

1. はじめに

現在、海岸・港湾分野において、海岸構造物に必要とされる機能に対して、消波性能等を総合的に照査する性能設計法の導入が進められている。この設計法では構造物の被災に伴う形状変化がもたらす各性能劣化の程度と、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よる形状変化に伴う、各性能の変化特性を明らかにする必要がある。これまでも、消波護岸や傾斜堤を対象として、断面形状と反射率や越波量などの変化について主に実験により検討が行われ(鹿島ら, 1992, 1993; 太田ら, 2006, 2007), 断面変形と性能変化の関係が定性的に把握されているが、両者の定量的評価までには至っていない。本研究では定量的評価のための第一段階として、捨石で構築される傾斜護岸を対象に、水理模型実験より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試みる。つぎに、性能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、モデル断面と数値計算モデルを用いてこれらを求めて、傾斜護岸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

傾斜護岸における実験装置の概要を図-1に示す。不規則波造波水槽(長さ 29m, 幅 0.5m, 高さ 0.75m)に、コア部と被覆層からなる前法面勾配 1:1.5, 天端高 15cm, 天端幅 10cm の傾斜護岸模型を設置した。被覆層には、密度 $\rho = 2.58 \text{g/cm}^3$, 質量の中央値 $M_{50} = 41.4 \text{g}$, 代表粒径 $D_{n50} = \sqrt[3]{M_{50} / \rho} = 2.52 \text{cm}$ の砕石を、コア部には粒径が 4.76~9.52mm の砂利を使用した。砕石と砂利の空隙率は、ともに約 0.4 である。作用させた不規則波は、JONSWAP スペクトル(ピーク形状パラメータ $\gamma = 3.3$)を用い、ピーク周期 $T_p = 1.6 \text{s}$ として作成した 20 分間の信号により、入射有義波高 $H_{m0I} \approx 10.5 \text{cm}$ として造波した。20 分間の作用波数は約 744 波である。一様水深部(水深 35cm)に 4 本の波高計(W1~W4), 護岸上に 1 本(W5)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。堤体断面は、20 分毎にレーザー変位センサにより 5 側線で計測し、それらの平均をとって断面形とした。砕石層の浸食が進行し、天端に浸食がおおよぶ程度となるまで、同じ造波信号による波を繰り返し作用させた。実験は 4 回(Test1~4)行い、波の合計作用時間は、Test1: 2 時間 40 分, Test2: 4 時間, Test3: 2 時間 40 分, Test4: 4 時間である。Test2 と Test4 では断面変形の進行が遅かったため、3 時間以降の入射有義波高を $H_{m0I} \approx 10.9 \text{cm}$ とした。

3. 実験結果と断面形状のモデル化

図-2は護岸模型の断面変化の様子を表したものである。図の横軸は波高計 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。波の作用時間の増加とともに、 $z = -0.1 \text{m}$ のあたりから天端までの部分が浸食され、転落した石が前法面下部に堆積し、緩い(逆)S字型の断面となっているこ

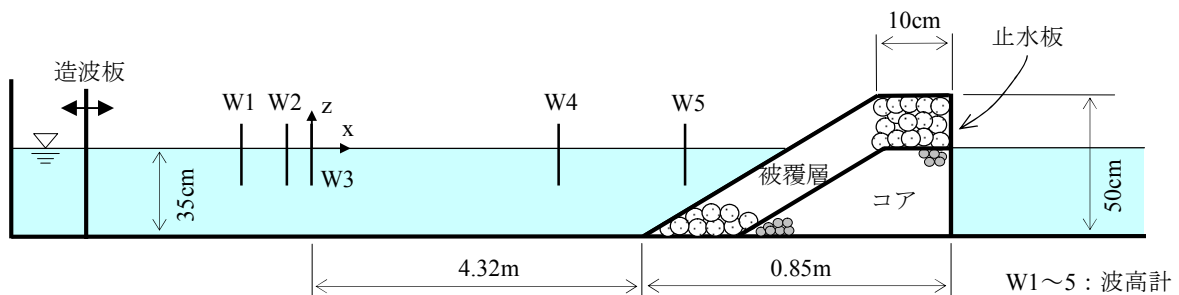


図-1 実験装置および数値計算の座標系

とがわかる．図－3，4は浸食の程度を表すパラメータ S ($=A_e/D_{n50}^2$ ， A_e ：浸食面積)，反射率 K_R と累積作用波数 N との関係を示したものである． S は N の増加につれて増大し， K_R は0.05～0.08程度の減少が見られた．しかし，同一条件の実験でも S の変化は異なり，また，仮に S の値が同じであるとしても断面形は当然違ったものになる． S の値に対して標準（平均）的な断面形を与えることができれば，変形量と性能変化との関係の量的把握に役立つと考え，以下のようにして断面形のモデル化を試みた．

