

礫浜海岸の前浜における地下水位が 砕波に及ぼす影響に関する研究

EFFECTS OF GROUNDWATER TABLE ON WAVE BREAKING IN A GRAVEL BEACH

李光浩¹・水谷法美²・藤井俊明³
Kwang-Ho LEE, Norimi MIZUTANI, Toshiaki FUJII

¹正会員 博(工) 名古屋大学助教 大学院工学研究科社会基盤工学専攻 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

²正会員 工博 名古屋大学教授 大学院工学研究科社会基盤工学専攻 (同上)

³学生会員 名古屋大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻 (同上)

The aim of this study is to investigate the characteristics of the height and depth of breaking waves for periodic waves, considering the effects of the groundwater table on them. A hydraulic model experiments and numerical simulation are performed to accomplish the aim. The experimental results of breaking index including the breaking wave height and breaking point on a gravel beach are compared with the existing experimental data on a sandy beach and the proposed breaking wave formula for computing breaker height and depth. Experimental results indicate that the higher the groundwater table, the deeper breaking point. Further, the breaking wave height is smaller than that in a sandy beach. The numerical model based on N-S equation solver is found to reproduce the wave fields affected by the groundwater table and its results are in close agreement with the laboratory data.

Key Words : Wave breaking, groundwater, gravel beach, breaker height, breaker depth

1. はじめに

浅水変形により波が碎ける砕波現象は、波力や漂砂移動による海岸侵食など海岸工学上の様々な問題と密接に関連する物理現象の一つである。そのため、砕波帯を含めた波浪場の特性を十分に把握し、砕波のメカニズムを解明することは極めて重要である。また、潮位差の大きな海岸においては、地下水面と海面との位置関係によって波浪場の特性は大きく変化することが予想される。特に、透水性の高い礫浜海岸では前面の波浪場は前浜の地下水位の影響を受けやすいことが指摘されており、地下水位の影響を含めた砕波現象の検討が必要である。これまで、多数の研究により砕波現象が検討されてきている。例えば、合田¹⁾はこれまでに報告されている砕波に関する研究を取りまとめ、新たな修正砕波指標式を提案するとともに、実務ならびに研究に使用可能な規則波と不規則波の砕波統計量の整備を行った。また、Le Roux²⁾は、既往の砕波指標に関する提案式では砕波波高と砕波水深の2つの未知数を同時に考慮していることを指摘し、反復法に基づく計算法を提案している。しかしながら、これまでの研究のほとんどが砂浜海岸を対象としたものであり、礫浜海岸に関する検討例は少ないのが実状である。その中で、Lee et al.³⁾は地下水位が礫浜の地形変化に及ぼす影響に

ついて検討を行い、砕波点付近で最も侵食されることを指摘している。しかし、礫浜海岸における地下水位が砕波現象に及ぼす影響まで考慮した研究はなされていない。そこで、本研究では、まず斜面背後での水位を強制的に上昇させることにより斜面内からの滲出流を変化させた水理模型実験を行った。そして、砕波波高、砕波水深および砕波点近傍の流速場などの実験データを得るとともに、数値解析結果も併せて前浜地下水位が砕波を含めた波浪場に及ぼす影響について考究する。

2. 水理模型実験の概要

(1) 実験装置

水理模型実験は、名古屋大学大学院工学研究科の長さ30 m、幅0.7 m、高さ0.9 mの片面ガラス張り二次元造波水路を用いて行った。造波水路の一端にはピストン型造波装置が備えられている。また、水路内の岸側に中央粒径 $d_{50}=5$ mm、比重2.65の礫を敷きならして、勾配1/7の移動床斜面を製作した。実験中の水位を一定に保つため、板で仕切りを作ることで水槽を幅0.3 mと0.4 mに分割した。また、地下水位を考慮するため、斜面背後にアクリル製水槽を設置し、ポンプによる注・排水を行なうことに

より地下水位を操作するとともに水槽内で水を循環させた。斜面とアクリル製水槽とは底質と比べて十分に細かい目の網によって接しているため斜面からアクリル製水槽への底質の移動はなく、また、水の移動が妨げられないように配慮している。実験装置の概要を図-1に示す。

