

国土技術政策総合研究所資料

TECHNICAL NOTE of
National Institute for Land and Infrastructure Management

No.1346

March 2026

気候変動に伴う作用条件の変化に対する既存防波堤の
改良に関する意思決定問題における応答曲面法の適用

宮島正悟・竹信正寛・三上康光・宮田正史

Application of Response Surface Method for Decision-Making Issues Concerning
Improvement of Existing Breakwaters under Uncertainty of Loading Conditions
Due to Climate Change

MIYAJIMA Shogo, TAKENOBU Masahiro, MIKAMI Yasumitsu, MIYATA Masafumi

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

気候変動に伴う作用条件の変化に対する既存防波堤の 改良に関する意思決定問題における応答曲面法の適用

宮島正悟*・竹信正寛**・三上康光***・宮田正史****

要 旨

気候変動に伴って、既存防波堤では作用条件が変化することにより損傷の危険度が増加する可能性が高まる。将来的に作用条件が変化する場合、構造物の安定性等の性能評価のために、幅のある作用条件に対する防波堤の安定性照査を実施する必要があり、その作業負荷は著しく増大する。本研究では、将来的な作用条件の変化量の想定の不確実性に対して、既存防波堤を対象に、作用条件の変化に伴う性能評価や補強対策の効果の検討を効率的に行うための、応答曲面法を用いた実務的な評価手法を提案した。併せて、提案手法の活用事例として、簡便なリアルオプション分析を適用し、補強対策の効果の検討と実施時期に関する意思決定に活用できる可能性を示した。

これらの結果は、港湾施設の長期的な維持管理を実施する上で、気候変動に伴う作用条件の変化への対策を検討する際の資料となるものである。

キーワード：港湾施設，防波堤（重力式），作用耐力比，応答曲面，リアルオプション分析

*副所長（京都大学経営管理大学院客員教授）

**港湾・沿岸海洋研究部港湾施設研究室長

***前交流研究員（現三井共同建設コンサルタント（株））

****研究総務官

〒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-46pr@gxb.mlit.go.jp

Application of Response Surface Method for Decision-Making Issues Concerning Improvement of Existing Breakwaters under Uncertainty of Loading Conditions Due to Climate Change

MIYAJIMA Shogo*
TAKENOBU Masahiro**
MIKAMI Yasumitsu***
MIYATA Masafumi****

Synopsis

Climate change increases the risk of damage to existing breakwaters due to altered loading conditions. When loading conditions change in the future, it will be necessary to assess the stability of breakwaters across a wide range of loading conditions to evaluate structural performance, but this will significantly increase the workload. Therefore, this study proposes a practical evaluation method using a response surface methodology for existing breakwaters. This method efficiently addresses the uncertainty in estimating future changes in loading conditions, enabling performance assessments and evaluations of the effectiveness of reinforcement measures in response to such changes. As an application example of the proposed method, a simplified real options analysis was applied, demonstrating its potential utility for decision-making regarding the effectiveness of reinforcement measures and the timing of their implementation in response to changing loading conditions.

These results provide valuable reference for considering countermeasures against changes in loading conditions due to climate change in long-term maintenance and management of port facilities.

Key Words: port infrastructure, breakwater (caisson type), stress-resistance ratio, response surface, real option analysis

* Deputy Director General (Adjunct Professor, Graduate School of Management, Kyoto University)
** Head of Port Facilities Division, Port, Coastal and Marine Department
*** Ex-Trainee (Mitsui Consultants Co., Ltd.)
**** Executive Director for Research Affairs
National Institute for Land and Infrastructure Management
Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism
3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan
Phone : +81-46-844-5019 Fax : +81-46-842-9265 e-mail : ysk-nil-46pr@gxb.mlit.go.jp

目 次

1. はじめに	1
2. 作用条件の変化に対する対策選定手法の提案	1
2.1 既往研究	1
2.2 提案手法の概要	2
3. 既存防波堤の安定性の応答曲面関数化	2
3.1 防波堤の設計照査における適用例	2
3.2 防波堤構造形式による作用耐力比の比較	4
3.3 応答曲面関数の作成	5
3.4 応答曲面法による補強対策効果の俯瞰的評価	5
4. 補強対策の効果及び対策優先度の評価	6
4.1 リアルオプション分析の概念	6
4.2 リアルオプション分析の概念を用いた簡便な評価	7
4.3 提案手法の優位性	11
5. まとめ	12
謝辞	12
参考文献	12
付録	14

1. はじめに

港湾は、防波堤等の外郭施設、岸壁等の係留施設、荷役機械等の荷さばき施設、航路等の水域施設から構成される複合的な施設群として機能している。港湾機能を継続的に確保するためには、これらを構成する個々の施設が、時間的・空間的な制約の下で所要の性能を長期にわたり発揮し続けることが不可欠である。

近年、気候変動の進行に伴い、将来的な平均海面水位の上昇や自然災害の激甚化が懸念されている。2021年に公表された国連の気候変動に関する政府間パネル（IPCC）の第6次評価報告書¹⁾によれば、温室効果ガスの排出削減対策が不十分な場合、2100年までに世界平均海面水位は1995～2014年平均比で0.63～1.01 m上昇すると予測されている。また、高波浪についても、長期観測結果に基づき、その発生頻度の増加傾向が指摘されている²⁾。また本多ら³⁾は、将来気候に起因する海水面温度パターンの不確実性を考慮した解析により、日本の主要港湾における将来の潮位偏差及び波高の変化を示しており、潮位偏差は100年確率で港湾ごとの平均が1～10%の増加、波高は50年確率で最大8%の増加が見込まれるとしている。これら自然条件の変化は、新設・既存を問わず港湾構造物の性能照査に影響を及ぼし、設計条件の見直しを不可避とする。

一方、多数の既存港湾施設に対して性能照査を実施することは、多大な計算負荷を伴う。特に、設計条件が将来予測として幅をもって与えられる場合、検討ケース数は膨大となり、実務上の負担は極めて大きい。加えて、国土強靱化の観点からは、設計条件の変化に対して、例えば既存防波堤の全延長区間にわたる安定性を迅速に把握したい、といった要請が高まることが想定される。このため、詳細検討に先立ち、検討対象や方向性を効率的に絞り込むための手法が求められている。

そこで本研究では、設計段階において、変動する設計条件に対する施設性能を迅速に判断可能な指標を応答曲面法⁴⁾により構築し、維持管理段階において当該指標を活用することで、補強対策の要否判断及び工法選定を効率的に行う手法を提案する。これにより、多数の施設群を対象とした安定性評価の実務的な効率化を図る。

さらに、気候変動は本質的に不確実性を伴うものであり、将来の作用条件に幅がある状況下で対策実施の意思決定を迫られる場合が多い。このような状況においては、対策を即時に実施するか否かを二者択一で判断するのではなく、将来における選択肢の柔軟性を保持する「意思決定の留保」を積極的に評価する指摘もなされている⁵⁾。

従来の費用便益分析⁶⁾では、貨幣換算した便益と投入される費用の比較分析を基本とするため、実施時期の柔軟性を明示的に評価することが困難であり、不確実性の高い環境下においては限界を有する。

以上を踏まえ、本研究では、応答曲面法の活用事例として、気候変動に伴う設計条件の不確実性に対して、リアルオプション分析⁷⁾⁸⁾(Real Option Analysis, 以下、「ROA」という。)の概念を導入した簡便な意思決定手法を提示し、補強対策に関する試行的検討を行う。

なお、本資料は著者らによる既発表論文⁹⁾を基に加筆・補足したものであり、特に第4章及び付録を中心に内容の充実を図っている。

2. 作用条件の変化に対する対策選定手法の提案

2.1 既往研究

港湾施設の性能評価に関して、ライフサイクルマネジメントあるいはアセットマネジメントの観点から、多くの研究が蓄積されてきた。例えば、栈橋上部工や矢板護岸等の係留施設を対象として、劣化対策の優先順位を決定する手法の提案がなされている¹⁰⁾¹²⁾。しかし、これらの研究はいずれも設計条件を固定的に扱うことを前提としており、設計条件に幅を持たせた検討を対象とする本研究とは課題設定を異にする。

設計条件に不確実性を伴う場合に、計算負荷の低減を図る実用的手法として応答曲面法⁴⁾の活用が挙げられる。応答曲面法は、構造物の設計変数と、安定解析により得られる応答（目的変数）との関係を関数近似により表現する手法であり、この近似関数を応答曲面関数と呼ぶ。応答曲面法の適用例としては、液状化地盤上の長大水路を対象とした液状化対策の要否の検討¹³⁾や、津波解析結果に基づく断層すべりによる最大津波高さの不確実性評価¹⁴⁾などが報告されている。これらの研究は、作用や耐力の空間的なばらつきを考慮した評価手法を提示している点で有用である一方、本研究が目的とする、多様な施設を対象とし、維持管理段階において継続的に適用することを目的とした評価手法とは、適用の方向性が異なる。

不確実性の高い環境下における意思決定手法として挙げられるリアルオプション分析（ROA）については第4章で詳述するが、金融分野を中心に活発な研究が行われてきた¹⁵⁾¹⁶⁾。近年では、防災投資の便益評価や社会基盤プロジェクトの評価など、土木分野への応用に関する研究も数多く報告されている¹⁷⁾¹⁹⁾。しかし、これらの多くは概念整理や理論的枠組みの構築に主眼を置いたものであ

り、実務への直接的な適用には一定の困難を伴う。また、実務に近い研究としては、大規模プロジェクトを段階的に整備する場合における事業中断の検討²⁰⁾や、治水施設を対象として整備時期及び順序の決定手法を提案した研究²¹⁾などが挙げられる。これらの研究は、意思決定の柔軟性を考慮した評価手法として有用である一方で、本研究が対象とするような、幅のある作用条件を前提とした維持管理段階での反復的な意思決定への適用については、運用面でのさらなる工夫を要する。

以上を踏まえ、本研究では、幅を有する設計条件下において、気候変動に対する対策の要否及び工法選定に関する意思決定を行うための実務的手法として、応答曲面法の適用方法を提案するとともに、その活用事例として、ROAの概念を導入した簡便な分析手法により、補強対策に関する試行的検討を行う点に特徴がある。

2.2 提案手法の概要

本研究では、港湾施設のうち、水域の静穏を確保する上で不可欠であり、かつ海象条件の変化の影響を直接受ける防波堤を検討対象とする。本研究の目的の一つは、既存防波堤の改良設計を念頭に、気候変動に伴い作用条件が経時的に変化し、かつその変化量に不確実性を伴う状況下で、堤体の安定性を効率的に評価し、補強対策の要否及び工法選定を合理的に行うことが可能な実務的手法を提案することにある。

現行の港湾施設の設計実務では、設計時点で得られる限られた情報に基づき、単一の設計条件を想定した性能照査が行われる。このため、維持管理段階において気候変動に起因する設計条件の見直しが生じた場合、多数の既存施設の中から補強対策の優先度を判断するには、各施設の設計情報を再整理した上で、新たに安定計算を実施する必要があり、実務上大きな負担となる。

この課題に対して本研究で提案する手法は、図-1に示すように、維持管理段階において簡易に安定性評価を行うことを可能とするため、設計段階であらかじめ評価指標を整備しておくフロントローディング型のアプローチである。具体的には、幅を有する設計条件に対して防波堤断面の安定計算を実施し、作用耐力比等の構造安定性を表す指標を算定する。次に、これらの結果を基に、安定性評価指標を目的変数とした応答曲面関数を構築する。

本研究では、安定性評価指標として港湾基準²²⁾に基づく作用耐力比を採用する。また、応答曲面関数の説明変数としては、将来的に変化が想定される設計条件として、波高、周期及び潮位を選定する。なお、波向は一定と仮定する。構築した応答曲面関数を用いることにより、説

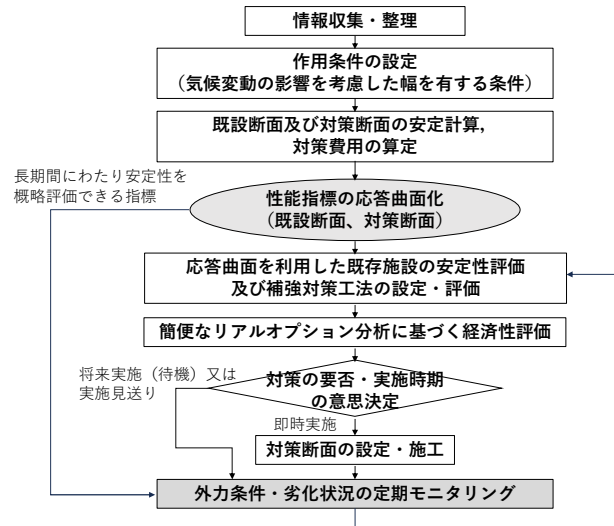


図-1 提案する全体プロセスの最適化に留意した既存防波堤の安定性評価及び意思決定手法

明変数の任意の組合せに対する作用耐力比を即座に計算することが可能となる。これにより、単一箇所における複数の設計条件間の比較や、複数地点における安定性の相対評価を視覚的に行うことができ、また第4章で述べる分析に必要となる繰り返し計算の効率化にも寄与する。本手法では、設計段階において応答曲面関数を構築するための一定の作業負荷を要するものの、維持管理段階における補強対策の要否判断や対策工法の選定を俯瞰的かつ効率的に行うことが可能となる。

3. 既存防波堤の安定性の応答曲面関数化

3.1 防波堤の安定性評価における適用例

(1) 安定性評価の対象モデル

実在する既存第一線防波堤の設計事例を参考に、構造形式の異なる2種類の防波堤断面として、ケーソン式混成堤(model-1)及び消波ブロック被覆堤(model-2)を設定した。各モデル断面の断面図及び主要諸元を図-2及び表-1に示す。これらは、同一防波堤における異なる区間の設計断面を基に設定したものであり、設計潮位、設計波高・周期及び波向きといった設計条件は共通である。

防波堤の性能照査において、作用耐力比(以下、 S/R という。)を算出する際に影響する説明変数を整理した結果、作用項(S)及び耐力項(R)に含まれる説明変数のうち、作用側に関わる主要な説明変数は、滑動及び転倒に関しては、潮位、波高及び周期の3つであることが確認された。なお周期については、微小振幅波理論に基づ

く深海波条件での波長 (L_0) と周期 (T_0) との近似関係 ($L_0 \approx 1.56 \times T_0^2$)²³⁾を用い、さらに波形勾配(波高と波長の比)が一定であると仮定することで、波高に応じて周期が一意に定まるものとした。このため、本研究では説明変数を潮位と波高の2つに集約して扱うこととした(詳細は付録A参照)。

(2) 作用耐力比の算出 (model-1)

本項では、設定したモデル断面を対象に現行の港湾基準²²⁾に基づき作用耐力比を算出する。ここでは、部分係数を考慮した S_d/R_d を用いるが、以下では簡略化のため添字 d を省略して表記する。まず、model-1 を対象に滑動、転倒及び支持力の各破壊モードについて検討を行う。

