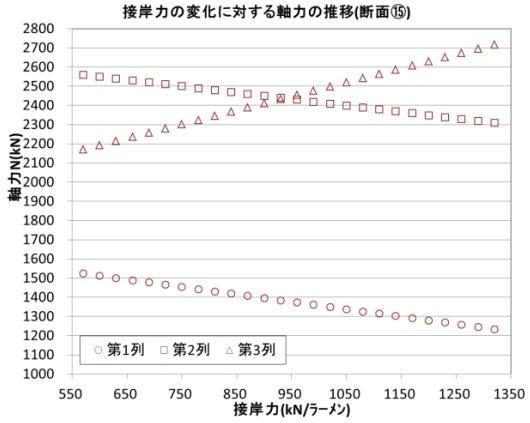
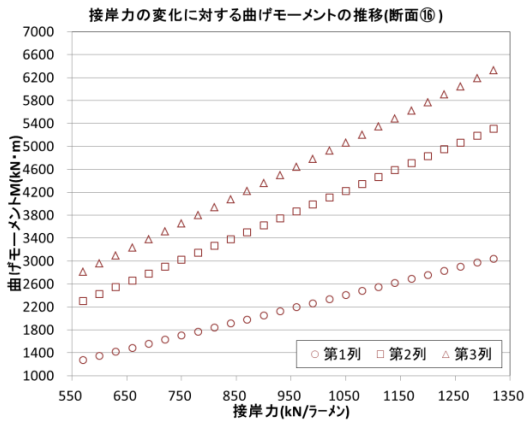
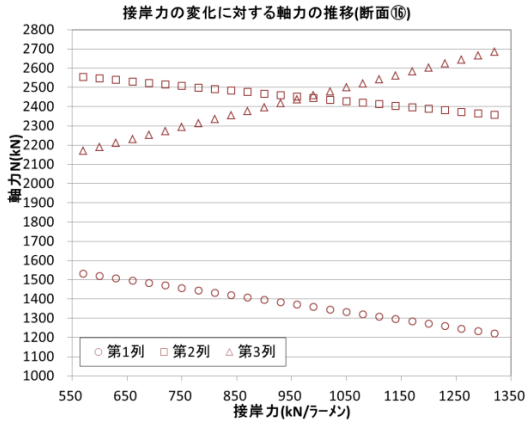
付表 B-12　接岸力の変化に対する近似式出力値の推移(断面⑤～⑧)

	発生部材力	
	曲げモーメント	軸力
断面⑤		
断面⑥		
断面⑦		
断面⑧		

付表 B-13　接岸力の変化に対する近似式出力値の推移(断面⑨～⑫)

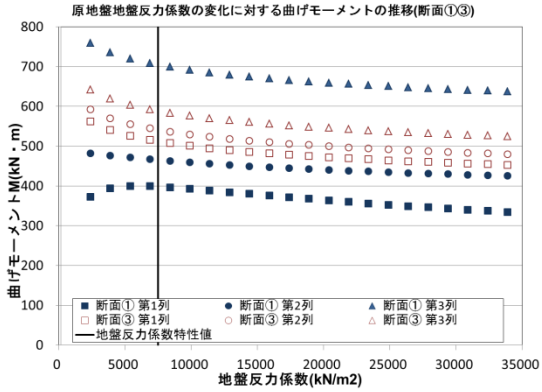
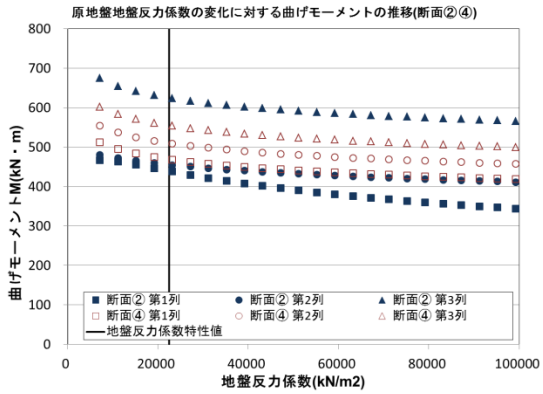
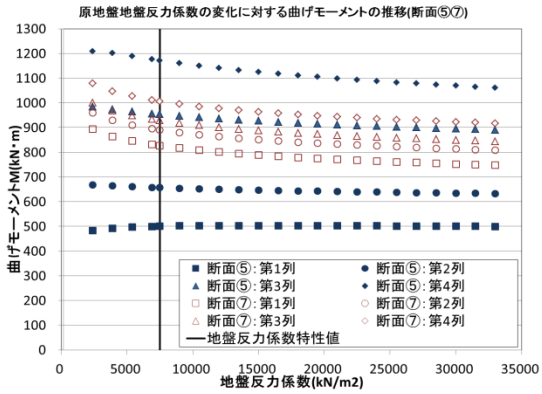
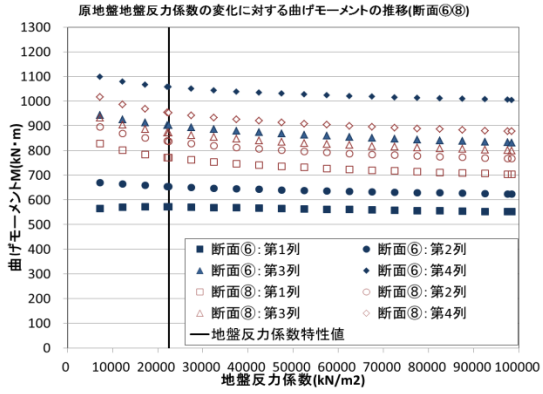
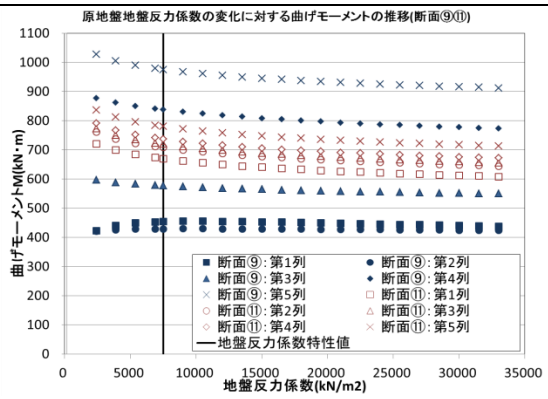
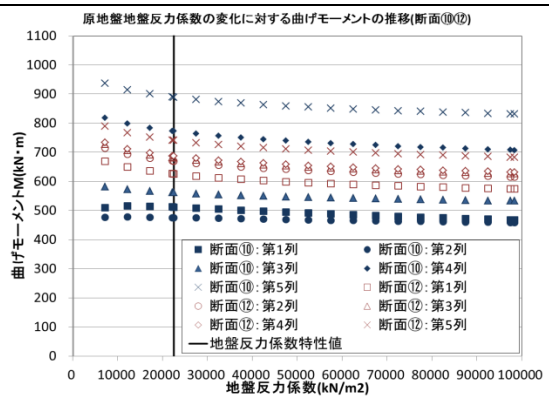
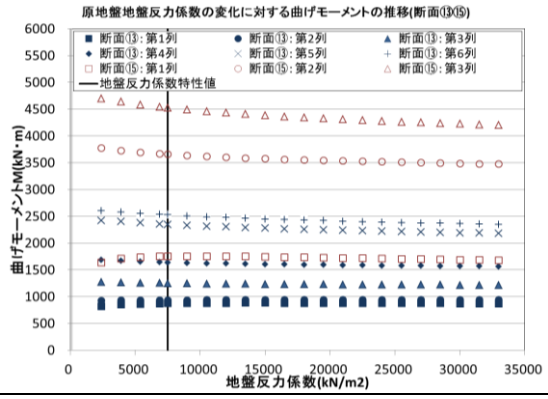
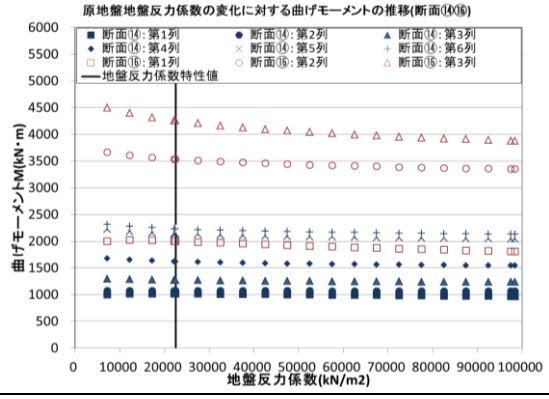
	発生部材力	
	曲げモーメント	軸力
断面⑨		
断面⑩		
断面⑪		
断面⑫		

付表 B-14　接岸力の変化に対する近似式出力値の推移（断面⑬～⑯）

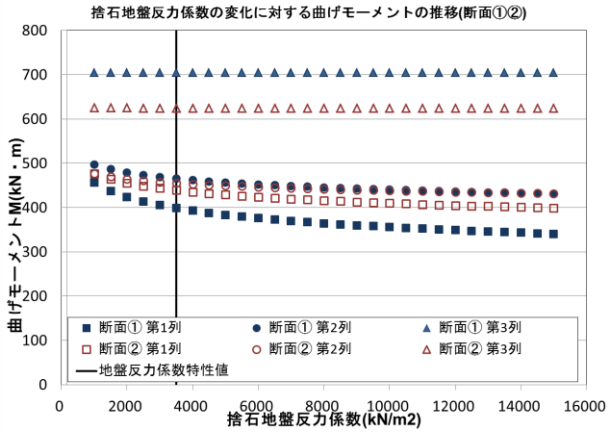
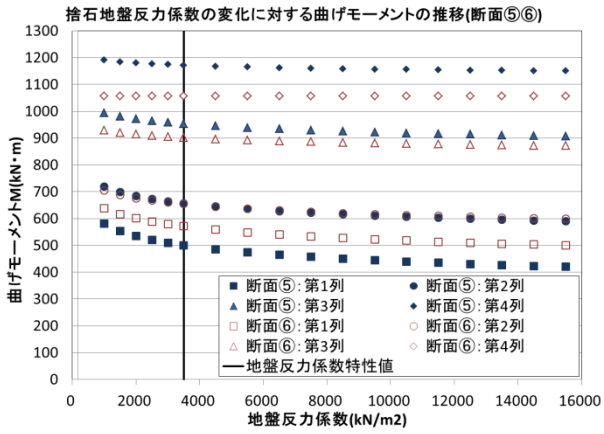
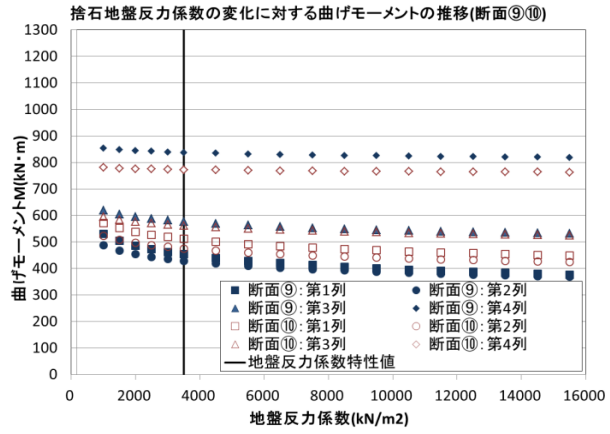
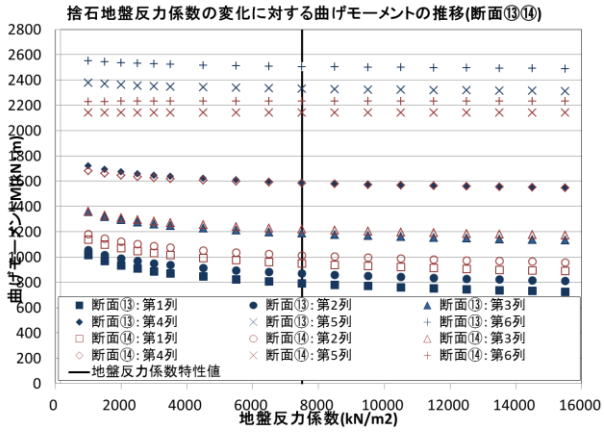
	発生部材力	
	曲げモーメント	軸力
断面⑬		
断面⑭		
断面⑮		
断面⑯		

②地盤反力係数の変化に対する近似式出力値の推移

付表 B-15　原地盤の地盤反力係数の変化に対する曲げモーメントの推移

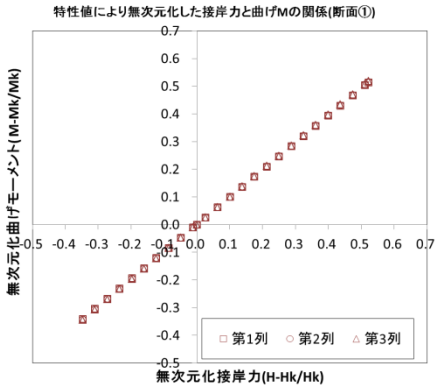
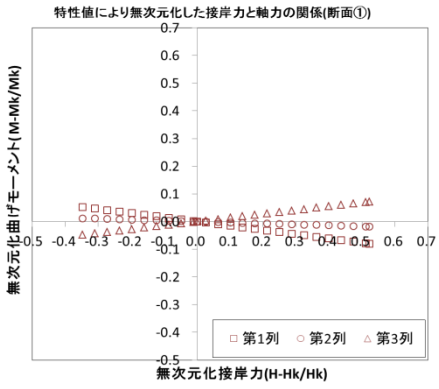
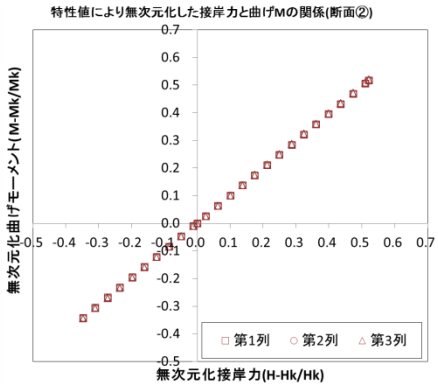
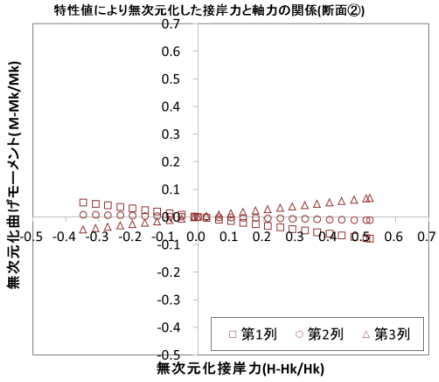
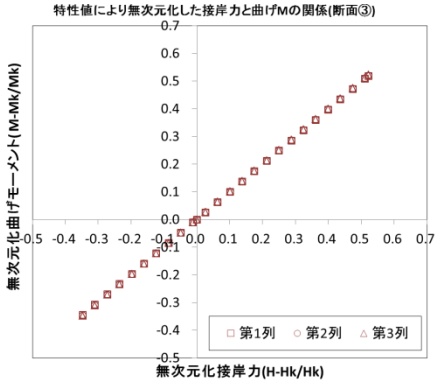
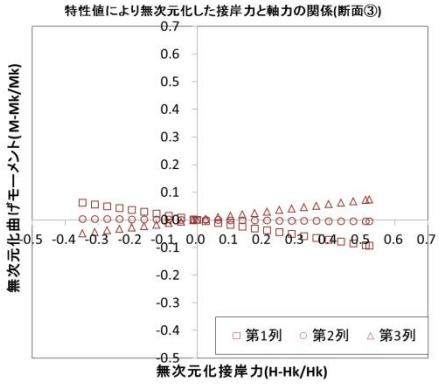
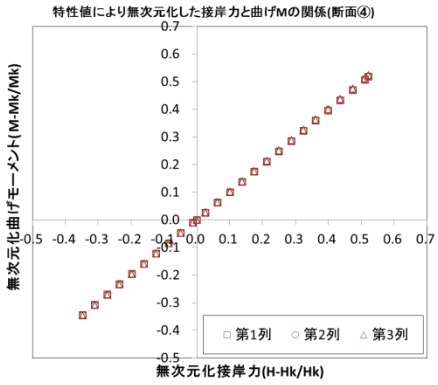
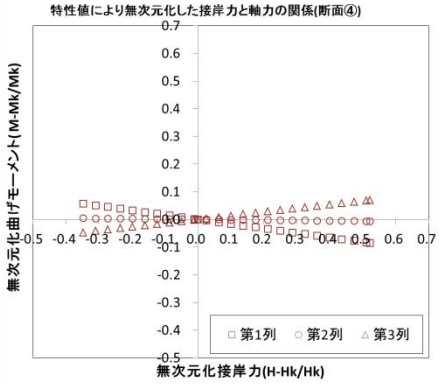
断面	断面①③	断面②④
関係図		
断面	断面⑤⑦	断面⑥⑧
関係図		
断面	断面⑨⑪	断面⑩⑫
関係図		
断面	断面⑬⑮	断面⑭⑯
関係図		

付表 B-16　捨石の地盤反力係数の変化に対する曲げモーメントの推移

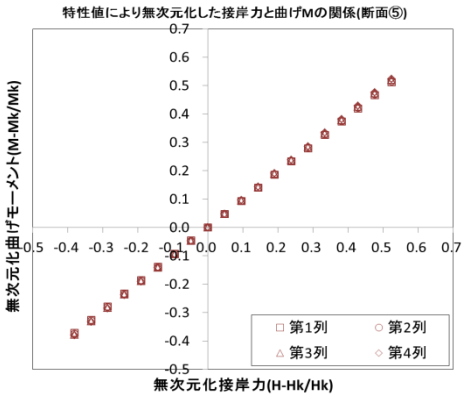
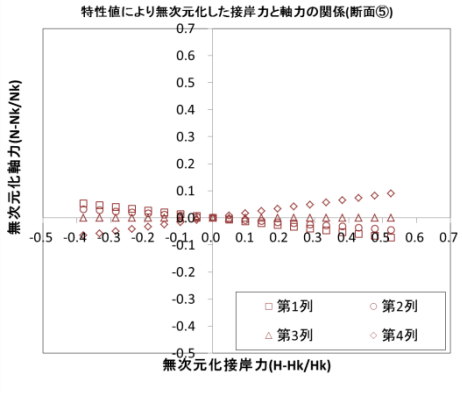
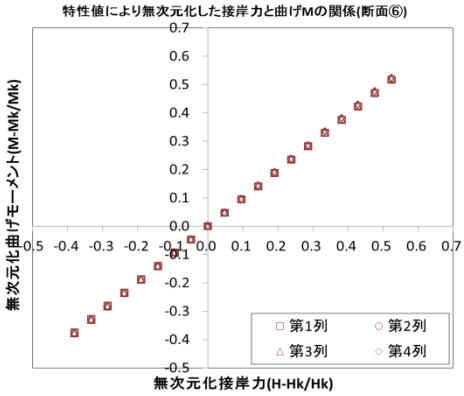
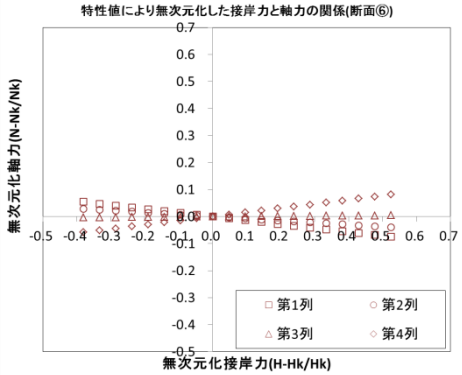
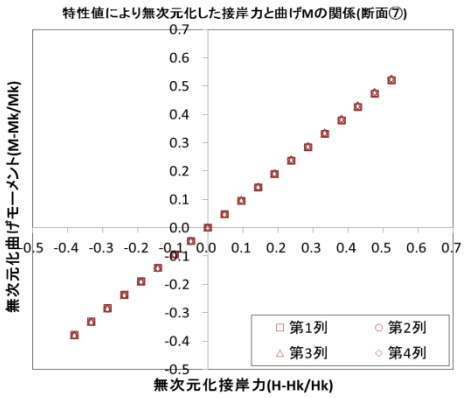
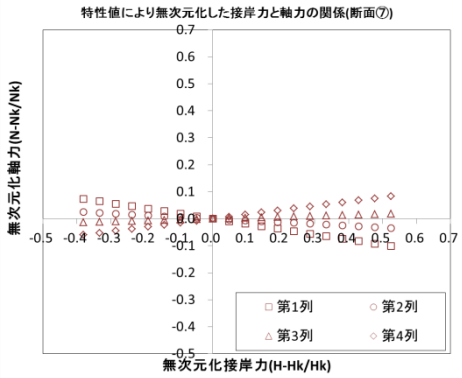
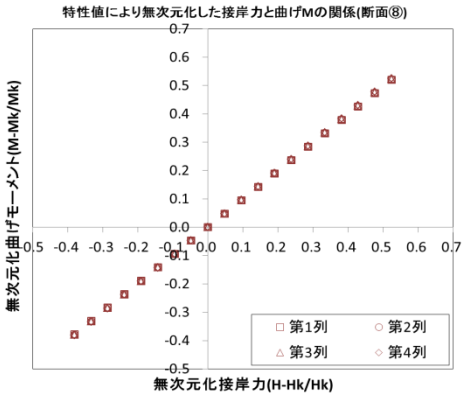
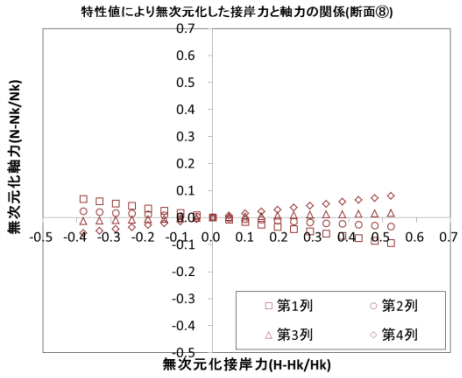
断面	断面①②	断面⑤⑥
関係図		
断面	断面⑨⑩	断面⑬～⑯
関係図		

③無次元化した近似式の入出力値の関係

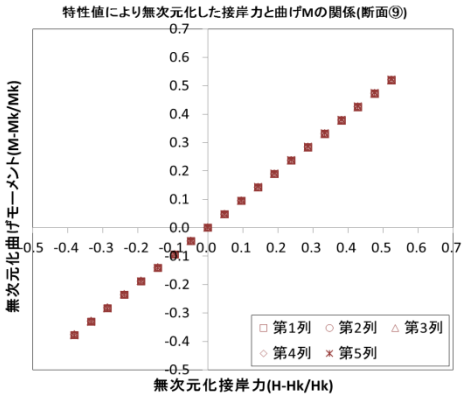
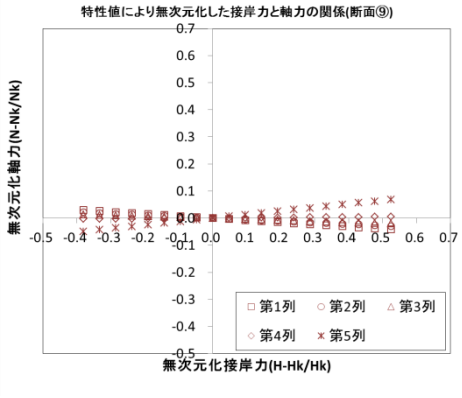
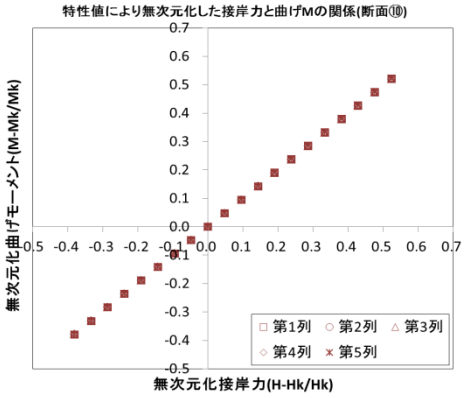
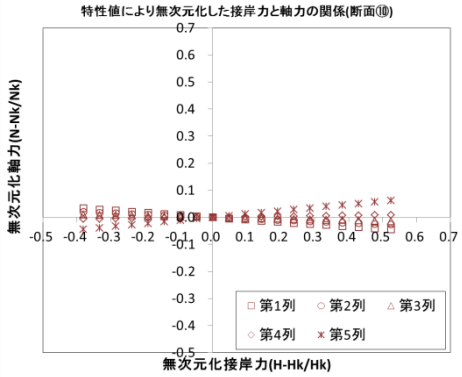
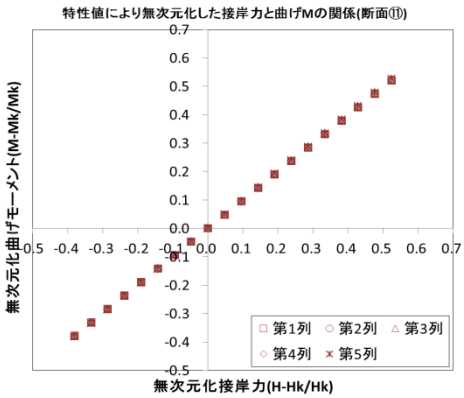
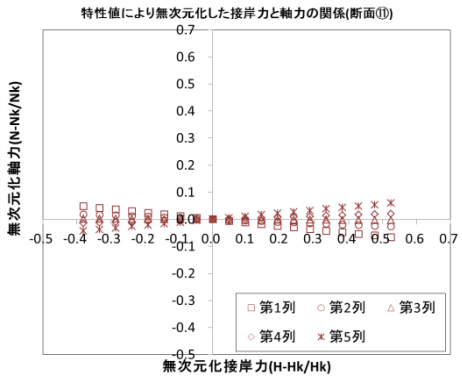
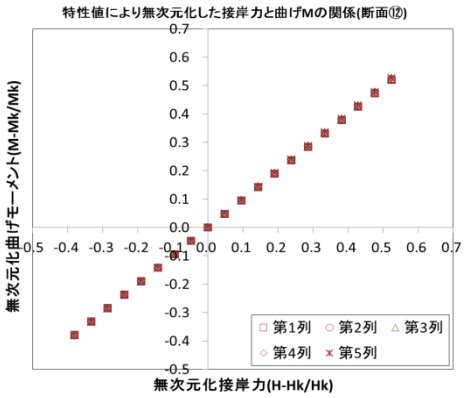
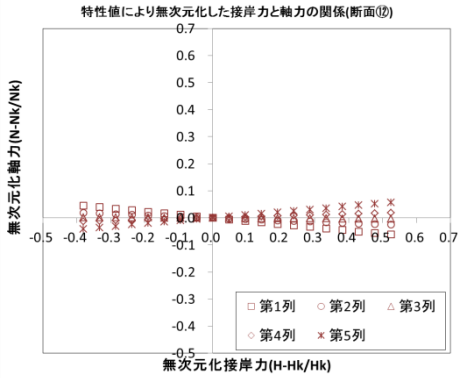
付表 B-17　無次元化した接岸力と出力値の関係(断面①～④)

	発生部材力	
	曲げモーメント	軸力
断面①		
断面②		
断面③		
断面④		

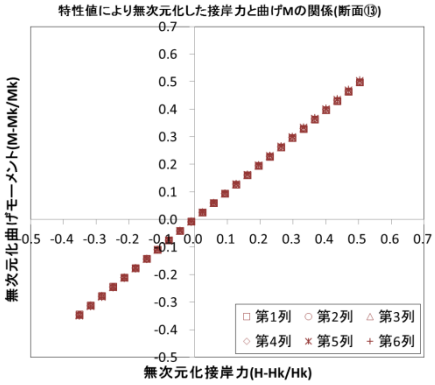
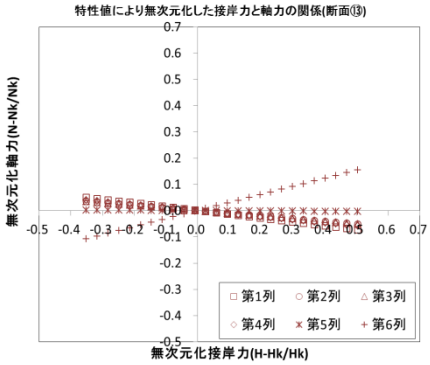
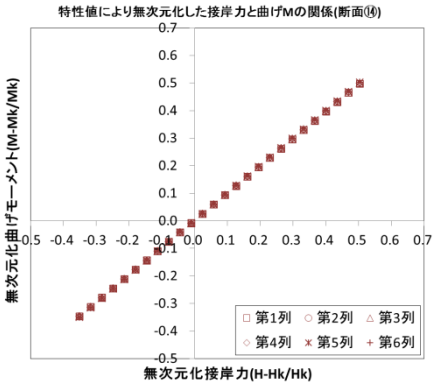
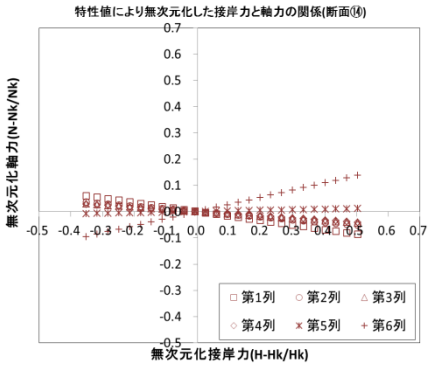
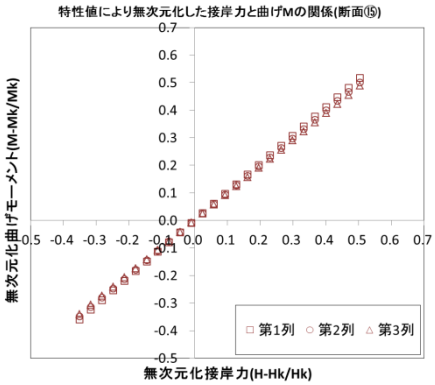
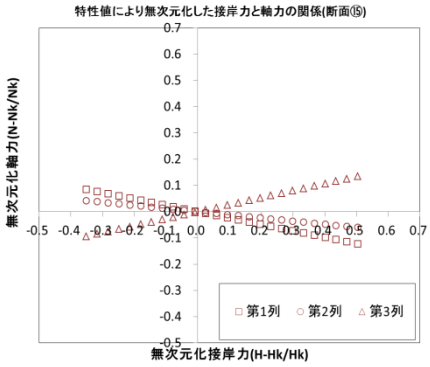
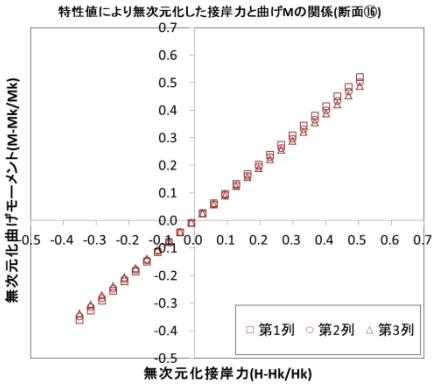
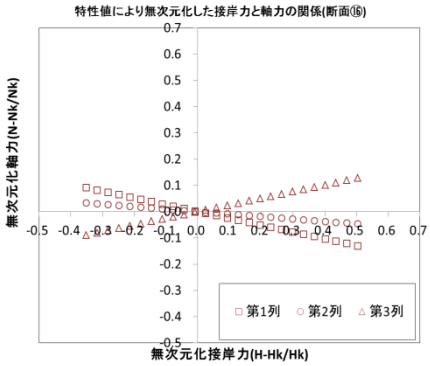
付表 B-18　無次元化した接岸力と出力値の関係（断面⑤～⑧）

	発生部材力	
	曲げモーメント	軸力
⑤断面		
⑥断面		
⑦断面		
⑧断面		

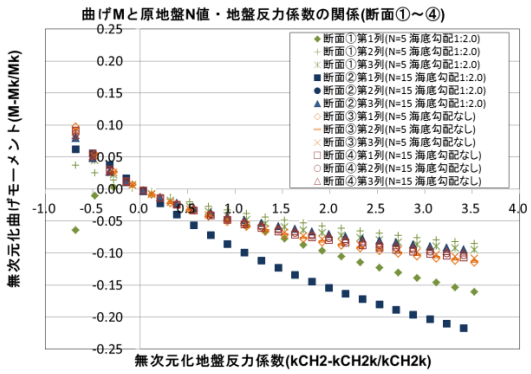
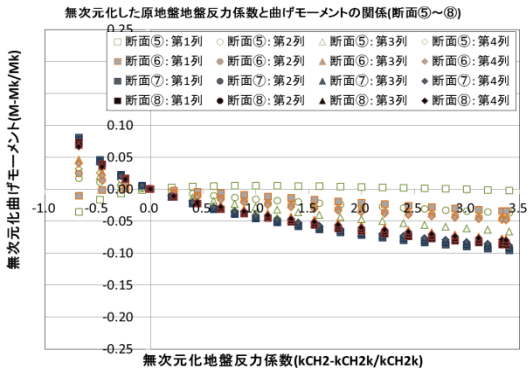
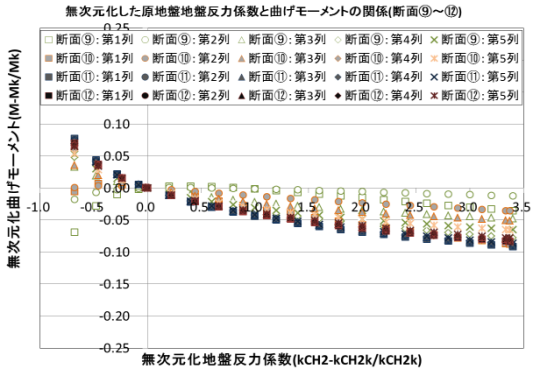
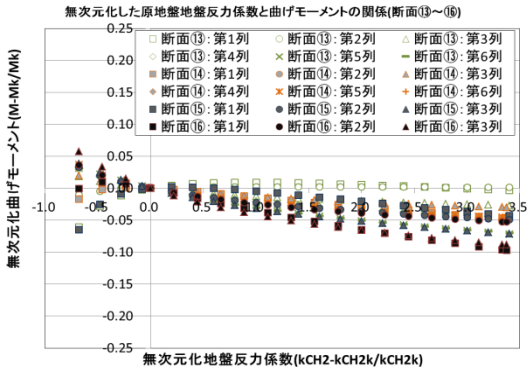
付表 B-19　無次元化した接岸力と出力値の関係（断面⑨～⑫）

	発生部材力	
	曲げモーメント	軸力
⑨断面		
⑩断面		
⑪断面		
⑫断面		

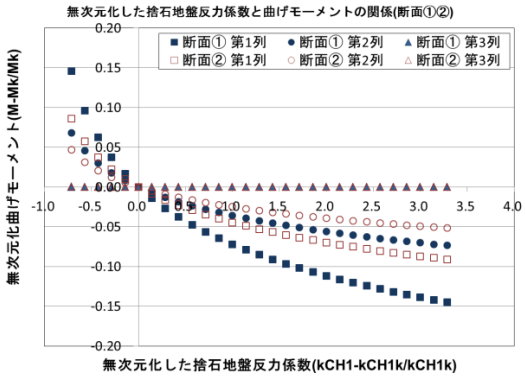
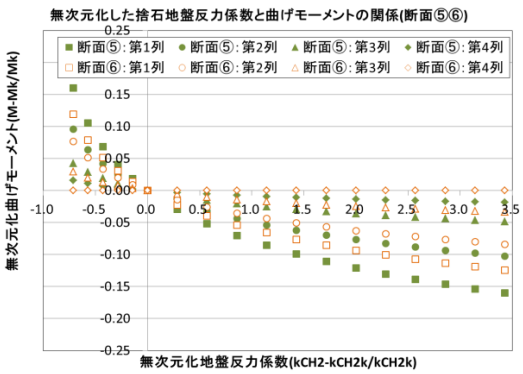
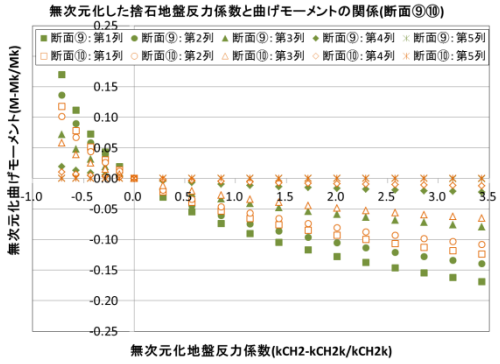
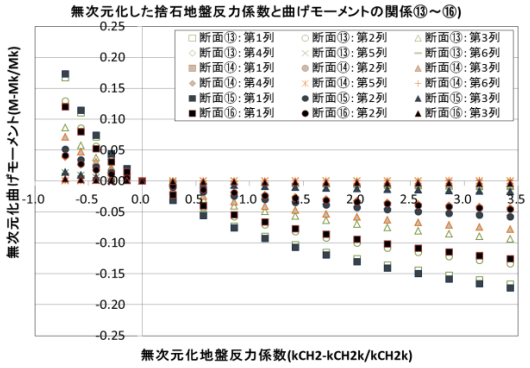
付表 B-20　無次元化した接岸力と出力値の関係（断面⑬～⑯）

	発生部材力	
	曲げモーメント	軸力
断面⑬		
断面⑭		
断面⑮		
断面⑯		

付表 B-21　無次元化した原地盤の地盤反力係数と曲げモーメントの関係

断面	断面①～④	断面⑤～⑧
関係図		
断面	断面⑨～⑫	断面⑬～⑯
関係図		

付表 B- 22　無次元化した捨石の地盤反力係数と曲げモーメントの関係

断面	断面①②	断面⑤⑥
関係図		
断面	断面⑨⑩	断面⑬～⑯
関係図		

附録 C　曲げ圧縮応力度と軸方向圧縮応力度の分布

(1) 接岸力の変化に対する性能照査値の感度

本稿本文の 2.4(2)に示すように，接岸力の変化に対する性能照査値の感度は，設計断面に関わらず概ね同程度ではあるが若干の差が認められる．このため，性能照査値を曲げ圧縮応力度比と軸方向圧縮応力度比に分けて評価することで，接岸力の変化に対する両者の変化を比較した．

付図 C-1，**付図 C-2** は，接岸速度に対する発生曲げ圧縮応力度と曲げ圧縮降伏応力度の比($\sigma_{bcd}/\sigma_{byd}$)を横軸，発生軸方向圧縮応力度と軸方向圧縮降伏応力度の比(σ_{cd}/σ_{cyd})を縦軸とすることで，接岸速度の変化に対する性能照査値の変化を，曲げ圧縮応力度比と軸方向圧縮応力度比に分けて示したものである．したがって，分布図における各点は性能照査値($\sigma_{bcd}/\sigma_{byd}+\sigma_{cd}/\sigma_{cyd}$)を示しており，性能照査値が 1 を超過すると($\sigma_{bcd}/\sigma_{byd}+\sigma_{cd}/\sigma_{cyd}=1$ の右上側に達すると)，杭は降伏に至ることとなる．

断面や杭に関わらず，接岸力の変化に対する発生部材力の推移がほぼ一定であることは，**附録 B** に示したとおりである．しかしながら，各断面における曲げ圧縮応力度比-軸方向圧縮応力度比分布図を比較すると，性能照査値は同値であっても，曲げ圧縮応力度比と軸方向圧縮応力度比は断面や杭毎に異なることが示される．設計条件ごとにまとめると，概ね以下のとおりである．

①海底勾配の有無

海底勾配の有無により，各杭間における曲げ圧縮応力度比と軸方向圧縮応力度比の分布は以下のように変化し，非常に明確な影響があるといえる．

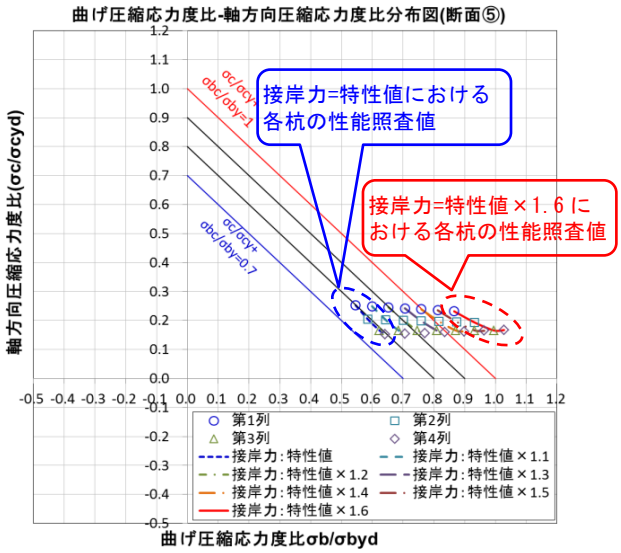
- 海底勾配あり：海側杭の曲げ圧縮応力比が最も低く，軸方向圧縮応力度比が最も高くなる．また，海底勾配なしと比較して，性能照査値が一点に収束しない．
- 海底勾配なし：陸側杭の曲げ圧縮応力比が最も低く，軸方向圧縮応力度比が最も高くなる．ただし，性能照査値はほぼ一点に収束しており，杭間での差が少ない．

一例として，断面⑤(海底勾配あり)，断面⑦(海底勾配なし)の曲げ圧縮応力度比と軸方向圧縮応力度比の分布図を**付図 C-1**，**付図 C-2** に示す．

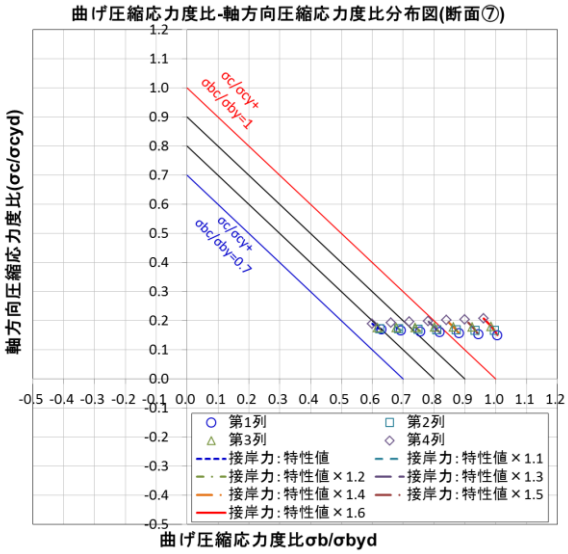
これは，海底勾配を有する断面では，海底勾配が無い断面と比較して，各杭列に生じる発生曲げモーメントの差は大きくなるが，軸力はそれほど変化しないことによると考えられる．

つまり，海底勾配を有する断面は，杭列毎の曲げモーメントの差が大きいため，曲げ圧縮応力比の差も大きくなる．これに伴い，断面係数や断面積は海側杭で小さく，陸側杭で大きくなるが，軸力はそれほど変化しないため，海側杭の軸方向圧縮応力度は大きくなり，陸側杭の軸方向圧縮応力度は小さくなるものと考えられる．このため，海底勾配の有無による影響は，海側杭や陸側杭に対して大きく，中央杭では影響が小さい．

ただし，海底勾配の有無に関わらず，各接岸力に対する海側杭から陸側杭までの性能照査値の分布は，ほとんど $\sigma_{bcd}/\sigma_{byd}+\sigma_{cd}/\sigma_{cyd}=1$ の線と平行となっている．つまり，海底勾配の有無は，各杭列における曲げ圧縮応力度比と軸方向圧縮応力度比には影響を与えるものの，性能照査値に対しては特段の影響を与えていないといえる．



付図 C-1　圧縮応力度比分布図(断面⑤：海底勾配有り)

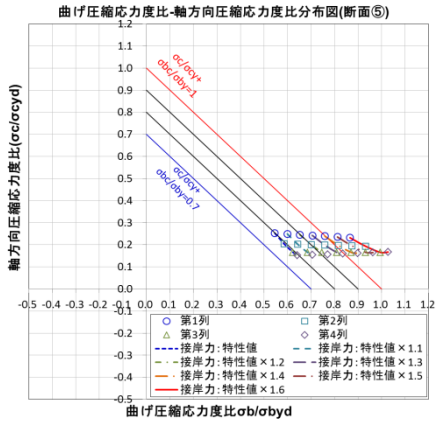


付図 C-2　圧縮応力度比分布図(断面⑦：海底勾配なし)

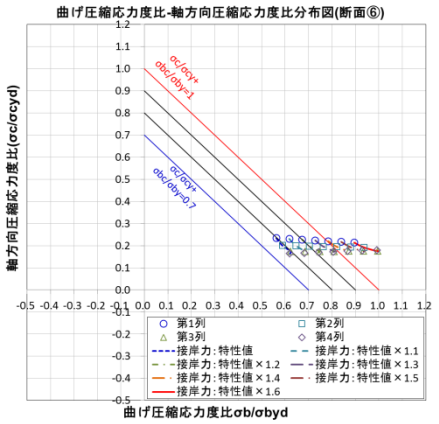
②原地盤の N 値

一例として，断面⑤(N=5)，断面⑥(N=15)における圧縮応力度比分布図を**付図 C-3**，**付図 C-4** に示す．原地盤 N 値が小さい断面は，杭列毎に性能照査値が散らばり，原地盤 N 値が大きくなると一定の値に収束する．したがって，N 値の増加に伴い，杭間での曲げ圧縮応力度比や軸方向圧縮応力度比の差が小さくなることが示される．これについては，**付表 A-1**，**付表 A-2** に示したとおり，原地盤N値が小さい断面では杭列間における曲げモーメントの差が広がるため，杭列間における曲げ圧縮応力度比の差も大きくなる．これにより，海側杭の断面係数や断面積は減少し，陸側杭の断面係数や断面積は増加する．一方で，原地盤 N 値の大小は軸力にはほとんど影響しないため，海側杭は断面係数や断面積の減少に伴い軸方向圧縮応力度が増加し，陸側杭では減少したと考えられる．

なお，N 値の大小に関わらず，海側杭から陸側杭までの性能照査値の分布は，接岸力の変化に対し，$\sigma_{bcd}/\sigma_{byd}+\sigma_{cd}/\sigma_{cyd}=1$ の線とほぼ平行に推移する．すなわち，N 値の大小は，各杭列における曲げ圧縮応力度比と軸方向圧縮応力度比には影響を与えるものの，性能照査値としては特段の影響を与えていないといえる．



付図 C-3　圧縮応力度比分布図(断面⑤：N=5)



付図 C-4　圧縮応力度比分布図(断面⑥：N=15)

③杭列数

本研究の検討断面において，設計水深が等しく，杭列数が異なる断面の組合せは以下のとおりである．

・設計水深 12m：断面⑤～⑧(4 列)⇔断面⑨～⑫(5 列)
・設計水深 18m：断面⑬⑭(6 列)⇔断面⑮⑯(3 列)

一例として，断面⑤⑨(設計水深 12m，杭列数 4 もしくは 5)，および断面⑬⑮(設計水深 18m，杭列数 6 もしくは 3)の曲げ圧縮応力度比と軸方向圧縮応力度比の分布図を**付図 C-5**，**付図 C-6** に示すが，曲げ圧縮応力度比と軸方向圧縮応力度比は，杭列数により異なる傾向を取ることが確認できる．傾向は概ね以下のとおりである．

・断面⑤～⑫
杭列数が多い断面(断面⑨～⑫)は，杭列数が少ない断面(断面⑤～⑧)と比較して，全杭列において，曲げ圧縮応力度比が減少し，軸方向圧縮応力度比が増加する．
また，海側杭ほど曲げ圧縮応力度比の減少量と，軸方向圧縮応力度比の増加量が大きい．

・断面⑬～⑯
杭列数が多い断面(断面⑬⑭)は，杭列数が少ない断面(⑮⑯)と比較して，海側杭は曲げ圧縮応力度比が減少し，軸方向圧縮応力度比が増加する．
その一方で，陸側杭については，最も陸側の杭列は，曲げ圧縮応力度比も軸方向圧縮応力度比もほとんど変化しない．
そして，中央杭群のうち，陸側杭寄りの各杭列(第 4・5 列)の曲げ圧縮応力度比が増加し，軸方向圧縮応力度比が減少する．

上述のように，断面⑤～⑫と断面⑬～⑯では，曲げ圧縮応力度比や軸方向圧縮応力度比が増減しやすい杭列が異なっている．これは，断面⑤～⑫は全て RC 桟橋であり，杭列数の増加に伴い，上部工面積も増加するが，断面⑬～⑯は，RC 桟橋と PC 桟橋の比較であり，杭列数が増加しても，上部工面積はほぼ変わらないことによると考えられる．

つまり，断面⑤～⑫では，杭列数が増加すると，全ての杭列において曲げモーメントは減少し，断面係数や断面積，曲げ圧縮応力度比も減少する．その一方で，上部工面積は増加するため，各杭列に生じる軸力はほとんど変化しない．このため，軸方向圧縮応力度比は全杭列において増加することとなる．

これに対し，断面⑬～⑯は性能照査値の変化が複雑である．各断面の曲げモーメントおよび軸力の基準値を比較するため，**付表 C-1**，**付表 C-2** に断面⑬～⑯における部材力の基準値を示す．曲げモーメントの基準値は，杭列数に関わらず，海側杭が最小であり，陸側杭に近づくにつれ漸増する．一方で，軸力の基準値は杭列数により傾向が異なり，杭列数 6 本の断面(⑬⑭)は，海側杭や中央杭(第 1～4 列)では軸力がほぼ一定で，陸側杭(第 5，6 列)のみ大きく増加する．また，杭列数 3 本の断面(⑮⑯)は，海側杭(第 1 列)の軸力が最も小さく，中央杭と陸側杭(第 2，3 列)ではほぼ一定となる．つまり，上部工の面積を変えずに，杭列数を変化させたとしても，曲げモーメントの基準値は概ね同一の傾向を示すが，軸力の基準値は，杭列数により杭列毎の傾向がかなり変化すると判断できる．

各杭列の断面係数や断面積はほぼ曲げモーメントにより決定されるため，杭列数に関わらず，断面係数や断面積は海側杭が最小，陸側杭が最大となり，曲げ圧縮応力度比もこれに従う．しかし，軸力については，杭列数の変化に対し，各杭列に発生する軸力の変動が一定で無いため，各杭列における軸方向圧縮応力度比の増減が調和的とならない．これが，曲げ圧縮応力度比と軸方向圧縮応力度比，および性能照査値の分布が複雑になる原因と考えられる．

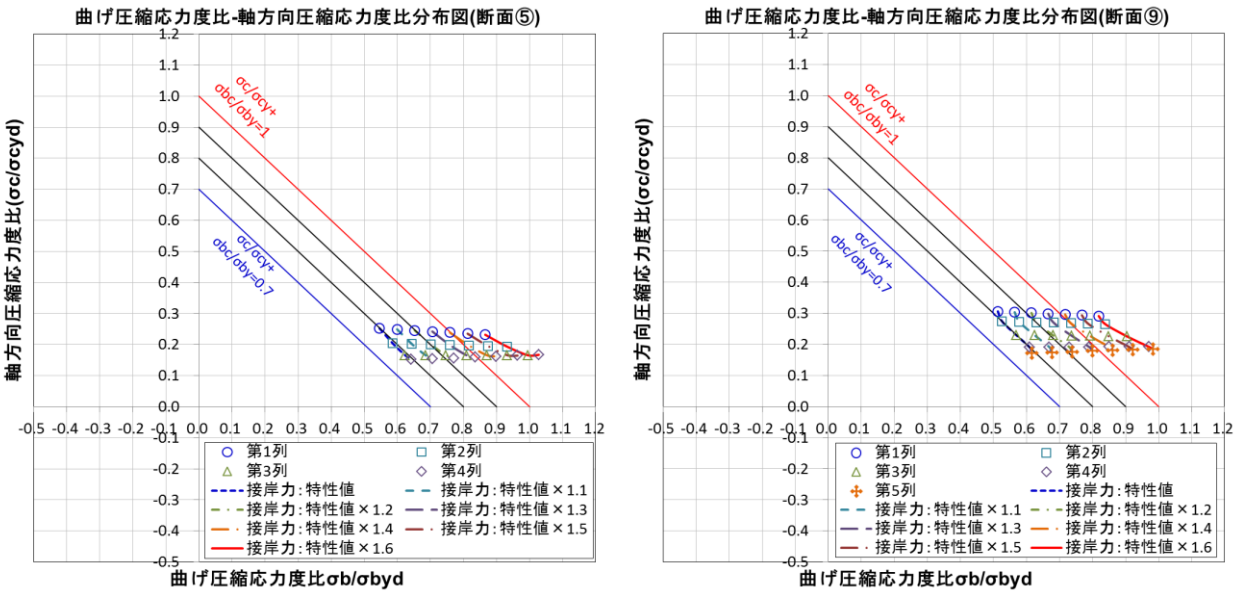
ただし，杭列数の多少に関わらず，接岸力の変化に対し，海側杭から陸側杭までの性能照査値の分布は，概ね $\sigma_{bcd}/\sigma_{byd}+\sigma_{cd}/\sigma_{cyd}=1$ の線と平行の推移する．つまり，杭列数の多少は，各杭列における曲げ圧縮応力度比と軸方向圧縮応力度比には影響を与えるものの，性能照査値に対しては特段の影響を与えていないといえる．

付表 C-1　杭列数による近似式の比較(曲げモーメント)

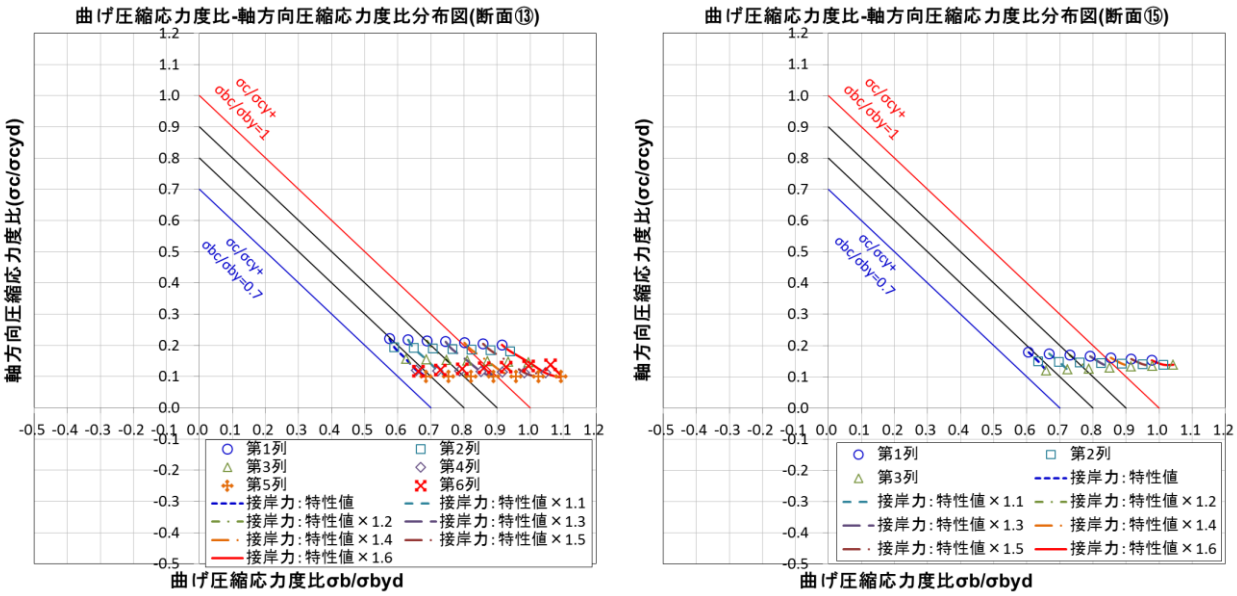
断面番号	設計水深対象船舶	接岸力	海底勾配	砂質土地盤N値	曲げモーメント 杭列数 6本	3本	加重平均の比 ($M_{6本}/M_{3本}$) 杭毎	平均
13,15	-18.0m 120,000DWT	877.8 (kN/ﾗｰﾒﾝ)	1:2.0	5	第1列M= 870.88	第1列M= 1749.85	1.00	0.97
					第2列M= 935.42		1.07	
					第3列M= 1248.41	第2列M= 3652.61	0.68	
					第4列M= 1637.09		0.90	
					第5列M= 2347.01	第3列M= 4523.79	1.04	
					第6列M= 2522.15		1.12	
					合計 9560.96	合計 9926.25	0.96	
14,16			1:2.0	15	第1列M= 1016.11	第1列M= 2000.01	1.02	0.96
					第2列M= 1073.25		1.07	
					第3列M= 1271.68	第2列M= 3534.05	0.72	
					第4列M= 1618.82		0.92	
					第5列M= 2139.34	第3列M= 4255.31	1.01	
					第6列M= 2230.05		1.05	
					合計 9349.25	合計 9789.37	0.96	

付表 C-2　杭列数による近似式の比較(軸力)

断面番号	設計水深対象船舶	接岸力	海底勾配	砂質土地盤N値	軸力 砂質土地盤N値 6本	3本	加重平均の比 ($N_{6本}/N_{3本}$) 杭毎	平均
13,15	-18.0m 120,000DWT	877.8 (kN/ﾗｰﾒﾝ)	1:2.0	5	第1列N= 1145.28	第1列N= 1404.21	1.63	1.25
					第2列N= 1063.32		1.51	
					第3列N= 1117.62	第2列N= 2456.49	0.91	
					第4列N= 1102.46		0.90	
					第5列N= 1336.66	第3列N= 2394.92	1.12	
					第6列N= 1746.34		1.46	
					合計 7511.67	合計 6255.62	1.20	
14,16			1:2.0	15	第1列N= 1108.86	第1列N= 1404.22	1.58	1.25
					第2列N= 1101.31		1.57	
					第3列N= 1102.05	第2列N= 2473.46	0.89	
					第4列N= 1138.82		0.92	
					第5列N= 1366.35	第3列N= 2381.59	1.15	
					第6列N= 1685.95		1.42	
					合計 7503.35	合計 6259.27	1.20	



付図 C-5　曲げ圧縮・軸方向圧縮応力度比分布図(設計水深 12m：断面⑤(杭列数 4)，断面⑨(杭列数 5))



付図 C-6　曲げ圧縮・軸方向圧縮応力度比分布図(設計水深 18m：断面⑬(杭列数 6)，断面⑮(杭列数 3))

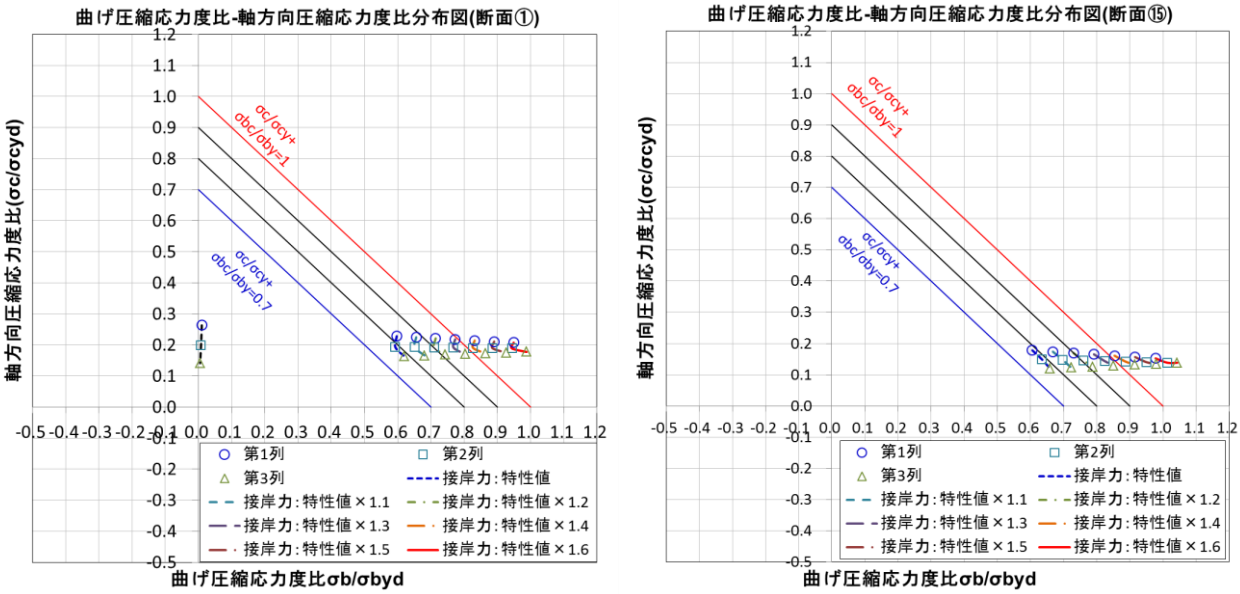
④設計水深

設計水深が異なり，杭列は同一となる断面は，断面①②(-7.5m，3 列)と断面⑮⑯(-18m，3 列)である．一例として，断面①と断面⑮の曲げ圧縮応力度比と軸方向圧縮応力度比の分布図を付図 C-7 に示す．

各断面を比較すると，設計水深が深い断面は，浅い断面と比較して，曲げ圧縮応力度比が増加し，軸方向圧縮応力度比は減少することが分かる．これは，杭列数が同値であれば，設計水深が深い断面ほど接岸力が大きく，これに伴い，曲げモーメントも大きくなるためである．

つまり，設計水深が深い断面ほど，曲げモーメントのが大きく，曲げ圧縮応力度比や適合杭の断面積が増加する．これに伴い，軸方向圧縮降伏応力度が増加するため，軸方向圧縮応力度比が減少すると考えられる．

ただし，設計水深の大小に関わらず，各接岸力に対する海側杭から陸側杭までの性能照査値の分布は，概ね $\sigma_{bcd}/\sigma_{byd}+\sigma_{bcd}/\sigma_{cyd}=1$ の線と平行となっている．つまり，設計水深の大小は，各杭列における曲げ圧縮応力度比と軸方向圧縮応力度比には影響を与えるものの，性能照査値に対しては特段の影響を与えていないといえる．



付図 C-7　曲げ圧縮・軸方向圧縮応力度比分布図(断面①：設計水深 7.5m，断面⑮：設計水深 18m)

⑤原地盤の地盤反力係数

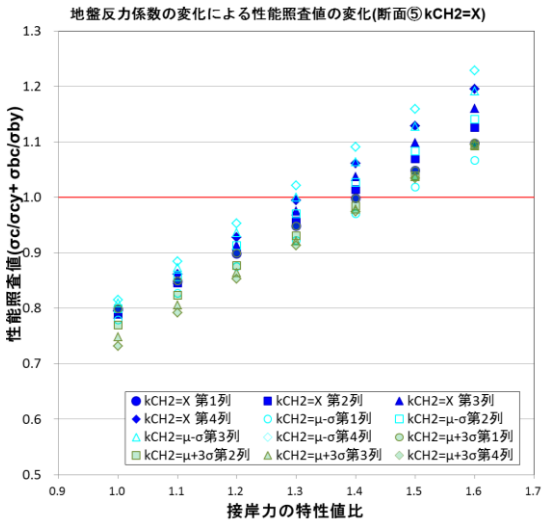
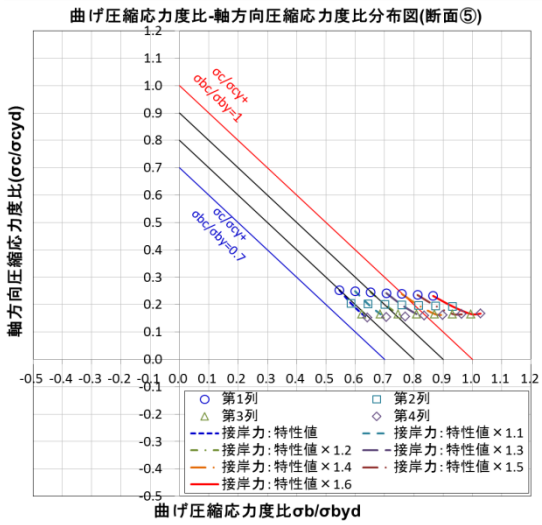
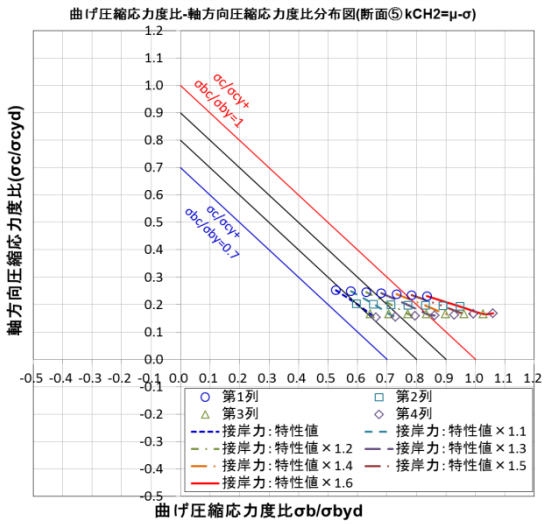
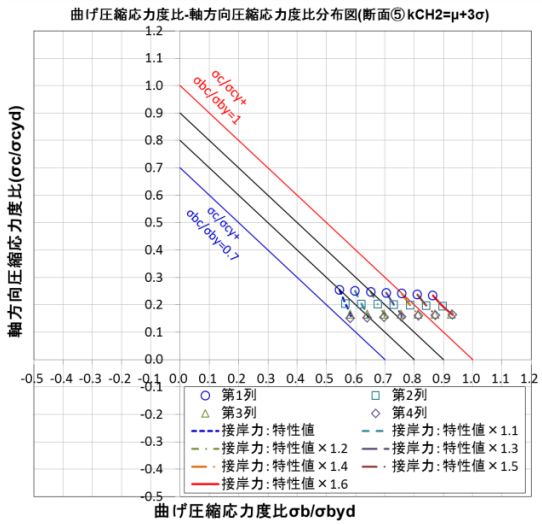
断面⑤を例に，原地盤の地盤反力係数を特性値 X，および μ-σ，μ+3σ とした際の，曲げ圧縮応力度比-軸方向圧縮応力度比分布図を**付表 C-3** に示す．

付表 C-3 より，原地盤の地盤反力係数を特性値より小さい値にすると，接岸力の変化に対し曲げ圧縮応力度比が増加しやすくなることがわかる．特に，陸側杭は原地盤の地盤反力係数の変化に対する性能照査値の感度が高く，より小さな接岸力でも杭が降伏する．また，原地盤の地盤反力係数を特性値より大きい値にすると，接岸力の変化に対し，陸側杭の性能照査値が増加しにくくなる．一方で，海側杭の性能照査値は，地盤反力係数が特性値と異なる値をとってもほとんど変化しない．

すなわち，原地盤の地盤反力係数が特性値と異なる値であると，その影響は陸側に近い杭ほど顕著に表れるといえる．これは，各検討断面において，陸側杭が海側杭より剛性が高いことや，捨石基礎を有する断面では，陸側杭ほど捨石層に埋まっている杭長が長いことに起因すると考えられる．

なお，地盤反力係数が特性値より高い値であっても，海側杭が降伏する接岸力はほとんど変化しないことから，桟橋全体の評価としては杭が降伏する接岸力はほとんど変わらない．一方で，地盤反力係数が特性値より小さな値であると，陸側杭が海側杭より先に降伏するようになるため，桟橋全体の評価としても，より小さな接岸力で杭が降伏するようになるといえる．

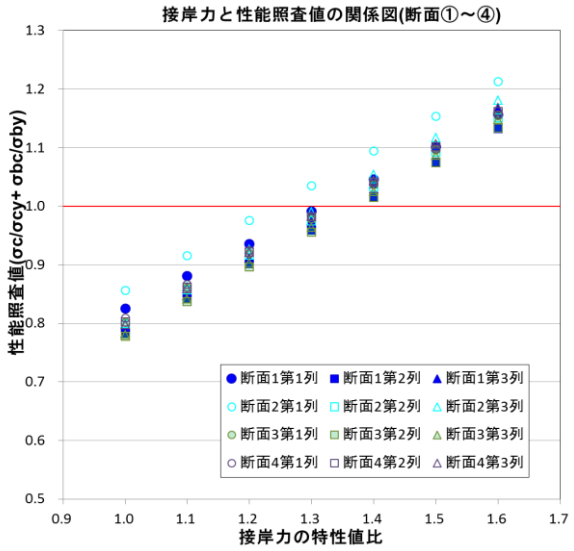
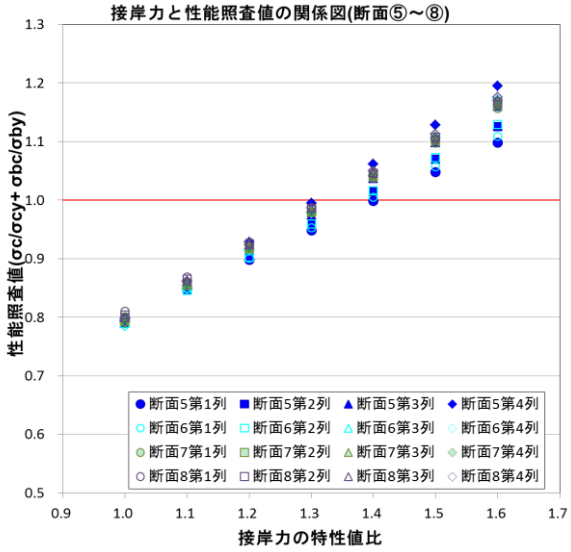
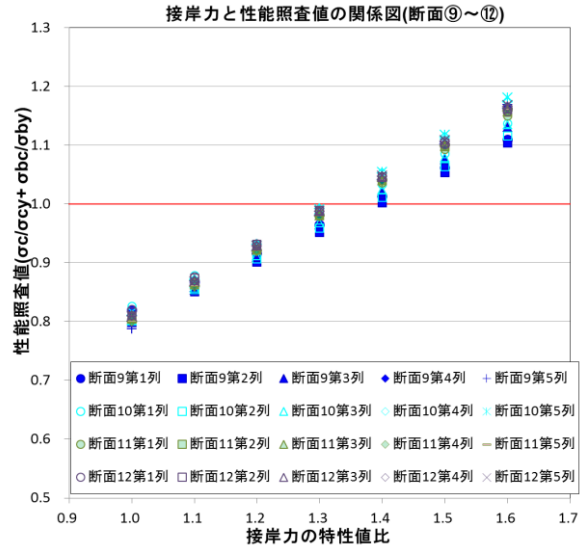
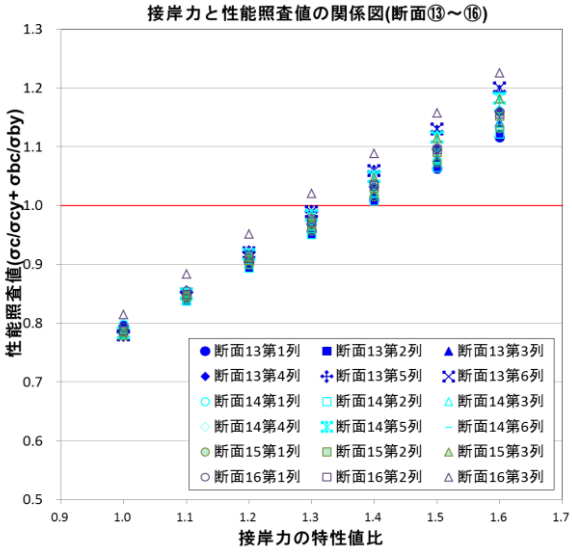
付表 C-3　性能照査値($\sigma_c/\sigma_{cy}+\sigma_{bc}/\sigma_{by}$)と原地盤の地盤反力係数との関係(断面⑤)

原地盤の地盤反力係数	μ-σ，X，μ+σ	X
関係図		
原地盤の地盤反力係数	μ-σ	μ+3σ
関係図		

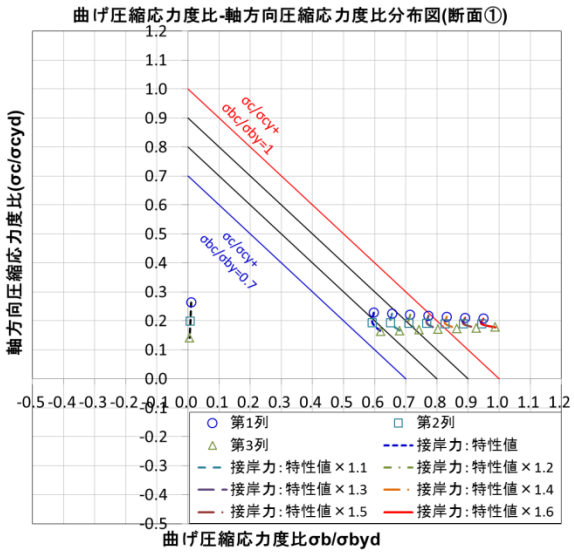
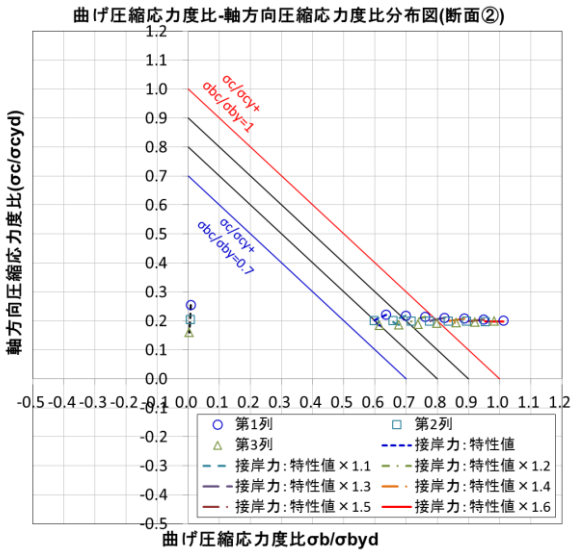
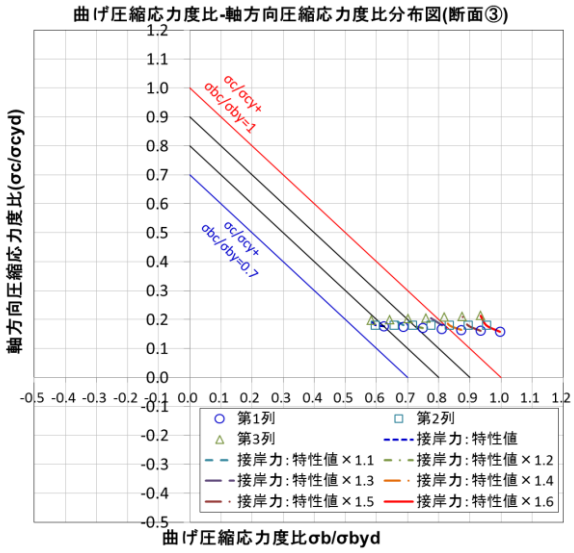
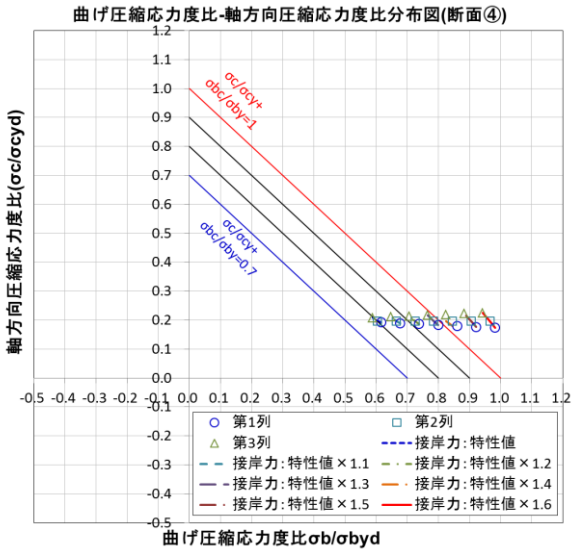
(2)各断面の性能照査値一覧

各断面の接岸力と性能照査値の関係図，および接岸力を変化させた際の曲げ圧縮-軸方向圧縮応力度比分布図を以下に示す.

