

波打ち帯の漂砂量に及ぼす前浜浸透流の流動特性

THE INFLUENCE OF SWASH INFILTRATION-EXFILTRATION ON SEDIMENT TRANSPORT

宮武 誠¹・藤間 聡²

Makoto MIYATAKE and Satoshi TOHMA

¹学生員 工修 室蘭工業大学大学院 工学部建設工学専攻 (〒050-8585 室蘭市水元町27番1号)

²フェロー 工博 室蘭工業大学 工学部建設システム工学科 (〒050-8585 室蘭市水元町27番1号)

The effect on cross shore sediment transport due to seepage are investigated experimentally. The time series data of phreatic surface and height of runup wave, cross shore changes are collected in swash zone. Calculation of infiltration-exfiltration flux show that, in case of eroded beach, the beach face leads to unstable condition caused by fluidsation of upper layer of sediment. Estimating of tractive force with the uplift force due to seepage, present results indicate that the direction of sediment transport changed from onshore to offshore can be evaluated by the infiltration-exfiltration process.

Key Words: infiltration, exfiltration, phreatic surface, runup wave, sediment transport

1. はじめに

砂浜海岸において汀線後退や前浜勾配の急峻化といった侵食現象の解明は、海岸保全上、急務な課題である。そのためには、波打ち帯における地下水の浸透・浸出や前浜砂層内の地下水位変動を考慮に入れた遡上波に関する水理現象を把握することが不可欠である。遡上波による地下水の浸透・浸出を検討した研究は、過去に数多く行われている。浅野ら¹⁾は、乾燥した砂層地盤に遡上波が浸透する状態を再現した Packwood²⁾の数値モデルを用いて、地下水の浸透・浸出が波打ち帯の漂砂量に及ぼす影響を定量的に評価している。また、Butt³⁾は大潮海岸の現地データに基づき、地下水の浸透・浸出効果を考慮した Tuner⁴⁾の修正シールズ数を用いて、漂砂の向きに影響を及ぼす底質砂の限界粒径を考察している。しかし、上記の研究は波浪変形を主眼とした検討であり、地下水の浸透・浸出に重要だと思われる遡上波水位と前浜地下水位の不連続性及び不飽和砂層の水分保湿状態を考慮していない。

本研究は、侵食性及び堆積性の砂浜海岸を想定した海浜変形実験を行い、波打ち帯の遡上波変形や海浜変形に加え、地下水位変動や前浜砂層の水分保湿状態を詳細に測定する。これより波打ち帯の砂層表面で生じ

る地下水の浸透・浸出流束を定量的に評価し、波打ち帯の海浜変形及び漂砂量に及ぼす影響を考察するものである。

2. 波打ち帯の海浜変形と前浜浸透流に関する実験

実験は図-1に示すスネーク式ピストン造波機を有する長さ20 m、幅8 m、高さ70 cmの3次元水槽内に、長さ8 m、高さ70 cm、後浜天端1 mを有する斜面勾配1/10の砂浜模型を作製して行った。砂浜模型の底質材料には中央粒径0.1 mm、比重2.68の珪砂を用い、同砂の透水係数は $K=1.44 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$ である。入射波はすべて規則波とし、沖波波高及び周期を表-1に示す。沖波波長 $L_0 (=1.56 T^2)$ に対する沖波波高 H_0 の比を表す波形勾配 (H_0/L_0) は、侵食性海浜から堆積性海浜が出現するよう同表中のように順次低下させた。造波時間は120分とし、砂浜斜面上の水面変動、遡上波先端位置、砂浜内の地下水位変動の測定を0.2秒間隔で同時に行った。

砂浜斜面上の水面変動は、岸沖方向距離4～7 m区間に容量式波高計を7本設置して測定した。遡上波先端位置は、静水時汀線より鉛直上方1 mに設置したデジタルビデオカメラを用いて撮影し、5 mm間隔の直交格子により目測で読定した。砂浜内の地下水位変動は、直径



