

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

宮武 誠¹・石橋さくら²・木村克俊³・越智聖志⁴・佐々真志⁵・白水 元⁶

¹ 正会員 函館工業高等専門学校准教授 社会基盤工学科 (〒042-8501 函館市戸倉町14番1号)
E-mail:miyatake@hakodate-ct.ac.jp

² 学生員 函館工業高等専門学校専攻科 社会基盤工学専攻 (〒042-8501 函館市戸倉町14番1号)
E-mail:18901@hakodate.kosen.ac.jp

³ フェロー会員 室蘭工業大学大学院教授 暮らし環境系領域 (〒050-8585 室蘭市水本町27番1号)
E-mail:kimura@mmm.muroran-it.ac.jp

⁴ 正会員 日本データサービス株式会社 (〒065-0016 札幌市東区北16条東19丁目1番14号)
E-mail:m-ochi@ndsinc.co.jp

⁵ 正会員 (国研)海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所 動土質研究グループ長
(〒239-0826 横須賀市長瀬3丁目1番1号)

⁶ 正会員 山口大学大学院助教 社会建設工学分野 (〒755-0097 山口県宇部市常盤台2丁目16番1号)
E-mail:shiro@yamaguchi-u.ac.jp

遡上波変形と飽和・不飽和浸透流の結合数値解析モデル及び浸透・滲出流を考慮した浮遊砂輸送モデルを構築し、著者ら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した。浮遊砂輸送モデルでは、移流拡散方程式の底面境界条件として課す底質砂の巻き上げ関数にNielsenの式を採用し、式に含まれるシールド数に浸透・滲出流による2つの効果を考慮したTurner・Masselinkの修正シールド数を用いることで、浸透・滲出流の影響を考慮した。その結果、斜面を透過とした場合、計算値は、実験値と同様に浮遊砂量が遡上時よりも引き波時で大きくなる傾向や飽和斜面に比べ不飽和斜面の浮遊砂量が遡上時及び引き波時で小さくなる特性を概ね良好な結果で評価できることを示した。

Key Words : *swash sediment transport, saturation, infiltration and exfiltration, Shields number*

1. はじめに

遡上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いる。例えば、浅野・Hoque¹⁾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。また、Karambas²⁾は高次オーダのBoussinesqモデルに鉛直1次元浸透・滲出流を考慮した多孔質媒体のための長波方程式を連成させた数値解析モデルから水深方向に平均化した水平流速及び地下水流速を計算し、修正Meyer-Peter and Mullerの式により推定された掃流砂量及び水深方向に積分された浮遊砂輸送モデルによる浮遊砂濃度から波打ち帯の漂砂量

を推定し、実験値との比較から良好な結果が得られている。しかし、上記を含め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斜面に限定されており、不飽和斜面を包含したモデルは数少ない。白水ら^{3,4)}は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。以上のことから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⁵⁾は飽和及び不飽和とした前浜斜面に敷設した蛍光砂にブラックライトを照射し、段波作用下における波打ち帯の漂砂移動に関する可視化実験を行い、撮影画像の濃淡値濃度から遡上波流水中の蛍光砂量を計測し、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. 遡上波変形と前浜浸透流の結合数値解析

(1) 遡上波変形に関する基本方程式

前浜浸透流と結合させる砂浜斜面上の遡上波に関する基本方程式は、柴山・Duy⁶⁾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下記に示す Reynolds 方程式及び連続式、水表面の式を用いる。

$$\frac{\partial \bar{U}}{\partial t} + \bar{U} \frac{\partial \bar{U}}{\partial x} + \bar{W} \frac{\partial \bar{U}}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{P}}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 \bar{U}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{U}}{\partial z^2} \right) + 2 \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu_t \frac{\partial \bar{U}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \nu_t \left(\frac{\partial \bar{U}}{\partial z} + \frac{\partial \bar{W}}{\partial x} \right) \right\} \quad (1)$$

$$\frac{\partial \bar{W}}{\partial t} + \bar{U} \frac{\partial \bar{W}}{\partial x} + \bar{W} \frac{\partial \bar{W}}{\partial z} = -g - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{P}}{\partial z} + \nu \left(\frac{\partial^2 \bar{W}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{W}}{\partial z^2} \right) + 2 \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu_t \frac{\partial \bar{W}}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \nu_t \left(\frac{\partial \bar{U}}{\partial z} + \frac{\partial \bar{W}}{\partial x} \right) \right\} \quad (2)$$

$$\frac{\partial \bar{U}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{W}}{\partial z} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \int_{zh}^{\zeta} \bar{U} \cdot dz = 0 \quad (4)$$

