

平面的な被災を考慮した消波ブロック被覆堤の維持管理手法の検討

A Study on the Maintenance Strategy of Breakwaters Armored with Wave Dissipating Blocks Considering Uneven Displacement

長尾 毅¹・辻尾大樹²・熊谷健蔵³

Tsuyoshi NAGAO, Daiki TSUJIO and Kenzou KUMAGAI

It is necessary to maintain wave dissipating blocks for the armor of breakwaters properly because settlement of blocks often causes large disaster. Therefore, clarification of correlation between block settlement and breakwater displacement is important for the establishment of effective maintenance strategy. Previous study discusses maintenance strategy of breakwaters armored with wave dissipating blocks on the assumption of uniform displacement of breakwaters, however, uneven displacement of breakwaters is observed in field. This study considers uneven displacement of breakwaters and discusses the maintenance criteria for the minimum repair cost during working life of breakwaters.

1. はじめに

近年、港湾施設において、施設量そのものの増大と相まって、老朽化の進行によって増大が予想される改良・更新コストへの対応が重要な事項となっている。そのため、「港湾の施設の維持管理計画書作成の手引き（増補改訂版）（以下、「手引き」）」（2008）にも示されているように、長期にわたって施設を有効に活用するための予防保全を導入した戦略的な維持管理への転換が進められているところである。

「手引き」（2008）では、それぞれの港湾施設に対する維持管理計画の考え方が示されているが、防波堤（消波ブロック被覆堤）の消波工の維持管理レベルについては、事後保全的な対策の実施を想定した「維持管理レベルⅢ」と設定されている。この理由としては、供用期間中における変状の発生によって部材の性能低下が予想されるものの、変状に対する維持補修の緊急性の判定や予防保全的な対策が困難あるいは不経済であるためとしている。

一方、経年的に進行する消波工の沈下は、衝撃碎波が発生するなどの波力の増大を招き、大規模被災の発生に繋がることから、ブロックの積み増し等の補修時期を適切に定め、防波堤の要求性能を確保できるように、予防保全的な維持管理を行っていくことが必要と考えられる。そのため、消波工の変状によって生じる防波堤の性能低下度について定量的な評価を行い、維持管理コストが最小となる補修基準に基づいた維持管理手法の確立が望まれるところである。そこで、宮田ら（2009）は消波工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工を嵩上げて原断面に戻す）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を算出することによって、維持管理上の消波工の補修基準を適切に設定することができる手法について、基本的な考え方を提案した。

しかし、これまでの防波堤の滑動量解析は、下迫ら（2000）が指摘しているように二次元的な解析であり、法線方向に平均的な滑動量を算出しているため、局所的な被災や平面的な被災の分布状況については考慮されていなかった。そのため、本研究では、法線方向におけるケーソン滑動量の分布のモデル化を試み、消波ブロック被覆堤を対象として、平面的な被災を考慮した補修費を算出し、供用期間中の期待補修費が最小となる維持管理水準を決定する手法を提案する。

2. 平面的な滑動量のばらつきを考慮した被災ケーソンのモデル化

(1) 被災事例からみたケーソン滑動量の分布状況

防波堤の平面的な被災形態については、伊藤ら（1971）が名付けている「蛇行被災」のように、ケーソンの滑動量が防波堤の法線方向に波状に分布する顕著な事例が見受けられる。また、下迫ら（2000）は波高増大や波力増大の影響を考慮した滑動量の平面分布の再現計算を行い、期待滑動量を用いた設計法における防波堤の法線形状の影響について検討している。しかし、長尾ら（2010a）は、大規模被災（1992年～2008年に発生した被災事例のうち、1件当たり1億円以上の復旧工費を要した被災等）の被災状況を整理した上で、滑動量の平面的なばらつきの状況については、必ずしも有義波高の大小だけでは議論できない可能性があることを指摘している。

