

透過波高を性能指標とした捨石防波堤の最適な補修計画の検討

荒木進歩*・田中隆太**・浦井 剛***・出口一郎****

捨石防波堤の補修費用と後背地の被害額を算定した。耐用年数内における捨石防波堤の補修費用を削減するため、この算定手法を利用して補修費用と被害額の和が最小になるような補修基準の検討を行った。補修は、捨石防波堤の消波機能が低下し、透過波高が大きくなった際に行うものとし、透過波高の大ききで定めた。堤体の変形量に応じて補修費用を算定するため、入射波高と堤体変形量、および透過波高の関係を水理実験から求めた。補修費用と被害額の和を最小にする補修基準およびそのコストは、被害額発生限界によって大きく変化することが分かった。

1. はじめに

海岸構造物のコスト削減は喫緊の課題である。初期建設費の削減は言うまでもないが、供用開始後30年以上が経過し、機能の低下が見られる構造物が増加していることから維持補修費の削減も重要であり、ライフサイクルコストに関する研究が行われている（例えば、長尾・松淵, 1999; 松淵・横田, 1999; 難波ら, 2003）。構造物は外力の作用による変形や劣化に伴い機能が低下するため、構造物のライフサイクルを通じた維持補修費の削減を考えると、どの程度まで機能が低下した段階で補修を行うか（補修基準の設定）がポイントになると考えられる。

そこで、防波堤の最適な補修計画および補修基準の検討を目的として、高波浪による防波堤の変形とそれに伴う機能低下の評価、および耐用年数内での総補修費用と総被害額の算定を行う。また、補修基準を変化させることによる総補修費用と総被害額の変化を検討する。

本研究では、防波堤の機能低下を定量的に把握して補修計画を検討することに重点を置くため、防波堤の構造様式としては、比較的、消波機能の低下（堤体変形に伴う透過波高の変化）を測定しやすい捨石防波堤とする。

2. 補修費用と被害額の算定手法

(1) 性能指標の設定

防波堤が被災した場合、補修を行うかどうかは補修基準と照らし合わせて判断される。補修基準は、防波堤の機能低下に直結する変位量や変形量で規定されることが多いが、直接、性能面から規定することも可能である。本研究では、近年の性能設計導入に向けての活発な動きも踏まえ、機能・性能の低下の面から防波堤の補修を考えることとする。防波堤には種々の機能があるが、本研

究では最も重要である消波機能のみに着目し、測定または算定が比較的、容易な堤体背後への透過波高の大ききを性能指標とした。したがって、後背地での被害発生限界や、堤体の補修基準はすべて透過波高の大ききで表すこととする。

(2) 算定手順

補修費用と後背地の被害額の算定は、耐用年数を50年と仮定し、モンテカルロ法により以下の手順で行う。

- NOWPHAS のデータを参考にして入射波高の確率分布を仮定する
- 仮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する
- 発生させた入射波高による堤体の変形量を求める
- 変形した捨石防波堤から堤体背後への透過波高を求める
- 設定した補修基準および被害額を超える場合は、それぞれ補修費および被害額を算出する
- 耐用年数分の計算を行う
- 異なる乱数を発生させて b)~f) を繰り返し計算し、補修費および被害額の平均を取る
- c) および d) の入射波による堤体の変形量と透過波高の算出は、汎用性のある補修費用および被害額算出手法の確立の面からは数値モデル等を使用することが考えられるが、今回は水理実験の結果を用いて評価した。すなわち、水理実験の結果から、ある波浪が来襲したときの堤体変形量とその際の透過波高を関連づけ、入射波高が決まれば堤体変形量および透過波高を求めることができるようにした。水理実験の詳細については後述する。

(3) 入射波高の確率分布

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）から、ある一地点での有義波高のデータを取り出し、波高の確率分布を求めた。沖波の極値分布として形状母数 $k = 2.0$ の Weibull 分布に従うと考え、尺度母数 $A = 1.87$ 、位置母数 $B = 4.20$ を得た。

