

礫浜上の波の変形に関する研究

出口 一郎*・小野 正 順**・森 脇 清***

1. ま え が き

最近、環境にやさしい護岸として人工礫浜海岸（透水性を持つ緩傾斜護岸）が施工されている。その理由は、透水性を持つ緩傾斜護岸が、反射率低減化、水質浄化、新しい生態系の形成といった機能を持ちさらに、親水性施設としての機能を有しているからである。このような人工礫浜の建設はこれからも増加する可能性は高い。

一方、透水層内の非線形・非定常流体運動を考慮してその上の波動を解析する方法はすでに提案されている（例えば出口他，1988）。しかし、粒径の大きな底質で構成された礫浜海浜上の波変形あるいは海浜自体の変形については不明な点が多く、特に斜面上で砕波が生ずるような浅海域においては砕波条件もまだ明らかにされていない。斜面からの反射あるいは遡上については、いくつかの研究が行われている。（たとえば Losada & Cruto (1981), Kobayashi & Wurjanto (1990)）。

本研究の目的は、礫浜海岸（透水性緩傾斜護岸）の水理機能（波変形、反射率、遡上特性）について実験的検討を加え、それらに及ぼす底質粒径（透水性）の影響を明らかにし、そのモデル化を行うことによって波変形、遡上高さ等についての予測手法を提案することである。

2. 礫浜海浜上での波変形と遡上、反射に関する実験

(1) 実験方法と諸元

傾斜海底を構成する底質粒径が変化することによって透水性も変化することに着目し、2次元実験によって異なる透水特性（非定常透水係数、乱流抵抗係数および質量係数）をもつ2種類の底質（平均粒径 $D_m = 1.76 \text{ cm}$ 及び 3.21 cm の採石）で構成された礫浜上及び、同じ勾配をもつ不透過斜面上の浅水砕波変形に関する実験を行い、波高減衰率、砕波条件、遡上特性、平均水位変動量および海浜からの反射率に及ぼす底質粒径の影響を明らかにした。不透過斜面は防水合板で作成した。

斜面勾配 $\tan \beta$ は $1/5$ 及び $1/10$ の2種類で、水槽内の不透過水平床（Case-A）及び勾配 $1/20$ の不透過固定床上（Case-B）に作成した。斜面の法先水深は $25 \sim 30 \text{ cm}$ である。実験波は周期 $T = 0.6 \sim 2.0 \text{ s}$ の間の規則波及び4種類の2成分波（ $T_1 = 1.0 \text{ s}$, $T_2 = 1.05 \sim 1.5 \text{ s}$ の間の4種類）である。実験における測定項目は、11本の容量式波高計による水位変動と遡上域のビデオ撮影（Case-B）で、測定された水位変動から波高、平均水位、斜面からの反射率等を計算した。実験装置の概略を図-1に示す。

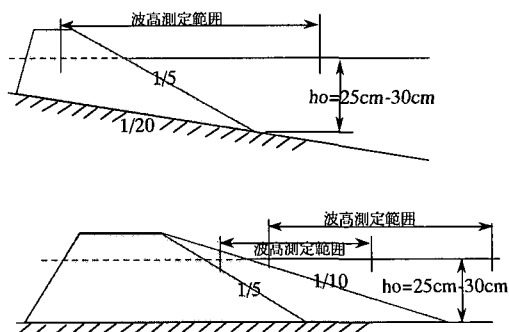


図-1 実験装置の概略

(2) 礫浜上で測定された波高変化・平均水位変動

図-2は、Case-Bの実験で測定された波高 H 及び平均水位変動 η の例（ $T = 1.0 \text{ s}$ ）を示したものである。図の横軸は斜面上の静水汀線から沖側に測った距離で、透水斜面上では、静水汀線より岸側（ $x < 0$ の領域）の3点においても水位変動の計測を行っている。

図より、不透過斜面上での波高が最も大きく、透水斜面上では、碎石の粒径に関わらず波高の減少が生じている。このような透水層上での波高減衰は特に砕波波高に顕著に現れている。初期汀線付近の平均水位上昇量も不透過斜面上で大きく、透水斜面上では小さくなる。このような傾向は全ての実験ケースにおいて認められた。