図-1に、F港における被災事例をもとに、ケーソン1箇

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

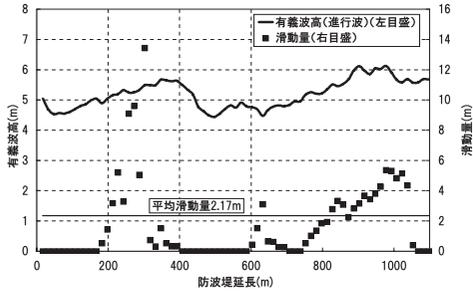


図-1 防波堤法線方向の滑動量と波高分布の一例 (F港)

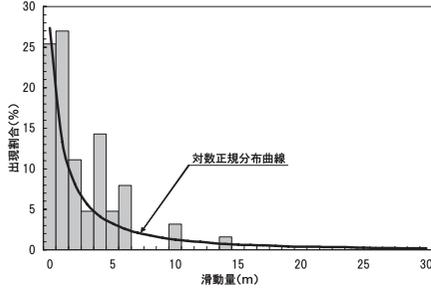


図-2 ケーソン滑動量の出現頻度分布算出の一例 (F港)

毎の滑動量の分布状況と防波堤前面における波高分布を示した。波高分布は平山 (2002) によるブシネスク方程式モデル (NOWT-PARI Ver.4.6c7a) を用いて計算したものである。法線方向において消波工の規格などが異なっている区間があり、必ずしも断面諸元が一樣ではないことから、波高のピーク位置と最大の滑動被災の発生位置がずれているものと考えられるが、滑動量のばらつきの状況を見ると、有義波高から滑動量の分布状況を再現することは困難であることを示唆している。

一方、図-2は同様にF港の滑動量の頻度分布を整理したもので、図中の実線は、滑動量のデータから対数正規分布を当てはめたものである。長尾ら (2010b) は他の被災事例についても同様に整理を行っているが、法線方向のケーソン滑動量の出現頻度分布は、概ね対数正規分布で表せることを示している。

(2) 被災ケーソンのモデル化

対数正規分布は変数の自然対数が正規分布に従うもので、確率密度関数は式 (1) で表される。ここで、 λ と ζ は、それぞれ対数平均および対数標準偏差であり、平均値 μ 、標準偏差 σ を用いて式 (2) で表される。

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}(\zeta x)} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln x - \lambda}{\zeta}\right)^2\right] \dots\dots\dots(1)$$

$$\lambda = \ln \mu - \frac{1}{2}\zeta^2, \quad \zeta = \ln\left[1 + \left(\frac{\sigma}{\mu}\right)^2\right] \dots\dots\dots(2)$$

そこで、長尾ら (2010b) は大規模被災事例の中から、ケーソンの滑動被災が大きい14件の被災事例 (表-1) に

表-1 被災事例

	平均滑動量	最大滑動量	分散	被災函数	被災延長
K1港-1	0.31m	1.15m	0.08m ²	27	270m
K1港-2	0.28m	0.77m	0.05m ²	23	230m
K2 港	0.17m	0.28m	0.01m ²	7	175m
M港	1.26m	3.50m	1.09m ²	16	160m
O1港-1	0.25m	0.92m	0.03m ²	61	915m
O1港-2	0.63m	1.60m	0.19m ²	32	480m
S1 港	2.64m	6.04m	3.10m ²	9	135m
O2港-1	3.37m	24.00m	26.15m ²	40	600m
O2港-2	0.55m	2.62m	0.34m ²	21	315m
O2港-3	0.40m	1.13m	0.08m ²	27	405m
S2 港-1	0.65m	2.84m	0.57m ²	27	405m
S2 港-2	1.23m	7.81m	3.66m ²	25	375m
S2 港-3	1.82m	6.30m	2.97m ²	15	210m
F 港	2.17m	13.44m	7.26m ²	58	870m

ついて、平均滑動量 μ (m) と分散 σ^2 (m²) の関係を整理し、平均滑動量が1m未満の被災事例を対象とした場合において、平均値と分散の関係を式 (3) の近似関数で表すことができることを示した。

$$\sigma^2 = 1.6 \times \mu^3 \dots\dots\dots(3)$$

法線方向におけるケーソン滑動量の分布のモデル化は、式 (3) を用いて既往の期待滑動量の解析手法により算出した平均滑動量から分散を求め、対数正規分布に従う乱数を発生させ、設定した被災区間におけるケーソン1函毎の滑動量を推定した。