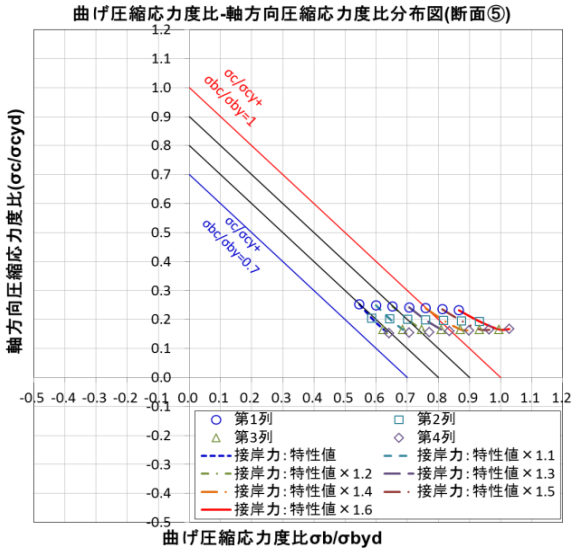
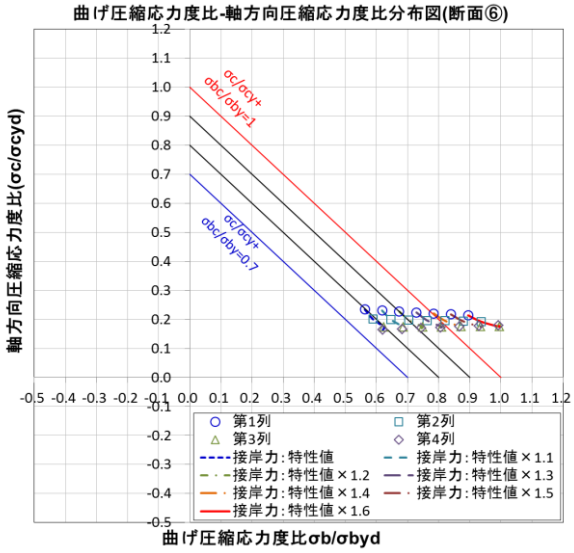
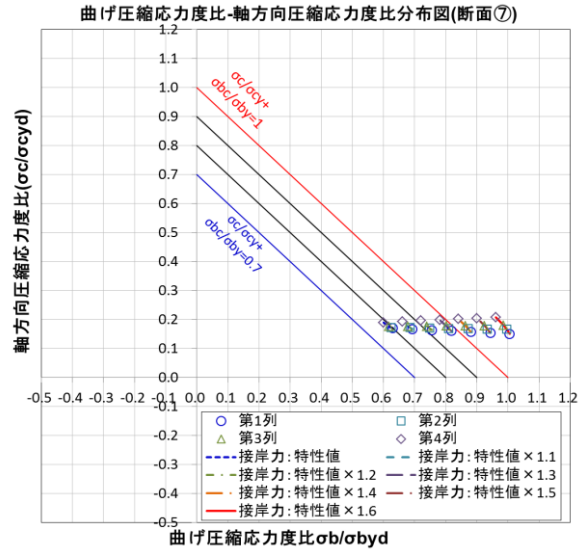
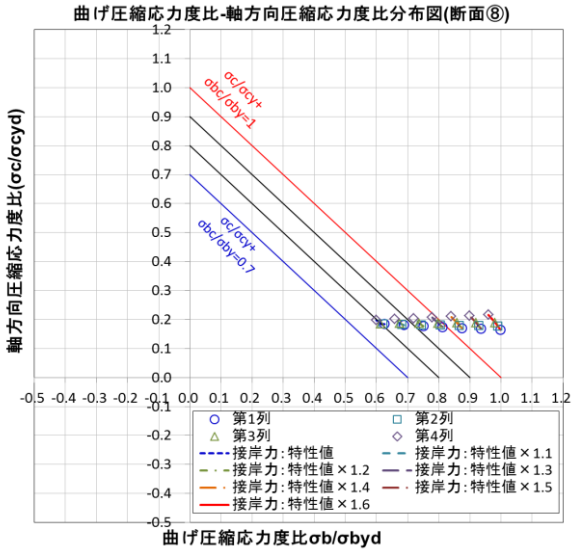
付表 C-4　接岸力と性能照査値の関係図

断面	断面①～④	断面⑤～⑧
水深	-7.5m	-12m
杭列	3 列	4 列
関係図		
断面	断面⑨～⑫	断面⑬～⑯
水深	-12m	-18m
杭列	5 列	6 列，3 列
関係図		

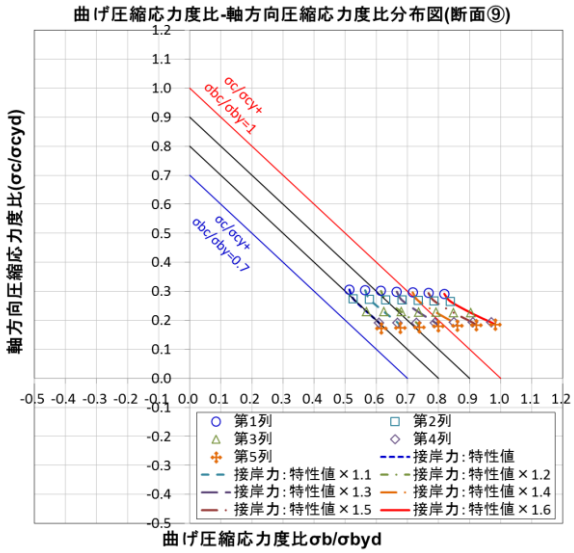
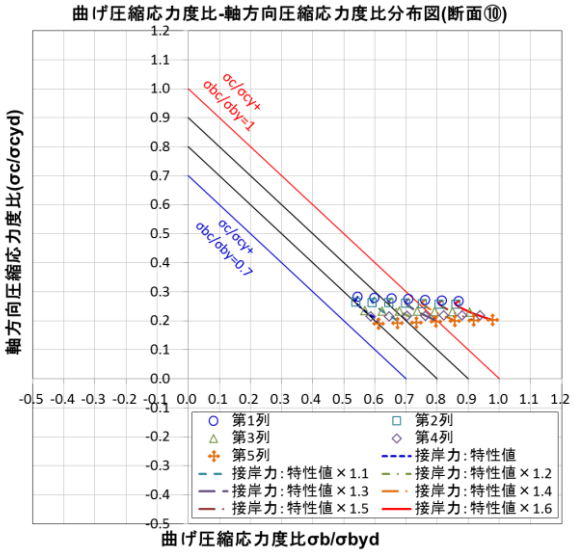
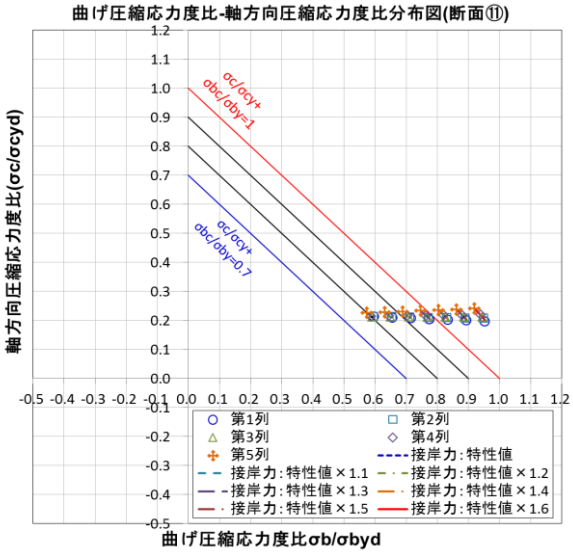
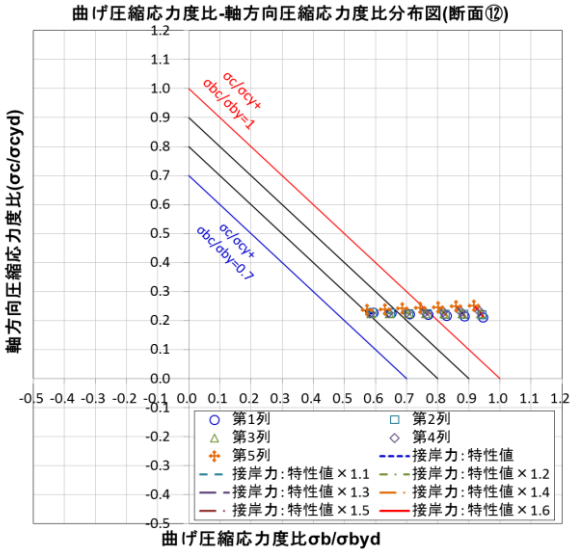
付表 C-5　接岸力を変化させた際の曲げ圧縮・軸方向圧縮応力度比分布図（断面①～④）

断面	断面①	断面②
関係図		
断面	断面③	断面④
関係図		

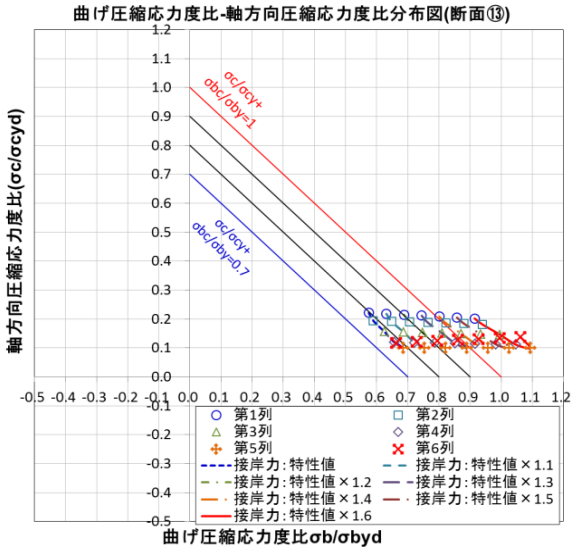
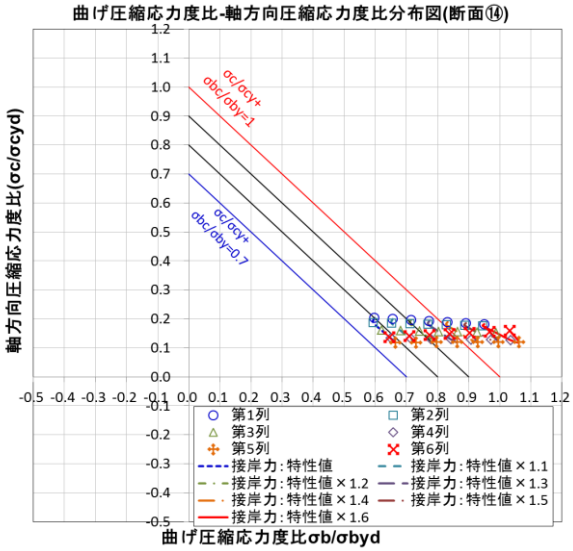
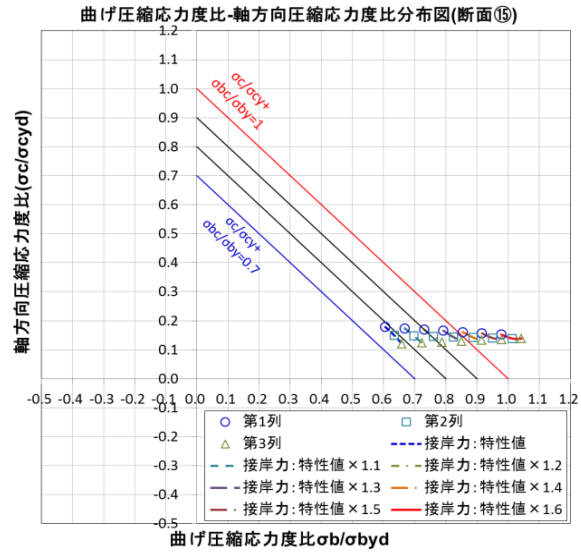
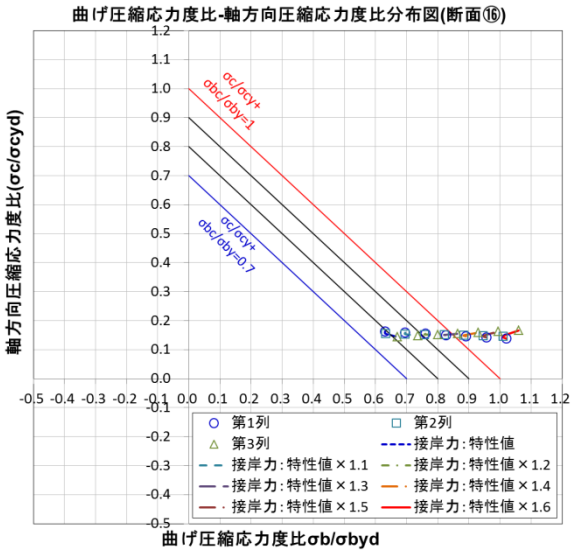
付表 C-6　接岸力を変化させた際の曲げ圧縮・軸方向圧縮応力度比分布図(断面⑤～⑧)

断面	断面⑤	断面⑥
関係図		
断面	断面⑦	断面⑧
関係図		

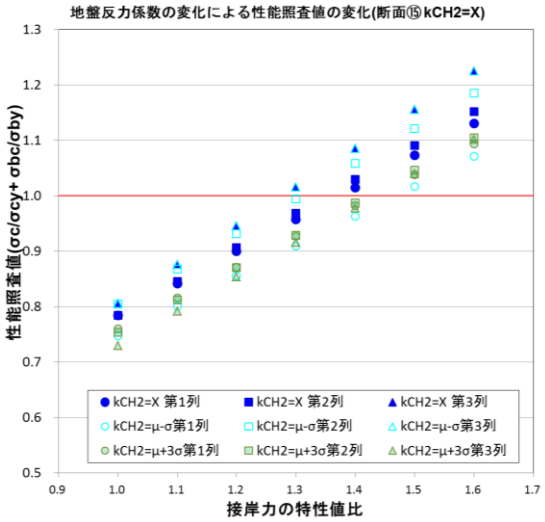
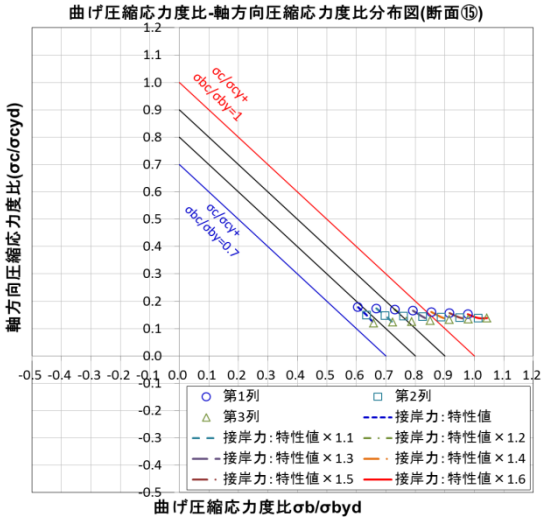
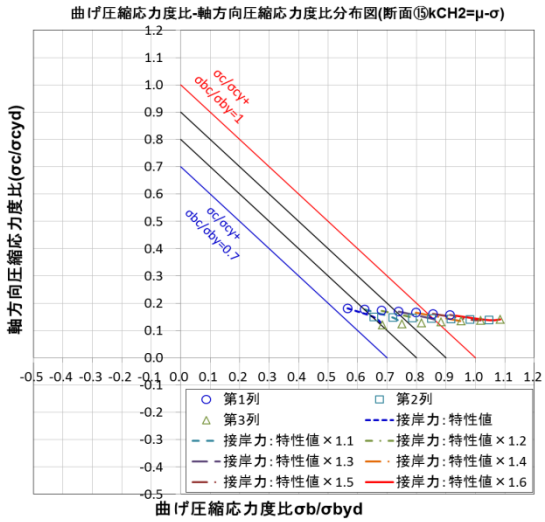
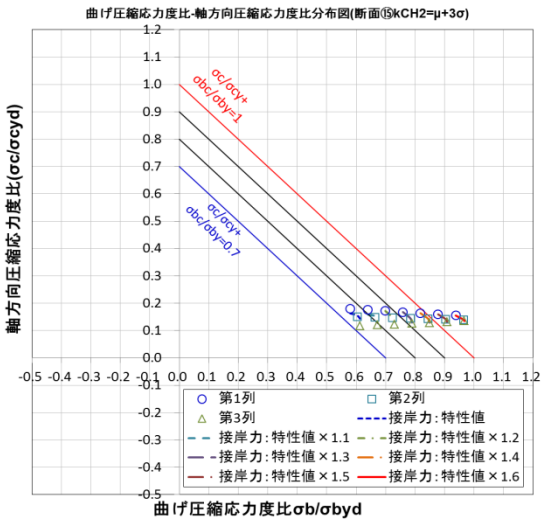
付表 C-7　接岸力を変化させた際の曲げ圧縮・軸方向圧縮応力度比分布図（断面⑨～⑫）

断面	断面⑨	断面⑩
関係図		
断面	断面⑪	断面⑫
関係図		

付表 C-8　接岸力を変化させた際の曲げ圧縮・軸方向圧縮応力度比分布図（断面⑬～⑯）

断面	断面⑬	断面⑭
関係図		
断面	断面⑮	断面⑯
関係図		

付表 C-9　接岸力および原地盤反力係数を変化させた際の曲げ圧縮・軸方向圧縮応力度比分布図(断面⑮)

原地盤の地盤反力係数	－	X
関係図		
原地盤の地盤反力係数	μ-σ	μ+3σ
関係図		

附録 D　現行港湾基準における確率変数の設定過程

(1) 現行港湾基準の確率変数

現行港湾基準における確率変数は**付表D-1**に示すとおり，水平力，地盤反力係数，鋼材降伏応力度である．なお，船舶接岸時における水平力P_Hは防舷材反力であるが，防舷材反力は，船舶質量や接岸速度，防舷材の性能等により変化する．つまり，**付表D-1**に示す水平力P_H(防舷材反力)の確率変数は，船舶質量や接岸速度，防舷材の性能等の変動を，水平力という一つの確率変数に統合したものである．

付表 D-1　確率変数の従う確率分布の一覧(現行港湾基準)

確率変数	平均値の偏り μ/X_k	変動係数 V	分布形	備考
水平力 P_H	0.870	0.25	対数正規	防舷材反力 牽引力 クレーン水平力
地盤反力係数 k_{CH}(kN/m^3)	1.333	0.76	対数正規	
鋼材降伏強度 σ_y(N/mm^2)	1.260	0.08	正規	

(2) 現行港湾基準における防舷材反力の確率分布設定過程

現行港湾基準は，防舷材反力の確率分布を長尾ら[9)]に依っているが，長尾ら[9)]は防舷材反力の従う確率分布を評価するため，以下の検討を行なっている．

①船舶の接岸エネルギーの従う確率分布の評価

船舶接岸エネルギーに関する各諸元を，互いに独立な確率変数とし，下式のとおり表現する．下式の各パラメータが，**付表 D-2**, **付表 D-3** に示す確率分布に従うものとして，モンテカルロシミュレーションにより，接岸エネルギーの従う確率分布を評価する．

①船舶質量（排水トン数）

$$DT = P_{DT} \cdot DWT^{0.957} \quad \text{（コンテナ船）} \quad (1)$$

$$DT = P_{DT} \cdot DWT^{0.913} \quad \text{（一般貨物船）} \quad (2)$$

②接岸速度（m/s）

$$V_b = P_{Vb} \cdot DWT^{-0.338} \quad (3)$$

③仮想質量係数

$$C_M = P_{CM} \cdot DWT^{0.022} \quad (4)$$

④偏心係数

$$C_e = P_{Ce} \cdot DWT^{-0.015} \quad (5)$$

⑤接岸エネルギー

$$E = \frac{1}{2} P_{DT} \cdot P_{Vb}^{\ 2} \cdot P_{CM} \cdot P_{Ce} \cdot DWT^{n} \quad (6)$$

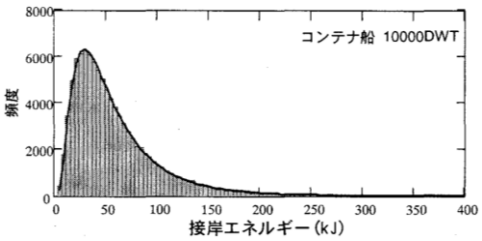
この結果，**付図 D-1** に示す接岸エネルギーの頻度分布が得られ，接岸エネルギーの従う確率分布は，**付表 D-4** に示す平均値と標準偏差をもつ対数正規分布とみなせる．

付表 D-2　パラメータの確率分布(コンテナ船)

		確率分布	μ	σ
P_{DT}	（船舶質量）	対数正規分布	2.131	0.156
P_{Vb}	（接岸速度）	対数正規分布	2.040	0.714
P_{CM}	（仮想質量係数）	対数正規分布	1.491	0.054
P_{Ce}	（偏心係数）	対数正規分布	0.621	0.019
DWT	対象船舶=10,000DWT	対数正規分布	9322	6886
	対象船舶=15,000DWT		12345	7650
	対象船舶=20,000DWT		13318	10234
	対象船舶=35,000DWT		30265	15117

付表 D-3　パラメータの確率分布(貨物船)

		確率分布	μ	σ
P_{DT}	（船舶質量）	対数正規分布	3.128	0.238
P_{Vb}	（接岸速度）	対数正規分布	2.040	0.714
P_{CM}	（仮想質量係数）	対数正規分布	1.491	0.054
P_{Ce}	（偏心係数）	対数正規分布	0.621	0.019
DWT	対象船舶=15,000DWT	対数正規分布	6729	6974



付図 D-1　MCS による接岸エネルギーの確率分布

付表 D-4　接岸エネルギーの確率分布

	μ_E (kJ)	σ_E (kJ)	変動係数
コンテナ船　10,000 DWT	61.27	48.48	0.79
コンテナ船　15,000 DWT	67.19	52.77	0.79
コンテナ船　20,000 DWT	67.70	53.68	0.79
コンテナ船　35,000 DWT	87.91	68.55	0.78
一般貨物船　15,000 DWT	54.31	43.25	0.80

②防舷材反力の確率分布の評価

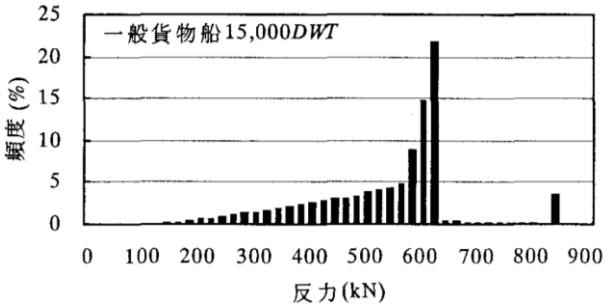
付表 D-4 に示した接岸エネルギーの確率分布を，防舷材の性能曲線により防舷材反力に変換することで，防舷材反力の従う確率分布を評価する．

なお，防舷材形状は V 型(H=600mm)を想定しており，防舷材長は，接岸エネルギーの 95%信頼値が防舷材の最大吸収エネルギーを上回らない長さとしている．また，検討対象船舶は**付表 D-5** に示すとおりであり，船舶質量の平均値の偏りは，コンテナ船：0.9，貨物船：0.5 としている．

付表 D-5　検討対象船舶と防舷材長

	防舷材長さ (mm)
コンテナ船　10,000 DWT	1,500
コンテナ船　15,000 DWT	1,700
コンテナ船　20,000 DWT	1,700
コンテナ船　35,000 DWT	2,200
一般貨物船　15,000 DWT	1,400

この結果，防舷材反力の確率分布は付図 D-2 に示すとおりとなり，正規分布にも対数正規分布にも従わない確率分布となる．



付図 D-2 防舷材反力の確率分布(貨物船，15,000DWT)

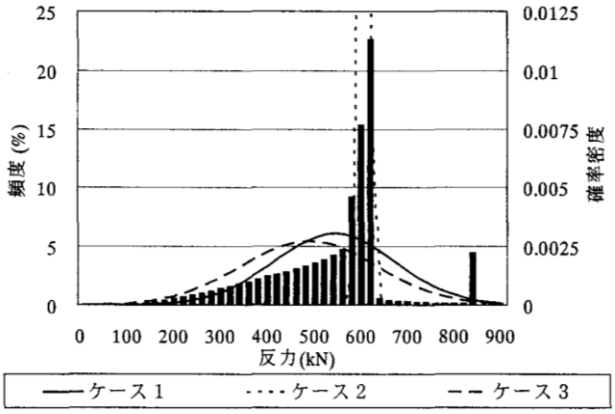
③信頼性理論を用いた防舷材反力の確率分布の検討

付図 D-2 に示す防舷材反力の確率分布は，正規分布にも対数正規分布にも合致しないため，確率的に扱いやすい正規分布に置き換えることを検討する．

すなわち，桟橋杭の断面係数が変化した際のシステム破壊確率の推移を，FORM により算出することで，付図 D-2 の防舷材反力から算出したシステム破壊確率 P_{ft} と，付図 D-3 に示すケース 1～3 の正規分布に従う防舷材反力から算出したシステム破壊確率 P_{fcal} を比較し，P_{ft} と P_{fcal} が最も近くなる正規分布化ケースを検討する．ただし，検討対象船舶は，付表 D-2 に示した 4 種である．

この検討における設計変数の確率分布は付図 D-5 に示すとおりである．なお，長尾ら[9]は検討断面の形状等を記載していないため，一部の設計条件は把握できない．

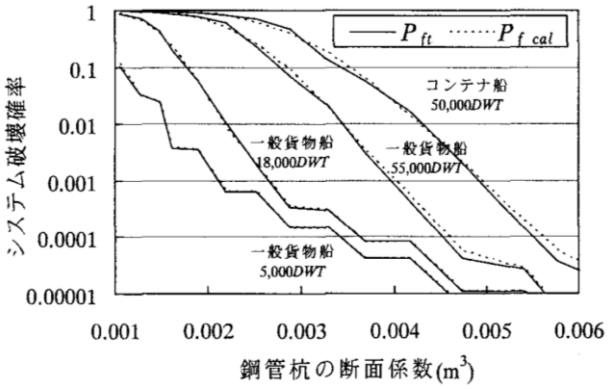
ケース 1 の正規分布におけるシステム破壊確率の推移を付図 D-4 に示すが，一般的な破壊確率と考えられる 0.01～0.001 程度の範囲では，P_{ft} と P_{fcal} が概ね一致しており，信頼性解析において，防舷材反力はケース 1 の正規分布に従うものと評価して良いと考えられる．



付図 D-3 防舷材反力の確率分布と正規分布化の検討ケース

付表 D-6 設計変数の確率分布

	平均値のズレ	変動係数
杭の特性長 $1/\beta$	1.00	0.10
鋼材の降伏軸方向圧縮応力 f_c	1.00	0.065
鋼材の降伏曲げ引張応力 f_R	1.00	0.065
耐力式精度パラメタ ψ	1.17	0.10
先端支持力算定精度パラメタ η_1	0.93	0.20
周面摩擦力算定精度パラメタ η_2	1.60	0.35



付図 D-4 システム破壊確率の比較(正規分布化ケース 1)

④平成 11 年度港湾基準との防舷材反力の比較

平成 11 年度港湾基準による防舷材反力と，③に示した正規分布の平均値とを比較することで，平均値の偏りを設定する．なお，平成 11 年度港湾基準による防舷材反力は付表 D-7 に示すパラメータを用いて算出している．

各対象船舶の結果を総合すると，付表 D-8 のとおりとなり，これが，付表 D-1 に示す防舷材反力の確率変数として，現行港湾基準に採用されている．なお，現行港湾基準は防舷材反力の確率分布を対数正規分布に従うものとしているが，上述したとおり，長尾ら(2004)は防舷材反力の確率分布を正規分布に従うものとしている．

付表 D-7 防舷材反力設計値のパラメータ

対象船舶	船舶の満載排水量 (DT)	船舶の接岸速度 (V_b)	仮想質量係数 (C_M)	偏心係数 (C_e)
一般貨物船5,000DWT	7,500t	12.5cm/s	1.913	0.736
一般貨物船18,000DWT	24,900t	8.0cm/s	1.873	0.736
一般貨物船55,000DWT	69,000t	5.5cm/s	1.782	0.745
コンテナ船50,000DWT	69,700t	6.0cm/s	1.959	0.695

付表 D-8 信頼性設計で用いる防舷材反力の正規分布

正規分布の平均値／平成 11 年度設計値	変動係数 V
0.870	0.25

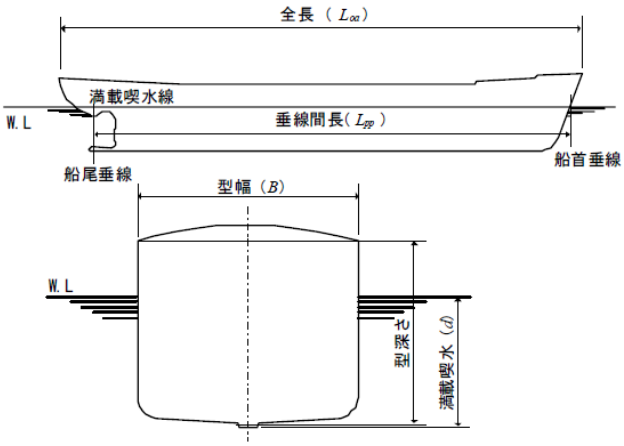
(3) 現行港湾基準における船舶の標準寸法

現行港湾基準においては，載荷重量トン数 DWT に対する船舶の全長，垂線間長，型幅，満載喫水の標準値は，高橋ら[15]を参照している．これは，以下の 2 種類のデータを整理し，75%のカバー率を満たす諸元である．

①Lloyd's Mariteime Intelligence Unite Shipping Data(2004.1)
②日本船舶明細書(2004 年度版)

なお，高橋ら[15]は，船舶は世界のどの港湾にも寄港可能であることから，船舶の標準寸法も①Lloyd's Mariteime Intelligence Unite Shipping Data(2004.1)より，世界で就航中の船舶データを対象とすることを基本としている．ただし，日本国内での就航に限定されるフェリーや 1000DWT 以下の小型貨物船は，②日本船舶明細書(2004 年度版)を対象としている．さらに，日本船籍の船舶に特徴があるといわれている RORO 船，PCC 船については，①Lloyd's Mariteime Intelligence Unite Shipping Data(2004.1)，および②日本船舶明細書(2004 年度版)の両方を対象としている．

この結果，現行港湾基準の船舶標準値は，平成 11 年度の港湾基準と比較して若干の差異がある．



付図 D-5　船舶寸法の名称

付表 D-9　主要諸元の解析結果（貨物船）

載貨重量トン数 DWT（トン）	全長 L_{oa} (m)	垂線間長 L_{pp} (m)	型幅 B (m)	満載喫水 d (m)
1,000	67	61	10.7	3.8
2,000	82	75	13.1	4.8
3,000	92	85	14.7	5.5
5,000	107	99	17.0	6.4
10,000	132	123	20.7	8.1
12,000	139	130	21.8	8.6
18,000	156	147	24.4	9.8
30,000	182	171	28.3	10.5
40,000	198	187	30.7	11.5
55,000	217	206	32.3	12.8
70,000	233	222	32.3	13.8
90,000	251	239	38.7	15.0
120,000	274	261	42.0	16.5
150,000	292	279	44.7	17.7

付表 D-10　主要諸元の解析結果（コンテナ船）

載貨重量トン数 DWT（トン）	全長 L_{oa} (m)	垂線間長 L_{pp} (m)	型幅 B (m)	満載喫水 d (m)	参考：積載可能コンテナ個数 TEU（個）
10,000	139	129	22.0	7.9	500～ 890
20,000	177	165	27.1	9.9	1,300～1,600
30,000	203	191	30.6	11.2	2,000～2,400
40,000	241	226	32.3	12.1	2,800～3,200
50,000	274	258	32.3	12.7	3,500～3,900
60,000	294	279	35.9	13.4	4,300～4,700
100,000	350	335	42.8	14.7	7,300～7,700

附録 E　設計水深ごとのモデル防舷材の性能導出

(1)接岸力の特性値の設定

村上ら[2)]が作成した近似式は，その近似過程において桟橋に作用する接岸力の特性値を固定している．したがって，モデル防舷材の性能を設定する際には，防舷材の設計反力を近似式作成時の接岸力特性値と整合させなければならない．

村上ら[2)]は，各検討断面における接岸力特性値を**付表 E-1** のとおりに設定しているが，接岸力特性値は設計圧縮率における防舷材反力により決定される．このため，各設計水深に適用するモデル防舷材を設定する際も，設計圧縮率における防舷材反力が**付表 E-1** と一致するように，防舷材の寸法等を設定する．

付表 E-1　各設計水深に対する接岸力の特性値

設計水深(m)		-7.5m	-12m	-18m
船型(DWT)		5,000	30,000	120,000
防舷材名称		高性能 V 型	中空円錐台形型	中空円錐台形型
設計圧縮率(%)		52.5	70.0	70.0
(公表値)性能	吸収エネルギー E(kNm)	68.2	319.0	962.0
	反力 R(kN)	406.0	636.0	1330.0
(公差考慮)性能	吸収エネルギー E'(kNm)	61.4	287.1	865.8
	反力 R'(kN)	446.6	699.6	1463.0
接岸力(kN/ブロック)		1339.8	2098.8	4389.0
接岸力(kN/ラーメン)		268.0	419.8	877.8

(2)設計水深-7.5m

設計水深-7.5m の検討断面は，高性能 V 型防舷材を想定している．したがって，モデル防舷材においても高性能 V 型を想定する．先述したモデル防舷材の設定手順により，高性能 V 型防舷材の基本性能は，各製造者の製造する防舷材の性能から，以下のとおり設定する．

高さ H	:	0.4m
長さ L	:	1.0m
設計圧縮率 ε_d	:	52.5%
吸収エネルギーE	:	44.58kNm
反力 R	:	265.6 kN
エネルギー吸収効率を示す係数 f	:	0.80
限界圧縮率 ε_c	:	55.0%
限界圧縮率における反力増加率 C_R	:	1.59

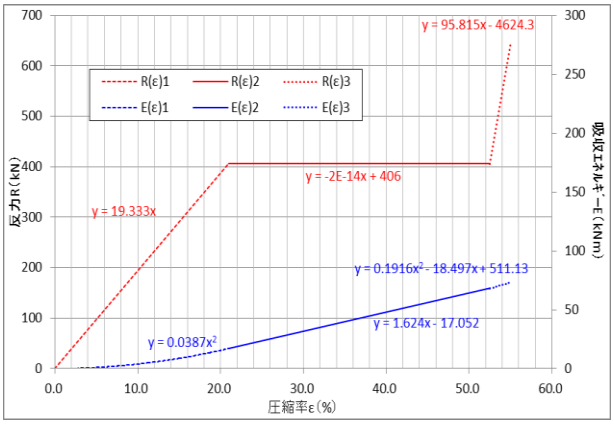
高性能 V 型防舷材は，寸法(高さ H，長さ L)により，設計圧縮率における吸収エネルギーE や反力 R を変化させることができる．ここでは，高さ H を固定し，長さ L を変化させることで，設計圧縮率におけるモデル防舷材の反力 R が目標値と一致するように調整する．なお，吸収エネルギーE，反力 R　の目標値は以下のとおりである．

吸収エネルギーE(目標値)	:	68.2kNm
反力 R(目標値)	:	406.0 kN

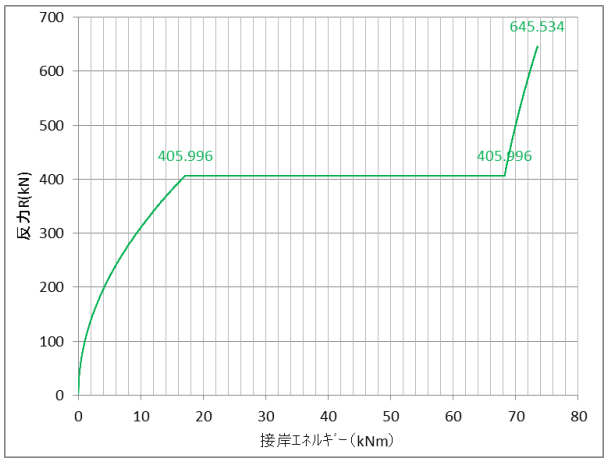
上記の目標値を満たすモデル防舷材(高性能 V 型)の長さは L=1.5286m である．この時の性能を**付表 E-2**，**付図 E-1** に示し，接岸エネルギーEf と反力 R の関係図を**付図 E-2** に示す．

付表 E-2　モデル防舷材(設計水深-7.5m)の寸法および性能

高さ H	0.4m
長さ L	1.5286m
設計圧縮率 ε_d	52.5%
吸収エネルギーE	68.21kNm
反力 R	406.0 kN



付図 E-1　モデル防舷材の性能曲線



付図 E-2　モデル防舷材の接岸エネルギーと反力の関係

(3)設計水深-12m

設計水深-12m の検討断面は，中空円錐台形型防舷材を想定している．したがって，モデル防舷材においても中空円錐台形型を想定する．

先述したモデル防舷材の設定手順により，中空円錐台形型防舷材の基本性能は，各製造者の製造する防舷材の性能から，以下のとおり設定する．

高さ H	:	1.0m
設計圧縮率 ε_d	:	70.0%
吸収エネルギーE	:	433.60kNm
反力 R	:	786.8kN
エネルギー吸収効率を示す係数 f	:	0.787
限界圧縮率 ε_c	:	72.5%
限界圧縮率における反力増加率 C_R	:	1.22

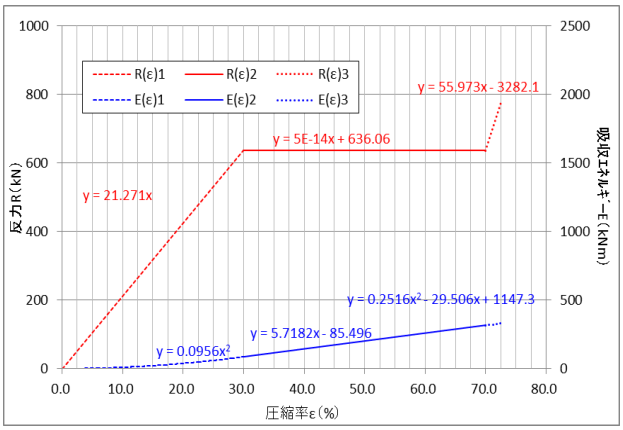
中空円錐台形型防舷材は，V 型防舷材と異なり長さ L がない．このため，高さ H を変化させることで，設計圧縮率におけるモデル防舷材の反力 R が目標値と一致するように調整する．なお，吸収エネルギーE，反力 R の目標値は以下のとおりである．

吸収エネルギーE(目標値)	:	319.0kNm
反力 R(目標値)	:	636.0 kN

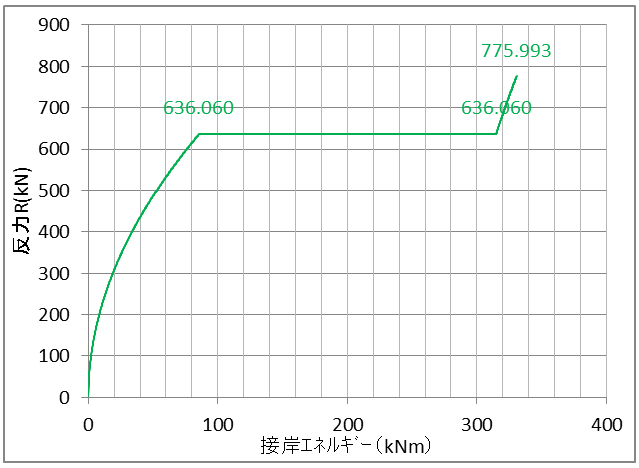
上記の目標値を満たすモデル防舷材(中空円錐台形型)の高さは H=0.899m である．この時の性能を**付表 E-3**，**付図 E-2** に示し，接岸エネルギーEf と反力 R の関係図を**付図 E-4** に示す．

付表 E-3　モデル防舷材(設計水深-12m)の寸法および性能

高さ H	0.899m
設計圧縮率 ε_d	70.0%
吸収エネルギーE	314.86kNm
反力 R	636.1 kN



付図 E-3　モデル防舷材の性能曲線



付図 E-4　モデル防舷材の接岸エネルギーと反力の関係

(4)設計水深-18m

設計水深-18m の検討断面は，中空円錐台形型防舷材を想定している．したがって，モデル防舷材においても中空円錐台形型を想定する．

先述したモデル防舷材の設定手順により，中空円錐台形型防舷材の基本性能は，各製造者の製造する防舷材の性能から，以下のとおり設定する．

高さ H	:	1.0m
設計圧縮率 ε_d	:	70.0%
吸収エネルギーE	:	433.60kNm
反力 R	:	786.8kN
エネルギー吸収効率を示す係数 f	:	0.787
限界圧縮率 ε_c	:	72.5%
限界圧縮率における反力増加率 C_R	:	1.22

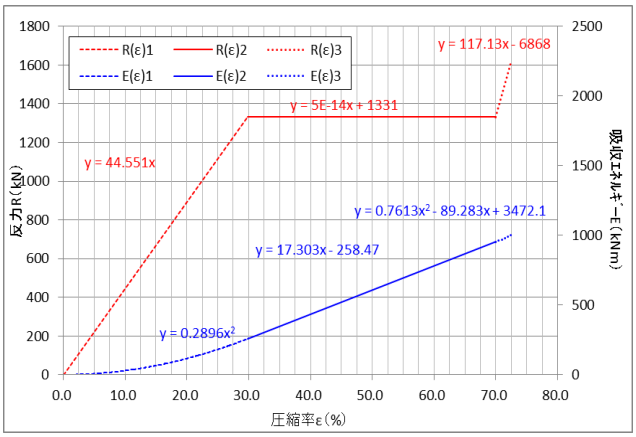
中空円錐台形型防舷材は，高さ H を変化させることで，設計圧縮率におけるモデル防舷材の反力 R が目標値と一致するように調整する．なお，吸収エネルギーE，反力 R の目標値は以下のとおりである．

吸収エネルギーE(目標値)	:	962.0kNm
反力 R(目標値)	:	1330.0 kN

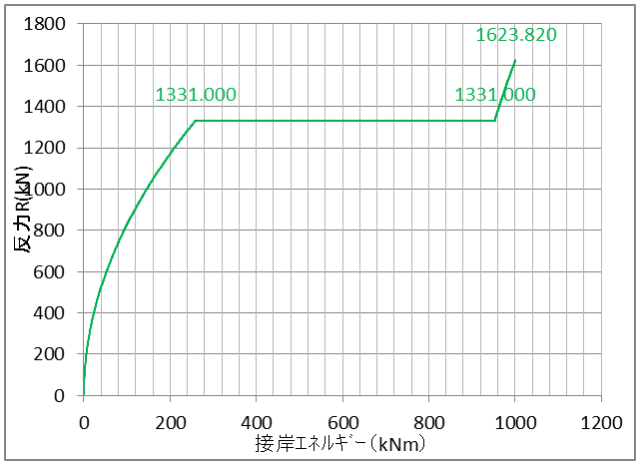
上記の目標値を満たすモデル防舷材(中空円錐台形型)の高さは H=0.899m である．この時の性能を**付表 E-4**，**付図 E-5** に示し，接岸エネルギーEf と反力 R の関係図を**付図 E-6** に示す．信頼性解析においては，モデル防舷材はこれらの性能曲線，関係式に従うものとする．

付表 E-4　モデル防舷材(設計水深-18m)の寸法および性能

高さ H	1.30m
設計圧縮率 ε_d	70.0%
吸収エネルギーE	952.60kNm
反力 R	1331.0kN



付図 E-5　モデル防舷材の性能曲線



付図 E-6　モデル防舷材の接岸エネルギーと反力の関係

附録 F 現行港湾基準に基づく検討断面に対する信頼性解析結果

(1)防舷材反力の計算条件

①設計圧縮率以降の防舷材の反力増加率

設計圧縮率以降の防舷材の反力増加率については，以下の 2 パターンが想定され，本稿本文でも両パターンの信頼性解析結果を記載している．本附録においても，両パターンに対し，現行港湾基準に基づく検討断面の信頼性解析結果を記載する．

①防舷材の形状毎に，各製造者の最大値を用いる(**付表 F-1**)

②現行港湾基準の検討時の値を用いる(**付表 F-2**)

付表 F-1　設計圧縮率以降の反力増加率（形状毎の最大値）

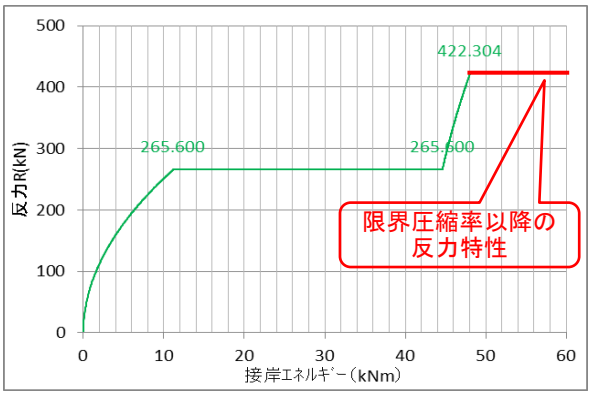
設計水深	-7.5m	-12m	-18m
形状	高性能 V	中空円錐台形	
設計圧縮率	52.5	70.0	70.0
限界圧縮率	55.0	72.5	72.5
反力増加率	1.59	1.22	1.22

付表 F-2 設計圧縮率以降の反力増加率（現行港湾基準相当）

設計水深	-7.5m	-12m	-18m
形状	高性能 V	中空円錐台形	
設計圧縮率	52.5	70.0	70.0
限界圧縮率	55.0	72.5	72.5
反力増加率	1.32		

②限界圧縮率以降の防舷材反力

信頼性解析においては，各確率変数の分布により防舷材の限界圧縮率を超過する接岸エネルギーが生じることが想定されるが，限界圧縮率を超過した際の反力特性については，根拠となり得る資料が確認できない．このため，本稿本文においては，**付図 F-1** に示すようにモデル防舷材の限界圧縮率以降の反力特性は，限界圧縮率時の値を準用することとした．

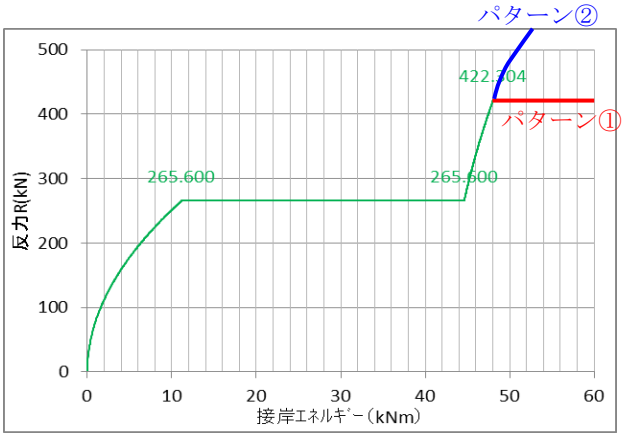


付図 F-1　限界圧縮率以降の反力特性の設定(本稿本文)

しかしながら，限界圧縮率以降のモデル防舷材の反力特性については，**付図 F-2** に示す以下の 2 パターンを想定することができる．

①限界圧縮率時の防舷材反力と同値とさせる

②設計圧縮率から限界圧縮率までの関係式に従い，限界圧縮率以降も防舷材反力を増加させる



付図 F-2　限界圧縮率以降の反力特性の設定パターン

本稿本文ではパターン①を用いた信頼性解析結果を記載している．しかしながら，限界圧縮率以降の防舷材反力は，信頼性解析における作用 S の確率分布に強く影響することから，本附録では両パターンに対して，現行港湾基準に基づく検討断面の信頼性解析結果を記載する．

③本附録における防舷材反力の計算条件

以上より，本附録においては，防舷材反力の計算条件は **付表 F-3** に示す 2×2=4 パターンとし，現行港湾基準に基づく検討断面の信頼性解析結果を記載する．なお，本稿本文に記載している信頼性解析結果は，設定 A および設定 B によるものである．

付表 F-3　防舷材反力の計算条件

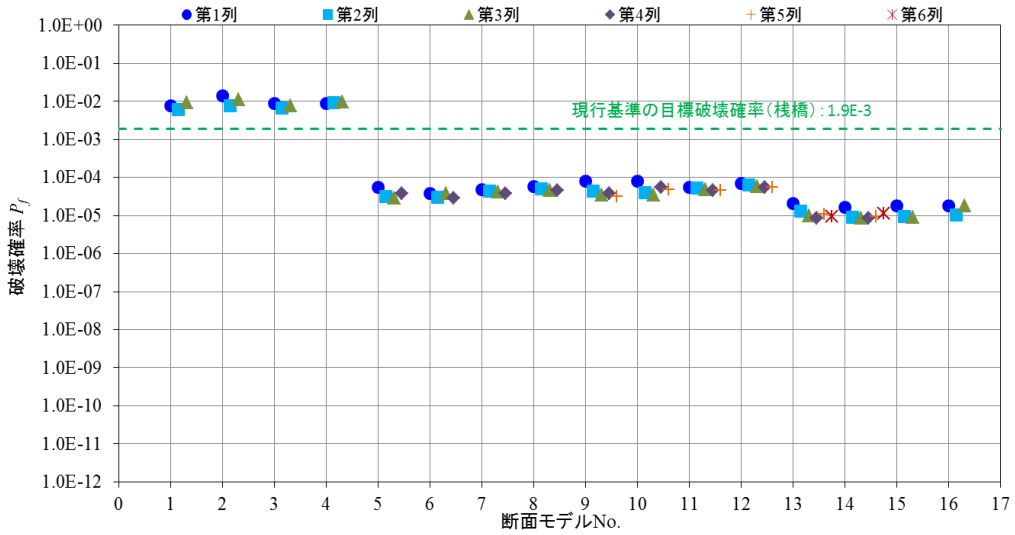
設定	設計圧縮率から限界圧縮率までの反力増加率	限界圧縮率以降の防舷材反力
A	形状毎に各製造者の最大値	限界圧縮率時の防舷材反力と同値
B	現行港湾基準の検討時の値	限界圧縮率時の防舷材反力と同値
C	形状毎に各製造者の最大値	設計圧縮率から限界圧縮率までの関係式に従い増加
D	現行港湾基準の検討時の値	設計圧縮率から限界圧縮率までの関係式に従い増加

(2)断面毎の破壊確率と信頼性指標

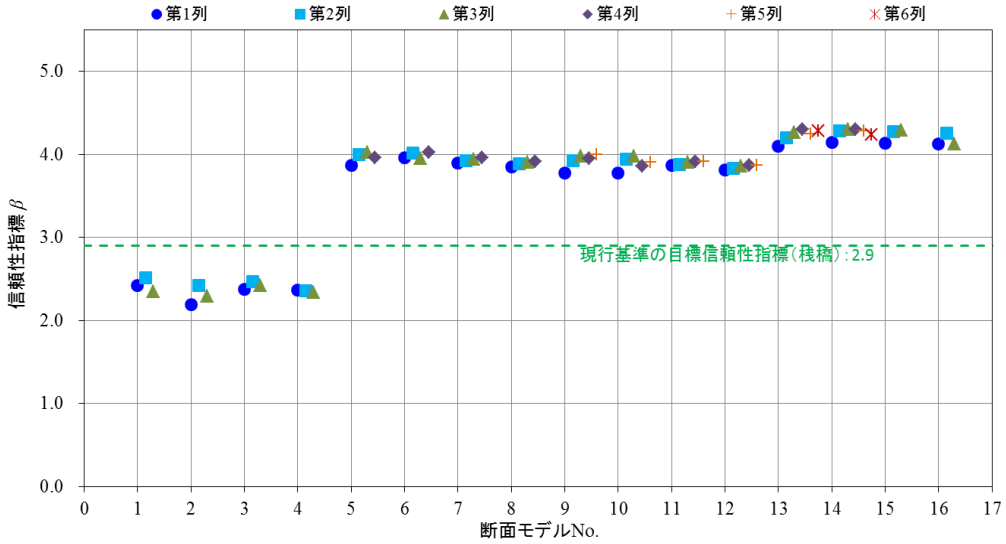
付表 F-3 に示した各設定について，断面毎の破壊確率，信頼性指標および実質安全率を次頁以降に示す．

付表 F-4　断面毎の破壊確率・信頼性指標(設定 A)

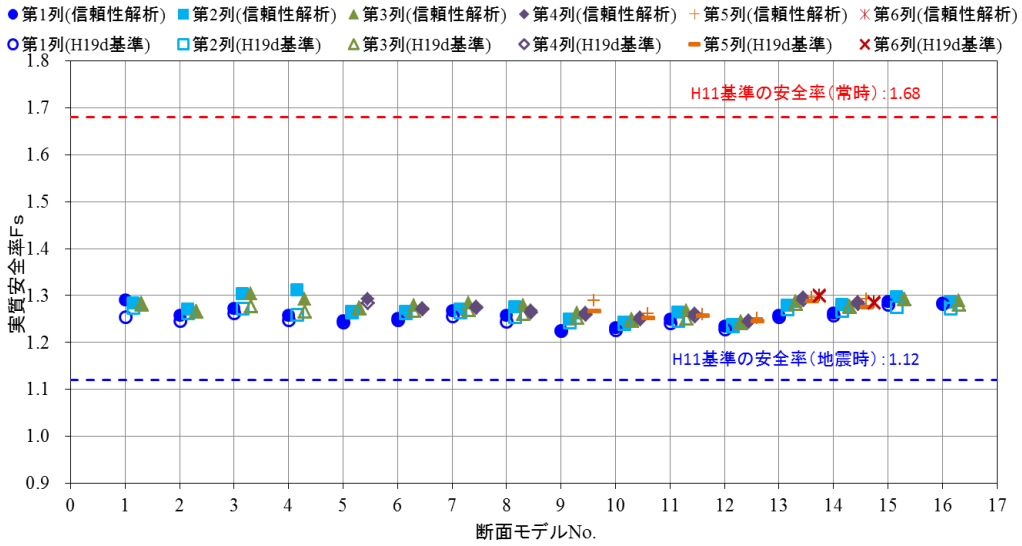
断面モデル	モデル別の条件			杭列	信頼性解析							H19d基準
	水深 (- m)	地盤反力係数 (kN/m³)			杭諸元		破壊確率 P_f	破壊確率平均値 P_{ave}	信頼性指標 β	信頼性指標平均値 β_{ave}	実質安全率 $Fs=\gamma_S/\gamma_R$	実質安全率 Fs=S/R
		捨石層	砂層		杭径 (mm)	肉厚 (mm)						
①	7.5	3,500	7,500	1列目	600	10.6	7.813E-03	8.945E-03	2.4175	2.376	1.291	1.255
				2列目	600	12.6	6.012E-03		2.5114		1.284	1.274
				3列目	600	18.8	9.360E-03		2.3511		1.284	1.282
②			22,500	1列目	600	11.0	1.415E-02		2.1931		1.258	1.246
				2列目	600	12.2	7.692E-03		2.4232		1.271	1.263
				3列目	600	16.6	1.105E-02		2.2888		1.267	1.267
③		無し	7,500	1列目	600	13.2	8.807E-03		2.3737		1.273	1.263
				2列目	600	14.7	6.736E-03		2.4710		1.304	1.273
				3列目	600	16.5	7.806E-03		2.4179		1.304	1.278
④			22,500	1列目	600	12.2	8.910E-03		2.3694		1.259	1.248
				2列目	600	13.6	9.286E-03		2.3540		1.312	1.259
				3列目	600	15.3	9.725E-03		2.3368		1.293	1.266
⑤	12.0	3,500	7,500	1列目	700	10.6	5.427E-05	4.697E-05	3.8707	3.914	1.246	1.243
				2列目	700	13.1	3.224E-05		3.9958		1.266	1.264
				3列目	700	18.3	2.899E-05		4.0209		1.274	1.273
				4列目	700	22.2	3.770E-05		3.9586		1.292	1.284
⑥			22,500	1列目	700	11.8	3.713E-05		3.9622		1.251	1.248
				2列目	700	13.0	2.961E-05		4.0159		1.266	1.263
				3列目	700	17.2	3.885E-05		3.9514		1.279	1.267
				4列目	700	20.6	2.818E-05		4.0275		1.272	1.271
⑦		無し	7,500	1列目	700	15.5	4.828E-05		3.8991		1.267	1.257
				2列目	700	17.0	4.387E-05		3.9222		1.271	1.264
				3列目	700	18.0	4.075E-05		3.9399		1.285	1.270
				4列目	700	20.2	3.755E-05		3.9595		1.276	1.274
⑧			22,500	1列目	700	14.5	5.869E-05		3.8515		1.258	1.245
				2列目	700	16.0	5.085E-05		3.8865		1.276	1.254
				3列目	700	16.9	4.625E-05		3.9095		1.280	1.261
				4列目	700	19.1	4.521E-05		3.9149		1.268	1.265
⑨		3,500	7,500	1列目	700	10.2	8.088E-05		3.7723		1.226	1.225
				2列目	700	9.4	4.408E-05		3.9211		1.249	1.243
				3列目	700	11.8	3.474E-05		3.9781		1.263	1.253
				4列目	700	16.3	3.843E-05		3.9540		1.263	1.259
				5列目	700	19.0	3.202E-05		3.9974		1.288	1.267
⑩			22,500	1列目	700	10.9	7.955E-05		3.7764		1.231	1.227
				2列目	700	10.2	4.043E-05		3.9419		1.244	1.239
				3列目	700	11.5	3.492E-05		3.9768		1.250	1.247
				4列目	700	15.0	5.621E-05		3.8621		1.253	1.250
				5列目	700	17.3	4.752E-05		3.9029		1.262	1.254
⑪		無し	7,500	1列目	700	13.1	5.491E-05		3.8678		1.249	1.242
				2列目	700	14.0	5.271E-05		3.8778		1.264	1.246
				3列目	700	14.3	4.692E-05		3.9060		1.269	1.252
				4列目	700	14.8	4.489E-05		3.9167		1.261	1.257
				5列目	700	16.1	4.494E-05		3.9164		1.259	1.258
⑫			22,500	1列目	700	12.3	6.923E-05		3.8109		1.234	1.228
				2列目	700	13.3	6.340E-05		3.8326		1.239	1.235
				3列目	700	13.6	5.709E-05		3.8583		1.244	1.242
				4列目	700	13.8	5.503E-05		3.8673		1.247	1.244
				5列目	700	15.3	5.456E-05		3.8694		1.252	1.246
⑬	18.0	3,500	7,500	1列目	900	10.5	2.115E-05	1.217E-05	4.0946	4.232	1.257	1.255
				2列目	900	11.0	1.324E-05		4.2017		1.279	1.272
				3列目	900	14.0	9.863E-06		4.2680		1.287	1.283
				4列目	900	17.6	8.367E-06		4.3045		1.296	1.291
				5列目	900	24.9	1.073E-05		4.2492		1.295	1.289
				6列目	900	28.0	9.325E-06		4.2805		1.300	1.298
⑭			22,500	1列目	1,000	9.5	1.672E-05		4.1486		1.263	1.257
				2列目	1,000	10.1	9.016E-06		4.2880		1.280	1.268
				3列目	1,000	11.5	8.385E-06		4.3041		1.278	1.277
				4列目	1,000	14.1	8.525E-06		4.3004		1.286	1.283
				5列目	1,000	18.5	9.350E-06		4.2799		1.293	1.276
				6列目	1,000	19.8	1.119E-05		4.2398		1.286	1.285
⑮			7,500	1列目	1,300	9.5	1.798E-05		4.1320		1.288	1.281
				2列目	1,300	19.3	9.473E-06		4.2770		1.297	1.277
				3列目	1,300	23.2	9.013E-06		4.2880		1.293	1.293
⑯			22,500	1列目	1,300	10.4	1.815E-05		4.1299		1.285	1.283
				2列目	1,300	18.7	1.036E-05		4.2570		1.286	1.272
				3列目	1,300	21.4	1.831E-05		4.1279		1.288	1.280



付図 F-3　各検討断面の破壊確率(設定 A)



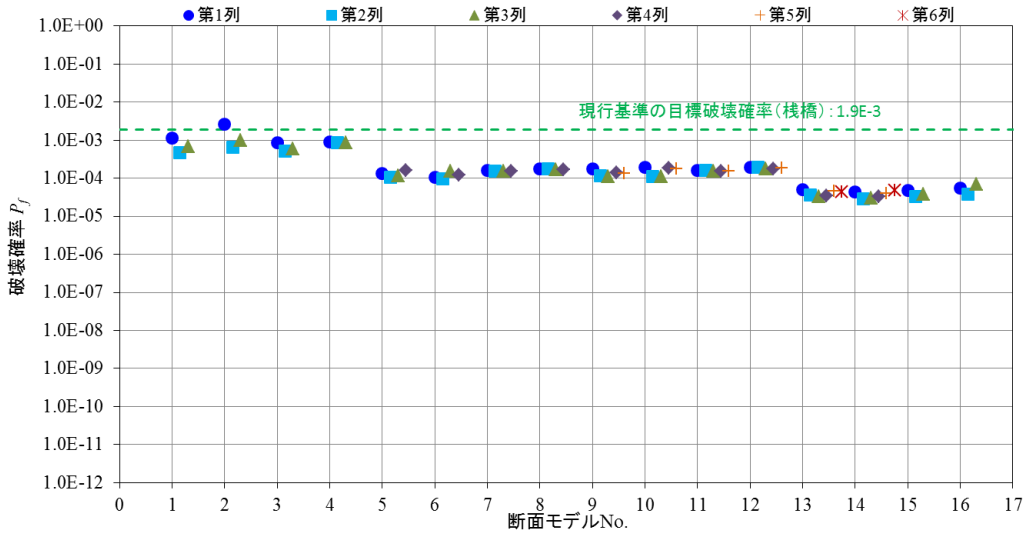
付図 F-4　各検討断面の信頼性指標(設定 A)



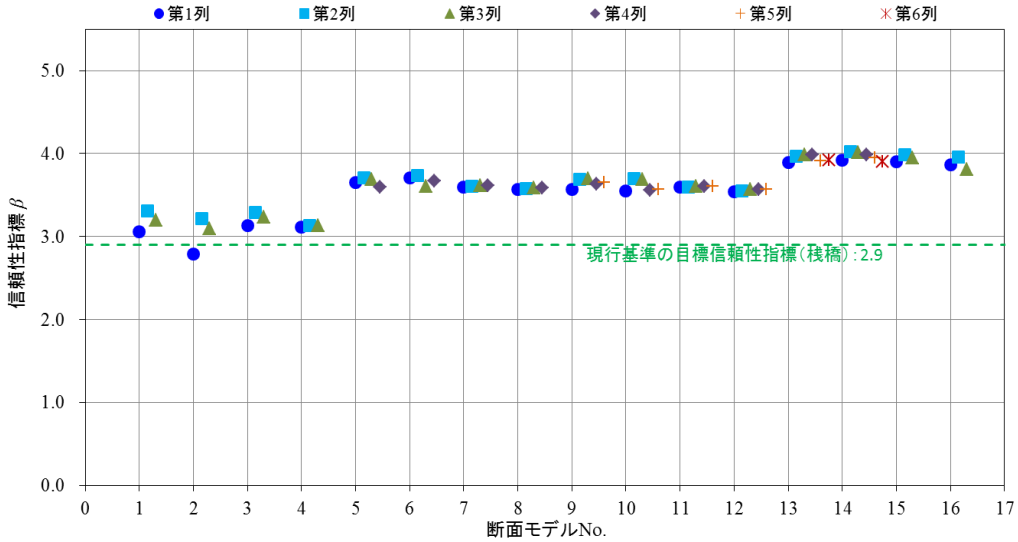
付図 F-5　各検討断面の実質安全率(設定 A)

付表 F-5　断面毎の破壊確率・信頼性指標(設定 B)

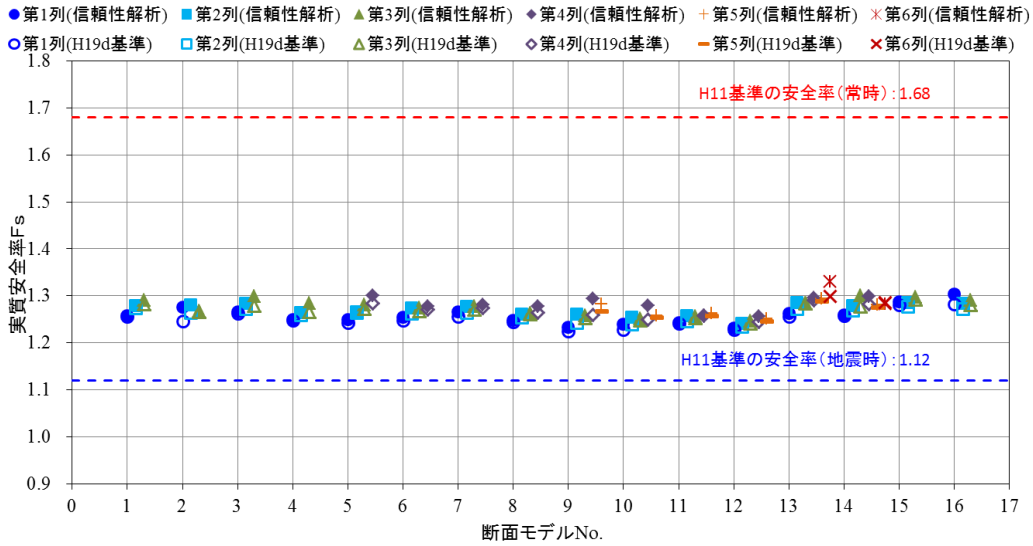
断面モデル	モデル別の条件			杭列	信頼性解析							H19d基準
	水深 (- m)	地盤反力係数 (kN/m³)			杭諸元		破壊確率 P_f	破壊確率平均値 P_{ave}	信頼性指標 β	信頼性指標平均値 β_{ave}	実質安全率 $Fs=\gamma_S/\gamma_R$	実質安全率 Fs=S/R
		捨石層	砂層		杭径 (mm)	肉厚 (mm)						
①	7.5	3,500	7,500	1列目	600	10.6	1.116E-03	9.267E-04	3.0575	3.143	1.258	1.255
				2列目	600	12.6	4.668E-04		3.3098		1.280	1.274
				3列目	600	18.8	6.936E-04		3.1973		1.291	1.282
②			22,500	1列目	600	11.0	2.628E-03		2.7909		1.275	1.246
				2列目	600	12.2	6.492E-04		3.2163		1.280	1.263
				3列目	600	16.6	9.706E-04		3.0991		1.267	1.267
③		無し	7,500	1列目	600	13.2	8.535E-04		3.1370		1.266	1.263
				2列目	600	14.7	5.081E-04		3.2860		1.283	1.273
				3列目	600	16.5	6.053E-04		3.2364		1.299	1.278
④			22,500	1列目	600	12.2	9.073E-04		3.1190		1.249	1.248
				2列目	600	13.6	8.692E-04		3.1316		1.264	1.259
				3列目	600	15.3	8.522E-04		3.1374		1.283	1.266
⑤	12.0	3,500	7,500	1列目	700	10.6	1.316E-04	1.518E-04	3.6490	3.617	1.250	1.243
				2列目	700	13.1	1.037E-04		3.7099		1.266	1.264
				3列目	700	18.3	1.145E-04		3.6847		1.281	1.273
				4列目	700	22.2	1.614E-04		3.5963		1.301	1.284
⑥			22,500	1列目	700	11.8	1.034E-04		3.7105		1.254	1.248
				2列目	700	13.0	9.532E-05		3.7311		1.274	1.263
				3列目	700	17.2	1.558E-04		3.6055		1.273	1.267
				4列目	700	20.6	1.207E-04		3.6713		1.277	1.271
⑦		無し	7,500	1列目	700	15.5	1.610E-04		3.5969		1.266	1.257
				2列目	700	17.0	1.541E-04		3.6083		1.277	1.264
				3列目	700	18.0	1.509E-04		3.6137		1.277	1.270
				4列目	700	20.2	1.501E-04		3.6152		1.280	1.274
⑧			22,500	1列目	700	14.5	1.804E-04		3.5673		1.248	1.245
				2列目	700	16.0	1.756E-04		3.5743		1.261	1.254
				3列目	700	16.9	1.678E-04		3.5862		1.263	1.261
				4列目	700	19.1	1.681E-04		3.5856		1.277	1.265
⑨		3,500	7,500	1列目	700	10.2	1.803E-04		3.5674		1.233	1.225
				2列目	700	9.4	1.142E-04		3.6853		1.261	1.243
				3列目	700	11.8	1.102E-04		3.6944		1.258	1.253
				4列目	700	16.3	1.414E-04		3.6306		1.294	1.259
				5列目	700	19.0	1.306E-04		3.6511		1.282	1.267
⑩			22,500	1列目	700	10.9	1.942E-04		3.5478		1.240	1.227
				2列目	700	10.2	1.083E-04		3.6989		1.254	1.239
				3列目	700	11.5	1.132E-04		3.6876		1.251	1.247
				4列目	700	15.0	1.857E-04		3.5596		1.279	1.250
				5列目	700	17.3	1.771E-04		3.5721		1.257	1.254
⑪		無し	7,500	1列目	700	13.1	1.614E-04		3.5962		1.243	1.242
				2列目	700	14.0	1.633E-04		3.5933		1.257	1.246
				3列目	700	14.3	1.544E-04		3.6077		1.256	1.252
				4列目	700	14.8	1.535E-04		3.6093		1.258	1.257
				5列目	700	16.1	1.565E-04		3.6044		1.262	1.258
⑫			22,500	1列目	700	12.3	1.975E-04		3.5435		1.231	1.228
				2列目	700	13.3	1.898E-04		3.5539		1.241	1.235
				3列目	700	13.6	1.771E-04		3.5720		1.245	1.242
				4列目	700	13.8	1.806E-04		3.5670		1.256	1.244
				5列目	700	15.3	1.807E-04		3.5668		1.251	1.246
⑬	18.0	3,500	7,500	1列目	900	10.5	5.013E-05	4.150E-05	3.8900	3.941	1.262	1.255
				2列目	900	11.0	3.654E-05		3.9660		1.286	1.272
				3列目	900	14.0	3.354E-05		3.9864		1.283	1.283
				4列目	900	17.6	3.383E-05		3.9844		1.295	1.291
				5列目	900	24.9	4.572E-05		3.9123		1.293	1.289
				6列目	900	28.0	4.342E-05		3.9247		1.330	1.298
⑭			22,500	1列目	1,000	9.5	4.373E-05		3.9230		1.259	1.257
				2列目	1,000	10.1	2.849E-05		4.0250		1.278	1.268
				3列目	1,000	11.5	2.972E-05		4.0150		1.300	1.277
				4列目	1,000	14.1	3.316E-05		3.9891		1.299	1.283
				5列目	1,000	18.5	3.924E-05		3.9490		1.281	1.276
				6列目	1,000	19.8	4.816E-05		3.8997		1.282	1.285
⑮			7,500	1列目	1,300	9.5	4.771E-05		3.9020		1.288	1.281
				2列目	1,300	19.3	3.368E-05		3.9854		1.285	1.277
				3列目	1,300	23.2	3.866E-05		3.9525		1.297	1.293
⑯			22,500	1列目	1,300	10.4	5.490E-05		3.8679		1.304	1.283
				2列目	1,300	18.7	3.726E-05		3.9614		1.284	1.272
				3列目	1,300	21.4	6.903E-05		3.8116		1.291	1.280



付図 F-6　各検討断面の破壊確率(設定 B)



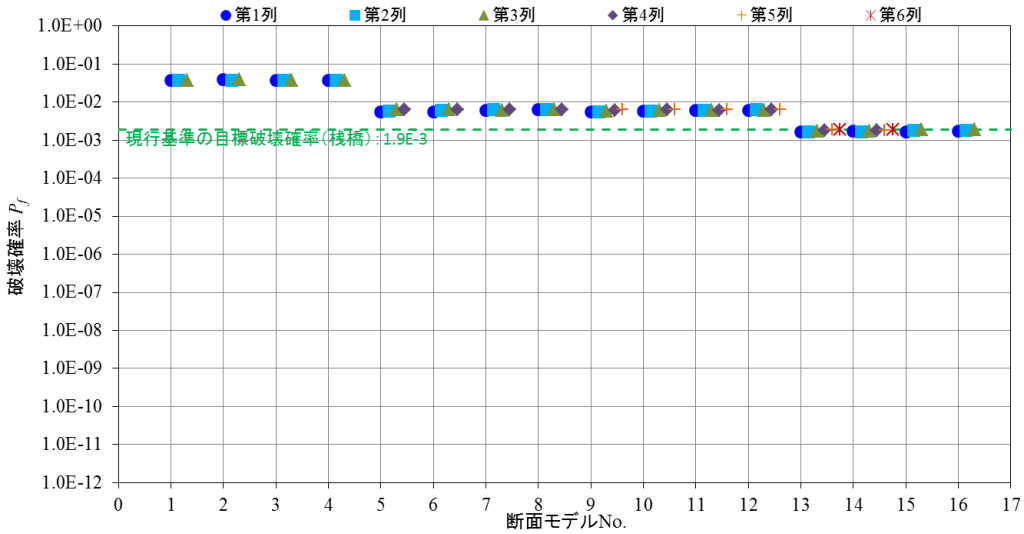
付図 F-7　各検討断面の信頼性指標(設定 B)



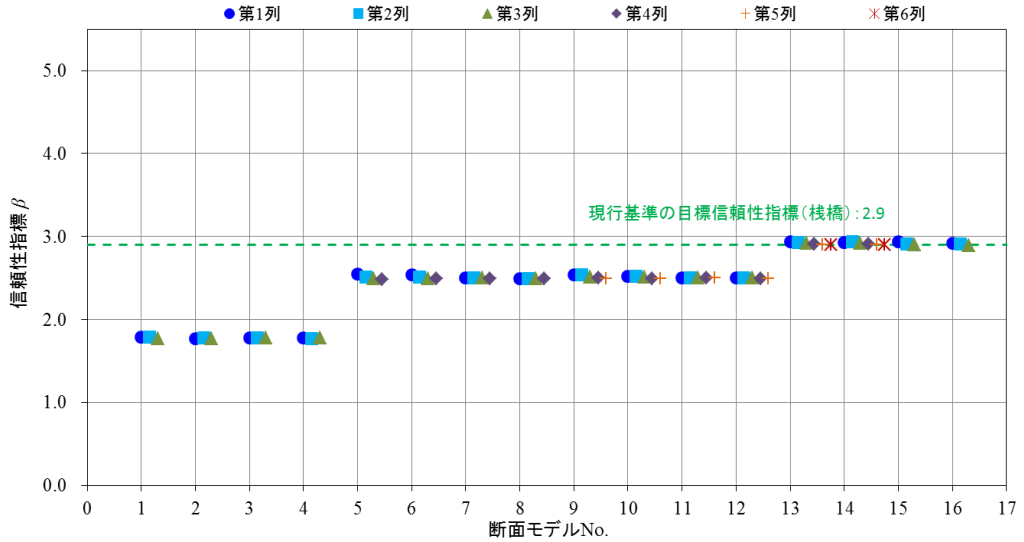
付図 F-8　各検討断面の実質安全率(設定 B)

付表 F-6　断面毎の破壊確率・信頼性指標(設定 C)

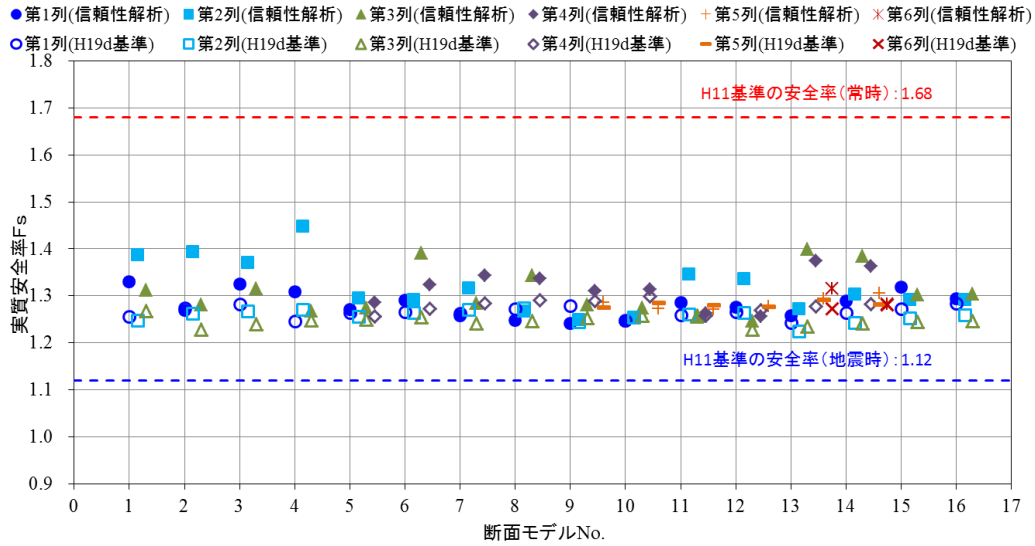
断面モデル	モデル別の条件			杭列	信頼性解析							H19d基準
	水深 (- m)	地盤反力係数 (kN/m³)			杭諸元		破壊確率 P_f	破壊確率平均値 P_{ave}	信頼性指標 β	信頼性指標平均値 β_{ave}	実質安全率 $Fs=\gamma_S/\gamma_R$	実質安全率 Fs=S/R
		捨石層	砂層		杭径 (mm)	肉厚 (mm)						
①	7.5	3,500	7,500	1列目	600	10.6	3.701E-02	3.776E-02	1.7865	1.777	1.330	1.255
				2列目	600	12.6	3.704E-02		1.7862		1.388	1.274
				3列目	600	18.8	3.814E-02		1.7727		1.312	1.282
②			22,500	1列目	600	11.0	3.858E-02		1.7674		1.268	1.246
				2列目	600	12.2	3.776E-02		1.7773		1.394	1.263
				3列目	600	16.6	3.844E-02		1.7691		1.280	1.267
③		無し	7,500	1列目	600	13.2	3.787E-02		1.7759		1.325	1.263
				2列目	600	14.7	3.737E-02		1.7821		1.371	1.273
				3列目	600	16.5	3.732E-02		1.7827		1.314	1.278
④			22,500	1列目	600	12.2	3.790E-02		1.7756		1.308	1.248
				2列目	600	13.6	3.802E-02		1.7742		1.448	1.259
				3列目	600	15.3	3.764E-02		1.7787		1.267	1.266
⑤	12.0	3,500	7,500	1列目	700	10.6	5.476E-03	6.121E-03	2.5442	2.505	1.270	1.243
				2列目	700	13.1	5.933E-03		2.5161		1.296	1.264
				3列目	700	18.3	6.248E-03		2.4978		1.275	1.273
				4列目	700	22.2	6.458E-03		2.4861		1.285	1.284
⑥			22,500	1列目	700	11.8	5.617E-03		2.5353		1.291	1.248
				2列目	700	13.0	5.968E-03		2.5140		1.292	1.263
				3列目	700	17.2	6.294E-03		2.4952		1.390	1.267
				4列目	700	20.6	6.337E-03		2.4928		1.324	1.271
⑦		無し	7,500	1列目	700	15.5	6.208E-03		2.5001		1.257	1.257
				2列目	700	17.0	6.244E-03		2.4981		1.316	1.264
				3列目	700	18.0	6.209E-03		2.5000		1.284	1.270
				4列目	700	20.2	6.296E-03		2.4951		1.343	1.274
⑧			22,500	1列目	700	14.5	6.260E-03		2.4971		1.248	1.245
				2列目	700	16.0	6.296E-03		2.4951		1.268	1.254
				3列目	700	16.9	6.290E-03		2.4954		1.343	1.261
				4列目	700	19.1	6.341E-03		2.4926		1.336	1.265
⑨		3,500	7,500	1列目	700	10.2	5.539E-03		2.5402		1.241	1.225
				2列目	700	9.4	5.590E-03		2.5370		1.250	1.243
				3列目	700	11.8	5.935E-03		2.5160		1.280	1.253
				4列目	700	16.3	6.214E-03		2.4997		1.310	1.259
				5列目	700	19.0	6.256E-03		2.4973		1.286	1.267
⑩			22,500	1列目	700	10.9	5.875E-03		2.5195		1.246	1.227
				2列目	700	10.2	5.775E-03		2.5256		1.255	1.239
				3列目	700	11.5	5.994E-03		2.5125		1.274	1.247
				4列目	700	15.0	6.324E-03		2.4935		1.314	1.250
				5列目	700	17.3	6.359E-03		2.4916		1.272	1.254
⑪		無し	7,500	1列目	700	13.1	6.116E-03		2.5054		1.286	1.242
				2列目	700	14.0	6.175E-03		2.5020		1.347	1.246
				3列目	700	14.3	6.124E-03		2.5049		1.254	1.252
				4列目	700	14.8	6.177E-03		2.5018		1.262	1.257
				5列目	700	16.1	6.235E-03		2.4986		1.270	1.258
⑫			22,500	1列目	700	12.3	6.198E-03		2.5007		1.276	1.228
				2列目	700	13.3	6.232E-03		2.4987		1.336	1.235
				3列目	700	13.6	6.181E-03		2.5016		1.246	1.242
				4列目	700	13.8	6.254E-03		2.4975		1.255	1.244
				5列目	700	15.3	6.329E-03		2.4932		1.277	1.246
⑬	18.0	3,500	7,500	1列目	900	10.5	1.633E-03	1.779E-03	2.9416	2.915	1.257	1.255
				2列目	900	11.0	1.679E-03		2.9329		1.272	1.272
				3列目	900	14.0	1.750E-03		2.9201		1.398	1.283
				4列目	900	17.6	1.805E-03		2.9104		1.374	1.291
				5列目	900	24.9	1.855E-03		2.9019		1.294	1.289
				6列目	900	28.0	1.869E-03		2.8994		1.315	1.298
⑭			22,500	1列目	1,000	9.5	1.707E-03		2.9278		1.288	1.257
				2列目	1,000	10.1	1.668E-03		2.9350		1.304	1.268
				3列目	1,000	11.5	1.746E-03		2.9208		1.384	1.277
				4列目	1,000	14.1	1.801E-03		2.9110		1.364	1.283
				5列目	1,000	18.5	1.842E-03		2.9040		1.306	1.276
				6列目	1,000	19.8	1.874E-03		2.8986		1.283	1.285
⑮			7,500	1列目	1,300	9.5	1.655E-03		2.9374		1.319	1.281
				2列目	1,300	19.3	1.786E-03		2.9137		1.292	1.277
				3列目	1,300	23.2	1.869E-03		2.8994		1.303	1.293
⑯			22,500	1列目	1,300	10.4	1.759E-03		2.9184		1.294	1.283
				2列目	1,300	18.7	1.802E-03		2.9109		1.292	1.272
				3列目	1,300	21.4	1.927E-03		2.8899		1.304	1.280



付図 F-9　各検討断面の破壊確率(設定 C)



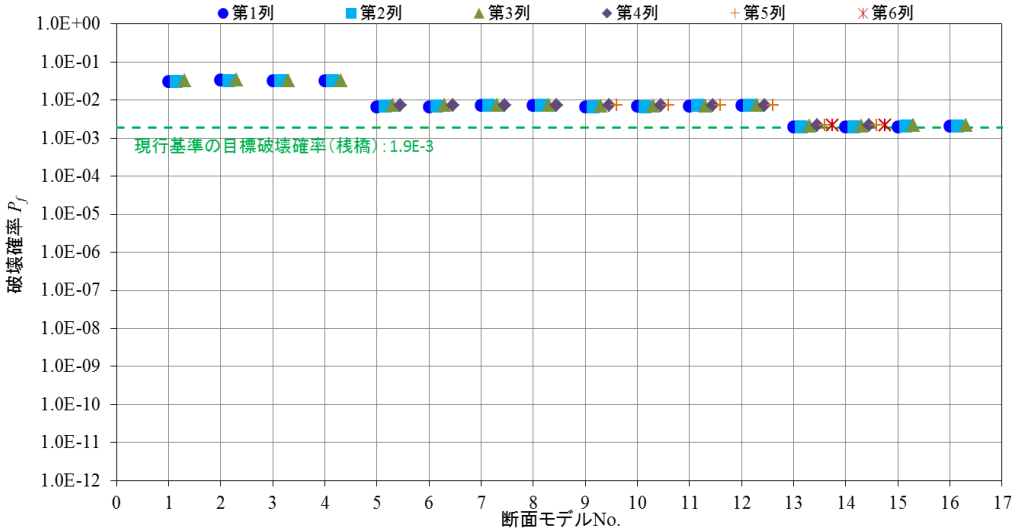
付図 F-10　各検討断面の信頼性指標(設定 C)



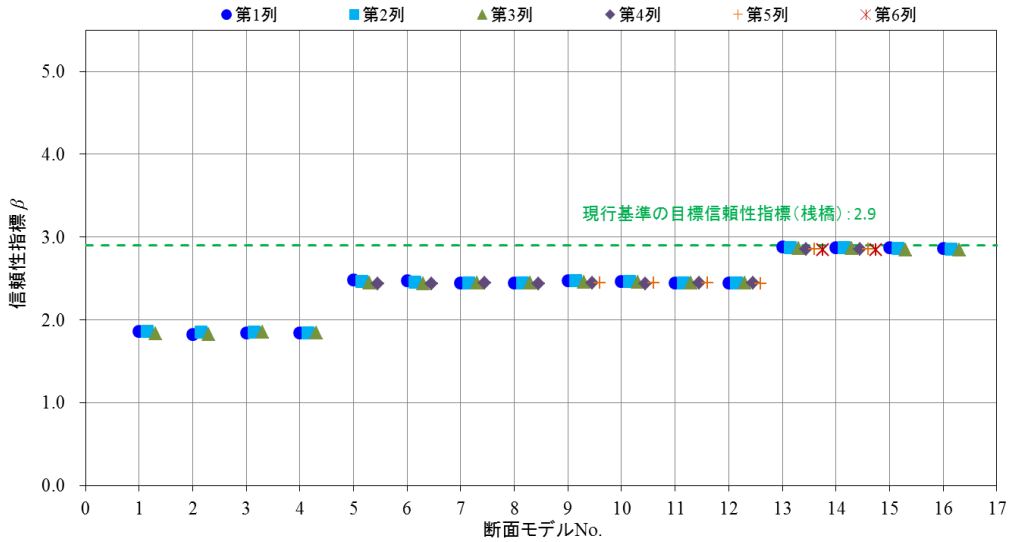
付図 F-11　各検討断面の実質安全率(設定 C)

付表 F-7　断面毎の破壊確率・信頼性指標(設定 D)

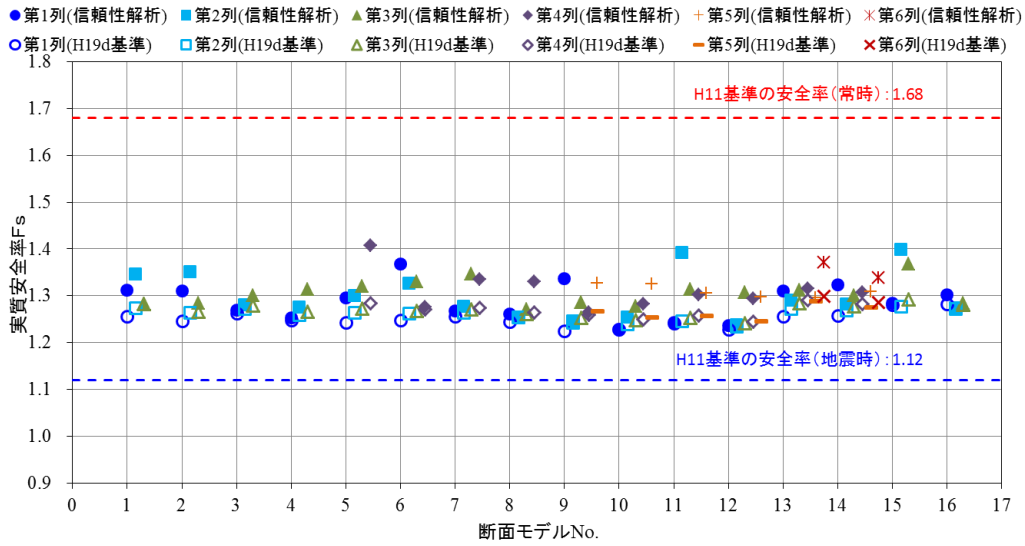
断面モデル	モデル別の条件			杭列	信頼性解析							H19d基準
	水深 (- m)	地盤反力係数 (kN/m³)			杭諸元		破壊確率 P_f	破壊確率平均値 P_{ave}	信頼性指標 β	信頼性指標平均値 β_{ave}	実質安全率 $Fs=\gamma_S/\gamma_R$	実質安全率 Fs=S/R
		捨石層	砂層		杭径 (mm)	肉厚 (mm)						
①	7.5	3,500	7,500	1列目	600	10.6	3.133E-02	3.249E-02	1.8616	1.845	1.312	1.255
				2列目	600	12.6	3.153E-02		1.8588		1.346	1.274
				3列目	600	18.8	3.321E-02		1.8356		1.282	1.282
②			22,500	1列目	600	11.0	3.367E-02		1.8293		1.310	1.246
				2列目	600	12.2	3.217E-02		1.8499		1.351	1.263
				3列目	600	16.6	3.367E-02		1.8294		1.284	1.267
③		無し	7,500	1列目	600	13.2	3.249E-02		1.8453		1.268	1.263
				2列目	600	14.7	3.174E-02		1.8559		1.281	1.273
				3列目	600	16.5	3.210E-02		1.8508		1.300	1.278
④			22,500	1列目	600	12.2	3.253E-02		1.8448		1.252	1.248
				2列目	600	13.6	3.274E-02		1.8420		1.275	1.259
				3列目	600	15.3	3.272E-02		1.8422		1.314	1.266
⑤	12.0	3,500	7,500	1列目	700	10.6	6.567E-03	7.119E-03	2.4801	2.451	1.296	1.243
				2列目	700	13.1	6.931E-03		2.4608		1.300	1.264
				3列目	700	18.3	7.221E-03		2.4461		1.321	1.273
				4列目	700	22.2	7.388E-03		2.4378		1.407	1.284
⑥			22,500	1列目	700	11.8	6.726E-03		2.4715		1.368	1.248
				2列目	700	13.0	6.985E-03		2.4581		1.327	1.263
				3列目	700	17.2	7.316E-03		2.4414		1.329	1.267
				4列目	700	20.6	7.310E-03		2.4416		1.275	1.271
⑦		無し	7,500	1列目	700	15.5	7.187E-03		2.4478		1.268	1.257
				2列目	700	17.0	7.206E-03		2.4468		1.277	1.264
				3列目	700	18.0	7.205E-03		2.4469		1.347	1.270
				4列目	700	20.2	7.266E-03		2.4438		1.336	1.274
⑧			22,500	1列目	700	14.5	7.234E-03		2.4454		1.261	1.245
				2列目	700	16.0	7.242E-03		2.4450		1.255	1.254
				3列目	700	16.9	7.244E-03		2.4449		1.271	1.261
				4列目	700	19.1	7.318E-03		2.4413		1.329	1.265
⑨		3,500	7,500	1列目	700	10.2	6.633E-03		2.4766		1.336	1.225
				2列目	700	9.4	6.684E-03		2.4738		1.246	1.243
				3列目	700	11.8	6.964E-03		2.4591		1.285	1.253
				4列目	700	16.3	7.208E-03		2.4467		1.264	1.259
				5列目	700	19.0	7.188E-03		2.4477		1.326	1.267
⑩			22,500	1列目	700	10.9	6.885E-03		2.4632		1.229	1.227
				2列目	700	10.2	6.803E-03		2.4675		1.255	1.239
				3列目	700	11.5	7.007E-03		2.4569		1.277	1.247
				4列目	700	15.0	7.305E-03		2.4419		1.283	1.250
				5列目	700	17.3	7.264E-03		2.4439		1.325	1.254
⑪		無し	7,500	1列目	700	13.1	7.122E-03		2.4510		1.243	1.242
				2列目	700	14.0	7.169E-03		2.4487		1.393	1.246
				3列目	700	14.3	7.125E-03		2.4509		1.314	1.252
				4列目	700	14.8	7.178E-03		2.4482		1.301	1.257
				5列目	700	16.1	7.241E-03		2.4451		1.306	1.258
⑫			22,500	1列目	700	12.3	7.184E-03		2.4479		1.236	1.228
				2列目	700	13.3	7.199E-03		2.4472		1.238	1.235
				3列目	700	13.6	7.201E-03		2.4471		1.306	1.242
				4列目	700	13.8	7.244E-03		2.4449		1.294	1.244
				5列目	700	15.3	7.317E-03		2.4413		1.297	1.246
⑬	18.0	3,500	7,500	1列目	900	10.5	1.979E-03	2.109E-03	2.8814	2.862	1.311	1.255
				2列目	900	11.0	2.020E-03		2.8750		1.291	1.272
				3列目	900	14.0	2.093E-03		2.8639		1.312	1.283
				4列目	900	17.6	2.136E-03		2.8573		1.315	1.291
				5列目	900	24.9	2.170E-03		2.8523		1.295	1.289
				6列目	900	28.0	2.194E-03		2.8488		1.371	1.298
⑭			22,500	1列目	1,000	9.5	2.030E-03		2.8735		1.324	1.257
				2列目	1,000	10.1	2.025E-03		2.8743		1.282	1.268
				3列目	1,000	11.5	2.087E-03		2.8647		1.301	1.277
				4列目	1,000	14.1	2.134E-03		2.8577		1.307	1.283
				5列目	1,000	18.5	2.148E-03		2.8555		1.309	1.276
				6列目	1,000	19.8	2.200E-03		2.8479		1.338	1.285
⑮			7,500	1列目	1,300	9.5	2.003E-03		2.8777		1.284	1.281
				2列目	1,300	19.3	2.110E-03		2.8612		1.399	1.277
				3列目	1,300	23.2	2.193E-03		2.8490		1.368	1.293
⑯			22,500	1列目	1,300	10.4	2.093E-03		2.8637		1.302	1.283
				2列目	1,300	18.7	2.122E-03		2.8594		1.274	1.272
				3列目	1,300	21.4	2.227E-03		2.8441		1.283	1.280



付図 F-12　各検討断面の破壊確率(設定 D)



付図 F-13　各検討断面の信頼性指標(設定 D)

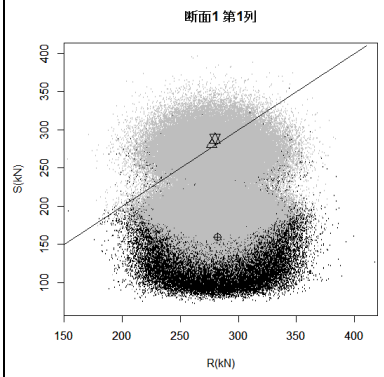
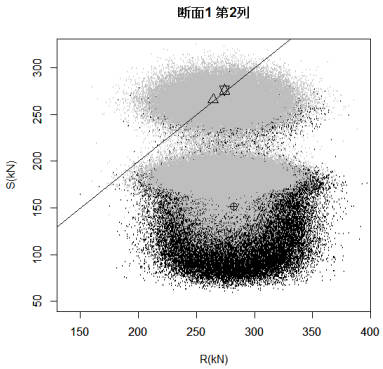
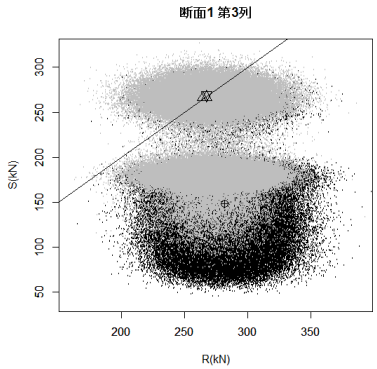
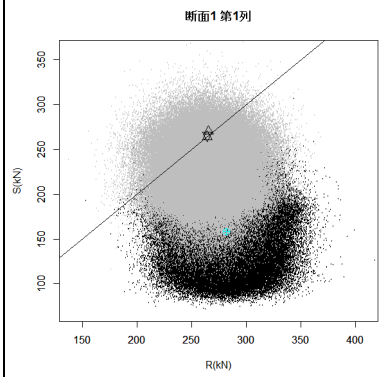
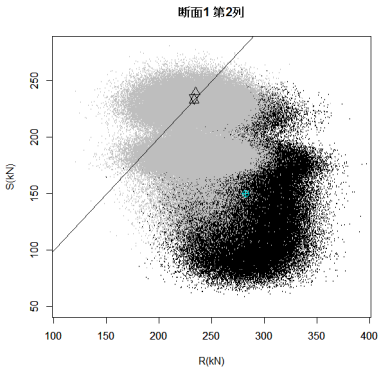
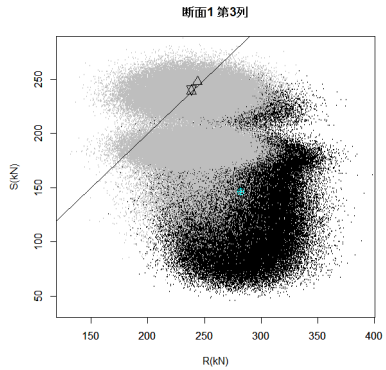
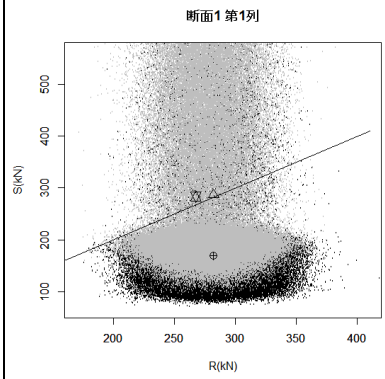
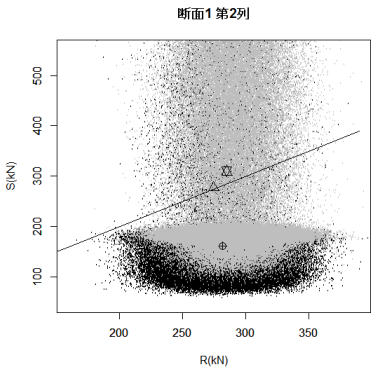
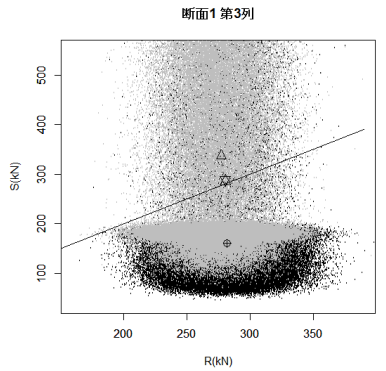
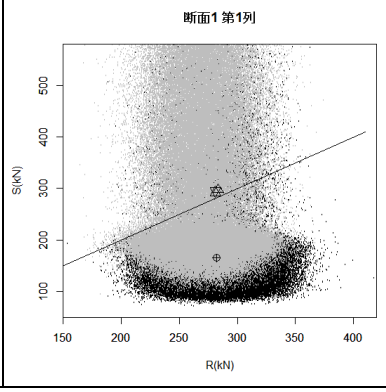
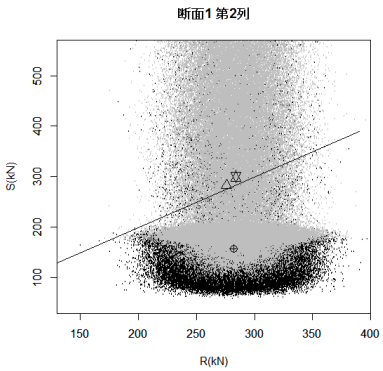
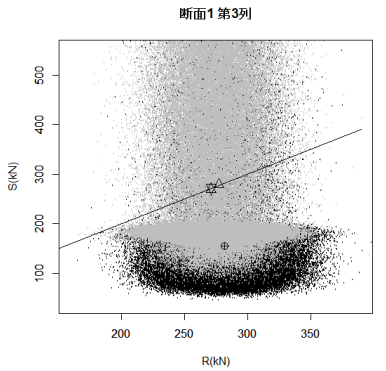


