

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。被覆層に使用した碎石は、密度 2.58g/cm^3 、代表粒径 (D_{n50}) 2.52cmで、すべての碎石の質量は、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。碎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 $\gamma_c=3.3$ 、有義波周期 $T_{1/3}=1.6\text{s}$) 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 $H_{1/3} \approx 10.5\text{cm}$ (実験1)、 10.0cm (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

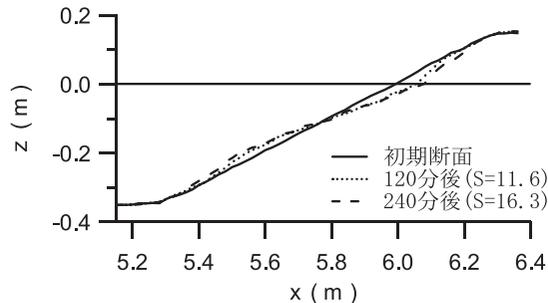


図-2 堤体断面の変化 (実験2)

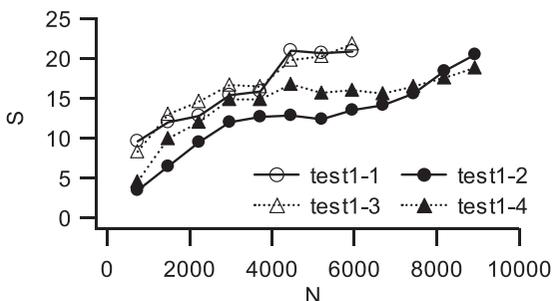


図-3 変形量パラメータの変化 (実験1)

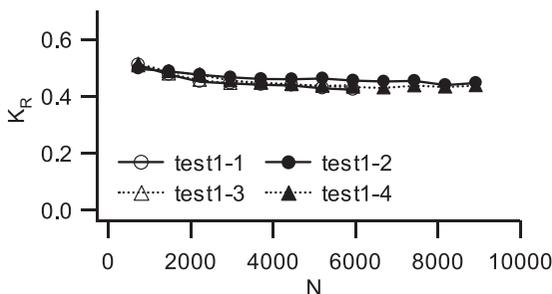


図-4 反射率の変化 (実験1)

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て作用させ、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を考え、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。

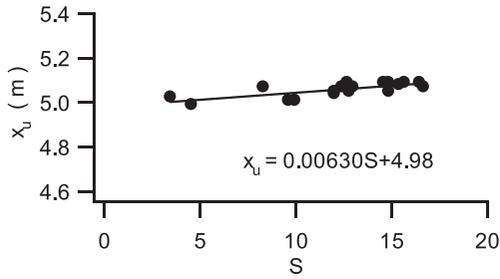


図-5 上端のx座標 (実験1)

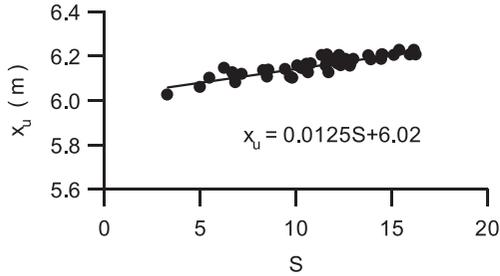


図-6 上端のx座標 (実験2)

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 x_u 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($x_u > 5.09\text{m}$ である)データを省いている。上端のz座標 z_u についても、 x_u と同様にSとの関係が得られたが、ここでは x_u 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_c が等しくなるように与えた。 $D_{n50} = 0.0252\text{m}$ を用いると、sin曲線の振幅aは

$$a = \frac{6.35 \times 10^{-4} \pi S}{L} \dots\dots\dots(1)$$

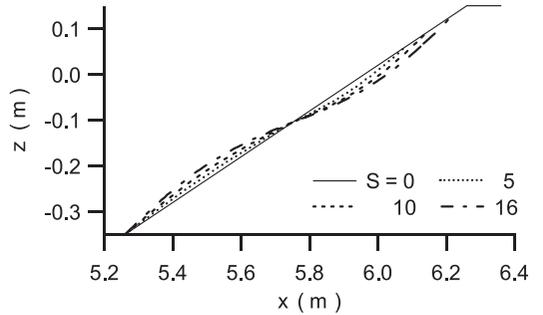


図-7 モデル断面 (勾配1:2)

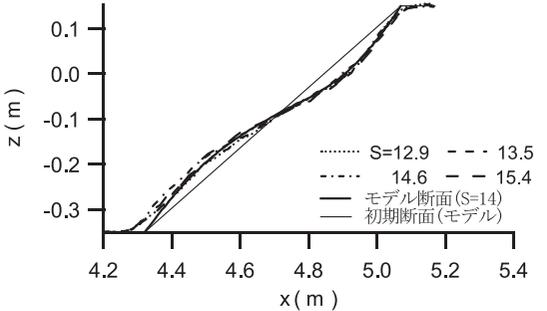


図-8 実験データとモデル断面の比較 (勾配1:1.5)

