

境界層の変化を考慮した透水性斜面上の漂砂の解析

浅 野 敏 之*・Md. Azharul Hoque**

透水性斜面上の波動運動と地盤内地下水流を、仮想薄層を介して連続的な流れとして解析し、得られた流体運動から斜面上の漂砂運動を議論した。浸透流・滲出流の漂砂運動に及ぼす効果として、砂粒子に作用する付加的な抗力と、境界層構造の変化の 2 つの相反する効果を取り上げ、斜面上の掃流漂砂量への影響を定量的に評価した。両者の効果の影響下において漂砂の方向を規定する限界粒径と、どちらの効果が卓越するかを判定する限界粒径について考察した。

1. はじめに

新しい侵食制御工法として、サブ・サンド・フィルター工法や透水層埋設工法など、前浜地盤内の地下水位を低下させることによって、砂浜の侵食を制御しようとする試みがなされている(例えば Sato, 1990; 柳島ら, 1995)。この原理は、吸水によって砂粒子に鉛直下向きの付加的な抗力を与え、安定化させようとするものである。

しかし、Conley-Inman (1994) の実験によれば、浸透性底面にサクシオンをかけると境界層厚さが薄くなり、その結果底面摩擦力が増大して、逆に砂粒子が輸送されやすくなることが報告されている。この研究を受けて、最近 Butt ら (2001)、Nielsen ら (2001) は、波打ち帯の漂砂機構に及ぼす浸透・滲出流の効果についての室内および現地実験を行い、サクシオンは細砂に対して安定化を、粗砂に対して不安定化をもたらすことを示している。しかし、こうした効果が透水性斜面上の漂砂に及ぼす影響については、十分な解明がなされていない。

本研究は、一様勾配斜面上の遡上波の水粒子運動と地盤内浸透流の両者を考慮した数値解析結果から、透水性斜面上の漂砂量を計算し、浸透・滲出流の及ぼす効果を検討したものである。本研究では、浸透・滲出流が持つ力学的な作用として、鉛直方向の抗力を付加する作用と、境界層構造を変化させて掃流力を増減させる作用の両者を考慮し、それぞれの卓越する条件と漂砂現象、海底断面変化に及ぼす効果を検討した。

2. 浸透・滲出流による境界層構造の変化ならびに掃流力の変化

地盤内の浸透流・滲出流の漂砂に及ぼす影響は、砂粒子に作用する付加的な抗力と境界層構造の変化の 2 つの相反する作用があることが明らかにされつつある。これは図-1 に模式的に示すように、浸透流については砂面上の砂粒子に下向きの流れによる付加的な抗力が安定化の作用を及ぼす一方で、境界層厚を薄くするために底面摩擦

力を増加させ、底質輸送を活性化させるというものである。滲出流では浸透流の作用と逆の作用となる。

Martin (1970) は、石英砂・ガラス球、ニッケルペレットなど粒径や比重の異なる各種の粒子を用い、定常管路流による底質粒子の初期移動と吸水による浸透流速との関係を調べた。また、Conley-Inman (1994) は、振動流水槽の底面からサクシオンを作用して吸水し、境界層内の流速分布と底面摩擦力を実測することにより、吸水による境界層構造の変化を検討した。これまでの知見をまとめると、細砂など粒径が小さい場合には付加的な抗力の作用が現象を支配し、粒径が粗くなると境界層構造の変化の作用が卓越することが定性的ではあるがわかっている。

Nielsen (1997) は、これら相反する 2 つの作用の漂砂への影響を簡潔に表現する指標として次式に示す修正 Shields 数を提案した。

$$\psi_b = \frac{u_{*0}^2 \left(1 - \alpha \frac{w_p}{u_{*0}} \right)}{g d \left(s_g - 1 - \beta \frac{w_p}{K} \right)} \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 u_{*0} は摩擦速度、 g は重力加速度、 d は中央粒径、 s_g は粒子の比重、 K は透水係数、 w_p は浸透・滲出流速で、浸透流では $w_p < 0$ 、滲出流では $w_p > 0$ とする。無次元量 α 、 β については Nielsen は Martin の実験結果などを踏まえ、また彼ら自身の移動床実験 (Nielsen et al., 2001) を追加して考察し、 $\alpha = 16$ 、 $\beta = 0.35 \sim 0.40$ の値を提唱し

