捨石護岸の断面変形量の統計的特性について

Statistical Characteristics of Profile Change Quantity of Rubble Mound Revetment

太田隆夫¹·松見吉晴²·山口秀樹³·木村 晃⁴

Takao OTA, Yoshiharu MATSUMI, Hideki YAMAGUCHI and Akira KIMURA

As a first step to develop a probabilistic model for the maintenance and repair of revetment, laboratory experiments were conducted to investigate the statistical characteristics of profile change quantity. Ten wave flumes were constructed in a multi-directional wave basin and a conventional rubble mound revetment was placed in each flume. A total of 2700 data of the revetment profile were obtained. The statistical characteristics of the normalized eroded area S were investigated. The frequency distributions of S were approximated by the normal distribution and the standard deviation of S increased as the damage of the revetment progressed. The mean and standard deviation of the increment of S did not change much as the total number of wave became large.

1. はじめに

近年の公共事業費削減,高度成長期に整備された多数 の社会基盤施設の老朽化,さらには性能設計法の導入を 背景として,効率的な維持管理が重要となってきている. 構造物が一定の性能水準を保持するためには,適切な時 期に補修することが必要であり,ひいては効率的な維持 補修計画の策定が求められることになる.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,定期的な点検と適時,適切な保全対 策の必要性がうたわれている.

構造物の適切な維持管理のためには、構造物の劣化過 程・補修モデルが重要な要素となるが、海岸・港湾構造 物のうち,特に多数の捨石や消波ブロックで構成される 構造物の場合, 主たる作用である波浪の不規則性に加え て,被覆材の大きさ,形状,据付状態,かみ合わせのば らつきに起因する断面変形(劣化)過程の不確定性が含 まれることから、確率的な劣化過程・補修モデルが必要 となる. 消波ブロックを対象にした研究として, 佐藤ら (2009) は予防保全に関する確率モデルを提案し、最適 予防保全レベルは、1回の異常波浪による変形量(損傷 量)の平均値および分散に大きく影響されることを示し ている.また,捨石や消波ブロックによる防波堤・護岸 の断面変形に関しては、これまでにも多くの研究が行わ れてきたが,変形量の統計的特性について検討したもの としては、著者が知る限り Melby · Kobayashi (1998) が 挙げられるのみである.この論文では,捨石堤を対象と

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		修(工)	国土交通省近畿地方整備局
4	正会員	工博	鳥取大学名誉教授

した実験結果より、断面変形に関する3つのパラメータ について頻度分布を示している.そのうちの変形量パラ メータS (= A_e / D_{n50}^2 , A_e :侵食面積, D_{n50} :代表粒径) については、平均値・標準偏差の累積作用波数に対する 変化、平均値と標準偏差との関係も示している.ただし、 一組の実験を波浪条件と水深を変えながら行っている.

本研究は, 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, その際に必要となる断面変形量の統計的特性について, 同一の波浪条件下での水理模型実験で得られた多数のデ ータにもとづいて, 検討を行うものである.

2. 水理模型実験

本研究では、捨石護岸での多数の断面変形データを取 得するために、長さ14m、幅9mの多方向不規則波造波水 槽内に、図-1のように10基の水路を設置した.多方向不 規則波造波装置は、幅0.6mの14枚の造波板からなるサ ーペント型で、各造波板の両端をサーボモータとボール ねじで駆動させるものである.14枚のうち、両端2枚ず



図-1 実験水路



図-2 実験装置の概要

つを除いて造波板ごとにベニヤ板で仕切り,長さ8.6m, 高さ0.6mの造波水路を10基作成した.なお,ベニヤ板 は造波板の間隙を貫通するように設置し,造波板の駆動 範囲を含めて仕切ってある.