実験名	波 高 H_0 (cm)	周 期 T (sec)	波形勾配 H_0/L_0	汀線の 前・後進	砂州の 有・無	バームの 有・無
Run-1	11.0	1.0	0.071	後 進	あ り	な し
Run-2	11.0	1.2	0.049	後 進	あ り	な し
Run-3	11.0	1.4	0.036	後 進	あ り	な し
Run-4	11.0	1.6	0.028	後 進	あ り	な し
Run-5	11.0	1.8	0.022	後 進	な し	な し
Run-6	5.5	1.2	0.024	後 進	な し	あ り
Run-7	5.5	1.4	0.018	後 進	な し	あ り
Run-8	5.5	1.8	0.011	後 進	な し	あ り
Run-9	5.5	2.5	0.0056	前 進	な し	あ り
Run-10	5.5	4.0	0.0022	前 進	な し	あ り

3. 入射波の波形勾配による波打ち帯の侵食現象

Figure 10 consists of four vertically stacked cross-sectional diagrams, labeled Run-1, Run-4, Run-8, and Run-10. Each diagram plots the vertical distance from the mean water level (静水位からの鉛直距離) in cm on the y-axis against the distance from the shoreline (岸沖方向距離) in cm on the x-axis. The x-axis ranges from 220 to 500 cm. The y-axis ranges from -20 to 10 cm. Each diagram shows the relationship between the water level and the distance from the shoreline, with the area of erosion (hatched) and deposition (white) indicated. Key parameters for each run are provided: Run-1 ($H_0=11.0\text{cm}$, $T=1.0\text{sec}$, $H_0/L_0=0.071$), Run-4 ($H_0=11.0\text{cm}$, $T=1.6\text{sec}$, $H_0/L_0=0.028$), Run-8 ($H_0=5.5\text{cm}$, $T=1.8\text{sec}$, $H_0/L_0=0.011$), and Run-10 ($H_0=5.5\text{cm}$, $T=4.0\text{sec}$, $H_0/L_0=0.0022$). Arrows indicate the breaking point (B.P.) and the maximum erosion point (S.W.L.).

Legend:

- ↓ : 砕波点 (B.P.)
- ← : 侵食発生高
- ▨ : 侵食領域
- : 堆積領域

図-2 実験開始 20 分後の縦断地形変化

成される。しかし、波形勾配を減少させた結果、波エネルギーの逸散は碎波帯から波打ち帯までの広範囲に及ぶ。そのため乱れを伴う遡上波が、静水時汀線付近の侵食深を増大させ、洗掘の発生位置は碎波帯から静水時汀線付近に移動する。図中の矢印は斜面上の侵食発生位置を示す。これより後浜侵食は、Run-1の場合に比して更に高い位置から発生する。この結果、Run-1からRun-4へ波形勾配を減少させると、波打ち帯の侵食は進行する。

Run-8,10は波形勾配をRun-4の場合よりも更に減少させた場合を示す。Run-14の場合に生じた沖側の堆積

は岸側に移動し、波打ち帯での洗掘及び侵食発生高はともに減少する。この岸側に形成するバームは、波形勾配の減少に伴い後浜から静水時汀線付近まで拡大し、実験開始 20 分後の汀線は前進する。この結果、Run-4 よりも更に波形勾配を減少させると、波打ち帯の侵食はほぼ停止し、堆積性海浜に移行する。

図-3 は図-2 の縦断地形変化量から漂砂に関する連続式を用いて、岸沖方向の漂砂量を推定したものである。Run-1 から Run-4 へと波形勾配を減少させた結果、洗掘位置が砕波帯から静水時汀線付近に移動するため、波打ち帯の漂砂量は沖向きに増大する。これに対し、Run-4 よりも更に波形勾配を減少させた Run-8, 10 の場合、波打ち帯の漂砂量は沖向きから岸向きへと転じ、Run-1, 4 の場合に生じた沖側の堆積は岸側に移動する。以上の結果、波形勾配の大きい場合に卓越する砕波帯の侵食は、波形勾配の減少に伴い波打ち帯に移動し、更に波形勾配を減少させると、堆積性海浜へと移行する。

