

技術紹介 6 消波ブロック被覆防波堤の信頼性更新に関する基礎的検討

三上 康光
MIKAMI Yasumitsu
港湾・空港事業部
港湾・空港第一部



本稿は、防波堤ケーソンの安定性を消波ブロックの沈下量と関連付けて評価する手法について述べる。本手法は、信頼性解析の枠組みを利用し、特にブロック沈下による被害が広範囲に及ぶ防波堤ケーソンの対策の優先順位を決定するものである。本手法で用いる安定性能指標は、ケーソンの滑動、転倒、支持力破壊モードの信頼性解析に基づく破壊確率 (pf) である。また、支持力問題を解くための信頼性解析手法として、簡易ビショップ法に基づく応答曲面法の利用とその適用性についても述べる。

キーワード：消波ブロック、防波堤の安定性、破壊確率、応答曲面法、支持力、対策優先度の決定、簡易ビショップ法

1.はじめに

防波堤の消波ブロックは、防波堤の堤体に作用する波力の低減効果を期待して設置される。しかし何らかの要因でブロックの沈下が生じると、堤体に作用する波力が増大し防波堤の安定性に大きな影響を与えることが知られている(高橋(2000)¹⁾)ことから、消波ブロック被覆防波堤の設計では、消波ブロックがケーソン天端まで被覆されていることを前提としている。防波堤の維持管理では消波ブロック天端の沈下量に着目した定期点検が実施され、a-dの診断指標に基づく評価を行っている。

台風や低気圧の通過時において、ブロック沈下等の被災が長い延長にわたって生じることが想定され、その場合には復旧優先順位の策定が必要となる。この際、ブロックの沈下量や上述した点検結果の分類に基づく定性的な評価のみに基づいて策定する。しかし本来は、ブロックの沈下量に基づいて設計波に対するケーソンの安定性を定量評価し、その結果を防波堤延長の各区分において相対比較した上で策定することが望ましいと考えられる。

2.研究目的

本研究では、長い延長を有する消波ブロック被覆堤のブロック沈下時における補修優先順位の策定に資するよう、ブロック沈下量と防波堤の安定性をあらかじめ把握しておくことで、点検後に防波堤延長方向の安定性を簡易に相対評価する枠組みの検討を行った。ケーソンの安定性は、滑動、転倒、支持力などの各破壊モードの信頼性解析と、将来の設計パラメータ更新への対応性を考慮した破壊確率 (pf) を用いて評価する。また、簡易ビショップ法に基づく支持力安定性評価に対する信頼性解析手法として応答曲面法 (RSM) の適用可能性を検討した。

3.研究方法

3-1.消波ブロックの沈下による波力増加を考慮した信頼性解析

実在する消波ブロック被覆堤をモデル化し、断面形状や構造諸元を図-1および表-1に示した。この防波堤は、同じ延長上に6つの断面(A~F)があり、設計水深はAからFの順に深くなっている。

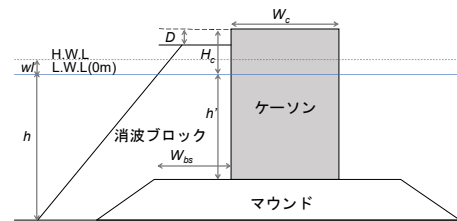


図-1 解析に使用した断面の模式図

表-1 各断面の設計条件(特性値)

記号	単位	断面No.					
		A	B	C	D	E	F
前面水深	h	9.5	9.5	12.0	14.0	15.5	15.5
設置水深	h'	7.0	7.0	8.5	10.0	10.0	10.0
ケーソン高	h_c	5.0	5.0	5.0	6.0	6.0	6.0
ケーソン幅	W_c	17.0					
肩幅	W_{bs}	22.0	15.0	8.5	8.0	11.3	11.3
設計波高	H_D	9.1	9.1	9.6	10.8	11.8	11.8
有義波高	$H_{1/3}$	7.1	7.1	7.4	8.2	8.1	8.1
ブロック層分の厚さ	D_B	2.20	2.40	2.55	2.75	2.75	3.00
摩擦係数	μ	0.6					
ケーソン単重	γ_c	22.0					
周期	T	13.1					
潮位	wl	1.5					

表-2は信頼性解析に使用した確率変数とその統計的性質を示す。これらの統計的性質は、「港湾の施設の技術上の基準・同解説(2018)」²⁾(以降、技術基準)における部分係数のキャリブレーションに使用されたものと同様である。また、各確率変数は互いに独立であると仮定している。

表-2 検討に用いた確率変数と統計的性質

確率変数	記号	bias (平均値の偏り) (=平均/特性値)	COV (変動係数)	確率密度関数
摩擦係数	μ	1.06	0.15	正規分布
ケーソン単重	γ_c	1.01	0.03	
潮位	wl	1.00	0.20	
設計波高	H_D	0.84	0.14	
合田式の精度	E_M	0.84	0.10	

