

消波ブロック被覆堤の合理的な補修計画の 立案に向けて

EFFECTIVE REPAIR PLAN FOR CAISSON BREAKWATERS COVERED WITH WAVE-DISSIPATING BLOCKS

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 cost during a period for caisson breakwaters covered with wave-dissipating blocks is estimated. In this study, the transmitted wave height behind breakwater is assumed to be an index for repairing the wave-dissipating works. Deformation of wave-dissipating works by incident waves and transmitted wave height behind the breakwaters with deformed wave-dissipating works are estimated by equations proposed by other researchers. The estimation of repair cost during a period is conducted by Monte Carlo Simulation. Calculated repair costs for various repair criteria and mass of wave-dissipating block are illustrated. The authors show that the minimum repair cost can be found and the values of the minimum repair costs vary depending on the conditions.

Key Words : *Repair Cost, wave-dissipating block, transmitted wave height, damage, Monte Carlo Simulation*

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. 予算が限られている現状では新規構造物の建設コストを抑制するため, 老朽化した構造物を新しいものに置き換えるより, 適切な維持補修を行うことにより構造物の延命化を図る必要がある. しかし, あまりに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るため, 適切な補修基準を定め, 今後の供用年数内での総補修費用を算定し, それに基づいて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・マネジメントに関する研究としては, 混成堤のライフサイクルコストを算定した長尾・松渕¹⁾, 係留施設の維持管理費のマネジメントを検討した松渕・横田²⁾, 海岸保全施設の計画的な維持補修の必要性を示した難波ら³⁾, 消波ブロックのライフサイクルコストを検討した高山ら⁴⁾などがある. また, 著者ら^{5), 6)}も捨石防波堤等を対象として耐用年数内の堤体の補修費用, および後背地で発生する被害額の算定を行っている.

本研究では, 我が国でも施工例の多い消波ブロック被覆堤を対象として, 今後の供用年数内での総補修費用を算定することにより, 合理的な補修計画に

ついて検討することを目的とする.

2. 総補修費用の算定方法

(1) 堤体の性能指標

本研究では, 消波ブロック被覆堤のライフサイクル内において来襲した高波浪によりケーソン前面の消波工が変形し, 堤体背後への伝達波高が増大することにより, 後背地で被害が発生するという状況を想定し, どの時点において補修を行うべきかを考察する.

防波堤の補修は, 主として堤体の持つ性能が低下したときに行うべきものである. 消波ブロック被覆堤の持つ主要な機能は消波機能であり, 消波ブロック被覆工の天端が沈下すると, 堤体背後への伝達波高が増加すると考えられる. このことから, 本研究では堤体背後への伝達波高の大きさを消波ブロック被覆堤の性能指標とし, これを堤体補修の判断基準とした.

(2) 総補修費用算定の具体的な手順

総補修費用は, 堤体の補修費と後背地で発生する被害額の和として考える. 前者は, 入射波により散乱, 沈下した消波工の補修費を表し, 後者は, 堤体

背後への伝達波高により後背地で発生する被害を表す額である。ここで、消波工の変形、および後背地での被害は年最大波によって発生すると仮定する。また、ある期間内に発生する総補修費用はモンテ・カルロ法により求めた。総補修費用の具体的な算定手順は以下の通りである。

- 運輸省港湾局監修(財)沿岸開発技術研究センター⁷⁾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消波工の変形量を算定
- 消波工に変形が生じた堤体の背後への透過波高を算定
- 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
- 供用年数分の計算を繰り返す
- 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

(3) 入射波高の算定

入射波高の確率分布は、荒木ら⁵⁾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。この確率分布は沖での波浪に対するものであるため、堤体前面での入射波高 $H_{1/3}$ は微小振幅波理論の浅水係数を用いて計算した。碎波の判定には次式で表される Goda⁸⁾の碎波指標を用いた。

$$\frac{H_b}{L_0} = 0.17 \left[1 - \exp \left\{ -1.5 \frac{\pi h_b}{L_0} (1 + 11 \tan^{4/3} \theta) \right\} \right] \quad (1)$$

