遡上波掃流に伴う前浜浸透流の流動特性

Fluidized Characteristics of Wave-Induced Seepage in Swash Zone

函館工業高等専門学校	○学生員	越智聖志	(Masashi Ochi)
函館工業高等専門学校	正 員	宮武 誠	(Makoto Miyatake)

1. はじめに

波打ち帯における前浜勾配の急峻化や浜崖の形成と いった侵食現象に関し,波の遡上・流下運動に伴う前浜砂 層内の浸透・滲出流の影響が指摘されている⁽¹⁾.しかし, その検討のほとんどは,波浪変形と浸透流を結合させた数 値モデルに基づくものであり,波打ち帯の侵食現象に寄与 する前浜浸透流の流速・流向を,模型実験や現地観測等に より具視化した研究は数少ない⁽²⁾⁽³⁾.

本研究は、模型実験を行い、波打ち帯の侵食・堆積過程 に影響を及ぼす前浜砂層内の地下水流速・流向を、砂浜模 型内に注入した蛍光塗料の軌跡及び移流拡散方程式によ り推定し、波打ち帯の漂砂運動を解明する基礎的知見を得 ることを目的とする.

2. 遡上波に伴う前浜浸透流の可視化に関する模型実験 2.1 実験方法

実験は、図-1に示す可傾斜式開水路内に長さ250 cm, 高さ20 cm,後浜天端10 cmを有する斜面勾配1/10の砂浜 模型を中央粒径0.1 mmの硅砂により製作して行った.同 砂の透水係数は k=0.0144 cm / s である.5 cmの静止水深の もと模型斜面の後浜には15 cmの地下水位を与え,沖側か らは初期水位40 cmの段波を180秒間隔で5 波入射させた. 砂層内の地下水位は,静水時汀線及びそこから20 cm岸側 の砂浜床部に水圧計を埋設して測定した.遡上波水位は, 地下水位計測と同位置の水路側面に設置したビデオカメ ラにより撮影した動画から0.1 秒毎の RGB 画像を抽出し, デジタイザーを使用して読定した.また,静水時汀線から 20 cm岸側の水路側面には,砂層表面から深さ3 cm地点の 砂層内に蛍光塗料(オレンジ色)を注入し,ブラックライ トを照射することで,波の遡上・流下に伴う蛍光塗料の軌 跡をデジタルビデオカメラで撮影した.

2.2 蛍光塗料の濃度変換曲線

遡上波に伴う蛍光塗料の軌跡を撮影した動画は,DIB形 式のRGB 画像で0.1秒毎に抽出した後,256 階調の白黒濃 淡画像に変換する.変換後得られる画像濃度は図-2 に示 す濃度変換曲線を用いて,蛍光塗料の体積濃度に変換す る.この濃度変換曲線は,予め用意した体積濃度の異なる 蛍光塗料溶液にブラックライトを照射し,得られる画像濃 度との関係を示し,画像濃度の閾値は標準偏差で5以下と なるように抽出した.画像濃度は,体積濃度が40(vo1%) 以上で輝度が上限値に達し,ほぼ一定となるため,前述の 実験で砂層内に注入した蛍光塗料溶液は,40(vo1%)以下 のものを採用している.これより,実験で得られた各時間 における画像濃度は同図中の曲線式を用いて,体積濃度に 変換する.





各時間における画像に対する体積濃度の値から,以下に 示す多孔質媒体の移流拡散方程式を用いて,前浜砂層内に おける地下水の実流速を推定する.

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u' \frac{\partial C}{\partial x} + w' \frac{\partial C}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left\{ (\alpha_L \frac{u'}{V} + D_M) \frac{\partial C}{\partial x} \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ (\alpha_T \frac{w'}{V} + D_M) \frac{\partial C}{\partial z} \right\}$$
(1)

ここに、Cは画像から得られる体積濃度、u'及びw'はx軸及びz軸方向の浸透流速u,wを有効空隙率 λ_e でそれぞ れ除した実流速、Vはその合成流速、 α_L,α_T はそれぞれ縦 方向及び横方向の分散長を表す分散定数、 D_M は浸透層中 の水の分子拡散係数を示す、実流速u',w'の値を仮定して (1)式より求めた体積濃度の計算値 $C(J,\mathbf{P})$ と画像から得た 体積濃度の実験値 $\hat{C}(J)$ との間には、以下の残差が生じる.