この確率分布は沖波に対するものであり、防波堤前面

* 正会員 博(工) 大阪大学講師 大学院工学研究科

** 正会員 修(工) 新日本製鐵(株)

*** 大阪大学 大学院工学研究科

**** 正会員 工博 大阪大学教授 大学院工学研究科

での波浪の確率分布ではないが、ここでは浅海域での波浪変形は無視し、防波堤にはこの確率分布を持つ波浪が入射するものと考えた。

(4) 補修費用と被害額

堤体の補修については、堤体背後の透過波高 H_t が設定した基準値 H_{tc} (補修基準)を上回った場合に堤体の変形を修復し、原形に復旧させた。補修基準を満たした場合は瞬時に補修が行われ、完全に初期状態の機能を回復するものとした。補修費用 C_r は次式で算定した。

$H_t > H_{tc}$ のとき

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

$H_t < H_{tc}$ のとき

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

ここに、 C_{ru} : 捨石防波堤堤体の単位体積あたりの補修費用、 A_e : 岸沖断面内で波浪により侵食された面積、 b : 侵食域の沿岸方向長さ(ここでは断面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、透過波高 H_t が設定した基準値 H_{dc} (被害発生限界)を上回った場合、後背地に被害が生じるとして被害額を計上した。被害額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。

$H_t > H_{dc}$ のとき

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

$H_t < H_{dc}$ のとき

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

ここに、 h_c : 捨石防波堤の天端高さ、 C_{da} 、 C_{db} : 後背地の利用状況等に依存する定数。

耐用年数内での総補修費用と総被害額の和 C_t は、社会的割引率($=0.04$)を考慮して、各年の補修費用と被害額をすべて足し合わせるにより得られる。

(5) 透過波高と防波堤の性能

補修費用と被害額は透過波高から算定する。また、補修基準と被害発生限界も透過波高の大きさに決定されている。ただし、両者で用いる透過波高には若干の相違があると考えられる。

被害額算定に用いる透過波高は、高波浪が来襲し、越波や透過などにより実際に防波堤の背後に伝達した波により被害が発生する。これに対して補修費用の算定においては、ある波浪が来襲して変形した防波堤が、想定する最大の波浪(設計波)に対してどの程度の性能を保持しているかを明示するための指標として透過波高を用いている。透過波高の大きさは入射波高により変化するので、補修費用の算定においては、様々な形状の変形断面に同一の波浪を入射させることによって防波堤の消波機能(透過波高の大きさ)をチェックする必要がある。すなわち、補修費用の算定は同一の入射波条件で検討しな

ければならない。

3. 水理実験

(1) 実験の概要

水理実験は前述の通り、入射波高と堤体の変形量、および透過波高を関連づけるために行った。図-1に示す大阪大学の断面2次元水路内に設置された水平な固定床上に粒径 $D_{50} = 1.59$ cmの碎石を用いて天端幅 $B = 25$ cm、沖側・岸側の法面勾配 $1:1.5$ の捨石防波堤を作製した。法先水深は $h = 30$ cmで天端高さを $h_c = 5$ cmとした。

入射波はBretschneider-光易型を目標スペクトルとする不規則波で有義波周期を1.6秒とし、有義波高を7 cm、8 cm、9 cmと3段階に変化させた。この有義波高を持つ入射波をそれぞれ波浪1、波浪2、波浪3とする。有義波周期1.6秒のとき、有義波高が7 cm未満では堤体の変形量が小さいことを予備実験により確認しており、したがって、波浪1～3の入射波が捨石防波堤に作用すると堤体は変形する。