各水路には、被覆層およびコア部からなる捨石護岸の 模型を設置した。初期断面における前のり面勾配は1:1.5, 静水面からの天端高0.15m,天端幅0.1mである。1つの 水路における装置の概要を図-2に示す。被覆層に使用し た砕石は、平均質量87.6g,密度p=2.75g/cm³,質量の中 央値(M_{50}) 88.4g,代表粒径(D_{n50}) 3.18cmであり、こ れらはランダムに抽出した100個の砕石から求めたもの である。また、すべての砕石の質量は、70~100gの間に ある。

作用させた不規則波は、JONSWAPスペクトル(先鋭 度パラメータ γ =3.3)を期待スペクトルとし、有義波周期 $T_{1/3}$ =1.2s,サンプリング間隔0.05s,データ数32768とし て作成した一方向不規則波の信号により、すべての造波 板を同位相で駆動させて造波したものである。したがっ て、10基の水路に同波形・同位相の不規則波を造波し、 護岸模型に作用させた。1回の作用波数は約1400波で、 有義波高は $H_{1/3}$ =11cmとした。有義波高を用いた安定数 $N_s=H_{1/3}(\Delta D_{n50})$ の値は2.0である。ここに、 $\Delta=(\rho-\rho_w)/\rho_w$ 、 ρ_w :水の密度である。

各水路の一様水深部(水深0.35m)に,0.3m間隔で2 本の波高計を置いて水位を計測した.護岸側の波高計か ら護岸のり先までの距離は3mである.これらの波高計 で得られた水位データより,合田ら(1976)の方法によ り反射率を推定した.

護岸の断面形(岸沖方向)の測定には、レーザー変位 センサを用いた。台車にセンサを取り付け、水路上に設 置した外部トリガマーカ(凹凸)付きのレールを走らせ ることにより、1cm間隔で底面までの距離を測定し、断 面形を求めた。センサの出力電圧を距離に換算する際に は、水中と空中に置いた突起物(角柱)による電圧差を 用い、水中部分と空中部分をそれぞれ換算した。ただし、 断面計測時には静水面近傍での出力電圧と距離(高さ) との関係から、水中部分と空中部分の境界でギャップが 生じていないことを確認しつつ,計測を行った.波を1 回(約27分間)作用させるごとに,1水路あたり3測線 (15cm間隔)で断面を測定し,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,同 様にその初期断面を基準とするパラメータŜも求めた.

同じ波を繰り返し作用させて、断面変化のデータを取 得することを1回の実験(以後,Testと表記)とし、こ れを13回行った.Test1のみ波の繰り返し回数が6回であ るが、Test2以降Test13までは繰り返し7回(累積作用波 数約9800)の波を作用させた.したがって、得られた断 面データの合計は2700個(初期断面を含めると3090個) である.

3. 実験結果および解析

(1) 断面形状と反射率の変化

図-3に断面変化の一例を示す.図の横軸は,護岸側の 波高計を原点に岸向きを正としたx座標,縦軸は静水面 から上向きを正としたz座標である(図-2参照).よく知 られているように,波の累積作用時間の増加につれて静 水面付近が侵食され,緩い(逆)S字形の断面となって いる.

図-4は、断面変形量と反射率K_Rとの関係を表したもの である.各水路での平均的な断面形状がK_Rに影響すると 考え,3測線の平均をとった断面形から求めたŜを用いた. Ŝの増加にともなってK_Rは減少する傾向を示している.





*K_R*の変化幅は最大で約0.05であった.また,図中の直線 は最小二乗法による回帰直線で,式(1)のように表さ れる.

 $K_R = -0.0025\hat{S} + 0.280$ (1)

太田ら(2007,2009)が傾斜堤・傾斜護岸を対象として 行った実験においても、断面変形の進行につれて反射率 が減少しており、本研究でも同様の傾向が確認された.