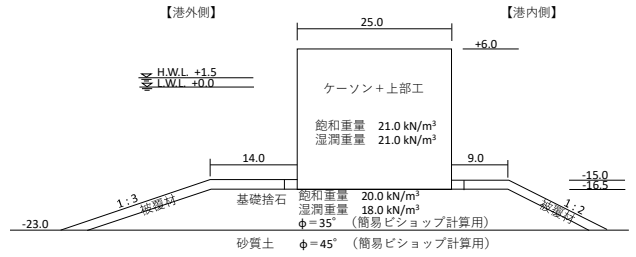
前項で抽出した潮位及び波高の2つの説明変数から作用項を算定し、地盤条件や堤体の単位体積重量等に基づき耐力項を求め、それらの比として作用耐力比 (S/R) を算出した。各説明変数の変動幅は、対象モデルの設計条件として設定された潮位及び波高(周期を含む)を基本とし、気候変動に伴うこれらの変動が S/R に及ぼす影響を評価することとした。

気候変動に伴う潮位及び波高の変化については、港湾施設の設計供用期間として一般に採用される50年間を対象とし、既往研究を踏まえて設定した。潮位の変動については、平均海面水位(MWL)が気候変動により50年間で最大84cm上昇するとの報告²⁴⁾を参考に変動幅を設定した。また波高については、50年確率波高が港湾ごとの平均で最大8%増加するとした本多らの報告³⁾や、平均気温4°C上昇シナリオ(RCP8.5)において地域によっては50年確率波高が2~9%増大するとの報告²⁵⁾がある。

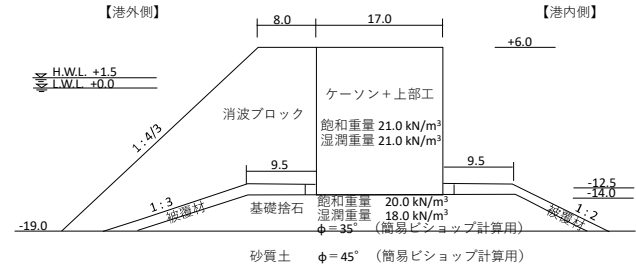
本研究では、これらに加えて、将来予測に伴う不確実性を考慮し、気候変動がより顕著に進行した場合も含めて検討を行った。その結果、対象とする2モデルの設計波高 $H_D=15.0\text{m}$ に対して最大で±9.0mの変動幅を、また潮位 $w_l=15.0\text{m}$ に対して最大±90cmの変動幅を設定した(潮位及び波高が減少する場合も含む)。なお、波高が増大した場合においても、砕波の影響は考慮しないものとした。

ここで、潮位及び波高の正負方向の変動幅によって囲まれる領域を応答曲面の適用範囲(内挿領域)と定義する(図-3)。本研究では、この内挿領域内において、潮位及び波高と作用耐力比 S/R との関係を後述する2次多項式による曲面で近似できると仮定する。

model-1 における滑動と転倒の各破壊モードについて、潮位及び波高に対する S/R の分布を三次元的に整理した結果を図-4に示す。ここで、 $S/R \geq 1.0$ は、滑動や転倒の



(a) model-1 (ケーソン式混成堤)



(b) model-2 (消波ブロック被覆堤)

図-2 対象モデル断面図

表-1 対象モデルの主要諸元

断面モデル	model-1	model-2
構造形式	ケーソン式 混成堤	消波ブロック 被覆堤
前面水深	DL-23.0 m	DL-19.0 m
堤体幅	25.0 m	17.0 m
堤体天端高	DL+6.0 m	DL+6.0 m
消波工天端高	-	DL+6.0 m
斜面幅	-	-
斜面境界高	-	-
マウンド天端高	DL-16.5 m	DL-14.0 m
単位体積重量 (上部工)	21.0 kN/m ³	21.0 kN/m ³
単位体積重量 (ケーソン+中詰)	21.0 kN/m ³	21.0 kN/m ³
堤体とマウンドとの摩擦係数	0.6	0.6
潮位 w_l	DL+1.5 m	DL+1.5 m
有義波高 $H_{1/3}$	8.33 m	8.33 m
設計波高 H_D ($=1.8 H_{1/3}$)	15.0 m	15.0 m
周期 T	13.2 s	13.2 s

発生可能性が高い状態を示している。

model-1 における説明変数の変化が、滑動、転倒及び支持力の各破壊モードの S/R に及ぼす影響を整理した結果を図-5に示す。なお、支持力の計算には簡易ビショッフ法を用いた。図より、いずれの破壊モードにおいても、波高 H_D の増加に伴い S/R が増加する傾向が確認された。当初設計条件 ($H_D=15.0\text{m}$, $w_l=1.50\text{m}$) において滑動破壊モードの場合に $S/R \approx 1$ であり、滑動破壊モードで断面が決定されていることが分かる。また、滑動破壊モードに

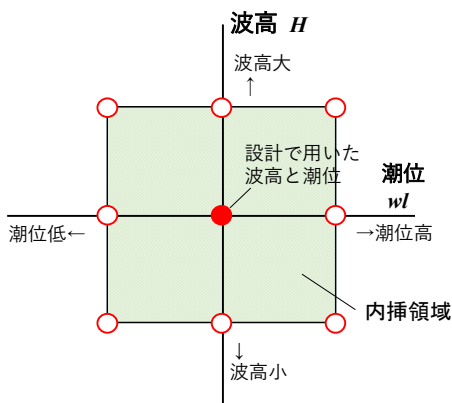
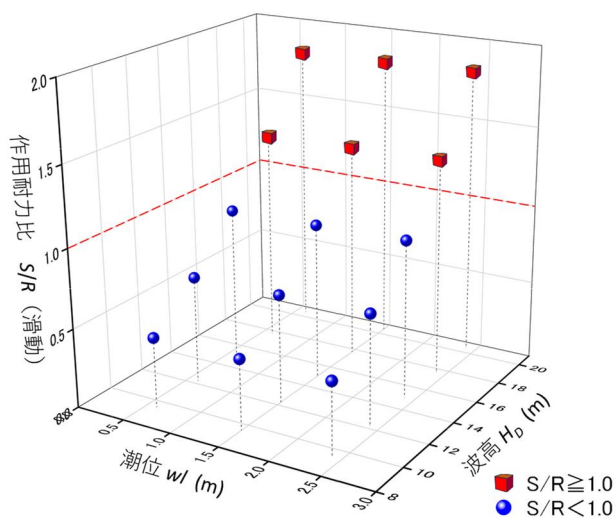
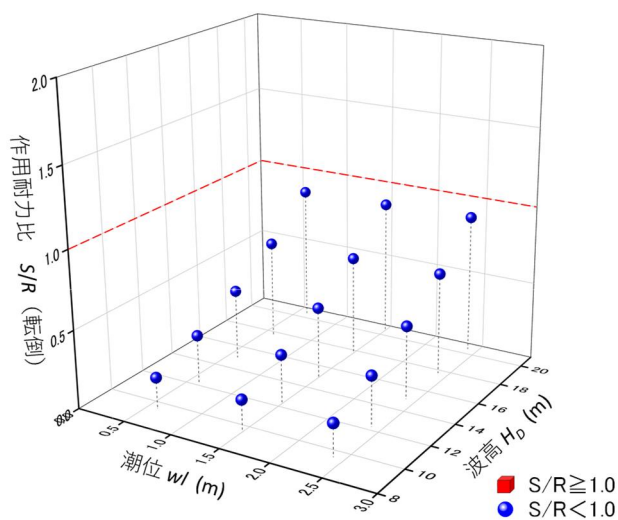


図-3 応答曲面の適用範囲



(a) 滑動破壊モード



(b) 転倒破壊モード

図-4 潮位と波高の条件変化に伴う作用耐力比の変化 (model-1)

おいては、最も波高が減少する場合 ($H_D=9.5\text{m}$) を除き、作用条件の大部分において他の破壊モードに比べて大きな S/R を示しており、本研究における設定範囲においては、気候変動の進展により波高が増大しても、支配的な破壊モードが変わらないことが読みとれる。

一方、潮位 wl の変化による影響は限定的であり、潮位を複数段階に変化させても S/R の顕著な変化は認められなかった。これは、本モデルにおいては、合田波圧算定式²³⁾に基づく作用項及び耐力項の双方が潮位低下に伴って同様に変動し、その影響が相殺されたためと考えられる。

3.2 防波堤構造形式による作用耐力比の比較

model-2 についても前節と同様に各破壊モードに対する S/R を算出し、model-1 の結果と併せて図-6 に示す。こ

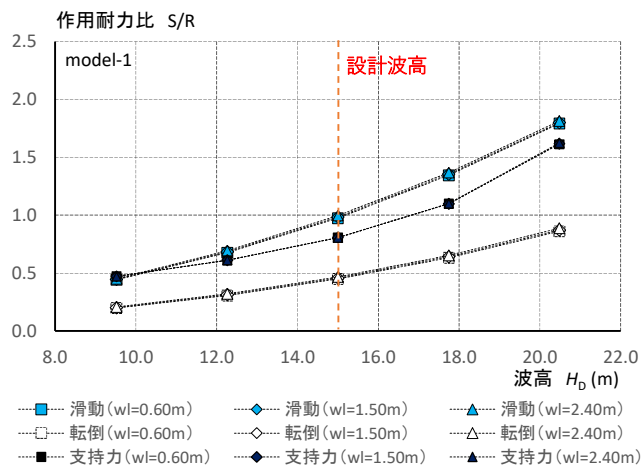


図-5 作用条件の変化に伴う防波堤の3つの破壊モードに対する作用耐力比の比較 (model-1)

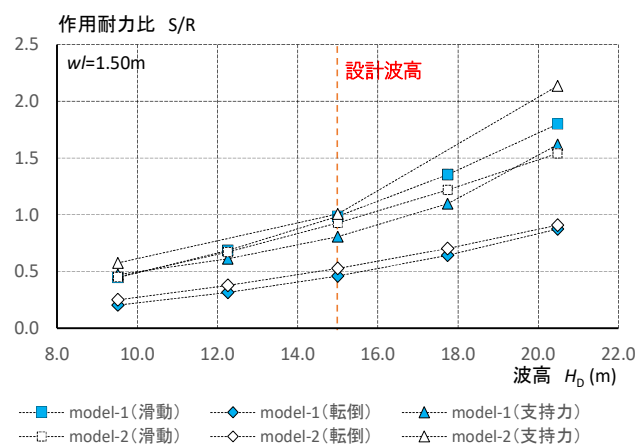


図-6 波高の変化に伴う各モデル断面における作用耐力比の変化 (滑動破壊モード)

ここでは、潮位 $wl=1.50m$ における結果を対象とする。model-1 では、作用条件の大部分において滑動破壊モードの S/R が最大となる傾向が確認されたのに対し、model-2 では支持力破壊モードが最大となる傾向が見られる。model-2 では、当初設計条件 ($H_D=15.0m, wl=1.50m$) において支持力破壊モードの場合に $S/R \approx 1$ であり、支持力破壊モードで断面が決定されている。さらに、波高の増加に対する S/R の増加率 (S/R の増加量/波高の増加量) に着目すると、model-1 の滑動破壊モードに比べて model-2 の支持力破壊モードにおける S/R の値は、設計波高 ($H_D=15.0m$) を超える領域において増加率が顕著に大きくなっており、波高増大に対して S/R がより敏感に変化する傾向が確認できる。

以上より、波高増大等の作用条件の変化に対する構造物の安定性の感度を把握することは、将来的な被災リスクの評価を通じて港湾機能の低下を未然に防ぐ観点から重要であると考えられる。またこれらの知見は、新設防波堤の設計段階においても有用な知見を与えるものである。なお、本節では代表的な結果のみを示したが、model-1 及び model-2 の各破壊モードについて、潮位及び波高と S/R との関係を付録 B に示す。

3.3 応用曲面関数の作成

前節までの検討により得られる防波堤区間ごとの作用耐力比 S/R は、説明変数 (潮位, 波高) の組合せに対応した離散的な数値として求められる。また、支持力に関する S/R の算出には反復計算を要するため、1 回あたりの計算時間が短い場合であっても、対象区間数が多くなると計算負荷が増大し、施設群全体を俯瞰的に評価する上での制約となる。

そこで本研究では、説明変数と S/R との関係を応答曲面関数として近似表現することにより、説明変数の任意の値に対する S/R を即座に算出可能とする手法を採用する。

図-5 及び図-6 に示した各破壊モードならびに各断面モデルにおける S/R の変化傾向から、設定した内挿領域内においては、 S/R を説明変数 (潮位, 波高) の 2 次多項式により近似することが可能であると判断した。内挿領域内における滑動、転倒及び支持力の S/R をそれぞれ y_1, y_2, y_3 とすると、応答曲面関数は次式で表される²⁶⁾。

滑動の S/R :

$$y_1(x_1, x_2) = a_1 + b_1x_1 + c_1x_2 + d_1x_1x_2 + e_1x_1^2 + f_1x_2^2 \quad (1)$$

転倒の S/R :

$$y_2(x_1, x_2) = a_2 + b_2x_1 + c_2x_2 + d_2x_1x_2 + e_2x_1^2 + f_2x_2^2 \quad (2)$$

支持力の S/R :

$$y_3(x_1, x_2) = a_3 + b_3x_1 + c_3x_2 + d_3x_1x_2 + e_3x_1^2 + f_3x_2^2 \quad (3)$$

ここに、

a_k, b_k, \dots, f_k は係数 ($k = 1 \sim 3$) .

x_1 : 波高 H_D , x_2 : 潮位 wl

である。

上式において、説明変数として潮位及び波高の 2 変数を用いる場合、作用耐力比は両者の相互作用の影響を受けると考えられる。このため、本研究では内挿領域内における近似精度の確保を目的として、2 次項及び交差項を含む応答曲面関数を採用した。

各モデル断面に対する S/R (滑動、転倒、支持力の各破壊モード) について、最小二乗近似により式(1)~(3)の応答曲面関数の係数を求めた (詳細は付録 C 参照)。これらの係数を用いて算出した応答曲面関数による S/R の近似値は、図-7 に示すとおり、計算値に対して相関係数が 0.99996 以上と高い相関を示しており、本研究で設定した内挿領域内における近似精度は十分であることが確認された。

3.4 応答曲面法による補強対策効果の俯瞰的評価

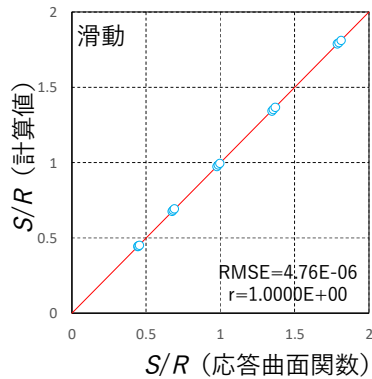
補強対策による作用耐力比 S/R の改善効果を、応答曲面を用いてあらかじめ把握する。作用条件の変化に対して補強が必要となる場合、候補となる対策工法としては、例えば波力に対する抵抗力の増加を目的とした堤体幅の拡大が考えられる。実際の対策工事に際しては詳細な設計が必要であるが、多数の施設を対象として、どの施設が作用条件の変化に対して相対的に安定性が低下しやすいか、すなわち補強対策を優先的に実施すべきかを判断する段階においては、応答曲面法の活用が有効である。

