

消波ブロック被覆堤の期待補修費を考慮した維持管理手法に関する研究

A Study on Maintenance Methods Considering Expected Maintenance Costs of Caisson Breakwaters Covered with Wave-dissipating Concrete Blocks

宮田正史¹・熊谷健蔵²・辻尾大樹³・大久保陽介³

Masafumi MIYATA, Kenzo KUMAGAI, Daiki TSUJIO and Yosuke OKUBO

In this study, we propose a new method for caisson breakwaters covered with wave-dissipation concrete blocks, which enables to evaluate cumulative maintenance costs including both ordinary maintenance costs (to raise work level of the blocks) and disaster recovery costs due to an extreme wave load. The method is based on a statistical model (Monte Carlo Simulation) calculating sliding distances of a caisson during its working life. This method can be effectively utilized for planning maintenance strategies, considering how the ordinary maintenance criteria for the settlement of the blocks affects the cumulative maintenance costs including information on both expected value and the its variations.

1. はじめに

消波ブロック被覆堤の維持管理では、経年的に進行する消波ブロックの天端の沈下が波力の増大を招き、大規模被災の発生に繋がることから、本来、ブロックの積み増し等の補修時期を適切に定め、ある一定の施設の管理水準を確保するように継続的に維持管理を行っていく必要がある。特に、予算制約が厳しい中、補修の優先度が高い施設・区間を定量的に評価・抽出し、計画的に補修を行うことが必要とされる。しかしながら、一般的には、防波堤は再現期間50年を想定した設計波高に対して断面が決定されるため、日常的に求められる防波堤の機能としての港内の静穏性は十分に確保されていることなどの理由により、ブロックの沈下等の軽微な防波堤の補修への対応は積極的には為されていないのが現状である。

以上の背景のもと、本研究では、まず初めに、消波ブロック被覆堤の建設後におけるブロック変状調査の事例を示し、現況を把握するとともに、維持管理上の課題や今後の方向性などについて概説する。その上で、消波ブロック被覆堤の維持管理における消波ブロック天端の沈下に対する補修基準（ある補修基準としての沈下量に達したら消波ブロックを嵩上げして原断面に戻す）に着目し、供用期間中のブロック補充費と災害発生時の復旧費の累積補修費について算出することにより、適切な維持管理上の消波ブロックの補修基準について検討することができる手法の基本的な考え方を提案する。

2. 消波ブロック被覆堤の建設後の変状調査の事例

消波ブロック被覆堤の変状調査結果の事例を図-1に示

す。本防波堤は、約40年前に混成堤として当初建設されたものであるが、防波堤の前面地盤の洗掘等が激しかったため、約20年前にケーソン前面に消波ブロックを追加した経緯を有する断面である。図中には、消波ブロックの外形線として消波ブロックを設置した当時の設計断面、および近年実施したナローマルチビームと3Dレーザーミラースキャナーによる測量結果を示している。なお、測量結果については、防波堤断面方向に2m間隔のデータとしてケーソン1函分のデータを表示している。本図より、消波ブロック部の断面が大きく欠損し、水面上の消波ブロックが2~4m程度沈下していることが分かる。

本研究では、このような消波ブロックの経年的な変状のうち、波浪作用による消波ブロック天端の沈下を主たる維持補修の対象とする。これは消波ブロック被覆堤において消波ブロックの天端が下がると、波がケーソンに直接作用することにより波力の増加を招き、さらに部分被覆状態になるため衝撃砕波力が発生する可能性が高くなることから、防波堤の安定性の低下に大きな影響を及ぼすと考えられるためである。また、消波ブロックが沈下した状態を放置した場合、増大した波力がケーソンに作用することから、設計波以上の大きな波が作用した際にケーソンの被災程度（変形量）は、ブロックが沈下していない状態に比較して、より大きくなると考えられる。

以上の観点から、先述した2mピッチの詳細測量データを用いて、図-2に消波ブロックの海上部分における断面

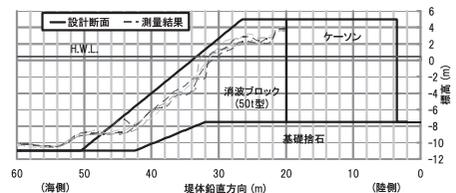


図-1 消波ブロック被覆堤の詳細測量結果の事例 (A港)