本研究は、この波打ち帯の侵食が進行する侵食性から汀線が前進する堆積性に移行する海浜変形過程において、地下水の浸透・浸出がどの程度関与しているかを検討する。

4. 砂層表面における地下水の浸透・浸出分布特性

実験で得た遡上波先端位置及び前浜地下水位の観測値を用いて、遡上波先端流束及び地下水の浸透・浸出流束を算定する。算定に用いたエネルギー方程式は、スカラー量を取り扱ったものであり、流向の異なる遡上波先端流束と地下水の浸透・浸出流束を 1 つの平衡方程式に表すことが可能である。また、遡上波エネルギーの摩擦や乱れによる損失は、解析に用いる実験値にその効果が含まれるため、ここでは特に考慮しないものとする。

図-4 において、 N 波目の入射波が遡上する時(図中 C 点)、静水位から遡上波先端までの高さを η_N とすると、 N 波目の遡上波先端が最大到達点(図中 A 点)に達した時の静水位からの高さ η_{Nmax} との間には、下記のエネルギー平衡式が成立する。

$$\frac{q_w^2}{2} + g\eta_N = g\eta_{Nmax} \quad (1)$$

ここに、 g は重力加速度、 q_w は遡上波エネルギーの消長が地下水の浸透・浸出により生じるものとして、下記のように扱う。

$$q_w = q_0 + w \quad (2)$$

ここに q_0 は不透過斜面の遡上波先端流束、 w は遡上波先端部で生じる地下水の浸透・浸出流束であり、浸透を負、浸出を正とする。地下水の浸透・浸出流束は、斜面上の地下水位(図中 D 点)より上部を不飽和部、下部を飽和部として下記の連続式より算定する。

