実験データにもとづく捨石護岸の被災進行過程のモデル化

Modeling of Damage Progression Process for Rubble Mound Seawall Based on Experimental Data

太田隆夫¹・松見吉晴²・鳩野敦士³・佐藤 毅⁴

Takao OTA, Yoshiharu MATSUMI, Atsushi HATONO and Takashi SATOW

Based on the experimental results for profile change of rubble mound seawall, the modeling of damage progression process is discussed in this study. The ranks that indicate the degree of damage for the seawall are determined and the ratio for each rank of damage is obtained from the experimental data. Three models based on the Markov chain model are applied to the transition process of the ratio. The stationary transition probability is obtained for each model and the damage progression is predicted. The model that includes the transition to more than two ranks can predict the transition process of the ratio well.

1. はじめに

社会基盤施設は設計時に設定された性能を供用期間にわたって保持することが求められる。現在導入が進められている性能設計法においても、性能保持に関する検討が含まれている。しかし、経年変化や外力の作用による被災（損傷）で性能の劣化が生じることから、適切な維持管理を行う必要がある。また、多数の社会基盤施設の老朽化に対する補修・更新費用の増大が予想されており、その観点からも効率的な維持管理が重要となる。社会基盤施設の適切かつ効率的な維持管理のためには、施設の劣化過程を明らかにすることが必要事項の一つである。道路舗装や橋梁などについては、点検・健全度評価手法や劣化予測手法に関する研究が進められてきた（たとえば、武山ら，1990；保田ら，2004）。海岸保全施設に対しても、ライフサイクルマネジメントを導入した維持管理マニュアル（案）（農林水産省・国土交通省，2008）が作成され、点検・健全度評価の方法が示されている。また、コンクリート構造物を主対象に劣化予測に関する研究も行われている（小牟禮ら，2002；横田ら，2003；辻岡ら，2004）。さらに、佐藤ら（2009, 2010）は消波ブロック被覆工を対象として予防保全および事後保全に関する確率モデルを提案し、最適保全方策について理論的な検討を行っている。しかし、多数の捨石や消波ブロックで構成される構造物を対象とした劣化過程に関する検討は未だ数少ないのが現状である。本研究では、捨石で構成される護岸を対象とした確率的な劣化過程・補修モデルの構築を最終的な目的として、まず波の作用で生じる被災の度合の変化推定を行う。具体的には、水

理模型実験で得られた捨石護岸の断面変形のデータにもとづいて被災度の変化（推移）を求め、その過程に対するマルコフ連鎖モデルの適用性を検討する。

2. 断面変形計測実験と結果の概要

本研究で用いる捨石護岸の断面変形データは、太田ら（2010）の模型実験によるもので、実験とその結果の概要は以下のものである。多方向不規則波造波水槽内に、造波水路（長さ8.6m，幅0.6m，高さ0.6m）を10基作製し被覆層とコア部からなる護岸模型を設置した。被覆層に使用した砕石は密度 $\rho=2.75\text{g/cm}^3$ ，代表粒径 $D_{n50}=3.18\text{cm}$ であり，すべての砕石の質量は，70～100gの間にある。期待スペクトルにJONSWAPスペクトルを用い，有義波周期 $T_{1/3}=1.2\text{s}$ として作成した約27分間の一方向不規則波の信号により造波し，10基の水路で同波形・同位相の不規則波を護岸模型に作用させた。1回の作用波数は約1400波，有義波高 $H_{1/3}\approx 11\text{cm}$ で，有義波高を用いた安定数 $N_s\approx 2.0$ である。不規則波を1回作用させるごとに，1水路あたり3測線で護岸の断面形（岸沖方向）をレーザー変位センサにより計測し，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 （ $=A_e/D_{n50}^2$ ， A_e ：侵食面積）を求めた。同じ波を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（以下，Testと表記）とし，これを13回行った。Test1のみ波の作用回数が6回であるが，それ以降Test13までは繰り返し7回の波を作用させ，合計2700個の断面データおよび S の値を得た。解析の結果として，図-1，2に示すような波の作用回数 N_r ごとの S の平均値 S_m および標準偏差 σ_S が得られ， N_r ごとの S の度数分布が S_m と σ_S をもつ正規分布で近似できることなどがわかった。

