

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

Md. Azharul Hoque*・浅野敏之**

本研究は、前浜斜面上に透水係数がオーダ一的に大きい仮想的な薄層を設定して、前浜地盤内の自由地下水面の滲出面と斜面上の翹上波先端的接合処理を行うことにより、斜面上の波浪変形と砂層地盤内の浸透流解析を結合させた数値解析を行ったものである。こうして得られた透過性斜面上の流速場から漂砂量の時間変動を計算し、net の漂砂量の空間分布を求めた。波浪条件・底質条件・地形条件・地下水面の位置等を変えた系統的な計算結果から、波打ち帯の漂砂に及ぼす浸透・滲出流の効果を検討した。

1. はじめに

波打ち帯の漂砂現象を複雑にする原因の1つとして、砂層地盤内からの浸透流・滲出流の影響が挙げられる。潮位差の大きい海岸においては、急速な張潮・落潮に地下水面が追従せず、地下水面と海面との位置関係によって、砂浜上の流れと漂砂は不透過を仮定した場合とは異なる様相を示す。これまでの研究から、通常の砂浜の粒径では浸透・滲出流が斜面上の波・流れに及ぼす影響は無視でき、また波の周期の時間スケールでは漂砂に与える影響も大きくないことがわかっている。しかし、長時間スケールでは、漂砂や地形変動に与える影響は決して無視できず、潮位変化に伴う地下水位の変化による前浜の砂移動への影響について多くの研究がなされてきている（例えば Butt ら, 2001）。

著者らは、波打ち帯では底質粒子が波の作用を1周期を通じては連続的に受けないことに着目し、斜面上の漂砂量の特性的について研究を行ってきた（浅野・米永, 2000; Hoque・浅野, 2001）。前者の研究では、砂層地盤内への浸透流を鉛直成分のみをもつ定常浸透流として解析し、移動限界掃流力および掃流漂砂量に及ぼす影響についての定量的表示式と図表を提示した。ここでの浸透流の解析は、限定された条件下の簡単なモデルであって、この部分の高精度化が課題として残された。後者においては、遡上波の運動を Carrier-Greenspan (1958) の解析解で与え、広範な条件下で系統的な漂砂量の解析を行ったが、この研究では砂浜斜面を不透過と仮定したため、ほとんどのケースで net の漂砂は冲向きとなってしまう、堆積型に相当する波と底質の条件下でも岸側への底質輸送が再現できないという問題が残された。

こうした透過性斜面上の遡上波の解析では、高速度の斜面上の波動運動と砂層地盤内の緩慢な流体運動をどのように接続するかが問題となる。本研究では、杉尾・森(1989)の提案した境界面処理を採用した。すなわち、前浜斜面上に透水係数がオーダー的に大きい仮想的な薄層

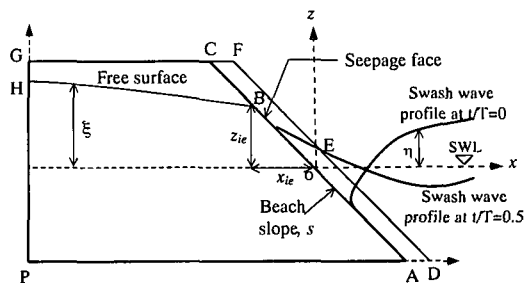
を設定して、前浜地盤内の自由地下水面の滲出面と斜面上の遡上波先端の接合処理を行った。こうして得られた流速場から漂砂量の時間変動を計算し、1 周期平均漂砂量の空間分布を求めた。波浪・底質・地形・地下水面位置などをパラメーターとした系統的な計算結果を行い、波打ち帯の漂砂に及ぼす浸透・滲出流の効果を検討した。

