

消波ブロック被覆傾斜堤の維持管理支援方法の開発

東電設計株式会社 港湾・海岸部 阿部 光信

外洋に面した浅海域に設置された消波ブロック被覆傾斜堤を対象として、その合理的補修計画の立案のための「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。開発した方法は、消波ブロックの被災量の定量的評価指標である被災度を用いて、各種の変動要因や不確定要因を統計的に取り扱えるモンテカルロシミュレーションに基づく被災度解析を行うことにより、消波ブロックの将来の被災度の進行状況を予測するものである。本方法をモデル港湾の消波ブロック被覆傾斜堤に適用した結果、補修が必要とされる限界被災度レベルを適切に設定することにより、即時補修の必要性の有無の判定、次回補修時期および今後の補修間隔等を合理的に設定することが可能となった。

1. はじめに

外洋に面した浅海域の代表的な防波堤構造様式の一つに消波ブロック被覆傾斜堤がある。この構造は、図-1に示すように、海中に投入した捨石の表層を被覆材（被覆ブロック）で被覆し、その上部にコンクリート製の上部工、港外側に消波ブロックを設置したものである。この消波ブロック被覆傾斜堤は、港外側に設置した消波ブロックが外海からの巨大な波浪を消波することによって堤体全体の安定性を保持している。このため、傾斜堤の維持管理においては、消波ブロックの健全性を維持することが重要であり、従来は消波ブロックが移動、沈下等の変形を生じた場合は即時補修することが通例となっていた。

しかし、防波堤の本来の性能は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る範囲内であれば、傾斜堤の消波ブロックの変形を許容しても問題ないと考えられる。したがって、消波ブロックが変形したときの防波堤としての性能を適切に評価できれば、より合理的な維持管理計画の立案・実施が可能となる。

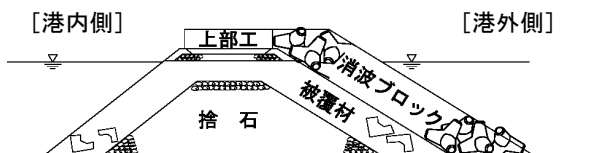


図-1 消波ブロック被覆傾斜堤の概要図

このような背景から、当社では、消波ブロックの波浪による変形の進行状況を予測し、その被災リスクから現時点での補修の必要性や将来の補修頻度を判定する「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。ここでは、その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. 消波ブロックの被災進行とその定量的評価

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-2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。

2) 消波ブロックの被災の進行と限界被災レベル

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回のみを外力に対する変形ではなく、経年的に発生する不規

【問い合わせ先】 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 3-3-3

(TEL) 03-4464-5483

(FAX) 03-4464-5490

(担当者) 阿部

(E-mail) eabe@tepsco.co.jp

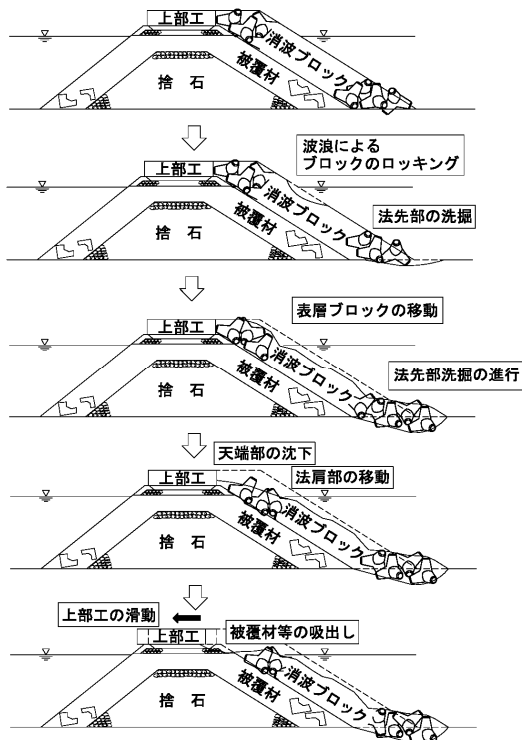


図-2 傾斜堤の被災進行の模式図

則な波浪によって変形が進行する。この消波ブロックの被災の進行を模式的に示すと図-3 のようになる。

消波ブロックの被災の進行過程は、①健全状態、②被災進行状態、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。表-1にそれぞれの段階の被災状態を示す。