ここに、 H_b ：碎波波高、 h_b ：碎波水深、 L_0 ：沖波波長、 θ ：海底勾配である。

上記の Weibull 分布に従って発生する年最大波の周期 $T_{1/3}$ は、Goda⁹⁾によって提案されている次式で算定した。

$$T_{1/3} = 3.3 \times H_{1/3}^{0.63} \quad (2)$$

(4) 伝達波高の算定

本研究では、入射波の作用によりケーソン前面の消波工が変形し、堤体背後への伝達波高が増大する状況を想定している。上久保ら¹⁰⁾は、消波工の天端高さと同様のケーソンの天端高さが異なる消波ブロック被覆堤の水利特性を検討し、堤体背後への波高伝達率として次式を提案している。

$$K_T = -0.18 \frac{h_c}{H_{1/3}} - 0.03 \frac{h_{CB}}{H_{1/3}} - 2.79 \frac{h}{L_{1/3}} + 0.63 \quad (3)$$

ここに、 h_c ：ケーソンの天端高さ、 h_{CB} ：消波工の天端高さ、 h ：消波工の法先水深、 $L_{1/3}$ ：有義波周期から計算される堤体法先での波長である。図-1 に h_c 、 h_{CB} および h を図示する。

上久保ら¹⁰⁾の算定式は直立部と消波工の天端高さが異なる防波堤を設計するための実験式であり、

適用範囲も十分には検証されていないが、ここでは本研究にも適用できるものとした。

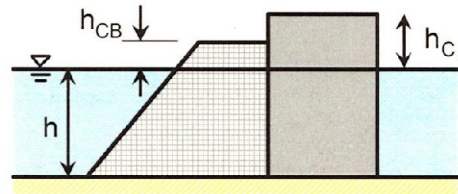


図-1 h_c 、 h_{CB} および h の定義

堤体背後への伝達波高 H_t は、入射波高 $H_{1/3}$ に波高伝達率 K_T を掛けることにより得られる。

入射波の作用により生じるケーソン前面の消波工の変形は、次式で表される高橋ら¹¹⁾の消波ブロック安定質量算定式を用いて算定した。

$$\frac{H_{1/3}}{(\rho/\rho_w - 1)D_n} = C_H \left[a \left(\frac{S}{\sqrt{N}} \right)^{0.2} + b \right] \quad (4)$$

ここに、 ρ ：消波ブロックの密度、 ρ_w ：水の密度、 D_n ：消波ブロックの代表径 ($D_n = (M/\rho)^{1/3}$ 、 M ：消波ブロックの質量)、 C_H ：碎波の効果を表す係数、 S ：被災レベル ($S = Ae/D_n^2$ 、 Ae ：消波工の侵食面積)、 N ：作用波数、 a および b ：消波ブロックの形状や斜面勾配により決まる定数 (本研究では、テトラポッドを対象としているので、 $a=2.32$ 、 $b=1.33$) である。

本研究では、防波堤の消波工に被災が生じて、ある水準以上の消波性能が確保されていれば補修は行わないこととするので、消波工の変形量の累積値を考慮する必要がある。消波工の変形量の累積については、高橋ら¹¹⁾と同様に以下のように考慮した。

i 年目の年最大波 (有義波高 $H_{1/3}$) による消波工の変形を考える際には、 $(i-1)$ 年目までに蓄積された変形 (変形レベル S_{i-1}) を考慮する必要がある。変形レベル S_{i-1} が何波の i 年目の年最大波によって引き起こされるのかを次式により算定する。

$$N' = \left[\frac{H_{1/3}/C_H(\rho/\rho_w - 1)D_n - 1.33}{2.32} \right]^{-10} S_{i-1}^2 \quad (5)$$

ここに、 N' ： i 年目の年最大波によって変形レベル S_{i-1} を引き起こすのに必要な作用波数である。

これより、 i 年目の年最大波によって生じる変形レベル S_i が次式で求められる。

$$S_i = \left[\frac{H_{1/3}/C_H(\rho/\rho_w - 1)D_n - 1.33}{2.32} \right]^5 \sqrt{N_i + N'} \quad (6)$$

