

防波堤の洗掘解析に向けた SPH-DEM 法による 流体-土粒子の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 年の東北地方太平洋沖地震に伴い発生した津波による被害の一つに、防波堤の崩壊被害がある。既往の研究によりこの防波堤の主な崩壊要因として、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.津波の越流波による防波堤捨石マウンドの洗掘、Ⅲ.防波堤捨石マウンド内の浸透流による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。これら要因への対策を行い、今後起きると予想される巨大地震による防波堤の津波被害を軽減させることが必要だと考えられるが、それを行なうために崩壊メカニズムを解明することが急務である。小型模型実験により要因の一つである洗掘を再現したものがあるが、実規模での実験はその規模や費用から不可能である。そのためこれを解析によって再現を行うことが妥当であると考えられる。また先行研究では防波堤マウンドといった間隙率を含む領域での SPH 法による流体解析、また洗掘判定式によるマウンドの洗掘離脱判定¹⁾がそれぞれ独自に行われてきており、実験との比較等によりその妥当性を確認してきた。しかし洗掘後の土粒子挙動解析が行われていなかったため、土粒子の浮遊や堆積が再現できなかった。そのため本研究では先行研究で用いられていた SPH 法による流体解析に DEM による土粒子解析を追加し、相互連成を行ないながら解析を行なう流体-土粒子連成解析の開発を行なった。

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

流体の解析手法には非圧縮性流体解析手法の一つである 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 法を用いている。流体解析における基本的な支配方程式は Navier-Stokes 式と連続の式であり、これを SPH 法の基本概念を用いて解析する。

洗掘現象が起こる際、流体は防波堤を超える越流波である自由表面流れと、防波堤マウンド内を流れる浸透流となり、また洗掘された領域では流体と土粒子が入り混じる混相流となる。そのためそれぞれに対応した流体の支配方程式を用いる必要がある。そのため本研究では Akbari³⁾によって提案された浸透流用の支配方程式をベースとし、それを固体希薄領域にも対応可能なように抵抗力を改良した統一方程式を用いて流体解析を行っている。以下に流体の支配方程式を示す。

$$\frac{C_r(\varepsilon)}{\varepsilon} \frac{D\bar{v}_f}{Dt} = -\frac{1}{\rho_f} \nabla P + \mathbf{g} + \nu_E(\varepsilon) \nabla^2 \bar{v}_f \begin{cases} -a(\varepsilon)\mathbf{v}_r - b(\varepsilon)\mathbf{v}_r|\mathbf{v}_r| & (\varepsilon < 0.8) \\ -\frac{3}{4}C_d \frac{(1-\varepsilon)\rho_f\mathbf{v}_r|\mathbf{v}_r|}{d_s} \varepsilon^{-2.7} & (\varepsilon \geq 0.8) \end{cases} \quad (1)$$

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

上式は間隙率 ε をパラメータとし、式(1)の右辺第4項の固体からの抵抗力を受けることで、固体の影響を加味している。また抵抗力に関しては浸透流域($\varepsilon < 0.8$)と固体希薄流域($\varepsilon \geq 0.8$)とで抵抗力を切り替えることで、それぞれの流れに対応させている。またこの抵抗力は力の釣り合いから固体に対しても作用していると考えられる。そのためこの抵抗力を相互作用力と解釈し、固体にも逆符号で作用させている。

2.2. 土粒子の解析手法

本研究では球形粒子を用いた DEM によって土粒子解析を行っている。流体中の土粒子には土粒子間での接触力 $\mathbf{F}_c$ と流体からの流体力が作用し、本研究ではその流体力には浮力と抗力 $\mathbf{F}_d$ を採用している。ここで抗力とは前述した相互作用力と同義なため、式(1)で示す流体の統一方程式での抵抗力項を逆符号にし、土粒子1つ当たりに作用する力としたものとしている。式(3)と式(4)に土粒子運動方程式と抗力式を示す。