2. 数値解析モデル

2.1 砂浜地盤内の浸透流の数値モデル

砂浜地盤内の不圧地下水流に関して、宮武ら（2001）が不飽和砂層内の水分保湿状態を考慮した数値解析を行っている。こうした不飽和解析法は、砂層地盤全域を解析対象とできるが、不飽和透水係数と体積含水率および毛管水頭と体積含水率の関係を知る必要があって複雑となる。一方、飽和解析法は、砂層地盤内の自由地下水面が解析領域の境界となるために、時々刻々変化する自由水面位置を求める自由境界値問題となるが、地盤内の水分保持特性を考える必要が無く、その意味では取扱いは容易となる。本研究ではこの方法で地盤内の浸透流を解析した。本解析で使用する砂浜地盤モデルを図-1に示す。斜面と静水面の交点を原点とし、沖向きを正として水平方向に x 軸ととり、鉛直方向に z 軸をとる。図中の記号で s は斜面勾配、 ξ は海面静水位からの地下自由水面の高さ、 x_{ie} 、 z_{ie} はそれぞれ斜面上の滲出面の水平位置と高さである。

砂層地盤内の浸透流の基礎方程式は次の通りである。



図一1 解析領域と座標系

$$S \frac{\partial \phi}{\partial t} = k \left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} \right) \dots\dots\dots (1)$$

$$u = -k \frac{\partial \phi}{\partial x}; \quad w = -k \frac{\partial \phi}{\partial z} \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 ϕ はピエゾ水頭、 u, w は x, z 軸方向の水粒子速度、 k は透水係数、 S は貯留係数である。

地下自由水面 $z = \xi$ における運動学的境界条件は以下のようなになる。

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} = \frac{k}{n} \left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \frac{\partial \xi}{\partial x} - \frac{\partial \phi}{\partial z} \right) \text{ at } z = \xi \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 n は空隙率である。上式の計算では自由表面上の流速 $\partial \phi / \partial x, \partial \phi / \partial z$ が必要であるが、これは格子点とは一般に一致しないので、自由表面に直近の流体層内にある 2 格子の値を外挿する (数値流体力学編集委員会, 1995)。自由表面の傾き $\partial \xi / \partial x$ は計算格子のアスペクト比 $\Delta z / \Delta x$ を越えないように、 $\Delta z / \Delta x = s$ (s は斜面勾配) となる扁平な格子システムを採用した。また、式 (1) 中の 2 回微分についても自由表面の直近の格子点で値を求める場合には、次式のように差分式をとった。

$$\left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} \right)_A = \frac{2}{(\Delta x)^2} \left\{ \frac{1}{\lambda(1+\lambda)} \phi_B + \frac{1}{1+\lambda} \phi_C - \frac{1}{\lambda} \phi_A \right\} \dots\dots\dots (4)$$

上式では x に関する 2 回微分について例示している。ここで λ は自由表面の内分点であり、添字記号の位置関係は図-2 に示すとおりである。

2.2 波の場の解析

斜面上の波動場は非線形長波方程式を基礎式とし、Carrier-Greenspan (1958) の解法で計算した。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(u_w h)}{\partial x} = 0 \dots\dots\dots (5)$$

$$\frac{\partial u_w}{\partial t} + u_w \frac{\partial u_w}{\partial x} + g \frac{\partial h}{\partial x} = g \frac{\partial d_0}{\partial x} \dots\dots\dots (6)$$

ここに、 u_w は波動運動による水平方向水粒子速度、 h は全水深、 d_0 は静水深、 g は重力加速度である。

砂層地盤内の流れとは、図-1 中に示した透水係数の

大きい仮想的薄層を介して接続する。検討の結果、この薄層の水平幅は水平方向格子幅 Δx と等しくとり、薄層内の透水係数は砂層内のその 10 倍とした。なお、この設定は、オーダーが異ならない限り、浸透流の結果にはほとんど影響を与えないことがわかった。しかし、薄層幅を Δx の数倍と大きくすると、遡上端と地下水面を直線的に接続するため、波の水粒子速度の再現精度は悪くなる。鄭ら (1999) や柿沼 (2001) は、遡上波先端の運動を移動境界値問題でなく固定境界値問題として取り扱うために、砂浜斜面領域を一定水深の透過性領域とし、斜面表面で空隙率を 0 から 1 に急変させて実質的に斜面領域の存在を考慮する手法を提案しているが、本研究の手法も同じ発想のモデル化と考えられる。