(2) 実験条件および実験方法

実験では静水深 h を 40.0 cm で一定とした。砕波波高と砕波水深の測定に関する実験では、波高 H を約 3.0 cm から約 8.0 cm の 11 種類、造波板の押し出す周期 T を 1.0 s から 2.0 s の 11 種類、斜面背後の水位と静水深の差 Δh を 0.0 cm, 7.5 cm, 12.5 cm, 17.5 cm の 4 種類ずつ変化させて、計 484 ケースの実験を行った。実験中は、砕波点近傍（汀線より沖側に 10 cm～80 cm）を高速度ビデオカメラで撮影し、写真-1 に示すように砕波水深と砕波波高をそれぞれ定義し、画像解析から求めた。

砕波点近傍の流速場に関する実験では、波高 H を 6.0 cm, 周期 T を 1.1 s とし、斜面背後の水位と静水深の差 Δh を 0.0 cm, 7.5 cm, 12.5 cm, 17.5 cm の 4 種類に対して砕波帯近傍の流速を測定した。流速の計測点は、図-2 に示すように水平方向に汀線から 20 cm～90 cm までを 5 cm 間隔、鉛直方向に静水面から 3 cm 上方、静水面、静水面から 4 cm 下方、静水面から 8 cm 下方、底面とし、計 62 点で計測を行った。流速の測定には、これまでに砕波帯内の流速場の計測に用いられてきた図-3 に示す岩田ら⁴⁾によるキャンティレバー型流速計を使用した。キャンティレバー型流速計は、ひずみゲージを貼った板の先端に棒を取り付け、棒に波を作用させることでひずみを計測する装置である。計測したひずみを校正式によって流速に変換し、流速を算定した。

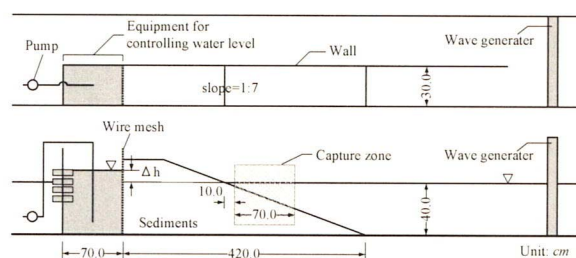


図-1 実験装置



写真-1 砕波波高と砕波水深の定義

3. 数値解析モデル

(1) 基礎方程式

2次元波浪場の数値計算には、砕波を含む複雑な変化を伴う自由表面を精度よく追跡できるとされるVOF法を採用した。また、移動床は均質なポーラス層で近似し、空隙率や流体抵抗（線形および非線形）を考慮した水谷ら⁵⁾のモデルを使って波浪場と移動床内部の波浪場を同時に計算することとした。本数値解析モデルの基礎方程式は、式(1)の連続式、式(2)の運動方程式、式(3)の自由表面の形状を模擬するためのVOF関数 F に関する移流方程式で構成される。

$$\frac{\partial m u_i}{\partial x_i} - \tilde{q} = 0 \quad (1)$$

$$\hat{m} \frac{D u_i}{D t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} - R_i - g_i - \beta u_j \delta_{j3} + \frac{\nu}{3m} \frac{\partial \tilde{q}}{\partial x_i} \quad (2)$$

$$\frac{\partial m F}{\partial t} + \frac{\partial (F m u_i)}{\partial x_i} = F \tilde{q} \quad (3)$$

$$\hat{m} = 1 + C_M \frac{1-m}{m} \quad (4)$$

ここに、 u_i : x, z 方向の流速成分 ($i=1, 2$), t : 時間, p : 圧力, ν : 動粘性係数, m : 移動床の空隙率, g : 重力加速度, ρ : 流体の密度, F : VOF関数（流体の体積率）, d_{50} : 底質の中央粒径, C_M : 慣性力係数, β : 付加減衰領域でのみ正の値を持つ減衰係数, $\tilde{q}$: 造波ソースに起因する付加項である。また, R_i : 移動床内部の抗力項で、次式で定義される。

$$R_i = \frac{6C_{D2}\nu(1-m)}{md_{50}^2} u_i + \frac{C_{D1}(1-m)}{2m^2 d_{50}} u_i \sqrt{u_j^2} \quad (5)$$

