

期待総補修費の算定に基づく質量を割増した 被覆石による堤体補修の検討

REPAIR OF DETACHED BREAKWATER BODY USING RUBBLE STONE WITH
LARGER MASS ON THE BASIS OF ESTIMATION OF EXPECTED REPAIR COST

荒木進歩¹・出口一郎²
Susumu ARAKI and Ichiro DEGUCHI

¹正会員 博(工) 大阪大学 准教授 大学院工学研究科 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1)

²正会員 工博 大阪大学 教授 大学院工学研究科 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1)

The repair of detached breakwater body is discussed in this paper. In the repair of the detached breakwater body, the use of rubble stones with larger mass than the required mass in the initial design is proposed. Although the estimation of the repair cost depends on the circumstances of the detached breakwater, the effectiveness of such kind of repair method is investigated on the basis of estimation of the expected repair cost. The repair criterion was determined on the basis of transmitted wave height behind the detached breakwater.

The authors show that the repair cost was reduced in several cases where larger rubble stones were used for repairing the detached breakwater body. In other words, the stability of the detached breakwater improved at low repair cost by such kind of repair method in several cases.

Key Words : Repair cost, rubble stone, detached breakwater, transmitted wave height

1. はじめに

既存の海岸構造物は供用開始後 30 年以上を経過したものが増加しており, 適切な維持補修を行うことが重要である. 近年では, 海岸構造物のライフサイクルコスト算定やその最小化に関する研究が行われてきている. 吉岡・長尾¹⁾はケーソン式防波堤のライフサイクルコストの最小化の手法について検討し, また, 高山ら²⁾は護岸の被覆材の設計にライフサイクルコストの概念を導入している. しかし, 消波ブロック構造物や捨石構造物の適切な補修時期についてライフサイクルコストの面から検討した研究は著者ら³⁾以外にはほとんどない.

通常, 消波ブロックや捨石により構成された構造物は, 被災後の補修では供用開始時と同じ質量の被覆材により復旧されるが, 質量の大きな被覆材を用いて, より安定性を高めた状態に復旧することを考えてみたい. 質量の大きな被覆材を用いて補修すれば, それ以降に襲来する高波に対する堤体の安定性は高まり, 被災の回数は少なくなり, また被災の程度も小さくなることが期待される. 問題となるのは, 質量の大きな被覆材を設置する際の施工費(補修費)単価である. この施工費単価が被覆材の代表長さに比例して大きくなるならば, 被災回数および被災の程度の減少により削減した補修費を相殺してし

まう.

そこで本研究では, 構造物が被災した際に質量の大きな被覆材を用いて補修することの有効性を考えるため, 質量の大きな捨石で補修する際の補修費と, その後の堤体被災の関係を検討する. これにより, 既に供用を開始した構造物が, これから先, 遭遇する高波により被災したとき, 補修に用いる適切な質量の被覆材を選定されることが期待される.

2. 期待総補修費用の算定

(1) 期待総補修費用算定モデル

期待総補修費用の算定には荒木ら³⁾のモデルを若干, 改良して用いた. このモデルでは, 供用期間内での堤体の補修費, および堤体の被災に起因する後背地での被害額を算定することにより, 両者のバランスから総補修費用(=補修費+被害額)が最小となる補修基準を見出すことができる. その概要を以下に示す.

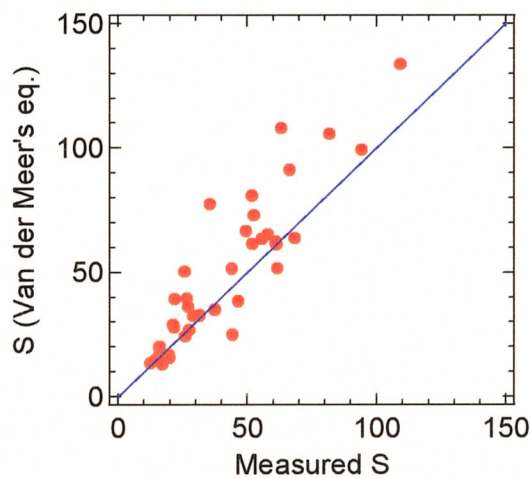
a) 補修基準

堤体の補修を行うかどうかは離岸堤の最も重要な機能である消波性能で判断することとした. したがって, 後背地での被害発生限界や, 堤体の補修基準は堤体背後への透過波高の大きさで表す.

