

波群特性の差異を考慮した離岸堤の総補修費用の算定

Expected Total Repair Cost of Detached Breakwaters Including Influences of Wave Group Characteristics of Incident Waves

荒木進歩¹・浦井 剛²・牧野宏俊³・有田 守⁴・出口一郎⁵

Susumu ARAKI, Gou URAI, Hirotoshi MAKINO, Mamoru ARITA and Ichiro DEGUCHI

Expected total repair cost of detached breakwaters is estimated in this study. The criterion for repair is based on the reduction of hydraulic performance of the detached breakwaters. The relationship between incident wave height, deformation of the detached breakwater body and transmitted wave height is measured in experiments. The influences of wave group characteristic of incident waves on the transmitted wave height behind the detached breakwater are taken into account. Wave group characteristics have a great influence on the expected total repair cost because the deformation of the detached breakwater and the transmitted wave height are dependent on the wave group characteristics in a certain range of incident wave height.

1. はじめに

メンテナンスフリーで、かつ所要の性能を保持し続ける構造物は維持補修費が不要となり、理想的である。しかし現実には、構造物のメンテナンスを怠ると性能が低下し、災害を引き起こすことにもつながりかねない。そのため、構造物の性能劣化が進行しないうちに適切な維持補修を行うことにより所要の性能を保持し、構造物の延命化を図る動きが活発化している。しかし、あまりにも頻繁に維持補修を行うことは逆にコスト増を招くおそれがあり、限られた予算を圧迫することになる。したがって、適切な補修基準を定めて供用年数内の総補修費用を算定し、これに基づいて維持補修計画を立案することが重要である。

海岸構造物のライフサイクルコストの算定を行った研究として、長尾・松淵(1999)は混成堤に信頼性理論を適用するとともにライフサイクルコストを算定した。松淵・横田(1999)は係留施設を対象に維持管理費のマネジメントについて議論した。難波ら(2003)は海岸保全施設に計画的かつ効率的な維持補修を行うライフサイクルマネジメントの必要性を示した。捨石や消波ブロック構造物に着目した例としては荒木ら(2005)や高山ら(2006)などがある。

本研究では、離岸堤のような消波ブロック構造物を対象として、総補修費用が最小になる補修基準を見つけることにより、最適な補修計画の立案の一助となることを

目的とする。補修は堤体の性能が一定の水準を下回ったときに行うと考え、性能の指標としては堤体変形に伴う透過波高の変化のみを考えることとする。その際、荒木ら(2005)の検討を発展させ、想定する入射波の波群特性にも着目し、波群特性の差異が離岸堤の性能に及ぼす影響の検討、また、それを総補修費用算定モデルに組み込む。

2. 総補修費用算定モデル

(1) モデルの概要

荒木ら(2005)のモデルをもとに、入射波高の出現確率分布、入射波高と堤体変形量および透過波高の関係、補修基準、後背地での被害発生限界等を入力することにより、離岸堤の供用年数内の総補修費用を算定するモデルを作成した。総補修費用は、堤体自体の補修費と後背地の被害額の和からなるものと仮定し、モンテカルロ法により1ライフサイクル毎の来襲波浪のばらつきを平均化して総補修費用を求める形とした。荒木ら(2005)との相違点は、入射波の波群特性を考慮することと、堤体の補修基準に直結する堤体性能の評価方法である。

(2) 算定手法

堤体の補修費と後背地の被害額は、供用年数を50年と仮定し、モンテカルロ法により以下の項目に従って算定する。

- 運輸省港湾局監修(財)沿岸開発技術研究センター(1996)の全国港湾海洋波浪観測資料(NOWPHAS)のデータを参考にして年最大波の入射波高の出現確率分布を決定
- 決定した確率分布に従う乱数を発生させて入射波高を決定
- 発生させた入射波による堤体の変形量を算定

1 正 会 員 博(工) 大阪大学 准教授 大学院工学研究科
2 修(工) 松下システムソフト(株)
3 学生会員 大阪大学 大学院工学研究科
4 正 会 員 博(工) 大阪大学 助教 大学院工学研究科
5 正 会 員 工博 大阪大学 教授 大学院工学研究科