(2) 変形量パラメータの統計的特性

実験で得られた各測線の断面データから求めた変形量 パラメータSについて、その統計的特性を検討した.ま ず、図-5にSの全データ(2700個)の度数分布を示す. 縦軸の値は各階級の相対度数を階級幅で除したものであ る.すべてのSの平均値は8.52、標準偏差は3.27であり、 図中の曲線はこれらの値をもつ正規分布である.Sは正 の値であるため、S=0近傍で正規分布の対応があまりよ くないが、Sの度数分布は概ね正規分布で近似できるこ とがわかる.

つぎに,波の繰り返し回数ごとに,Test1からTest13で 得られたSの平均値および標準偏差を求め,それらの特 性を調べた.まず,図-6に累積作用波数NとSの平均値 S_m および標準偏差 σ_s との関係を示す.1回目(N=1400) から6回目(N=8400)までのそれぞれのデータ数は390, 7回目(N=9600)のデータ数は360である. S_m は1回目の



図-7 Sの平均値と標準偏差・変動係数との関係

波の作用で大きく増加した後,緩やかに増える傾向を示 している.図-7は、 $S_m \ge \sigma_s$ および変動係数 $\sigma_s / S_m \ge \sigma_g$ 係を表したものである.Melby・Kobayashi (1998)は、 傾斜堤を対象とした実験結果から、Sの平均値が大きく なるにつれて σ_s が増えること、逆に変動係数は減少する ことを指摘しているが、本研究の実験においても同様の 結果となった.ただし、前述のように、Melby・ Kobayashiは一組の実験の間に波浪条件(6種類)と水深 (2種類)を変化させている.彼らの実験結果では、入射 波高が大きい場合は、波の累積作用時間がかなり長く (最長11時間)なっても、Sの平均値と標準偏差の増加傾 向は変わらないことが示されている.本研究の実験でN をさらに増やした場合に、Sの変化がどのようになるか 不明であるが、Melby・Kobayashiと同様に収束傾向を示 さない可能性もある.

図-8は、波の繰り返し回数ごとに、Sのヒストグラム とSの平均値・標準偏差をもつ正規分布との比較を示し たものである.添字の1から7は、波の繰り返し回数を 表し、たとえば5は上述の不規則波を5回作用させた後 のTest1からTest13の断面データにより求めたであること を表す.図-5と同様に、S_i(*i*=1,…,7)の度数分布は概ね 正規分布で近似できることがわかる.また、図-6、7か らも明らかなことであるが、波の繰り返し回数が増すに つれ、分布はSの大きいほうへシフトし、分布幅が広が



っていることが見て取れる.

さらに、同じ測線でNの各値に対して得られたSの相 関性について検討した.図-9は隣り合うNでのSの値 $S_{i,r}$ S_{i+1} (i=1, 2, 4, 6)をプロットしたものである.図中のrは 相関係数である.相関係数は、隣り合うNの場合で約0.8, 1つおきの場合でも約0.73の大きな値を示した.断面変 形の過程で、砕石の初期移動がトリガーとなって、その 部分から侵食が拡大していくというパターンから考える と、SONに対する変化に高い相関性があるのは予想さ れることである.

(3) 変形量パラメータの変化量の統計的特性

各測線の断面データによる*S*について、その変化量 (増分)の統計的性質を検討した.隣り合う*N*での*S*の差 ($S_{i+1} - S_i$)から平均値 ΔS_m および標準偏差 $\sigma_{\Delta S}$ を求めた. 図-10 に*N*と ΔS_m および $\sigma_{\Delta S}$ との関係を示す.この図より、 *N*=4200 以降(3回目以降の波の作用)では、 ΔS_m 、 $\sigma_{\Delta S}$ と もにほぼ一定となっていることがわかる.図-11 は隣り 合う*N*での*S*の差をプロットした一例である.図中の横 軸 ΔS_{3-2} は、($S_3 - S_2$)のデータであることを表している. 図には負の増分が含まれているが、これは断面形状の測 定誤差のほか、断面形の測線以外から移動してきた砕石 による侵食面積の減少などによるものと考えられる. 負 の増分の取り扱いについて明確な基準はないが, 全デー タを用いた場合の相関係数は約0.2~0.4, 一例として-1 よりも小さい値を省いた場合では約0.07~0.3であった. 以上のことから,変形量パラメータSは,断面変形の初 期段階を除いて,ほぼ一定で弱い相関のある増分をもつ 確率過程に従うことが推測される.