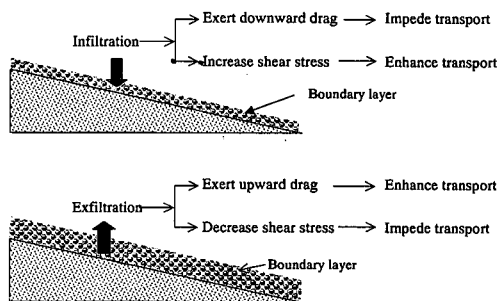


図-1 浸透/滲出流の持つ 2 つの相反する効果

* 正会員 工 博 鹿児島大学教授 工学部海洋土木工学科
** Dr.Eng. 前・鹿児島大学理工学研究科博士後期課程学生

ている。本来の Shields 数と比べて、分子は境界層構造の変化を考慮し、分母は砂面上の粒子に作用する付加的抗力への影響を含めた形となっている。浸透流では $w_p < 0$ であるから、分子は大きくなって Shields 数は増加し不安定化に向かい、分母は大きく Shields 数は減少して安定化に作用する。

3. 数値解析の概要

数値解析は図-2の砂浜地盤モデルを用いて行った。斜面と静水面との交点を原点として、冲向きを正として水平方向に x 軸をとり、鉛直方向に z 軸をとる。斜面勾配を s 、斜面上の地下水滲出面の水平位置と高さをそれぞれ x_{ie} , z_{ie} とする。本研究では z_{ie} は波の遡上高 z_R より高いことを仮定する。波の遡上運動と地下水の流れは斜面上で不連続となるため、斜面の外側に1メッシュ分の幅で地盤の透水係数より1オーダー大きい仮想薄層 CADF を設置し、両者の運動を連続的に接続した。

一方、砂浜斜面上の波動場については Carrier-Greenspan (1958) の理論で求めた。すなわち、斜面上の有限振幅重複波を仮定しており、計算条件は非砕波条件に制約される。これより計算されるピアゾ水頭を斜面上の境界条件として与えて、透過性砂浜地盤内の地下水流の計算を行った。数値解析の詳細は前報 (Hoque・浅野, 2002) を参照されたい。

なお、最近 Karambas (2003) は、波動運動として Bousinesq モデルを用い、地盤内浸透流の解析を組み合わせた数値解析結果を示している。しかし波の作用下における地下水流の解析では、波の水位変動を水平地盤上に transient な水深変動があった場合の鉛直浸透流として扱っており、この点では粗いモデル化となっている。

4. 透水性斜面上の漂砂量の計算

得られた流速場に対して、浸透・滲出流を考慮した斜面上の掃流漂砂量 q の計算を行った。浸透・滲出流の効果は、移動限界シールズ数 ψ_c 、瞬时无次元掃流力 ψ 、移動可能粒子数 n を通じて評価される。その結果は複雑な表示式となるが (浅野・米永, 2000)、もともとのモデル

化 (Kobayashi, 1982) から基本的には $q = f((\psi - \psi_c)^{3/2})$ に近い形となる。

浸透・滲出流を考慮した移動限界シールズ数 ψ_c は次式で与えられる。

$$\psi_c = \frac{1 + b_1 \tan \phi}{1 + (b_1 + w_p/u_c)(w_p/u_c) \tan \phi} \psi_{c0} \quad \dots\dots (2)$$

ここに、 b_1 は砂粒子に作用する揚力の抗力に対する比、 ϕ は粒子の内部摩擦角、 u_c は底質粒子に作用する波の流速振幅である。

瞬时无次元掃流力 ψ については、前出の式 (1) で計算する。ただし本節では、浸透・滲出流が漂砂に及ぼす効果を、境界層構造を変化させる作用 (P, B) と、鉛直方向の抗力を付加させる作用 (P, W)、に分けて考察する際の便宜上、次の2つの Shields 数を新たに導入する。

$$\psi_{P,B} = u_{*0}^2 \left(1 - \alpha \frac{w_p}{u_*}\right) / g d (s_c - 1) \quad \dots\dots (3)$$

$$\psi_{P,W} = u_{*0}^2 / g d \left(s_c - 1 - \beta \frac{w_p}{K}\right) \quad \dots\dots (4)$$