- d) 変形した堤体の背後への透過波高を算定
 e) 設定した補修基準および被害発生限界を超える場合は、それぞれ補修費および被害額を算出
 f) 供用年数分の計算を繰り返し
 g) 異なる乱数を発生させてb)～f)を繰り返し、補修費および被害額の平均を取る

a) の入射波高の確率分布は、荒木ら (2005) と同様に尺度母数 $A=1.87$ 、位置母数 $B=4.20$ 、形状母数 $k=2$ の Weibull 分布とした。なお、この入射波高の出現確率分布は現地スケールの沖での波浪に対するものであるため、後述する水理実験では造波可能な波高にまで低減させた。また、c) の入射波による堤体の変形量の算定、および d) の堤体背後への透過波高の算定には水理実験の結果を用いることとした。

(3) 堤体の性能と補修基準

堤体の性能は堤体背後への透過波高の大きさを表す。堤体の性能が低下 (すなわち透過波高が増大) し、設定した補修基準を上回った場合に堤体の変形を修復し、原形に復旧させることとした。堤体の補修は翌年の高波浪来襲時まで完了し、完全に初期状態の性能を回復するものとした。

なお、荒木ら (2005) のモデルでは堤体の性能を評価するために、堤体の性能を表す透過波高と後背地の被害額算定のための透過波高の 2 種類を用いていた。しかし、本モデルでは後背地の被害額算定のみを堤体背後への透過波高の大きさから算定し、堤体の補修基準は堤体の変形の程度で表した。これは本質的には荒木ら (2005) のモデルと変わりはないが、堤体の変形量が大きくなれば堤体背後への透過波高も大きくなることが明らかであり、モデルを簡略化するためである。

3. 水理実験

(1) 水理実験の概要

水理実験は図-1 に示す長さ 27 m、幅 0.7 m の大阪大学の屋内断面 2 次元水路で行った。水路内に設置された水平な固定床上に天端幅 $B=24$ cm、天端高さ $h_c=5$ cm、法先水深 $h=25$ cm、法面勾配 1:4/3 の離岸堤模型を作製した。堤体は代表粒径 $D_{50}=1.59$ cm の碎石を用いて中詰材とし、質量 14.5 g の消波ブロックで被覆した。なお、縮尺は 1/25 程度を想定した。

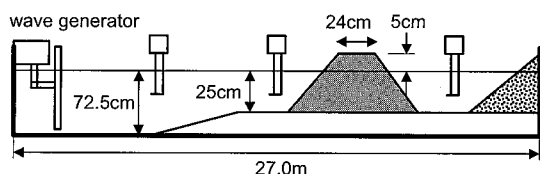


図-1 実験水槽の概要

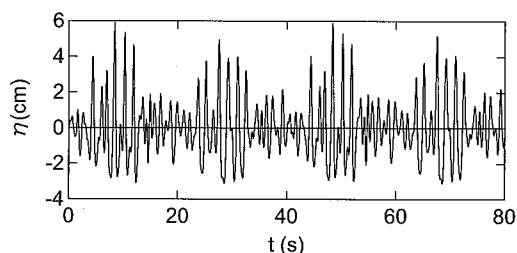
図中に示すように、堤体前面および背後の水面変動を容量式波高計により測定した。また、堤体の形状は水路の幅方向に 15 cm 間隔で設定された 3 測線上で岸沖方向に 3 cm 間隔で 2000 波ないしは 4000 波入射ごとにレーザ変位計で測定し、水路の幅方向 3 測線の平均を堤体の形状とした。