消波ブロックが健全状態から被災進行状態にある場合は防波堤としての性能が保持され、その間の補修等には必要ない。消波ブロックの補修が必要となるのは危険状態であり、被災進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、崩壊状態は消波ブロックの被災が進行して防波堤としての性能が失われた機能喪失状態で、そのような状態になってはいけない。ここでは、被災進行状態と危険状態の境界をレベル1(補修限界レベル)、危険状態と崩壊状態の境界

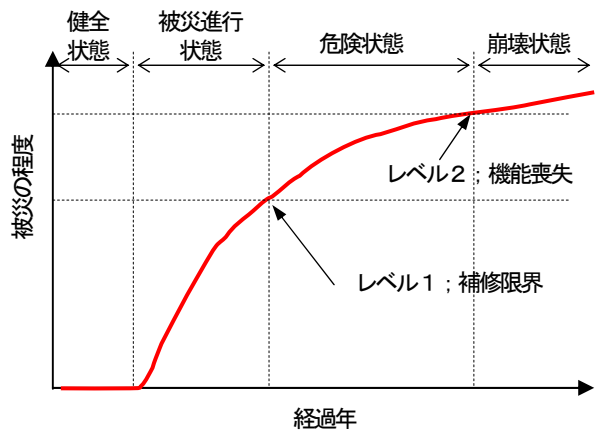


図-3 消波ブロックの被災進行の模式図

をレベル2(機能喪失レベル)と定義した。

3) 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は、ブロック1個当たりの体積 V の3乗根で求める代表径 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 を用いた。

傾斜堤の設備点検等において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被災度(初期被災度)が得られる(図-4参照)。

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

ここで、 p は消波ブロックの空隙率である。

一方、消波ブロックの被災度 N_0 と1回の高波浪(台風等の時化)の有義波高 $H_{1/3}$ 、波数 N の関係は、既往の水理模型実験等より次式のように表せる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、 S_r はブロックの海水に対する比重、 C_H は砕波の効果を表す係数、 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)である。

表-1 消波ブロックの被災状態と限界被災レベル

	①健全状態	②被災進行状態	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小で、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]

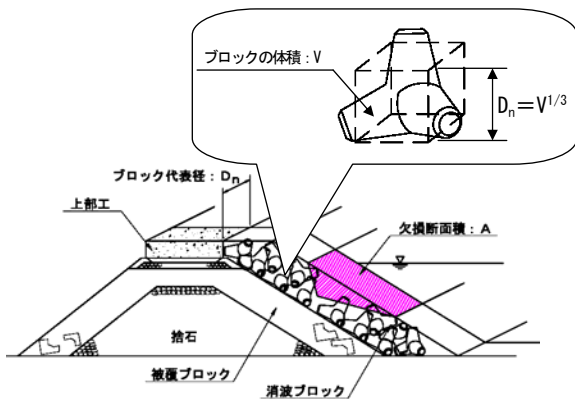


図-4 消波ブロックの被災と代表径

1 回の高波浪による消波ブロックの被災度は式(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推定誤差やブロック比重等の条件のばらつきを考慮する必要がある。本方法では、高橋ら¹⁾の研究に習い、これらの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。

モンテカルロシミュレーションとは、不確定要因をその確率分布に基づく乱数により発生させ、これを用いて現象を繰り返し試行し、その結果を統計処理することにより確率分布を求める方法で、複数の多段階にわたる現象を統計的に扱うのに適した方法である。