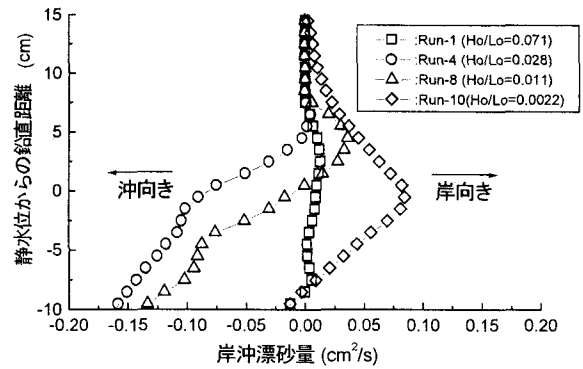


図-3 実験開始 20 分後の岸沖漂砂分布

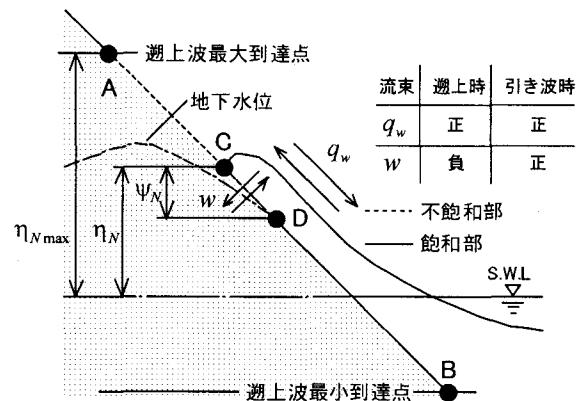


図-4 波打ち帯の水理モデル概要図

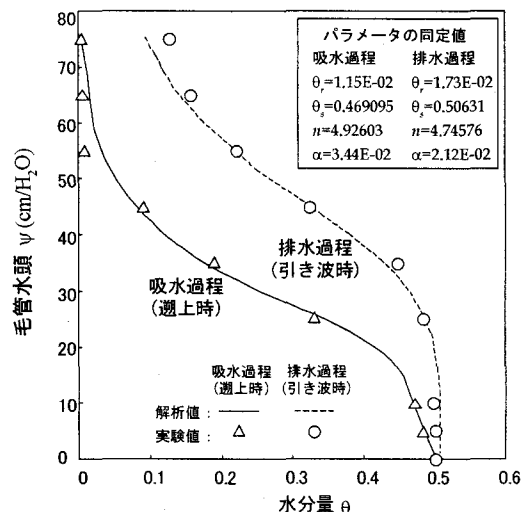


図-5 水分保持特性曲線

$$w = -S_y(\psi_N) \frac{\partial \psi_N}{\partial t} \quad (3)$$

ここに、 $S_y(\psi_N)$ は砂層内外に浸透・浸出する割合を表す比浸出量、 ψ_N は斜面上の地下水位から遡上波先端までの高さを表す毛管水頭である。不飽和部に対する比浸出量の算定は、図-5 に示す土柱法により得た水分保持特性曲線の値を用いる。図中の実線及び点線は下記の van Genuchten⁵⁾ の式において、

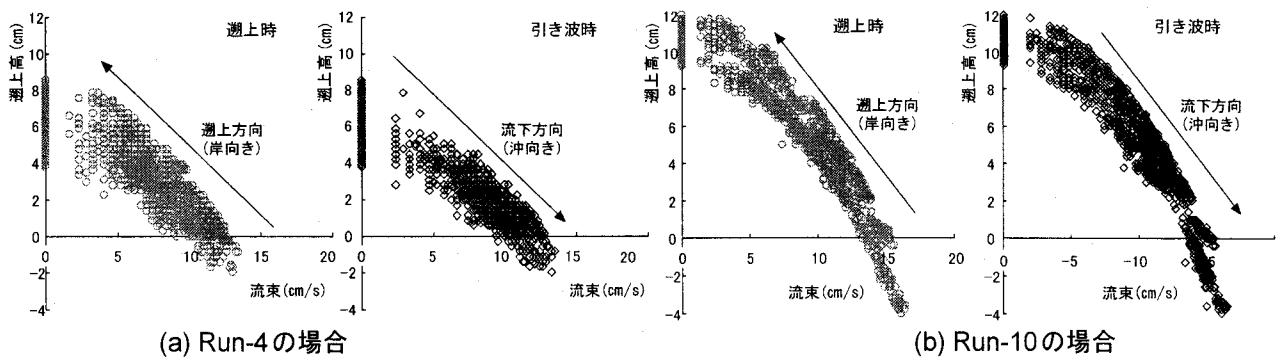


図-6 実験開始20分後における不透過斜面の遡上波先端流速分布

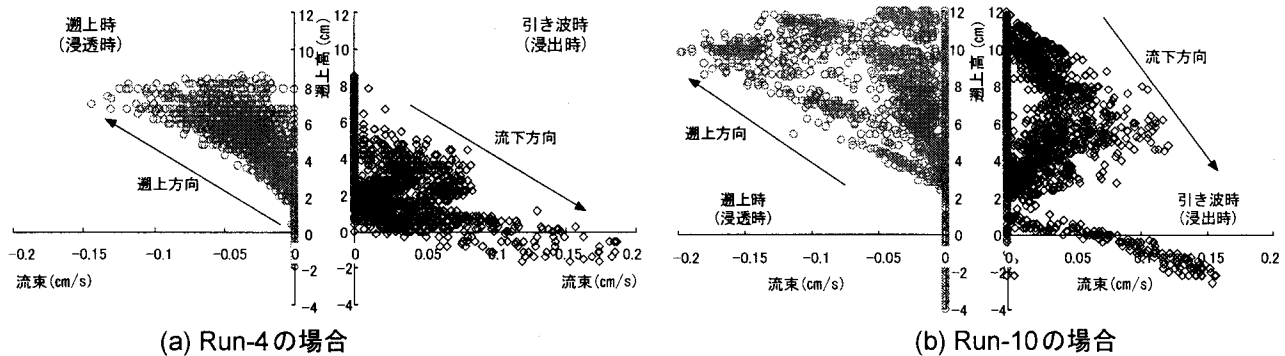


図-7 実験開始20分後における地下水の浸透・浸出流速分布

$$\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \left\{ \frac{1}{1 + (a|\psi_N|)^n} \right\}^m \quad (4)$$