ここに、 \bar{U} 及び \bar{W} は x 及び z 軸方向の位相平均流速、 \bar{P} は平均圧力、 ζ は水表面の高さ、 zh は底面の高さ、 g は重力加速度、 ρ は流体密度、 ν は動粘性係数を示す。 ν_t は渦動粘性係数を示し、Bakhtyar⁷⁾の研究を参考にして2方程式乱流モデルにより決定した。遡上波の解析に使用した計算パラメータを表-1に示す。

(2) 前浜浸透流に関する基本方程式

遡上波と結合させる砂浜内の浸透流は、遡上波によって地下水位が絶えず変化する不圧帯水層全域を対象とするため、基本方程式には、Bear⁸⁾の飽和・不飽和浸透流方程式を用いる。砂層内は等方性均質多孔体と仮定すれば、以下のように表される。

$$(u, w) = -K(\psi) \left(\frac{\partial \psi}{\partial x}, \frac{\partial \psi}{\partial z} + 1 \right) \quad (5)$$

$$\{S_w S_s + C(\psi)\} \frac{\partial \psi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left\{ K(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial x} \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ K(\psi) \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} + 1 \right) \right\} \quad (6)$$

ここに、 ψ は飽和時において圧力水頭 (>0)、不飽和時

表-1 計算パラメータの諸元 (結合数値解析)

	Reynolds 方程式	流体密度 $\rho(\text{g/cm}^3)$	1.0	
			動粘性係数 $\nu(\text{cm}^2/\text{s})$	0.010
遡上波変形計算	2方程式 (κ - ϵ 方程式)	定数 C_u	0.09	
		σ_ϵ	1.30	
		σ_κ	1.0	
		$C_{\epsilon 1}$	1.44	
		$C_{\epsilon 2}$	1.92	
前浜浸透流計算	飽和・不飽和浸透流方程式	比貯留係数 $S_s(1/\text{cm})$	0.011	
		飽和透水係数 $K_s(\text{cm/s})$	0.014	
		べき定数 γ	3.0	
	水分保持特性曲線 (Van-Genuchtenの式)	吸水過程		
		排水過程		
		定数 a	0.0344	0.0211
		定数 m	0.7970	0.7893
定数 n	4.9260	4.7458		
飽和水分量 θ_s	0.4691	0.5063		
残留水分量 θ_r	0.0115	0.0173		

では毛管水頭 (<0)、 u, w は x, z 軸方向の浸透流速、 $K(\psi)$ は透水係数 ($=K_s S_w^m$)、 S_w は飽和度 ($=(\theta - \theta_r)/(\theta_s - \theta_r)$)、 θ は水分量、 θ_s は飽和水分量、 θ_r は残留水分量を示す。 γ はべき定数であり、Imay⁹⁾による値を採用する。 K_s は飽和透水係数、 S_s は比貯留係数、 $C(\psi)$ は比水分容量を示す。不飽和砂層内の透水係数及び比水分容量の算定に必要な水分量 θ と毛管水頭 ψ の関係には、以下に示す Van-Genuchten¹⁰⁾の式を用いる。

$$\theta = \theta_s + (\theta_s - \theta_r) \left\{ \frac{1}{1 + (a|\psi|)^n} \right\}^m \quad (7)$$

ここに、 a, m, n は経験的に定める定数である。浸透流の計算に用いる土壌パラメータは、後述する漂砂可視化実験で使用した底質砂に対する実測値を表-1のように与えている。