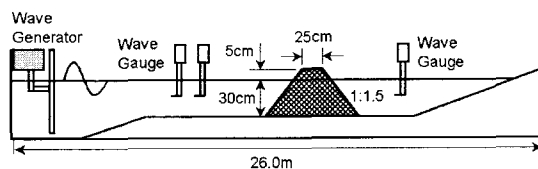


図-1 実験装置

(2) 入射波の作用履歴

防波堤の耐用年数内には堤体に被災(変形)が生じる波浪が何度も来襲する可能性があるが、補修基準の設定値によっては軽微な被災の場合は補修せずにそのまま供用を続けることもあり得る。したがって、入射波の履歴を考慮して堤体の変形および透過波を測定するため、波浪1～3を用いて、1つの波浪の作用後に初期断面への整形は行わずに次の波浪を作用させて断面形状および透過波高を測定した。

来襲波の作用履歴のパターンは耐用年数内での来襲回数が多くなると指数関数的に増えるため、全てのパターンを実験で検討することは不可能である。そこで、1つの実験ケースで作用させる波浪は3回までとした。表-1に1回目の入射波高が7 cm(波浪1)の場合の組み合わせパターンを示す。1回目の入射波高が8 cm(波浪2)、または9 cm(波浪3)の場合も同様にあるので、3種類の波浪を組み合わせた計27ケースの実験を行った。また、波の継続時間により堤体の変形量は変化するが、ここでは1つの波浪の作用時間は4000波で一定とした。

耐用年数内に被災をもたらす波浪が4回以上来襲して

も補修基準に達しない場合は、3回来襲した場合の実験結果を用いて計算することとした。これについては後述する。耐用年数内に1～2回しか高波浪が来襲しない場合は、3回まで作用させる実験結果の途中までを利用する。

表-1 入射波浪の組み合わせ(1回目 $H_1=7$ cm のとき)

実験 Case No.	1回目の波高 (4000波)	2回目の波高 (4000波)	3回目の波高 (4000波)
1	7 cm	7 cm	7 cm
2			8 cm
3			9 cm
4		8 cm	7 cm
5			8 cm
6			8 cm
7		9 cm	7 cm
8			8 cm
9			9 cm

(3) 測定項目

測定項目は入射波高、透過波高、および堤体の断面形状である。入射波高と透過波高は1ケース内で3種類の波浪を作用させる際、各波浪の造波開始直後と造波終了時(4000波作用時点)に測定し、堤体の断面形状は初期断面、および各波浪の造波終了時に測定した。堤体の形状は、水路内の中央および中央から左右に15 cmの地点に設定した3測線上でレーザー変位計を用いて測定し、3測線上での平均値を取って断面形状とした。

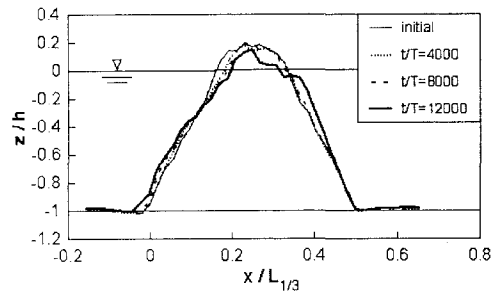
透過波高については前章5節で述べたように、被害額算定のためには実際に入射している波浪による透過波高を、また補修費用の算定のためには種々の形状を呈する防波堤に同一の高波浪を作用させたときの透過波高を測定する必要がある。被害額算定のための透過波高は、各波浪の造波終了時(4000波作用時点)での透過波高とし、これを H_{t1} とする。補修費用算定のための透過波高は、各波浪の造波終了後(4000波終了後)に波浪3(波高9 cm)を入射させたときの透過波高とし、これを H_{t2} とする。

(4) 実験結果

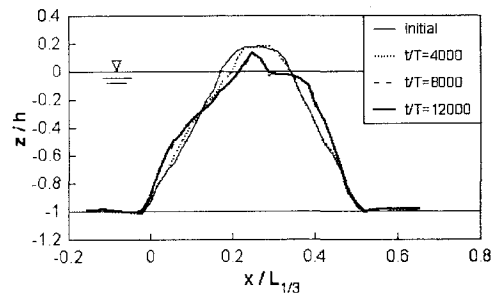
図-2に捨石防波堤の断面形状を示す。横軸は、防波堤設置水深において有義波周期により計算される波長 $L_{1/3}$ で無次元化した岸沖方向座標で岸向きが正、また縦軸は、防波堤設置水深で無次元化した鉛直座標で上向きが正である。