飽和水分量 θ_s 、残留水分量 θ_r 、定数 a, m, n を共役勾配法により同定したものを示す。同図中には、その同定値を表示する。不飽和部の比浸出量は、飽和水分量 θ_s と毛管水頭 ψ_N に対する水分量 $\theta(\psi_N)$ との差として下式で算定する。

$$S_y(\psi_N) = \theta_s - \theta(\psi_N) \quad (5)$$

図-6は、実験開始20分後のRun-4,10における遡上高と不透過斜面の遡上波先端流速との関係を示す。各ケースにおいて、遡上・引き波時における遡上波先端流速はともに遡上高の減少に伴い増加し、その大きさはほぼ等しい分布となる。これより遡上波掃流によって生じる遡上時の岸向き漂砂と引き波時の沖向き漂砂との差し引きは、ほぼ零になると推定される。この結果、遡上波先端流速分布は図-2及び3に示した波打ち帯の縦断地形変化や漂砂分布の特性とは矛盾する。

図-7は、実験開始20分後のRun-4,10における遡上高と地下水の浸透・浸出流速との関係を示す。遡上時に生じる浸透流速は、両ケースともに遡上高の増加に伴い、その絶対値は増大する。この浸透流速は、遡上時の岸向き漂砂を捕捉しているものと推定される。これに対し引き波時の浸出流速分布は、Run-4とRun-10との間に明確な差異が認められる。Run-4の場合、引き波時に生じる浸出流速は遡上波の流下方向に向かって増加し、静水時汀線付近で最大となる。これより静水時汀線付近

では浸透流速よりも浸出流速が卓越し、引き波時の沖向き漂砂の発生を助長させる。この結果、静水時汀線付近の侵食は進行したものと推定される。一方、Run-10の場合、静水位よりも上部で発生する浸出流速は、浸透流速の絶対値に比して小さな分布となる。従って、正味の地下水流速は浸透方向に作用し、岸向き漂砂の捕捉を増大させる。この結果、後浜には大規模なバームが発生したものと推定される。以上の結果、砂層表面における地下水の浸透・浸出流速特性は、波打ち帯の縦断地形変化や漂砂分布の傾向とよく一致することが認められる。

5. 地下水浸透・浸出による前浜砂層の安定・不安定化

前述した地下水の浸透・浸出流速は、遡上波先端流速に比して2オーダー程度小さい値となり、遡上波先端流速を増加あるいは減少させる効果は小さい。しかし、地下水の浸透・浸出流速は、前浜砂層の安定及び不安定化に関して寄与しているものと考えられる。本章では、この寄与の程度を定量的に評価する。

図-8は、引き波時の浸出流速によって砂層表面に加わる浸透力と斜面上の砂粒子自重との力の平衡関係を示す。斜面遡上方向に x 軸、地下水の浸出方向に z 軸をとると、単位面積当たりの浸出流速による浸透力と砂粒子の水中自重との間には、下記の力に関する平衡式が成立する。

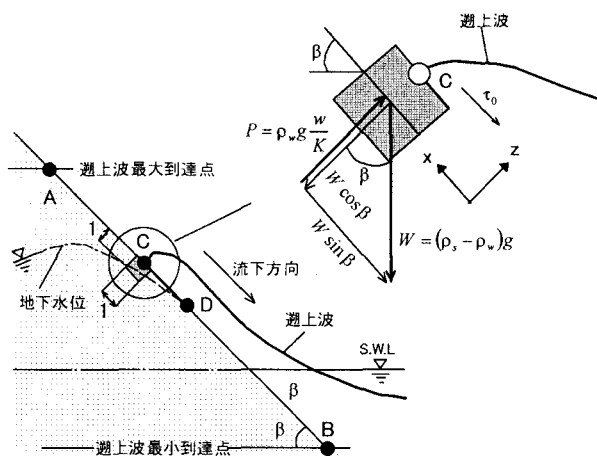


図-8 遡上波先端部の力に関する平衡関係

$$\tan \Phi = \frac{-(\rho_s - \rho_w)g \sin \beta}{-(\rho_s - \rho_w)g \cos \beta + \rho_w g \frac{|w|}{K}} \quad (6)$$