1 正会員 工修 国土技術政策総合研究所港湾研究部
2 正会員 博(工) パシフィックコンサルタンツ株式会社
3 正会員 修(工) パシフィックコンサルタンツ株式会社

残存率を法線方向の分布として示す。ここで、海上部分の断面残存率は試行的な指標として、HWLより上方の海上部分で消波ブロックが残存している断面積を海上部分の消波工の原断面積で除することにより算出している。この図より、本防波堤では、海上部分における消波ブロックの断面残存率が60%を下回る区間が約200m程度続いている(延長800m~1,000m付近)ことが分かるなど、防波堤延長の中で相対的に耐波安定性が低下している区間が即座に特定できる。現状、消波ブロック被覆堤の維持管理では、スタッフ測量や目視点検の結果に基づき、個々の点検員等が定性的な施設の劣化状況の評価を行っているが、今後は詳細測量データ等を用いた断面情報を用いて、施設の耐波安定性の低下程度を定量化し、経年変化を予測した上で、具体的な補修等の時期や補修内容を検討できる手法の構築が必要であると考えられる。

3. モンテカルロ法による累積補修費の評価手法

本検討では、消波ブロック被覆堤の堤体(ケーソン)の滑動変形量をモンテカルロ法により確率的に評価する手法を用いた。既存の高山ら(2006, 2007)のモデルでは、構造物の設計に対するLCC算出モデルであったため、大規模な被災を受けないような構造物を対象としていた。そのため、被災した消波ブロックの沈下に伴う波力の増大を考慮しているものの、補修費については補修基準を超えた場合のブロック補充費のみを考慮するものであった。本検討では、既存構造物を対象とした補修費を算出するため、供用期間中の補修費として、維持管理で定期的に発生するブロックの補充費と大規模被災が発生した場合の災害復旧費の両者を加算・累積した費用を考慮した。なお、ブロック補充費はブロックを新規製作・据付するとし

て算出し、災害復旧費は被災時の堤体滑動量の関数として定義した(図-3)。災害復旧費のモデル化は、近年15年間の消波ブロック被覆堤の大規模被災時のケーソン(全93函)について滑動量と復旧方法の関係を調査したところ(図-4)、滑動量を港内側のマウンド肩幅で基準化した相対滑動量が0.7程度まではケーソンの据直しは実施されず復旧費は緩やかに増加するが、相対滑動量が0.7程度を超えるとケーソンの据直しが必要になる事例が急増し、工費も急激に増大するという調査結果に基づいている。参考として図-3にF港の被災事例(全53函)をもとに相対滑動量と復旧工事費の関係をプロットして示した。なお、F港ではケーソンの新規製作による復旧は行っていないが、混成堤の被災事例では相対滑動量が3程度を超えるとケーソンの新規製作による復旧が急増しているため、復旧工費の上限はケーソンの新規製作の工費とした。

図-5に本検討での補修費算出の考え方を示す。堤体が被災して累積相対滑動量(=累積滑動量/港内側の肩幅)が0.1を上回った場合には災害復旧として、図-3に示した復旧工事費を用いて補修費を算出する。相対滑動量が0.1未満の場合には補修基準(日常的なブロック天端の管理基準)を上回って沈下した場合は、ブロックの沈下補充費を算出する。本検討ではブロック天端の日常的な補修基準としてブロック天端の沈下量(0.5個・1個・1.5個・2個分)を指標として設定し、各補修基準を採用した場合の供用期間中に発生する累積補修費への影響を評価した。

本研究で用いた補修費算出モデルの計算フローを図-6に示す。まず、沖波確率分布から乱数を用いて年1回の異常波浪を抽出し、波浪変形計算によって構造物設置地点の波浪諸元(波高, 周期)を求める。次に、レーリー分布から1波1波の波浪を抽出し、それぞれの波に対する堤体の滑動量を算出し、1回の異常波浪に対する滑動量を算出

