SPH-DEM 連成解析手法の妥当性確認 ~孤立波による砂山崩壊の再現解析~

九州大学大学院	学生会員	\bigcirc	辻	憅平
九州大学大学院	正会員		浅井	光輝
八戸工業大学	正会員		高瀬	慎介

1. 研究背景·目的

2011 年東北地方太平洋沖地震において発生した巨大 津波により,各地で多くの防波堤が甚大な被害を受け た.防波堤の破壊要因としては、1)浸透流による防波 堤マウンドの支持力低下によるパイピング破壊,2)越流 波による防波堤マウンドの洗掘,3)防波堤前後での水 位差による水平力だと考えられている. 先行研究 1)では その中でも1 つ目の要因であるパイピング破壊に焦点 を当て,パイピング発生予測や破壊後の挙動を再現す るため流体解析には SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics), 土粒子の挙動解析には離散要素法

(DEM: Distinct Element Method) を採用し, 両者を組 み合わせた固液混相流解析手法を構築している.本研 究では先行研究での手法を用いて,砂山への孤立波衝 突実験の再現解析を行い,解析手法の妥当性確認を実 施する.また,解析手法における SPH と DEM の連成 に重要となる抗力モデル,及び洗掘されるマウンド表 面の DEM 粒子の取扱いに関して考察を行う.

2. 解析手法

2.1 安定化 ISPH 法による流体解析と支配方程式

流体解析には非圧縮流体解析手法の一つである安定 化 ISPH 法のなかでも浅井ら²⁾によって提案された安 定化 ISPH 法を採用する. 支配方程式として式(1)に示 す質量保存則と、自由表面流の計算における Navier-Stokes 式および浸透流の計算における拡張ダルシー則 を統一的に表記した式(2)に示す運動方程式を用いる.

$$\frac{D\bar{\rho}_{f}}{Dt} + \bar{\rho}_{f}\nabla \cdot \left(\frac{\overline{\nu}_{f}}{\varepsilon}\right) = 0$$
(1)
$$\frac{C_{r}(\varepsilon)}{\varepsilon} \frac{D\overline{\nu}_{f}}{Dt} = -\frac{1}{\rho_{f}}\nabla P + g + \nu_{E}(\varepsilon)\nabla^{2}\overline{\nu}_{f}$$
$$\begin{cases} -a(\varepsilon)\varepsilon\nu_{r} - b(\varepsilon)\varepsilon^{2}\nu_{r}|\nu_{r}| & (\varepsilon < 0.8) \\ -c(\varepsilon)\nu_{r}|\nu_{r}| & (\varepsilon \ge 0.8) \end{cases} \end{cases}$$
(2)
$$\text{L式CSWCP, } \rho_{f}, g, \varepsilon, \nu_{E}$$
\delta ChED, \(\vec{ch}\)

の固有密度,重力加速度,間隙率,有効動粘性係数で ある. また, 式(2)においてa, b, cはそれぞれ経験的 に得られた線形項,非線形項に対応する係数であり, 相対速度 $v_r = v_f - v_s$ を用いて右辺第4,5項に土粒子 からの抵抗力を表す.上式における $\bar{\rho}_f$ は地盤中の見か けの流体密度を表し、間隙率を用いて $\bar{\rho}_f = \epsilon \rho_f$ で示さ れる.同様にダルシー流速 \overline{v}_f と地盤中の浸透速度 v_f の 間には $\bar{v}_f = \epsilon v_f$ の関係がある.なお、統一方程式にお ける各係数は間隙率 ϵ の関数となっており、 $\epsilon = 1$ のと き Navier-Stokes 式に一致する.水中の土粒子(DEM 粒子)は抵抗力の反作用が作用していると解釈できる ため、固体に対しても逆符号にして作用させることで 水 (SPH) と土粒子 (DEM) の連成を行う.

2.2 土粒子の挙動解析

本研究では球形 DEM 粒子を用いた土粒子解析を実 施する.式(3)に土粒子の運動方程式,式(4)に流体中の 土粒子に作用する抗力式を示す.

$$m_s \frac{d\boldsymbol{v}_s}{dt} = m_s \boldsymbol{g} - \nabla P \boldsymbol{V}_s + \boldsymbol{F}_d + \sum \boldsymbol{F}_c + \sum \boldsymbol{F}_{coh} \quad (3)$$

$$\boldsymbol{F}_{d} = \begin{cases} a(\varepsilon)\boldsymbol{v}_{r} + b(\varepsilon)\boldsymbol{v}_{r}|\boldsymbol{v}_{r}|\frac{V_{s}}{1-\varepsilon} & (\varepsilon < 0.8) \\ \\ c(\varepsilon)\boldsymbol{v}_{r}|\boldsymbol{v}_{r}|\frac{V_{s}}{1-\varepsilon} & (\varepsilon \ge 0.8) \end{cases}$$
(4)

ここで、m_s, V_sはそれぞれ DEM 粒子の質量、体積で ある. また右辺に示す作用力として, VPV。は浮力, F_d は式(4)に示す流体から受ける抗力、 F_c は土粒子間での 接触力, F_{cob}は含水に伴う見かけの粘着力である.こ の抵抗式は、間隙率ε = 0.8を基準とし、浸透流域

(ε < 0.8), 固体希薄流域 (ε ≥ 0.8) での抵抗力へ切 り替えるモデルとなっている.抗力は前述の通り,流体 が土粒子の影響を受ける抵抗力の反作用として、土粒 子1つあたりが受ける力として与える.また接触力**F**。 の計算には通常のバネ・ダッシュポットモデルで評価 を行う.

