

防波堤の洗掘崩壊シミュレーションに向けた

SPH-DEM 連成解析による流体-土粒子連成解析手法の開発

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. 緒言

2011 年の東北地方太平洋沖地震に伴い発生した津波により、多くの港湾構造物が被害を受けた。この津波による被害の 1 つに防波堤の崩壊被害が報告されている。この崩壊被害に関するこれまでの調査および研究により、その崩壊要因には 3 つのものが考えられている。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である。これら要因の複合作用により防波堤は崩壊に至ったと考えられているが、2011 年の被災報告より防波堤背面での地盤の洗掘が多く報告されていることから洗掘崩壊のメカニズム解明のための研究を行っている。これを行うにあたり、洗掘現象の実物規模での実験は不可能であるため、解析によるアプローチが適当であると考えられる。洗掘現象は土粒子と水が入り混じった固液混相流状態にある。そのため本研究では流体を粒子法の 1 つである SPH 法、固体を DEM によってそれぞれ解析を行うこととし、これを連成することにより固液混相流解析とする。流体と固体の連成手法としては、流体と固体がそれぞれ貫入し合うことなく圧力を直接与えることで固体を運動させる、一般的に直接解法と呼ばれる手法が用いられることが多い。しかし、この手法では固体に作用する力を正確に計算する必要があるという性質上、流体の粒子は固体に比べて非常に小さくする必要がある。そのため本研究が対象とする洗掘現象のような大規模なモデルでは流体粒子数が非常に多くなり、解析的に非現実的である。そのため本研究では流体と固体の貫入を許容し、相互作用力を各相に与えることによって連成を行う手法を用いる。本手法では流体粒子と固体の大きさを同程度とすることができるため、直接解法に比べ粒子数が少なくなり、解析コストが小さくなる。この手法を用いて本研究では連成解析を行う。

2. 解析手法

前述したように本研究では流体を SPH 法、固体を DEM によって解析を行う。以下ではそれぞれの支配方程式、解析手法および連成を行う上で重要な相互作用力に関して説明する。

2.1 SPH 法による流体解析

一般に流体のみの領域での流れは地表流となり、その支配方程式は Navier-Stokes 式によって記述される。一方地盤内部を流れる浸透流は一般にダルシー則によって示される。洗掘現象の場合は異なる 2 つの流れを常に行き来するため、これらを統一的に解くことが可能な式が必要となる。Akbari¹⁾は間隙を含んだ多孔質体内を流れる流体を記述するための流体の支配方程式を提案しており、固定された多孔質体内を流れる流体解析にこれを用いている。しかし、洗掘の場合は固体である土粒子もまた移動するためこの式をそのまま用いることは出来ない。そのため本研究では Akbari の提案した式を改良し、混相流状態にも対応した以下の式を流体の支配方程式に採用している。

$$\frac{D\bar{\rho}_f}{Dt} + \bar{\rho}_f \nabla \cdot \left(\frac{\bar{\mathbf{v}}_f}{\varepsilon} \right) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{C_r(\varepsilon)}{\varepsilon} \frac{D\bar{\mathbf{v}}_f}{Dt} = -\frac{1}{\bar{\rho}_f} \nabla P + \frac{\mathbf{g}}{\varepsilon} + \nu_E(\varepsilon) \nabla^2 \bar{\mathbf{v}}_f - a(\varepsilon) \varepsilon \mathbf{v}_r - b(\varepsilon) \varepsilon^2 \mathbf{v}_r |\mathbf{v}_r| \quad (2)$$

上式において ε は地盤内の間隙率を示し、各係数は間隙率の関数となっている。平均流速 $\bar{\mathbf{v}}_f$ と見かけ密度 $\bar{\rho}_f$ は実流速 $\mathbf{v}_f$ と実密度 ρ_f に間隙率をかけたものであり、 $\mathbf{v}_r$ は流体と固体の相対速度である。

ここで式(6)において、通常の Navier-Stokes 式には含まれない右辺第 4-5 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。そのためこの項を前述した相互作用力とみなし、各相に逆符号で与えることによって連成としている。本研究では以上の式を SPH 法によって離散化し、解析を行っている。

