

被災リスクを考慮した消波ブロック被覆 傾斜堤の維持管理支援方法の開発

MAINTENANCE MANAGEMENT SUPPORT METHOD OF WAVE-DISSIPATING BLOCK ALLOWED FOR RISK BY WAVES

阿部光信¹・興野俊也²・安田勝則²・柴崎尚史³

Mitsunobu ABE, Toshiya KYONO, Katsunori YASUDA and Naofumi SHIBASAKI

¹正会員 東電設計株式会社第二土木本部港湾・海岸部 (〒110-0015 東京都台東区東上野3丁目3番3号)

²正会員 東京電力株式会社技術開発研究所 (〒230-8510 神奈川県横浜市鶴見区江ヶ崎町4番1号)

³正会員 東京電力株式会社原子力技術・品質安全部 (〒100-8560 東京都千代田区内幸町1丁目1番3号)

For making maintenance plan for sloping breakwater covered with wave-dissipating blocks, we developed "maintenance management support method". In this method, relative damage level is used for evaluation of deformation for wave-dissipating blocks, and the damage of sloping breakwater is calculated by Monte Carlo simulation. As the result of these, occurrence probability of relative damage level for wave-dissipating block in future is estimated. With relative damage level that maintenance of sloping breakwater and permission excess probability of relative damage level, the time of next maintenance are examined. In addition, by calculating repair costs of wave-dissipating block and risk of sloping breakwater, a life cycle cost during lifetime is calculated. The economical next time of repair and an interval of maintenance are examined by life cycle cost. By using this method, better maintenance planning are made.

Key Words : *maintenance management, wave-dissipating block, sloping breakwater, relative damage level, Monte Carlo simulation, life cycle cost, risk by waves*

1. まえがき

浅海域の代表的な防波堤構造である消波ブロック被覆傾斜堤は、外洋からの波浪に対する堤体の安定は前面の消波ブロックによって保持されている。このため、傾斜堤の維持管理においては消波ブロックの機能維持が重要であることから、消波ブロックが移動、沈下等の変形を生じた場合には即時補修することが通例となっている。しかし、防波堤に求められる性能は外海からの波浪を遮断して港内の静穏度を確保することであり、この性能を満たしていれば、傾斜堤の消波ブロックは多少の変形を許容することが可能であると考えられる。したがって、消波ブロックの変形特性を適切に予測・評価できれば、より合理的な維持管理計画を立案することができるものと推察される。

このような背景から、本研究では、傾斜堤消波ブロックの波浪による変形被災の進行状況を予測して、その被災リスクを検討することにより、現時点での補修の必要性や将来の補修頻度の判断材料を提供する「消波ブロッ

ク被覆傾斜堤の維持管理支援方法」を開発した。開発した方法では、消波ブロックの変形量を表す指標として被災度を用い、モンテカルロシミュレーションによる被災度解析手法により消波ブロックの将来の被災状況を予測し、さらに、ライフサイクルコストに基づく被災リスクを考慮して、次回補修時期や今後の補修間隔等の補修計画立案の基礎情報を提供するものである。

本論文では、提案した維持管理支援方法の概要を述べるとともに、モデル防波堤での適用事例を紹介する。

2. 被災度解析手法による消波ブロック被覆傾斜堤の被災の定量的評価

(1) 消波ブロック被覆傾斜堤の被災進行モード

消波ブロック被覆傾斜堤の被災には、波浪による消波ブロックのロッキング、移動・沈下、海底地盤の洗掘、基礎捨石の吸い出し、上部工の滑動等の様々なモードがある。これまでの実海域での被災事例や既往の水理模型実験結果等によれば、消波ブロック被覆傾斜堤の被災は