また，1回の波の作用による被災（変形）度の変化特性に関してつぎのような検討を行った。まず，各測線の断面データによる S の値を四捨五入して整数値とし，同

1 正会員 博(工) 鳥取大学准教授大学院工学研究科
2 正会員 工博 鳥取大学教授大学院工学研究科
3 鳥取大学大学院工学研究科
4 博(工) 鳥取大学助教大学院工学研究科

図-1 Sの平均値・標準偏差の変化

図-2 Sの平均値と標準偏差との関係

一測線で隣り合う作用回数での S の推移に関して、 S の値の組み合わせごとに度数を求めた。そのままでは組み合わせ数が多いことから、被災度のランク分けを考え、van del Meer (1987) が $S=2$ で初期被災、 $S=8$ でコアが露出するような大きな被災 (のり面勾配1:1.5から1:2, 2層被覆の場合) としていることにもとづいて、 S が0から3をランク a 、4から7をランク b 、8から11をランク c 、12以上をランク d とした。ランクの各組み合わせでの相対度数を求め、表-1に示すような結果を得た。

3. マルコフ連鎖モデルの適用性

表-1の結果は、 N_r が1から7の間で被災度の推移をまとめて示したものであるが、 N_r の各回でランク a から d の割合 (以下、被災度割合と表記) を求めたところ、図-3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-3から、ランク a の割合は急速に減少し、逆にランク d の割合は徐々に増加することなどがわかる。本研究では、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。このモデルは道路舗装、橋梁や各種コンクリート構造物などの劣化予測モデルとしてもよく用いられている (たとえば、前出の武山ら, 1990; 保田ら, 2004; 小牟禮ら, 2002; 横田ら, 2003)。ここでは、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

表-1 被災度の変化

		$N_r + 1$			
		a	b	c	d
N_r	a	0.218	0.642	0.134	0.006
	b		0.563	0.416	0.021
	c			0.731	0.269
	d				1

図-3 被災度割合(実験値)

(a) モデル 1

(b) モデル 2

(c) モデル 3

図-4 各モデルの状態推移図

確率はランク間でそれぞれ異なる、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ランク間でそれぞれ異なる、の3種類のマルコフ連鎖モデルを使用する。各モデルの状態推移は図-4のように表され、図中の p は推移確率である。本研究では補修を考慮しないため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 に留まる確率は1である．また，各モデルにおける波の作用回数 N_r での被災度割合は，式(1)から(3)で与えられる．

$$\begin{pmatrix} a \\ b \\ c \\ d \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1-p & 0 & 0 & 0 \\ p & 1-p & 0 & 0 \\ 0 & p & 1-p & 0 \\ 0 & 0 & p & 1 \end{pmatrix}^{N_r} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad \dots\dots(1)$$

$$\begin{pmatrix} a \\ b \\ c \\ d \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1-p_1 & 0 & 0 & 0 \\ p_1 & 1-p_2 & 0 & 0 \\ 0 & p_2 & 1-p_3 & 0 \\ 0 & 0 & p_3 & 1 \end{pmatrix}^{N_r} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad \dots\dots(2)$$

$$\begin{pmatrix} a \\ b \\ c \\ d \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1-(p_{12}+p_{13}+p_{14}) & 0 & 0 & 0 \\ p_{12} & 1-(p_{23}+p_{24}) & 0 & 0 \\ p_{13} & p_{23} & 1-p_{34} & 0 \\ p_{14} & p_{24} & p_{34} & 1 \end{pmatrix}^{N_r} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad \dots\dots(3)$$

これらの式における推移確率の推定は，Microsoft Excel 2007（以下，Excelと表記）を用いてつぎのような手順（港湾空港技術研究所，2007）で行った．まず，ワークシート内に上記のモデル1から3における推移確率の初期値として(0,1)の任意の値を与え，式(1)から(3)で表される被災度割合の推移を $N_r=1, 2, \dots, 7$ について計算する． $N_r=7$ での被災度割合の実験値（図-3参照）と計算値から誤差の2乗和を求める．Excelのソルバー機能を用いて誤差の2乗和を最小にする推移確率を算出する．ソルバー機能のパラメータ設定における制約条件およびオプション設定の追加事項としては，推移確率をすべて1未満の値とすることと非負数の仮定のみであり，その他は初期設定のままとした．モデル1では推移確率 p の初期値によらず同じ推定結果が，モデル2では p_1 から p_3 の初期値をすべて0.1とした場合を除いて同じ推定結果が得られた．モデル3では p_{12} から p_{34} の初期値によって推定結果が異なったため，初期値の設定と推定結果の両方に表-1の結果を参照して，妥当と思われる初期値を決めた．表-2に各モデルの推移確率の推定値を示す．上述の $N_r=7$ における推移確率推定後の誤差の2乗和は，モデル1で約0.028，モデル2と3では 10^{-14} のオーダーであった．

