

(56) 応答曲面法を用いた港湾施設群の安定性のスクリーニング手法に関する研究 ～ケーソン式防波堤の滑動・転倒安定性への試行的適用～

宮島 正悟¹・宮田 正史²

¹正会員 京都大学経営管理大学院 特定教授 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

E-mail: miyajima.shogo.6z@kyoto-u.ac.jp

²正会員 京都大学経営管理大学院 客員教授 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

E-mail: miyata-m92y2@mlit.go.jp

近年、気候変動に伴う自然災害の激甚化に関する指摘がなされている。そのような自然条件が変化する中で、国の経済や国民生活にとって重要な基盤である港湾のインフラストラクチャ（港湾インフラ）の機能を継続して確保するためには、港湾内に多数存在する施設群において条件変化した場合であっても所用の性能が確保されるか検証することが不可欠であり、そのためには簡易かつ俯瞰的に把握するための手法が必要となる。本研究では、ケーソン式混成堤を対象として、設計段階において性能を判断する指標をあらかじめ作成し、維持管理段階で活用するフロントローディング型のアプローチを提案する。

Key Words: port infrastructure, composite breakwater (caisson type), ratio of action and strength, response surface, flont loading

1. はじめに

港湾機能を支える防波堤や係留施設などの港湾のインフラストラクチャ（以下、「港湾インフラ」）は、50年等の長期に及ぶ設計供用期間にわたり必要な性能を発揮することが求められ、そのために、計画・調査・設計・施工・維持管理等が的確に行われる必要がある¹⁾。

これまで、維持管理の効率化・高度化を目指して、多くの研究がなされてきた。その中で、港湾インフラに対するマネジメントの概念²⁾や維持管理の基本となる維持管理計画策定の支援³⁾などの研究による知見の蓄積を踏まえて、維持管理計画書の策定⁴⁾と維持管理が行われている。また西岡ら⁵⁾は、長期間性能を発揮するために、設計・施工・維持の各段階間での連携や情報伝達の必要性を指摘した。現行の「港湾の施設の技術上の基準・同解説」⁶⁾（以下、「港湾技術基準」）でも、これと同様の考え方に立ち、港湾インフラの計画、調査・設計、施工、維持、災害復旧の各事業段階間での情報の適切な伝達を求めている。

一方で近年、気候変動に伴う将来的な平均海水面の上昇や自然災害の激甚化の指摘がなされている。例えば、

国連の気候変動に関する政府間パネル（IPCC）が2021年に発表した報告書⁷⁾によれば、今後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の上昇が0.63～1.01 mに達する（1995～2014年の平均海面水位との比較）と予測されている。

このような自然条件の変化は、新設・既設に関わらず、港湾構造物の性能照査における設計条件の変更につながる可能性があるものである。港湾内に多数の施設が広がる港湾インフラの機能を継続的に確保するためには、上記のような設計条件の変化に対する性能確保の検証が不可欠となる。しかし、現状の維持管理計画書や事業段階間の情報伝達においては、設計条件の変化への対応について明示されていない。また、多数の施設に対する性能照査を行うことは大きな負荷を伴うものであり、特に、想定される設計条件が上記IPCCの予測のように幅のある数値で示される場合にはその負荷は非常に大きいものとなる。そのため、詳細検討を実施する前に何らかのスクリーニングが求められる。