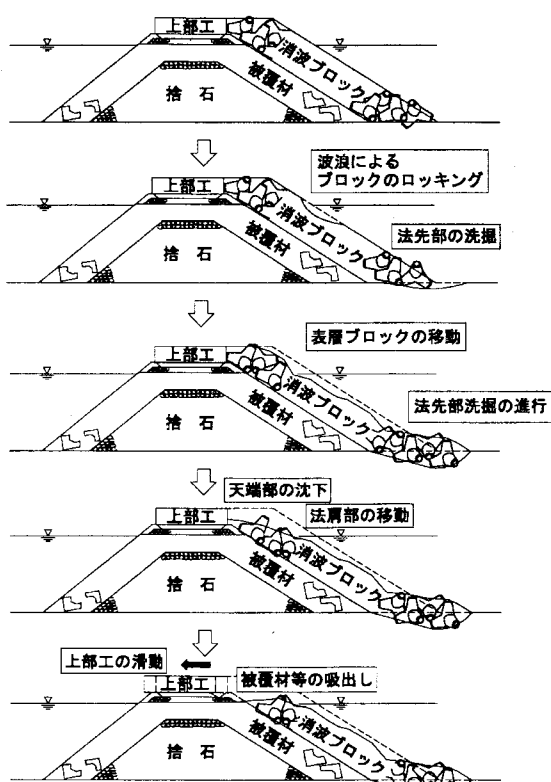


図-1 傾斜堤の被災進行の模式図

図-1 のように進行することが多い。すなわち、①高波浪来襲時における傾斜堤法先部の洗掘および消波ブロックのロッキング、②水面付近以下の表層の消波ブロックの移動、③水面以上の法肩部および上部工前面の消波ブロックの移動、④上部工前面露出後の上部工の滑動移動、と進行すると考えられる。

このような消波ブロックの変形に伴う傾斜堤の被災は、地震による構造物の被災とは異なり、1 回のみの外力に対する変形ではなく、経年的に発生する外力によって変形が進行する。このため、消波ブロックの被災の進行は、経年的に発生する不規則な高波浪に対する個々の変形の累積として求める必要がある。

(2) 被災度による消波ブロックの被災の定量的評価方法

消波ブロックの被災の程度を定量的に評価する指標として、ブロックの代表径 D_n の幅の断面内における移動個数で定義する被災度 N_0 がある。傾斜堤の設備点検等により堤体の断面形状を計測すると、消波ブロックの欠損断面積 A が求められ、次式によって現状の初期被災度が得られる。

$$N_0 = \frac{A(1-p)D_n}{V} \quad (1)$$

ここで、 p は消波ブロックの空隙率、 V は消波ブロック 1 個当たりの体積である。

一方、消波ブロックの被災度 N_0 は、既往の水理模型実験等より来襲波浪等との関係を次式のように表すこと

ができる¹⁾。

$$N_0 = \left\{ \frac{H_{1/3} / [(S_r - 1)D_n \cdot C_H] - b}{a} \right\}^{1/c} N^{0.5} \quad (2)$$

ここで、 $H_{1/3}$ は有義波高、 S_r はブロックの海水に対する比重、 C_H は碎波の効果を表す係数、 N は波数、 a, b, c はブロックの種類や形状によって決まる定数（被災度係数と称す）である。

1 回の高波浪に対する消波ブロックの被災個数は式(2)によって求めることができる。しかし、消波ブロックの被災の進行を予測するにあたっては、主要外力である波浪の統計的変動性及各種条件の不確定要因を考慮する必要がある。そこで、本研究では、高橋ら¹⁾の研究に習い、確率論的な問題をモンテカルロシミュレーションを用いて検討することとした。

図-2 にモンテカルロシミュレーションを用いた消波ブロックの被災度解析フローを示す。ここで、高波浪の出現回数と極大波高の算定は、検討対象地点の高波浪の極値統計分布から年 1 波を抽出することとし、その出現確率や堤体前面の波浪諸元推定のための波浪変形に対しては、その推定誤差を正規分布で考慮することとした。また、経過期間中の各年の消波ブロックの被災度の算定では高波浪の履歴を考慮することから、下記の式(3)で対象とする高波浪よりも以前の高波浪による累積被災度から相当波数を求めてから、式(4)で該当年までの累積被災度を求めることとした。

$$(N)_{N-1} = \left\{ \frac{(H_{1/3})_n / [(S_r - 1)D_n \cdot C_H] - b}{a} \right\}^{-c/2} (N_0)_{N-1}^2 \quad (3)$$

$$(N_0)_N = \left\{ \frac{(H_{1/3})_n / [(S_r - 1)D_n \cdot C_H] - b}{a} \right\}^{1/c} (N)_N^{0.5} \quad (4)$$