すなわち、式 (3) の瞬时无次元掃流力を用いて漂砂量を計算した場合には、境界層構造の変化の影響のみを抽出することができる。また式 (4) の瞬时无次元掃流力を用いて漂砂量を計算した場合には、付加的な抗力の影響のみを取り出すことができる。本来の式 (1) を用いると両者を考慮した場合の漂砂量が計算できる。ただし、式 (3) と式 (4) を単純に掛けても式 (1) にはならないことに注意する必要がある。

5. 結果ならびに考察

図-3は、細砂 ($d=0.2 \text{ mm}$) に対して、地下水位 z_{ie} が平均海水位より高い条件下 (したがって全位相区間で滲出流が卓越) で、瞬时无次元漂砂量 q^* ($q^* = q/w_0 d$, w_0 は砂粒子の沈降速度) の位相変化を示したものである。滲出流の効果は、砂粒子に作用する付加的な抗力 (下付添字 P, W) と、境界層構造を変化させる効果 (下付添字 P, B) に分けて表示した。滲出流の影響を無視したときの漂砂量 q^* と比較すると、付加的な抗力の影響によって漂砂運動は岸方向にも沖方向にも活発化することがわかる。一方、 q^* と $q_{P,B}^*$ との比較から、滲出流による境界層構造の変化は、岸方向にも沖方向にも漂砂を抑制する働きを示すことがわかる。 $q^* \sim q_{P,W}^*$ の差と $q^* \sim q_{P,B}^*$ の差を比較すると前者の方が数倍大きく、粒径 $d=0.2 \text{ mm}$ の細砂に対しては、付加的抗力の効果が卓越することがわかる。 q_P^* は両者をともに考慮した場合の漂砂量で、 q^* に比べて岸方向にも沖方向にも漂砂量が増加する結果となる。

図-4は、同じ細砂に対する計算条件のもとで、一周期平均無次元漂砂量 Q^* の岸沖分布を示したものである。

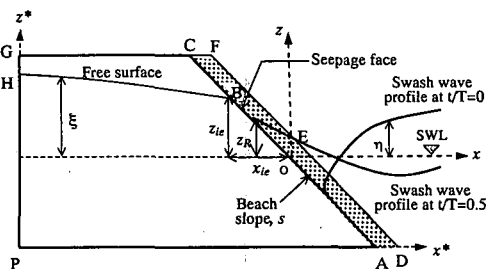


図-2 透水性斜面のモデル

横軸は、遡上波の水平距離 x_R によって無次元化されている。全領域にわたって砂粒子に作用する付加的抗力 (P , W) の効果が、境界層構造の変化 (P , B) の効果より卓越することがわかる。 (P, W) と (P, B) の効果を合成した Q^* は、滲出流の効果を考慮しない Q^* に比べ、すべての波打ち帯領域で沖向きの漂砂を強める結果となっている。すなわち、滲出流の影響によって、粒径 $d=0.2$ mm の細砂で構成される勾配 $s=1/10$ の斜面は侵食性が増大する。

図-5 は、粒径 d を粗砂に対応する 0.7 mm とした結果を示したものである。他の計算条件は、図-3 と同じである。 $q^*_0 \sim q^*_{P,W}$ の差と $q^*_0 \sim q^*_{P,B}$ の差を比較すると、後者の差が圧倒的に大きい。すなわち、粗砂の条件下では、境界層構造の変化の効果 (P, B) が卓越し、漂砂運動が抑制されることがわかる。両者を考慮した q^* は、 $q^*_{P,B}$ と図中では判別ができないほどの近い値となる。