(3) 計算方法

(1)式から(7)式は、前浜砂層内の浸透流との結合を考え、遡上波における水表面の時間的変動をより正確に計算するため、自然座標系に変換した後、差分法により計算を行う。波の計算に関する水表面及び底面に関する境界条件及び波打ち帯における遡上計算は、柴山・Duy⁶⁾の方法を準用する。沖側の境界から入射させる波は、後出の漂砂実験で使用したゲート水位を初期条件として与えて段波を発生させる。一方、浸透流に関する境界条件は、水路床部の境界を不透過として取り扱い、後浜側の境界には漂砂実験で設定した後浜水位を圧力水頭として与える。また、遡上波と結合させる砂浜斜面上の浸透流に関する境界格子点には、波の計算で得られた遡上波水深を圧力水頭として与える。

3. 浸透・滲出流を考慮した浮遊砂輸送解析

(1) 遡上波流水中の浮遊砂輸送に関する基本方程式

遡上波流水中の浮遊砂移動に関しては、浮遊砂の沈降速度が時間によらず一定の値をとるものとし、以下に示す移流拡散方程式を用いる。

$$\frac{\partial \bar{C}}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{C}\bar{U})}{\partial x} + \frac{\partial(\bar{C}\bar{W})}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x}(\epsilon_{sx} \frac{\partial \bar{C}}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial z}(\epsilon_{sz} \frac{\partial \bar{C}}{\partial z}) + w_f \frac{\partial \bar{C}}{\partial z} \quad (8)$$

ここに、 \bar{C} は位相平均した浮遊砂濃度、 w_f は底質砂の沈降速度であり、Rubey¹¹⁾の実験式を用いる。 ϵ_{sx} 、 ϵ_{sz} 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、本計算では前出の渦動粘性係数の関数($\epsilon_{sx} = \epsilon_{sz} = \beta v$)として取り扱い、 β 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-2のように与える。

(2) 計算方法

(8)式の計算は前述の結合数値解析に倣い、自然座標系に変換後、差分法により計算する。境界条件として、水表面に関しては、水表面を通じて浮遊砂フラックスはゼロであるとする以下の条件を適用する。

$$\epsilon_{sz} \frac{\partial \bar{C}}{\partial z} + \bar{C}w_f = 0 \quad (9)$$

これに対し、底面に関する境界条件はこの境界面を通じて乱流拡散により上方に運ばれる浮遊砂フラックスと底面から巻き上げられるフラックスが釣り合うとして、以下のように与える。

$$\epsilon_{sz} \frac{\partial \bar{C}}{\partial z} = -P_w \quad (10)$$

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Nielsen¹²⁾によって提案された巻き上げ関数を使用する。

$$P_w = \begin{cases} C_p \left(\frac{\Theta - \Theta_c}{\Theta_c} \right)^{1.5} \frac{(s-1)^{0.6} g^{0.6} d^{0.8}}{\nu^{0.2}} & \Theta > \Theta_c \\ 0 & \Theta \leq \Theta_c \end{cases} \quad (11)$$

ここに、 s は底質砂の比重($=\rho_s/\rho$)、 ρ_s は底質砂の密度、 d は底質砂の中央粒径、 Θ はシールズ数であり、次節に詳述する。 Θ_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Nielsen¹²⁾及び中村ら¹³⁾の研究を参考にして表-2のように与える。

(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 Θ_0 を、(11)式中の Θ に代入して計算を行う。

表-2 計算パラメータの諸元(浮遊砂輸送解析)

	移流拡散方程式	定数	β	1.0
	浮遊砂輸送計算	巻き上げ関数(Nielsenの式)	経験的な定数	C_p
限界 Shields 数			Θ_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	β_s c	0.50 2.0	

$$\Theta_0 = \frac{\tau_0}{W_0} = \frac{0.5\rho_w f \bar{U}_s |\bar{U}_s|}{\rho_w g d (s-1)} \quad (12)$$

ここに、 τ_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、沖向き方向を負とする。 f は摩擦係数であり、Masselink¹⁴⁾らに倣い、表-2に示す値を用いる。

