

国土技術政策総合研究所資料

TECHNICAL NOTE of
National Institute for Land and Infrastructure Management

No.659

December 2011

水理模型実験結果によるケーソン式混成堤の 波浪による変形特性に関する一考察

橋本 淳・長尾 毅

A Study on Deformation Characteristic of Composite Caisson Type Breakwater
Using Hydraulic Model Experiment Result

Jun HASHIMOTO, Takashi NAGAO

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

水理模型実験結果によるケーソン式混成堤の 波浪による変形特性に関する一考察

橋本 淳*・長尾 毅**

要 旨

ケーソン式混成堤の性能設計において変形量の評価は重要であるが、滑動以外の変形モードについては変形量の算定手法が確立されていないのが現状である。本研究では、既往の水理模型実験を入手し、実験データをもとに変形初期段階におけるケーソン式混成堤の波浪による変形特性を議論した。その結果、波浪を受けたときの変形はケーソンがマウンド上を単に水平方向に滑動するのではなく、港内側端しがマウンド内に貫入しながら変形し、その変形特性はマウンド条件で異なることを明らかにした。さらに、波浪によるケーソン式混成堤の変形量実験値を簡易に推定できる手法を提案した。

キーワード：ケーソン式混成堤，変形特性，支持力破壊，貫入角

*港湾研究部港湾施設研究室交流研究員（中電技術コンサルタント株式会社）

**港湾研究部港湾施設研究室長

〒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：046-844-5029 Fax：046-844-5081 e-mail: nagao-t92y2@ysk.nilim.go.jp

A Study on Deformation Characteristic of Composite Caisson Type Breakwater Using Hydraulic Model Experiment Result

Jun HASHIMOTO*
Takashi NAGAO**

Synopsis

Evaluation of deformation is important for the performance-based design of caisson type composite breakwaters. However, the evaluation method of the deformation except for the sliding failure mode has not been established yet. In this study, authors obtained a past hydraulic model experiment result and discussed the deformation characteristic of breakwater in the range of small deformation. As a result, it was shown that the deformation of breakwaters is not as simple as mere sliding but is accompanied by the deformation in the rubble mound. It was also shown that deformation characteristics differ according to mound conditions. Furthermore, authors proposed a simple estimation method of deformation of breakwaters of the hydraulic model experiment results.

Key Words : caisson type composite breakwater, deformation characteristic, foundation failure, penetration angle

* Exchanging Researcher of Port Facilities Division, Port and Harbor Department
** Head of Port Facilities Division, Port and Harbor Department
3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan
Phone : +81-46-844-5029 Fax : +81-46-844-5081 e-mail: nagao-t92y2@ysk.nilim.go.jp

目 次

1. 序論	1
2. 既往の水理模型実験の概要	1
3. ケーソン式混成堤の変形挙動把握	1
3.1 ローパスフィルター処理	2
3.2 変形段階の確認	3
3.3 1波あたりのケーソン挙動	3
3.4 変位履歴と貫入角等	4
3.5 見かけの摩擦係数	6
3.6 静的載荷実験による貫入角及び見かけの摩擦係数	6
4. マウンド変形特性についての考察	8
4.1 作用荷重と貫入角の関係	8
4.2 貫入量と貫入角の関係	9
4.3 見かけの摩擦係数と貫入角の関係	9
4.4 捨石の受働抵抗力の影響	10
5. 変形量実験値に対する簡易推定手法の提案	10
5.1 貫入角の推定	10
5.2 見かけの摩擦係数の推定	11
5.3 ケーソン回転角の推定	12
5.4 推定値と実験値のケーソン変位量比較	12
6. 結論	13
謝辞	13
参考文献	13
付録	14

1. 序論

ケーソン式混成堤の耐波設計においては、滑動・転倒・支持力の3つの破壊モードを考慮した検討が行われる。3つのモードのうち滑動が支配的となることが多く、これは被災事例と整合すると一般に考えられている。また、性能設計の体系においては、変形という観点からケーソン式混成堤の性能を議論する必要があると考えられるが、滑動以外の変形モードについては、変形量の算定方法が確立されていないのが現状である。

マウンド支持力の安定性について、現行設計法では簡易ビショップ法により照査されるが、メカニズムの観点から必ずしも合理的でない可能性が指摘されている。例えば、宮田ら(2002)は載荷実験によりマウンドの荷重支持は極めて不均質かつ離散的であることを明らかにした。長尾ら(2008)は、マウンドの支持力破壊は原地盤を包括する大規模な円弧すべり破壊ではなく、ケーソン港内側端し近傍の局所的な破壊であることを明らかにした。

本研究では水理模型実験によってケーソン式混成堤の変形特性の議論を行った宮田ら(2009, 2010)の研究結果に着目した。性能照査法への反映という観点からは1m程度までの変形特性の把握が重要と考えられるが、宮田ら(2009, 2010)の研究では1m程度までの変形初期段階では水平変位が卓越し、支持力破壊の可能性は示唆されるもののマウンド肩幅などの違いによる変形挙動の違いはないと結論されている。本研究では、この宮田ら(2009, 2010)の水理模型実験の結果を入手し、そのデータを詳細に検討することによってケーソン式混成堤の波浪による変形特性を議論した。

主な内容は次の通りである。①変形初期段階におけるケーソン式混成堤の変形挙動を把握した(3章)。②波浪作用時にケーソン港内側端しがマウンド内へ貫入する角度(以下、貫入角と称す)の観点からマウンド変形特性について考察した(4章)。③波浪によるケーソン式混成堤の変形量実験値を簡易に推定できる手法を提案した(5章)。本研究は、ケーソン式混成堤の波浪に対する性能照査において、滑動だけでなくマウンド支持力の安定性も考慮した複合的な変形挙動を把握するための基礎資料になることを目的としている。

2. 既往の水理模型実験の概要

本研究でデータを使用した宮田ら(2009, 2010)の水理模型実験(以下、既往の水理模型実験と称す)の概要について、本論文を読み進める上で必要な事項を記述する。

水理模型実験は造波水路(長さ50.0m×幅0.6m×高さ1.2m)で実施しており、模型縮尺は1/30、実験断面はマウンドの支持力破壊が原因と判定される防波堤の被災事例を参考に設定されている(図-1)。

表-1に検討Case一覧を示す。議論は模型縮尺で行うが、参考として表内の括弧に実物大換算値を示している。実験はケーソン規格・設置水深の異なるType-1とType-2の断面について行っている。波浪条件は、事前に各Typeの基本断面で実施した実験結果より、大変形が生じた波高・周期に設定した規則波を用いている。大変形とはマウンド法肩部分が側方へ変形するほどの変形で、ケーソンを支持できていない状態である。マウンドの仕様は、港外側肩幅が0.167m(実物大換算で5.00m)で港内側肩幅・高さ・港内側被覆石の有無を変えて実験を行っている。マウンド材には砕石6号(粒径5-13mm)を用いており実物大換算の粒径は150-390mmである。これは被災事例の防波堤に使用されていたマウンド材が5~100kg/個の捨石であり、捨石の土粒子密度を 2.6g/cm^3 、形状を球状と仮定した場合の粒径(154-419mm)とほぼ同じである。

計測について、ケーソンの水平変位・沈下・回転はワイヤー変位計またはマーキングによる画像解析により計測している。波圧・揚圧力は波圧計をケーソン模型の前背面にそれぞれ8個、底面に4個設置して計測している。

3. ケーソン式混成堤の変形挙動把握

ケーソン式混成堤の波浪による変形特性を議論するために、既往の水理模型実験結果を整理した。マウンド仕様やケーソン式混成堤の変形に与える影響について考察するため、Type-1の基本①・肩幅狭・肩幅広①(この章では、①は省いて表記する)の結果を示す。[基本]については、マウンド材の粒径を大きくしたCase(以下、[粒径大]と称す)も実施しているのでこれも比較の対象とした。[粒径大]のマウンド材には砕石4号(粒径20-30mm)を用いており実物大換算の粒径は600-900mmである。

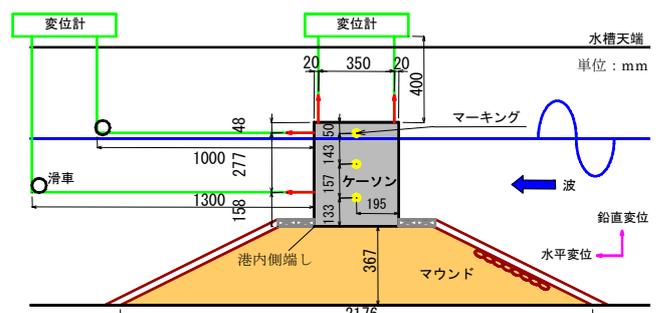


図-1 水理模型実験の断面_[基本①] (縮尺: 1/30)

表-1 検討 Case 一覧

Case	Type-1				Type-2				
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
マウンド仕様	基本①	肩幅狭	肩幅極狭	肩幅広①	基本②	基本③	肩幅広②	肩幅広② マウンド低	マウンド低
港内側肩幅 (m)	0.167 (5.00)	0.125 (3.75)	0.083 (2.50)	0.600 (18.00)	0.167 (5.00)		0.250 (7.50)		0.167 (5.00)
港内側被覆石	有り				有り	無し			
マウンド高さ (m)	0.367 (11.00)				0.367 (11.00)			0.167 (5.00)	
設置水深 (m)	0.408 (12.25)				0.328 (9.85)				
ケーソン規格	寸法:B0.390×H0.483×L0.560m (11.7×14.5×16.8m) 水中重量:1834N/m (1651kN/m)				寸法:B0.466×H0.483×L0.560m (14.0×14.5×16.8m) 水中重量:2657N/m (2391kN/m)				
設定波浪条件	規則波, 波高:0.350m(10.50m) 周期:2.20s(12.0s)				規則波, 波高:0.325m(9.75m) 周期:2.14s(11.7s)				

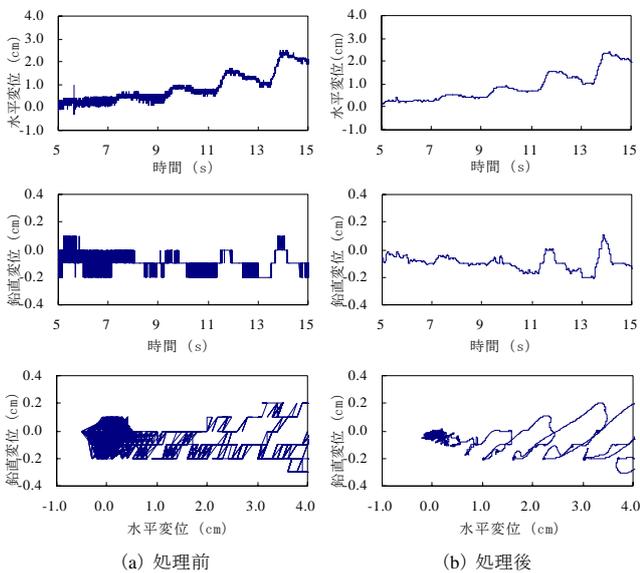


図-2 ローパスフィルター処理によるケーソン中心変位履歴の例_[基本]

3.1 ローパスフィルター処理

宮田ら(2009, 2010)の研究においては, 着眼点を大変形に置いていたこともあり, ケーソン式混成堤の変形特性は画像データの分析によって議論されていた. 本研究では, 変形量の小さい範囲でのケーソン挙動を把握することが目的であるため, ワイヤ式変位計のデータを入手した. ワイヤ式変位計で計測された[基本]の変位履歴の一部を図-2(a)に示す. サンプル周波数は500Hzであるが, データに高周波ノイズが多く含まれていると考えられたため, 2Hzのローパスフィルター処理を施した(図-2(b)). 同様の処理を他Caseにも施し, そのデータをもとに詳細にケーソン式混成堤の変形特性を議論した.

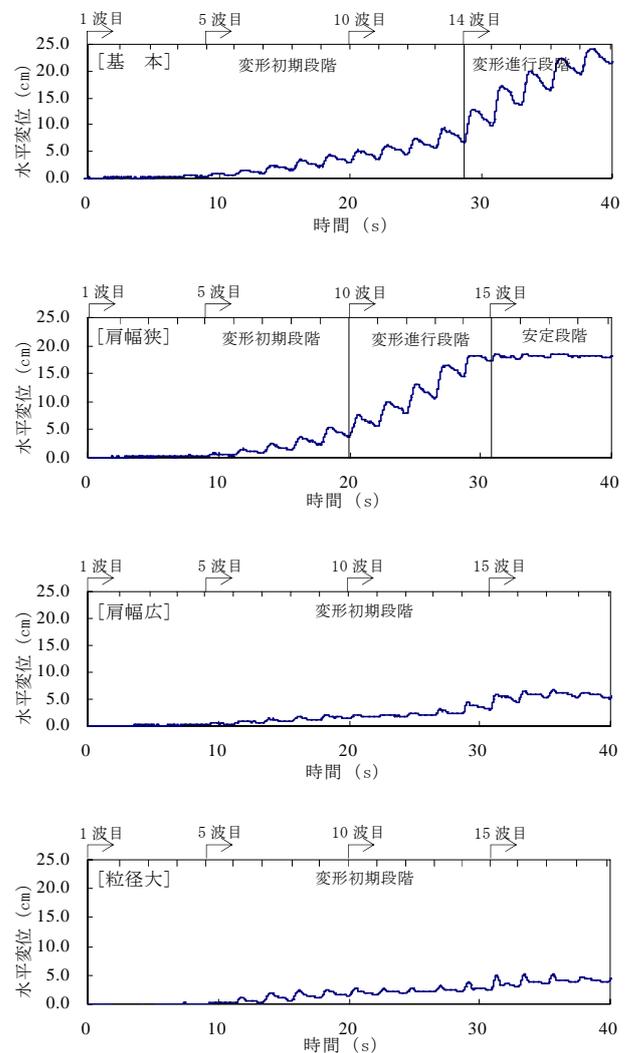
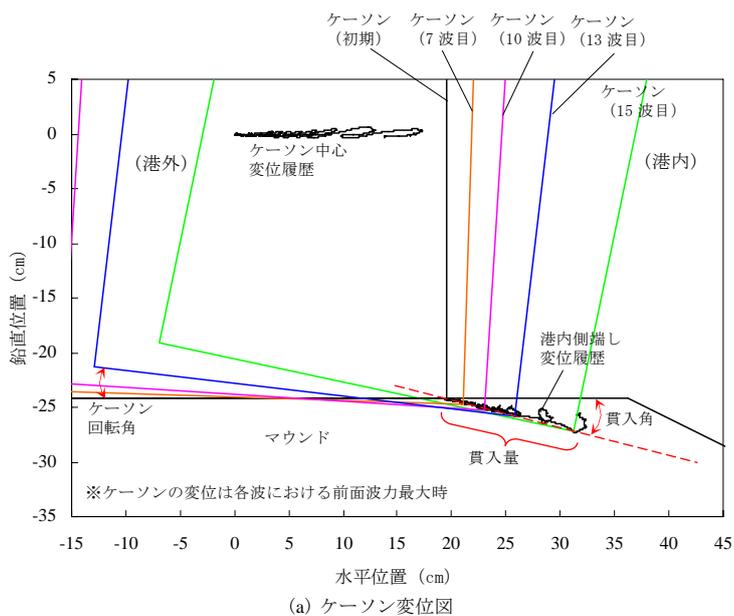
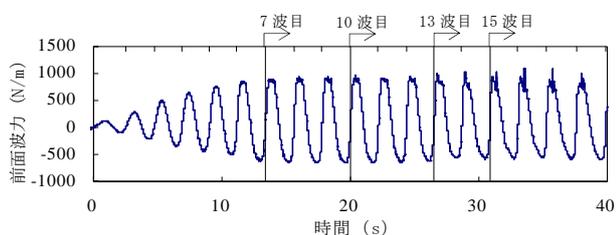