さらに、透水斜面内にも水位変動は伝播し、層内でも平均水位上昇が生じていることがわかる。不透過斜面上

* 正 会 員 工 博 大阪大学助教授 工学部土木工学科

** 正 会 員 工 博 大阪大学助手 工学部土木工学科

*** 学生会員 大阪大学大学院 工学部土木工学科

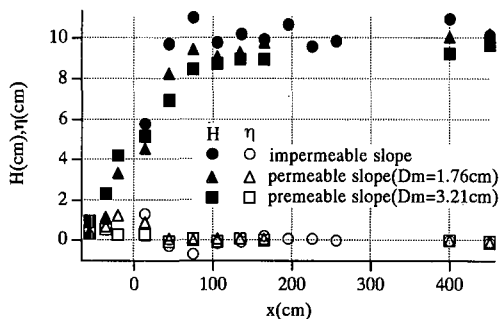


図-2 礫浜上の波高・平均水位変動 (Case-A)

では、このような斜面内への流体運動の伝播は生じず、そのエネルギーは斜面上への遡上運動、あるいは斜面からの反射波に変換される。その結果、後述するように不透過斜面上では遡上高さあるいは反射率が增大する。

(3) 斜面上への遡上及び斜面からの反射に及ぼす透水性の影響

図-3はCase-Bの実験においてビデオ解析によって得られた無次元遡上高さ R/H_0 とイリパレン数 $I_r = \tan \beta / (H_0/L_0)^{1/2}$ の関係を示したものである。ここに H_0 は入射波の換算沖波波高である。図中の実線は、滑面の不透過斜面上への遡上高さの目安として

$$R/H_0 = I_r \dots \dots \dots (1)$$

を示したものであり、破線は Losada & Cruto (1981) が既往の捨石斜面上への遡上高さに関する実験結果に基づいて導いた無次元遡上高さに関する経験式

$$R/H_0 = 1.3898 \{1 - \exp(-0.5984 I_r)\} \dots \dots \dots (2)$$

を示したものである。なお、Losada & Cruto の解析には、捨石の相対的な大きさ、あるいは透水性については考慮されていない。

また、実験結果は、不透過斜面及び $D_m = 1.76$ cm の碎石で作成した透過斜面上の結果のみを示してあるが、 $D_m = 3.21$ cm の碎石で作成した斜面上では、明確な遡上が確認されず、平均水位付近で図-2に示した波高に対応する水位変動程度の変動しか生じなかったので図示していない。

$D_m = 1.76$ cm の碎石で構成された透過斜面上で実測された遡上高さは、平均的に見て不透過斜面上で測定された遡上高さの $1/2 \sim 1/3$ に減少する。この場合の碎石の相対的な大きさ D_m/H_0 は、 $0.13 \sim 0.32$ の範囲である。

一方、先に述べたように、 $D_m = 3.21$ cm の碎石で作成した斜面上での無次元遡上高さは、 $D_m/H_0 = 0.29 \sim 0.62$ の範囲で高々 $R/H_0 = 0.1$ 程度にしかならず、不透過斜面に比べて激減する。

図-4は、勾配 $1/5$ の斜面上の全てのケースで測定された反射率と入射波の波形勾配の関係を示したものである。

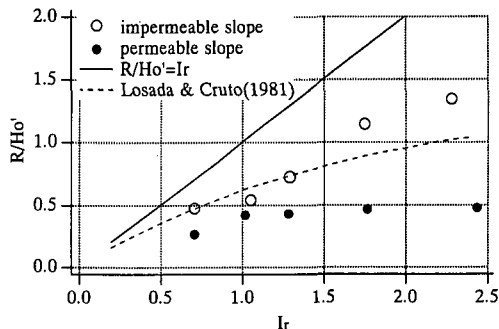


図-3 遡上高さに及ぼす透水性の影響 (Case-A)