(2) 実験波

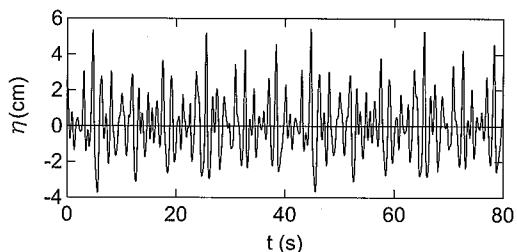
実験波は離岸堤設置位置での有義波高 $H_{1/3}=6.3 \sim 6.8$ cm、有義波周期 $T_{1/3}=1.5$ s で、Bretschneider- 光易型を目標スペクトルとする不規則波とした。また、波群特性の違いによる影響を検討するため、成分波間の位相を変化させることにより有義波諸元およびスペクトル形状がほぼ同じで、連長が異なる不規則波を発生させた。連長は有義波高 $H_{1/3}$ を超える波高が連続して出現する波数で表現した。異なる入射波高および異なる連長を持つ不規則波として、本研究では表-1 に示す 6 種類の実験波を用いた。表の有義波高 $H_{1/3}$ は造波機前で測定されたものである。図-2 に、離岸堤を設置しない状態の、堤体法先付近で測定された wave3 と wave4 の水位変動の時系列を示す。

表-1 実験波の諸元

	$H_{1/3}$ (cm)	$T_{1/3}$ (s)	平均連長
wave1	6.2	1.5	1.73
wave2	6.3	1.5	1.00
wave3	7.7	1.5	1.28
wave4	7.7	1.5	1.00
wave5	8.0	1.5	1.62
wave6	8.0	1.5	1.00

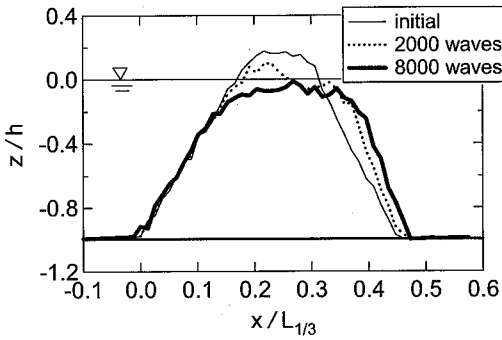


(a) wave3の水位変動

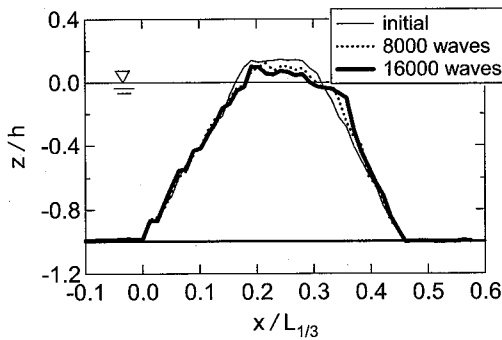


(b) wave4の水位変動

図-2 実験波の水位変動



(a) wave3 による堤体の変形形状



(b) wave4 による堤体の変形形状

図-3 堤体の変形形状

(3) 堤体の変形形状

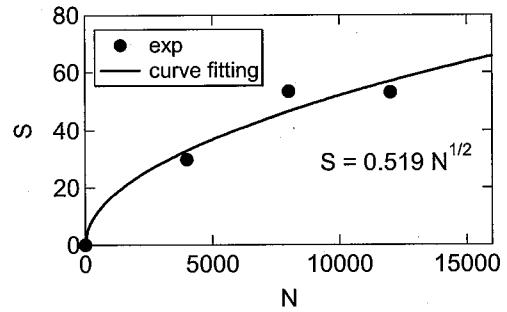
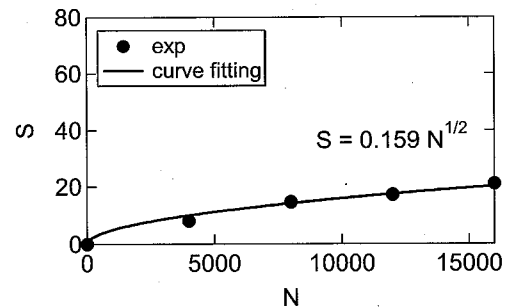
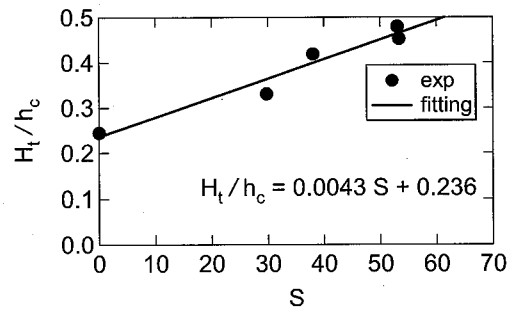
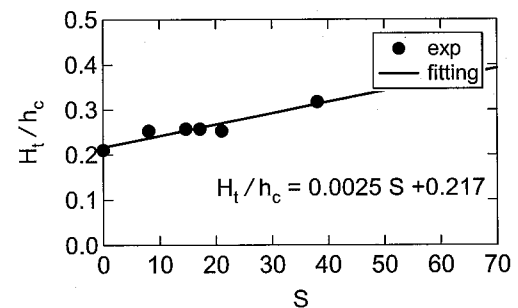
図-3 に wave3 および wave4 による堤体の変形形状を示す。榎木ら (1984) が指摘したように、消波ブロック構造物の変形に及ぼす入射波の連長の影響は大きく、wave3 と wave4 の有義波諸元はほぼ同一であるにもかかわらず、連長の長い wave3 の作用下のほうが堤体の変形量のはるかに大きくなることが分かる。