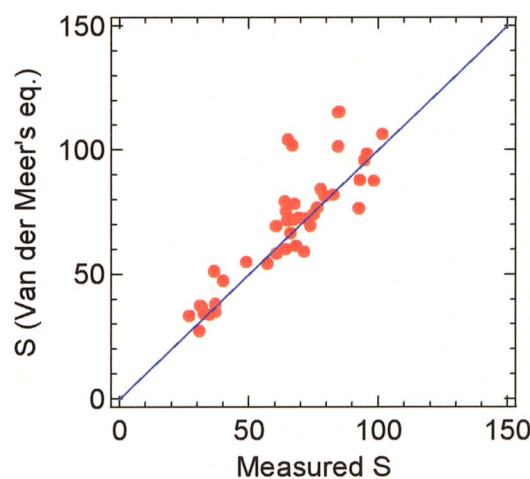
b) 算定手順

補修費用と後背地の被害額の算定は、モンテカルロ法により以下の手順で行う。

- ・ 運輸省港湾局監修（財）沿岸開発技術研究センター⁵⁾の全国港湾海洋波浪観測資料（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
- ・ 設定した年数分の計算を行う
- ・ 異なる乱数を発生させて以上の計算を繰り返し、補修費および被害額の平均を取る



(a) 初期断面からの堤体変形量に対する比較



(b) 入射波の変化の履歴を考慮した比較

図-1 Van der Meer 式⁴⁾と実験結果との比較

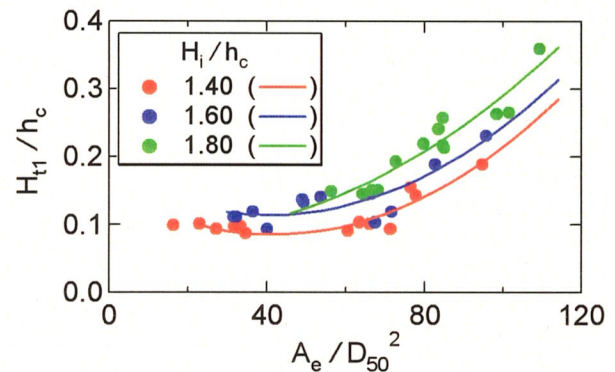
c) 入射波高の確率分布

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、年最大波高に対する確率分布を求めた。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。