キーワード SPH, DEM, 洗掘

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

$$m_s \frac{dv_s}{dt} = m_s \mathbf{g} - \nabla P V_s + \mathbf{F}_d + \sum \mathbf{F}_c \quad (3)$$

$$\mathbf{F}_d = \begin{cases} a(\varepsilon) \mathbf{v}_r + b(\varepsilon) \mathbf{v}_r |\mathbf{v}_r| \frac{V_s}{1-\varepsilon} & (\varepsilon < 0.8) \\ \frac{3}{4} C_d \frac{(1-\varepsilon) \rho_f \mathbf{v}_r |\mathbf{v}_r|}{d_s} \varepsilon^{-2.7} \frac{V_s}{1-\varepsilon} & (\varepsilon \geq 0.8) \end{cases} \quad (4)$$

2.3. 洗掘判定

本研究では洗掘現象を解析によって再現するにあたり，解析コストを削減するために洗掘判定を用いている．具体的にはマウンド形状を保持している状態ではマウンドは固定された多孔質体とみなし，洗掘判定により洗掘された土粒子は個別の DEM 粒子として解析し，離脱，浮遊，堆積過程を再現する．洗掘判定の有用性は先行研究⁷⁾でも既に示されており，本研究ではそれを 3 次元の判定へと発展させている．また本研究では先行研究で再現されていなかったマウンド内の流体流れも解析しており，浸透流と越流波の統合的解析を行っている．

3. SPH-DEM 連成解析による防波堤洗掘の定性的再現

防波堤の洗掘崩壊の再現に向けて，簡易モデルでの防波堤越流波洗掘解析を行った．解析では港外側と港内側の水位をそれぞれ異なる一定値に保つことで越流波を生じさせ，マウンドを洗掘させている．また水位を一定に保つ上で排除される水粒子は流入水に再利用することで，水粒子のサイクル化を行なっている．図-1 には初期状態と洗掘後の解析結果を示しており，色は流速分布を示している．初期状態に比べ，洗掘後では流体流れに沿ってマウンドが洗掘されていることが確認できる．洗掘は越流波がマウンドに当たる部分で卓越するがその傾向も再現できている．また防波堤前後で水位差があることによってマウンド内に水の流れが生じるが，それも定性的に再現できている．洗掘後の土粒子は水の流れに沿って移動するが，そのまま流れ出すことなくマウンド斜面部に堆積することも確認できた．以上より，定性的評価にとどまるが洗掘現象の再現がなされたと考える．

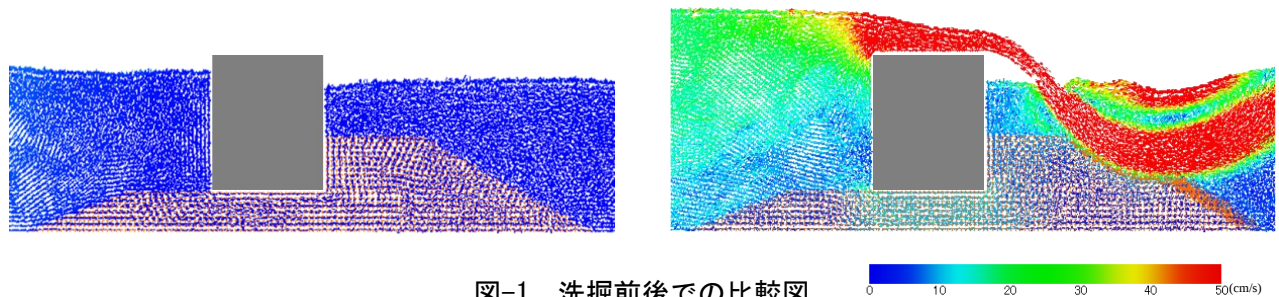


図-1 洗掘前後での比較図

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統一方程式をベースとし，固体希薄領域にも適応可能なように改良し，流体 - 土粒子連成解析手法の開発を行った．
- 2). 洗掘判定を用いた簡易モデルでの洗掘現象の再現解析を試み，定性的ではあるが洗掘の再現を行なった．

今後の課題として，現段階では定性的評価で留まっている洗掘解析を，実験との比較等によりその妥当性を確認していく必要がある．

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.