

地盤の内部侵食解析に向けた ISPH-DEM 解像・非解像型ハイブリッド連成手法の開発

九州大学大学院 学生会員 ○辻 勲平
九州大学大学院 正会員 浅井 光輝

1. 目的

2011 年東北地方太平洋沖地震で発生した津波による防波堤の浸透・洗掘破壊や、2017 年九州北部豪雨で発生した土石流や斜面崩壊など、水と地盤の混相流による自然災害が多発している。水と地盤に関する混相流の数値解析の中でも、地盤内で浸透流により局部的に生じる内部侵食の解析には、土粒子の挙動を直接表現する個別要素法 DEM を用いたシミュレーションが実施されている¹⁾。著者らの先行研究²⁾では、ケーソン式防波堤における捨石マウンドの浸透崩壊に着目し、ISPH 法と DEM を用い、土粒子と水の相互作用は流速依存の抗力を経験則に従って与える非解像型連成によって、捨石マウンドの浸透崩壊を定性的に再現した。ただ、この非解像型連成は空間平均した Darcy 流速から土粒子に作用する抗力を求めるため、局部的に発生する噴砂（後退侵食）を発生させる大きな流速を持つ局所的な流れを過小評価する可能性を示唆する結果を得た。本研究では、比較的大きな礫粒子に対しては解像型連成、大きな礫粒子が作る間隙内を埋めるような小粒子に対しては、非解像型連成を適用する解像・非解像型ハイブリッド連成解析手法を開発した。

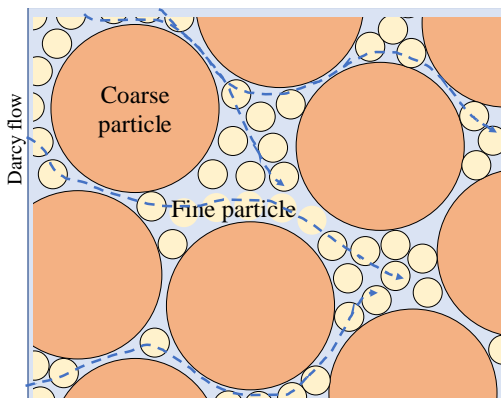


図-1 解像・非解像ハイブリッド連成

2. 計算手法

(1) ISPH による流体計算

津波は非圧縮性流体として扱い、解析手法として M. Asai et al.³⁾ が提案した安定化 ISPH 法を用いる。支配方程式には地表流と浸透流を間隙率 ε を介して統一的

に記述した Darcy-Brinkman 型の統一方程式を採用した。

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

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

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

ここで $P, \mathbf{g}, \rho_f, \mathbf{v}_f, \mathbf{v}_r, C_r$ はそれぞれ、圧力、重力加速度、流体密度、流体速度、仮想質量係数、有効粘性係数を表す（下付き添字 $_f$ は流体粒子）。 \mathbf{v}_f, ρ_f はそれぞれダルシー流速、地盤中の見かけの密度であり、間隙率 ε を用いて、 $\bar{\mathbf{v}}_f = \varepsilon \mathbf{v}_f$, $\bar{\rho}_f = \varepsilon \rho_f$ で示される。また、 a, b, c, ν_E は抵抗係数、粘性係数を示す。抵抗項は流体と土粒子の相互作用力であり、相対速度 $\mathbf{v}_r = \mathbf{v}_f - \mathbf{v}_s$ (\mathbf{v}_f は流体の速度、 \mathbf{v}_s は固体の速度)により相対的に評価する。

(2) DEM による土粒子挙動の計算

地盤を構成する土粒子の挙動を個別要素法 DEM で表現する。この際、接触解析にはバネ-ダッシュポットモデルを採用し、非解像型連成対象の小粒子の回転運動には凹凸形状の土粒子が持つ転がり抵抗を転がり摩擦 \mathbf{m}_r で表現する。また、流体粒子の抵抗力の反作用として抗力 \mathbf{f}_d を考慮した。一方、解像型連成対象のケーソンブロック（防波堤崩壊解析）や大粒子（内部侵食解析）は剛体としてモデル化し、流体に対しては移動壁境界として扱う。なお、剛体表面には DEM の接触判定球と ISPH の壁粒子を配置し、流体および小粒子との相互作用力を求める。

$$M \frac{d\mathbf{V}}{dt} = M\mathbf{g} + \mathbf{F}_c + \mathbf{F}_f \quad (3)$$

$$\frac{d(\mathbf{I}\boldsymbol{\Omega})}{dt} = \mathbf{M}_c + \mathbf{M}_f \quad (4)$$

ここで、 $M, \mathbf{I}, \mathbf{V}, \boldsymbol{\Omega}$ はそれぞれ剛体の質量、慣性テンソル、速度、角速度を示す。 $\mathbf{F}_c, \mathbf{M}_c, \mathbf{F}_f, \mathbf{M}_f$ は剛体に作用する土粒子との接触力、接触トルク、流体粒子から作用する流体力、流体トルクを示す。