図-6 は図-5 と同じ計算条件に対する 1 周期平均無次元漂砂量 Q^* の岸沖分布の結果を示したものである。滲出流による境界層構造の変化を受けて底面摩擦力は減少し、1 周期平均漂砂量は小さくなっている。漂砂の方向は、斜面勾配 s が $1/10$ と大きいにもかかわらず、岸向となっている。換言すれば、粒径 $d=0.7$ mm の粗砂で構成される勾配 $s=1/10$ の斜面は、滲出流の影響によって堆積傾向が強まることになる。

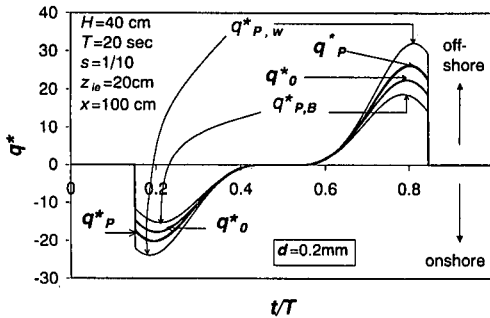


図-3 細砂に対する瞬時無次元漂砂量の位相変化

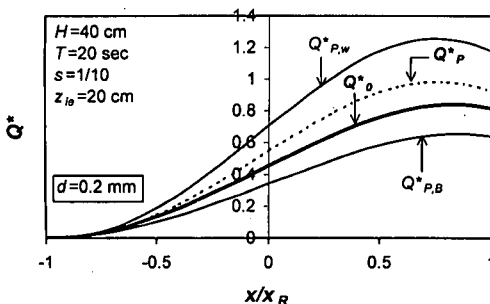


図-4 細砂に対する 1 周期平均無次元漂砂量の岸沖分布

図-7 は、両者の中間の粒径 $d=0.5$ mm (Wentworth の粒径区分 (Dean-Dalrymple, 2002) によれば medium sand と coarse sand の境界) に対する 1 周期平均漂砂量の結果を示したものである。この場合も境界層構造の変化の影響 (P, B) の方が卓越する。両者の効果を合成した Q^* については、波打ち帯のほとんどの領域でわずかに岸向きであるが $x/x_R=0.7$ 付近から沖側では沖向きに転じることがわかる。

さて、図-4、図-6、図-7 から、滲出流の作用下にある 1 周期平均無次元漂砂量は、粒径が細砂から粗砂になるにつれて沖向きから岸向きに転じると予測される。これを示したものが図-8 である。図より粒径 $d=0.5$ mm 付近で砂が移動しない限界粒径 $d|Q^*=0$ が存在する。この値は波高 H や滲出面の高さ z_{ie} が変化しても、ほとんど変化しない。こうした考察は地下水流がある海岸に養浜を行う際に、安定な砂粒径を定める上で必要となると考える。

図-8 の結果には海底勾配 $s=1/10$ の効果を含んでおり、滲出流による漂砂の方向の変化を表現するためには、 Q^*_P と Q^*_B の差で定義される Q^*_B で表示した方が良くと考え、粒径を横軸にとって示したものが図-9 である。図より Q^*_B で表示すると、粒径 $d=0.25 \sim 0.30$ mm 以上で、