これに対し、Turner・Masselink¹⁵⁾は透過斜面とした場合、遡上斜面上で生じる浸透・滲出流による2つの作用として、底質砂の有効自重を増減させる効果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、それぞれ(12)式中の分母及び分子に考慮した透過斜面に対する修正シールズ Θ_w を以下のように提案している。

$$\Theta_w = \frac{\tau_w}{W_w} = \frac{\tau_0 \left(\frac{\Phi}{e^\Phi - 1} \right)}{\rho g d (s-1 - \beta_s \frac{w_s}{K(\psi)})} \quad (13)$$

ここに、 τ_w は透過斜面の底面掃流力、 W_w は底質砂の有効自重、 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、 Φ 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 β_s は、Buttら¹⁶⁾に従い表-2に示す値を用いる。砂浜斜面を透過として取り扱う場合は、この修正シールズ Θ_w を(11)式中の Θ に代入して計算することとする。

4. 波打ち帯における漂砂可視化実験の再現計算

(1) 模型実験の概要及び計算ケース

宮武ら⁵⁾による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。実験は図-1に示す、底質を珪砂で構成した海底勾配1/10の砂浜模型に沖側のゲート水位 h により段波を作用させ、初期汀線から25cm岸側の遡上波水位及び地下水位を計測するとともに、50cm岸側には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

の蛍光砂の画像濃淡濃度から濃度変換曲線により蛍光砂層上部を通過する単位幅あたりの蛍光砂量を求めている。実験ケースは2種の粒径の底質に対し、後浜水位 h' を変化させて砂浜斜面を飽和及び不飽和とした全4ケースで行われているが、本計算ではその中でも実験において浮遊砂の卓越する中央粒径 $d_{50}=0.1\text{mm}$ の細砂を対象に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ケース実施した(表-3)。

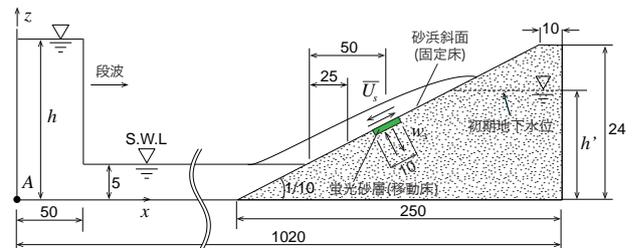


図-1 模型実験の概要図(単位: cm)

表-3 計算ケース

ケース	沖側ゲート水位 h (cm)	後浜水位 h' (cm)	遡上斜面の状態	底質の粒径 d_{50} (mm)
Run1	40.0	15.0	飽和	0.1
Run2	40.0	5.0	不飽和	0.1
Run3	40.0	—	不透過	0.1

(2) 計算条件

座標軸は、図-1中のA点を原点とし、岸沖方向に x 軸、鉛直方向に z 軸を設定する。計算では、蛍光砂層上部を通過する単位幅あたりの蛍光砂量を再現するにあたり、蛍光砂層区間を移動床とし、その他の砂浜斜面は固定床として取り扱う。沖側の境界から入射させる段波は、表-3中に示す実験で使用したゲート水位 h を用いて発生させる。浸透流計算において後浜側の境界から圧力水頭として与える後浜水位 h' は飽和・不飽和斜面に応じ、同表中に示す実験値を用いる。なお、不透過斜面の場合、浸透流計算は行わず、段波計算のみで浮遊砂を計算する。

5. 解析結果の検証と考察

(1) 遡上波水位及び前浜地下水位の検証

図-2及び3の(a)と(b)はそれぞれ、初期汀線から25cm岸側地点で計測された飽和及び不飽和斜面における遡上波水位と地下水位の実験値と計算値を比較したものを示す。両図(a)に示す遡上波水位の実験値は、同じ段波条件にも関わらず、水位上昇時に若干の違いが認められる。この要因としては計測装置の応答特性による問題や砂浜斜面の飽和度に伴う砂層内への浸透の影響等が考えられるが、実験値からその要因を究明することは難しい。より詳細な検証は今後の課題として残るものの、遡上波水位の計算値は、実験値の傾向を概ね再現しているといえる。一方、両図(b)に示す地下水位の実験値は、斜面の飽和度に依らず遡上波水位の上昇にやや遅れて応答するが、その上昇量は飽和斜面よりも不飽和斜面に対して大きくなる。上昇後は、地下水位が速やかに初期地下水位までほぼ低下する飽和斜面に対し、不飽和斜面ではある程度低下した後、初期地下水位よりも高い水位を維持している。地下水位の計算値は、こういった実験値の特性を良好な結果で予測している。