図-3 ケーソン中心水平変位による変形段階確認



(a) ケーンソン変位図



(b) ケーンソン前面波力時刻歴

図-4 ケーンソン変位図及び前面波力時刻歴_[基本]

3.2 変形段階の確認

ケーンソン式混成堤の波浪による変形は変形初期段階・変形進行段階・安定段階の3つの変形過程を経ることが明らかになっている(宮田ら, 2010)。変形初期段階は、ケーンソン港内側端し付近のマウンド表層の変形が主要因で、ケーンソンの変位がわずかに進行する状態、変形進行段階は、マウンドの変形に伴いケーンソンが水平及び鉛直に著しく変位する状態、安定段階は、変形進行段階時にケーンソンによって押し出され大きく隆起した捨石が受働抵抗として働きケーンソンがほとんど変位しない状態である。各変形段階の境界となる時刻は、基本的にケーンソン中心水平変位の変位速度が大きく変化する時刻と定義されており(宮田ら, 2010)、これに従い変形段階を確認した。

図-3に各Caseの変形段階を確認した結果を示す。[基本]と[肩幅狭]は、変形初期段階と変形進行段階の境界がそれぞれ14波目と10波目にみられ、その時の水平変位は約5cmであった。肩幅が狭い方が早く変形進行段階に移行し、15波目で安定段階まで変形が至っていることが確認できた。一方、[肩幅広]と[粒径大]については、顕

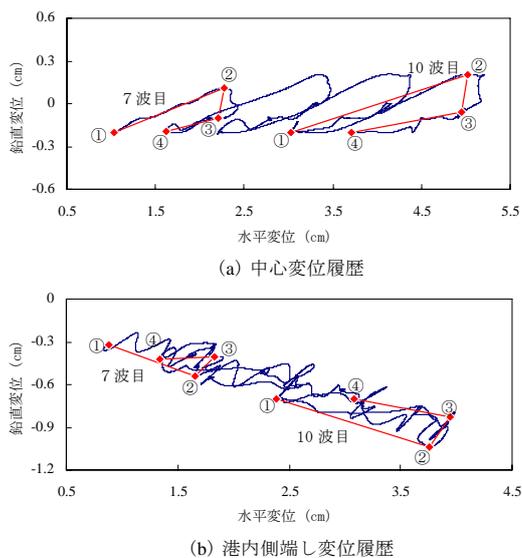


図-5 ケーンソン変位履歴 (7~10波目)_[基本]

著な変位速度の変化がみられず変形進行段階に至っていないと考えられる。[基本]の変形初期段階から変形進行段階に移行する様子は、図-4に示す波力最大時のケーンソン変位図からも窺える。変形初期段階と変形進行段階の境界に相当する13-15波目は、変形初期段階の7-10波目や10-13波目と比べ作用波数が少なく波力も大差ないが、変位量は大きくなっており、変位速度が変化していることが分かる。

同じ波浪条件であるがマウンド仕様の違いによりケーンソン式混成堤の変形特性に差があり、肩幅が広く粒径が大きいほど変形の進行が遅い傾向を示している。また、変形初期段階からケーンソンの変位量に差がみられ、肩幅が広く粒径が大きいほど変位量が小さい。ここから、水平力と摩擦抵抗力のバランスでケーンソンがマウンド上を水平方向に滑動するという枠組みからは実際の変形特性を説明できないことが示唆される。

3.3 1波あたりのケーンソン挙動

波が作用する時の変形初期段階におけるケーンソンの挙動を把握すべく、[基本]の変形初期段階で7波目と10波目に注目した。図-5に7~10波のケーンソン中心と港内側端しの変位履歴を示す。図中、①は作用開始時、②は波力最大時、③は押し波から引き波への変化時、④は作用終了時を指し、各点を結び大まかな変位を捉えた。ケーンソン中心は図のように楕円状の回転を伴いながら変位している。これはケーンソンがマウンド上を単に水平方向に滑動するのではなく、マウンドへ貫入を繰り返しながら

ら変位していることを意味する。ケーソン港内側端しの変位履歴にもその様子が表れており、また、ケーソン港内側端しの変位からは、港内側端しが直線状にマウンドに貫入することが分かる。他の Case においても変位量や貫入角が違うものの同様の挙動がみられた(次節で詳述)。

図-6 は、1 波あたりのケーソン挙動の概念図で、図-5 の①～④の経緯を示している。図中の「・」は、ケーソン中心である。①～②では、押し波の作用により港内側端し近傍の接地圧が増加し、港内側端しがマウンド内に貫入していく。それと同時にケーソンが港内側端しを中心とした回転運動により浮き上がる挙動をしている。②～③では、波力の減少に伴いケーソンが港外側に回転する。その際、港内側端しは港内上方に変位するが、変形初期段階ではケーソンの回転量が小さく、ケーソン底面とマウンドの接触面が広いため、ロッキングによる港内側端しの浮き上がり量は小さい。図-4 のケーソン変位図をみると、変形進行段階に移行する直前の 13 波目から港内側端しの浮き上がりが顕著になっておりロッキングを伴った挙動をしていると推察される。③～④の引き波作用時では、引き波・負の揚圧力でケーソンが港外下方へ沈み込む変位と底面中央付近を中心に港外側に回転する変位が同時に生じているが、ロッキングの影響で挙動が異なる。底面とマウンドの接触が十分でロッキングの影響が小さいと考えられる場合は、回転による変位が小さく港内側端しの浮き上がりは沈み込みによる変位で相殺されている。一方、底面とマウンドの接触が不十分でロッキングの影響が大きいと考えられる場合は、沈み込む変位より回転する変位の方が大きく港内側端しは上方へ変位している。

3.4 変位履歴と貫入角等

図-7 は、各 Case のケーソン中心と港内側端しの変位履歴である。全ての Case で、中心は楕円状の回転を伴いながら変位し、港内側端しは直線状にマウンドに貫入していることが分かる。図中、近似線_中心 A・B・C は、ケーソン中心変位履歴図より 9 波目までの各波における「波力最大時」・「押し波から引き波への変化時」・「引き波から押し波への変化時」のケーソン中心位置を抽出プロットし、それぞれの時刻におけるケーソン中心の各位置を対象とした近似線である。9 波目までとしたのは、10 波目から[肩幅狭]が変形進行段階に移行し、本研究の対象とする変形初期段階から外れるからである。近似線_端しは、港内側端し変位履歴図において変形初期段階の範囲(港内側端し水平変位で 5cm 程度)で引いた近似線である。

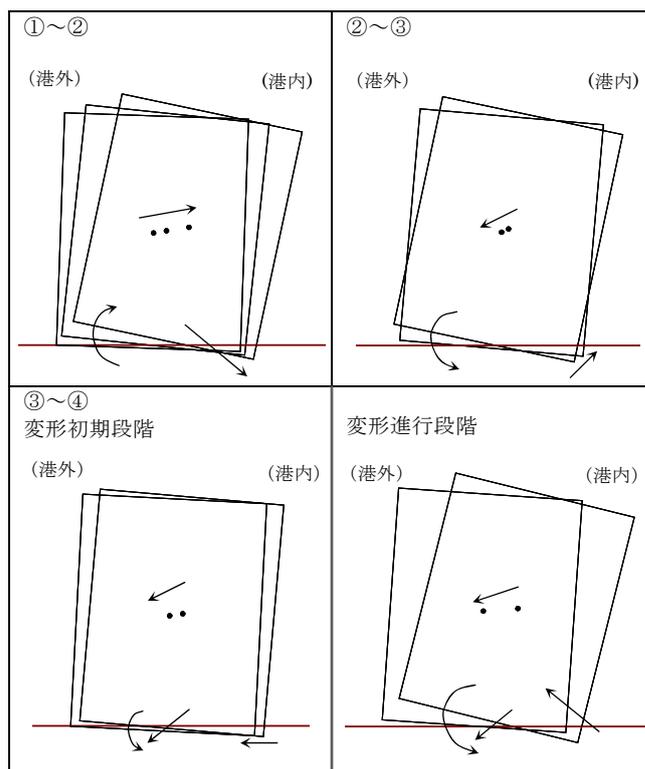


図-6 1 波あたりのケーソン挙動の概念図

各近似線の角度(傾き)を求めると、Case によって差がありマウンド仕様で挙動が異なることが明らかとなった。近似線_端しの角度は貫入角を表しているが、貫入角は肩幅が広いほど小さくなっている。これは、肩幅が広いとマウンド変形への抵抗性が大きく、港内側端しの下方への貫入が低減されるためと考えられる。粒径が大きい条件もマウンド変形への抵抗性は大きいことが期待されるが、貫入角は大きい結果となっている。これは、粒径が大きいと港内側端しが間隙に入り込み貫入角が大きくなってしまった可能性がある。なお、後述する静的載荷実験では、粒径が大きいほど貫入角が小さくなる結果が得られている。

図-8 は、同じ波数(7 波目)作用させた時のケーソン中心水平変位と図-7 で示した角度をプロットし近似線を引いたものである。マウンドを強固にすることで貫入角は減少し、変位量も減少することが分かる。この結果から、マウンドの支持力特性が水平変位量に密接に関係しており、マウンド仕様・外力条件等から貫入角を推定できれば、ケーソン変位量を推定できる可能性が示唆される。

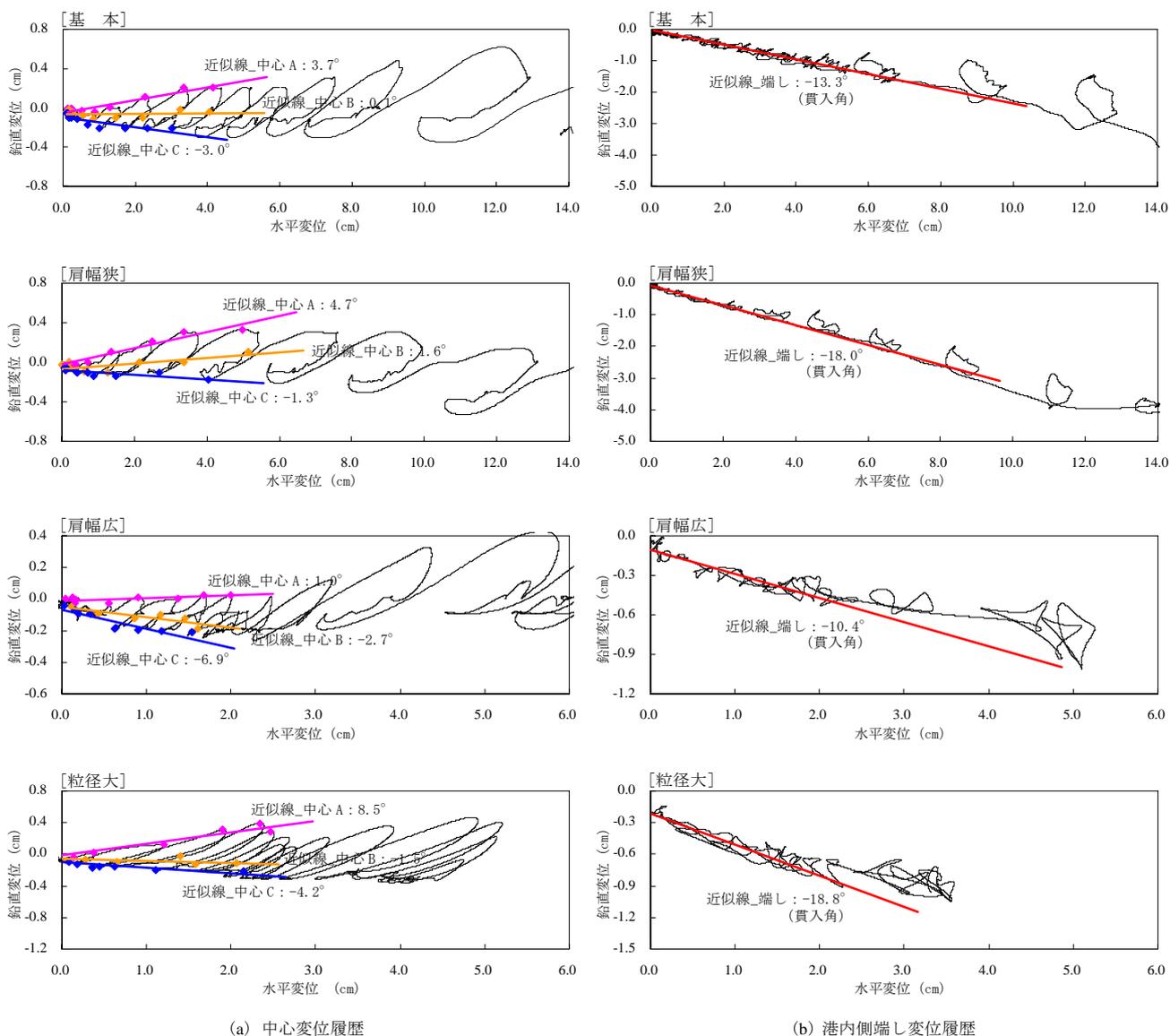


図-7 ケーソン変位履歴と近似線の角度（傾き）

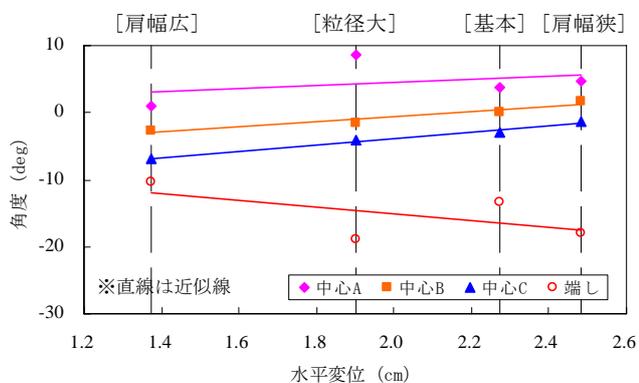


図-8 ケーソン中心水平変位と貫入角等の関係

3.5 見かけの摩擦係数

マウンドの支持力特性の違いでケーソン変位量が異なる結果を受けて、マウンド仕様と見かけの摩擦係数の関係を整理した。見かけの摩擦係数は、1波でのケーソン中心変位量が理論値と実験値で等しくなるような摩擦係数を試行錯誤で算定した。理論値は滑動量算定手法(例えば、下迫ら, 1998)を参考に、式(1)で表される滑動時のケーソンの運動方程式を2回数値積分することで計算できる。

$$(W/g + M_a)\ddot{x} = P - \mu(W' - U) \quad (1)$$

ここに、 W : ケーソンの空中重量, g : 重力加速度, M_a : 付加質量, \ddot{x} : ケーソンの加速度, P : 水平波力, μ : 摩擦係数, W' : ケーソンの水中重量, U : 揚圧力である。水平波力に計測波力を sin 波近似して代入し、この式内の摩擦係数を調整することで見かけの摩擦係数を算定している。