図-5 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

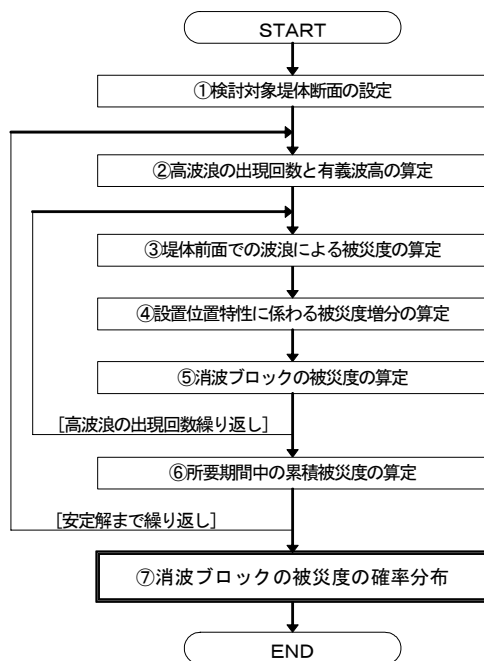


図-5 消波ブロックの被災度解析フロー

こで、高波浪の出現回数と有義波高の算定は、検討対象地点の高波浪の極値統計分布から年 1 波を抽出し、その出現確率や堤体前面での有義波高算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(②)。経過期間中の累積被災度は、式(2)によって被災度を算定し(③)、これを経過期間中の出現回数分繰り返すことによって求められる(⑥)。以上の解析を、消波ブロックの被災度が安定解になるまで繰り返すことによって、被災度の確率分布を求めることができる(⑦)。

実海域での傾斜堤の被災では、図-2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も多い。法先部の洗掘による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も特性が異なり、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被災を、検討対象地点の補修履歴の実測データより推定し、被災度の増分として考慮することとした(④)。

3. 消波ブロックの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

図-6 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、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す。設備点検の結果、前述式(1)から現時点の被災度(初期被災度)が求められる。また、前述式(2)から現時点から推定した被災度(二重線が期待値、破線がばらつき範囲)が求められる。

この被災シナリオに従って消波ブロックの補修時期を検討する場合は、消波ブロックの被災状況に応じた被災レベルを設定し、経過年数に対する被災の程度がどのレベルに達しているかによって補修の必要性を判断する。