付図 F-14　各検討断面の実質安全率(設定 D)

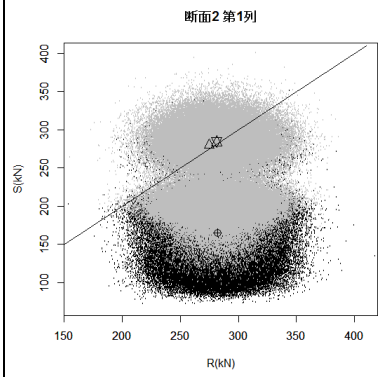
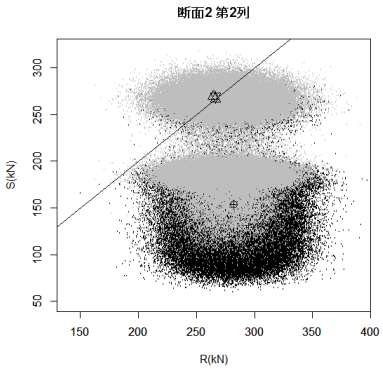
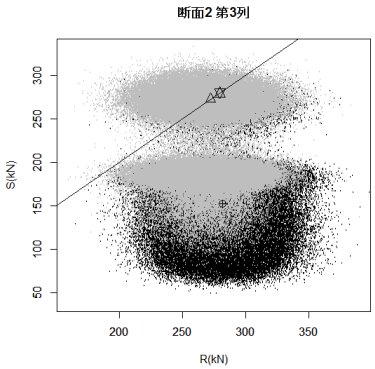
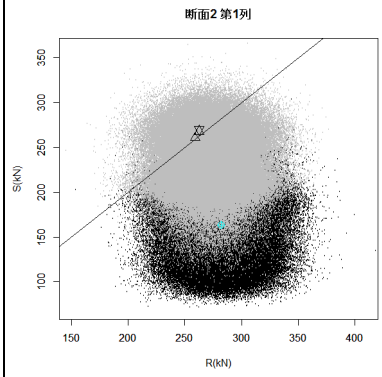
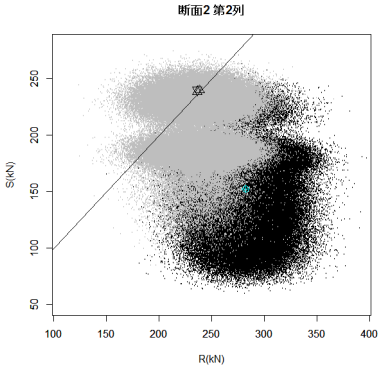
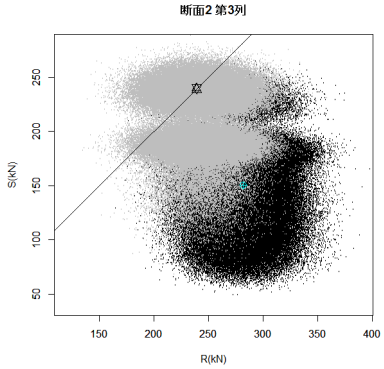
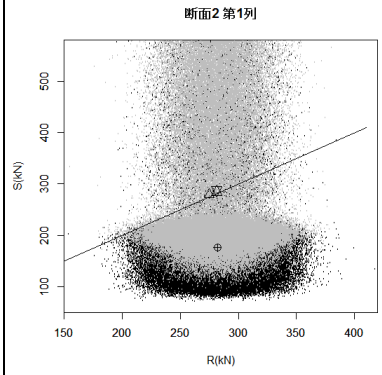
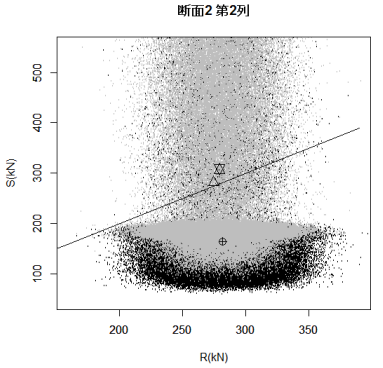
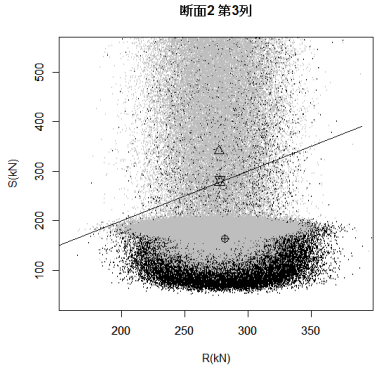
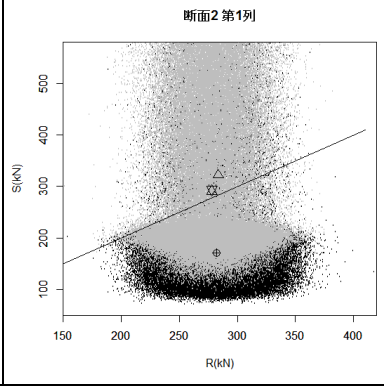
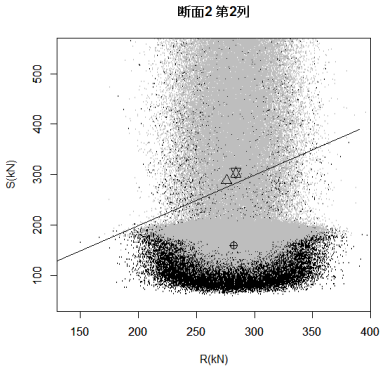
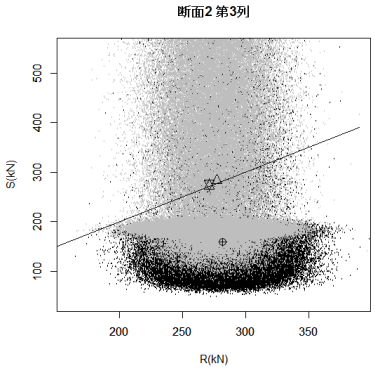
(3)信頼性解析結果図一覧

①抵抗-作用分布図

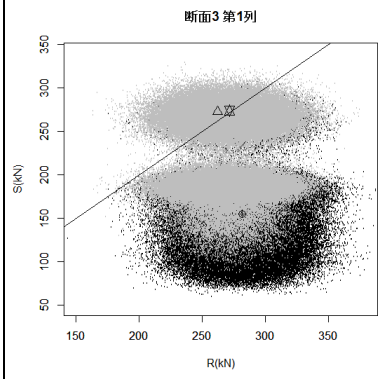
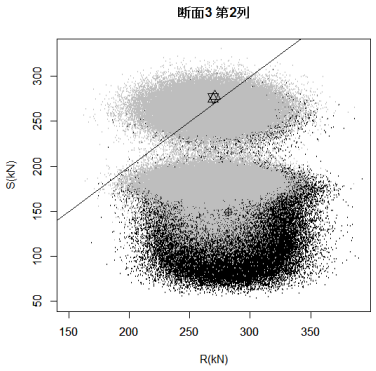
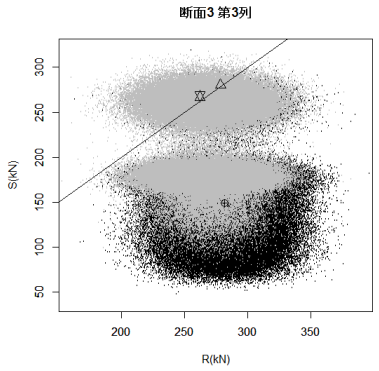
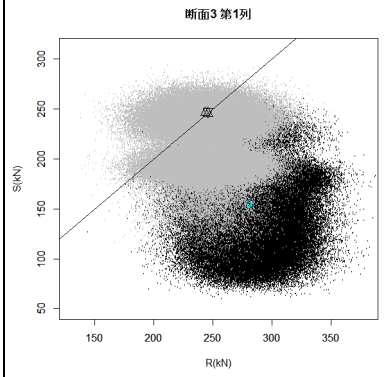
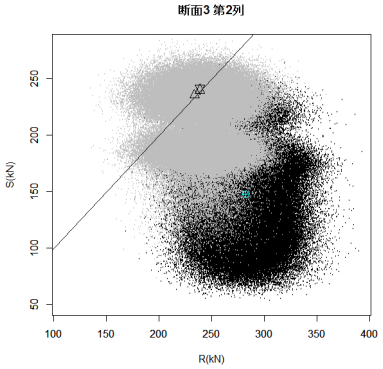
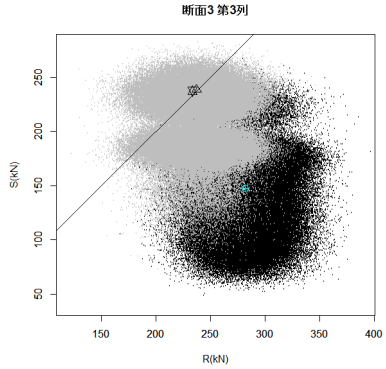
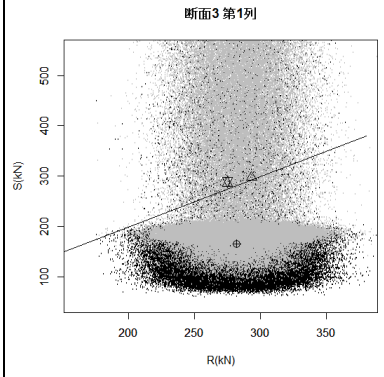
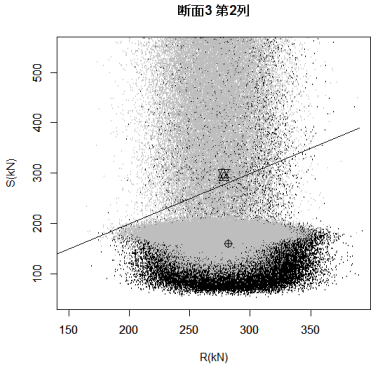
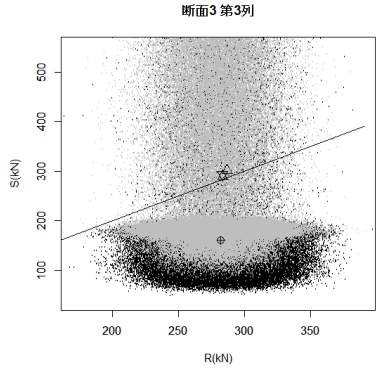
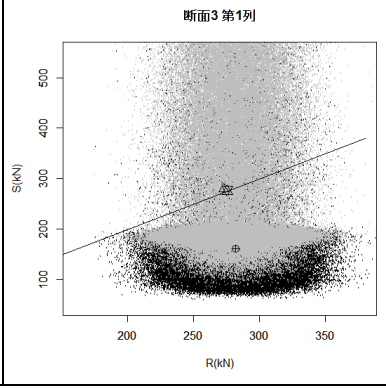
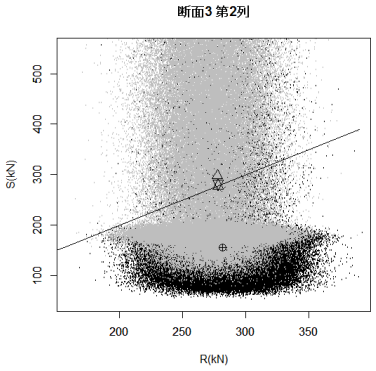
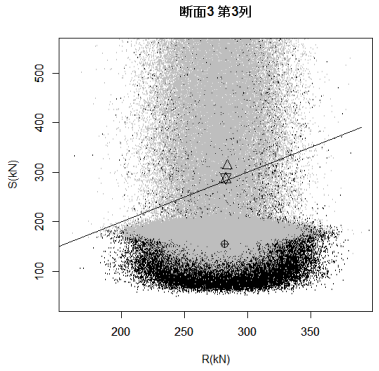
付表 F-8　杭列毎の抵抗-作用分布図(断面①)

杭列		第 1 列	第 2 列	第 3 列
防舷材反力の設定	A			
	B			
	C			
	D			

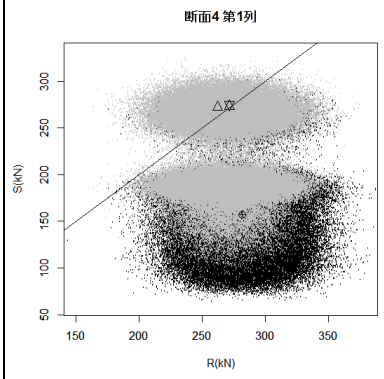
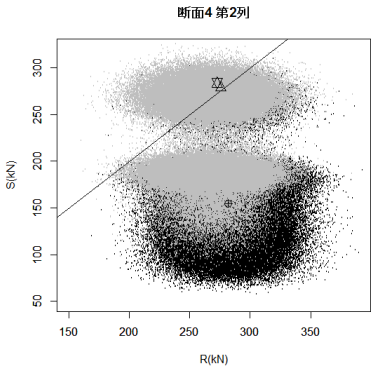
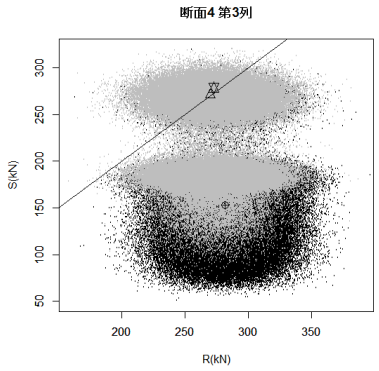
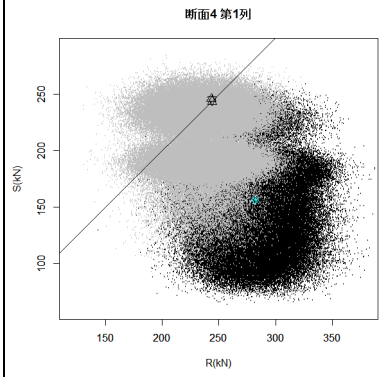
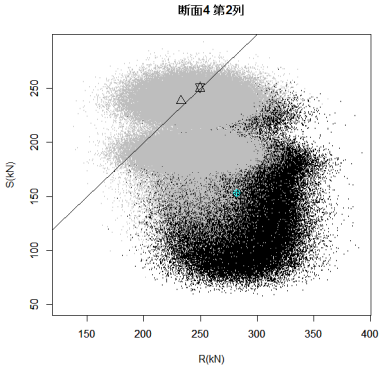
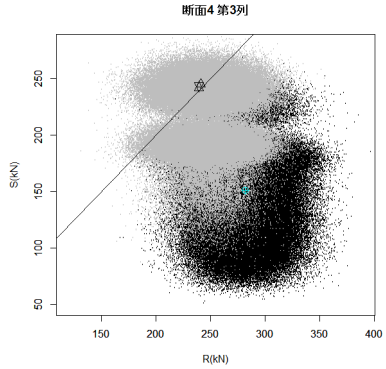
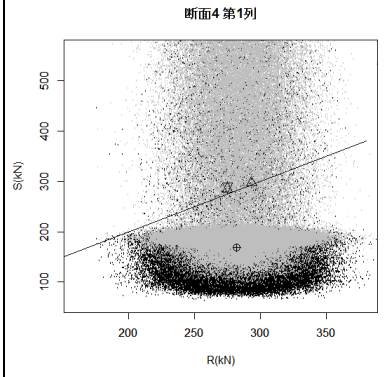
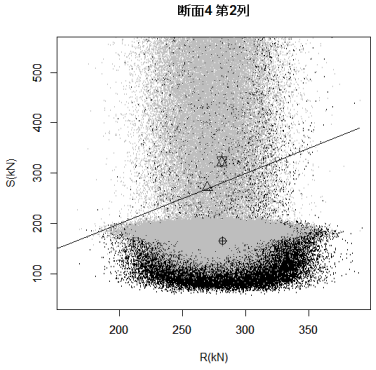
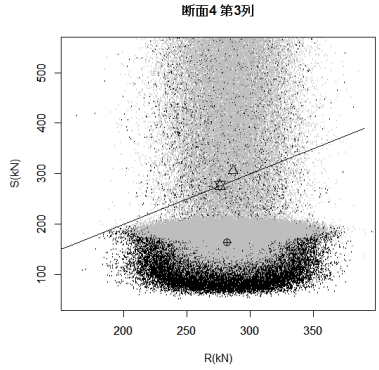
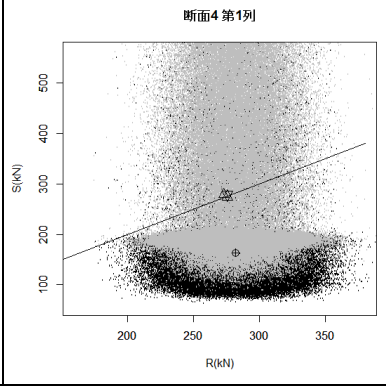
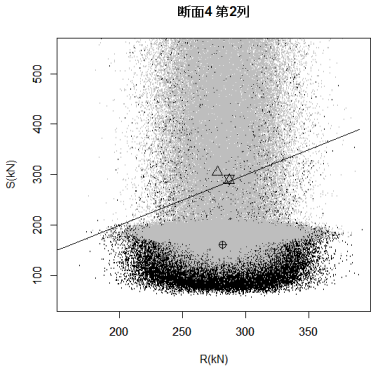
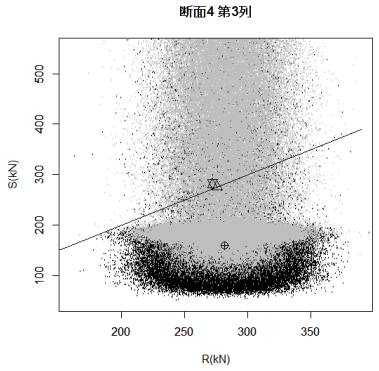
付表 F-9　杭列毎の抵抗-作用分布図(断面②)

杭列		第 1 列	第 2 列	第 3 列
防舷材反力の設定	A			
	B			
	C			
	D			

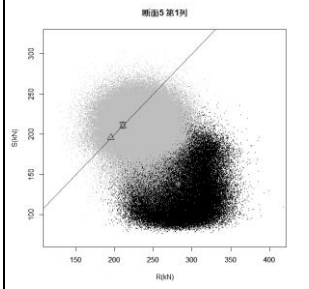
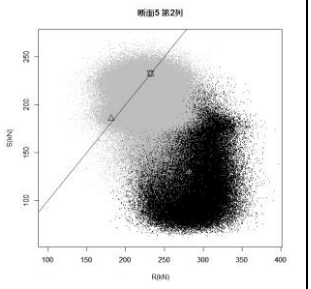
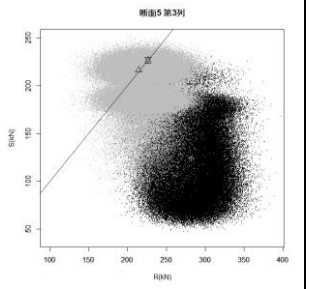
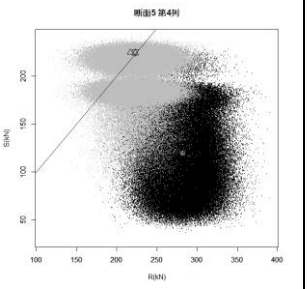
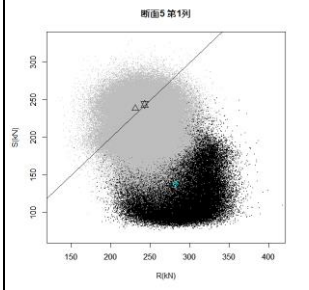
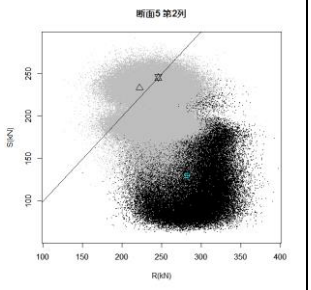
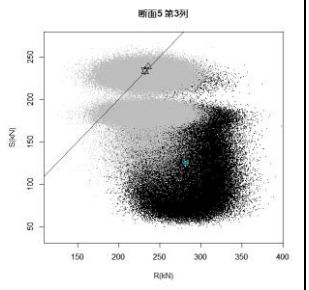
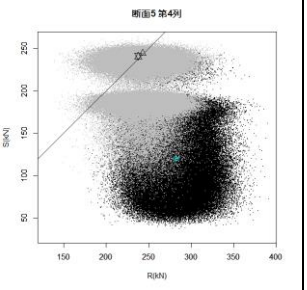
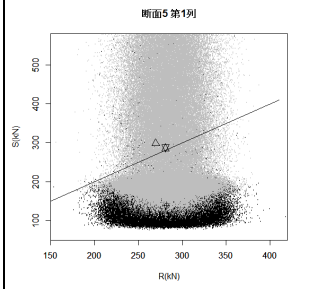
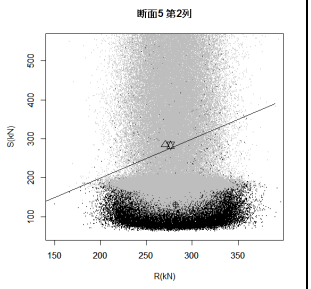
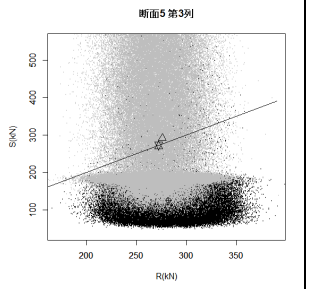
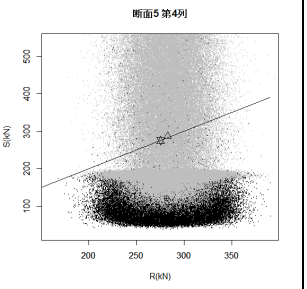
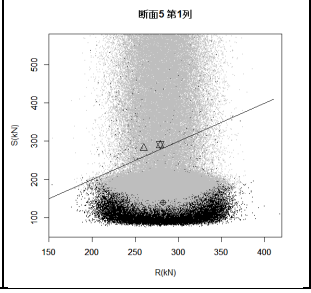
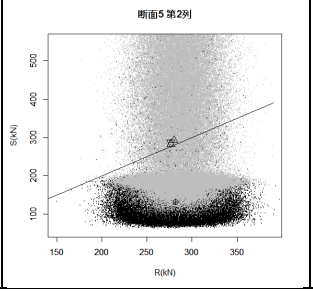
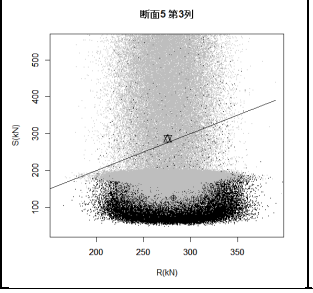
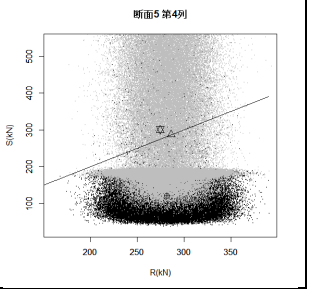
付表 F-10　杭列毎の抵抗-作用分布図(断面③)

杭列		第 1 列	第 2 列	第 3 列
防舷材反力の設定	A			
	B			
	C			
	D			

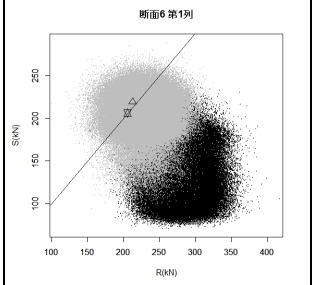
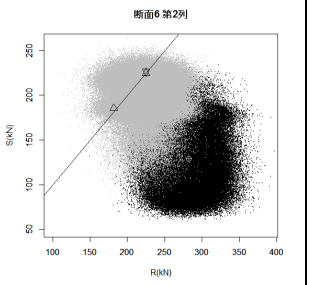
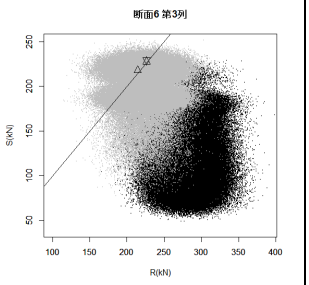
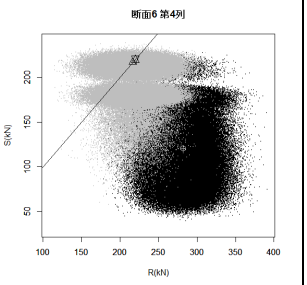
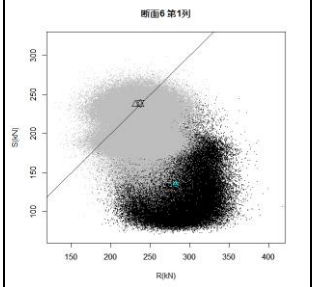
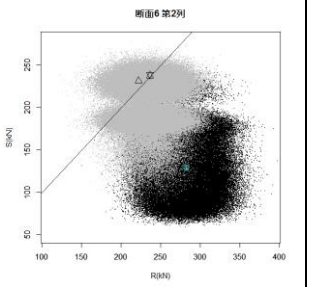
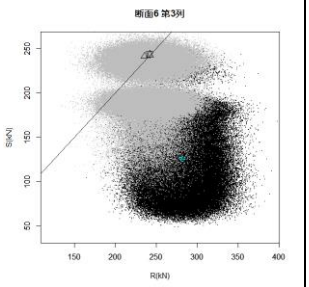
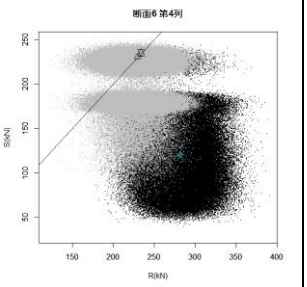
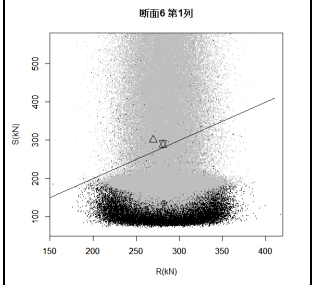
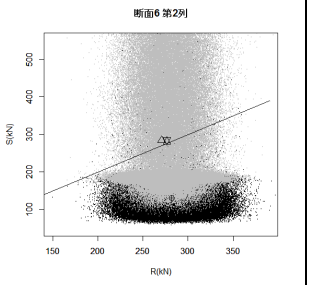
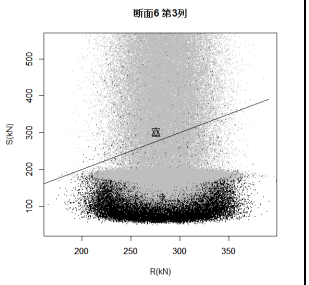
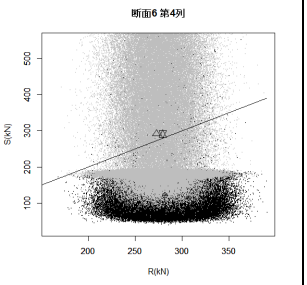
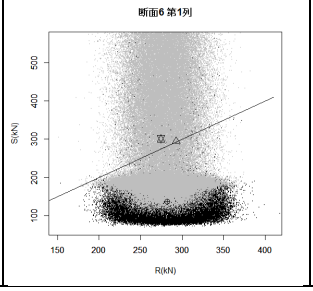
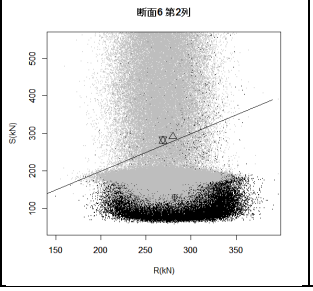
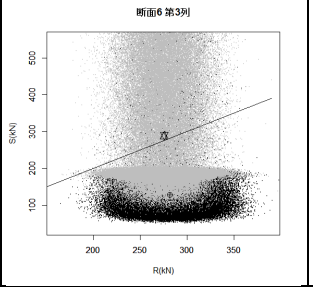
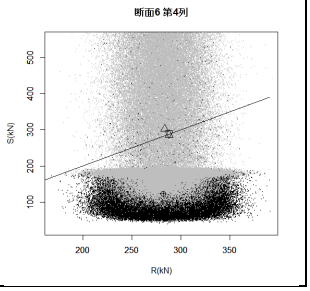
付表 F-11　杭列毎の抵抗-作用分布図(断面④)

杭列		第 1 列	第 2 列	第 3 列
防舷材反力の設定	A			
	B			
	C			
	D			

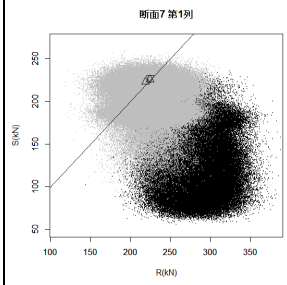
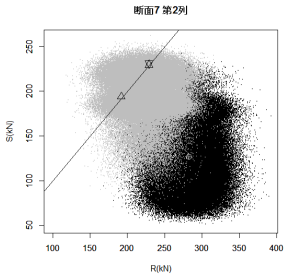
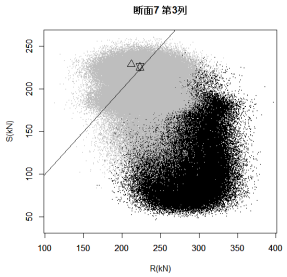
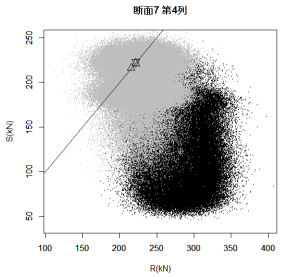
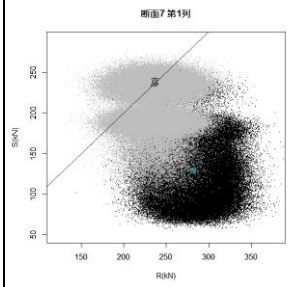
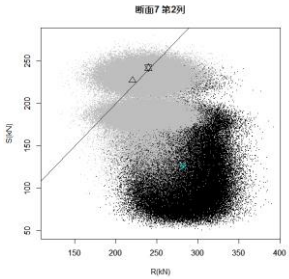
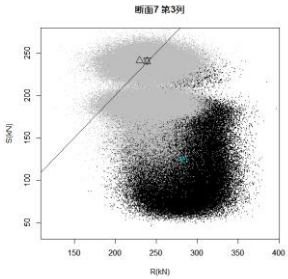
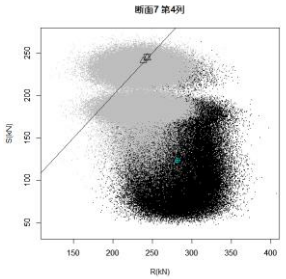
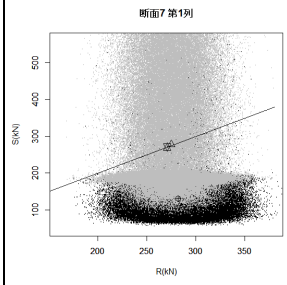
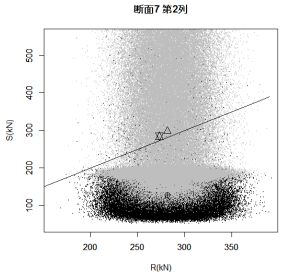
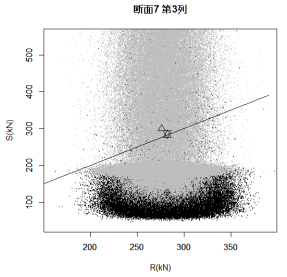
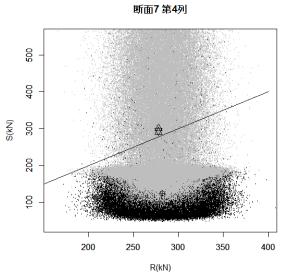
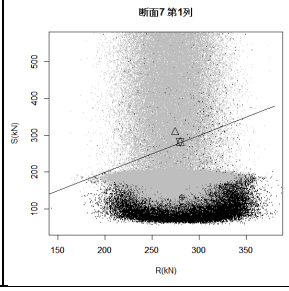
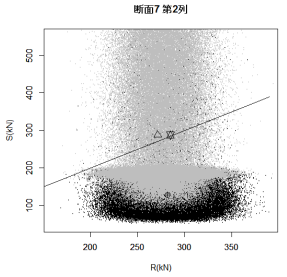
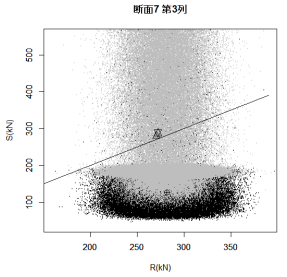
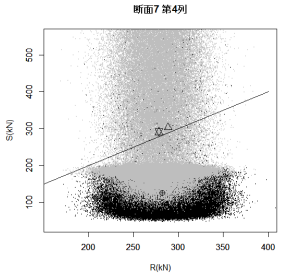
付表 F-12　杭列毎の抵抗-作用分布図(断面⑤)

杭列		第 1 列	第 2 列	第 3 列	第 4 列
防舷材反力の設定	A				
	B				
	C				
	D				

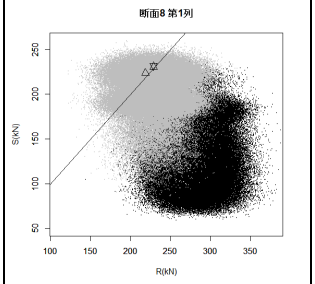
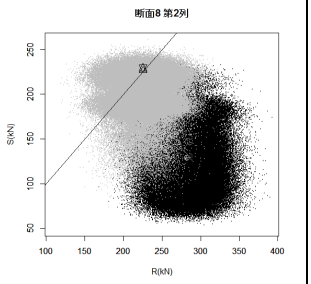
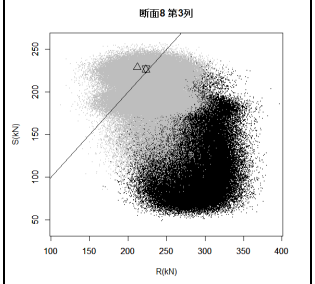
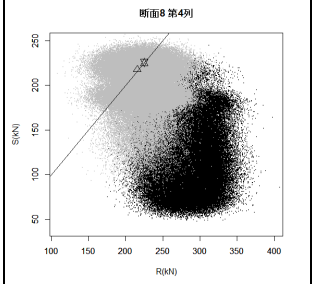
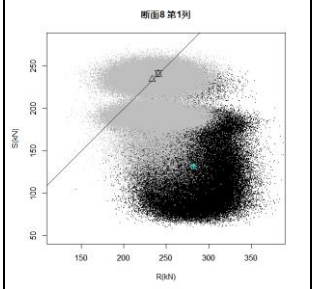
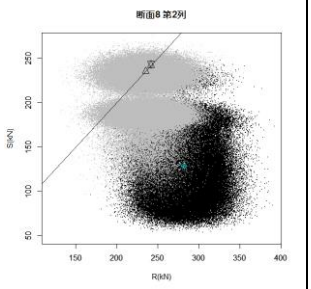
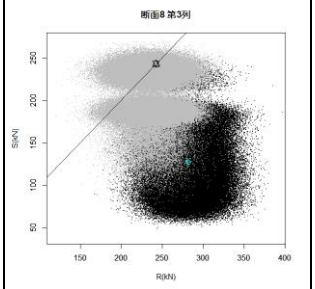
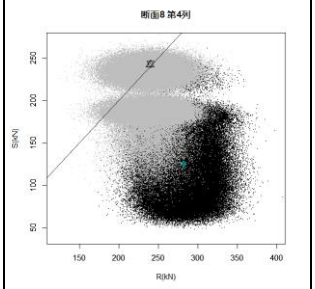
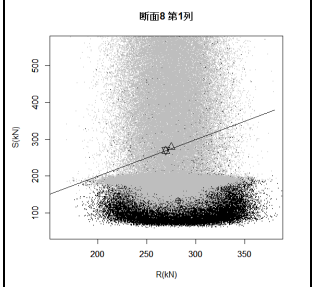
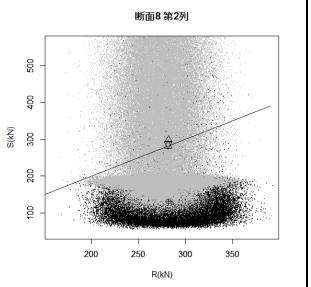
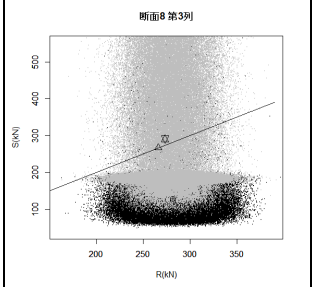
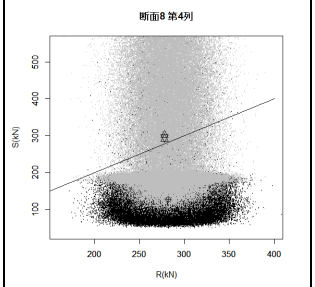
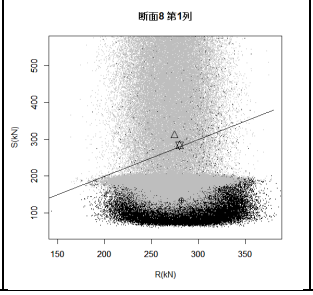
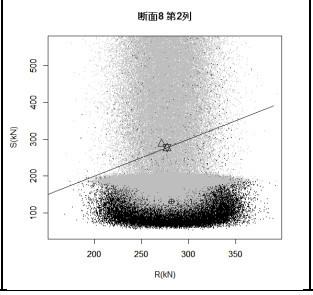
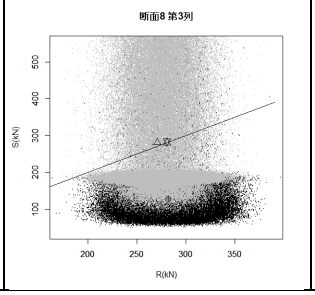
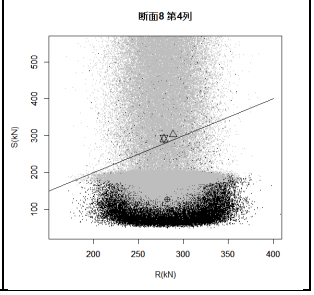
付表 F-13　杭列毎の抵抗-作用分布図(断面⑥)

杭列		第１列	第２列	第３列	第４列
防舷材反力の設定	A				
	B				
	C				
	D				

付表 F-14　杭列毎の抵抗-作用分布図(断面⑦)

杭列		第 1 列	第 2 列	第 3 列	第 4 列
防舷材反力の設定	A				
	B				
	C				
	D				

付表 F-15　杭列毎の抵抗-作用分布図(断面⑧)

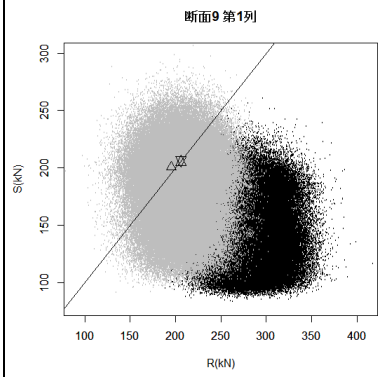
杭列		第１列	第２列	第３列	第４列
防舷材反力の設定	A				
	B				
	C				
	D				

付表 F-16　杭列毎の抵抗-作用分布図(断面⑨ 設定 A および設定 B)

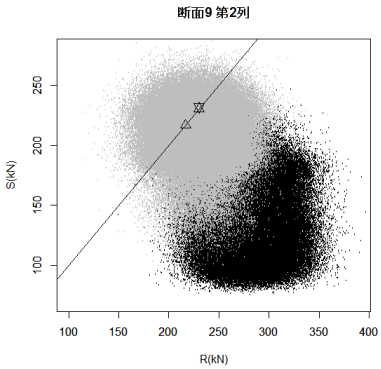
防舷材反力の設定

A

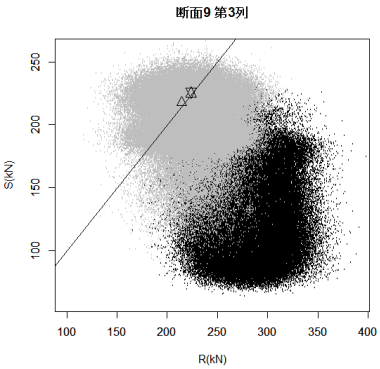
第 1 列



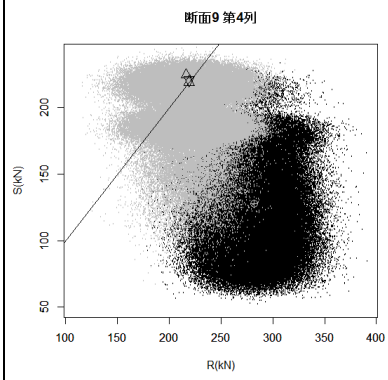
第 2 列



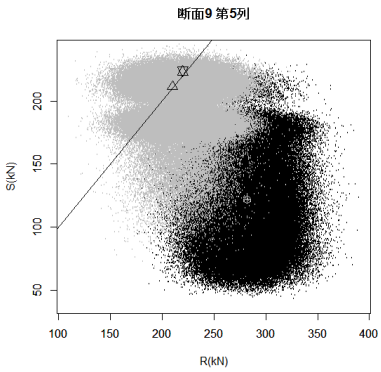
第 3 列



第 4 列

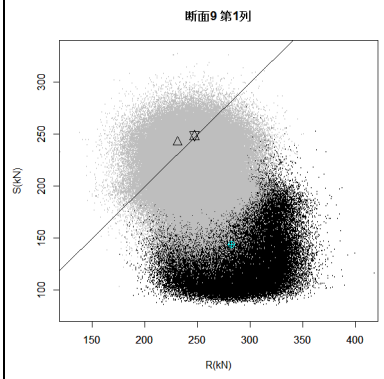


第 5 列

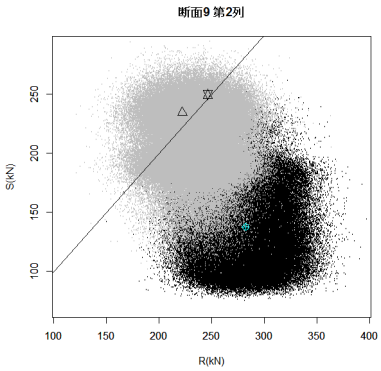


B

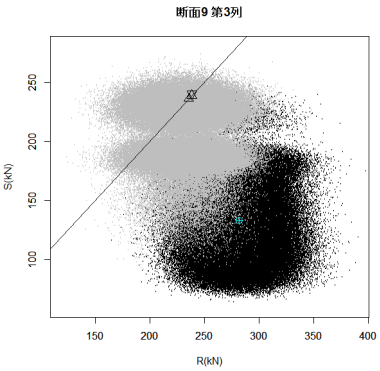
第 1 列



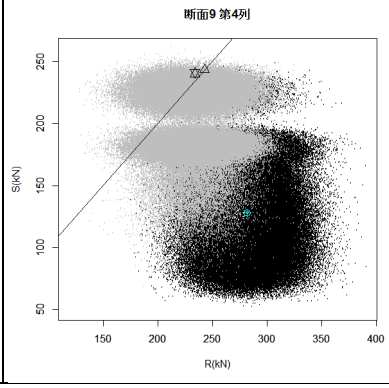
第 2 列



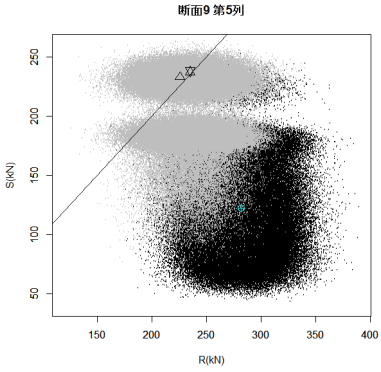
第 3 列



第 4 列



第 5 列

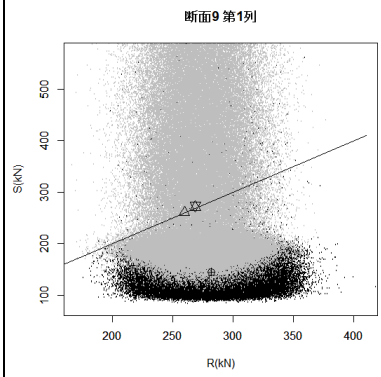


付表 F-17　杭列毎の抵抗-作用分布図(断面⑨ 設定 C および設定 D)

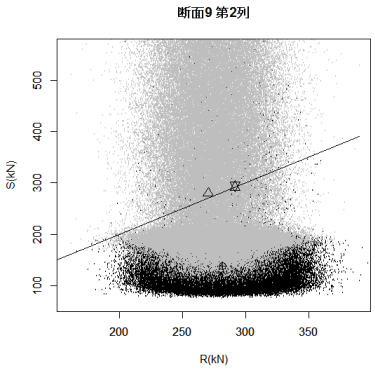
防舷材反力の設定

C

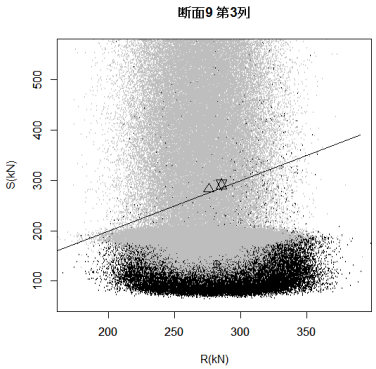
第 1 列



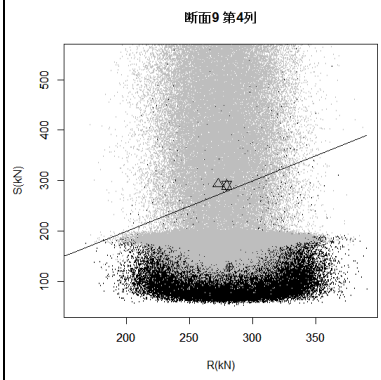
第 2 列



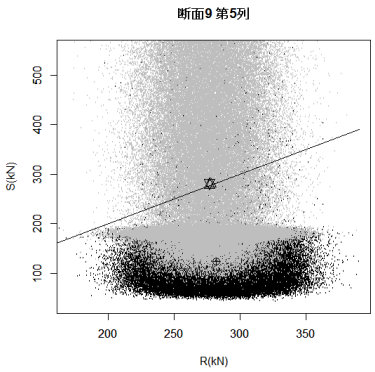
第 3 列



第 4 列

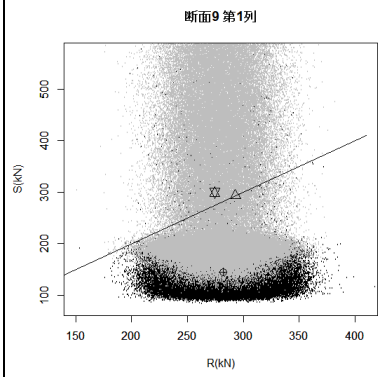


第 5 列

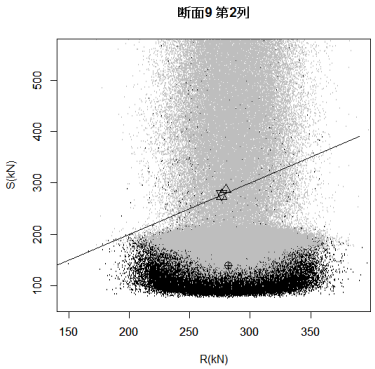


D

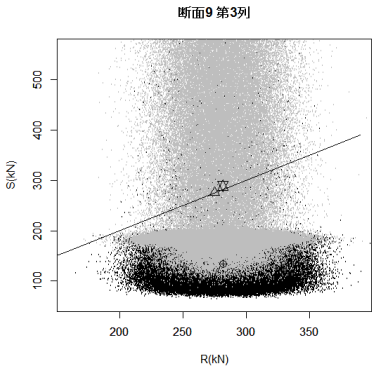
第 1 列



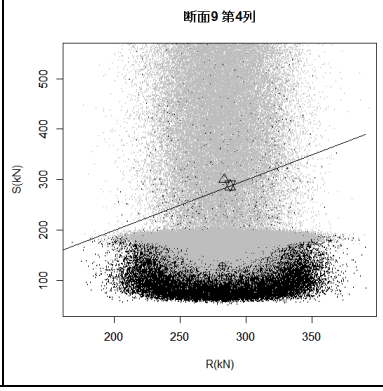
第 2 列



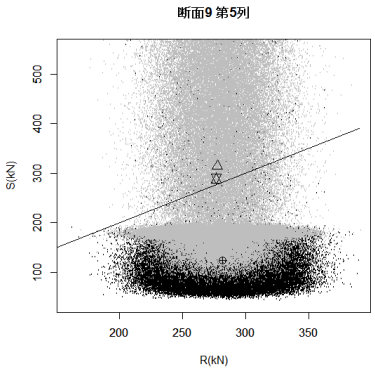
第 3 列



第 4 列



第 5 列

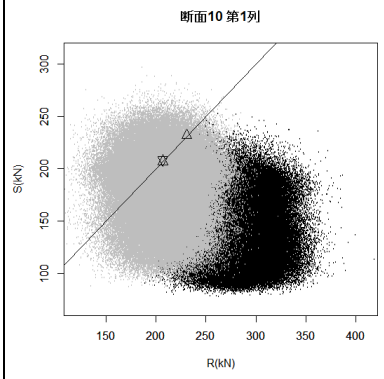


付表 F-18　杭列毎の抵抗-作用分布図(断面⑩ 設定 A および設定 B)

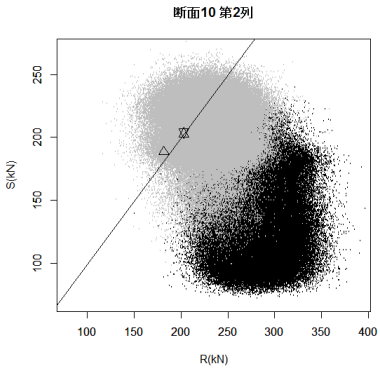
防舷材反力の設定

A

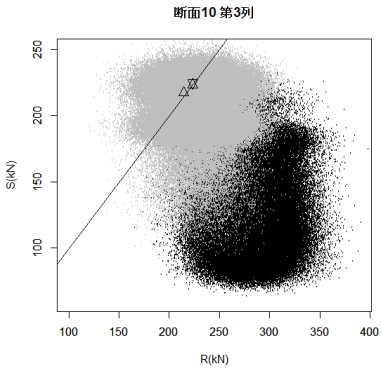
第 1 列



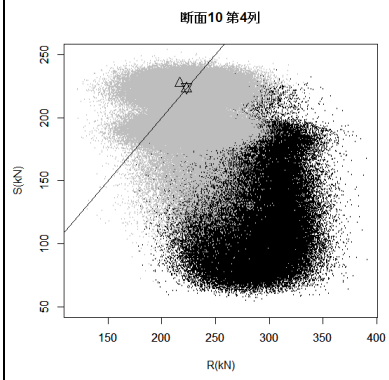
第 2 列



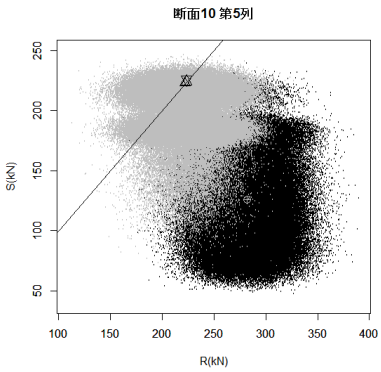
第 3 列



第 4 列

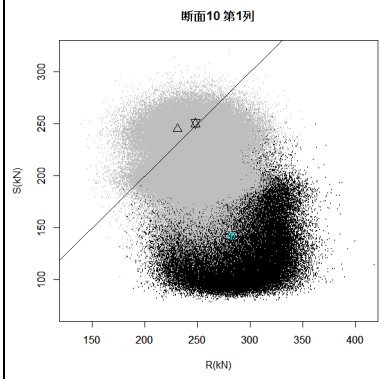


第 5 列

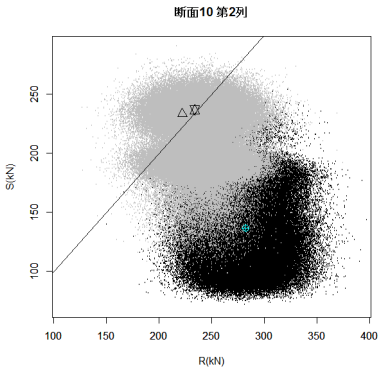


B

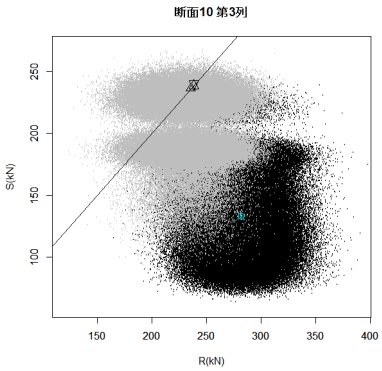
第 1 列



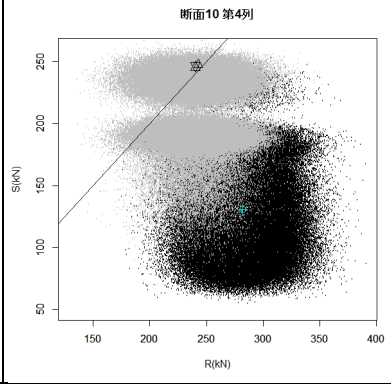
第 2 列



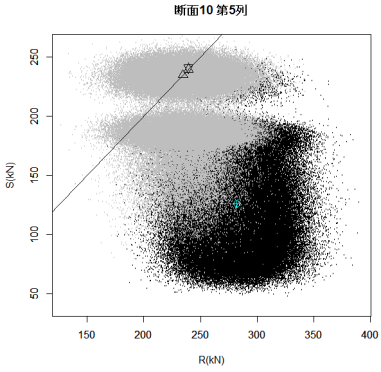
第 3 列



第 4 列



第 5 列

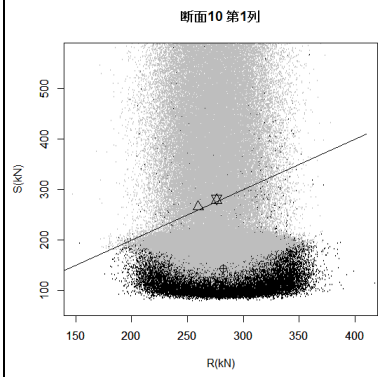


付表 F-19　杭列毎の抵抗-作用分布図(断面⑩ 設定 C および設定 D)

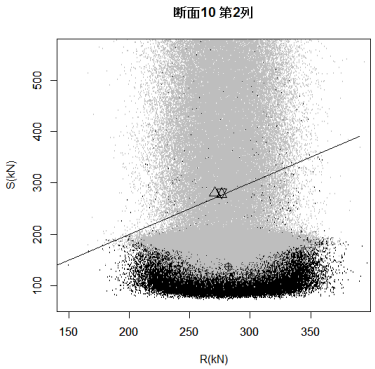
防舷材反力の設定

C

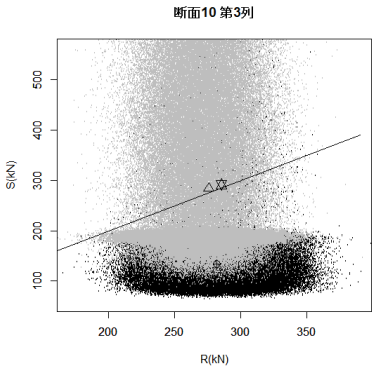
第 1 列



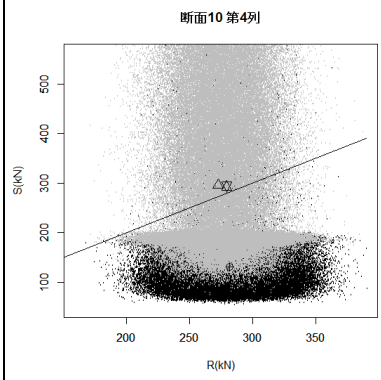
第 2 列



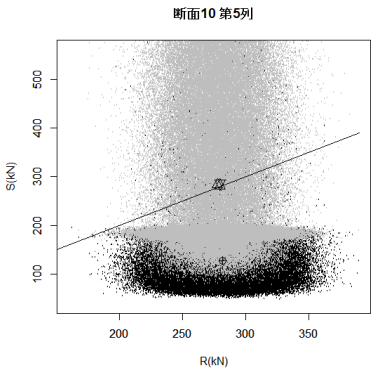
第 3 列



第 4 列

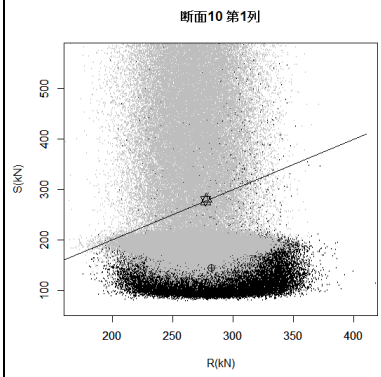


第 5 列

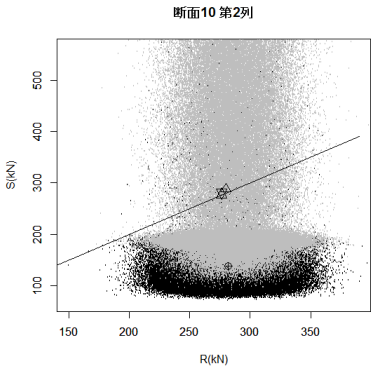


D

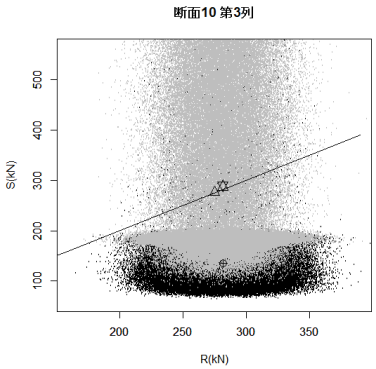
第 1 列



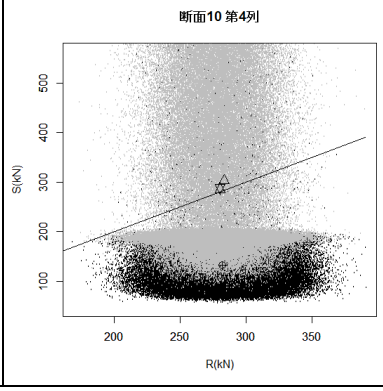
第 2 列



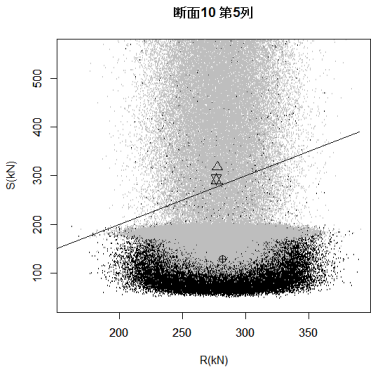
第 3 列



第 4 列



第 5 列

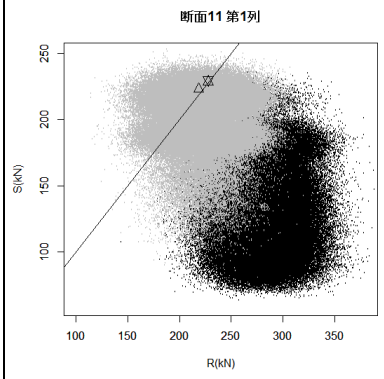


付表 F-20　杭列毎の抵抗-作用分布図(断面⑪ 設定 A および設定 B)

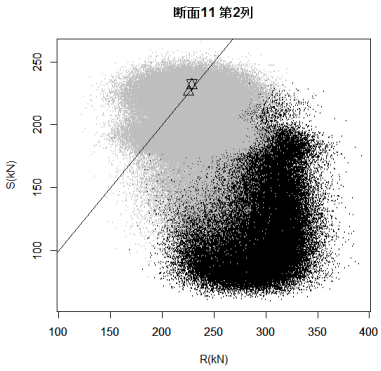
防舷材反力の設定

A

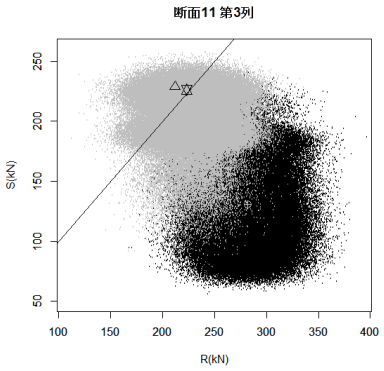
第 1 列



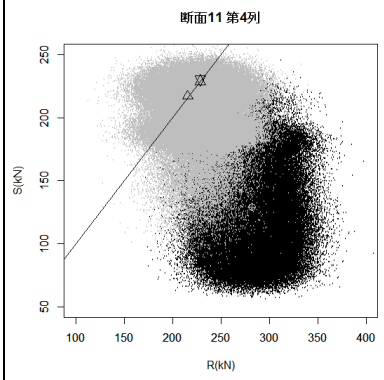
第 2 列



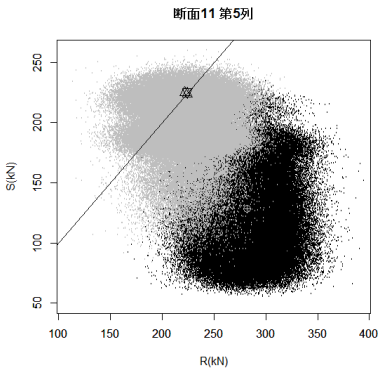
第 3 列



第 4 列

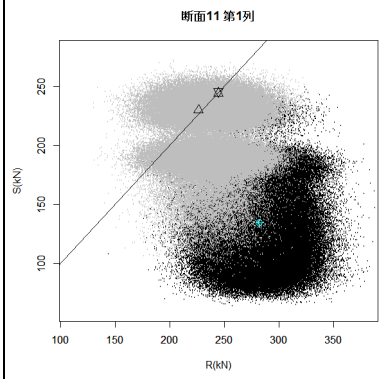


第 5 列

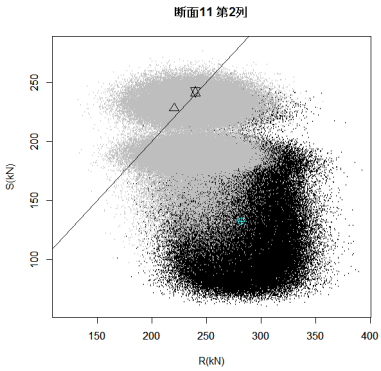


B

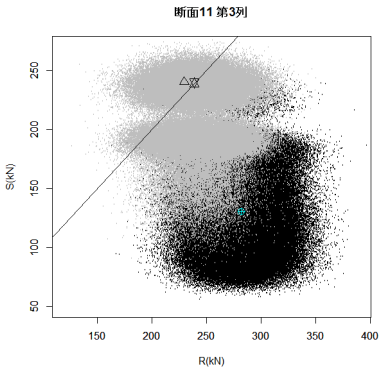
第 1 列



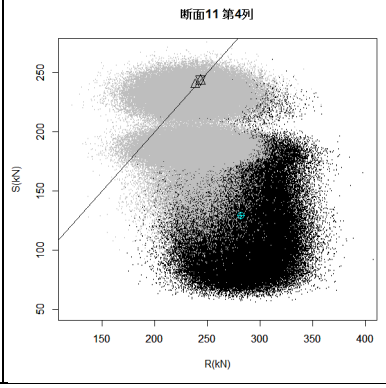
第 2 列



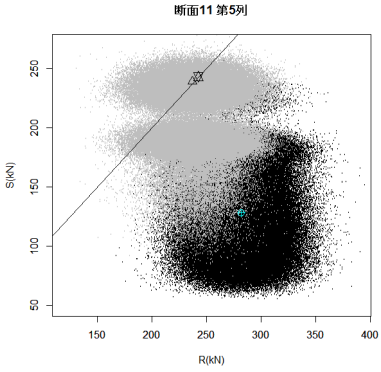
第 3 列



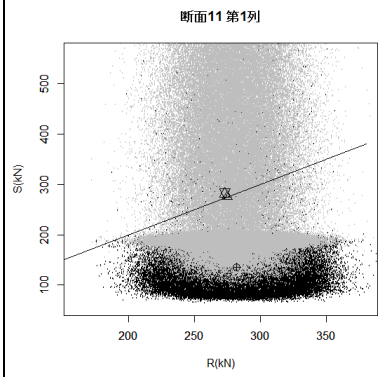
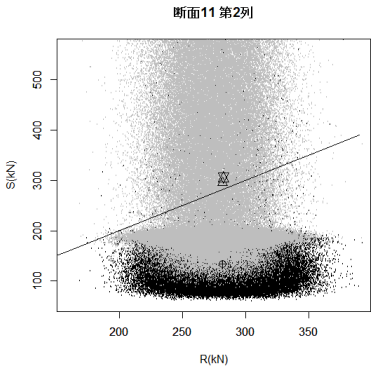
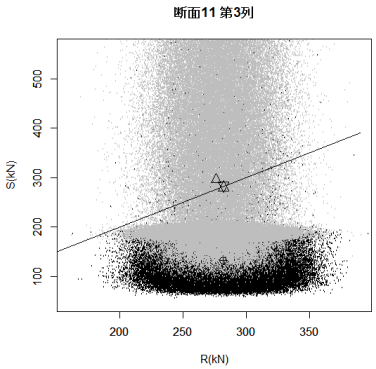
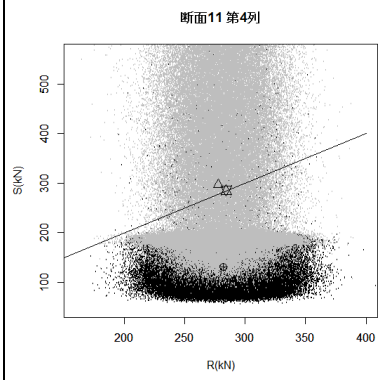
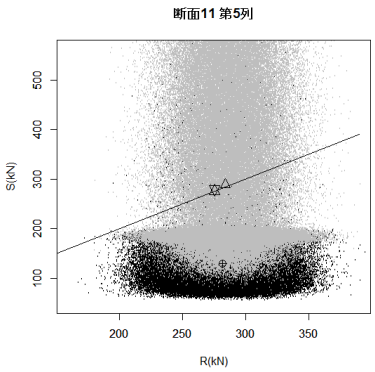
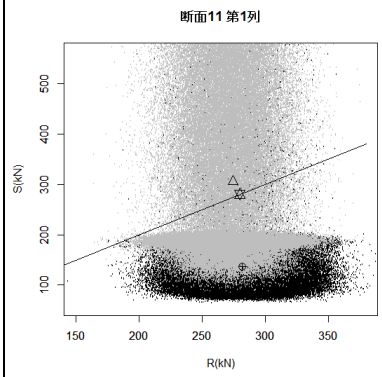
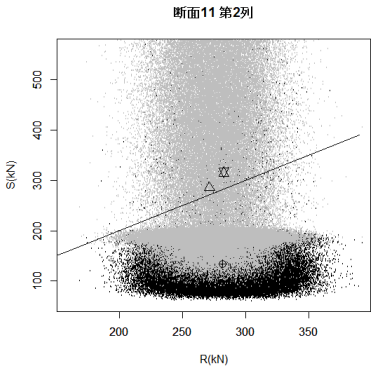
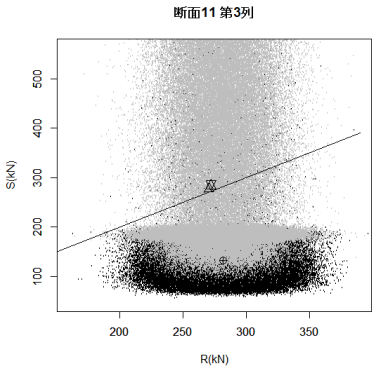
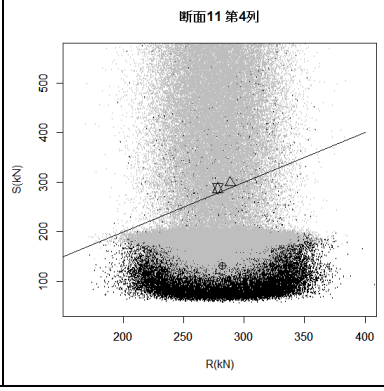
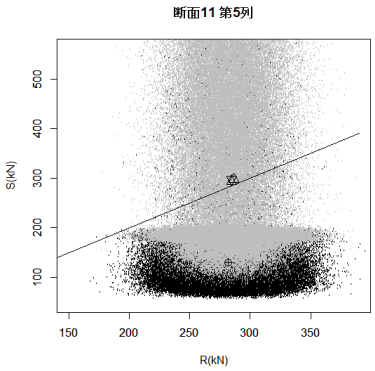
第 4 列



第 5 列



付表 F-21　杭列毎の抵抗-作用分布図(断面⑪ 設定 C および設定 D)

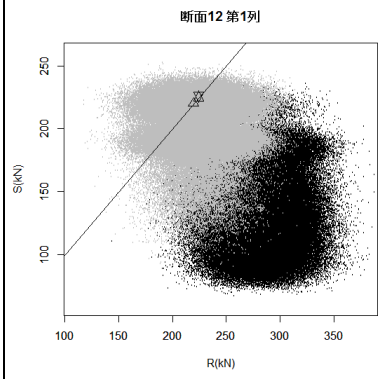
防舷材反力の設定	C	第 1 列	第 2 列	第 3 列
				
		第 4 列	第 5 列	
				
	D	第 1 列	第 2 列	第 3 列
				
		第 4 列	第 5 列	
				

付表 F-22　杭列毎の抵抗-作用分布図(断面⑫ 設定 A および設定 B)

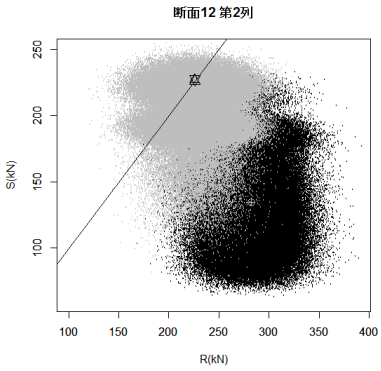
防舷材反力の設定

A

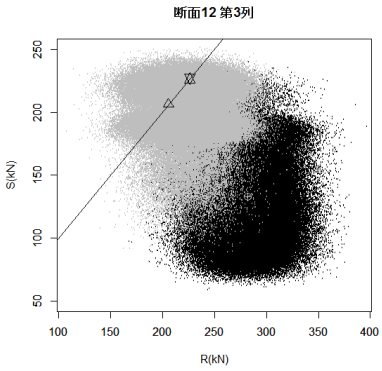
第 1 列



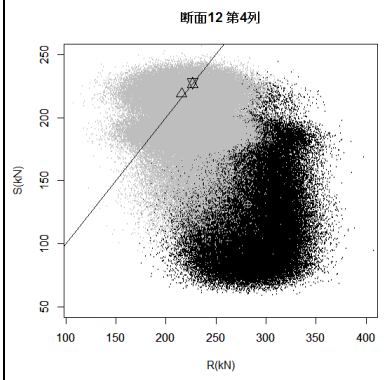
第 2 列



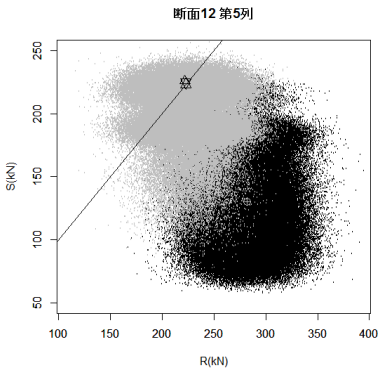
第 3 列



第 4 列

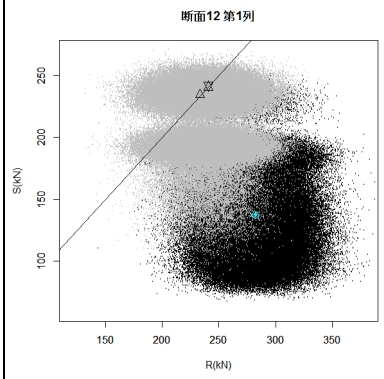


第 5 列

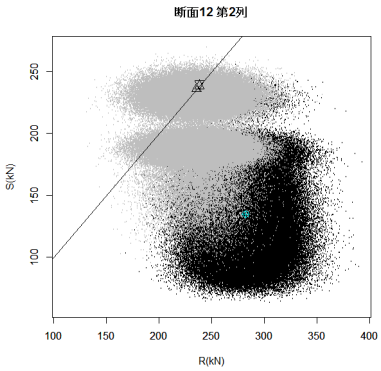


B

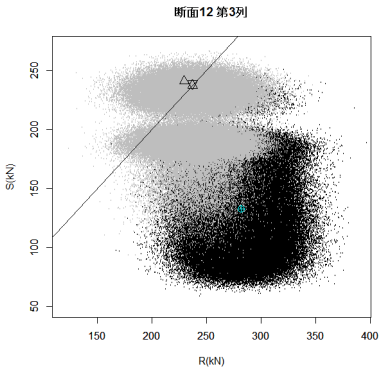
第 1 列



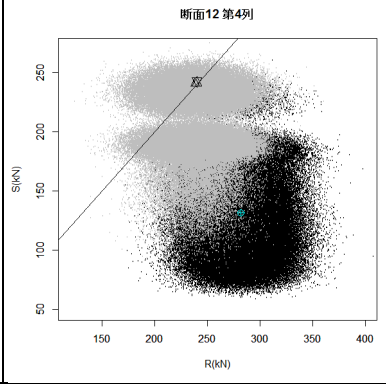
第 2 列



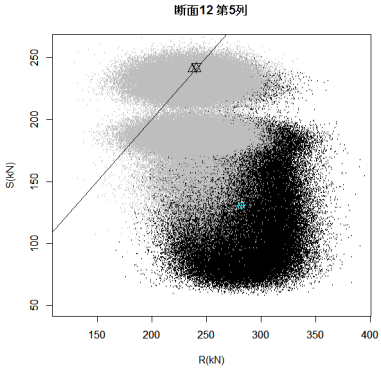
第 3 列



第 4 列



第 5 列

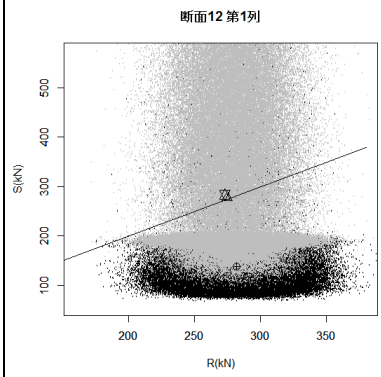


付表 F-23　杭列毎の抵抗-作用分布図(断面⑫ 設定 C および設定 D)

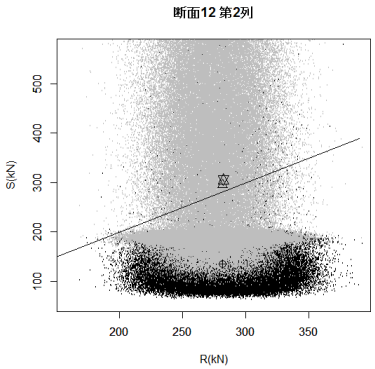
防舷材反力の設定

C

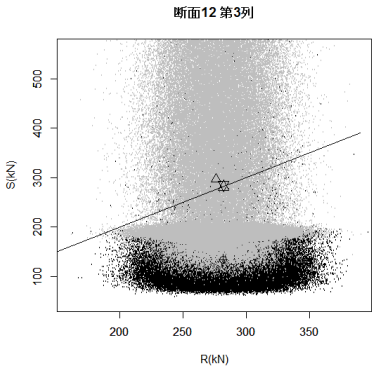
第 1 列



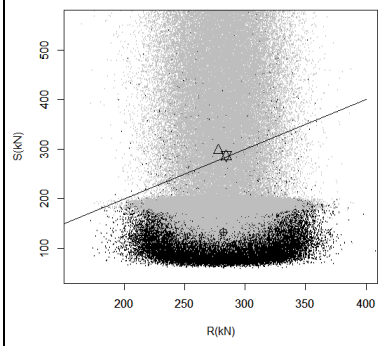
第 2 列



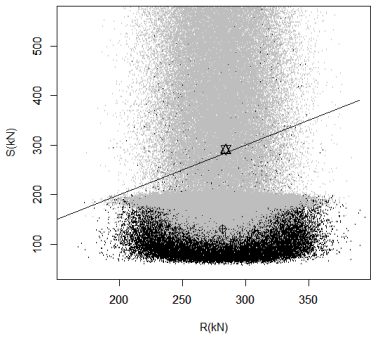
第 3 列



第 4 列

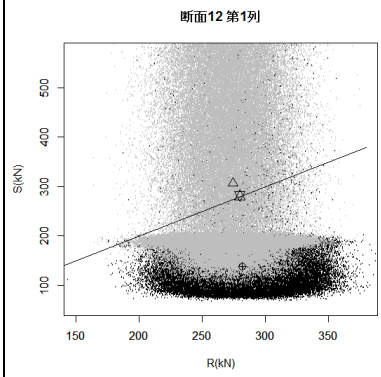


第 5 列

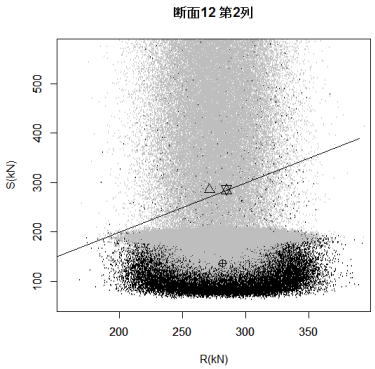


D

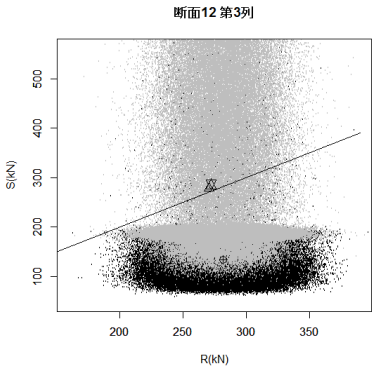
第 1 列



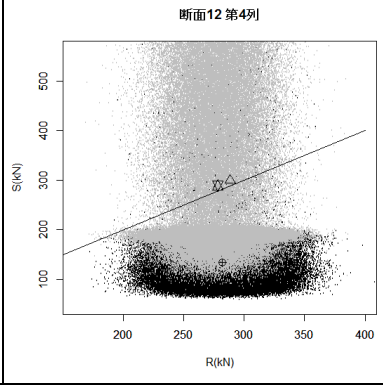
第 2 列



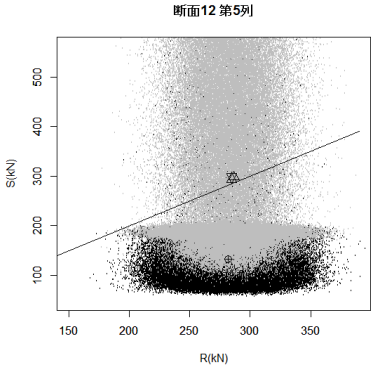
第 3 列



第 4 列



第 5 列



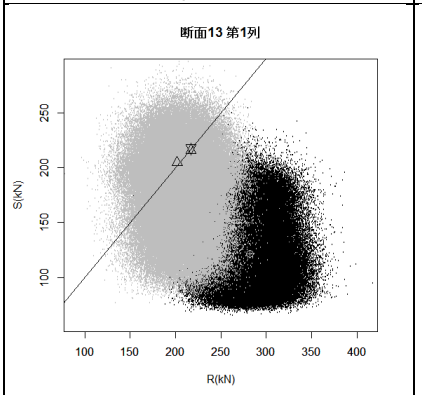
第 6 列

付表 F-24　杭列毎の抵抗-作用分布図(断面⑬ 設定 A および設定 B)

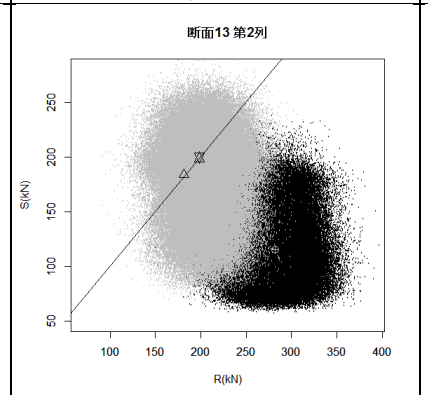
防舷材反力の設定

A

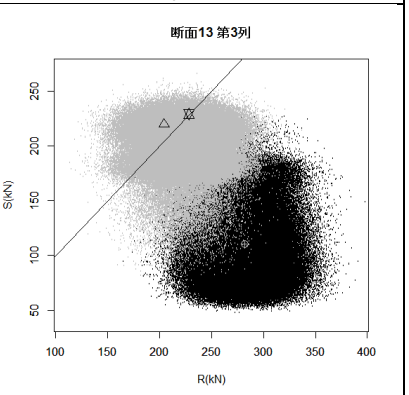
第 1 列



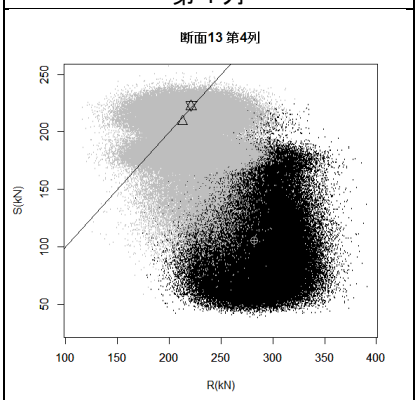
第 2 列



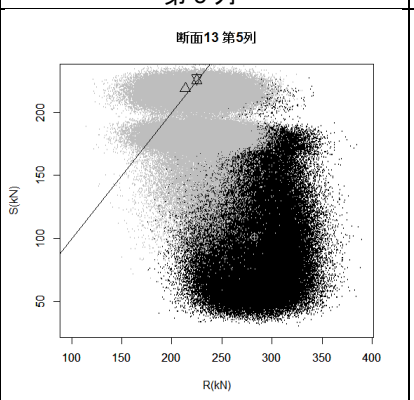
第 3 列



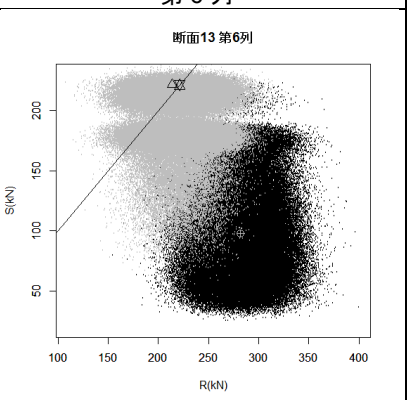
第 4 列



第 5 列

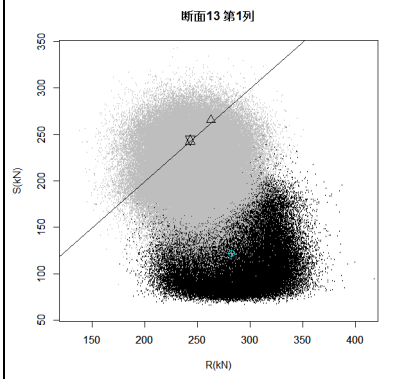


第 6 列

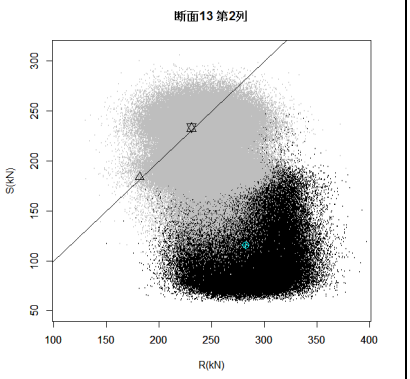


B

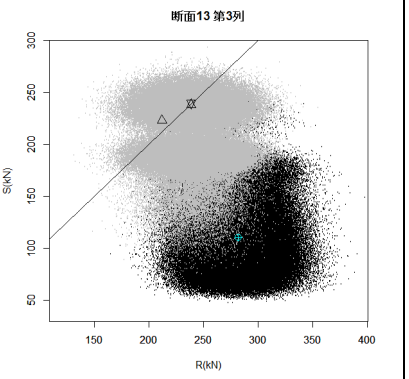
第 1 列



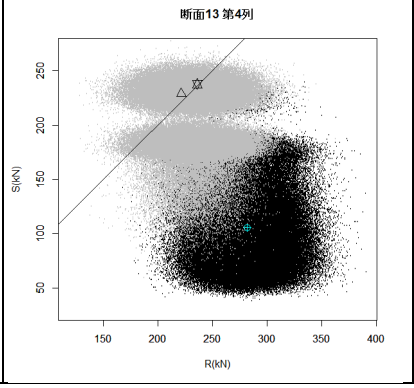
第 2 列



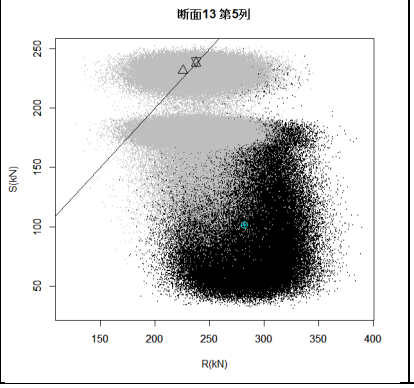
第 3 列



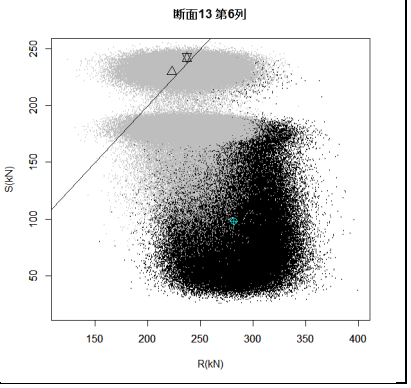
第 4 列



第 5 列



第 6 列

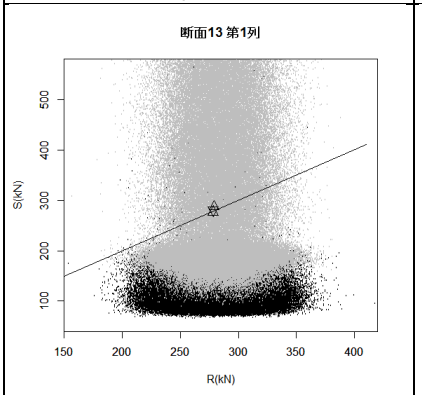


付表 F-25　杭列毎の抵抗-作用分布図(断面⑬ 設定 C および設定 D)