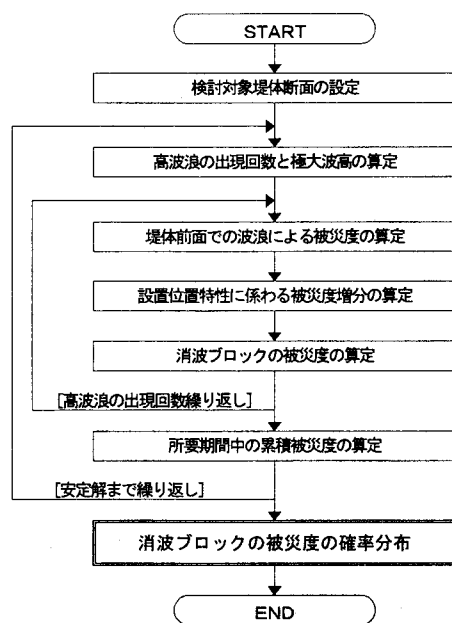


図-2 消波ブロックの被災度解析フロー

$$(N)_N = (N)_{N-1} + (N)_n \quad (5)$$

ここで、 $(N_0)_{N-1}$ 、 $(N)_{N-1}$ はそれぞれ $n-1$ 回目までの高波浪に対する累積被災度と相対波数、 $(N_0)_n$ 、 $(N)_n$ はそれぞれ n 回目までの高波浪に対する累積被災度と波数、 $(N)_n$ は n 回目の高波浪に対する波数である。

以上の式(3)～式(5)で求められる消波ブロックの被災度は、基本的には高波浪に起因するブロックの変形を対象にしたものである。しかし、実海域での傾斜堤の被災では、前述図-1にも示したように、海底地盤が洗掘したために法先部の消波ブロックの変形を引き起こすことが多い。法先部の洗掘による消波ブロックの被災については不明な点が多く、また設置位置の底質の状況によって特性が異なり、現時点では統一的な評価が困難である。そこで、このような海底地盤の洗掘に係わる要因を被災度の増分として考慮することとし、検討対象地点の補修履歴の実測データより設定することとした。

3. 消波ブロックの被災・補修シナリオと維持管理支援方法の提案

(1) 消波ブロックの被災・補修シナリオと被災レベル

図-3は前述の消波ブロックの被災進行モードに基づいて作成した消波ブロックの被災・補修シナリオである。この図は、横軸に時間の流れ、縦軸に消波ブロックの被災度を取り、原点は建設時または補修時（原形復旧時）としている。太曲線は建設時または補修時から現時点までの被災度の進行を示し、◆が現時点である。設備点検を行うと、前述式(1)に基づいて現時点での被災度（初期被災度）が求められる。また、二重線は前述式(3)～式(5)によって現時点から推定した期待被災度、破線はそのばらつきである。

これに従って消波ブロックの補修時期を検討する場合には、消波ブロックの被災状態に応じた被災レベル0、被災レベル1、被災レベル2を設定する必要がある。

消波ブロックの被災状態は、表-1のように①健全状態、②進行状態、③危険状態、④崩壊状態の4段階に区分することができる。消波ブロックが健全状態から進行状態にある場合は防波堤としての性能が保持されているため、その間の補修等は必要ないものと考えられる。消波ブロックの補修が必要となるのは危険状態であり、進