以上の手順で推定した各モデルの推移確率と式(1)から(3)を用いて， $N_r=20$ までの被災度割合を求めた．また，それらの結果を評価するために，実験結果にもとづき以下のようにして $N_r=8 \sim 20$ の被災度割合を推定した．まず， S_m と σ_s の実験値（図-1, 2参照）に対して図-5, 6の実線で示す近似曲線を当てはめた．それぞれの近似式は式(4)，(5)のように表される．

$$S_m = 5.390 N_r^{0.3588} \quad \dots\dots(4)$$

$$\sigma_s = 1.038 S_m^{0.4553} \quad \dots\dots(5)$$

図-6の点線は，Melbyら（1998）が傾斜堤を対象とした実験結果から与えたもので，近似式は $\sigma_s=0.5S_m^{0.65}$ であるが，太田ら（2010）の実験結果では S のばらつきがより大きいことがわかる． $N_r=8 \sim 20$ の S_m と σ_s を式(4)，(5)で与え， S の確率分布がこれらの平均値と標準偏差をもつ正規分布で表されると仮定すると， S の値がランク a から d のそれぞれに入る確率を求めることができる．本研究ではシンプソン則を用いた数値積分により正規分布の分布関数 $P(S)$ の値を求めた．ただし， $P(0)$ の値が0でなく各ランクに入る確率の和が1とならないため， $P(0)$ を各ランクの確率の比にしたがって配分した．図-7に，マルコフ連鎖モデル1から3と正規分布を用いて計算した $N_r=20$ までの被災度割合を示す．ただし，(d)の $N_r \leq 7$ は図-3に示した実験値である．これらの図より，モデル1, 2, 3の順でランク a の減少が緩やかで d の増加が急であることがわかる．また，図-8はランク別の割合の変化を表したものである．以上の結果より，マルコフ連鎖モデルのう

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	0.3287	p ₁₂	0.4045
モデル2	0.4954	p ₁₃	0.0843
		p ₁₄	0.0065
p ₁	0.3433	p ₂₃	0.2729
p ₂	0.2075	p ₂₄	0.0370
p ₃		p ₃₄	0.1508

図-5 S_m の近似

図-6 σ_s の近似

ち実験結果にもとづく被災度割合の推移傾向に近いのはモデル3であり、2ランク以上の推移を考慮したモデルが最もよく現象を表していると考えられる。

4. S の変化特性が異なる場合の検討

3.では図-5の実線で示した S_m の変化にもとづいて被災度割合の推定を行った。ここでは、 S_m の実験値に関する近似を変えることによって異なる S_m の変化過程を作成し、これにより被災度割合を求めて、その推移に及ぼす影響を3.の結果と比較することで検討する。図-9の●は隣り合う N_r での S_m の増分 ΔS_m であり、この値に対して累

乗近似と指数近似により図中に示す近似曲線と近似式を得た。これらの近似式で与えられる ΔS_m より $N_r=1\sim 20$ の S_m を求めた。ただし、累乗近似による S_m は、実験値に近くなるように $N_r=1$ での値を調整した。図-5に示した点線が累乗近似、破線が指数近似によるもので、それぞれの S_m に対する σ_s は式(5)で与えた。図-5から、 ΔS_m の累乗近似にもとづく S_m は $N_r \geq 8$ でより緩やかに増加し、指数近似によるものは最も勾配が大きく $N_r \geq 8$ で直線状に増加することがわかる。Melbyら(1998)は、 S の平均値が収束傾向を示さず累積作用波数につれて増加を続けるような実験結果を示していることから、 S_m が直線的に増加

図-7 被災度割合(モデルと正規分布)

図-8 ランク別の割合の変化(モデルと正規分布)

図-9 S_m の増分の近似

(a) ランク b

(b) ランク c, d

図-10 ランク別の割合の変化(正規分布)