ここに、 C_{D1} , C_{D2} : それぞれ非線形、線形抵抗項係数である。

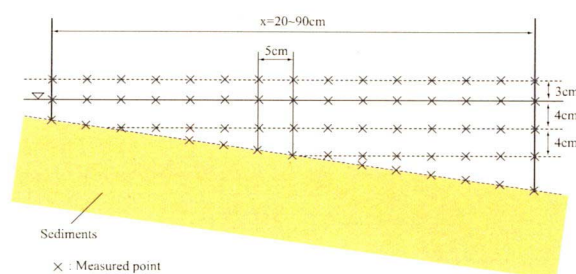


図-2 砕波波高と砕波水深の定義

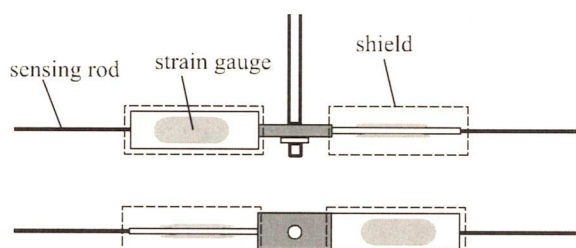


図-3 キャンティレバー型流速計

(2) 数値計算手法

本数値計算では、まず、波高や周期などの波の入射条件、斜面の位置および空隙率、慣性力係数や抗力係数などの初期条件を入力し、ついで、式(2)の運動方程式を解くことにより、次の時間ステップの流速を計算している。その数値解法として、本研究では以下に示すTwo-step projection法を用いた。

・ 予測段階

$$\frac{\tilde{u}_i^{n+1} - u_i^n}{\Delta t} = \begin{bmatrix} -u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \hat{m}^{-1} \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} - R_i - g_i \\ -\beta u_j \delta_{j3} + \frac{\nu}{3m} \frac{\partial \tilde{q}}{\partial x_i} \end{bmatrix}^n \quad (6)$$

・ 修正段階

$$\frac{u_i^{n+1} - \tilde{u}_i^{n+1}}{\Delta t} = -\hat{m}^{-1} \frac{1}{\rho^n} \frac{\partial p^{n+1}}{\partial x_i} \quad (7)$$

ここに、 Δt は時間ステップ間隔、 $\tilde{u}_i$ は式(6)より求められる仮流速成分である。修正段階の式(7)における圧力勾配 $\partial p^{n+1} / \partial x_i$ は、次のポアソン方程式から得られる。

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{m}{\hat{m} \rho^n} \frac{\partial p^{n+1}}{\partial x_i} \right) = \frac{1}{\Delta t} \left(\frac{m \tilde{u}_i^{n+1}}{\partial x_i} - \tilde{q} \right) \quad (8)$$

また、実際の計算上では自由表面セルにおける圧力の定義位置は実際の自由表面の位置と異なるため、自由表面の形状によって隣接した流体セルから線形近似して自由表面セル内の圧力を求めるのが一般的である。本計算ではこのような自由表面付近での複雑な圧力近似を無くすため、李・水谷⁶⁾に倣いポアソン方程式を解く段階のみ、一般座標系 (ξ, ζ) に座標変換し連立一次方程式を構成した。一般座標系から構成された計算領域は格子長 $\Delta \xi = \Delta \zeta = 1$ の均一な矩形格子を用いて、自由表面に沿う格子を生成することができる。自由表面に沿う一般座標 (ξ, ζ) に座標変換したポアソン方程式は次のようになる。

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{m}{\hat{m} \rho^n} \alpha \frac{\partial p^{n+1}}{\partial \xi} - \frac{m}{\hat{m} \rho^n} \beta \frac{\partial p^{n+1}}{\partial \zeta} \right) \\ & + \frac{\partial}{\partial \zeta} \left(\frac{m}{\hat{m} \rho^n} \gamma \frac{\partial p^{n+1}}{\partial \zeta} - \frac{m}{\hat{m} \rho^n} \dot{\beta} \frac{\partial p^{n+1}}{\partial \xi} \right) \\ & = \frac{1}{\Delta t} \left\{ \frac{\partial}{\partial x_i} (\tilde{u}_i^{n+1}) - \tilde{q} \right\} \end{aligned} \quad (9)$$

ここに、 α, β, γ ：形状係数、 S_p ：ポアソン方程式におけるソース項である。一般座標系の形状係数およびポアソン方程式のソース項はそれぞれ次式で表される。

$$\alpha = \left(\frac{\partial^2 z}{\partial \xi^2} + \frac{\partial^2 x}{\partial \zeta^2} \right) \quad (10)$$

$$\dot{\beta} = \left(\frac{\partial z}{\partial \xi} \frac{\partial z}{\partial \xi} + \frac{\partial x}{\partial \xi} \frac{\partial x}{\partial \xi} \right) \quad (11)$$

$$\dot{\gamma} = \left(\frac{\partial^2 z}{\partial \xi^2} + \frac{\partial^2 x}{\partial \xi^2} \right) \quad (12)$$

$$S_p = \frac{J}{\Delta t} \left\{ \frac{\partial}{\partial x_i} (m \tilde{u}_i^{n+1}) - \tilde{q} \right\} \quad (13)$$