キーワード SPH, DEM, 固液混相流, 洗掘

連絡先 〒819-0395 福岡市西区元岡 744 W2-1102 号室 構造解析学研究室 TEL: 092-802-3370

3. 砂山への孤立波衝突実験の再現解析

3.1 実験・解析概要

本解析手法の妥当性確認及び抗力モデルの考察を行 うために,水路上の砂山への孤立波衝突実験の再現解 析を実施した.実験では川砂を充填した CBR 試験用 モールドを垂直に持ち上げることで山を形成,この山 に孤立波を衝突させ,砂山の形状を確認するものであ る.今回の実験では造波板の移動距離を 24cm,速度 を 60cm/s に設定し孤立波を生成,水路上約 1m 離れた 砂山へ衝突させた.実験水路及び造波装置を図-1 に, 孤立波衝突前後の砂山形状を図-2 に示す.



図-2 孤立波衝突前後の砂山形状

流体解析には浅井ら²⁾を参考に壁面での非すべり条件を設定した.また,造波版は実験と同等の移動距離 になるよう速度・移動時間を調整,急な加減速になら ないように正弦波状の速度変化に設定した.流体解析 での造波で生じる最大波高(約18cm)は実験で計測 された最大波高と概ね一致していることを確認した.

3.2 解析結果及び考察

砂山への孤立波衝突実験の再現解析の SPH による流体解析を図-3 に、DEM による土粒子の挙動解析の結 果を図-4 に示す.解析の結果、実験と同様に孤立波の 衝突によって、砂山の表面が削り取られ、砂山後方に 砂の尾を引きながら流れる挙動を再現することができ た.しかし、実験では砂山の後方約 1m に渡って、砂 の尾が伸びていることが確認されているが、解析では 表現できていない.これは本解析で用いている DEM 粒子では細粒分が表現できないことや、現在導入して いる抗力モデルでは、表面の粒子が削れにくいことが 原因だと考えられる.今後、抗力算出の際に参照する 流体速度の平均化や、抗力の切り替えの閾値である間 隙率εを見直す必要があると考えている.



図-4 DEM による土粒子の挙動解析結果 (左図:正面図,右図:上面図)

4. 結論

本研究では粒子法である SPH と DEM を組み合わせ た固液混相流解析手法を構築してきた.砂山への孤立 波衝突実験の再現を実施し,実験と同様の流出傾向を 確認することができた.しかし,抗力算出の際の参照 流速や間隙率による表面粒子の特定など課題が残され た.今後,粗視化 DEM モデルなどの導入し,防波堤 マウンドの洗掘解析など,広範囲の解析へと展開して いく予定である.

参考文献

- 「「「「「」」」
 「「」」」
 「」」「「」」」
 「」」
 「」」
 「」」
 「」」
 「」」
 「」」
 「」」
 「」」
 「」」
 「」」
 「」」
 「」」
 「」」
 「」」
 「」」
 「」」
 「」」
 「」」
 「」」
 「」」
 「」」
 「」」
 「」」
 「」」
 「」」
 「」」
 「」」
 「」」
 「」」
 「」」
 「」」
 「」」
 「」」
 「」」
 「」」
 「」」
 「」」
 「」」
 「」」
 「」」
 「」」
 「」」
 「」」
 「」」
 「」」
 「」」
 「」」
 「」」
 「」」
 「」」
 「」」
 「」」
 「」」
 「」」
 「」」
 「」」
 「」」
 「」」
 「」」
 「」」
 「」」
 「」」
 「」」
 「」」
 「」」
 「」」
 「」」
 「」」
 「」」
 「」」
 「」」
 「」」
 「」」
 「」」
 「」」
 「」」
 「」」
 「」」
 「」」
 「」」
 「」」
 「」」
 「」」
 「」」
 「」」
 「」」
 「」」
 「」」
 「」」
 「」」
 「」」
 「」」
 「」」
 「」」
 「」」
 「」」
 「」」
 「」」
 「」」
 「」」
 「」」
 「」」
 「」」
 「」」
 「」」
 「」」
 「」」
 「」」
 「」」
 「」」
 「」」
 「」」
 「」」
 「」」
 「」
 「」」
 <
- 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.