

波による海浜地形変化と透過性斜面内の流れ場に関する研究

STUDY ON BEACH PROFILE CHANGE AND WAVE INDUCED VELOCITY FIELD IN PERMEABLE BEACH

馬賢鎬¹・水谷法美²・江口周³・許東秀⁴

Hyun Ho MA, Norimi MIZUTANI, Shu EGUCHI, Dong Soo HUR

¹学生会員 工修 名古屋大学大学院工学研究科土木工学専攻 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

²正会員 工博 名古屋大学大学院教授 工学研究科社会基盤工学専攻 (同上)

³正会員 工修 名古屋市住宅都市局都市計画部 (〒460-8508 名古屋市中区三の丸三丁目1)

⁴正会員 工博 慶尚大學校海洋土木工学科助教授 (〒660-701 韓国慶尚南道晉州市加佐洞900)

Beach profile change has been investigated in relation to velocity field inside and outside of permeable beach. Velocity field on shore and swash zone has been obtained by conducting numerical simulations and model experiments. In the experiments, water surface change has been measured using run-up gage covered with fine wire mesh and compared to verify the numerical simulation results. Infiltration flow has been found to play an important role on sediment transport. It is also revealed that sediment transport and formation process of gravel beach can be well explained by considering of kinetics on beach.

Key Words : gravel beach, topographic change, sediment transport, infiltration flow

1. 序論

波による海浜断面の変形過程を解明するには、その外力である流れ場を正確に把握し、漂砂の移動機構と関連付けて検討することが必要である。漂砂の大部分が生産される砕波帯、およびそれ以浅は海浜変形を考える上で重要な場であり、漂砂を外力である流れ場と関連させて検討を加えることは極めて重要である。そして、その流れ場や漂砂機構を把握する上で、斜面上のみならず斜面内の浸透流も含めた場全体の流速場を考えることが重要である。

漂砂の移動機構に関してはこれまでに数多くの研究が行われてきているが、透過性斜面内も含めた場全体の流速場特性を総括的に考慮した例は少なく、詳細については未解明な部分が少なくない。出口ら(1996)は水理実験によって斜面上での波変形と遡上、斜面からの反射の影響を検討し、さらに透水層上の流体運動については分散性を考慮した非線形波動理論と非定常流場に拡張された非線形Darcy則を適用して透水斜面上への遡上波を解析した。しかし、彼らの数値解析には鉛直方向の水粒子運動が考慮されておらず、斜面内の流れ場の詳細を解析することは難しいと考えられる。宮武・藤間(2004)は地下水位の計測実験と数値解析により、波打ち帯の漂砂移動に及ぼす砂層表面への浸透・浸出流の影響を検討した。彼らは塩化ビニール管を水槽床下部に埋設し、

その管内に形成される水面を水位計を用いて測定するとともに、Bearの飽和一不飽和浸透流方程式を用いた浸透流の計算を行っている。しかし、不透過な円筒内に形成される水面は管の開口部における圧力に大きく支配されており、周囲の地下水位との連続性が保たれない可能性がある。

本研究では、二次元水理模型実験により波浪作用下の海浜斜面の流速場と水位変化、および海浜断面地形の変形特性を計測し、その実態を考究する。さらにVOF法にPorous Body Modelを組み合わせた数値解析手法による計算を行って海浜斜面内も含めた流速場の構造を明らかにし、波による漂砂の移動機構や海浜断面の変形過程と関連付けて考察を行って、海浜斜面内部の流れ場が漂砂移動機構や海浜断面の形成過程に及ぼす影響を考究するものである。

2. 水理実験

(1) 実験装置および実験条件

実験を名古屋大学の片面ガラス張り二次元鋼製造波水槽で行った。水槽の一端に1/7の一様勾配を有する木製不透過斜面を設置し、その上に移動床模型を製作し、規則波を入射させた。移動床の材料として、 $d_{50}=0.1\text{mm}$ の珪砂と $d_{50}=5\text{mm}$ の礫を使用し、実験では移動床斜面を礫のみで製作した場合と、礫と