応答曲面関数の構築方法は前節で述べた通りであり、補強対策を施したモデル断面について S/R を算出し、その結果から内挿範囲における近似関数を求める。図-8 には、model-1 の滑動破壊モードを対象として、無対策の場合と補強対策を行った場合の S/R を比較して示す。無対策の場合、 H_D が 15.0m から 16.5m (+10%) に増加すると、 S/R が 1.0 を大きく上回り、滑動安定性が確保できない。一方、堤体を 5m 拡幅することで $S/R < 1.0$ となり、安定性が確保できることが確認できる。

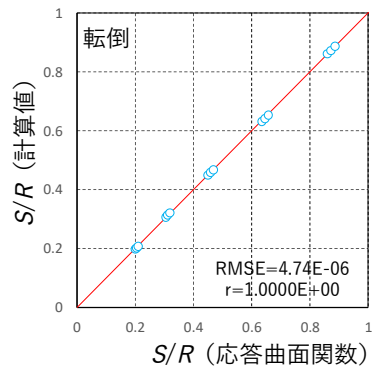
表-2 には、model-1 の場合の初期整備費及び各補強対策に要する防波堤単位長さあたりの概算工費を示した

(工費の内訳は付録 D 参照)．拡幅を 10m とした場合、 H_D が 0~+10% の範囲において概ね $S/R \leq 0.8$ となり、より高い安定性向上効果が得られるものの、工費は拡幅 5m の場合の約 1.6 倍超となる。

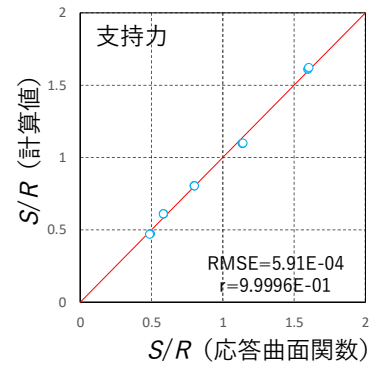
なお、改善効果の検討過程において、堤体の港外側への消波工設置も対策候補として検討したが、 H_D が 15.0m を超える条件では適用可能な消波ブロックが存在せず (表-D.1 参照)，規格外となることから本研究では候補



(a) model-1 (滑動破壊モード)



(b) model-1 (転倒破壊モード)



(c) model-1 (支持力破壊モード)

図-7 作用耐力比の計算値と応答曲面関数による近似値の相関(model-1)

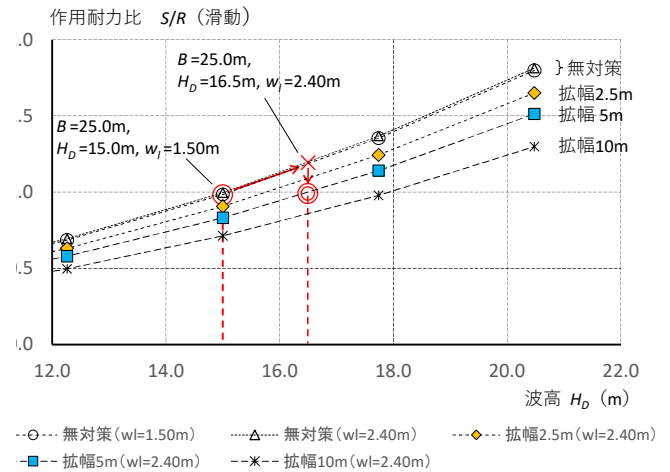


図-8 作用条件の変化に伴う作用耐力比の変化と対策実施による改善効果(model-1, 滑動)

表-2 初期整備費及び補強対策費の概算 (model-1)

初期整備費	C_{init} (約 22 百万円/m)
拡幅 2.5m	$0.278 C_{init}$
拡幅 5m	$0.462 C_{init}$
拡幅 10m	$0.759 C_{init}$

として採用していない。また、港内側を石材で補強する腹付工²⁷⁾については、腹付工を設置しないケーソン単体の状態で $S/R < 1.0$ を満たす必要がある²²⁾とされていることから、本研究における補強対策の候補には含めていない。

図-8 に示すように、将来的な波高や潮位の変化に対しても、応答曲面を活用することで補強対策の要否判断や対策工法の比較検討を俯瞰的かつ効率的に行えることが示された。

4. 補強対策の効果及び対策優先度の評価

4.1 リアルオプション分析の概念

前章において、応答曲面法が補強対策の要否判断及び対策工法の選定に有効であることを示した。一方、気候変動に伴う将来の波浪及び潮位の変化には高い不確実性が存在し、従来の確定的な設計手法では、過大な補強投資あるいは将来リスクの過小評価を招くおそれがある。また、伝統的な費用便益分析は、「now-or-never」原則^{7),19)}に基づき、対策を即時に実施するか、あるいは実施しないかという二者択一の意味決定を前提としており、実施時期を柔軟に選択する余地は考慮されない。

将来の便益や費用に大きな不確実性が存在する場合に

は、対策の実施要否のみならず、実施時期をどのように選択するかが意思決定上の重要な論点となる。しかし、将来予測された波高や潮位条件を単一または限定的なシナリオとして設計外力に設定し、現行の設計条件との比較により安定性を評価する従来手法では、将来外力の不確実性を十分に反映できず、意思決定の柔軟性も限定的である。

このような不確実性の高い環境下における意思決定手法として、リアルオプション分析 (ROA) が挙げられる。

「リアル」は金融資産以外の実物資産を対象とすることを意味し、「オプション」は将来のある時点を選択して資産を取得する権利であって、義務を伴わないものを指す⁸⁾。ROAは、将来の情報更新を待った上で意思決定を行う「選択権」を資産価値として評価する手法であり、エネルギー分野やインフラ投資分野における応用^{28),29)}のほか、治水施設等を対象として、将来における作用の不確実性を考慮した段階的の整備において活用されてきた^{19),21)}。一方、港湾構造物を対象とした、波浪や潮位といった自然作用の長期的変動をリアルオプション評価に直接組み込んだ研究はほとんど見られない。そこで本研究では、気候変動に伴う潮位上昇及び波高増大を想定し、その変動規模の不確実性を考慮した複数の増大シナリオに基づき、ROAの適用可能性を検討する。

4.2 リアルオプション分析の概念を用いた簡便な評価

(1) 従来型の割引現在価値評価の制約

社会基盤施設の整備や補強対策の費用対効果評価においては、将来にわたって発生する費用及び便益を現在価値に換算して評価する正味現在価値 (Net Present Value, NPV) が広く用いられている³⁰⁾。NPVは、評価期間内に発生する便益とコストを割引率により現在価値に換算した合計として、一般に次式で定義される。

$$NPV = \sum_{t=0}^T \frac{B(t) - C(t)}{(1+r)^t} \quad (4)$$

ここに、

$B(t)$: 時点 t における便益

$C(t)$: 時点 t におけるコスト

r : 社会的割引率

T : 評価期間

である。本研究においては、評価期間は設計供用期間である 50 年とした。

港湾整備事業の費用対効果分析⁹⁾において、防波堤整備の便益としては、港内の静穏度の向上による港内の利用価値の増大が挙げられている。一般的には、係留施設

の利用可能日数の増加や周辺港湾の混雑緩和等も便益として評価される。本研究では、既存防波堤の安定性評価及びその結果に基づく補強対策を対象とすることから、まず補強により将来的に回避される被害額を便益として扱う。

後述する ROA との比較のため、まず従来型 NPV (即時実施) による補強対策の評価を行う。時点 $t=0$ において一度だけ補強対策を実施する場合、その従来型 NPV は次式で表される。

$$NPV_{conv} = -C_m + \sum_{t=0}^T \frac{D(t)}{(1+r)^t} \quad (5)$$

ここに、

C_m : 補強対策費 ($t=0$)

$D(t)$: 補強対策により回避される被害額

r : 社会的割引率

T : 評価期間 (=設計供用期間)

である。

例として、 $T=50$ 年、 $r=0.04$ 、 $C_m=10$ 億円とする。無対策の場合、20 年目に 5 億円、40 年目に 20 億円の被害が発生すると仮定し、これらの被害を補強対策により回避できるものとする。このとき、従来型の NPV は次式により算定される。

$$NPV_{conv} = -10 + \left(\frac{5}{(1.04)^{20}} + \frac{20}{(1.04)^{40}} \right) = -3.55 \text{ 億円} \quad (6)$$

本事例では、将来に大きな被害が想定される場合であっても、割引率を考慮した従来型 NPV は負値となり、将来被害の大きさが現在価値評価に十分反映されず、補強対策の経済性が指標上は明確に示されない結果となった。この結果は、将来不確実性が大きい条件下において、従来型の現在価値評価に基づく意思決定が内包する構造的な制約を示唆するものである。

(2) リアルオプション価値

気候変動に伴う波高及び潮位の将来変化には高い不確実性が存在する。このため、補強対策の実施を将来時点まで留保できる場合、意思決定者は将来時点において「補強対策を実施する」か「実施を延期する」かを選択する柔軟性を持つことができる。本研究では、このような意思決定の柔軟性をリアルオプションの概念に基づいて評価する。

気候変動に伴って波高及び潮位が変化し、施設に被害が生じる場合を考える (図-9)。図は説明のため、波高の変化のみに着目して示している。設計供用期間中に想定

される施設被害に対して、補強対策は時点 t_m に一度だけ実施する、もしくは期間中に補強対策を実施しないものとする。

防波堤は、構造物そのものの健全性を維持することを目的とした施設ではなく、港内の静穏度を確保し、それを通じて荷役作業の安全性や円滑性を維持するという港湾機能を担う基幹施設である。このため、防波堤に被害が生じた場合には、補修費用といった直接的な被害に加えて、港内静穏度の低下による荷役制限や入出港制約等を通じた港湾機能の低下が生じ、これが継続的な経済的損失として顕在化する可能性がある。

したがって、防波堤を対象とした補強対策の便益を、施設被害の回避額のみによって評価するのではなく、補強対策を実施しない場合に生じ得る港湾機能の利用制約に伴う損失の回避額を含めて捉えることは合理的である。このような考え方は、耐震強化岸壁の費用対効果分析⁹⁾において、事前に対策を講じることで、被災や復旧工事に伴う物流停滞や利用制限による損失を回避する便益を評価対象に含めている点とも整合的である。

以上を踏まえ、本研究では、補強対策の便益を、将来において回避される施設被害及び港湾機能の利用制約に伴う損失の合計として評価する。このとき、補強対策に対する費用対効果を評価する現在価値の指標 V は、次式で表される。

$$V = -\frac{C_m}{(1+r)^{t_m}} + \mathbb{E} \left[\sum_{t=0}^T \frac{D(t) + C_r(t)}{(1+r)^t} \right] \quad (7)$$

$$D(t) = C_{a0}(t) - C_{d1}(t) \quad (8)$$

ここに、

t_m : 補強対策の実施時期

C_m : 補強対策費 ($t=t_m$)

$D(t)$: 補強対策により回避される被害額

$C_{a0}(t)$: 無対策の場合に時点 t において想定される被害額

$C_{d1}(t)$: 補強対策を実施した場合に時点 t において想定される被害額

$C_r(t)$: 補強対策により回避される機能制約による損失額

r : 社会的割引率

T : 評価期間 (=設計供用期間)

$\mathbb{E}[\cdot]$: 将来被害額及び損失額の不確実性を考慮した期待値を表す

である。

被害回避額 $D(t)$ は、式(7)に示す通り、各時点 t における無対策時と補強対策実施時の被害額の差として定義さ

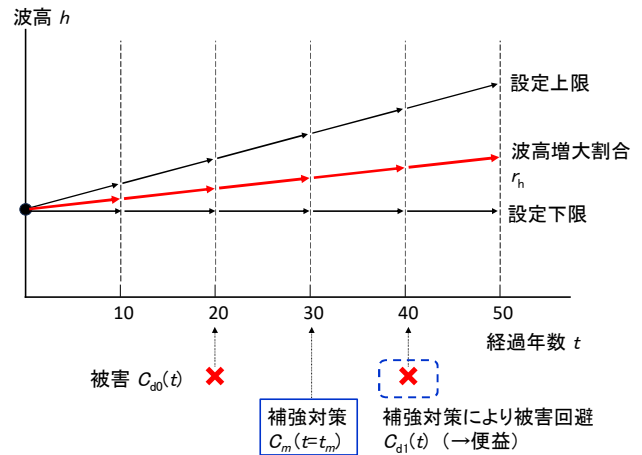


図-9 波高の変化及び対策による被害回避のイメージ

れる。式(5)に示す従来型 NPV との本質的な相違は、補強対策の実施時期を $t=0$ に固定せず $t=t_m$ として選択可能とする点、並びに $D(t)$ を確定値ではなく期待値として扱い、将来被害の不確実性を明示的に評価する点にある。式(7)により算定される V が正值となる場合、期待される被害及び損失の回避額の現在価値が補強対策費の現在価値を上回することを意味し、時期 t_m における補強対策の実施が経済的に合理的な選択肢であると解釈できる。

(3) リアルオプション分析の概念に基づく簡便な検討の実施手順

本研究において実施する、簡便なリアルオプション分析の概念に基づく簡便な検討の手順を図-10に示す。概要は以下の通りである。

まず、3.1(2)に示した範囲に基づき、波高 H_D 及び潮位 wl の増大割合を設定する (図中①)。補強対策を実施する場合には、3.4 節で示した対策工法のうち、効果及び実務適用性を考慮し、堤体 5m 幅を対象とした(同②)。次に、対象施設に対して、ワイブル分布に従う高波 (沖波) が年 1 回作用すると仮定する (同③)。沖波から堤前波への換算比率は 1.0 とし (同④)、波高及び潮位の組合せから、応答曲面関数を用いて作用耐力比 S/R を算定する (同⑤)。算定された S/R が 1.0 を超える場合を「被災」と判定し、被害額 $C_{a0}(t)$ 又は $C_{d1}(t)$ を計上する。具体的には、 $S/R \geq 2.0$ の場合には防波堤の初期整備費 C_{init} に相当する復旧費を要するものとし、 $1.0 < S/R < 2.0$ の場合には、 S/R に応じて被害額が線形に増加すると仮定した。 C_{init} の内訳を付録 D に示す。評価期間中に複数回被災した場合は、被害額を累積する (同⑥)。