2) 消波ブロックの限界被災レベルの設定

以上の消波ブロックの被災・補修シナリオに従って補修時期を検討する場合には、前述表-1に示す限界被災レベルに対応する被災度とその許

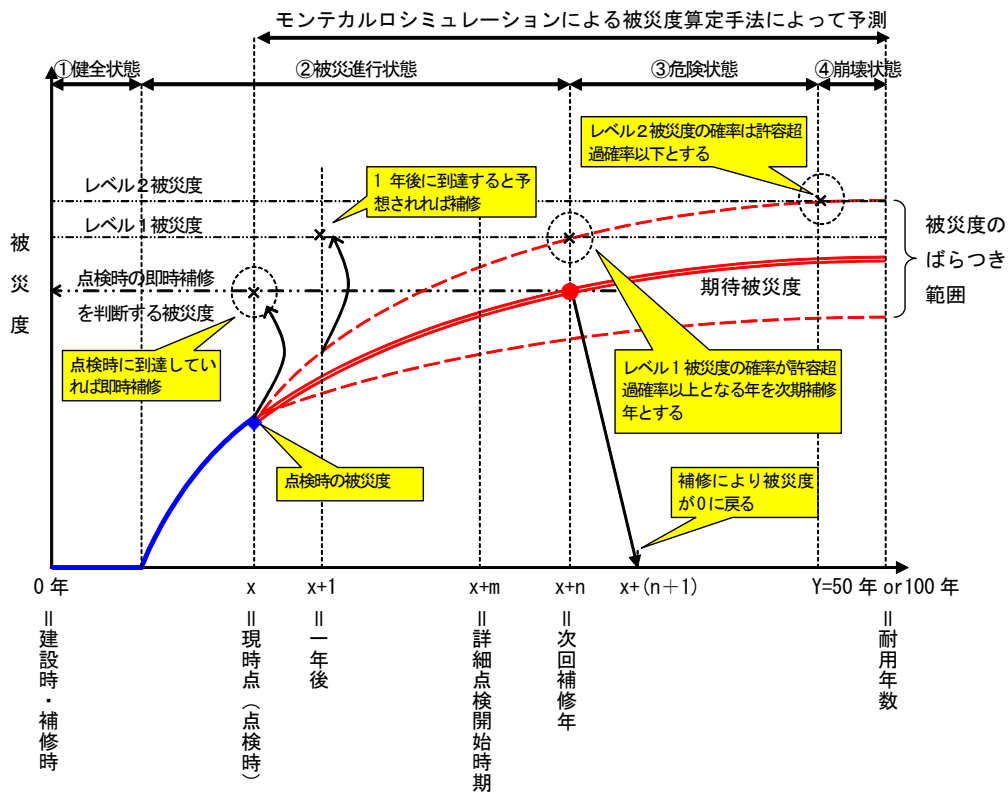


図-6 消波ブロックの被災・補修シナリオ

容超過確率を設定する必要がある。これらについては港湾施設管理者が被災リスクを考慮して設定することが基本であるが、ここではひとつの指標として、以下の考え方を提案した。

- ①補修限界レベルであるレベル1被災度は、上部工に作用する波力実験結果や補修マニュアル²⁾をもとに、表層1層のブロックが全て移動した状態とする。
- ②機能喪失レベルであるレベル2被災度は、上部工に作用する波力が増大し、上部工の滑動や被覆材の吸い出しが生じる可能性がある状態として、表層1層と上部工前面のブロックが全て移動した状態とする。
- ③限界被災レベルの許容超過確率は、日本の防波堤の許容破壊確率³⁾より、 $3 \times 10^{-2} \sim 3 \times 10^{-3}$ とする。
- ④即時補修の必要性を判断する被災度は、点検時に得られる被災度が確定値(期待値)であることから、レベル1被災度が許容超過確率以上となった状態における期待値として定義する。

3) 被災度に基づく維持管理支援方法の提案

図-7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の全体フローを示す。

まず、傾斜堤の設備点検等により得られた消波

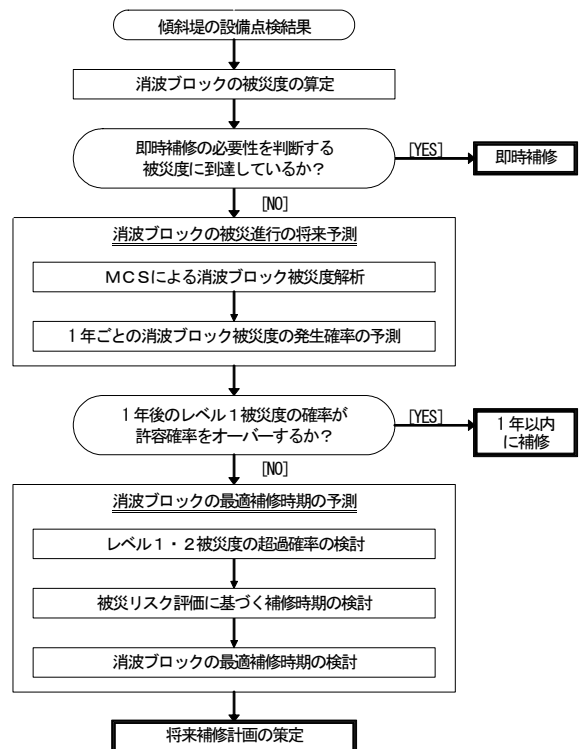


図-7 傾斜堤の維持管理支援方法のフロー

ブロックの断面形状から、式(1)を用いて現状での被災度を算定する。この被災度が即時補修の必要性を判断する被災度に到達していれば即時補修とする。

次に、消波ブロックの被災度が即時補修の必要性を判断する被災度に到達していなければ、前述の図-5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。