見かけの摩擦係数の算定結果を図-9 に示す。ケーソン初動時に摩擦係数の急増がみられるが、どの Case においても水平変位 1.5cm あたりで傾きが緩くなり始め、この時の摩擦係数に大差はなく約 0.55 である。なお、ここでの摩擦係数はあくまでケーソン中心の水平変位量をもとに算定した値であり、既に述べたように条件によって貫入角が異なるため、貫入ラインに沿った変位量としてみた場合には、肩幅が広い条件などでは摩擦係数が大きいといえることに注意が必要である。

水平変位 1.5cm 程度以降、変位が進むにつれて摩擦係数に差が現れ始め、[肩幅狭]は減少し、[肩幅広]・[粒径大]は増加していく。肩幅が狭いとマウンドの支持力が小さいためマウンドが変形しやすく、それに伴いケーソンの変位が促進され摩擦係数が小さくなると考えられる。逆に肩幅広・粒径大でマウンドが強固であれば、マウンドの変形が小さくケーソンの変位が抑制され摩擦係数が大きくなることを示している。図中に水平変位 1.5~10cm 間の摩擦係数の平均値を示しているが 10%以上の差がある。

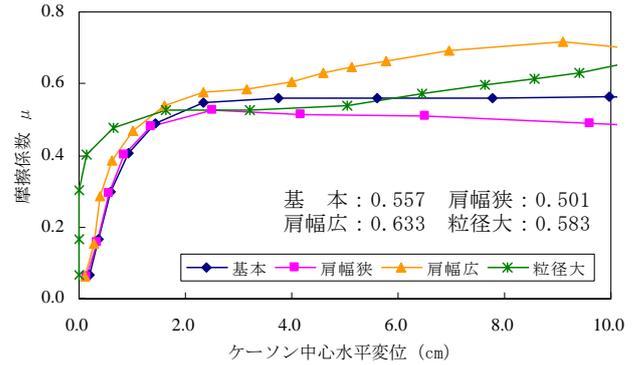


図-9 マウンド仕様と見かけの摩擦係数の関係

3.6 静的載荷実験による貫入角及び見かけの摩擦係数

これまで水模型実験結果を整理し考察してきた Case は、宮田ら(2009, 2010)によって静的載荷実験も実施されているので同様の整理を行った。

(1) 実験概要

断面は水理模型実験時と同じで、ケーソンの変位・回転に追従可能なローラー付の油圧ジャッキを用いて単調載荷している(図-10)。[基本]の水理模型実験の押し波最大時相当を再現するように調整されており、載荷重は水理模型実験の波力合力と同等の荷重、ケーソン水中重量は水理模型実験におけるケーソン水中重量より揚圧力を除いた重量、作用位置は港内側端し回りのモーメントが水理模型実験と概ね等しくなる位置である。データの整理はワイヤー式変位計で計測された変位を用いた。

(2) 変位量と貫入角

図-11 に静的載荷試験によるケーソン港内側端しの変位履歴と貫入角算定結果を示す。変形初期段階から港内側端しがマウンド内に直線状に貫入していく様子が確認でき、その角度は肩幅が広いほど、粒径が大きいほど小さい。

図-12 はケーソン中心水平変位と図-11 で示した貫入角をプロットし近似線を引いた図である。ケーソン中心水平変位は、変形初期段階で各 Case の摩擦抵抗力のなす仕事等しい時であるが、マウンド仕様の違いで変位量に差があり、マウンドを強固にするほど変位量は小さい。また、貫入角も小さいことが分かる。図-11, 12 とも水理模型実験と同様の結果である。

(3) 見かけの摩擦係数

図-13 に静的載荷実験による見かけの摩擦係数の算定結果を示す。ここでの摩擦係数は、作用荷重をケーソンの水中重量で除した値である。結果は以下に示す通りで、水理模型実験と同様の結果である。

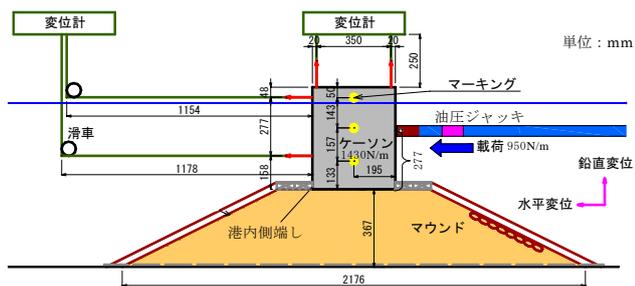


図-10 静的荷重実験の断面_〔基本〕 (縮尺：1/30)

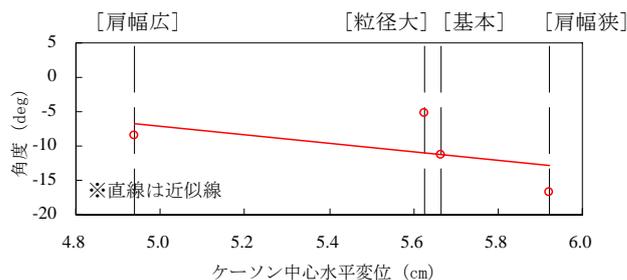


図-12 ケーソン中心水平変位と貫入角の関係

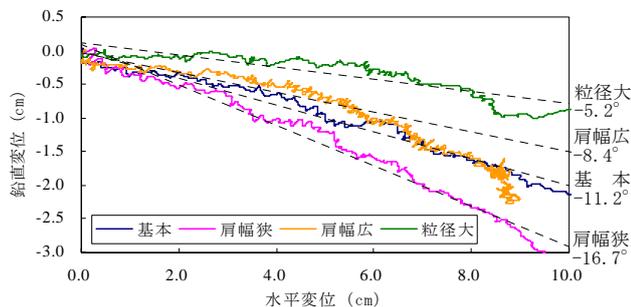


図-11 ケーソン港内側端し変位履歴と貫入角

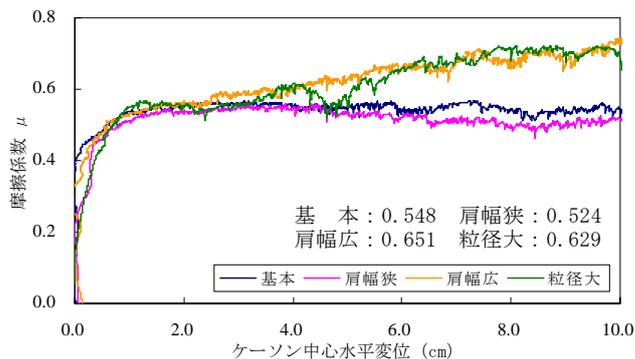


図-13 静的荷重実験による見かけの摩擦係数

- ・ケーソン初動時に摩擦係数が急増するが、どの Case においても水平変位 1.5cm あたりで傾きが緩くなり始め、この時の摩擦係数は大差なく約 0.55 である。
- ・水平変位 1.5cm 程度以降、変位が進むにつれて摩擦係数に差が現れ始め、[肩幅狭]は減少し、[肩幅広]・[粒径大]は増加する。
- ・水平変位 1.5~10cm 間の摩擦係数の平均値を図中に示しているが 10%以上の差がある。

表-2 検討 Case 一覧及び貫入角算定結果

Case	Type-1				Type-2				
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
マウンド仕様	基本①	肩幅狭	肩幅極狭	肩幅広①	基本②	基本③	肩幅広②	肩幅広② マウンド ^低	マウンド ^低
港内側肩幅 (m)	0.167	0.125	0.083	0.600	0.167		0.250		0.167
港内側被覆石	有り				有り	無し			
マウンド ^高 高さ (m)	0.367				0.367			0.167	
設置水深 (m)	0.408				0.328				
ケーソン規格	寸法:B0.390×H0.483×L0.560m 水中重量:1834N/m				寸法:B0.466×H0.483×L0.560m 水中重量:2657N/m				
設定波浪条件	規則波, 波高:0.350m 周期:2.20s				規則波, 波高:0.325m 周期:2.14s				
水平波力(N/m)	893.72	870.43	886.51	884.52	1102.24	1102.24	1098.88	1098.88	1102.24
有効鉛直荷重(N/m)	1487.37	1503.04	1495.43	1402.44	2350.86	2350.86	2340.68	2340.68	2350.86
荷重傾斜率	0.60	0.58	0.59	0.63	0.47	0.47	0.47	0.47	0.47
実験回数	2回	1回	1回	1回	3回	4回	4回	3回	3回
貫入角 (deg)	13.3/11.5	18.0	16.1	10.4	24.8/25.1 28.0	25.5/26.2 23.8/18.6	20.6/20.2 18.3/20.1	14.4/17.5 17.1	22.0/14.2 20.2

4. マウンド変形特性についての考察

ここでは、貫入角の観点からマウンド変形特性について議論を進めるため、まずは既往の水理模型実験結果から全Caseの貫入角を算定した(表-2)。貫入角の算定方法については3.4で述べているので省略するが、全Caseの貫入角算定図は付録-Aに添付する。

4.1 作用荷重と貫入角の関係

作用荷重と貫入角の関係を荷重傾斜率(水平波力/有効鉛直荷重)に着目し考察した。水平波力は実験時に計測されたケーソンの前面波力で、各Caseにおいて変形初期段階での最大値である。図-14にTypeの異なるCase-1(Type-1)とCase-6(Type-2)の前面波力時刻歴を示す。設定波高はCase-6よりCase-1の方が大きいですが、前面波力最大値はCase-1の方が小さくなっている。これは、Case-1は水面上からケーソン天端までが低く越流に伴う波力減少と、Case-1はCase-6よりケーソンの変位量が大きく変位に伴う波力減少が影響しているからだと考えられる。Case-1は越流による港内側マウンドの洗掘が心配されるが、港内側にも被覆石を設置しており洗掘は防止されている。有効鉛直荷重はケーソン重量から浮力と前面波力最大時の計測揚圧力を差し引いた値である。前面波力最大時の計測揚圧力がCase-1~3は約340N/m、Case-4は約430N/mであるため、Case-4の有効鉛直荷重が小さくなっている。なお、Case-5,8,9については、波力・揚圧力の計測を実施していないので、Case-6,7の結果を流用している。

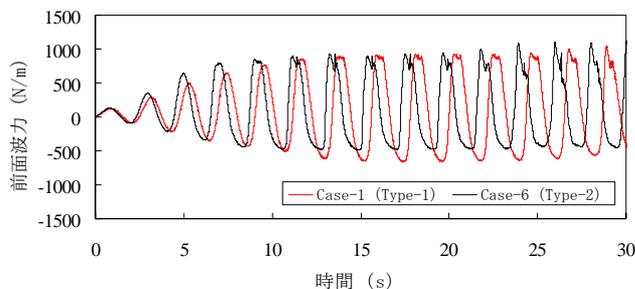


図-14 ケーソン前面波力時刻歴比較

荷重傾斜率が大きいと偏心距離・港内側端し圧が大きくなることから、荷重傾斜率と貫入角に相関があることが想定される。しかしながら、Type-1が荷重傾斜率0.60で貫入角10.4~18.0度、Type-2が荷重傾斜率0.47で貫入角14.2~28.0度と、荷重傾斜率の低いType-2の方が貫入角が大きくなっている(表-2)。Type-1とType-2では用いたケーソンに差があり、Type-2の方が重いケーソンである。このため自重による鉛直方向の沈下の影響が支配的でType-1と比較して貫入角が大きくなったと考えられる。このことは、Case-1(Type-1)とCase-5(Type-2)を比較することで分かる。Case-1とCase-5はマウンド仕様が同じで作用している波力も図-14に示す通りType別で大差ない。条件の違いはケーソン規格のみで、ケーソンが重いCase-5の貫入角が大きくなっている。以上より、必ずしも水平波力の値や滑動安定性(=摩擦係数×有効鉛直荷重/水平波力)だけで貫入角は決まらないといえる。