そこで本研究においては、ケーソン式混成堤（以下、「防波堤」という。）を対象として、気候変動に伴う設計条件の変化に対して簡易かつ俯瞰的に評価する手法と

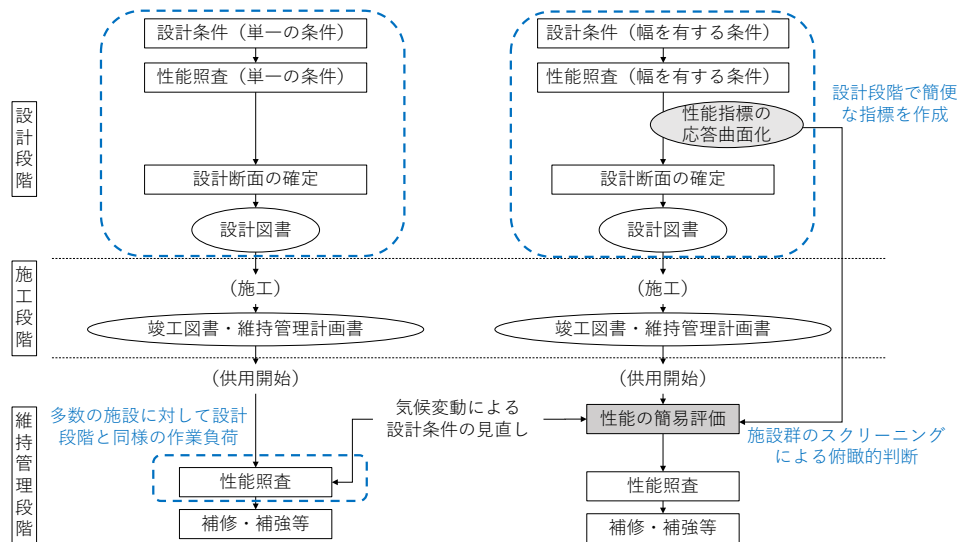


図-1 設計照査の現状と提案手法

ともに、それに基づくスクリーニング手法を提案する。

2. 防波堤の設計主要因子と作用耐力比の関係

(1) 維持管理段階における課題と提案の骨子

現状の港湾施設の設計は、図-1の左側に示すとおり、設計時点の限られた情報と設計基準で定められた単一の設計条件に基づき性能照査を行うのみである。そして、施工後に港湾管理者に引き渡されると、設計図書、竣工図書および維持管理計画書に詳細情報が格納された状態で維持管理が始まる。ここで、維持管理段階で、気候変動による設計条件の見直しが発生した場合を考えると、膨大な施設群の中から補強の優先度を評価するためには、全施設の設計情報を収集した上で、各施設の安定計算を実施する必要がある。元々の設計が単一の条件に基づくものであるため、この段階での作業は非常に負荷・コストがかかることになる。設計条件の見直しは気候変動の進展状況に応じて不可避となる可能性が高く、効率的な対応手法を構築しておく必要がある。

本課題に対して本研究で提案する手法は、図-1の右側に示すように、維持管理段階で簡易に評価が可能となるよう、そのための指標を設計段階で作成し、維持管理段階でリアルタイムに判断に使えるよう準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、まず設計段階では、将来の気候変動の影響による設計条件の変化を見越し、幅のある条件設定とする。設計断面の設定は、従来どおりの単一の設計条件に基づき決定するが、作用耐力比(安全率)を幅のある設計条件に対応して算出しておく。次に、その結果を用いて、作用耐力比を目的変数とした応答曲面関数をあら

かじめ構築する。応答曲面関数の説明変数は、性能評価指標に大きな影響を及ぼす変数を選択する。説明変数としては、将来外力レベルが変化する可能性がある設計条件(例えば、波高、周期および平均海水面の増加)とする。さらに、材料劣化や断面変状(沈下等)により耐力の低下に繋がる因子も加えることもできる。そして、維持管理段階で気候変動に伴い設計条件を見直しする場合、あらかじめ準備しておいた応答曲面関数を利用することで、施設の性能評価を簡便かつ即座に行うことができる。多数の施設でこの性能評価の準備をしておけば、同じ指標に基づく施設群の性能評価が可能となり、アセットマネジメントの効率化に繋がる。

以上のように、この枠組みでは、設計段階で作業負荷がかかるものの、維持管理段階での性能評価を容易かつリアルタイムで実施できることになる。なお、設計段階での性能評価のための応答曲面関数化は、様々な設計条件や設計変数の不確実性に対する構造ロバスト性(冗長性)の評価にも適用可能である。

(2) 防波堤の設計照査における適用例

a) 設計照査における主要因子の抽出

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に関する照査が求められる¹⁾。本研究においては、気候変動に伴う影響の把握を行うこととし、変動波浪に対する滑動と転倒を対象を絞って検討することとする。

滑動、転倒のそれぞれにおいて一般的に用いられる照査手法から、作用耐力比を算出する際に影響する因子を網羅的に抽出して図-2に示す。図より、抵抗項(R)と荷重項(S)に挙げられた項目に影響する因子のうち、観測・調査・試験によって設定する因子(すなわち自然条

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 wl		浮力 P_B	水平波力 P_H
	波長 L		揚圧力 P_U	
波高 H_D			堤体の重量 W	
		設置水深 h	摩擦係数 f	
		堤体の諸元		
		堤体底面と基礎との摩擦係数 f		