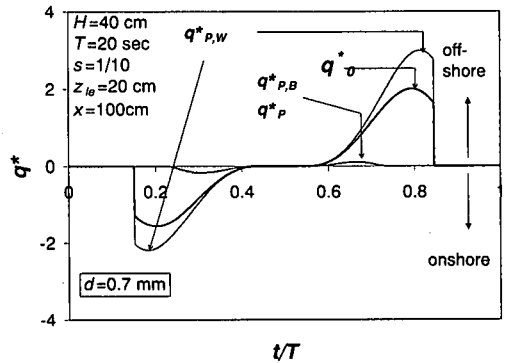


図-5 粗砂に対する瞬時無次元漂砂量の位相変化

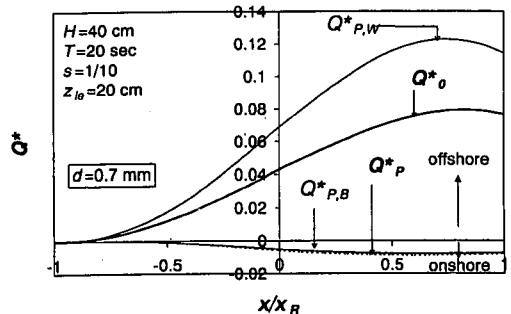
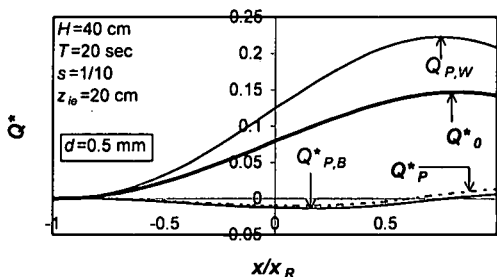


図-6 粗砂に対する 1 周期平均無次元漂砂量の岸沖分布



図一7 中間粒径に対する1周期平均無次元漂砂量の岸冲分布

付加的抗力 P, W より境界層構造の変化 P, B が卓越し、結果として漂砂の方向を冲向きから岸向きへ変えることがわかる。

6. まとめ

斜面上の波浪変形と砂浜地盤内の浸透流解析を仮想薄層を介して結合させた数値解析から、漂砂の外力となる波浪による流れと地下水滲出流を求めた。浸透・滲出流の漂砂の及ぼす効果については、鉛直方向の抗力を付加する作用と境界層構造の変化を作用の両者を考慮した。

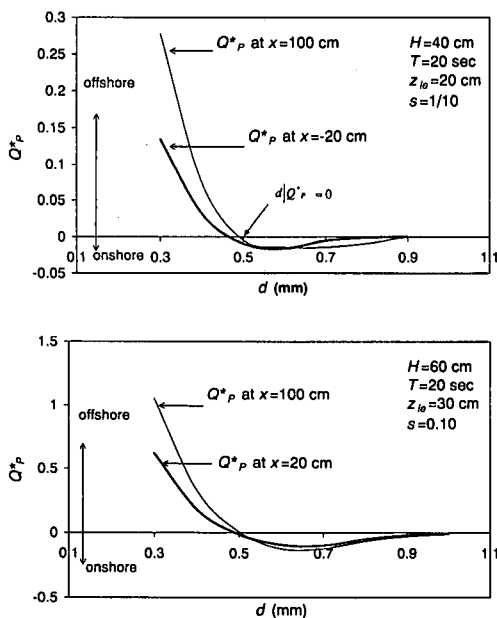
$d=0.2$ mm の細砂では、滲出流による鉛直上向きの付加的抗力によって実効的な粒子重量が減少する効果が卓越し、漂砂は波打ち帯全域で冲向きとなることがわかった。一方、 $d=0.7$ mm の粗砂では、滲出流による境界層厚さの増大による底面摩擦力の減少の効果が付加的抗力の効果より卓越し、漂砂運動は抑制され、1周期平均漂

砂量は岸向きとなることが判明した。

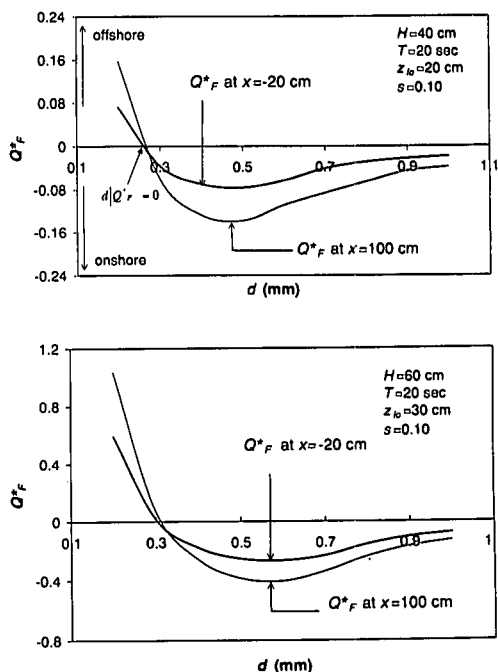
ここで行った計算条件の範囲では、勾配 1/10 の斜面では砂粒子が岸へも沖へも移動しない平衡状態となる粒径は $d=0.5$ mm 付近にあることが明らかにされた。また、 $d=0.25\sim0.30$ mm 付近が付加的抗力と境界層構造の変化の作用の分岐点で、これより粒子が細くなると、滲出流は沖側への漂砂移動に寄与し、粗い場合には岸側への漂砂移動に寄与することがわかった。

