

鉛直噴流問題における粒子法による水-土粒子混相流解析法の精度検証

九州大学 学生会員 ○藤井 孟大

九州大学 正会員 浅井 光輝

1. 目的

近年、津波あるいは風水害時に土構造物が被害を受ける災害が数多く発生している。たとえば 2011 年に発生した東北地方太平洋沖地震においては、多くの防波堤が決壊した。今後、防波堤には津波の越流に対しても粘り強く防波堤の機能を発揮できる構造が望まれている。既往の研究より防波堤の崩壊原因として、1)防波堤前後での水位差による水平力、2)越流波および防波堤の目地における捨石マウンドの洗掘、3)水位差に起因する浸透流による捨石マウンドの支持力低下によるパイピング破壊などが考えられている。先行研究⁽¹⁾においては、越流水による防波堤マウンドの洗掘において堆積した土砂礫が越流水の流れに影響するなど、水と土の相互作用による様々な破壊を予測するため SPH 法 (Smoothed Particle Hydrodynamics) と離散要素法 DEM による水-土粒子混相流解析手法が開発された。しかしながら、まだ解析精度の信頼性検証が十分に行われていたとは言い難いため、本研究では鉛直噴流実験による洗掘現象との比較検証を通して信頼性を検証した。

2. 解析手法

2.1. 流体の計算手法

流体の計算手法には Navier-Stokes 式と拡張ダルシー則を組み合わせ、地表流と浸透流の両方の流れを統一的に記述した統一方程式を採用している。

$$\frac{C_r(\varepsilon)}{\varepsilon} \frac{D\bar{\mathbf{v}}_f}{Dt} = -\frac{1}{\rho_f} \nabla P + \mathbf{g} + \nu_E(\varepsilon) \nabla^2 \bar{\mathbf{v}}_f$$

$$\begin{cases} -a(\varepsilon)\varepsilon\mathbf{v}_r - b(\varepsilon)\varepsilon^2|\mathbf{v}_r|\mathbf{v}_r & (\varepsilon < 0.8) \\ -c(\varepsilon)|\mathbf{v}_r|\mathbf{v}_r & (\varepsilon \geq 0.8) \end{cases} \quad (1)$$

$$\frac{D\bar{\rho}_f}{Dt} + \bar{\rho}_f \nabla \cdot \left(\frac{\bar{\mathbf{v}}_f}{\varepsilon} \right) = 0 \quad (2)$$

ここで C_r は仮想質量係数、 ν_E は粘性係数、 $\bar{\mathbf{v}}_f$ はダルシー流速であり間隙率を ε 用いて $\bar{\mathbf{v}}_f = \varepsilon\mathbf{v}_f$ で示される。式 (1) は間隙率をパラメータとして、地表流と浸透流の両方に挙動を変える式となっており、 $\varepsilon=1$ の場合は Navier-Stokes 式に収束し、 $\varepsilon < 1$ の場合には右辺第 4 項以降の抵抗力項が作用することで拡張ダルシー則に相

当する。また $\varepsilon < 0.8$ の固体が密な領域と $\varepsilon \geq 0.8$ の固体が希薄な領域とで抵抗力項を切り替えている。この際、抵抗力項において流体と固体の連成を行っており、以下に示す相対速度 $\mathbf{v}_r$ によって各層を相対的に評価している。

$$\mathbf{v}_r = \mathbf{v}_f - \mathbf{v}_s \quad (3)$$

ここで $\mathbf{v}_f$ は流体の速度、 $\mathbf{v}_s$ は固体の速度である。

2.2. 固体の計算手法

本研究の固体解析には離散要素法 DEM を採用している。流体中の固体並進運動方程式を以下に示す。

$$m_s \frac{d\mathbf{v}_s}{dt} = m_s \mathbf{g} - \nabla P V_s + \mathbf{F}_d + \sum \mathbf{F}_c \quad (4)$$

ここで $\mathbf{F}_d$ は流体から受ける抵抗力の反作用、 $\mathbf{F}_c$ は固体どうしの接触力である。流体中の固体には外力として、重力、流体力、接触力が作用する。流体力に関しては、右辺第 2 項に浮力を作用させ、右辺第 3 項に抗力を作用させている。接触力に関しては、一般の DEM 解析に用いられるバネ・ダッシュポットモデルを採用しているが詳細は割愛する。

回転運動方程式は球形粒子であることを考慮して実際の土粒子形状の転がりにくさを表現するために以下に示す付加的力である転がり摩擦を導入した。

$$I \frac{d\boldsymbol{\omega}}{dt} = \sum (\mathbf{M}_c - \mathbf{M}_r) \quad (5)$$

$$\mathbf{M}_r = \beta r |\mathbf{F}_n| \hat{\boldsymbol{\omega}} \quad (6)$$

ここで I は慣性モーメント、 $\mathbf{M}_c$ は外力モーメント、 $\mathbf{M}_r$ は転がり摩擦、 $\mathbf{F}_n$ は法線方向接触力、 $\hat{\boldsymbol{\omega}}$ は単位角速度ベクトルである。