図-2 防波堤の設計における因子の関係¹⁾を基に作成

件に関する因子)は、潮位、波長、波高の3つとなる。本研究ではこれら3つの因子を主要因子として以後の検討を行う。

b) 作用耐力比の算出

ここでは、モデル断面を対象に作用耐力比を算出する。既往研究⁷⁾を参考に設定したモデル断面の主要諸元を表-1に示す。

前節で抽出した潮位(設計においては潮位偏差をいう)、波高(同じく有義波高をいう)及び波長(検討においては周期と読み替える)の3つの因子の数値を変えて、抵抗項、荷重項を求め作用耐力比を算出する。因子の変化の幅については、対象モデルの設計条件となる潮位、波高、周期の値を基本として、気候変動に伴って50年後までに波高と周期は最大(最悪のケースとして)±50%の範囲で変化すると想定した。また潮位は、同様に、最悪のケースとして±1mまで変化すると想定した。

滑動及び転倒の作用耐力比の算出結果の例をそれぞれ図-3、図-4に示す。図においては、波形勾配一定の条件下で周期 T と波高 H の間に $T \propto \sqrt{H}$ の関係があることを用いて、偏差、波高、周期(波高の大きさに応じて定まる周期)の3因子を変化させた場合の作用耐力比との関係を3次元グラフ上にプロットしている。作用耐力比が1.0を超えると滑動及び転倒の可能性が高まることを意味する。対象モデルの設計条件(図中の▲)に対して、想定される因子が変化する場合も併せて例示している(図中の+)

このように、あらかじめ3因子と作用耐力比の関係を求めておくことで、因子の変化に伴う作用耐力比の値だけでなく破壊モードについても想定でき、詳細検討の要否をリアルタイムで判断できる。

c) 応答曲面の作成

図-3及び図-4に示した3つの因子の変化に伴う作用耐力比(滑動、転倒)への影響を整理し、図-5に示す。図では、潮位、波高、周期、それぞれの因子のみを変化させた場合の作用耐力比を示している。図より、前項で見たように、波高を変えた場合の作用耐力比の値の変化が

表-1 対象モデルの主要諸元

	対象モデル
設計潮位 (H. W. L.)	DL+2.8m
前面水深	DL-12.0m
海底勾配	1/30
堤体幅	18.5m
底板幅	18.5m
堤体天端	DL+8.0m
上部工境界	DL+3.0m
マウンド天端高	DL-9.0m
単位体積重量(上部工)	22.0kN/m ³
単位体積重量(ケーソン+中詰)	22.0kN/m ³
堤体とマウンドとの摩擦係数	0.6
設計波高	7.5m
設計周期	9.0s

【凡例】

- : 作用耐力比 ≤ 1.0
- : 作用耐力比 > 1.0
- ▲ : 設計条件
($w=0.0m, H_{1/3}=7.5s$)
- + : 因子変化例
($w=0.5m, H_{1/3}=9.0s$)

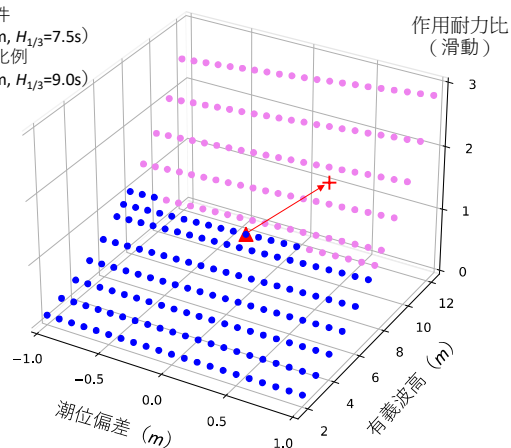


図-3 3因子を変化させた場合の作用耐力比(滑動)

【凡例】

- : 図-3に同じ

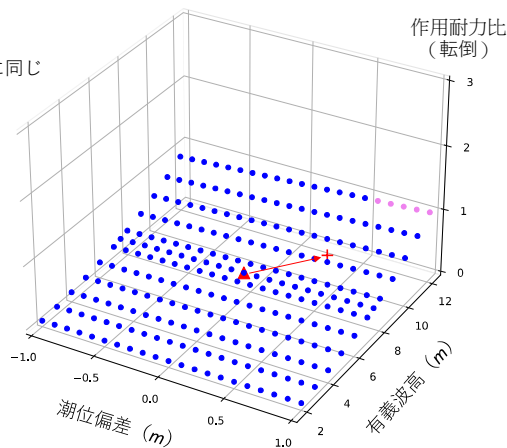


図-4 3因子を変化させた場合の作用耐力比(転倒)