(2) 透過斜面のシールズ数及び浮遊砂量の検証

図-4及び5の(a)は遡上波と浸透流の結合数値解析モデルで得た初期汀線から50cm岸側地点の飽和及び不飽和斜面における遡上波底面流速及び浸透・滲出流速を示す。飽和斜面とした場合、遡上時に生じる浸透流速とは

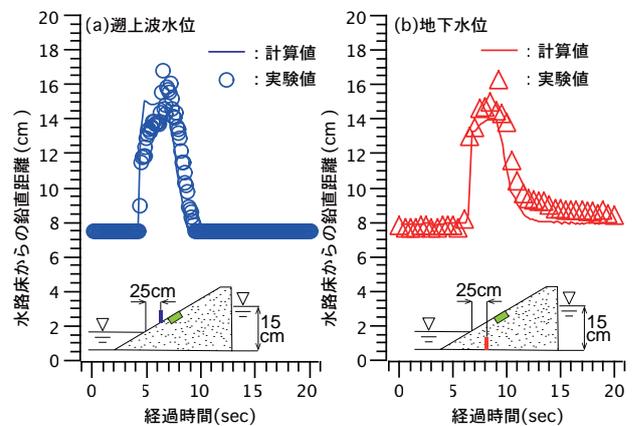


図-2 遡上波水位及び地下水位の比較(Run1, 飽和斜面)

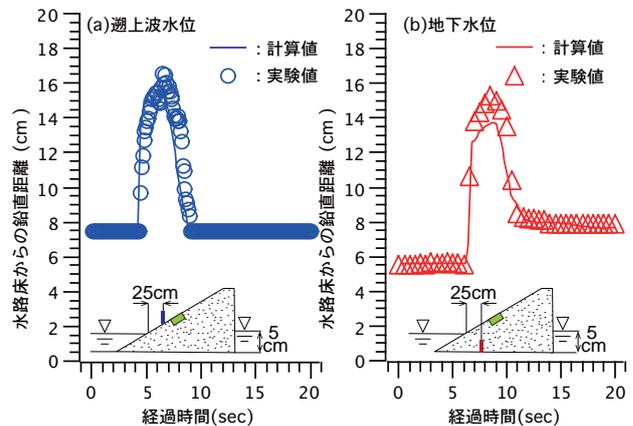


図-3 遡上波水位及び地下水位の比較(Run2, 不飽和斜面)

ほぼ同程度の滲出流速が引き波時に生じるのに対し、不飽和斜面の場合では、飽和斜面よりも大きな浸透流速が長時間に渡り発生し、滲出流速は減速する。これは遡上時に前浜砂層内に浸透した遡上水のほとんどが引き波時の滲出流となって砂層外に流出する飽和斜面に対し、不飽和斜面ではより多くの遡上水が前浜砂層に浸透し、貯留されたことを示唆しており、計測地点が異なるものの前述した飽和及び不飽和斜面における地下水位の上昇量や

