

## 前浜浸透・滲出流を考慮した波打ち帯の飽和・不飽和斜面の漂砂輸送解析

Prediction of sediment transport in swash zone considering saturated-unsaturated ground water flow

函館工業高等専門学校  
日本データサービス株式会社  
函館工業高等専門学校

○学生会員  
正社員  
正会員

石橋さくら (Sakura Ishibashi)  
越智聖 志 (Ochi Masashi)  
宮武 誠 (Makoto Miyatake)

## 1. はじめに

波打ち帯の漂砂移動は、浜崖の形成や汀線後退、それに伴う底質の粗粒化といった汀線付近の侵食現象が直接影響しており、その定量的な評価は重要な課題である。しかし、波打ち帯の漂砂移動は、遡上波水塊が非常に希薄であることに加え、遡上波水位と地下水位が不連続となるため、現象の複雑さや測定の困難さから現象解明及び理論構築の妨げとなっている。遡上波斜面を透過性と考え、波の遡上に伴う前浜斜面の浸透・滲出流を考慮した波打ち帯の漂砂解析モデルは過去に数多く提案されており、例えば浅野・Hoque<sup>1)</sup>は Carrier-Greenspan の理論を用いた斜面上の波浪変形と砂浜地盤の2次元飽和浸透流を仮想薄層を介して結合させた数値解析から地下水流を推定し、波打ち帯の漂砂移動に及ぼす浸透・滲出流の影響に関し、鉛直方向の抗力と境界層変化の両面から考察している。しかし、上記を含むこれまでに提案されたモデルのほとんどは前浜域の飽和砂層を対象としており、不飽和斜面を包含したモデルは数少ない。

白水ら<sup>2,3)</sup>は模型実験から不飽和砂層域でのサクシオン動態が底質の間隙収縮やせん断強度に影響を及ぼすことを明らかにするとともに、それらが前浜地形の安定に寄与することを指摘している。以上より不飽和領域を包含した前浜砂層の飽和度は、波打ち帯の漂砂移動や前浜域の地形変化に重要な役割を果たしているものと考えられる。

一方、宮武ら<sup>4)</sup>は段波作用下における波打ち帯の漂砂移動に関して蛍光砂を用いた可視化実験を行い、底質粒径による波打ち帯の漂砂移動に影響を及ぼす飽和・不飽和浸透流動特性について検討している。

本研究は、遡上波変形と飽和・不飽和浸透流を水頭を介して結合させた数値解析モデルならびに、浸透・滲出流を考慮した浮遊砂輸送モデルを構築し、上述した段波作用下における波打ち帯の漂砂可視化実験の再現計算を行い、数値解析モデルの再現性を検証するとともに、波打ち帯の漂砂移動に及ぼす飽和・不飽和斜面の影響について考察する。

## 2. 前浜浸透流を考慮した浮遊砂輸送解析

## 2. 1 遡上波変形と前浜浸透流の結合数値解析

段波を入射波とした模型実験における遡上波内流速及びそれに伴う前浜砂層域での浸透・滲出流速を対象とし、越智ら<sup>5)</sup>による遡上波変形と飽和・不飽和浸透流を結合させた数値解析モデルを改良して行った。改良点としては、波打ち帯まで拡張させた遡上波変形モデルに、柴山ら<sup>6)</sup>に倣い流速値に波動運動の位相を基準とした位相平均値を用いた Reynolds 方程式と2方程式を準用した点及び、連続式中に浸透・滲出量を考慮したことである。

表-1 計算パラメータの諸元 (浮遊砂輸送解析)

|         |                    |                         |      |
|---------|--------------------|-------------------------|------|
| 浮遊砂輸送計算 | 移流拡散方程式            | 定数 $\beta$              | 1.0  |
|         | 巻上げ関数 (Nielsen の式) | 経験的な定数 $C_p$            | 0.04 |
|         |                    | 限界 Shields 数 $\Theta_c$ | 0.05 |
|         | シールズ数 (無次元掃流力)     | 摩擦係数 $f$                | 0.03 |
|         |                    | 中央粒径 $d(\text{mm})$     | 0.1  |
|         |                    | 比重 $s$                  | 2.67 |
|         |                    | 経験的な無次元定数 $\beta_s$     | 0.50 |
|         |                    | $c$                     | 2.0  |