 $s_{J} = C(J,\mathbf{P}) - \hat{C}(J)$ (2) ここに、Jは全ピクセル数をmとした場合の画像のピクセル番号、 \mathbf{P} は推定するパラメータであり、実流速u',w'を示す.本研究は (2) 式の残差平方和 $E(\mathbf{P})$ を目的関数として、

$$E(\mathbf{P}) = \sum {s_J}^2 \tag{3}$$

が最小となるようなパラメータ **P**(実流速 *u'*,*w'*)を推定する. パラメータ **P**を **e**だけ補正した結果,目的関数 *E*(**P**) が最小となるように期待すれば,

$$\frac{\partial}{\partial \mathbf{P}} E(\mathbf{P} + \mathbf{e}) = 0 \tag{4}$$

のようになる.この(4)式にTalyor展開を施し、1次精 度の近似式を求めると、

$$\frac{\partial}{\partial \mathbf{P}} E(\mathbf{P} + \mathbf{e}) = 2(\mathbf{A}^{\mathsf{t}} \cdot \mathbf{s} + \mathbf{A}^{\mathsf{t}} \cdot \mathbf{A} \cdot \mathbf{e}) = 0$$
(5)

が得られる.ここに、Aは $A_{JJ} = \partial s_J / \partial P_I$ を成分とする行列, Iはパラメータ数を示す.この結果、パラメータの補正量は、

$$\mathbf{e} = \left(\mathbf{A}^{\mathrm{t}}\mathbf{A}\right)^{-1}\mathbf{A}^{\mathrm{t}}\mathbf{s} \tag{6}$$

となる.本研究では、(6) 式より補正量を計算し、パラメー タを修正した後、得られる実流速 u',w'の値を再度、(1) 式に代入し、以下の相対誤差を満足するまで反復計算を行 うことで実流速 u',w'の値を求める.

$$\sum_{J=1}^{m} \{C(J,\mathbf{P}) - \hat{C}(J)\} / C(J,\mathbf{P}) < 0.0001$$
(7)

3. 遡上波に伴う前浜浸透流の流動特性

図-3は第1波目の段波を入射させた場合における静水 時汀線及びそれより20cm岸側で得られた遡上波水位と地 下水位の時系列変化を示す. 図中の水位は水路床からの鉛 直距離として表示する.静水時汀線での地下水位は,波の 遡上に伴いほぼ追従して上昇し, その上昇量は最大遡上波 水位の約9割程度に達する.一方,静水時汀線より20cm 岸側の地下水位は、遡上波水位の上昇に大きく遅延する格 好で上昇し,同地点の遡上波水位ならびに静水時汀線での 地下水位よりも上昇量が大きくなっている. これは後浜地 下水位が静水位よりも高い状態のもと、波の遡上による水 位伝播が遅延して加わったことに起因する. この結果, 段 波が斜面を遡上すると,引き波時の前浜砂層内では岸沖方 向により大きな地下水位勾配が生じている.図-4は引き 波時における砂層内の蛍光塗料の軌跡を示す. 波の遡上に 伴い前浜地下水位は岸沖方向に向かって急激に低下する ため、引き波時には蛍光塗料の軌跡が沖向きから上向き方 向に転じている.この結果,遡上時に砂層表面から浸透し た地下水は,引き波時に砂層表層を循環し,再び砂層表面 から滲出しているものと推察される.

図-5 は図-4の RGB 画像を 256 階調白黒濃淡画像に変換 して得られる画像濃度から体積濃度を計算し,前述の移流 拡散方程式により前浜地下水の流速・流向を推定したもの である. 図中の流速ベクトルは得られる実流速に有効空隙 率 λ_e を乗じた浸透流速で表示する. 前浜浸透流は,蛍光 塗料による分子拡散の影響を多少受けるものの,沖向きか ら上向き方向に転じる流向を再現することできる. また, 流速も 10⁻³ cm/s 程度のオーダとなり,図-3 中の 2 点間の 地下水位差から Dacry 則により推定した浸透流速のオーダ にほぼ一致している. 以上の結果,本研究で推定した前浜 地下水の流速・流向ともに妥当で精度で予測している.

4. 結 論

本研究で得られた主要な結論は以下のとおりである.

(1)静水位よりも後浜地下水位の高い状態で砂浜斜面に段 波を遡上させた結果,水位伝播が遅延することで,引き波 時の前浜砂層内では岸沖方向に低下するより大きな地下 水位勾配が生じる.

(2) 前浜砂層内に蛍光塗料を注入し、ブラックライトで照



図-3 遡上波に伴う前浜地下水位の追従性



図-4 波の遡上・流下に伴う蛍光塗料の軌跡





射することで,波の遡上に伴う前浜浸透流の軌跡を追跡 した結果,遡上時に砂層表面から浸透した地下水は,引 き波時に砂層表層を循環し,再び砂層表面から滲出する 復帰流が確認できた.

(3) RGB 画像を 256 階調白黒濃淡画像に変換し得られる画 像濃度から体積濃度を計算し,移流拡散方程式により前 浜地下水の流速・流向を推定した結果,妥当な精度で推 定することができる.

参考文献

1) Turner, I.L. and Masselink, G. :Swash infiltration-exfiltration and sediment transport, J.Geophys.Res. ,103, pp.30813-30824, 1998.

2) Packwood, A.R.: The influence of beach porosity on wave uprushand 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.