波の運動はその全水頭を斜面上で与えることにより、砂浜内の浸透流に作用することになる。

2.3 漂砂の解析

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の計算を行った。浸透流・滲出流の効果は砂粒子に作用する抗力の形で評価され、移動限界シールズ数、単位底面積あたりに移動可能な粒子数に反映されて漂砂量を変化させる。詳細は、浅野・米永 (2000) に譲る。波や底質の諸元、地下水位などのパラメータを変化させ、漂砂量に及ぼす影響について考察した。

3. 計算結果ならびに考察

3.1 滲出流による前浜斜面上の流速場の変化特性

最初に、地下水位が静水時海面より高い場合、すなわち、前浜からの滲出流が支配的な条件下における計算結果を示す。

図-3 は、滲出面の位置 $x_{ie} = -300$ cm の時に、前浜斜面上の位置 $x = 200$ cm, 100 cm, -100 cm における地下水流の時間波形を遡上端位置 x_{shore} の時間波形とともに示したものである。 $t/T = 0.0$ は、図-3 上段図ならびに図-1 の遡上波の波形からもわかるように、最も波が引いた位相であり、地下水流の速度は u, w ともに最大となる。また $t/T = 0.5$ は波が最も打ち上がった位相となるため、そこでは流速は極小となる。また計算条件によって絶対値は変化するが、斜面勾配 $s = 0.1$ の結果では鉛直成分 w は水平成分 u より 10 倍ほど大きい。なお、図中の一部の曲線については、全位相区間にわたって表示していないが、この区間は波の打ち上がっていない位相区間に相当する。これに関しては図-6 で後述する。

図-4、図-5 は、それぞれ滲出面の位置 x_{ie} (= 滲出面の高さ $z_{ie} \times 0.1$)、前浜底質粒径 d を変化させた時の地下水流の鉛直方向流速 w の変化を示したものである。滲出流を駆動する水頭の増大ならびに粒径の増大による透水性の増大が、大きな滲出流速を生じさせることがわかる。

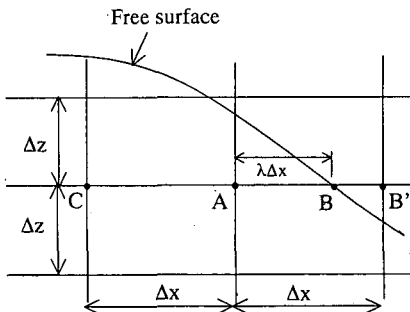


図-2 自由地下水面近くの差分スキーム

図-6は、滲出面の位置 $x_{ie} = -100$ cmの時に、最大打ち上げ高近くの前浜斜面上 $x = -75$ cmの位置での地盤内水平流速 u 、鉛直流速 w の時間的変化を示したものである。図より、 t/T が0.4~0.6以外の区間では u, w ともに正となっており、ほぼ一定の滲出流が発生しているが、遡上波が来襲して x_{shore} が着目する地点 x を越える $t/T = 0.4 \sim 0.6$ の区間では急激に滲出流が小さくなることからわかる。一方、鉛直流速 w についてはその前に一旦流速が大きくなっている。これは、前述の仮想的薄層を導入したことによる擾乱で、図-7に示すように領域 BEE' 内の格子点 N3, N4, N5 の地下水流の計算には遡上波の全水頭値を与えることができず、BE を結んだ形式的な位置水頭のみが与えられたことに起因する。また砂浜斜面を階段状の格子で表現したことも擾乱の一因となる。これらは今後の検討課題といえるが、以下の漂砂量の計算では、滲出高さ B ではなく波の解析から得られる遡上端 E' の位置で波の作用の有無を判定しており、上記の流速波形の擾乱は計算結果に含まれないことを記しておく。

