

第II部門

高精度 ISPH 法による鉛直噴流洗掘シミュレーション

京都大学工学部 学生会員 ○小西 晃大
 京都大学工学研究科 正会員 五十里 洋行
 京都大学工学研究科 正会員 後藤 仁志

1. はじめに

大規模津波による防波堤の被災過程において、防波堤背後の洗掘が崩壊の要因の一つである。本研究では、この種の現象の再現計算に先立ってモデルの基礎的検証を行う。解像度以下の微細土砂輸送モデルを導入した高精度 ISPH 法¹⁾²⁾を用いて鉛直噴流洗掘計算を実施する。既往の実験結果と計算結果を比較し、本モデルの妥当性について検討する。

2. 数値計算モデル

2-1 流体—地盤相互作用項

水粒子および砂粒子の運動方程式を以下に示す。

$$\frac{D\mathbf{u}_l}{Dt} = -\frac{1}{\rho_l} \nabla p_l + \left(\frac{\mu}{\rho_l} + \nu_t \right) \nabla^2 \mathbf{u}_l + \mathbf{g} - \frac{\beta_l}{\rho_l} \mathbf{F}_{ls} \quad (1)$$

$$\frac{D\mathbf{u}_s}{Dt} = -\frac{1}{\rho_s} \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} - \frac{\epsilon}{\rho_s} \nabla p_l + \mathbf{g} + \frac{\beta_s}{\rho_s} \mathbf{F}_{ls} \quad (2)$$

$$\mathbf{F}_{ls} = \frac{\gamma \rho_l g}{k_c} (\mathbf{u}_l - \mathbf{u}_s) \quad (3)$$

ここで、 ν_t ：渦動粘性係数、 γ ：地盤の間隙率、 k_c ：透水係数である。 ϵ は砂粒子の密度変化率であり、浮遊砂モデルおよび掃流砂モデルによる底質の輸送によって値が変動する。本モデルでは、この値域を $0.4 < \epsilon < 2.0$ としており、 ϵ が2.0を超えると新たな砂粒子を1個出現させる。なお、それぞれの相互作用項に乗じている係数 β_l および β_s は、近傍の砂粒子との相対位置によって変動するパラメータである。

$$\beta_{li} = \left(\sum_{j \in I} w_{ij} V_j \right)^{m_l}, \quad \beta_{si} = \left(\sum_{j \in J} w_{ij} V_j \right)^{m_s} \quad (4)$$

2-2 底質輸送モデル

a) 浮遊砂輸送モデル

浮遊砂の輸送は移流拡散方程式を Lagrange 微分した以下の式で記述される。

$$\frac{DC}{Dt} = -\nabla \cdot (\mathbf{u}_s C) + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \nabla^2 C + Q_{in} - Q_{out} \quad (6)$$

$$\begin{cases} Q_{in} = \nu_t \nabla^2 \epsilon (1 - \gamma) \\ Q_{out} = -\nabla \cdot (\mathbf{u}_s C) \end{cases} \quad (7)$$

ここで、 C ：浮遊砂濃度、 $\mathbf{u}_s$ ：浮遊砂の流体に対する相対速度、 σ_k ：乱流シュミット数である。 Q_{in} は地盤からの浮遊、 Q_{out} は地盤への堆積を示す。

b) 掃流砂輸送モデル

掃流砂量 q_b の推定に、以下の掃流砂モデル³⁾を導入した。

$$q_b = \frac{1}{6} \pi d_{50}^3 \frac{p_{EF}}{d_{50}^2} U_b \quad (4)$$

U_b は底質の平均輸送速度で、力のつり合いから求めることができる。 p_{EF} は地盤表層において掃流形態で移動する底質粒子の割合と定義され、次式で与えられる。

$$p_{EF} = \begin{cases} \left[1 + \left(\frac{1}{6} \pi \mu_d \right)^4 \right]^{-\frac{1}{4}} & \text{if } \theta \geq \theta_c \\ 0 & \text{if } \theta < \theta_c \end{cases} \quad (5)$$

ここで、 μ_d は底質粒子の動摩擦係数、 θ_c は斜面における限界 Shields 数であり、Shields 数 θ は次式で定義される。

$$\theta = \frac{U_f^2}{(s-1)gd_{50}} \quad (6)$$

以上より、掃流砂量 q_b が求まる。さらに以下の式から砂粒子の密度変化率 ϵ の差分が求まり、底質の掃流運動として、砂粒子から砂粒子へ質量が受け渡される。

$$\frac{\partial z_s}{\partial t} + \frac{1}{1-\gamma} \nabla q_b = 0 \quad (7)$$

$$\Delta \epsilon = \frac{\partial z_s}{\partial t} \Delta t / d_0 \quad (8)$$

3. 鉛直噴流による砂地盤洗掘

本研究の比較対象の実験として、赤司ら⁴⁾の鉛直噴流実験を用いた。計算領域および計算ケースを図-1 および表-1 に示す。表-1 の3列目の値は(4)式中の値で、チューニングパラメータとした。なお、計算粒径は $d_0 = 3.33\text{mm}$ である。