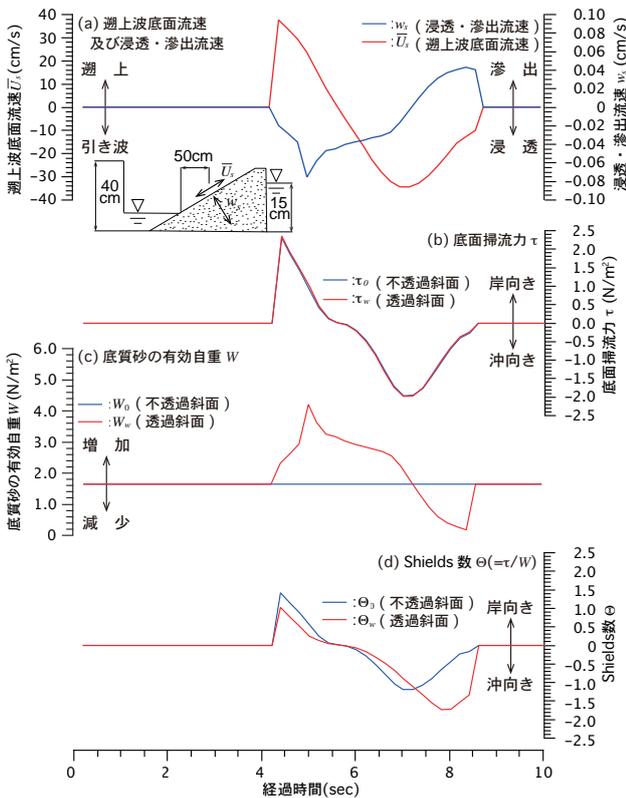


図-4 飽和斜面 (Run1) における浸透・滲出流速, 底質砂の有効自重, 底面掃流力, シールズ数の経時変化

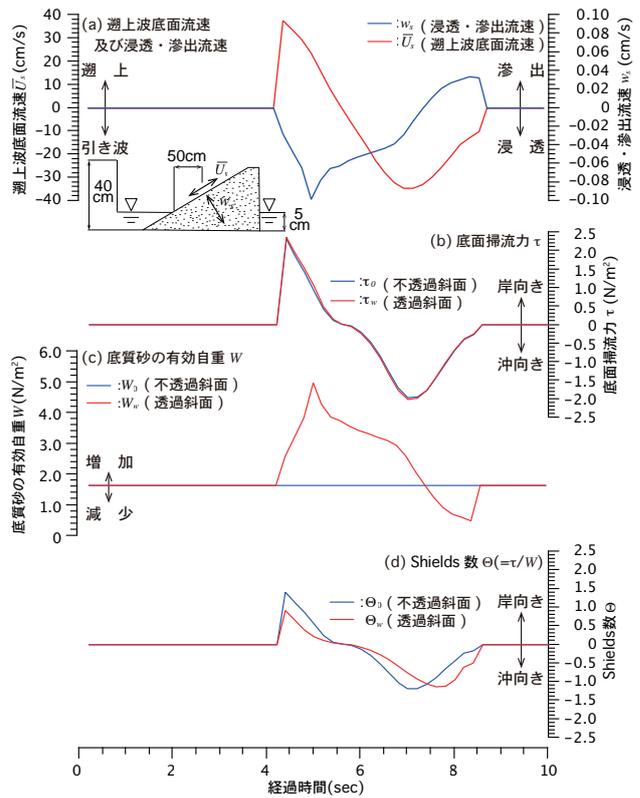
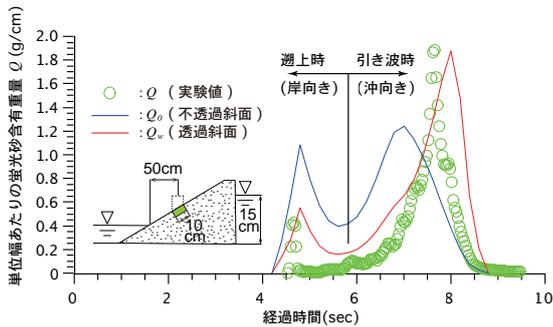
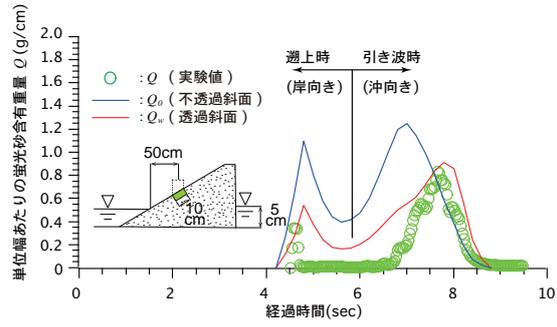


図-5 不飽和斜面 (Run2) における浸透・滲出流速, 底質砂の有効自重, 底面掃流力, シールズ数の経時変化



(a) 飽和斜面の場合 (Run1)



(b) 不飽和斜面の場合 (Run2)