ここに、 Φ は摩擦角、 β は斜面勾配、 ρ_s は砂粒子密度、 ρ_w は水の密度、 g は重力加速度、 w は浸透時に負、浸出時に正となる地下水流束、 K は飽和・不飽和透水係数を示し、不飽和透水係数の算定には図-5に示す水分保持特性曲線を用いる。上式に実験砂の摩擦角 $\Phi=30.7^\circ$ 及び密度 $\rho_s=2.68\text{g/cm}^3$ 、水の密度 $\rho_w=1.0\text{g/cm}^3$ 、斜面勾配 $\beta=5.67^\circ$ をそれぞれ代入し、透水係数で無次元化した地下水流束 $|w|/K$ について求めると、浸透・浸出流束によって、前浜砂層が安定及び不安定な状態になる限界は、下式のように得る。

$$\frac{|w|}{K} = \cos \beta \frac{(\rho_s - \rho_w)g}{\rho_w g} \left(1 - \frac{\tan \beta}{\tan \Phi} \right) = 1.68 \quad (7)$$

これより、地下水流束が透水係数の1.68倍を超えた場合、前浜砂層は浸透時において安定、浸出時において不

安定な状態となる。

図-9(a)はRun-4における無次元浸透・浸出流束分布であり、図-9(b)は図-2で示した縦断地形変化を示す。同図(a)中の実線、点線及び一点破線はそれぞれ侵食発生高、斜面上の地下水位上昇高、最大遡上高を表し、点及び斜線でハッチングした領域は前浜砂層がそれぞれ安定及び不安定な状態であることを示す。これより後浜侵食は、最大遡上高と斜面上の地下水位上昇高との中間の高さから発生し、その高さは無次元浸出流束が1.68を超えた高さに一致する。同図(a)において、無次元浸透流束は遡上高の増加に従い、より安定化に向かう。一方、無次元浸出流束は遡上高の減少に伴い、より不安定な状態に向かう。この結果、不安定な砂層(斜面ハッチング部)が、安定した砂層(点ハッチング部)よりも下部で発生するため、同図(b)の縦断地形変化において、静水時汀線付近では大規模な洗掘が発生したものと考えられる。この地下水の浸透・浸出による前浜砂層の安定及び不安定化は、波打ち帯の遡上波掃流により発生する漂砂の量や向きに影響を及ぼすものと推定される。