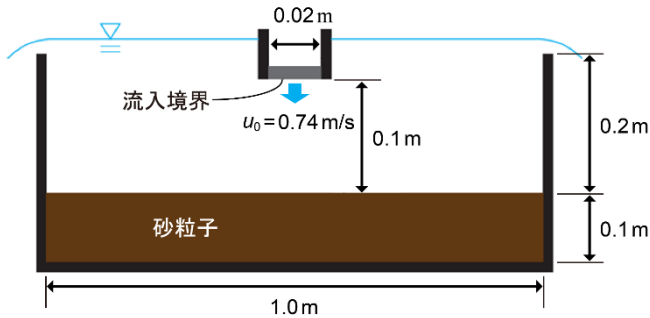


図-1 計算領域

表-1 計算ケース

	掃流砂モデル	(m_l, m_s)
Case 1	有	(5,3)
Case 2	無	(5,3)
Case 3	無	(4,3)
Case 4	無	(3,2)

図-2 は実験結果および4ケースの計算の地盤表面形状である。全ケースのすべての時刻において、実験結果よりも洗掘孔内側の洗掘量が多い。その一因として、間隙水圧の上昇が適切に再現できていないことが考えられる。本来、水路中央に噴流が直接衝突すると、局所的な間隙水圧の上昇によって有効応力が低下し、砂が流動しやすくなると考えられる。それが再現できれば、より掘れにくいパラメータでも洗掘深が大きくなり、結果として洗掘量は少なくなると考えられる。

図-3 に砂地盤中央で計測した洗掘深の時系列を示す。掃流砂モデルを導入した Case 1 は、Case 2 より洗掘深が大きく、掃流砂モデル導入の効果が確認できる。

4. おわりに

本研究では、鉛直噴流による砂地盤洗掘シミュレーションを行った。洗掘深および砂堆部において実験結果と良好な一致がみられたが、洗掘孔内側の洗

掘形状は実験結果と乖離している。今後、さらなるモデルの改良が必要である。

参考文献

- 1) H. Gotoh, A. Khayyer, H. Ikari, T. Arikawa and K. Shimosako: On enhancement of Incompressible SPH method for simulation of violent sloshing flows, Applied Ocean Research, Vol.46, pp.104-115, 2014.
- 2) H. Ikari and H. Gotoh: SPH-based simulation of granular collapse on an inclined bed, Mechanics Research Communications, Vol. 73, pp. 12-18, 2016.
- 3) F. Engelund and J. Fredsøe: A sediment transport model for straight alluvial channels, Nordic Hydrology, Vol.7, pp.293-306, 1976.
- 4) 赤司信義・斎藤隆: 鉛直噴流による洗掘に関する研究, 土木学会論文集, 第298号, pp.53-62, 1980.

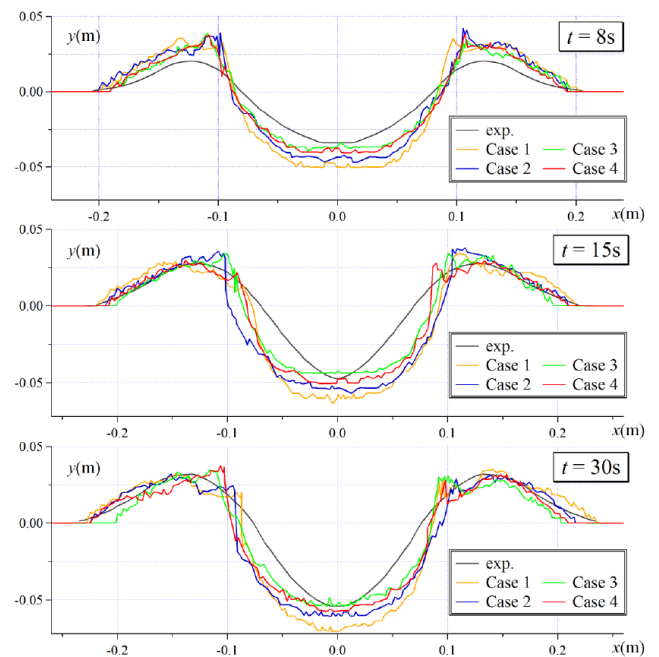


図-2 砂地盤表面形状

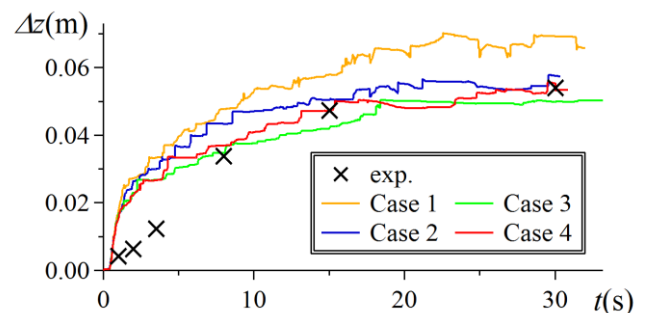


図-3 砂地盤中央の洗掘深