

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 14 日現在

機関番号：15101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420524

研究課題名(和文)消波ブロックによる海岸構造物の最適補修モデルの構築

研究課題名(英文)Development of optimum repair model for coastal structures that consist of wave-dissipating blocks

研究代表者

太田 隆夫(OTA, TAKAO)

鳥取大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：70233129

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、消波ブロック被覆堤の消波工を対象として、水理模型実験で得られた断面変形データを用いて、消波工の変形(被災)と性能変化の関係の把握、被災の進行過程のモデル化を行い、さらに補修過程を考慮した被災進行予測と総費用の算定方法について検討したものである。モデル断面を用いた数値実験より、断面変形にともなって越波流量が1.5倍程度まで増加することが示された。また、被災進行過程に対してマルコフ連鎖モデルを適用し、補修過程を考慮して補修費用と損害額を合わせた総費用を求める方法を示した。この方法により、総費用を最小化する補修方針を決定することが可能となり、いくつかの計算結果を示した。

研究成果の概要(英文)：Based on the experimental results for profile change of wave-dissipating blocks covering a caisson breakwater, the model profiles for the damaged block layer are made and the relation between the damage progression and change of performance is investigated. The results of the numerical experiment using the model profiles show that the overtopping rate increases by a factor of 1.5 compared to that of the initial profile with damage progression. Furthermore a statistical model based on the Markov chain is applied to the damage progression process and the total cost for the maintenance of wave-dissipating blocks is estimated by using an assumed repair cost and loss. This method can be applied to find a policy of repair that minimizes the total (life cycle) cost and some numerical results are obtained.

研究分野：海岸工学

キーワード：消波ブロック被覆堤 マルコフ連鎖モデル 被災進行予測 補修

1. 研究開始当初の背景

近年、海岸・港湾分野においても、耐波安定性能、消波性能、越波低減性能等を統合的に照査する性能設計法の導入が進められている。この設計法においては、構造物の形状変化がもたらす各種性能の劣化の度合いと、構造物の社会的重要度で性能レベルが評価され、また構造物の長期間（たとえば供用期間）にわたる性能保持についても検討することが求められる。したがって、性能設計法の確立に当たっては、構造物の形状変化に伴う性能の劣化特性を定量的に把握しておく必要がある。港湾・海岸構造物の性能設計に関する研究では、形状変化と性能劣化の関係を扱ったものはあまり多くないのが現状である。一方で、高度成長期に整備された多数の社会基盤施設の老朽化に伴い、これに対処するための維持管理費用の増加が懸念されている。このような状況下で、新規の社会基盤整備の要求に応えつつ、既存のものを継続運用していくためには、それらの維持管理に必要な経費を可能な限り正確に予測する必要がある。消波ブロックで構成される構造物において、ライフサイクルコスト(LCC)を精度よく推定するには、構造物の変形プロセスを詳細に検討してモデル化するとともに、性能劣化を織り込んで補修を要する変形レベル(要補修レベル)を設定することが必要となる。また、海岸構造物に対する主たる外力である波力、および多数の消波ブロックから構成される構造物については、その劣化過程にも多くの不確実性が含まれる。将来における補修需要予測やLCCの評価は、構造物の性能劣化予測の精度に大きく依存しており、性能劣化予測モデルの開発が重要なものとなる。

2. 研究の目的

本研究では、消波ブロック被覆堤の消波工を対象に、ライフサイクルコストを最小化する補修の方針(戦略)を見出すことを最終的な目的として、水理模型実験で得られた断面変形データにもとづく、消波工の変形(被災)と性能変化の関係の把握、被災の進行過程のモデル化を行い、さらに補修過程を考慮した被災進行予測と総費用の算定方法について検討する。具体的な内容は以下のようである。

(1) 水理模型実験により消波工の断面変形を計測し、そのデータにもとづいて変形量に対応した平均的な断面形状(モデル断面)を決め、数値実験により消波工の被災と性能変化の評価を行う、(2) 断面変形データから得られた、変形量を表すパラメータの値により、被災度のランク分けを行い、その変化過程(被災進行過程)に対してマルコフ連鎖モデルを適用する、(3) マルコフ連鎖モデルによる被災の進行過程と補修過程を考慮し、総費用を算定する。