ここに、 N_i ： i 年目の年最大波の作用波数である。

通常、消波ブロック被覆堤の被覆工の侵食は、静水面付近で生じる。しかし、本研究では図-2 に示すように、式(6)により算定された侵食面積 ($Ae = S_i \times D_n^2$) が天端上から差し引かれるものと仮定した。この仮定により、消波工の天端の沈下は変形レベル S_i から求められる。ケーソンの滑動によって生じる消波工の天端の沈下や、法先洗掘によって生

じる消波工の天端の沈下は無視した。また、侵食域にあった消波ブロックが静水面下に堆積することによる伝達波高への影響も無視した。

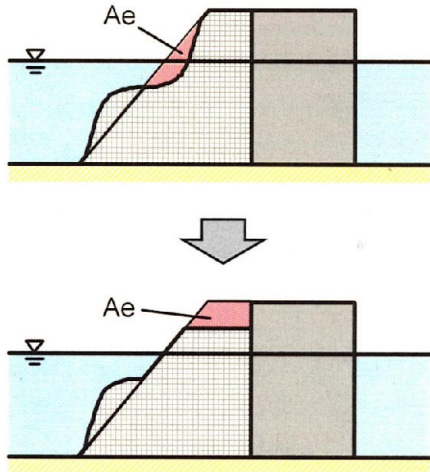


図-2 消波工の変形の仮定

3. 総補修費用の算定方法

前述の通り、総補修費用は消波工の補修費と、後背地で発生する被害額の和とする。消波工の補修費 C_r は、入射波による消波工の侵食面積 A_e に比例するものと仮定し、次式で表される。

$$h_{CB} < h_{CBc} \text{ のとき} \\ C_r = C_{m0} \times A_e \times b + C_{r0} \quad (7)$$

$$h_{CB} > h_{CBc} \text{ のとき} \\ C_r = 0 \quad (8)$$

ここに、 h_{CBc} ：堤体の補修基準を表す消波工の許容天端高さ、 C_{m0} ：侵食域の単位体積当たりの補修費、 b ：侵食域の堤体法線方向の長さ（ここでは断面2次元を考えているので $b=1.0\text{m}$ ）、 C_{r0} ：消波工の侵食面積の大きさには依存しない補修費である。

堤体の補修基準は、より直接的には消波性能の指標である堤体背後への伝達波高の大きさを用いるべきであるが、式(3)より消波工の天端が沈下すると伝達波高が大きくなることは明らかなので、消波工の天端高さを補修の判断基準とする。

後背地で発生する被害額 C_d は、後背地の利用状況等により大きく異なるため、ここでは背後の港湾への航行、荷役作業への影響、越波等を想定し、単純に堤体背後への伝達波高の大きさに比例するものと仮定することにより次式で表される。

$$H_t > H_{tc} \text{ のとき} \\ C_d = C_{da} \times (H_t - H_{tc}) + C_{db} \quad (9)$$

$$H_t < H_{tc} \text{ のとき} \\ C_d = 0 \quad (10)$$

ここに、 C_{da} および C_{db} ：後背地の利用状況等に依存する定数、 H_{tc} ：後背地での被害発生を表す伝達波高の閾値である。

図-3 に総補修費用算定のフローを示す。

4. 計算条件

(1) 防波堤

本研究では表-1 に示す消波ブロック被覆堤を対象として総補修費用の算定を行った。なお、50年確率沖波波高は7.9m、周期は12.0秒とした。

(2) パラメータ

計算では表-2 に示すパラメータを用いた。建設後、既に年数を経ている既存の防波堤に対して今後の総補修費用を考えるため、計算を行う期間は耐用年数とせず、「今後の20年間」のように定め、計算を行う期間も変化させて総補修費を算定した。モンテ・カルロ法の繰り返し回数は10,000回とした。また、総補修費用の算定においては、社会的割引率($=0.04$)を考慮した。