4.2 貫入量と貫入角の関係

図-15 に港内側端しの貫入量と貫入角の関係図を示す。貫入量は港内側端しの水平変位と鉛直変位の二乗平方根で、9 波目（変形初期段階）の波力最大時である。全体では貫入量と貫入角に相関がみられないが、Type 別に分けてみると、マウンドが低い Type を除き、貫入角が大きいほど貫入量が大きくなっている。一方、マウンドが低い Type は、貫入角は小さいが貫入量は大きい結果となっている。マウンド高が低い条件では相対的にマウンド下の原地盤の影響を受けやすいと考えられるが、本実験ではマウンドは水槽の上に直接構築されており原地盤は再現していない。このため原地盤が軟弱である影響を受けて貫入量が大きいというわけではない。また、水槽底面には不織布が取り付けられており、マウンド底面の滑りによって貫入量が大きいというわけでもない。貫入角が小さいのは、マウンド下が強固であるために崩壊線が他 Case と比較して水平に近くなり、表層のせん断抵抗の小さな領域を貫入していくために滑動に近い変形モードとなり、貫入量が大きくなったものと考えられる。

Type-1 と Type-2 を比較すると、Type-2 の方が前節で述べたように貫入角が大きいものの、貫入量は小さい。9 波目までの波力に大きな違いがみられず（図-14）、波力の力積累計を計算すると、Type-1 が 4420 (N s/m)、Type-2 が 4520 (N s/m) でほぼ同程度であること、Case-1 (Type-1) と Case-5 (Type-2) はマウンド仕様が同じであることから、ケーソン規格の違いによるものと考えられる。Type-2 は、前述のようにケーソン重量が大きいため貫入角は大きくなるが、波力作用に対する変形抵抗が大きくなるため貫入量は小さくなったと考えられる。

なお、Type-2 の実験結果からは、同条件下でも貫入角・量にばらつきがあることが分かる。標準偏差でそれぞれ約 1~3 度、約 0.1~1.5cm のばらつき、特にマウンドの低い Type は変形しやすいためかばらつきが大きい。

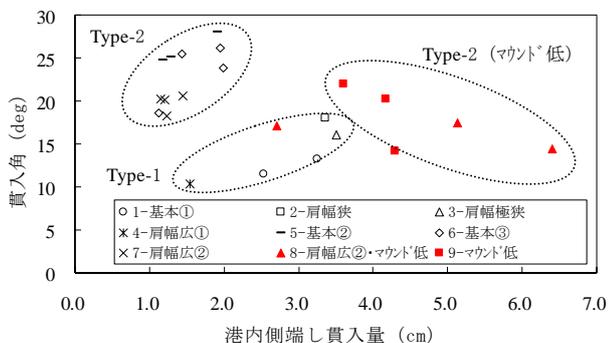


図-15 港内側端し貫入量と貫入角の関係

4.3 見かけの摩擦係数と貫入角の関係

図-16 に見かけの摩擦係数（変位量 1.5~10cm 間の平均値）と貫入角の関係図を示す。見かけの摩擦係数の算定方法については 3.5 で示した通りだが、ここではマウンド変形に焦点を置いているので、ケーソン中心の水平変位量ではなく港内側端しの貫入量をもとに算定した。また、入力波力は設計の観点から波高データから合田式で算出した波力に変更した。全 Case の見かけの摩擦係数算定図は付録-B に添付する。

関係図をみると、マウンドの支持力が小さければ貫入角が大きくなり見かけの摩擦係数が小さくなることが分かる。ただし、マウンドが低い Type はこの傾向に当てはまっていない。本実験ではマウンド下が水槽底面で強固あって、水槽底面には不織布が取り付けられておりマウンド底面が滑らない条件であるから、マウンドが低い Type は貫入角が小さいほど滑動に近い変形モードとなり、見かけの摩擦係数が小さくなると考えられる。

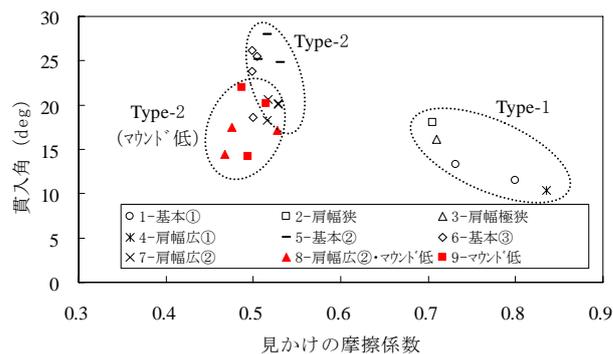


図-16 見かけの摩擦係数と貫入角の関係

4.4 捨石の受働抵抗力の影響

ケーソン港内側端しがマウンド内に貫入することで、港内側端し前面の捨石の受働抵抗が期待される。どの程度の抵抗力が作用するのか、ケーソンが貫入ラインに沿って滑動するとし捨石の受働抵抗力を算出した。ここでこの計算は概算であり、実際は図-4 に示すようにケーソン回転角と貫入角は一致しない。

図-17 に計算結果を示す。受働抵抗力は、肩幅の約半分の貫入量までは増加しそれ以降は減少している。貫入が小さい範囲では、肩幅狭が狭いほど受働抵抗力が大きい傾向にある。これは肩幅が狭いと貫入角が大きくなり、受働抵抗力として作用する港内側端し前面の捨石面積が広いからである。しかし、その値は肩幅狭のピークで約55N/mであり、作用水平波力(約870N/m)の1/10にも満たない。つまり、受働抵抗力はマウンド仕様の違いによるケーソン変位量の差にあまり影響しないと考えられる。

参考までに浮力増分を計算した。その結果が図-18 である。港内側端しがマウンド内に貫入しケーソンが回転することで、本体の水中部が増し浮力が増加することを表している。受働抵抗力より浮力の増分値の方が大きく、浮力がケーソン変位量に影響している可能性を示唆している。貫入角が大きければ浮力の作用も大きくなりケーソンの安定性を低下させると考えられる。

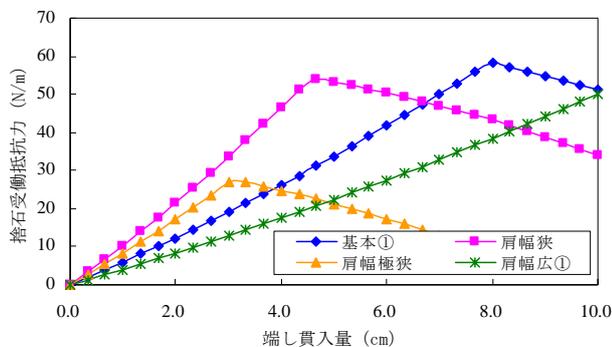


図-17 港内側端し貫入による捨石受働抵抗力

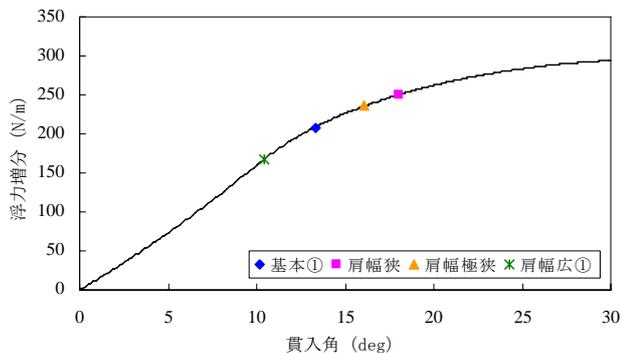


図-18 貫入角と浮力増分の関係

5. 変形量実験値に対する簡易推定手法の提案

これまでの検討で、水理模型実験によるケーソン式混成堤の変形はケーソンがマウンド上を単に滑動するのではなく、港内側端しがマウンド内に貫入しながら変形し、その変形特性は諸条件によって異なることが明らかになった。ここでは、このことを踏まえ、諸条件より水理模型実験によるケーソンの変位量を簡易に推定できる手法を検討する。水理模型実験によるケーソンは、図-19 に示すように変位しており、貫入角 (θ_p)、貫入量 (d)、ケーソン回転角 (θ_c) が分かればケーソンの変位量を推定できる。従って、これらを簡易に推定できる式を作成する。

貫入量については、波力の作用時間などが関係し、簡易な推定式を作成するのは困難なため、既に確立されている滑動量算定手法を活用する。滑動量算定式中の摩擦係数を見かけの摩擦係数に置換して波浪による滑動量を計算し、これを港内側端しの貫入量とするという考えである。よって、諸条件で異なる見かけの摩擦係数の簡易推定式を作成する。

なお、推定式は既往の水理模型実験結果をもとに作成するものであり、一般の設計への適用を念頭に置いたものではないことに注意が必要である。

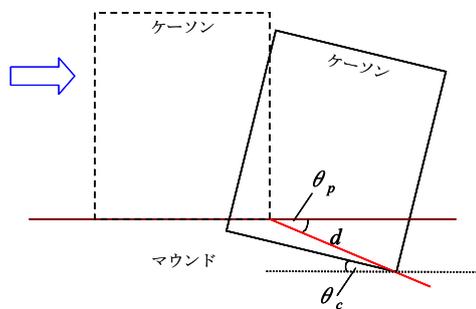


図-19 水理模型実験によるケーソンの変位の概念図

5.1 貫入角の推定

貫入角を簡易に推定する式を構築すべく、全 Case において貫入角を目的変数とした重回帰分析を実施した。説明変数は、これまでの検討結果を踏まえ、マウンド仕様(港内側肩幅・天端幅・高さ・水中単位体積重量)、外力条件(水平波力・有効鉛直荷重・港内側端し圧・偏心率)、ケーソン条件(幅・高さ・重量)、その他(説明変数候補の組合せなど、例えば偏心傾斜荷重)など様々な条件の中から、多重共線性に注意し決定係数・t 値を参考に適切と考えられるものを試行錯誤で抽出した。

分析の結果、得られた推定式が次式である。

$$\theta_p = 8.77 \left(\frac{B_C}{B_M} \right) + 20.39 \left(\frac{H_M}{B_M} \right) + 7.52q_V - 29.03 \quad (2)$$

ここに、 θ_p ：貫入角(deg)、 B_C ：ケーソン幅(m)、 B_M ：マウンド天端幅(m)、 H_M ：マウンド高(m)、 q_V ：有効鉛直等分布荷重(kN/m²)。

表-3 に重回帰分析結果を、図-20 に貫入角の推定値と実験値の関係を示す。決定係数 R^2 は 0.703 と比較的高く、設定した変数で貫入角を概ね良く評価できている。結果を細かくみると、貫入角への影響度が大きい変数は、 t 値から、 $q_V > H_M/B_M > B_C/B_M$ の順だと分かる。 B_C/B_M の影響度が特に小さいが、港内側肩幅の広さを表す変数の中ではこれが適当であった。ちなみに、 B_C/B_M の代わりに港内側肩幅のみで分析を行い、 t 値を算出すると 0.26 であり、より影響度が低くなる。

提案した推定式は 4.2 で考察した変形特性を捉えており、ケーソン幅が広く重量が大きい場合、マウンドが厚く肩幅が狭い場合に貫入角が大きくなることを示している。この式に波力に関する変数が入っていないのは、実験の範囲では波力の貫入角への影響を詳細に議論することは困難であるためである。ただし、本研究で対象としている変形初期段階の貫入角は、ケーソンが動き出してすぐの僅かな変形で決まっているので(図-4,7)、波力が貫入角に与える影響は小さく、むしろ波力は貫入量に影響を与えられられる。

表-3 貫入角推定の重回帰分析結果

回帰統計			係数	標準誤差	t
重相関 R	0.839	切片	-29.03	7.67	-3.79
重決定 R^2	0.703	B_C/B_M	8.77	14.21	0.62
標準誤差	2.89	H_M/B_M	20.39	6.16	3.31
観測数	22	q_V	7.52	1.55	4.84

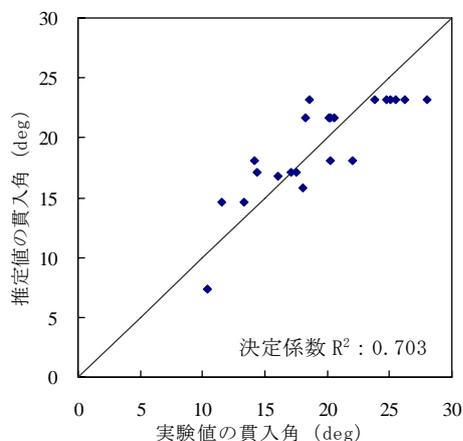


図-20 貫入角の推定値と実験値の関係

5.2 見かけの摩擦係数の推定

図-16 の見かけの摩擦係数と貫入角の関係図より、負の相関がみられるので、まずは、直線回帰分析で貫入角から見かけの摩擦係数を推定する式を作成してみたが、決定係数 R^2 が 0.391 と適合性が低かった。そこで、貫入角と同様に、全 Case において見かけの摩擦係数を目的変数とした重回帰分析を実施した。

分析の結果、得られた推定式が次式である。

$$\mu' = -0.580 \left(\frac{B_C}{B_M} \right) + 0.219 \left(\frac{H_M}{B_M} \right) + 0.578 \left(\frac{P_H}{P_V} \right) + 0.432 \quad (3)$$

ここに、 μ' ：見かけの摩擦係数、 B_C ：ケーソン幅(m)、 B_M ：マウンド天端幅(m)、 H_M ：マウンド高(m)、 P_H ：水平波力(N/m)、 P_V ：有効鉛直荷重(N/m)。

表-4 に重回帰分析結果を、図-21 に見かけの摩擦係数の推定値と実験値の関係を示す。決定係数 R^2 は 0.962 と高く、設定した変数で見かけの摩擦係数を良く評価できている。見かけの摩擦係数への影響度が大きい変数は、 t 値から、 $P_H/P_V > B_C/B_M > H_M/B_M$ の順である。

提案した推定式は 4.3 で考察した見かけの摩擦係数の特性を捉えており、肩幅が狭い時やマウンドが低い時、ケーソン重量が大きい時のようにマウンドが変形しやすい条件の時に見かけの摩擦係数が小さくなることを示している。

表-4 見かけの摩擦係数推定の重回帰分析結果

回帰統計			係数	標準誤差	t
重相関 R	0.981	切片	0.432	0.067	6.425
重決定 R^2	0.962	B_C/B_M	-0.580	0.106	-5.472
標準誤差	0.956	H_M/B_M	0.219	0.045	4.832
観測数	22	P_H/P_V	0.578	0.040	14.367