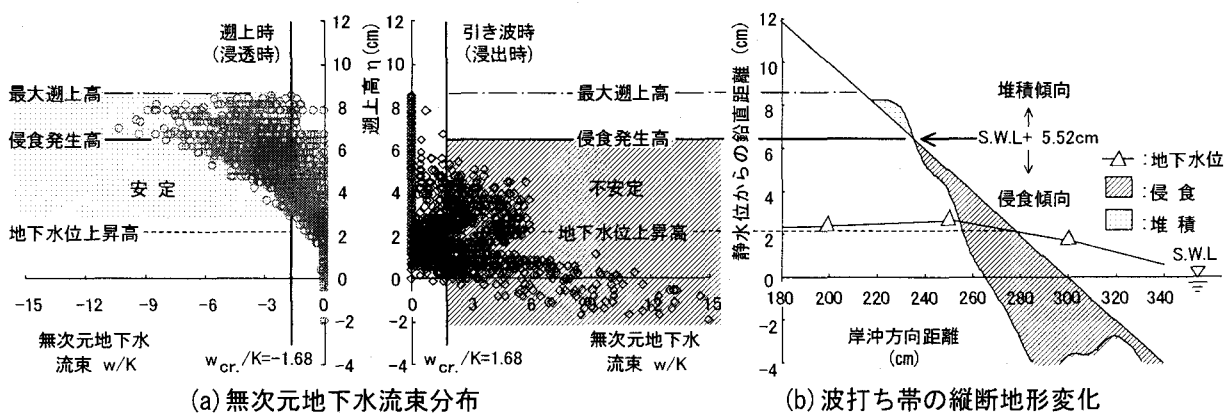
6. 地下水の浸透・浸出を考慮した遡上波掃流力特性

本章では、遡上波掃流のみでは解明できない波打ち帯の縦断地形変化に、地下水の浸透・浸出流束が寄与する程度を定量的に評価する。

図-8中のC点において不透過斜面と考えた場合、遡上波による無次元掃流力は、下式のシールズ数により評価する。

$$\Phi_0 = \frac{\tau_0}{W} = \frac{\rho_w q_0^2}{(\rho_w - \rho_s)gd} = \frac{q_0^2}{(s-1)gd} \quad (8)$$

ここに、 Φ_0 は不透過斜面の無次元掃流力、 τ_0 は不透過斜面上の砂粒子に作用する遡上波掃流力、 W は砂粒子の水中自重、 q_0 は不透過斜面の遡上波先端流束、 g は重力加速度、 s は砂粒子の比重($=\rho_s/\rho_w$)、 d は中央粒径を示す。



(a) 無次元地下水流束分布

(b) 波打ち帯の縦断地形変化

図-9 Run-4における無次元地下水流束分布と縦断地形変化の比較

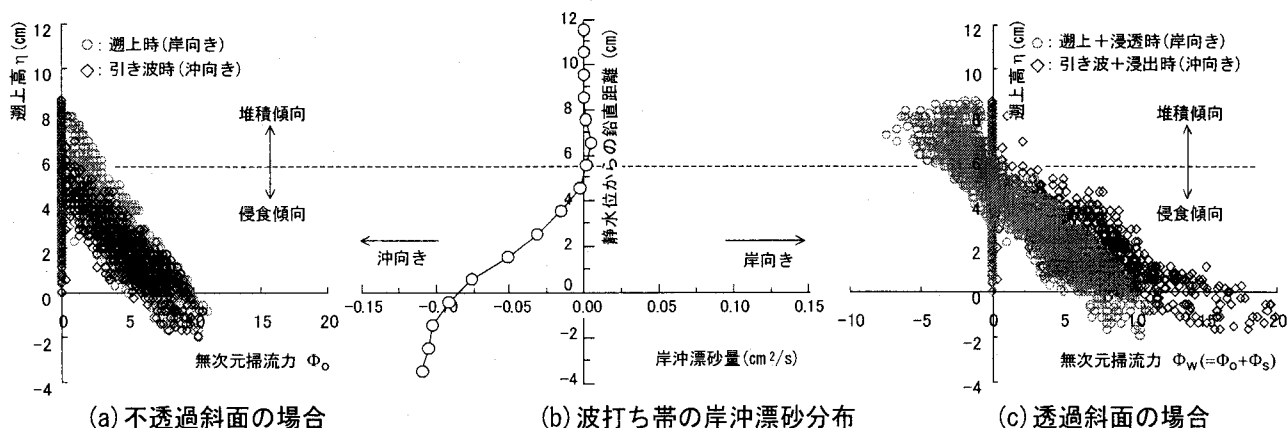


図-10 Run-4における波打ち帯の無次元掃流力と岸沖漂砂量の関係

図-10(a)及び(b)は、Run-4における不透過斜面の無次元掃流力分布と図-3で示した波打ち帯の漂砂分布を比較したものである。図中の点線は、漂砂の向きが岸向きから沖向きへと転じる高さを示す。砂浜斜面を不透過として扱った場合、図中の点線より上部において、岸向きに作用する遡上時の無次元掃流力は、沖向きに作用する引き波時に比して小さくなる。しかし、図中の点線より下部では遡上時及び引き波時の無次元掃流力がほぼ同一な大きさとなる。この結果は同図(b)において、遡上高の減少に伴い、沖向き漂砂が増加する傾向とは一致しない。