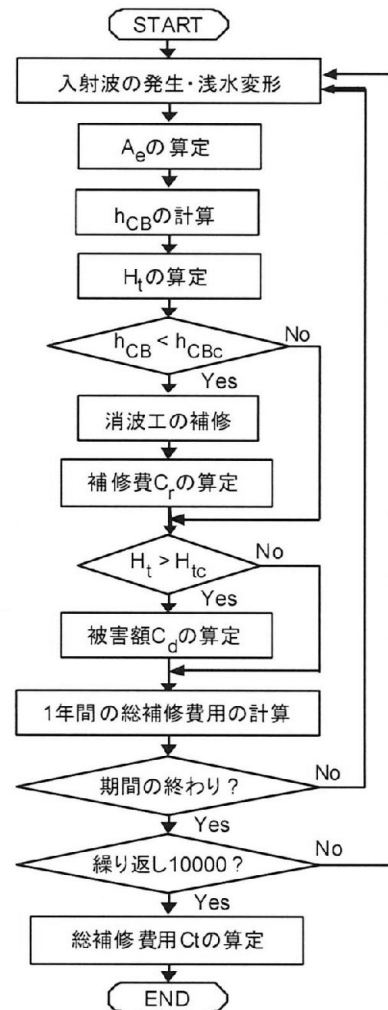


図-3 総補修費用算定のフロー

表-1 消波ブロック被覆堤の諸元

水深	9.0m
堤体幅	15.0m
天端高さ	4.5m
法面勾配	1 : 4/3
消波ブロックの質量	16t, 20t, 24t
消波工の天端幅	消波ブロック 2 個並び
マウンド層厚	2.0m

表-2 計算で用いたパラメータ

作用波数	1,000 波
H_{ic}/h_c	0.40~0.49
C_{da}	8,000 千円
C_{db}	3,000 千円
C_{ru}	24,610 円
C_{r0}	0 円

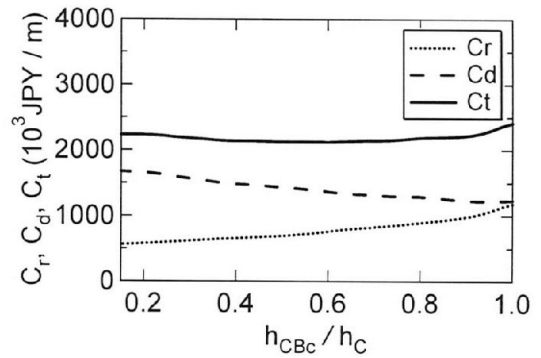
(3) その他の仮定

年最大波のデータを用いて入射波の出現確率分布を求めていることもあり、消波工に変形を生じさせるのは年最大波のみであると仮定する。すなわち、消波工に変形を与える可能性のある波は年に 1 回だけ来襲する。被覆工の補修を行う場合は、翌年の年最大波が来襲するまでに補修が完了するものと仮定する。また、補修は原形復旧とし、補修後は初期の消波性能にまで回復することとする。

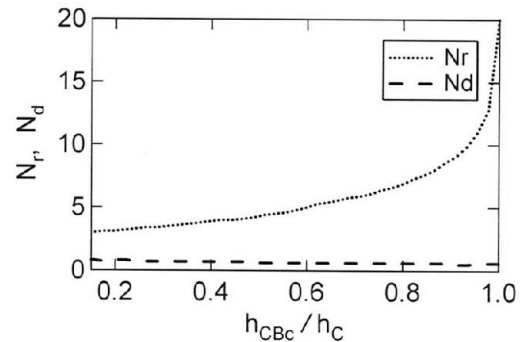
5. 計算結果

図-4 に、消波ブロックの質量 20t で、後背地での被害発生限界を $H_{ic}/h_c = 0.44$ としたときの今後 20 年間の総補修費用を示す。(a)は消波工の補修費用 C_r 、後背地で発生する被害額 C_d 、および両者の和で表される総補修費用 C_t 、(b)は 20 年間での消波工の補修回数 N_r 、および後背地での被害発生回数 N_d を示している。横軸は消波工の補修基準を表す h_{CBc} をケーソンの天端高さ h_c で除した無次元の堤体補修基準である。消波工の補修基準を緩やかにする (h_{CBc} の値を小さくする) と、消波工の天端が沈下しても補修基準値以内であれば補修は行われなため、点線で示される消波工の補修費、補修回数ともに減少し、逆に破線で示される後背地での被害額、被害発生回数は緩やかに増加する傾向が示されている。その結果として両者の和である総補修費用は、消波工の補修基準の値を小さくしていくと緩やかに変化し、 $h_{CBc}/h_c = 0.6$ 付近で最小となる。