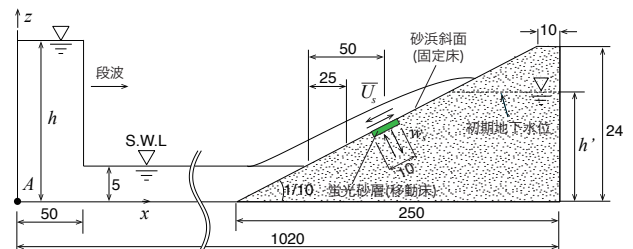


図-1 模型実験の概要図 (単位: cm)

## 2. 2 遡上波流水中の浮遊砂に関する基本方程式

遡上波流水中の浮遊砂濃度の算定については、基本方程式として以下の乱流下における2次元移流拡散方程式を用いた。

$$\frac{\partial \bar{C}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{C}\bar{U}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{C}\bar{W}}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x}(\epsilon_{xx} \frac{\partial \bar{C}}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial z}(\epsilon_{zz} \frac{\partial \bar{C}}{\partial z}) + w_f \frac{\partial \bar{C}}{\partial z} \quad (1)$$

ここに、 $\bar{C}$ は位相平均した浮遊砂濃度、 $\bar{U}$ ,  $\bar{W}$ は Reynolds 方程式より得られた  $x, z$  軸方向の時間平均流速、 $w_f$ は底質砂の沈降速度であり、Rubey<sup>6)</sup>の実験式を用いる。 $\epsilon_{xx}$ ,  $\epsilon_{zz}$ は  $x$  及び  $z$  軸方向における浮遊砂の濃度拡散係数を示し、本計算では2方程式から得た渦動粘性係数の関数 ( $\epsilon_{xx} = \epsilon_{zz} = \beta v_t$ ) として取り扱い、 $\beta$ は希薄な遡上波流水中の浮遊砂が流体運動による乱流拡散に十分追従すると仮定して、表-1のように与える。(1)式の計算は自然座標系に変換後、差分法により計算する。上式に対する水面と底面に関する境界条件は下式で与える。

$$\epsilon_{xz} \frac{\partial \bar{C}}{\partial z} + \bar{C}w_f = 0 \quad (2)$$

$$\epsilon_{xz} \frac{\partial \bar{C}}{\partial z} = -P_w \quad (3)$$

ここに、 $P_w$ は底質の巻き上げ率を示し、本計算では、以下に示す Nielsen<sup>7)</sup>によって提案された巻上げ関数を使用する。

$$P_k = \begin{cases} C_p \cdot \left( \frac{\Theta - \Theta_c}{\Theta_c} \right)^{1.5} \frac{(s-1)^{0.6} g^{0.6} d^{0.8}}{v^{0.2}} & \Theta > \Theta_c \\ 0 & \Theta \leq \Theta_c \end{cases} \quad (4)$$

ここに、 $s$ は底質砂の比重 ( $=\rho_s/\rho$ )、 $\rho_s$ は底質砂の密度、 $d$ は底質砂の中央粒径、 $\Theta$ はシールズ数であり、次節に詳述する。 $\Theta_c$ は限界シールズ数、 $C_p$ は経験的な定数であり、それぞれ Nielsen<sup>7)</sup> 及び中村ら<sup>8)</sup>の研究を参考に表-1のように与える。

### 2. 3 不透過及び透過斜面に対するシールズ数の評価

砂浜斜面を不透過と考えた場合、以下に示す遡上波掃流に対するシールズ数を、(4) 式中の  $\Theta$  に代入して計算を行う。

$$\Theta_0 = \frac{\tau_0}{W_0} = \frac{0.5\rho f \bar{U}_s |\bar{U}_s|}{\rho g d (s-1)} \quad (5)$$

ここに、 $\tau_0$ は不透過斜面の底面掃流力、 $W_0$ は底質砂の水中自重、 $\bar{U}_s$ は遡上波による底面流速の斜面方向成分を示し、岸向き方向を正、冲向き方向を負とする。 $f$ は摩擦係数であり、Masselink<sup>9)</sup>に倣い、表-1に示す値を用いる。