しかし、有義波高が wave3 および wave4 より小さい入射波の場合は、そもそも消波ブロックの移動が少ないため、連長の相違が堤体変形量に及ぼす影響は小さい。同様に、有義波高が wave3 および wave4 より大きい入射波の場合は、連長より入射波高の影響が大きく現れ、消波ブロックが容易に移動するため、連長の相違が堤体変形量に及ぼす影響は小さい。

なお、入射波の有義波高が 6 cm 以下の場合、堤体の変形はごくわずかであることを別途、確認している。

(4) 堤体の変形レベルと作用波数

図-4 に、wave3 および wave4 による堤体の変形レベル S ($S = Ae/D_{50}^2$, Ae : 侵食域の断面積, D_{50} : 被覆材の代表粒径) と作用波数 N の関係を示す。作用波数が多くなるにつれて変形レベル S は増加するが、初期の段階での変形レベルの増加量が特に大きい。そのため、

(a) wave3 作用下での S と N (b) wave4 作用下での S と N 図-4 堤体の変形レベル S と作用波数 N (a) wave3 作用下での H_t と S (b) wave4 作用下での H_t と S 図-5 堤体背後への透過波高 H_t と変形レベル S

測定データは少ないが、変形レベル S を作用波数 N の平方根に比例する形で近似した。その近似式は図中に示す通りである。

(5) 堤体の変形レベルと透過波高

図-5 に、wave3 および wave4 による堤体の変形レベル S と堤体背後への透過波高 H_t の関係を示す。縦軸の透過波高 H_t は堤体の天端高さ h_c で無次元化している。透過性構造物のため、また、堤体の天端高さが比較的低いため、堤体が変形していない初期形状の段階でも堤体背後に波高が伝達している。変形レベル S と無次元透過波高 H_t/h_c の関係は 1 次式で近似した。その近似式は図中に示す通りである。

4. 総補修費用の算定手順

(1) 補修の判定手順

前述のように、堤体の補修は堤体の変形量 S が設定した基準値 S_c (補修基準) を上回った場合に行う。また、後背地での被害は堤体背後の透過波高 H_t が設定した基準値 H_{tc} (被害額発生限界波高) を上回った場合に発生する。具体的な手順は以下の通りである。

- 入射波高を発生確率分布に従って発生させ、これを表-1 の wave1 から wave6 に分類
- wave3 と wave4 は有義波高と有義波周期がほぼ同一で連長のみが異なるが、これらの波浪の分類は、別途、発生させた一様乱数の大きさから判定
- 高波浪は 2000 波継続すると仮定し、分類した波が作用したときの堤体変形レベル S を図-4 に示した関係式から算定 (図-4 は wave3 および wave4 の場合)
- 分類した波が作用したときの堤体背後への透過波高 H_t を図-5 に示した関係式から算定 (図-5 は wave3 および wave4 の場合)
- 算定した堤体の変形レベル S が、補修基準として設定した値を上回った場合は補修費を計算
- 算定した透過波高 H_t が、被害発生限界として設定した値を上回った場合は被害額を計算

(2) 入射波の作用履歴

入射波の作用により堤体が変形しても、補修基準値以下であれば補修は行わず、変形した状態で更なる高波浪の入射を受けることになる。本モデルにおいては、このような入射波の作用履歴を、wave3 の入射後、wave4 が入射する場合を例に取り、以下のように考慮した。なお、前述の通り、高波浪は $N_0=2000$ 波継続すると仮定した。