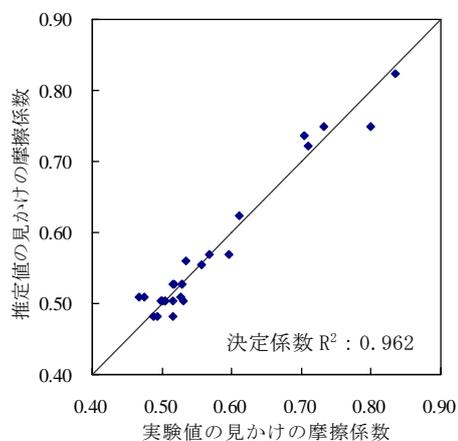


図-21 見かけの摩擦係数の推定値と実験値の関係

5.3 ケーソン回転角の推定

ケーソン回転角は、波の作用を受け港内側端しがマウンド内に貫入するにつれ大きくなる様子が図-4 から窺える。そこで、横軸に貫入量を縦軸にケーソン回転角をとり実験データを整理した。その結果が図-22 である。データは全 Case の5~10波を対象に各波での回転角最大時の値を使用している。先に述べた通り正の相関がみられ、直線回帰分析で得られた推定式が次式である。

$$\theta_c = 0.55d + 0.28 \quad (4)$$

ここに、 θ_c : ケーソン回転角 (deg), d : ケーソン港内側端し貫入量 (cm)。

決定係数 R^2 は 0.650 と比較的高く、港内側端しの貫入量でケーソン回転角を概ね良く評価できている。

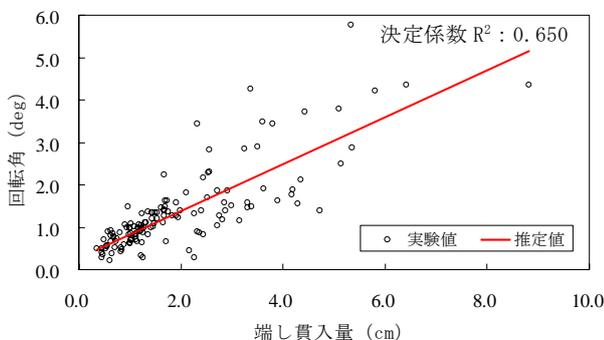


図-22 ケーソン回転角と港内側端し貫入量の関係

5.4 推定値と実験値のケーソン変位量比較

作成した推定式を使い、水理模型実験によるケーソンの変位量を推定した。その手順は以下の通りである。

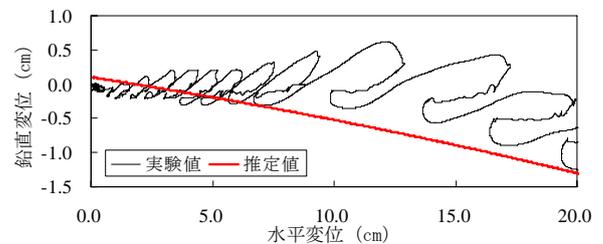
- ① マウンド仕様・ケーソン規格・外力条件より、貫入角と見かけの摩擦係数を推定する (式(2)(3)を使用)。
- ② 推定した見かけの摩擦係数を滑動量算定式に代入し波浪による滑動量 (港内側端しの貫入量) を計算する (式(1)を使用)。水平波力は合田式による計算値を sin 波で代入。
- ③ 港内側端しの貫入量と貫入角から、港内側端しの位置を算出する。
- ④ 港内側端しの貫入量からケーソン回転角を算出する (式(4)を使用)。
- ⑤ 港内側端しを中心にケーソンが回転するとし、ケーソン中心位置を算出する。

変位量推定結果の例として基本①の結果を図-23 に示す。他 Case の変位量推定結果は付録-C に添付する。

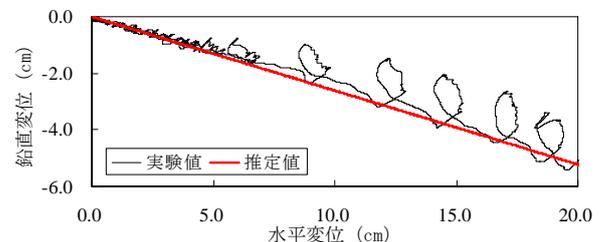
ケーソン中心変位履歴・港内側端し変位履歴・ケーソン回転角時刻歴は実験結果を概ね再現できているといえ

るが貫入量は実験値との差が大きい。これは、変位量の小さい範囲については、見かけの摩擦係数を港内側端し貫入量 1.5~10cm 間の平均値としているためである。0~1.5cm 間では摩擦係数が増加している段階であり、1.5~10cm 間は一定となりつつある段階である。よって、0~1.5cm 間では摩擦係数が本来より大きく設定されてしまうため変位を表現できない。変位量の大きい範囲については、引き波時の変位量の差が原因と考えられる。推定値は引き波波力が摩擦抵抗力を上回らないので変位しないが、実験値は元に戻る変位がみられ、この差が蓄積されて推定値と実験値のずれが大きくなっている。対象としている港内側端し貫入量 1.5~10cm 間では、実験結果を概ね再現できているといえる。

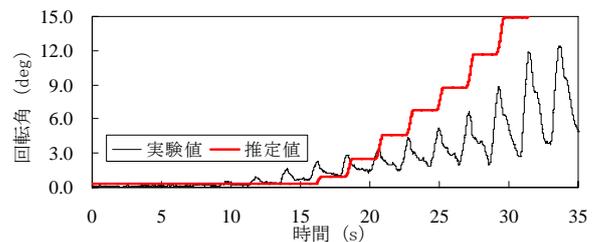
以上より、提案した手法で水理模型実験によるケーソンの変位量を諸条件から概ね推定できた。



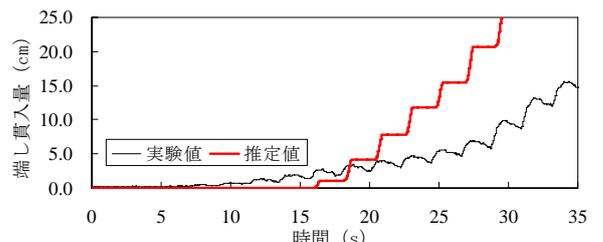
(a) ケーソン中心変位履歴



(b) 港内側端し変位履歴



(c) ケーソン回転角時刻歴



(d) 港内側端し貫入量時刻歴

図-23 推定値と実験値のケーソン変位量比較 [基本①]

6. 結論

本研究では、宮田ら(2009, 2010)の水理模型実験の結果を入手し、そのデータを詳細に検討することによって、変形初期段階におけるケーソン式混成堤の水理模型実験による変形特性を議論した。水理模型実験は水槽の上にマウンドを直接構築しており原地盤は再現していないため、その点について注意が必要である。本研究により得られた知見をまとめると以下の通りである。

① ケーソン中心は楕円上の回転を伴いながら変位する。これは、ケーソン式混成堤の変形はケーソンがマウンドの上を単に水平方向に滑動するのではなく、マウンドへ貫入を繰り返しながら変形していることを意味する。また、ケーソン港内側端しは変形初期段階からマウンドへ直線状に貫入する。

② マウンドの肩幅を広げたり、マウンドを構成する捨石の粒径を大きくすることでケーソン水平変位量は減少する。これは、水平力と摩擦抵抗力のバランスでケーソンがマウンドの上を水平方向に滑動するという枠組みからは説明できない。マウンドへの港内側端しの貫入による変形という観点から説明可能であり、マウンドの仕様、換言するとマウンドの支持力特性が水平変位量に密接に関係している。マウンドを強固にすることにより貫入角は減少し、同じ波数作用時の変位量も減少する。

③ マウンド仕様の違いによる見かけの摩擦係数の関係を整理した。マウンド仕様の違いにより 10% 以上の見かけの摩擦係数の差がある。

④ 自重による鉛直方向の沈下の影響が支配的であれば貫入角が大きくなる。貫入角は必ずしも水平波力の値や滑動安定性(=摩擦係数×有効鉛直荷重/水平波力)だけで決まらない。

⑤ 波浪の作用により港内側端しがマウンド内に貫入することで港内側端し前面の捨石の受働抵抗が期待されるが、変形初期段階においてその抵抗力は小さい。これより、受働抵抗力はマウンド仕様の違いによるケーソン変位量の差にあまり影響しないと考えられる。

⑥ 貫入角・見かけの摩擦係数(貫入量)・ケーソン回転角を諸条件から推定できる式を作成し水理模型実験によるケーソンの変位量を推定した。実験を概ね再現することができ推定手法の有効性は確認できたが、推定式は宮田ら(2009, 2010)の水理模型実験結果をもとに作成したものであり、一般の設計への適用を念頭に置いたものではない。

(2011年11月15日受付)

謝辞

最後に、本研究でデータを使用した宮田ら(2009, 2010)の水理模型実験について、五洋建設株式会社の吉田誠氏・安野浩一朗氏に多大なるご教示を賜りました。心より感謝申し上げます。

参考文献

- 下迫健一郎・高橋重雄(1998)：期待滑動量を用いた混成防波堤直立部の信頼性設計法，港湾技術研究所報告，第 37 巻第 3 号，pp. 3-30.
- 長尾毅・吉岡健(2008)：防波堤の支持力照査法に関する実験的研究，国土技術政策総合研究所資料，No. 453，pp. 1-19.
- 宮田正史・菅野高弘・長尾毅・菊池信夫(2002)：捨石マウンドの支持機構を考慮したケーソン底版設計法の開発への取り組み，土と基礎，Vol. 50, No. 4, pp. 19-21.
- 宮田正史・吉田誠・安野浩一朗・三好俊康・三藤正明・熊谷健蔵(2009)：偶発波浪荷重を受けるケーソン式防波堤の大変形メカニズムに関する実験的研究，土木学会論文集 B2 (海岸工学)，Vol. B2-65, No. 1, pp. 886-890.
- 宮田正史・吉田誠・安野浩一朗(2010)：ケーソン式防波堤の大変形メカニズムに関する実験的研究，国土技術政策総合研究所資料，No. 564, pp. 1-28.