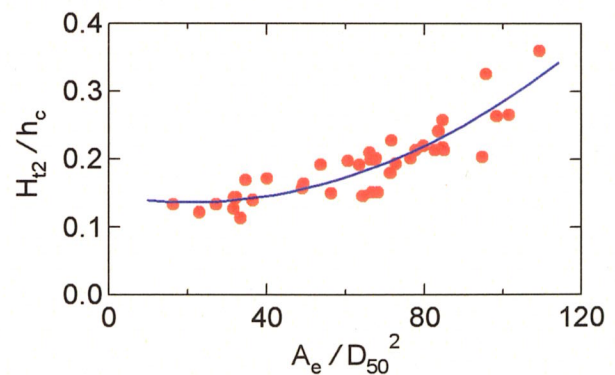
d) 堤体変形量と透過波高

入射波と堤体変形量の関係には Van der Meer の式⁴⁾を、また堤体変形量と透過波高の関係算出には、荒木ら³⁾の実験結果を用いた。図-1に Van der Meer 式⁴⁾の適用性を示す。図の横軸は荒木ら³⁾による実験結果、縦軸は Van der Meer 式⁴⁾による算定結果で、図-1(a)は初期断面からの堤体変形量に対する比較、図-1(b)は有義波高の異なる 2 組以上の波を作用させた場合の履歴を考慮した比較である。堤体の変形量は変形レベル S ($S = A_e/D_{50}^2$, A_e : 堤体の侵食面積, D_{50} : 堤体構成材の代表粒径) で表している。変形量が大きくなると算定精度がやや悪くなるが、概ね良好である。

図-2に透過波高と堤体変形量の関係を示す荒木ら³⁾の実験結果を示す。図-2(a)は 3 種類の波高を持つ不規則波（周期は一定）を入射させたときの、堤体背後への透過波高 H_{t1} と堤体の侵食面積 A_e の関係である (h_c : 堤体の天端高さ)。横軸の堤体侵食面積の無次元量は変形レベル S と等価である。縦軸の透過波高 H_{t1} は、ある波浪が入射したときに実際に



(a) 透過波高 H_{t1} と堤体変形量の関係



(b) 透過波高 H_{t2} と堤体変形量の関係

図-2 透過波高と堤体変形量の関係

堤体背後に透過する波高であるので、後背地での被害額の算定に用いる。この透過波高 H_{t1} は3種類の入射波高の大きさと分類して示されている。図-2(b)も透過波高と侵食面積の関係であるが、縦軸の透過波高 H_{t2} は堤体の消波性能を評価するための透過波高であり、図-2(a)の透過波高 H_{t1} とは異なる。堤体背後への透過波高の大きさは入射波高に依存するため、堤体の消波性能を評価するためには入射波高を統一しておく必要がある。そこで、様々に変形した断面に、図-2(a)の $H_t/h_c=1.80$ に相当する波を入射させたときに計測した透過波高が H_{t2} である。

図-2(a)および(b)には実験データの近似曲線が示されている。この近似曲線を利用することにより、入射波高が与えられれば図-1 から堤体の変形量が求まり、さらに図-2 から堤体背後への透過波高が求まる。これらの透過波高を用いて後述する堤体の補修費用と後背地の被害額を算定する。

e) 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_{t2} が設定した基準値 H_{rc} (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。補修基準を超えた場合は、翌年の高波浪が来襲する前までに補修が行われ、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、割増した質量(粒径)の捨石により補修する際の費用割増率を粒径の比で表現し、次式で算定する。

$H_t > H_{rc}$ のとき

$$C_r = (C_{ru} \times A_e \times b) \times (D/D_0)^\alpha + C_{r0} \quad (1)$$

$H_t < H_{rc}$ のとき

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

ここに、 C_{ru} : 離岸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(本研究では断面2次元で考えるので $b=1.0\text{m}$)、 C_{r0} : 補修のための工事費のうち、堤体の侵食域の大きさに依存しない費用、 D および D_0 : それぞれ補修の際に用いる捨石の粒径、および初期建設時から使用されていた捨石の粒径、 α : 定数である。

式(1)で算定される補修費用は、 $\alpha=1$ であれば粒径の比に比例して補修費用が増加し、 $\alpha=3$ であれば捨石の質量の比に比例して補修費用が増加することを意味する。捨石の粒径(あるいは質量)を増加した場合、補修費用に与える要因は、粒径の比(あるいは質量の比)で表される割増し以外の要因も大きいと考えられるが、ここでは式(1)で単純化して表すことができるものと仮定した。

一方、堤体の後背地の被害額 C_d は、透過波高 H_{t1} 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する。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。