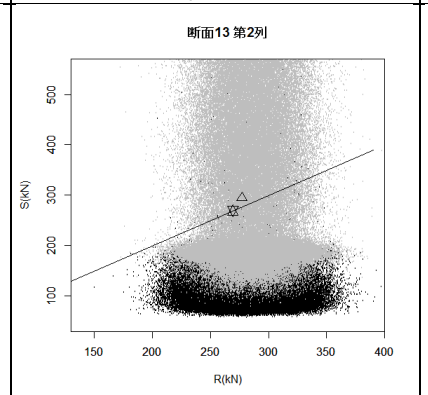
防舷材反力の設定

C

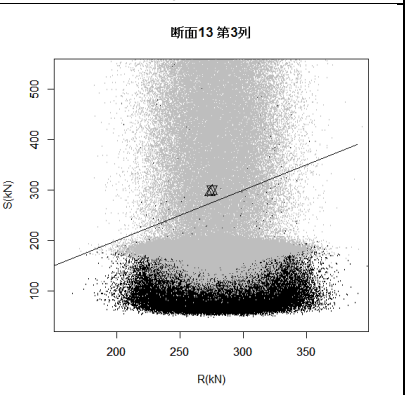
第 1 列



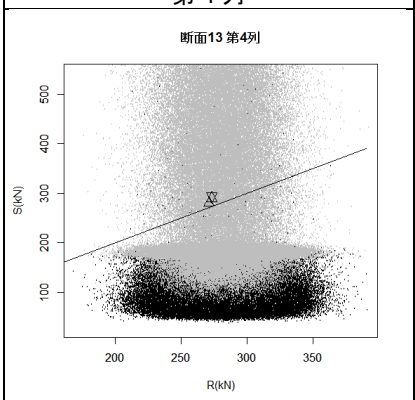
第 2 列



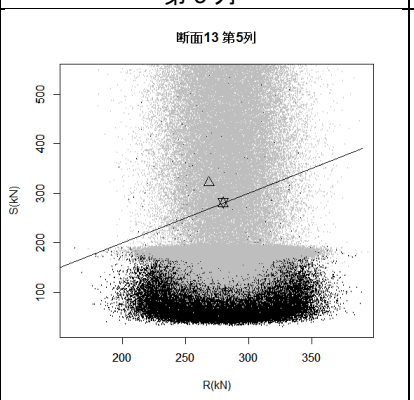
第 3 列



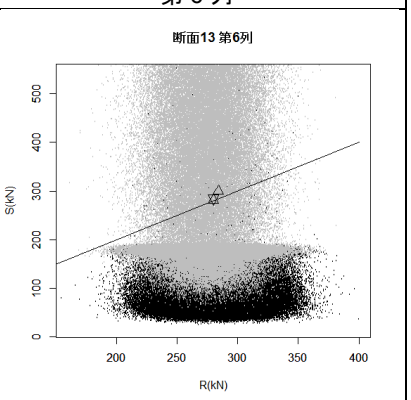
第 4 列



第 5 列

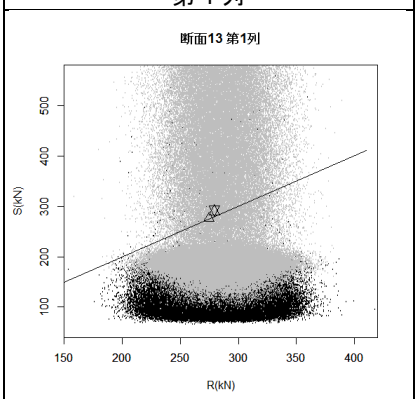


第 6 列

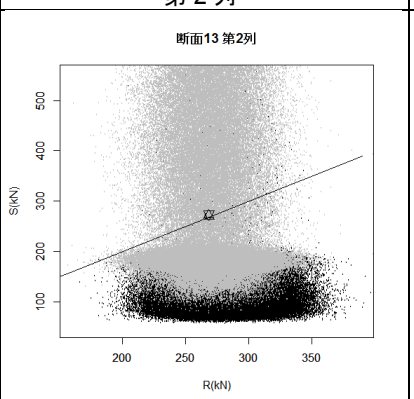


D

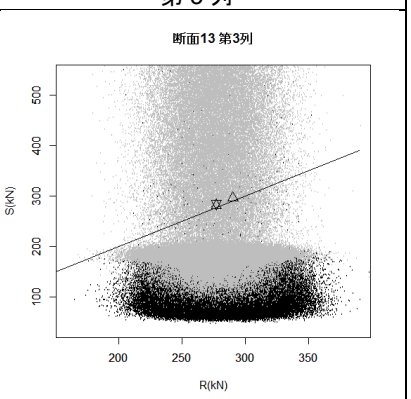
第 1 列



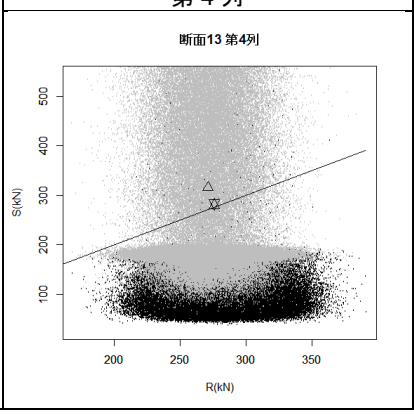
第 2 列



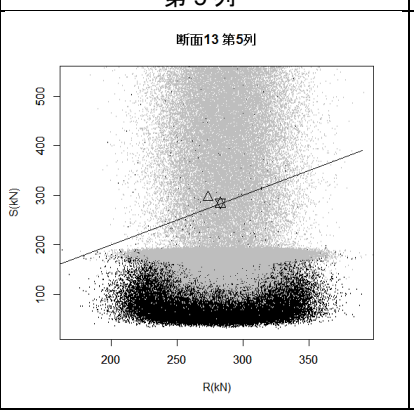
第 3 列



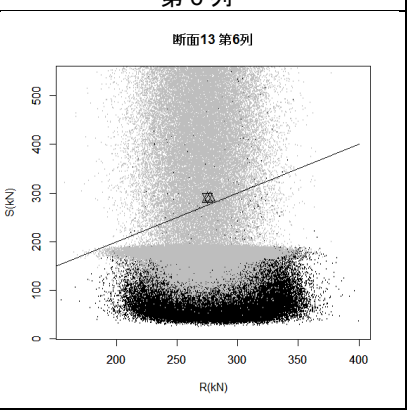
第 4 列



第 5 列



第 6 列

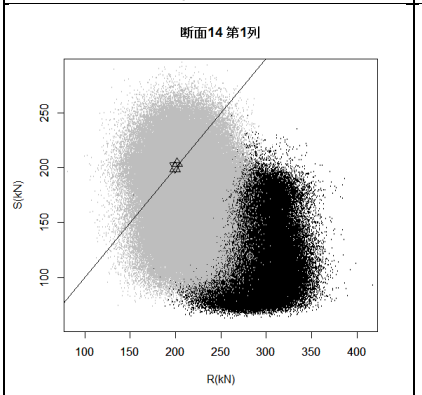


付表 F-26　杭列毎の抵抗-作用分布図(断面⑭ 設定 A および設定 B)

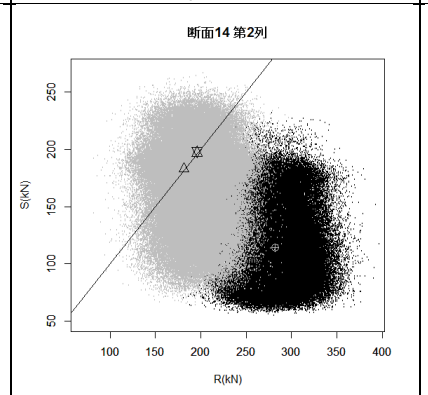
防舷材反力の設定

A

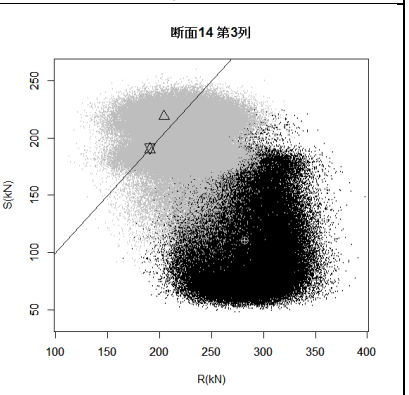
第 1 列



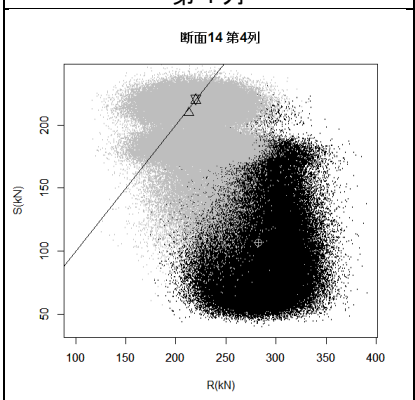
第 2 列



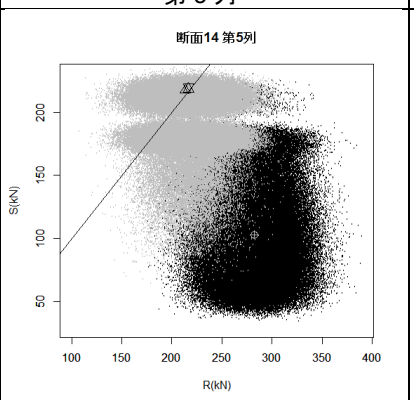
第 3 列



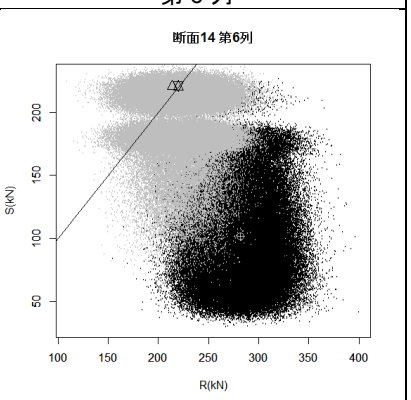
第 4 列



第 5 列

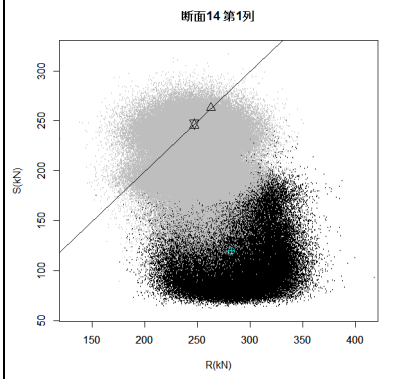


第 6 列

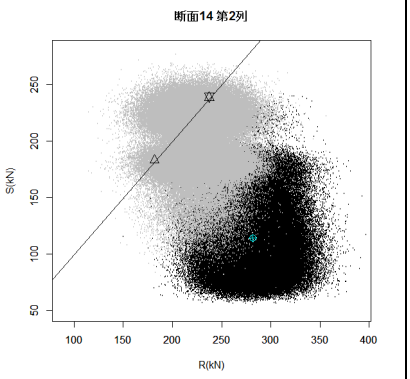


B

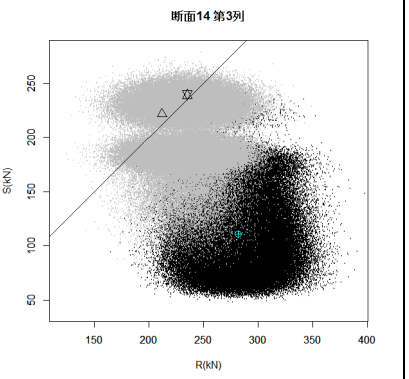
第 1 列



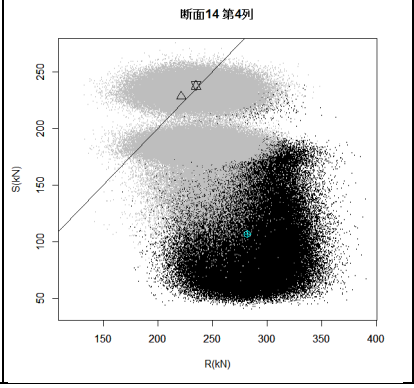
第 2 列



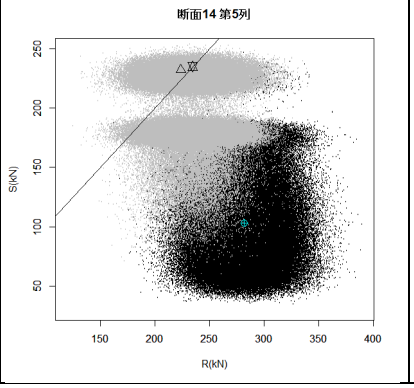
第 3 列



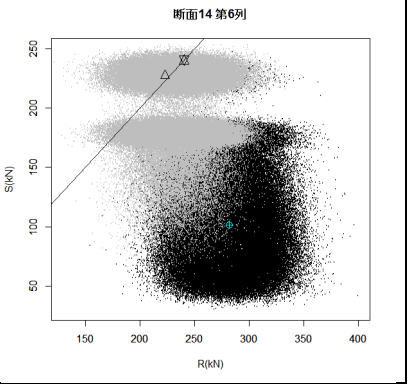
第 4 列



第 5 列



第 6 列

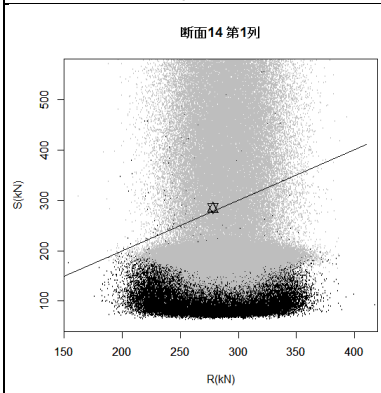


付表 F-27　杭列毎の抵抗-作用分布図(断面⑭ 設定 C および設定 D)

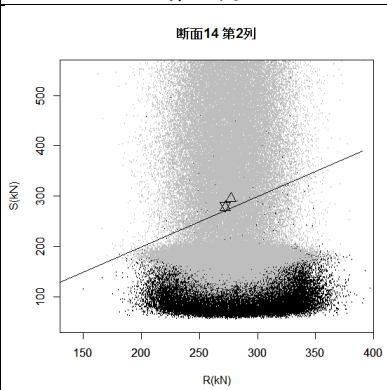
防舷材反力の設定

C

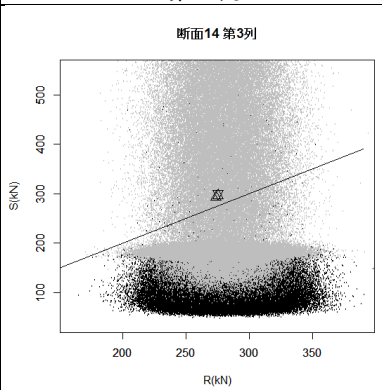
第 1 列



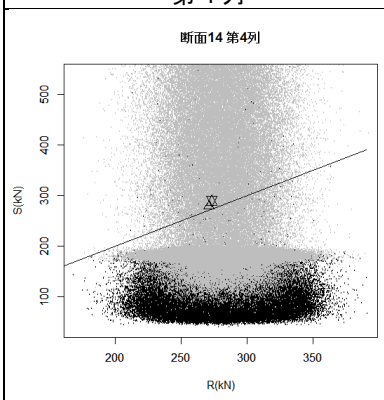
第 2 列



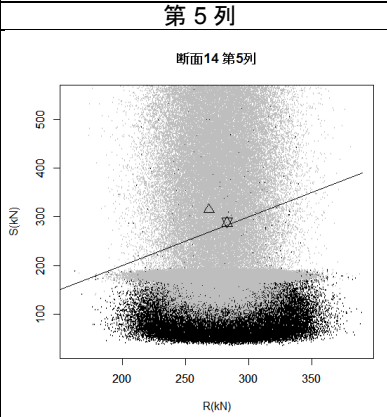
第 3 列



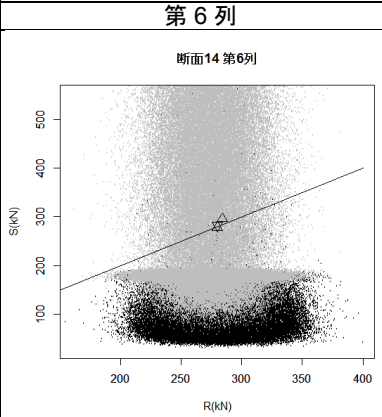
第 4 列



第 5 列

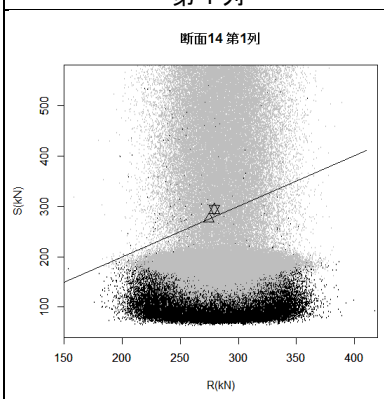


第 6 列

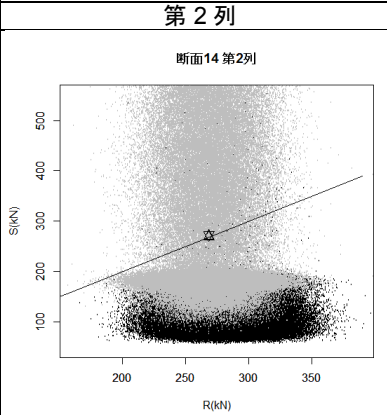


D

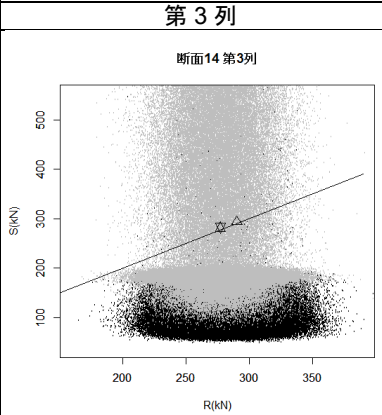
第 1 列



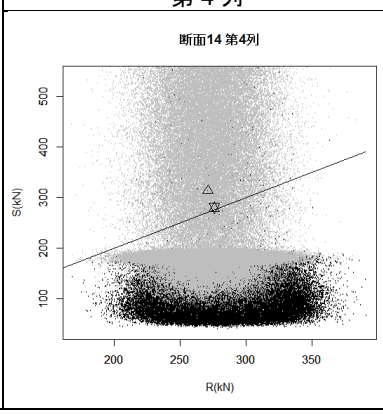
第 2 列



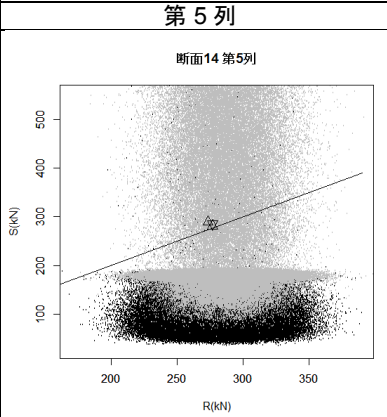
第 3 列



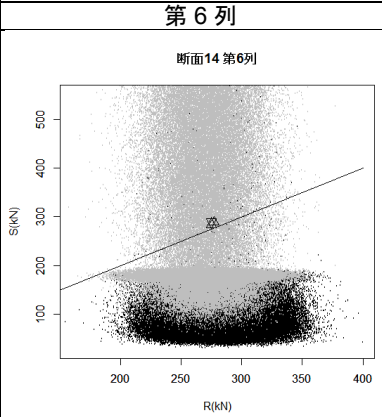
第 4 列



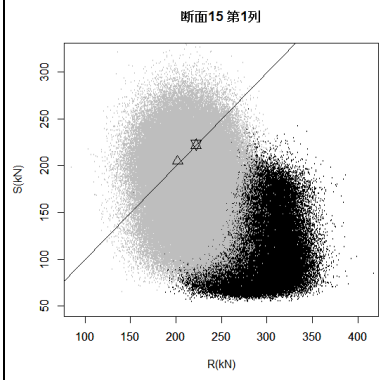
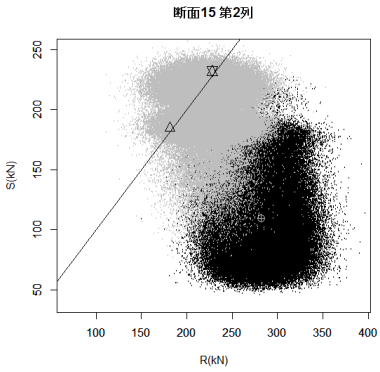
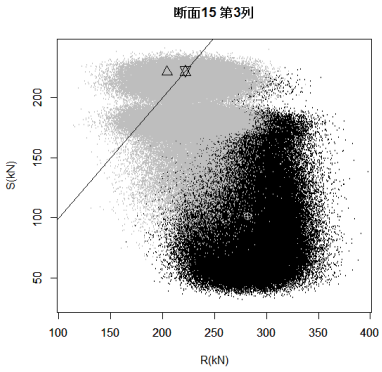
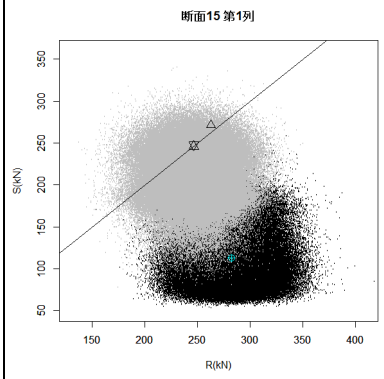
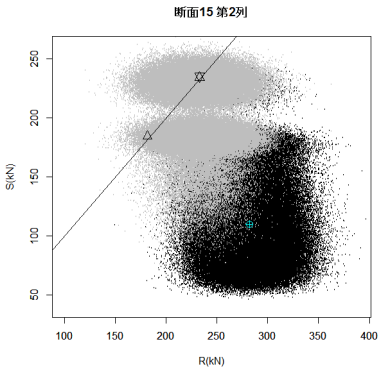
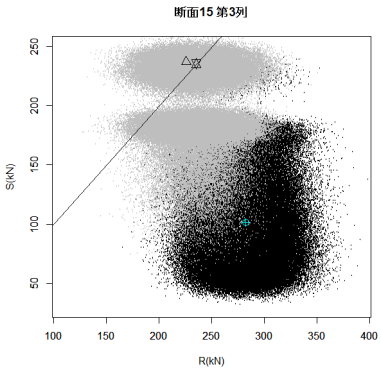
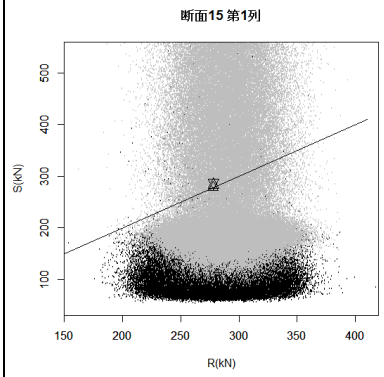
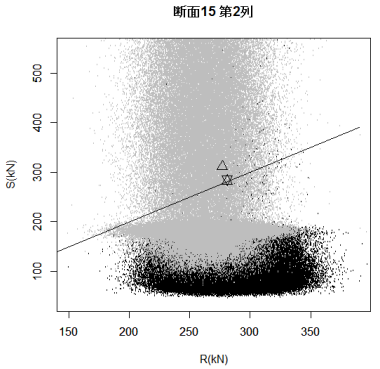
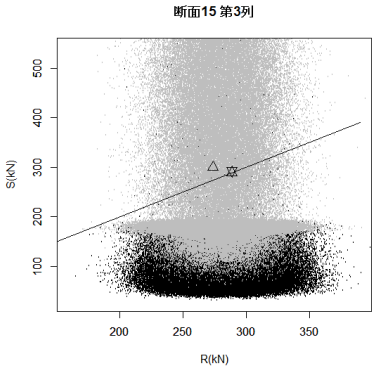
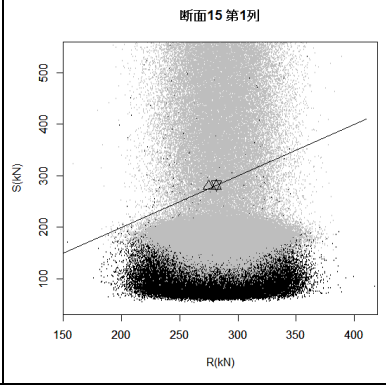
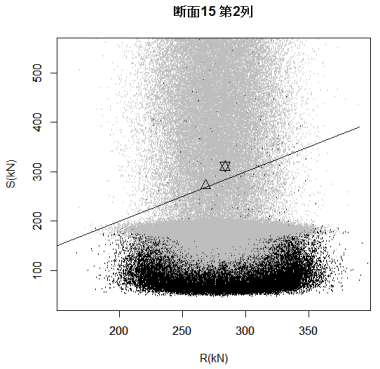
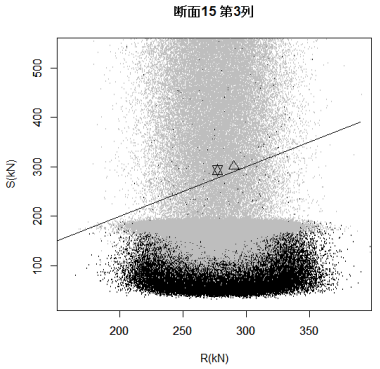
第 5 列



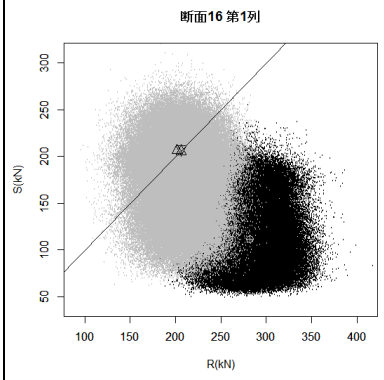
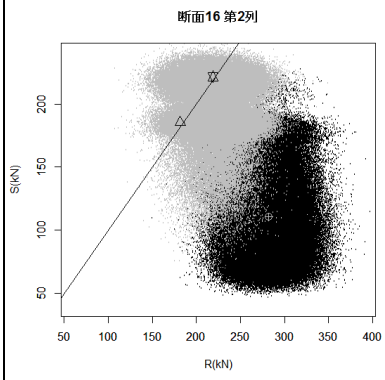
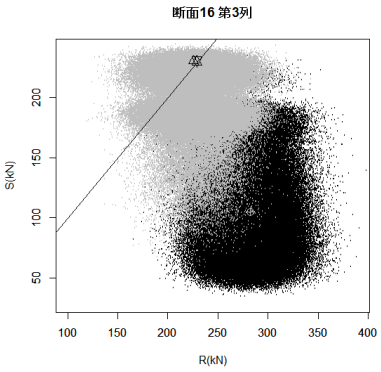
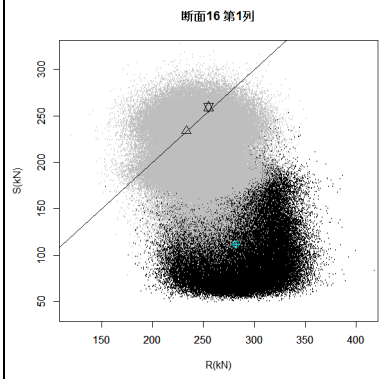
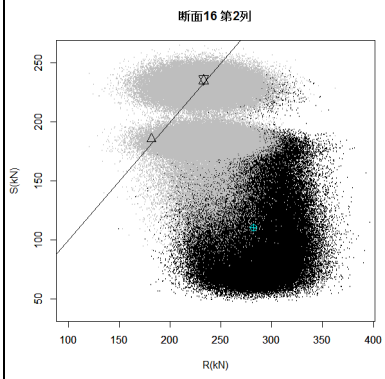
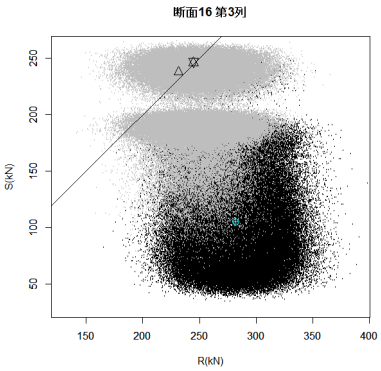
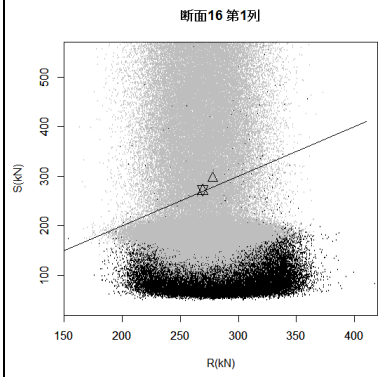
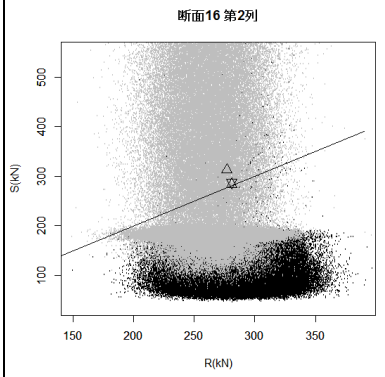
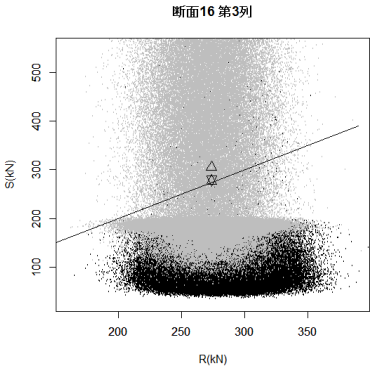
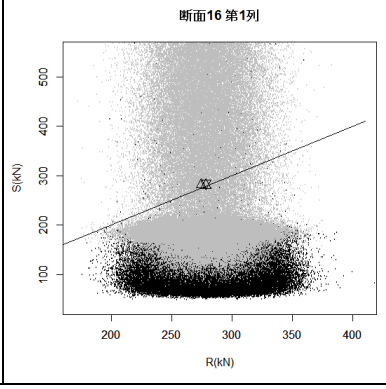
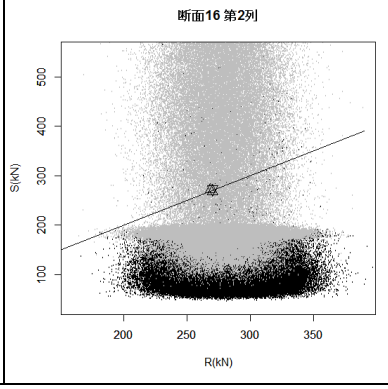
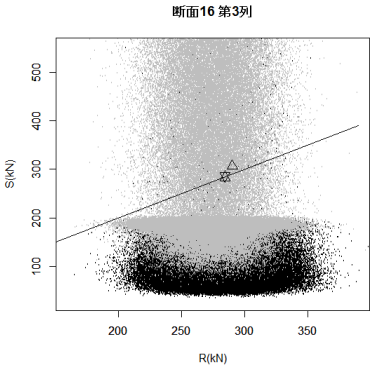
第 6 列



付表 F-28　杭列毎の抵抗-作用分布図(断面⑮)

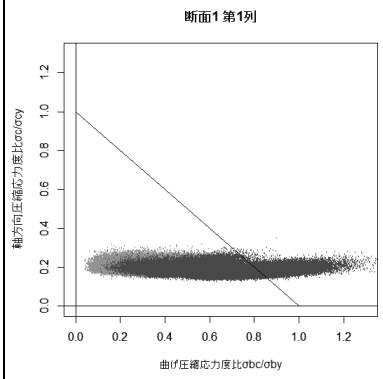
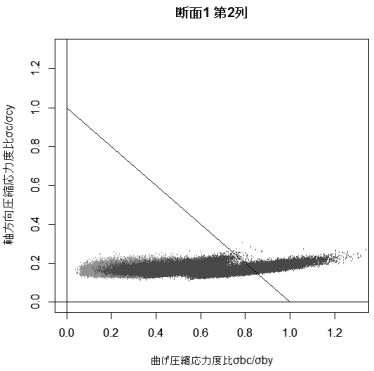
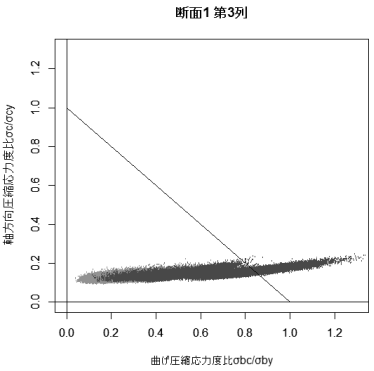
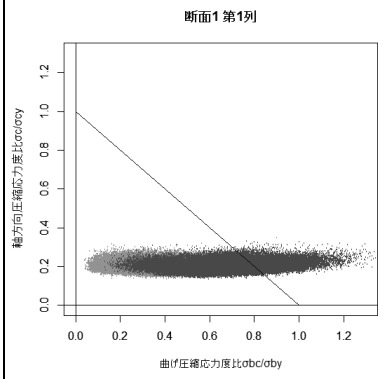
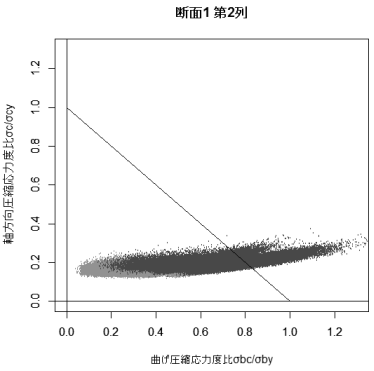
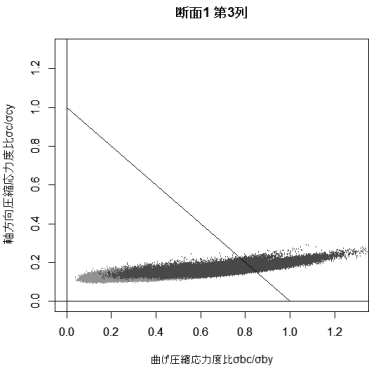
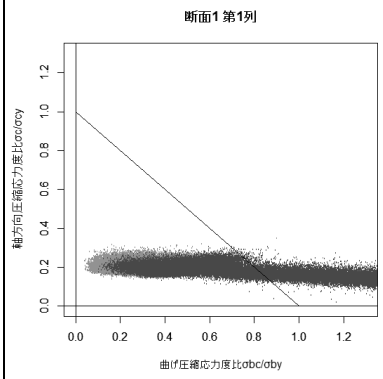
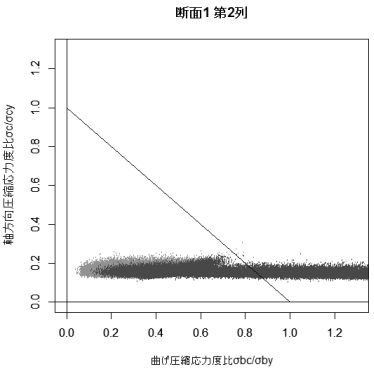
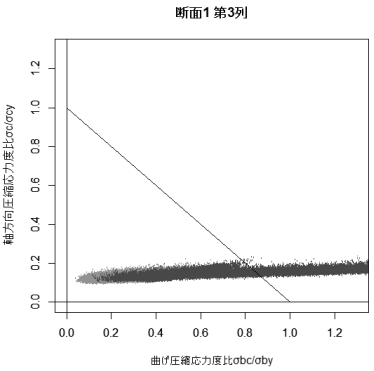
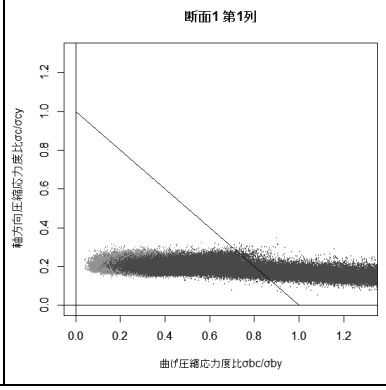
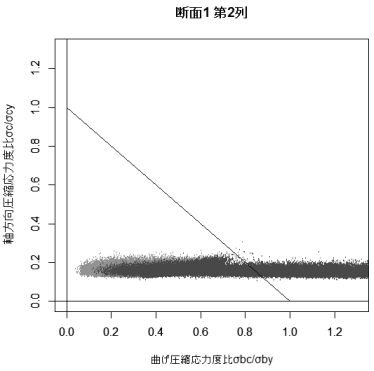
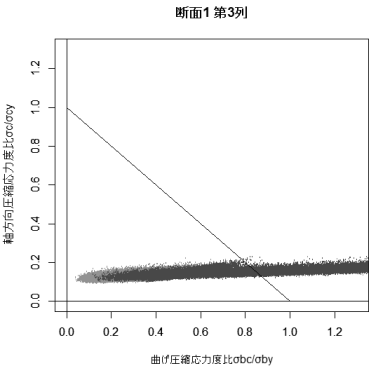
杭列		第 1 列	第 2 列	第 3 列
防舷材反力の設定	A			
	B			
	C			
	D			

付表 F-29　杭列毎の抵抗-作用分布図(断面⑯)

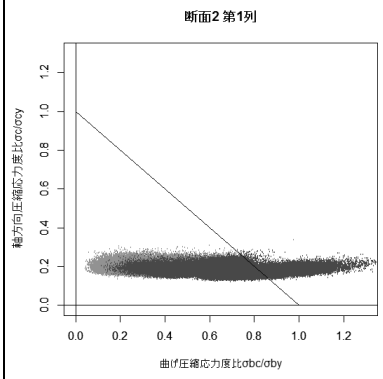
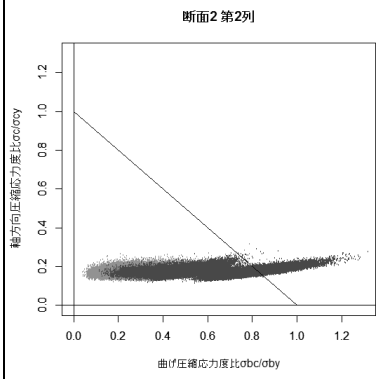
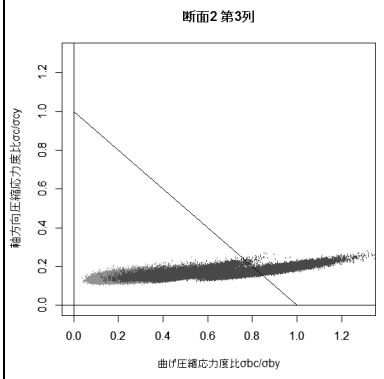
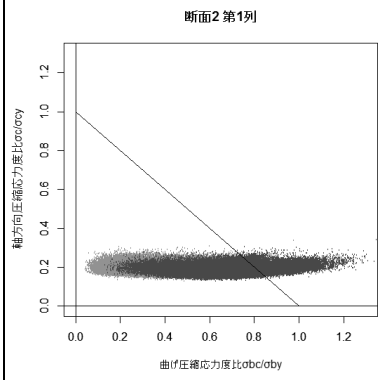
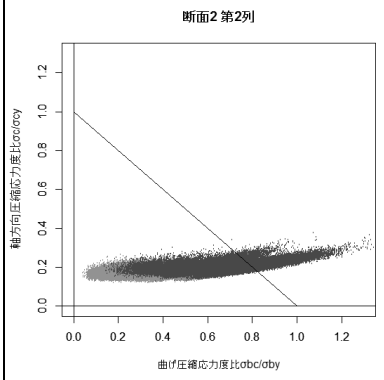
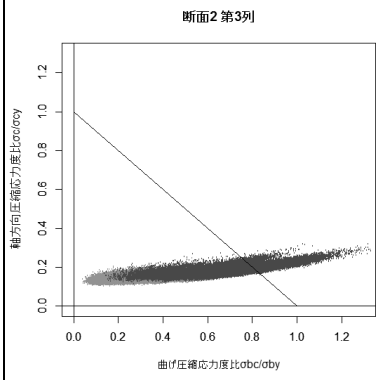
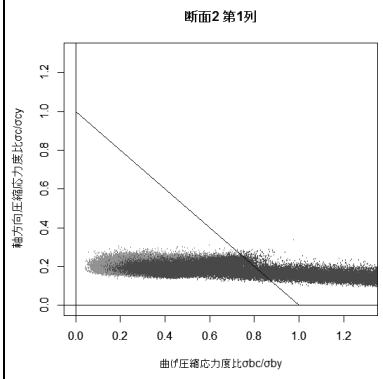
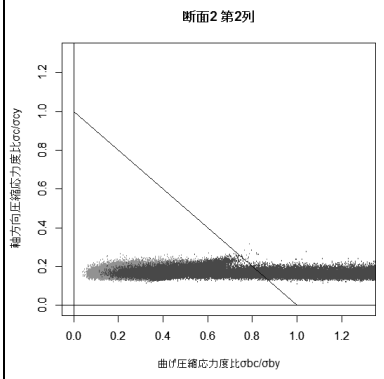
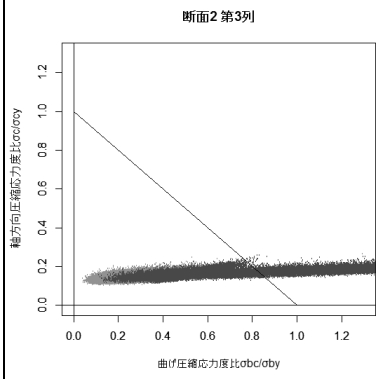
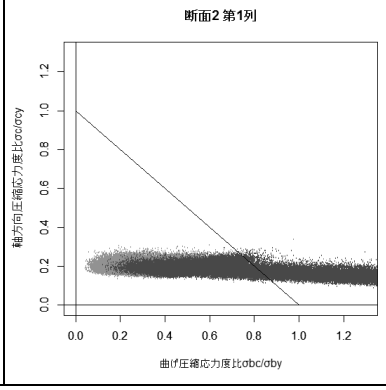
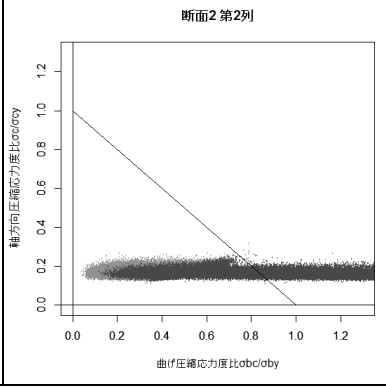
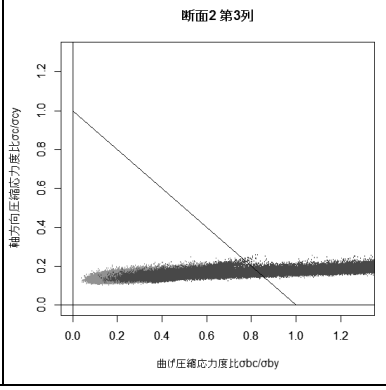
杭列		第 1 列	第 2 列	第 3 列
防舷材反力の設定	A			
	B			
	C			
	D			

②曲げ圧縮応力度比-軸方向圧縮応力度比分布図

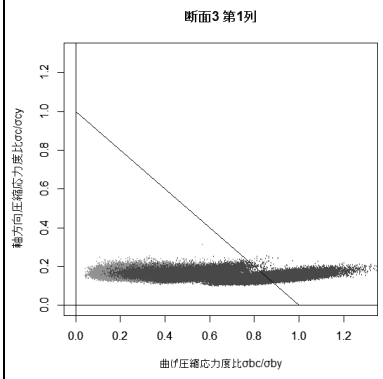
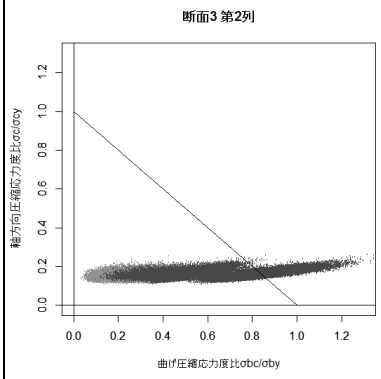
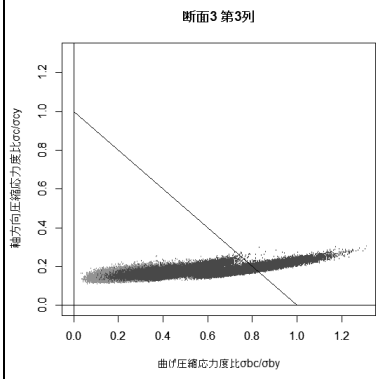
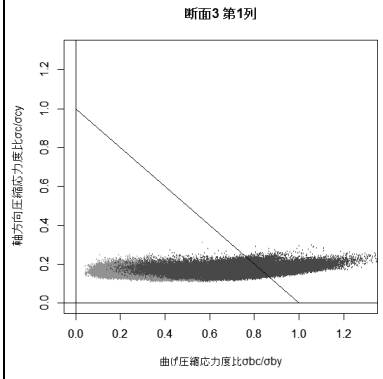
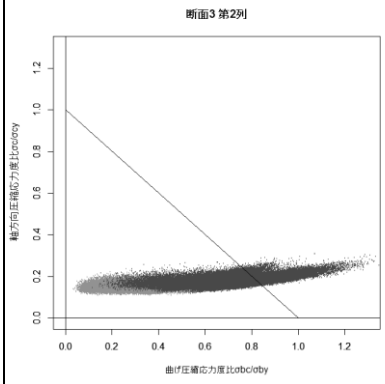
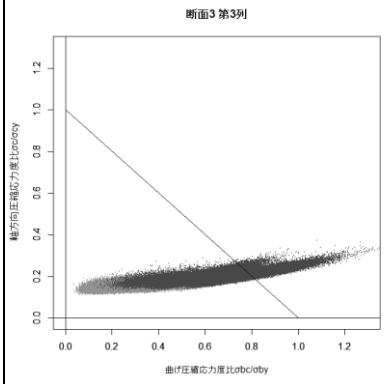
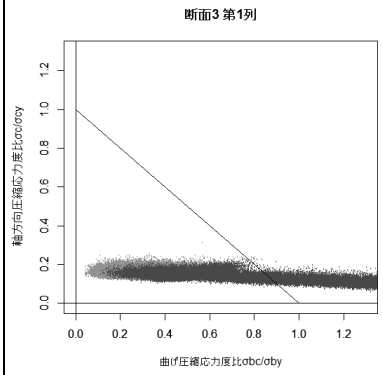
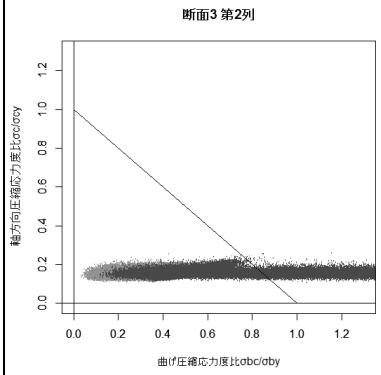
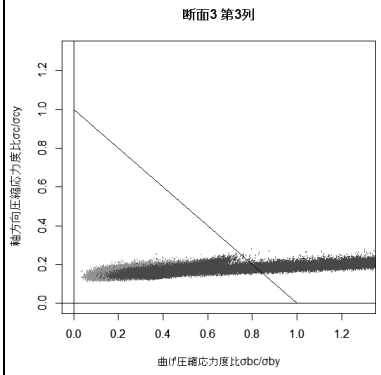
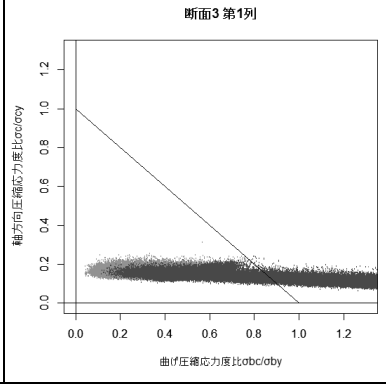
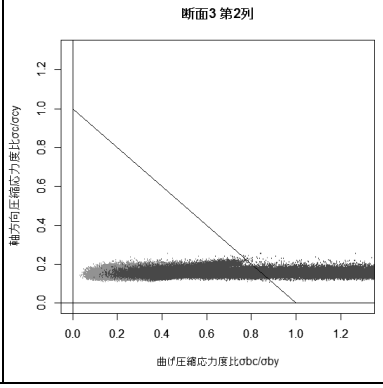
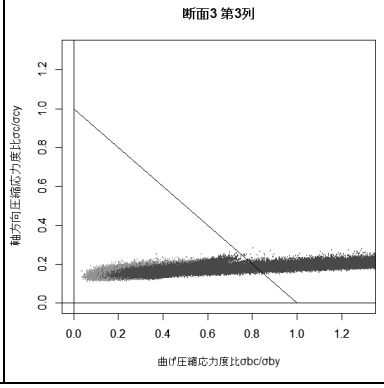
付表 F-30　杭列毎の曲げ圧縮応力度比-軸方向圧縮応力度比分布図(断面①)

杭列		第 1 列	第 2 列	第 3 列
防舷材反力の設定	A			
	B			
	C			
	D			

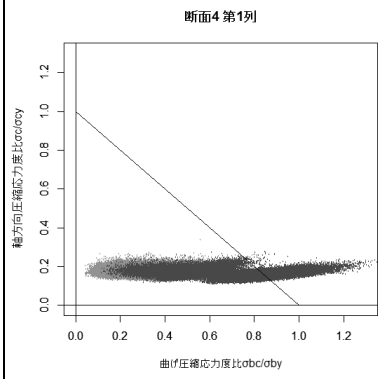
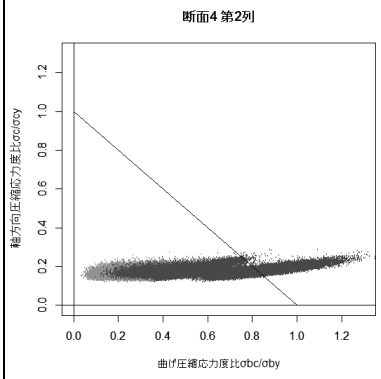
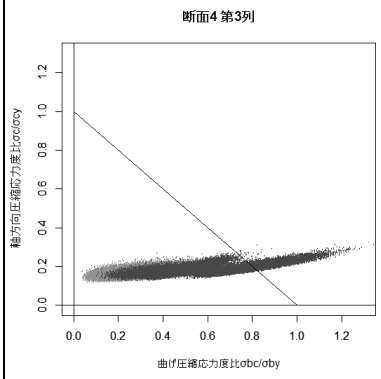
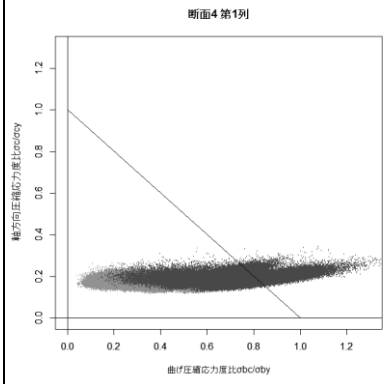
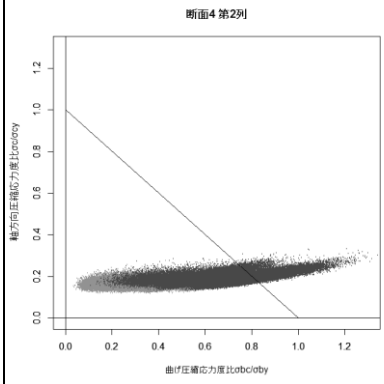
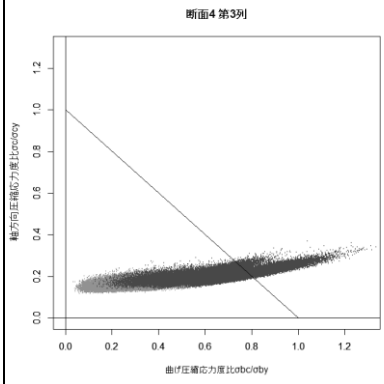
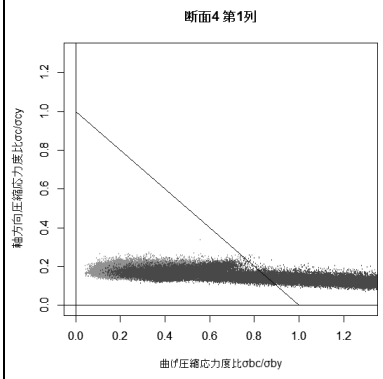
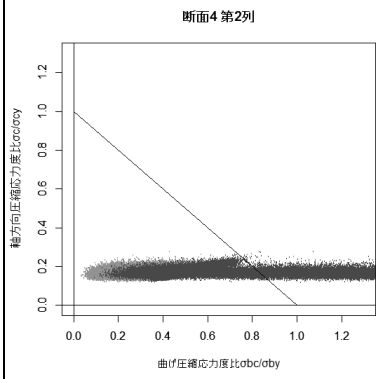
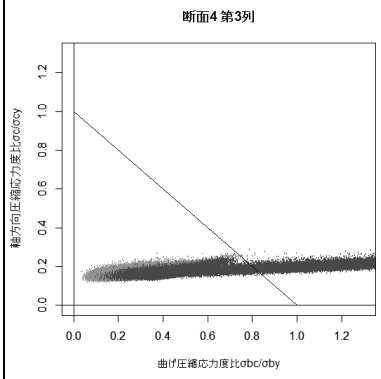
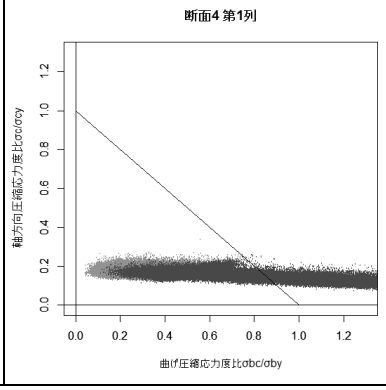
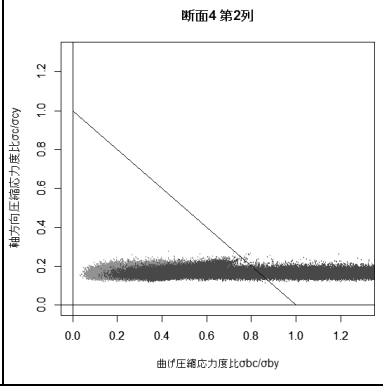
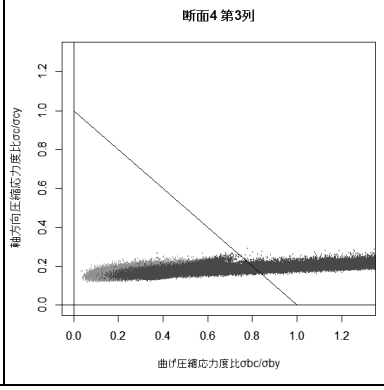
付表 F-31　杭列毎の曲げ圧縮応力度比-軸方向圧縮応力度比分布図(断面②)

杭列		第１列	第２列	第３列
防舷材反力の設定	A			
	B			
	C			
	D			

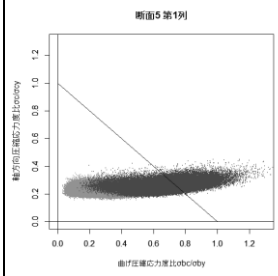
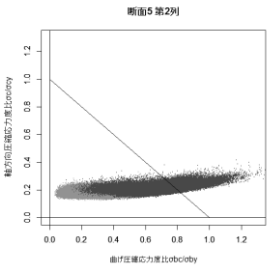
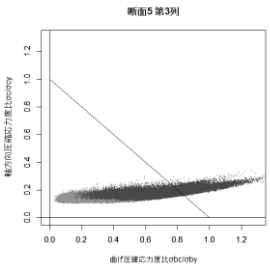
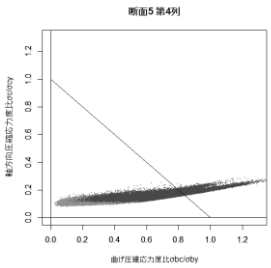
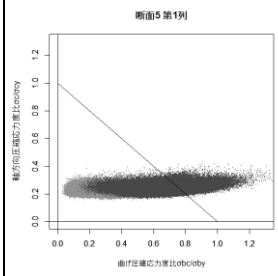
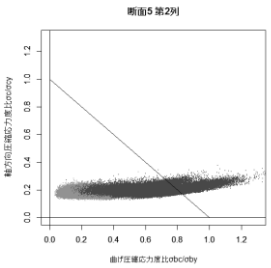
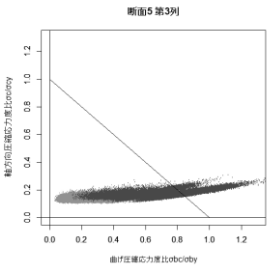
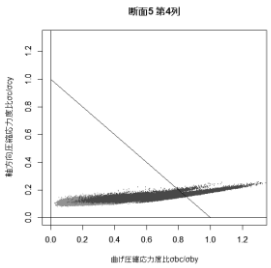
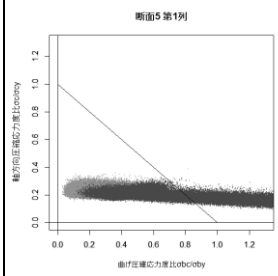
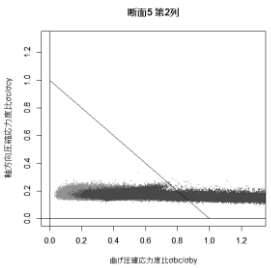
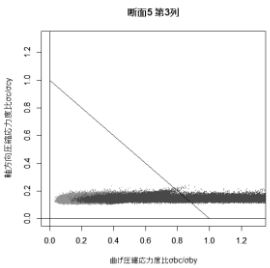
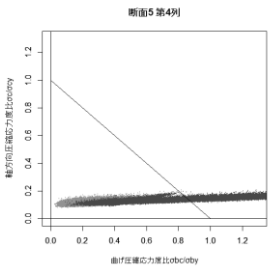
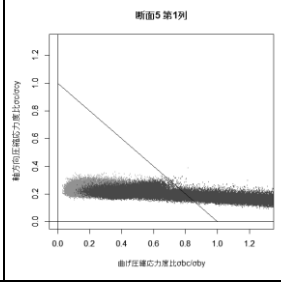
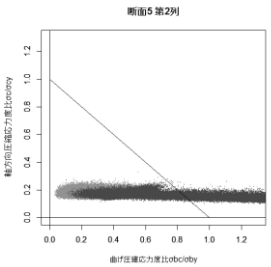
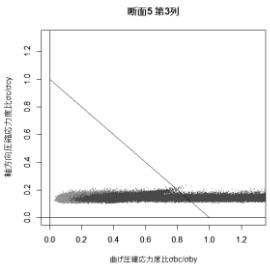
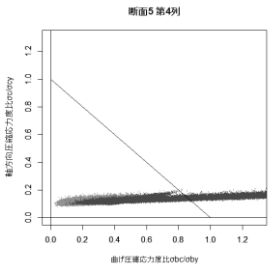
付表 F-32　杭列毎の曲げ圧縮応力度比-軸方向圧縮応力度比分布図(断面③)

杭列		第 1 列	第 2 列	第 3 列
防舷材反力の設定	A			
	B			
	C			
	D			

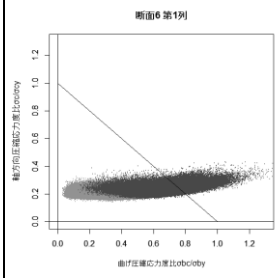
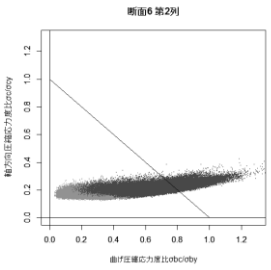
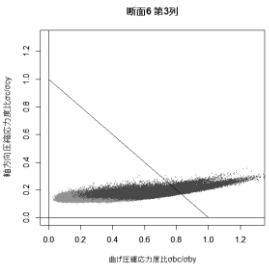
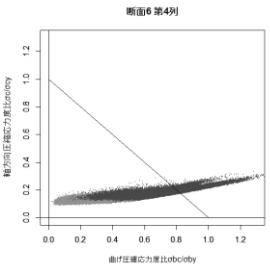
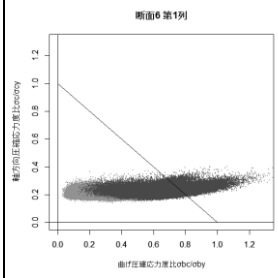
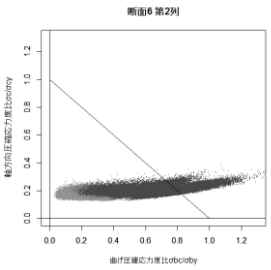
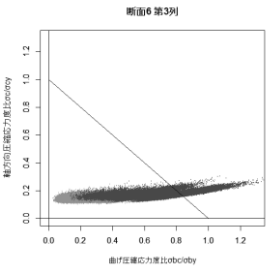
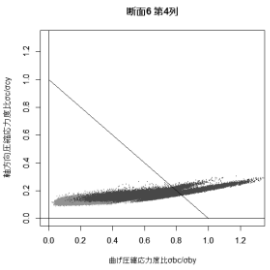
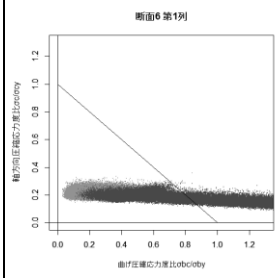
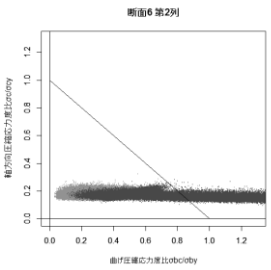
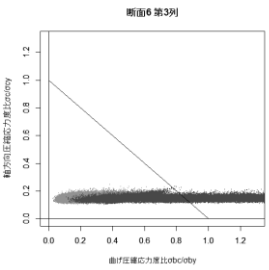
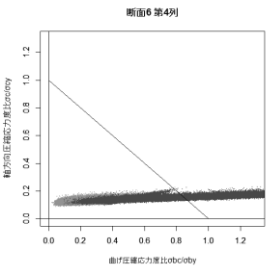
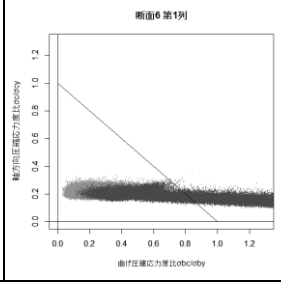
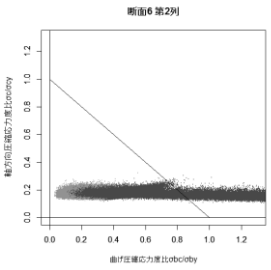
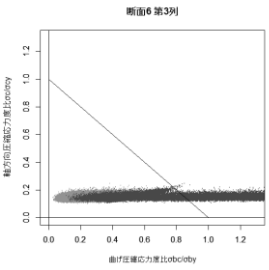
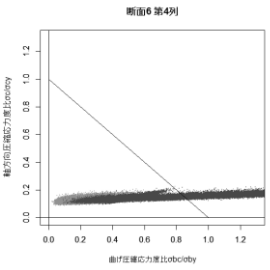
付表 F-33　杭列毎の曲げ圧縮応力度比-軸方向圧縮応力度比分布図(断面④)

杭列		第１列	第２列	第３列
防舷材反力の設定	A			
	B			
	C			
	D			

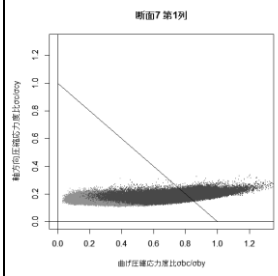
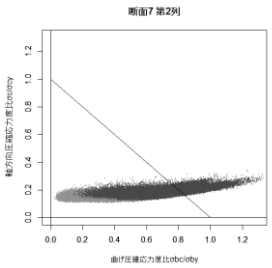
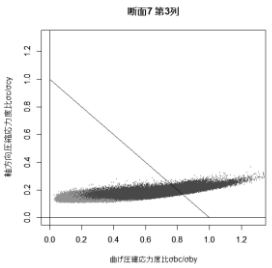
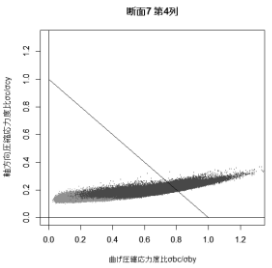
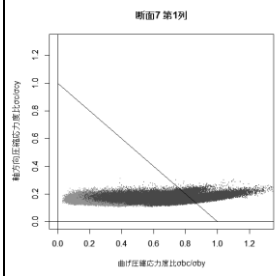
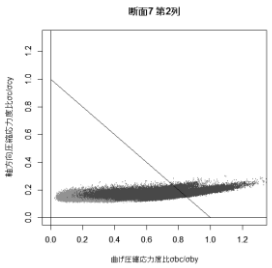
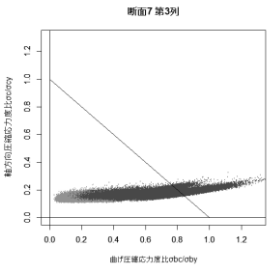
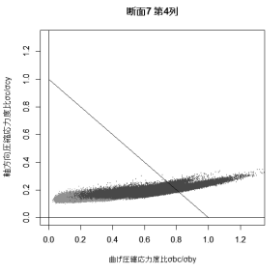
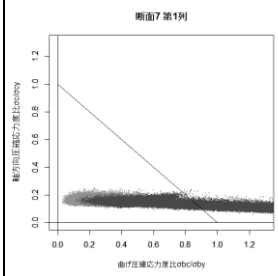
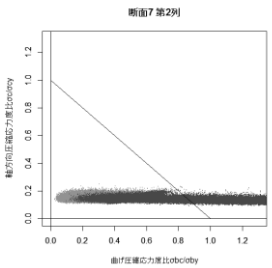
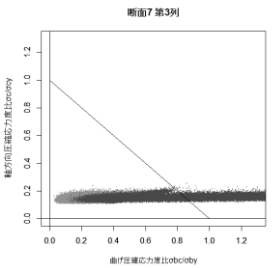
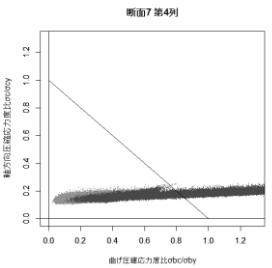
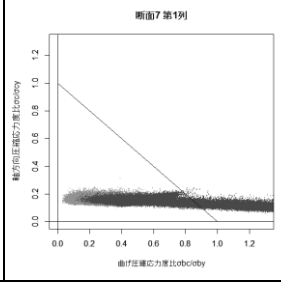
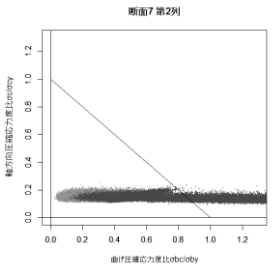
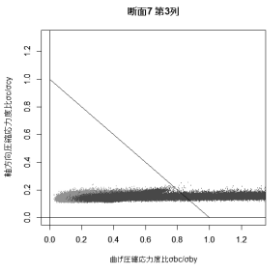
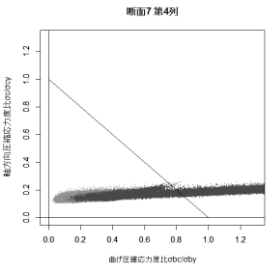
付表 F-34　杭列毎の曲げ圧縮応力度比-軸方向圧縮応力度比分布図(断面⑤)

杭列		第 1 列	第 2 列	第 3 列	第 4 列
防舷材反力の設定	A				
	B				
	C				
	D				

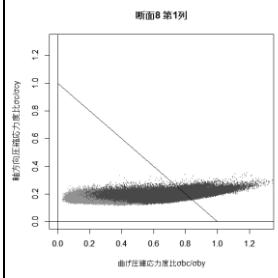
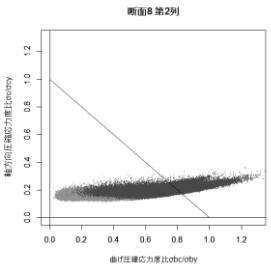
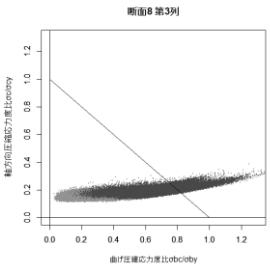
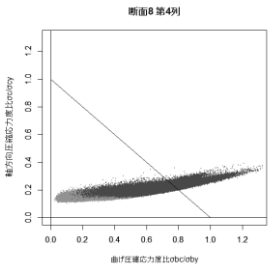
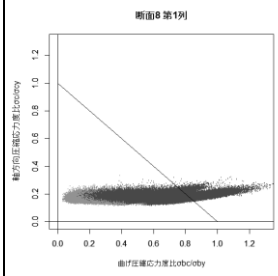
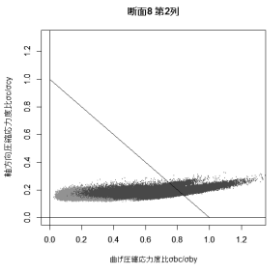
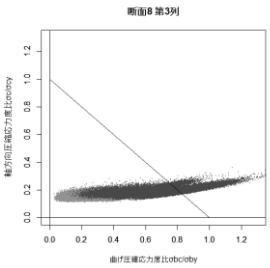
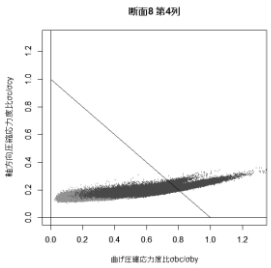
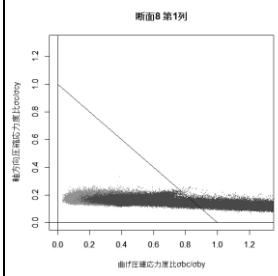
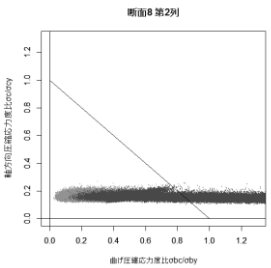
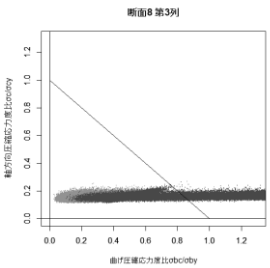
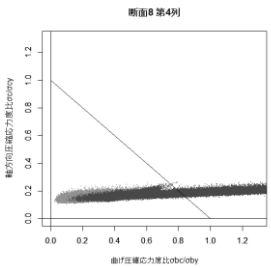
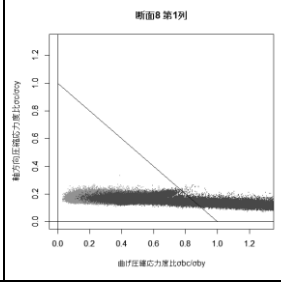
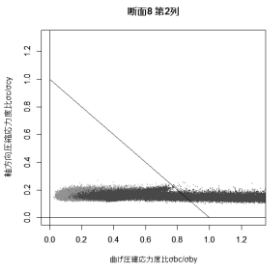
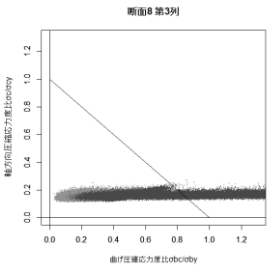
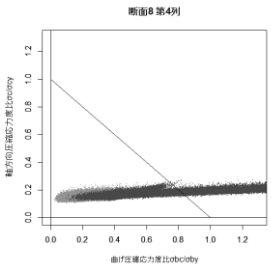
付表 F-35　杭列毎の曲げ圧縮応力度比-軸方向圧縮応力度比分布図(断面⑥)

杭列		第１列	第２列	第３列	第４列
防舷材反力の設定	A				
	B				
	C				
	D				

付表 F-36　杭列毎の曲げ圧縮応力度比-軸方向圧縮応力度比分布図(断面⑦)

杭列		第 1 列	第 2 列	第 3 列	第 4 列
防舷材反力の設定	A				
	B				
	C				
	D				

付表 F-37　杭列毎の曲げ圧縮応力度比-軸方向圧縮応力度比分布図(断面⑧)

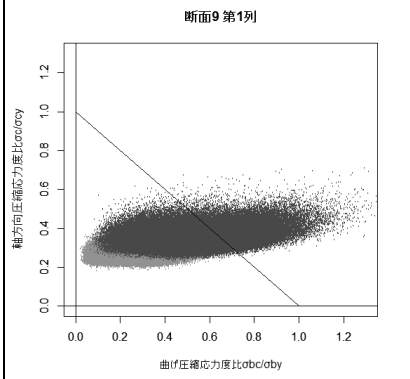
杭列		第１列	第２列	第３列	第４列
防舷材反力の設定	A				
	B				
	C				
	D				

付表 F-38　杭列毎の曲げ圧縮応力度比-軸方向圧縮応力度比分布図(断面⑨　設定 A および設定 B)

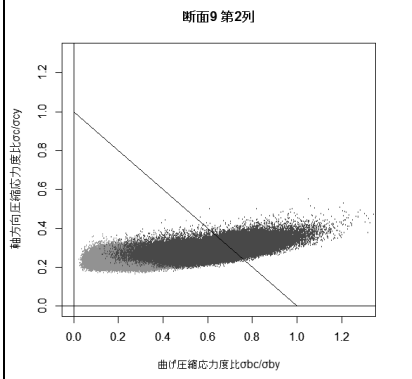
防舷材反力の設定

A

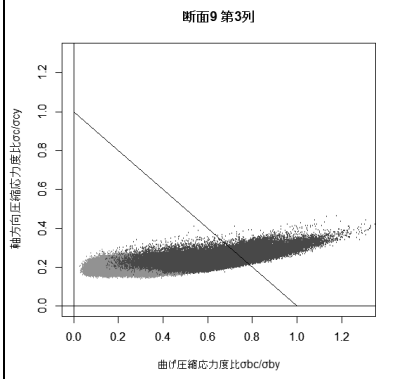
第 1 列



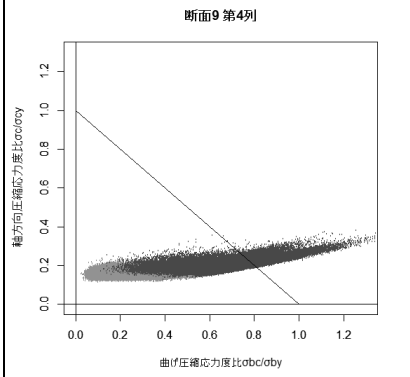
第 2 列



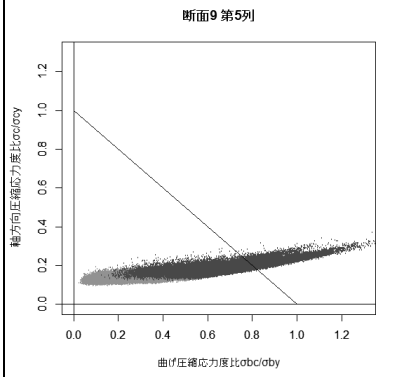
第 3 列



第 4 列

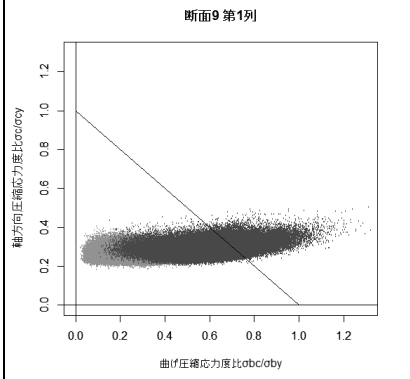


第 5 列

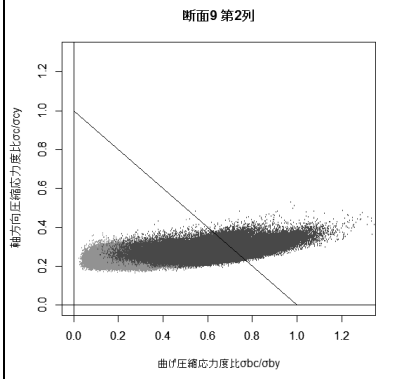


B

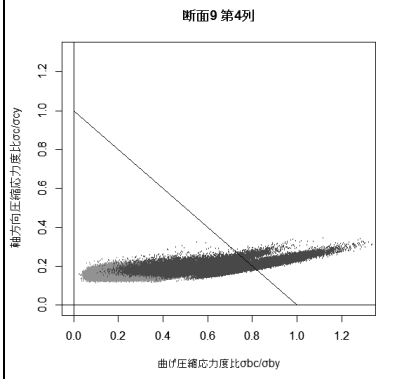
第 1 列



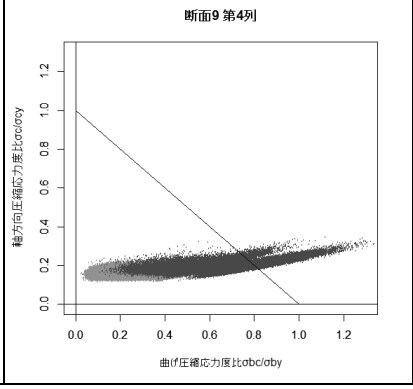
第 2 列



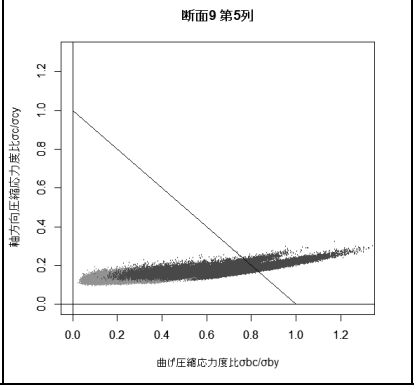
第 3 列



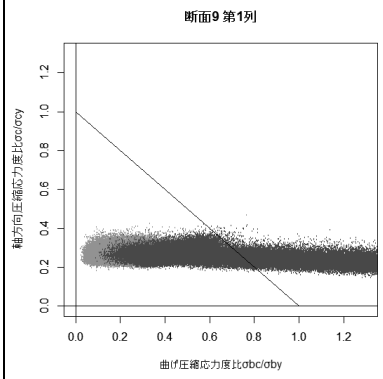
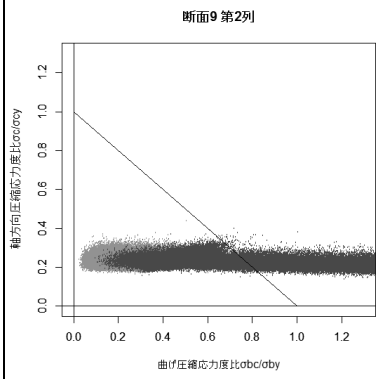
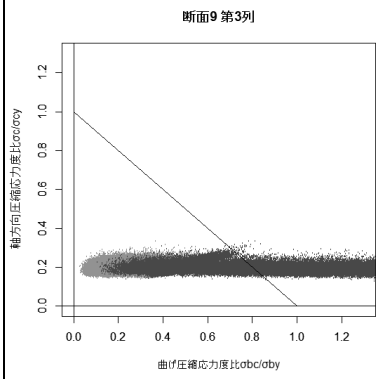
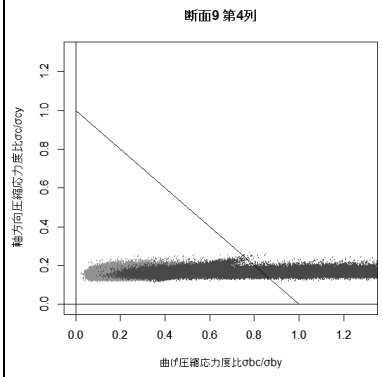
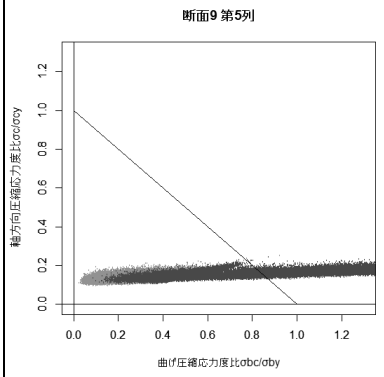
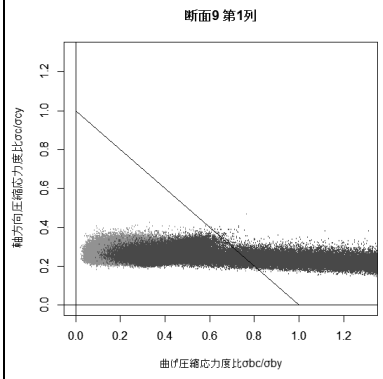
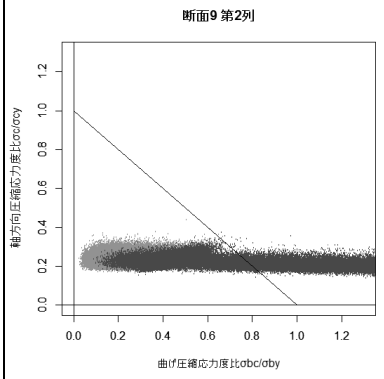
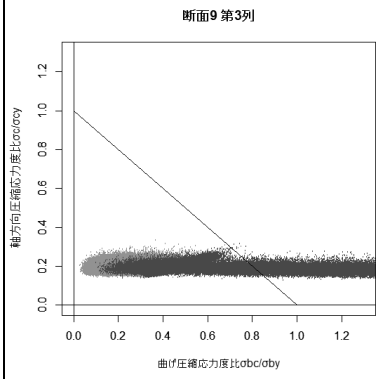
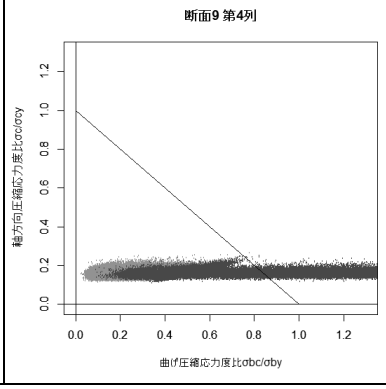
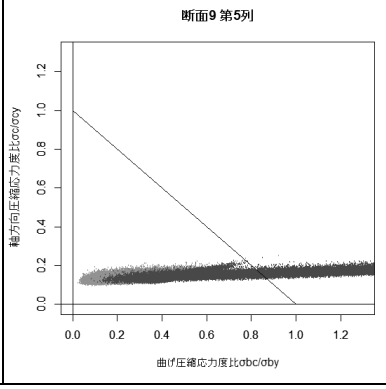
第 4 列



第 5 列



付表 F-39　杭列毎の曲げ圧縮応力度比-軸方向圧縮応力度比分布図(断面⑨　設定 C および設定 D)

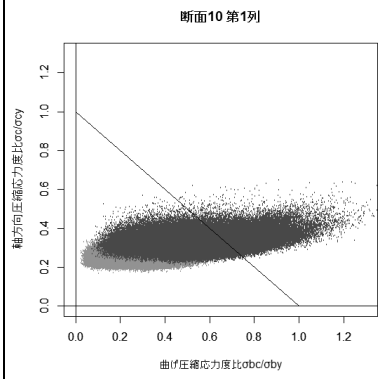
防舷材反力の設定				
	C	第１列	第２列	第３列
				
		第４列	第５列	
				
	D	第１列	第２列	第３列
				
		第４列	第５列	
				

付表 F-40　杭列毎の曲げ圧縮応力度比-軸方向圧縮応力度比分布図(断面⑩　設定 A および設定 B)

