

京都大学工学部 学生員 ○伊賀 修平
 京都大学工学研究科 正会員 原田 英治
 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

津波襲来時には、防波堤越流時に形成される落下流に起因した防波堤マウンド洗掘がケーソン防波堤倒壊の大きな要因となる。落下流によるマウンド洗掘過程の数値シミュレーションを行い、別途実施した模型実験結果と比較することで三次元数値モデルの妥当性を検討する。

2. 実験概要

ポンプによってケーソンの下流側の水を上流側へ循環させることで一方向流れをケーソン防波堤の模型に作用させる。マウンドには、碎石よりも密度の小さいデルリン球を用いた。実験の模式図および実験条件を図-1,表-1に示す。単位幅流量は限界水深から算出した。また、数値シミュレーションでは負圧を考慮していないため、落下流とケーソンの間にポイントゲージを挿入し空気を含ませることで付着ナップを解消した。

3. 計算手法

本研究では固相と液相を異なる離散空間で解く、オーバーラップ型の固液混相型 DEM-MPS法をもちいた。液相と固相の相互作用に関しては松藤¹⁾を参考に抗力を与えた。

(1) 液相計算手法

流体計算には MPS-HS-HL-ECS-GC-DS法²⁾を用いた。重み関数には、Wendland型関数を使用した。運動方程式は下記のとおりである。

$$\frac{D\mathbf{u}_l}{Dt} = -\frac{1}{\rho}\nabla p + \nu\nabla^2\mathbf{u}_l + \mathbf{g} + \delta\frac{\mathbf{R}}{\rho} \quad (1)$$

$$\frac{\mathbf{R}}{\rho} = -a\mathbf{u} - b\mathbf{u}|\mathbf{u}| \quad (2)$$

$$\begin{cases} a = \alpha \frac{n_w \nu}{K} \\ b = \beta \frac{n_w}{\sqrt{K}} \\ K = \frac{n_w^3 d_{50}^2}{(1-n_w)^2} \end{cases} \begin{cases} \alpha = 150 \\ \beta = \frac{1.75}{\sqrt{n_w^3}} \end{cases} \quad (3)$$

ここに、 δ : Dirac のデルタ関数, \mathbf{R} : マウンドから受ける抗力 (Forchhemier の式³⁾), n_w : マウンド間隙率, d_{50} : マウンド中央粒径 (本研究では $d_{50} = d_s$) である。下付き添え字 s, l はそれぞれ固相, 液相の物理量を表す。式(3)の α, β は実験的に求められる値である⁴⁾。

(2) 固相計算手法

後藤⁵⁾を参考にした下記の運動方程式を用いた。

$$(\rho C_M + \sigma)A_3 d_s^3 \frac{d\mathbf{u}_s}{dt} = \mathbf{F}_{drag} + \mathbf{F}_{accel} + \mathbf{F}_g + \mathbf{F}_{colp} \quad (4)$$

$$\mathbf{F}_{drag} = \frac{1}{2} C_D \rho A_2 d_s^2 |\bar{\mathbf{u}}_l - \mathbf{u}_s| (\bar{\mathbf{u}}_l - \mathbf{u}_s) \quad (5)$$

$$\mathbf{F}_{accel} = \rho(1 + C_M)A_3 d_s^3 \frac{d\mathbf{u}}{dt} \quad (6)$$

$$\mathbf{F}_g = (\sigma - \rho)A_3 d_s^3 \mathbf{g} \quad (7)$$

ここに、 σ : 比重 (ρ_s/ρ_l), C_M : 付加質量, \mathbf{F}_{drag} : DEM粒子に作用する流体抗力, \mathbf{F}_{accel} : 付加質量の加速による力, \mathbf{F}_g : 浮力と重力の合力, \mathbf{F}_{colp} : 固相粒子間衝突力, C_D : 抗力係数, A_2, A_3 : 固相粒子の2次元形状係数, 3次元形状係数, d_s : 固相粒径, ν : 動粘性係数, である。式(5)での相対速度の推定には異相の空間平均速度を用いた。

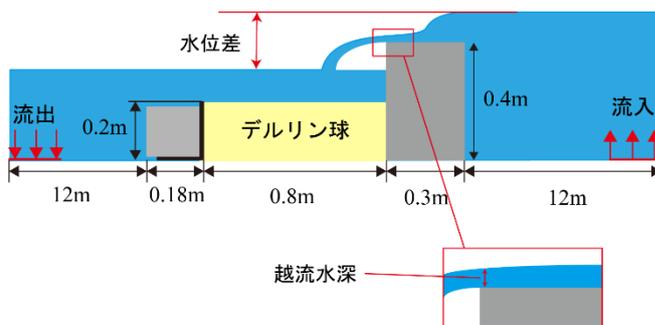


図-1 実験模式図

表-1 実験条件

デルリン球粒径	0.01(m)
デルリン球密度	$1.36 \times 10^3(\text{kg/m}^3)$
水路幅	0.4(m)
初期水深	0.4(m)
限界水深	$3.0 \times 10^{-2}(\text{m})$
単位幅流量	$1.63 \times 10^{-2}(\text{m}^3/\text{s})$