3. 研究の方法

(1) 断面変形と性能変化の評価

水理模型実験においては、多方向不規則波

造波水槽内に2基の造波水路(長さ8.6 m、幅0.6 m、高さ0.6 m)を設置した。サーペント型の多方向不規則波造波装置のうち、2枚の造波板をベニヤ板で仕切ることで造波水路としている。各水路内にマウンド部(高さ0.13 m)と消波ブロックによる消波工の模型、および2本の波高計を設置し、消波工の背後は高さ0.45 mの止水板とした。水路底からの水深は0.35 mである。マウンド部は、消波工への作用波力を増大させ、断面変形量を大きくすることを目的に設置したものである。消波工の初期断面における前のり面勾配は1:4/3、天端高 $h_c=0.1$ m、天端幅0.06 mとした。消波ブロックは四脚型のもので、実験に使用した模型の平均質量は37.6 g、代表径 $D_n=2.56$ cmである。作用させた不規則波は、JONSWAPスペクトル(ピーク増幅率 $\gamma=3.3$)を期待スペクトルとし、有義波周期 $T_{1/3}=1.2$ sとして作成した一方不規則波の信号により造波した。したがって、2基の水路で同波形・同位相の不規則波を消波工に作用させている。1回(20分間)の作用波数は約1100波で、有義波高は $H_{1/3}=0.11$ mである。不規則波を20分間作用させるごとに、1水路あたり3測線(0.15 m間隔)において1 cm間隔で、消波工の断面形(岸沖方向)をレーザ変位計により計測し、各測線で初期断面を基準として断面の変形量を表すパラメータ $S(=A_e/D_n^2, A_e$: 侵食面積)を求めた。また、3測線の平均をとって1つの水路での断面形とし、その初期断面を基準とするパラメータ S_0 も求めた。同じ不規則波を10回繰り返し作用させて、断面変形のデータを取得することを1回の実験とし、これを10回行った。実験で得られた断面変形データ(3測線の平均)のうち、天端と前のり面が変形したケースのデータをモデル断面の作成に用いた。

モデル断面を用い越波流量を指標として、数値実験による性能変化の評価を行った。数値実験には数値波動水路CADMAS-SURF/2D(Ver. 5.1)を使用した。造波板から止水板までは実験装置に対応するように計算領域を設定するとともに、領域の沖側(左側)端部には幅6 m、高さ0.35 mのエネルギー減衰帯を設けて沖側境界を開境界とし、止水板から岸側の幅1 mの領域は越波枳(初期水位0.1 m、岸側は壁境界)としている。水平方向の格子間隔 Δx は、沖側境界からマウンド手前までを2 cm、その他を1 cm、鉛直方向の格子間隔 Δz は1 cmとした。消波工部分は透過性であり、空隙率0.5、慣性力係数 $C_M=1.2$ 、抗力係数 $C_D=1.0$ とした。なお、透過性構造物の計算においては、透水層の抵抗力算定法の選択と係数値の設定を行う必要がある。これについては、反射率と越波量を評価基準とし、実験値と計算値を比較することにより計算精度を検証した。このように設定した水路において、 $H_{1/3}=0.11$ m、 $T_{1/3}=1.6$ sと設定し修正Bretschneider・光易型スペクトルを用いた不規則波により越波流量の計算を行った。

(2) 被災進行過程のモデル化

実験で得られた S のデータにもとづいて、被災（変形）度の変化特性に関して以下のような検討を行った。まず、 S の値を四捨五入して整数値とし、その値によりランク a ($S=0\sim 3$)、 b ($S=4\sim 7$)、 c ($S=8\sim 11$)、 d ($S=12$) として被災度をランク分けした。不規則波（20 分間）の作用回数 N_r ($=0\sim 10$) ごとにランク a から d に入るデータ数の割合（以後、被災度割合と表記）を求めた。このような被災進行過程に対して、定常推移確率をもつマルコフ連鎖モデルの適用を検討した。本研究では、モデル 1；被災度は 1 ランクずつ推移しランク間の推移確率はすべて等しい、モデル 2；被災度は 1 ランクずつ推移し推移確率は各々異なる、モデル 3；2 ランク以上の被災度の推移が生じ推移確率は各々異なる、の 3 種類のマルコフ連鎖モデルを用いた。このモデルに補修を組み込まない場合は、被災度が大きいランクへの推移のみが生じ、ランク d が最終状態であることから、 d にとどまる確率は 1 である。各モデルの推移確率は、ランク a の割合がゼロでない $N_r=5$ における被災度割合の実験値と、モデルによる計算値との誤差の 2 乗和が最小となるように、Excel のソルバー機能を用いて算出した。以上のように推定した推移確率を用いて、被災度割合の変化を推定することができる。