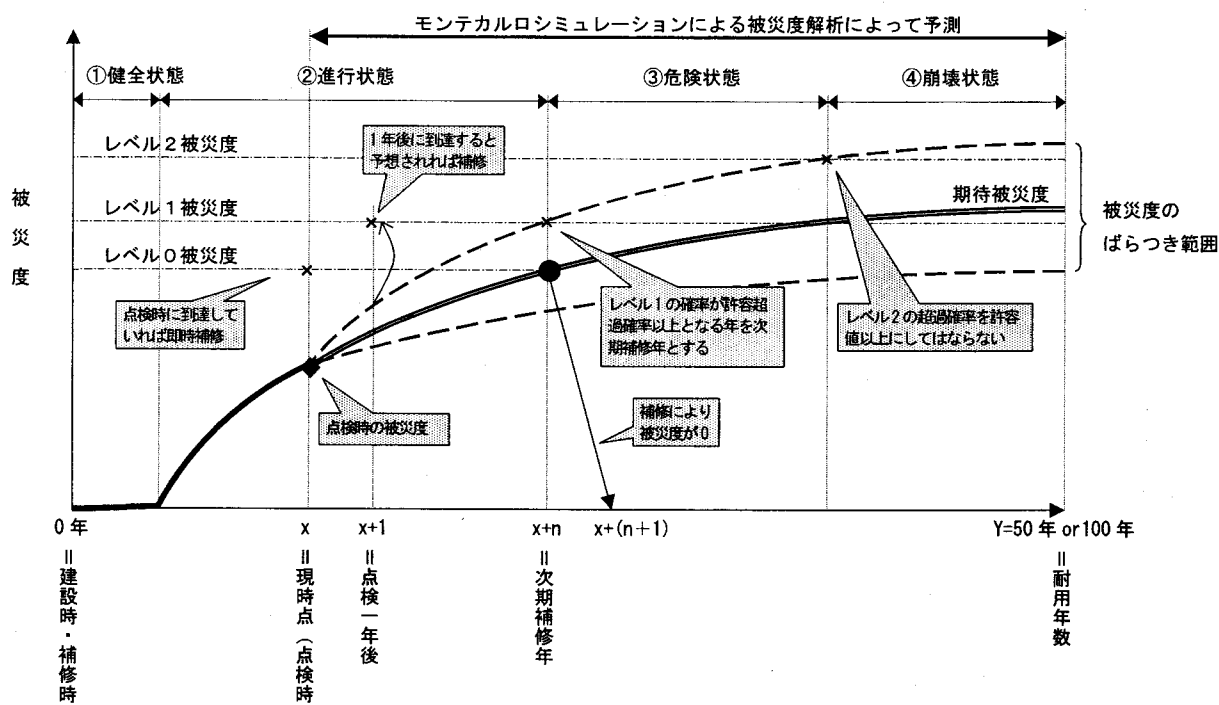


図-3 消波ブロックの被災・補修シナリオ

表-1 消波ブロックの被災状態と限界被災度レベル

	①健全状態	②進行状態	③危険状態	④崩壊状態
被災状態	消波ブロックの変形が無く、全く健全な状態	消波ブロックの変形が微少で、防波堤の性能には影響を及ぼさない状態	消波ブロックの変形が進行して、表層部のブロックが移動し、防波堤の性能に影響を及ぼす変状が生じる可能性がある状態	消波ブロックが顕著に変形して、上部工前面が露出し、防波堤の性能が損なわれ、機能が喪失する可能性がある状態
限界被災度レベル		レベル1 [補修限界レベル]	レベル2 [機能喪失レベル]	

行状態から危険状態に進行する段階で補修することが望ましい。また、崩壊状態は防波堤の性能が失われた機能喪失状態で、このような状態になることは避けなければならない。

ここでは、進行状態と危険状態の境界をレベル1被災度（補修限界レベル）、危険状態と崩壊状態の境界をレベル2被災度（機能喪失レベル）とし、検討対象堤体断面に対して、それぞれのレベルの被災度とその許容超過確率を設定することとした。

また、傾斜堤の設備点検等により現時点での初期被災度は確定値として求められるが、この確定値は期待被災度に相当するものとし、レベル1被災度が許容超過確率以下となる状態に対応した期待被災度をレベル0被災度として設定すれば、現時点での補修の必要性を判定することが可能となる。

(2) 被災度に基づく傾斜堤の維持管理支援方法の提案

以上の消波ブロックの被災・補修シナリオをもとに、消波ブロック被覆傾斜堤の補修計画立案の合理化を目指した維持管理支援方法を提案した。

図-4に提案した方法の全体フローを示す。

傾斜堤の設備点検等により得られた消波ブロックの断面形状から、式(1)を用いて現状での初期被災度を算定する。この初期被災度がレベル0被災度に到達していれば即時補修と判断する。