3) 被災リスク評価に基づく補修時期の設定方法

消波ブロックの最適補修時期を設定する一つの方法として、ライフサイクルコストを用いた被災リスク評価による方法がある。

ライフサイクルコストとは、耐用期間中に予想される総費用で、一般には初期建設費、補修費用、機能低下に伴う損失費およびリスク等が含まれる。この費用を最小とすることが最も合理的であると考えられる。

ここでは、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したライフサイクルコストを算定し、被災リスク評価に基づいた補修時期の設定方法について検討した。ここで、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被災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。

$$CC_y = \begin{cases} \sum_{i=0}^{i=\infty} (A_i \times P_1 \times R_{yi}) & ; \text{補修年次} \\ 0 & ; \text{非補修年次} \end{cases} \quad (3)$$

$$CR1_y = \sum_{i=0}^{i=\infty} ((A_i \times P_1 + P_2) \times R_{yi}) \quad (4)$$

$$CR2_y = \sum_{i=0}^{i=\infty} (P_3 \times R_{yi}) \quad (5)$$

$$CR_y = (CR1_y + CR2_y) - (CR1_{y-1} + CR2_{y-1}) \quad (6)$$

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 は健全状態および被災進行状態、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。

$$C_{ETC} = \sum_{i=n}^{i=\infty} \sum_{y_i}^{t=y(i+1)-1} \frac{CC_{t-y_i} + CR_{t-y_i}}{(1+\beta)^t} \quad (7)$$

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

4. 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

提案した維持管理支援方法を用いて、図-8に示すモデル防波堤の試験を行った。モデル防波堤の設置水深は $h = 9.1m$ 、堤体位置での設計波は

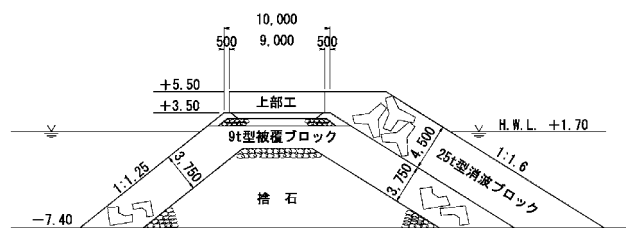


図-8 検討対象モデル防波堤の標準断面図

$H_{1/3} = 6.4m$, $T_{1/3} = 12.0s$, 高波浪の極値統計分布は Weibull 分布 ($k = 2.00$), 高波浪の出現回数と波数は, 既往の研究成果¹⁾より, それぞれ 1 回/年, 1000 波/1 回とした。

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。

消波ブロックの限界被災レベルに対する被災度については, レベル 1 被災度は 2.3, レベル 2 被災度は 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 3×10^{-3} とした。

2) 被災度解析手法による被災進行予測

図-9 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被災度の確率分布の一例である。これによれば, モデル防波堤の

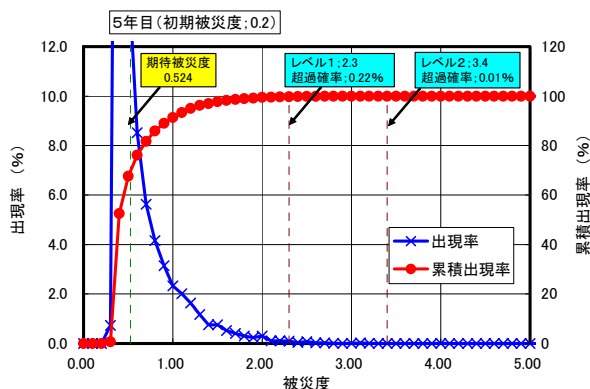


図-9 代表年の被災度の確率分布

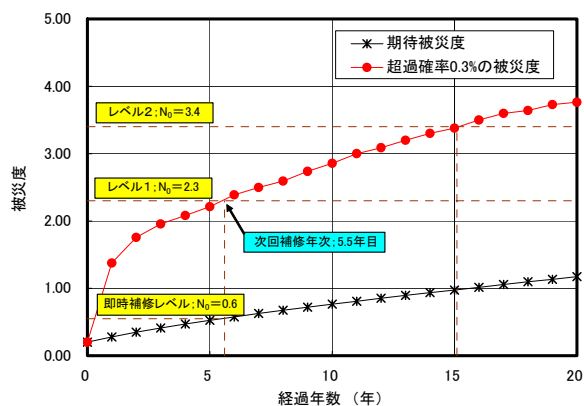


図-10 経過年数ごとの被災度

5 年目の期待被災度は 0.524, レベル 1 被災度の超過確率は 0.22%, レベル 2 被災度の超過確率は 0.01% である。被災度解析では, このような被災度の発生確率分布を経過年ごとに求めることができる。