また、透過斜面とした場合は、浸透・滲出による2つの作用として底質砂自重に付加的に働く揚力と境界層構造の変化により底面掃流力を増減させる効果を反映した Turner・Masselink<sup>10)</sup>の修正シールズ  $\Theta_w$ を用いて (4) 式の計算を行う。

$$\Theta_w = \frac{\tau_w}{W_w} = \frac{\tau_0 \left( \frac{\Phi}{e^{\Phi} - 1} \right)}{\rho g d (s-1 - \beta_s \frac{w_s}{K})} \quad (6)$$

ここに、 $\tau_w$ は透過斜面の底面掃流力、 $W_w$ は底質砂の有効自重、 $K$ は透水係数、 $w_s$ は浸透を負、滲出を正とする浸透・滲出流速の斜面垂直成分、 $\Phi$ は  $c/f \cdot w_s / |\bar{U}_s|$  であり、経験的に定める無次元定数である  $c$  及び  $\beta_s$  は、Butt ら<sup>11)</sup>に従い表-1に示す値を用いる。

### 3. 再現対象実験の概要

本研究は、宮武ら<sup>4)</sup>が過去に行った段波作用下における波打ち帯の漂砂可視化実験を再現対象としている。その概要を記すと、図-1に示す底質を珪砂で構成した海底勾配 1/10 の砂浜模型に段波を作用させ、初期汀線から 50cm 岸側の前浜斜面に敷設した蛍光砂にブラックライトを照射し、水槽側面より撮影した遡上波流水中の蛍光砂層上部を通過する単位幅当たりの蛍光砂量を求めている。本研究では浮遊砂の卓越する中央粒径  $d_{50}=0.1\text{mm}$  の細砂のケースを再現対象とし、飽和及び不飽和斜面とした場合に加え、比較のため斜面を不透過とした全3ケースを実施した。

### 4. 解析結果の検証と考察

図-2及び図-3は砂浜斜面を飽和及び不飽和とした場合におけるシールズ数の経時変化をそれぞれ示す。シールズ数は、岸向き及び冲向きの絶対値がほぼ同程度となる不透過斜面に対し、透過斜面とした場合では、浸透・滲出流速の特性に応じて底質砂の有効自重が増減するため、図-2に示す飽和斜面は不透過斜面に比して岸向きに減じ、冲向きに増加する。一方、図-3に示す不飽和斜面の