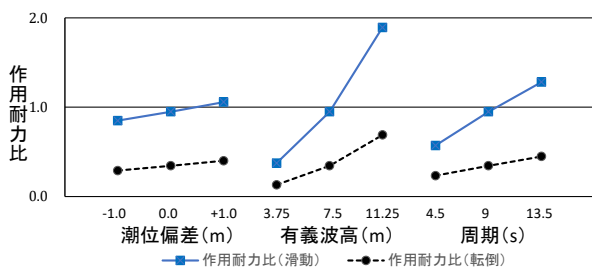


図-5 作用耐力比に対する各因子の影響度合

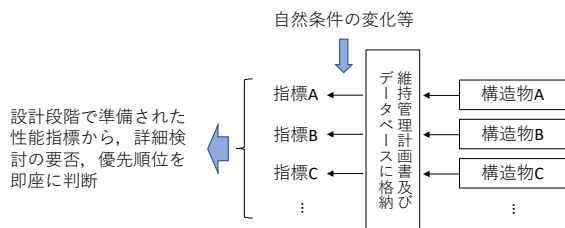


図-6 3 維持管理段階における応答曲面の活用

最も大きく現れていることが分かる。

図-3～図-5 に示した 3 因子と作用耐力比との関係から、3 因子と作用耐力比との関係を重回帰分析等により応答曲面関数化しておけば、3 因子の変化から作用耐力比を算出することが可能となる。

3. 維持管理段階における応答曲面の活用

前章では、潮位、波高、周期の 3 因子を変えた場合の作用耐力比について比較し、応答曲面の生成について述べた。維持管理段階において、仮に自然条件の変化等の要因から設計条件の見直しの検討が必要となる場合には、多数の施設群に対しても、生成した応答曲面を用いることで指標とする作用耐力比の値によって俯瞰的に評価することができ、詳細な検討を必要とする構造物の選定を即座に行うことができる(図-6)。応答曲面の生成は、構造物新設時の設計段階に限らず、既設構造物の補修時や再照査時に行うこともできる。

港湾構造物の場合には、設置者が国、管理者が都道府県等の港湾管理者というケースが多く、現状では、維持管理段階で設計条件が変化する状況となる場合の対応が明確にされていない。そのため、本研究で提案するように設計段階で性能を判断する指標を作成して維持管理段階で使えるようにしておくことは、港湾管理者の立場から詳細検討の要否を容易に判断するための材料を提供する重要な対応であると考えられる。また、設計条件の変化に対して構造物の安全性がどのような影響を受けるかについても、詳細な検討を行う前に把握できる点で有用である。

4. おわりに

本研究においては、防波堤を対象として、海面水位上昇のような設計条件の変化に対して、設計段階で簡便な指標を作成し、維持管理段階で用いる手法を提案した。指標として、作用耐力比(滑動、転倒)を想定し、性能照査の主要因子を変化させて作用耐力比に及ぼす影響の程度を比較するとともに、応答曲面の生成と維持管理段階での活用について述べた。

防波堤に比べて複雑な構造物に対しても、同様のアプローチは可能と考える。例えば有限要素法(FEM)やフレーム計算を必要とする性能照査についても、少ない検討条件であるとしても作用耐力比の応答曲面を把握しておくことで、自然条件の変化の可能性に対する港湾インフラ側での緊急度合いについての指標を持つことができる。このような作業を通じて、自然条件の変化に対してロバストな港湾インフラの整備につなげることができる。と考える。

謝辞: 本研究を進めるに当たり、検討対象施設の整備関係者から、設計条件等に関する情報提供をいただいた。また、当寄附講座の関係者から研究にあたっての貴重な示唆を得た。ここに深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 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.29-32, 2018.
- 2) 高橋宏直, 横田 弘, 岩波光保：港湾施設のアセットマネジメントに関する研究－構造性能の低下予測とアセットマネジメントの試行例－, 国土技術政策総合研究所研究報告, No.29 号, p.84, 2006.
- 3) 加藤絵万, 岩波光保, 横田 弘：棧橋のライフサイクルマネジメントシステムの構築に関する研究, 港湾空港技術研究所報告, Vol.48, No.2, pp.3-35, 2009.
- 4) 国土交通省港湾局：港湾の施設の維持管理計画策定ガイドライン, 2015 (2020 一部変更), <https://www.mlit.go.jp/kowan/kowan_fr5_000051.html> (入手 2022.5.20).
- 5) 西岡悟史, 井山 繁, 藤井 敦, 宮田正史, 坂田憲治, 高野向後：港湾分野における設計・施工・維持の連携強化方策に関する基礎的検討, 国土技術政策総合研究所資料, No.932, p.50, 2016.
- 6) 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).
- 7) 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.