

# 傾斜堤における断面変形のモデル化と性能評価に関する基礎的研究

太田 隆夫・松見 吉晴・木村 晃  
鳥取大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻

Study on a model for profile change of rubble mound breakwater and performance evaluation

Takao OTA, Yoshiharu MATSUMI and Akira KIMURA  
Department of Management of Social Systems and Civil Engineering  
Graduate School of Engineering, Tottori University, Tottori, 680-8552 Japan  
E-mail: ohta@sse.tottori-u.ac.jp

**Abstract:** This study deals with a model for profile change of rubble mound breakwater based on the experimental results. The model profiles are given by composite sine curve corresponding to the degree of damage. The model profile and a time-averaged numerical model are applied to computation of reflection coefficient, runup height and overtopping rate to evaluate the wave dissipation performance. The measured and computed reflection coefficient and runup height do not change much with damage progression of the breakwater. As for the overtopping rate, the computed result shows different tendency from the experimental result.

**Key Words:** Rubble mound breakwater, Profile change, Performance-based design

## 1. はじめに

現在、海岸・港湾分野では、耐波安定性能、消波性能等を統合的に照査する性能設計法の導入が計られている。この設計法では、構造物の被災に伴う形状変化を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る。したがって、性能設計法の確立に当たっては、構造物の被災進行に伴う各性能の変化特性を明らかにする必要がある。また、形状変化に伴う性能劣化を予測・評価することができれば、修復時期的確な判定、およびメンテナンス・ライフサイクルコストの算定に適用されることが考えられる。本研究では、傾斜堤体を対象として、まず、水理模型実験で得られた断面変化のデータをもとに断面形状のモデル化を行う。つぎに、消波性能の評価指標として反射率、越波流量および打ち上げ高を取り上げて、モデル断面と数値計算モデルによりこれらを求める。評価指標の実験値および計算値により、傾斜堤の消波性能に及ぼす断面変形の影響について検討する。

## 2. 水理模型実験

本研究で用いる実験データは、これまでに著者

らが行った実験[1][2]で得られたものである。これらの実験では、傾斜堤の断面変形と、傾斜堤の性能評価指標として取り上げた打ち上げ高、越波量および反射率との関係を見出すことを目的としている。実験の概要を以下に記す。

実験は、図1（実験1）および図2（実験2）に示すような初期断面形状で、被覆層およびコア部からなる堤体（前面勾配 1:1.5、後面勾配 1:1）で行った。図1と2では、傾斜堤岸側斜面の形状と、越波量測定のための集水柵の設置位置だけが異なる。被覆層砕石の代表粒径（ $D_{n50}$ ）は 2.52cm であり、コア部に用いた砂利の中央質量は 3.75g である。また、すべての砕石の質量は、35~50g の間にある。

不規則波の期待スペクトルとして JONSWAP スペクトル（集中度パラメータ  $\gamma_c=3.3$ 、ピーク周期  $T_p=1.6s$ ）を用い、20分間の造波信号（744波）を作成した。この信号データをもとに、有義波高  $H_{1/3} \approx 8.5, 10.5cm$  の不規則波を造波した。ただし、 $H_{1/3} \approx 8.5cm$  の波は、初期断面における砕石層の締固めのために最初の 20分間だけ作用させた。

堤体の断面形（岸沖方向）の測定には、レーザー変位センサを用いた。波を 20分間作用させるごとに 3測線で堤体断面を測定し、その平均をとって断面形とした。初期断面を基準として、堤体の

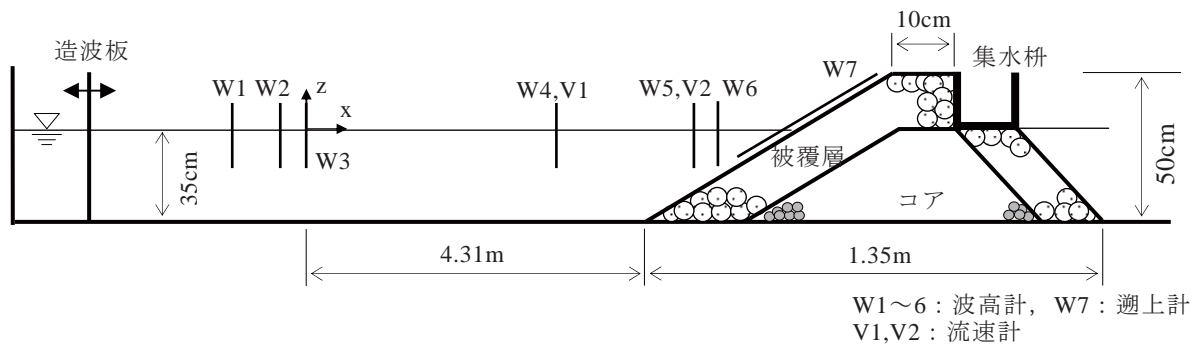


図1 実験装置 (実験1)