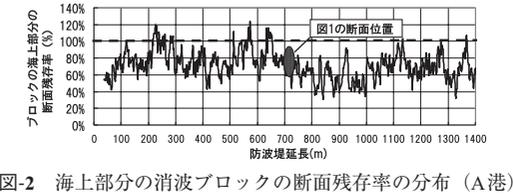


図-2 海上部分の消波ブロックの断面残存率の分布 (A港)

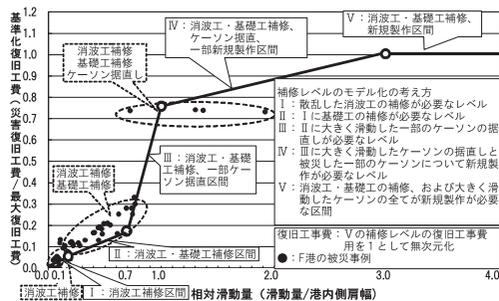


図-3 ケーソン滑動量に対応した復旧工費モデル

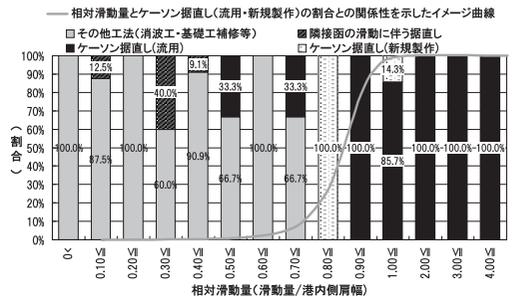


図-4 相対滑動量と復旧工法の関係

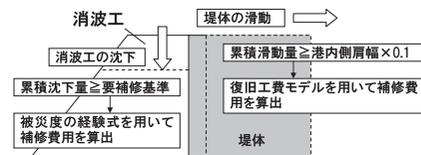


図-5 累積補修費の算出の考え方

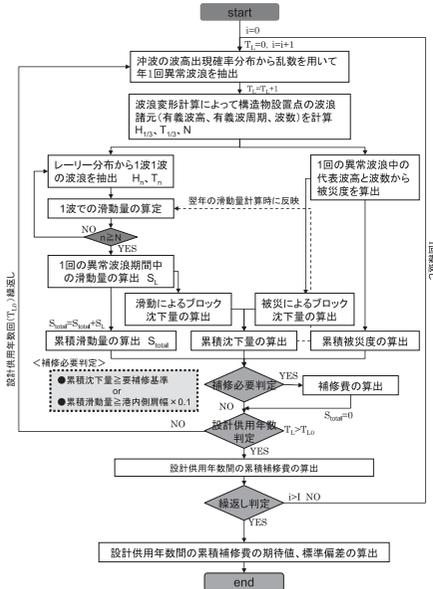


図-6 計算フロー

し、前年までの滑動量に加えて累積滑動量を算出する。滑動したケーソンと消波ブロックの間に生じた空隙によって、消波ブロックが変状すると仮定し、ケーソンの滑動による消波ブロックの沈下量を算出する。

次に、異常波浪期間中の有義波高と波の数から、高橋ら(1998)の式を用いて消波ブロックの被災度(長さ1m当たりの移動個数)を算出する。この時、高橋らと同様に累積被災度を算出する。消波ブロックの被災度から、移動した消波ブロックの体積(空隙も含む)に対応した量だけ消波ブロックの天端が沈下したとして、その沈下量を算出する。そして、ケーソンの滑動と消波ブロックの移動に伴う沈下量を加えて、消波ブロックの沈下量を算出し、前年までの沈下量に加えて累積沈下量を求める。

ここで、累積相対滑動量が0.1を超えた場合には前述のように図-3の復旧工事費を用いて補修費を算出し、累積相対滑動量が0.1未満で累積沈下量が補修基準を上回る場合には消波ブロックの新規製作・据付費を補修費として計上している。なお、累積相対滑動量が0.1~0.7に至った場合は、港内側の捨石マウンドの肩幅を延長する補修を行うため、累積滑動量を0に戻す。同様に、累積滑動量が0.7を超えた場合もケーソン据直しに伴い、累積滑動量を0に戻すことになる。

これを設計供用年数間(50年間)繰返し、さらに50,000回の試行を繰返し、累積補修費の期待値、標準偏差を求めている。

4. 解析結果および考察

(1) 対象断面および解析条件

解析対象はA港防波堤(図-1)およびS港防波堤(図-7)