損失回避額 $C_r(t)$ の評価について、本来、対象施設ごと

の条件を踏まえ、対策未実施時 (Without) に生じる輸送コストや水域利用機会等の損失が、対策実施時 (With) にどの程度回避されるかを詳細に設定することが望ましい。しかし本研究では一般化を目的として、既往の事業評価事例^{例えは 31)}などを参考に、港湾機能の制約による損失回避額 $C_r(t)$ を被害回避額 $D(t)$ と同値と仮定し、補強対策による便益を $D(t) + C_r(t)$ として評価した。本研究における被害回避額及び損失回避額の算定条件を、耐震強化施設整備における費用対効果の算定条件と比較して表-3に示す。

以上の過程を繰り返すことにより、補強対策の有無及び実施時期ごとの被害回避額及び損失回避額を推計する。本研究では、各ケースについて毎年 10,000 回のモンテカルロシミュレーションを実施し、一様乱数により設定した高波の波高に基づいてこれらを算出したうえで、式(7)により評価指標 V を算定した (同⑦⑧)。

(3) ワイブル分布に従う波高の算出

高波の波高 x は、ワイブル分布³²⁾に従うものとし、その累積確率分布 $F(x)$ は次式で表される。

$$F(x) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{x-B}{A}\right)^k\right] \quad (9)$$

ここに、

k : 形状母数

A : 尺度母数

B : 位置母数 ($B \leq x$)

である。式(9)を変形すると、

$$x = B + A[-\ln(1 - F(x))]^{1/k} \quad (10)$$

となる。本研究では、 $F(x)$ に 0~1 の一様乱数を与えることで波高 x を生成した。母数 A 及び B は、50 年確率波高 H_{50} 、裾長さ γ_{50} 、基準化変数 y_{50} 及び y_{10} 、形状母数 k 、平均発生率 λ から算出し、波高増大割合 r_h に応じて H_{50} を線形に変化させた。

$$A = H_{50} \frac{1 - 1/\gamma_{50}}{y_{50} - y_{10}} \quad (11)$$

$$B = H_{50} \left[1 - \frac{1 - 1/\gamma_{50}}{1 - y_{10}/\gamma_{50}} \right] \quad (12)$$

$$y_R = [\ln(\lambda R)]^{1/k} \quad (13)$$

ここに、

H_{50} : 50 年確率波高

γ_{50} : 裾長さ

y_R : 再現期間 R 年の基準化変数

λ : 平均発生率

k : 形状母数

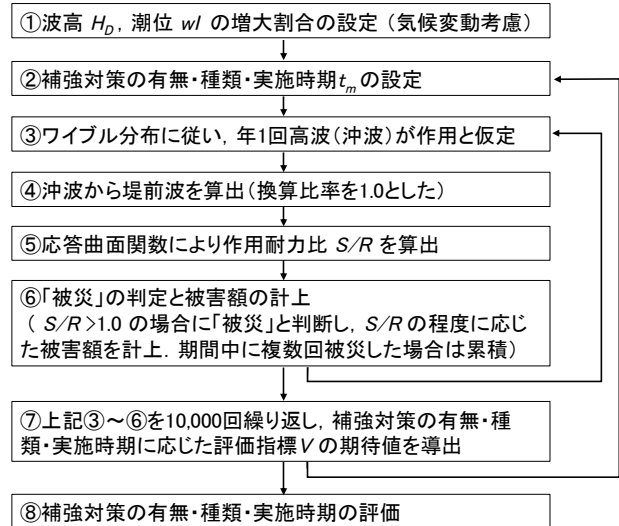


図-10 本研究におけるリアルオプション分析の概念に基づく簡便な検討の実施手順

表-3 本研究と耐震強化施設整備における費用対効果の算定条件の比較

(a) 本研究における既存防波堤改良

項目	with時	without時
〔整備費用〕		
整備費用	整備費用:補強対策費 C_m	整備費用:0
〔施設被害回避便益関連〕		
平常時	復旧費用:0	復旧費用:0
被災時	復旧費用: $C_{ai}(t)$	復旧費用: $C_{ao}(t)$
〔輸送コスト削減便益関連〕		
平常時	輸送コスト削減便益: B_t	輸送コスト削減便益: B_t
被災時	輸送コスト削減便益: $B_t - C_{ai}(t)$ (便益減は、施設被害と同額と想定)	輸送コスト削減便益: $B_t - C_{ao}(t)$ (便益減は、施設被害と同額と想定)

(b) 〔参考〕岸壁の耐震強化整備

項目	with時	without時
〔整備費用〕		
整備費用	整備費用:耐震強化費 C	整備費用:0
〔施設被害回避便益関連〕		
平常時	復旧費用:0	復旧費用:0
被災時	復旧費用:0	復旧費用:平常バース整備費
〔輸送コスト削減便益関連〕		
平常時	輸送コスト削減便益: B_t	輸送コスト削減便益: B_t
被災時	緊急物資輸送コスト削減便益: B_{id} (緊急物資輸送の輸送コストが、代替施設経路に比べて削減される)	緊急物資輸送コスト削減便益: 0 (緊急物資の輸送が、代替施設経路となる)

※港湾整備事業の事業評価においては、対象地震の発生確率を考慮する

である。解析では、 $\gamma_{50}=1.2$ 、 $\lambda=1.0$ 、 $k=1.0$ とした。

(4) 評価結果と考察

図-10 に示す手順に基づき、社会的割引率 $r=0.04$ 、評価期間を 50 年として検討を行った。波高増大割合 r_h は 0~0.4 の範囲で 0.1 刻みの 5 段階に設定し、補強対策を実

施する場合の実施時期 t_m は 0~45 年の範囲で 5 年刻みで設定した。各経過年における無対策時の被害額 $C_{d0}(t)$ 及び補強対策実施時の被害額 $C_{d1}(t)$ をそれぞれ防波堤の初期整備費 C_{init} で無次元化し、補強対策の有無による比較を行った結果を図-11 に示す。ここでは代表例として $r_h=0.1$ 及び $r_h=0.3$ のケースを示しており、補強対策を行う場合は $t_m=20$ 時点で実施するものとした。なお、図中の被害額は割引率を考慮しない実額である。

波高増大が相対的に大きい $r_h=0.3$ の場合、無対策時には年数の経過に伴って被害額が顕著に増加する一方、補強対策の実施により被害額が大幅に低減することが確認できる。また、 $r_h=0.1$ の場合においても、補強対策による被害抑制効果が一定程度認められる。各経過年数における被害額の差は、式(8)に示す回避額 $D(t)$ に相当する。

補強対策による便益を評価期間全体で把握するため、無対策時及び補強対策実施時における被害額の期待現在価値を、それぞれ次式により定義する。

$$C0 = E \left[\sum_{t=0}^T \frac{C_{d0}(t)}{(1+r)^t} \right] \quad (13)$$

$$C1(t_m) = E \left[\sum_{t=0}^{t_m-1} \frac{C_{d0}(t)}{(1+r)^t} + \sum_{t=t_m}^T \frac{C_{d1}(t)}{(1+r)^t} \right] \quad (14)$$

ここに、

$C0$: 無対策の場合に想定される評価期間全体の被害額の期待現在価値

$C1(t_m)$: 時点 t_m に補強対策を実施した場合に想定される評価期間全体の被害額の期待現在価値

である。

各実施時期に対して算出した $C0$ 及び $C1$ を C_{init} で無次元化した結果を図-12 に示す。図には $r_h=0.1$ 及び $r_h=0.3$ のケースを示しており、 $C1$ については $t_m=0\sim45$ の範囲で 5 年刻みで設定した場合を示した。いずれの波高増大割合においても、補強対策の実施時期が早いほど、評価期間全体の被害額 $C1$ は小さく抑えられており、対策実施時期が遅れるにつれて無対策時の被害額 $C0$ に近づく傾向が確認される。

次に、図-10 の手順に基づき、波高増大割合及び補強対策実施時期を変化させた場合に、式(7)で算定される便益の割引現在価値を C_{init} で無次元化し、図-13 に示す。図には $r_h=0\sim0.4$ のケースを示している。波高増大割合が大きいほど被害及び損失の回避効果を表す便益は増加し、また対策実施時期が早いほど便益が大きくなる傾向が認められる。図中、補強対策費 C_m の割引現在価値 (式(7)第 1 項) も併せて示しており、 $D(t) + C_r(t)$ から補強対策費

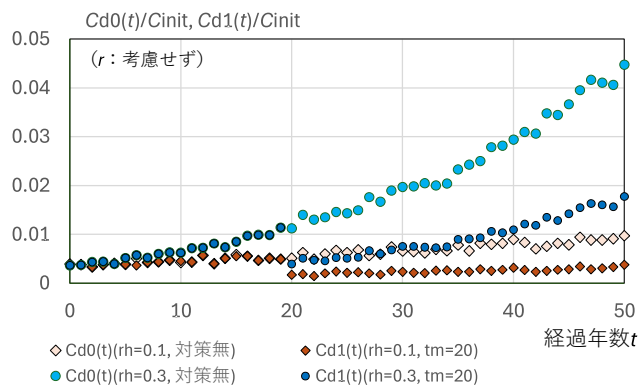


図-11 各年の被害額の補強対策実施有無による比較
 ($r_h=0.1$ 及び $r_h=0.3$. 対策は $t=20$ 時点で実施)

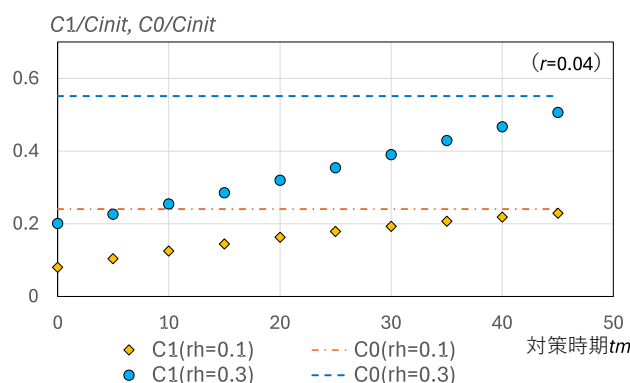


図-12 補強対策の実施時期による評価期間全体の被害額への影響

C_m を差し引いた評価指標 V を C_{init} で無次元化して図-14 に示す。

波高増大割合が最も大きい $r_h=0.4$ では、全ての対策実施時期において V が正值となり、さらに V が最大となる対策実施時期 ($t_m=20$ 付近) が存在することが確認された。 $r_h=0.3$ のケースでは、 $t_m=15\sim35$ の範囲で V が正值となり、 $t_m=25$ 付近で V が最大値をとっている。

一方、波高増大割合が相対的に小さい $r_h=0.0\sim0.2$ のケースでは、いずれの対策実施時期についても V は負値となっており、本研究で設定した条件下では、補強対策の経済性が指標上は明確に示されない結果となった。ただし、これは期待値に基づく経済性評価の結果であり、気候変動に伴う将来の被災リスク増大そのものを否定するものではない。たとえ r_h が小さい場合であっても、極端事象の発生確率や被害規模の変化を通じて、長期的には施設の信頼性低下や管理上の不確実性が增大する可能性がある。したがって、本研究の結果は、将来の状況変化を見据えた段階的かつ柔軟な意思決定を支援するための

基礎的情報として位置づける必要がある。

なお、社会的割引率は将来に発生する費用及び便益の現在価値評価に大きな影響を及ぼし、その設定には政策的判断が含まれる。本研究ではこれまで、現行指針²⁹⁾において一般的に用いられる割引率 $r=0.04$ を基準として評価を行ってきた。一方、現行指針には、過去の国債の実質利回りを踏まえた参考値として、 $r=0.01$ 及び 0.02 も併記されている。そこで、割引率の設定が経済性評価に及ぼす影響を確認するため、割引率を $r=0.01$ とした場合の評価結果を図-15及び図-16に示す。図-15は被害回避額と損失回避額の合計で表される便益 $(D(t) + C_r(t))$ の割引現在価値と、補強対策費 C_m の割引現在価値と併せて示したものであり、図-16は C_m を差し引いた割引現在価値 (評価指標 V) を示している。

$r=0.01$ の場合には、 $r=0.04$ の場合と比べて、補強対策実施時期の違いによる便益及び対策費の現在価値の変動が少なくなることが確認できる。また、図-16より、 $r_h=0.3$ のケースでは、広い対策実施時期の範囲 ($t_m=0\sim40$) で V が

正值となり、 $r=0.04$ では全て負値であった $r_h=0.2$ のケースにおいても、 V が正值となる対策実施時期が存在する ($t_m=0\sim20$ 付近)。これは、割引率が低い場合、将来時点における被害および損失の回避による便益が相対的に大きく評価され、補強対策の経済性がより明確に示されるためである。

以上より、社会的割引率の設定は補強対策の経済性評価に本質的な影響を及ぼし、割引率の違いによって意思決定の方向性が変わり得ることが示された。なお、指針に示された他の参考値を含めた割引率の感度分析結果については、付録Eに示す。

以上示した通り、リアルオプション分析の概念に基づく簡便な検討によって、補強対策の要否のみならず、実施時期を含めた意思決定の評価が可能であることを確認した。このような検討が可能となるのは、応答曲面関数を用いることで、任意の波高・潮位条件に対する作用耐力比 S/R を即時に算定できる点に依拠している。

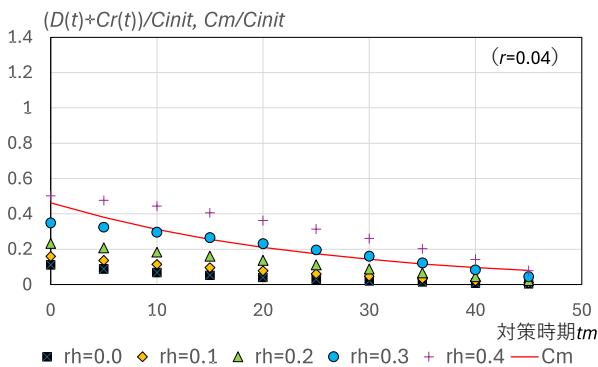


図-13 補強対策による便益の波高増大割合と補強対策実施時期による変化

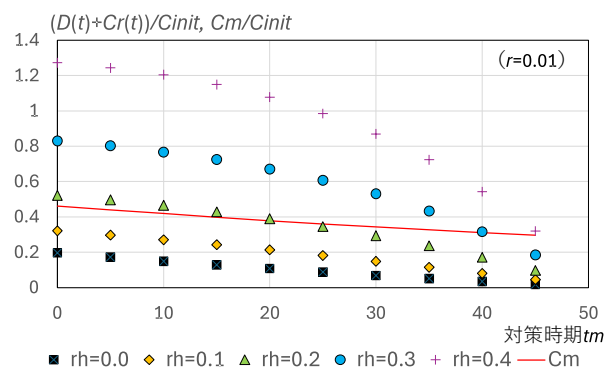


図-15 補強対策による便益の波高増大割合と補強対策実施時期による変化 ($r=0.01$)