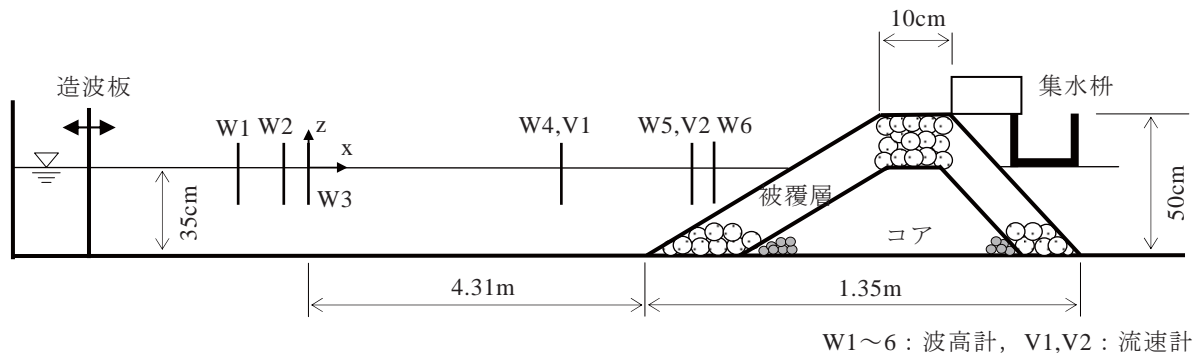


図2 実験装置 (実験2)

変形量を表すダメージパラメータ  $S = A_e / D_{n50}^2$

( $A_e$ : 侵食面積) を求めた. また, 堤体の天端背後に集水枡 (実験1では幅 40.8cm, 実験2では幅 37cm) を置き, 20分間ごとの越波量を計測した.

一様水深部 (水深 35cm) に4本 (W1~W4), 傾斜堤前法面上に2本 (W5, W6) の波高計を設置して水位を計測し, W1~W3のデータより反射率を求めた. また, 実験1 (の2回目) では, 初期断面の前法面上約 2.5cm の位置に遡上計 (W7) を設置し, 打ち上げ波の水位を計測した.

実験においては, 波の作用累積時間が3時間程度になるまで, 同じ造波信号による波を繰り返し作用させ, これを2回ずつ行った.

### 3. 実験結果と断面形状のモデル化

図3, 4に堤体断面変化を示す. 図の横軸は, W3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1, 2参照). 波の作用時間の増加につれて, 静水面付近が浸食され, 転落した石が前法面下部に堆積して, 緩い逆S字形の断面となっていることがわか

る.

図5, 6は, ダメージパラメータ  $S$ , 反射率  $K_R$  と作用累積波数  $N$  との関係を示したものである. 実験1および2の1回目 (test1-1, test2-1) では,  $N$  の増加に伴って  $S$  がほぼ単調に増加している. 実験1の2回目 (test1-2) では一旦収束する傾向を示した後再び増大し, 実験2の2回目 (test2-2) では,  $N=4000$  以降であまり変化がない.  $K_R$  は, いずれの実験でも,  $N$  の増加につれて徐々に低下しているが, その変化量は 0.06 から 0.07 程度と小さい.

図7, 8には, 無次元越波流量  $q_0 / (2gH_{m0l}^3)^{0.5}$ , と相対打ち上げ高  $R_{1/3} / H_{m0l}$  と  $N$  との関係を表す. ここに,  $q_0$ : 単位時間, 単位幅あたりの越波量,  $H_{m0l}$ : 入射波のエネルギースペクトルから求めた有義波高,  $R_{1/3}$ : 1/3最大打ち上げ高である. 実験2の2回目を除いて, 無次元越波流量は,  $N$  の増加, すなわち浸食の増大とともに増加する傾向が見られる. ただし, 断面変形の形状の違いなどにより, 越波量は実験ごとに大きく異なる. 相対打ち上げ高は, 浸食が大きくなるにつれ減少していく傾向を示している.