まず，実験の各回（Test1～4）で得られた断面形データを重ね合わせたところ，浸食部と堆積部の間にある断面が変化しない点は，変形度合い（ S ）の大小によらず，実験の各回でほぼ一定であることがわかった．ここではこの点を中心と表記する．本研究では，この中心と護岸法先および浸食部上端（以後，上端と表記）の3点を基準点とし，法先と中心の間（堆積部），中心と上端の間（浸食部）の各形状を，sin曲線で近似することとした．実験での各断面形において，法先の x 座標と，初期断面との交点として中心と上端の x ， z 座標を読み取った．ただし，上端については，初期断面との交点が見出せない場合に，断面形状で法肩と判断される点をとった．モデル初期断面を図－1に示した形状とし，中心については，読み取った x 座標の平均値と，モデル初期断面上でその値に対応する z 座標により位置を決めたところ，(4.72, -0.083)を得た．上端の座標(x_u, z_u)については，モデル断面で考えた場合，浸食が天端まで及んだ後では $z_u=0.15\text{m}$ で一定となるはずである．初期断面モデルでは $x=5.07\text{m}$ の位置に法肩があるが，実験断面では碎石の粒径を考慮して， $x_u \leq 5.09\text{m}$ であるデータを用いたところ，図－5，6に示す結果が得られた．図中には，最小2乗法による回帰直線と回帰式も示した．ただし，初期断面での実験断面とモデル断面との相違（模型作成時の誤差）と，断面計測の誤差により，図－5，6の回帰式で与えられる(x_u, z_u)が，モデル初期断面上にあるとは限らない．本研究では， x_u のみを回帰式で与え，モデル初期断面上でそれに対応する z 座標を求めて，上端の位置を決定した．法先の x 座標についても S との関係式が得られたが，堆積部形状のsin曲線での近似を簡単にするために，法先をモデル初期断面での位置に固定した．

これらの結果より，基準点（法先，中心，上端）の位置を与えられたことから，法先と中心，中心と上端を，各2点間距離を半波長とするsin曲線で結び，モデル断面とした．sin曲線の振幅については， S の値に対応する浸食面積と，sin曲線とモデル初期断面で囲まれる部分の面積が等しくなるように与えた．図－7にモデル断面を，図－8には $S=14$ に対するモデル断面と，実験で得られた断面データのうち S の値が同程度であるものを示した．浸食部のモデル断面に関しては，実験での断面形をよく近似していることがわかる．堆積部については，この部分の中央付近でも実験断面との若干の相違が見られるが，これは被覆層の碎石が法面上部から転落して下部に堆積するとき，碎石の転がり方にばらつきが出るためと推測される．また，モデル断面では法先を固定しているため，法先付近で実験断面との相違があるが，水深が大きい位置であるため，波に及ぼす影響は小さいと考えられる．

4. 数値モデルと計算結果

本研究では，Kobayashi and de los Santos (2007) による，時間平均型波浪変形モデルと打ち上げ高・越波流量算定のための確率モデルを組み合わせた数値モデルを用いた．波浪変形モデルは，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からなり，水位および堤体内外の流速変動の平均値と標準偏差，エネルギーフラックスおよびエネルギー逸散率を求められる．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，経験式により平均越波流量を算定する．この数値モデルとモデル断面を用いて， S の値を0（初期断面）から14の間で7個設定して計算を行った． $x=0$ における入力条件として，rms波高 $H_{rms}=8\text{cm}$ ，平均水位 $\bar{\eta}=0\text{cm}$ ， $T_p=1.6\text{s}$ を用いた．また，仮想遡上計の位置は，前法面からの鉛直距離が1.5cmのところとした．図－9に計算結果のうち，反射率 K_R ，平均越波流量 q_o ，1/3最大打ち上げ高 $R_{1/3}$ を示す．