信頼性解析を適用するにあたっては、表-2に示されている確率変数を用いて、波力に対するケーソンとマウン

ド間の滑動の破壊確率 (pf) および港内側のケーソン下端を支点とする転倒安定性の破壊確率 (pf) をモンテカルロシミュレーション (MCS) で評価した。

3-2. 支持力の破壊確率算定に対する応答曲面法の適用について

技術基準において、防波堤の支持力の照査は簡易ビショップ法に基づく円弧すべり解析を適用し、性能照査を行う。

簡易ビショップ法において作用耐力比 S/R を求めるには収束計算が必要である。MCS を用いて破壊確率を求める場合、全試行回数に対して S/R が 1.0 を超える場合の数を計算する必要があるが、その計算には時間を非常に要する。このため、防波堤の支持力照査について、あらかじめ応答曲面法 (RSM) を用いて確率変数と S/R の関係を定式化した上で MCS を適用することを試みた。

RSM を用いて近似式を求める場合、平均値 μ と標準偏差 σ を有する確率変数を $\mu \pm n\sigma$ の範囲で変化させて、目的変数を定式化するのが一般的である。n は 1~3 の範囲で選択することが多いが、ここでは $n=3$ とした。目的変数は、支持力に関する S/R とした。支持力照査には用いない摩擦係数 μ 以外の確率変数 (4 つ) を、各断面諸元を固定した条件で変更し、各断面に対して $3^4=81$ 通りの支持力に関する S/R を計算した。

応答曲面には、Tan ら (2013) に基づき二次多項式を適用した。応答曲面の式は以下のとおりである。³⁾

$$f = a + \sum_{i=1}^4 b_i X_i + \sum_{i=1}^4 c_i X_i^2 + \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1, i \neq j}^4 d_{ij} X_i X_j \quad (1)$$

式 (1) において、 X_i と X_j はそれぞれ i 番目と j 番目の確率変数を表し、多項式係数は a, b_i, c_i, d_{ij} で示される。 $X_1 \sim X_4$ の値は、それぞれ γ_c, Wl, H_D, E_M に対応する。

各断面について、ブロック沈下がない場合、ブロック沈下が 1 層、2 層の 3 ケースについて応答曲面を作成した。

4. 研究結果

信頼性解析で得られた全防波堤断面のブロック沈下量と破壊確率 pf の関係を図-2 にまとめた。このような関係をあらかじめ整理しておくことで、点検結果に応じて既設防波堤の安定性を定量的かつ迅速に評価することができる。例えば広範囲にブロック沈下が発生した場合、設計波に対する破壊確率が高い F 断面を優先的にブロック復旧するといった判断が可能となる。

また、防波堤の建設期間が長いと、設計条件が異なる断面が混在するため、既設断面の最新の安定性評価結果はすべての断面で同じとは限らない。図-2 に示すように、ブロック沈下がない場合でも、断面ごとに安定性は異なるため、防波堤の全長にわたって評価することが特に重要である。

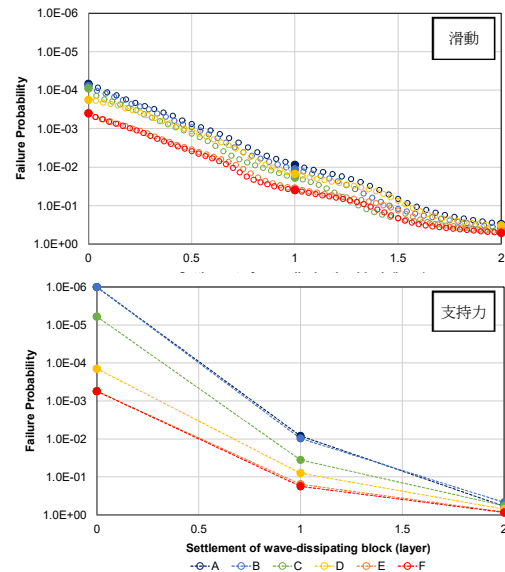


図-2 各断面におけるブロック沈下量と pf の関係

5. まとめ

本稿では、長い延長を有する消波ブロック被覆堤のブロック沈下時の補修優先順位の策定に資するよう、ブロック沈下量と防波堤の安定性をあらかじめ把握しておくことで、点検後に防波堤延長方向の安定性を簡易に相対評価する枠組みの検討を行った。特に広範囲にブロック沈下被害がある場合には、対策優先順位を決定するための有効な手法であることが示された。

当該手法を用いることにより、広範囲にブロック沈下が発生した場合、同じブロック沈下量を有する断面においても、定量的かつ迅速に補修優先順位を策定することが可能となる。

また、長い延長を有する防波堤の場合、既設断面の最新の安定性評価結果は断面ごとに異なる場合がある。最新の設計条件に基づき、現在の防波堤の性能を全長にわたって評価し整理しておくことは極めて重要である。

現在、港湾局において、気候変動の影響を考慮した高潮・波浪推算のデータベースを構築し、全国の各港の沖波条件を設定中である。このような外力諸元の変更に際しても、定量的な維持管理手順を提案可能な本検討手法は、極めて有効な検討方法であると言える。

参考文献

- 1) 高橋重雄, 大木泰憲, 下迫健一郎, 諫山貞雄, 石貫国朗: 台風 9 9 1 8 号による護岸の被災とその対策に関する水理模型実験, 港湾技研資料, No.973, 2000
- 2) 日本港湾協会: 港湾の施設の技術上の基準・同解説, 2018
- 3) Tan X.H., Shen M.F., Hou X.L., Li D., Hu N.: Response surface method of reliability analysis and its application in slope stability analysis Geotech.Geol. Eng, 31(4), pp.1011-1025,2013