消波ブロックの初期被災度がレベル0被災度に到達していなければ、前述の図-2に示すモンテカルロシミュレーションによる消波ブロックの被災度解析手法により

被災進行の将来予測を行い、1年ごとの消波ブロック被災度の発生確率を予測する。1年後の被災度の確率分布において、レベル1被災度の超過確率が許容確率をオーバーしている場合には、1年以内に補修と判断する。

1年後のレベル1被災度の超過確率が許容確率を満足していれば、モンテカルロシミュレーションによる消波ブロックの被災度解析結果をもとに、レベル1被災度およびレベル2被災度の超過確率の経年変化、ライフサイクルコストに基づく被災リスク評価を行い、消波ブロックの最適補修時期を予測し、将来補修計画を策定する。

なお、本方法の適用にあたっては、あらかじめ消波ブロックの被災レベルに対する被災度と許容超過確率、式(3)～式(5)の被災度算定式における被災度係数と被災度の増分を設定する必要がある。被災度係数については、高橋ら¹⁾の提案値があるが、検討対象堤体の補修履歴等がある場合には、再現検討を行って被災度増分と合わせて地点特性値として設定することが望ましい。

(3) 被災リスク評価に基づく補修時期の設定方法

提案した傾斜堤の維持管理支援方法では、消波ブロックの最適補修時期は、ライフサイクルコストに基づく被災リスク評価を用いて設定することとした。

ライフサイクルコストには、耐用年数間に予想される消波ブロックの補修費と傾斜堤の被災に対するリスクを考慮することとした。このうち、消波ブロックの補修費については、消波ブロック被災度解析結果より得られた被災度の確率分布をもとに、補修年次の健全状態と進行状態の被災度の累積出現率に消波ブロックの補修単価を乗じて算定することとし、傾斜堤の被災リスクについては、毎年の危険状態と崩壊状態の被災度の出現率にそれぞれの状態に対する復旧費を乗じて算定することとした。

耐用期間中の補修後 y 年目の補修費 CC_y 、危険状態に対する復旧費 $CR1_y$ 、崩壊状態に対する復旧費 $CR2_y$ 、被災リスク CR_y は次式にて算定する。

$$CC_y = \begin{cases} \sum_{i=0}^{i=\infty} (A_i \times P_i \times R_{yi}) & ; \text{補修年次} \\ 0 & ; \text{非補修年次} \end{cases} \quad (6)$$

$$CR1_y = \sum_{i=0}^{i=\infty} ((A_i \times P_1 + P_2) \times R_{yi}) \quad (7)$$

$$CR2_y = \sum_{i=0}^{i=\infty} (P_3 \times R_{yi}) \quad (8)$$

$$CR_y = (CR1_y + CR2_y) - (CR1_{y-1} + CR2_{y-1}) \quad (9)$$

ここで、 A_i は被災度階級 i の被災度（区間平均被災度）、 P_1, P_2, P_3 は健全状態および進行状態、危険状態、崩壊状態の補修・復旧単価、 R_{yi} は補修後 y 年目の被災度階級 i の出現率である。