3. 鉛直噴流実験の概要と再現解析結果

前述した計算式により、鉛直噴流実験において検証を行った。解析対象モデルとして柳ら⁽²⁾によって行われた鉛直噴流実験とほぼ同様の装置を採用している。図-1 に実験の概略図を示す。

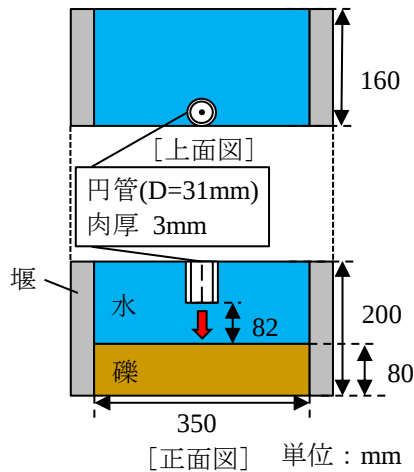


図-1 鉛直噴流実験概略図

図-1のようにパイプを設置し、水を流入させて礫層に水流を衝突させている。また解析のために事前に転がり摩擦のパラメータを決定する必要があるため、水中安息角実験により事前に見積もり、その値を用いて鉛直噴流による洗掘の数値実験を行った。図-2に水中安息角実験による転がり摩擦のパラメータ決定の様子、表-1に解析条件を示す。

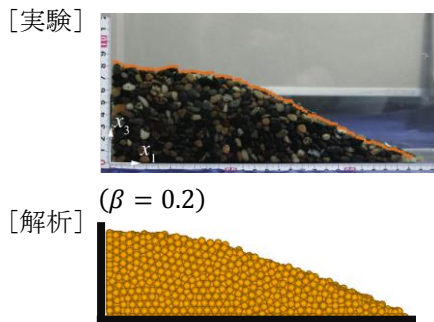


図-2 水中安息角実験の様子

表-1 解析条件と各パラメータ

水粒子 (SPH)		
粒子数	粒径 (cm)	密度 (g/cm ³)
439163	0.35	1.0
土粒子 (DEM)		
粒子数	粒径 (cm)	密度 (g/cm ³)
15118	0.705	2.59
反発係数	摩擦係数	転がり摩擦係数
0.8	0.601	0.2

表-1に示している通り、円管の流入流速分布を表現するためDEMに対するSPHの解像度を1/2と設定している。また円管の流入流速分布として下に示す1/7乗則を与えた。

$$u = u_{\max} \left(\frac{y}{r_0} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (7)$$

$$u_{\max} = u_m \frac{(n+1)(2n+1)}{2n^2} \approx 144 [\text{cm/s}] \quad (8)$$

ここで u は管壁から半径方向に y だけ離れたところの流速、 u_m は円管の断面平均流速($= 118 [\text{cm/s}]$)、 r_0 は円管の半径、 $n = 7$ である。

図-3に実験結果と解析結果を示す。実験結果はDEM粒子分布上に5回の実験結果をグラフ化して表示している。解析結果としては、ある程度の洗掘現象の再現ができたものの、噴流終了後に礫面の崩壊が発生するため、現時点ではまだ実験終了後の最終礫面を表現できていない。

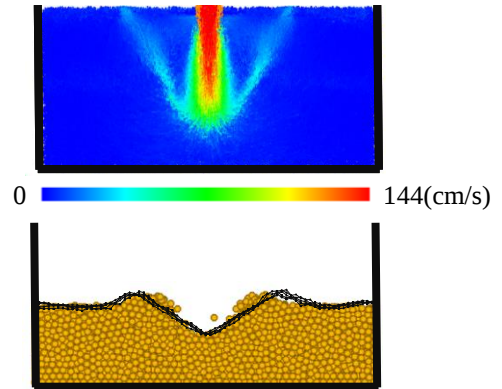


図-3 流体流速分布 (上) と DEM 粒子分布 (下)

4. 結論

SPH-DEMによる水-土混相流解析法の精度検証のため、鉛直噴流による洗掘実験を取り上げ、その再現解析を実施した。管路内の流速分布、SPH法による空間解像度の両者を改善することで、より適切な洗掘深さを表現できる可能性は示すことができたものの、現時点では実験よりも洗掘深さが浅い傾向にあった。今後は、流体と固体の連成における重要なパーツとなっている抵抗モデルのパラメータ同定方法を見直すことでその解の精度を向上させる方針である。

謝辞

京都大学学術情報メディアセンター・牛島省教授、鳥生大祐助教に鉛直噴流の実験データをご提供いただきました。

参考文献

- (1) 原崎健輔, 浅井光輝, SPH-DEMによる固液混相流解析の妥当性確認と粗視化粒子モデルによる洗掘現象解析, 日本計算工学会論文集, No.20182001, 2018.
- (2) 柳博文, 鳥生大祐, 牛島省, 相平均モデルを用いた鉛直噴流による礫群輸送の数値解析, 第32回数値流体力学シンポジウム, C01-03, 2018.