傾斜護岸の断面変形のモデル化と性能評価

Modeling for Profile Change of Rubble Mound Seawall and Performance Evaluation

太田隆夫¹·松見吉晴²·時岡明範³·木村 晃⁴

Takao OTA, Yoshiharu MATSUMI, Akinori TOKIOKA and Akira KIMURA

This study deals with modeling for profile change of rubble mound seawall based on the experimental results. The model profiles are given by composite sine curve corresponding to the degree of deformation of the structure. The model profiles agree well with the measured profiles. The model profiles are also used in the experiments and numerical model to evaluate the change of the wave dissipation performance. The reflection coefficient and overtopping rate are used as the indices of the performance. The measured reflection coefficient decreases but the overtopping rate increases with damage progression of the seawall. The computed reflection coefficient is almost constant and the overtopping rate shows opposite tendency from the experimental result.

1. はじめに

現在、海岸・港湾構造物に対して性能設計法の導入が 進められている.この設計法では、構造物に対して要求 される種々の性能を満たすように設計することが必要と されるが、さらに供用期間中にわたる性能の保持につい ても検討することが求められている. 海岸・港湾構造物 は、一般に厳しい自然環境下にあり、供用期間中に性能 劣化を生じる可能性が高く、維持管理がより重要である と考えられる.構造物の維持管理にあたっては,一つに は、構造物の被災に伴う形状変化がもたらす性能劣化 (変化)の度合いを、量的に評価することが必要となる. これまでにも、たとえば消波護岸や傾斜堤を対象として、 波の作用による断面変形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、 1993a,太田ら,2006,2007),変形量と性能変化の関係 が定性的に把握されている.しかし、断面変化が実験ご とに異なることもあって,両者の定量的評価までには至 っていない.太田ら(2009)は、変形量に対応したモデ ル断面が決められれば、その断面形状を用いた実験や数 値計算を行うことができ、変形と性能変化の量的な関係 の把握に寄与すると考え、傾斜堤および傾斜護岸を対象 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試みた.本研究では、異な るのり面勾配の傾斜護岸についても同様のモデル化を行 い、得られたモデル断面を用いた模型実験と数値計算に より反射率と越波流量を求め、これらを性能評価指標と して、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. 断面変化計測の実験

本研究で用いる傾斜護岸の断面変形データは,著者ら がこれまでに行った実験(太田ら,2009)と,新たに実 施した実験により得られたものである.以下に実験の概 要を記す.

不規則波造波水槽(長さ29m,幅0.5m,高さ0.75m)



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) (株)金星

⁴ 正会員 工博 鳥取大学名誉教授

に、被覆層およびコア部からなる護岸模型を設置した. 初期断面におけるのり面勾配は1:1.5 (実験1) および1:2 (実験2),静水面からの天端高0.15m,天端幅0.1mであ る.実験装置の概要を図-1に示す.()内の数値は、実 験2に対するものである.被覆層に使用した砕石は、密 度2.58g/cm³,代表粒径 (D_{n50}) 2.52cmで、すべての砕石 の質量は、35~50gの間にある.コア部には、目開き 9.50mmのふるいを通り4.76mmのものに残る砂利を用い た.砕石と砂利の空隙率は、ともに約0.4である.

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 $\gamma_{e}=3.3$,有義波周期 $T_{1/3}=1.6s$)を用い,20分間の信号を作成した.この信号データをもとに,有義波高 $H_{1/3} \approx 10.5$ cm (実験1),10.0 cm (実験2)の不規則波を造波した.

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、5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.

波高計(5本)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.造波開始から20秒後に水位 計測をスタートさせて、1150秒間のデータを記録した.

実験では、断面変形が法面上部に達するまで、同じ造 波信号による波を繰り返し作用させ、これを4回ずつ行 った.

3.実験結果と断面形状のモデル化

図-2に実験2での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,緩い (逆) S字形の断面となっている.

図-3,4は、実験1での変形量パラメータ*S*、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. 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おり、その変化量は実験1で0.06から0.09程度、実験2で0.03から0.06程度である.