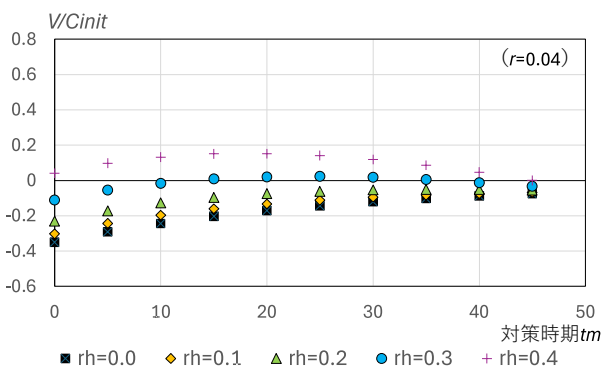


図-14 波高増大割合と補強対策実施時期による評価指標 V の変化

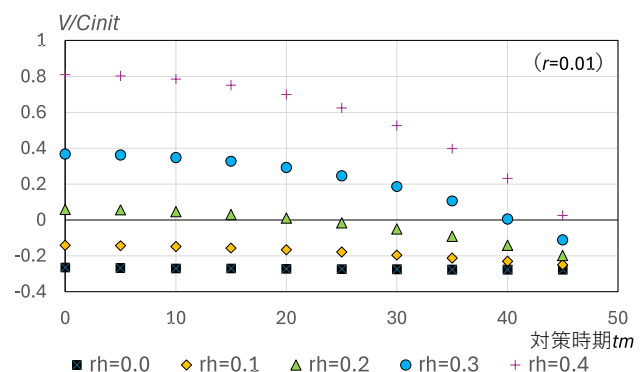


図-16 波高増大割合と補強対策実施時期による評価指標 V の変化 ($r=0.01$)

4.3 提案手法の優位性

本研究で提案する手法の利点は、主として次の点に集約される。

第一に、応答曲面関数を用いることにより、設計条件の変化が施設全体及び各部位の安定性に及ぼす影響について、詳細検討に先立って概略的な傾向を把握できる点である。例えば、全国の第一線防波堤を対象として、気候変動に伴う波高や潮位の増大に対する安定性の応答曲面をあらかじめ整備しておけば、防波堤全延長に対する被災リスク増大の程度を迅速に評価することが可能となる。

第二に、作用に対する構造物の安定性という設計の根幹的情報が、応答曲面関数として集約される点が挙げられる。数十年から100年規模で供用されるインフラ施設においては、設計図書を後世に残すことに加え、将来世代の技術者や施設管理者が判断を行う際に本質的に重要となる情報を、簡潔かつ効率的に伝達することが重要である。防波堤の場合、波高や潮位の増大に伴う安定性低下の程度といった設計の要点を、応答曲面関数という形で世代を超えて共有できる点は、情報伝達の在り方としても有効であると考えられる。

以上のように、本研究で提案する枠組みは、設計段階において一定の作業負荷を要するものの、事業の初期段階から全体プロセスの最適化を重視するという港湾基準に示された理念²³⁾を具体化する手法である。さらに、維持管理段階においては、圧縮された根幹的設計情報である応答曲面関数に基づき、安定性評価を容易かつ迅速に実施できることから、長期にわたる施設管理を考慮すれば、効率性及び生産性の向上に寄与する枠組みであるとされる。加えて、この枠組みは、有限要素法(FEM)等を用いた高度な数値解析を伴う設計においても適用可能であると考えられる。

5. まとめ

本研究では、既存防波堤を対象として、将来的な気候変動を考慮した補強対策の検討を支援するため、性能評価指標である作用耐力比 S/R の応答曲面関数を事前に構築する実務的手法を提案した。2種類のモデル断面について、滑動・転倒・支持力の各破壊モードに対する S/R を算定し、主要な説明変数の変化が安定性に及ぼす影響を整理するとともに、応答曲面の生成方法及び港湾施設のライフサイクル、特に維持管理段階における活用可能性を示した。

さらに、リアルオプション分析の概念に基づく簡便な検討を行い、補強対策の要否及び実施時期を含めた意思決定の評価が可能であることを確認した。これを可能としたのは、応答曲面関数によって設計情報を集約・簡略化できたことによるものである。本手法は、将来世代の判断にとって本質的に重要な設計情報を効率的に継承するとともに、多数の施設群に対する概略的な安定性評価を継続的に実施することを可能とする。また、同一指標に基づく包括的な評価を通じて、補強対策の優先順位付けを迅速に行うことができ、港湾施設のアセットマネジメントの高度化及び効率化に資するものと考えられる。

(2026年2月12日受付)

謝辞

本研究を取りまとめるにあたり、所内での討議や関係者との意見交換、ならびに査読段階において大変有用な意見をいただいた。また、京都大学経営管理大学院の赤倉特定教授からは分析手法及び評価において非常に重要なアドバイスをいただいた。ここに深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Working Group 1: *IPCC Sixth Assessment Report - Climate Change 2021: The Physical Science Basis*, 2021. <<https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>> (入手 2022.5.20).
- 2) 清水勝義, 永井紀彦, 里見茂, 李在炯, 富田雄一郎, 久高将信, 額田恭史: 長期波浪観測値と気象データに基づく波候の変動解析, 海岸工学論文集, Vol.53, pp.131-135, 2006.
- 3) 本多和彦, 成田裕也, 平山克也, 高川智博, 森 信人, 千田 優: 日本沿岸の主要港湾における高潮・波浪への気候変動の影響評価, 国土技術政策総合研究所資料, No.1302, 45p., 2025.
- 4) Myers, R.H.: *Response Surface Methodology*, Allyn and Bacon, 246p., 1971.
- 5) 多々納裕一: 不確実性下のプロジェクト評価: 課題と展望, 土木計画学研究・論文集, No.15, pp.19-30, 1998.
- 6) 国土交通省港湾局: 港湾整備事業の費用対効果分析マニュアル, pp.III-4-1-III-4-16, pp.III-9-1-III-9-20, 2024. <<https://www.mlit.go.jp/kowan/content/001752480.pdf>> (入手 2025.8.20).
- 7) Trigeorgis, L.: *Real Options - Managerial Flexibility and Strategy in Resource Allocation*. MIT Press, 246p., 1996. [レノ・トゥリジオリス (川口有一郎ら訳): リアルオプション, エコノミスト社, 514p., 2001.]
- 8) Dixit, A.K. and Pindyck, R.S.: *Investment under Uncertainty*, Princeton University Press, pp.3-25, 1994. [アヴィナッシュ・K, ディキスト, ロバート・S, ピン

- ディク（川口有一郎ら訳）：投資決定理論とリアルオプション—不確実性のもとでの投資，エコノミスト社，pp.3-32, 2002.]
- 9) 宮島正悟, 竹信正寛, 三上康光, 宮田正史：気候変動に伴う作用条件の変化に対する既存防波堤の応答曲面法を用いた改良設計手法，土木学会論文集，Vol.79, No.18, 23-18157, 2023.
 - 10) 岩波光保, 加藤絵万, 川端雄一郎：棧橋上部工の保有性能評価に基づく対策優先順位の決定手法に関する一提案，土木学会論文集 B3(海洋開発), Vol.67, No.2, pp.I_661-I_666, 2011.
 - 11) 小川貴裕, 藤森裕二, 紅谷昇平, 貝戸清之, 小林潔司：地震リスクを考慮した港湾矢板構造物群の維持補修シミュレーションモデル，土木学会論文集 F4(建設マネジメント), Vol.67, No.1, pp.14-32, 2011.
 - 12) 谷拓歩, 横田弘, 橋本勝文, 古谷宏一, 北里新一郎：複数の係留施設の維持管理における最適な補修優先度と年間予算に関する検討，土木学会論文集 F4(建設マネジメント), Vol.70, No.4, pp.I_73-I_82, 2014.
 - 13) 大竹 雄, 本城勇介：応答曲面を用いた実用的な地盤構造物の信頼性設計法：液状化地盤上水路の耐震設計への適用，土木学会論文集 C(地圏工学), Vol.68, No.1, pp.68-83, 2012.
 - 14) 小谷拓磨, 高瀬慎介, 森口周二, 寺田賢二郎, 福谷 陽, 大竹 雄, 野島和也, 桜庭雅明：応答曲面を用いた数値解析援用確率論的津波ハザード評価，土木学会論文集 A2(応用力学), Vol.72, No.1, pp.58-69, 2016.
 - 15) Quigg, L.: Empirical Testing of Real Option - Pricing Models, *Journal of Finance*, Vol.48, No.2, pp.621-640, 1993.
 - 16) Amram, M. and Kulatilaka, N.: *Real Options: Managing Strategic Investment in an Uncertain World*, Harvard Business School Press, 246p., 1998. [マーサ・アムラム, ナリン・クラティラカ（石原雅行ら訳）：リアル・オプション, 東洋経済新聞社, 290p., 2001.]
 - 17) 上田孝行：防災投資の便益評価 - 不確実性と不均衡の概念を念頭に置いて，土木計画学研究・論文集，Vol.14, pp.17-34, 1997.
 - 18) 玉置哲也, 多々納裕一, 今井瑛介：相互依存性を考慮した港湾における防災投資行動分析，土木学会論文集 D3(土木計画学), Vol.68, No.5, pp. I_155-I_166, 2012.
 - 19) 小林潔司, 横松宗太, 織田澤利守：サンクコストと治水経済評価：リアルオプションアプローチ，河川技術に関する論文集，Vol.7, pp.417-422, 2001.
 - 20) 高橋宏直, 吉田二郎, 山本幸司：社会資本整備の評価手法へのリアルオプションの適用に関する研究，国土技術政策総合研究所報告，No.22, 13p., 2005.
 - 21) 瀬木俊輔, 湧川勝己, 錦織俊之, 小林優輔：気候変動の不確実性を考慮した治水施設に対する予算配分の動学的最適化，土木学会論文集 D3(土木計画学), Vol.78, No.3, pp.78-92, 2022.
 - 22) 国土交通省港湾局監修：港湾の施設の技術上の基準・同解説，(公社)日本港湾協会，pp.212-227, pp.910-958, 2018.
 - 23) 国土交通省港湾局監修：港湾の施設の技術上の基準・同解説，(公社)日本港湾協会，pp.130-140, 2018.
 - 24) 宇都宮好博, 宮田正史, 高山知司, 河合弘泰, 平山克也, 鈴木善光, 君塚政文, 福永勇介：シナリオ台風に基づく最大クラス高潮の設定法について，土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.73, No.2, pp.I_247-I_252, 2017.
 - 25) 野村明弘, 佐藤典之, 石川浩希, 早川哲也, 岩崎慎介, 大塚淳一, 森 信人, 渡部靖憲：d4PDFを用いた設計波高の将来変化の効率的な推定手法，土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.78, No.2, pp.I_937-I_942, 2022.
 - 26) 山田 秀：実験計画法—方法編，日科技連出版社，pp.185-196, 2004.
 - 27) 佐藤健彦, 宮田正史, 竹信正寛, 高橋英紀：防波堤腹付工の設計法構築と断面形状の感度分析，土木学会論文集 B3(海洋開発), Vol.73, No.2, p.I_42-I_47, 2017.
 - 28) 吉岡 剛, 吉田好邦, 松橋隆治：リアルオプション概念を用いた不確実性下の風力発電事業評価，風力エネルギー利用シンポジウム，Vol.25, pp.189-192, 2003.
 - 29) 高橋 啓, 赤松 隆, 水谷 剛：金利リスクを考慮したリアル・オプション問題に関する研究，土木計画学研究・論文集，Vol.24, pp.111-119, 2007.
 - 30) 国土交通省：公共事業評価の費用便益分析に関する技術指針（共通編），44p., 2025.
<https://www.mlit.go.jp/tec/hyouka/public/250918_shishin/250918_shishin.html> (入手 2026.2.6).
 - 31) https://www.cgr.mlit.go.jp/public_info/koukyouhyouka/r07/kohyo/pdf/12_R7-2_4-4_hamadakou.pdf (入手 2026.2.6).
 - 32) 合田良実：耐波工学—港湾・海岸構造物の耐波設計，鹿島出版会，pp.327-337, 2008.

付録A

性能照査において影響する説明変数の抽出

防波堤の性能照査においては、変動波浪及びレベル1地震動に対して、堤体の滑動、転倒及び基礎地盤の支持力の各破壊モードに関する評価が求められる²²⁾。堤体の滑動、転倒及び基礎地盤の支持力のそれぞれにおいて一般的に用いられる評価手法から、ケーソン式混成堤において、作用耐力比を算出する際に影響する説明変数を網羅的に抽出する。

まず、ケーソンに作用する波力の計算に用いる波圧分布 (図-A.1) は以下のように表される。

$$p_1 = 0.5(1 + \cos \beta)(\alpha_1 \lambda_1 + \alpha_2 \lambda_2 \cos^2 \beta) \rho_0 g H_D \quad (A1)$$

$$p_2 = \frac{p_1}{\cosh(2\pi h/L)} \quad (A2)$$

$$p_3 = \alpha_3 p_1 \quad (A3)$$

$$p_u = 0.5(1 + \cos \beta) \alpha_1 \alpha_3 \lambda_3 \rho_0 g H_D \quad (A4)$$

$$\alpha_1 = 0.6 + \frac{1}{2} \left\{ \frac{4\pi h/L}{\sinh(4\pi h/L)} \right\}^2 \quad (A5)$$

$$\alpha_2 = \min \left\{ \left(\frac{h_b - d}{3h_b} \right) \left(\frac{H_D}{d} \right)^2, \frac{2d}{H_D} \right\} \quad (A6)$$

$$\alpha_3 = 1 - \frac{h'}{h} \left\{ 1 - \frac{1}{\cosh(2\pi h/L)} \right\} \quad (A7)$$

$$\eta^* = 0.75(1 + \cos \beta) \lambda_1 H_D \quad (A8)$$

ここに、

p_1 : 静水面における波圧強度 (kN/m²)

p_2 : 海底面における波圧強度 (kN/m²)

p_3 : 直立壁底面における波圧強度 (kN/m²)

p_u : 直立壁底面に作用する揚圧力 (kN/m²)

$\alpha_1 \sim \alpha_3$: 各作用のアーム長 (m)

$\rho_0 g$: 水の単位体積重量 (kN/m³)

λ_1, λ_2 : 波圧の補正係数 (いずれも 1.0 とする)

λ_3 : 揚圧力の補正係数 (1.0 とする)

β : 波の主方向から $\pm 15^\circ$ の範囲内で最も危険な方向と直立壁の法線の垂線が成す角度 ($^\circ$)

h : 直立壁前面における水深 (m)

h' : 直立壁の底面の水深 (m)

h_b : 直立壁前面から沖側に $5 H_{1/3}$ の地点の水深 (m)

H_D : 最高波の波高 (= $1.8 H_{1/3}$) (m)

$H_{1/3}$: 直立壁の前面における進行波としての有義波高 (m)