(4) 変形度(被災度)の変化特性

護岸に対する確率的な劣化過程モデルを構築するに は、1回の波の作用による変形(被災)度の変化特性も 必要になると考えられる.ここでは、確率的モデルで直





ちに使用できるようなものを与えるわけではないが,以 下のような簡単な解析を行った.

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,波の繰り返し回数j,j+1 (j=0,…,6) でSの 値の組み合わせごとに度数を求めた.j=0は初期断面を 意味し,S=0である.また,上述のように,j+1でのSがjのときよりも小さい場合もあるが,そのような組み合わ せの度数は除いた.つぎに,Sの値の組み合わせ数が多 いことから,変形度のランク分けを行った.Van del Meer (1987) が,S=2でほぼ無被害,S=8でフィルター 層の露出 (のり面勾配1:1.5~1:2の場合) としているこ とにもとづいて,S=0~3をランクI,4~7をランクII,8 ~11をランクIII,12以上をランクIV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 果が得られた.ランクの各行での相対度数の和は1であ る.この結果より,jでの変形度が大きいほど,j+1で同 じランクにとどまる割合が高くなることがわかる.

4.おわりに

本研究では,捨石護岸を対象として,その断面変形量 の統計的特性について,水理模型実験のデータにもとづ いて検討を行った.得られた結果を以下に要約する.

- 各測線の断面データから求めた変形量パラメータについては、全データの度数分布と波の繰り返し回数ごとの度数分布のいずれに対しても、正規分布で近似することができる。
- 2)波の繰り返し回数ごとの変形量パラメータの平均値 および標準偏差は、1回目の波の作用で大きく増加し た後、緩やかに増える傾向を示す。
- 3) 波の繰り返し回数ごとの変形量パラメータ間には高 い相関性が見られる.
- 4)変形量パラメータの変化量(増分)の平均値・標準 偏差は、波の繰り返し回数が多くなると変動が小さく

表-1 変形度の変化割合

$\overline{}$		<i>j</i> +1				
		Ι	II	III	IV	
j	Ι	0.218	0.642	0.134	0.006	
	II		0.563	0.416	0.021	
	III			0.731	0.269	
	IV				1	

なる.隣り合う波の繰り返し回数での増分の間には, 弱い相関性が見られる.

5) ある波の繰り返し回数での変形度が大きいほど,つ ぎの波の作用後に同じ変形度ランクにとどまる割合が 高くなる.

今後は、さらに護岸の斜面勾配,砕石の質量などの異 なる条件の実験により、断面変形量のデータを蓄積して、 その統計的特性を検討するとともに、確率的な劣化過 程・補修モデルの構築を行う予定である.

謝辞:実験においては,加藤展顕君(現,鳥取大学大学 院生)に協力していただきました.また,本研究は科学 研究費補助金基盤研究(C)(課題番号20560479,研究代 表者:松見吉晴)により実施されました.ここに記して 謝意を表します.

参考文献

- 太田隆夫・松見吉晴・木村 晃 (2007):断面変形を伴う傾斜 堤の越波量からみた性能評価,海岸工学論文集,第54巻, pp.746-750.
- 太田隆夫・松見吉晴・平山隆幸・木村 晃 (2009): 傾斜堤お よび傾斜護岸における断面変形のモデル化と性能評価, 海洋開発論文集,第25巻, pp.175-179.
- 合田良実・鈴木康正・岸良安治・菊地 治(1976):不規則波 実験における入・反射波の分離推定法,港湾技研資料, No. 248, 24p.
- 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,海岸工学論文集,第56巻,pp.951-955.
- 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.
- 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.