- wave3 が $N_0=2000$ 波入射したときの堤体の変形レベル S を図-4(a) から算出する
- 算出した変形レベル S の値は、wave4 の作用下

では何波の入射が必要となるかを図-4(b) から逆算する ($N' = (S/0.159)^2$)

- 逆算された入射波数 N' に wave4 の入射波数 ($N_0=2000$) を加え、 $N'+N_0$ の波数による堤体の変形量 S を図-4(b) から求める

(3) 補修費および被害額の算定

堤体の補修費 C_r は次式で算定した。

$S > S_c$ のとき

$$C_r = C_{ru} \times A_e \times b + C_{ro} \dots \dots \dots (1)$$

$S < S_c$ のとき

$$C_r = 0 \dots \dots \dots (2)$$

ここに、 S_c : 堤体の補修基準、 C_{ru} : 離岸堤堤体の単位体積当たりの補修費、 C_{ro} : 離岸堤堤体を補修する際に被災箇所の体積にかかわらず発生する補修費、 b : 侵食域の沿岸方向長さ (本研究では断面 2 次元で考えているので $b=1.0$ m)。

後背地の被害額 C_d は、後背地の利用状況等により大きく異なるため、次式で算定できるものと仮定した。

$H_t > H_{tc}$ のとき

$$C_d = C_{da} \times (H_t/h_c - H_{tc}/h_c) + C_{db} \dots \dots \dots (3)$$

$H_t < H_{tc}$ のとき

$$C_d = 0 \dots \dots \dots (4)$$

ここに、 C_{da} 、 C_{db} : 後背地の利用状況等に依存する定数、 H_{tc} : 後背地での被害が発生する限界の透過波高。

供用年数内での堤体の補修費と後背地の被害額の和 C_t は社会的割引率 ($=0.04$) を考慮して、各年の補修費と被害額をすべて足し合わせるにより得られる。

5. 算定結果

(1) 堤体補修費 C_r と後背地の被害額 C_d の変化

図-6 に計算結果の一例を示す。連長の大きな波 (水理実験での wave1, wave3 および wave5 に相当) が発生する確率 γ は 50 %、後背地の被害額発生限界は $H_{tc}/h_c=0.39$ として計算した。図の横軸は堤体の補修基準を表す変形レベル S_c 、縦軸は費用 (単位: 千円) である。凡例で示すように、堤体の補修費 C_r 、後背地の被害額 C_d および両者の和で表される総補修費用 C_t を分けて図示している。総補修費用算定に用いる式 (1) および式 (3) のパラメータは堤体の規模、後背地の重要度等により大きく変化するため、ここでは $C_{ru}=74.6$ (千円/ m^3)、 $C_{da}=95,000$ (千円/ m)、 $C_{db}=222.4$ (千円/ m) の値が適用されると仮定した。

横軸の堤体の補修基準 S_c が小さい値に設定されると、

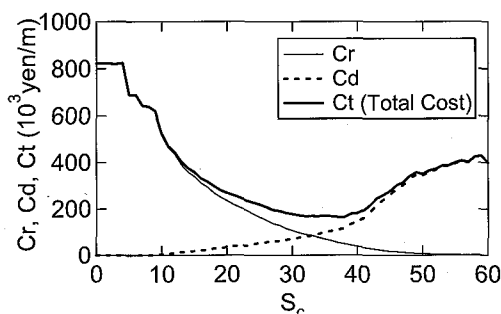
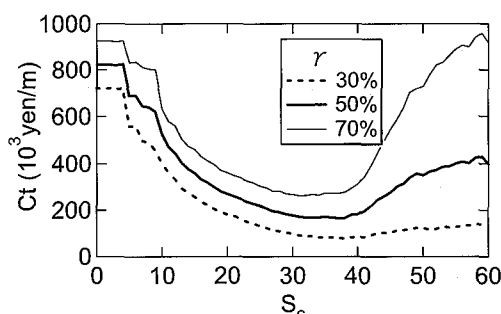
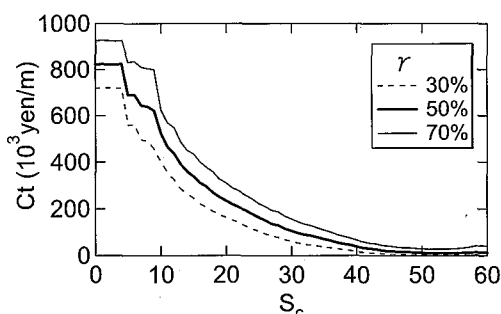