3. 期待補修費の算出方法

(1) 滑動量算出モデルの概要

本研究では、平均滑動量については、消波ブロック被覆堤を対象とした不完全被覆による波力増大を考慮した高山ら (2007) の滑動量解析手法を基本とした。

本研究で用いた計算モデルのフローを図-3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) を求めた。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滑動量を算出し、1回の異常波浪に対する滑動量を求め、前年までの滑動量に加えて累積滑動量を計算した。

平面的な滑動量の分布は、算出した累積滑動量を平均滑動量とし、前章で示した方法により、滑動量の延長方向の分布 (本研究では100函分とした) を求め、全函の累積滑動量を計算した。

次に、消波工の沈下量の算出は以下のように行った。

高山 (2007) らと同様に、異常波浪期間中の有義波高と波の数から、高橋ら (1998) の式を用いて消波工の被

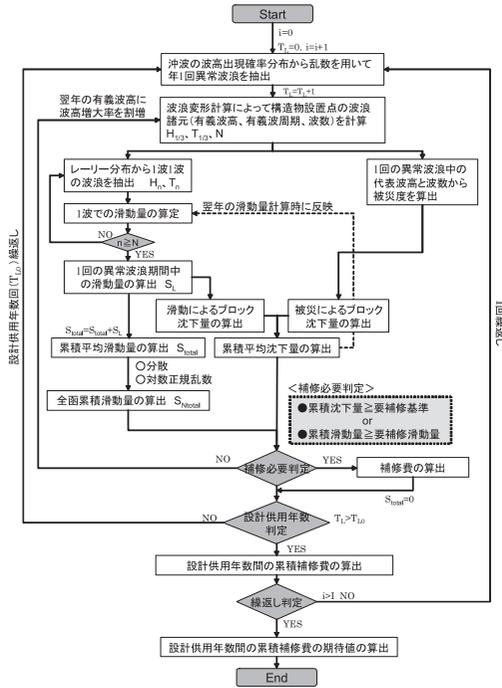


図-3 計算フロー

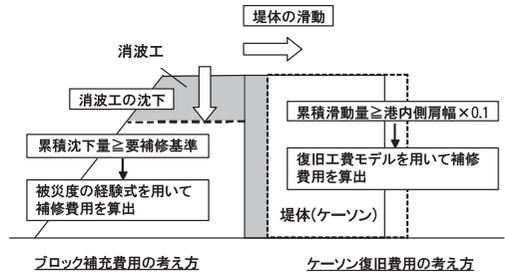


図-4 補修費の算出の考え方

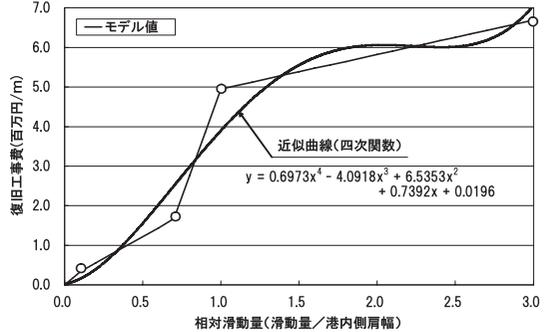


図-5 復旧工費モデル (ケーソン復旧費)

災害 (長さ 1m 当たりの移動個数) を算出した。次に、消波工の被災度から、移動した消波工の体積 (空隙も含む) に対応した量だけ消波工の天端が沈下したとしてその沈下量を算出し、ケーソンの滑動に伴う消波工の沈下量を考慮した上で、前年までの沈下量に加えて累積平均沈下量を求めた。