$H_{t1} > H_{dc}$ のとき

$$C_d = C_{da} \times (H_{t1}/h_c - H_{dc}/h_c) + C_{db} \quad (3)$$

$H_{t1} < H_{dc}$ のとき

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

ここに、 h_c : 離岸堤の天端高さ、 C_{da} 、 C_{db} : 後背地の利用状況等に依存する定数である。

考慮する年数内での総補修費用と総被害額の和は、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。なお、式(1)および(3)に含まれる費用算定にかかわる定数の値は荒木ら³⁾を参考にした。

(2) 対象とする堤体の諸元

本研究では荒木ら³⁾の実験結果を用いる関係上、対象とする堤体は当該実験で用いられたものとなる。すなわち、粒径 1.59cm の砕石により作成された天端幅 $B=25\text{cm}$ 、天端高さ $h_c=5\text{cm}$ 、法先水深 $h=30\text{cm}$ 、沖側・岸側の法面勾配 $1:1.5$ の堤体である。

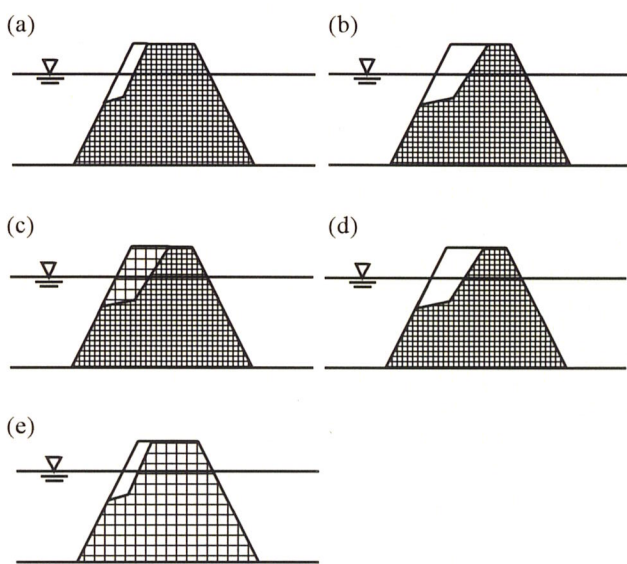


図-3 堤体の変形、補修の概念図

(3) 質量の大きな捨石による補修、およびその後の被災の考え方

堤体が被災し、要補修と判断された場合には、以下のように質量の大きな捨石により補修を行う(図-3参照)。ただし、初期建設時の捨石粒径を D_0 、補修時に用いる質量の異なる捨石粒径を D とする。

- ・堤体の変形しても、透過波高の大きさが設定されている基準値(補修基準)よりも小さければ補修は行わない(図-3(a))
- ・さらに堤体の変形することにより透過波高が大きくなり、基準値(補修基準)に達した場合は補修を行う(図-3(b))
- ・このとき、侵食域を異なる粒径の捨石で原型復旧させる(補修時の侵食域の断面積を A_{er} とする)(図-3(c))

- ・ その後の高波浪に対しては、粒径 D_0 のみ、および粒径 D のみで構成された均質な離岸堤を考え、それぞれに対して Van der Meer 式により侵食域の断面積を独立に求める（それぞれの面積を A_{e0} , A_{e1} とする）（図-3(d), (e)）
- ・ 侵食域の断面積 A_e は次式で表されるものと仮定する。

$A_{e1} < A_{er}$ かつ $A_{e0} < A_{er}$ の場合

$$A_e = A_{e1} \quad (5)$$

$A_{e1} < A_{er}$ かつ $A_{e0} > A_{er}$ の場合

$$A_e = (A_{e0} - A_{er}) + A_{e1} \quad (6)$$

$A_{e1} > A_{er}$ の場合

$$A_e = A_{e0} \quad (7)$$

式(5)は、粒径 D_0 のみ、および粒径 D のみで構成された離岸堤の侵食域の断面積がともに補修を受けた面積 A_{er} 以下である場合に相当し、補修を受けた箇所の砕石の粒径は D のみであるため、粒径 D のみで構成された離岸堤の侵食域の断面積 A_{e1} を侵食域の断面積 A_e とした。