図-3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ことが 指摘されている(太田ら、2009).また、鹿島ら(1993b) が述べているように同程度のSに対して同じような変形 形状を示すが、局所的な凹凸まで全く同一の断面形にな ることはなく、結果的に越波量もばらつくことが考えら れる.したがって、断面の変形量と、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の値に対応して平均(標準)的な断面形状を 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行った.

まず,実験1と2の各4回分のデータから得られた断面 形を,それぞれ重ね合わせたところ,図-2にも示されて いるように,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.以下ではこの点を中心と 表記する.この中心と堤体のり先および侵食部上端(以 下,上端と表記)の3点を基準点とした.断面形のモデ ル化には,基準点の位置を与えるとともに,それらの点 を結ぶ曲線を決めることが必要であり,本研究では,侵 食部と堆積部のそれぞれの形状を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,のり先の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,断面形状でのり肩と判断される点をとった.



モデル初期断面を、図-1に示したような形状とし、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定した. 実験1での中心の座標は(4.72, -0.083),実験2では (5.75, -0.105)となった.

つぎに、上端のx座標xuについては、図-5,6に示すよ うなSとの関係が得られた。図中には最小2乗法による 回帰直線と回帰式も示してある。ただし、図-5(実験1) では、侵食が天端に及んでいる(xu>5.09mである)デー タを省いている。上端のz座標zuについても、xuと同様に Sとの関係が得られたが、ここではxuのみを回帰式によ り与え、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。これは、初期断面におけ る実験断面とモデル断面との相違(模型作成時の誤差) と、断面計測の誤差が含まれているためである。実験1 では、のり先のx座標についてもSとの関係が得られたが、 堆積部形状のsin曲線による近似を簡単にするために、の り先をモデル初期断面での位置に固定した。

以上の結果より,基準点であるのり先・中心・上端の 位置を決めることができたことから,のり先と中心,中心 と上端を,それぞれの2点間距離を半波長とするsin曲線 で結び,モデル断面を作成した.sin曲線の振幅は,モデ ル初期断面とsin曲線で囲まれる面積と,Sの値に対応する 侵食面積A_eが等しくなるように与えた.D_{n50}=0.0252mを 用いると,sin曲線の振幅aは



と表される.ここに, L:波長=2点間距離の2倍である. のり面勾配1:2の護岸におけるS=5,10,16のモデル断面 (S=0は初期断面)を図-7に示す.図-8には勾配1:1.5での S=14のモデル断面と,実験1で得られた断面データのう ちSの値が同程度のもの,図-9には勾配1:2でのS=16のモ デル断面と,実験2で得られた断面データの比較を示す が,両者の対応は良好である.モデル断面ののり先を固 定したことにより,図-8(勾配1:1.5,実験1)では,そ の付近で実験断面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と考えられる.

4. モデル断面を用いた実験および計算の結果

3.でモデル化した断面を用い,反射率と越波流量を指 標として,実験と数値計算による性能評価に関する検討 を行った.

まず,実験においては、1:1.5斜面ではS=0, 7, 10, 14,1:2斜面ではS=0, 5, 10, 16に対応するモデル断面の模型を 設置した.実験装置の概要は図-1と同様である.模型の 断面形については、レーザー変位センサで計測して所期 の形状となっていることを確認した.また,波の作用に よって砕石が移動しないように、模型の前のり面と天端 を金網で覆った.反射率の測定では、JONSWAPスペク トル($\chi=3.3$)を用いて、 $T_{1/3}=1.2, 1.3, 1.4, 1.6, 1.8, 2.0s$ と した各10分間の信号により、 $H_{1/3} = 8$ cmの不規則波を作 用させた.越波量計測では、2.に記した実験2で用いた 不規則波(20分間)を作用させ、止水板背後に集水枡 (幅37.5cm)を設置して越波量を測定した.

数値計算では, Kobayashi · de los Santos (2007) 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、堤体前のり面上に仮想的に遡 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.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 反射されるものと便宜的に仮定してK_Rを求めている.数 値モデルの詳細については、太田ら(2006, 2007)を参 照されたい.