なお、補修の必要性が無い場合には、被災したケーソンの法線方向における滑動量のばらつきによって、ケーソンの前面波高が増大する可能性があることから、長尾ら (2010b) が提案する式 (4) を用いて、平均滑動量 μ (m) から波高増大率 (平均値) d (%) を求め、翌年の有義波高に乗じた。

$$d = 0.07 \times \mu^{1/3} \times 100 \dots\dots\dots (4)$$

(2) 補修費の算出方法

補修費は図-4に示すように、維持管理上発生するブロック補充費用とケーソンの滑動を伴うような突発的な復旧費用について、それぞれの補修の判定基準に基づいて、補修の必要性を判定した上で補修費を算出した。

ブロック補充費は、設定した維持管理水準がブロックの累積平均沈下量を上回った場合に、新規製作・据付を行って原形復旧するものとして補修費を算出した。

また、ケーソン復旧費は、宮田ら (2009) が提案した復旧工費モデルをもとに、相対滑動量 (= 滑動量 / 港内側マウンド肩幅) と復旧費の関係を4次関数で近似し、

相対滑動量が0.1を超えた場合に復旧するとして、補修費を算出した。図-5にケーソン復旧費の算出モデルを示す。なお、復旧工費モデルの補修費用にはケーソン本体の補修費を始めとして、消波工、基礎工等の補修費を含んでいることから、相対滑動量が0.1以上の場合にはブロック補充費は計上していない。

これを設計供用年数間 (50年間) 繰返し、さらに100,000回の試行を繰返し、累積補修費の期待値を求めた。

4. 解析結果

(1) 計算条件

図-6に示す防波堤断面 (F港) を対象として、表-2に示す計算条件のもとで、供用期間中の期待補修費を算出した。なお、滑動量の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動係数については高山ら (1994) と同じ値を用いた。

解析を行った波浪条件は表-2に示すように、設計時の波浪条件 (波浪1, 耐力作用比: 滑動1.08) に加えて、堤体の安全性と補修水準の関係を検討するため、近年の観測値を用いた極値統計による波浪 (波浪2, 耐力作用比: 滑動1.31) と、波浪2の50年確率波の周期を17sとした波浪 (波浪3, 耐力作用比: 滑動0.98) の計3ケースとした。また、維持管理水準として、ブロック0.5個, 1個, 1.5個, 2個分の沈下量が生じた時点で補修する予防保全の4ケースと、ケーソンが大規模に被災するまで補修し

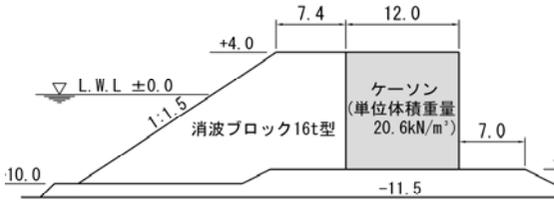


図-6 検討対象モデル (F港防波堤)

表-2 計算条件一覧

項目	値
波浪1 沖波確率分布 (50年確率値)	Weibull 分布 k=1.4, A=0.826, B=2.611 (4.80m, 12.0s)
波浪2 沖波確率分布 (50年確率値)	Weibull 分布 k=1.4, A=0.826, B=1.67 (3.86m, 13.1s)
波浪3 沖波確率分布 (50年確率値)	Weibull 分布 k=1.4, A=0.826, B=1.671 (3.86m, 17.0s)
潮位	0.0m~0.5m
継続時間	2時間
供用期間	50年間
繰返し回数	100,000回

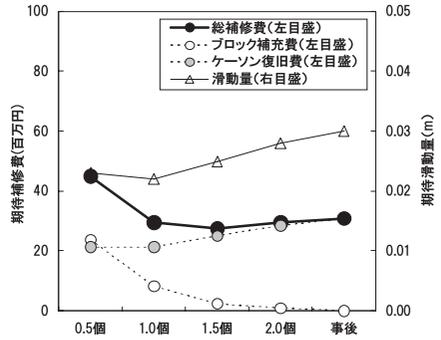
ない事後保全のケースの計5ケースを設定し、それぞれの波浪条件で解析を行った。なお、ブロック0.5個の沈下は通常は維持管理の対象にならない損傷レベルであるが、波力の増大等の影響があるために比較対象に加えている。