図-5 に、消波ブロックの質量 20t で、後背地での被害発生限界を $H_{ic}/h_c = 0.44$ としたときの今後 50 年間の総補修費用を示す。期間が長くなったため、消波工の補修費用 C_r 、後背地で発生する被害額 C_d 、

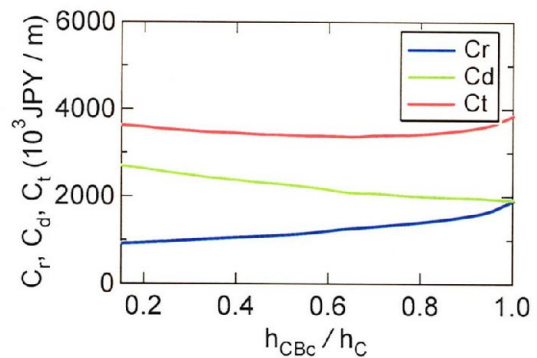


(a) 補修費用 C_r 、被害額 C_d および総補修費用 C_t

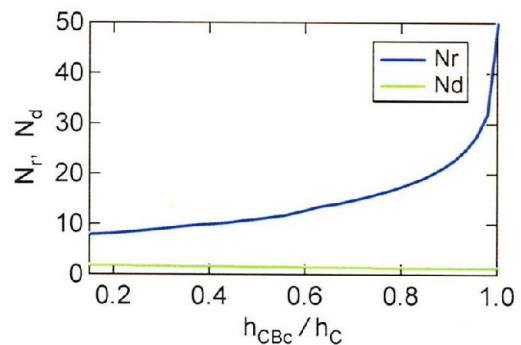


(b) 補修回数 N_r および被害発生回数 N_d

図-4 今後 20 年間の総補修費用 ($H_{ic}/h_c = 0.44$, $M=20t$)



(a) 補修費用 C_r 、被害額 C_d および総補修費用 C_t



(b) 補修回数 N_r および被害発生回数 N_d

図-5 今後 50 年間の総補修費用 ($H_{ic}/h_c = 0.44$, $M=20t$)

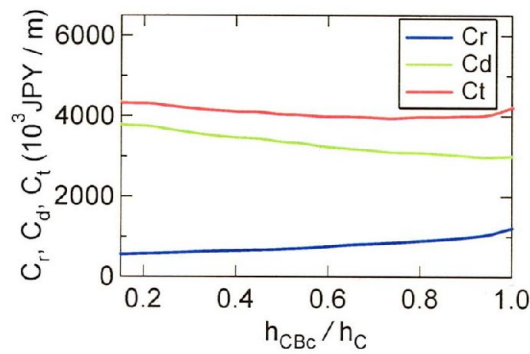
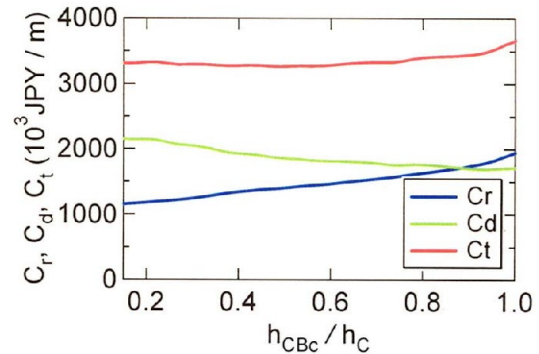


図-6 今後 20 年間の総補修費用($H_{ic}/h_c = 0.42$, $M=20t$)