(3) 補修を考慮した被災進行予測と総費用算定

消波工においては、高波の作用の結果として被災が生じ、その後に補修を行うことから、マルコフ連鎖モデルで被災過程を与え、その後、ランク b 、 c 、 d から r_{21} 、 r_{31} 、 r_{41} の割合で補修を行うモデルを用いた。補修は原形復旧でランク a に推移するものとし、補修完了後の状態で次の高波の作用を受けることを想定している。補修費は、補修対象となるランクでの S の平均値を用いて侵食面積を与え、消波工の単位長さあたりの消波ブロック個数を求めて、各ランクの被災度割合と補修単価を掛け合わせて算定する。補修に必要なブロック数は、各ランクの S の平均値（ランク b ；5.5，ランク c ；9.5）により与えられる。ランク d の S の平均値については、実験データより求めた値である 15.2 を用いる。また、補修の実施方針としては、被災を生じるような高波の作用ごとに毎回、1 回おき、2 回おき、... が考えられ、毎回補修以外では補修を行わないことによる損害を含めて総費用を求めた。

4. 研究成果

(1) モデル断面と性能変化の評価

3.(1) に記した断面変形データより、のり面上での初期断面と変形断面の交点位置、天端岸側（止水板前面）および天端のり肩での初期断面からの沈下量 η_s 、 η_l 、のり先位置の変化量 x_l を読み取った。初期断面と変形断

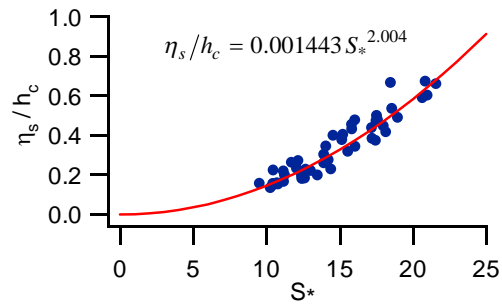


図-1 天端のり肩の沈下率と S_* との関係

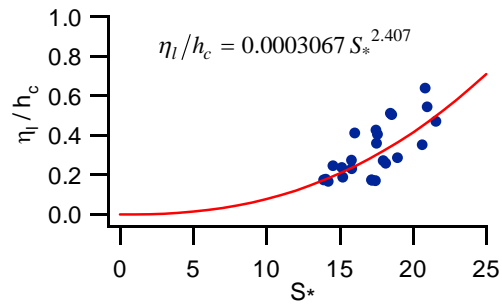


図-2 天端岸側の沈下率と S_* との関係

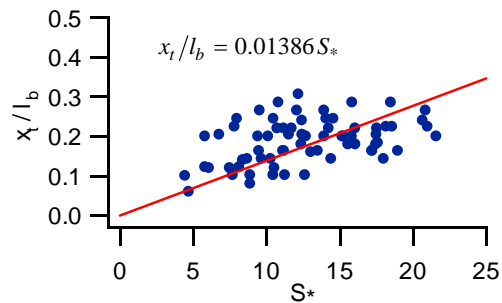


図-3 のり先位置と S_* との関係

面の交点については、読み取った交点の x 座標の平均値と、モデル初期断面（台形断面）上でその値に対応する z 座標により位置を決定し、中心点とした。 η_s 、 η_l および x_l については、図-1～3 に示すような S_* との関係が得られた。ただし、 η_s と η_l は h_c で、 x_l は消波工初期断面の底辺長 l_b で除した値を用いている。図中には近似曲（直）線と近似式を示しており、これらの式から S_* の値に対応する天端の 2 点での沈下量と のり先位置の変化量を与えることができる。 S_* と D_n の値で与えられる侵食面積と一致するように、静水面 ($z=0$) でのモデル断面の x 座標を決め、この点と天端の 2 点および中心点を直線で結んで侵食部のモデル断面とした。堆積部の形状については、便宜的に中心点とのり先を直線で結ぶことにより与えた。以上の方法により得られたモデル断面を図-4 に示す。

図-4 に示した 6 つに $S_*=8, 12$ を加えたモデル断面を用いて計算を行い、越波桁の領域で F 値の面積積分値を出力して、これにより越波流量を求めた。表-1 に S_* 、 η_l/h_c および越波流量 q_o' の関係を表す。表中の q_o' は $S_*=0$ で