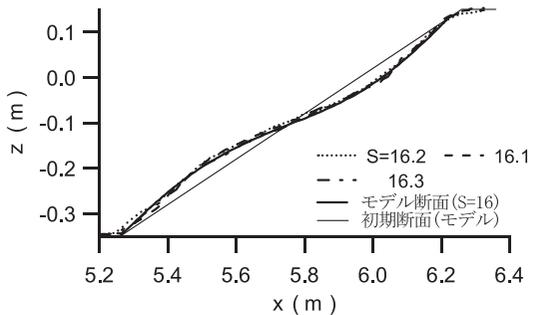


図-9 実験データとモデル断面の比較 (勾配1:2)

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、波の作用によって碎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($\gamma_c=3.3$)を用いて、 $T_{1/3}=1.2, 1.3, 1.4, 1.6, 1.8, 2.0$ sとした各10分間の信号により、 $H_{1/3} \approx 8$ 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 $S=0 \sim 16$ 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 $\gamma_c=3.3$ のJONSWAPスペクトルに対応する $T_p=1.07T_{1/3}$ の関係式で与え、平均水位を $\bar{\eta}=0$ cm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、 $T_{1/3}=1.6 \sim 2.0$ s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、 $T_{1/3}=1.4$ sでほぼ横ばい、 $T_{1/3}=1.2, 1.3$ s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

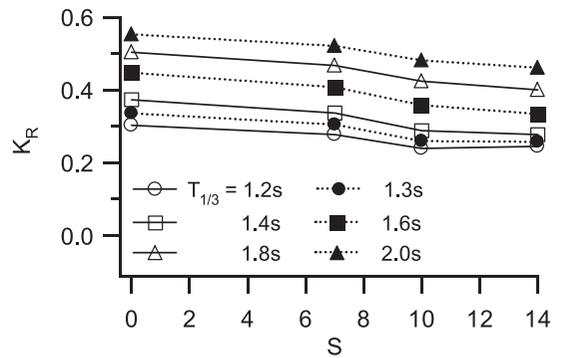


図-10 反射率の変化(実験値, 勾配1:1.5)

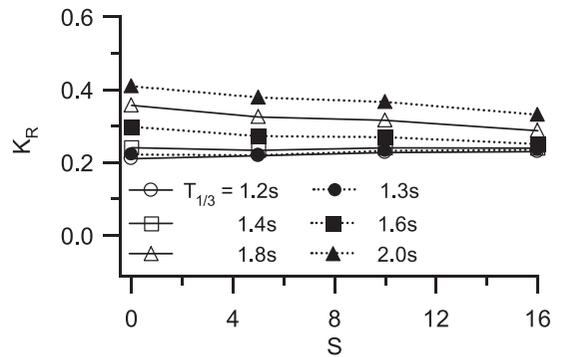


図-11 反射率の変化(実験値, 勾配1:2)

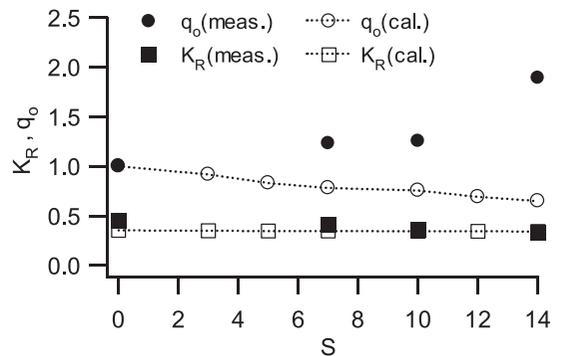


図-12 反射率, 越波流量の比較(勾配1:1.5)

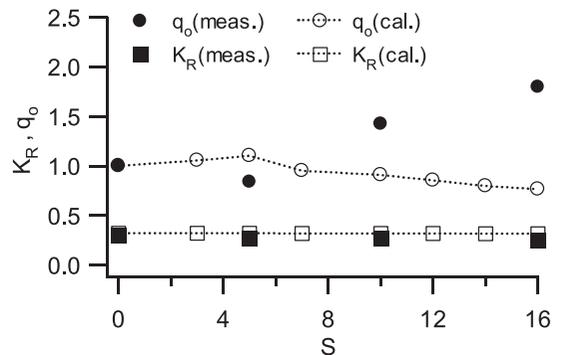


図-13 反射率, 越波流量の比較(勾配1:2)

し、 K_R は $T_{1/3}=1.6s$ の波に対するもの、 q_0 は $S=0$ 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_0 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、波浪条件および碎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.