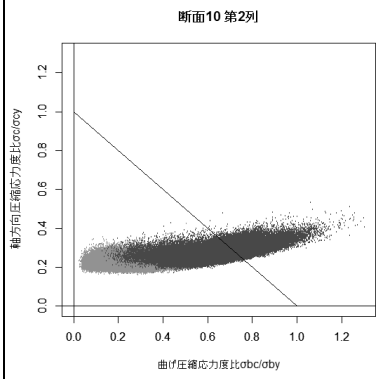
防舷材反力の設定

A

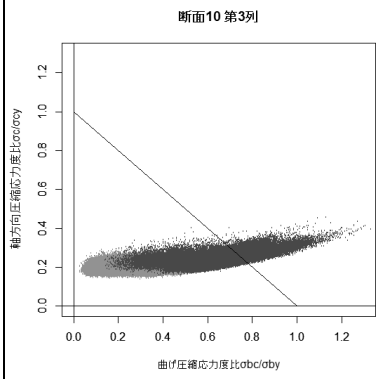
第 1 列



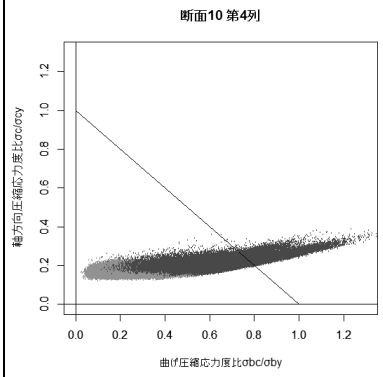
第 2 列



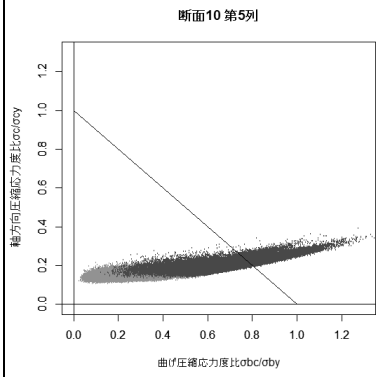
第 3 列



第 4 列

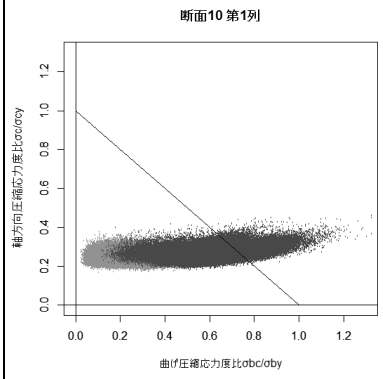


第 5 列

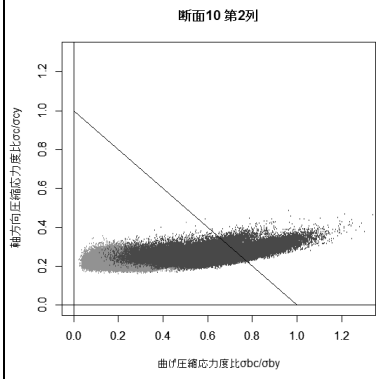


B

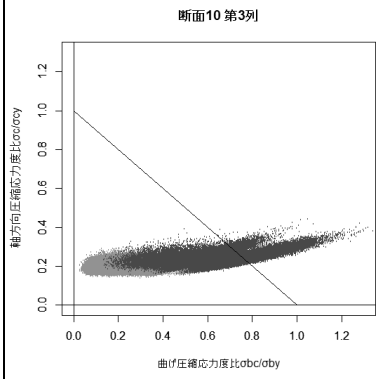
第 1 列



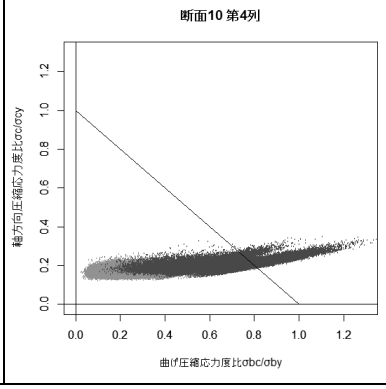
第 2 列



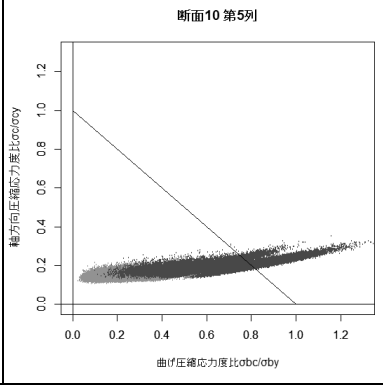
第 3 列



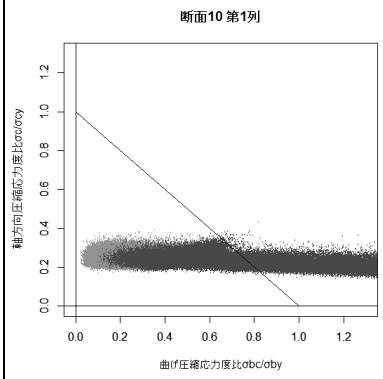
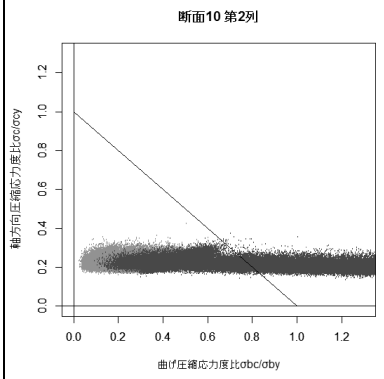
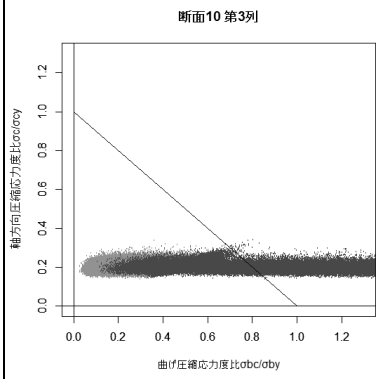
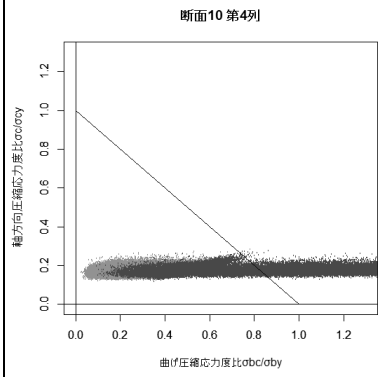
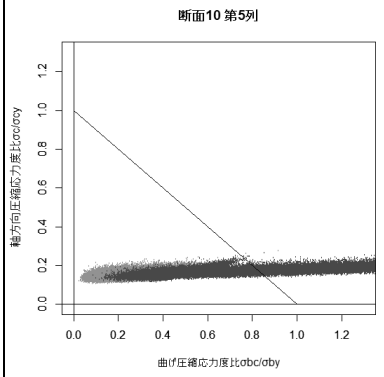
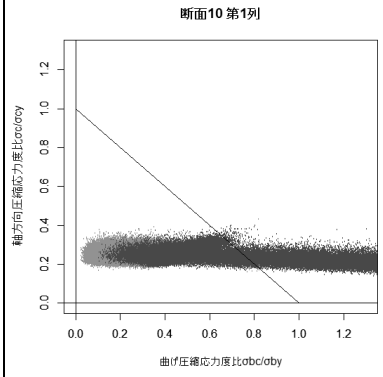
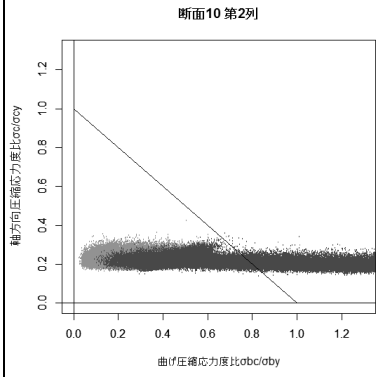
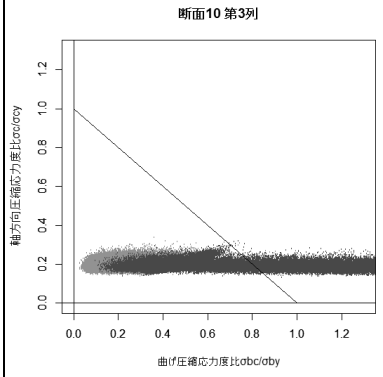
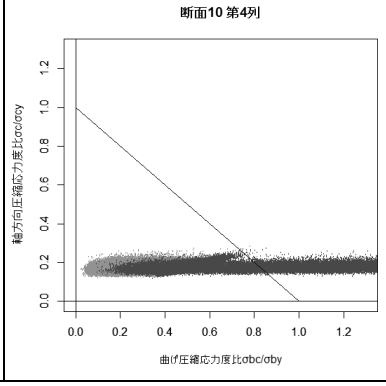
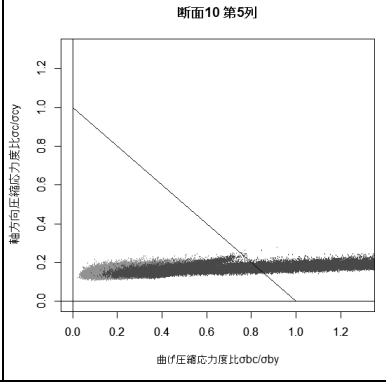
第 4 列



第 5 列



付表 F-41　杭列毎の曲げ圧縮応力度比-軸方向圧縮応力度比分布図(断面⑩　設定 C および設定 D)

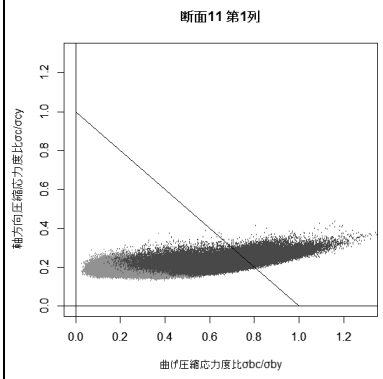
防舷材反力の設定	C	第１列	第２列	第３列
				
		第４列	第５列	
				
	D	第１列	第２列	第３列
				
		第４列	第５列	
				

付表 F-42　杭列毎の曲げ圧縮応力度比-軸方向圧縮応力度比分布図(断面⑪　設定 A および設定 B)

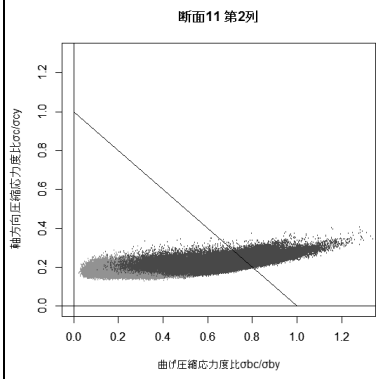
防舷材反力の設定

A

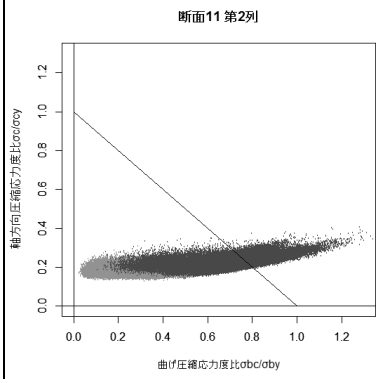
第 1 列



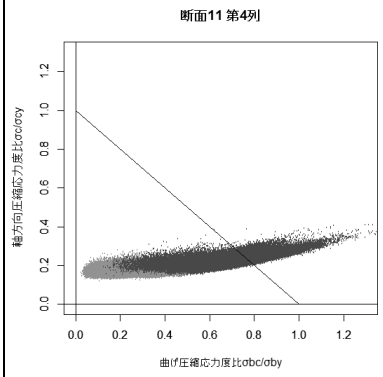
第 2 列



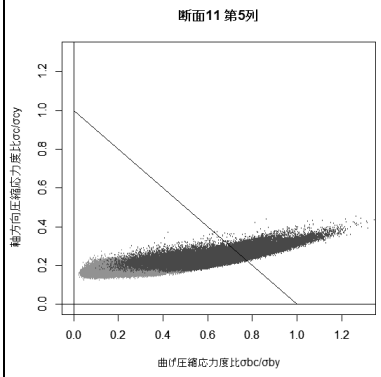
第 3 列



第 4 列

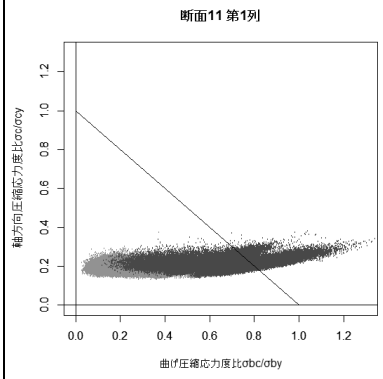


第 5 列

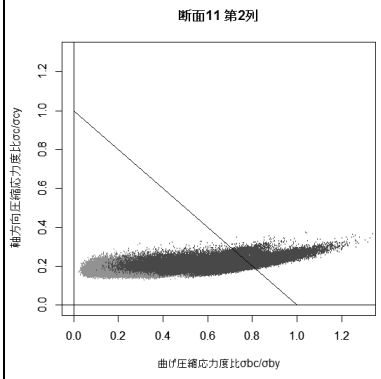


B

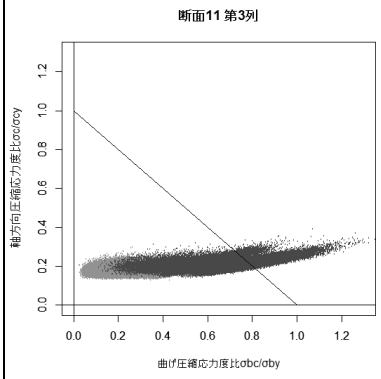
第 1 列



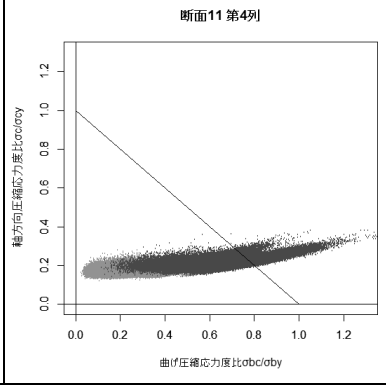
第 2 列



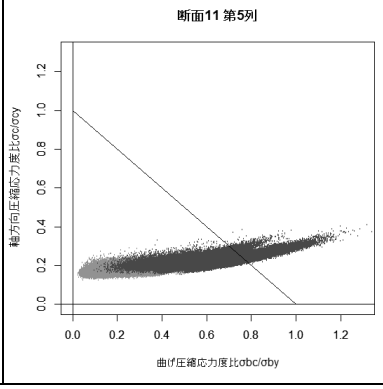
第 3 列



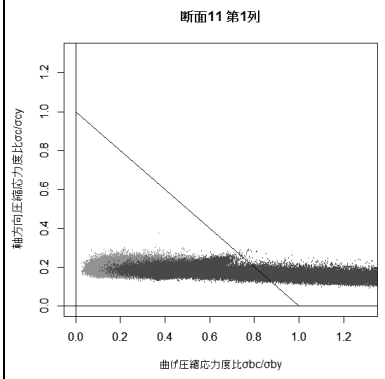
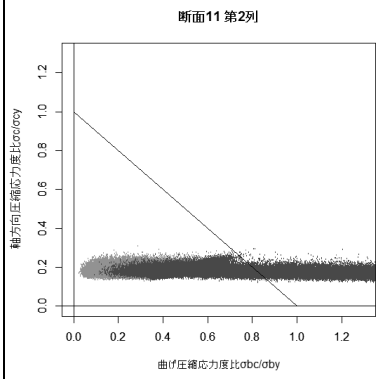
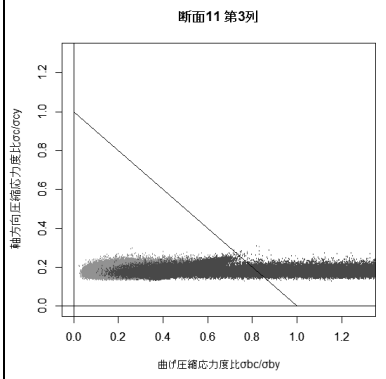
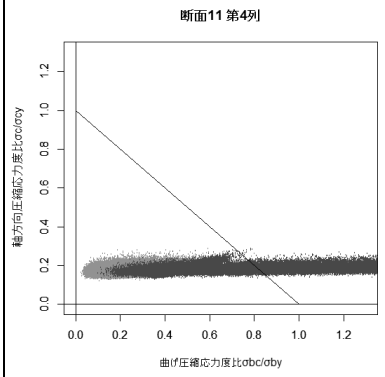
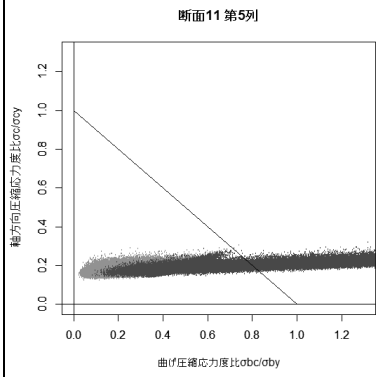
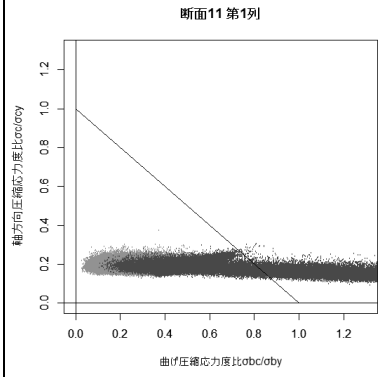
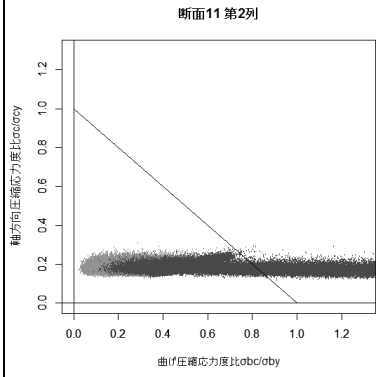
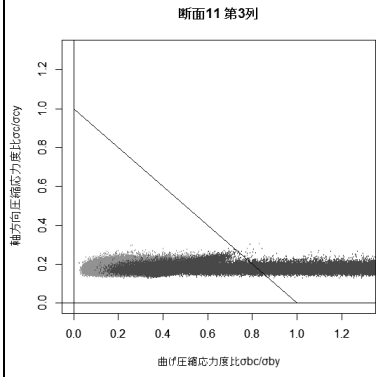
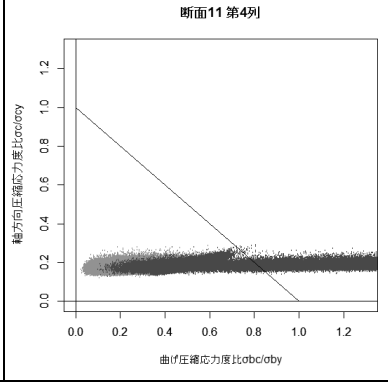
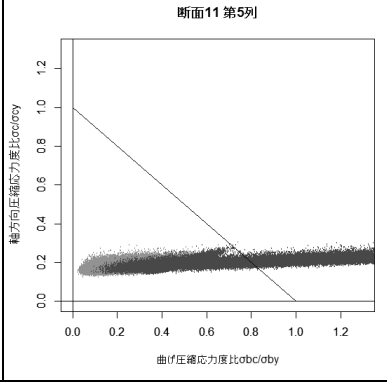
第 4 列



第 5 列



付表 F-43　杭列毎の曲げ圧縮応力度比-軸方向圧縮応力度比分布図(断面⑪　設定 C および設定 D)

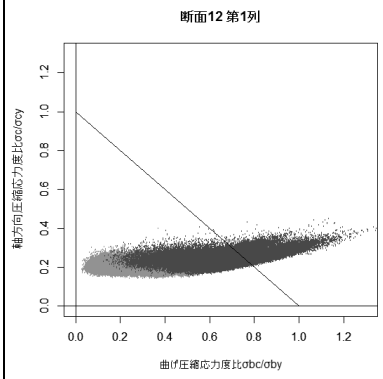
防舷材反力の設定	C	第１列	第２列	第３列
				
		第４列	第５列	
				
	D	第１列	第２列	第３列
				
		第４列	第５列	
				

付表 F-44　杭列毎の曲げ圧縮応力度比-軸方向圧縮応力度比分布図(断面⑫　設定 A および設定 B)

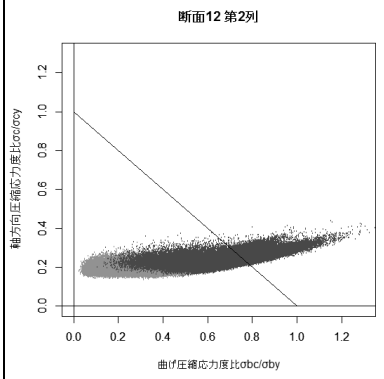
防舷材反力の設定

A

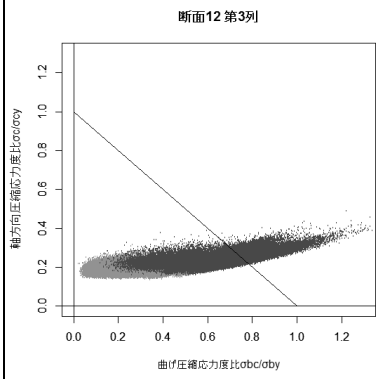
第 1 列



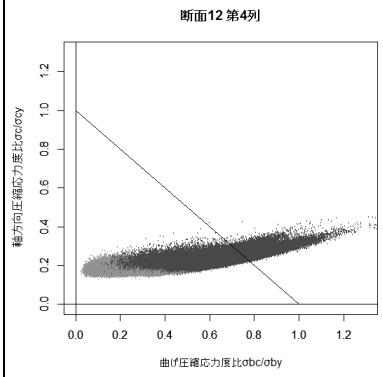
第 2 列



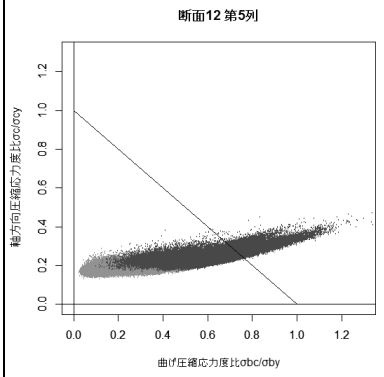
第 3 列



第 4 列

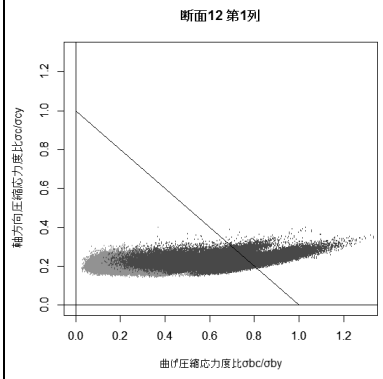


第 5 列

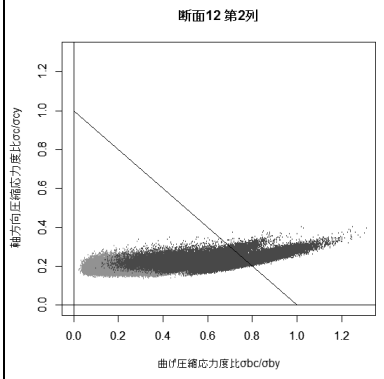


B

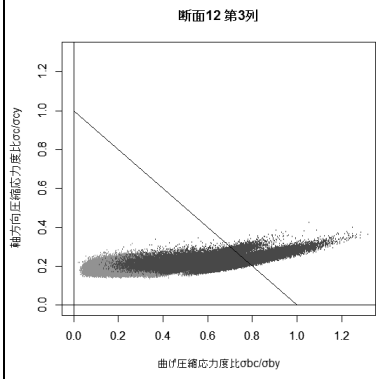
第 1 列



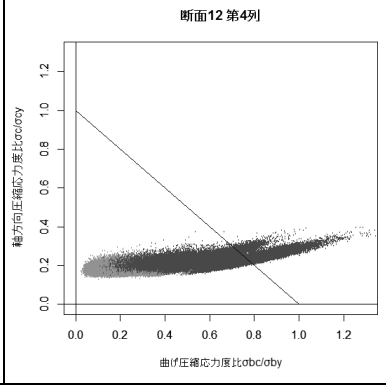
第 2 列



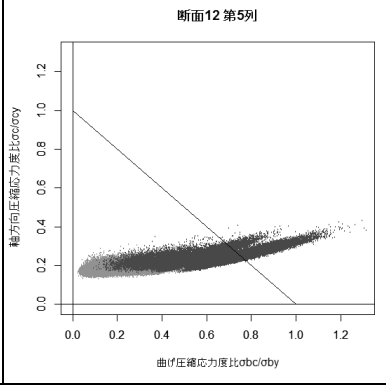
第 3 列



第 4 列



第 5 列

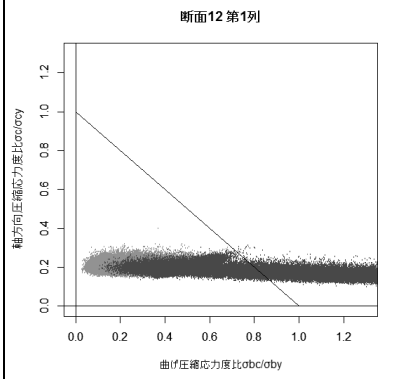


付表 F-45　杭列毎の曲げ圧縮応力度比-軸方向圧縮応力度比分布図(断面⑫　設定 C および設定 D)

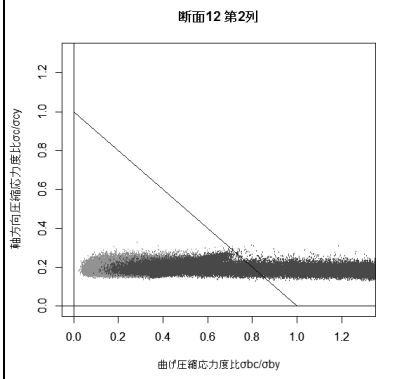
防舷材反力の設定

C

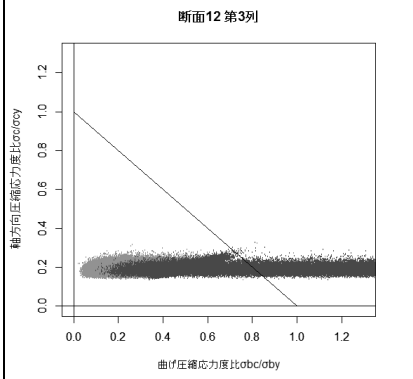
第 1 列



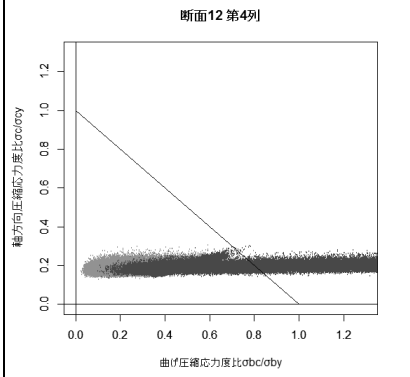
第 2 列



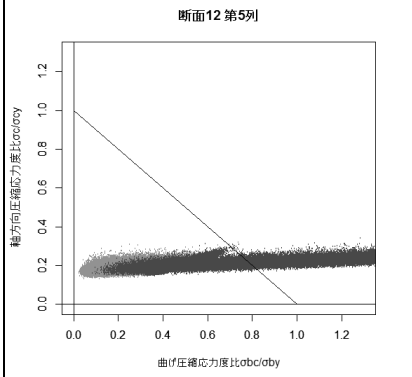
第 3 列



第 4 列

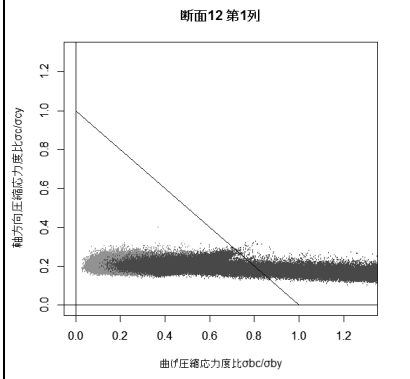


第 5 列

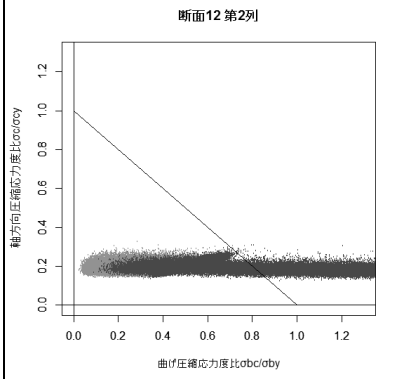


D

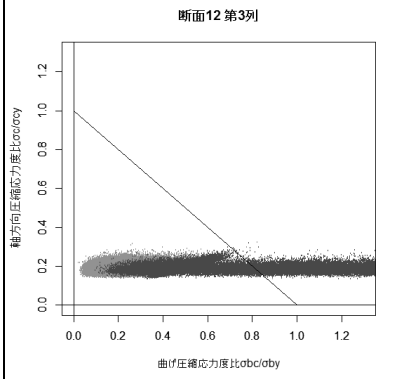
第 1 列



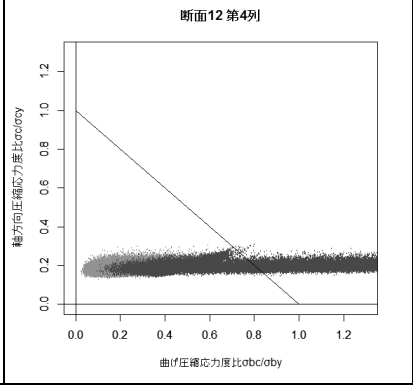
第 2 列



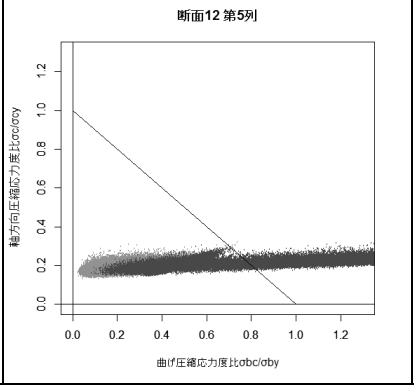
第 3 列



第 4 列



第 5 列

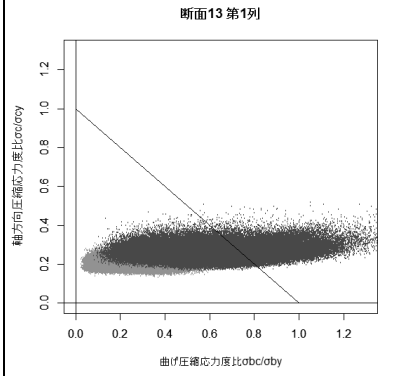


付表 F-46　杭列毎の曲げ圧縮応力度比-軸方向圧縮応力度比分布図(断面⑬　設定 A および設定 B)

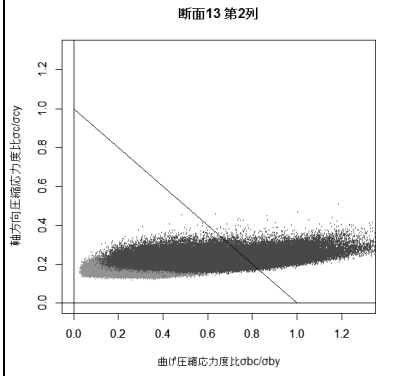
防舷材反力の設定

A

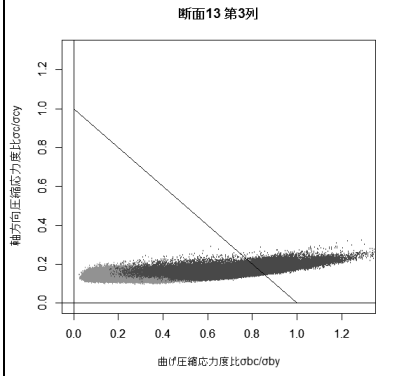
第 1 列



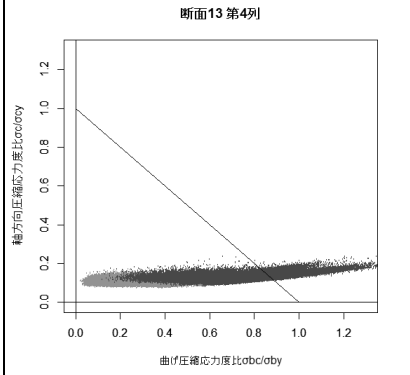
第 2 列



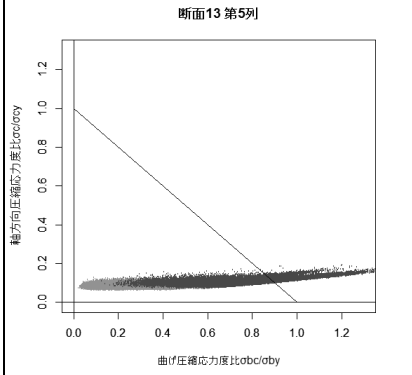
第 3 列



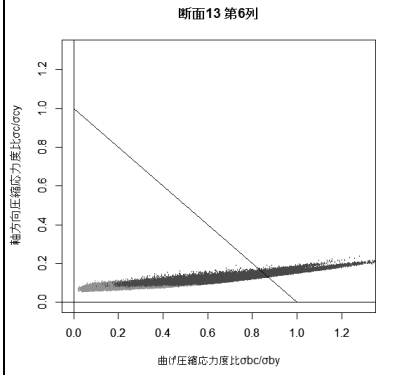
第 4 列



第 5 列

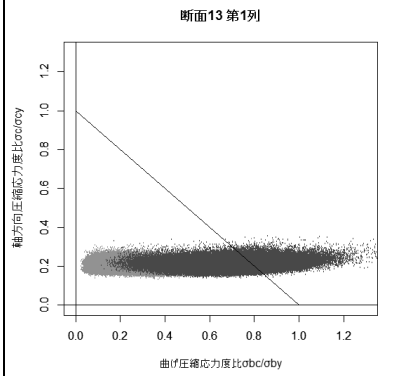


第 6 列

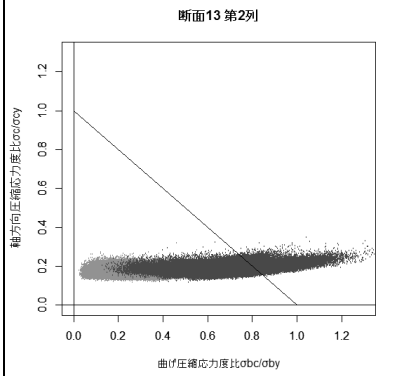


B

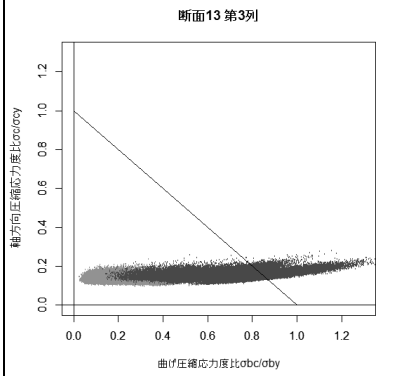
第 1 列



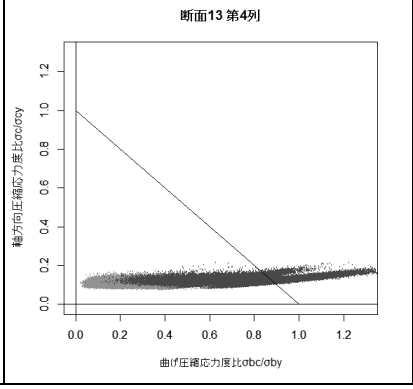
第 2 列



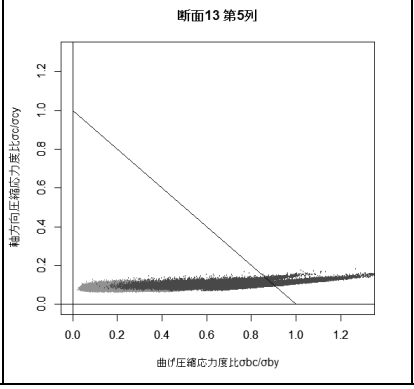
第 3 列



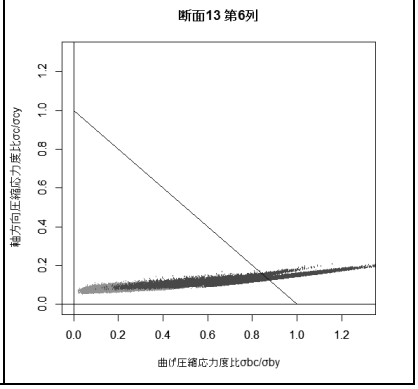
第 4 列



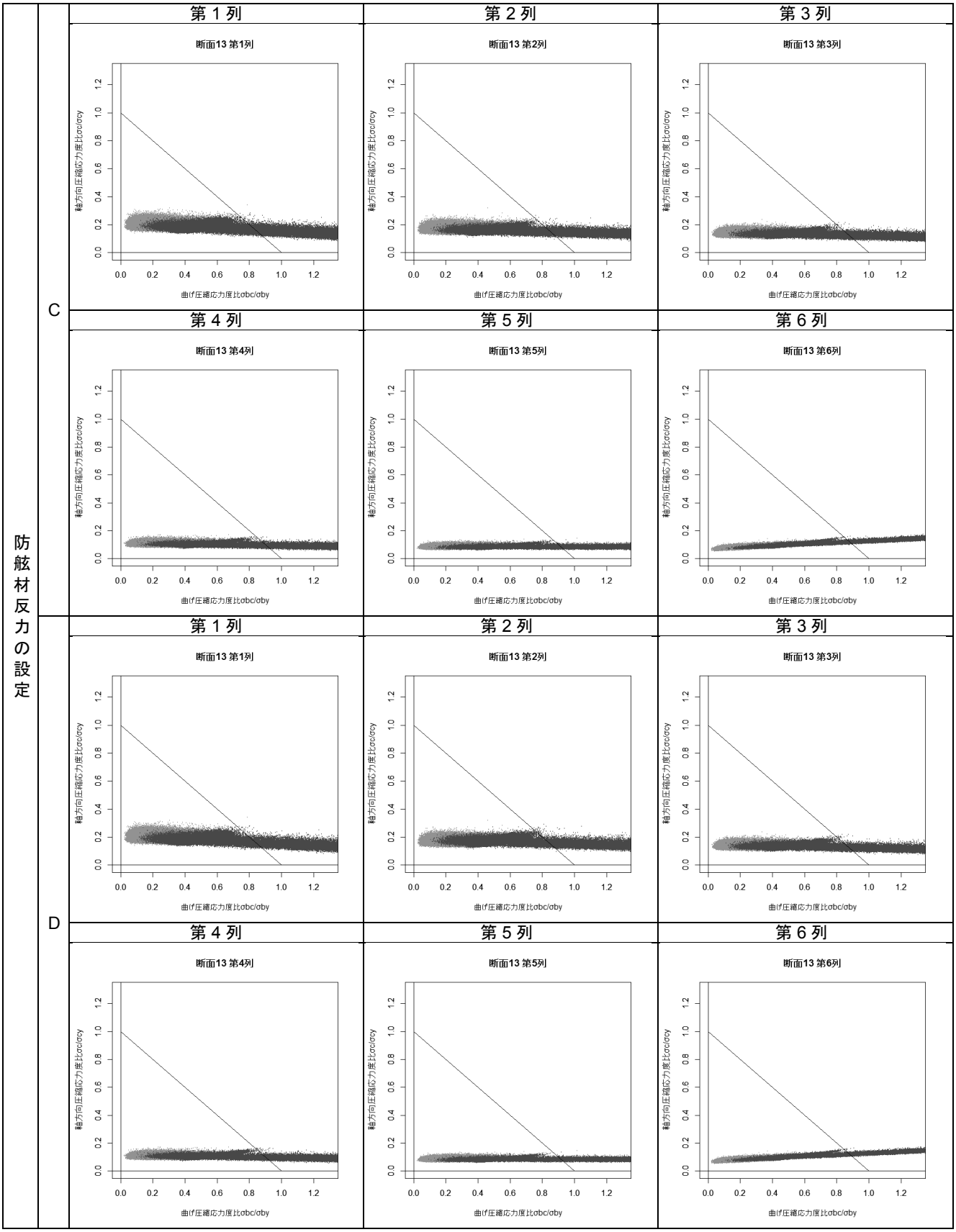
第 5 列



第 6 列



付表 F-47　杭列毎の曲げ圧縮応力度比-軸方向圧縮応力度比分布図(断面⑬　設定 C および設定 D)

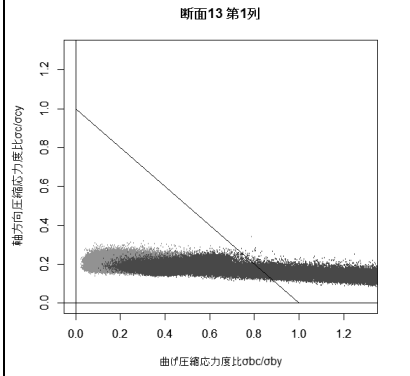


付表 F-48　杭列毎の曲げ圧縮応力度比-軸方向圧縮応力度比分布図(断面⑭　設定 A および設定 B)

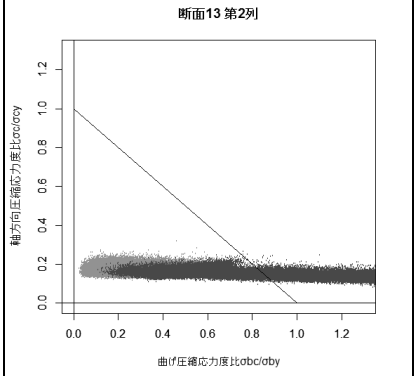
防舷材反力の設定

A

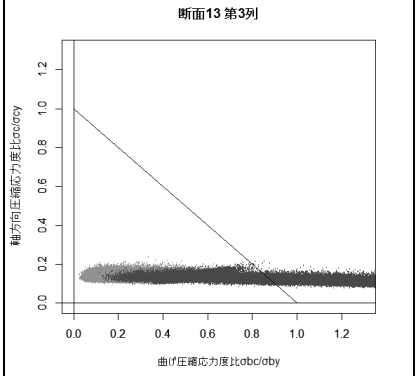
第 1 列



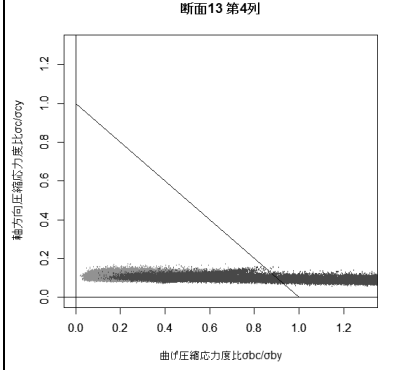
第 2 列



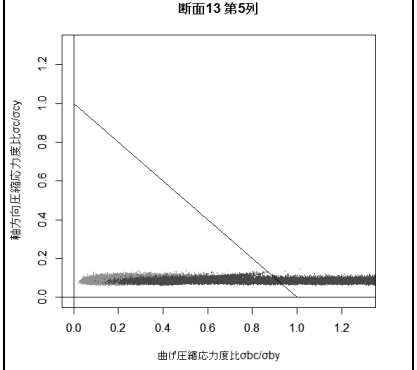
第 3 列



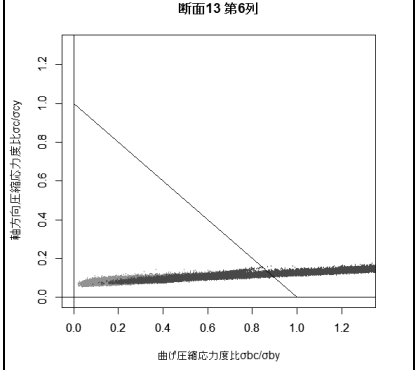
第 4 列



第 5 列

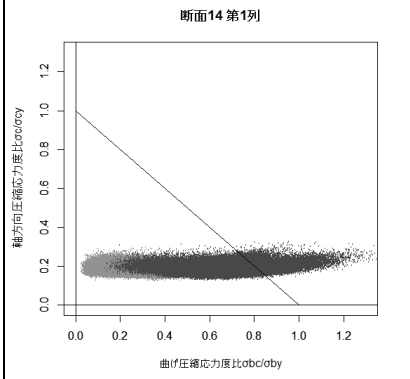


第 6 列

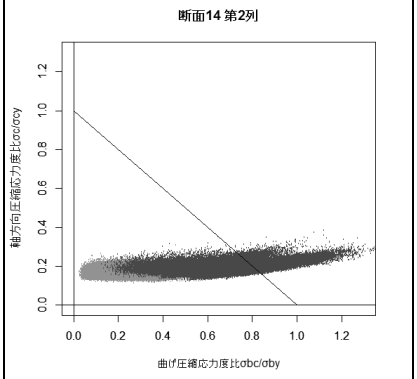


B

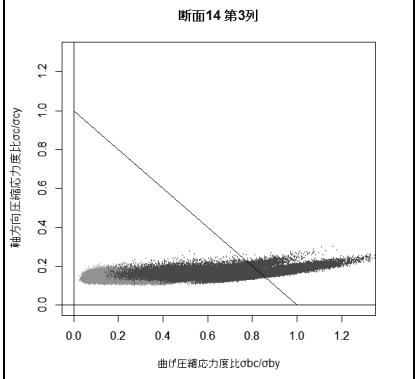
第 1 列



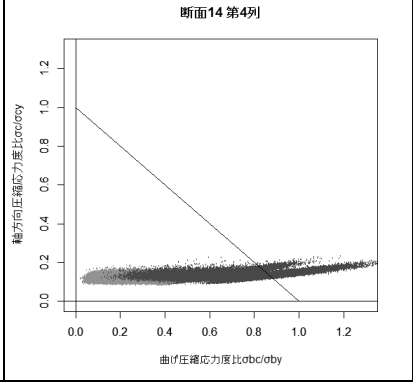
第 2 列



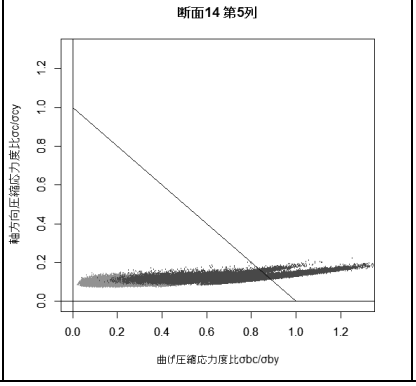
第 3 列



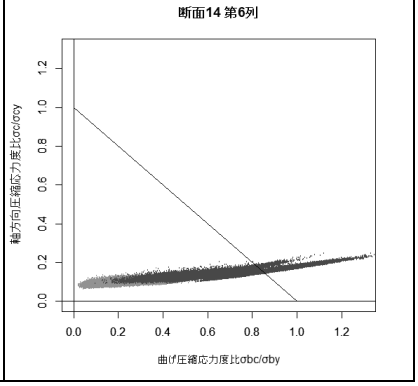
第 4 列



第 5 列



第 6 列

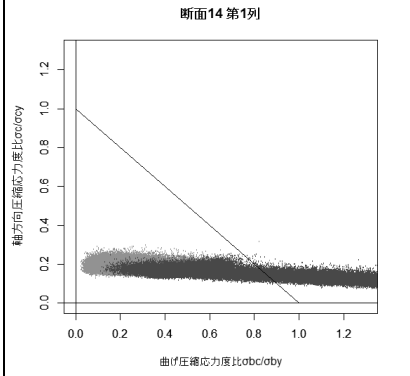


付表 F-49　杭列毎の曲げ圧縮応力度比-軸方向圧縮応力度比分布図(断面⑭　設定 C および設定 D)

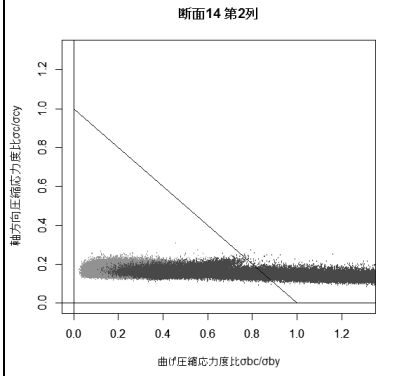
防舷材反力の設定

C

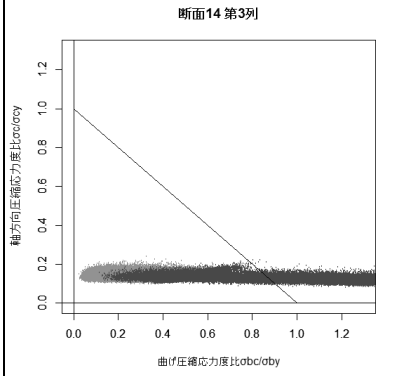
第 1 列



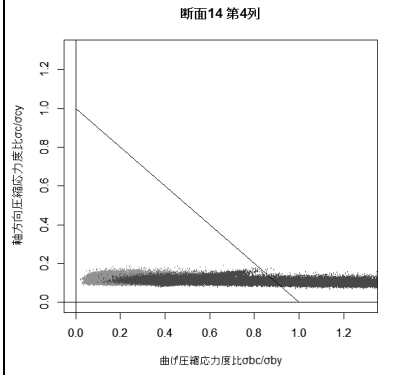
第 2 列



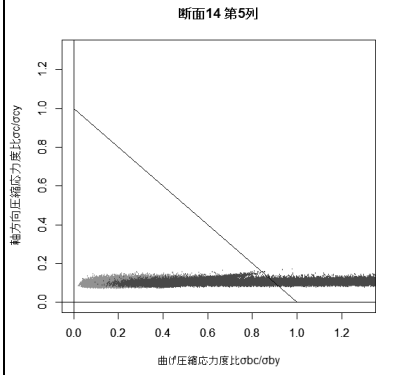
第 3 列



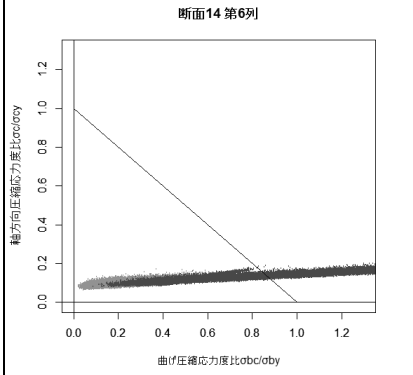
第 4 列



第 5 列

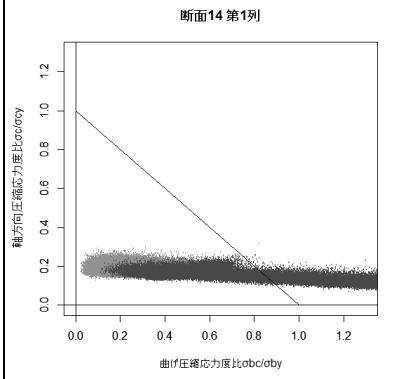


第 6 列

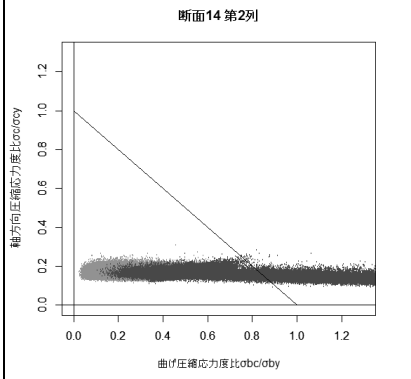


D

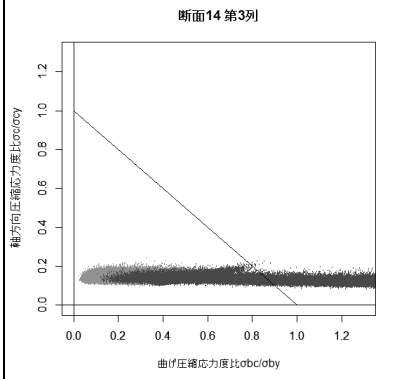
第 1 列



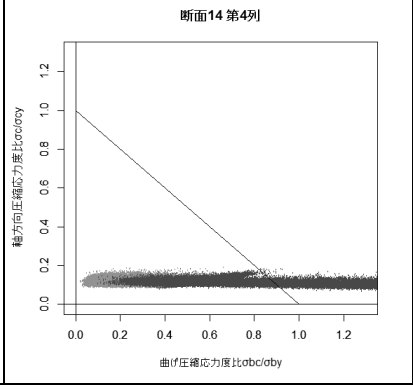
第 2 列



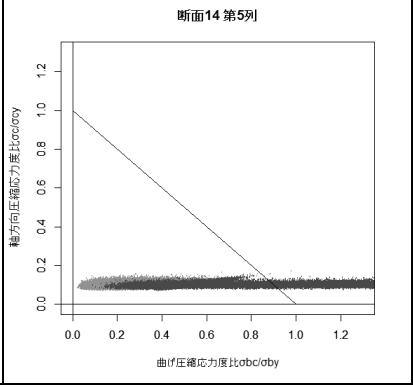
第 3 列



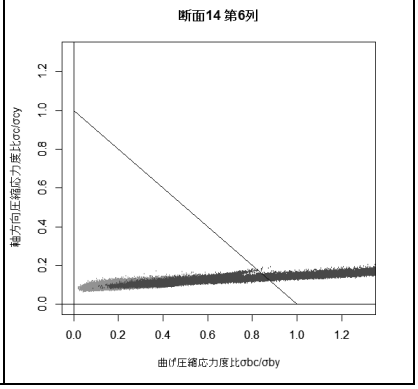
第 4 列



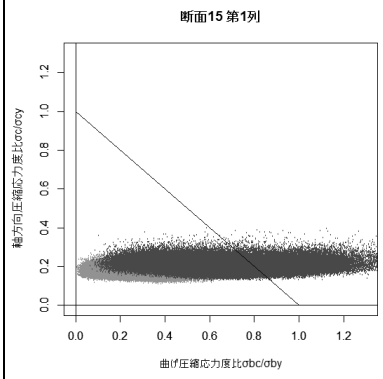
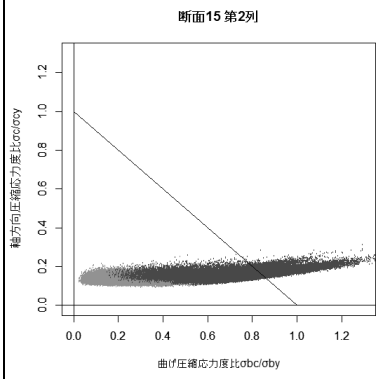
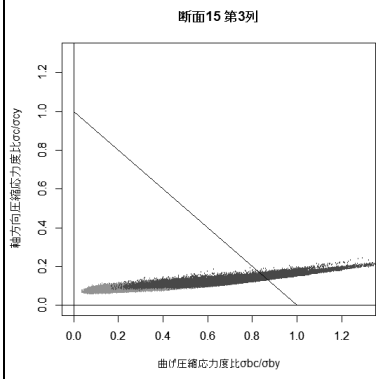
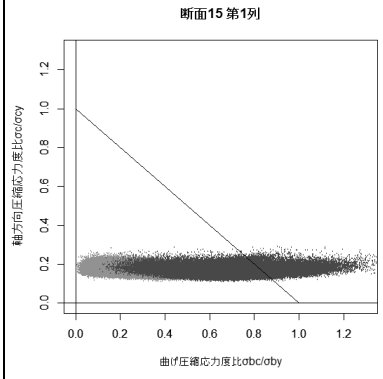
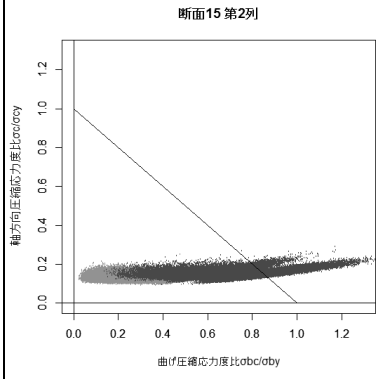
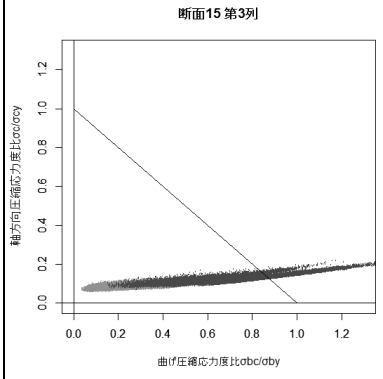
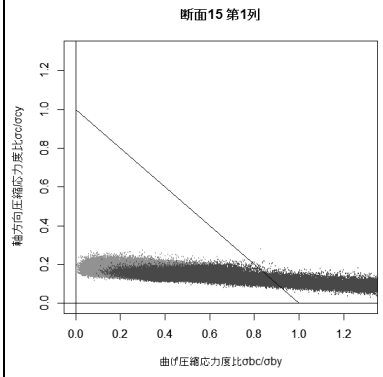
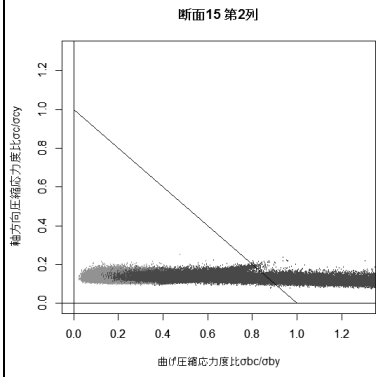
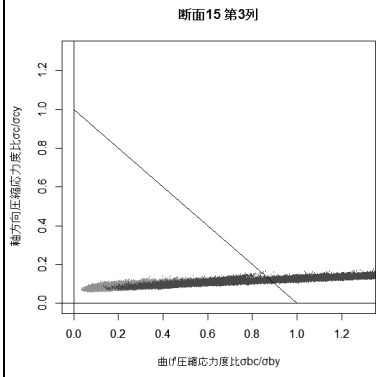
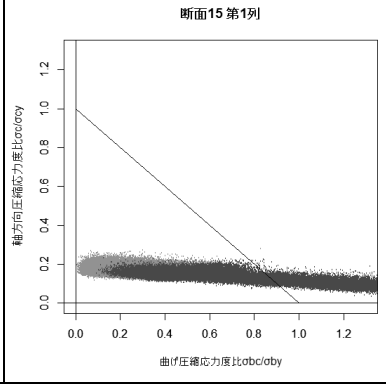
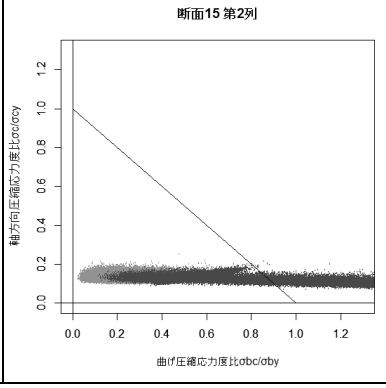
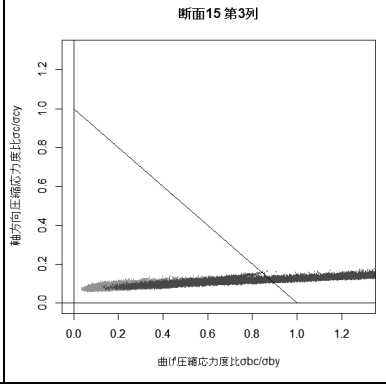
第 5 列



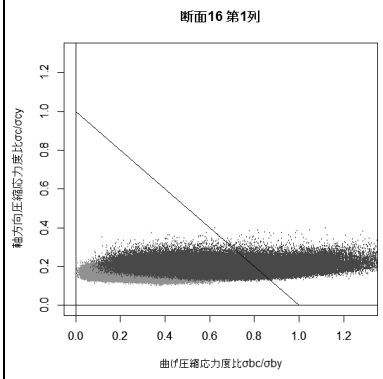
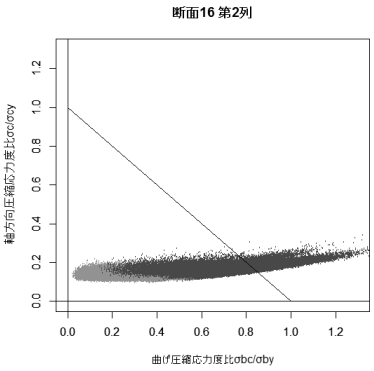
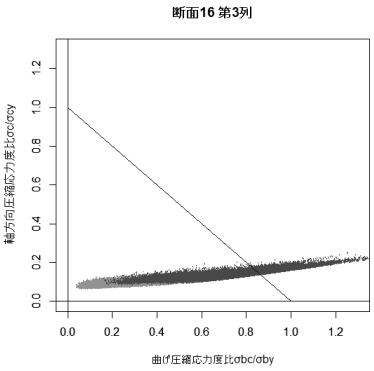
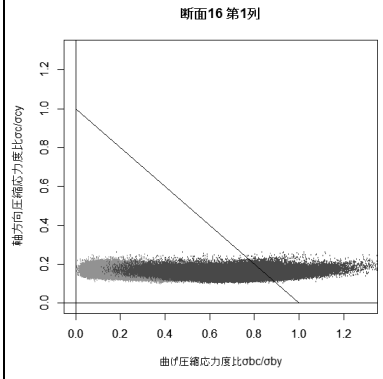
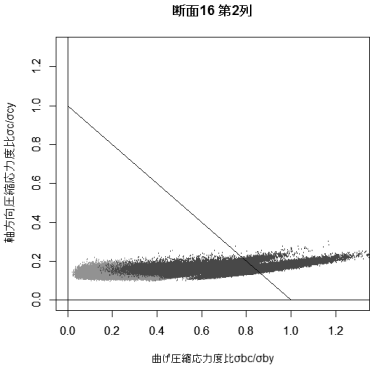
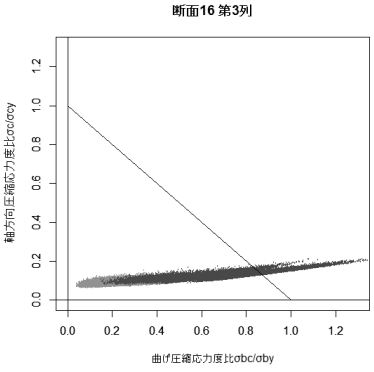
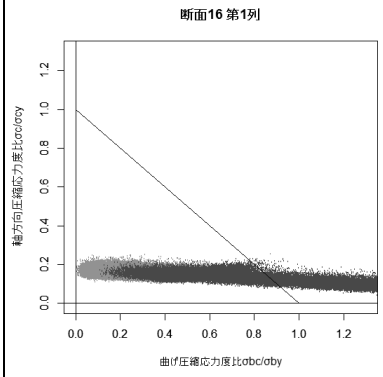
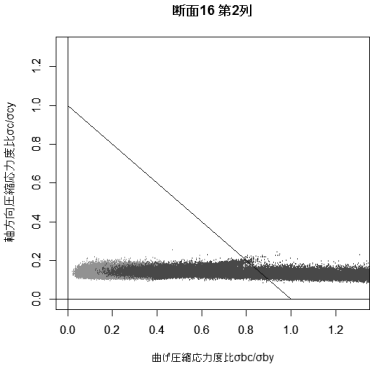
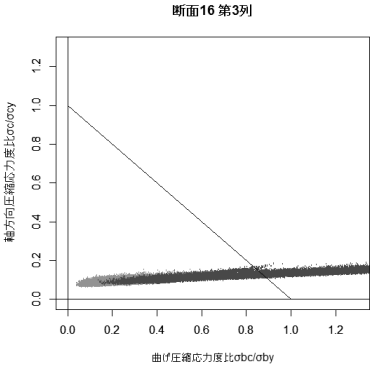
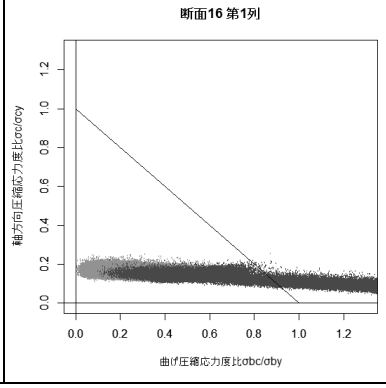
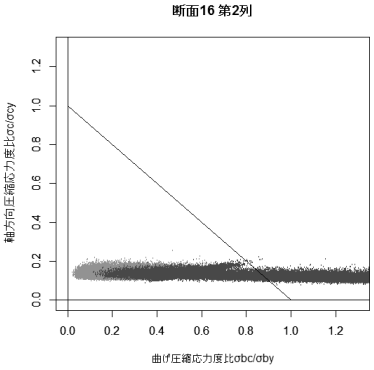
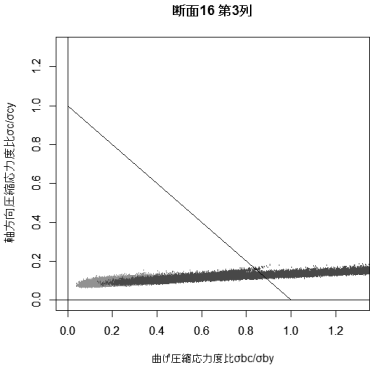
第 6 列



付表 F-50　杭列毎の曲げ圧縮応力度比-軸方向圧縮応力度比分布図(断面⑮)

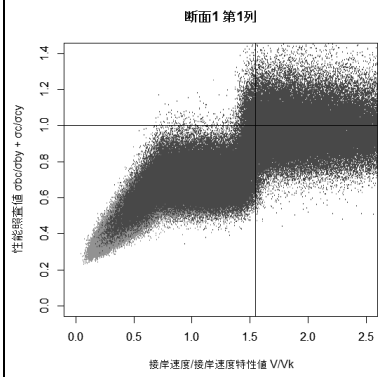
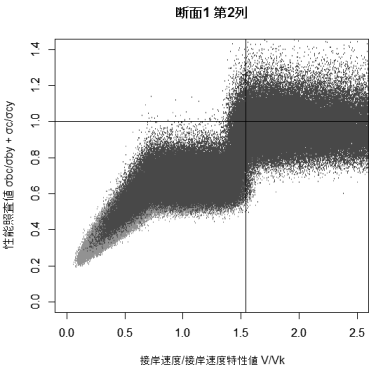
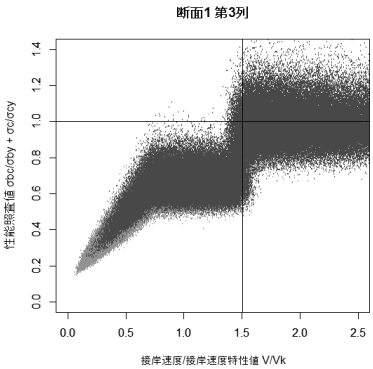
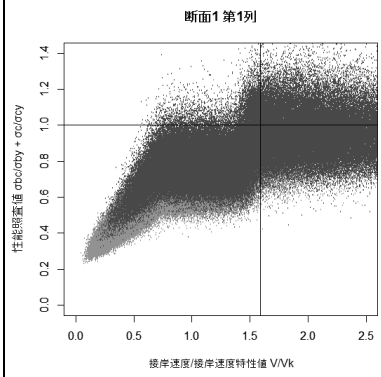
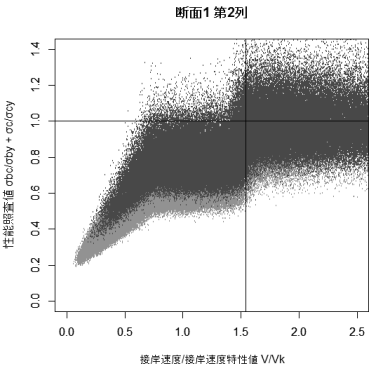
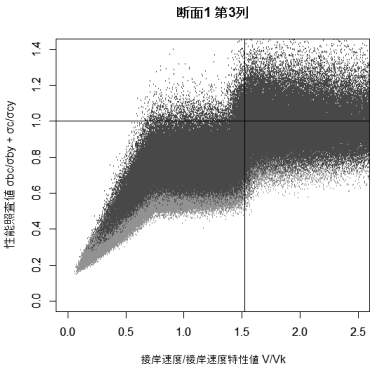
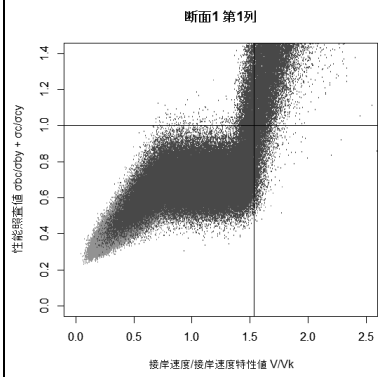
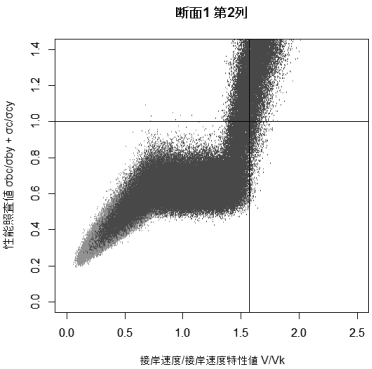
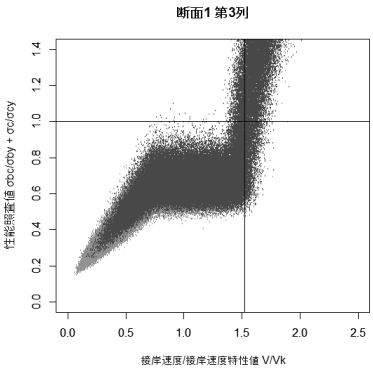
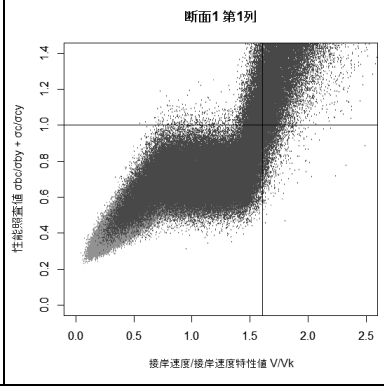
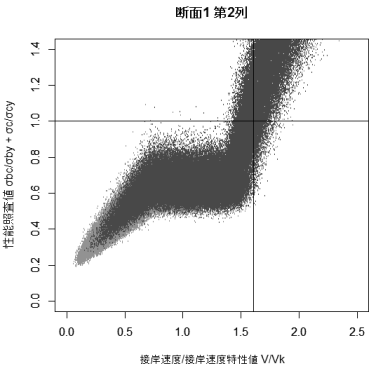
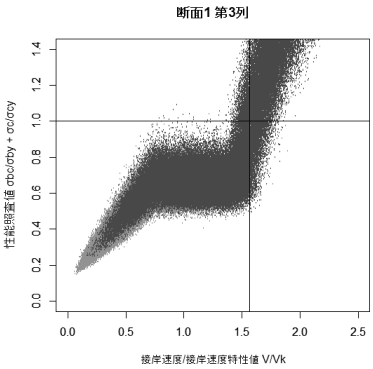
杭列		第 1 列	第 2 列	第 3 列
防舷材反力の設定	A			
	B			
	C			
	D			

付表 F-51　杭列毎の曲げ圧縮応力度比-軸方向圧縮応力度比分布図(断面⑯)

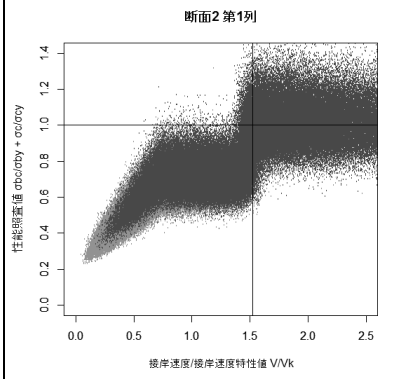
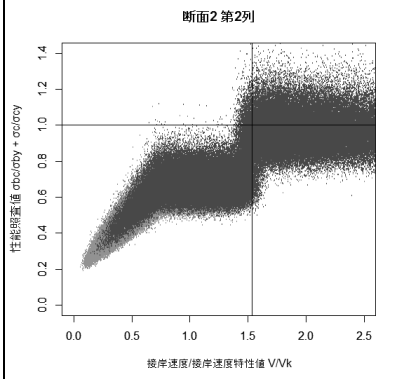
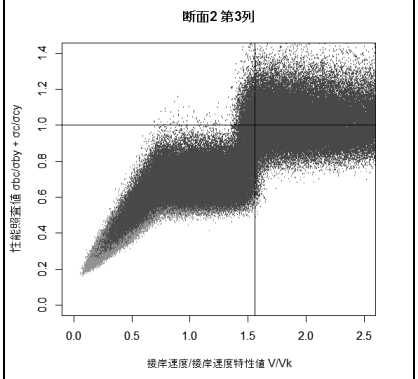
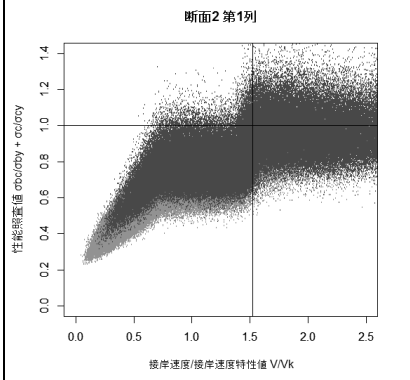
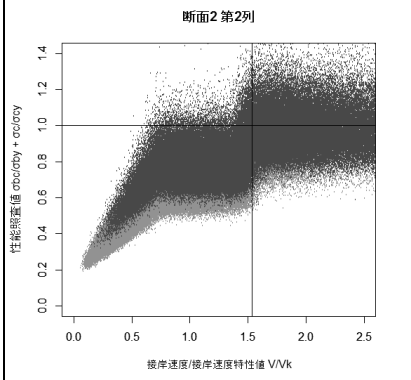
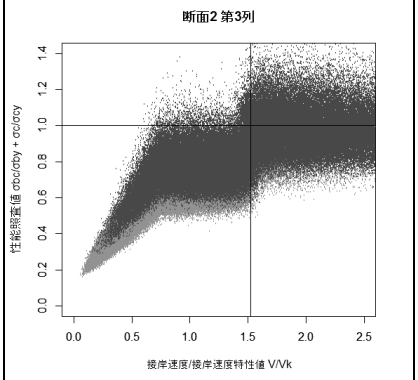
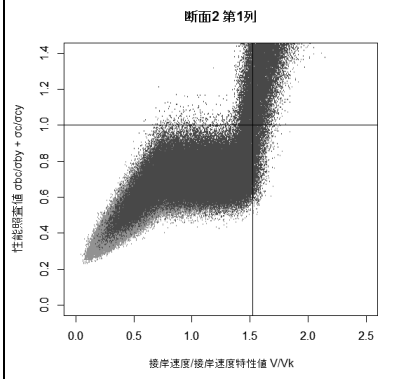
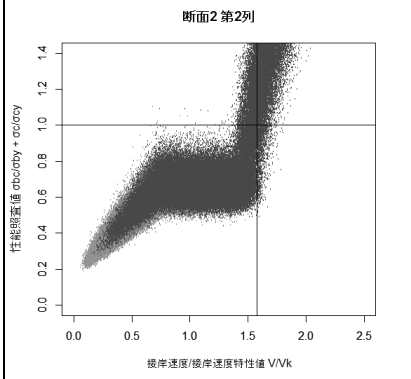
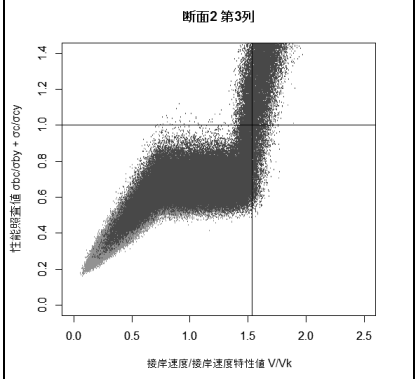
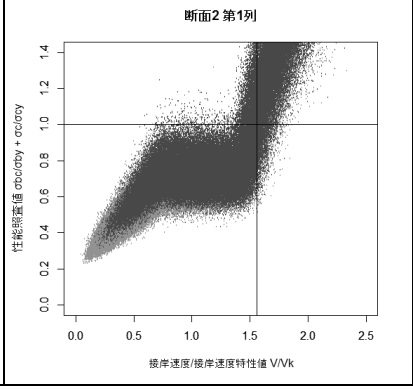
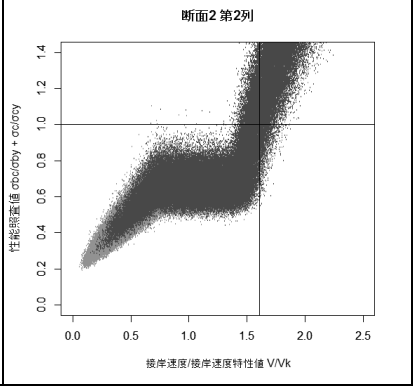
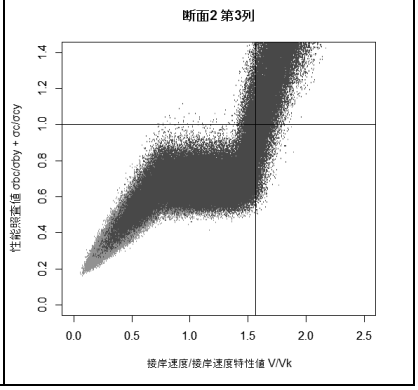
杭列		第１列	第２列	第３列
防舷材反力の設定	A			
	B			
	C			
	D			

③接岸速度-性能照査値分布図

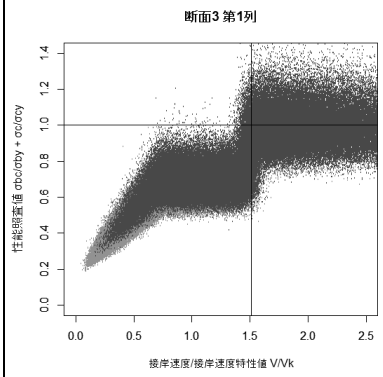
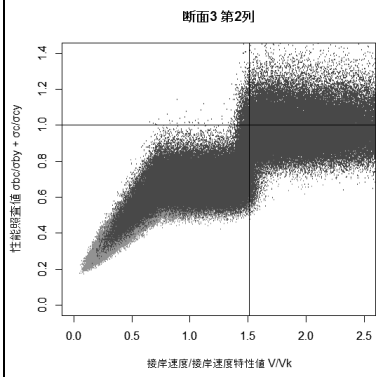
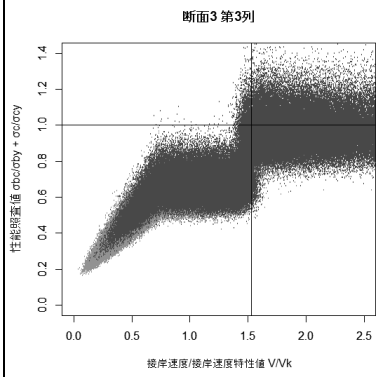
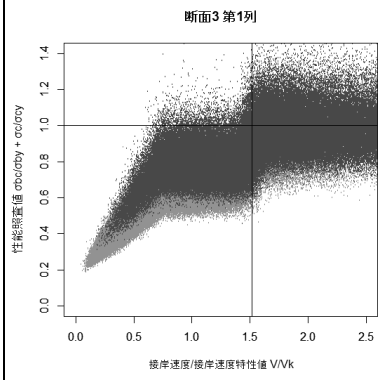
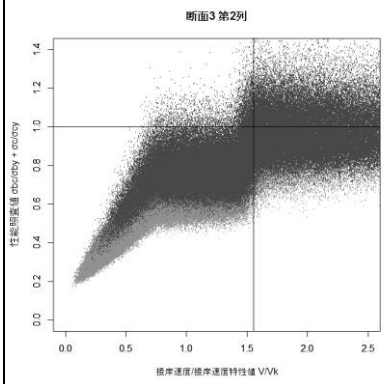
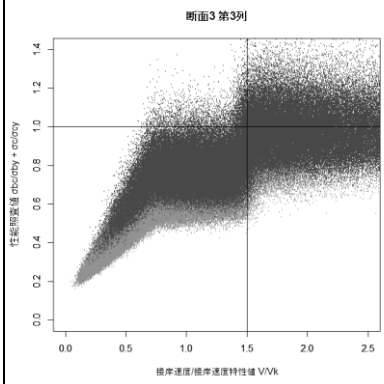
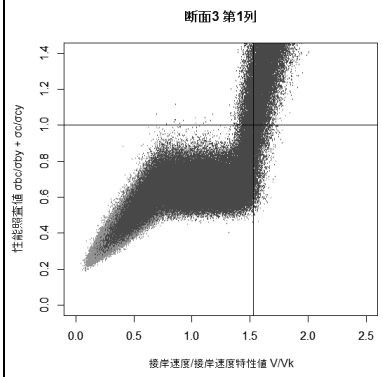
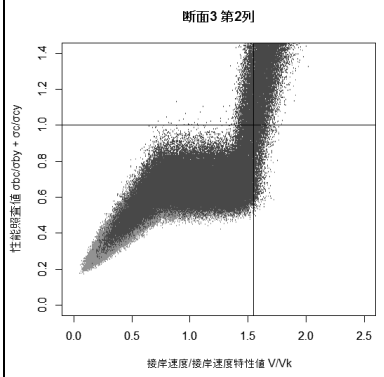
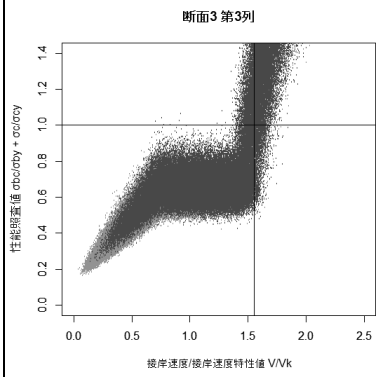
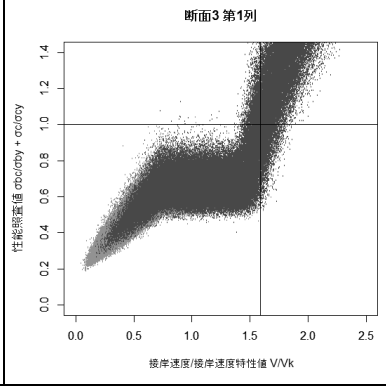
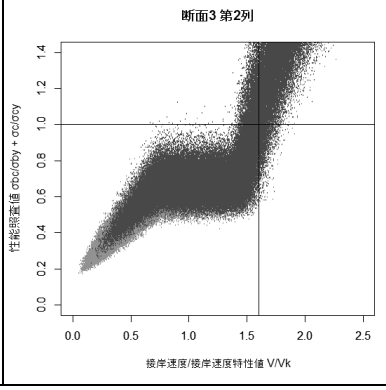
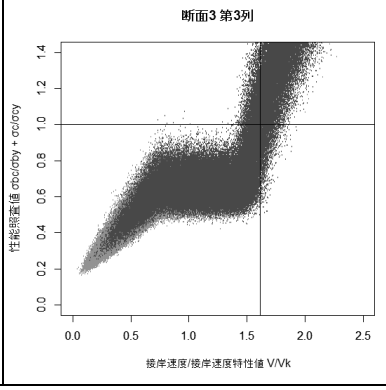
付表 F-52　接岸速度-性能照査値分布図(断面①)

杭列		第 1 列	第 2 列	第 3 列
防舷材反力の設定	A			
	B			
	C			
	D			

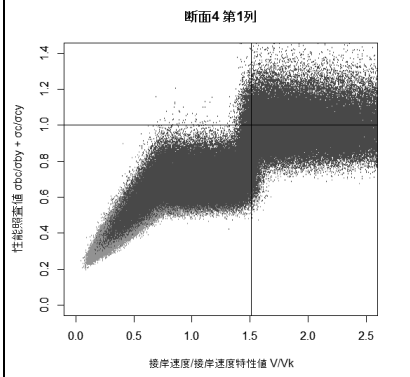
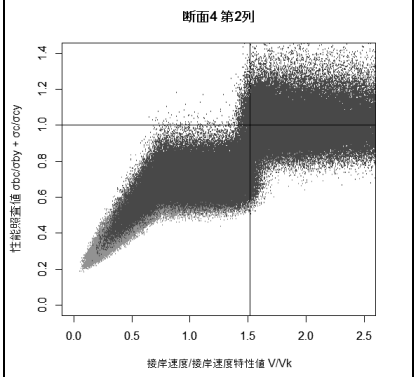
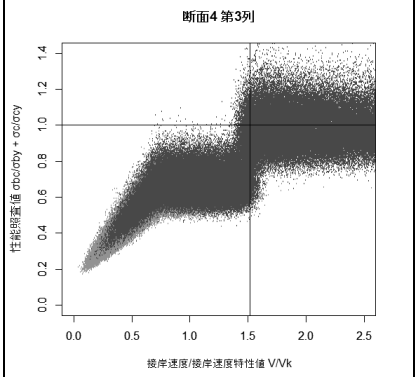
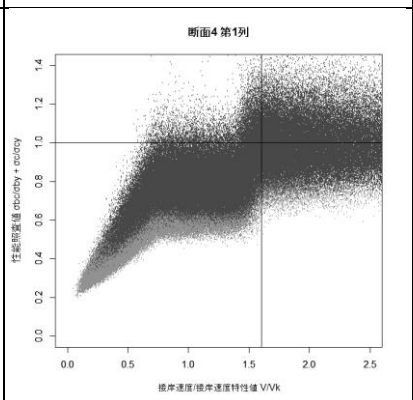
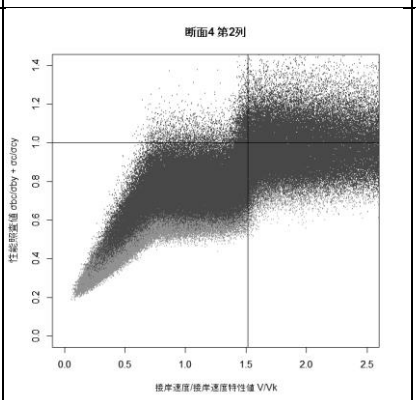
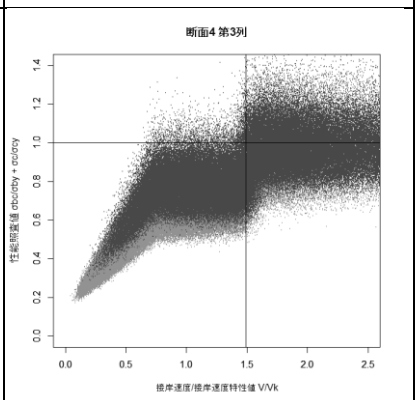
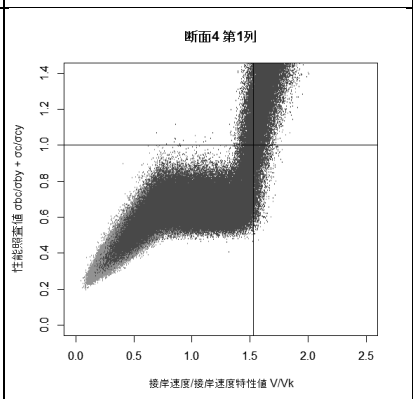
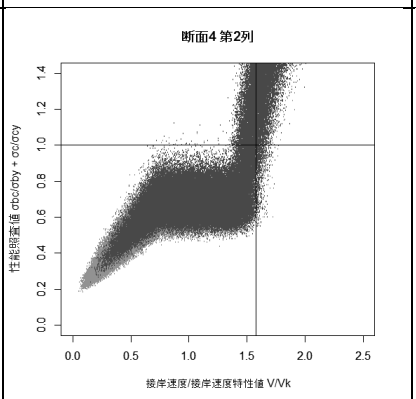
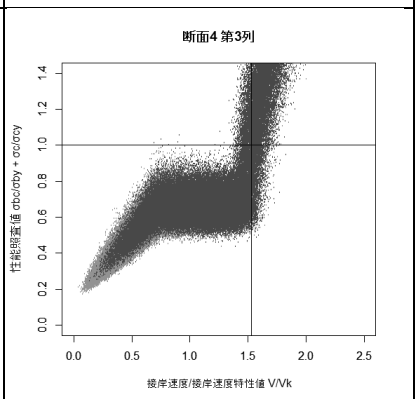
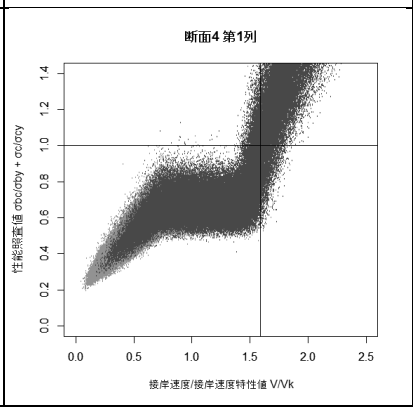
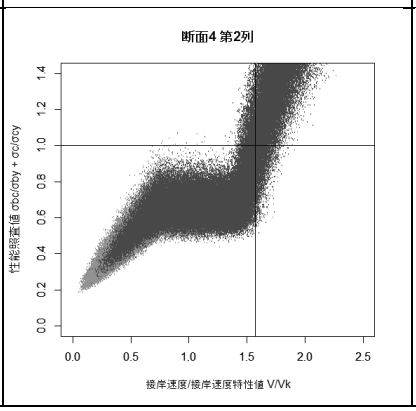
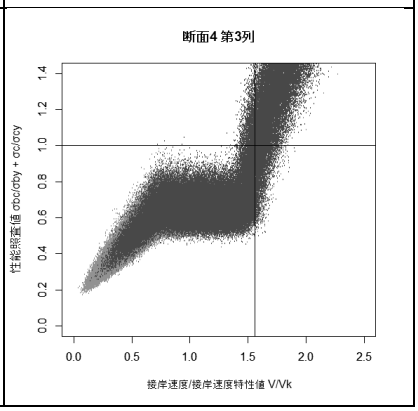
付表 F-53　接岸速度-性能照査値分布図(断面②)