付録-A 貫入角算定結果

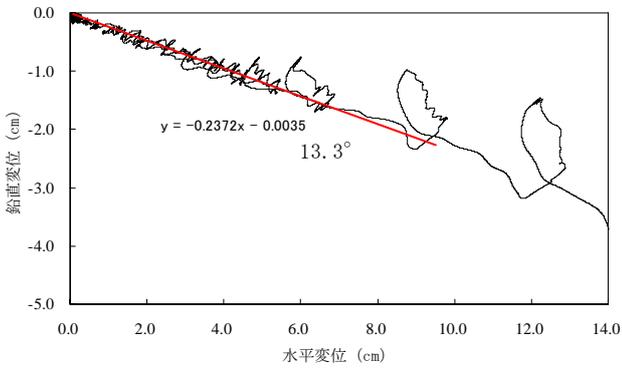


図-A.1 Case-1 基本①_1の港内側端し変位履歴

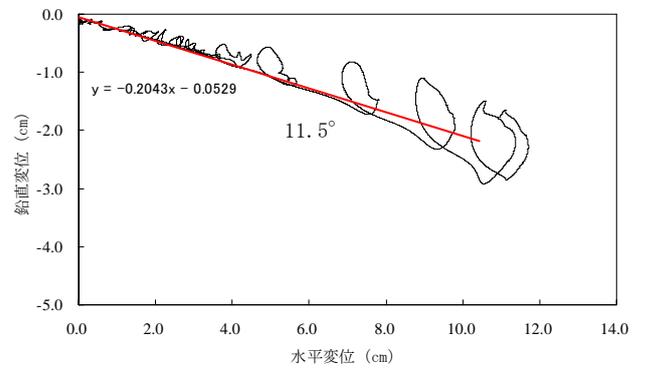


図-A.2 Case-1 基本①_2の港内側端し変位履歴

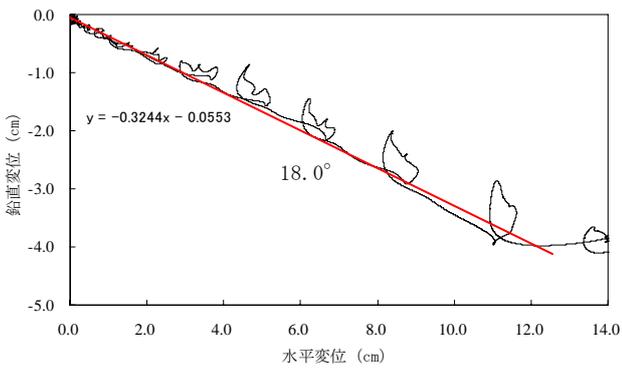


図-A.3 Case-2 肩幅狭の港内側端し変位履歴

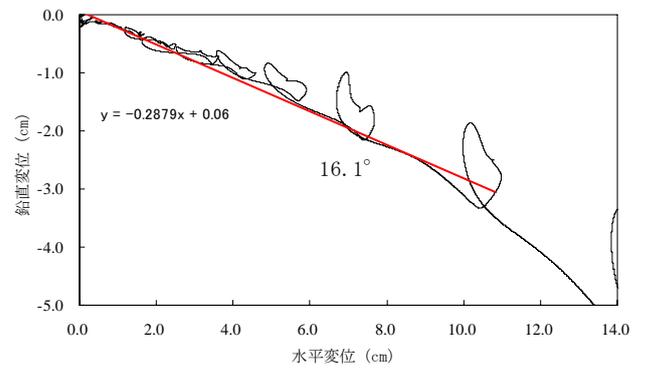


図-A.4 Case-3 肩幅極狭の港内側端し変位履歴

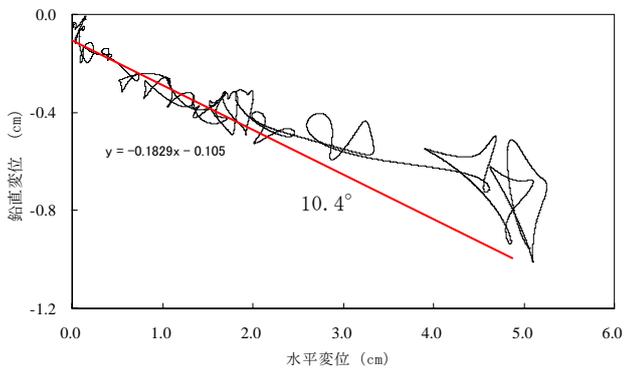


図-A.5 Case-4 肩幅広①の港内側端し変位履歴

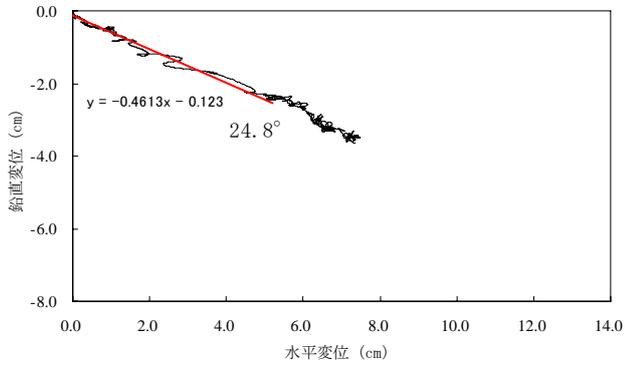


図-A.6 Case-5 基本②_1 の港内側端し変位履歴

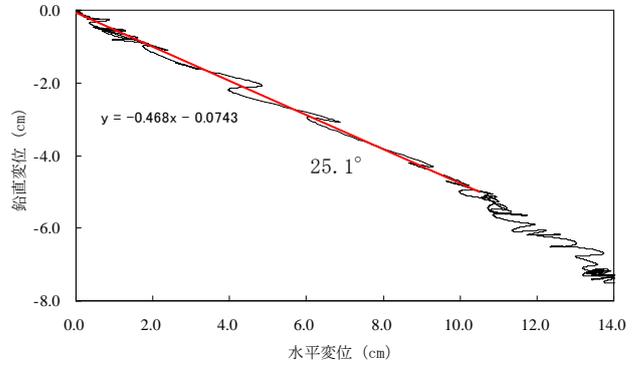


図-A.7 Case-5 基本②_2 の港内側端し変位履歴

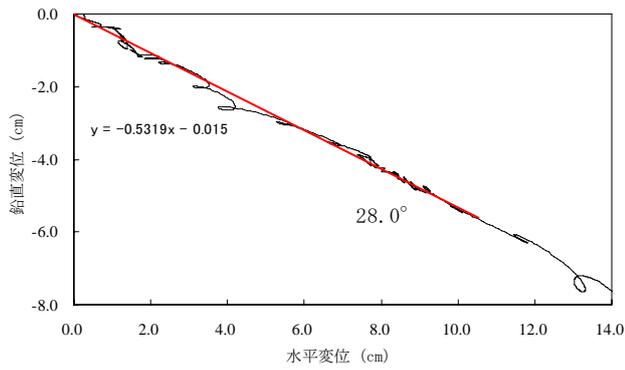


図-A.8 Case-5 基本②_3 の港内側端し変位履歴

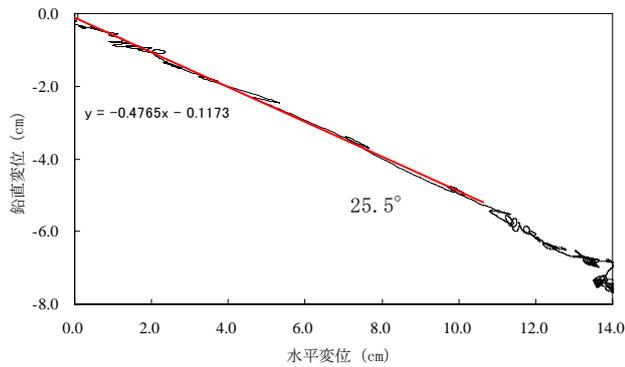


図-A.9 Case-6 基本③_1 の港内側端し変位履歴

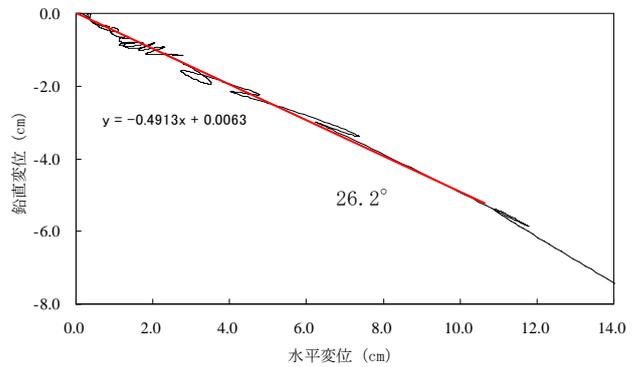


図-A.10 Case-6 基本③_2 の港内側端し変位履歴

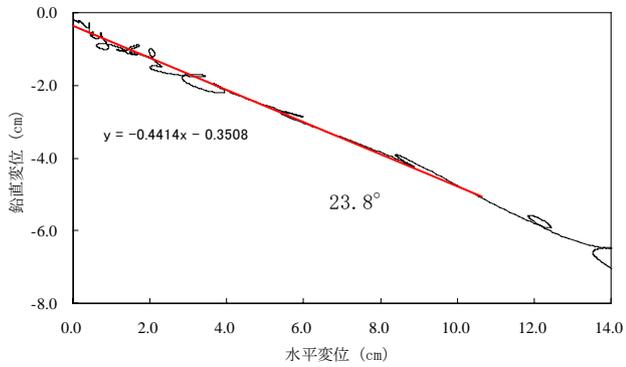


図-A.11 Case-6 基本③_3 の港内側端し変位履歴

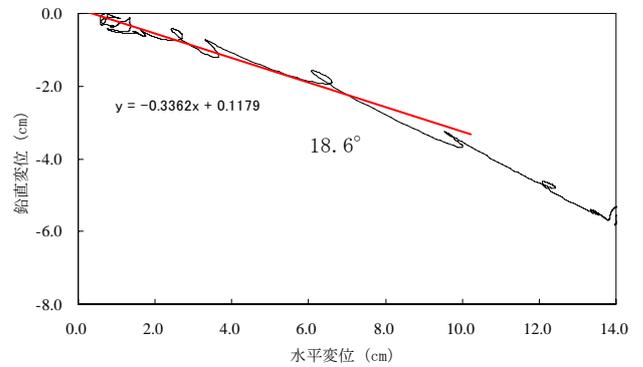


図-A.12 Case-6 基本③_4 の港内側端し変位履歴

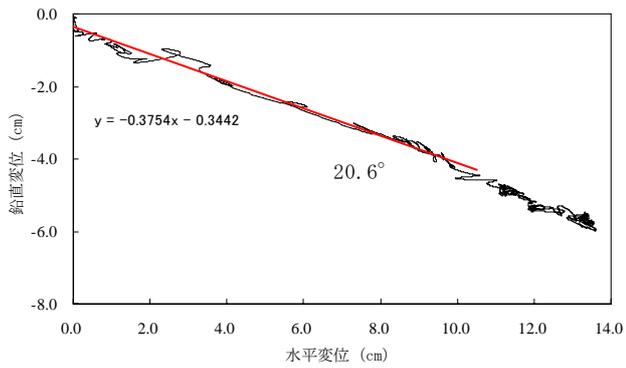


図-A.13 Case-7 肩幅広②_1 の港内側端し変位履歴

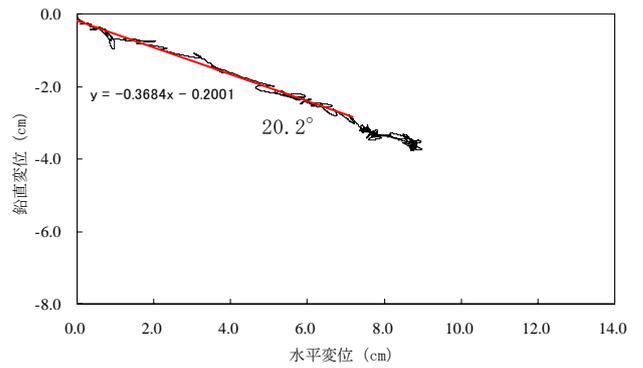


図-A.14 Case-7 肩幅広②_2 の港内側端し変位履歴