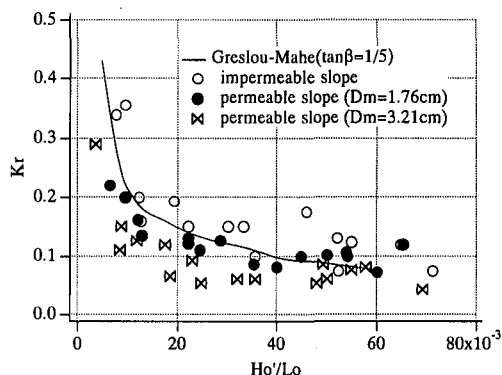


図-4 反射率に及ぼす透水性の影響

図中には勾配 $1/5$ の不透過斜面からの反射率に関する Greslou-Mahe (1954) の関係式も実線で示してある。本実験で測定された不透過斜面からの反射率は、入射波の波形勾配の増大に伴って減少し、その値は Greslou-Mahe の結果とほぼ一致する。

一方、透水斜面からの反射率は、不透過斜面からの反射と同様、波形勾配の増加に伴って減少し、さらに、斜面を構成する碎石の粒径が大きくなると（透水性が増加すると）反射率も減少する。

一方、斜面上で2成分波を造波させた実験においては、波群に拘束された長周期波が発生し、それが斜面上で反射し、いわゆる leaky mode の反射定常波が形成されることが知られている。著者らは、このような拘束長波の斜面からの反射限界は式(3)で表される Miche の限界式（例えば岩垣・榎木, 1971）で与えられることを確認している（出口他, 1994）。

$$\left(\frac{H_0}{L_0}\right)_c = \sqrt{\frac{\beta}{90}} \frac{\sin^2 \beta}{\pi} \dots \dots \dots (3)$$

本実験で発生させた2成分波によって発生する拘束長波の周期 T_{b0} は、 $T_{b0} = 21$ s ($T_1 = 1.0$ s, $T_2 = 1.05$ s), 11 s ($T_1 = 1.0$ s, $T_2 = 1.1$ s), 6 s ($T_1 = 1.0$ s, $T_2 = 1.2$ s) 及び 3 s ($T_1 = 1.0$ s, $T_2 = 1.5$ s) の4種類で、それらの波

形勾配は全て 0.005 以下である。Miche の限界式によると、本実験で用いた 2 成分波によって発生する拘束長波は、全て完全反射することになる。実験においても不透過斜面上では、その勾配に関わらず 90 % 以上の反射率が測定された。透水斜面上でも 2 成分波を造波した実験で拘束長波の反射率の測定を行った。図-4 に示すように $H_0/L_0 > 0.005$ の領域では透水性の増加に伴って反射率は低減するが、拘束長波の反射率はいずれの場合も全て 90 % 以上の値を示し、不透過斜面上での反射率とほぼ同じ値となった。ただし、拘束長波の波高 H_{b0} に対する透水斜面構成材の粒径の相対的な大きさ D_m/H_{b0} は全て 4 以上である。透水斜面上で長周期波の反射率が大きくなった原因については、この点も含めて今後更に検討を行う必要がある。

3. 礫浜上の波高変化予測モデル

礫浜上の波浪の浅水砕波変形による波高変化及び平均水位変動に対し、砕波、透水層内の流体運動によるエネルギー逸散及び礫浜表面の境界摩擦によるエネルギー逸散を考慮した非線形長波のエネルギー保存則と、波平均量としての運動量保存則に基づく予測方法を構築し、実験結果に基づいてその妥当性の検証を行った。

透水性を持つ任意海底地形上での波動の表現方法についての研究はすでに行われている（例えば間瀬・沖，1994）。ここでは、透水斜面上での波高及び平均水位変動を簡単な方法で推定する事を考え、斜面上の波高に対する浅水係数を式（4）に示す首藤（1974）によって導かれた非線形長波理論に基づく近似式によって計算した。

$$\left. \begin{aligned} gHT^2/h^2 &\leq 30: \text{small amplitude wave theory} \\ 30 &\leq gHT^2/h^2 \leq 50: Hh^{2/3} = \text{const.} \\ 50 &\leq gHT^2/h^2: Hh^{5/2}(\sqrt{gHT^2/h^2} - 2\sqrt{3}) = \text{const.} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (4)$$