(a) 補修費用 C_r , 被害額 C_d および総補修費用 C_t

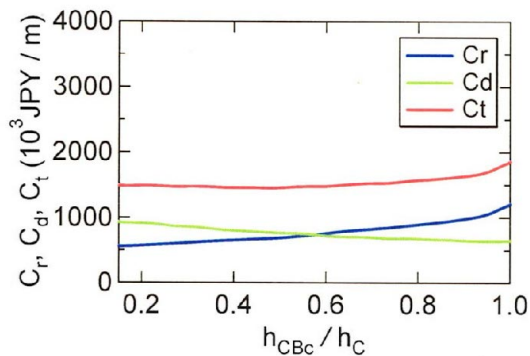
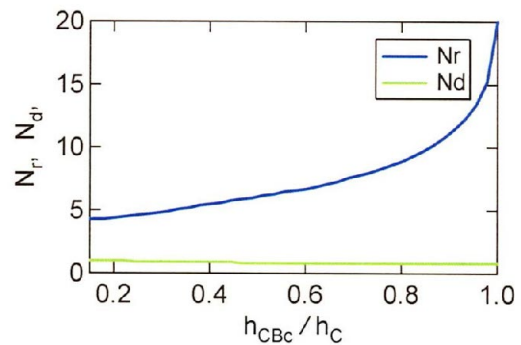


図-7 今後 20 年間の総補修費用($H_{ic}/h_c = 0.46$, $M=20t$)



(b) 補修回数 N_r および被害発生回数 N_d

図-8 今後 20 年間の総補修費用($H_{ic}/h_c = 0.44$, $M=16t$)

総補修費用 C_t , また消波工の補修回数 N_r , 後背地での被害発生回数 N_d のいずれも図-4 のケースよりも大きくなっている。総補修費用が最小となる時の消波工の補修基準は $h_{CBc}/h_c = 0.6$ 付近であり、図-4 の場合とほぼ同じである。

図-6 に、消波ブロックの質量 $20t$ で、後背地での被害発生限界を $H_{ic}/h_c = 0.42$ としたときの今後 20 年間の総補修費用を示す。後背地での被害発生限界が図-4 のケースに比べて小さくなっており、一般的には後背地がより重要な機能を持っている場合と考えられる。そのため、堤体背後への伝達波高が大きくなると後背地での被害額が大きく算出されている。その結果として、総補修費用は $h_{CBc}/h_c = 0.8$ 付近で最小となる。

図-7 に、消波ブロックの質量 $20t$ で、後背地での被害発生限界を $H_{ic}/h_c = 0.46$ としたときの今後 20 年間の総補修費用を示す。後背地での被害発生限界が図-4 のケースに比べて大きくなっており、一般的には後背地の重要度の優先順位が比較的低い場合と考えられる。そのため図-6 とは逆に、堤体背後への伝達波高が大きくなっても、後背地での被害額がそれほど大きくなっていない。その結果として、総補修費用は $h_{CBc}/h_c = 0.4$ 付近で最小となる。しかし、図示している範囲においては最小値は不明瞭であり、大まかな傾向としては補修基準の値を下げ、補修回数を少なくするほうが総補修費用が小さくなっている。これは現実的ではない結果であるが、

消波工が多少変形しても消波ブロック被覆堤の消波性能は粘り強く発揮されることを表しているとも考えられる。実際には、ケーソンのコンクリートの劣化、消波ブロックの摩耗、ケーソンの滑動等にも注意を払う必要があり、完全に補修が不要ということにはつながらない。