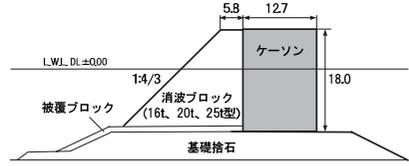


図-7 解析対象断面(S港防波堤, 単位:m)

表-1 解析ケースおよび解析条件

	A港		S港	
	50年確率波浪	偶発波浪	150年確率波浪	50年確率波浪
沖波確率分布	ワイブル分布	ワイブル分布	ワイブル分布	ワイブル分布
裾長さパラメータ	1.14	1.27	1.14	1.27
形状母数(k)	2.0	1.4	2.0	1.4
尺度母数(A)	3.211	3.106	3.211	3.211
位置母数(B)	5.852	3.972	5.852	4.127
波高(m)	12.2	12.2	13.0	13.4
波周期(s)	14.0	17.0	14.5	16.1
波形勾配	0.040	0.027	0.040	0.039
消波ブロック被覆堤時の安全率	1.67	1.55	1.50	1.20
天端高(m)	5.0		6.0	
堤体幅(m)	12.5		12.7	
法面勾配	1:4/3		1:4/3	
消波ブロック種別	50t型(高さ4.155m)		25t型(高さ3.30m) 20t型(高さ3.06m) 16t型(高さ2.83m)	
設計供用年数	50年		50年	
継続時間	2.0時間		2.0時間	
繰返し回数	50,000回		50,000回	

の2断面であり、表-1に各断面に対する解析ケース・解析条件を示す。

A港については、ワイブル分布に従う沖波確率分布として、裾長さパラメータ(50年確率波高/10年確率波高)が1.14である50年確率波、150年確率波および偶発波浪を設定した全3ケースと、裾長さパラメータが1.27である50年確率波を設定したケースを対象とした。ここで、偶発波浪とは平石ら(2008)に従い、50年確率波浪の周期を17sとなるように設定したケースである。これらのケースにより、確率波高の再現年数、偶発波浪による周期の増大および確率分布の裾野形状の相違が累積補修費に及ぼす影響を評価することができる。なお、裾長さパラメータは、極値分布の分布特性を表す指標であり、合田(2002)によると、日本海側など毎年冬季風浪などにより設計波相当の高波が毎年来襲するような港では1.13程度であり、逆に台風来襲時に突発的に高波が発生するような太平洋側の港では1.21~1.24程度とされている。また、計算に用いた沖波波高などの各設計変数の平均値の偏りと変