透水層内の流体運動に起因するエネルギー逸散については、透水層状の波浪の波高減衰係数 k_i を用いて、次式で評価した。

$$E_p = \frac{\rho g H^2}{4} C_g k_i \dots\dots\dots (5)$$

ここに、 C_g は透水層上水深における群速度、 ρ は水の単位体積重量、 g は重力加速度である。なお、 k_i は透水層上の波動に対する分散関係式

$$\sigma^2 = gk$$

$$\frac{(S/f_e + 1) \sinh kh \cosh kd + (1/f_e) \cosh kh \sinh kd}{(S/f_e + 1) \cosh kh \cosh kd + (1/f_e) \sinh kh \sinh kd} \dots\dots\dots (6)$$

から求められる複素波数 k の虚部で、 h は透水層上水深、 d は透水層厚、 $S = \{(1-\lambda)C_m + 1\}/\lambda$ で、 C_m は付加質

量係数、 λ は透水層の空隙率である。また、 f_e は、式（7）で等価線形透水係数 K_{pe} と関係づけられる等価線形抵抗係数で、水深 h における底部水粒子速度 u 及び透水層構成材料の代表粒径 D_m を用いて式（8）（出口他，1992）によって求めた。

$$1/f_e = K_{pe}\sigma/v \dots\dots\dots (7)$$

$$f_e = 0.1 + 1.8(u/\sigma D_m) \dots\dots\dots (8)$$

透水層表面の境界せん断力によるエネルギー逸散については、Jonsson によって定義された底部せん断力が透水層表面の空隙以外の領域に作用するものとし、以下の式によって推定した。

$$E_{fb} = \frac{2}{3} \pi^2 \frac{\rho f_w H^3}{T^3 \sinh^3 kh} (1-\lambda) \dots\dots\dots (9)$$

ここに、 f_w は Jonsson の摩擦係数、 k は透水層上水深 h における複素波数の実部である。

砕波によるエネルギー逸散については、Sawaragi et al. (1984) によって求められた不透過斜面上での砕波によるエネルギー逸散の推定式、式（10）を準用して求めた。

$$E_b = \alpha \left(5.3 - 3.3 I_r - \frac{0.07}{\tan \beta} \right) \left(\frac{(\rho g H^2/8)^3}{\rho h^3} \right)^{1/2} \dots\dots (10)$$

ただし、 α は 3.0 とし、砕波点は波高水深比が 0.78 となる地点とした。

平均水位変動量の計算は通常の波平均量としての運動量保存則を用いて行ない、ラディエーション応力は微小振幅波理論より求められる値を与えた。

実際の計算は、岸沖方向等間隔（2 cm）に設置した計算点で各種エネルギー逸散を考慮した波高分布と平均水位変動量が定常状態になるまで繰り返して行った。

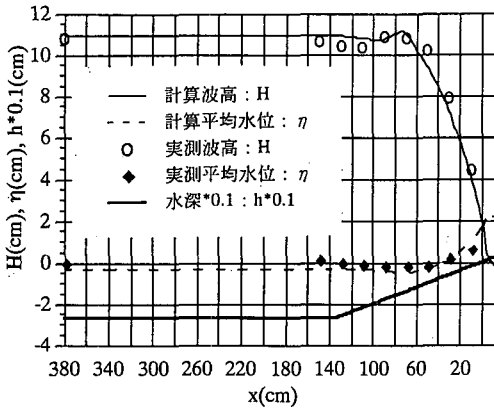
本計算においては、斜面の底質粒径の差異は等価線形抵抗係数と境界粗度の差異としてエネルギー逸散に反映される。

図-5 及び図-6 は、Case-A の実験で $T=1.0$ s の場合についての計算結果と実験結果の比較を示したもので、それぞれ斜面勾配 1/5 及び 1/10 に対応し、図の (a)、(b)、(c) はそれぞれ $D_m=3.21$ cm、1.76 cm の礫浜及び不透過斜面的場合である。