図5に示したように、同一条件下の実験でも  $S$  の変化は異なり、これにより特に越波量が影響を受ける。したがって、断面の変形量と、傾斜堤の性能評価指標の一つである越波量との定量的な関係を見出すには、多数の実験データが必要になることが予想される。そこで本研究では、 $S$  の値に対応して断面形状を決めることができれば、上述の定量的評価がしやすくなると考え、断面形のモデル化を試みた。まず、計4回の実験で得られた

断面形のデータを重ね合わせたところ、 $S$  の大小によらず、断面が変化しない点はほぼ一定であることがわかった。この点と、堤体前法面の法先・法肩の3点を基準（固定）点として、2つの  $\sin$  曲線で断面形を与えた。 $\sin$  曲線の振幅は、 $S$  の値に対応する浸食面積  $A_e$  と  $\sin$  曲線の面積が等しくなるように決定した。堆積部分の面積は  $A_e$  に等しいものとしている。図9、10に、 $S$  を10および20とした場合のモデル断面（太い実線）と、実験

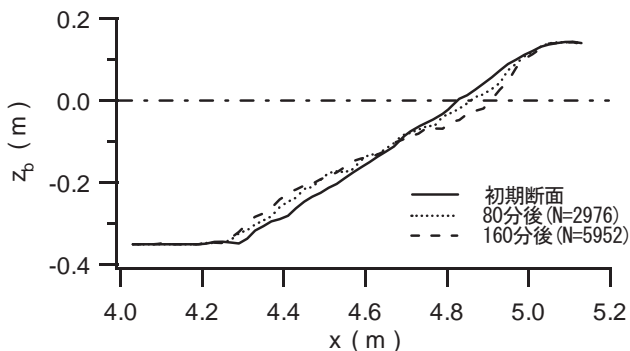


図3 堤体断面の変化（実験1）

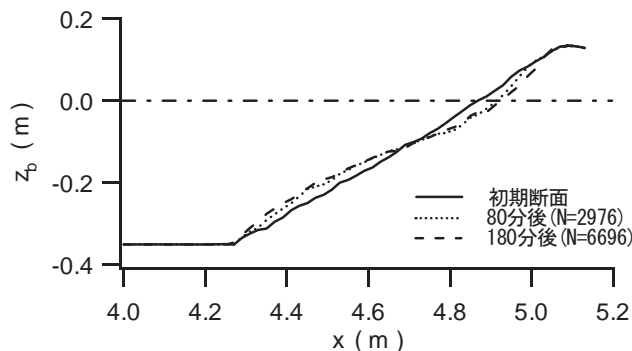


図4 堤体断面の変化（実験2）

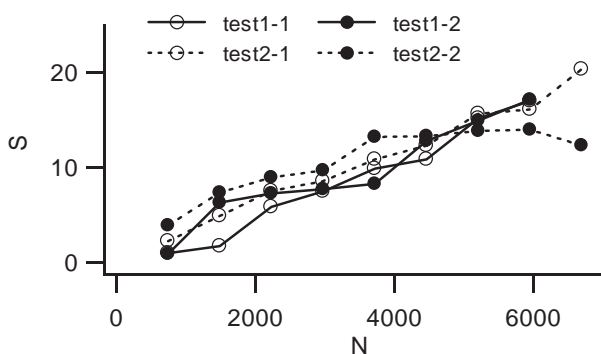