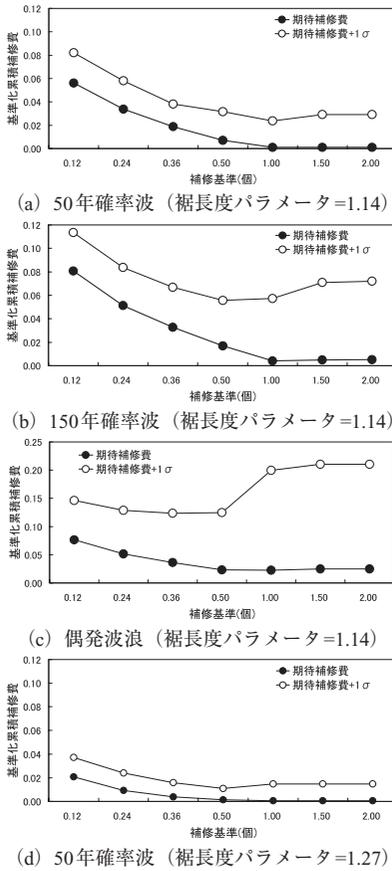


図-8 累積補修費と補修基準の関係

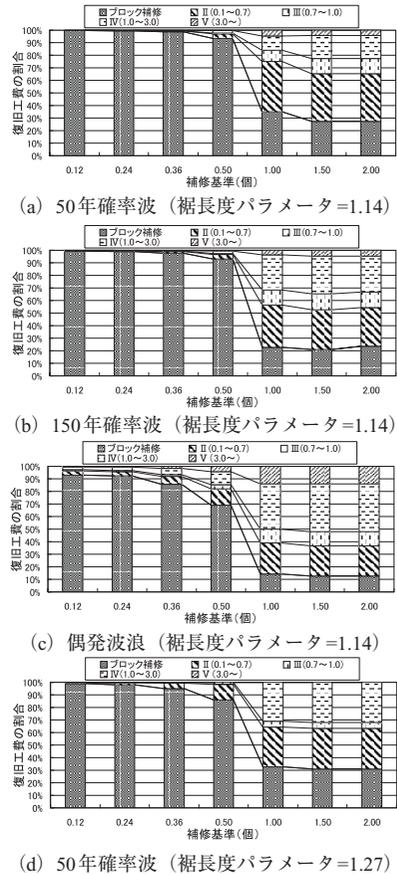


図-9 累積補修費内訳と補修基準の関係

動係数については高山ら (1994) と同じとした。

S港については、ワイブル分布に従う沖波確率分布として、裾長さパラメータが1.27である50年確率波を用いて、消波ブロックの規格(重量)を16t, 20tおよび25tと変化させたケースを解析対象とした。これは、実務設計における消波ブロックの選定は、必要最小重量を最低限満たす規格に加えて、2規格上までの重量のブロックについて経済比較(施工費)を実施した上でブロック重量を決定しているため、必ずしも設計から要求される最低重量に対応するブロックが採用されないことを考慮している。ブロック重量が必要最小重量より大きい場合は、波浪作用による消波ブロックの被災が低減されるため、ブロック重量が累積補修費に及ぼす影響をこれらの解析結果ケースから評価する。

(2) 解析結果及び考察

図-8にA港防波堤の結果として、供用期間中(50年間)の累積補修費の期待値(平均値)と補修基準との関係を示す。補修基準には、0.5個(2.06m)・1個(4.16m)・1.5個(6.23m)・2個(8.31m)に加えて、補修費の傾向を確認するために0.12個(0.5m), 0.24個(1.0m)および

0.36個(1.5m)の場合も併せて示している。なお、累積補修費は、図-3における最大工費(ケーソンの撤去・新規製作)で基準化した補修費として定義している。以下、基準化累積補修費と呼ぶ。また、図-9には、基準化累積補修費の期待値の内訳(日常的なブロック補充, 相対滑動量に応じた図-3に定義した被災レベルII~V)と補修基準との関係を示す。

この結果より、本防波堤では、どの解析条件においてもブロック0.5個~1個分程度で継続的に補修する場合に期待補修費が最小となることが分かる。補修基準を0.5個未満にして頻繁にブロックを補修しても、補修費用が増加するため、過度のブロック補修は合理的ではないことを示している。また、偶発波浪を考慮した場合の期待補修費の増加に及ぼす影響は非常に大きく、波浪周期の増加は著しい被災工費の増大を招くことが分かる。ただし、補修基準を1個以上に緩和しても期待補修費の増加程度は小さいため、次に、期待補修費に累積補修費の標準偏差(σ)を加えて、累積補修費のばらつきを評価する(図-8)。この結果より、例えば150年確率波および偶発波浪の場合は、ブロック0.5個~1個分より大きい補修基準を設定す

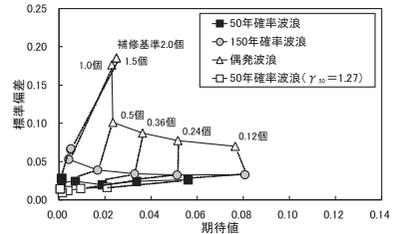
ると標準偏差は急増することが分かる。これは、補修基準の緩和にともない、波力が増大する状態を放置することになり、その結果として防波堤が大規模被災に至り災害復旧費が著しく大きくなるケース（確率）が増加し、補修費が大きくなるためである。この結果は、大規模被災のリスクを低減（コントロール）するためには、日常的な維持管理において、こまめに消波ブロックの補修を行うことの有効性を示唆するものである。