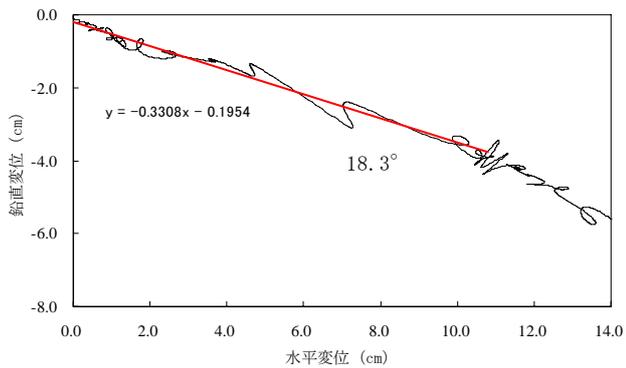


図-A.15 Case-7 肩幅広②_3 の港内側端し変位履歴

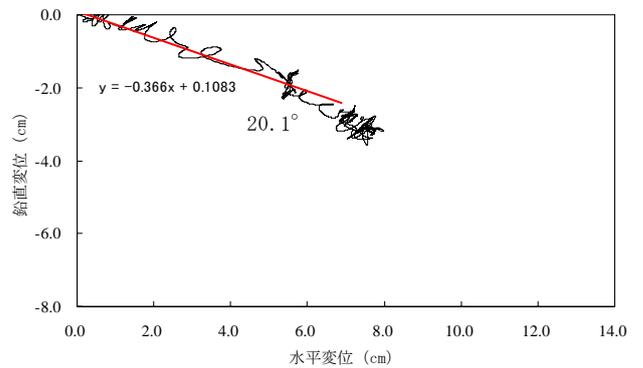


図-A.16 Case-7 肩幅広②_4 の港内側端し変位履歴

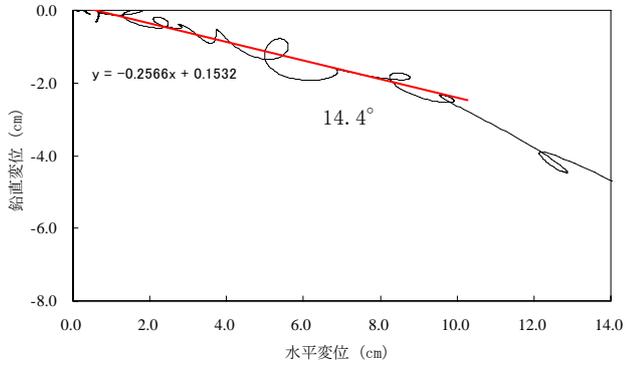


図-A.17 Case-8 肩幅広②マウンド低_1 の港内側端し変位履歴

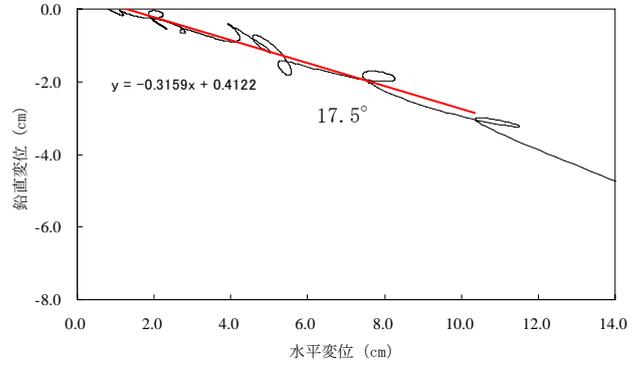


図-A.18 Case-8 肩幅広②マウンド低_2 の港内側端し変位履歴

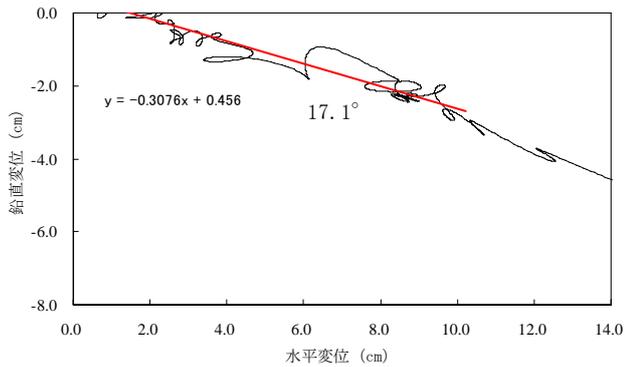


図-A.19 Case-8 肩幅広②マウンド低_3 の港内側端し変位履歴

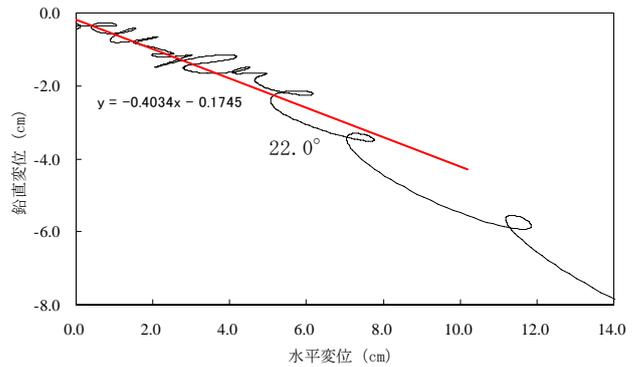


図-A.20 Case-9 マウンド低_1 の港内側端し変位履歴

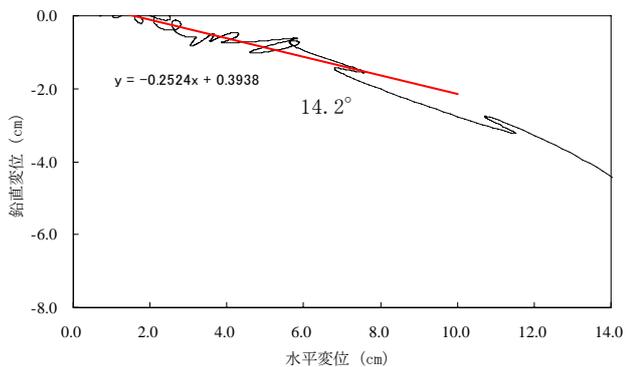


図-A.21 Case-9 マウンド低_2 の港内側端し変位履歴

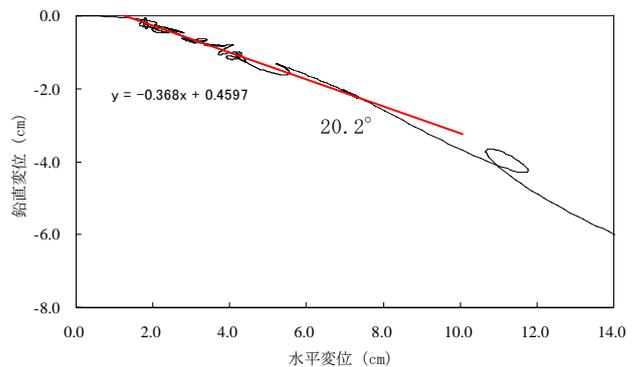


図-A.22 Case-9 マウンド低_3 の港内側端し変位履歴

付録-B 見かけの摩擦係数算定結果

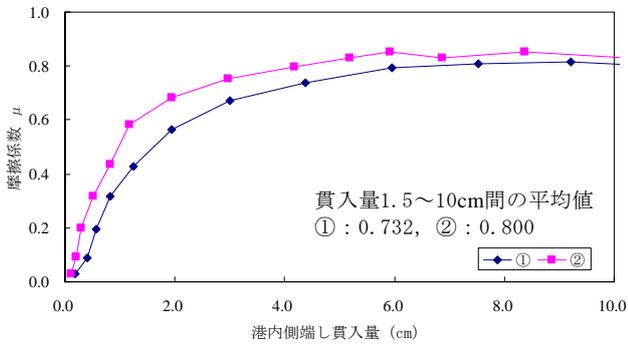


図-B.1 Case-1 基本①の見かけの摩擦係数

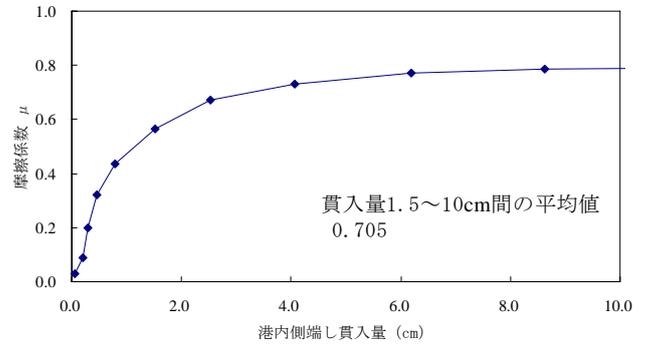


図-B.2 Case-2 肩幅狭の見かけの摩擦係数

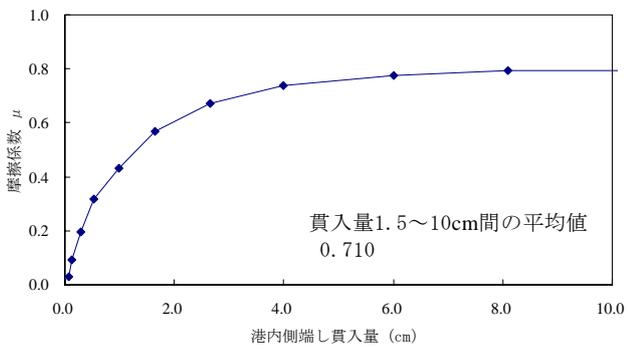


図-B.3 Case-3 肩幅極狭の見かけの摩擦係数

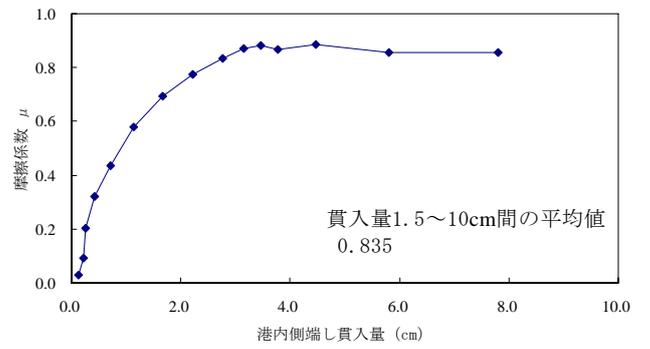


図-B.4 Case-4 肩幅広①の見かけの摩擦係数

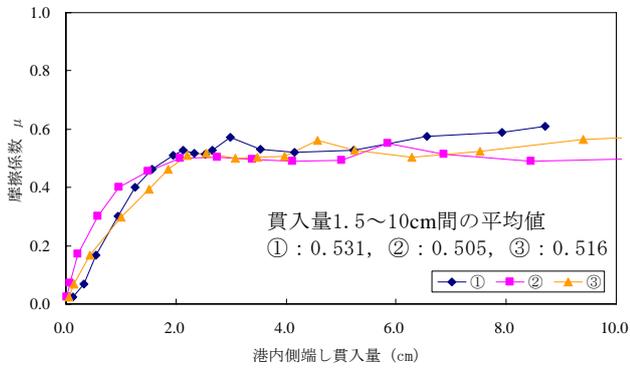


図-B.5 Case-5 基本②の見かけの摩擦係数

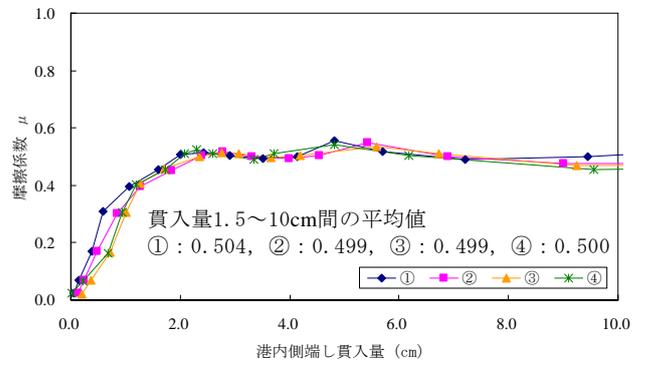