ここに、 J ：ヤコビアンである。式(9)のポアソン方程式から連立1次方程式を構成し、それをMICCG法より解いた。

図-4に数値計算領域の概略を示す。計算領域は、鉛直長さ1.0 cm、水平長さ2.0 cmのセルに分割し、計算を行った。礫浜を想定した透水性斜面は、空隙率0.37のセルでモデル化した。また、斜面背後で地下水位を操作するために、斜面背後に水理模型実験と同様の貯水領域を設け、底面から地下水位の変化量に応じた流量 Q を与えた。これにより、地下水位の影響を含めた波浪場をシミュレーションできる。

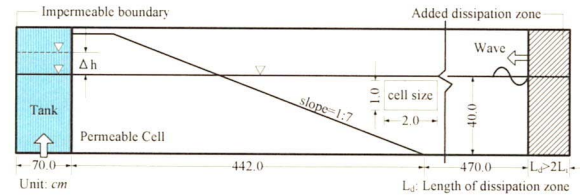


図-4 計算領域の概略

4. 結果と考察

(1) 既往の評価式

砂浜海岸を対象に碎波波高および碎波水深を評価する式はこれまでに多数提案されてきた。例えば、Rattanapitikon et al.⁷⁾と Rattanapitikon and Shibayama⁸⁾は26の論文・報告より得た695ケースの碎波データを再検討し、式(14)、(15)に示す底面勾配の影響を含む新たな碎波波高 H_b と碎波水深 h_b の碎波指標に関する評価式を提案している。

$$\frac{H_b}{L_b} = (-1.40s^2 + 0.57s + 0.23) \left(\frac{H_0}{L_0} \right)^{0.35} \quad (14)$$

$$\frac{h_b}{L_0} = (3.86s^2 - 1.98s + 0.88) \left(\frac{H_0}{L_0} \right)^{0.84} \quad (15)$$

ここに、 H_b ：碎波波高、 h_b ：碎波水深、 L_b ：碎波時の波長、 H_0 ：沖波波高、 L_0 ：沖波波長、 s ：水底勾配である。本研究では、水理模型実験から得られた碎波に関する実験データの妥当性を確保するとともに、礫浜海岸における碎波特性を把握するため、式(14)、(15)に示す Rattanapitikon et al.⁷⁾と Rattanapitikon and Shibayama⁸⁾によって提案された砂浜に対する評価式および既往の研究で報告され

ている実験データと関連付けて検討を行う。

(2) 実験結果

実験データは、礫浜を対象とした本実験 484 ケースのうち砕波データが得られた 469 ケースだけでなく、砂浜を対象とした既往の実験による 345 ケースも用いた。なお、砂浜の実験データは Deo and Jagdale⁹⁾および既往の実験データを取りまとめた Smith and Kraus¹⁰⁾ から得た。使用した実験データの概要を表-1 に示す。

図-5 に斜面背後の地下水位を変化させたときの汀線付近から滲出する冲向き流速の空間分布を示す。図中の縦軸は水表面での流速、横軸は汀線からの距離である。図-5 より、斜面背後の水位と静水深の差 Δh が大きいほど流速が大きくなることを確認できる。また、 $x > 30$ cm では Δh による流速の差は小さくなっている様子が認められる。

図-6, 7 に斜面背後の水位を変化させたときの沖波波形勾配 H_0/L_0 (横軸) と砕波水深および砕波波高 (縦軸) の関係を示す。なお、図中には比較のため、砂浜に対する既往の提案式 (14), (15) および本実験結果から得られた近似式を示している。また、図中の R^2 は式 (16) で定義される決定係数である。

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (e_i - o_{mean})^2 - \sum_{i=1}^N (e_i - o_i)^2}{\sum_{i=1}^N (e_i - o_{mean})^2} \quad (16)$$

ここに、 N : データ数、 e_i : 実験値、 o_i : 予測値、 o_{mean} : 予測値の平均である。図-6 より、 H_0/L_0 の増加にともない、また斜面背後の水位が高いほど砕波水深が