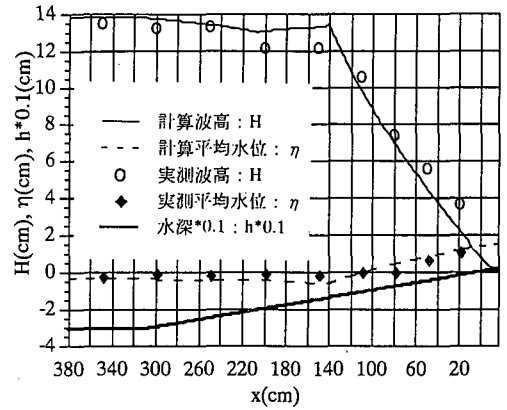
まず、図-5 に示す勾配 1/5 の斜面での波高変化は、不透過斜面上（図 (c)）では実測結果にみられる波高の砕波点近傍での急激な立ち上がり及び礫浜上（図 (a)、(b)）での底質粒径の増大に伴う砕波点付近の波高の平滑化といった様子が計算によってもよく再現されている。しかし、汀線近傍の平均水位については、不透過斜面上での実測結果は、計算結果よりも若干大きい値を示すのに対し、礫浜上での実測値は、計算結果を下回る。この理由は、計算では、ラディエーション応力の勾配で与えられる平均水位変動に対する推進力が、透水層上水深の間

で作用するとしているのに対し、礫浜上では透水層内にもその作用が及ぶからである。その結果、図-2に示すように汀線より陸上側の透水層内でも平均水位変動が生ずる。

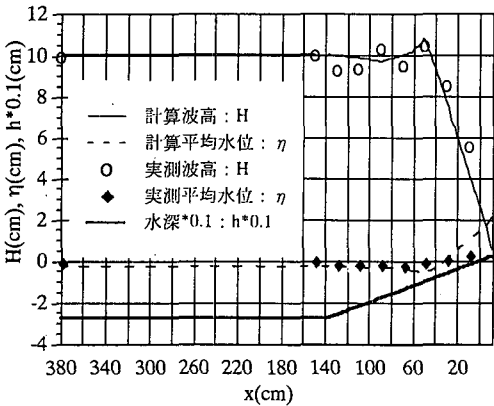
一方、図-6に示す勾配1/10の不透過斜面上で実測された波高変化(図(c))は、明確な砕波点が存在するのに対し、礫浜上(図(a), (b))では透水層部($x < 300$ cm)の領域で既に波高減衰が始まり、砕波点は明確ではな



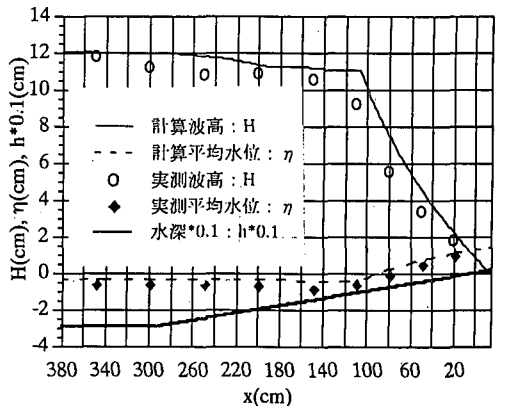
(a) 透過斜面 ($D_m = 3.21$ cm, $T = 1.0$ s)



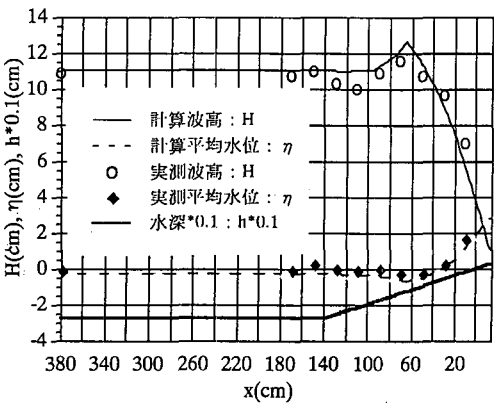
(a) 透過斜面 ($D_m = 3.21$ cm, $T = 1.0$ s)



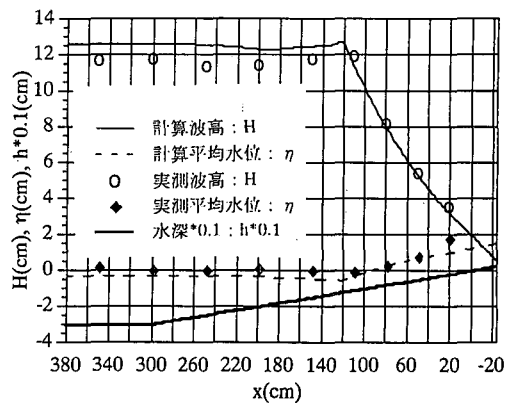
(b) 透過斜面 ($D_m = 1.76$ cm, $T = 1.0$ s)