珪砂を層状に配置して製作した場合の二種類を対象に実験を行った。なお、底質材料として礫のみを用いた場合、その透水層厚を8cmと15cmの2種類変化させ、層厚の変化が地形変化や流れ場に与える影響も検討した。

実験では、入射波の周期を3種類 ($T=1.5, 1.7, 2.0s$)、それぞれの周期に対して入射波高を3種類 ($H=4, 6, 8cm$) 変化させ、合計9種類の規則波を入射させた。

(2) 実験方法

a) 地形変化に関する実験

水槽に設置された不透透斜面上に所定の底質を勾配1/7の一樣勾配斜面を初期地形として敷きならし、造波装置により所定の波を入射させた。波作用中、側方からデジタルビデオカメラにより撮影を行い、海浜変形の様子を記録した。造波開始から0.5, 1, 3, 6hr後に造波を一時中断し、砂面計により地形の計測を行った。

b) 礫浜斜面上の流れ場に関する実験

本実験では、キャンティレバー型流速計（岩田ら、1983）を製作し、礫浜上の碎波帯以浅における流速場の計測を行った。

まず波による地形変化が生じないように移動床を金網で覆った状態で波を作用させ、キャンティレバー型流速計により流速分布の時間変化を計測した。流速の計測点は、水平・鉛直方向に3~6cm間隔とした。次に金網を取り除いて波を入射させ、地形変化が平衡に達したと判断できた時点で同様の流速分布の計測を行った。なお、流速計測時には、二本の水位計を用い、斜面沖側と流速計測点における水位変動も同時に計測した。

c) 礫浜斜面内の水位変動に関する実験

長さ250cmの電気容量式水位計（遡上計）を、礫層内に三本設置し、波が入射したときの透水層内の水位変動を計測した。対象としたのは層厚15cmの場合で、図-3に示すように、三本の水位計は斜面と平行に、不透透斜面上から5, 8, 11cmの位置に埋設した。なお、水位計センサーを金網によって保護した。

d) 礫浜斜面内の流れ場の可視化実験

礫浜斜面内の流れの様子を可視化するために、注

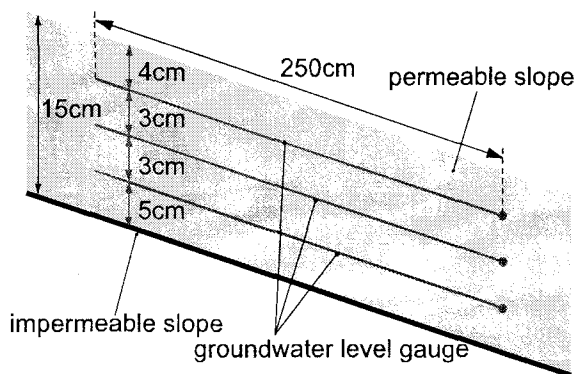


図-1 斜面内水位計配置状況

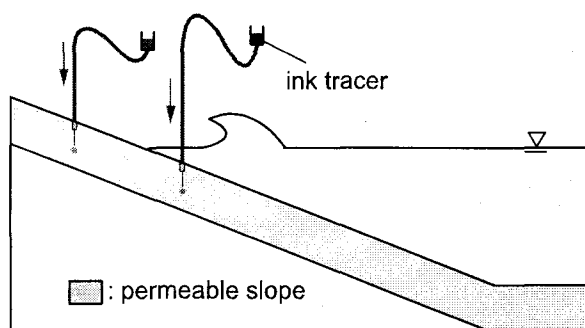


図2 斜面内流れの可視化実験概念

射針を装着したビニールチューブによって染料を斜面内に注入し（図-2参照）、波の作用によって染料が拡散する様子をデジタルビデオカメラで撮影した。

3. 数値解析

(1) 数値計算の概要

本実験装置をモデル化した二次元波浪場の数値計算を、VOF法にPorous Body Modelを組み合わせた数値解析手法（許、2000）を採用して実施した。基礎方程式は、二次元非圧縮流体の連続式と、運動方程式、および自由表面の形状を模擬するためのVOF関数Fの移流方程式で構成されている（許、2000）。