この数値モデルとモデル断面を用い、勾配1:1.5では*S* の値を0(初期断面)から14の間で7個、1:2では*S*=0~ 16で8個設定して計算を行った.*x*=0における入力条件 として、実験で得られた水位変動の標準偏差 σ_η からrms 波高を $H_{rms} = \sqrt{8} \sigma_\eta$ で、ピーク周期を γ_c =3.3のJONSWAP スペクトルに対応する T_p =1.07 $T_{1/3}$ の関係式で与え、平均 水位を $\bar{\eta}$ =0cmとした.また、仮想遡上計の位置は、前の り面からの鉛直距離が1.5cmのところとした.

図-10, 11に、モデル断面を用いた実験結果のうち、反 射率 K_R とSとの関係を示す。勾配1:1.5では、Sの増加に つれてすべての周期で K_R が減少し、S=0と14での変化量 は約0.06~0.11であった。1:2では、 $T_{1/3}$ =1.6~2.0sで減 少傾向が見られ、S=0と16での変化量は約0.05~0.08で あったが、 $T_{1/3}$ =1.4sでほぼ横ばい、 $T_{1/3}$ =1.2, 1.3sでは約 0.01~0.02の増加を示した。

図-12,13は、K_Rと越波流量q_oの、実験結果とモデル断面を用いた数値計算の結果を比較したものである.ただ



し、 $K_R ki T_{1/3}=1.6s$ の波に対するもの、 $q_o ks=0$ の値で除 したものである. K_R については、実験値では上述のよう に減少傾向を示し、1:1.5のs=0と14では約0.11の差、勾 配1:2のs=0と16では約0.05の差となったのに対し、計 算結果ではほぼ一定となっている. q_o の実験値は、1:2の s=5で減少しているものの、全体的にはsが大きくなるに つれ増加しており、1:1.5のs=14で約1.9、1:2のs=16で約 1.8となっている.一方、計算値は、1:1.5では単調減少 でs=0と14での変化量は約35%、1:2ではs=5まで増加し ているが、その後は減少してs=0と16での変化量は約 23%で、実験結果とは逆の傾向を示している.実験にお いては、大きな波による越流に加えて、断面変形の進行 に伴って飛沫状の越波が発生するようになるが、数値計 算でこの現象に対応できていないことが異なる傾向の原 因の一つと考えられる.

5.おわりに

本研究では,海岸・港湾構造物の維持管理で必要とな る,構造物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, 傾斜護岸を対象に, 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侵食部の上端の位置 を,実験データにもとづいて与え,侵食部と堆積部のそ れぞれの形状を sin 曲線で近似してモデル断面を作成し た. モデル断面と実験データとの対応は良好であった. さらに,反射率および越波流量を性能評価指標として, モデル断面を用いた実験と数値計算によりこれらを求 め, 消波性能の変化を検討した. 実験結果においては, 勾配1:1.5ではいずれの周期でも断面変形量の増加につれ て反射率は減少したが、1:2では周期の短い波でわずかな 増加傾向が見られた.反射率の計算値は、変形量の増加 に対しほとんど変化がなかった. 越波流量については, 実験では2倍弱までの増加を示したのに対し、計算結果 では逆に減少となった.

今後,さらに護岸天端高,波浪条件および砕石の質量 等の条件を変えた実験により断面変化のデータを蓄積し て,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.

謝辞:実験においては、今村克也君(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 (2006):傾斜堤体の被災変形 に伴う消波性能変化について,海岸工学論文集,第53巻, pp.711-715.
- 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,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.
- 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,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 (1993a):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,海岸工学論文集,第40巻, pp.686-690.
- 鹿島遼一,榊山 勉,清水琢三,関本恒浩,国栖広志,京谷 修(1993b):不規則波に対する消波ブロック被覆工の変 形量評価式について,海岸工学論文集,第40巻,pp.795-799.
- Kobayashi, N and F.J. de los Santos (2007) : Irregular wave seepage and overtopping of permeable slopes, J. Waterw., Port, Coastal, Ocean Eng., Vol. 133, No. 4, pp. 245-254.