するような変化過程もあり得ると考えられる。さらに、 σ_s の差異による影響を検討するために、 ΔS_m の指数近似による S_m とMelbyら(1998)が与えた $\sigma_s = 0.5 S_m^{0.65}$ を組み合わせたケースも設定した。以上の3ケースについて、 S_m を平均値、 σ_s を標準偏差とする正規分布を用いて、 S の値がランクaからdのそれぞれに入る確率を求めた。図-10は $N_r \geq 8$ でのランクbからdの割合を示したものである。図中のnormal1は S_m の累乗近似による値で図-8の実線で示したのと同じもの、normal2は ΔS_m の累乗近似、normal3は ΔS_m の指数近似にもとづくもので、normal3+Melbyはnormal3とMelbyら(1998)の式による σ_s を用いたものである。ランクb、cの減少とランクdの増加の緩急は図-5の $N_r \geq 8$ での緩急に対応していること、

S_m の変化が同じでも標準偏差の小さいほうがランクb、cの減少とdの増加の早いことが示されている。また、図-8と10との比較より、 S_m が直線的に増加するnormal3では、結果的にランクc、dの割合がマルコフ連鎖モデル2による値に近くなっていることがわかる。

5. おわりに

本研究では、水理模型実験で得られた捨石護岸の断面変形のデータにもとづいて、変形量パラメータ S の値によって被災度をランク分けし被災度割合およびその推移を求め、被災進行過程に対して定常推移確率をもつ3種類のマルコフ連鎖モデルの適用性を検討した。各モデルに対して推移確率が得られ、これにより被災度割合を算出した結果、2ランク以上の推移を考慮したモデルが最もよく現象を表すことがわかった。また、 S の変化特性が異なる場合について、被災度割合の推移に及ぼす影響を検討した。今後は、補修を考慮したより実用的なモデルを構築する予定である。

参 考 文 献

- 太田隆夫・松見吉晴・山口秀樹・木村 晃 (2010)：捨石護岸の断面変形量の統計的特性について，土木学会論文集B2(海岸工学)，Vol.B2-66，No.1，pp.871-875.
- 港湾空港技術研究所編著 (2007)：港湾の施設の維持管理技術マニュアル，沿岸技術研究センター，229p.
- 小牟禮建一・濱田秀則・横田 弘・山地 徹 (2002)：RC栈橋上部工の塩害による劣化進行モデルの開発，港研報告，第41巻第4号，pp.3-37.
- 佐藤 毅・松見吉晴・角 勇人・平山隆幸・太田隆夫 (2009)：供用期間を考慮した消波ブロックの損傷度に基づく予防保全問題，土木学会論文集B2(海岸工学)，Vol.B2-65，No.1，pp.951-955.
- 佐藤 毅・松見吉晴・平山隆幸・角 勇人・太田隆夫 (2010)：消波施設耐力と外的負荷を考慮した応急処置を伴う年齢型予防保全問題，土木学会論文集B2(海岸工学)，Vol.B2-66，No.1，pp.931-935.
- 武山 泰・嶋田洋一・福田 正 (1990)：マルコフ連鎖モデルによるアスファルト舗装の破損評価システム，土木学会論文集，第420号/V-13，pp.135-141.
- 辻岡信也・横田 弘・関根好幸・稲田 裕 (2004)：劣化・変状を含む海岸保全施設の破壊確率算定手法に関する研究，海岸工学論文集，第51巻，pp.1331-1335.
- 農林水産省・国土交通省 (2008)：ライフサイクルマネジメントのための海岸保全施設維持管理マニュアル(案)～堤防・護岸・胸壁の点検・診断～，105p.
- 保田敬一・小林潔司 (2004)：BMSにおける点検結果と状態推移確率がLCCに及ぼす影響，建設マネジメント研究論文集，Vol.11，pp.111-122.
- 横田 弘・岩波光保・関根好幸 (2003)：海岸保全施設の老朽化実態とその進行モデルの構築，海岸工学論文集，第50巻，pp.911-915.
- Melby, J. A. and N. Kobayashi (1998)：Progression and variability of damage on rubble mound breakwaters, J. Waterw., Port, Coastal, and Ocean Eng., Vol.124, No.6, pp.286-294.
- Van der Meer (1987)：Stability of breakwater armour layers - design formulae, Coastal Eng., Vol.11, pp.219-239.