ライフサイクルコストに基づく合理的な補修時期については、次回補修年次をパラメータとした補修パターン

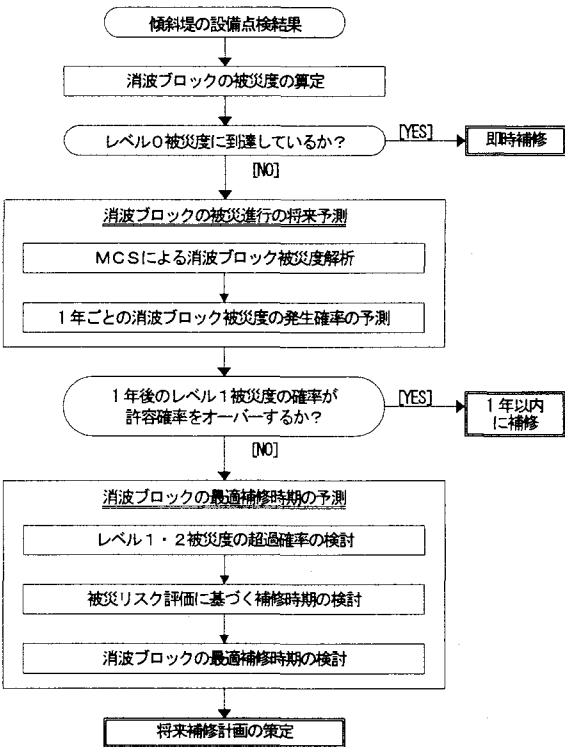


図-4 傾斜堤の維持管理支援方法の全体フロー

を仮定して耐用年数間の期待総費用を算定し、これが最小となる補修パターンを検討することとした。耐用年数間の補修パターンについては、設備点検結果による初期被災度を考慮した被災度解析結果から次回補修年次の復旧目標被災度を求め、2回目以降は、補修後の被災度を0とした被災度解析結果から復旧目標被災度に到達した年次に補修することとした。

耐用年数間の期待総費用 C_{ETC} は次式で算定する。

$$C_{ETC} = \sum_{i=0}^{n-1} \sum_{j_i}^{t=y_{(i+1)}-1} \frac{CC_{t-y_i} + CR_{t-y_i}}{(1+\beta)^t} \quad (10)$$

ここで、 T, t は耐用年数と経過年次、 y_i は i 回目の補修を実施した経過年次（ただし、 $y_0 = 0$ 、 $y_{n+1} = T$ ）、 n は補修回数、 β は割引率である。

4. 被災リスクを考慮した維持管理支援方法の適用事例

(1) モデル防波堤の被災レベルと被災度係数

太平洋岸に面した小規模港湾のモデル防波堤を対象に、提案した消波ブロック被覆傾斜堤の維持管理支援方法を用いて、合理的な補修計画立案の試験検討を行った。検討対象断面は図-5に示すとおりで、設置水深は $h = -7.4m$ 、堤体位置の設計波は $H_{1/3} = 6.4m$ 、 $T_{1/3} = 12.0s$ 、高波浪の極値統計分布は Weibull 分布 ($k = 2.00$)、高波浪の来襲頻度は1回/年、1回の高波浪の波数は1000波とした。

消波ブロックの被災度算定式における被災度係数については、モデル防波堤の既往の補修履歴の再現検討により、 $a = 1.26$ 、 $b = 1.47$ 、 $c = 0.2$ とし、洗掘による被災

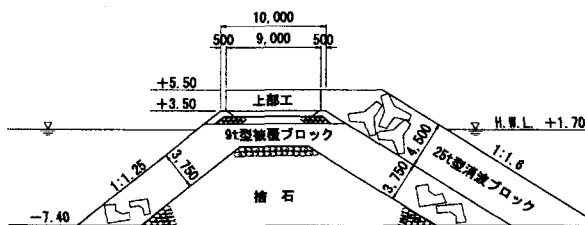


図-5 検討対象モデル防波堤の標準断面図

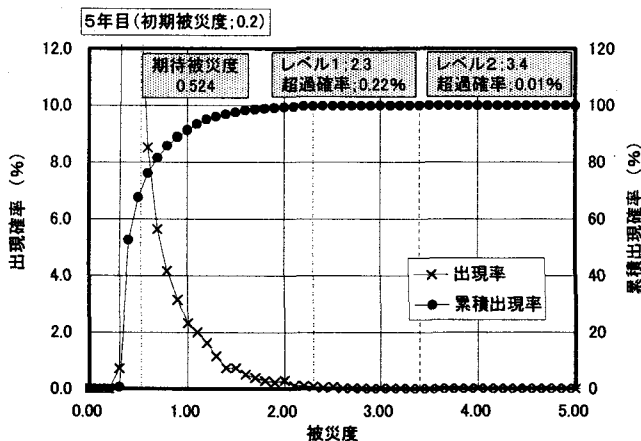


図-6 被災度解析による代表年の被災度の確率分布

度増分は $\alpha = 0.022$ とした。また、モンテカルロシミュレーションで考慮する不確定要素は、高波浪の極大波高と波浪変形係数の推定誤差、潮位のばらつきの3項目とし、シミュレーションの試行回数は、被災度の確率分布が安定する10,000回とした。