式(6)は、粒径 D のみで構成された離岸堤の侵食域の断面積 A_{e1} は補修を受けた面積以下であるが、粒径 D_0 のみで構成された離岸堤の侵食域の断面積 A_{e0} が補修を受けた面積以上である場合に相当し、 A_{e0} と補修後の堤体において粒径 D で構成されている部分の面積 A_{er} の差 $(A_{e0} - A_{er})$ と A_{e1} の和を A_e とした。実際には、堤体断面内で $(A_{e0} - A_{er})$ と A_{e1} が生じる箇所は連続していないかもしれないが、ここでは両者が連続した侵食域の断面積 A_e であると仮定した。

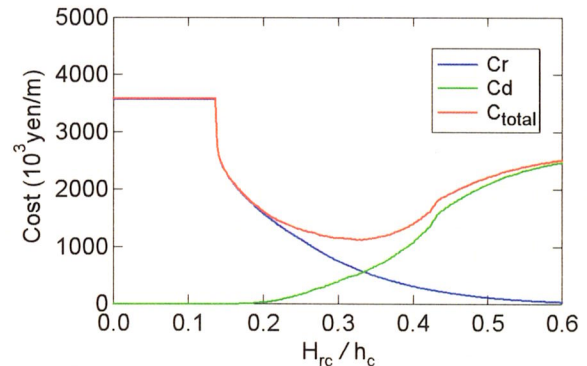
式(7)は、粒径 D_0 のみ、および粒径 D のみで構成された離岸堤の侵食域の断面積がともに補修を受けた面積 A_{er} 以上である場合に相当し、粒径 D_0 のみで構成された離岸堤の侵食域の断面積 A_{e0} を侵食域の断面積 A_e とした。

3. 補修基準と総補修費用の関係

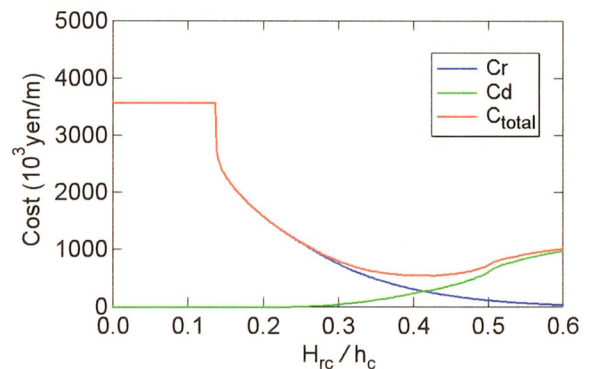
前章で示した期待総補修費用の算定モデルにより期待総補修費用を求めることができるが、堤体の補修基準と後背地での被害発生限界を決める必要がある。両者とも、透過波高の大きさと与えるが、ここでは、補修基準をパラメータとして変化させた場合の堤体の総補修費用の変化を検討する。

図-4 に、補修基準 H_{rc} と補修費用 C_r 、後背地の被害額 C_d および両者の和で表される期待総補修費用 C_{total} との関係を示す。横軸が離岸堤の天端高さ h_c で無次元化した補修基準、縦軸がそれぞれの費用である。図-4(a)は被害発生限界を $H_{dc}/h_c=0.4$ とした場合、図-4(b)は被害発生限界を $H_{dc}/h_c=0.5$ とした場合である。構造物の耐用年数を 50 年と仮定し、50 年間の計算を行ったものである。

どちらの場合も補修基準 H_{rc}/h_c が小さいときは小さな変形が生じるとすぐに補修を行うことになるため、期待総補修費用＝堤体の補修費用となり、一定値を取る。補修基準が緩やかになると変形が生じても補修を行わない場合が生じるので補修費 C_r が低減し始める。さらに補修基準が緩やかになると、後背地で被害が発生し始め、総補修費用は最小値をとった後、再び増加し始める。ただし、図-4(b)のケースは図-4(a)のケースより後背地での被害発生が遅れるため、最小値を取った後の総補修費用の増加が緩やかである。



