

堤防の洗掘崩壊シミュレーションに向けた SPH-DEM カップリング法による固液混相流解析手法の開発

九州大学大学院 学生会員 ○原崎 健輔
九州大学大学院 正会員 浅井 光輝

1. 目的

2011年に発生した東北地方太平洋沖地震において防波堤を含む多くの港湾構造物が津波により被害を受けた。今後の津波対策のために粘り強い防波堤が望まれている。既往の研究に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) 越流波による防波堤の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が主な原因であると考えられている。また2011年の被害報告では防波堤背面での地盤崩壊が数多く報告されていることから、本研究では2)の洗掘現象の解明に焦点を当て、研究を行っている。また野上ら¹⁾は、河床変動解析で採用されている土粒子に作用する力のつり合いより導出される判定式を用いてSPH法により越流波による洗掘形状の再現解析を実施した。この結果、洗掘時の土粒子堆積が流体流れに与える影響が小さい場合には実験との良好な一致が見られたが、堆積形状の影響が無視できない場合には土粒子の浮遊・堆積過程の再現がなされていなかったため実験を再現できなかった。そこで本研究では野上らのSPH法による洗掘解析を改良し、洗掘後の土粒子運動をDEMにより解析するSPH-DEM連成解析手法の開発を行った。

2. 浸透流を伴う流体の解析手法

2.1. 安定化 ISPH 法

流体の解析手法には非圧縮性流体解析用に開発された粒子型の解法である ISPH 法を採用し、なかでも浅井ら²⁾によって提案された安定化 ISPH 法を用いることにした。ISPH 法は、非圧縮性流体の支配方程式を予測子修正子法に基づく射影法と呼ばれる分離型解法によって時間離散化し、その分離された方程式を SPH 法の基礎式に基づいて空間離散化を行う手法である。流体解析における支配方程式は Navier-Stokes 式と質量保存則であり、これを SPH 法の基本概念を用いて解析する。安定化 ISPH 法の定式化の詳細については参考文献²⁾を参照していただきたい。

2.2. 支配方程式

洗掘現象を取り扱う際、解析対象は固体と流体が混ざり合う混相流れになる。そのため、固液混相流れに対応した流体支配方程式が必要となる。そのため、本研究では流体の支配方程式に Akbari³⁾によって提案された統一方程式(式(1),(2))を採用している。この支配方程式は間隙率 ε をパラメータとしており、間隙率が1のときは地表流を表すナビエ・ストークス式に、間隙率が1以下のときは浸透流を表す拡張ダルシー則にそれぞれ対応可能な式となっている。

$$\frac{c_r(\varepsilon) D \mathbf{v}_D}{\varepsilon} = -\frac{1}{\rho} \nabla P + \frac{\mathbf{g}}{\varepsilon} + \nu_E(\varepsilon) \nabla^2 \mathbf{v}_r - a(\varepsilon) \mathbf{v}_D - b(\varepsilon) \mathbf{v}_r |\mathbf{v}_r| \quad (1) \quad \frac{D \hat{\rho}}{Dt} + \hat{\rho} \nabla \cdot \left(\frac{\mathbf{v}_D}{\varepsilon} \right) = 0 \quad (2)$$

上式において、 P :圧力、 ρ :密度、 \mathbf{v} :速度、を示し、 $\hat{\rho} = \varepsilon \rho_f$ 、 $\mathbf{v}_D = \varepsilon \mathbf{v}_f$ 、 $\mathbf{v}_r = \mathbf{v}_D - \mathbf{v}_s$ (添え字 f は流体、 s は土粒子) となっている。式中の係数はすべて間隙率に依存したものである。上式を支配方程式とした自由表面流れと同時に浸透流が発生する問題を解析した際の計算精度については、既に森本ら⁴⁾により十分に検証が行われている。

ここで式(1)において、通常の Navier-Stokes 式には含まれない右辺第3-4項は、流体が多孔質体内を流れる際に受ける抵抗力であると解釈できる。また、この抵抗力は作用・反作用の関係より多孔質体にその反作用が逆符号で作用する相互作用力と考えられる。こうした土粒子と流体の連成解析では、土粒子を球体として仮定し、球体に作用する抵抗力を流体にも逆符号で作用させることにより流体-土粒子連成とした事例はある。しかし、地盤内部を流れる流体は土粒子そのものよりも多孔質体内部への流れと捉えられ、抵抗力も多孔質体全体から受けるものと捉えられる。そのため、本研究では上記の相互作用力を土粒子へと作用させることで流体-土粒子連成とした。