杭列		第 1 列	第 2 列	第 3 列
防舷材反力の設定	A			
	B			
	C			
	D			

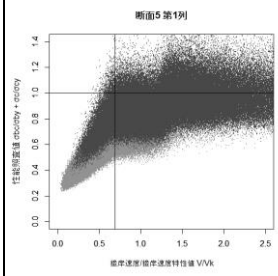
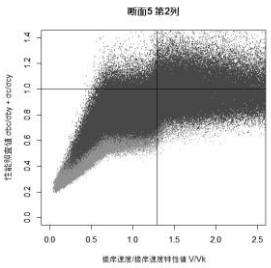
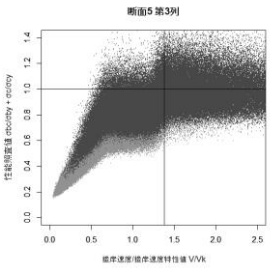
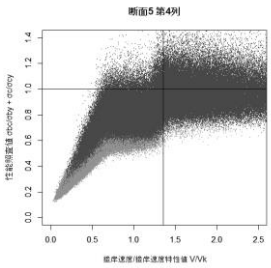
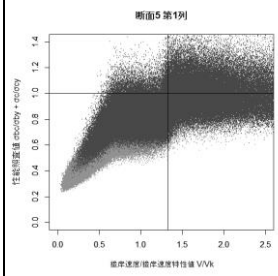
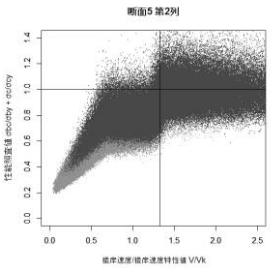
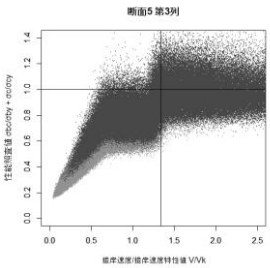
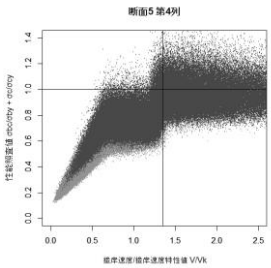
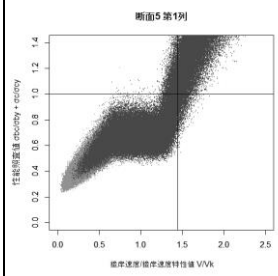
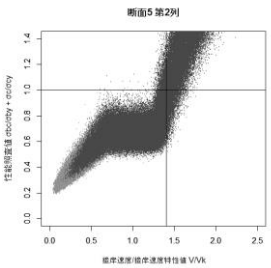
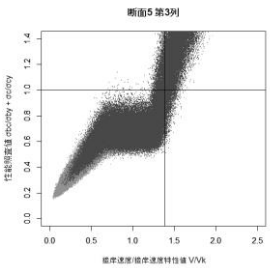
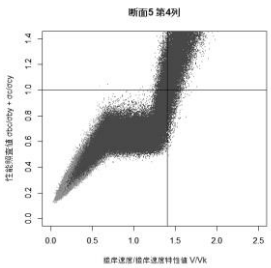
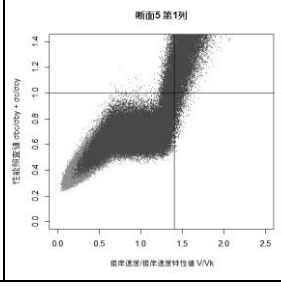
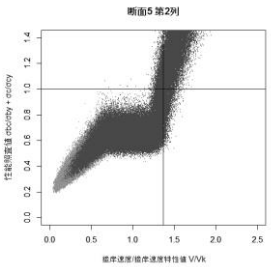
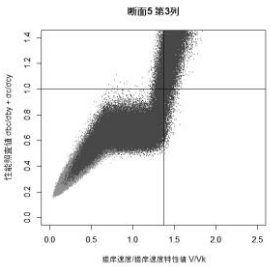
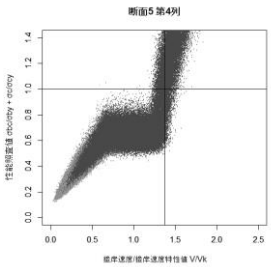
付表 F-54　接岸速度-性能照査値分布図(断面③)

杭列		第 1 列	第 2 列	第 3 列
防舷材反力の設定	A			
	B			
	C			
	D			

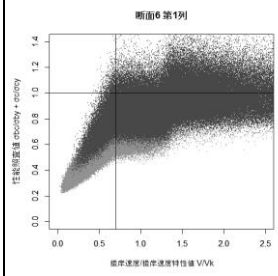
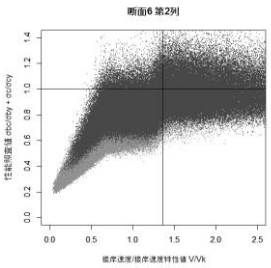
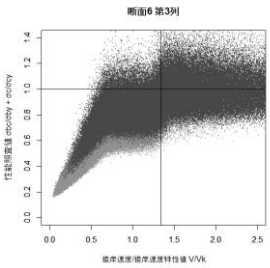
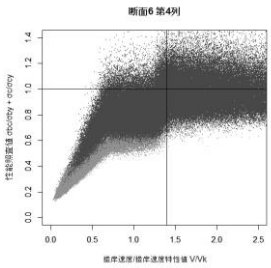
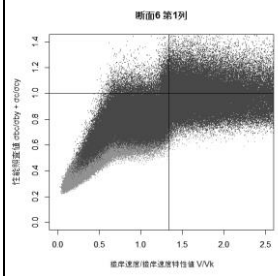
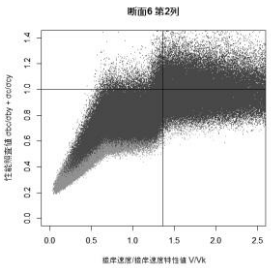
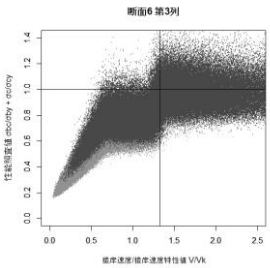
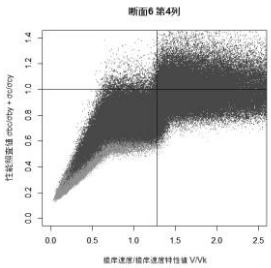
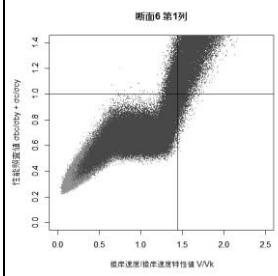
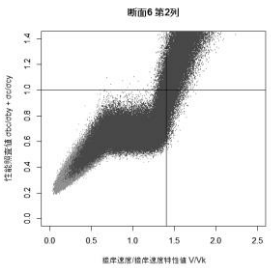
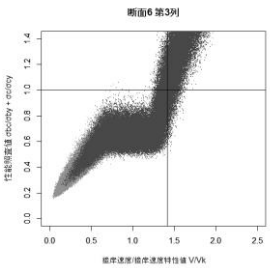
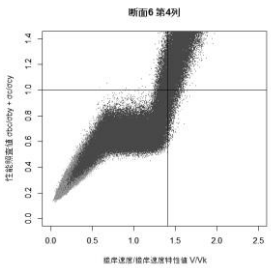
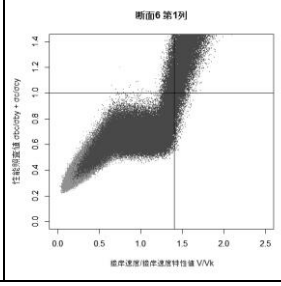
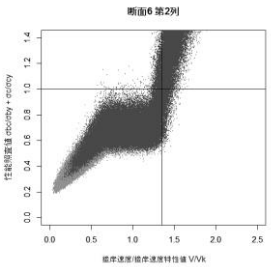
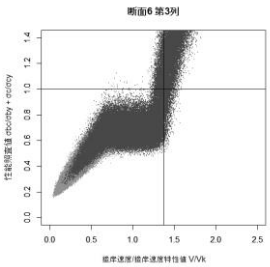
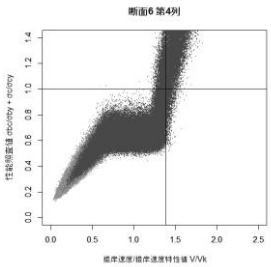
付表 F-55　接岸速度-性能照査値分布図(断面④)

杭列		第 1 列	第 2 列	第 3 列
防舷材反力の設定	A			
	B			
	C			
	D			

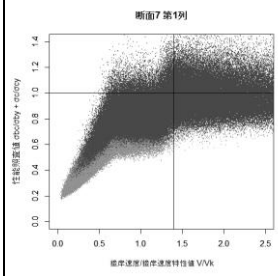
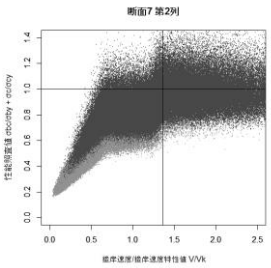
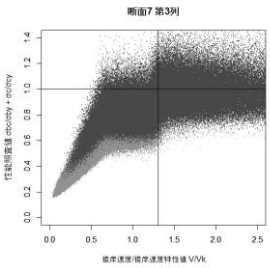
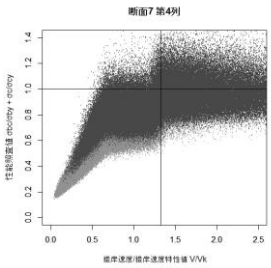
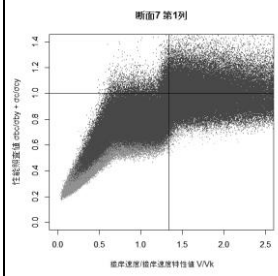
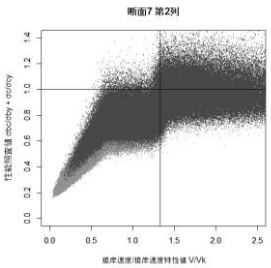
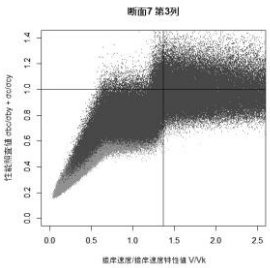
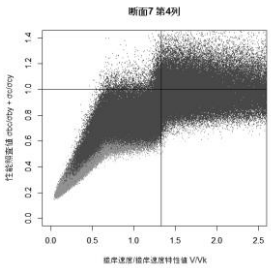
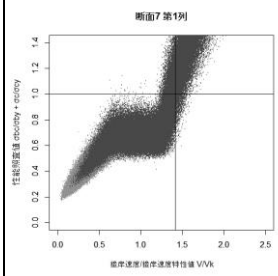
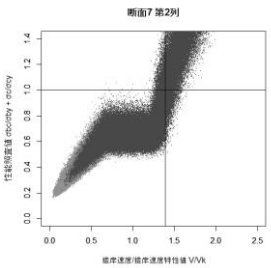
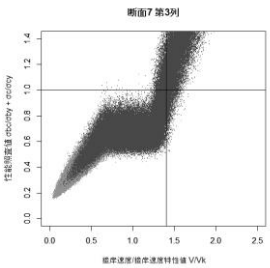
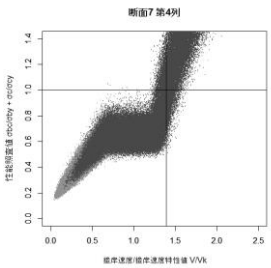
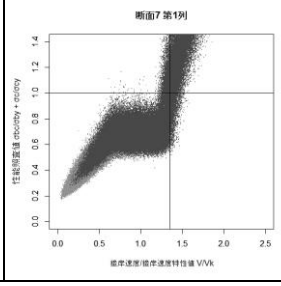
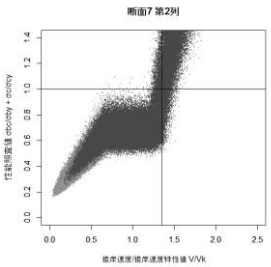
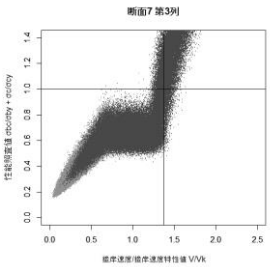
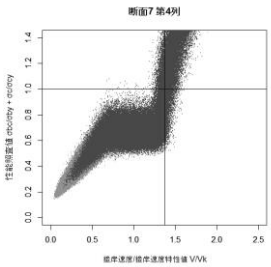
付表 F-56　接岸速度-性能照査値分布図(断面⑤)

杭列		第 1 列	第 2 列	第 3 列	第 4 列
防舷材反力の設定	A				
	B				
	C				
	D				

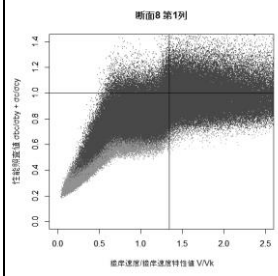
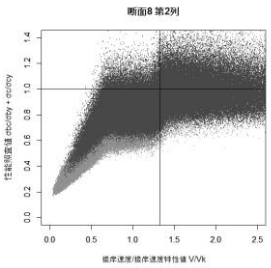
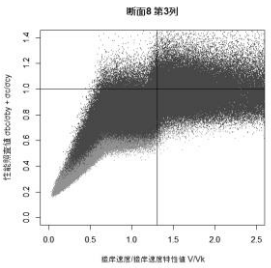
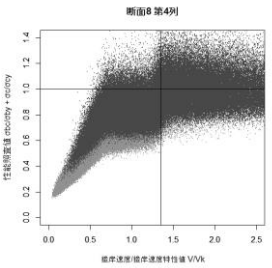
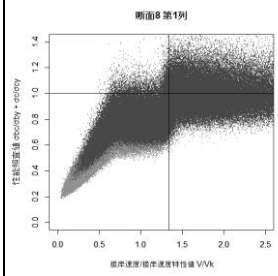
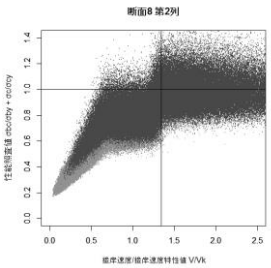
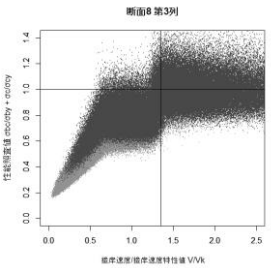
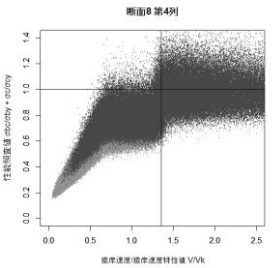
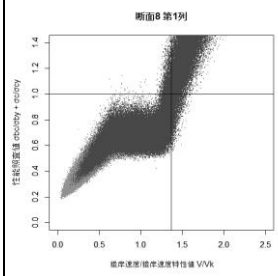
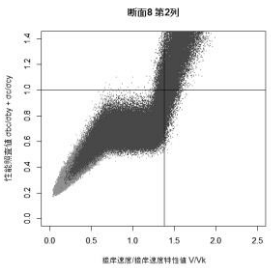
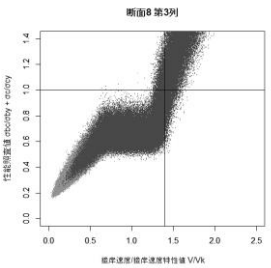
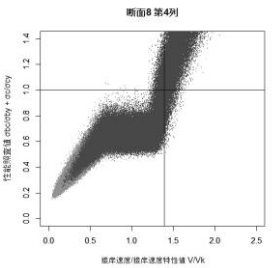
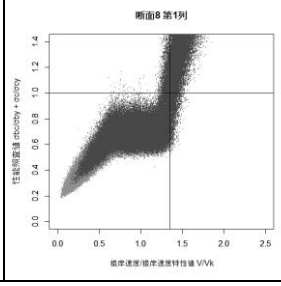
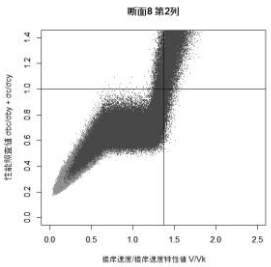
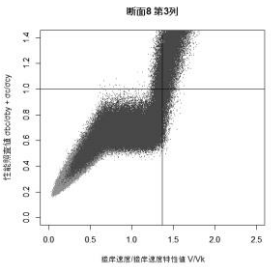
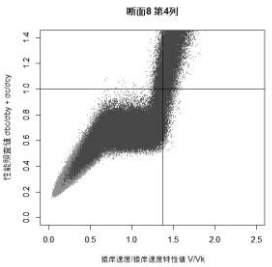
付表 F-57　接岸速度-性能照査値分布図(断面⑥)

杭列		第１列	第２列	第３列	第４列
防舷材反力の設定	A				
	B				
	C				
	D				

付表 F-58　接岸速度-性能照査値分布図(断面⑦)

杭列		第 1 列	第 2 列	第 3 列	第 4 列
防舷材反力の設定	A				
	B				
	C				
	D				

付表 F-59　接岸速度-性能照査値分布図(断面⑧)

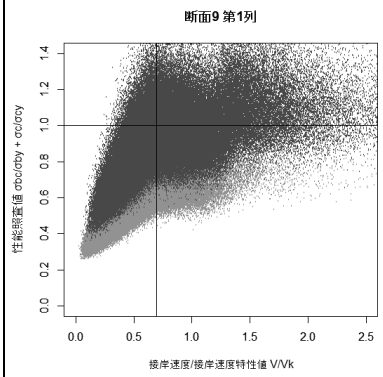
杭列		第１列	第２列	第３列	第４列
防舷材反力の設定	A				
	B				
	C				
	D				

付表 F-60　接岸速度-性能照査値分布図(断面⑨ 設定 A および設定 B)

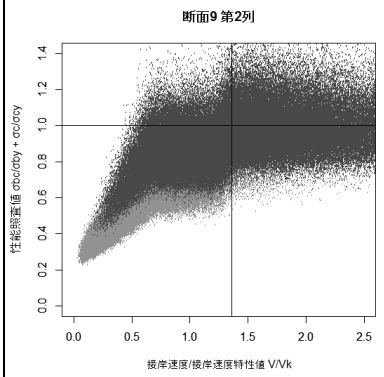
防舷材反力の設定

A

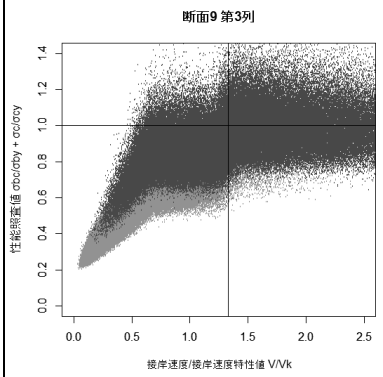
第 1 列



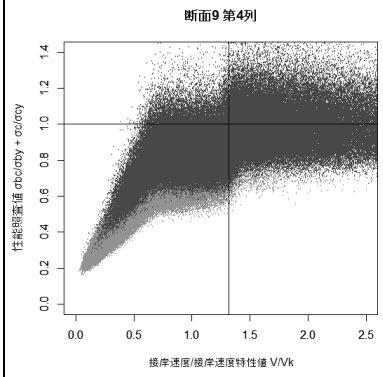
第 2 列



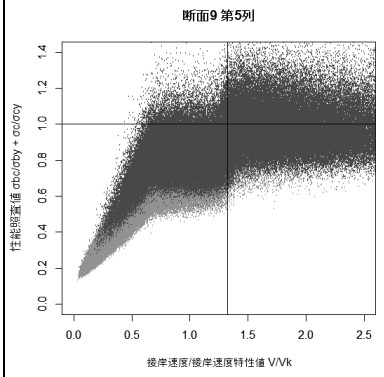
第 3 列



第 4 列

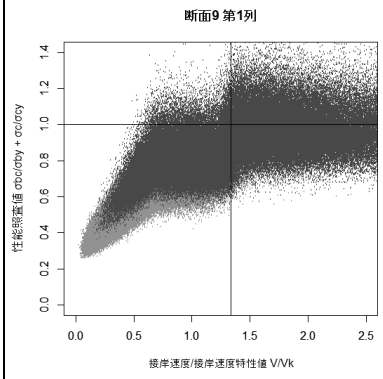


第 5 列

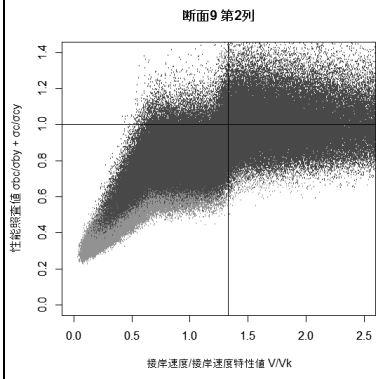


B

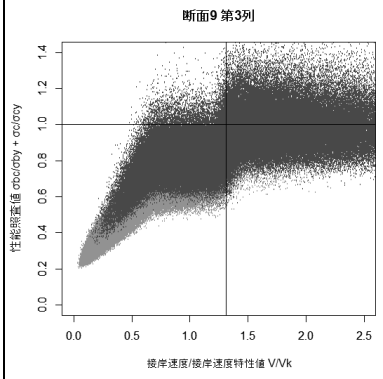
第 1 列



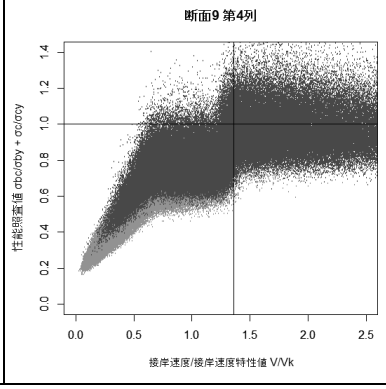
第 2 列



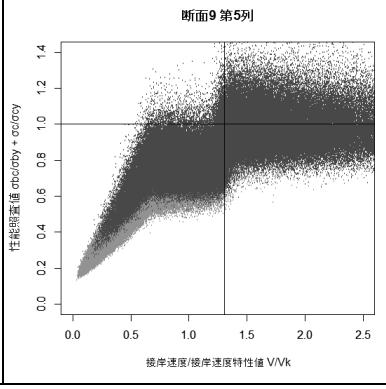
第 3 列



第 4 列



第 5 列

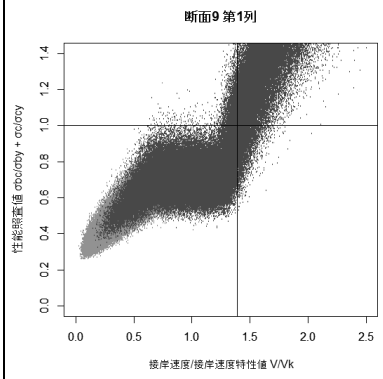


付表 F-61　接岸速度-性能照査値分布図(断面⑨ 設定 C および設定 D)

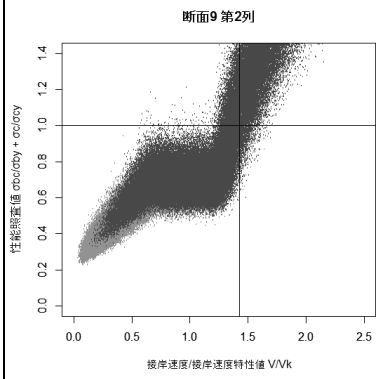
防舷材反力の設定

C

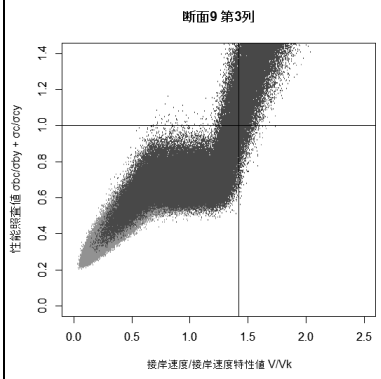
第 1 列



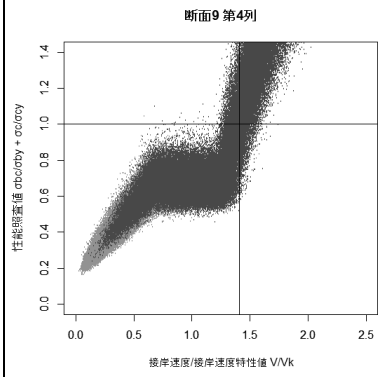
第 2 列



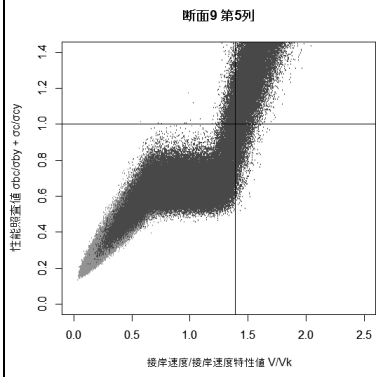
第 3 列



第 4 列

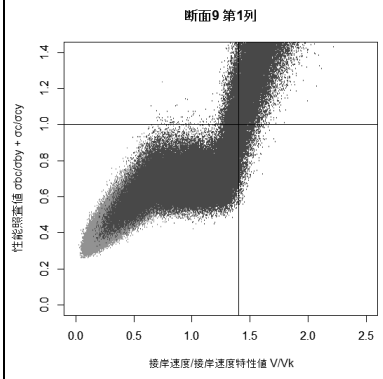


第 5 列

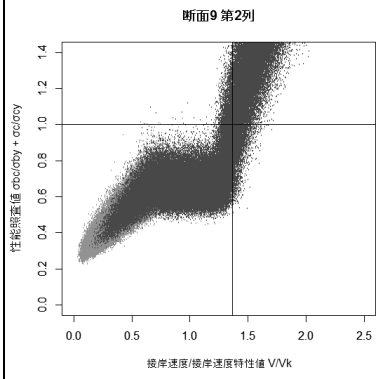


D

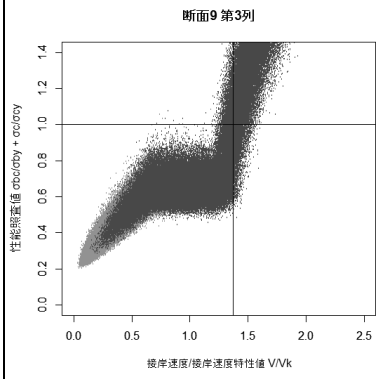
第 1 列



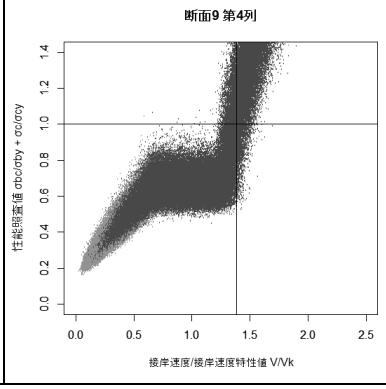
第 2 列



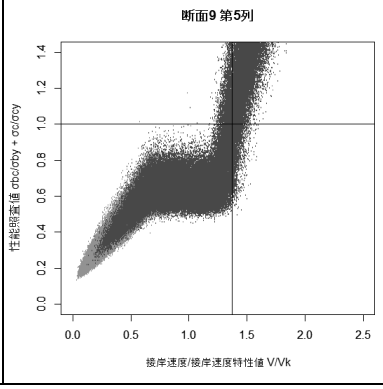
第 3 列



第 4 列



第 5 列

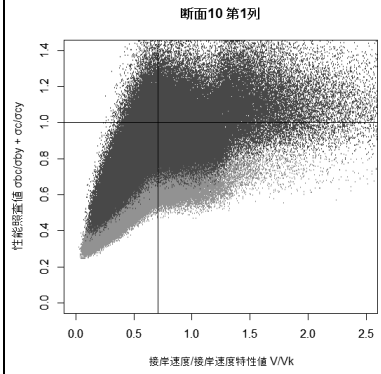


付表 F-62　接岸速度-性能照査値分布図(断面⑩ 設定 A および設定 B)

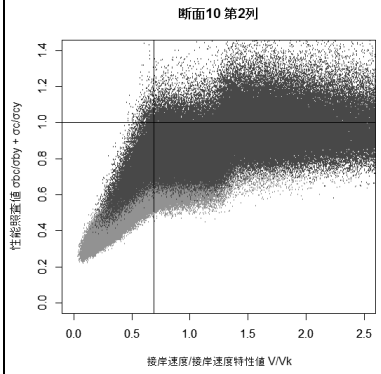
防舷材反力の設定

A

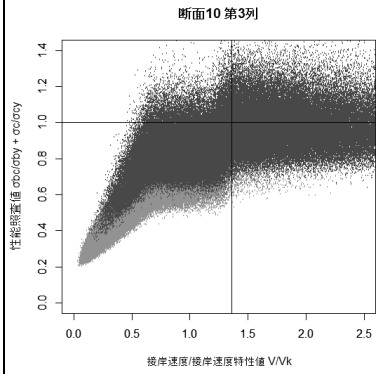
第 1 列



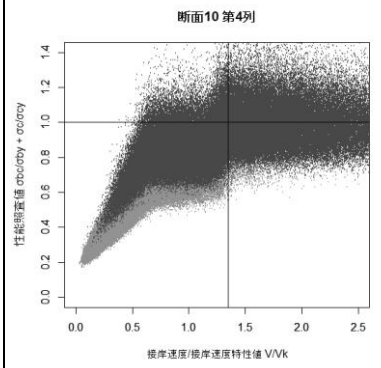
第 2 列



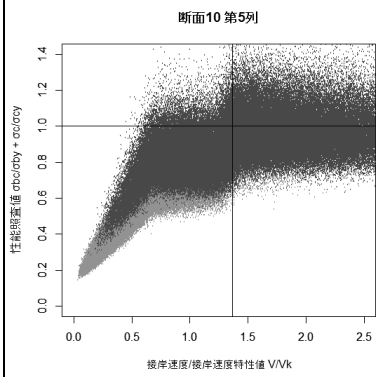
第 3 列



第 4 列

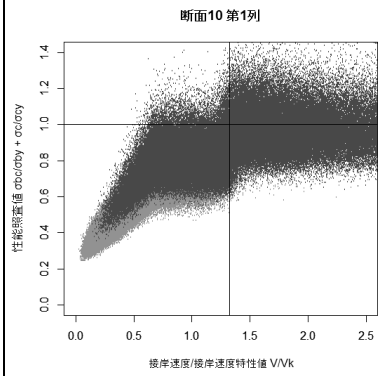


第 5 列

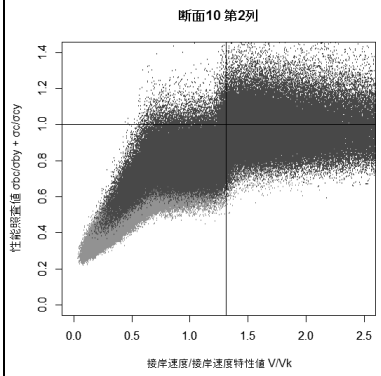


B

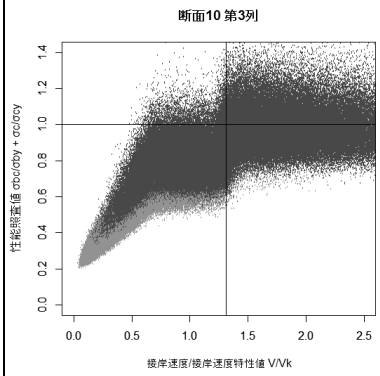
第 1 列



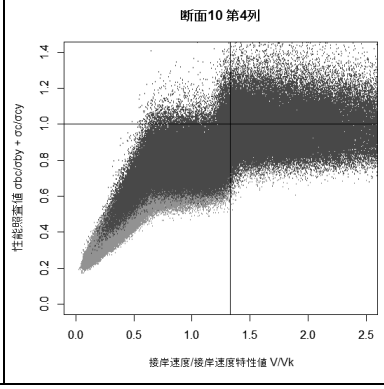
第 2 列



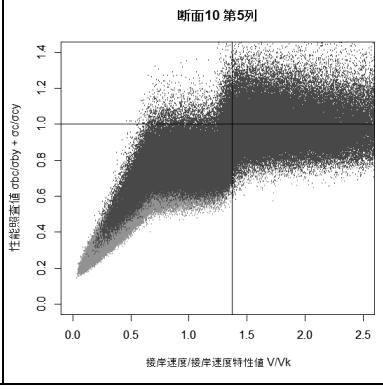
第 3 列



第 4 列



第 5 列

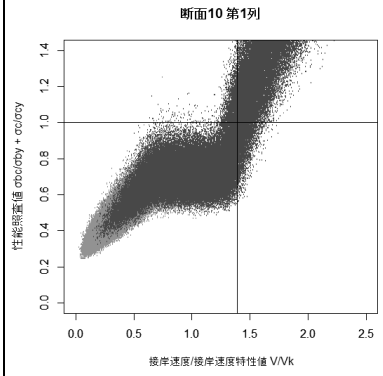


付表 F-63　接岸速度-性能照査値分布図(断面⑩ 設定 C および設定 D)

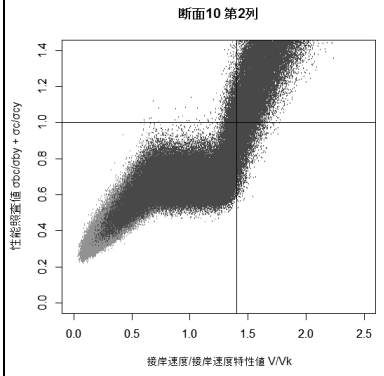
防舷材反力の設定

C

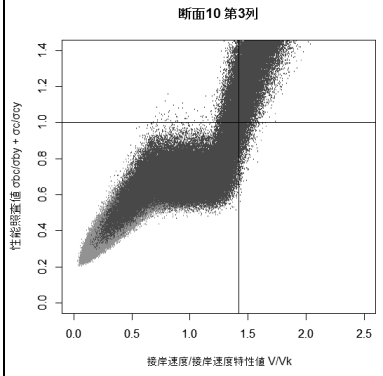
第 1 列



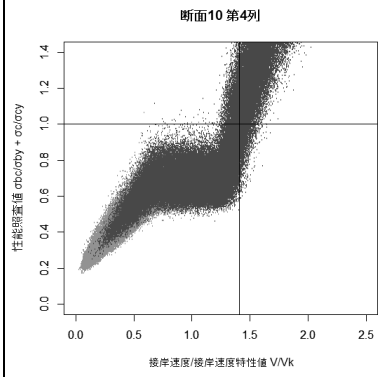
第 2 列



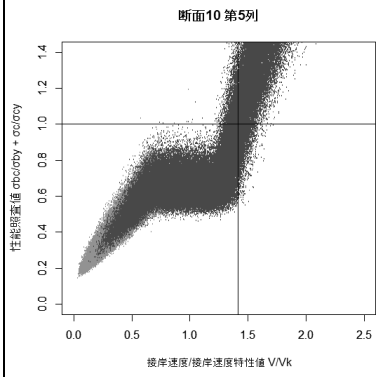
第 3 列



第 4 列

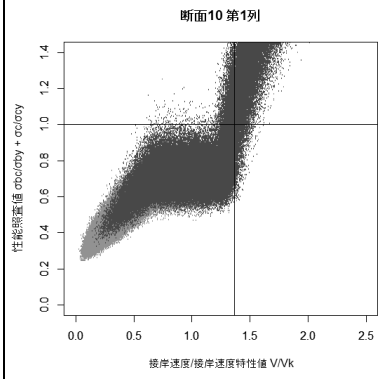


第 5 列

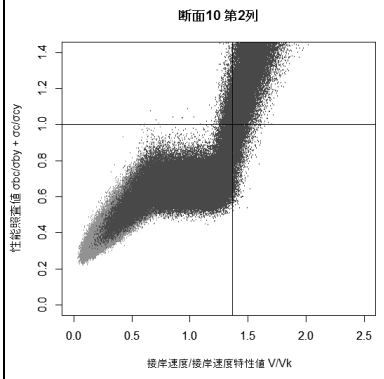


D

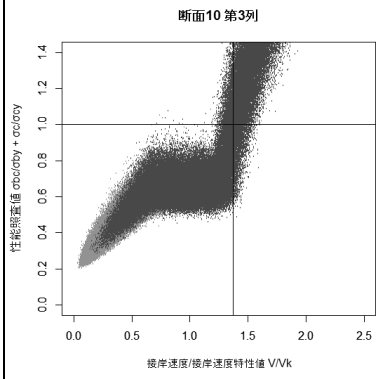
第 1 列



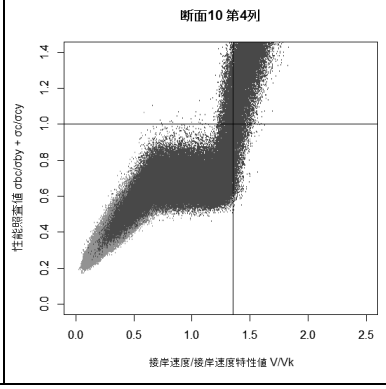
第 2 列



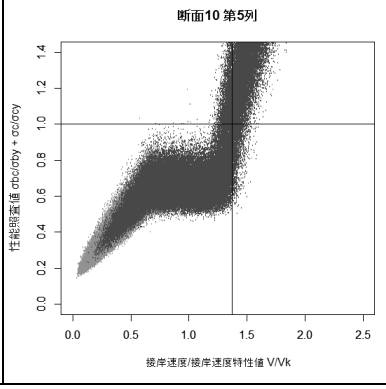
第 3 列



第 4 列



第 5 列

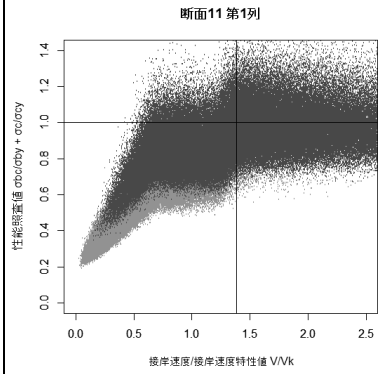


付表 F-64　接岸速度-性能照査値分布図(断面⑪ 設定 A および設定 B)

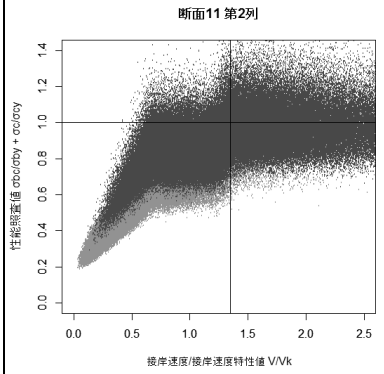
防舷材反力の設定

A

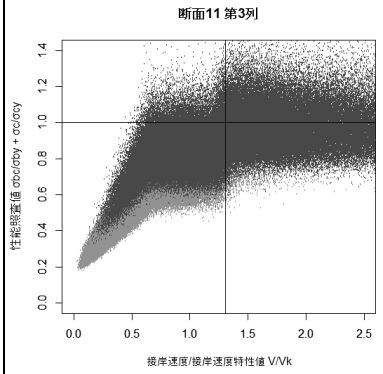
第 1 列



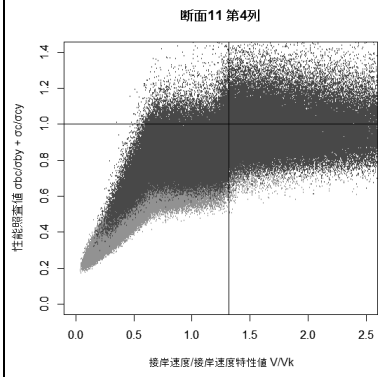
第 2 列



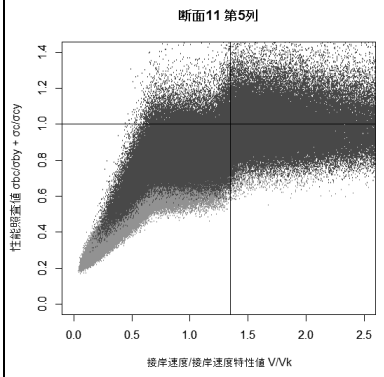
第 3 列



第 4 列

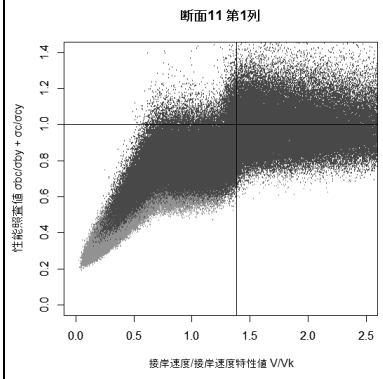


第 5 列

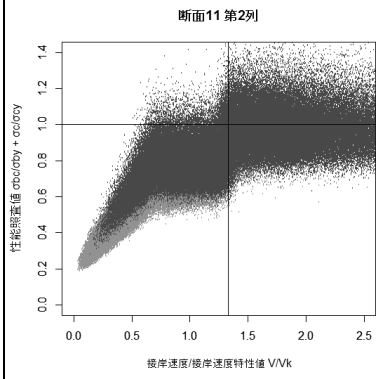


B

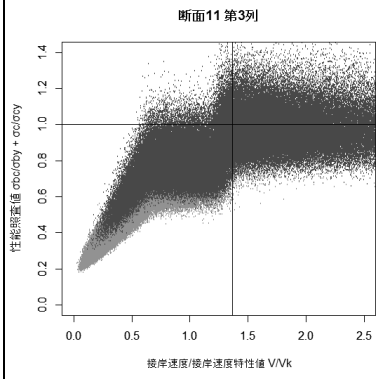
第 1 列



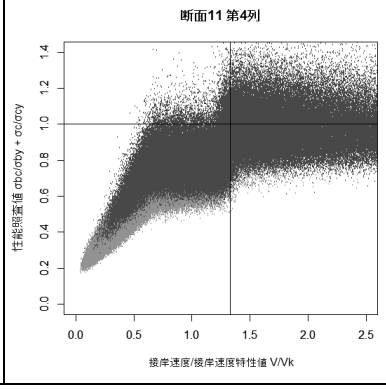
第 2 列



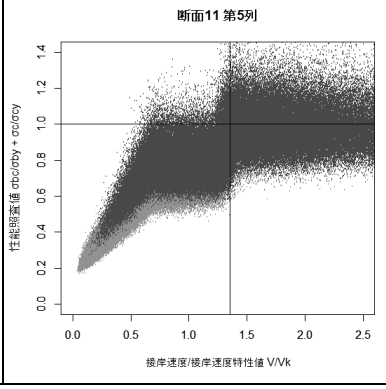
第 3 列



第 4 列



第 5 列

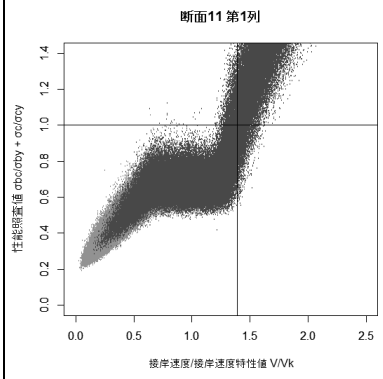


付表 F-65　接岸速度-性能照査値分布図(断面⑪ 設定 C および設定 D)

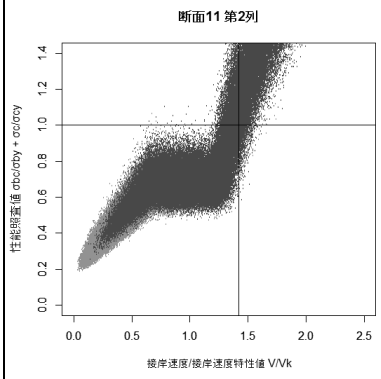
防舷材反力の設定

C

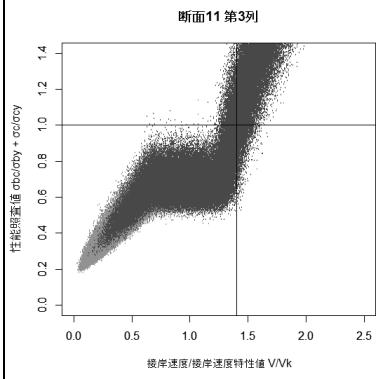
第 1 列



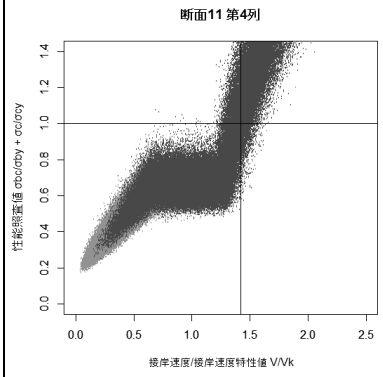
第 2 列



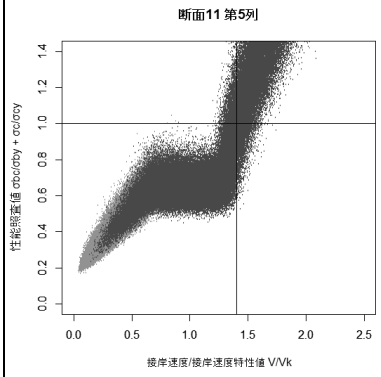
第 3 列



第 4 列

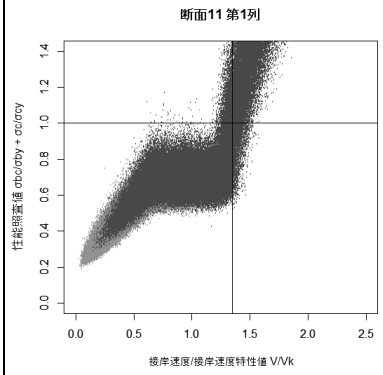


第 5 列

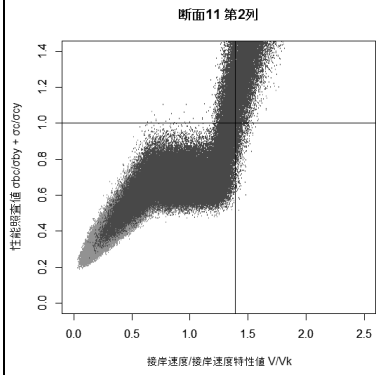


D

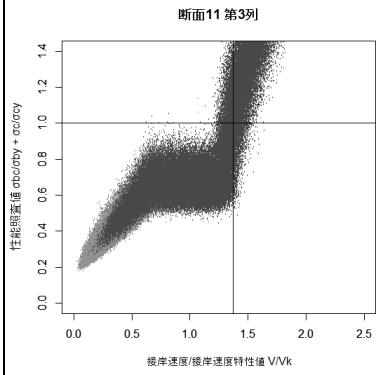
第 1 列



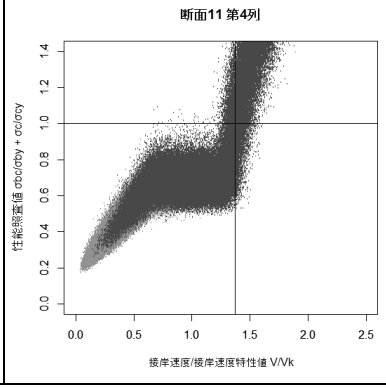
第 2 列



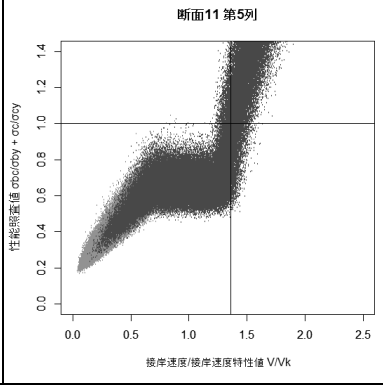
第 3 列



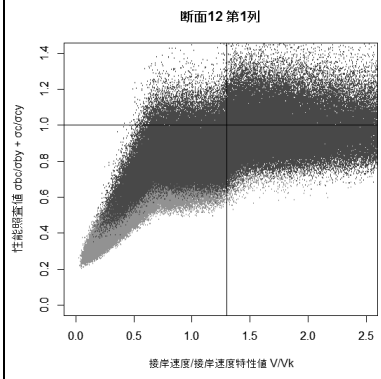
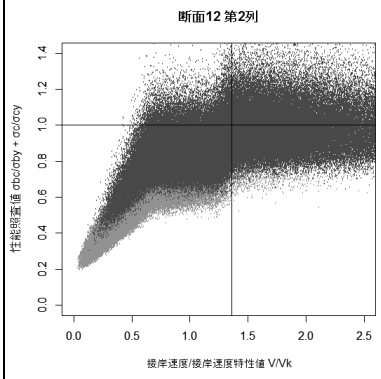
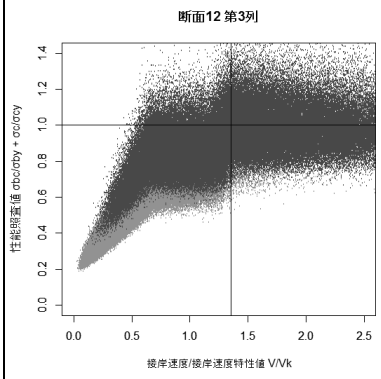
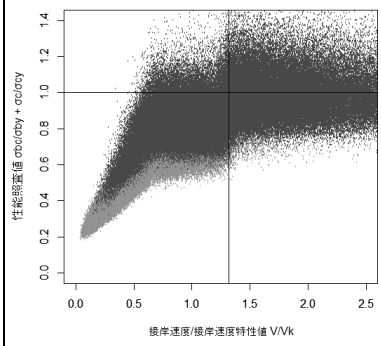
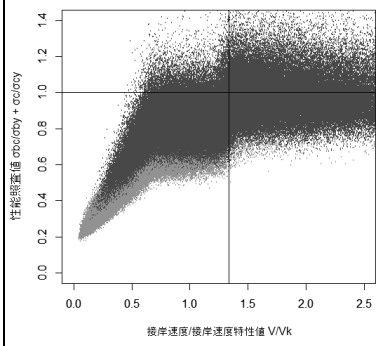
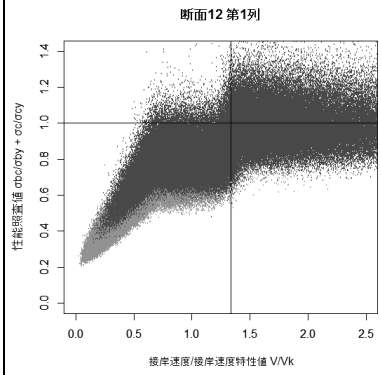
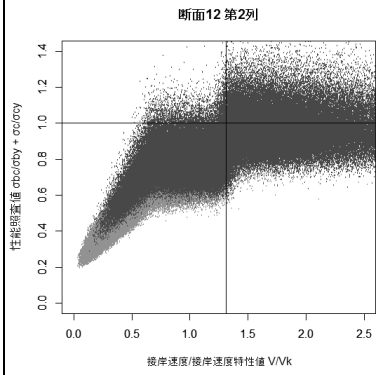
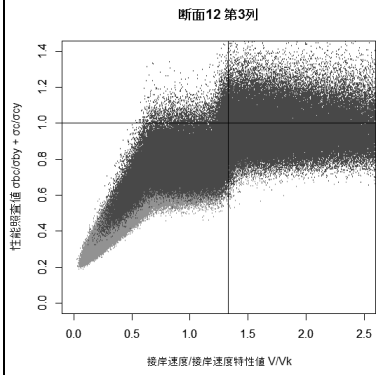
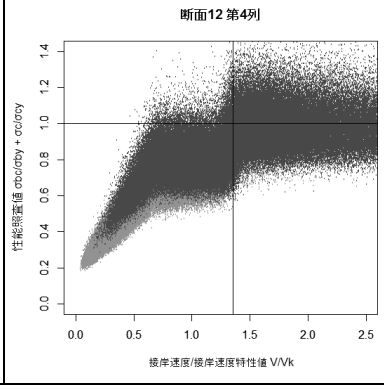
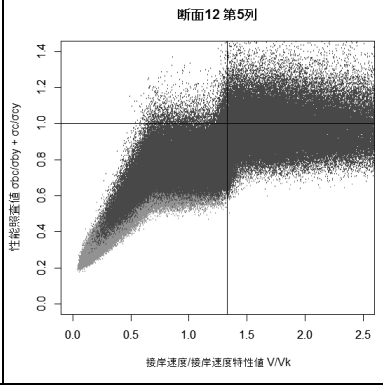
第 4 列



第 5 列



付表 F-66　接岸速度-性能照査値分布図(断面⑫ 設定 A および設定 B)

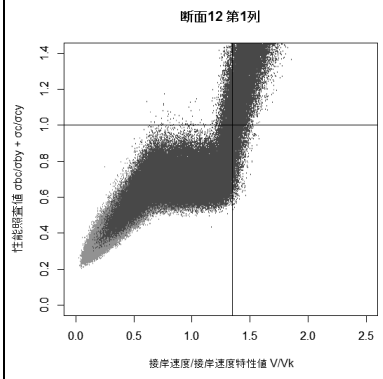
防舷材反力の設定	A	第 1 列	第 2 列	第 3 列
				
		第 4 列	第 5 列	
				
	B	第 1 列	第 2 列	第 3 列
				
		第 4 列	第 5 列	
				

付表 F-67　接岸速度-性能照査値分布図(断面⑫ 設定 C および設定 D)

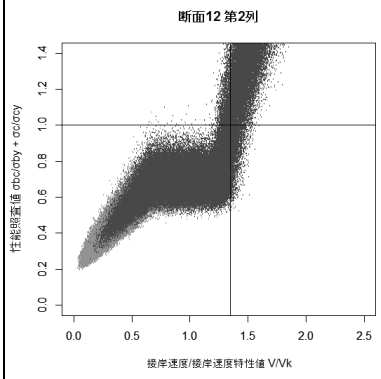
防舷材反力の設定

C

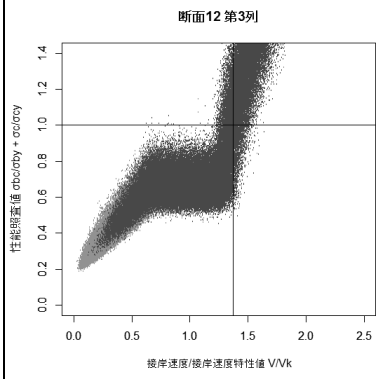
第 1 列



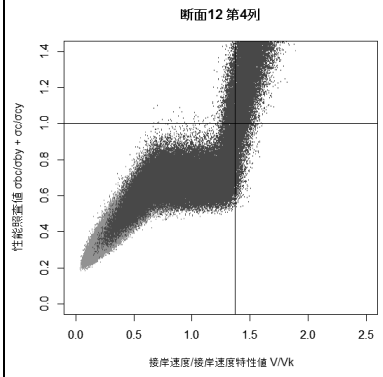
第 2 列



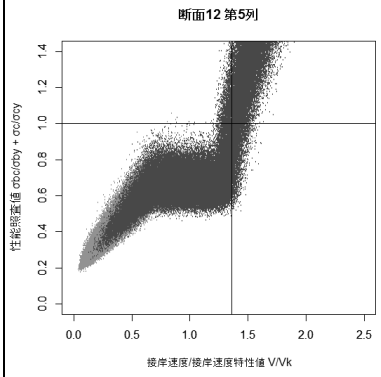
第 3 列



第 4 列

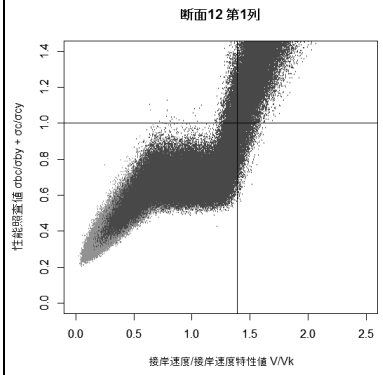


第 5 列

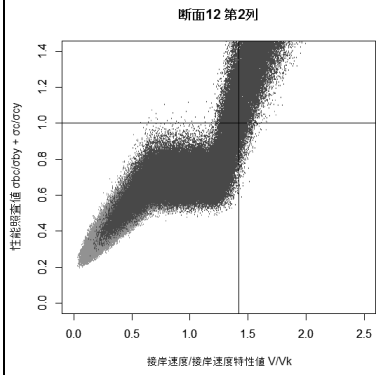


D

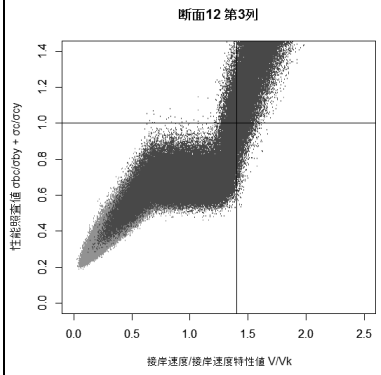
第 1 列



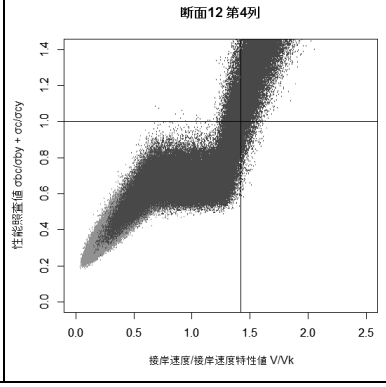
第 2 列



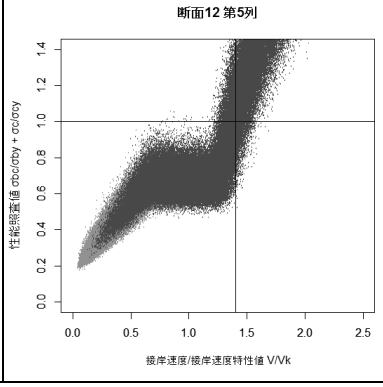
第 3 列



第 4 列



第 5 列

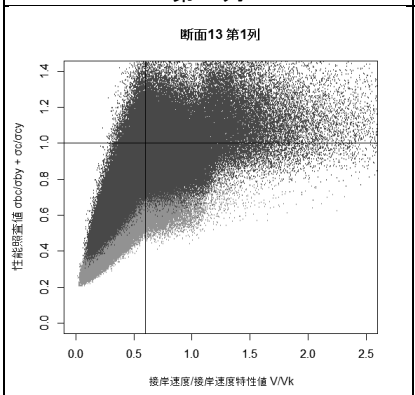


付表 F-68　接岸速度-性能照査値分布図(断面⑬ 設定 A および設定 B)

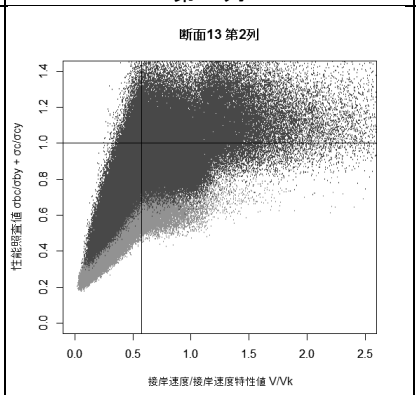
防舷材反力の設定

A

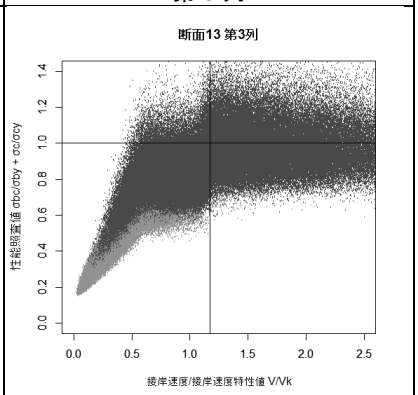
第 1 列



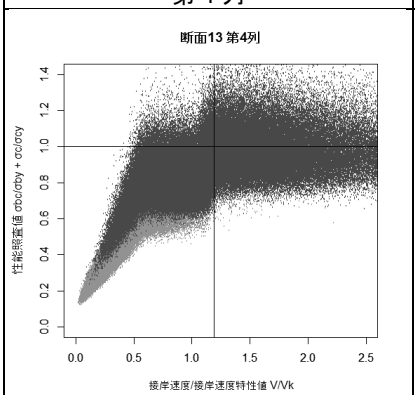
第 2 列



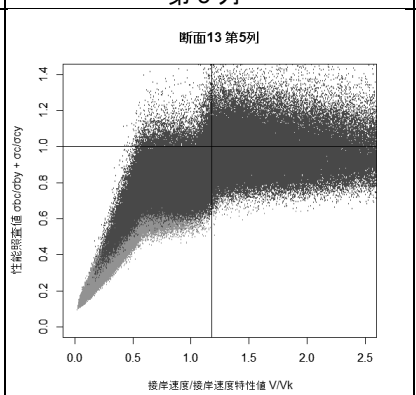
第 3 列



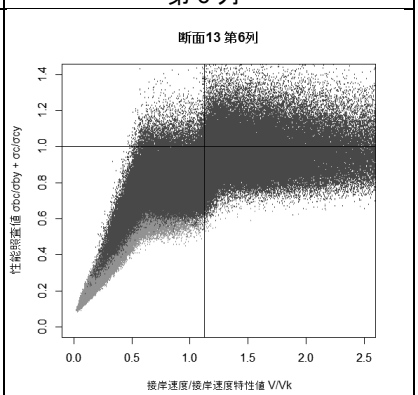
第 4 列



第 5 列

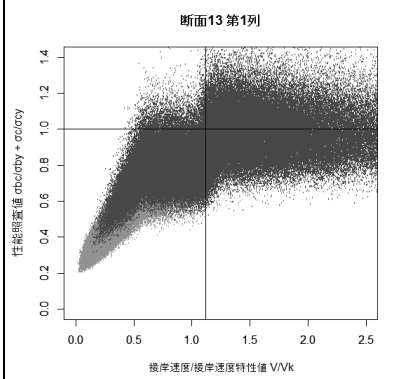


第 6 列

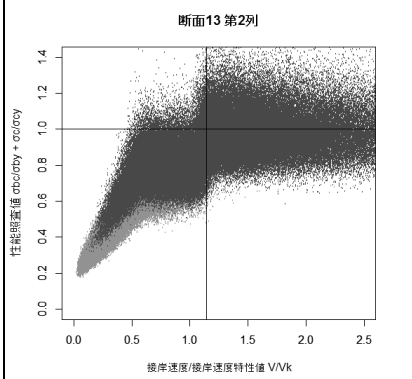


B

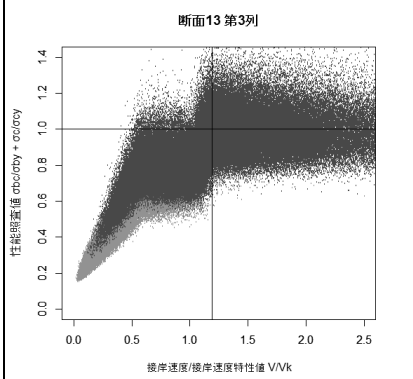
第 1 列



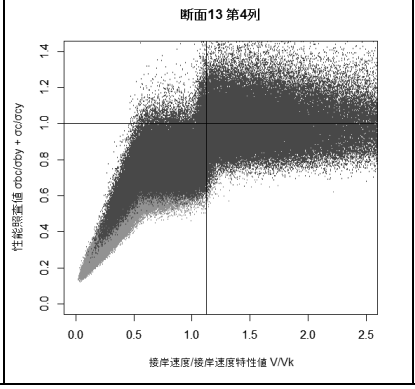
第 2 列



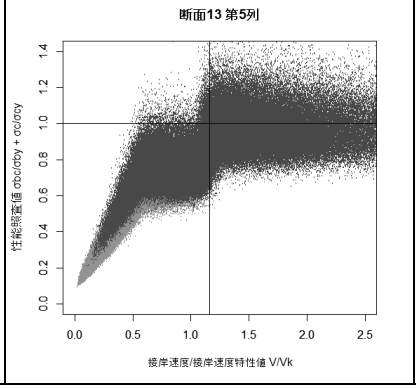
第 3 列



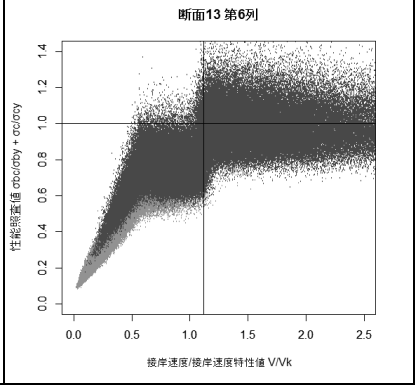
第 4 列



第 5 列



第 6 列

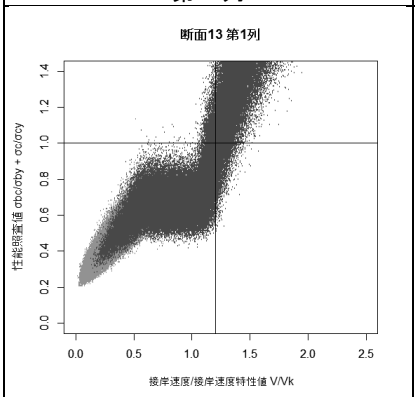


付表 F-69　接岸速度-性能照査値分布図(断面⑬ 設定 C および設定 D)

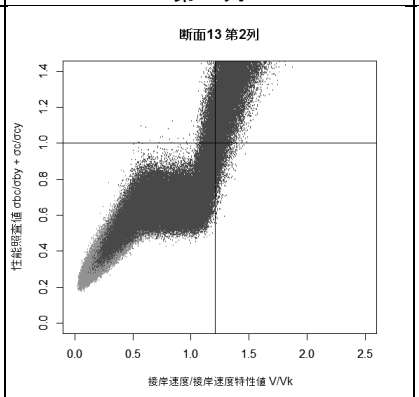
防舷材反力の設定

C

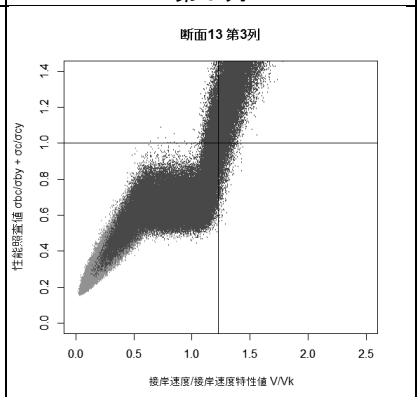
第 1 列



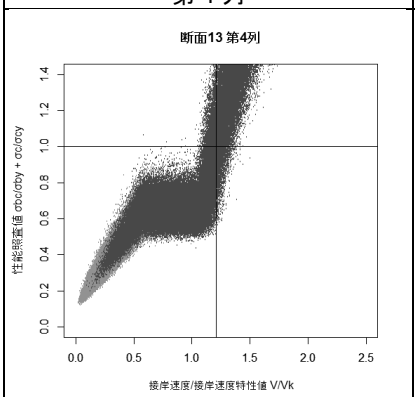
第 2 列



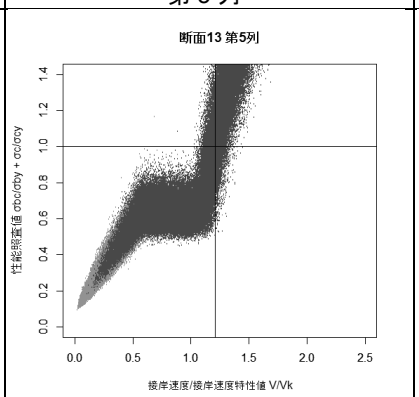
第 3 列



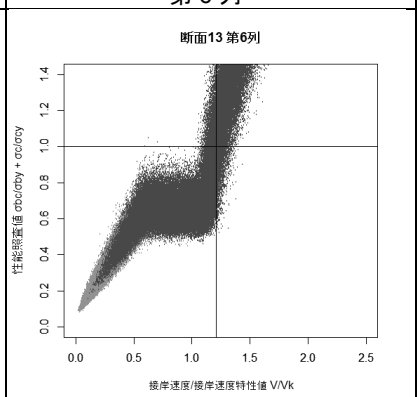
第 4 列



第 5 列

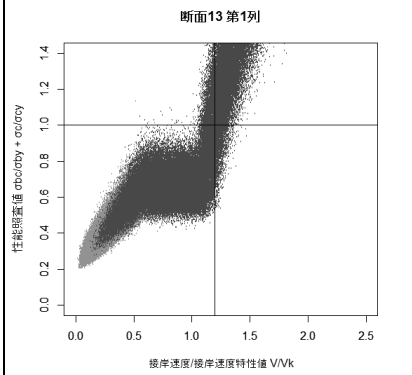


第 6 列

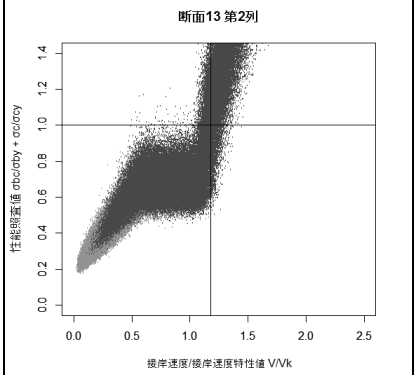


D

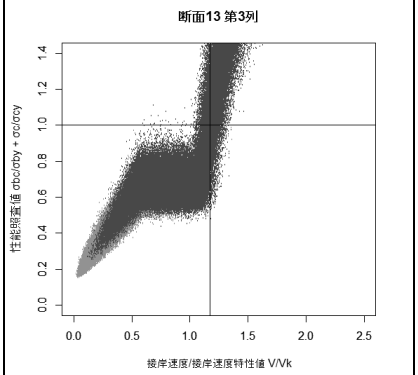
第 1 列



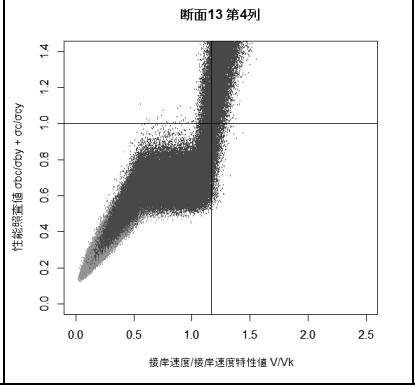
第 2 列



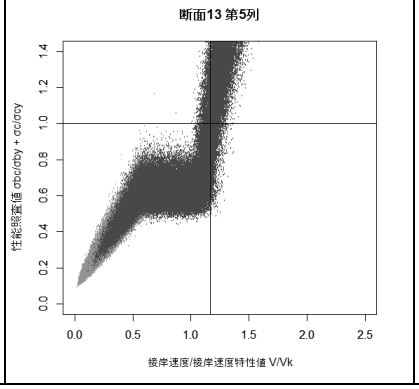
第 3 列



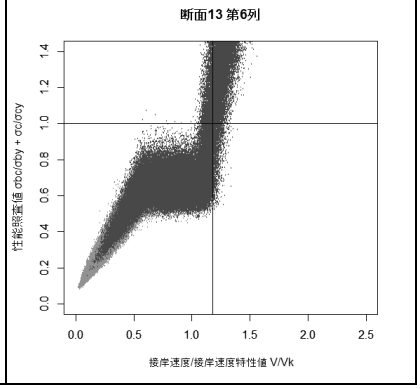
第 4 列



第 5 列



第 6 列

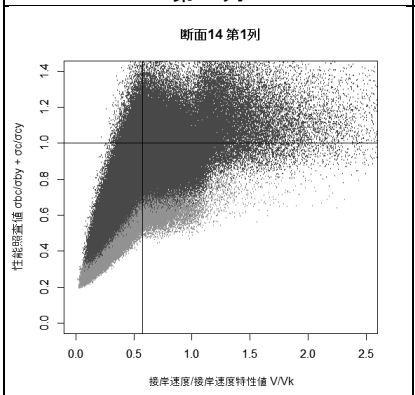


付表 F-70　接岸速度-性能照査値分布図(断面⑭ 設定 A および設定 B)

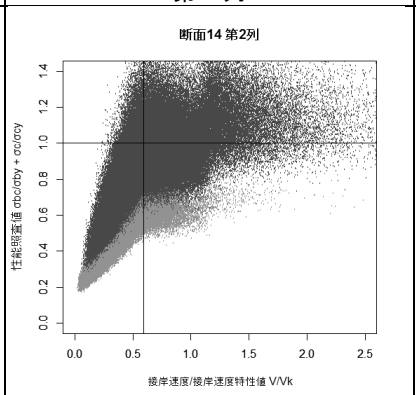
防舷材反力の設定

A

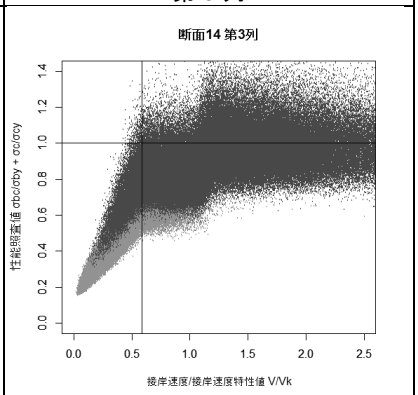
第 1 列



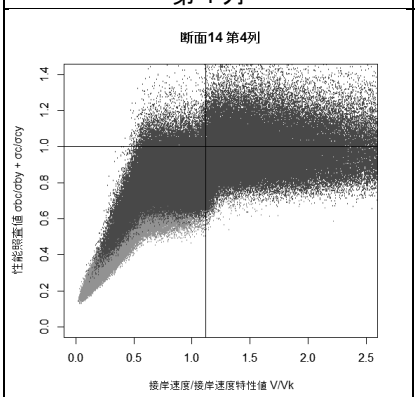
第 2 列



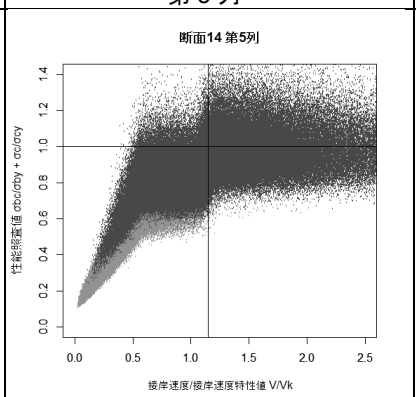
第 3 列



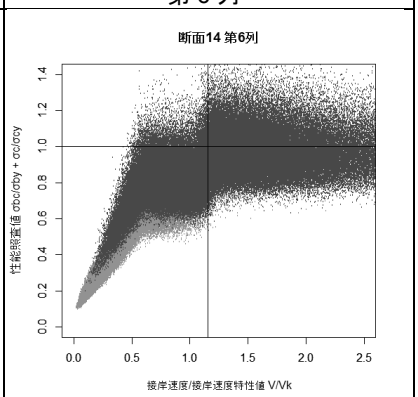
第 4 列



第 5 列

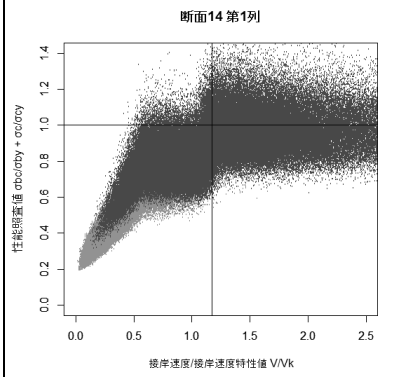


第 6 列

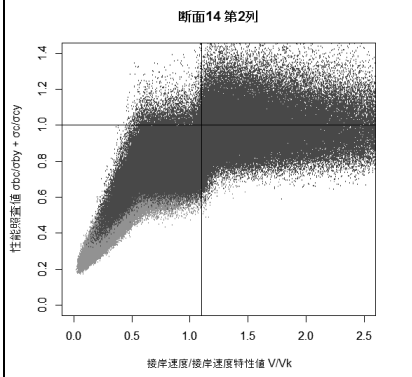


B

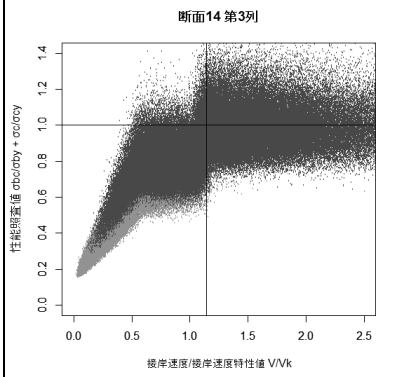
第 1 列



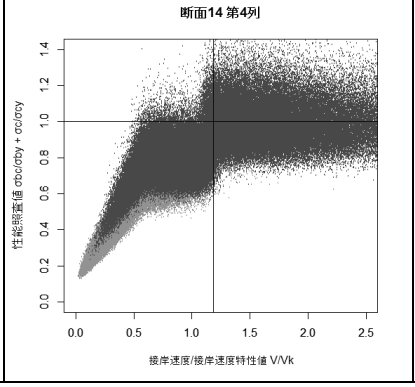
第 2 列



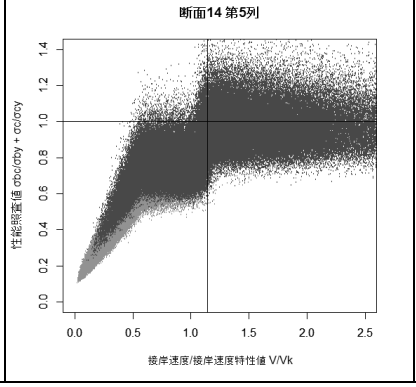
第 3 列



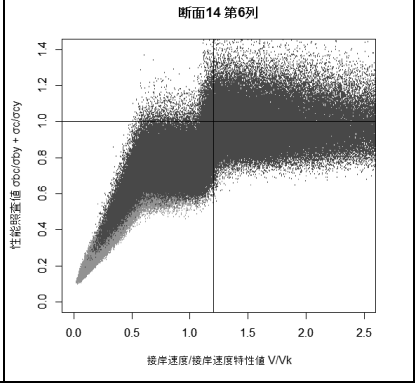
第 4 列



第 5 列



第 6 列

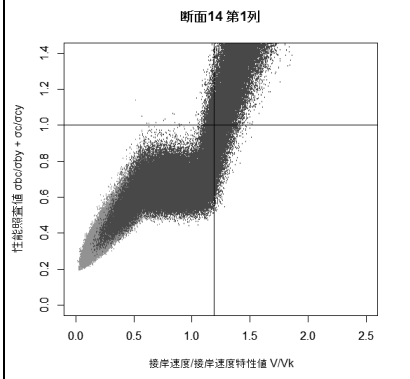


付表 F-71　接岸速度-性能照査値分布図(断面⑭ 設定 C および設定 D)

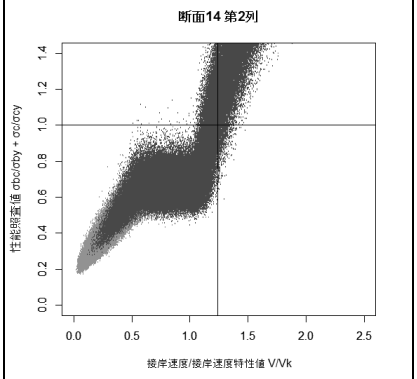
防舷材反力の設定

C

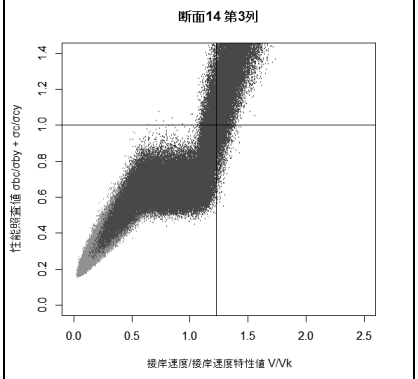
第 1 列



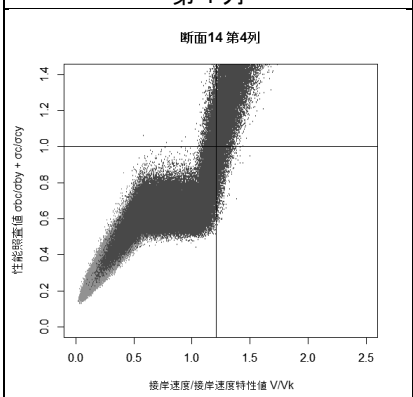
第 2 列



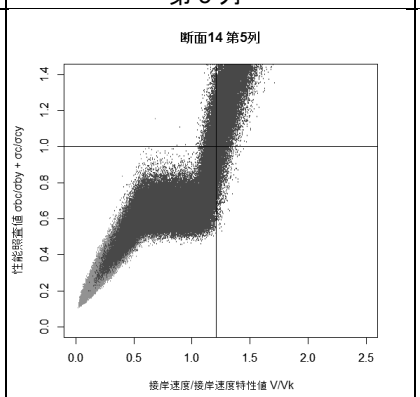
第 3 列



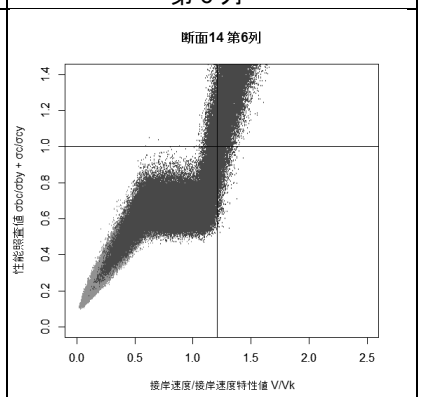
第 4 列



第 5 列

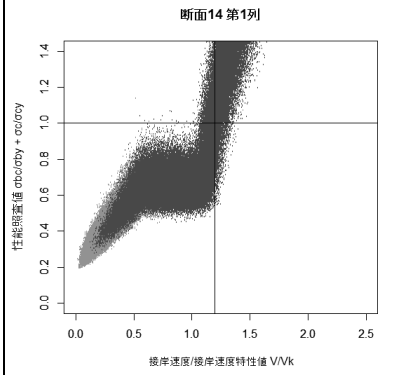


第 6 列

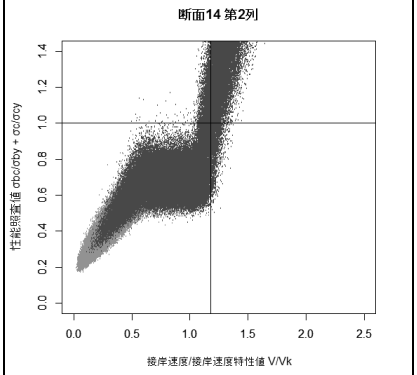


D

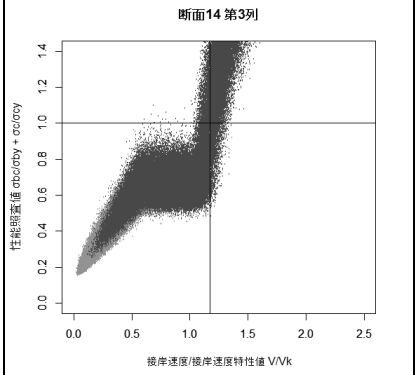
第 1 列



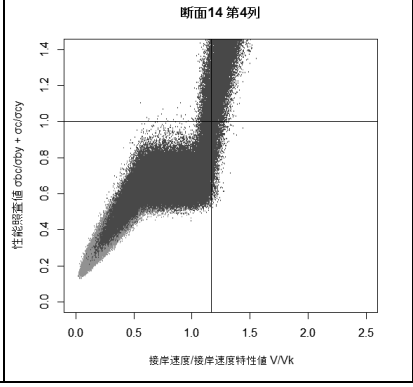
第 2 列



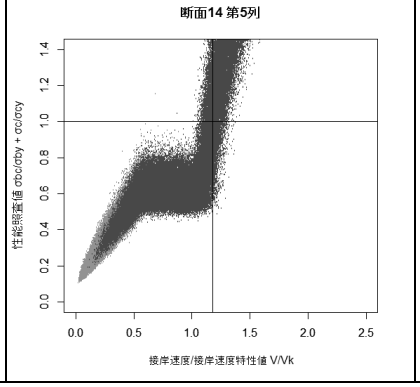
第 3 列



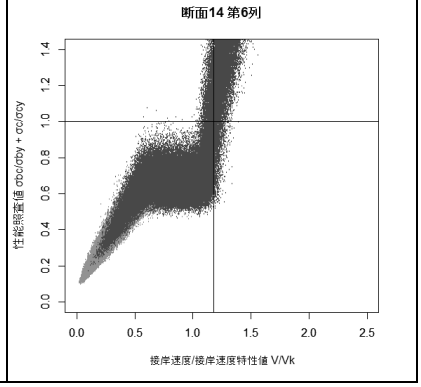
第 4 列



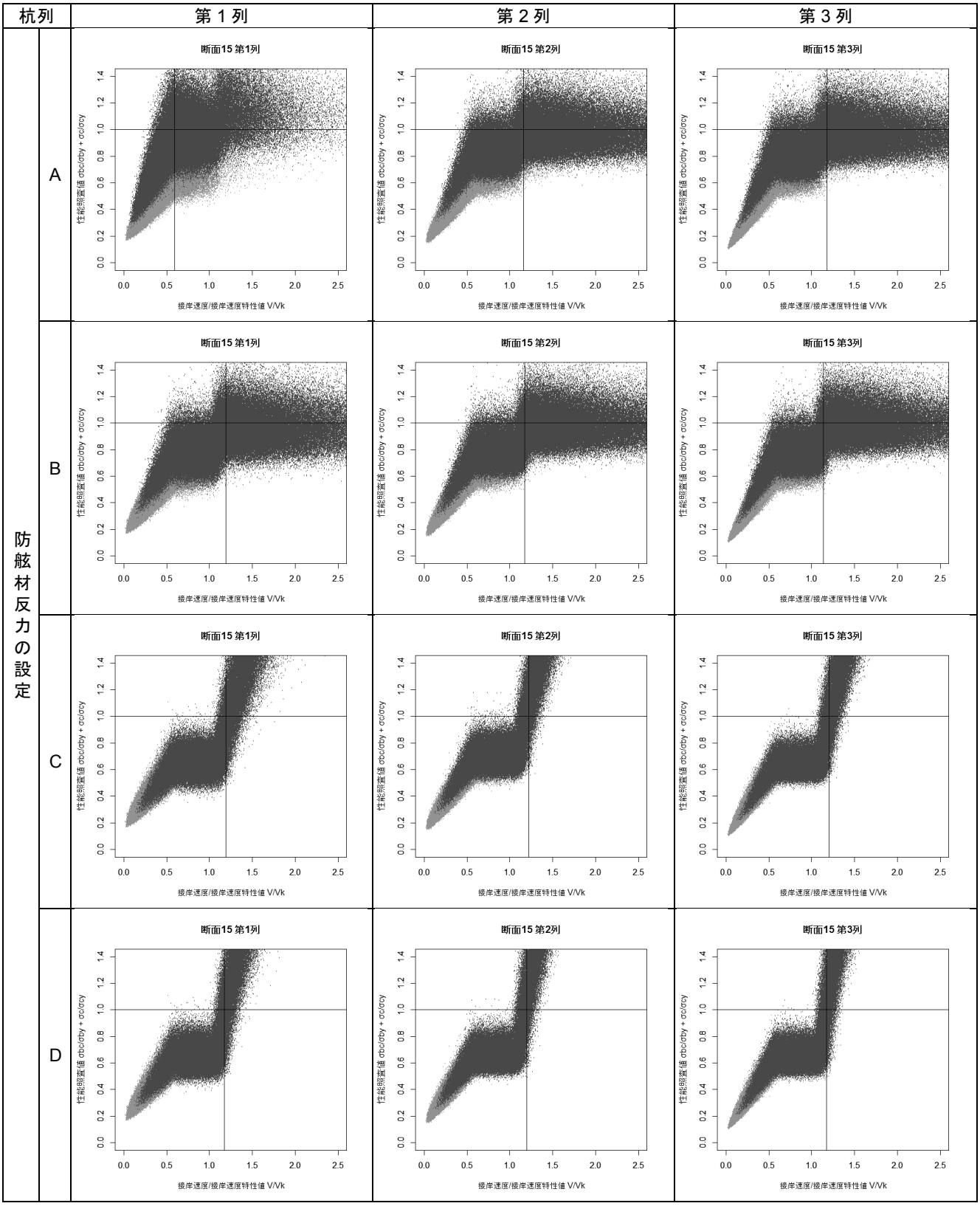
第 5 列



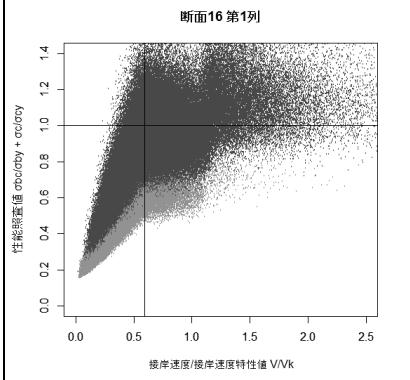
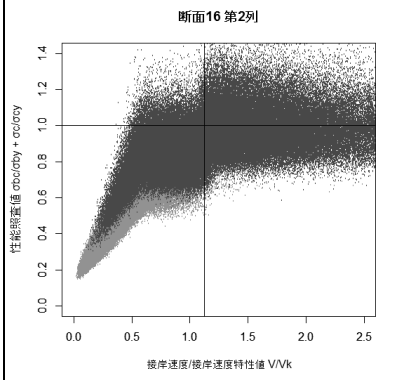
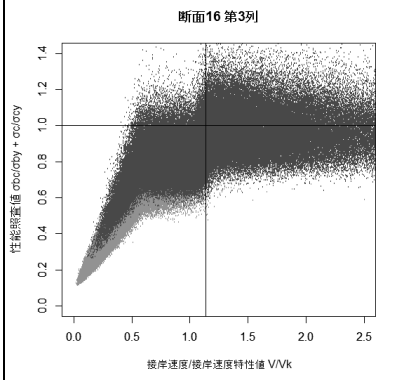
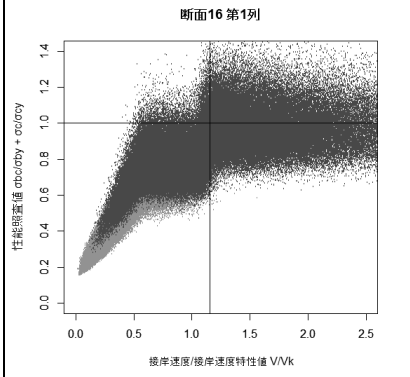
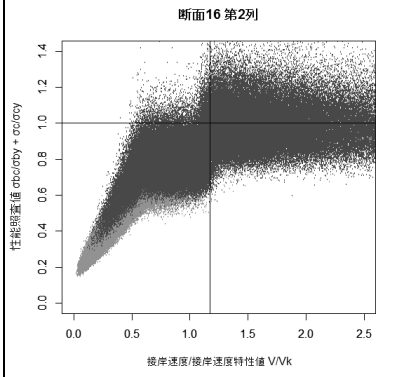
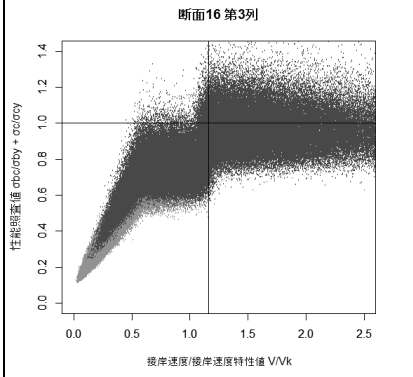
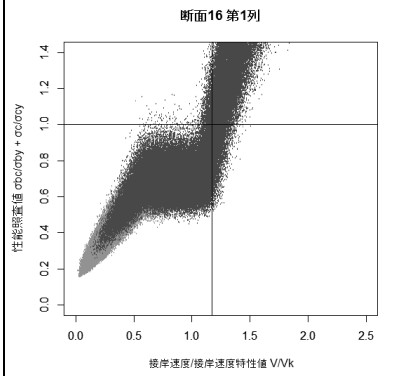
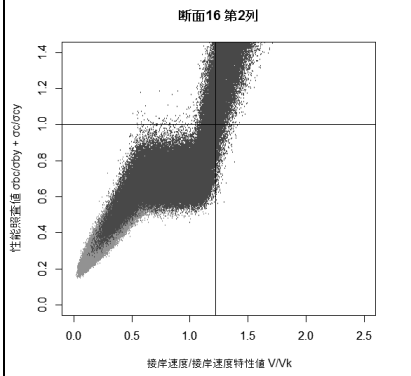
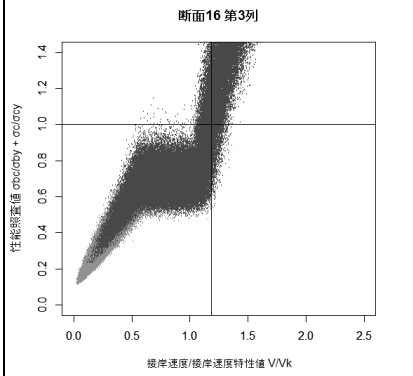
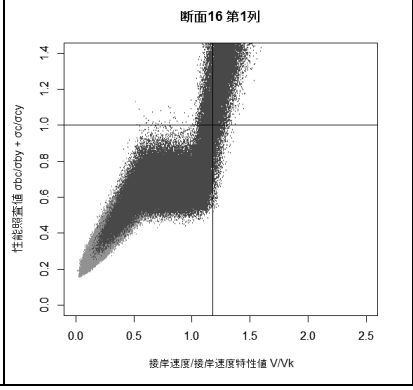
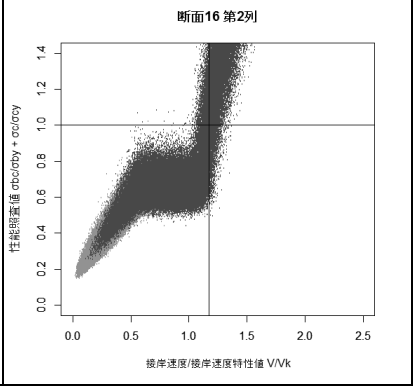
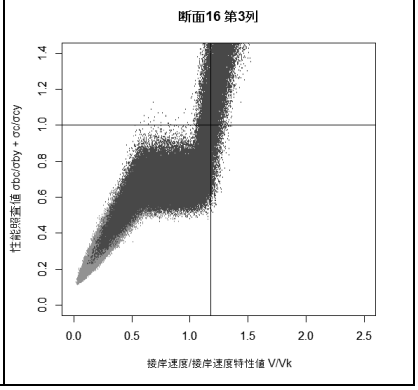
第 6 列