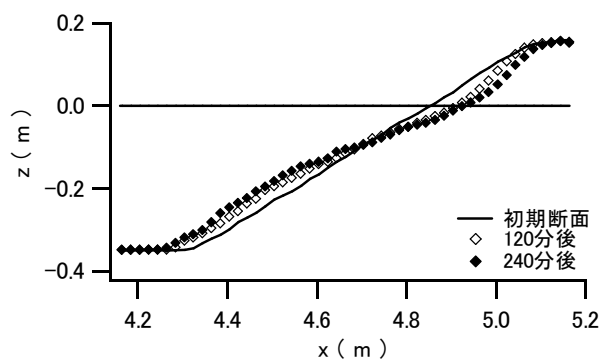


図-2 断面変化(Test2)

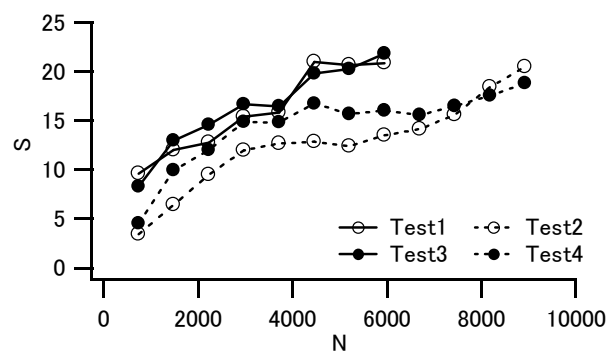


図-3 変形量パラメータの変化

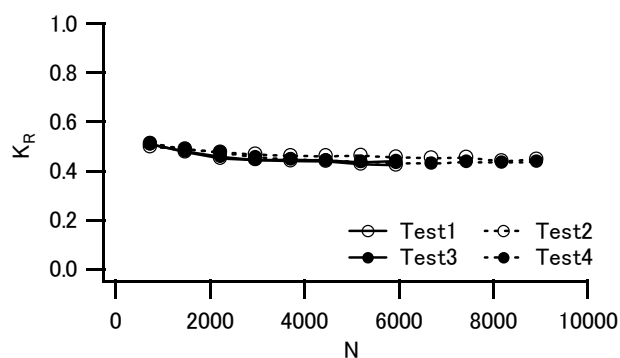


図-4 反射率の変化

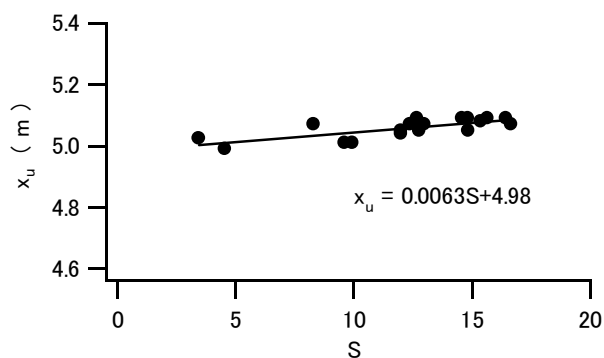


図-5 浸食部上端の x 座標

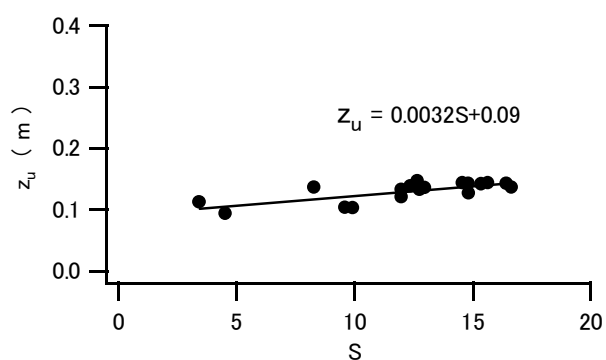


図-6 浸食部上端の z 座標

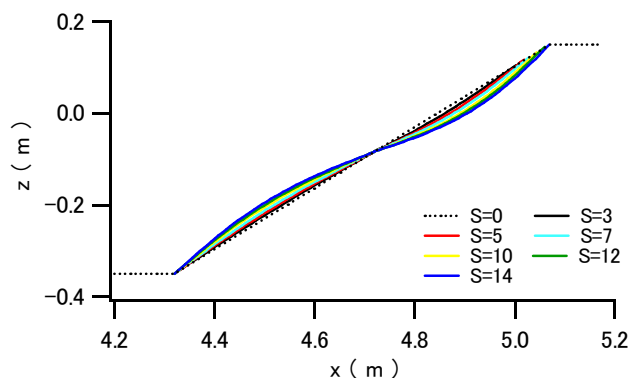


図-7 モデル断面

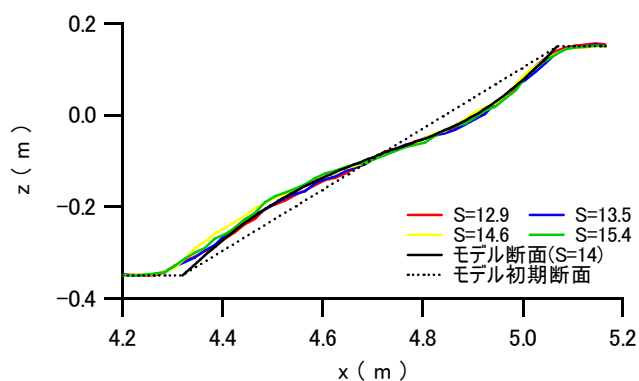


図-8 モデル断面と実験断面の比較(S=14)

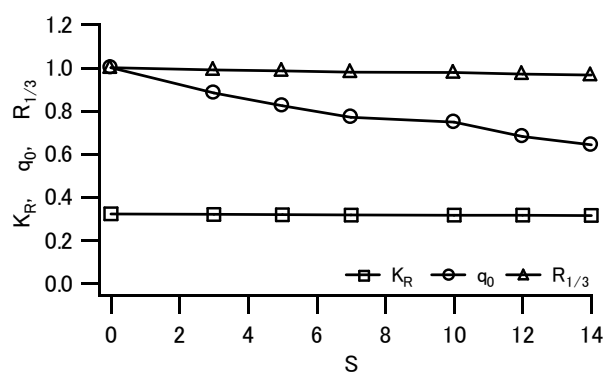


図-9 K_R , q_0 , $R_{1/3}$ の変化(計算値)

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、この数値モデルでは、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 K_R を求めている。 S の増加につれて q_0 は減少、 K_R と $R_{1/3}$ はほぼ一定（わずかに減少）となっていることがわかる。 K_R に関しては図-4の結果と、 $R_{1/3}$ でも過去の実験結果（太田ら、2006）と同じ傾向が見られるが、減少量は小さい。 q_0 については、過去の実験（太田ら、2006, 2007）では、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、結果的に越波量は増加していくことが報告されている。このことを踏まえると、 q_0 については実験値と計算値が逆の傾向を示しているといえる。