図5 ダメージパラメータの変化

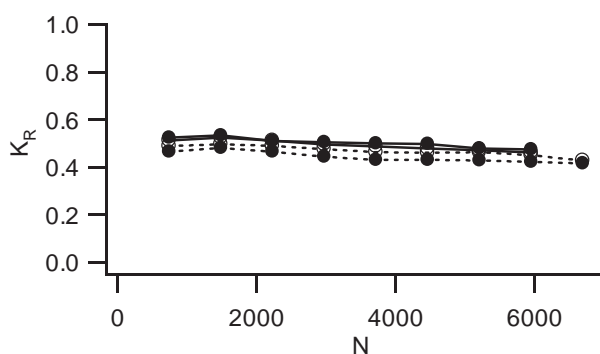


図6 反射率の変化

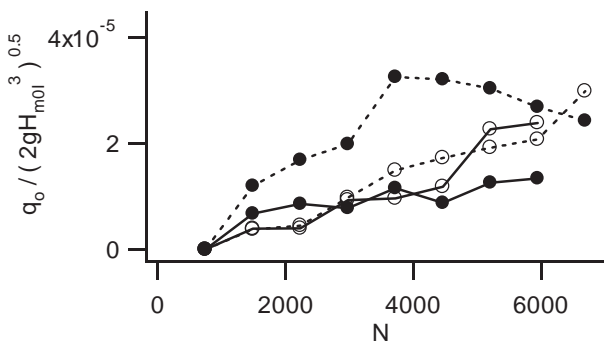


図7 越波流量の変化

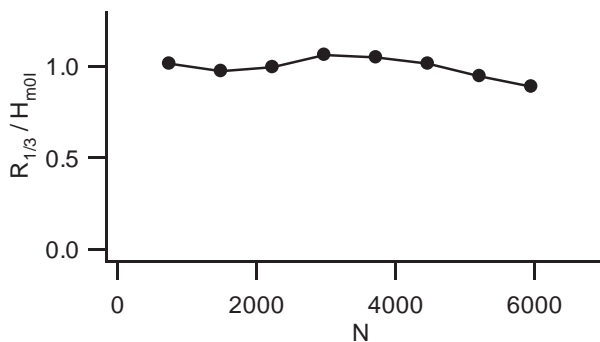


図8 打ち上げ高の変化

で得られた断面形のうち  $S$  の値が同程度であるもの（破線および鎖線）を示した。モデル断面は実験での断面形をほぼ近似していることがわかる。この方法により、与えられた  $S$  の値に対して断面形を一義的に決めることができる。なお、モデル断面では法先を固定しているため、実験結果との相違が見られるが、水深が大きい位置であるため、

波に及ぼす影響は小さい。

#### 4. 数値計算モデルと計算結果

本研究では、Kobayashi・de los Santos[3]による、時間平均型波浪変形モデルと越波流量算定のための確率モデルを組み合わせたものを用いた。波浪

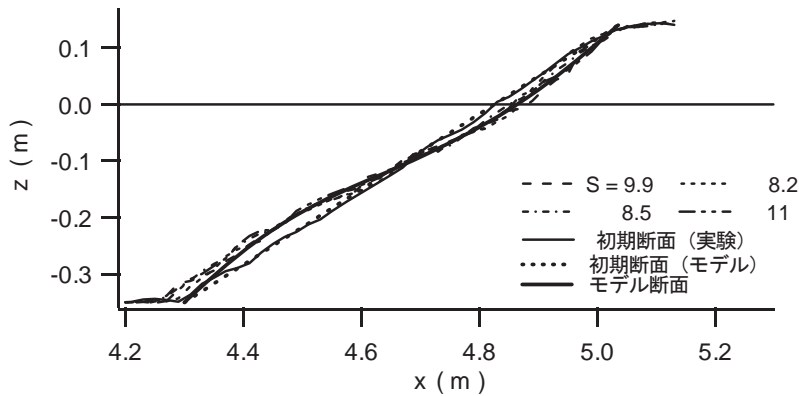


図9 断面形状のモデル化 ( $S=10$ )

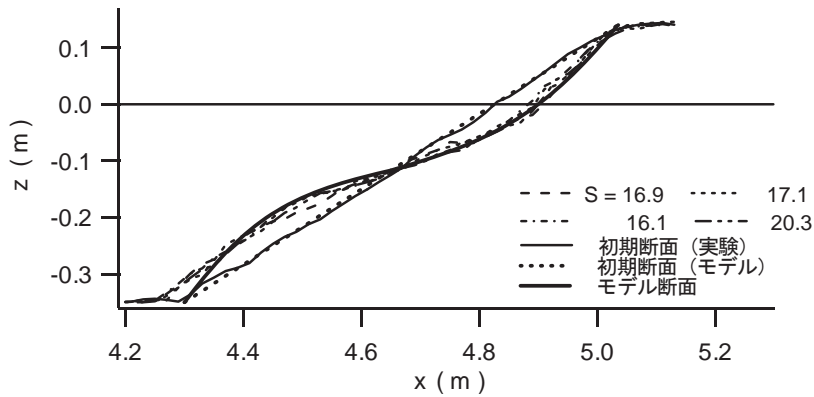


図10 断面形状のモデル化 ( $S=20$ )