消波ブロックの被災レベルに対する被災度については、前述図-1の被災進行モードや類似構造物の補修マニュアル²⁾、上部工に作用する波力実験結果等を参考に、レベル1被災度は表層1層のブロックが全て移動した状態を想定して $N_0 = 2.3$ 、レベル2被災度は上部工が滑動する限界状態として表層1層と上部口前面のブロックが全て移動した状態を想定して $N_0 = 3.4$ とした。また、これらの被災度に対する許容超過確率は、日本の消波ブロック被覆堤の許容破壊確率³⁾より 3×10^{-3} とした。さらに、レベル0被災度については、事前のモンテカルロシミュレーションによる被災度解析結果より、 $N_0 = 0.6$ とした。

(2) 消波ブロックの被災度解析手法による被災進行予測

以上の条件に基づいて、モンテカルロシミュレーションによる消波ブロックの被災度解析を実施した。ここで、設備点検から得られた初期被災度は $N_0 = 0.2$ とした。

図-6はモンテカルロシミュレーションによる被災度解析によって得られた5年目の被災度の確率分布である。これによれば、モデル防波堤の5年目の期待被災度は0.524、レベル1被災度を超える確率は0.22%、レベル2被災度を超える確率は0.01%であると予想される。

図-7は各年の被災度の確率分布から求めた経過年数と被災度の関係で、*は期待被災度、●は超過確率0.3%に対応する被災度の経年変化である。これによれば、0.3%超過被災度がレベル1被災度を超えるのは5.5年目であることから、次回補修年次は6年目と判断される。