L : 最高波の波長 (m)

η^* : 静水面上で波圧強度が 0 となる高さ (m)

d : マウンドの根固め工または被覆工の天端高のう

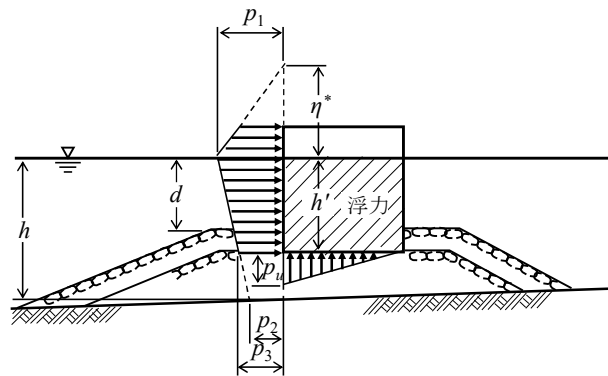


図-A.1 直立壁に作用する波力の計算に用いる波圧分布 (港湾基準²²⁾より作成)

ち、いずれか浅い水深 (m)

である。

以上の波圧分布に対して、滑動に関する作用項 (S) と耐力項 (R) は次式で表される。

$$R = f(W - P_B - P_U) \quad (A9)$$

$$S = P_H \quad (A10)$$

また転倒に関する S と R は次式で表される。

$$R = \alpha_1 W - \alpha_2 P_B - \alpha_3 P_U \quad (A11)$$

$$S = \alpha_4 P_H \quad (A12)$$

ここに、

f : 壁体底面と基礎との摩擦係数

W : 堤体の重量 (kN/m)

P_B : 浮力 (kN/m)

P_U : 揚圧力 (kN/m)

P_H : 水平波力 (kN/m)

$\alpha_1 \sim \alpha_4$: 各作用のアーム長 (m)

である。

さらに、支持力に関する S と R は次式で表される。

$$F_f = \frac{R(F_f)}{S} \quad (A13)$$

$$R = \sum \left[\frac{\{c's + (w' + q) \tan \phi'\} \sec \theta}{1 + \frac{\tan \theta \tan \phi'}{F_f}} \right] \quad (A14)$$

$$S = \sum \{ (w' + q) \sin \theta \} + \frac{dP_H}{r_a} \quad (A15)$$

ここに、

F_f : 耐力項と作用項の比を表す補助パラメータ

P_H : 水平波力 (kN/m)

c' : 非排水せん断強さまたは粘着力 (kN/m²)

- s : 分割細片の幅 (m)
- w' : 分割細片の有効重量 (kN/m)
- q : 分割細片に作用する上載荷重 (kN/m)
- ϕ' : 見掛けのせん断抵抗角 ($^{\circ}$)
- θ : 分割細片の底面となす角 ($^{\circ}$)
- d : 水平波力 P_H のアーム長 (m)
- r_a : すべり円弧の半径 (m)

である。

支持力の計算においては、式(A5)の $R(F_f)$ の式中に F_f が含まれており、繰り返し計算により解が求められる。

以上挙げた説明変数の関係をまとめて図-A.2に示す。なお、支持力における説明変数として地盤の有効重量 (W') を示しているが、これは計算過程において算出される滑り面内の土塊の重量であり、入力には有効単位体積重量を用いている。

図より、作用項 (S) と耐力項 (R) に挙げられた項目に影響する説明変数のうち作用側の説明変数 (すなわち説明変数) は、滑動と転倒に関しては、潮位、波高、周期の3つとなる。なお周期については、波形勾配一定の条件下で周期と波高の間に $T \propto \sqrt{H}$ の関係を仮定することにより、変化前後の波高の値を与えれば変化後の波高に応じた周期の値は一意に定まるため、潮位と波高の2つを説明変数とした。上記の関係性は、波の線形分散関係 (微小振幅波理論) において、深海波条件での波長 (L_0) と周期 (T_0) との近似関係 ($L_0 \approx 1.56 \times T_0^2$)²³⁾ を利用し、さらに波形勾配 (波高と波長との比) が一定値であるとの条件を付すことで得られる。

また、耐力側の説明変数については、滑動と転倒に関

して堤体の諸元や基礎との摩擦係数が加わる。さらに基礎地盤の支持力に関しては、滑動と転倒で挙げた説明変数に加えて、地盤強度に関する説明変数も含まれる。

本研究で用いる作用耐力比 (S/R) は、水平波力 (P_H)、浮力 (P_B) 及び揚圧力 (P_U) を通じて波高 (H_D) および潮位 (w') の関数として表される。これらの荷重は波高および潮位に対して高々2次の依存性を有することから、設計上想定される範囲において、作用耐力比は波高および潮位の2次多項式として近似的に表現可能である。

なお、以上はケーソン式混成堤 (model-1) について述べているが、消波ブロック被覆堤 (model-2) においても、作用及び耐力の算出過程に異なる部分はあるものの、影響する説明変数及び応答関数における説明変数は上記と同様である。

照査項目	観測・調査・試験による因子	設計者が設定する因子	抵抗項 R	荷重項 S
堤体の滑動 堤体の転倒	潮位 w' 周期 T (波長 L) 波高 $H_D (=1.8 H_{1/3})$	設置水深 堤体の諸元 堤体底面と基礎との摩擦係数 f	浮力 P_B 揚圧力 P_U 堤体の重量 W 摩擦係数 f	水平波力 P_H
基礎地盤の支持力	非排水せん断強さ c' せん断抵抗角 ϕ' 地盤の有効重量 W' 潮位 w' 周期 T (波長 L) 波高 $H_D (=1.8 H_{1/3})$	設置水深 堤体の諸元	c' ϕ' W' 上載荷重 q 水平波力 P_H	c' ϕ' W' q P_H
※簡易ビショップ法による支持力の計算で繰り返し計算を行うため、抵抗項と荷重項の因子が同一となる。				

図-A.2 防波堤の設計における説明変数の関係 (ケーソン式混成堤)

付録B 対象モデルの作用耐力比

(1) model-1 (ケーソン式混成低堤)

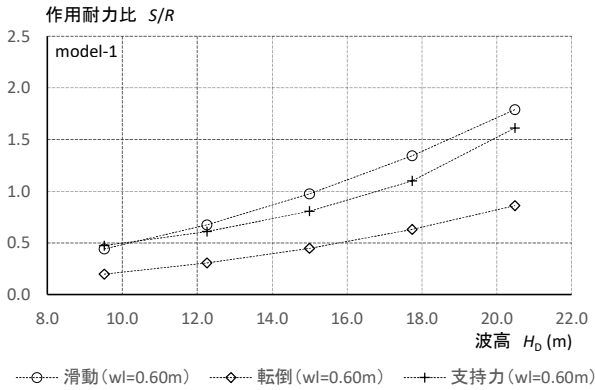


図-B.1a 破壊モードに対する作用耐力比の比較 (model-1, $w/l=0.60m$)

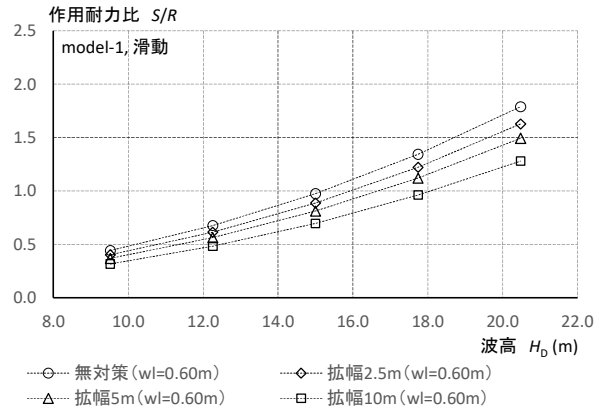


図-B.2a 対策実施による作用耐力比の変化 (model-1, 滑動, $w/l=0.60m$)

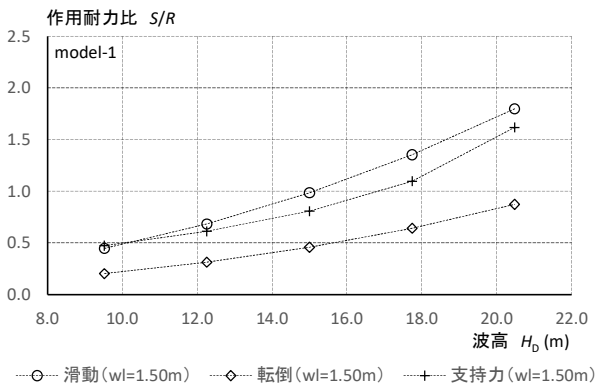


図-B.1b 破壊モードに対する作用耐力比の比較 (model-1, $w/l=1.50m$)

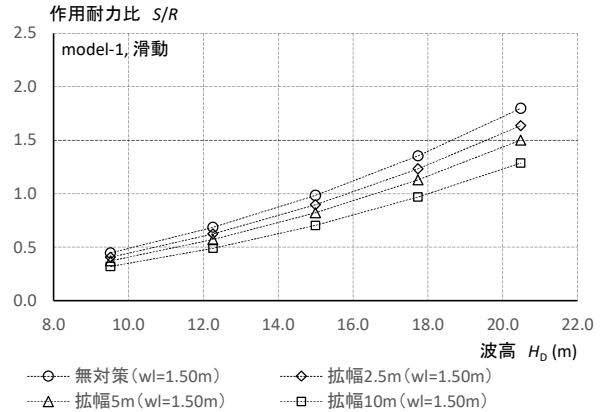


図-B.2b 対策実施による作用耐力比の変化 (model-1, 滑動, $w/l=1.50m$)

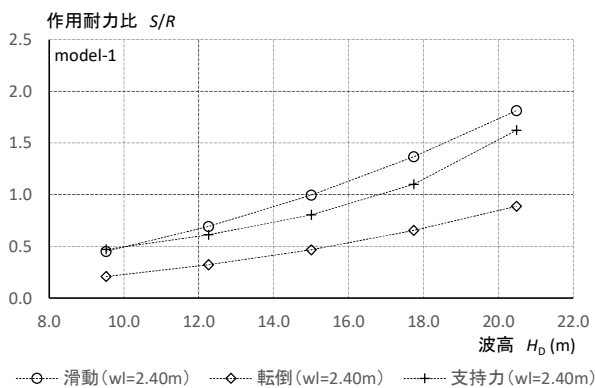


図-B.1c 破壊モードに対する作用耐力比の比較 (model-1, $w/l=2.40m$)

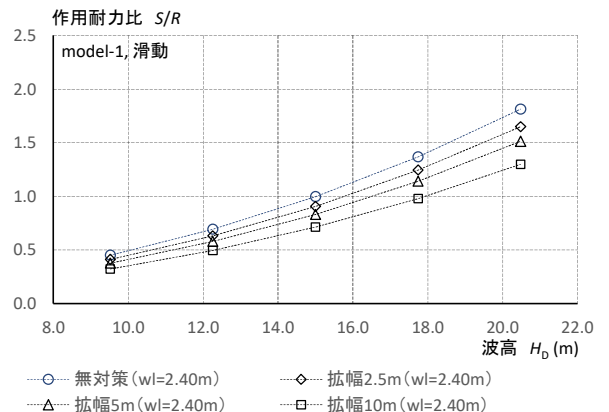


図-B.2c 対策実施による作用耐力比の変化 (model-1, 滑動, $w/l=2.40m$)

(2) model-2 (消波ブロック被覆堤)

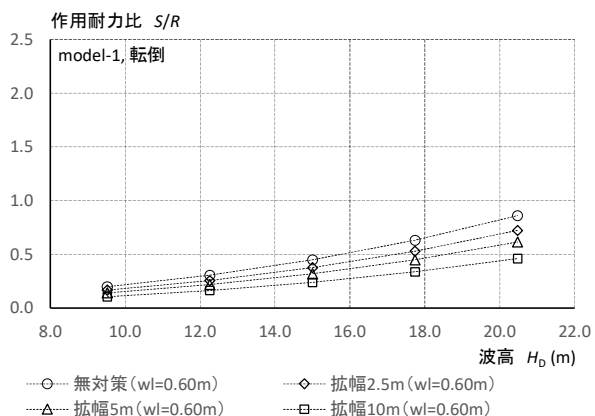


図-B.3a 対策実施による作用応力比の変化 (model-1, 転倒, $w/l=0.60m$)

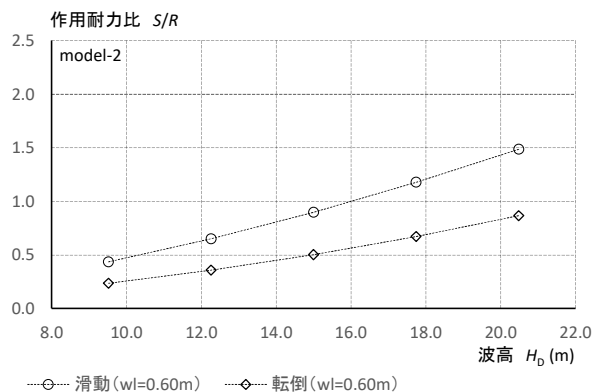


図-B.4a 破壊モードに対する作用耐力比の比較 (model-2, $w/l=0.60m$)

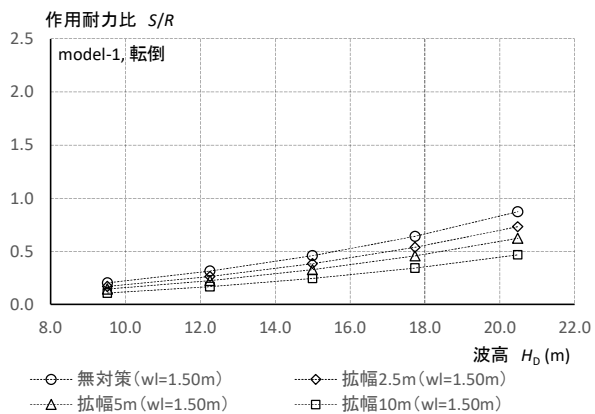


図-B.3b 対策実施による作用応力比の変化 (model-1, 転倒, $w/l=1.50m$)

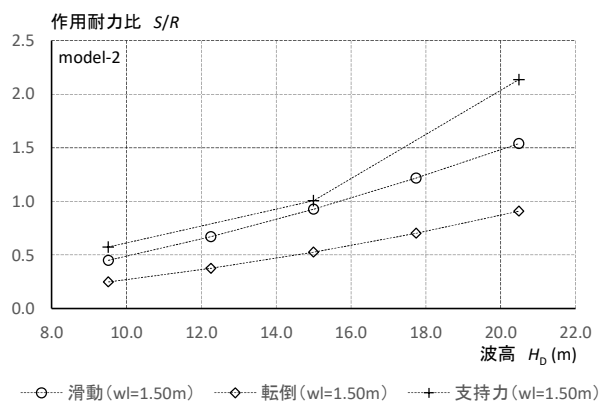


図-B.4b 破壊モードに対する作用耐力比の比較 (model-2, $w/l=1.50m$)