図-2(a), (b), (c)にそれぞれ「波浪1→波浪1→波浪3」、「波浪1→波浪3→波浪1」、および「波浪3→波浪1→波浪1」と作用させたときの断面形状を示す。作用させた波高とそれらの継続時間は同じであるが、作用させた順序(履歴)の違いにより、最終的な形状に相

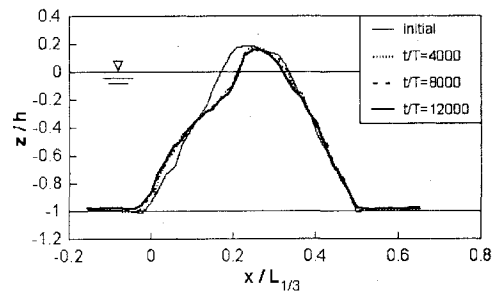
違が見られる。どのケースにおいても、沖側の法肩が侵食されて斜面の下方に捨石が堆積している点は同じであるが、図-2(a)および(b)では岸側の法肩も侵食されるとともに天端高さも低下している。これにより透過波高が増大していると考えられる。一方、図-2(c)では沖側の侵食量は大きいものの天端高さはほとんど低下していない。



(a) 波浪1→波浪1→波浪3



(b) 波浪1→波浪3→波浪1

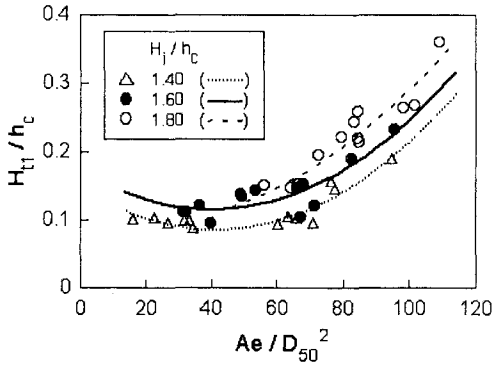


(c) 波浪3→波浪1→波浪1

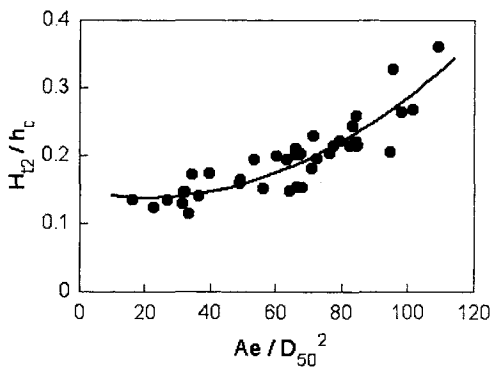
図-2 変形した捨石防波堤の断面形状

図-3(a)と(b)にそれぞれ透過波高 H_{t1} と堤体の侵食面積 A_e 、および透過波高 H_{t2} と堤体の侵食面積の関係を示す。図-3(a)では入射波の波高 H_i を波浪1(7 cm)、波浪2(8 cm)、波浪3(9 cm)ごとに分類し、それぞれに対して2次関数で近似している。侵食面積 A_e が小さいうちは透過波高 H_{t1} に大きな変化は見られないが、侵食面積が増大すると急激に透過波高 H_{t1} は大きくなる。

図-3(b)でも同様に、侵食面積が増大すると急激に透過波高 H_{t2} が大きくなっている。図中の実線は2次関数による近似曲線である。なお、透過波高 H_{t2} を測定する際には、入射波はすべて波浪3を用いているので入射波高ごとの分類はない。