付表 F-72　接岸速度-性能照査値分布図(断面⑮)



付表 F-73　接岸速度-性能照査値分布図(断面⑯)

杭列		第 1 列	第 2 列	第 3 列
防舷材反力の設定	A			
	B			
	C			
	D			

(4)防舷材反力の計算条件の差異に伴う信頼性解析結果の変遷

現行港湾基準を満たす断面に対する信頼性解析の結果は，上述の付表 F-4～付表 F-73，および付図 F-3～付図 F-14 に示したとおりであるが，防舷材反力の計算条件(付表 F-74)により，解析結果が異なることが示されている．

付表 F-74　防舷材反力の計算条件

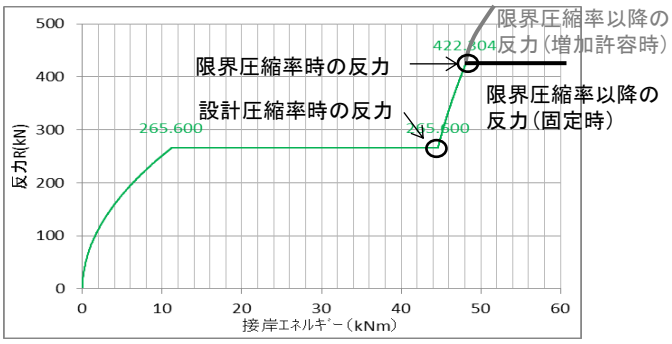
設定	設計圧縮率から限界圧縮率までの反力増加率	限界圧縮率以降の防舷材反力
A	形状毎に各製造者の最大値	限界圧縮率時の防舷材反力と同値
B	現行港湾基準の検討時の値	限界圧縮率時の防舷材反力と同値
C	形状毎に各製造者の最大値	設計圧縮率から限界圧縮率までの関係式に従い増加
D	現行港湾基準の検討時の値	設計圧縮率から限界圧縮率までの関係式に従い増加

①限界圧縮率以降の防舷材反力

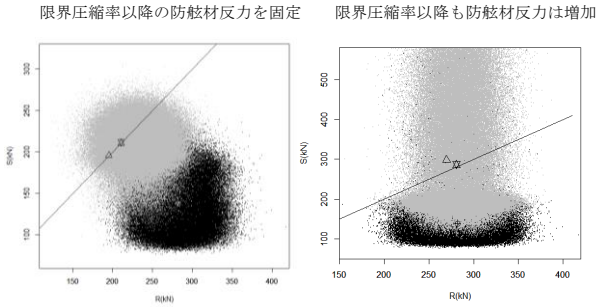
付図 F-16 に，限界圧縮率以降の防舷材反力の設定方法による破壊点の変化の一例を示す．付図 F-16 より，設定 A，B のように，限界圧縮率以降の防舷材反力を一定値とすると(付図 F-15 黒字)，作用の算出値は特性値と破壊点を中心とした二極分布をとり，設定 C，D のように，限界圧縮率以降も接岸エネルギーに従い反力を増加させると(付図 F-15 灰字)，破壊点側では中心を持たず，作用側に帯状に分布する．これより，本検討で採用した接岸速度の従う確率分布は，防舷材の限界圧縮率を超過する接岸エネルギーを与え得ることがわかる．これについては，付図 F-17 に示すように，限界圧縮率以降の防舷材反力の設定により，接岸速度の破壊点が異なることからも確認できる．

②設計圧縮率から限界圧縮率までの反力増加率

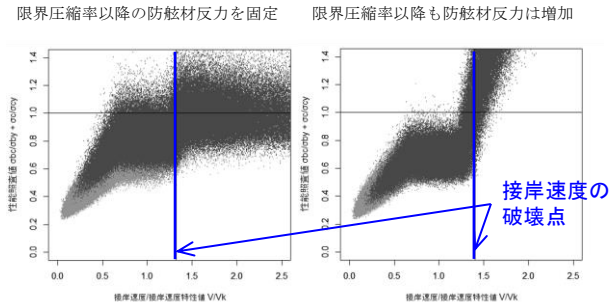
限界圧縮率以降の防舷材反力の設定方法については，本稿本文に述べたとおりであり，各検討断面における防舷材の設計圧縮率から限界圧縮率までの反力増加率を同値とすると，破壊確率や信頼性指標は水深に依らず一定となる傾向が生じる(付表 F-75)．



付図 F-15　モデル防舷材の接岸エネルギー-反力関係式

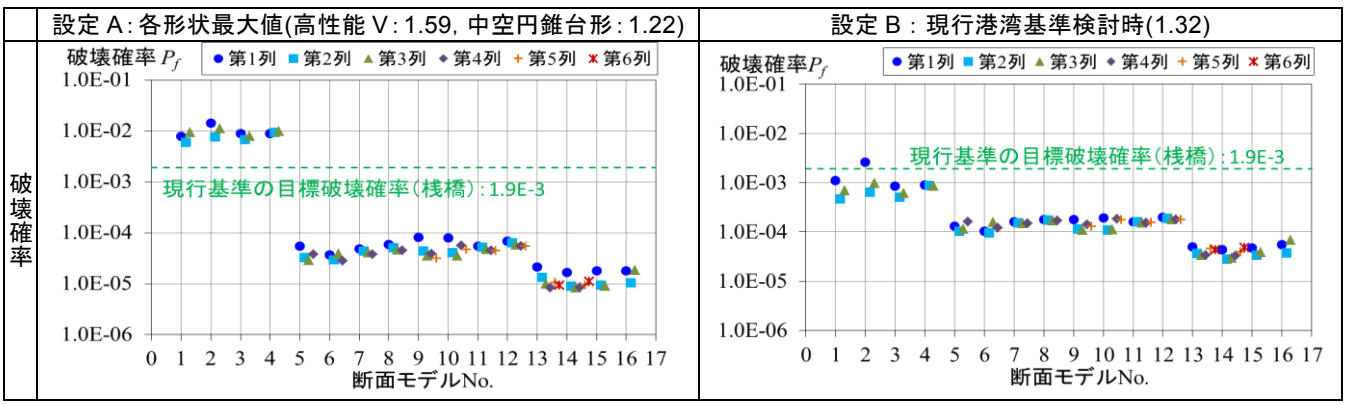


付図 F-16 限界圧縮率以降の防舷材反力の設定方法による破壊点の変化(例：断面⑤第 1 列)



付図 F-17　接岸速度破壊点の変化(例：断面⑤第 1 列)

付表 F-75　設計圧縮率から限界圧縮率までの反力増加率が破壊確率に与える影響



③破壊確率・信頼性指標の比較

付表 F-78，**付表 F-79** に，防舷材反力の設計条件ごとの破壊確率，信頼性指標を示す．**付表 F-78**，**付表 F-79** より，いずれの設計条件も，破壊確率と設計水深に相関があることがわかる．これは，**付表 F-76** に示すように，船舶質量が増加するほど，接岸速度の平均値が減少するためである．

付表 F-76　積載荷重トン数，および接岸速度の設定

接岸速度の算出方法	設計水深 (m)	接岸速度(m/s)	
		平均値	標準偏差
関係式使用時	-7.5	0.061	0.034
	-12	0.039	0.022
	-18	0.027	0.015

一方，限界圧縮率以降の防舷材反力を接岸エネルギーに従い増加させると，限界圧縮率時の反力で固定した場合と比較して，各杭の破壊確率が非常に大きくなる．これは，限界圧縮率以降の防舷材反力を固定させることで，信頼性解析において接岸力に上限値が生じ，破壊確率を減少させるためである．これから，現行港湾基準に基づく断面では，防舷材が限界圧縮率に至る程の接岸エネルギーが作用したとしても，必ずしも桟橋杭が破壊するとはいえない．

なお，限界圧縮率以降の防舷材反力を固定すると，断面①～④(設計水深-7.5m)と断面⑤～⑯(設計水深-12m，-18m)で破壊確率・信頼性指標に大きな差が生じる．これは，本稿本文に示したとおり，防舷材の設計圧縮率から限界圧縮率までの反力増加率の差に起因している (**付表 F-77**)．限界圧縮率以降も反力を増加させる場合は，信頼性解析において接岸力の上限値が設けられないため，反力増加率は破壊確率にほとんど影響せず，水深によってのみ破壊確率が左右されることが確認できる．

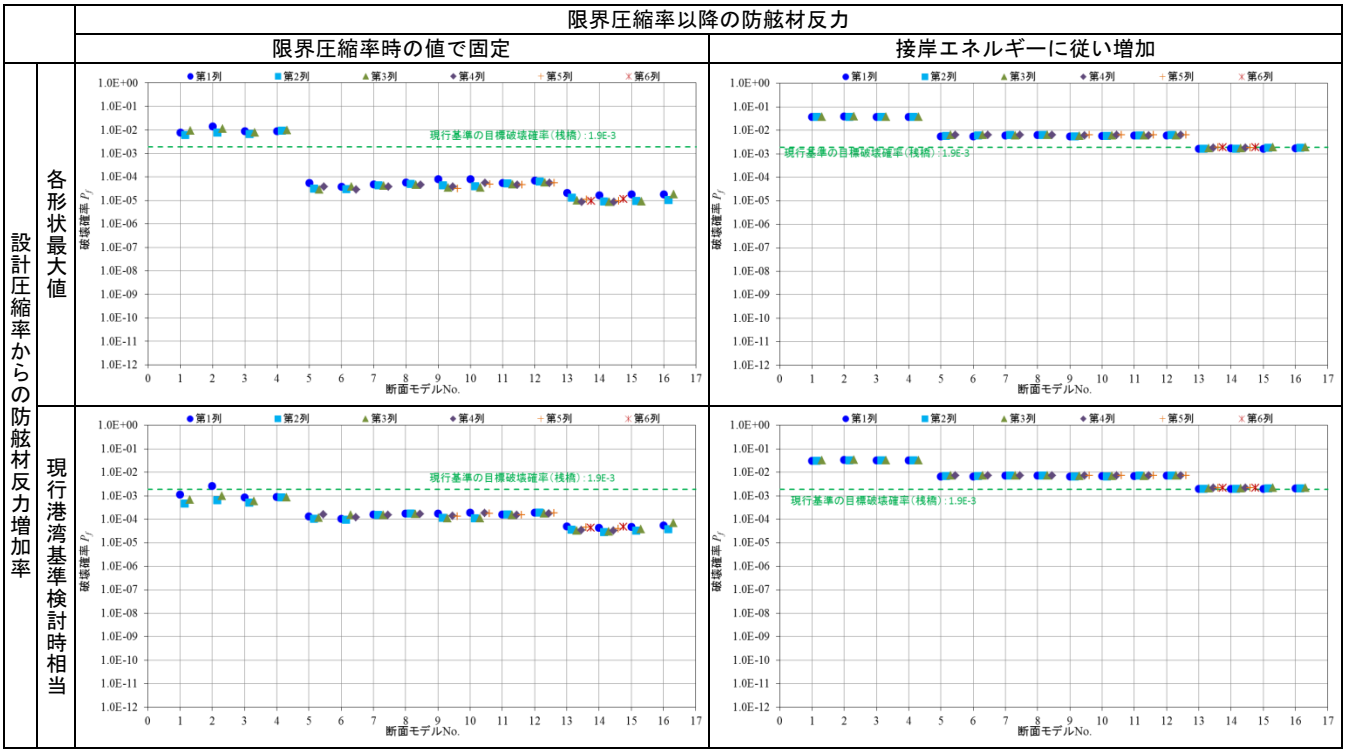
付表 F-77　設計圧縮率から限界圧縮率までの反力増加率

設計水深	-7.5m	-12m	-18m
形状	高性能 V	中空円錐台形	
設計圧縮率	52.5	70.0	
限界圧縮率	55.0	72.5	
反力増減率（各形状最大値）	1.59	1.22	
反力増減率（現行港湾基準相当）	1.33		

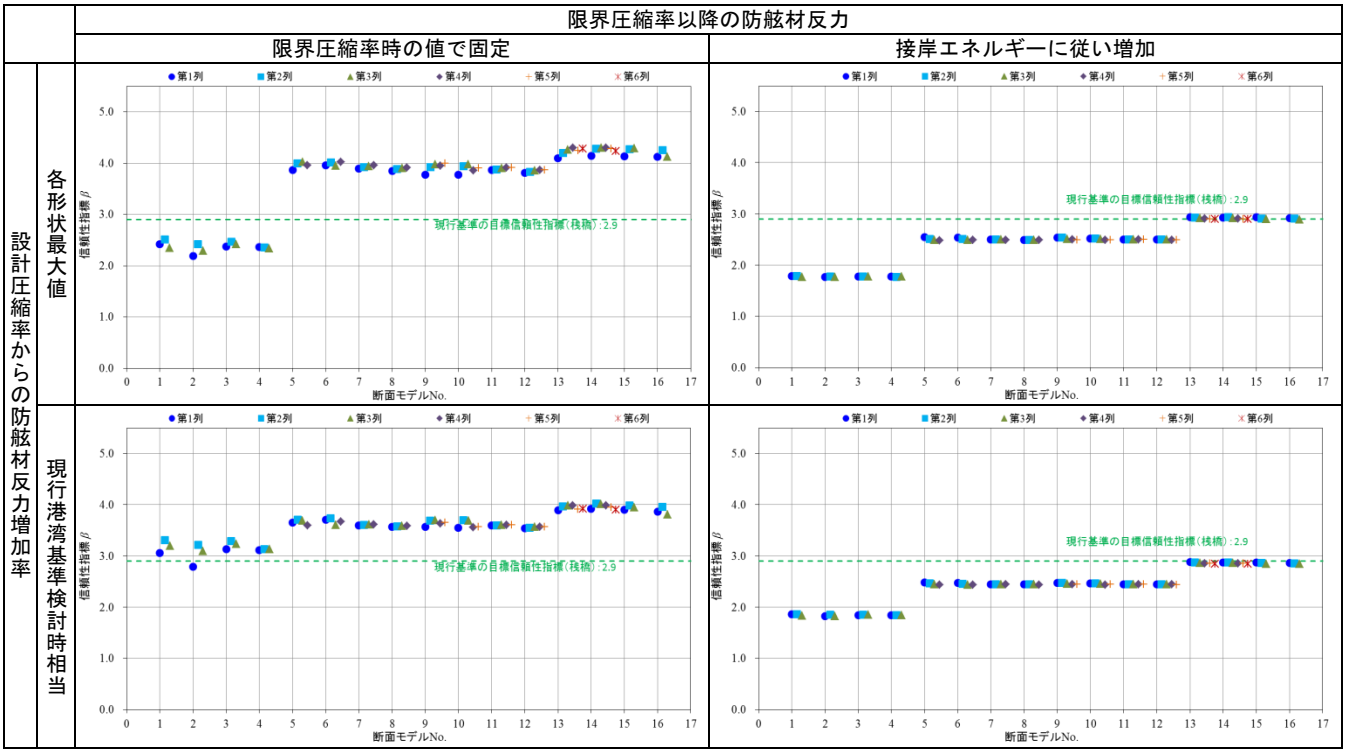
以上に示したように，現行港湾基準に基づく断面に対する信頼性解析では，設計水深や防舷材反力の設定方法により，破壊確率や信頼性指標が大きく変化する．したがって，目標破壊確率や目標信頼性指標の設定において，ターゲットとする設計水深や防舷材反力の設定方法を決定する必要がある．

なお，**付表 F-80** に示すとおり，各検討断面の実質安全率は，限界圧縮率以降の防舷材反力を固定すると，断面に関わらず 1.2～1.3 程度でほぼ一定である．一方で，接岸エネルギーに従い増加させると，断面や杭毎に実質安全率の差が生じやすくなり，概ね 1.2～1.5 の間で推移する．

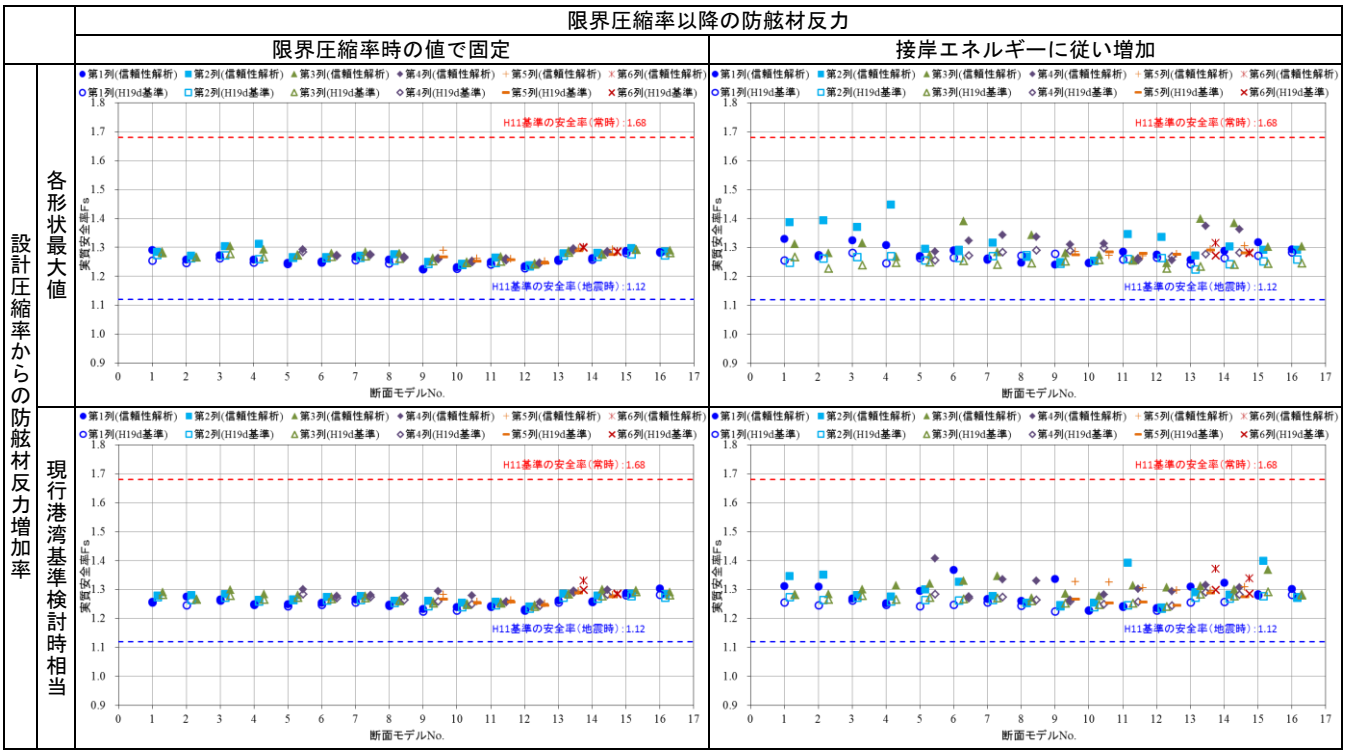
付表 F-78　各杭の破壊確率



付表 F-79　各杭の信頼性指標



付表 F-80　各杭の実質安全率



附録 G　目標破壊確率に相当する桟橋杭肉厚の算定

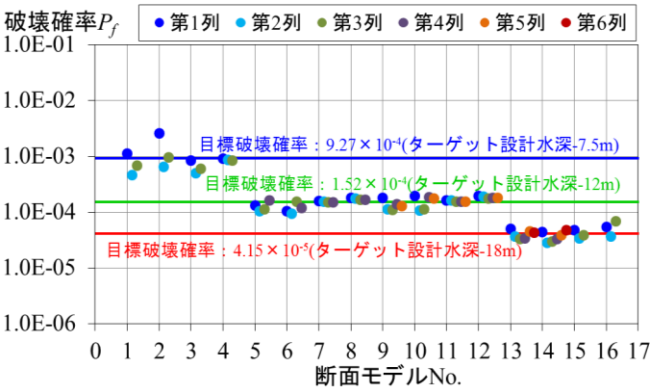
目標破壊確率に相当する桟橋杭の肉厚は，各検討断面について肉厚を 0.1mm ずつ変化させ，目標破壊確率を下回る最小肉厚を求めることで算定した．

なお，附録 F において，現行港湾基準に基づく断面は，設計水深や防舷材反力の設定方法により，破壊確率や信頼性指標が変化することを示した．このため，目標破壊確率の設定においては，ターゲットとする設計水深や防舷材反力の設定方法を決定する必要があるが，ここでは本稿本文で採用した条件を前提とする．つまり，設計圧縮率から限界圧縮率までの防舷材反力増加率は，各製造者の高性能 V 型防舷材，および中空円錐台形型防舷材の反力増加率の平均値である 1.32 とし，限界圧縮率以降の防舷材反力は，限界圧縮率時の防舷材反力で固定するものとした．

本稿本文では，**付表 G-1**，**付図 G-1** に示す各ターゲット設計水深において目標破壊確率を設定し，部分係数を導出した．したがって，本附録においては，目標破壊確率ごとに，各検討断面および各杭列について，肉厚ごとの破壊確率の推移と目標破壊確率の導出を次頁以降に示す．

付表 G-1　ターゲット設計水深と目標破壊確率

ターゲットとする設計水深	ターゲットとする検討断面	目標破壊確率
-7.5m	①～④	9.27×10^{-4}
-12m	⑤～⑫	1.52×10^{-4}
-18m	⑬～⑯	4.15×10^{-5}

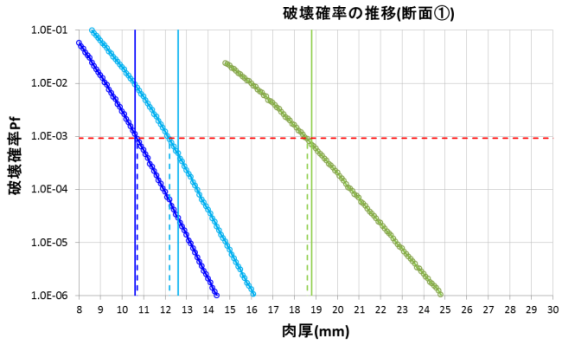


付図 G-1　ターゲット設計水深と目標破壊確率

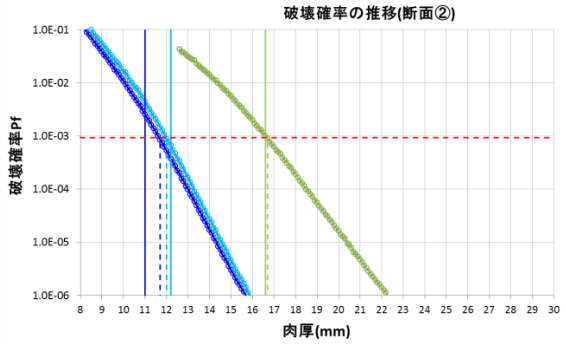
(1) 目標破壊確率 9.27×10^{-4}，ターゲット設計水深-7.5m

付表 G-2　肉厚ごとの破壊確率の推移と目標破壊確率相当の肉厚(断面①～⑧)

断面①

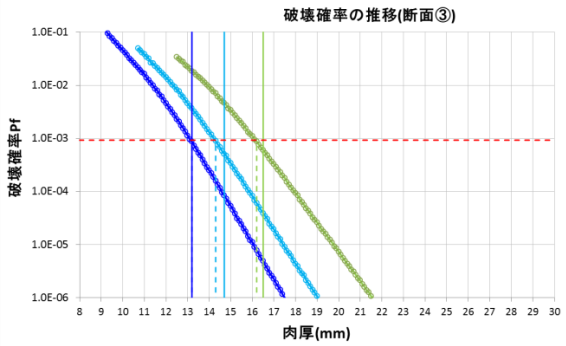


断面②

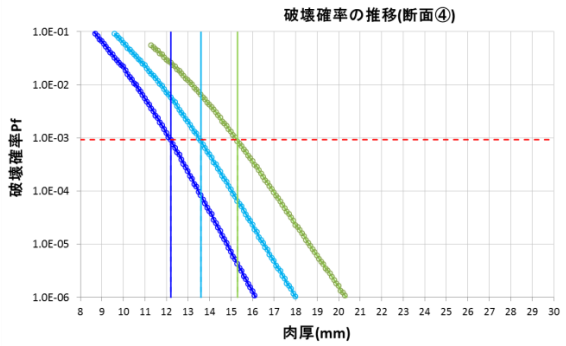


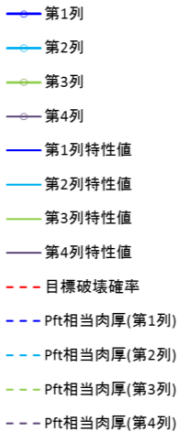
凡例

断面③

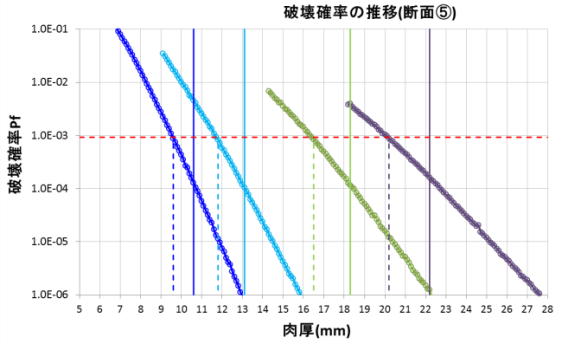


断面④

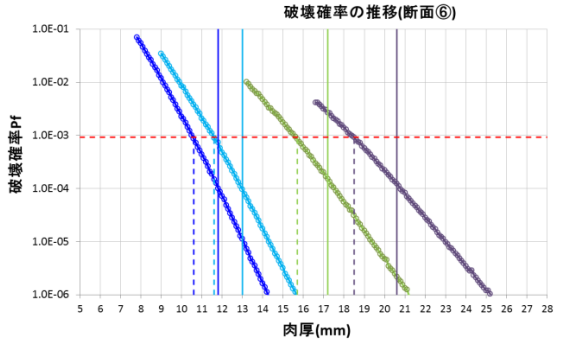




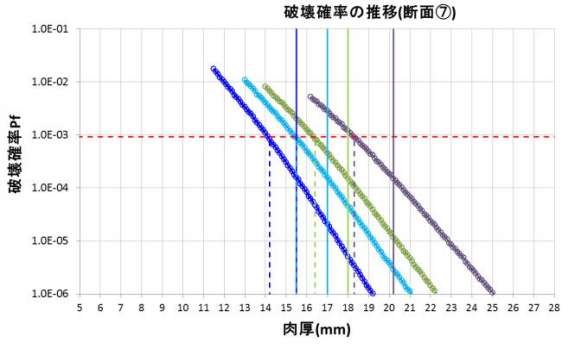
断面⑤



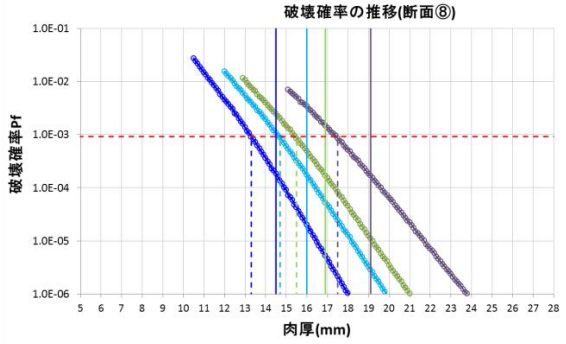
断面⑥



断面⑦

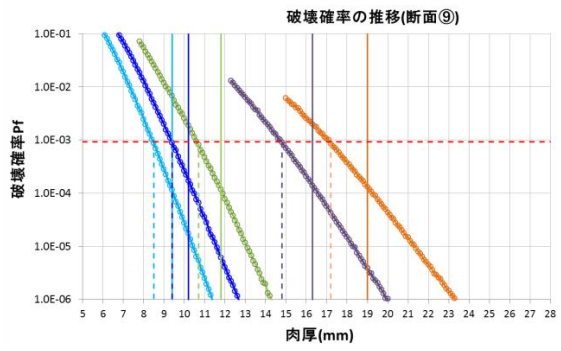


断面⑧

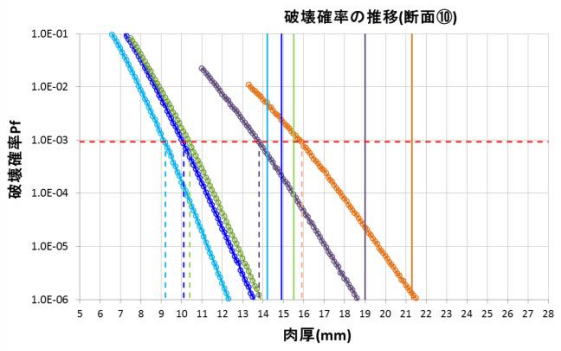


付表 G-3　肉厚ごとの破壊確率の推移と目標破壊確率相当の肉厚(断面⑨～⑯)

断面⑨

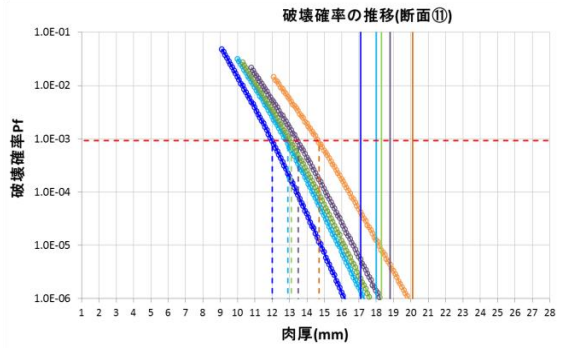


断面⑩

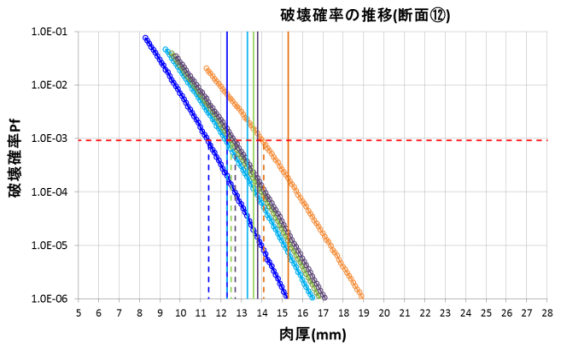


凡例

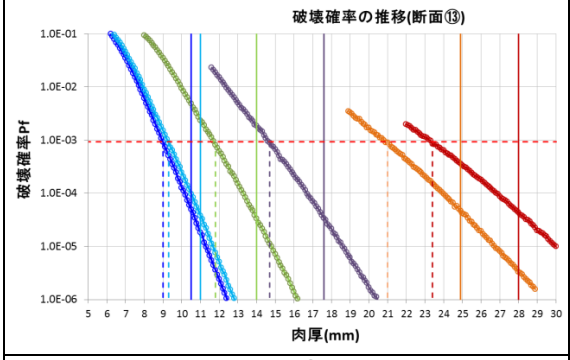
断面⑪



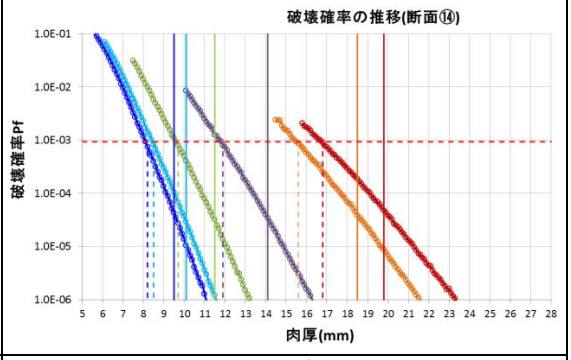
断面⑫



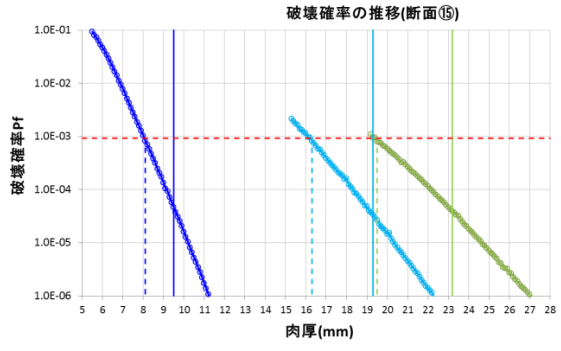
断面⑬



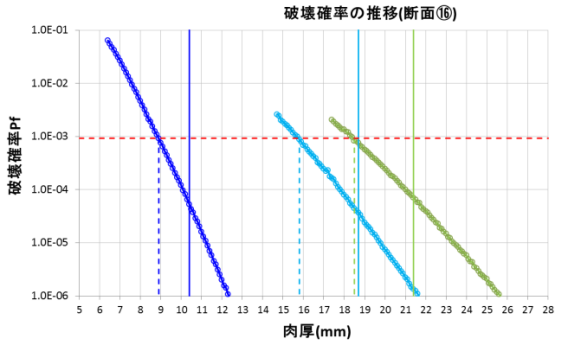
断面⑭



断面⑮



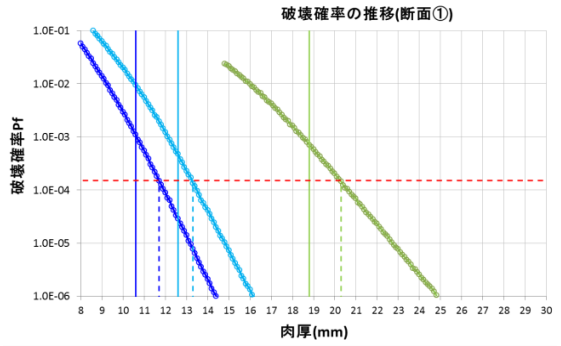
断面⑯



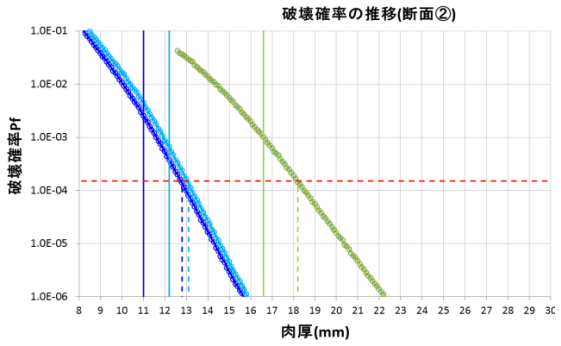
(2) 目標破壊確率 1.52×10^{-4}，ターゲット設計水深-12m

付表 G-4　肉厚ごとの破壊確率の推移と目標破壊確率相当の肉厚(断面①～⑧)

断面①

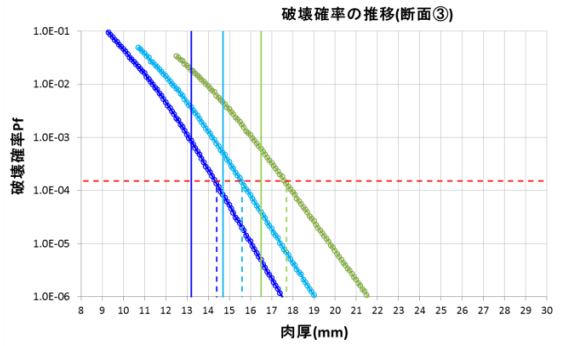


断面②

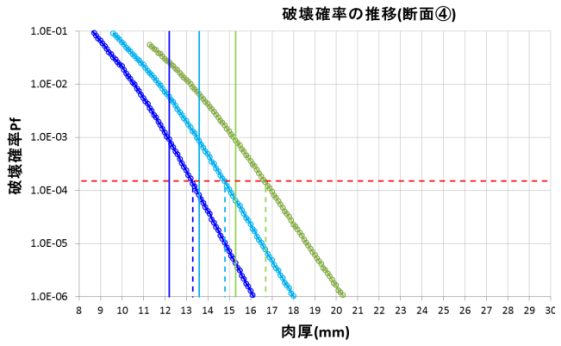


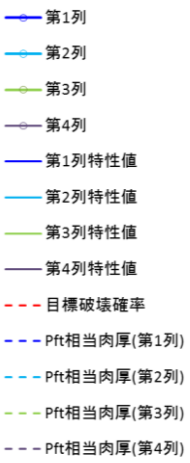
凡例

断面③

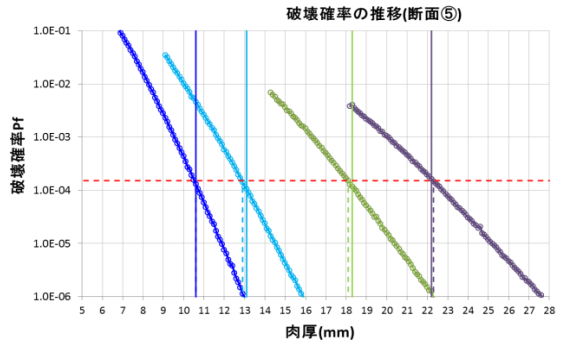


断面④

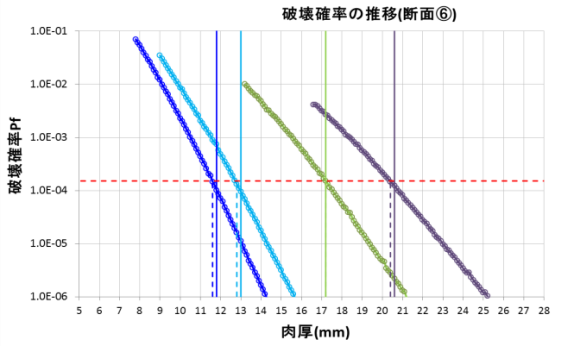




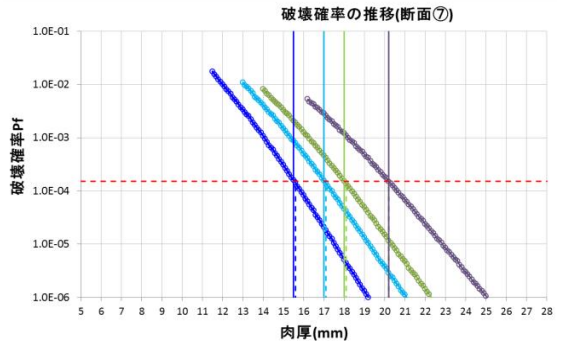
断面⑤



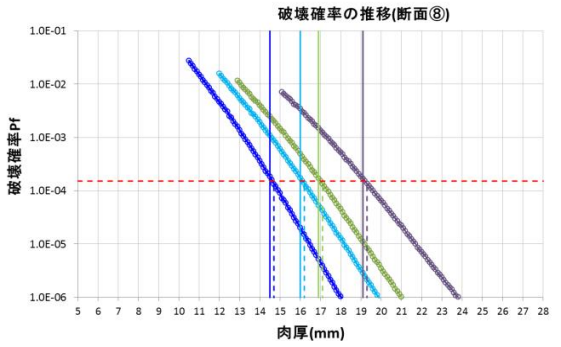
断面⑥



断面⑦

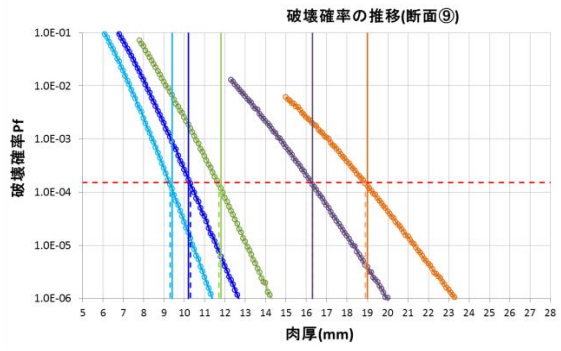


断面⑧

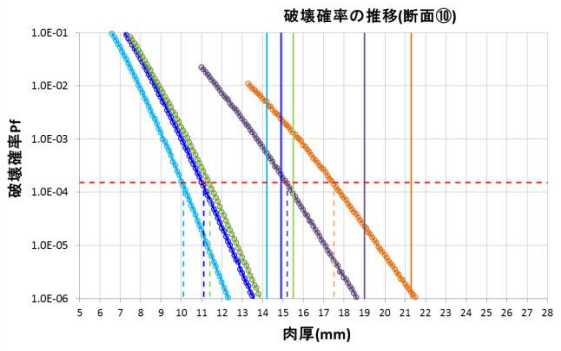


付表 G-5　肉厚ごとの破壊確率の推移と目標破壊確率相当の肉厚(断面⑨～⑯)

断面⑨

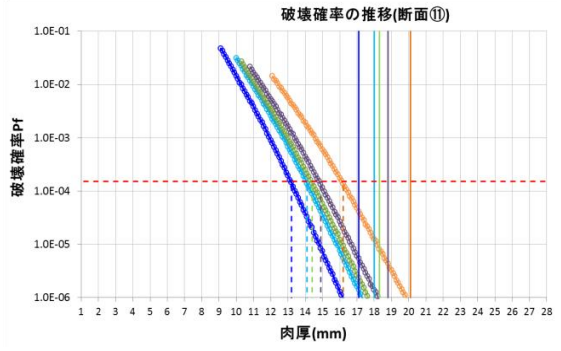


断面⑩

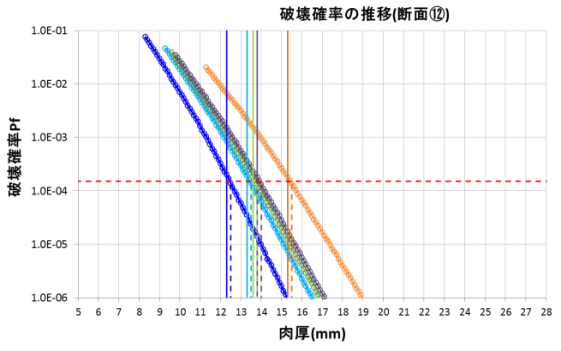


凡例

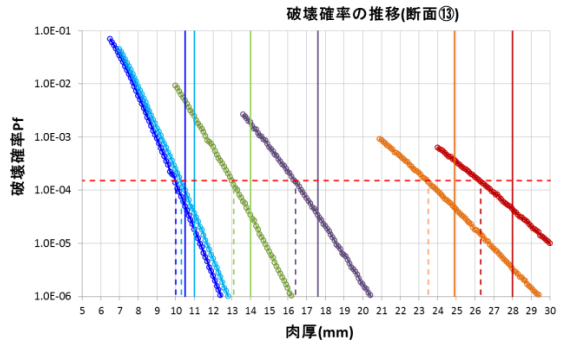
断面⑪



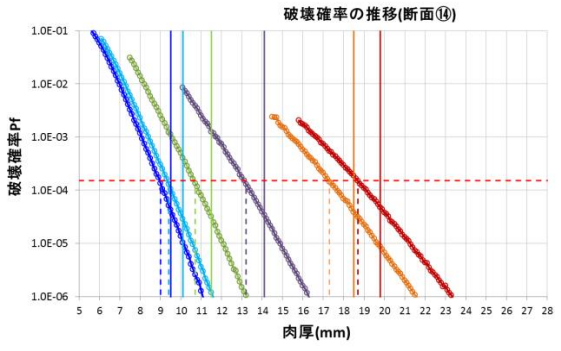
断面⑫



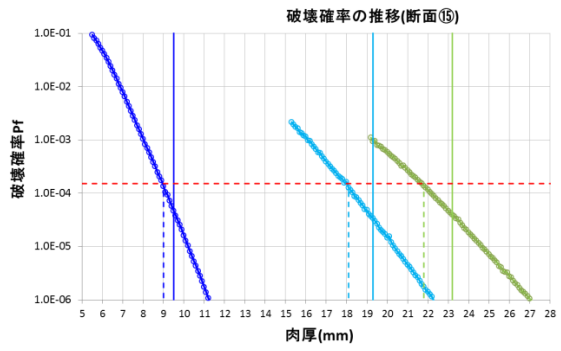
断面⑬



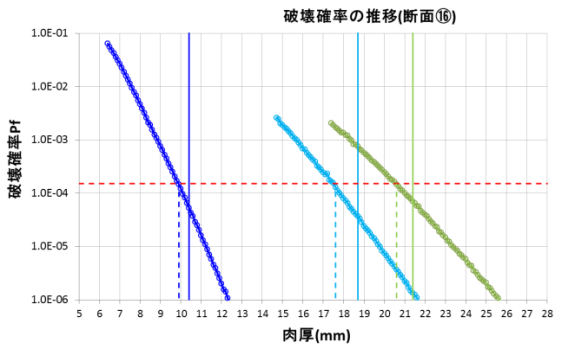
断面⑭



断面⑮



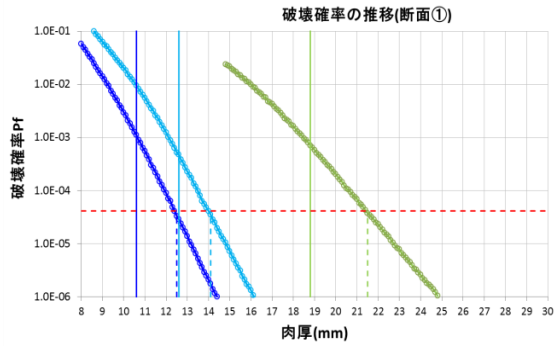
断面⑯



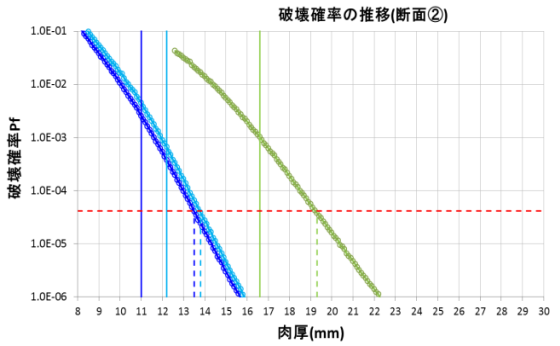
(3) 目標破壊確率 4.15×10^{-5}，ターゲット設計水深-18m

付表 G-6　肉厚ごとの破壊確率の推移と目標破壊確率相当の肉厚(断面①～⑧)

断面①

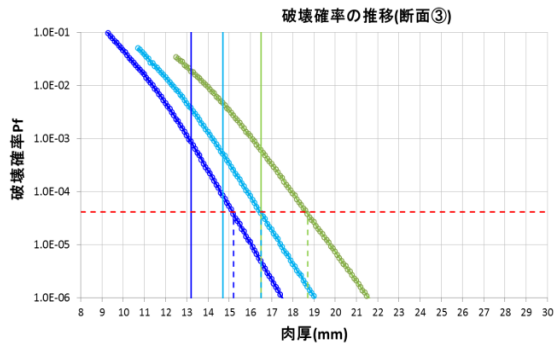


断面②

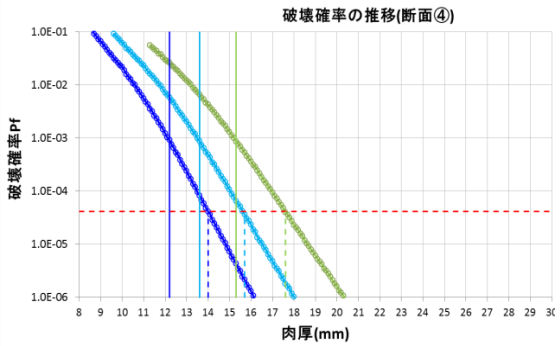


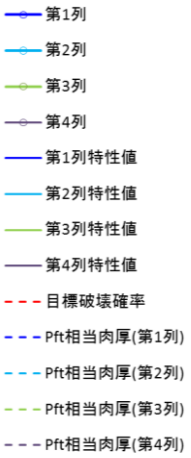
凡例

断面③

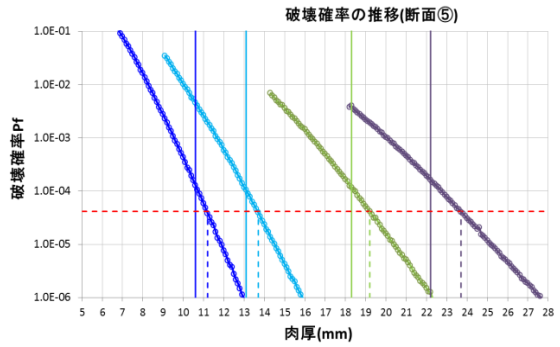


断面④

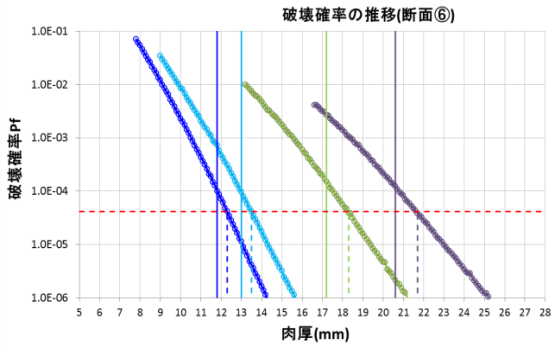




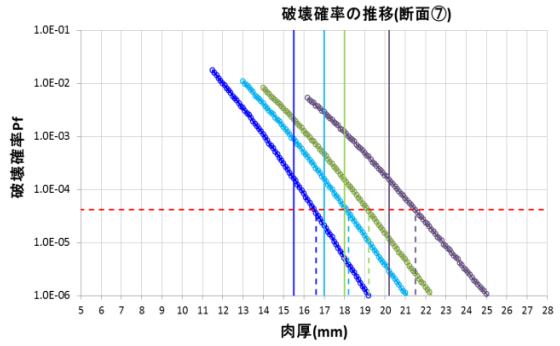
断面⑤



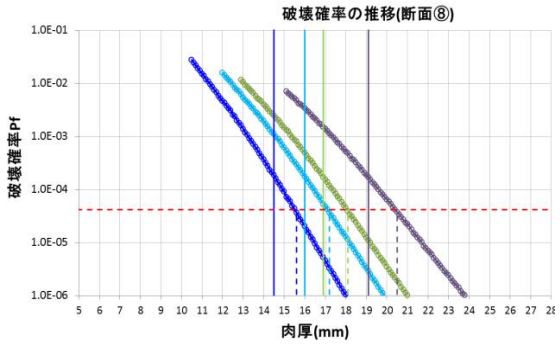
断面⑥



断面⑦

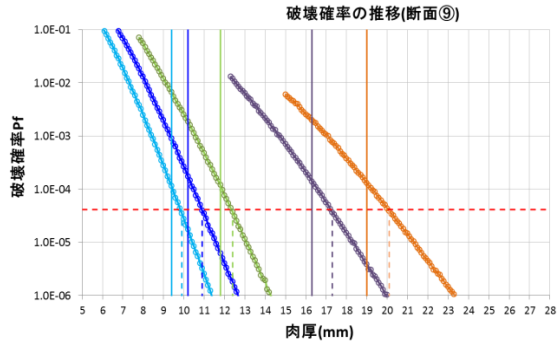


断面⑧

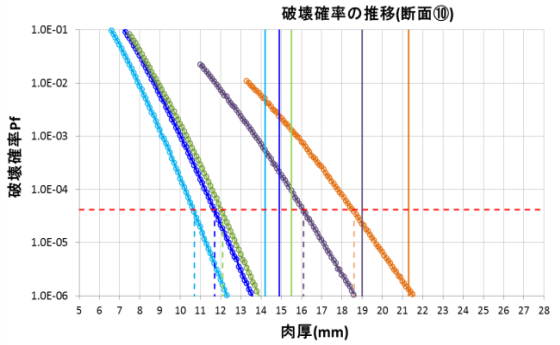


付表 G-7　肉厚ごとの破壊確率の推移と目標破壊確率相当の肉厚(断面⑨～⑯)

断面⑨

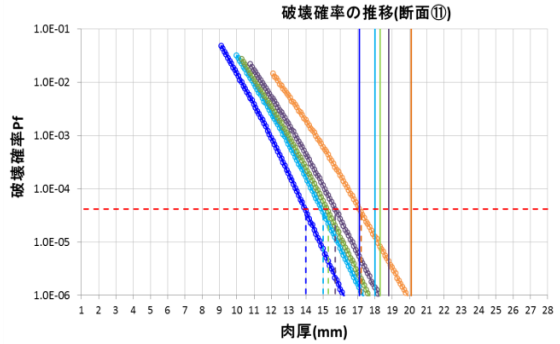


断面⑩

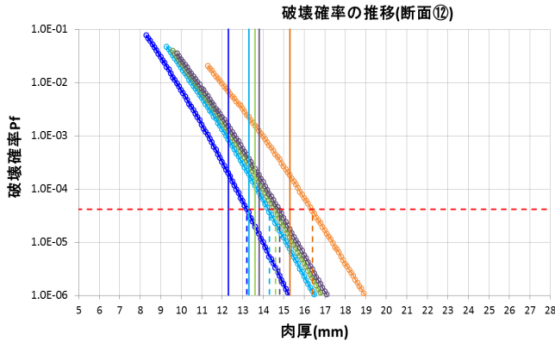


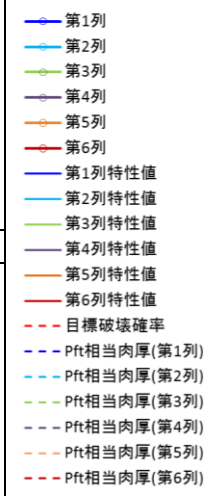
凡例

断面⑪

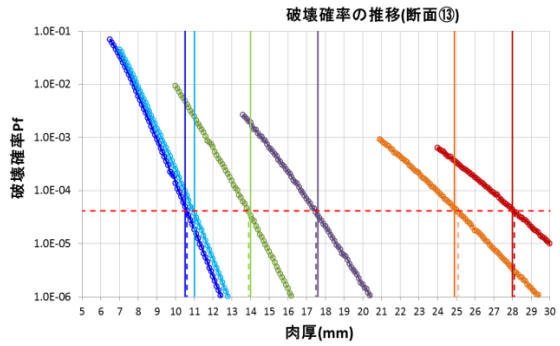


断面⑫

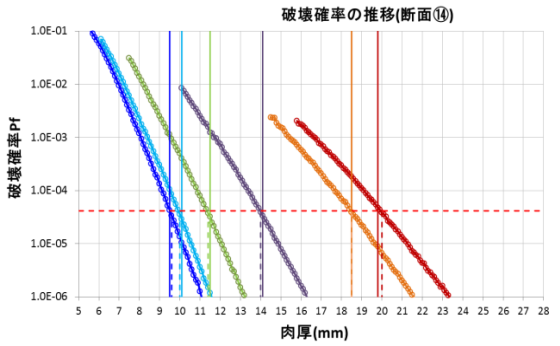




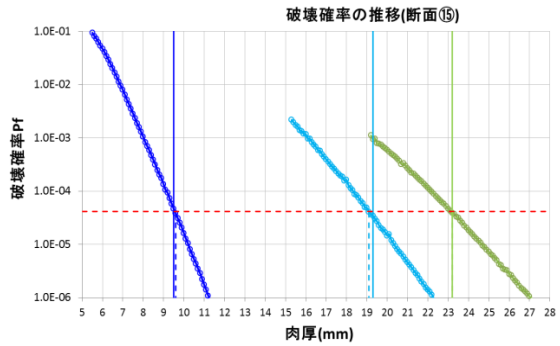
断面⑬



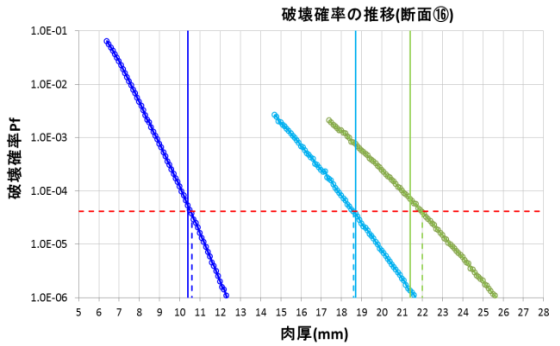
断面⑭



断面⑮



断面⑯



附録 H　各目標破壊確率における検討断面ごとの信頼性解析結果

(1) 破壊確率，信頼性指標

付表 H-1　目標破壊確率における各断面の破壊確率・信頼性指標(目標破壊確率 9.27×10^{-4}，ターゲット設計水深-7.5m)

断面モデル	モデル別の条件			杭列	現行港湾基準		信頼性解析				H19d基準
	水深 (- m)	地盤反力係数 (kN/m³) 捨石層	地盤反力係数 (kN/m³) 砂層		杭径 (mm)	肉厚 (mm)	肉厚 (mm)	破壊確率 P_f	信頼性指標 β	実質安全率 $Fs=\gamma_S/\gamma_R$	実質安全率 Fs=S/R
①	7.5	3,500	7,500	1列目	600	10.6	10.7	8.880E-04	3.1253	1.274	1.255
				2列目	600	12.6	12.2	8.831E-04	3.1270	1.237	1.274
				3列目	600	18.8	18.6	8.943E-04	3.1232	1.280	1.282
②			22,500	1列目	600	11.0	11.7	8.488E-04	3.1386	1.329	1.246
				2列目	600	12.2	12.0	8.694E-04	3.1316	1.246	1.263
				3列目	600	16.6	16.7	9.003E-04	3.1213	1.284	1.267
③		無し	7,500	1列目	600	13.2	13.2	8.723E-04	3.1306	1.268	1.263
				2列目	600	14.7	14.3	8.958E-04	3.1228	1.250	1.273
				3列目	600	16.5	16.2	8.725E-04	3.1305	1.259	1.278
④			22,500	1列目	600	12.2	12.2	9.154E-04	3.1164	1.252	1.248
				2列目	600	13.6	13.6	8.708E-04	3.1311	1.269	1.259
				3列目	600	15.3	15.3	8.679E-04	3.1321	1.267	1.266
⑤	12.0	3,500	7,500	1列目	700	10.6	9.6	8.801E-04	3.1280	1.136	1.243
				2列目	700	13.1	11.8	8.344E-04	3.1436	1.152	1.264
				3列目	700	18.3	16.5	8.492E-04	3.1385	1.173	1.273
				4列目	700	22.2	20.2	8.792E-04	3.1283	1.190	1.284
⑥			22,500	1列目	700	11.8	10.6	8.643E-04	3.1333	1.132	1.248
				2列目	700	13.0	11.6	8.897E-04	3.1248	1.146	1.263
				3列目	700	17.2	15.7	8.460E-04	3.1395	1.180	1.267
				4列目	700	20.6	18.5	9.202E-04	3.1149	1.183	1.271
⑦		無し	7,500	1列目	700	15.5	14.2	8.328E-04	3.1442	1.164	1.257
				2列目	700	17.0	15.5	8.828E-04	3.1271	1.160	1.264
				3列目	700	18.0	16.4	8.382E-04	3.1423	1.170	1.270
				4列目	700	20.2	18.3	9.016E-04	3.1209	1.172	1.274
⑧			22,500	1列目	700	14.5	13.3	9.102E-04	3.1181	1.177	1.245
				2列目	700	16.0	14.7	8.822E-04	3.1273	1.170	1.254
				3列目	700	16.9	15.5	8.546E-04	3.1366	1.166	1.261
				4列目	700	19.1	17.5	8.478E-04	3.1389	1.182	1.265
⑨		3,500	7,500	1列目	700	10.2	10.1	8.612E-04	3.1343	1.144	1.225
				2列目	700	9.4	9.2	8.809E-04	3.1277	1.133	1.243
				3列目	700	11.8	10.4	8.551E-04	3.1364	1.135	1.253
				4列目	700	16.3	13.8	9.183E-04	3.1155	1.158	1.259
				5列目	700	19.0	15.9	9.096E-04	3.1183	1.170	1.267
⑩			22,500	1列目	700	10.9	10.1	8.612E-04	3.1343	1.144	1.227
				2列目	700	10.2	9.2	8.809E-04	3.1277	1.133	1.239
				3列目	700	11.5	10.4	8.551E-04	3.1364	1.135	1.247
				4列目	700	15.0	13.8	9.183E-04	3.1155	1.158	1.250
				5列目	700	17.3	15.9	9.096E-04	3.1183	1.170	1.254
⑪		無し	7,500	1列目	700	13.1	12.0	8.969E-04	3.1224	1.153	1.242
				2列目	700	14.0	12.9	8.014E-04	3.1554	1.198	1.246
				3列目	700	14.3	13.1	8.476E-04	3.1390	1.157	1.252
				4列目	700	14.8	13.5	8.760E-04	3.1293	1.165	1.257
				5列目	700	16.1	14.7	8.505E-04	3.1380	1.156	1.258
⑫			22,500	1列目	700	12.3	11.4	8.729E-04	3.1304	1.150	1.228
				2列目	700	13.3	12.3	8.545E-04	3.1366	1.155	1.235
				3列目	700	13.6	12.5	9.196E-04	3.1150	1.153	1.242
				4列目	700	13.8	12.7	8.710E-04	3.1310	1.155	1.244
				5列目	700	15.3	14.1	8.462E-04	3.1395	1.159	1.246
⑬	18.0	3,500	7,500	1列目	900	10.5	9.0	9.166E-04	3.1160	1.087	1.255
				2列目	900	11.0	9.3	8.823E-04	3.1272	1.083	1.272
				3列目	900	14.0	11.8	8.056E-04	3.1539	1.097	1.283
				4列目	900	17.6	14.7	9.037E-04	3.1202	1.084	1.291
				5列目	900	24.9	21.0	9.022E-04	3.1207	1.155	1.289
				6列目	900	28.0	23.4	8.519E-04	3.1375	1.113	1.298
⑭			22,500	1列目	1,000	9.5	8.2	7.445E-04	3.1768	1.096	1.257
				2列目	1,000	10.1	8.5	8.285E-04	3.1457	1.073	1.268
				3列目	1,000	11.5	9.7	7.965E-04	3.1572	1.085	1.277
				4列目	1,000	14.1	11.9	8.006E-04	3.1557	1.102	1.283
				5列目	1,000	18.5	15.6	8.690E-04	3.1317	1.107	1.276
				6列目	1,000	19.8	16.8	8.908E-04	3.1244	1.121	1.285
⑮			7,500	1列目	1,300	9.5	8.1	8.330E-04	3.1441	1.102	1.281
				2列目	1,300	19.3	16.3	8.330E-04	3.1441	1.086	1.277
				3列目	1,300	23.2	19.5	7.967E-04	3.1571	1.096	1.293
⑯			22,500	1列目	1,300	10.4	8.9	9.141E-04	3.1168	1.106	1.283
				2列目	1,300	18.7	15.8	8.825E-04	3.1272	1.082	1.272
				3列目	1,300	21.4	18.5	8.241E-04	3.1473	1.116	1.280

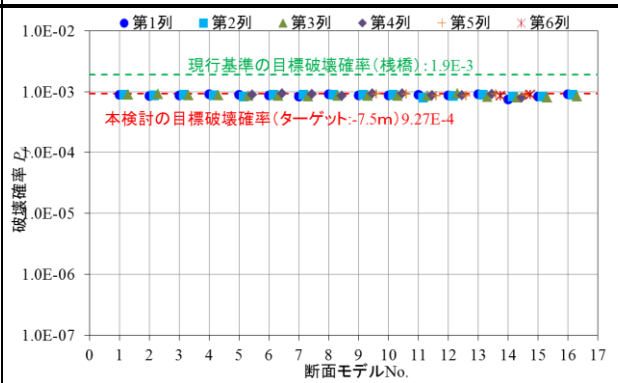
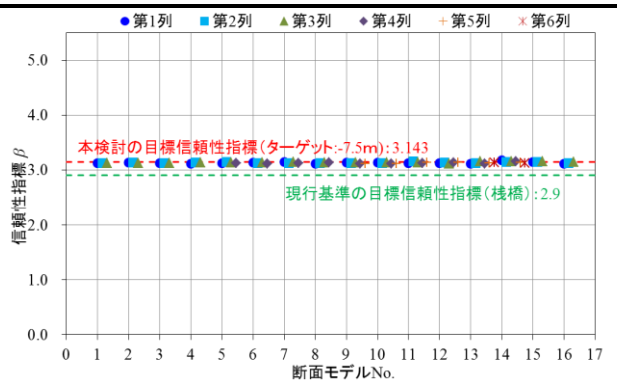
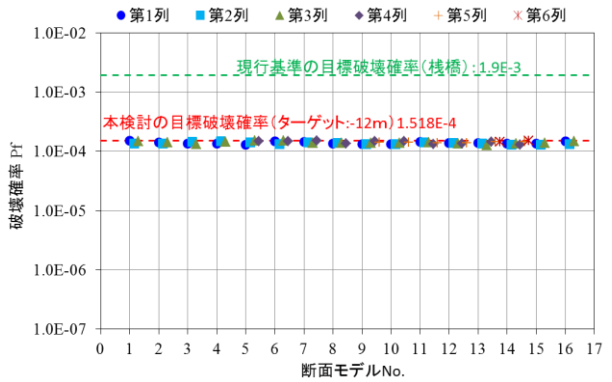
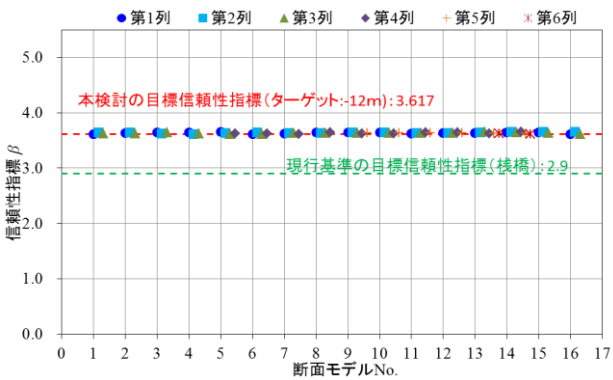
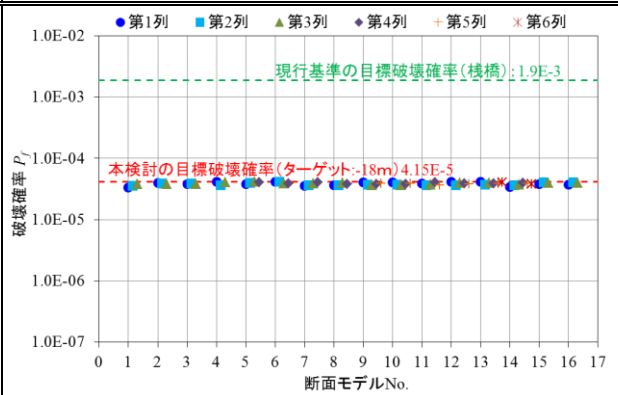
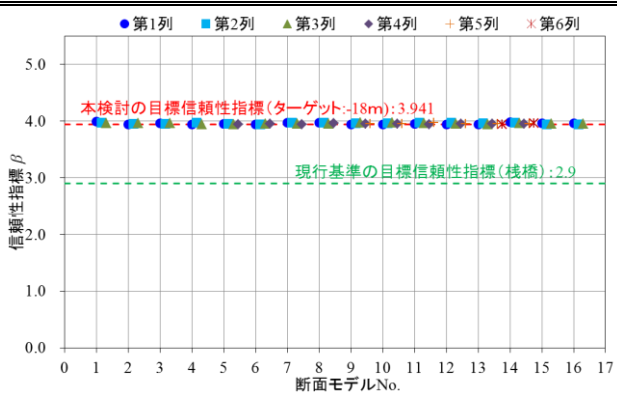
付表 H-2　目標破壊確率における各断面の破壊確率・信頼性指標(目標破壊確率 1.52×10^{-4},　ターゲット設計水深-12m)

断面モデル	モデル別の条件			杭列	現行港湾基準		信頼性解析				H19d基準
	水深 (- m)	地盤反力係数 (kN/m³) 捨石層	地盤反力係数 (kN/m³) 砂層		杭径 (mm)	肉厚 (mm)	肉厚 (mm)	破壊確率 P_f	信頼性指標 β	実質安全率 $Fs=\gamma_S/\gamma_R$	実質安全率 Fs=S/R
①	7.5	3,500	7,500	1列目	600	10.6	11.7	1.495E-04	3.6162	1.408	1.255
				2列目	600	12.6	13.3	1.355E-04	3.6416	1.348	1.274
				3列目	600	18.8	20.3	1.462E-04	3.6220	1.382	1.282
②			22,500	1列目	600	11.0	12.8	1.394E-04	3.6343	1.457	1.246
				2列目	600	12.2	13.1	1.352E-04	3.6422	1.377	1.263
				3列目	600	16.6	18.2	1.424E-04	3.6287	1.401	1.267
③		無し	7,500	1列目	600	13.2	14.4	1.334E-04	3.6455	1.378	1.263
				2列目	600	14.7	15.6	1.428E-04	3.6281	1.365	1.273
				3列目	600	16.5	17.7	1.331E-04	3.6461	1.379	1.278
④			22,500	1列目	600	12.2	13.3	1.351E-04	3.6424	1.368	1.248
				2列目	600	13.6	14.8	1.478E-04	3.6191	1.369	1.259
				3列目	600	15.3	16.7	1.431E-04	3.6275	1.373	1.266
⑤	12.0	3,500	7,500	1列目	700	10.6	10.6	1.291E-04	3.6541	1.244	1.243
				2列目	700	13.1	12.9	1.400E-04	3.6332	1.263	1.264
				3列目	700	18.3	18.1	1.517E-04	3.6124	1.273	1.273
				4列目	700	22.2	22.3	1.466E-04	3.6213	1.305	1.284
⑥			22,500	1列目	700	11.8	11.6	1.476E-04	3.6195	1.228	1.248
				2列目	700	13.0	12.8	1.326E-04	3.6470	1.264	1.263
				3列目	700	17.2	17.2	1.508E-04	3.6139	1.272	1.267
				4列目	700	20.6	20.4	1.471E-04	3.6204	1.262	1.271
⑦		無し	7,500	1列目	700	15.5	15.6	1.446E-04	3.6247	1.269	1.257
				2列目	700	17.0	17.1	1.405E-04	3.6321	1.271	1.264
				3列目	700	18.0	18.1	1.367E-04	3.6392	1.298	1.270
				4列目	700	20.2	20.2	1.518E-04	3.6123	1.287	1.274
⑧			22,500	1列目	700	14.5	14.7	1.343E-04	3.6439	1.268	1.245
				2列目	700	16.0	16.2	1.386E-04	3.6358	1.277	1.254
				3列目	700	16.9	17.1	1.365E-04	3.6397	1.287	1.261
				4列目	700	19.1	19.3	1.356E-04	3.6413	1.283	1.265
⑨		3,500	7,500	1列目	700	10.2	11.1	1.314E-04	3.6495	1.250	1.225
				2列目	700	9.4	10.1	1.321E-04	3.6480	1.233	1.243
				3列目	700	11.8	11.4	1.370E-04	3.6388	1.255	1.253
				4列目	700	16.3	15.2	1.460E-04	3.6223	1.269	1.259
				5列目	700	19.0	17.5	1.413E-04	3.6307	1.269	1.267
⑩			22,500	1列目	700	10.9	11.1	1.314E-04	3.6495	1.250	1.227
				2列目	700	10.2	10.1	1.321E-04	3.6480	1.233	1.239
				3列目	700	11.5	11.4	1.370E-04	3.6388	1.255	1.247
				4列目	700	15.0	15.2	1.460E-04	3.6223	1.269	1.250
				5列目	700	17.3	17.5	1.413E-04	3.6307	1.269	1.254
⑪		無し	7,500	1列目	700	13.1	13.2	1.441E-04	3.6256	1.263	1.242
				2列目	700	14.0	14.1	1.394E-04	3.6343	1.256	1.246
				3列目	700	14.3	14.4	1.401E-04	3.6330	1.263	1.252
				4列目	700	14.8	14.9	1.325E-04	3.6473	1.279	1.257
				5列目	700	16.1	16.2	1.378E-04	3.6371	1.273	1.258
⑫			22,500	1列目	700	12.3	12.5	1.370E-04	3.6387	1.250	1.228
				2列目	700	13.3	13.5	1.375E-04	3.6378	1.257	1.235
				3列目	700	13.6	13.8	1.361E-04	3.6405	1.266	1.242
				4列目	700	13.8	14.0	1.335E-04	3.6453	1.262	1.244
				5列目	700	15.3	15.5	1.388E-04	3.6353	1.280	1.246
⑬	18.0	3,500	7,500	1列目	900	10.5	10.0	1.385E-04	3.6359	1.200	1.255
				2列目	900	11.0	10.3	1.334E-04	3.6456	1.214	1.272
				3列目	900	14.0	13.1	1.262E-04	3.6599	1.216	1.283
				4列目	900	17.6	16.4	1.434E-04	3.6269	1.230	1.291
				5列目	900	24.9	23.5	1.446E-04	3.6249	1.238	1.289
				6列目	900	28.0	26.3	1.444E-04	3.6252	1.229	1.298
⑭			22,500	1列目	1,000	9.5	9.0	1.339E-04	3.6447	1.196	1.257
				2列目	1,000	10.1	9.4	1.289E-04	3.6544	1.194	1.268
				3列目	1,000	11.5	10.7	1.352E-04	3.6421	1.202	1.277
				4列目	1,000	14.1	13.2	1.287E-04	3.6548	1.205	1.283
				5列目	1,000	18.5	17.3	1.429E-04	3.6278	1.202	1.276
				6列目	1,000	19.8	18.7	1.503E-04	3.6148	1.250	1.285
⑮			7,500	1列目	1,300	9.5	9.0	1.347E-04	3.6431	1.228	1.281
				2列目	1,300	19.3	18.1	1.276E-04	3.6570	1.230	1.277
				3列目	1,300	23.2	21.8	1.381E-04	3.6366	1.222	1.293
⑯			22,500	1列目	1,300	10.4	9.9	1.475E-04	3.6197	1.229	1.283
				2列目	1,300	18.7	17.6	1.305E-04	3.6513	1.201	1.272
				3列目	1,300	21.4	20.6	1.481E-04	3.6186	1.239	1.280

付表 H-3　目標破壊確率における各断面の破壊確率・信頼性指標(目標破壊確率 4.15×10^{-5}，ターゲット設計水深-18m)

断面モデル	モデル別の条件			杭列	現行港湾基準		信頼性解析				H19d基準
	水深 (- m)	地盤反力係数 (kN/m³) 捨石層	地盤反力係数 (kN/m³) 砂層		杭径 (mm)	肉厚 (mm)	肉厚 (mm)	破壊確率 P_f	信頼性指標 β	実質安全率 $Fs=\gamma_S/\gamma_R$	実質安全率 Fs=S/R
①	7.5	3,500	7,500	1列目	600	10.6	12.5	3.335E-05	3.9878	1.478	1.255
				2列目	600	12.6	14.1	3.548E-05	3.9731	1.424	1.274
				3列目	600	18.8	21.5	3.793E-05	3.9571	1.451	1.282
②			22,500	1列目	600	11.0	13.5	4.014E-05	3.9436	1.525	1.246
				2列目	600	12.2	13.8	3.873E-05	3.9521	1.427	1.263
				3列目	600	16.6	19.3	3.801E-05	3.9566	1.456	1.267
③		無し	7,500	1列目	600	13.2	15.2	3.790E-05	3.9573	1.447	1.263
				2列目	600	14.7	16.5	3.923E-05	3.9491	1.423	1.273
				3列目	600	16.5	18.7	3.818E-05	3.9556	1.438	1.278
④			22,500	1列目	600	12.2	14.0	4.128E-05	3.9368	1.428	1.248
				2列目	600	13.6	15.7	3.622E-05	3.9681	1.459	1.259
				3列目	600	15.3	17.6	4.025E-05	3.9429	1.449	1.266
⑤	12.0	3,500	7,500	1列目	700	10.6	11.2	3.834E-05	3.9545	1.316	1.243
				2列目	700	13.1	13.7	3.957E-05	3.9470	1.338	1.264
				3列目	700	18.3	19.2	4.124E-05	3.9371	1.338	1.273
				4列目	700	22.2	23.7	4.087E-05	3.9393	1.374	1.284
⑥			22,500	1列目	700	11.8	12.3	4.145E-05	3.9358	1.301	1.248
				2列目	700	13.0	13.5	4.148E-05	3.9357	1.331	1.263
				3列目	700	17.2	18.3	3.911E-05	3.9498	1.349	1.267
				4列目	700	20.6	21.7	3.857E-05	3.9531	1.336	1.271
⑦		無し	7,500	1列目	700	15.5	16.6	3.548E-05	3.9730	1.343	1.257
				2列目	700	17.0	18.2	3.605E-05	3.9693	1.350	1.264
				3列目	700	18.0	19.2	3.910E-05	3.9498	1.353	1.270
				4列目	700	20.2	21.5	4.055E-05	3.9411	1.357	1.274
⑧			22,500	1列目	700	14.5	15.6	3.657E-05	3.9659	1.344	1.245
				2列目	700	16.0	17.2	3.669E-05	3.9650	1.344	1.254
				3列目	700	16.9	18.1	3.942E-05	3.9479	1.344	1.261
				4列目	700	19.1	20.5	3.768E-05	3.9587	1.353	1.265
⑨		3,500	7,500	1列目	700	10.2	11.7	4.046E-05	3.9417	1.327	1.225
				2列目	700	9.4	10.7	3.722E-05	3.9617	1.310	1.243
				3列目	700	11.8	12.1	3.605E-05	3.9693	1.312	1.253
				4列目	700	16.3	16.1	3.833E-05	3.9546	1.341	1.259
				5列目	700	19.0	18.6	3.860E-05	3.9529	1.349	1.267
⑩			22,500	1列目	700	10.9	11.7	4.046E-05	3.9417	1.327	1.227
				2列目	700	10.2	10.7	3.722E-05	3.9617	1.310	1.239
				3列目	700	11.5	12.1	3.605E-05	3.9693	1.312	1.247
				4列目	700	15.0	16.1	3.833E-05	3.9546	1.341	1.250
				5列目	700	17.3	18.6	3.860E-05	3.9529	1.349	1.254
⑪		無し	7,500	1列目	700	13.1	14.0	3.875E-05	3.9520	1.324	1.242
				2列目	700	14.0	15.0	3.636E-05	3.9672	1.333	1.246
				3列目	700	14.3	15.3	3.744E-05	3.9602	1.351	1.252
				4列目	700	14.8	15.7	4.099E-05	3.9385	1.333	1.257
				5列目	700	16.1	17.2	3.653E-05	3.9661	1.356	1.258
⑫			22,500	1列目	700	12.3	13.2	4.120E-05	3.9373	1.316	1.228
				2列目	700	13.3	14.3	3.631E-05	3.9675	1.335	1.235
				3列目	700	13.6	14.6	3.955E-05	3.9471	1.334	1.242
				4列目	700	13.8	14.8	3.876E-05	3.9519	1.340	1.244
				5列目	700	15.3	16.4	3.835E-05	3.9545	1.337	1.246
⑬	18.0	3,500	7,500	1列目	900	10.5	10.6	4.103E-05	3.9383	1.267	1.255
				2列目	900	11.0	11.0	3.748E-05	3.9600	1.288	1.272
				3列目	900	14.0	13.9	4.015E-05	3.9435	1.299	1.283
				4列目	900	17.6	17.5	3.916E-05	3.9495	1.289	1.291
				5列目	900	24.9	25.1	3.928E-05	3.9488	1.303	1.289
				6列目	900	28.0	28.1	4.022E-05	3.9431	1.326	1.298
⑭			22,500	1列目	1,000	9.5	9.6	3.389E-05	3.9839	1.288	1.257
				2列目	1,000	10.1	10.0	3.607E-05	3.9691	1.260	1.268
				3列目	1,000	11.5	11.4	3.762E-05	3.9591	1.280	1.277
				4列目	1,000	14.1	14.0	3.955E-05	3.9471	1.278	1.283
				5列目	1,000	18.5	18.5	3.909E-05	3.9499	1.282	1.276
				6列目	1,000	19.8	20.0	3.801E-05	3.9566	1.296	1.285
⑮			7,500	1列目	1,300	9.5	9.6	3.821E-05	3.9554	1.319	1.281
				2列目	1,300	19.3	19.1	4.074E-05	3.9400	1.267	1.277
				3列目	1,300	23.2	23.2	3.948E-05	3.9476	1.293	1.293
⑯			22,500	1列目	1,300	10.4	10.6	3.724E-05	3.9615	1.312	1.283
				2列目	1,300	18.7	18.6	4.052E-05	3.9413	1.279	1.272
				3列目	1,300	21.4	22.0	3.978E-05	3.9457	1.339	1.280

付表 H-4　目標破壊確率における各断面の破壊確率・信頼性指標

目標破壊確率	破壊確率	信頼性指標
9.27×10^{-4} (ターゲット設計水深-7.5m)		
1.52×10^{-4} (ターゲット設計水深-12m)		
4.15×10^{-5} (ターゲット設計水深-18m)		

(2) 部分係数・感度係数算出結果

付表 H-5　目標破壊確率に相当する部分係数(目標破壊確率 9.27×10^{-4}, ターゲット設計水深-7.5m)