表-1 実験データの概要

変数	Gravel		Sand	
	最小値	最大値	最小値	最大値
T (s)	1.0	2.0	0.7	6.0
H_0 (cm)	3.04	8.76	1.04	17.3
s	0.143	0.143	0.0125	0.2
Δh (cm)	0.0	17.5	0.0	0.0
H_b (cm)	2.52	11.4	2.44	19.3
h_b (cm)	3.64	11.6	3.05	26.3
データ数	469		345	

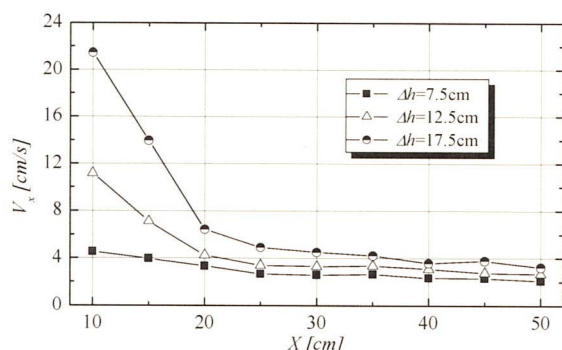


図-5 滲出流速の空間分布

増加することが確認できる。このことから、斜面背後の水位が高いほど汀線付近から滲出する冲向きの流れが強くなり、その抵抗によって砕波点が沖側に移動したことが指摘できる。また、中央粒径の差 (礫浜と砂浜) の効果に着目し、砕波指標に関する提案式と地下水位の影響を排除した本実験結果 (図中に ■ で示す) を比較すると、中央粒径が大きい ■ では砂浜に対する提案式に比べ砕波水深が小さくなっていることがわかる。この理由として、中央粒径が大きく、また斜面の透水性が高い礫浜海岸では、遡上した波が斜面内に浸透するために遡上域に水が残りにくく、その後入射する波の妨げとならないので、砕波点が岸側に移動したことが考えられる。

一方、砕波に及ぼす地下水位の影響については、図-6 に示す本実験結果から得られた近似式により考察を行う。図-6 から、 $\Delta h = 0.0$ cm と $\Delta h = 7.5$ cm では砕波水深の差が大きい、 $\Delta h = 7.5$ cm と $\Delta h = 12.5$ cm、 $\Delta h = 17.5$ cm ではその差が小さいことが確認できる。これは、図-5 に示したように、 $x > 30$ cm の範囲では地下水位と静水深の差による滲出流速の差が小さくなっていることに起因すると考えられる。また、 $\Delta h = 0.0$ cm と $\Delta h = 7.5 \sim 17.5$ cm を比較すると、 H_0/L_0 の増加にともない砕波水深の差が大きくなるが、これは H_0/L_0 が大きく不安定な波ほど地下水位の影響を強く受けるためである。

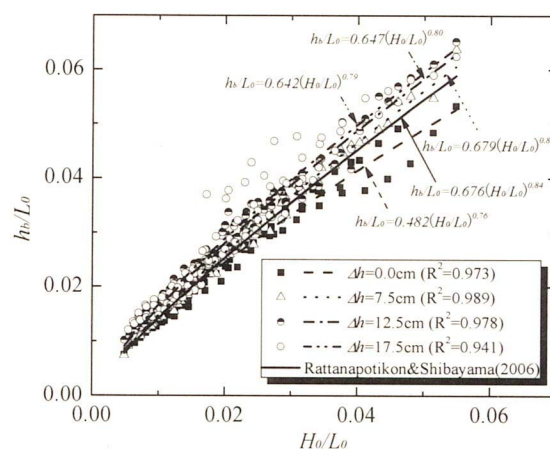


図-6 沖波波形勾配と砕波水深の関係

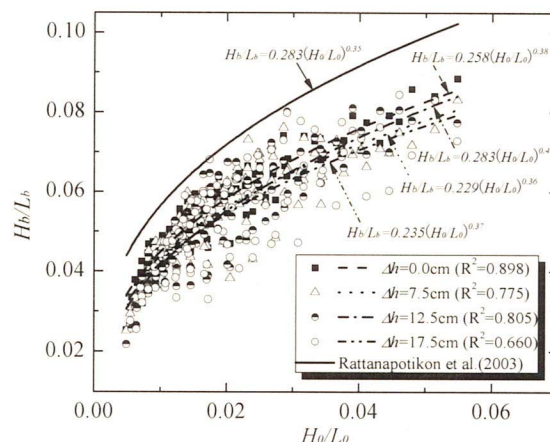


図-7 沖波波形勾配と砕波波高の関係

図-7 については、 H_0/L_0 の増加にともない砕波波高が増加すること、また、斜面背後の水位が高いと砕波波高が僅かに小さくなることが確認できる。これは、斜面背後の水位と静水深の差が大きくなり砕波点が沖側に移動したことで、砕波波高が相対的に小さくなったと考えられる。ただし、実験結果のバラつきが大きく、また $\Delta h=7.5$ cm と $\Delta h=12.5$ cm において傾向が異なっている様子が認められるため、今後更に検討する必要がある。また、既往の提案式と本実験結果とを比較すると、全ケースで既往の提案式は実験結果より砕波波高を過大評価している様