(2) 解析結果

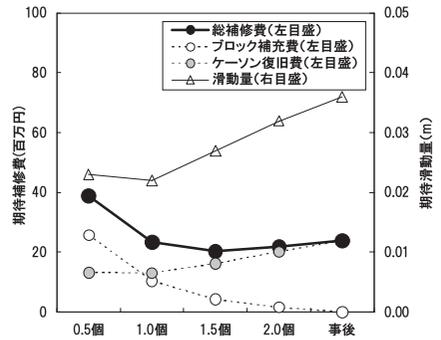
波浪1の結果(図-7(a))から補修基準を小さくするとブロック補充費は大きくなるが、ケーソン復旧費は小さくなる。また、平均滑動量のみを考慮した場合(図-7(b))に比べて、平面的な被災を考慮した場合(図-7(a))では、ブロック補充費は同程度であるがケーソン復旧費が大きくなっている。これは平面的な被災を考慮することで、平均滑動量としては小さくても、ケーソンが局所的に大きく滑動することによって、補修費が大きくなる場合があるためであり、平面的な被災を考慮したモデルにおいては、より実際の被災状況を反映した解析が可能であることがわかった。

また、図-8(a)に示す波浪2の結果では安全性の水準が高いため、期待滑動量や期待補修費が非常に小さく、図-8(b)に示す波浪3では、ブロック被災は波浪2と変わらないが、来襲波浪の周期が長いために堤体に作用する波力が大きくなって滑動量が増し、ケーソン復旧費の割合が非常に大きくなる解析結果となっている。

次に、維持管理水準と期待補修費の関係をみると、波浪条件が1~3において、期待補修費が最小となる維持

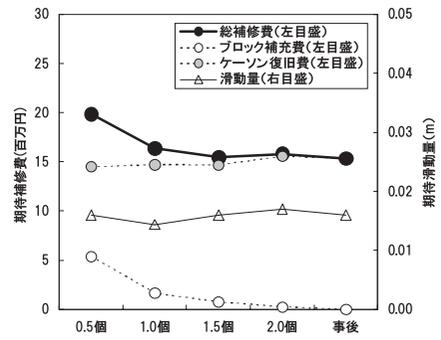


(a) 平面的な被災を考慮

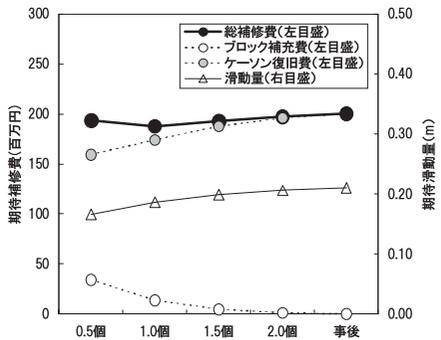


(b) 平均滑動量のみを考慮 (従来法)

図-7 補修基準と期待補修費の関係 (波浪1)



(a) 波浪2



(b) 波浪3

図-8 補修基準と期待補修費の関係

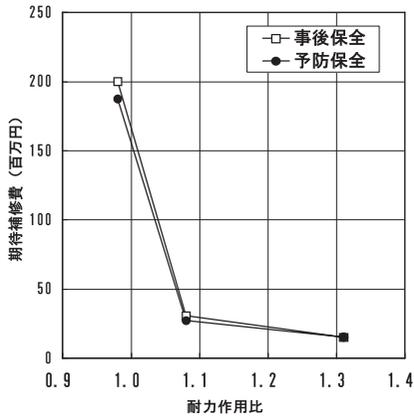


図-9 滑動の耐力作用比と期待補修費の関係

管理水準は、それぞれブロック1.5個、事後保全、ブロック1個の結果となった。

図-9に、滑動の耐力作用比と期待補修費の関係を示す。上述のように波浪3ではケーソン復旧費が非常に大きいため期待補修費が他のケースよりも大きい。また、波浪2のように安全性の水準が非常に高い場合は予防保全の必要性は低く、事後保全が最小の期待補修費に対応するケースとなる。しかしながら、通常波浪もしくは安全性水準が比較的低い波浪1や波浪3の場合は、適切に維持補修を行うことで、事後保全よりも少ない期待補修費用が得られることから、安全性の水準に応じて最適な維持管理水準が異なることがわかった。なお、波浪2は標準よりも安全性を高めた断面であるため、初期建設費用は波浪1などよりも大きい。従って、今後は、初期建設費用も含めたライフサイクルコストの観点からの最適な水準の検討が必要と考えられる。