(a) 透過波高 H_{t1} と侵食面積 A_e



(b) 透過波高 H_{t2} と侵食面積 A_e

図-3 透過波高と侵食面積の関係

(5) 補修までに変形が4回以上生じるとき

補修基準に達するまでに変形が4回以上生じる場合は実験結果を直接利用することはできない。そこで、4回目以降の変形は次のようにして求めた。

- 4回目に作用した入射波と同じ波浪が3回目に作用したときの侵食面積の変化量を、すべての実験結果の中から抽出する。
- 抽出した侵食面積の変化量の平均値を求める。
- その平均値を3回目までに来襲した入射波による侵食面積に加算する。

4. 補修費用と被害額の算定結果

(1) 計算条件

補修費用と被害額の算定には種々のパラメータの値を決める必要がある。補修費用の算定に用いるパラメータ

として捨石防波堤堤体の単位体積あたりの補修費用 C_{ru} は、沖縄県土木建築部港湾課(1996)を参考に $C_{ru} = 24.61$ (千円/ m^3)とした。被害額算定においては、後背地の利用状況等に依存する定数を $C_{da} = 20,000$ (千円/m) および $C_{db} = 22,240$ (千円/m)とした。補修基準を表す透過波高 H_{tc} は $0 < H_{tc} < 3.0$ (cm) で変化させた。また被害発生限界を表す透過波高 H_{td} は $0.9 < H_{td} < 1.8$ (cm) で変化させた。モンテカルロ法による繰り返し計算の回数 N は5000回程度では各回ごとの変動がやや大きかったため10000回とした。

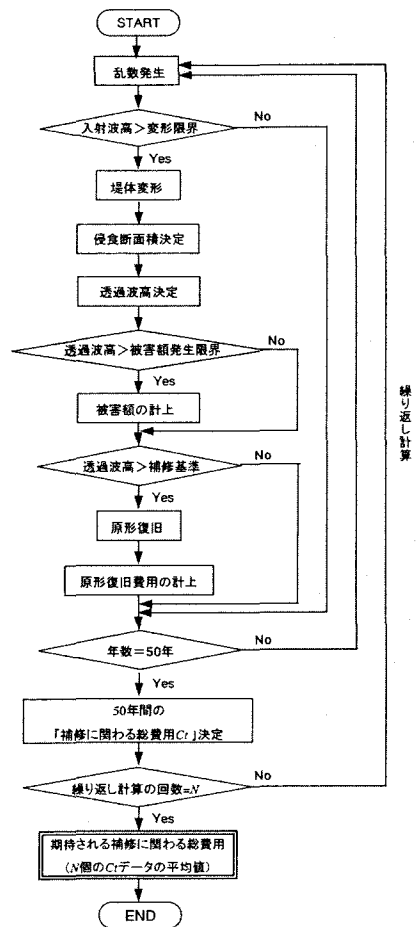


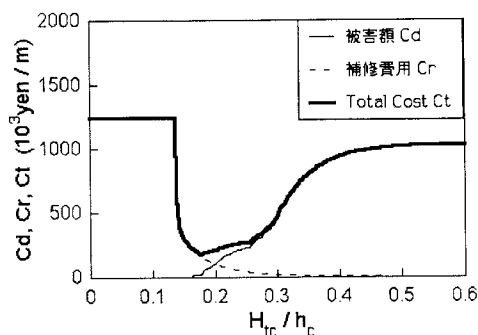
図-4 補修費用および被害額算定のフローチャート

図-4に算定手法のフローチャートを示す。

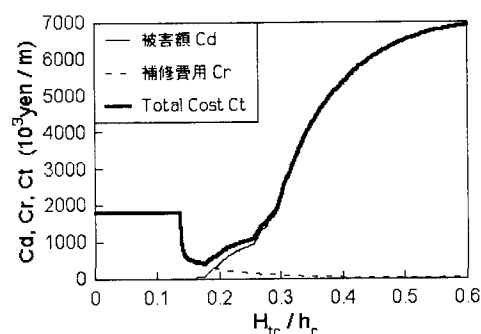
また、Weibull分布を仮定した入射波の出現確率分布は現地スケールの波高データをもとに求めたものであり、水理実験の結果を用いて侵食面積および透過波高を算定するためには、実験スケールへの換算が必要になる。入射波高の実験スケールへの換算は仮定したWeibull分布により計算される超過確率をもとに表-2に示す2つの