(b) 透過斜面 ($D_m = 1.76$ cm, $T = 1.0$ s)



(c) 不透過斜面 ($T = 1.0$ s)



(c) 不透過斜面 ($T = 1.0$ s)

図-5 斜面上の波高・平均水位分布 (勾配 1/5)

図-6 斜面上の波高・平均水位分布 (勾配 1/10)

い。このような波高変化の様子は計算結果によってもほぼ再現されている。また、平均水位変動については、勾配 1/5 の斜面上と同様、不透過斜面上での実測値は計算結果より大きい値を示すのに対し、礫浜上では計算結果の方が若干大きい値となる。

本研究で行った他の実験ケースについても波高及び平均水位の計算を行ったが、これらの図に示した結果と同程度の再現性があった。ただし、礫浜上の平均水位変動を精度よく予測するにあたり、透水層上、層内の波動に伴う平均量の保存則について、再検討する必要がある。

4. あとがき

本研究で得られた主要な結論は以下の通りである。

- ・礫浜上では、不透過斜面上に比べて碎波点が岸側に移動し、碎波波高は減少し、初期汀線における平均水位上昇量も減少する。また、遡上高さは、同じ条件の不透過斜面に比べて大幅に激減する。それぞれの減衰率は、斜面の透水性(碎石の粒径が)大きいほど大きい。ただし、実験範囲は $0.13 < D_m/H_0 < 0.62$ の領域である。

- ・透水斜面上での波高変化は、碎波によるエネルギー逸散、透水性及び境界摩擦によるエネルギー逸散を考慮したエネルギー保存式を数値的に解くことによって推定できることが分かった。しかし、透水性が大きい場合、従来の波平均量としての運動量保存則から計算される初期汀線近傍の平均水位変動は、実測された平均水位変動量よりも大きな値となり、このような場合の平均水位変動量の計算手法を、新たに構築する必要がある。

- ・不透過斜面からの反射率は、従来指摘されているよう

に、波形勾配が小さいほど、斜面勾配が急なほど大きい。が、斜面が透水性をもつと、反射率は不透過斜面の反射率の最大 50 % 程度にまで減少する。その減少率は入射波の波形勾配が小さいほど大きい。2 成分波に拘束された長周期波の反射率は、不透過斜面上では 100 % で、透過斜面上でも 90 % 以上となり、斜面を透過性にしても長周期波の反射率制御機能は期待できない。

参 考 文 献

- 岩垣雄一・榎木 亨 (1971): 海岸工学, 共立出版, p. 116.
 首藤伸夫 (1974): 非線形長波の変形, 第 24 回海岸工学講演会論文集, pp. 57-63.
 出口一郎・榎木 亨・白谷宏司 (1988): 透水層上の波変形に対する非線形非定常ダルシー則の適用性について, 第 35 回海岸工学講演会論文集, pp. 487-491.
 出口一郎・水野 立 (1992): 透水層表面の境界摩擦の推定と箱波変形に対する線形波動理論の適用限界, 海岸工学論文集, 第 39 巻, pp. 596-600.
 間瀬 肇・沖慎一郎 (1994): 透水性を有する海底起伏と波浪との平面 2 次元干渉, 土木学会論文集, No. 509/II-30, pp. 193-202.
 Greslou, L. and Y. Mahe (1954): Etude du coefficient de reflexion d'une houle sur un obstacle constitue par un plan incline, Proc. 5th ICCE, pp. 68-84.
 Kobayashi, N. and A. Wurjanto (1990): Numerical model for waves on rough permeable slopes, J. of Coastal Research, SI No. 7, pp. 149-166.
 Losada, M. and L. Gimenez-Cruto (1981): Flow characteristics on rough, permeable slopes under wave action, Coastal Engineering, 4, pp. 187-206.
 Sawaragi, T., I. Deguchi and K. H. Kim (1988): Energy loss and wave set-up due to breaking waves, Tech. Rept., Osaka University, Vol. 34, No. 1779, pp. 329-338.