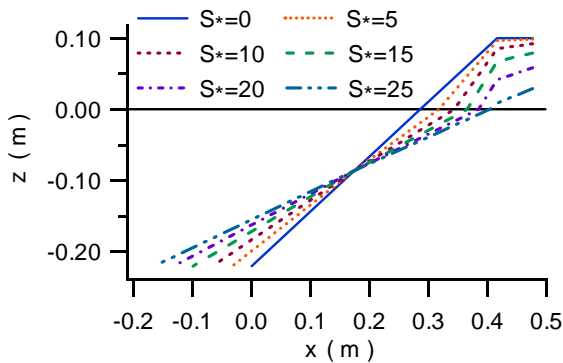


図-4 消波工のモデル断面

表-1 消波工の断面変形と越波流量の変化

| S_* | η_i/h_c | q_o' |
|-------|--------------|--------|
| 0 | 0 | 1.00 |
| 5 | 0.0148 | 1.06 |
| 8 | 0.0458 | 1.17 |
| 10 | 0.0783 | 1.22 |
| 12 | 0.121 | 1.30 |
| 15 | 0.208 | 1.38 |
| 20 | 0.415 | 1.47 |
| 25 | 0.710 | 1.30 |

の越波流量との比である。越波流量は $S_*=20$ で約 1.5 倍となり、消波工の変形とともに越波流量が増加傾向を示すことがわかる。表-1 に示した結果は補修を要する性能低下の明確な基準を与えるものではないが、少なくともランク d は要補修レベルであり、消波工がこの状態である場合には損害も考慮する必要があると考えられる。

(2) 被災進行過程のモデル化

実験で得られた S のデータから、図-5 に示す被災度割合の推移が得られた。ただし、 $N_r=0$ は初期状態で被災度はすべてゼロであることから、ランク a の割合を 1 としている。図-5 から、ランク a の割合は急速に減少し、ランク d の割合は徐々に増加していることがわかる。

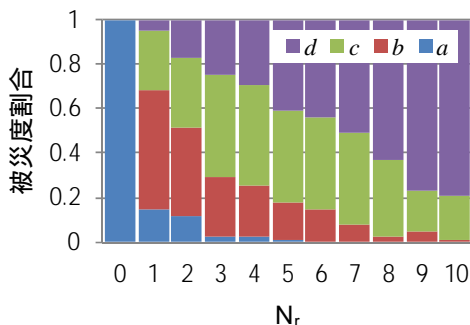
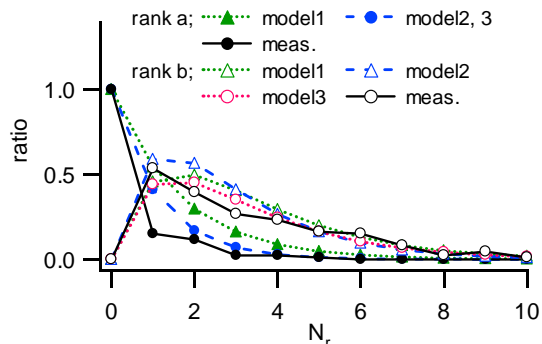


図-5 被災度割合の推移 (実験値)

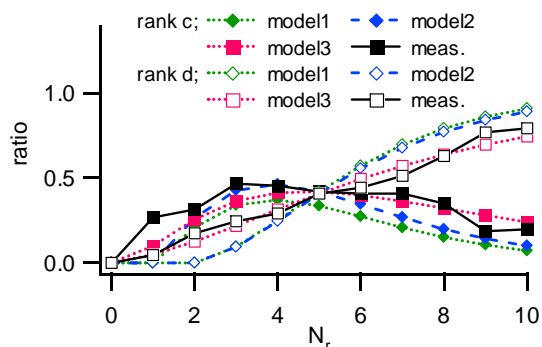
ランク a の割合がゼロでない $N_r=5$ における被災度割合の実験値と、モデルによる計算値との誤差の 2 乗和が最小となるように算出した推移確率を表-2 に示す。また、各モデルの推移確率を用いて求めた $N_r=10$ までのランク別の割合変化を、実験値と合わせて図-6 に示す。この図より、モデル 3 が実験結果による被災度割合の推移傾向に近いことがわかる。

表-2 推移確率の推定値

| モデル 1 | 推定値 | モデル 3 | 推定値 |
|-------|-------|----------|--------|
| p | 0.456 | p_{12} | 0.441 |
| モデル 2 | | p_{13} | 0.101 |
| p_1 | 0.590 | p_{14} | 0.0481 |
| p_2 | 0.451 | p_{23} | 0.296 |
| p_3 | 0.353 | p_{24} | 0.0910 |
| | | p_{34} | 0.169 |



(a) ランク a, b



(b) ランク c, d

図-6 ランク別の割合変化

(3) 補修を考慮した被災進行予測と総費用算定

図-7 にモデル 3 でランク d からの補修のみを考慮した場合の被災度割合を示す。この図は被災直後の状態を表しているが、補修により、 N_r がある程度大きくなると被災度割合が一定となることがわかる。図-8 は、消波工単位長さあたりの総費用の計算例であり、高波の作用後に毎回補修する場合から、1 から 4