図-B.6 Case-6 基本③の見かけの摩擦係数

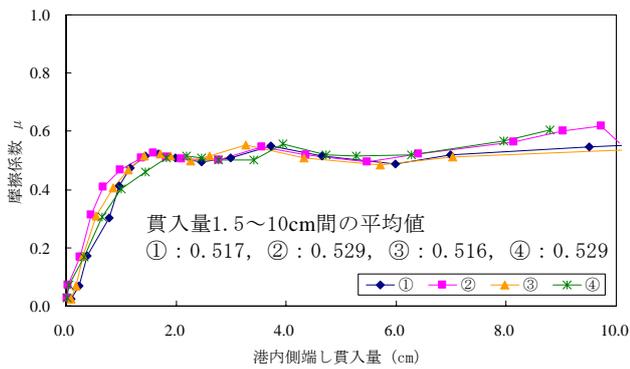


図-B.7 Case-7 肩幅広②の見かけの摩擦係数

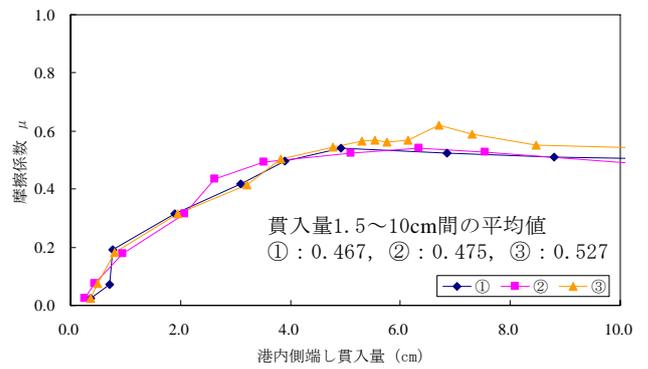


図-B.8 Case-8 肩幅広②マウンド低の見かけの摩擦係数

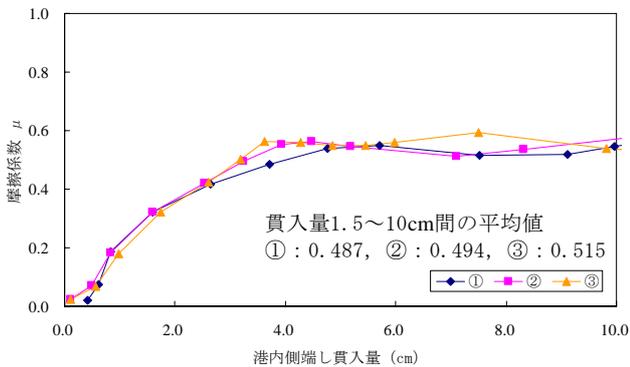


図-B.9 Case-9 マウンド低の見かけの摩擦係数

付録-C 推定値と実験値のケーソン変位置比較

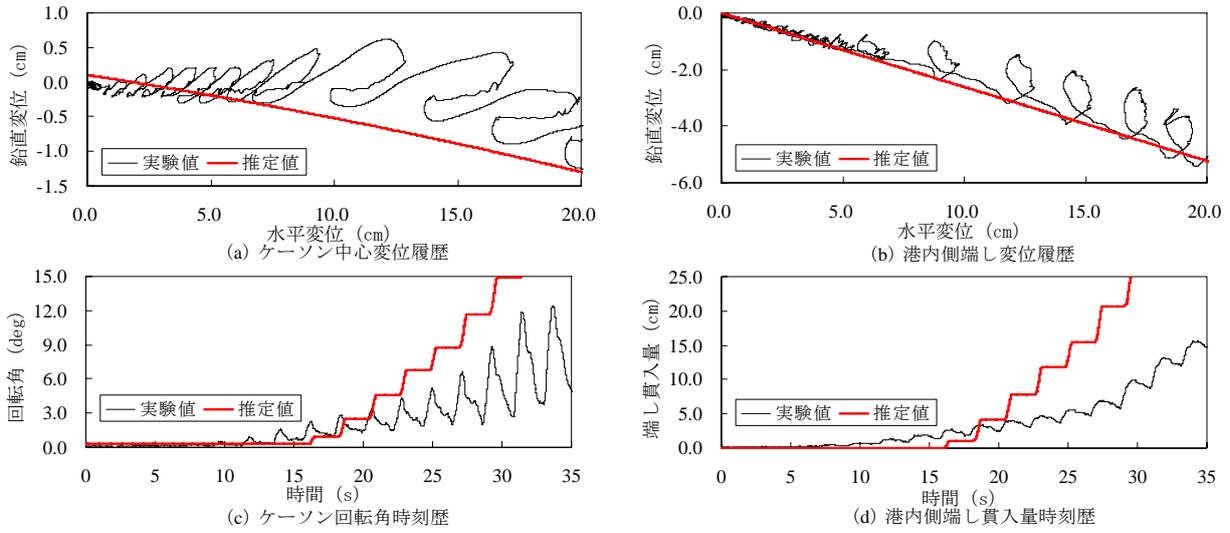


図-C.1 Case-1 基本①のケーソン変位置比較

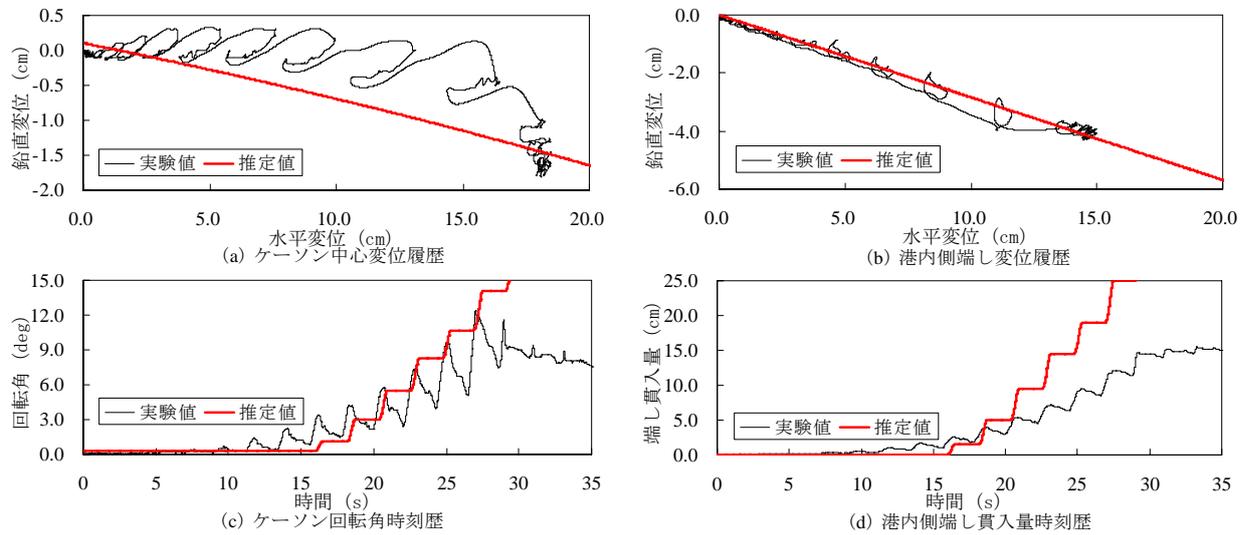


図-C.2 Case-2 肩幅狭のケーソン変位置比較

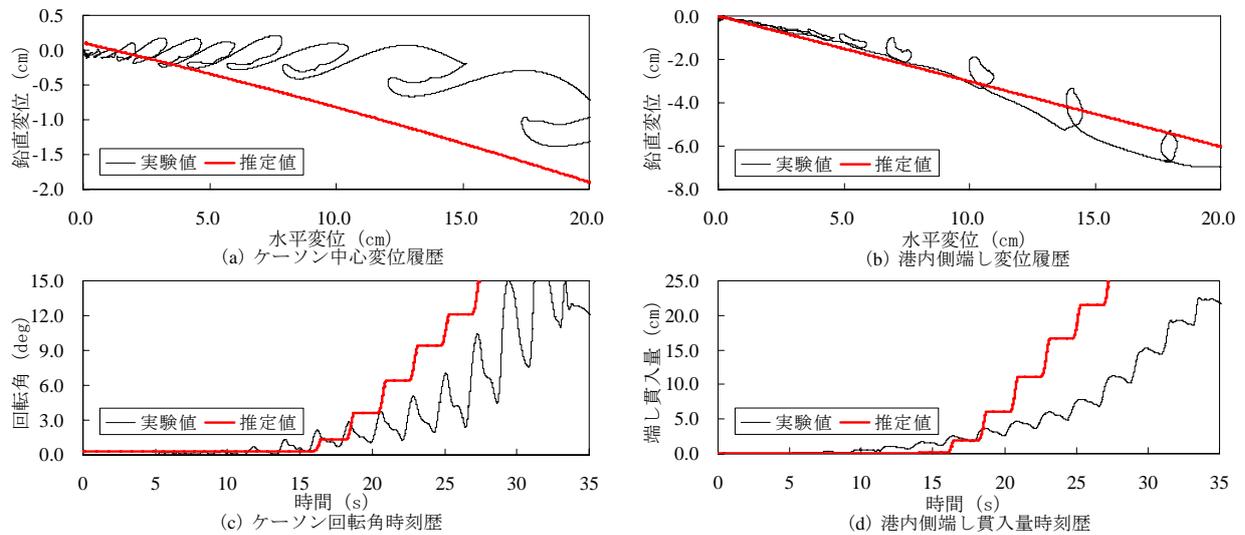


図-C.3 Case-3 肩幅極狭のケーソン変位置比較

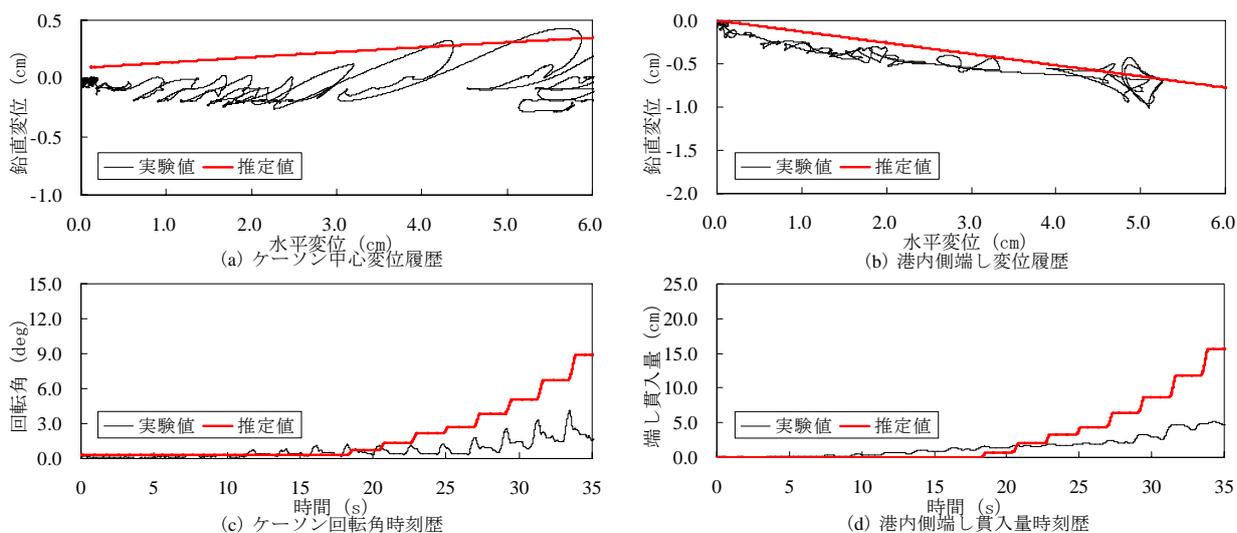


図-C.4 Case-4 肩幅広①のケーソン変位量比較

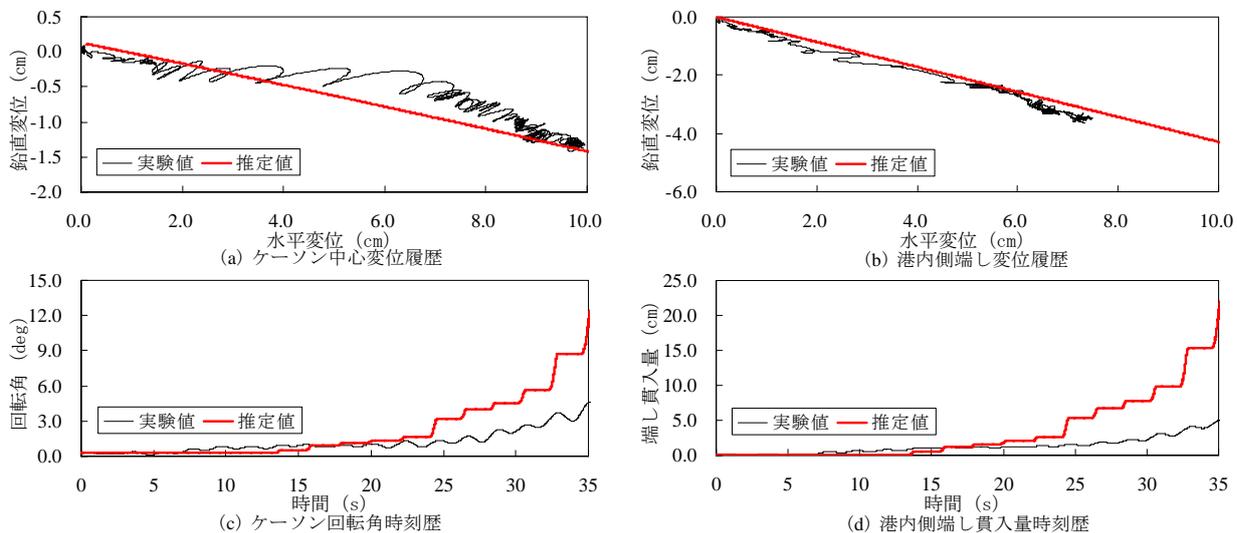


図-C.5 Case-5 基本②のケーソン変位量比較

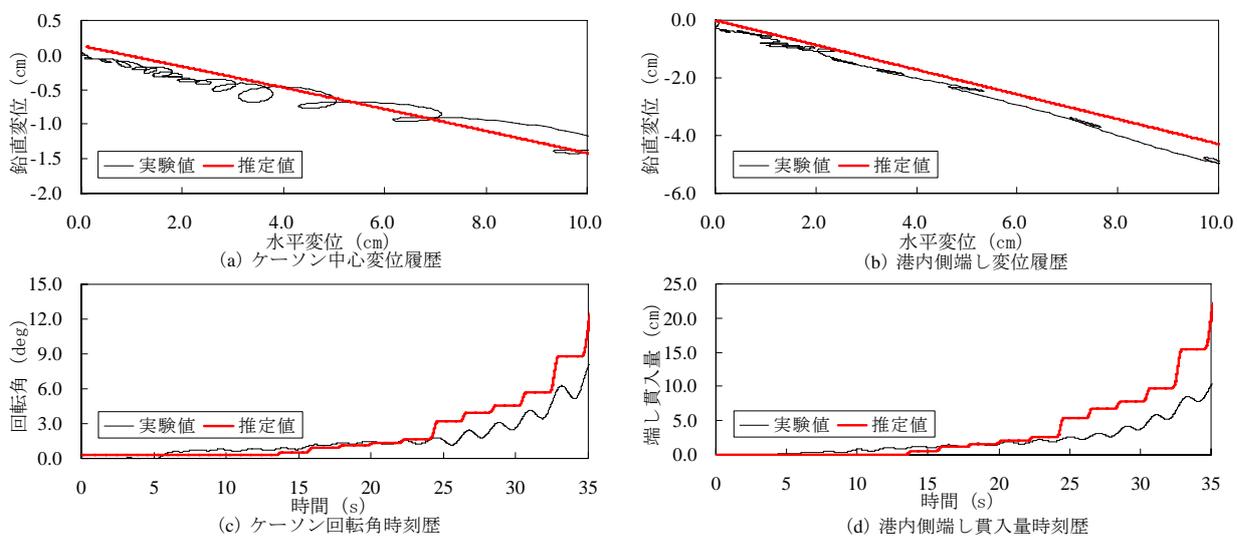


図-C.6 Case-6 基本③のケーソン変位量比較

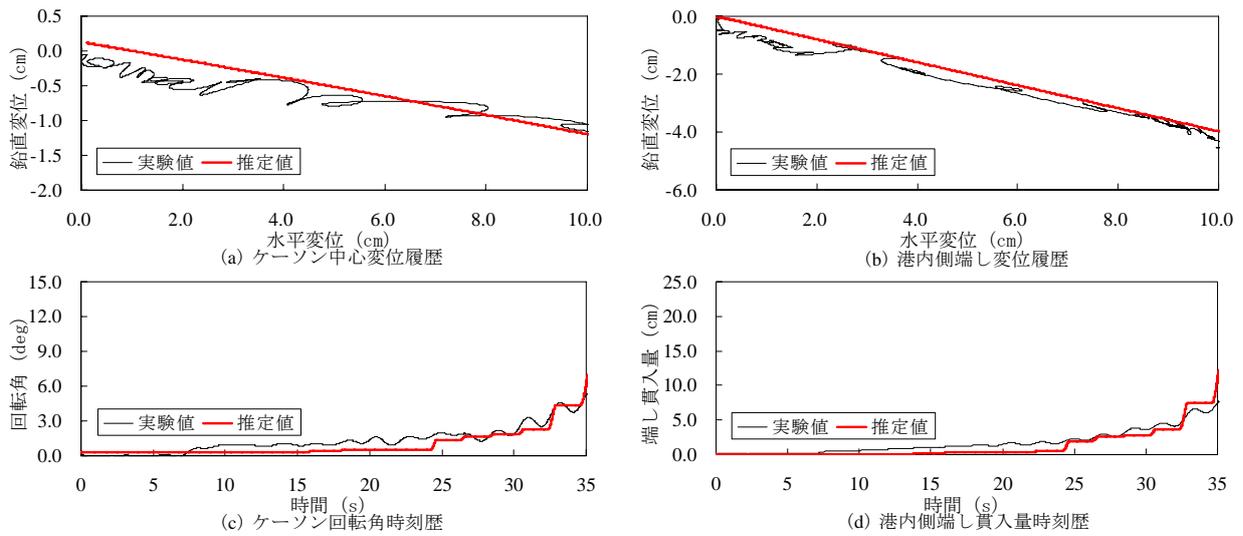


図-C.7 Case-7 肩幅広②のケーソン変位量比較

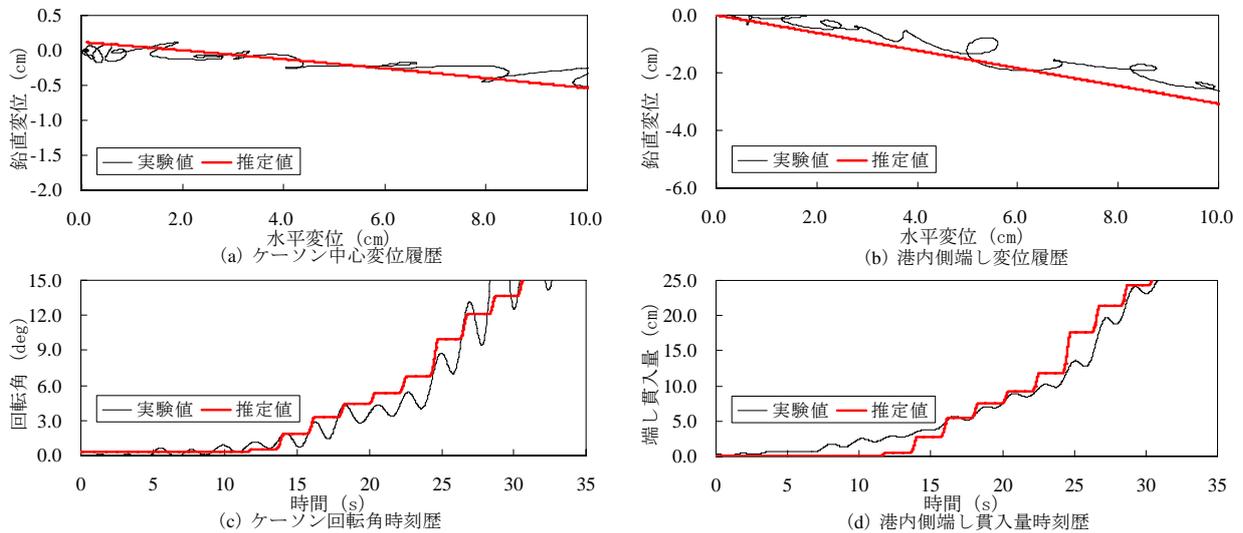


図-C.8 Case-8 肩幅広②基礎低のケーソン変位量比較

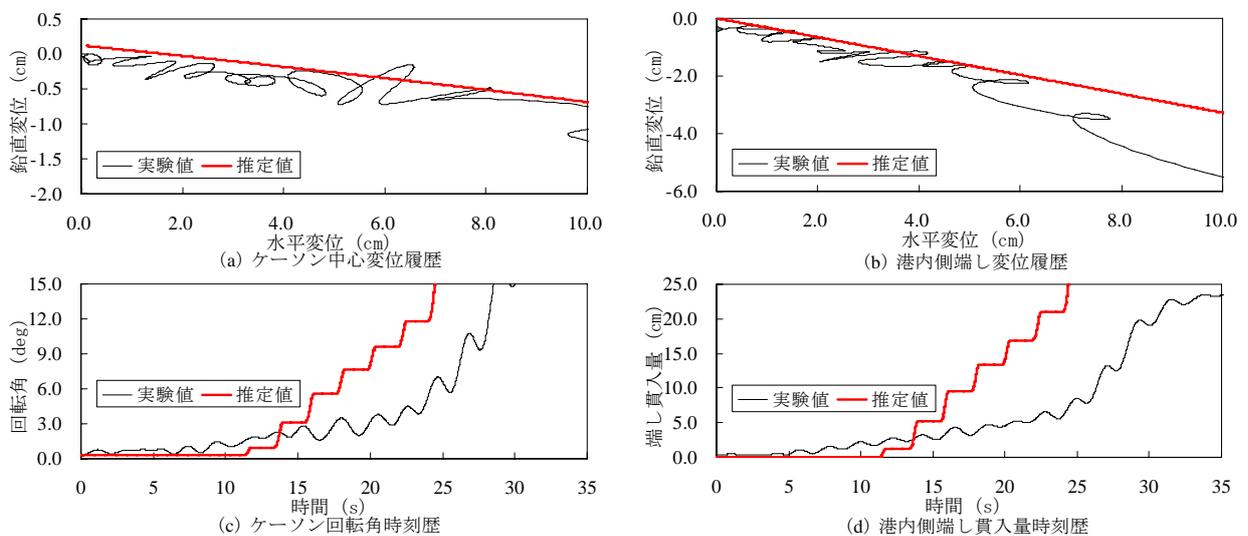


図-C.9 Case-9 基礎低のケーソン変位量比較

国土技術政策総合研究所資料

TECHNICAL NOTE of NILIM

No. 659 December 2011

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