

第II部門 一般座標系での流れ解析モデルを用いた堤防の越流侵食に関する 数値シミュレーション

京都大学大学院工学研究科 学生員 ○村埜健太
京都大学大学院工学研究科 学生員 笠島光司
京都大学大学院工学研究科 正会員 音田慎一郎

1. はじめに

近年、局地的集中豪雨の頻発により河川堤防の越流による決壊が発生しており、その侵食過程を精度よく予測する数値解析モデルが求められている。本研究では、堤防のような複雑な形状を扱うことができるよう一般座標系での3次元流れ解析モデルを用い、圧力勾配の影響を考慮した流砂量式¹⁾と組み合わせ、越流侵食に関する数値解析を行い、再現性を検証することを目的とする。

2. 数値解析モデル

流れの基礎式、河床変動モデルにおける流れ方向とその横断方向の掃流砂式、浮遊砂浮上量は以下の通りである。

[連続式]

$$\frac{\partial(1-c)\rho\Phi}{\partial t} + \frac{1}{\sqrt{g}} \frac{\partial(1-c)\Phi\sqrt{g}\rho V^i}{\partial \xi^i} = 0 \quad (1)$$

[運動方程式]

$$\begin{aligned} \frac{\partial(1-c)\rho V^i}{\partial t} + \nabla_j [(1-c)\rho V^i V^j] &= (1-c)\rho F^i \\ - (1-c)g^{ij}\nabla_j p + 2\nabla_j(1-c)\mu S^{ij} & \\ + \nabla_j [-(1-c)\rho \overline{v^i v^j}] + \frac{\rho G(1-c)^2}{k} V^i & \end{aligned} \quad (2)$$

[掃流砂量式]

$$q_{bs} = 8(\tau_* - \tau_{*c})^{\frac{3}{2}} \sqrt{\left(\frac{\rho_s}{\rho_w} - 1\right) G d^3} \quad (3)$$

$$q_{bn} = q_{bs} \left(-\sqrt{\frac{\tau_{*c}}{\mu_s \mu_k \tau_*}} \frac{\partial z_b}{\partial n} \right) \quad (4)$$

$$\tau_{*c} = \tau_{*c0} (\hat{\mathbf{k}} + \nabla P) \cdot \left(\hat{\mathbf{m}} + \frac{\hat{\mathbf{s}}}{\mu_s} \right) \quad (5)$$

$$q_{su} = K \left[\alpha_* \frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_s} \frac{g d}{u_*} (1 - \nabla P \cdot \hat{\mathbf{k}}) - w_f \right] \quad (6)$$

ここに、ここに、 ξ^i : 計算空間の空間座標、 t : 時間、 V^i : 流速の反変成分、 c : 固相の体積濃度、 p : 圧力、 ρ : 流体の密度、 μ : 流体の粘性係数、 Φ : 密度関数、 g^{ij} : 計量テンソルの反変成分、 g : 計量テンソルの行列式、 v^i : 乱れ速度ベクトルの反変成分、 F^i : 重力加速度ベクトルの反変成分、 ∇_i : 共変微分、 G : 重力加速度、 k : 透水係数、 S^{ij} : ひずみテンソル、 q_{bs} : 主流(s)方向の流砂量式、 q_{bn} : 横断(n)方向の流砂量、 τ_* : 無次元掃流力、 τ_{*c} : 無次元限界掃流力、 τ_{*c0} : 岩垣式より算出した無次元限界掃流力、 d : 粒径、 z_b : 河床高、 ρ_w : 水の密度、 ρ_s : 砂粒子密度、 μ_s : 静止摩擦係数、 μ_k : 動摩擦係数、 q_{su} : 浮遊砂の浮上量、 u_* : 摩擦速度、 w_f : 沈降速度、 $\hat{\mathbf{m}}, \hat{\mathbf{s}}$: 河床面に対する法線方向及び接線方向の単位ベクトル、 $\hat{\mathbf{k}}$: 鉛直上向きの単位ベクトル、 P : ピエゾ水頭、 $K = 0.008$, $\alpha_* = 0.14$ である。

得られた流砂量式に対して座標変換を行い、次式より河床変動計算を行う。

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (z_b \sqrt{g}) + \frac{1}{1-\lambda} \left\{ \frac{\partial}{\partial \xi} (q_b^\xi \sqrt{g}) + \frac{\partial}{\partial \eta} (q_b^\eta \sqrt{g}) \right. \\ \left. + (q_{su} - w_f C_b) \sqrt{g} \right\} = 0 \end{aligned} \quad (7)$$