3.2 滲出流が漂砂量に与える影響

図-8は、無次元岸沖漂砂量 $Q_x/w_0 d$ (w_0 は底質粒子の沈降速度) の時間波形を、地下水流の鉛直方向成分 w 、

遡上波による水平方向水粒子速度 u_w とともに示したものである。地下水流の水粒子速度 u, w は、波による水粒子速度 u_w と比して小さく、特に水平成分 u は同じスケールでは0に近くなって図示できないので省略した。浸透流・滲出流の漂砂量に与える影響はわずかであり、図中では同じ曲線としか認識できない。しかし、滲出流によって一周期を通じて沖向きの漂砂量が強まるため、日単位の長期スケールでは無視できない影響を与える。

つぎに1周期平均した漂砂量 $\bar{Q}$ の斜面上各点での空

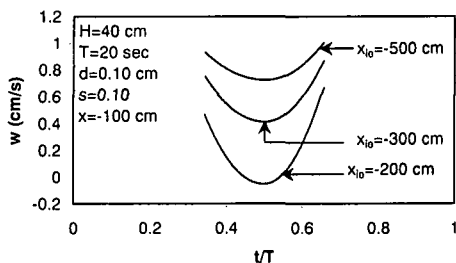


図-4 滲出面の位置 x_{ie} をパラメータとしたときの滲出流の鉛直成分の位相変化

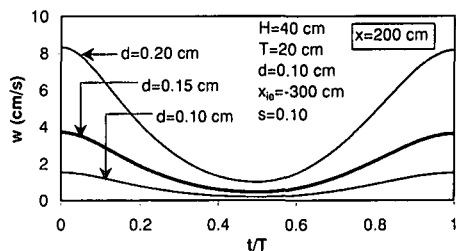


図-5 粒径 d をパラメータとしたときの滲出流の鉛直成分の位相変化

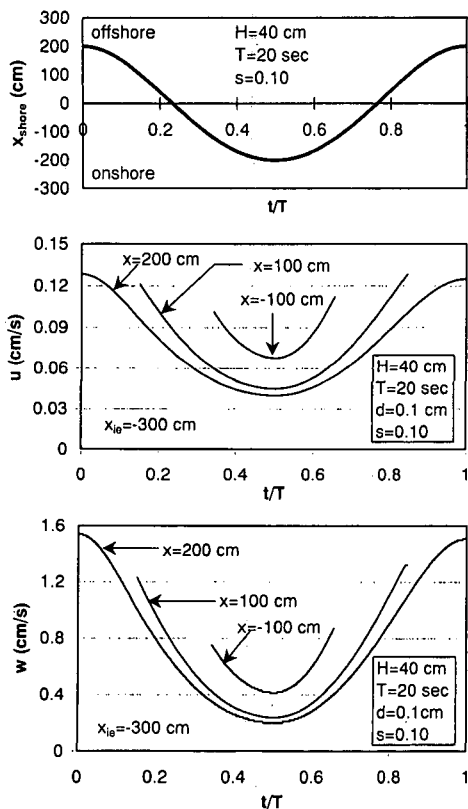


図-3 遡上端先端位置および滲出流速の位相変化

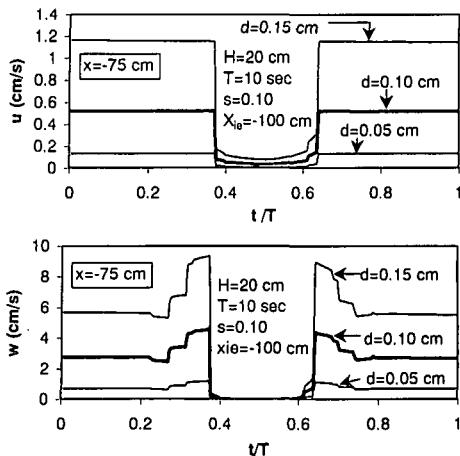


図-6 遡上端先端付近での滲出流速の位相変化

間分布について調べた(図-9)。静水時汀線より岸側($x < 0$)における漂砂量は波の作用時間が短いため小さい。粒径 d が0.07 cmから0.10 cmと大きくなると漂砂量自体は小さくなるが、浸透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、浸透によって $d=0.10$ cmの場合には最大で14%の漂砂量の低減があることがわかる。