(2) 計算対象領域

計算対象領域を、鉛直長さ1.0cm、水平長さ1.4cm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0.36の透水性セルでモデル化した。ただし、透水性斜面の底面及び表層では、底質が密に配置された場合よりも空隙率が大きくなるため、それぞれのセルの空隙率は0.68とした。

4. 地形変化に関する実験結果と考察

海浜変形特性について、使用した底質ごとに以下に記述する。なお、入射波の波浪条件は、周期 $T=1.7s$ 、波高 $H=6.0cm$ の規則波を対象とする。

(1) 礫のみの場合

図-3に波の作用による平衡断面を示す。底質が礫のみの場合、その層厚を8cmと15cmの2種類変化させているが、いずれの層厚に対しても典型的な堆積性の断面地形が形成された。層厚の効果に着目すると、層厚の大きい方が、前浜がより急峻な勾配となる堆積形状を示しており、碎波帯付近の侵食規模は大きくなっている。

ビデオ解析と目視観測より、碎波帯の強い流速によって礫は浮遊状態となり、遡上帯で寄せ波とともに岸側へ掃流状態で移動するが、引き波時には礫層内へ波が浸透することにより、漂砂移動が少なくなる。これにより、漂砂は岸向きに卓越し、堆積性の

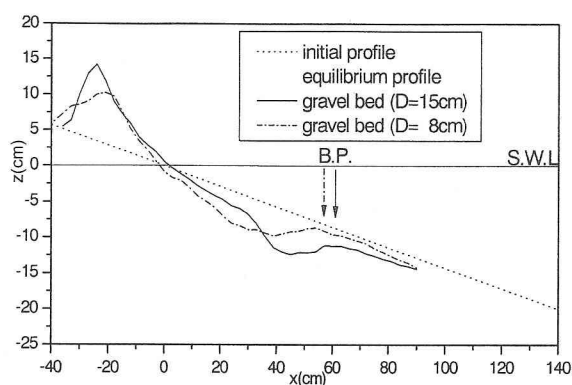


図-3 礫斜面の平衡断面 ($T=1.7s$, $H=6.0cm$)

地形が生じた。この傾向は層厚が大きい方が顕著であったため、層厚に伴って平衡断面形状に差が生じたものと考えられる。

(2) 礫と砂を層状に配置した場合

移動床斜面の上層5cmに礫を、下層10cmに硅砂をそれぞれ斜面と平行に配置して波を入射させた場合の平衡海滨断面形状を図-4に示す。この場合、表層

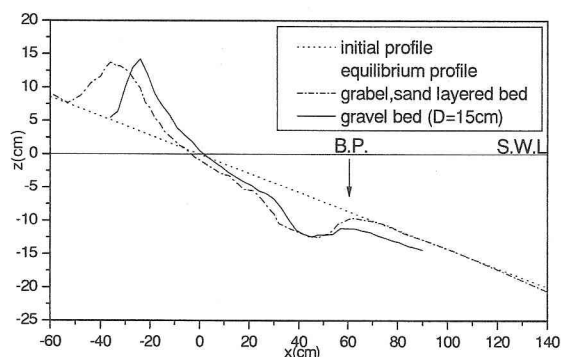


図-4 平衡断面(礫と砂の層状配置)