子が認められる。これも礫浜海岸の浸透効果に起因するものであり、斜面内への浸透によって波高が小さくなったと考えられる。

つぎに、図-8、9 に $\Delta h=0.0$ cm に対する本実験結果 121 ケースと砂浜に対する既往の実験結果 345 ケースを比較したものを示す。図-8 から、 H_0/L_0 の増加にともない砕波水深が増加することや礫浜では砂浜に比べて砕波水深が小さくなることといった図-6 で確認された特徴が認められる。しかし、図-9 では、 H_0/L_0 の増加にともない砕波波高が増加しているものの、礫浜の砕波波高が砂浜に比べて小さくなる傾

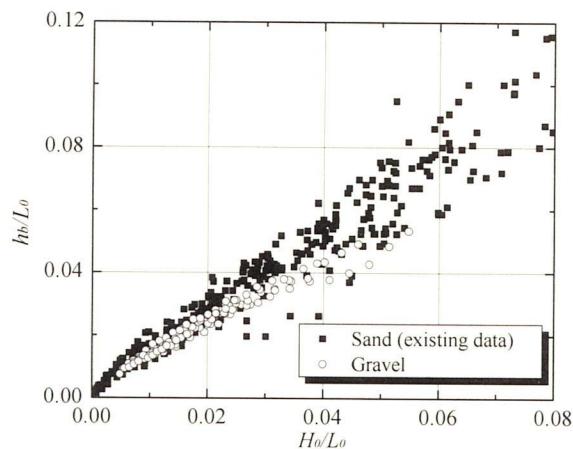