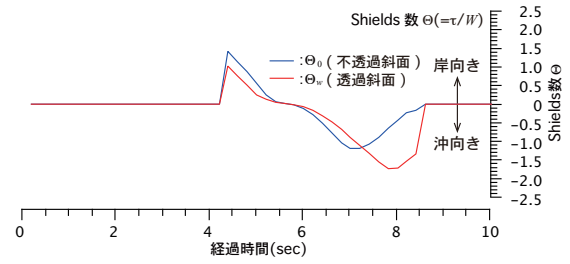


図-2 飽和斜面における透過斜面の無次元掃流力

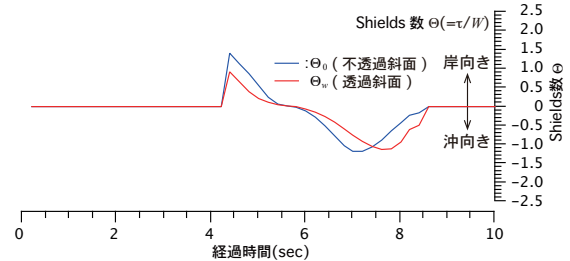


図-3 不飽和斜面における透過斜面の無次元掃流力

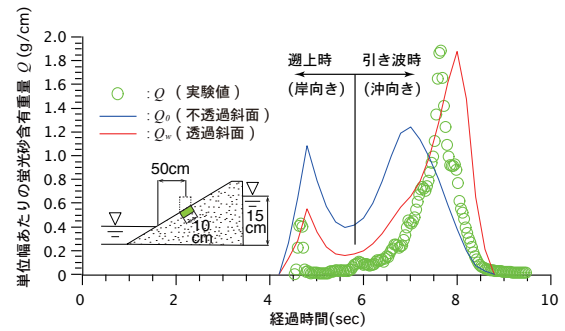


図-4 飽和斜面における蛍光砂量の経時変化

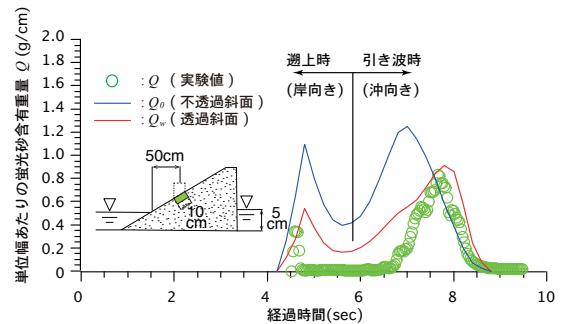


図-5 不飽和斜面における蛍光砂量の経時変化

場合は、飽和斜面よりも大きな浸透流速が長時間に渡り発生し、滲出流速が減速するため、飽和斜面の場合よりも岸向き及び冲向きでともに減少する。

図-4及び図-5は斜面を透過とし、飽和及び不飽和状態とした場合の蛍光砂層上部を通過する単位幅当たりの蛍光砂量の計算値と実験値の比較を示し、図中には不透過斜面に対する計算値も表示する。実験と同様に蛍光砂層上部における遡上波流水中の浮遊砂濃度を積分して求めた計算値はシールズ数の特性に対応して、不透過斜面の場合は遡上時及び引き波時でほぼ同程度となり、飽和及び不飽和斜面の実験値の傾向とは異なった結果となる。これに対し、浸透・滲出流を考慮に入れた透過斜面の場合では、実験値と同様に遡上時よりも引き波時の方が大き

くなる傾向や、飽和斜面に比べ不飽和斜面の蛍光砂量が遡上時及び引き波時でともに小さくなる特性を概ね良好な結果で再現できる。

## 5. 結論

本研究は、遡上波と浸透流の結合数値解析に浸透・滲出流を考慮した浮遊砂輸送解析を加えた数値モデルにより、過去に実施した漂砂実験の再現計算を行い、その再現性及び波打ち帯の漂砂移動に及ぼす飽和・不飽和斜面の影響を検証した。その結果、計算値は細砂で構成された飽和及び不飽和斜面における波打ち帯の漂砂量の特性を概ね良好な結果で評価できることを示した。今後は、遡上波水位の再現精度の向上に加え、連続した進行波への適用及び底質濃度の乱流モデルへの導入を検討する所存である。

## 参考文献

- 1) 浅野敏之, Md. Azharul Hoque: 境界層の変化を考慮した透水性斜面上の漂砂の解析, 海岸工学論文集, 第 50 巻, pp.501-505, 2003.
- 2) Karambas, T. V. : Prediction of sediment transport in the swash-zone by using a nonlinear wave model, Continental Shelf Research 26 pp.599-609, 2006.
- 3) 白水 元, 佐々真志, 宮武 誠, 本間大輔, 成田郁史: 高波作用下の前浜平衡勾配に及ぼす間隙サクシオン動態効果の影響, 土木学会論文集 B3(海洋開発), Vol. 72, No. 2, I\_712-I\_717, 2016.
- 4) 白水 元, 佐々真志, 宮武 誠: 砂浜底質の波の遡上に伴う間隙変化モニタリング手法の開発, 土木学会論文集 B3(海洋開発), Vol.73, No. 2, I\_702-I\_706, 2017.
- 5) 柴山知也, Nguyen The Duy: 碎波帯内乱流モデルの波打ち帯 (Swash Zone) への拡張, 海岸工学論文集, 第 49 巻, pp.451-455, 2002.
- 6) Rubey, W. W. : Settling velocities of gravel, sand, and silt, American J. of Science, vol 25, No.148, 1933.
- 7) Nielsen, P. : Coastal bottom boundary layers and sediment transport, World Scientific, pp.224-226, 1992.
- 8) 中村友昭, 水谷法美: 浮遊砂の移流拡散現象を解析できる三次元数値計算モデルの構築とその適用に関する一考察, 土木学会中部支部研究発表会, II-008, pp.131-132, 2010.
- 9) Masselink, G., P. Russel, I. Turner, C. Blenkinsopp: Net sediment transport and morphological change in the swash zone of a high-energy sandy beach from swash event to tidal cycle time scales, Marine Geology 267, pp.18-35, 2009.
- 10) Tuner, I. L. , Masselink, G. : Swash infiltration-exfiltration and sediment transport, J. Geophys. Res., Vol. 103, pp.30813-30824, 1998.
- 11) Butt, T., P. Russel and I. Turner: The influence of swash infiltration-exfiltration on beach face sediment transport: onshore or offshore?, Coastal Eng., Vol.42, pp.35-42, 2001.