2.2 DEM のよる固体解析

固体の解析には接触計算の簡易にするために球形DEMを用いている．洗掘において土粒子である固体には固体間での接触力と流体から受ける流体力が作用する．そのため固体の運動方程式および回転式は以下のよう示される．

$$m_s \frac{dv_s}{dt} = (\rho_s - \rho_f) V_s g + F_d + \sum F_c \quad (3)$$

$$I \frac{d\omega}{dt} = \sum T \quad (4)$$

ここで F_d 、 F_c は外力である抗力，接触力， I 、 ω 、 T はそれぞれ慣性モーメント，角速度，トルクである．ここで抗力とは前述した相互作用力と同義であるため，式(2)の抵抗力項を逆符号にしたものを用いている．

3. SPH-DEM 連成解析手法の妥当性確認

本連成解析手法の妥当性確認として，簡易なモデルでの実験との比較を行った．解析モデルを図.1に示す．初期状態としてゲートで区切られた空間に水と固体であるガラスビーズが堆積しており，ゲートを鉛直上方向に一定の速度 68(cm/s)で引き上げることによる挙動追跡を行っている．解析ではこの水中の堆積形状を，安定した水の上部よりガラスビーズを自由落下させることにより作成している．解析時間増分は $10^{-4}(s)$ としており，その他の条件は以下の表.1に示す．

表.1 解析条件

流体相			
粒子数	粒子間隔(cm)	密度(g/cm ³)	
13943	0.3	1.0	
固体相			
粒子数	粒子径(cm)	密度(g/cm ³)	反発係数
7920	0.3	2.5	0.9
バネ定数(N/m)		摩擦係数	
1000		0.2	

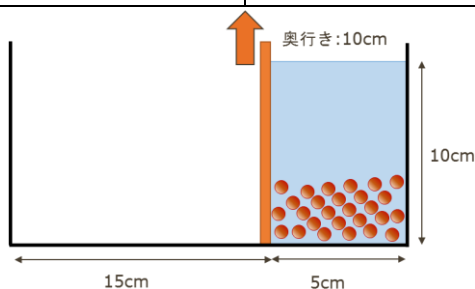


図.1 解析モデル

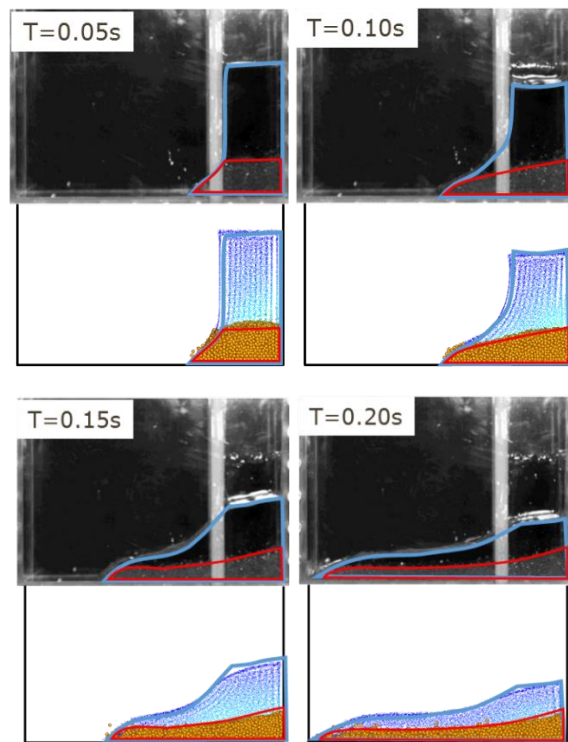


図.2 実験結果²⁾と解析結果の比較図

青枠は実験での水領域，赤枠が実験でのガラスビーズの領域を示す

図.2の比較図から分かるように，実験との比較により各時間において解析結果が良好な一致を示していることが確認できる．これにより前節までで説明した連成解析手法の妥当性が確認できたものと考えられる．

4. 結論

洗掘現象の崩壊メカニズム解明に向けて，流体をSPH法，固体をDEMによって解析を行う固液混相流解析手法の開発を行なった．流体の支配方程式には混相流状態でも統一的に記述できる式を採用し，その際に流体側に付加した抵抗力を相互作用力と解釈することで，固体との相互作用とした．実験との比較により，良好な一致が見られ本手法の妥当性を確認した．今後の課題として土粒子形状特性を加味した固体解析を行っていく予定である．

参考文献

- 1) Akbari, H.: Modified moving particle method for modeling wave interaction with multi layered porous structures. *Coast. Eng.*, Vol.89, pp.1-19, 2014.
- 2) 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.