図-8 沖波波形勾配と砕波水深の関係

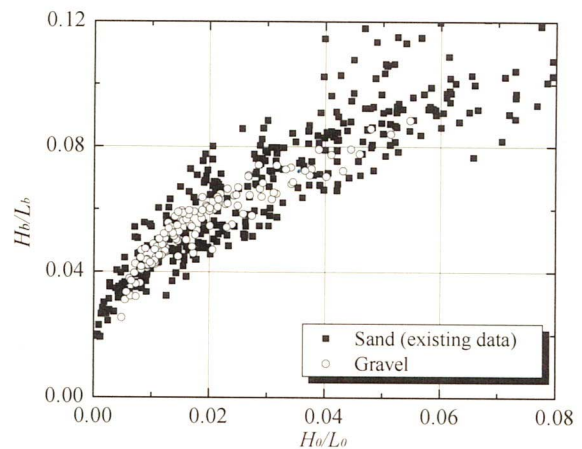


図-9 沖波波形勾配と砕波波高の関係

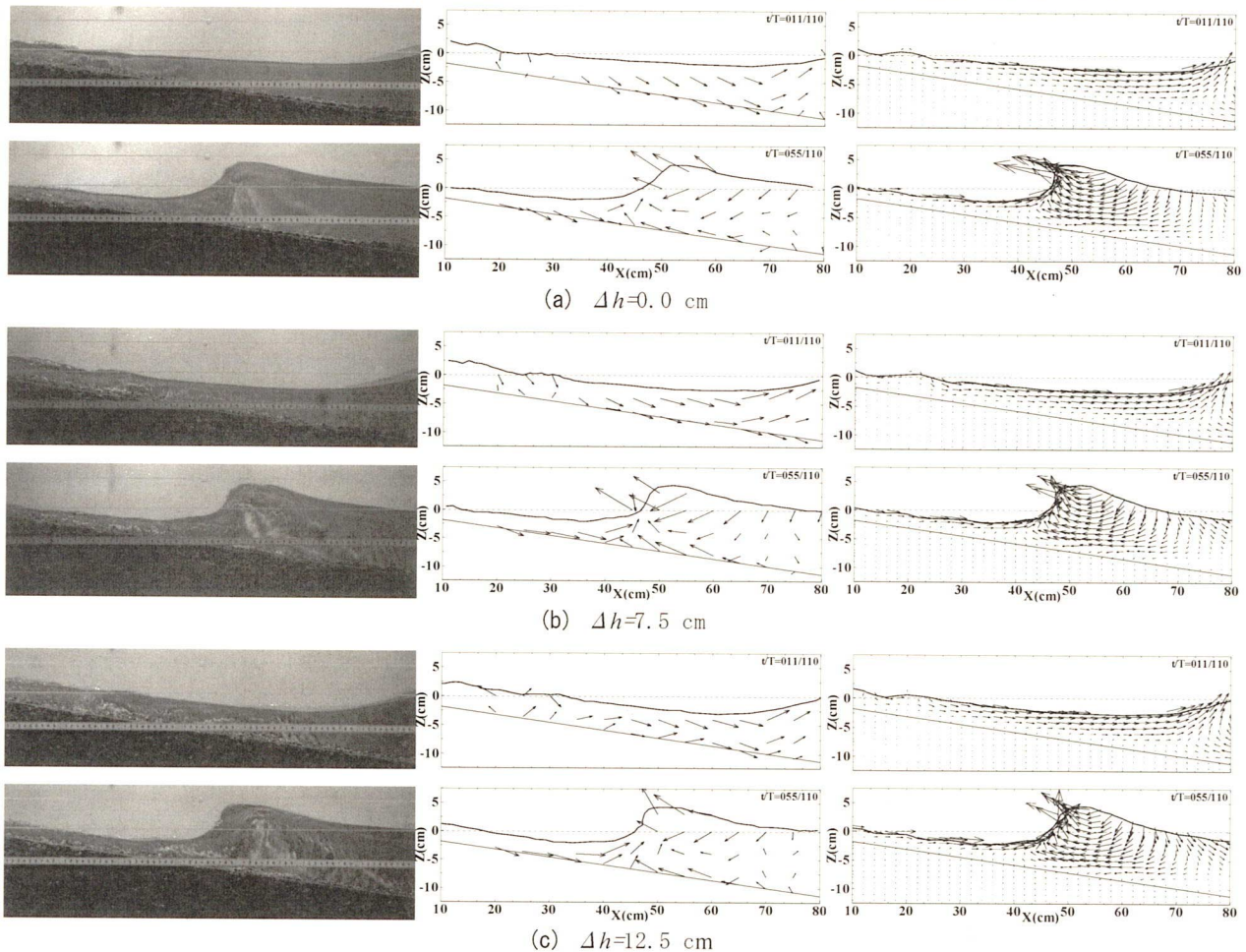


図-10 流速ベクトルの時系列変化 (左列：画像，中列：実験結果，右列：計算結果)

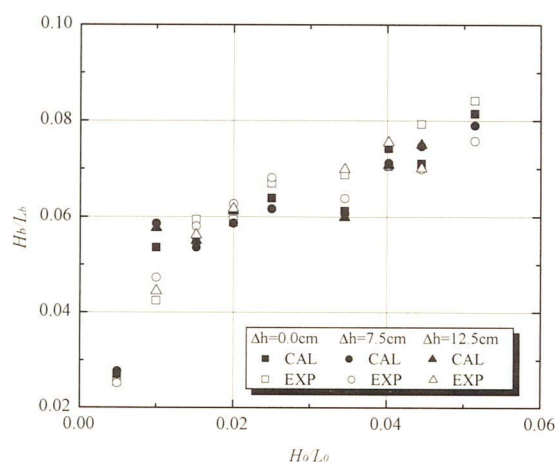
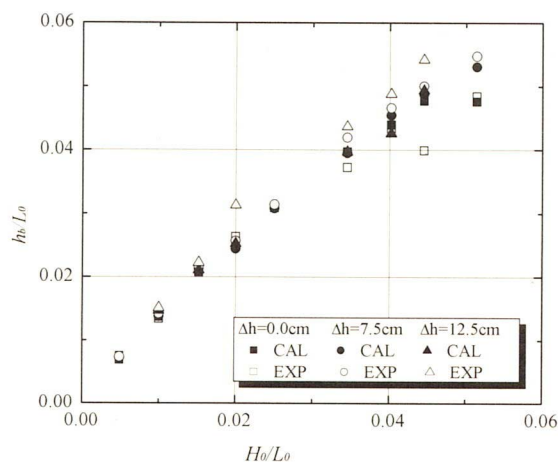


図-11 実験結果と計算結果の比較 (左：碎波水深，右：碎波波高)