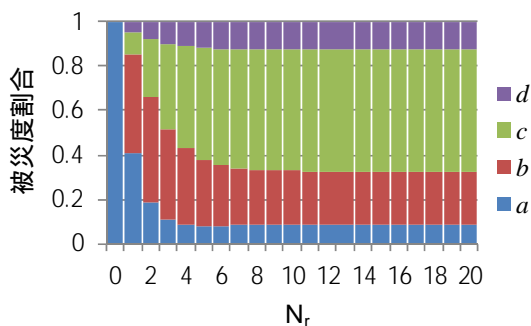
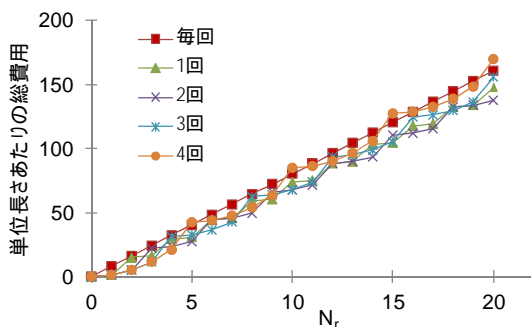
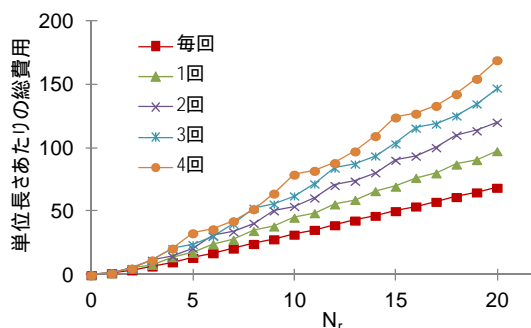


図-7 被災度割合 (モデル 3, ランク d からの補修のみ)



(a) ランク b, c, d を補修する場合



(b) ランク d のみを補修する場合

図-8 消波工単位長さあたり総費用の変化

回おきとする場合を合わせて示している。(a)は $r_{21}=r_{31}=r_{41}=1.0$ としてランク $b \sim d$ を補修する場合、(b)は $r_{21}=r_{31}=0, r_{41}=1.0$ としてランク d のみを補修する場合である。費用の算定においては、消波ブロックの補修単価を 10 とし、損害額はランク d の補修費と同額であると仮定している。(a)では、補修の実施方針による総費用の差は大きくないが、2 回おきに補修する場合でおおむね最小となっており、(b)では毎回補修の場合が最小である。図示していないが、例えば $r_{21}=r_{31}=r_{41}=1.0$ のケースで損害額を 2 倍程度にすると、毎回補修と 1 回おき補修の総費用がほぼ同額で最小となり、 $r_{21}=r_{31}=0, r_{41}=1.0$ のケースでランク c を補修しないことによる損害額としてランク c の補修費の半額を加えると、1 回おき補修が最小の総費用となる。

上述の方法で、総費用を最小化する補修方

針を決定することは可能であるが、損害額によって総費用を最小化する補修の方針が左右されることになり、補修単価と合わせて実際に即した値の設定は今後の課題である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 2 件)

Takao Ota, Hiroyuki Kawamura, Yoshiharu Matsumi, Takayuki Hirayama, Evaluation of life cycle cost for wave-dissipating works considering occurrence probability of high waves, Journal of Coastal Research Special Issue, 査読有, No.75, 2016, 675-679

太田 隆夫, 河村 裕之, 松見 吉晴, 藤井 優, 大野 賢一, 数値波動水路における透水層の抵抗力算定法の比較, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), 査読有, Vol.71, No.2, 2015, I_85-I_90

〔学会発表〕(計 3 件)

権守 真也, 消波ブロック被覆堤における消波工の被災・補修過程のモデル化, 第 68 回土木学会中国支部研究発表会, 2016 年 5 月 21 日, 広島工業大学 (広島市)

太田 隆夫, 日本海沿岸における波候特性を考慮した消波工の LCC 算定, 第 68 回土木学会中国支部研究発表会, 2016 年 5 月 21 日, 広島工業大学 (広島市)

太田 隆夫, 数値波動水路における透水層の抵抗力算定法の比較, 第 67 回土木学会中国支部研究発表会, 2015 年 5 月 23 日, 山口大学工学部 (宇部市)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

太田 隆夫 (OTA, Takao)
鳥取大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号: 70233129

(2) 研究分担者

佐藤 毅 (SATOW, Takashi)
神戸学院大学・共通教育センター・准教授
研究者番号: 30304405