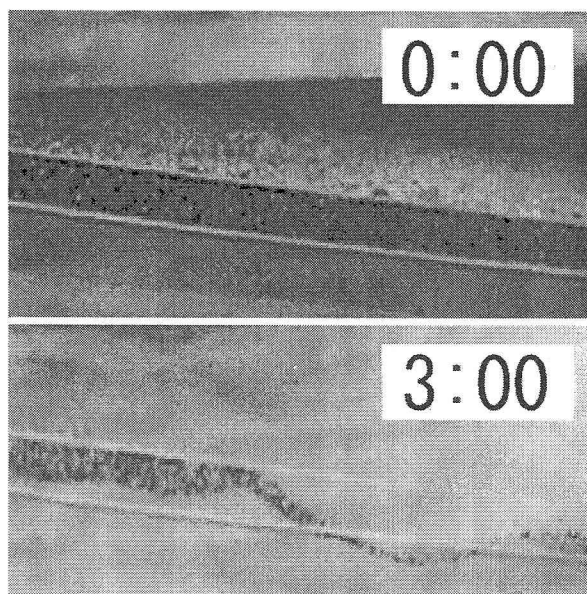


写真-1 礫層下の砂の挙動

に配置した礫の移動が著しく、底質に礫のみを用いた場合の結果とほぼ同じような断面を形成した。しかし、下層の硅砂層でも移動は生じている。写真-1は、碎波帯において造波開始直後および3時間後の海滨断面の様子を示している。下層の砂は時間の経過と共に少しずつ移動を生じており、下層の砂が礫層内へ持ち上げられてくる様子が確認できる。この現象に関しては後に詳細に検討を加える。

5. 礫浜斜面の流速場特性

(1) 斜面上の流速場特性

図-5は、層厚15cmの一樣勾配礫浜斜面に周期 $T=1.7s$ 、波高 $H=6.0cm$ の規則波が作用した場合の流速場の時間変化を示したもので、左列が実験結果を、右列が数値計算結果を示している。なお、流速ベクトルの実験結果は、斜面上での波浪場が定常状態になってから5周期の位相平均として求めた。

実験結果より、 $t/T=000/170$ では、引き波に起因する冲向きの流れや斜面への浸透流成分が確認できる。波の進行とともに、 $t/T=075/170$ で引き波による冲向きの流れと波の進行による岸向きの流れが干渉して上向きの流速を発生させ、波峰の通過と共に大規模な水平渦が形成される。実験時の目視観察より、碎波点は $x=45cm$ 付近であることが確認されており、岸沖方向の流れが衝突し、上向きの流速が発生する点は $t/T=075/170$ と一致している。そして、波峰の通過直後の $t/T=100/170$ で、碎波帯で斜面内から鉛直上向きに滲出する底面流速が最大となる。その後、波の遡上に伴って碎波帯から遡上帯にかけて岸向きの強い流速が確認された。上述の流速特性は、層厚8cmの場合にも同様であり、実験時の目視観察やビデオ画像解析との整合性が確認された。

また、数値計算の再現性に着目すると、計算結果は碎波帯以浅の底面流速を過小評価する傾向にあるものの、波形や流れの構造など、定性的な現象を良く再現している。

これまで、斜面上の流速場特性を考察してきたが、斜面底面付近にも鉛直方向の流れが周期的に発生しており、漂砂の外力として流れ場を正確に評価するには斜面内の流速場も考慮する必要があると考えられる。

図-6は、斜面内に注入した染料によって波浪作用下の礫浜斜面の流れ場を可視化した実験結果で、1周期を8分割して図示したものである。写真の0から3にかけて、碎波の波峰直下付近で斜面内の染料が水中に吸い出される様子が確認できる。これは、図5の実験結果 $t/T=100/170$ で、斜面底面から発生する鉛直上向きの流れと一致している。その後、斜面内から吸い出された水粒子は、波の遡上に伴って岸側へと輸送されており、これらは図の $t/T=125/170$ 、 $t/T=150/170$ に相当する。