向が認められないことがわかる。

(3) 計算結果

図-10は斜面背後の水位と静水深の差 Δh を0.0 cm～12.5 cmとしたときの流速ベクトルの時系列変化の実験結果と計算結果を比較したものである。図中の横軸は汀線からの距離，縦軸は静水面からの高さである。図-10の実験結果から， $t/T=011/110$ で引き波に起因する冲向きの流れが発生していること，波の進行とともに冲向きの流れと岸向きの流れが衝突し， $t/T=055/110$ で強い岸向き流速が発生していることが分かる。また，図-10(c)の $t/T=055/110$ で滲出流に起因する上向き流速が発生していることが分かる。そして，計算結果はこれらの実験結果の特徴を十分に精度良く再現していると判断できる。なお，図-10(a)～(c)の $t/T=055/110$ において実験結果と計算結果を比較すると， $x=20\sim40$ cm付近で発生している冲向き流速の位置に差異が認められるが，器具の性質上，実験の底面流速の計測点が底面より1～2 cm上方となることに起因するものと考えられる。

図-11は碎波水深と碎波波高の数値計算結果と実験結果を比較したものである。図-11から，計算結果は実験結果を若干過小評価し，碎波水深については沖波波高 H_0/L_0 が大きいほど実験結果と計算結果のばらつきが大きくなるものの，概ね精度良く計算できていることが分かる。このことから，本数値計算手法は，地下水位の影響を受ける碎波を含めた波浪場を十分に再現できると判断される。

5. おわりに

本研究では，礫浜海岸における地下水位が碎波現象に及ぼす影響を評価するために，斜面内からの滲出流を変化させた水理模型実験を行うとともに，数値解析結果も併せて前浜地下水位が碎波を含めた波浪場に及ぼす影響について考究した。本研究で得られた主要な結論を以下に要約する。

1) 砂浜海岸より透水性の高い礫浜海岸では，斜面

内への浸透により碎波波高が減少する。

- 2) 礫浜斜面背後の水位を上げると汀線付近から滲出する冲向き流れが強まり，碎波点を沖側に移動させ，碎波水深が増加するとともに碎波波高が減少する。
- 3) 地下水位の影響を考慮した数値計算手法を用いて碎波波高と碎波水深を計算したところ，実験データと良好に一致した。
- 4) 本実験では斜面勾配を固定して行ったため，今後斜面勾配を変えた実験を行い，更なる検討を行う必要がある。

参考文献

- 1) 合田良実：工学的応用のための碎波統計量データの再整理，海岸工学論文集，第54巻，pp.81-85，2007。
- 2) Le Roux, J.P.: A simple method to determine breaker height and depth for different wave height/length ratios and floor slope, *Coastal Engineering*, Vol.54, pp.271-277, 2001.
- 3) Lee, K.-H., Mizutani, N., Hur, D.-S., Kamiya, A.: The effect of groundwater on topographic changes in a gravel beach, *Ocean Engineering*, Vol.34, pp.605-615, 2007.
- 4) 岩田好一朗・小山裕文・布藤省三：碎波後の波動エネルギーの変化に関する実験的研究，海岸工学講演会論文集，第30巻，pp.10-14，1983。
- 5) 水谷法美，Golshani, A.，許東秀，平野善弘，清水秀行：透水性防波堤内部および周辺に形成される波浪流の特性に関する研究，海岸工学論文集，第48巻，pp.791-795，2001。
- 6) 李光浩，水谷法美：矩形潜堤周辺に生じる局所洗掘とその時間領域数値解析手法の開発，海岸工学論文集，第53巻，pp.501-505，2006。
- 7) Rattanapitikon, W., Vivattanasirisak, T., Shibayama, T.: A proposal of new breaker height formula, *Coastal Engineering Journal*, JSCE45, pp.28-48, 2003.
- 8) Rattanapitikon, W., Shibayama, T.: Breaking wave formulas for breaking depth and orbital to phase velocity ratio, *Coastal Engineering Journal*, JSCE48, pp.395-416, 2006.
- 9) Deo, M.C., Jagdale, S.S.: Prediction of breaking waves with neural networks, *Ocean Engineering*, Vol.30, pp.1163-1178, 2003.
- 10) Smith, E. R., Kraus, N. C.: Laboratory study on macro-features of wave breaking over bars and artificial reefs, *Technical Report CERC-90-12*, WES, U.S. Army Corps of Engineers, 1990.