5. まとめ

本研究では、傾斜護岸の変形と性能変化との定量的な関係を把握することを目的として、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。断面が変化しない点と浸食部の上端の位置を、実験データにもとづいて与え、浸食部分と堆積部分のそれぞれの形状を $\sin$ 曲線で近似することにより、変形量パラメータ S の値に対して一義的に断面形を求めることができることがわかった。また、実験断面とのよい一致が見られた。今後は、さらに堤体の斜面勾配等の条件を変えた実験を行って断面変化のデータを蓄積し、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評価について検討する予定である。

【参考文献】

- 太田隆夫・松見吉晴・木村 晃（2006）：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，pp711-715.
- 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，土木学会海岸工学論文集，第 54 巻，pp746-750.
- 鹿島遼一，榊山 勉，松山昌史，関本恒浩，京谷 修（1992）：安定限界を越える波浪に対する消波工の変形と防波機能の変化について，土木学会海岸工学論文集，第 39 巻，pp. 671-675.
- 鹿島遼一，榊山 勉，松山昌史，関本恒浩，京谷 修（1993）：安定限界を越える不規則波に対する人工島防波護岸の耐波安定性と越波特性，土木学会海岸工学論文集，第 40 巻，pp. 686-690.
- Kobayashi, N. and F.J. de los Santos (2007): Irregular wave seepage and overtopping of permeable slopes, J. Waterw., Port, Coastal, Ocean Eng., 133(4), pp.245-254.