ここで、斜面内も含む流れ場全体の特性を把握するために、図-5右列の数値計算結果を用いてさらに

考察を進める。遡上帯では遡上波の戻り流れが斜面内へ浸透し、浸透した水は斜面に沿って斜面内を冲向きに輸送され、砕波帯近傍で斜面上に滲出することがわかる。写真に見られる現象は、上述のような滲出流に起因するものと推測できる。この滲出の原因は、引き波による水位の低下と、砕波にともなう強い上向きの底面流速が周期的に発生するためであると考えられる。同じ底質を用いた海浜変形実験では、滲出域である砕波帯近傍が侵食域、浸透域である遡上帯が堆積域となっていた（図-3参照）。

したがって、この流れ場による浸透は底質を安定化するように影響していたことから、斜面内も含めた流れ場特性を把握することは、漂砂移動機構を議

論する上で重要であると考えられる。

(2) 斜面内の水位変動

図-7は、同波浪作用下の透水性斜面内部の水位の時間変化を実験値と計算値と比較した結果を示しており、図中の○は、斜面内に埋設した水位計によって計測された水位である。実験値より、斜面内の水位変動は、寄せ波時に急速に上昇し、引き波時には緩やかに下降することが判明した。また、礫層の深部(x の負方向)ほど水位変動の振幅は小さくなる傾向にある。数値計算結果は、寄せ波時の水位上昇を過大評価する傾向にあるが、水位上昇の初期段階や挙動の傾向を良好に再現している。