ここに、 q_b^ξ : ξ 方向の流砂量、 q_b^η : η 方向の流砂量、 λ : 河床材料の間隙率である。

ここで、掃流砂の移動限界については、式(5)のように圧力勾配の影響を考慮するとともに、浮遊砂浮上量についても式(6)のように、鉛直方向の圧力勾配の影響により浮遊砂の浮上する初速度が大きくなり、浮上量が増えると仮定したモデルを用いた¹⁾。

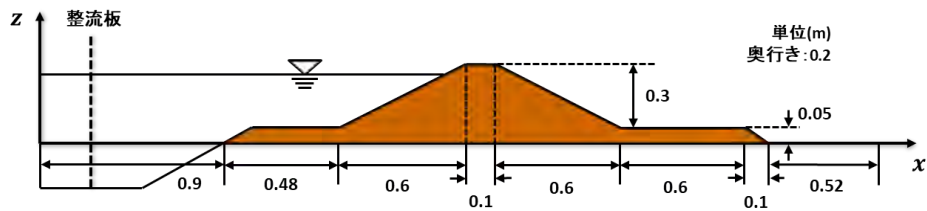
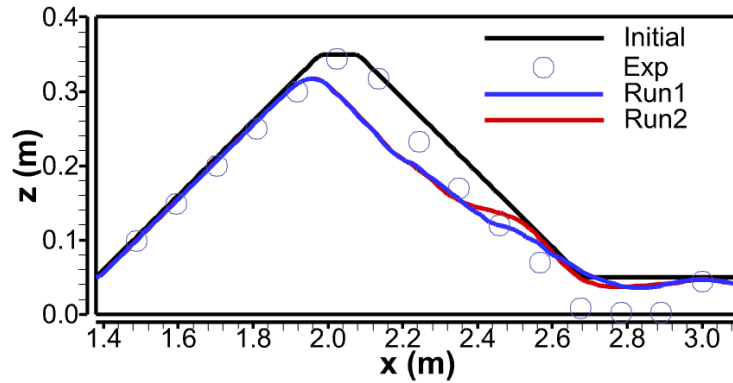


図 1 実験装置の概要

図 2 堤体形状の比較 ($t = 20$ s)

3. モデルの適用と結果の考察

数値解析モデルを堤防の越流侵食実験に適用した²⁾。実験の概略図を図 1 に示す。堤体材料には 7 号砂を用い、流入流量は 3.3 (l/s)、平均粒径 d は 0.26 (mm)、含水比は 11.46 (%) である。計算格子は $\Delta x = 0.01$ (m)、 $\Delta y = 0.04$ (m)、 $\Delta z = 0.01$ (m) とし、格子数は主流、横断、鉛直方向に 390、5、71 とした。また、計算時間間隔は $\Delta t = 0.00025$ (s) とした。本研究では圧力勾配の影響を考察した場合を Run1、考慮しない場合を Run2 として結果を比較した。

図 2 に $t = 20$ (s) での堤体形状の比較を示す。裏法面の途中 ($x = 2.4 \sim 2.5$ (m)) を見ると、Run1 が Run2 に比べてわずかに侵食を大きく計算していることが確認できる。これは、同区間で計算された鉛直方向の圧力勾配が負の値となったことで限界掃流力 τ_{*c} が低下し、結果として流砂量 q_{bs} が増加したためと考察される。

しかし、圧力勾配の影響を考慮した Run1 においても、裏法尻での洗掘は再現できておらず、全体として圧力勾配を考慮した Run1 と考慮しない Run2 の結果に顕著な差は見られなかった。この要因を明らかにするため、裏法肩から裏法尻にかけての流砂量特性について計算結果の考察を行う

とともに、裏法尻での侵食の再現性向上に向け、モデルの改良を行いたい。

4. おわりに

本研究では、河床勾配と圧力勾配の影響を土砂輸送モデルに組み込み、一般座標系での流れ解析モデルと組み合わせ、堤防の越流侵食に関する数値解析を行った。圧力勾配を考慮することで限界掃流力を低下させ、侵食が進む結果が得られたが、その影響は局所的であった。裏法尻の侵食の再現性には依然として課題が残っており、土砂輸送モデルの改良について今後の検討課題としたい。

参考文献

- 1) 音田慎一郎, 山口凌大, 金井稔: 河床近傍の圧力勾配の影響を考慮した堤防の越流侵食に関する数値シミュレーション, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol. 78, No.2, pp. 219-224, 2022.
- 2) 音田慎一郎, 清水皓一, 山口凌大: 浮遊砂の影響を考慮した堤防の越流侵食に関する数値シミュレーション, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol. 77, No.2, pp. 703-708, 2021.