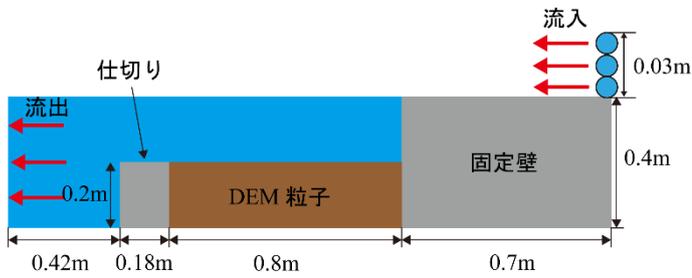


図-2 計算領域

表-2 水理条件

	実験	解析
下流側水深(m)	3.65×10^{-1}	3.65×10^{-1}
越流水深(m)	2.0×10^{-2}	2.7×10^{-2}
流速(m/sec)	8.1×10^{-1}	6.3×10^{-1}

4. 実験と数値シミュレーションの比較

(1) 水理条件の比較

数値シミュレーションの計算領域を図-2に示す。本研究では数値シミュレーションの下流側水深と流入流量を実験と一致させ、越流水深と越流水深位置における流速を合わせることを目標とした(表-2)。しかしながら、本計算では越流水深 3cm に対して粒径 1cm の水粒子を用いて計算を行っており、解像度が不十分であるため、厳密に条件を一致させることは難しい。今後、計算の高速化による高解像度計算が必要となる。

(2) 洗掘形状の比較

実験と数値シミュレーションでは落下流が定常となる時刻が異なるため、実験の 11 秒時点と数値シミュレーションの 5 秒時点と比較開始時刻として洗掘形状を比較する(図-3)。最大洗掘深や洗掘進行速度はほぼ一致しており、速度ベクトル図では洗掘孔内部に時計回りの渦が確認できる(図-4)。数値シミュレーションでも実験同様、渦によって巻きあげられた DEM 粒子が洗掘孔の下流側に堆積し、ある一定以上になると滑落するサイクルが生じる。一方で、実験の撮影角度を考慮しても洗掘孔の位置が大きくずれている。原因としては、解析のナップ流入角度がケーソン下流側にわずかにずれていることが考えられる。これは表面張力に加え、負圧の影響によるものであると推察される。さらに、洗掘孔より下流側の領域について、図-3 より実験と比較して解析ではマウンド粒子がより流下方向に流されている。これは下流領域の流速が大きいためであると推察される。すなわち低解像度のため間隙流の再現性が低く、DEM からの抗力が過剰評価され、DEM が壁のように働いているためであると考えられる。高解像度計算による間隙流のより正確な再現が今後の課題である。

5. おわりに

防波堤越流に伴う防波堤マウンド洗掘現象について数値シミュレーションを実施し、別途実施した実験

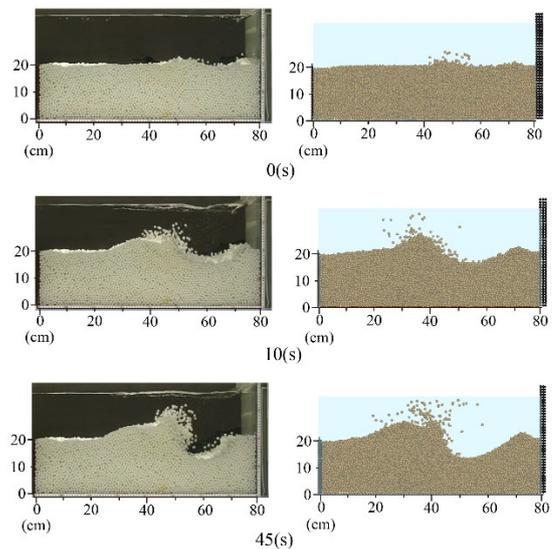


図-3 洗掘形状 (左) 実験 (右) 数値解析

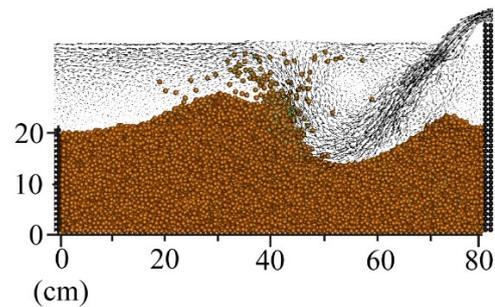


図-4 50s 時点の速度ベクトル図

との比較を通して数値モデルの精度を検証した。時間経過に伴う洗掘形状の遷移や、最大洗掘深に関しては妥当性が確認された一方で、洗掘孔の位置ならびに堆積層の形状について不一致が見られた。負圧の影響のより厳密な評価、ならびに並列化の導入による高解像度計算が今後の課題である。

参考文献

- 1) 松藤慶之：津波越流洗掘によるケーソン防波堤捨石マウンド崩壊過程の基礎的研究，京都大学大学院工学研究科 修士論文，2016。
- 2) 後藤仁志：粒子法—連続体・混相流・粒状体のための計算科学，森北出版，pp.289, 2018。
- 3) 吉岡真弓，登坂博行：高透水性多孔質体中の非ダルシー流れに関する考察，地下水学会誌，第 52 巻 第 3 号，275-284, 2010。
- 4) G. Pahar and A. Dhar: Modeling free-surface flow in porous media with modified Incompressible SPH, *Engineering Analysis with Boundary Elements*, Vol.68, pp.75-85, 2016。
- 5) 後藤仁志：数値流砂水理学—粒子法による混相流と粒状態の計算力学，森北出版，pp.223.2004。