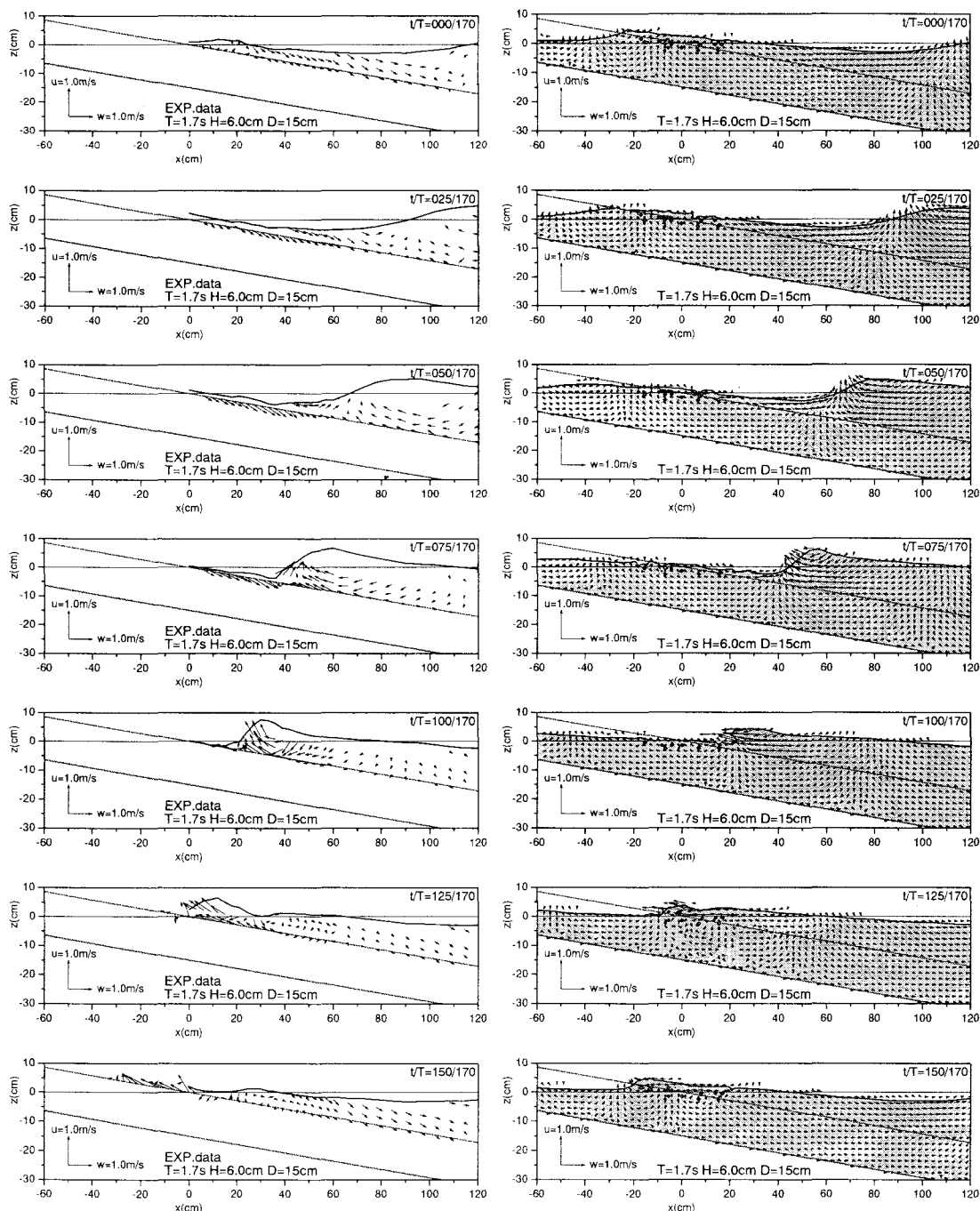


図-5 流速ベクトルの空間分布（左列：実験結果，右列：計算結果）

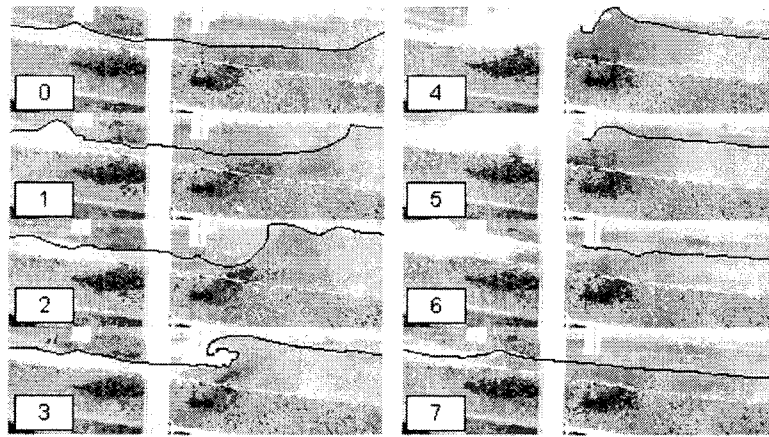


図-6 染料による礫層内の水粒子挙動の可視化結果の例

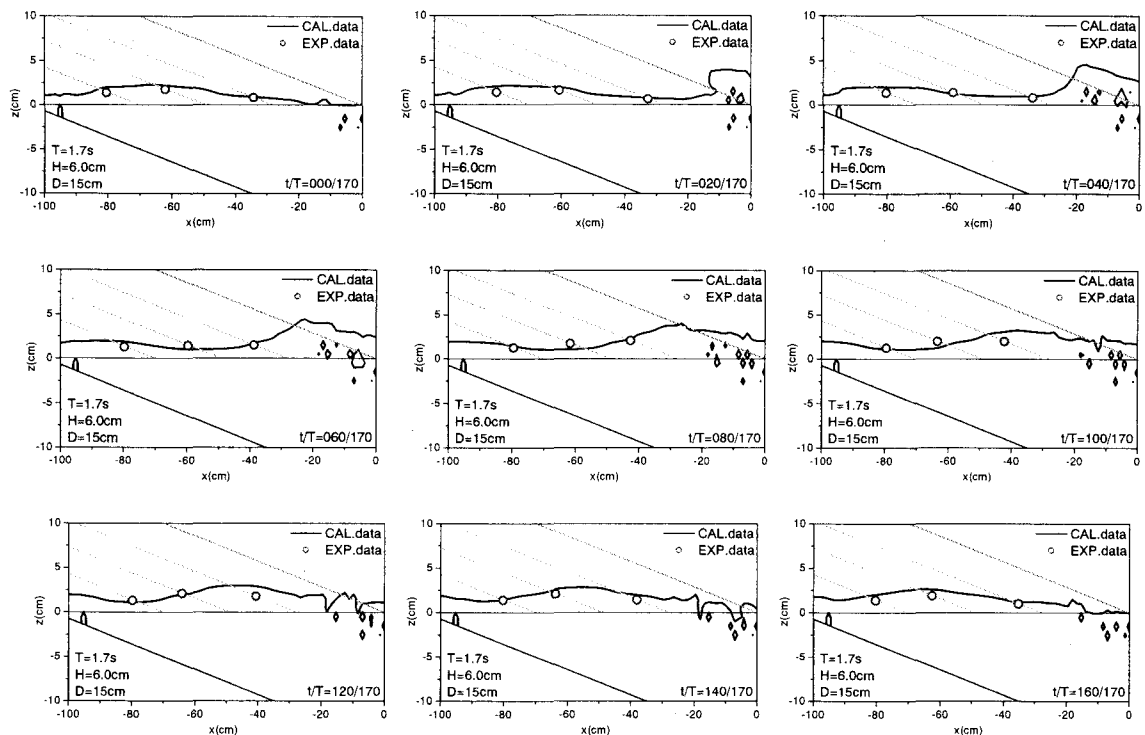


図-7 斜面内の水位変動の比較例

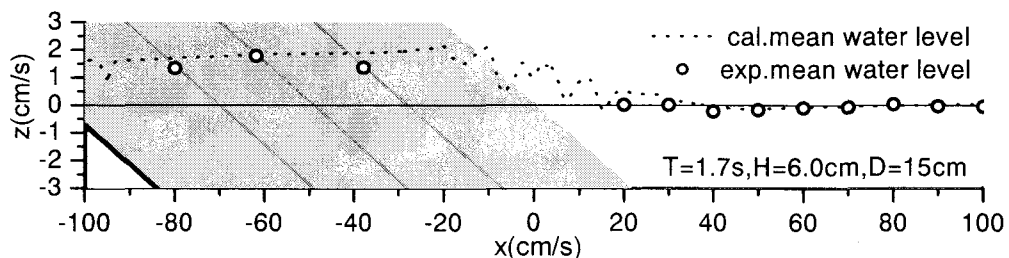


図-8 平均水位の比較例

(3) 平均水位と平均流ベクトル

図-8に、同波浪条件における平均水位の実験と数値計算の比較例を示す。既述したように $x=45\text{cm}$ 付近が砕波点であり、それ以深でwave-setdownが、またそれ以浅でwave-setupが生じている。そして、wave-setupは斜面内でより大きくなる。なお、これ

らの平均水位の特性を本数値計算モデルは良好に再現している。このように、透水性斜面内の流動場を本数値計算モデルは良好に再現していると考えられ、以下に数値計算結果に基づいて透水層内の流動場について検討する。