(a) $H_{dc}/h_c=0.4$ の場合



(b) $H_{dc}/h_c=0.5$ の場合

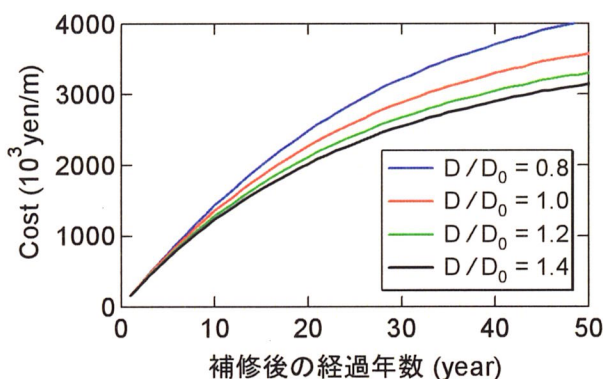
図-4 補修基準と期待総補修費用の関係

4. 粒径が増加しても補修費単価が変わらない場合

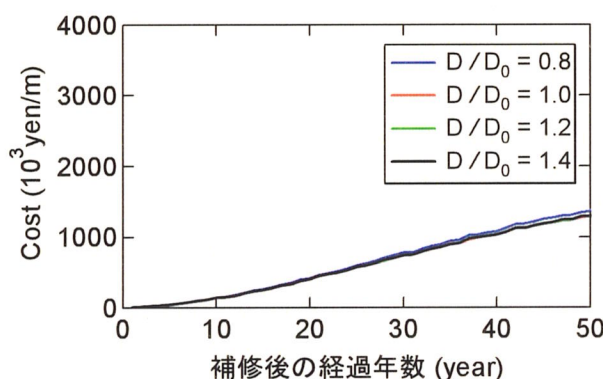
粒径が増加しても補修費単価が変わらないということは、費用の追加なしに高波浪に対する安定性が高まり、堤体の変形に伴う透過波高の増大も抑えられることを意味している。したがって、質量を増加して補修を行うほうが、期待総補修費用は小さくなるはずである。

図-5 に粒径が増加しても補修費単価が変わらない場合 ($\alpha=0$) の期待総補修費用の計算結果を示す。

横軸は補修を行ってからの経過年数、縦軸が総補修費用である。図-5(a)は、被害発生限界が $H_{dc}/h_c=0.4$ (図-4(a) のケース) で、堤体の補修基準を $H_{rc}/h_c=0.1$ とした場合の期待総補修費用である。 $D/D_0=1.2$ で表される質量を割増した場合の補修は、 $D/D_0=1.0$ で表される割増しない場合の補修より、期待総補修費用が低減していることが示されている。



(a) $H_{dc}/h_c=0.4$, $H_{rc}/h_c=0.1$ の場合



(b) $H_{dc}/h_c=0.4$, $H_{rc}/h_c=0.25$ の場合

図-5 補修費単価が変わらない場合の期待総補修費用

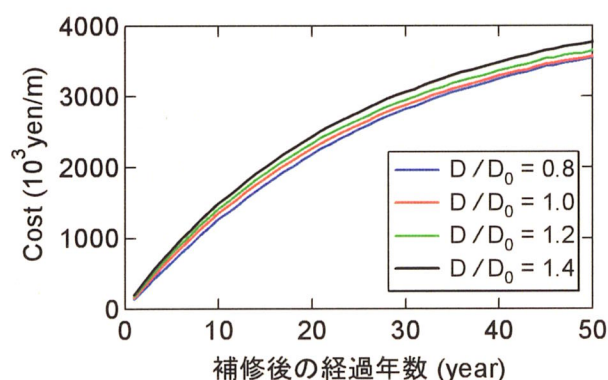


図-6 補修費単価が期待総補修費用に及ぼす影響 ($\alpha=1$, $H_{dc}/h_c=0.4$, $H_{rc}/h_c=0.1$ の場合)