キーワード ISPH, DEM, 解像型連成, 非解像型連成, 内部侵食

連絡先 〒819-0395 福岡市西区元岡 744 W2-1102 九州大学大学院 構造解析学研究室 TEL 092-802-3370

3. 解析結果・まとめ

(1) 非解像型連成による解析

流体と土粒子の相対速度依存の抗力を経験則から求める非解像型連成に基づいて解析を実施した前報の結果を示す。図-2[A]に示す解析結果のように、非解像型連成に従う計算を行った場合には、捨て石マウンドの変形までは表現できた。ただし、実験⁴⁾で観察されたようなケーソンを倒壊に至らしめる局所的な噴砂を再現する事はできなかった(図-2[B]参照)。小粒子が先行して移動する過程を簡易的な密度減少で表した場合、ケーソン下流側ケーソン近傍で噴砂が生じ、ケーソングロックが転倒、防波堤マウンドの崩壊に至った(図-2[B]参照)。なお、図-3に示すように、大小の粒子を混合した捨て石マウンドに対して非解像型連成を適用した場合にも、密度減少を考慮しない場合、マウンドの変形は表現できるものの、噴砂を表現できるものでは無かった。

(2) 解像・非解像型ハイブリッド連成解析の方針

前節のとおり、非解像型連成による流体-土粒子連成では、流体粒子(ISPH)の影響域内で流体の速度を平均化することが影響し、間隙内を局所的に流れる際の流速の増大が表現できていないことが一因と予想した。特に、全体の流れに影響を及ぼす大きな粒子を含む例題では、非解像型連成に限界を感じている。そこで、詳細に流体の流れを解く解像型連成と組み合わせた、解像・非解像型ハイブリッド連成の枠組みで解析手法を構築した。そして、これまで非解像型連成では限界のあった大粒子の間隙を縫う流速の大きな流れを表現できることを確認した。今後、この解像・非解像型ハイブリッド連成手法を用いて、地盤の内部侵食(SuffusionやContact Erosion)が解けることを確認し、防波堤シミュレーションへの応用を目指す。

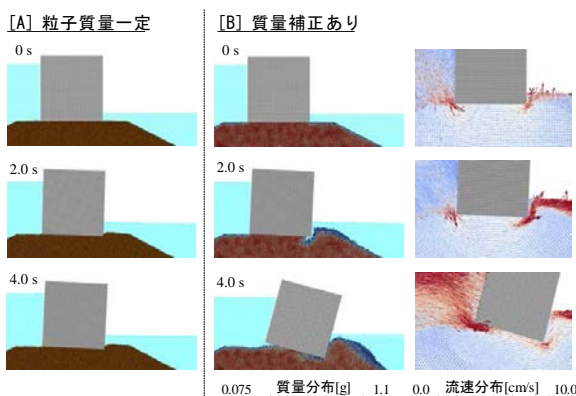


図-2 単一粒径、非解像型連成による解析結果

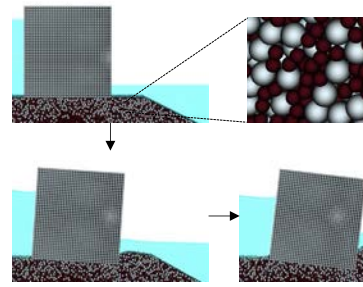


図-3 大小粒子混合、非解像型連成による解析結果

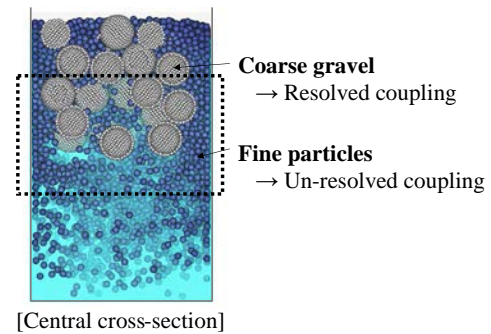


図-4 解像・非解像型ハイブリッド連成による流体-土粒子連成解析のデモ画像

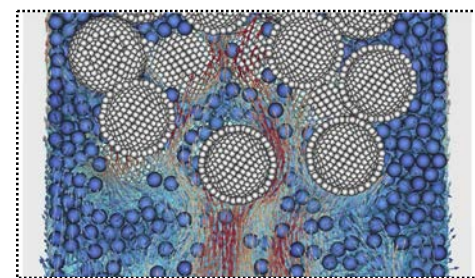


図-5 流速ベクトル (図-4 中央断面点線枠内)

参考文献

- 岡田 紘明, 福元 豊, 藤澤 和謙, 村上 章: 3次元粒子-流体連成計算モデルによる土中の水みち拡大過程のシミュレーション, 土木学会論文集 A2 (応用力学), Vol.73, No.2, (応用力学論文集 Vol.20), pp.I_429-I_438, 2017.
- 辻 勲平, 浅井 光輝, 笠間 清伸: ISPH-DEMによるマウンド変形・ケーソン滑動を考慮した防波堤浸透崩壊シミュレーション, 土木学会論文集A2 (応用力学), Vol.77, No.2, (応用力学論文集Vol.24), pp.I_105-I_116, 2021.
- 浅井 光輝, 「明解 粒子法」, 丸善出版, 2022.
- Kasama, K., Zen, K., Nakagawa, Y., and Furukawa, Z.: Instability evaluation of rubble mound for breakwaters subjected to tsunami-induced overflow and seepage flow. Soils and Foundations, Vol.60 (6), pp.1532-1545, 2020.