図-9に平均水位と浸透層内の平均流の空間分布を示す。上段が平均水位、中段が斜面底面の接線方向

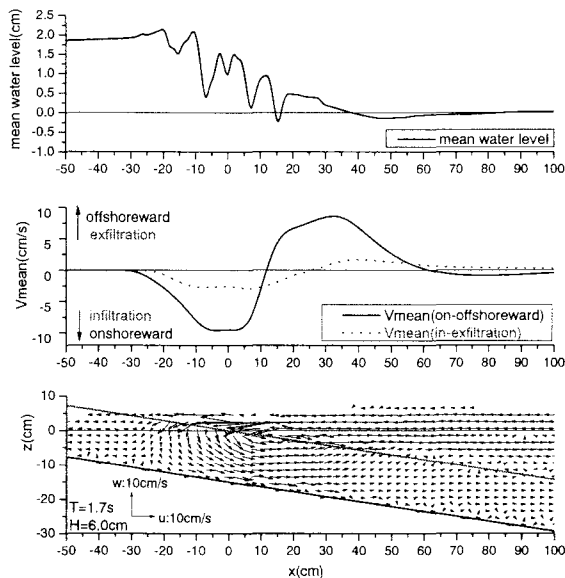


図9 平均水位(上段), 斜面底面接線・法線方向平均流(中段), 平均流ベクトル(下段)の空間分布

と法線方向の平均流速, 下段が平均流ベクトルである。この図より, 平均水位が上昇している部分で浸透域, 平均水位が下降している部分で滲出域となっていることがわかる。すなわち, 斜面底面における圧力分布の差が, 遡上帯で浸透, 砕波帯で滲出といった循環流を形成する原因となっていると考えられる。

写真-1で, 礫層下部の珪砂層が波の作用によって部分的に持ち上げられる様子を示したが, この持ち上げられる部分は浸透層内に形成される上向きの平均流が卓越する場所とほぼ対応していることが確認されている。したがって, 上述のような浸透流が存在することにより, 移動床では, 表層だけでなく, その内部まで底質の移動が生じていることが指摘でき, 海浜変形を考える上で浸透流の影響を考慮することは極めて重要であることが指摘できる。

6. 結論

本研究では, 移動床上の砕波帯以浅の流速場と透水性斜面内を含む水位変動の計測とVOF法にPorous Body Model を組み合わせた手法による数値計算を行って, 海浜斜面内も含めた流速場の特性を検討す

るとともに, 海浜断面の変形に及ぼす流速場特性を考究した。本研究で得られた主要な結論を以下に示す。

- 1) 透水性斜面上の流速場は, 砕波した波峰の通過直後に水平渦が発生し, その直後に鉛直上向きの底面流速が最大となる。
- 2) 透水性斜面では, 遡上波の戻流れが斜面内に浸透し, 浸透した水が斜面に沿って斜面内を冲向きに輸送され, 砕波帯近傍で斜面上に滲出する循環流が形成される。
- 3) 斜面内の流れ場により, 礫浜斜面の底質は, 浸透域で堆積傾向に, 滲出域で侵食傾向になっている。
- 4) 透水性斜面内の水位変動は, 寄せ波時に急速に上昇し, 引き波時には緩やかに下降し, 透水層の深部ほど水位変動の振幅は小さくなる。
- 5) 斜面の透水性を考慮し, 斜面内も含めた流速場特性を把握することは漂砂移動機構を考える上で重要である。

謝辞: 本研究を行うに当たり財団法人堀情報科学振興財団より研究補助を賜った。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Robinson, S. K.: Coherent motions in the turbulent boundary layer, *Ann. Rev. Fluid Mech.*, Vol.23, pp.601-639, 1991.
- 2) Tennekes, H. and Lumley, J.L.: *A first course in turbulence*, The MIT Press, 1972.
- 3) Karniadakis, G.E, Orszag S.A. and Yakhot, V.: Re-normalization group theory simulation of transitional and turbulent flow over a backward-facing step, *Large Eddy Simulation of Complex Engineering and Geophysical Flows*, Galperin, B. and Orszag, S.A. eds., Cambridge University Press, Cambridge, pp.159-177, 1993.
- 4) 出口一郎, 小野正順, 森脇清: 透水斜面上への遡上波の解析, 海岸工学論文集, 第43巻, pp136-140, 1996.
- 5) 土木学会編: 土木工学における数値解析, 流体解析編, サイエンス社, 1974.
- 6) 宮式誠, 藤間聡: 波打ち帯の侵食・堆積過程に及ぼす前浜地下水の流動特性, 土木学会論文集, No.754/II-66, pp.51-61, 2004. 2