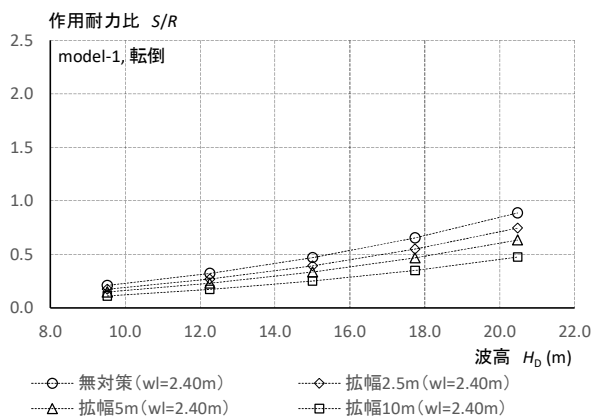


図-B.3c 対策実施による作用応力比の変化 (model-1, 転倒, $w/l=2.40m$)

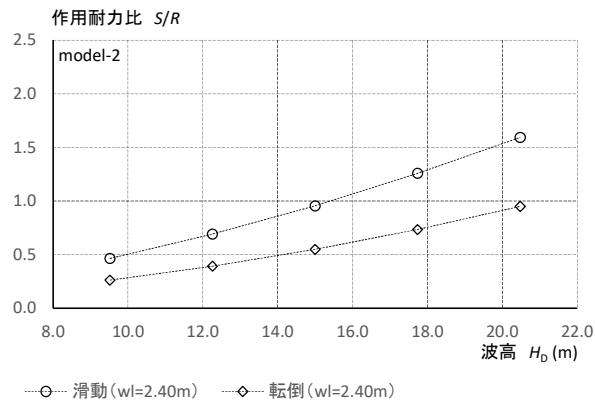


図-B.4c 破壊モードに対する作用耐力比の比較 (model-2, $w/l=2.40m$)

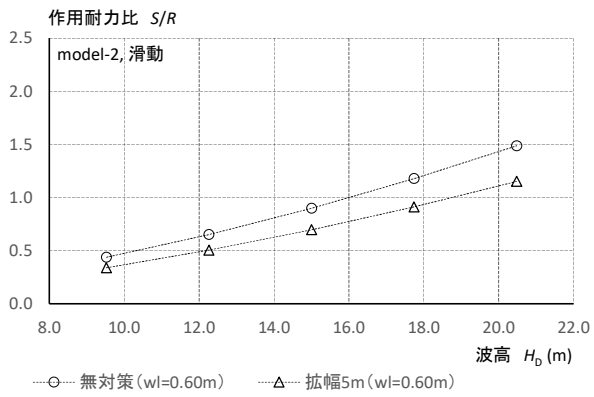


図-B.5a 対策実施による作用応力比の変化 (model-2, 滑動, $w/l=0.60m$)

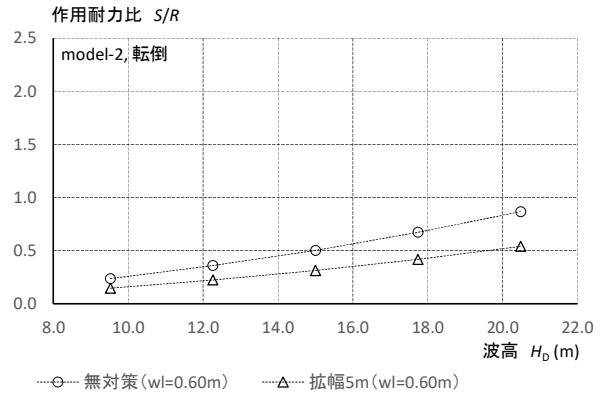


図-B.6a 対策実施による作用応力比の変化 (model-2, 転倒, $w/l=0.60m$)

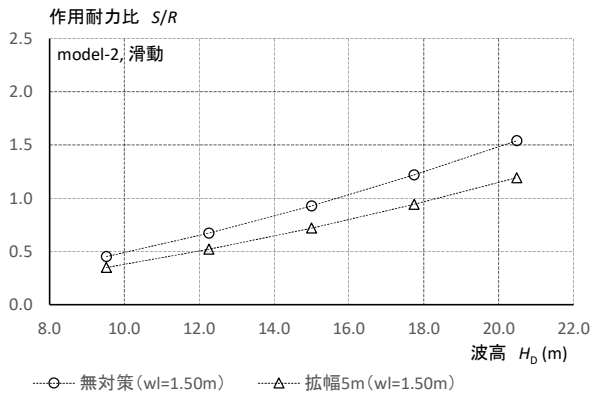


図-B.5b 対策実施による作用応力比の変化 (model-2, 滑動, $w/l=1.50m$)

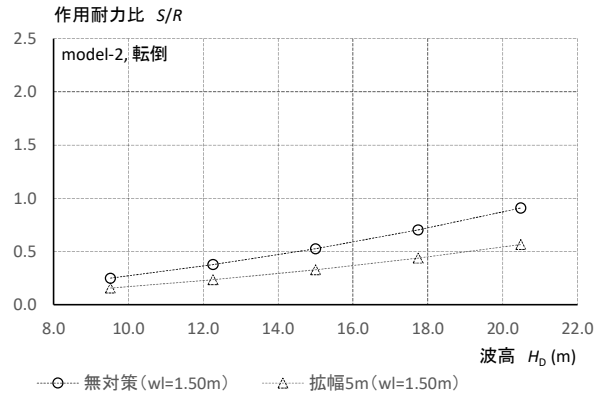


図-B.6b 対策実施による作用応力比の変化 (model-2, 転倒, $w/l=1.50m$)

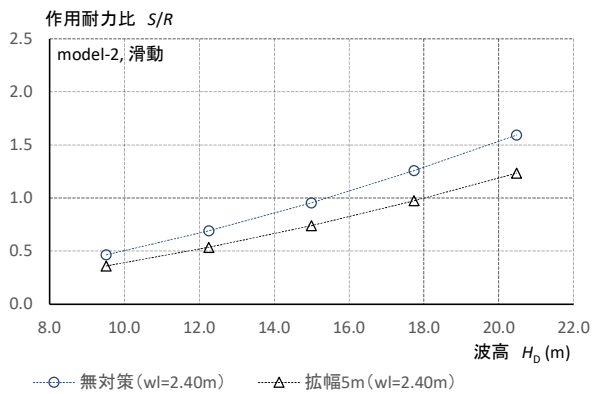


図-B.5c 対策実施による作用応力比の変化 (model-2, 滑動, $w/l=2.40m$)

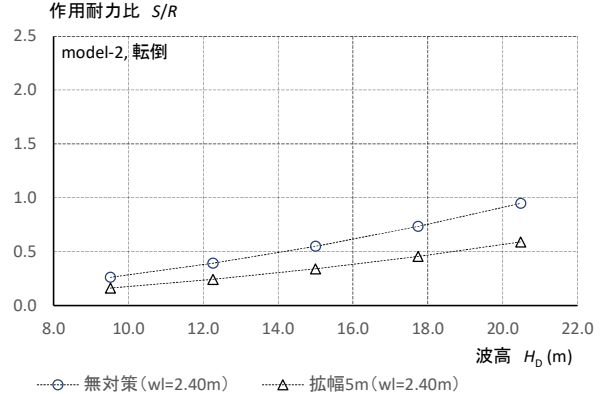


図-B.6c 対策実施による作用応力比の変化 (model-2, 転倒, $w/l=2.40m$)

付録C

最小二乗近似による応答曲面関数の係数の導出

ここでは、図-2 に示すように 9 組の座標点が得られた場合に、2 次多項式で表される応答曲面関数の係数を最小二乗近似により求める。

与えたいモデルは、近似式(1)~(3)を代表して次のように表記される。

$$y(x_1, x_2) = a + bx_1 + cx_2 + dx_1x_2 + ex_1^2 + fx_2^2 \tag{C1}$$

ここに、

a, b, \dots, f は係数。

x_1 : 波高 H_D , x_2 : 潮位 wl , y : 作用耐力比 S/R

である。

これを次式のベクトルで表示する。

$$\mathbf{y} = \mathbf{X} \boldsymbol{\beta} \tag{C2}$$

観測ベクトル \mathbf{y} , 変数ベクトル \mathbf{X} , 係数ベクトル $\boldsymbol{\beta}$ はそれぞれ以下のように表される。

$$\mathbf{y} = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_9 \end{pmatrix} \tag{C3}$$

$$\mathbf{X} = \begin{pmatrix} \mathbf{x}_1^T \\ \mathbf{x}_2^T \\ \vdots \\ \mathbf{x}_9^T \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & x_{11} & x_{21} & x_{11}x_{21} & x_{11}^2 & x_{21}^2 \\ 1 & x_{12} & x_{22} & x_{12}x_{22} & x_{12}^2 & x_{22}^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & x_{19} & x_{29} & x_{19}x_{29} & x_{19}^2 & x_{29}^2 \end{pmatrix} \tag{C4}$$

$$\boldsymbol{\beta} = \begin{pmatrix} a \\ b \\ c \\ d \\ e \\ f \end{pmatrix} \tag{C5}$$

未知係数はベクトル $\boldsymbol{\beta}$ で表される 6 個である。

ここで、観測点が 9 点あるので式(C2)は厳密には満足されない。そこで、誤差ベクトル $\boldsymbol{\varepsilon}$ を含めた形で改めて示す。

$$\mathbf{y} = \mathbf{X} \boldsymbol{\beta} + \boldsymbol{\varepsilon} \tag{C6}$$

誤差ベクトル $\boldsymbol{\varepsilon}$ は以下のように表される。

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \vdots \\ \varepsilon_9 \end{pmatrix} \tag{C7}$$

最小二乗近似により、 $\boldsymbol{\varepsilon}$ を最小とする係数ベクトル $\boldsymbol{\beta}$ を導き出すのが本節の目的である。評価関数 J を用いて、残差二乗和を次式で定義する。

$$J(\boldsymbol{\beta}) = \|\mathbf{y} - \mathbf{X} \boldsymbol{\beta}\|^2 = (\mathbf{y} - \mathbf{X} \boldsymbol{\beta})^T (\mathbf{y} - \mathbf{X} \boldsymbol{\beta}) \tag{C8}$$

展開して微分すると、

$$J(\boldsymbol{\beta}) = \mathbf{y}^T \mathbf{y} - 2\mathbf{y}^T \mathbf{X} \boldsymbol{\beta} + \boldsymbol{\beta}^T \mathbf{X}^T \mathbf{X} \boldsymbol{\beta} \tag{C9}$$

$$\frac{\partial J(\boldsymbol{\beta})}{\partial \boldsymbol{\beta}} = -2\mathbf{X}^T \mathbf{y} + 2\mathbf{X}^T \mathbf{X} \boldsymbol{\beta} \tag{C10}$$

最小条件は勾配=0 で表されるので、次の正規方程式が得られる。

$$\frac{\partial J(\boldsymbol{\beta})}{\partial \boldsymbol{\beta}} = 0 \tag{C11}$$

$$\mathbf{X}^T \mathbf{X} \boldsymbol{\beta} = \mathbf{X}^T \mathbf{y} \tag{C12}$$

$\mathbf{X}^T \mathbf{X}$ が正則であれば、この正規方程式から次式の最小二乗解が求められる。

$$\boldsymbol{\beta} = (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{y} \tag{C13}$$

以上のようにして求められる係数の組み合わせを、model-1, model-2 それぞれに対して表-C.1~表-C.3 に示す。

表-C.1 求められた応答曲面関数の係数 (model-1, 無対策)

	S/R (滑動) y_1	S/R (転倒) y_2	S/R (支持力) y_3
a	1.7818E-01	1.4523E-01	1.0430E+00
b	-1.6051E-02	-1.9822E-02	-1.3513E-01
c	-9.1829E-03	-6.1974E-03	-9.0594E-03
d	7.6034E-04	8.6172E-04	7.6034E-04
e	4.6120E-03	2.6584E-03	7.9475E-03
f	2.4691E-03	1.0288E-03	-4.1152E-04

表-C.2 求められた応答曲面関数の係数 (model-1, 堤体拡幅 (2.5m, 5m, 10m), 滑動破壊モード)

	S/R (2.5m拡幅) y_1	S/R (5m拡幅) y_2	S/R (10m拡幅) y_3
a	1.6444E-01	1.4654E-01	1.2582E-01
b	-1.4922E-02	-1.3224E-02	-1.1550E-02
c	-8.7312E-03	-6.7167E-03	-3.8380E-03
d	7.0965E-04	6.0827E-04	5.0689E-04
e	4.2068E-03	3.8461E-03	3.3078E-03
f	2.2634E-03	1.8519E-03	1.0288E-03

表-C.3 求められた応答曲面関数の係数 (model-2, 無対策)

	S/R (滑動) y_1
a	-1.4150E-02
b	2.5233E-02
c	-2.5974E-02
d	4.1094E-03
e	2.2650E-03
f	-1.4403E-05

付録D

補強対策費用の内訳

本研究で用いたmodel-1に対する補強対策費の概算を表-D.1及び図-D.1に示す。対策工法及び堤体拡幅の場合には拡幅幅に応じた補強対策費，並びに防波堤の初期整備費の概算を表-D.2～表-D.5に示す。

表-D.1 補強対策費の概算一覧 (model-1, 防波堤単位長さあたり)

(千円/m)					
設計波高 (H_D , m)	9.52	12.26	15	17.74	20.48
消波工	11,625	11,407	11,772	-	-
拡幅2.5m	6,098	6,170	6,206	6,206	6,873
拡幅5m	10,194	10,266	10,302	10,302	10,970
拡幅10m	16,798	16,871	16,906	16,906	17,276

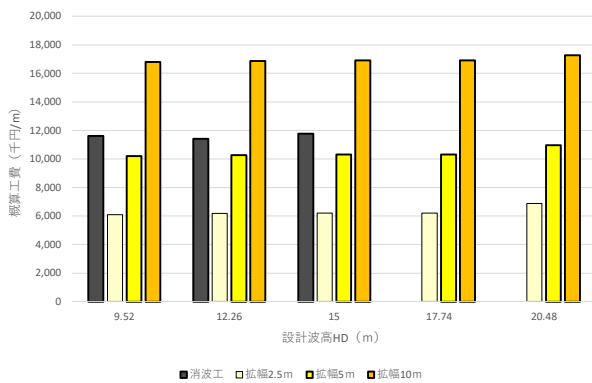


図-D.1 補強対策費用の概算比較 (model-1)

表-D.2 補強対策費の概算 (model-1, $H_D=15.0m$, 拡幅 2.5m, 防波堤単位長さあたり)