図-6 透過斜面と不透過斜面における蛍光砂量の計算値と実験値の比較

降下特性の結果とも整合する. 両図 (b) は斜面を透過及び不透過とした場合の底面掃流力を示す. 飽和及び不飽和斜面でともに不透過斜面とした場合との差が微小であることから, 浸透・滲出流が遡上波による底面掃流力の増減に及ぼす影響は, 本計算で対象とした細砂においては小さいといえる. 一方, 両図 (c) に示す底質砂の有効自重は, 浸透・滲出流の作用により, 飽和及び不飽和斜面でともに不透過斜面に比して遡上時に増加し, 引き波時に減少する. この結果, 両者の比を表す両図 (d) のシールズ数は, 岸向き及び沖向きに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・滲出流による底質砂の有効自重変化が主な要因となって, 飽和及び不飽和斜面でともに岸向きよりも沖向きに絶対値の方が大きくなる. また, 飽和・不飽和斜面による浸透・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, 飽和斜面は不透過斜面に比して岸向きに減じ, 沖向きに増加するが, 不飽和斜面では飽和斜面の場合よりも岸向き及び沖向きでともに減少する.

図-6(a) 及び (b) は斜面を透過とし, 飽和及び不飽和とした場合の蛍光砂層上部を通過する単位幅あ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, 不透過斜面の場合で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, 透過斜面とした場合では, 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.

6. 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すとともに、波打ち帯の漂砂移動は、飽和度に応じ発生する浸透・滲出流によって底質砂の有効自重を増減させる効果が深く関わっていることを明らかにした。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。

謝辞:本研究は学術研究助成基金助成金 基盤研究 (c) (課題番号 16K06521) の補助を受けた。ここに記して謝意を表す。

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) 宮武 誠, 阿部翔太, 木村克俊, 越智聖志: 底質粒径による飽和・不飽和浸透流が波打ち帯の漂砂移動に及ぼす影響, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol. 69, No.2, I_076-I_080, 2013.
- 6) 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.
- 7) R. Bakhtyar, D.A. Barry, A. Yeganeh-Bakhtiary, A. Ghaehri: Numerical simulation of surf-swash zone motions and turbulent flow, Advances in Water Resources 32, pp.250-263, 2009.
- 8) Bear, J. : Hydraulics of Groundwater, McGraw-Hill, pp.190-224, 1979.
- 9) Irmay, S.: On the hydraulic conductivity of unsaturated soils, Trans. AGU., Vol.35, pp.463-467, 1954.
- 10) Van-Genuchten, M. T. : A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, Soil Science Society of America Journal, Vol.44, pp. 892-898, 1980.
- 11) Rubey, W. W. : Settling velocities of gravel, sand, and silt, American J. of Science, vol 25, No.148, 1933.
- 12) Nielsen, P. : Coastal bottom boundary layers and sediment transport, World Scientific, pp.224-226, 1992.
- 13) 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.
- 14) 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.
- 15) Tuner, I. L. , Masselink, G. : Swash infiltration-exfiltration and sediment transport, J. Geophys. Res., Vol. 103, pp.30813-30824, 1998.
- 16) 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.

(2018.3.15 受付)

PREDICTION OF SEDIMENT TRANSPORT IN SWASH ZONE CONSIDERING SATURATED-UNSATURATED GROUNDWATER FLOW

Makoto MIYATAKE, Sakura ISHIBASHI, Katsutoshi KIMURA, Masashi OCHI,
Shinji SASSA and Hajime SHIROZU

Numerical simulations are performed to evaluate sediment transport affected by saturation of a beach slope in the swash zone. The wave transformation and groundwater flow are estimated using the Reynolds model describing the average motion of turbulent flow coupled with the saturated-unsaturated seepage flow model. The advection diffusion model is used to compute the transport of suspended sediment in the swash zone. Nielsen formula, which estimates the pickup rate of sediment, is applied as the bottom boundary condition. The infiltration-exfiltration effects are quantified through a permeable Shields parameter. The comparison between present model results and previous experimental data show that, in the case of fine sand, the characteristics of sediment transport due to saturation of a beach slope can be evaluated by changes in the effective weight of sediment due to infiltration-exfiltration flow.