本研究は、地下水位が海水面より高く滲出流が生起する条件下で考察を行ったが、この結果を基に地下水面が海水面より低い場合を推測すれば、吸水による海浜安定化工法の適否を考える上で重要な示唆を与えられると思われる。すなわち、吸水による浸透流は細砂の地盤に対しては、確かに下向きの付加的な抗力により侵食に対する安定化が期待できようが、粗砂の地盤に対しては波動境界層厚を薄くし底面摩擦力を増加させる効果が卓越するので、意図に反して冲向きの漂砂量を増加させることが考えられる。両者の効果のどちらが卓越するかを決める限界粒径が、上記検討で得られた値と同様なものかどうかは、今後検討すべき課題と考える。

謝辞：本研究を遂行するにあたり、科学研究費補助金（基盤研究(A)(2)、代表：酒井哲郎京都大学大学院教授、課題番号 14205072）の補助を受けたことを記し、謝意を表す。



図一8 粒径と1周期平均無次元漂砂量 Q^* との関係



図一9 粒径と $Q^* = Q^*_{P,W} - Q^*_{P,B}$ の関係

〔訂正〕 前報(Hoque・浅野：海岸工学論文集，第49巻)に記述ミスがありました。p. 459 左欄 4行目～7行目および10行目を次のように訂正致します。

「自体は小さくなるが，滲出流による影響は大きくなる。この結果を百分率で表したものが図-10であり，滲出によって $d=0.10$ cmの場合には最大で14%の漂砂量の増大があることがわかる。」

「滲出流による漂砂量の増大が大きいことがわかる。」

参 考 文 献

浅野敏之・米永敏之 (2000): 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, pp. 511-515.
 Hoque, M. A.・浅野敏之 (2002): 浸透・滲出を考慮した波打ち帯の流速場と漂砂に関する数値解析, 海岸工学論文集, 第49巻, pp. 456-460.
 柳嶋慎一・加藤一正ら (1995): 現地海岸に埋設した透水層の排水流量と前浜地形変化, 海岸工学論文集, 第42巻, pp. 726-730.
 Butt, T., P. Russel and I. Turner (2001): The influence of swash infiltration-exfiltration on beach face sediment transport: onshore or offshore?, Coastal Engineering, Vol. 42, pp. 35-52.

Carrier, G. F. and H. P. Greenspan (1958): Water waves of finite amplitude on a sloping beach, J. Fluid Mech., Vol. 4, pp. 97-109.
 Conley, D. C. and D. L. Inman (1994): Ventilated oscillatory boundary layers, J. Fluid Mech., Vol. 273, pp. 261-284.
 Dean, R. G. and R. A. Dalrymple (2002): Coastal Process with Engineering Applications, 2.3 Grain Sizes, Cambridge University Press, 475 p., pp. 22-29.
 Karambas, T. V. (2003): Modelling of infiltration-exfiltration effects of cross-shore sediment transport in the swash zone, Coastal Engineering Journal, Vol. 45, No. 1, pp. 63-82.
 Kobayashi, N (1982): Sediment Transport on a Gentle Slope due to waves, J. Waterways, Port, Coastal and Ocean Div., Vol. 108, WW3, pp. 254-271.
 Martin, C. S. (1970): Effect of a porous sand bed on incipient sediment motion, Water Resource Research, Vol. 6, No. 4, pp. 1162-1174.
 Nielsen, P. (1997): Coastal groundwater dynamics, Proc. Coastal Dynamics '97, pp. 546-555.
 Nielsen, P., S. Robert, B. M. Christiansen and P. Oliva (2001): Infiltration effects on sediment mobility under waves, Coastal Engineering. Vol. 42, pp. 105-114.
 Sato, M. (1990): Under-groundwater table and beach face erosion, Proc. 22nd I. C. C. E., Vol. 3, pp. 2644-2657.