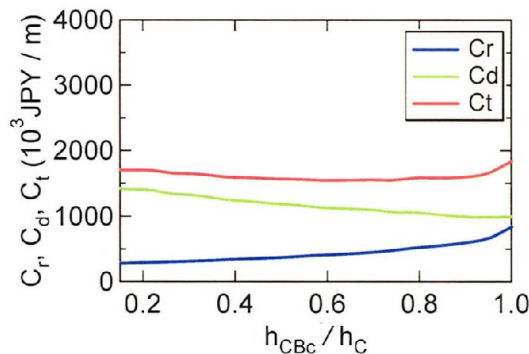
図-8 に、消波ブロックの質量 $16t$ で、後背地での被害発生限界を $H_{ic}/h_c = 0.44$ としたときの今後 20 年間の総補修費用、および補修回数と被害発生回数を示す。図-4 のケースに比べて消波ブロックの質量が小さくなっているため、消波工が変形しやすく、補修回数および消波工の補修費が大きくなっている。一方、後背地での被害発生回数と被害額も増加しているが、増加の割合は補修回数および被害額ほど大きくはない。総補修費用は $h_{CBc}/h_c = 0.4$ 付近で最小となる。

図-9 に、消波ブロックの質量 $24t$ で、後背地での被害発生限界を $H_{ic}/h_c = 0.44$ としたときの今後 20 年間の総補修費用、および補修回数と被害発生回数を示す。図-4 のケースに比べて消波ブロックの質量が大きくなっているため、消波工の変形量が小さく、補修回数および消波工の補修費は小さくなっている。総補修費用は $h_{CBc}/h_c = 0.65$ 付近で最小となる。図-4、図-8 および図-9 の結果から、本検討の条件においては消波ブロックの質量が大きくなるほど、総補修費用を最小とする消波工の補修基準（消

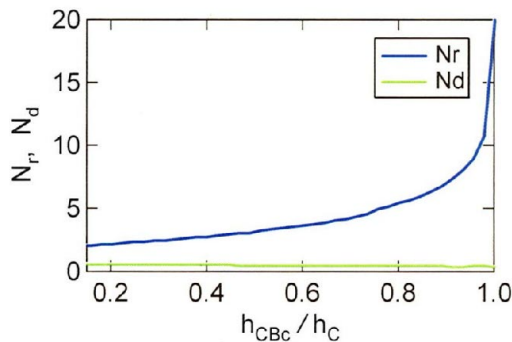
波工の天端高さ)の値は大きくなる,すなわち補修基準が厳しくなることが分かった。

6. まとめ

本研究では消波ブロック被覆堤を対象に,堤体背後への伝達波高の大きさを補修の目安として,ある期間内における消波工の補修費,後背地で発生する被害額,および両者の和である総補修費用の算定を行った。算定にあたっては仮定を導入しており,また用いたパラメータは条件によって大きく異なることが考えられるため,今後はより具体的な条件を用いた検討を行い,実事例との検証も考えていきたい。



(a) 補修費用 C_r , 被害額 C_d および総補修費用 C_t



(b) 補修回数 N_r および被害発生回数 N_d

図-9 今後20年間の総補修費用($H_c/h_c = 0.44$, $M=24t$)

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。

参考文献

- 1) 長尾 毅, 松淵 知: 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, 1999.
- 2) 松淵 知, 横田 弘: 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, 1999.
- 3) 難波喬司, 横田 弘, 橘 義規, 田中樹由, 岩田好一郎: 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, 2003.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 荒木進歩, 浦井 剛, 牧野宏俊, 有田 守, 出口一郎: 波群特性の差異を考慮した離岸堤の総補修費用の算定, 海岸工学論文集, 第54巻, pp. 956-960, 2007.
- 7) 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 年統計資料 NOWPHAS 1970~1994, 640p, 1996
- 8) Goda, Y.: How much do we know about wave breaking in the nearshore waters, *Proceedings of the 4th International Conference on Asian and Pacific Coasts 2007*, pp. 69-72, 2007.
- 9) Goda, Y.: Performance-based design of caisson breakwaters with new approach to extreme wave statistics, *Coastal Engineering Journal*, Vol. 43, No. 4, pp. 289-316, 2001.
- 10) 上久保勝美, 山本泰司, 梅沢信敏, 木村克俊, 土井義和: 消波工と本体工の天端高さが異なる消波ブロック被覆堤の水理特性, 海岸工学論文集, 第48巻, pp. 706-710, 2001.
- 11) 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 -, 港湾空港技術研究所報告, 第37巻, 第1号, pp. 3-32, 1998.