拡幅工 (B=2.5m)					
工種	単位	数量	単価	金額	
1.被覆ブロック撤去	個	4.3	24,000	103,200	
2.根固ブロック撤去	個	0.3	63,000	18,900	
3.捨石投入	m ³	16.3	12,000	195,600	
4.捨石均し	m ²	17.6	19,000	334,400	
5.被覆ブロック製作	個	1.4	255,000	357,000	
6.被覆ブロック据付	個	1.4	151,000	211,400	
7.根固ブロック据付	個	0.2	335,000	67,000	
8.陸上コンクリート	m ²	14.1	21,000	296,100	
9.型枠 (陸上)	m ²	33.83	25,000	845,750	
10.足場	m ²	33.83	14,000	473,620	
11.支保工	m	6	27,000	162,000	
12.水中コンクリート	m ³	42.2	24,000	1,012,800	
13.型枠 (水中)	m ²	59.1	36,000	2,127,600	
				(円/m)	6,205,370

表-D.3 補強対策費の概算 (model-1, $H_D=15.0m$, 拡幅 5.0m, 防波堤単位長さあたり)

拡幅工 (B=5m)					
工種	単位	数量	単価	金額	
1.被覆ブロック撤去	個	4.3	24,000	103,200	
2.根固ブロック撤去	個	0.3	63,000	18,900	
3.捨石投入	m ³	19.5	12,000	234,000	
4.捨石均し	m ²	17.6	19,000	334,400	
5.被覆ブロック製作	個	1.4	255,000	357,000	
6.被覆ブロック据付	個	1.4	151,000	211,400	
7.根固ブロック据付	個	0.2	335,000	67,000	
8.陸上コンクリート	m ²	28.2	21,000	592,200	
9.型枠 (陸上)	m ²	61.9	25,000	1,547,500	
10.足場	m ²	61.9	14,000	866,600	
11.支保工	m	11	27,000	297,000	
12.水中コンクリート	m ³	84.4	24,000	2,025,600	
13.型枠 (水中)	m ²	101.3	36,000	3,646,800	
				(円/m)	10,301,600

表-D.4 補強対策費の概算 (model-1, $H_D=15.0m$, 拡幅 10.0m, 防波堤単位長さあたり)

拡幅工 (B=10m)				
工種	単位	数量	単価	金額
1.被覆ブロック撤去	個	4.3	24,000	103,200
2.根固ブロック撤去	個	0.3	63,000	18,900
3.捨石投入	m ³	65	12,000	780,000
4.捨石均し	m ²	24.6	19,000	467,400
5.被覆ブロック製作	個	1.4	255,000	357,000
6.被覆ブロック据付	個	1.4	151,000	211,400
7.根固ブロック据付	個	0.2	335,000	67,000
8.陸上コンクリート	m ²	56.3	21,000	1,182,300
9.型枠 (陸上)	m ²	61.93	25,000	1,548,250
10.足場	m ²	61.93	14,000	867,020
11.支保工	m	21	27,000	567,000
12.水中コンクリート	m ²	168.8	24,000	4,051,200
13.型枠 (水中)	m ²	185.7	36,000	6,685,200
(円/m)				16,905,870

表-D.5 補強対策費の概算 (model-1, $H_D=15.0m$, 消波工設置, 防波堤単位長さあたり)

消波工設置				
工種	単位	数量	単価	金額
1.消波ブロック製作	個	9	971,000	8,739,000
2.消波ブロック据付	個	9	337,000	3,033,000
(円/m)				11,772,000

表-D.6 防波堤の初期整備費の概算 (model-1, 防波堤 1 函あたり及び単位長さあたり)

工種	単位	数量	単価	金額
1.ケーソン製作工				
ケーソン製作用台船係留	回	1.00	5,354,000	5,354,000
ケーソン製作用台船運転	式	1.00	66,851,000	66,851,000
ルーフィング敷設	m ²	375.00	1,000	375,000
支保組立組外	m	80.00	8,000	640,000
鋼製枠組足場架払	m ²	1600.00	3,000	4,800,000
内足場架払	m ²	1200.00	2,000	2,400,000
鉄筋加工組立	t	105.91	140,000	14,827,400
鋼製型枠組立組外	m ²	1600.00	6,000	9,600,000
コンクリート打設	m ³	1513.00	18,000	27,234,000
				132,081,400
2.ケーソン進水据付工				
中詰材投入	m ³	5517.00	4,000	22,068,000
中詰均し	m ²	276.00	2,000	552,000
ケーソン進水	回	1.00	504,000	504,000
ケーソン据付	函	1.00	2,783,000	2,783,000
ケーソンえい航	函	1.00	187,000	187,000
				26,094,000
3.上部工				
支保組立組外	m	80.00	23,000	1,840,000
鋼製枠組足場架払	m ²	400.00	11,000	4,400,000
鋼製型枠組立組外し	m ²	400.00	22,000	8,800,000
伸縮目地	m ²	125.00	3,000	375,000
コンクリート運搬	m ³	997.00	24,000	23,928,000
コンクリート打設	m ³	997.00	17,000	16,949,000
				56,292,000
4.基礎捨石工				
捨石投入	m ³	6255.00	12,000	75,060,000
捨石本均し	m ²	459.00	19,000	8,721,000
捨石荒均し	m ²	842.00	9,500	7,999,000
				91,780,000
5.被覆ブロック工				
被覆ブロック製作	個	56.76	255,000	14,472,973
被覆ブロック据付	個	56.76	151,000	8,570,270
				23,043,243
6.根固ブロック工				
根固ブロック据付	個	15.00	335,000	5,025,000
				5,025,000
(円/函)				334,315,643
(円/m)				22,287,710

付録E

経済性評価に及ぼす社会的割引率の感度分析

現行指針²⁸⁾では、一般的に用いられる割引率として $r=0.04$ が標準値として示されている一方、過去の国債の実質利回りを踏まえた参考値として、 $r=0.01$ 及び 0.02 も併記されている。そこでここでは、割引率を $0.01 \sim 0.04$ の範囲で変化させ、経済性評価に及ぼす影響を検討した。

図-E.15に示した対策実施時期別の評価指標 V について、割引率を変えて感度分析を行った評価結果を図-E.1～図-E.4に示す。4.2(4)で示した通り、 $r=0.04$ の場合、将来に発生する被害回避額の割引現在価値は相対的に小さく評価され、特に波高増大割合が相対的に小さい $r_h=0.1$ 及び $r_h=0.2$ のケースでは、補強対策の評価指標 V が負値となり、補強対策の経済性が指標上は明確に示されない結果となった。

一方、 $r=0.01$ や $r=0.02$ のように割引率を低く設定した場合、将来便益の割引現在価値が相対的に大きく評価され、 V は増加する傾向を示した。特に $r=0.01$ では、 $r_h=0.2$ のケースにおいても V が正値となる対策実施時期が存在することが確認された ($t_m=0 \sim 20$ 付近)。

また、補強対策を実施する場合について、実施時期 t_m を境に、対策実施前 ($t < t_m$) と実施後 ($t \geq t_m$) の被害額に分けて整理した結果を、図-E.5～図-E.8に示す。 $r=0.01$ の場合には、 $r=0.04$ の場合と比べて、将来発生する被害額が現在価値として大きく評価されるため、実施時期が遅れるほど対策前の被害額が急増する傾向が顕著となる。これにより、割引率の違いが評価指標に大きな差を生じさせていることが確認できる。

これらの結果は、社会的割引率の設定が補強対策の経済性評価に大きな影響を及ぼし、割引率の違いによって意思決定の方向性が変わり得ることを示唆している。現在価値評価では、被害発生時期が将来にあるほど評価額が低下するため、波高増大（すなわち被害増大）の程度が相対的に小さい場合には、長期的なリスク低減効果が経済性指標に十分に反映されにくい傾向がある。ただし、これは補強対策の必要性そのものを否定するものではなく、割引率を固定した単一指標による評価には、長期的かつ不確実なリスクへの対応価値が過小評価される可能性があることを示唆するものである。

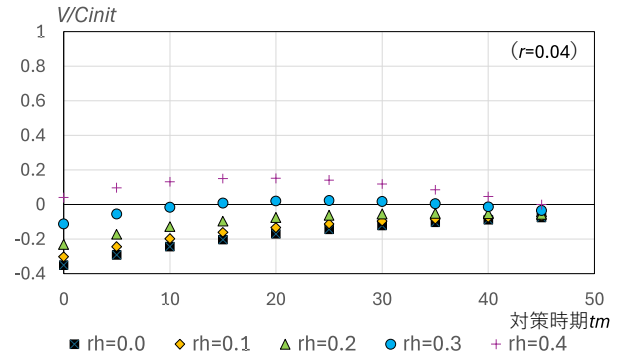


図-E.1 r_h と t_m による評価指標 V の変化 ($r=0.04$)

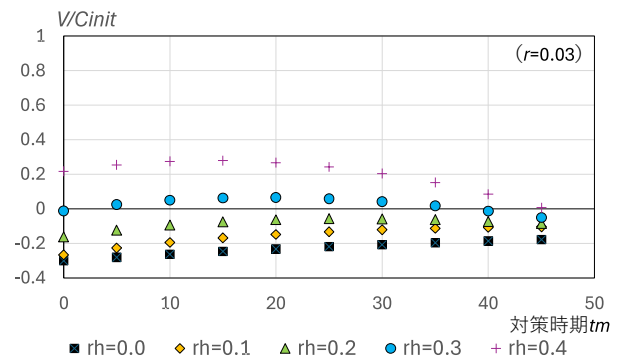


図-E.2 r_h と t_m による評価指標 V の変化 ($r=0.03$)

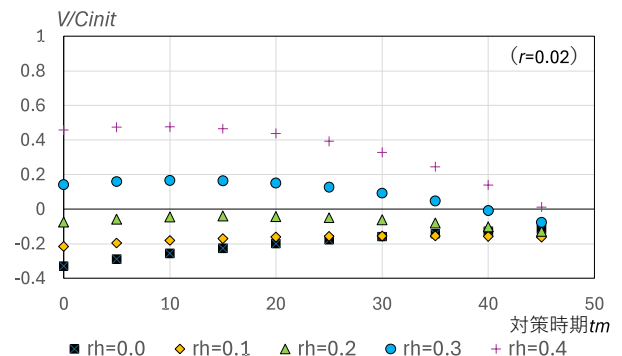


図-E.3 r_h と t_m による評価指標 V の変化 ($r=0.02$)

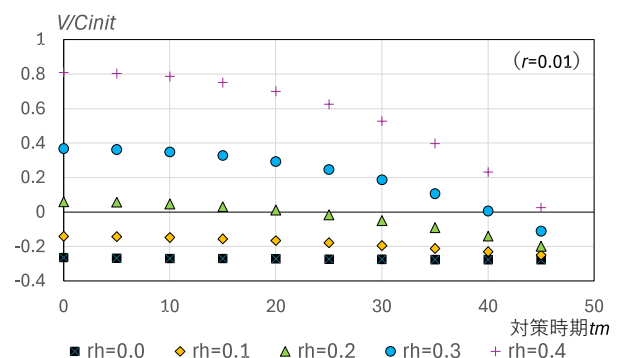


図-E.4 r_h と t_m による評価指標 V の変化 ($r=0.01$)

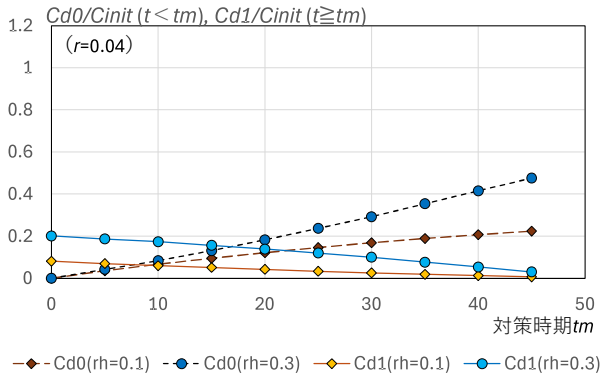


図-E.5 t_m による $C_{d0} (t < t_m)$ と $C_{d1} (t \geq t_m)$ の変化 ($r=0.04$)

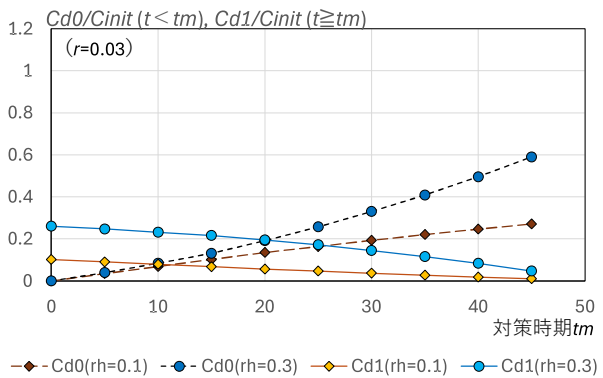


図-E.6 t_m による $C_{d0} (t < t_m)$ と $C_{d1} (t \geq t_m)$ の変化 ($r=0.03$)

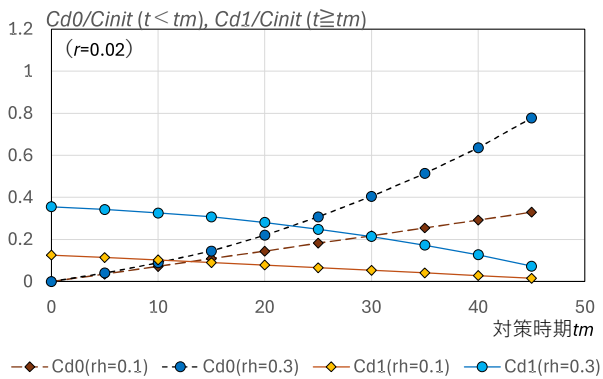


図-E.7 t_m による $C_{d0} (t < t_m)$ と $C_{d1} (t \geq t_m)$ の変化 ($r=0.02$)

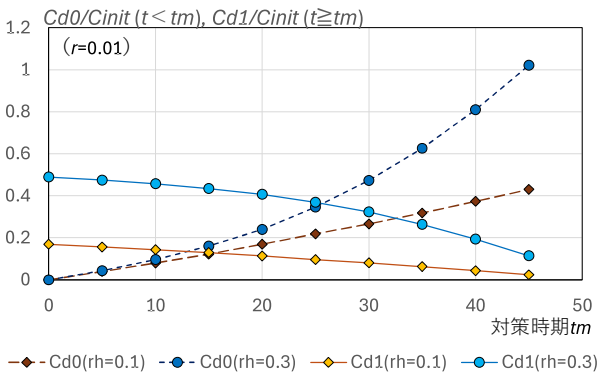


図-E.8 t_m による $C_{d0} (t < t_m)$ と $C_{d1} (t \geq t_m)$ の変化 ($r=0.01$)

国土技術政策総合研究所資料

TECHNICAL NOTE of NILIM

No. 1346

March 2026

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-46pr@gxb.mlit.go.jp

気候変動に伴う作用条件の変化に対する既存防波堤の改良に関する意思決定問題における応答曲面法の適用