最後に、以上に示した解析結果により算出されたA港防波堤における累積補修費の期待値（平均値）と標準偏差の関係を図-10 (a) に示す。この図より、補修基準の選択や波浪条件（確率分布や確率年）の相違が、累積補修費の期待値とばらつきにどのように影響を及ぼすかについて容易に評価することができる。すなわち、この図において、右上にプロットが移行することは、被災時の累積補修費の期待値と標準偏差がともに増加することを意味するため、被災リスク低減の観点からは望ましくない方向へ施設の状態が移行することになる。反対に、左下にプロットが移行することは、被災リスク低減の観点からは望ましい方向に移行することになる。以上のような観点であらためて評価すると、本検討ケースでは、偶発波浪以外の波浪条件においては、補修基準を1個程度まで緩和しても、期待値は低減する傾向にあり、かつ大規模被災時の復旧工費の増大も抑制されているため、補修基準1個という選択は合理的であると判断される。しかしながら、偶発波浪を考慮した場合には、補修基準0.5個を越え、復旧工費が増大する危険性が著しく大きくなるため、より厳しい補修基準（0.5個程度）の選択に合理性があることになる。

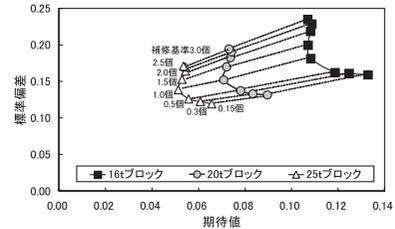
図-10 (b) にS港における同様の図面を示す。この図より、本検討条件では、どの補修基準においても、ブロック重量の増加に伴い期待値および標準偏差は小さくなる事が分かる。これは、ブロック重量を増加させることにより、ブロックの被災が減少し、その結果として大規模被災が発生する確率が低下するためである。例えば、補修基準1個の場合、ブロック重量を16tから25tに変更することで、基準化累積工費の期待値を約0.06低減させることができる。さらに、本断面の場合、ブロック重量の規格を2段階上げることによって、初期工費を約1%程度（基準化累積補修費0.01に相当）低減させることができる。したがって、消波ブロックの規格として必要最小重量よりも大きな規格を採用することは、被災リスクの低減および初期工費の低減の両者に寄与することから、非常に合理的な選択であることが分かる。

5. 結論

本研究では、消波ブロック被覆堤を対象として、プロ



(a) A港防波堤



(b) S港防波堤

図-10 基準化累積補修費の期待値と標準偏差の関係

ック天端の沈下補修基準を変化させて、各基準に対して算出される供用期間中の累積補修費を算出することにより、大規模被災時の復旧工費増大のリスクも考慮した上での適切な維持管理上の補修基準を評価できる手法を提案した。今回の検討事例の解析結果からは、維持管理において、こまめにブロックの沈下補修（ブロック半個～1個程度）を行うことが、期待補修費の最小化及び大規模被災時のリスク低減の観点から有効であることが分かった。また、設計段階の選択として、ブロックを設計上必要とされる最小重量ではなく、それより重い規格とすることが、同様の効果を発揮することが分かった。

なお、今後は、提案手法に基づき、戦略的な防波堤の維持管理をどのように行っていくべきかについて、さらに検討を進めたいと考えている。

参考文献

- 合田良実 (2002) : 設計波高に係わる極値統計分布の裾長さパラメータとその意義, 海岸工学論文集, 第49巻, pp.171-175.
- 高橋重雄・半沢 稔・佐藤弘和・五明美智男・下迫健一郎・寺内 潔・高山知司・谷本勝利 (1998) : 期待被災度を考慮した消波ブロックの安定重量, 港研報告, 第37号, 第1号, pp.3-32.
- 高山知司・鈴木康正・河合弘泰・藤咲秀可 (1994) : 防波堤の信頼性設計に向けて, 港湾技研資料, No.785, 36p.
- 高山知司・辻尾大樹・安田誠宏 (2006) : ライフサイクルコストを考慮した護岸被覆材の最適設計, 海岸工学論文集, 第53巻, pp.856-860.
- 高山知司・辻尾大樹・安田誠宏 (2007) : 消波ブロック被覆堤の変状による波力増大を考慮した期待滑動量算定法の検討, 海岸工学論文集, 第54巻, pp.756-760.
- 平石哲也・平山克也・加島寛章・春尾和人・宮里一郎 (2008) : 偶発波浪荷重による被害例とその特性, 海岸工学論文集, 第55巻, pp.981-985.