図-6 総補修費用算定結果

図-7 連長が大きな波の発生確率の影響 ($H_{ic}/h_c=0.39$)図-8 連長が大きな波の発生確率の影響 ($H_{ic}/h_c=0.45$)

後背地に被害は全く生じないが、堤体の補修を頻繁に行うため、総補修費用 C_t は高くなる。逆に、堤体の補修基準 S_c が大きな値に設定されると、堤体に変形が生じてもほとんど補修を行わないため堤体補修費 C_r は小さくなるが、堤体背後への透過波高が増大するため、後背地の被害額 C_d が大きくなり、総補修費用 C_t は大きくなる。

(2) 連長が大きな波の発生確率の影響

図-7 に、連長の大きな波の発生確率 γ を変化させたときの総補修費用 C_t の変化を示す。後背地の被害額発生限界は同様に $H_{ic}/h_c=0.39$ として計算した。連長が大きな波が入射した場合、図-3 に示したように堤体が大きく変形し、透過波高の増大が顕著となるため、総補

修費用が大きくなる。その発生確率 γ が増加すると、総補修費用 C_t が増加することが示されている。特に、今回行った計算条件では、補修基準 S_c を大きな値に設定した場合の、後背地での被害額に大きな差が生じる結果となった。

図-8 に、連長の大きな波の発生確率 γ を変化させたときの総補修費用 C_t の変化を示すが、後背地の被害額発生限界は $H_{ic}/h_c=0.45$ として計算した。図-7 の場合とは異なり、補修基準 S_c が小さい値に設定された場合の、堤体補修費に差が現れていることが分かる。これは堤体背後への透過波高が大きくなっても、後背地の被害が発生しにくいと考えられる。

6. まとめ

本研究では、波の連長の差異による影響を考慮して、離岸堤のような消波ブロック構造体の総補修費用（堤体の補修費と後背地の被害額の和）を算定した。連長が大きい波浪では堤体の変形量が大きくなるため堤体背後への透過波高も大きくなり、総補修費用に大きく影響を与えることが分かった。

謝辞

本研究の一部は科学研究費補助金（若手研究（B）：研究代表者 荒木進歩、課題番号 19760340）の補助を受けて実施した。ここに謝意を表します。また本研究で使用した模型消波ブロックは、株式会社不動産テトラから借用させて頂いた。併せて謝意を表します。

参考文献

- 荒木進歩・田中隆太・浦井 剛・出口一郎(2005): 透過波高を性能指標とした捨石防波堤の最適補修計画の検討, 海岸工学論文集, 第52巻, pp. 856-860.
- 運輸省港湾局監修(財)沿岸開発技術研究センター(1996): 全国港湾海洋波浪観測 25 年統計資料 NOWPHAS 1970～1994, 640p.
- 榎木 亨・柳 青魯・楠見正人(1984): 不規則波による捨石防波堤の破壊特性, 第31回海岸工学講演会論文集, pp. 562-566.
- 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.
- 長尾 毅・松淵 知(1999): 破壊確率を考慮した防波堤のライフサイクルコストと許容破壊確率, 港湾技術研究所報告, 第38巻, 第2号, pp. 395-421.
- 難波喬司・横田 弘・橘 義規・田中樹由・岩田好一郎(2003): 海岸保全施設における LCM (ライフサイクルマネジメント) の導入検討, 海岸工学論文集, 第50巻, pp. 916-920.
- 松淵 知・横田 弘(1999): 係留施設のライフサイクルコスト発生と維持管理意志決定支援システムの構築に関する基礎的研究, 港湾技術研究所報告, 第38巻, 第2号, pp. 423-473.