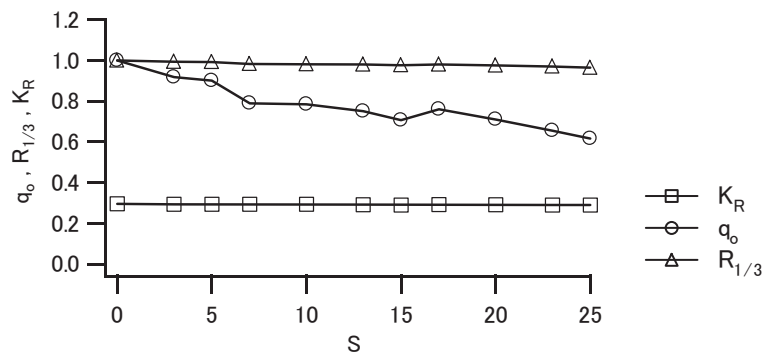


図11 反射率，越波流量および打ち上げ高の変化（計算値）

変形モデルは、時間平均された連続式、運動量方程式およびエネルギー方程式に基づくもので、水位および透過性堤体内外の流速の平均値・標準偏差、エネルギーフラックスおよびエネルギー逸散率を計算することができる。

越波流量算定モデルでは、まず、堤体前法面上に仮想的に遡上計があるとして、波浪変形モデルで得られた水位変動の平均値と標準偏差から、打ち上げ波の水位の平均値と標準偏差を求める。これらを用いて1/3最大打ち上げ高を推定し、さらに打ち上げ高の確率分布をWeibull分布と仮定して、経験式により越波流量を算定する。数値モデルの詳細については、参考文献[2]、[3]を参照されたい。

この数値モデルと、3. に述べたモデル断面を用い、 $S$  の値を0（初期断面）から25の間で11個設定して計算を行った。図11に計算結果のうち、反射率  $K_R$ 、越波流量  $q_0$ 、1/3最大打ち上げ高  $R_{1/3}$  を示す。 $q_0$  と  $R_{1/3}$  は、それぞれの  $S=0$  での値で除したものである。また  $K_R$  は、汀線でのエネルギーフラックスが反射されると仮定して求めている[3]。 $S$  の増加につれ、 $q_0$  は減少、 $K_R$ 、 $R_{1/3}$  はほぼ一定で、 $K_R$ 、 $R_{1/3}$  については実験結果と同じ傾向を示しているが、 $q_0$  は逆の傾向となっている。実験においては、断面変形が小さいうちは数波の大きな波による越流であったのが、変形の進行に伴って飛沫状の越波の発生が増加するようになり、このことが  $q_0$  の実験値と計算値で傾向が異なる原因と考えられる。

## 5. おわりに

本研究では、傾斜堤体を対象として、水理模型実験で得られた断面変化のデータをもとに断面形状のモデル化を行った。ダメージパラメータ  $S$  が10および20程度の断面について検討した結果、浸食部分と堆積部分のそれぞれの形状を  $\sin$  曲線で近似できることがわかった。さらに、モデル断面と数値計算モデルを用いて、反射率、越波流量および打ち上げ高を求め、消波性能の変化を検討した。結果として、反射率と打ち上げ高は実験と計算で同じ傾向を示したが、越波流量では逆となった。今後は、さらに実験を行って傾斜堤断面変化のデータを蓄積し、より詳細に断面形状のモデル化を行うとともに、モデル断面を用いた実験および数値計算により、断面変形と性能評価指標との定量的な関係について検討する予定である。

## 参考文献

- [1] 太田隆夫, 松見吉晴, 木村 晃: 傾斜堤体の被災変形に伴う消波性能変化について, 土木学会海岸工学論文集, 第53巻, pp. 711-715, 2006.
- [2] 太田隆夫, 松見吉晴, 木村 晃: 断面変形を伴う傾斜堤の越波量からみた性能評価, 土木学会海岸工学論文集, 第54巻, pp. 746-750, 2007.
- [3] Kobayashi, N and F.J. de los Santos: Irregular wave seepage and overtopping of permeable slopes, J. Waterw., Port, Coastal, Ocean Eng., Vol. 133, No. 4, pp. 245-254, 2007.

(受理 平成20年10月30日)