

洗掘解析に向けた粒子法による水-土粒子混相流解析手法の妥当性確認

九州大学 学生会員 ○藤井 孟大

九州大学 正会員 浅井 光輝

1. 背景・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。例えば 2011 年に発生した東北地方太平洋沖地震においては、巨大津波により多くの防波堤が崩壊する被害が生じた。現在は、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提案され始めている。既往の研究と調査より、津波による防波堤の崩壊の原因として、(I) 防波堤前面と背面の水位差に起因して作用する水平力、(II) 防波堤の越流水ならびに目地で発生する流水による捨石マウンドの洗掘、(III) 浸透流による捨石マウンドの支持力低下に伴うパイピング破壊が考えられているが、複数の要因が混在した場合の崩壊予測は実現していない。そこで本研究グループでは水と土の相互作用に起因する様々な破壊を予測するため、SPH 法 (Smoothed Particle Hydrodynamics) と DEM (Discrete Element Method) による水-土粒子混相流解析手法を開発してきた。しかしながら、これまでは特に洗掘現象に対する妥当性確認が不十分であったため、本研究では礫層の洗掘現象を対象として、鉛直噴流による洗掘実験を取り上げ、実験との比較検証を通して解析手法の妥当性確認を行った。

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统一的に記述した統一方程式を採用している。

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

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

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

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になっており、 $\varepsilon = 1$ の場合は

Navier-stokes 方程式に収束し、 $\varepsilon < 1$ 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 $\varepsilon < \varepsilon_d$ の固体が密な領域と $\varepsilon \geq \varepsilon_d$ 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福元ら¹⁾によって提案された付加的力である転がり摩擦 $\mathbf{M}_r$ を導入した。

3. 鉛直噴流実験の概要と再現解析

解析対象として図-1に示す柳ら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。また事前に転がり摩擦係数 β を決定する必要があるため、水中安息角実験の再現解析により見積もった値 ($\beta=0.2$) を用いて鉛直噴流による洗掘の数値実験を行った。

管路の流速分布を表現するため、流体解析用の SPH の粒子間隔は土粒子の平均粒径として設定した DEM 粒径の 1/2 と設定し、1/7 乗則を流入流速として与えた。

キーワード SPH, DEM, 洗掘

また DEM 抗力計算の際に参照する流速の算出を，従来の SPH 平均から DEM 最近傍の SPH が持つ流速を参照するように変更を行った．さらに， $\varepsilon_d = 0.6$ とすることで礫表層において抗力モデルを切り替え，渦粘性により過小評価されている流速と微小な渦による局所的な流速の影響を考慮した下式に示す渦粘性補填抗力モデルを導入し，適切な洗掘深さを得ることを試みた．

$$v_{df} = \left(1 + \frac{S}{\gamma}\right) v_f \quad (5)$$

ここで v_{df} は抗力を計算する際に用いられる流速， S はひずみ速度テンソルにより評価されたひずみ率である．渦粘性補填係数 γ は数値解析と実験の比較を行うことで求めた値 $\gamma = 30$ を用いている．図-2 は噴流開始から 3.1 秒後の渦粘性補填抗力モデルによる影響を比較したものである．また図-3 は噴流終了後の埋め戻しによる礫面形状を実験と比較したものである．また図-4 は礫粒径を 3mm へと変更した実験の再現解析に適用し、解析結果と比較したものである．

4. 結論

SPH-DEM 連成解析手法の礫層における洗掘現象に対する妥当性確認を行うため，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．渦粘性の影響を考慮するために流体のひずみ率を用いて礫表層における流速に修正を行うことで，実験に近い礫の挙動を再現した．またパラメータの調整を行い，それを小礫モデルに適用することでモデルの妥当性確認を行った．流体解像度の最適な値を含め，モデルの改良の余地はあるが，礫層における洗掘解析を行うにあたり，礫を移動させる力としてエネルギーの補填が必要である可能性が示された．今後は適切な流体解像度の設定，モデルの再考を含め，数値解析とのデータ同化を行うことでモデルの精度を高めていく予定である．

参考文献

- 1) 福元豊，坂口秀，村上章：地盤材料の破壊基準を表現するためのシンプルな個別要素モデル，土木学会論文集 A2(応用力学)，Vol.67 No.1, pp.105-112, 2011.
- 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.

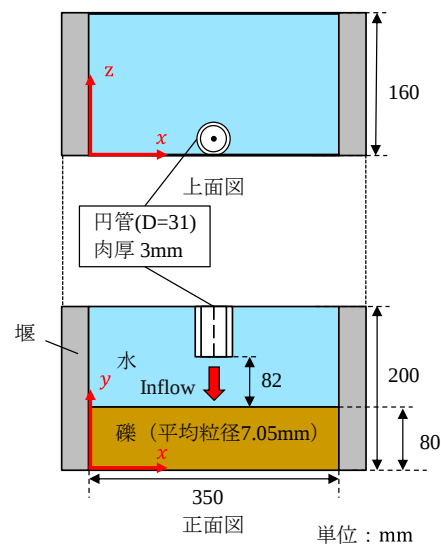


図-1 実験装置

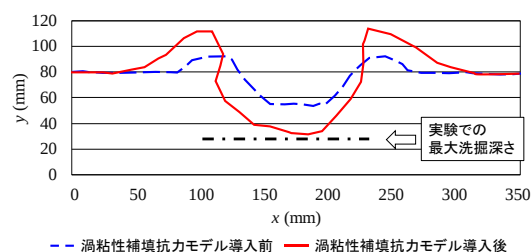


図-2 渦粘性補填抗力モデルによる影響の比較

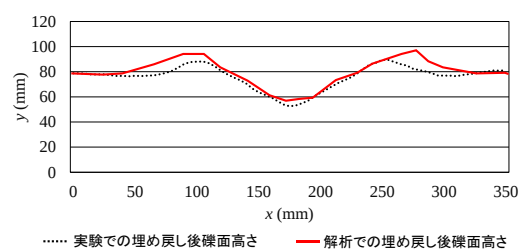


図-3 埋め戻し後の礫面形状の比較

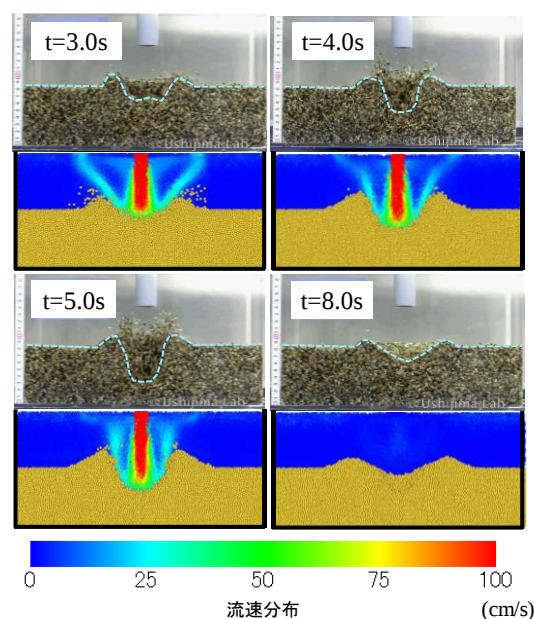


図-4 小礫での実験結果と解析結果の比較図