なお、本研究では、ブロック補充費やケーソン復旧費などの直接被害のみを対象としたが、大規模被災が発生し、防波堤背後の港湾施設の機能に影響が生じる場合には、間接被害（例えば、係留施設の機能が低下することによって生じる輸送コスト・移動コストの増大等）も考慮することも必要となる。例えば、F港において防波堤が全て被災したとした場合、間接被害額は最大で25億円/年程度かかるため、事後保全のケースではさらに被害額が増大する可能性がある。また、長尾ら（2010b）が示した平均滑動量と波高増大の関係については、本研究では平均値の波高増大率を用いて検討を行っている。しかし、長尾ら（2010b）によると、平均滑動量が0.5mの場合、最大で20%の波高増大が発生する可能性を指摘しており、事後保全のケースでは波高増大の影響が大きくなるものと予想されることから、今後は、波高増大率の取扱いについて、より詳細な検討が必要と考える。

5. おわりに

本研究の主要な知見を以下に示す。

- 1) 消波ブロック被覆堤について、設計供用期間中における平面的な被災を考慮した被害額を計上し、期待補修費を最小にする最適な維持管理水準を検討できる手法を提案した。
- 2) 既往の滑動量解析手法により算出した累積滑動量（平均滑動量）から対数正規分布に従うと仮定し、ある被災区間におけるケーソン1函毎の滑動量を推定し、平面的な滑動被災を考慮できる手法を検討した。
- 3) 防波堤の外部安定性の違いによって補修費を最小にする最適な維持管理水準が異なり、防波堤の安定性に応じた維持管理水準を検討する必要があることがわかった。

設計超過外力の来襲等によって大規模被災が発生した場合には、間接被害が大きくなることが想定される。そのため、直接被害の他に、間接被害も考慮した維持管理水準の検討が必要となり、平面的な被災を考慮した被害額を算出できる解析手法が非常に重要となるものとする。

参考文献

- 伊藤彦行, 谷本勝利 (1971): 混成防波堤の蛇行災害, 港湾技術研究所資料, No.112, 20p.
- 国土交通省港湾局・国土交通省国土技術政策総合研究所・港湾空港建設技術サービスセンター (編著) (2008): 港湾の施設の維持管理計画書作成の手引き (増補改訂版), pp. 2-4-1 - 2-4-52.
- 下迫健一郎・増田慎太郎・高橋重雄 (2000): 期待滑動量を用いた防波堤の信頼性設計法における法線形状の影響, 第47回海講論文集, pp. 821-825.
- 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 (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, 海講論文集, 第54巻, pp. 756-760.
- 長尾 毅・辻尾大樹・熊谷健蔵 (2010a): 防波堤の被災事例を用いた波高と滑動量の相関に関する一考察, 海洋開発論文集, 第26巻, pp. 981-986.
- 長尾 毅・辻尾大樹・熊谷健蔵 (2010b): 防波堤の平均滑動量と波高増大に関する研究, 海洋開発論文集, 第26巻, pp. 975-980.
- 平山克也 (2002): 非線形不規則波浪を用いた港湾設計への活用に関する研究, 港湾空港技術研究所資料, No.1036, p. 162.
- 宮田正史・熊谷健蔵・辻尾大樹・大久保陽介 (2009): 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, 海講論文集, 第56巻, pp. 911-915.
- 宮田正史 (2010): 消波ブロック被覆堤の累積補修費を考慮した維持管理手法に関する基礎的研究, 国総研資料, No.552, 9p.