この相違点を解明するため、前述した不透過斜面の無次元掃流力に、地下水の浸透・浸出による無次元揚力を導入する。この無次元揚力は、浸透・浸出流束による浸透力を砂粒子の水中自重で除したものであり、下式で表す。

$$\Phi_s = \frac{w}{K} \cdot \frac{1}{\cos \beta} \cdot \left(\frac{\tan \Phi}{\tan \Phi - \tan \beta} \right) / (s-1) \quad (9)$$

ここに、 Φ_s は地下水の浸透・浸出による無次元揚力であり、浸透時に負、浸出時に正をとる。

地下水の浸透・浸出を考慮した透過斜面の無次元掃流力 Φ_w は、不透過斜面の無次元掃流力 Φ_0 に地下水の浸透・浸出による無次元揚力 Φ_s を付加した下式で評価する。

$$\Phi_w = \Phi_0 + \Phi_s \quad (10)$$

図-10(c)は、Run-4における透過斜面の無次元掃流力分布を示す。不透過斜面の無次元掃流力に地下水の浸透・浸出による無次元揚力を付加した結果、浸透斜面の無次元掃流力は同図(a)に比較して、遡上時において(-)側、引き波時において(+)側にシフトした分形形状となる。この結果、浸透斜面の無次元掃流力分布には遡上時と引き波時で明確な差異が現れる。この差異によって生じる無次元掃流力の正味量は、遡上高の減少に伴い(-)側から(+)側へと増加する。これは同図(b)において、波打ち帯の漂砂が遡上高の減少に伴い、岸向きから沖向きに増加する傾向とほぼ一致する。この結果、地下水の浸

透・浸出による無次元揚力を考慮した透過斜面の無次元掃流力は、同図(a)において評価でき得なかった沖向き漂砂を定量的に説明できる。

7. 結 論

本研究で得られた結論を要約すると、下記の通りである。

- (1) 斜面勾配や底質砂を固定した条件下において、波形勾配の大きい場合に卓越する砕波帯の侵食は、波形勾配の減少に伴い波打ち帯に移動し、更に波形勾配を減少させると、堆積性海浜へと移行する。
- (2) 静水時汀線付近で発生する大規模な洗掘は、引き波時の地下水浸出流束が前浜砂層を不安定な状態にさせることに起因する。
- (3) 地下水の浸透・浸出による揚力効果を考慮した結果、遡上波掃流力のみでは説明でき得ない波打ち帯の漂砂量とその向きを定量的に評価できる。
- (4) 既往の遡上波掃流に地下水の浸透・浸出効果を考慮すると、侵食性から堆積性へ移行する波打ち帯の海浜変形過程を包括的に取り扱うことができる。

参考文献

- 1) 浅野敏之、米永敏之：前浜砂層内の浸透流を考慮した波打ち帯の漂砂の解析，海岸工学論文集，第47巻，pp511-515，2000。
- 2) Packwood, A. R. : The influence of beach procity on wave uprush and backwash, Coastal Eng., Vol.7, pp.29-40, 1983.
- 3) Butt, T., Russell, P., Turner, I. : The influence of swash infiltration-exfiltration on beach face sediment transport: onshore or offshore?, Coastal Eng., 42(1), pp.35-52, 2001.
- 4) Turner, I.L. and Masselink, G. : Swash infiltration-exfiltration and sediment transport, J. Geophys. Res., 103, pp.30813-30824, 1998.
- 5) 日野幹雄、太田猛彦、砂田憲吾、渡辺邦夫：洪水の数値予報，森北出版株式会社，pp. 73-75, 1989。

(2002. 9. 30受付)