また図-5(b)は、被害発生限界が $H_{dc}/h_c=0.4$ (図-4(a)のケース) で、堤体の補修基準を $H_{rc}/h_c=0.25$ とした場合の期待総補修費用である。図-5(a)とは異なり、質量の割増しによる影響がほとんど見られない(数値の上では質量を割増した場合の補修のほうが期待総補修費用が低減している)。これは、堤体の補修基準を $H_{rc}/h_c=0.25$ と比較的、大きな変形および透過波高を許容しているため、補修の回数が少なく、グラフ上ではほとんど差が見られなくなったからである。

このように、補修基準の取り方によっても質量を割増した補修の効果に差が見られることが分かる。期待総補修費用を最小にするという観点から補修を考えると、最適な補修基準は図-4(a)および(b)に示されるように補修回数は適度に減らした値となるため、図-5(b)のように質量を割増した補修の効果は小さくなることが予想される。しかし本研究では、質量を割増した補修の効果を検討しやすくするため、図-5(a)のように補修回数が多くなる値に補修基準を設定し、以降の検討を進める。

5. 粒径が増加した場合の補修費単価が期待総補修費用に及ぼす影響

補修費用は式(1)で算定するが、式中にある質量を割増した捨石の粒径と初期建設時の捨石の粒径の比にかかわる定数 α を変化させることにより、質量を割増した場合の補修費単価が期待総補修費用に及ぼす影響を検討した。

図-6 に $\alpha=1$ とした場合の期待総補修費の変化を示す。横軸は補修後の経過年数で、縦軸が期待総補修費用である。質量を割増して補修を行う $D/D_0=1.2$ および 1.4 のケースは、質量の割増しを行わない $D/D_0=1.0$ のケースより期待総補修費用が大きくなっている。これは $\alpha=1$ であるため、捨石の粒径の増加がそのまま補修費の増加につながるからである。

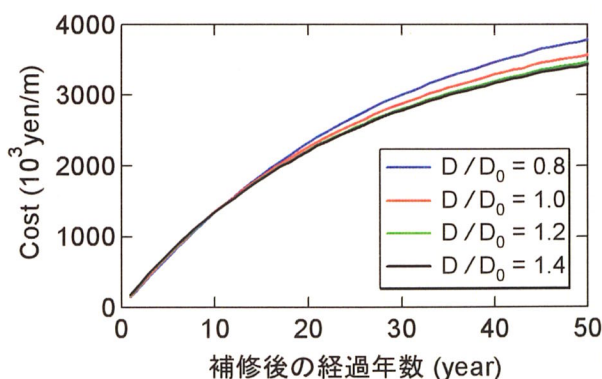
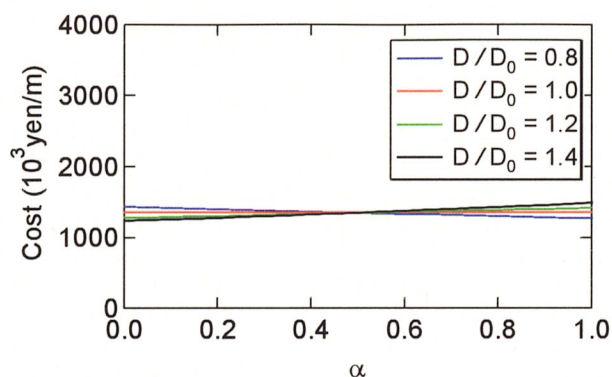
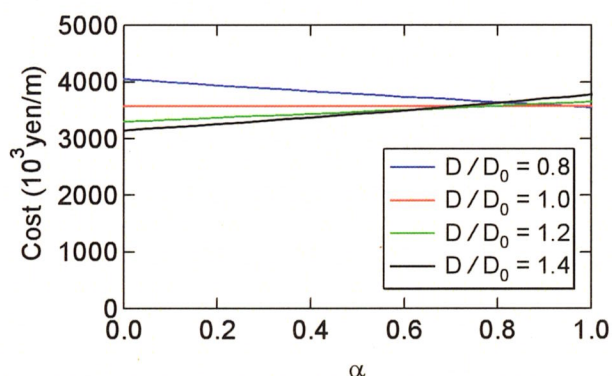