図-11と図-12は、それぞれ波高 H と斜面勾配 s をパラメータとした結果である。図-11より波高が大きいほど、滲出流による漂砂量の低減が大きくなる。図-12からは斜面勾配が急になると外力となる波の水粒子運動が小さくなるために、漂砂量自体が小さくなることが理解される。

3.3 前浜斜面上の浸透流が漂砂量に与える影響

前節までは滲出流が存在するときの水粒子速度場と漂

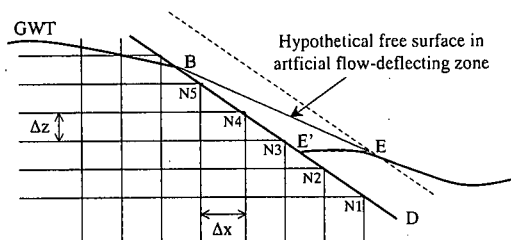


図-7 仮想薄層と遡上端付近の処理

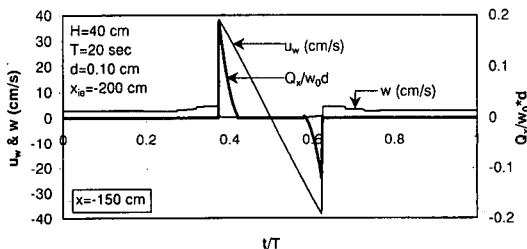


図-8 波による水粒子速度 u_w 、滲出流速 w および漂砂量 Q_x/w_0d の時間波形

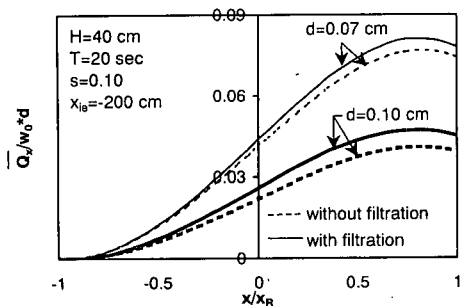


図-9 1周期平均漂砂量の岸沖分布

砂量の計算結果を示したが、次に、浸透流の影響が卓越するときの計算結果について考察する。

図-13は地下水位が静水時海面と同じ高さにある条件下で、静水時海面より岸側($x < 0$)の漂砂量を計算した結果である。この領域では、遡上した水塊は地盤内に浸透していくから、遡上端に近づくほど($x/x_R \rightarrow -1$ となるほど)浸透によって沖向き漂砂量が減少する。粒径が大きいほど(図-13(a))、波高が小さいほど(図-13(b))元の漂砂量からの減少率は大きくなる。ただし、結果は百分率で表しており、漂砂量自体はこの計算条件下では沖向きである。1周期漂砂量自体は遡上端

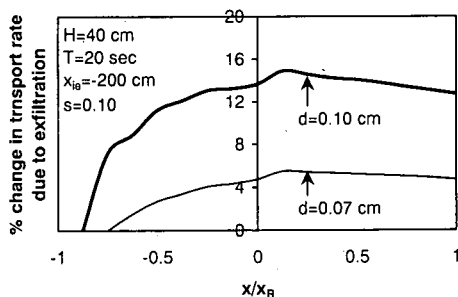


図-10 1周期平均漂砂量の岸沖分布(百分率表示)

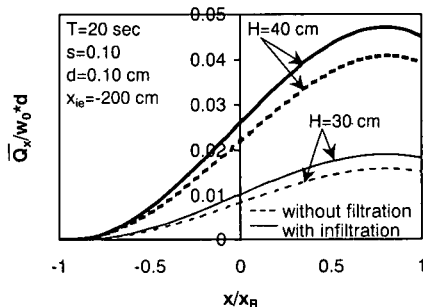


図-11 1周期平均漂砂量の岸沖分布(パラメータは波高)