キーワード SPH, 洗掘, DEM

連絡先 〒819-0395 福岡市西区元岡 744 ウエスト 2 号館 11 階 1102 号室構造解析学研究室 TEL092-802-3370

2.3. 水中土粒子の解析手法

本研究では土粒子の運動を DEM により解析することにした。解析モデルとして土粒子に対して流体解析の粒子が十分に小さいときには、土粒子に作用する流体圧を直接 DEM に作用させることにより土粒子の運動を解く‘圧力伝達モデル’を検討することができる。しかし土粒子は一般的に微小であり、さらに小さな粒子での SPH 法による流体解析は非現実的である。そのため SPH 法での水粒子は土粒子に対応する DEM 粒子を透過するものとし、前節で示した相互作用力を DEM に作用することで土粒子の運動を与えるものとした。SPH 法での水粒子と DEM での土粒子間での接触は行わず、間接的に相互作用力をそれぞれ作用させて運動を解く方法を、前述の圧力伝達モデルと対比させ、‘透過型抗力モデル’と呼ぶこととし、本研究ではこちらを連成解析モデルに採用している。

2.4. 水中土粒子の運動方程式

水中土粒子に作用する力には土粒子間での接触力： F_c に加え、流体の流速等から受ける流体力があり、式(3)で表される。接触モデルにはバネ・ダッシュポットモデルを採用し、流体力には浮力と抗力 F_d を採用している。前述した流体の支配方程式での相互作用力項は土粒子への抵抗力である抗力として考えることができる。よって本研究ではこの相互作用力項を単一 DEM 粒子に作用する力としたものを土粒子への抗力式(式(4))として採用している。

$$m_s \frac{dv_s}{dt} = (\rho_s - \rho_w)V_s g + F_d + \sum F_c \quad (3) \quad F_d = \frac{\varepsilon \hat{p}}{C_r(\varepsilon)} (a(\varepsilon)v_r - b(\varepsilon)v_r |v_r|) \frac{V_s}{1-\varepsilon} \quad (4)$$

3 SPH-DEM 連成解析の検証

前述した連成解析の検証として、酒井ら⁵⁾によって行われた実験を採用し、ゲートを開けることによる球体ガラスビーズと水の挙動解析を行った。解析モデル、各パラメータは図-1、表-1に示す。図-2に時系列ごとの実験と解析の比較を示す。図-2の比較結果より流体・ガラスビーズともに傾向としては実験の特徴を得られている。しかし、水面付近にてガラスビーズの離散が見られるため、自由表面付近の DEM の取り扱い方を修正する必要がある。

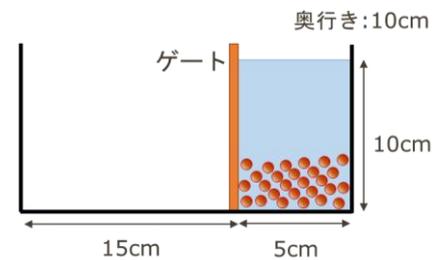


図.1 解析モデル

表.1 各パラメータ

水粒子間隔 (cm)	ビーズ粒径 (cm)	ビーズ密度 (g/cm ³)
0.3	0.27	2.5
摩擦係数	反発係数	ビーズ数
0.2	0.9	7920

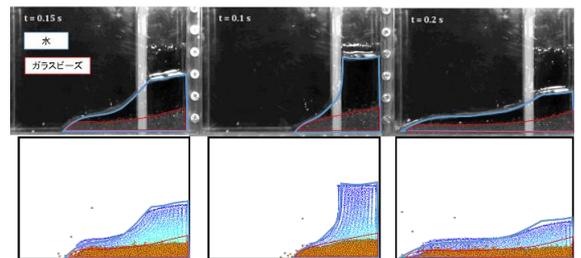


図.2 実験結果⁵⁾と解析結果の比較

4 結論

本研究で得られた結論を以下に示す。

- 1) Akbari によって提案された流体の統一方程式を用いた流体-固体連成モデルの開発を行った。
- 2) 実験との比較による検証を行い、大まかな傾向の類似が見られた。

今後の課題として固体粒子への回転運動の付加、水面付近での扱いの改善等により計算精度の改善を行う予定である。

参考文献

- 1) 野上智隆, 浅井光輝, 有川太郎, Abdelraheem Aly Mahmoud : 安定化 ISPH 法による滑動離脱過程を有する洗掘現象の基礎検討, 土木学会論文集 A2 (応用力学), Vol.71, No.2, pp.I_389-I_398, 2015.
- 2) 浅井光輝, 藤本啓介, 田邊将一, 別府万寿博 : 階段状の非適合境界を有する粒子法解析における仮想マーカーを用いたすべり・非すべり境界処理法, 日本計算工学会論文集, No.20130011, 2013.
- 3) Akbari, H. : Modified moving particle method for modeling wave interaction with multi layered porous structures. *Coast. Eng.*, Vol.89, pp.1-19, 2014.
- 4) 森本敏弘, 浅井光輝, 笠間清伸, 藤澤和謙, 井元佑介 : 安定化 ISPH 法による拡張ダルシー則とナビエ・ストークス方程式の統一解法, 土木学会論文集 A2 (応用力学), Vol.70, No.2, pp.I_213-I_21, 2014.
- 5) Xiaosong Sun, Mikio Sakai, Yoshinori Yamada: Three-dimensional simulation of a solid-liquid flow by the DEM-SPH method, *Journal of Computational Physics*, Vol.248, p.147-176, 2013.