図-7 補修費単価が期待総補修費用に及ぼす影響 ($\alpha=0.5$, $H_{dc}/h_c=0.4$, $H_{rc}/h_c=0.1$ の場合)



(a) 補修後の経過年数 10 年 ($H_{dc}/h_c=0.4$, $H_{re}/h_c=0.1$)



(b) 補修後の経過年数 50 年 ($H_{dc}/h_c=0.4$, $H_{re}/h_c=0.1$)

図-8 α を変化させた場合の期待総補修費の変化

図-7 に $\alpha=0.5$ とした場合の期待総補修費の変化を示す。 $\alpha=0.5$ であることから質量を割増して補修を行っても補修費単価の上昇が緩やかなため、 $D/D_0=1.2$ および 1.4 のケースは、質量の割増しを行わない $D/D_0=1.0$ のケースより期待総補修費用が小さくなっている。

図-6 および図-7 から、 α の値が 0.5 から 1 の間に、質量を割増した捨石による補修のほうが期待総補修費用が小さくなる遷移点が存在することが予想される。図-8 に、 α を連続的に変化させたときの期待総補修費用を示す。図-8(a)は補修後の経過年数が 10 年の状態、図-8(b)は補修後の経過年数が 50 年の状態を示す。図-8(a)の補修後の経過年数が 10 年の場合、 α が約 0.5 以上の場合、質量を割増した補修を行うと、質量の割増しを行わない場合よ

り期待総補修費用が高くなることが分かる。一方、図-8(b)の補修後の経過年数が 50 年の場合、 α が約 0.75 以上の場合、質量を割増した補修を行うと、質量の割増しを行わない場合より期待総補修費用が高くなる。したがって、補修後に長期間の供用を考える場合は、粒径の増加による補修単価の増加割合を少しでも抑えることにより、総補修費用を低減させる効果が大きい可能性がある。

6. まとめ

本研究では、捨石で構成された離岸堤を対象として、高波浪により堤体に被災が生じ、補修が必要となった場合に、初期建設時に用いられた捨石より質量の大きな捨石を用いて補修を行うことを検討した。質量の大きな捨石を用いて補修を行えば、堤体の安定性が向上し、その後の被災回数の減少、および被災程度の軽減が期待できる。そのため、質量の大きな捨石を用いて補修を行っても補修に要する単価が安い場合は総補修費用を低減できる可能性があることを示した。

謝辞：本研究の一部は文部科学省科学研究費補助金（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。

参考文献

- 1) 吉岡 健，長尾 毅：ケーソン式防波堤のライフサイクルコスト最小化法に関する一考察，海岸工学論文集，第 51 巻，pp. 871-875，2004.
- 2) 高山知司，辻尾大樹，安田誠宏：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. 856-860，2006.
- 3) 荒木進歩，田中隆太，浦井 剛，出口一郎：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，海岸工学論文集，第 52 巻，pp. 856-860，2005.
- 4) Van der Meer, J. W.: Stability of breakwater armour layers - Design formulae, *Coastal Engineering*, Elsevier, Vol. 11, No. 3, pp. 219-239, 1987.
- 5) 運輸省港湾局監修（財）沿岸開発技術研究センター：全国港湾海洋波浪観測 25 か年統計資料 NOWPHAS 1970～1994，640p，1996.