(3) 被災リスクに基づく合理的補修計画の検討

前項で求めた各年の被災度の確率分布をもとに、耐用年数を50年とした場合のライフサイクルコストを検討した。

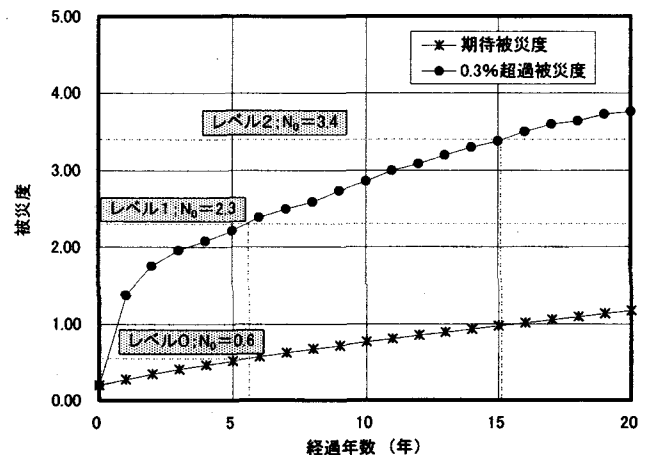


図-7 被災度解析に基づく経過年数ごとの被災度

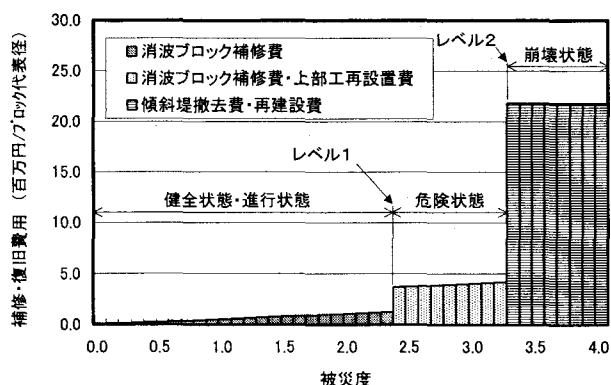


図-8 被災度に対する補修・復旧費用の設定例

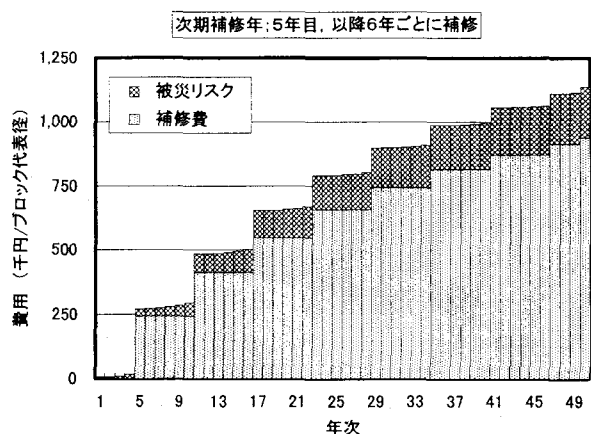


図-9 ライフサイクルコストの算定例

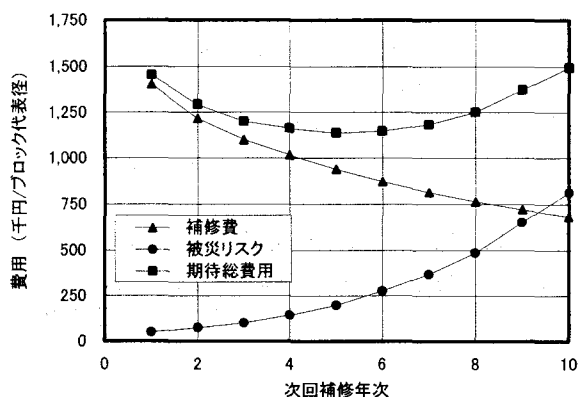


図-10 次回補修年次をパラメータとしたライフサイクルコストの算定結果

図-8 はライフサイクルコストの算定に用いる補修・復旧費の設定例である。健全状態と進行状態の場合は消波ブロックのみが移動した状態を想定して、消波ブロックの補修費を考慮し、危険状態の場合は上部工が滑動した状態を想定して、消波ブロックの補修費と上部工の再設置費を考慮した。また、崩壊状態の場合は傾斜堤の撤去費と再建設費を考慮した。

図-9 は次回補修年を5年目、次回補修年以降の補修間隔を6年とした場合の各年次までの累積費用を示したものである。補修費は6年ごとに増加し、被災リスクは毎年微増する。

図-10 は次回補修年次をパラメータとしたライフサイクルコストの算定結果で、▲は補修費、●は被災リスク、■が期待総費用である。これによれば、次回補修年次を遅くすると補修間隔が長くなり、耐用年数間の補修回数が少なくなるため補修費は減少し、補修しない放置期間が長くなるため被災リスクは増加する。結果として、期待総費用が最小となるのは5年目で、次回補修年次は5年目とするのが最も合理的であると判断される。この結果は、前述のレベル1被災度の超過確率から求めた次回補修年次と一致している。

5. あとがき

従来の消波ブロック被覆傾斜堤では、消波ブロックの変形が生じた場合に定性的な評価を行って即時補修を実施していた。これに対し、本研究では、港湾の性能に基づいた被災レベルを設定することにより、設備点検結果に基づく即時補修の可否判定やモンテカルロシミュレーションを用いた将来の被災度予測による合理的な補修時期を定量的に評価する「消波ブロック被覆傾斜堤の維持管理支援方法」を提案した。

本方法を用いることにより、次回補修時期や今後の補修間隔等の合理的な補修計画の立案が可能となり、維持管理にあたっては変形した消波ブロックの現状機能や補修までの被災リスクが評価でき、さらに、補修時期を延伸することにより維持管理費の低減が期待される。

これらの方法は、消波ブロック被覆ケーソン堤への適用、被覆ブロック等への応用も可能であり、今後は、本手法の実務への適用を図る予定である。

参考文献

- 1) 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：期待被災度を考慮した消波ブロックの安定重量—消波ブロック被覆堤の設計法の再検討，第1報一，港湾技術研究所報告，第38巻，第1号，pp.3-28，1998。
- 2) 運輸省港湾技術研究所編著：港湾構造物の維持・補修マニュアル，沿岸開発技術ライブラリー，No.6，(財)沿岸開発技術研究センター，pp.15-23，1999。
- 3) 長尾毅：防波堤の全体系安全性のレベル1，レベル2の信頼性設計，港湾構造物設計事例集，第3編，沿岸開発技術ライブラリー，No.1，(財)沿岸開発技術研究センター，pp.15-36，1999。