表-2 実験スケールでの入射波高の超過確率

入射波高	7 cm	8 cm	9 cm
Type A	18.3%	3.78%	0.47%
Type B	25.3%	6.36%	0.99%



(a) Type A により実験スケールに換算



(b) Type B により実験スケールに換算

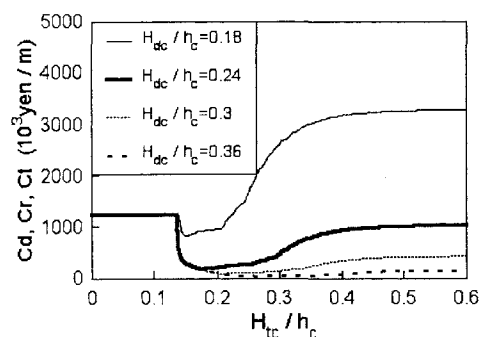
図-5 被害額と補修費用の算定結果

タイプで行うこととした。

(2) 計算結果

図-5 に、被害発生限界を $H_{dc} = 1.2$ cm ($H_{dc}/h_c = 0.24$) に固定し、補修基準 H_{tc} を変化させたときの被害額 C_d 、補修費用 C_r および両者の和であるトータルコスト C_t を図示する。図-5(a) は入射波高を Type A で換算した場合、図-5(b) は入射波高を Type B で換算した場合である。どちらも $H_{tc}/h_c < 0.14$ の範囲では補修基準が厳しく、わずかな変形でも必ず補修を行うため補修費用は一定である。 $0.14 < H_{tc}/h_c < 0.16$ の範囲では、堤体に変形しても補修を行わないケースが出てくるため補修費用が減少し始める。被害額は $H_{tc}/h_c = 0.16$ 以上で発生するが、トータルコストはしばらく減少して $H_{tc}/h_c = 0.18$ で最小となる。ここまでは図-5(a) と (b) とでコストの値は異なるものの、同じ傾向を示している。しかし、図-5(a) では $H_{tc}/h_c > 0.5$ ではほぼ一定であるが、高波浪の出現頻度が高い図-5(b) では $H_{tc}/h_c = 0.6$ においてもコストは上昇する傾向にある。

図-6 に、4通りの被害発生限界 H_{dc} に対して補修基準 H_{tc} を変化させたときのコストを図示する。実験スケールへの換算は Type A で行っている。被害発生限界が厳しい $H_{dc}/h_c = 0.18$ では早い段階から被害額が発生するので、トータルコストを最小にする補修基準も小さい値となる（補修基準が厳しくなる）。それに対して、被害発生限界が緩やかな $H_{dc}/h_c = 0.36$ では、堤体に変形して透過波高が増大しても後背地での被害額が小さいので、補修基準 H_{tc} も大きな値（緩やかな値）に設定することが可能である。また、トータルコストの最小値も $H_{dc}/h_c = 0.18$ の場合とは大きな差が見られる。

図-6 被害発生限界 H_{dc} がコストに及ぼす影響

5. あとがき

透過波高の大きさによる補修基準および被害発生限界を定め、入射波高と透過波高、および堤体の侵食面積との関係を水理実験の結果を利用することにより、耐用年数内での捨石防波堤の補修費用と後背地の被害額を算定した。今回は仮定を多数導入したが、今後はより現実に近い条件を取り込み、最適な補修計画の検討手法の確立を目指していく。

参考文献

- 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.
- 沖縄県土木建築部港湾課(1998): 港湾・海岸構造物被災施設に関する記録集, pp. 1-62.
- 長尾 毅・松岡 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. 395-422.
- 難波喬司・横田 弘・橘 義規・田中樹由・岩田好一朗(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.
- 松岡 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.