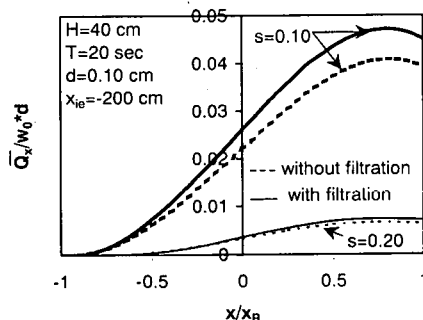


図-12 1周期平均漂砂量の岸沖分布(パラメータは斜面勾配)

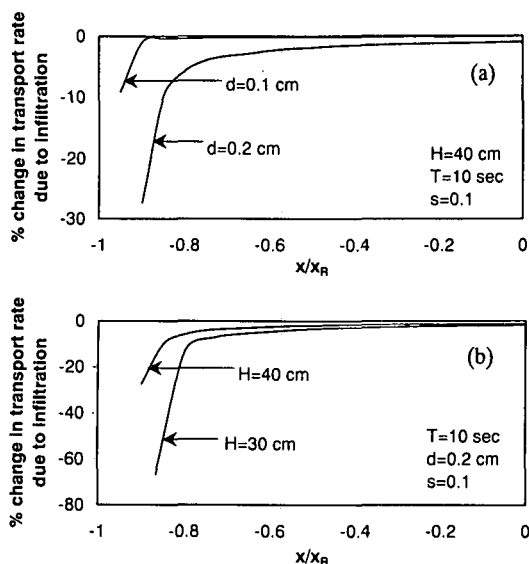


図-13 前浜斜面への浸透による漂砂量の減少(百分率表示)

に近づくほど、波の作用が低減するため、小さくなっていく。

4. むすびに

前浜斜面からの滲出流・浸透流が斜面上の流れや漂砂に及ぼす影響を数値解析によって検討した。前浜斜面上に透水係数が1オーダー大きい仮想的な薄層を介して斜面上の滲出面と遡上波先端を接合する手法を示し、斜面上の波浪変形と砂層地盤内の浸透流解析を結合させた数値解析を行った。透過性斜面上の流速場から漂砂量の時間変動とその1周期平均値を計算し、波や底質・地下水位などの条件が漂砂量をどれだけ変化させるかを、前浜斜面上の空間分布の形で定量的に示した。

その結果、滲出流はここで行った計算条件の範囲で漂

砂量を最大14%増大させ、その影響は静水時汀線よりやや沖側の点で大きくなることがわかった。粒径が増加するにつれ漂砂量自体は小さくなるが、滲出流の影響は大きくなった。一方、浸透流の影響は、遡上端付近に限定して現れ、漂砂量を減少させることがわかった。

謝辞：宮崎大学工学部の杉尾哲教授から浸透地盤内の流れの計算に関してご教示頂いたことを付記し、謝意を表します。

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.
- 柿沼太郎 (2001): 透水性海浜における内部波の挙動の数値計算, 海岸工学論文集, 第48巻, pp. 146-150.
- 数値流体力学編集委員会 (1995): 移動境界流れ解析, 東京大学出版会, 184 p, pp. 15-50.
- 杉尾 哲・森 耕司 (1989): 浸透層条件が不圧浸透地盤内の塩水侵入に及ぼす影響について, 土木学会論文集, 第411号, II-12, pp. 73-80.
- 鄭 培喜・余 錫平・磯部雅彦 (1999): 遡上波の高精度数値計算法の開発, 海岸工学論文集, 第46巻, pp. 181-185.
- 宮武 誠・藤間 聡・川森 晃 (2001): 前浜浸透流が汀線侵食現象に及ぼす影響について, 海岸工学論文集, 第48巻, pp. 151-155.
- Hoque, M. A.・浅野敏之 (2001): 1周期内で部分的に波の作用を受ける波打ち帯の漂砂の特性, 海岸工学論文集, 第48巻, pp. 491-495.
- Butt T., P. Russell 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 Greenspan, H. P. (1958): Water waves of finite amplitude on a sloping beach, J. Fluid Mech., Vol. 4, pp. 97-109.
- Sugio, S. and Desai, C. S. (1987): Residual flow procedure for sea water inclusion in unconfined aquifers, Int. J. Num. Meth. Engrg., Vol. 24, pp. 1439-1450.