断面モデル	杭列	信頼性解析 杭諸元 杭径(mm)	信頼性解析 杭諸元 肉厚(mm)	モデル別の条件 水深(-m)	モデル別の条件 地盤反力係数 捨石層	モデル別の条件 地盤反力係数 砂層	部分係数 手法A 水平力 g.HA4	手法A 原地盤反力係数 g.khaA4	手法A 捨石地盤反力係数 g.khbA4	手法A 降伏強度 g.σbyA4	手法B 曲げモーメント g.MB4	手法B 軸力 g.NB4	手法B 降伏強度 g.σbyB4	手法C 作用 g.SC4	手法C 抵抗 g.RC4
断面1	1列目	600	10.7	7.5	3,500	7,500	1.29	0.63	0.46	1.05	2.27	0.62	1.05	1.34	1.05
	2列目	600	12.2				1.28	0.56	0.38	1.04	2.00	0.69	1.04	1.29	1.04
	3列目	600	18.6				1.33	0.63	0.52	1.02	1.84	0.79	1.02	1.31	1.02
断面2	1列目	600	11.7			22,500	1.31	0.53	0.62	1.05	2.14	0.69	1.05	1.40	1.05
	2列目	600	12.0				1.33	0.59	0.53	1.05	2.08	0.67	1.05	1.31	1.05
	3列目	600	16.7				1.33	0.66	0.97	1.02	2.07	0.70	1.02	1.31	1.02
断面3	1列目	600	13.2		無し	7,500	1.32	0.33		1.06	1.60	0.85	1.06	1.35	1.06
	2列目	600	14.3				1.31	0.60		1.01	1.81	0.74	1.01	1.27	1.01
	3列目	600	16.2				1.33	0.40		1.06	2.16	0.70	1.06	1.33	1.06
断面4	1列目	600	12.2			22,500	1.32	0.33		1.06	1.77	0.76	1.06	1.33	1.06
	2列目	600	13.6				1.33	0.28		1.07	1.98	0.74	1.07	1.35	1.07
	3列目	600	15.3				1.33	0.31		1.07	2.30	0.67	1.07	1.35	1.07
断面5	1列目	700	9.6	12.0	3,500	7,500	1.29	0.67	0.47	1.10	2.05	0.64	1.10	1.25	1.10
	2列目	700	11.8				1.31	0.36	0.46	1.13	1.66	0.82	1.13	1.30	1.13
	3列目	700	16.5				1.31	0.63	0.51	1.10	1.39	0.99	1.10	1.29	1.10
	4列目	700	20.2				1.28	0.66	0.71	1.08	1.35	1.04	1.08	1.28	1.08
断面6	1列目	700	10.6			22,500	1.32	0.82	0.62	1.10	1.85	0.70	1.10	1.24	1.10
	2列目	700	11.6				1.28	0.51	0.62	1.08	1.64	0.79	1.08	1.24	1.08
	3列目	700	15.7				1.31	0.52	0.74	1.10	1.46	0.95	1.10	1.30	1.10
	4列目	700	18.5				1.32	0.72	0.65	1.07	1.47	0.95	1.07	1.27	1.07
断面7	1列目	700	14.2		無し	7,500	1.32	0.83		1.08	1.21	1.04	1.08	1.25	1.08
	2列目	700	15.5				1.32	0.51		1.12	1.29	1.04	1.12	1.30	1.12
	3列目	700	16.4				1.29	0.70		1.08	1.38	0.98	1.08	1.26	1.08
	4列目	700	18.3				1.31	0.44		1.12	1.61	0.92	1.12	1.31	1.12
断面8	1列目	700	13.3			22,500	1.32	0.47		1.09	1.31	0.99	1.09	1.29	1.09
	2列目	700	14.7				1.32	0.61		1.09	1.39	0.96	1.09	1.28	1.09
	3列目	700	15.5				1.31	0.63		1.10	1.47	0.94	1.10	1.28	1.10
	4列目	700	17.5				1.29	0.47		1.09	1.68	0.86	1.09	1.29	1.09
断面9	1列目	700	10.1		3,500	7,500	0.98	0.63	0.31	0.95	2.46	0.46	0.95	1.08	0.95
	2列目	700	9.2				1.32	0.75	0.57	1.10	2.26	0.60	1.10	1.24	1.10
	3列目	700	10.4				1.30	0.51	0.46	1.11	2.00	0.68	1.11	1.26	1.11
	4列目	700	13.8				1.29	0.72	0.78	1.09	1.76	0.77	1.09	1.26	1.09
	5列目	700	15.9				1.31	0.53	0.70	1.10	1.71	0.83	1.10	1.28	1.10
断面10	1列目	700	10.1			22,500	0.98	0.63	0.31	0.95	2.46	0.46	0.95	1.08	0.95
	2列目	700	9.2				1.32	0.75	0.57	1.10	2.26	0.60	1.10	1.24	1.10
	3列目	700	10.4				1.30	0.51	0.46	1.11	2.00	0.68	1.11	1.26	1.11
	4列目	700	13.8				1.29	0.72	0.78	1.09	1.76	0.77	1.09	1.26	1.09
	5列目	700	15.9				1.31	0.53	0.70	1.10	1.71	0.83	1.10	1.28	1.10
断面11	1列目	700	12.0		無し	7,500	1.32	0.48		1.11	1.61	0.82	1.11	1.27	1.11
	2列目	700	12.9				1.32	0.51		1.07	1.68	0.81	1.07	1.28	1.07
	3列目	700	13.1				1.32	0.46		1.11	1.70	0.82	1.11	1.29	1.11
	4列目	700	13.5				1.31	0.59		1.09	1.75	0.79	1.09	1.27	1.09
	5列目	700	14.7				1.29	0.55		1.09	1.95	0.72	1.09	1.27	1.09
断面12	1列目	700	11.4			22,500	1.29	0.80		1.06	1.75	0.73	1.06	1.22	1.06
	2列目	700	12.3				1.31	0.60		1.09	1.79	0.74	1.09	1.25	1.09
	3列目	700	12.5				1.30	0.60		1.08	1.81	0.74	1.08	1.25	1.08
	4列目	700	12.7				1.29	0.48		1.09	1.86	0.74	1.09	1.26	1.09
	5列目	700	14.1				1.32	0.65		1.10	2.05	0.69	1.10	1.27	1.10
断面13	1列目	900	9.0	18.0	3,500	7,500	1.00	0.66	0.29	1.02	1.28	0.89	1.02	1.11	1.02
	2列目	900	9.3				1.00	0.59	0.30	1.00	1.12	0.99	1.00	1.09	1.00
	3列目	900	11.8				0.99	0.70	0.41	0.95	0.90	1.18	0.95	1.04	0.95
	4列目	900	14.7				1.00	0.65	0.54	0.95	0.68	1.54	0.95	1.03	0.95
	5列目	900	21.0				1.31	0.67	0.73	1.13	0.58	2.34	1.13	1.30	1.13
	6列目	900	23.4				1.31	0.54	0.72	1.19	0.78	1.96	1.19	1.33	1.19
断面14	1列目	1,000	8.2			22,500	0.99	0.66	0.27	1.00	1.08	1.03	1.00	1.09	1.00
	2列目	1,000	8.5				0.99	0.45	0.32	0.99	1.01	1.06	0.99	1.06	0.99
	3列目	1,000	9.7				1.00	0.64	0.30	0.98	0.86	1.24	0.98	1.06	0.98
	4列目	1,000	11.9				0.99	0.79	0.55	0.92	0.71	1.44	0.92	1.02	0.92
	5列目	1,000	15.6				1.29	0.57	0.53	1.14	0.64	2.05	1.14	1.27	1.14
	6列目	1,000	16.8				1.29	0.71	0.76	1.13	0.82	1.73	1.13	1.27	1.13
断面15	1列目	1,300	8.1			7,500	1.00	0.70	0.26	1.04	0.78	1.49	1.04	1.15	1.04
	2列目	1,300	16.3				0.98	0.41	0.52	0.95	0.67	1.54	0.95	1.03	0.95
	3列目	1,300	19.5				0.99	0.38	0.61	0.95	0.54	1.96	0.95	1.04	0.95
断面16	1列目	1,300	8.9			22,500	1.00	0.60	0.42	0.99	0.71	1.57	0.99	1.10	0.99
	2列目	1,300	15.8				0.99	0.63	0.62	0.94	0.70	1.46	0.94	1.02	0.94
	3列目	1,300	18.5				1.00	0.66	0.50	0.94	0.58	1.84	0.94	1.04	0.94
					平均値 −7.5m	海側杭	1.31	0.46	0.54	1.06	1.94	0.73	1.06	1.35	1.06
						中央杭群	1.31	0.51	0.46	1.04	1.97	0.71	1.04	1.31	1.04
						陸側杭	1.33	0.50	0.75	1.04	2.09	0.72	1.04	1.32	1.04
					平均値 −12m	海側杭	1.23	0.67	0.43	1.05	1.84	0.73	1.05	1.21	1.05
						中央杭群	1.31	0.58	0.60	1.10	1.72	0.81	1.10	1.27	1.10
						陸側杭	1.30	0.57	0.69	1.09	1.69	0.86	1.09	1.28	1.09
					平均値 −18m	海側杭	1.00	0.65	0.31	1.01	0.96	1.25	1.01	1.11	1.01
						中央杭群	1.05	0.61	0.48	1.00	0.79	1.48	1.00	1.09	1.00
						陸側杭	1.15	0.57	0.65	1.05	0.68	1.87	1.05	1.17	1.05

付表 H-6　目標破壊確率に相当する感度係数(目標破壊確率 9.27×10^{-4}，ターゲット設計水深-7.5m)

断面モデル	杭列	信頼性解析 杭諸元 杭径(mm)	肉厚(mm)	モデル別の条件 水深（- m）	地盤反力係数 捨石層	砂層	感度係数 手法A 水平力 α.HA4	原地盤反力係数 α.khaA4	捨石地盤反力係数 α.khbA4	降伏強度 α.σbyA4	手法B 曲げモーメント α.MB4	軸力 α.NB4	降伏強度 α.σbyB4	手法C 作用 α.SC4	抵抗 α.RC4
断面1	1列目	600	10.7	7.5	3,500	7,500	-0.74	0.26	0.42	0.47	-0.46	0.88	0.11	-0.90	0.44
	2列目	600	12.2				-0.69	0.30	0.48	0.46	-0.13	0.99	0.04	-0.88	0.48
	3列目	600	18.6				-0.75	0.25	0.33	0.52	-0.63	0.74	0.23	-0.84	0.55
断面2	1列目	600	11.7			22,500	-0.77	0.34	0.27	0.46	-0.47	0.87	0.13	-0.90	0.43
	2列目	600	12.0				-0.77	0.28	0.34	0.46	-0.09	1.00	0.02	-0.89	0.46
	3列目	600	16.7				-0.79	0.23	0.04	0.56	-0.53	0.83	0.17	-0.83	0.56
断面3	1列目	600	13.2		無し	7,500	-0.73	0.54		0.41	-0.58	0.78	0.22	-0.91	0.42
	2列目	600	14.3				-0.77	0.29		0.58	-0.05	1.00	0.02	-0.82	0.57
	3列目	600	16.2				-0.77	0.47		0.43	-0.59	0.79	0.14	-0.90	0.44
断面4	1列目	600	12.2			22,500	-0.73	0.54		0.41	-0.50	0.85	0.16	-0.91	0.42
	2列目	600	13.6				-0.71	0.59		0.37	-0.06	1.00	0.01	-0.92	0.39
	3列目	600	15.3				-0.73	0.57		0.38	-0.57	0.82	0.11	-0.92	0.40
断面5	1列目	700	9.6	12.0	3,500	7,500	-0.87	0.21	0.36	0.28	-0.45	0.89	0.07	-0.96	0.27
	2列目	700	11.8				-0.81	0.44	0.34	0.19	-0.40	0.92	0.06	-0.98	0.20
	3列目	700	16.5				-0.88	0.23	0.32	0.28	-0.05	1.00	0.01	-0.96	0.28
	4列目	700	20.2				-0.89	0.22	0.19	0.36	-0.72	-0.64	0.27	-0.94	0.35
断面6	1列目	700	10.6			22,500	-0.92	0.12	0.25	0.29	-0.45	0.89	0.08	-0.96	0.28
	2列目	700	11.6				-0.85	0.32	0.24	0.34	-0.32	0.95	0.08	-0.94	0.34
	3列目	700	15.7				-0.89	0.31	0.16	0.28	-0.18	0.98	0.05	-0.96	0.28
	4列目	700	18.5				-0.90	0.17	0.22	0.35	-0.95	-0.11	0.30	-0.93	0.36
断面7	1列目	700	14.2		無し	7,500	-0.93	0.11		0.35	-0.87	0.30	0.39	-0.94	0.35
	2列目	700	15.5				-0.91	0.33		0.23	-0.90	-0.35	0.24	-0.97	0.23
	3列目	700	16.4				-0.91	0.19		0.35	-0.91	0.26	0.32	-0.94	0.35
	4列目	700	18.3				-0.89	0.40		0.22	-0.98	0.10	0.18	-0.97	0.22
断面8	1列目	700	13.3			22,500	-0.89	0.35		0.29	-0.81	0.51	0.28	-0.96	0.29
	2列目	700	14.7				-0.92	0.26		0.30	-0.61	0.77	0.19	-0.95	0.30
	3列目	700	15.5				-0.92	0.24		0.30	-0.51	0.85	0.14	-0.96	0.29
	4列目	700	17.5				-0.88	0.37		0.31	-0.88	0.43	0.21	-0.95	0.31
断面9	1列目	700	10.1		3,500	7,500	-0.47	0.22	0.53	0.67	-0.26	0.96	0.08	-0.69	0.73
	2列目	700	9.2				-0.90	0.16	0.28	0.29	-0.20	0.98	0.03	-0.96	0.28
	3列目	700	10.4				-0.85	0.32	0.36	0.23	-0.12	0.99	0.02	-0.97	0.24
	4列目	700	13.8				-0.91	0.18	0.14	0.33	-0.09	1.00	0.02	-0.94	0.33
	5列目	700	15.9				-0.89	0.31	0.18	0.29	-0.72	0.67	0.15	-0.96	0.30
断面10	1列目	700	10.1			22,500	-0.47	0.22	0.53	0.67	-0.26	0.96	0.08	-0.69	0.73
	2列目	700	9.2				-0.90	0.16	0.28	0.29	-0.20	0.98	0.03	-0.96	0.28
	3列目	700	10.4				-0.85	0.32	0.36	0.23	-0.12	0.99	0.02	-0.97	0.24
	4列目	700	13.8				-0.91	0.18	0.14	0.33	-0.09	1.00	0.02	-0.94	0.33
	5列目	700	15.9				-0.89	0.31	0.18	0.29	-0.72	0.67	0.15	-0.96	0.30
断面11	1列目	700	12.0		無し	7,500	-0.90	0.35		0.26	-0.49	0.87	0.10	-0.97	0.26
	2列目	700	12.9				-0.88	0.31		0.36	-0.25	0.97	0.07	-0.93	0.36
	3列目	700	13.1				-0.90	0.37		0.24	-0.04	1.00	0.01	-0.97	0.24
	4列目	700	13.5				-0.91	0.27		0.31	-0.22	0.97	0.05	-0.95	0.31
	5列目	700	14.7				-0.90	0.31		0.30	-0.55	0.83	0.10	-0.95	0.30
断面12	1列目	700	11.4			22,500	-0.91	0.13		0.40	-0.39	0.92	0.11	-0.92	0.39
	2列目	700	12.3				-0.91	0.26		0.33	-0.21	0.98	0.04	-0.95	0.32
	3列目	700	12.5				-0.91	0.26		0.33	-0.03	1.00	0.01	-0.94	0.33
	4列目	700	12.7				-0.88	0.36		0.31	-0.18	0.98	0.04	-0.95	0.31
	5列目	700	14.1				-0.93	0.23		0.30	-0.51	0.86	0.08	-0.96	0.29
断面13	1列目	900	9.0	18.0	3,500	7,500	-0.65	0.20	0.56	0.47	-0.52	0.82	0.24	-0.88	0.48
	2列目	900	9.3				-0.63	0.25	0.53	0.51	-0.65	0.64	0.42	-0.84	0.55
	3列目	900	11.8				-0.62	0.17	0.40	0.65	-0.30	-0.88	0.38	-0.74	0.68
	4列目	900	14.7				-0.65	0.21	0.29	0.67	-0.05	-0.99	0.13	-0.73	0.69
	5列目	900	21.0				-0.96	0.18	0.15	0.17	0.00	-1.00	0.00	-0.98	0.17
	6列目	900	23.4				-0.95	0.27	0.15	0.02	-0.08	-1.00	0.00	-1.00	0.02
断面14	1列目	1,000	8.2			22,500	-0.61	0.20	0.56	0.53	-0.73	0.43	0.53	-0.83	0.56
	2列目	1,000	8.5				-0.60	0.34	0.48	0.54	-0.75	-0.15	0.64	-0.80	0.60
	3列目	1,000	9.7				-0.61	0.20	0.51	0.57	-0.16	-0.97	0.20	-0.78	0.62
	4列目	1,000	11.9				-0.62	0.12	0.28	0.72	-0.04	-0.99	0.12	-0.68	0.74
	5列目	1,000	15.6				-0.92	0.24	0.27	0.14	0.00	-1.00	0.00	-0.99	0.14
	6列目	1,000	16.8				-0.96	0.16	0.13	0.17	-0.10	-0.99	0.04	-0.99	0.17
断面15	1列目	1,300	8.1			7,500	-0.65	0.18	0.61	0.43	-0.20	-0.96	0.22	-0.90	0.43
	2列目	1,300	16.3				-0.59	0.39	0.29	0.64	-0.05	-0.99	0.14	-0.72	0.70
	3列目	1,300	19.5				-0.61	0.42	0.23	0.64	-0.01	-0.99	0.13	-0.72	0.69
断面16	1列目	1,300	8.9			22,500	-0.67	0.25	0.41	0.57	-0.13	-0.96	0.25	-0.82	0.57
	2列目	1,300	15.8				-0.64	0.23	0.23	0.70	-0.05	-0.99	0.12	-0.70	0.71
	3列目	1,300	18.5				-0.63	0.20	0.31	0.69	-0.02	-0.99	0.15	-0.69	0.72
					平均値 −7.5m	海側杭	-0.74	0.42	0.34	0.44	-0.50	0.85	0.16	-0.90	0.43
						中央杭群	-0.73	0.37	0.41	0.47	-0.08	1.00	0.02	-0.88	0.48
						陸側杭	-0.76	0.38	0.19	0.47	-0.58	0.80	0.16	-0.87	0.49
					平均値 −12m	海側杭	-0.79	0.21	0.41	0.40	-0.50	0.79	0.15	-0.88	0.41
						中央杭群	-0.89	0.27	0.26	0.29	-0.28	0.86	0.07	-0.96	0.29
						陸側杭	-0.89	0.29	0.19	0.30	-0.75	0.35	0.18	-0.95	0.30
					平均値 −18m	海側杭	-0.64	0.21	0.53	0.50	-0.39	-0.17	0.31	-0.86	0.51
						中央杭群	-0.68	0.23	0.34	0.53	-0.20	-0.73	0.21	-0.79	0.56
						陸側杭	-0.79	0.26	0.21	0.38	-0.05	-0.99	0.08	-0.85	0.40

付表 H-7 目標破壊確率に相当する部分係数(目標破壊確率 1.52×10^{-4}，ターゲット設計水深-12m)

断面モデル	杭列	信頼性解析 杭諸元 杭径(mm)	信頼性解析 杭諸元 肉厚(mm)	モデル別の条件 水深(-m)	地盤反力係数 捨石層	地盤反力係数 砂層	部分係数 手法A 水平力 g.HA4	手法A 原地盤反力係数 g.khaA4	手法A 捨石地盤反力係数 g.khbA4	手法A 降伏強度 g.σbyA4	手法B 曲げモーメント g.MB4	手法B 軸力 g.NB4	手法B 降伏強度 g.σbyB4	手法C 作用 g.SC4	手法C 抵抗 g.RC4
断面1	1列目	600	11.7	7.5	3,500	7,500	1.33	0.54	0.31	1.01	2.24	0.67	1.01	1.42	1.01
	2列目	600	13.3				1.31	0.59	0.35	0.97	2.00	0.70	0.97	1.31	0.97
	3列目	600	20.3				1.29	0.35	0.90	0.96	1.83	0.80	0.96	1.32	0.96
断面2	1列目	600	12.8			22,500	1.31	0.40	0.43	1.00	2.13	0.72	1.00	1.45	1.00
	2列目	600	13.1				1.33	0.43	0.50	0.97	2.08	0.69	0.97	1.33	0.97
	3列目	600	18.2				1.32	0.32	0.69	0.97	2.08	0.73	0.97	1.35	0.97
断面3	1列目	600	14.4		無し	7,500	1.31	0.41		0.96	1.61	0.83	0.96	1.32	0.96
	2列目	600	15.6				1.33	0.33		0.97	1.81	0.78	0.97	1.33	0.97
	3列目	600	17.7				1.32	0.38		0.96	2.16	0.70	0.96	1.33	0.96
断面4	1列目	600	13.3			22,500	1.32	0.31		0.97	1.77	0.77	0.97	1.33	0.97
	2列目	600	14.8				1.32	0.38		0.97	1.98	0.72	0.97	1.32	0.97
	3列目	600	16.7				1.32	0.44		0.96	2.29	0.66	0.96	1.32	0.96
断面5	1列目	700	10.6	12.0	3,500	7,500	1.31	0.64	0.34	1.05	2.04	0.68	1.05	1.30	1.05
	2列目	700	12.9				1.32	0.74	0.49	1.02	1.66	0.81	1.02	1.28	1.02
	3列目	700	18.1				1.30	0.74	0.64	1.00	1.39	0.97	1.00	1.27	1.00
	4列目	700	22.3				1.32	0.90	0.70	1.00	1.36	1.06	1.00	1.31	1.00
断面6	1列目	700	11.6			22,500	1.28	0.53	0.51	1.01	1.85	0.70	1.01	1.24	1.01
	2列目	700	12.8				1.31	0.78	0.42	1.01	1.63	0.82	1.01	1.28	1.01
	3列目	700	17.2				1.31	0.38	0.67	1.03	1.46	0.96	1.03	1.31	1.03
	4列目	700	20.4				1.31	0.66	0.53	1.00	1.47	0.94	1.00	1.26	1.00
断面7	1列目	700	15.6		無し	7,500	1.32	0.38		1.03	1.19	1.10	1.03	1.31	1.03
	2列目	700	17.1				1.31	0.58		1.01	1.29	1.03	1.01	1.28	1.01
	3列目	700	18.1				1.31	0.40		1.01	1.38	1.03	1.01	1.32	1.01
	4列目	700	20.2				1.32	0.42		1.03	1.61	0.92	1.03	1.32	1.03
断面8	1列目	700	14.7			22,500	1.31	0.49		1.01	1.31	0.99	1.01	1.28	1.01
	2列目	700	16.2				1.29	0.58		0.99	1.39	0.95	0.99	1.26	0.99
	3列目	700	17.1				1.31	0.60		1.00	1.47	0.94	1.00	1.28	1.00
	4列目	700	19.3				1.31	0.45		1.01	1.68	0.87	1.01	1.30	1.01
断面9	1列目	700	11.1		3,500	7,500	1.31	0.84	0.42	1.03	2.39	0.59	1.03	1.28	1.03
	2列目	700	10.1				1.32	0.61	0.44	1.03	2.26	0.61	1.03	1.26	1.03
	3列目	700	11.4				1.32	0.55	0.52	1.01	2.00	0.68	1.01	1.27	1.01
	4列目	700	15.2				1.31	0.47	0.62	1.02	1.76	0.79	1.02	1.29	1.02
	5列目	700	17.5				1.31	0.43	0.59	1.02	1.71	0.84	1.02	1.29	1.02
断面10	1列目	700	11.1			22,500	1.31	0.84	0.42	1.03	2.39	0.59	1.03	1.28	1.03
	2列目	700	10.1				1.32	0.61	0.44	1.03	2.26	0.61	1.03	1.26	1.03
	3列目	700	11.4				1.32	0.55	0.52	1.01	2.00	0.68	1.01	1.27	1.01
	4列目	700	15.2				1.31	0.47	0.62	1.02	1.76	0.79	1.02	1.29	1.02
	5列目	700	17.5				1.31	0.43	0.59	1.02	1.71	0.84	1.02	1.29	1.02
断面11	1列目	700	13.2		無し	7,500	1.32	0.51		1.01	1.61	0.82	1.01	1.27	1.01
	2列目	700	14.1				1.30	0.44		1.02	1.68	0.81	1.02	1.28	1.02
	3列目	700	14.4				1.31	0.35		1.03	1.70	0.83	1.03	1.30	1.03
	4列目	700	14.9				1.32	0.66		0.99	1.75	0.79	0.99	1.27	0.99
	5列目	700	16.2				1.31	0.41		1.02	1.96	0.74	1.02	1.30	1.02
断面12	1列目	700	12.5			22,500	1.29	0.67		0.99	1.75	0.74	0.99	1.23	0.99
	2列目	700	13.5				1.31	0.43		1.01	1.79	0.76	1.01	1.27	1.01
	3列目	700	13.8				1.31	0.60		1.00	1.81	0.75	1.00	1.26	1.00
	4列目	700	14.0				1.31	0.45		1.01	1.86	0.75	1.01	1.28	1.01
	5列目	700	15.5				1.32	0.40		1.01	2.05	0.71	1.01	1.30	1.01
断面13	1列目	900	10.0	18.0	3,500	7,500	1.00	0.58	0.24	0.94	1.28	0.91	0.94	1.13	0.94
	2列目	900	10.3				1.32	0.87	0.56	1.05	1.09	1.22	1.05	1.28	1.05
	3列目	900	13.1				1.31	0.64	0.51	1.07	0.87	1.54	1.07	1.30	1.07
	4列目	900	16.4				1.31	0.64	0.65	1.05	0.65	2.01	1.05	1.29	1.05
	5列目	900	23.5				1.32	0.74	0.58	1.06	0.58	2.36	1.06	1.31	1.06
	6列目	900	26.3				1.31	0.58	0.81	1.07	0.77	1.94	1.07	1.32	1.07
断面14	1列目	1,000	9.0			22,500	0.99	0.75	0.38	0.90	1.08	1.01	0.90	1.07	0.90
	2列目	1,000	9.4				1.32	0.55	0.43	1.08	0.97	1.37	1.08	1.29	1.08
	3列目	1,000	10.7				1.29	0.80	0.41	1.06	0.84	1.57	1.06	1.28	1.06
	4列目	1,000	13.2				1.29	0.58	0.45	1.07	0.69	1.91	1.07	1.29	1.07
	5列目	1,000	17.3				1.30	0.42	0.79	1.07	0.64	2.09	1.07	1.29	1.07
	6列目	1,000	18.7				1.31	0.55	0.76	1.04	0.83	1.77	1.04	1.30	1.04
断面15	1列目	1,300	9.0			7,500	1.30	0.45	0.41	1.08	0.73	1.81	1.08	1.33	1.08
	2列目	1,300	18.1				1.32	0.59	0.47	1.06	0.65	2.06	1.06	1.30	1.06
	3列目	1,300	21.8				1.32	0.38	0.46	1.10	0.59	2.60	1.10	1.34	1.10
断面16	1列目	1,300	9.9			22,500	1.31	0.43	0.51	1.10	0.65	2.04	1.10	1.35	1.10
	2列目	1,300	17.6				1.30	0.60	0.42	1.07	0.68	1.94	1.07	1.29	1.07
	3列目	1,300	20.6				1.31	0.53	0.65	1.08	0.63	2.43	1.08	1.34	1.08
					平均値 −7.5m	海側杭	1.32	0.42	0.37	0.98	1.94	0.75	0.98	1.38	0.98
						中央杭群	1.32	0.43	0.43	0.97	1.97	0.72	0.97	1.32	0.97
						陸側杭	1.31	0.37	0.80	0.96	2.09	0.72	0.96	1.33	0.96
					平均値 −12m	海側杭	1.31	0.61	0.42	1.02	1.82	0.77	1.02	1.28	1.02
						中央杭群	1.31	0.55	0.54	1.01	1.72	0.82	1.01	1.28	1.01
						陸側杭	1.31	0.51	0.60	1.01	1.69	0.87	1.01	1.30	1.01
					平均値 −18m	海側杭	1.15	0.55	0.39	1.00	0.93	1.44	1.00	1.22	1.00
						中央杭群	1.31	0.64	0.53	1.06	0.77	1.81	1.06	1.29	1.06
						陸側杭	1.31	0.51	0.67	1.07	0.71	2.18	1.07	1.32	1.07

付表 H-8　目標破壊確率に相当する感度係数(目標破壊確率 1.52×10^{-4}，ターゲット設計水深-12m)

断面モデル	杭列	信頼性解析 杭諸元 杭径(mm)	肉厚(mm)	モデル別の条件 水深（- m）	地盤反力係数 捨石層	砂層	感度係数 手法A 水平力 α.HA4	原地盤反力係数 α.khaA4	捨石地盤反力係数 α.khbA4	降伏強度 α.σbyA4	手法B 曲げモーメント α.MB4	軸力 α.NB4	降伏強度 α.σbyB4	手法C 作用 α.SC4	抵抗 α.RC4
断面1	1列目	600	11.7	7.5	3,500	7,500	-0.66	0.28	0.50	0.49	-0.50	0.85	0.15	-0.89	0.46
	2列目	600	13.3				-0.63	0.24	0.45	0.58	-0.14	0.99	0.06	-0.80	0.60
	3列目	600	20.3				-0.62	0.46	0.07	0.63	-0.63	0.71	0.32	-0.75	0.66
断面2	1列目	600	12.8			22,500	-0.64	0.41	0.38	0.53	-0.50	0.85	0.19	-0.86	0.51
	2列目	600	13.1				-0.65	0.36	0.31	0.60	-0.10	0.99	0.04	-0.79	0.61
	3列目	600	18.2				-0.63	0.48	0.17	0.59	-0.57	0.79	0.23	-0.78	0.62
断面3	1列目	600	14.4		無し	7,500	-0.66	0.40		0.64	-0.53	0.78	0.35	-0.77	0.64
	2列目	600	15.6				-0.65	0.48		0.58	-0.06	1.00	0.03	-0.81	0.59
	3列目	600	17.7				-0.66	0.43		0.62	-0.58	0.78	0.22	-0.78	0.62
断面4	1列目	600	13.3			22,500	-0.64	0.51		0.58	-0.50	0.83	0.26	-0.80	0.60
	2列目	600	14.8				-0.66	0.43		0.61	-0.05	1.00	0.02	-0.78	0.62
	3列目	600	16.7				-0.68	0.37		0.63	-0.54	0.82	0.19	-0.77	0.64
断面5	1列目	700	10.6	12.0	3,500	7,500	-0.78	0.20	0.45	0.38	-0.47	0.87	0.11	-0.93	0.36
	2列目	700	12.9				-0.82	0.14	0.31	0.46	-0.38	0.91	0.14	-0.89	0.45
	3列目	700	18.1				-0.81	0.15	0.21	0.52	-0.02	1.00	0.01	-0.86	0.52
	4列目	700	22.3				-0.84	0.07	0.17	0.52	-0.64	-0.66	0.38	-0.86	0.51
断面6	1列目	700	11.6			22,500	-0.77	0.28	0.30	0.49	-0.45	0.88	0.15	-0.88	0.48
	2列目	700	12.8				-0.79	0.12	0.37	0.47	-0.36	0.92	0.14	-0.88	0.47
	3列目	700	17.2				-0.79	0.40	0.18	0.43	-0.21	0.97	0.09	-0.90	0.44
	4列目	700	20.4				-0.80	0.19	0.28	0.50	-0.89	-0.07	0.45	-0.86	0.52
断面7	1列目	700	15.6		無し	7,500	-0.81	0.41		0.42	-0.84	-0.12	0.54	-0.91	0.42
	2列目	700	17.1				-0.83	0.25		0.50	-0.85	-0.09	0.52	-0.87	0.49
	3列目	700	18.1				-0.80	0.38		0.46	-0.53	-0.80	0.28	-0.89	0.46
	4列目	700	20.2				-0.82	0.38		0.44	-0.93	0.06	0.36	-0.90	0.44
断面8	1列目	700	14.7			22,500	-0.82	0.32		0.48	-0.74	0.51	0.45	-0.88	0.48
	2列目	700	16.2				-0.80	0.25		0.54	-0.51	0.81	0.31	-0.84	0.54
	3列目	700	17.1				-0.82	0.23		0.52	-0.53	0.80	0.28	-0.86	0.51
	4列目	700	19.3				-0.81	0.35		0.47	-0.87	0.36	0.34	-0.88	0.48
断面9	1列目	700	11.1		3,500	7,500	-0.81	0.10	0.38	0.44	-0.32	0.94	0.07	-0.91	0.42
	2列目	700	10.1				-0.80	0.22	0.35	0.43	-0.21	0.98	0.05	-0.91	0.42
	3列目	700	11.4				-0.80	0.26	0.28	0.47	-0.12	0.99	0.04	-0.88	0.47
	4列目	700	15.2				-0.80	0.33	0.21	0.45	-0.10	0.99	0.04	-0.89	0.46
	5列目	700	17.5				-0.79	0.36	0.23	0.45	-0.73	0.63	0.27	-0.88	0.47
断面10	1列目	700	11.1			22,500	-0.81	0.10	0.38	0.44	-0.32	0.94	0.07	-0.91	0.42
	2列目	700	10.1				-0.80	0.22	0.35	0.43	-0.21	0.98	0.05	-0.91	0.42
	3列目	700	11.4				-0.80	0.26	0.28	0.47	-0.12	0.99	0.04	-0.88	0.47
	4列目	700	15.2				-0.80	0.33	0.21	0.45	-0.10	0.99	0.04	-0.89	0.46
	5列目	700	17.5				-0.79	0.36	0.23	0.45	-0.73	0.63	0.27	-0.88	0.47
断面11	1列目	700	13.2		無し	7,500	-0.82	0.30		0.49	-0.47	0.86	0.21	-0.87	0.49
	2列目	700	14.1				-0.81	0.36		0.47	-0.25	0.96	0.10	-0.88	0.47
	3列目	700	14.4				-0.79	0.44		0.43	-0.04	1.00	0.02	-0.90	0.43
	4列目	700	14.9				-0.83	0.20		0.53	-0.22	0.97	0.09	-0.85	0.52
	5列目	700	16.2				-0.80	0.39		0.46	-0.58	0.79	0.18	-0.89	0.46
断面12	1列目	700	12.5			22,500	-0.81	0.19		0.55	-0.39	0.90	0.17	-0.84	0.55
	2列目	700	13.5				-0.81	0.36		0.47	-0.22	0.97	0.08	-0.88	0.47
	3列目	700	13.8				-0.82	0.23		0.52	-0.03	1.00	0.01	-0.86	0.51
	4列目	700	14.0				-0.81	0.35		0.47	-0.19	0.98	0.07	-0.88	0.47
	5列目	700	15.5				-0.80	0.38		0.46	-0.53	0.83	0.16	-0.89	0.47
断面13	1列目	900	10.0	18.0	3,500	7,500	-0.55	0.22	0.54	0.60	-0.53	0.77	0.36	-0.79	0.62
	2列目	900	10.3				-0.91	0.07	0.24	0.34	-0.34	-0.93	0.17	-0.95	0.32
	3列目	900	13.1				-0.89	0.19	0.27	0.31	-0.08	-1.00	0.06	-0.95	0.30
	4列目	900	16.4				-0.90	0.19	0.18	0.34	-0.02	-1.00	0.04	-0.94	0.34
	5列目	900	23.5				-0.91	0.14	0.22	0.32	0.00	-1.00	0.00	-0.95	0.32
	6列目	900	26.3				-0.92	0.23	0.10	0.31	-0.08	-0.99	0.08	-0.95	0.31
断面14	1列目	1,000	9.0			22,500	-0.56	0.13	0.39	0.72	-0.59	0.50	0.64	-0.69	0.72
	2列目	1,000	9.4				-0.87	0.23	0.32	0.27	-0.16	-0.98	0.08	-0.96	0.27
	3列目	1,000	10.7				-0.87	0.10	0.35	0.32	-0.06	-1.00	0.05	-0.95	0.31
	4列目	1,000	13.2				-0.87	0.22	0.31	0.30	-0.02	-1.00	0.03	-0.95	0.30
	5列目	1,000	17.3				-0.88	0.34	0.11	0.30	0.00	-1.00	0.01	-0.95	0.31
	6列目	1,000	18.7				-0.89	0.24	0.12	0.36	-0.10	-0.99	0.10	-0.93	0.37
断面15	1列目	1,300	9.0			7,500	-0.85	0.30	0.34	0.26	-0.09	-0.99	0.09	-0.97	0.25
	2列目	1,300	18.1				-0.88	0.21	0.29	0.31	-0.02	-1.00	0.04	-0.95	0.31
	3列目	1,300	21.8				-0.86	0.36	0.29	0.23	-0.01	-1.00	0.03	-0.97	0.24
断面16	1列目	1,300	9.9			22,500	-0.88	0.33	0.26	0.23	-0.05	-1.00	0.06	-0.97	0.22
	2列目	1,300	17.6				-0.87	0.21	0.34	0.29	-0.02	-1.00	0.03	-0.96	0.30
	3列目	1,300	20.6				-0.91	0.26	0.18	0.27	-0.02	-1.00	0.04	-0.96	0.27
					平均値 −7.5m	海側杭	-0.65	0.40	0.44	0.56	-0.51	0.83	0.24	-0.83	0.55
						中央杭群	-0.65	0.38	0.38	0.59	-0.09	0.99	0.04	-0.79	0.61
						陸側杭	-0.65	0.44	0.12	0.62	-0.58	0.78	0.24	-0.77	0.64
					平均値 −12m	海側杭	-0.80	0.24	0.38	0.46	-0.50	0.72	0.22	-0.89	0.45
						中央杭群	-0.81	0.27	0.28	0.47	-0.26	0.82	0.12	-0.88	0.47
						陸側杭	-0.80	0.31	0.23	0.47	-0.74	0.32	0.30	-0.88	0.48
					平均値 −18m	海側杭	-0.71	0.25	0.38	0.45	-0.31	-0.18	0.29	-0.85	0.45
						中央杭群	-0.89	0.19	0.26	0.31	-0.07	-0.99	0.05	-0.95	0.31
						陸側杭	-0.89	0.27	0.17	0.29	-0.05	-1.00	0.06	-0.95	0.30

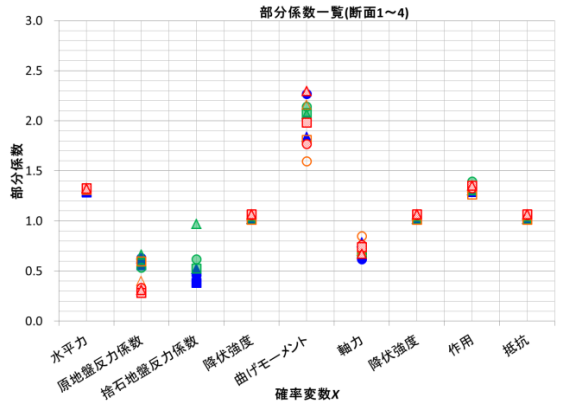
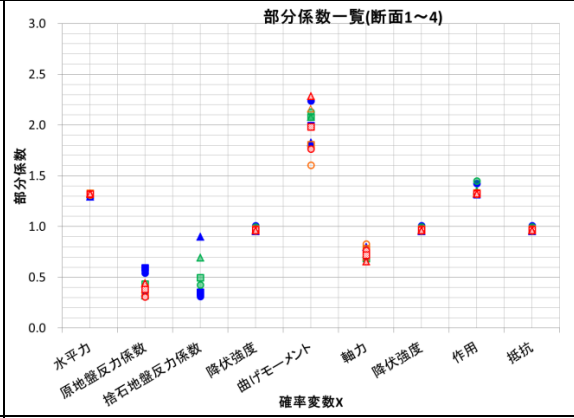
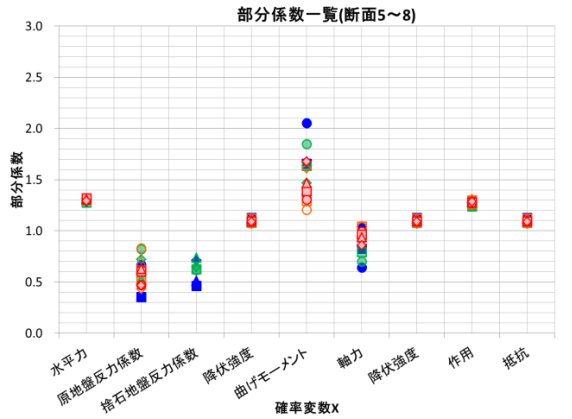
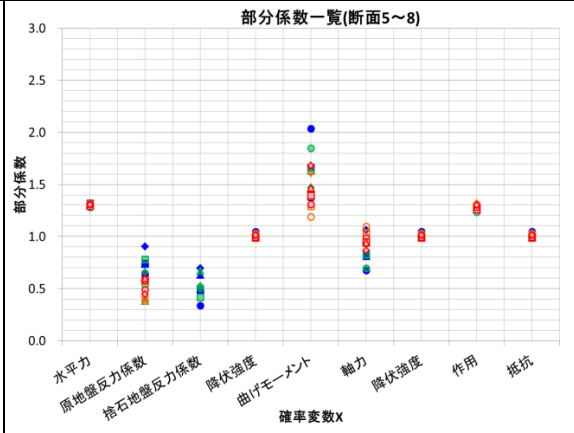
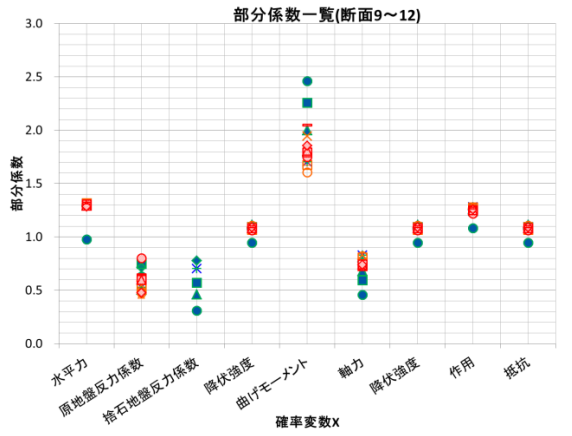
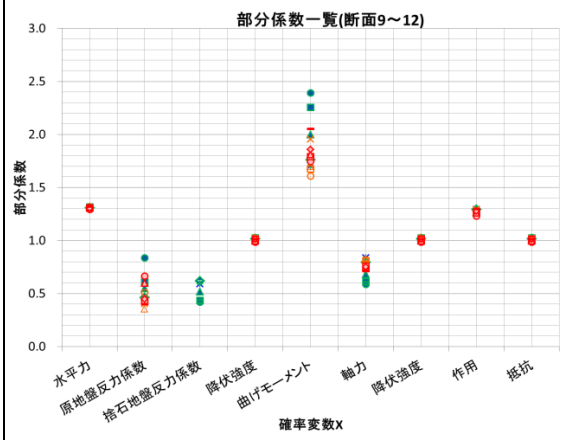
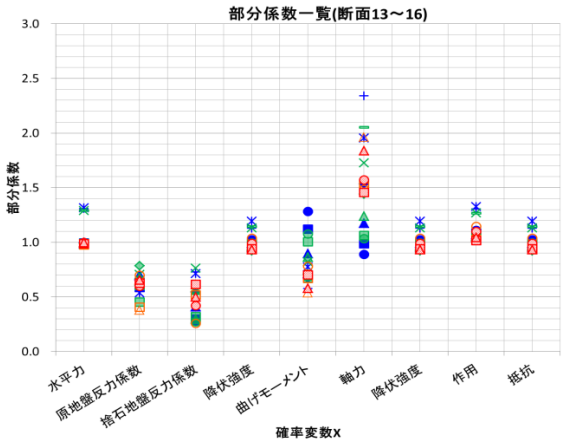
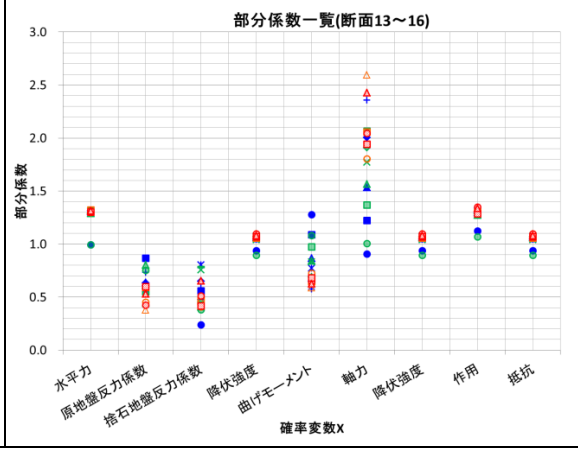
付表 H-9　目標破壊確率に相当する部分係数(目標破壊確率 4.15×10^{-5}，ターゲット設計水深-18m)

断面モデル	杭列	信頼性解析 杭諸元 杭径(mm)	肉厚(mm)	モデル別の条件 水深(-m)	地盤反力係数 捨石層	砂層	部分係数 手法A 水平力 g.HA4	原地盤反力係数 g.khaA4	捨石地盤反力係数 g.khbA4	降伏強度 g.σbyA4	手法B 曲げモーメント g.MB4	軸力 g.NB4	降伏強度 g.σbyB4	手法C 作用 g.SC4	抵抗 g.RC4
断面1	1列目	600	12.5	7.5	3,500	7,500	1.33	0.63	0.35	0.95	2.25	0.66	0.95	1.41	0.95
	2列目	600	14.1				1.31	0.53	0.57	0.91	2.00	0.69	0.91	1.29	0.91
	3列目	600	21.5				1.32	0.34	0.66	0.93	1.84	0.81	0.93	1.34	0.93
断面2	1列目	600	13.5			22,500	1.32	0.50	0.23	0.99	2.12	0.76	0.99	1.51	0.99
	2列目	600	13.8				1.32	0.54	0.48	0.92	2.08	0.67	0.92	1.31	0.92
	3列目	600	19.3				1.32	0.34	0.66	0.93	2.08	0.73	0.93	1.35	0.93
断面3	1列目	600	15.2		無し	7,500	1.33	0.30		0.94	1.59	0.86	0.94	1.36	0.94
	2列目	600	16.5				1.33	0.32		0.94	1.81	0.78	0.94	1.33	0.94
	3列目	600	18.7				1.32	0.40		0.92	2.16	0.69	0.92	1.32	0.92
断面4	1列目	600	14.0			22,500	1.31	0.30		0.93	1.77	0.76	0.93	1.33	0.93
	2列目	600	15.7				1.33	0.25		0.94	1.98	0.75	0.94	1.36	0.94
	3列目	600	17.6				1.32	0.37		0.92	2.29	0.66	0.92	1.33	0.92
断面5	1列目	700	11.2	12.0	3,500	7,500	1.28	0.58	0.21	1.02	2.03	0.71	1.02	1.35	1.02
	2列目	700	13.7				1.31	0.60	0.37	0.98	1.66	0.83	0.98	1.31	0.98
	3列目	700	19.2				1.30	0.66	0.53	0.96	1.39	0.98	0.96	1.28	0.96
	4列目	700	23.7				1.32	0.57	0.76	0.96	1.36	1.08	0.96	1.33	0.96
断面6	1列目	700	12.3			22,500	1.27	0.72	0.30	0.98	1.84	0.73	0.98	1.28	0.98
	2列目	700	13.5				1.32	0.59	0.57	0.96	1.63	0.82	0.96	1.27	0.96
	3列目	700	18.3				1.31	0.51	0.32	0.98	1.47	0.97	0.98	1.32	0.98
	4列目	700	21.7				1.31	0.43	0.65	0.96	1.47	0.96	0.96	1.28	0.96
断面7	1列目	700	16.6		無し	7,500	1.32	0.38		0.97	1.19	1.09	0.97	1.31	0.97
	2列目	700	18.2				1.32	0.58		0.96	1.29	1.04	0.96	1.29	0.96
	3列目	700	19.2				1.32	0.41		0.98	1.38	1.03	0.98	1.32	0.98
	4列目	700	21.5				1.32	0.38		0.98	1.62	0.93	0.98	1.33	0.98
断面8	1列目	700	15.6			22,500	1.31	0.34		0.97	1.30	1.01	0.97	1.30	0.97
	2列目	700	17.2				1.32	0.58		0.96	1.39	0.97	0.96	1.28	0.96
	3列目	700	18.1				1.31	0.54		0.96	1.47	0.95	0.96	1.29	0.96
	4列目	700	20.5				1.31	0.50		0.96	1.68	0.87	0.96	1.30	0.96
断面9	1列目	700	11.7		3,500	7,500	1.32	0.50	0.46	0.98	2.39	0.59	0.98	1.30	0.98
	2列目	700	10.7				1.31	0.52	0.42	0.97	2.25	0.61	0.97	1.27	0.97
	3列目	700	12.1				1.31	0.71	0.40	0.97	2.00	0.68	0.97	1.27	0.97
	4列目	700	16.1				1.31	0.54	0.51	0.96	1.76	0.79	0.96	1.29	0.96
	5列目	700	18.6				1.30	0.70	0.83	0.94	1.70	0.81	0.94	1.26	0.94
断面10	1列目	700	11.7			22,500	1.32	0.50	0.46	0.98	2.39	0.59	0.98	1.30	0.98
	2列目	700	10.7				1.31	0.52	0.42	0.97	2.25	0.61	0.97	1.27	0.97
	3列目	700	12.1				1.31	0.71	0.40	0.97	2.00	0.68	0.97	1.27	0.97
	4列目	700	16.1				1.31	0.54	0.51	0.96	1.76	0.79	0.96	1.29	0.96
	5列目	700	18.6				1.30	0.70	0.83	0.94	1.70	0.81	0.94	1.26	0.94
断面11	1列目	700	14.0		無し	7,500	1.30	0.40		0.96	1.61	0.82	0.96	1.28	0.96
	2列目	700	15.0				1.32	0.38		0.97	1.68	0.82	0.97	1.30	0.97
	3列目	700	15.3				1.30	0.39		0.95	1.70	0.82	0.95	1.29	0.95
	4列目	700	15.7				1.32	0.49		0.97	1.76	0.80	0.97	1.29	0.97
	5列目	700	17.2				1.32	0.42		0.96	1.96	0.75	0.96	1.30	0.96
断面12	1列目	700	13.2			22,500	1.31	0.49		0.96	1.74	0.76	0.96	1.26	0.96
	2列目	700	14.3				1.31	0.56		0.94	1.79	0.75	0.94	1.26	0.94
	3列目	700	14.6				1.30	0.46		0.95	1.81	0.75	0.95	1.27	0.95
	4列目	700	14.8				1.32	0.54		0.95	1.86	0.75	0.95	1.28	0.95
	5列目	700	16.4				1.31	0.34		0.97	2.05	0.71	0.97	1.30	0.97
断面13	1列目	900	10.6	18.0	3,500	7,500	1.32	0.67	0.34	1.06	1.22	1.14	1.06	1.34	1.06
	2列目	900	11.0				1.32	0.93	0.51	1.00	1.09	1.24	1.00	1.29	1.00
	3列目	900	13.9				1.31	0.50	0.60	1.00	0.87	1.53	1.00	1.29	1.00
	4列目	900	17.5				1.31	0.64	0.44	1.01	0.65	2.03	1.01	1.31	1.01
	5列目	900	25.1				1.29	0.41	0.40	1.01	0.57	2.35	1.01	1.31	1.01
	6列目	900	28.1				1.32	0.45	0.55	1.01	0.78	1.98	1.01	1.34	1.01
断面14	1列目	1,000	9.6			22,500	1.31	0.62	0.32	1.04	1.01	1.35	1.04	1.33	1.04
	2列目	1,000	10.0				1.31	0.94	0.50	1.00	0.98	1.34	1.00	1.27	1.00
	3列目	1,000	11.4				1.30	0.53	0.70	0.98	0.84	1.54	0.98	1.26	0.98
	4列目	1,000	14.0				1.31	0.64	0.44	1.01	0.69	1.92	1.01	1.30	1.01
	5列目	1,000	18.5				1.30	0.43	0.87	1.00	0.64	2.09	1.00	1.29	1.00
	6列目	1,000	20.0				1.31	0.70	0.78	1.00	0.83	1.76	1.00	1.29	1.00
断面15	1列目	1,300	9.6			7,500	1.31	0.69	0.40	1.03	0.72	1.85	1.03	1.36	1.03
	2列目	1,300	19.1				1.31	0.61	0.61	1.01	0.65	2.02	1.01	1.28	1.01
	3列目	1,300	23.2				1.31	0.59	0.45	1.01	0.58	2.53	1.01	1.31	1.01
断面16	1列目	1,300	10.6			22,500	1.32	0.61	0.28	1.08	0.64	2.17	1.08	1.42	1.08
	2列目	1,300	18.6				1.31	0.78	0.65	0.99	0.68	1.91	0.99	1.27	0.99
	3列目	1,300	22.0				1.32	0.64	0.74	0.99	0.63	2.41	0.99	1.33	0.99
					平均値 −7.5m	海側杭	1.32	0.43	0.29	0.95	1.93	0.76	0.95	1.40	0.95
						中央杭群	1.32	0.41	0.52	0.92	1.97	0.72	0.92	1.32	0.92
						陸側杭	1.32	0.36	0.66	0.92	2.09	0.73	0.92	1.34	0.92
					平均値 −12m	海側杭	1.30	0.49	0.36	0.98	1.81	0.79	0.98	1.30	0.98
						中央杭群	1.31	0.54	0.45	0.96	1.72	0.82	0.96	1.28	0.96
						陸側杭	1.31	0.50	0.77	0.96	1.69	0.87	0.96	1.29	0.96
					平均値 −18m	海側杭	1.31	0.65	0.33	1.05	0.90	1.63	1.05	1.36	1.05
						中央杭群	1.31	0.64	0.57	1.00	0.77	1.80	1.00	1.29	1.00
						陸側杭	1.31	0.60	0.63	1.00	0.71	2.17	1.00	1.32	1.00

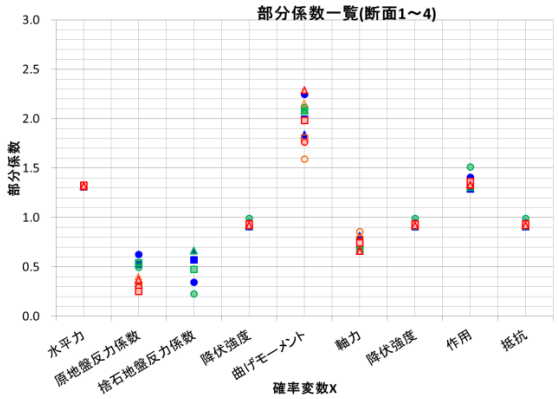
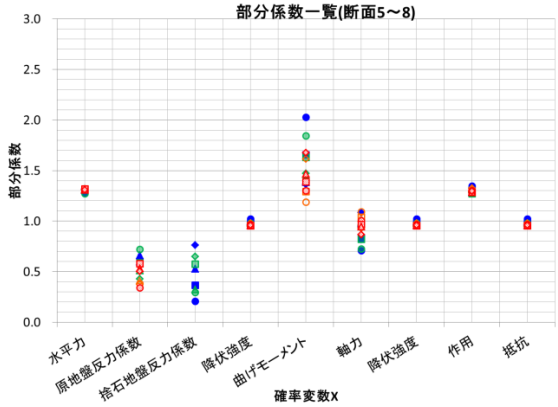
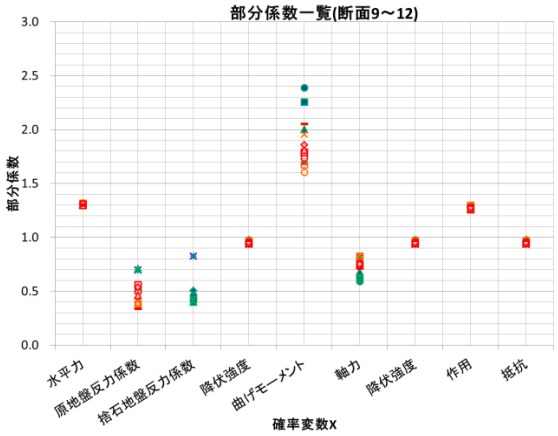
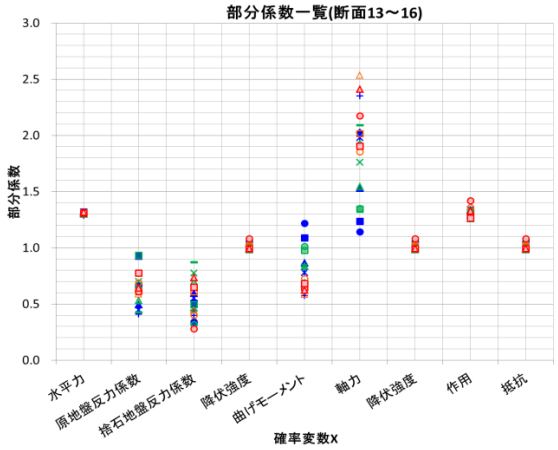
付表 H-10　目標破壊確率に相当する感度係数(目標破壊確率 4.15×10^{-5}，ターゲット設計水深-18m)

断面モデル	杭列	信頼性解析 杭諸元 杭径(mm)	肉厚(mm)	モデル別の条件 水深（- m）	地盤反力係数 捨石層	砂層	感度係数 手法A 水平力 α.HA4	原地盤反力係数 α.khaA4	捨石地盤反力係数 α.khbA4	降伏強度 α.σbyA4	手法B 曲げモーメント α.MB4	軸力 α.NB4	降伏強度 α.σbyB4	手法C 作用 α.SC4	抵抗 α.RC4
断面1	1列目	600	12.5	7.5	3,500	7,500	-0.63	0.21	0.44	0.61	-0.49	0.85	0.19	-0.82	0.57
	2列目	600	14.1				-0.60	0.27	0.24	0.71	-0.13	0.99	0.07	-0.70	0.72
	3列目	600	21.5				-0.59	0.44	0.18	0.65	-0.65	0.66	0.38	-0.73	0.68
断面2	1列目	600	13.5			22,500	-0.59	0.29	0.57	0.49	-0.54	0.81	0.21	-0.88	0.48
	2列目	600	13.8				-0.60	0.26	0.31	0.69	-0.09	0.99	0.05	-0.72	0.70
	3列目	600	19.3				-0.59	0.44	0.18	0.65	-0.56	0.79	0.27	-0.73	0.68
断面3	1列目	600	15.2		無し	7,500	-0.61	0.49		0.63	-0.56	0.72	0.41	-0.77	0.64
	2列目	600	16.5				-0.62	0.46		0.64	-0.06	1.00	0.03	-0.76	0.65
	3列目	600	18.7				-0.62	0.38		0.69	-0.57	0.78	0.26	-0.72	0.69
断面4	1列目	600	14.0			22,500	-0.59	0.49		0.64	-0.49	0.82	0.30	-0.75	0.67
	2列目	600	15.7				-0.59	0.53		0.61	-0.06	1.00	0.03	-0.76	0.64
	3列目	600	17.6				-0.61	0.41		0.68	-0.54	0.81	0.23	-0.72	0.69
断面5	1列目	700	11.2	12.0	3,500	7,500	-0.68	0.21	0.58	0.39	-0.50	0.85	0.14	-0.92	0.38
	2列目	700	13.7				-0.73	0.21	0.39	0.52	-0.40	0.90	0.19	-0.86	0.51
	3列目	700	19.2				-0.76	0.18	0.26	0.57	-0.04	1.00	0.03	-0.82	0.57
	4列目	700	23.7				-0.78	0.24	0.13	0.57	-0.59	-0.69	0.42	-0.83	0.56
断面6	1列目	700	12.3			22,500	-0.71	0.14	0.47	0.51	-0.48	0.86	0.18	-0.87	0.50
	2列目	700	13.5				-0.76	0.22	0.23	0.57	-0.35	0.92	0.18	-0.83	0.56
	3列目	700	18.3				-0.72	0.26	0.42	0.49	-0.31	0.94	0.18	-0.85	0.52
	4列目	700	21.7				-0.74	0.33	0.18	0.56	-0.84	-0.15	0.52	-0.81	0.58
断面7	1列目	700	16.6		無し	7,500	-0.76	0.38		0.53	-0.75	-0.09	0.65	-0.85	0.53
	2列目	700	18.2				-0.78	0.23		0.59	-0.77	-0.20	0.61	-0.82	0.58
	3列目	700	19.2				-0.77	0.36		0.53	-0.49	-0.81	0.32	-0.85	0.53
	4列目	700	21.5				-0.76	0.39		0.52	-0.90	0.02	0.44	-0.85	0.52
断面8	1列目	700	15.6			22,500	-0.74	0.42		0.53	-0.74	0.39	0.55	-0.84	0.54
	2列目	700	17.2				-0.78	0.23		0.59	-0.59	0.70	0.41	-0.81	0.58
	3列目	700	18.1				-0.77	0.26		0.58	-0.56	0.75	0.35	-0.82	0.57
	4列目	700	20.5				-0.77	0.28		0.58	-0.83	0.36	0.42	-0.82	0.58
断面9	1列目	700	11.7		3,500	7,500	-0.75	0.28	0.31	0.52	-0.33	0.94	0.09	-0.86	0.50
	2列目	700	10.7				-0.74	0.26	0.33	0.53	-0.21	0.98	0.06	-0.85	0.53
	3列目	700	12.1				-0.74	0.15	0.36	0.54	-0.12	0.99	0.05	-0.83	0.55
	4列目	700	16.1				-0.75	0.25	0.27	0.55	-0.10	0.99	0.05	-0.82	0.57
	5列目	700	18.6				-0.76	0.16	0.10	0.63	-0.65	0.68	0.35	-0.78	0.63
断面10	1列目	700	11.7			22,500	-0.75	0.28	0.31	0.52	-0.33	0.94	0.09	-0.86	0.50
	2列目	700	10.7				-0.74	0.26	0.33	0.53	-0.21	0.98	0.06	-0.85	0.53
	3列目	700	12.1				-0.74	0.15	0.36	0.54	-0.12	0.99	0.05	-0.83	0.55
	4列目	700	16.1				-0.75	0.25	0.27	0.55	-0.10	0.99	0.05	-0.82	0.57
	5列目	700	18.6				-0.76	0.16	0.10	0.63	-0.65	0.68	0.35	-0.78	0.63
断面11	1列目	700	14.0		無し	7,500	-0.75	0.37		0.55	-0.48	0.84	0.25	-0.83	0.56
	2列目	700	15.0				-0.76	0.38		0.53	-0.27	0.96	0.13	-0.84	0.54
	3列目	700	15.3				-0.73	0.37		0.57	-0.04	1.00	0.02	-0.82	0.57
	4列目	700	15.7				-0.78	0.29		0.56	-0.24	0.97	0.11	-0.83	0.55
	5列目	700	17.2				-0.75	0.35		0.56	-0.58	0.78	0.24	-0.83	0.56
断面12	1列目	700	13.2			22,500	-0.76	0.29		0.58	-0.41	0.89	0.20	-0.82	0.57
	2列目	700	14.3				-0.76	0.24		0.61	-0.21	0.97	0.10	-0.80	0.60
	3列目	700	14.6				-0.74	0.31		0.59	-0.03	1.00	0.01	-0.80	0.59
	4列目	700	14.8				-0.77	0.26		0.59	-0.19	0.98	0.09	-0.81	0.59
	5列目	700	16.4				-0.74	0.42		0.53	-0.53	0.83	0.19	-0.84	0.54
断面13	1列目	900	10.6	18.0	3,500	7,500	-0.85	0.16	0.39	0.31	-0.81	-0.48	0.33	-0.96	0.29
	2列目	900	11.0				-0.86	0.05	0.26	0.43	-0.31	-0.93	0.22	-0.91	0.42
	3列目	900	13.9				-0.84	0.26	0.20	0.44	-0.08	-0.99	0.09	-0.90	0.44
	4列目	900	17.5				-0.84	0.18	0.31	0.41	-0.02	-1.00	0.05	-0.91	0.41
	5列目	900	25.1				-0.79	0.32	0.33	0.41	0.00	-1.00	0.00	-0.90	0.43
	6列目	900	28.1				-0.84	0.29	0.22	0.40	-0.08	-0.99	0.11	-0.91	0.41
断面14	1列目	1,000	9.6			22,500	-0.83	0.18	0.41	0.35	-0.33	-0.92	0.22	-0.94	0.33
	2列目	1,000	10.0				-0.86	0.04	0.27	0.43	-0.17	-0.97	0.14	-0.91	0.42
	3列目	1,000	11.4				-0.84	0.24	0.15	0.47	-0.06	-1.00	0.08	-0.88	0.47
	4列目	1,000	14.0				-0.84	0.18	0.31	0.41	-0.02	-1.00	0.04	-0.91	0.41
	5列目	1,000	18.5				-0.84	0.32	0.07	0.43	0.00	-1.00	0.01	-0.90	0.44
	6列目	1,000	20.0				-0.87	0.15	0.11	0.45	-0.10	-0.99	0.13	-0.89	0.45
断面15	1列目	1,300	9.6			7,500	-0.85	0.15	0.34	0.37	-0.08	-0.99	0.12	-0.94	0.34
	2列目	1,300	19.1				-0.87	0.20	0.20	0.42	-0.02	-1.00	0.05	-0.91	0.41
	3列目	1,300	23.2				-0.84	0.20	0.30	0.40	-0.01	-1.00	0.06	-0.91	0.41
断面16	1列目	1,300	10.6			22,500	-0.83	0.19	0.45	0.25	-0.04	-1.00	0.06	-0.97	0.23
	2列目	1,300	18.6				-0.86	0.11	0.17	0.46	-0.02	-1.00	0.05	-0.89	0.46
	3列目	1,300	22.0				-0.86	0.18	0.13	0.45	-0.02	-1.00	0.07	-0.89	0.45
					平均値 −7.5m	海側杭	-0.60	0.37	0.51	0.59	-0.52	0.80	0.28	-0.80	0.59
						中央杭群	-0.60	0.38	0.28	0.66	-0.08	0.99	0.04	-0.73	0.68
						陸側杭	-0.60	0.42	0.18	0.67	-0.58	0.76	0.28	-0.73	0.69
					平均値 −12m	海側杭	-0.74	0.30	0.42	0.52	-0.50	0.70	0.27	-0.86	0.51
						中央杭群	-0.75	0.26	0.32	0.56	-0.27	0.80	0.15	-0.83	0.56
						陸側杭	-0.76	0.29	0.12	0.57	-0.70	0.31	0.37	-0.82	0.58
					平均値 −18m	海側杭	-0.84	0.17	0.40	0.32	-0.32	-0.85	0.18	-0.95	0.30
						中央杭群	-0.84	0.19	0.22	0.43	-0.07	-0.99	0.07	-0.90	0.43
						陸側杭	-0.85	0.21	0.19	0.43	-0.05	-0.99	0.09	-0.90	0.43

付表 H-11　断面毎の部分係数一覧(断面毎に整理)①

	目標破壊確率 9.27×10^{-4}(-7.5m)	目標破壊確率 1.52×10^{-4}(-12m)	凡例
断面①～④			●断面1第1列 ■断面1第2列 ▲断面1第3列 ●断面2第1列 ■断面2第2列 ▲断面2第3列 ○断面3第1列 □断面3第2列 △断面3第3列 断面4第1列 断面4第2列 ▲断面4第3列
断面⑤～⑧			●断面5第1列 ■断面5第2列 ▲断面5第3列 ◆断面5第4列 ●断面6第1列 ■断面6第2列 ▲断面6第3列 ◆断面6第4列 ○断面7第1列 □断面7第2列 △断面7第3列 ◇断面7第4列 断面8第1列 断面8第2列 ▲断面8第3列 ◇断面8第4列
断面⑨～⑫			●断面9第1列 ■断面9第2列 ▲断面9第3列 ◆断面9第4列 ✕断面9第5列 ●断面10第1列 ■断面10第2列 ▲断面10第3列 ◇断面10第4列 +断面10第5列 ○断面11第1列 □断面11第2列 △断面11第3列 ◇断面11第4列 ✕断面11第5列 断面12第1列 断面12第2列 ▲断面12第3列 ◇断面12第4列 断面12第5列
断面⑬～⑯			●断面13第1列 ■断面13第2列 ▲断面13第3列 ◆断面13第4列 +断面13第5列 ✕断面13第6列 ●断面14第1列 ■断面14第2列 ▲断面14第3列 ◇断面14第4列 断面14第5列 ✕断面14第6列 ○断面15第1列 □断面15第2列 △断面15第3列 断面16第1列 断面16第2列 ▲断面16第3列

付表 H-12　断面毎の部分係数一覧(断面毎に整理)②

	目標破壊確率 4.15×10^{-5} (-18m)	凡例
断面①～④		断面1第1列 断面1第2列 断面1第3列 断面2第1列 断面2第2列 断面2第3列 断面3第1列 断面3第2列 断面3第3列 断面4第1列 断面4第2列 断面4第3列
断面⑤～⑧		断面5第1列 断面5第2列 断面5第3列 断面5第4列 断面6第1列 断面6第2列 断面6第3列 断面6第4列 断面7第1列 断面7第2列 断面7第3列 断面7第4列 断面8第1列 断面8第2列 断面8第3列 断面8第4列
断面⑨～⑫		断面9第1列 断面9第2列 断面9第3列 断面9第4列 断面9第5列 断面10第1列 断面10第2列 断面10第3列 断面10第4列 断面10第5列 断面11第1列 断面11第2列 断面11第3列 断面11第4列 断面11第5列 断面12第1列 断面12第2列 断面12第3列 断面12第4列 断面12第5列
断面⑬～⑯		断面13第1列 断面13第2列 断面13第3列 断面13第4列 断面13第5列 断面13第6列 断面14第1列 断面14第2列 断面14第3列 断面14第4列 断面14第5列 断面14第6列 断面15第1列 断面15第2列 断面15第3列 断面16第1列 断面16第2列 断面16第3列

附録Ⅰ　試設計断面の杭頭変位量と相当設計震度

本研究では，船舶接岸時における横桟橋の杭の応力照査を対象とし，荷重抵抗係数アプローチによる部分係数について検討した．

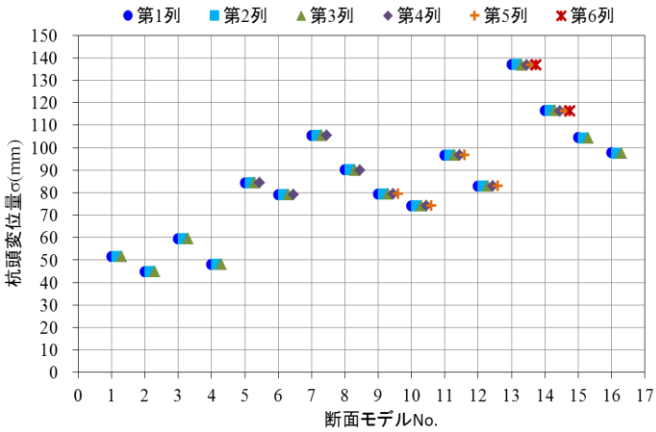
ここでは，これらの部分係数により試設計された断面が，船舶接岸力に対しどの程度の変位するかについて整理する．また，各設計水深における接岸力の特性値が，どの程度のレベル 1 地震動に相当するかを把握するため，接岸力に対して試設計された各断面が性能照査値を満足する最大の設計震度(以下，相当設計震度とする)について整理した．

(1) 試設計断面の杭頭変位量

本文 6.6 において設定した各検討断面について，船舶接岸力に対する各杭の杭頭変位量を**付図 I-1**，**付表 I-1** に示す．

各断面の杭頭変位量は，設計水深，杭列数，原地盤N値などにより変化するが，**付図I-1**，**付表I-1**より，特に設計水深の影響が大きいことが確認できる．これは，設計水深が大きい断面ほど，接岸力が大きくなると同時に，各杭の杭長も長くなることによると考えられる．また，断面⑬⑭はRC桟橋であり，断面⑮⑯はPC桟橋であるが，両者の杭頭変位量が大きく異なることから，杭間距離も杭頭変位量に影響することがわかる．このため，杭頭変位量の絶対量としては，設計水深が最も小さい断面①～④(設計水深-7.5m)では40mm～50mm程度であり，最も杭頭変位量が大きい断面⑬⑭(設計水深-18m，PC桟橋)では，およそ120～140mmに達する．

一方で，原地盤N値や海底勾配の有無，杭列数の影響はそれほど大きくない．



付図 I-1　試設計断面の杭頭変位量(船舶接岸時)

付表 I-1　試設計断面の杭頭変位量(船舶接岸時)

断面モデル	モデル別の条件 水深 (- m)	地盤反力係数 (kN/m³) 捨石層	地盤反力係数 (kN/m³) 砂層	杭列	杭径 (mm)	試設計：荷重抵抗係数アプローチ 肉厚 (mm)	$\gamma_S S/\gamma_R R$	実質安全率 Fs=R/S	杭頭変位量 σ(mm)
①	7.5	3,500	7,500	1列目	600	12.2	0.999	1.382	51.659
				2列目	600	13.5	1.000	1.382	51.647
				3列目	600	20.4	0.999	1.383	51.639
②			22,500	1列目	600	12.7	0.999	1.383	44.825
				2列目	600	13.2	0.999	1.383	44.813
				3列目	600	18.2	1.000	1.382	44.807
③		無し	7,500	1列目	600	14.8	0.998	1.385	59.502
				2列目	600	16.2	0.998	1.384	59.491
				3列目	600	17.8	1.000	1.382	59.485
④			22,500	1列目	600	13.9	0.998	1.384	48.149
				2列目	600	14.9	1.000	1.381	48.138
				3列目	600	16.8	0.999	1.383	48.132
⑤	12.0	3,500	7,500	1列目	700	11.4	0.999	1.278	84.299
				2列目	700	13.1	0.998	1.279	84.277
				3列目	700	18.4	0.999	1.278	84.261
				4列目	700	21.7	0.999	1.279	84.251
⑥			22,500	1列目	700	12.5	1.000	1.277	79.189
				2列目	700	12.9	0.999	1.278	79.168
				3列目	700	17.3	1.000	1.277	79.152
				4列目	700	20.6	1.000	1.278	79.143
⑦		無し	7,500	1列目	700	16.0	1.000	1.277	105.566
				2列目	700	17.3	1.000	1.277	105.547
				3列目	700	17.9	0.998	1.279	105.533
				4列目	700	20.1	1.000	1.277	105.526
⑧			22,500	1列目	700	15.2	1.000	1.277	90.103
				2列目	700	16.3	1.000	1.277	90.083
				3列目	700	17.0	0.999	1.278	90.070
				4列目	700	19.2	0.999	1.279	90.063
⑨		3,500	7,500	1列目	700	11.1	1.000	1.278	79.497
				2列目	700	9.5	1.000	1.277	79.475
				3列目	700	12.0	1.000	1.277	79.456
				4列目	700	16.6	1.000	1.278	79.442
				5列目	700	18.9	0.999	1.278	79.434
⑩			22,500	1列目	700	11.6	0.999	1.278	74.066
				2列目	700	10.7	0.998	1.279	74.044
				3列目	700	11.6	0.999	1.279	74.026
				4列目	700	15.4	0.998	1.280	74.013
				5列目	700	17.5	0.998	1.279	74.005
⑪		無し	7,500	1列目	700	13.8	0.998	1.280	96.770
				2列目	700	14.3	1.000	1.278	96.750
				3列目	700	14.8	0.999	1.278	96.734
				4列目	700	14.8	1.000	1.277	96.723
				5列目	700	16.3	0.999	1.279	96.718
⑫			22,500	1列目	700	13.0	1.000	1.277	82.970
				2列目	700	14.0	0.998	1.280	82.950
				3列目	700	14.0	0.999	1.279	82.934
				4列目	700	14.0	1.000	1.278	82.923
				5列目	700	15.6	1.000	1.277	82.918
⑬	18.0	3,500	7,500	1列目	900	11.2	0.999	1.279	136.989
				2列目	900	11.1	1.000	1.277	136.940
				3列目	900	13.9	0.999	1.279	136.897
				4列目	900	17.5	0.999	1.278	136.860
				5列目	900	24.7	0.999	1.279	136.832
				6列目	900	26.9	0.999	1.278	136.818
⑭			22,500	1列目	1,000	10.0	0.998	1.280	116.511
				2列目	1,000	10.2	1.000	1.277	116.463
				3列目	1,000	11.4	1.000	1.277	116.422
				4列目	1,000	14.0	1.000	1.278	116.387
				5列目	1,000	18.6	1.000	1.277	116.362
				6列目	1,000	19.4	1.000	1.278	116.349
⑮			7,500	1列目	1,300	9.5	1.000	1.278	104.458
				2列目	1,300	19.6	0.999	1.279	104.370
				3列目	1,300	22.3	0.998	1.280	104.320
⑯			22,500	1列目	1,300	10.5	0.995	1.283	97.722
				2列目	1,300	19.1	0.999	1.279	97.637
				3列目	1,300	21.0	0.999	1.278	97.591

(2) 試設計断面の相当設計震度

本文 6.6 において設定した各検討断面について，相当設計震度を**付表 I-3**，**付表 I-4** に示す．

付表 I-3，**付表 I-4** より，以下の傾向が確認できる．

○設計水深で比較すると，-12m(断面⑤～⑫)の相当設計震度が最も小さく，-7.5m(断面①～④)，-18m(断面⑬～⑱)と大きくなっていく．
しかしながら，船舶接岸時においては，設計水深が小さい断面ほど接岸力が小さくなるため，設計水深が小さい断面ほど，相当設計震度は小さくなると考えられる．したがって，**付表 I-3**，**付表 I-4** のように，設計水深-7.5m の断面の相当設計震度が，設計水深-12m の断面の相当設計震度を上回ることは，上述の特性に反しているが，これは，下表に示すように，設計水深-7.5m の断面と設計水深-12m とで部分係数が異なるためである．

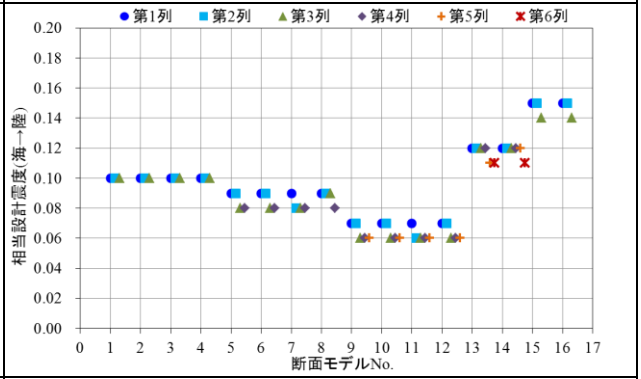
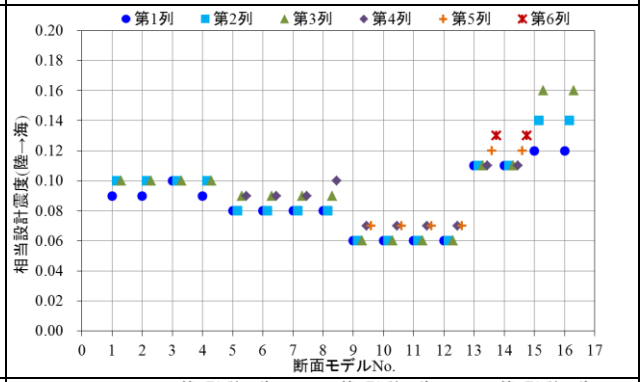
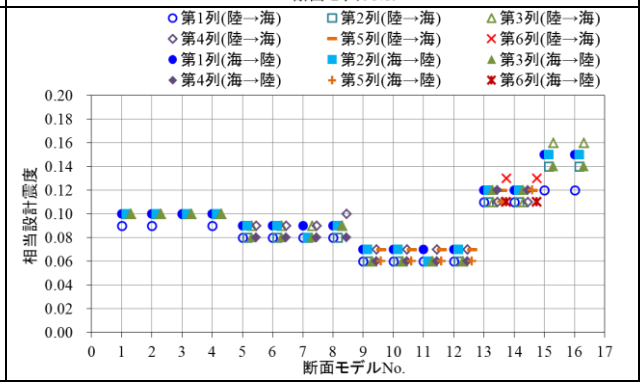
付表 I-2　部分係数の適用範囲

設計水深	作用	抵抗	部分係数比 γS/γR
-7.5m～-12m	1.34	0.97	1.38
-12m 以深	1.29	1.01	1.28

○設計水深が同一であれば，杭列が少ない断面ほど相当設計震度は大きくなる．これは，接岸力に対しては，杭列数の多少により各杭列に作用する応力が大きく変化し，杭列数が多い断面ほど桟橋杭の断面係数は小さくなるが，地震動に対しては杭列の多少による影響が小さく，しないためと考えられる．これにより，杭列数が小さい断面ほど，各杭列の断面係数が増加し，相当設計震度も大きくなると考えられる．

○原地盤 N 値や海底勾配の有無は，各断面の相当設計震度にほとんど影響しない．

付表 I-3　相当設計震度

<table>
<tr><th>方向</th><th>相当設計震度</th></tr>
<tr><td>海↓陸</td><td> 
</td></tr>
<tr><td>陸↓海</td><td> 
</td></tr>
<tr><td>両方向</td><td> 
</td></tr>
</table>

付表 I-4　相当設計震度

断面モデル	モデル別の条件 水深 (- m)	地盤反力係数 (kN/m³) 捨石層	地盤反力係数 (kN/m³) 砂層	杭列	杭径 (mm)	試設計：荷重抵抗係数アプローチ 肉厚 (mm)	作用部分係数 γ_S	抵抗部分係数 γ_R	相当設計震度 海→陸	相当設計震度 陸→海	相当設計震度 海→陸	相当設計震度 陸→海	相当設計震度
①	7.5	3,500	7,500	1列目	600	12.2	1.34	0.97	0.10	0.09	0.10	0.09	0.09
				2列目	600	13.5	1.34	0.97	0.10	0.10			
				3列目	600	20.4	1.34	0.97	0.10	0.10			
②			22,500	1列目	600	12.7	1.34	0.97	0.10	0.09	0.10	0.09	0.09
				2列目	600	13.2	1.34	0.97	0.10	0.10			
				3列目	600	18.2	1.34	0.97	0.10	0.10			
③		無し	7,500	1列目	600	14.8	1.34	0.97	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
				2列目	600	16.2	1.34	0.97	0.10	0.10			
				3列目	600	17.8	1.34	0.97	0.10	0.10			
④			22,500	1列目	600	13.9	1.34	0.97	0.10	0.09	0.10	0.09	0.09
				2列目	600	14.9	1.34	0.97	0.10	0.10			
				3列目	600	16.8	1.34	0.97	0.10	0.10			
⑤	12.0	3,500	7,500	1列目	700	11.4	1.29	1.01	0.09	0.08	0.08	0.08	0.08
				2列目	700	13.1	1.29	1.01	0.09	0.08			
				3列目	700	18.4	1.29	1.01	0.08	0.09			
				4列目	700	21.7	1.29	1.01	0.08	0.09			
⑥			22,500	1列目	700	12.5	1.29	1.01	0.09	0.08	0.08	0.08	0.08
				2列目	700	12.9	1.29	1.01	0.09	0.08			
				3列目	700	17.3	1.29	1.01	0.08	0.09			
				4列目	700	20.6	1.29	1.01	0.08	0.09			
⑦		無し	7,500	1列目	700	16.0	1.29	1.01	0.09	0.08	0.08	0.08	0.08
				2列目	700	17.3	1.29	1.01	0.08	0.08			
				3列目	700	17.9	1.29	1.01	0.08	0.09			
				4列目	700	20.1	1.29	1.01	0.08	0.09			
⑧			22,500	1列目	700	15.2	1.29	1.01	0.09	0.08	0.08	0.08	0.08
				2列目	700	16.3	1.29	1.01	0.09	0.08			
				3列目	700	17.0	1.29	1.01	0.09	0.09			
				4列目	700	19.2	1.29	1.01	0.08	0.10			
⑨		3,500	7,500	1列目	700	11.1	1.29	1.01	0.07	0.06	0.06	0.06	0.06
				2列目	700	9.5	1.29	1.01	0.07	0.06			
				3列目	700	12.0	1.29	1.01	0.06	0.06			
				4列目	700	16.6	1.29	1.01	0.06	0.07			
				5列目	700	18.9	1.29	1.01	0.06	0.07			
⑩			22,500	1列目	700	11.6	1.29	1.01	0.07	0.06	0.06	0.06	0.06
				2列目	700	10.7	1.29	1.01	0.07	0.06			
				3列目	700	11.6	1.29	1.01	0.06	0.06			
				4列目	700	15.4	1.29	1.01	0.06	0.07			
				5列目	700	17.5	1.29	1.01	0.06	0.07			
⑪		無し	7,500	1列目	700	13.8	1.29	1.01	0.07	0.06	0.06	0.06	0.06
				2列目	700	14.3	1.29	1.01	0.06	0.06			
				3列目	700	14.8	1.29	1.01	0.06	0.06			
				4列目	700	14.8	1.29	1.01	0.06	0.07			
				5列目	700	16.3	1.29	1.01	0.06	0.07			
⑫			22,500	1列目	700	13.0	1.29	1.01	0.07	0.06	0.06	0.06	0.06
				2列目	700	14.0	1.29	1.01	0.07	0.06			
				3列目	700	14.0	1.29	1.01	0.06	0.06			
				4列目	700	14.0	1.29	1.01	0.06	0.07			
				5列目	700	15.6	1.29	1.01	0.06	0.07			
⑬	18.0	3,500	7,500	1列目	900	11.2	1.29	1.01	0.12	0.11	0.11	0.11	0.11
				2列目	900	11.1	1.29	1.01	0.12	0.11			
				3列目	900	13.9	1.29	1.01	0.12	0.11			
				4列目	900	17.5	1.29	1.01	0.12	0.11			
				5列目	900	24.7	1.29	1.01	0.11	0.12			
				6列目	900	26.9	1.29	1.01	0.11	0.13			
⑭			22,500	1列目	1,000	10.0	1.29	1.01	0.12	0.11	0.11	0.11	0.11
				2列目	1,000	10.2	1.29	1.01	0.12	0.11			
				3列目	1,000	11.4	1.29	1.01	0.12	0.11			
				4列目	1,000	14.0	1.29	1.01	0.12	0.11			
				5列目	1,000	18.6	1.29	1.01	0.12	0.12			
				6列目	1,000	19.4	1.29	1.01	0.11	0.13			
⑮			7,500	1列目	1,300	9.5	1.29	1.01	0.15	0.12	0.14	0.12	0.12
				2列目	1,300	19.6	1.29	1.01	0.15	0.14			
				3列目	1,300	22.3	1.29	1.01	0.14	0.16			
⑯			22,500	1列目	1,300	10.5	1.29	1.01	0.15	0.12	0.14	0.12	0.12
				2列目	1,300	19.1	1.29	1.01	0.15	0.14			
				3列目	1,300	21.0	1.29	1.01	0.14	0.16			
				平均値 −7.5m	海側杭	13.4	1.34	0.97	0.10	0.09	0.10	0.09	0.09
					中央杭群	14.5	1.34	0.97	0.10	0.10			
					陸側杭	18.3	1.34	0.97	0.10	0.10			
				平均値 −12m	海側杭	13.1	1.29	1.01	0.08	0.07	0.07	0.07	0.07
					中央杭群	14.6	1.29	1.01	0.07	0.07			
					陸側杭	18.7	1.29	1.01	0.07	0.08			
				平均値 −18m	海側杭	10.3	1.29	1.01	0.14	0.12	0.13	0.12	0.12
					中央杭群	16.0	1.29	1.01	0.13	0.12			
					陸側杭	22.4	1.29	1.01	0.13	0.15			

国土技術政策総合研究所資料

TECHNICAL NOTE of ＮＩＬＩＭ

No. 931　　September 2016

編集・発行　©国土技術政策総合研究所

本資料の転載・複写のお問い合わせは
〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬 3-1-1
管理調整部企画調整課　電話：046-844-5019
E-mail：ysk.nil-kikaku@ml.mlit.go.jp