図-10 は経過年ごとの被災度の確率分布から求めた期待被災度と超過確率 3×10^{-3} に対応する被災度の経年変化である。これによれば, 許容超過確率 3×10^{-3} に対応する被災度がレベル 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 5 年目が適切であると判断される。

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-11 はライフサイクルコストの算定に用いた補修・復旧費の設定例である。健全状態と被災進行状態の場合は, 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。

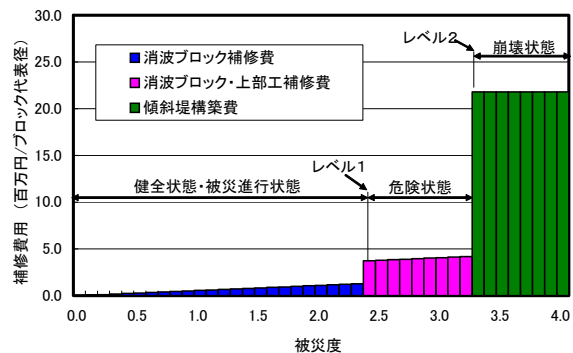


図-11 被災度に対する補修・復旧費用の設定例

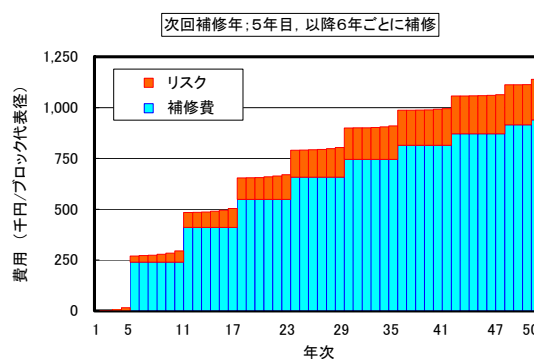


図-12 ライフサイクルコストの算定例

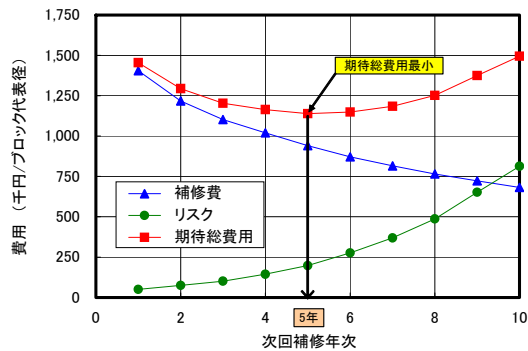


図-13 次回補修年次をパラメータとしたライフサイクルコストの算定結果

図-12 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-13 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、●は被災リスクで、■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するが、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の維持管理においては、消波ブロックの変形が生じた場合には即時補修を実施していた。当社では、この維持管理をより合理的に計画・実施する観点から、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・実施が可能となり、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。

なお、本方法は、現在、原子力発電所の防波堤の維持管理に適用し、消波ブロックの合理的な補修計画を検討中である。また、今後はさらに他の火力・原子力発電所にも本方法を適用していく予定である。

【謝辞】

本論文は、東京電力(株)技術開発研究所および原子力技術・品質安全部からの受託研究成果の一部をとりまとめたものです。本手法の開発にあたっては、東京電力(株)技術開発研究所設備基盤技術グループ興野主管研究員、原子力技術・品質安全部柴崎副長を始め、関係者各位から多大なるご指導・ご助言を頂きました。ここに、感謝の意を表します。

【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.