

SPH-DEM 連成解析を用いた地盤陥没現象の再現解析

九州大学 学生会員 ○松田 大樹

九州大学 学生会員 辻 勲平

九州大学 正 会 員 浅井 光輝

1. 目的

近年、これまで整備されてきた各種インフラ構造物の老朽化問題が顕在化しつつある。中でも下水道管などの管路設備に注目すると、管路の破損部に土砂が流出することに起因する地盤陥没が多発している。同様の陥没は国内で年間約 4,000 件報告されており、今後も下水道管などの埋設管の老朽化に伴って被害が増加することが懸念される。既往の研究⁽²⁾では、主に実験的なアプローチによって陥没発生メカニズムの解明が試みられてきた。ただし、実験では土層内部の水や土粒子移動の観察が困難であり、実際の地盤陥没の発生メカニズムは不明瞭なままとなっている。そこで先行研究⁽¹⁾においては、地下水と土粒子の相互作用を表現するための SPH 法(Smoothed Particle Hydrodynamics method)と個別要素法 DEM(Distinct Element Method)による連成解析によって地盤陥没の再現を試みており、土砂流出、空洞発達、陥没までの流れを定性的に表現した。しかしながら、陥没に至るまでの地盤内空洞の長時間安定化は表現できていない。本研究では、SPH-DEM 連成解析の問題点を克服し、空洞の長時間安定化などの地盤陥没解析の精度向上を目指す。

2. 解析手法

2.1. 流体の計算手法

流体の計算手法には Navier-Stokes 式と拡張ダルシー則を組み合わせ、地表流と浸透流の両方の流れを統一的に記述した統一方程式を採用している。

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

$$\begin{cases} -a(\varepsilon)\varepsilon \mathbf{v}_r - b(\varepsilon)\varepsilon^2 |\mathbf{v}_r| \mathbf{v}_r & (\varepsilon < 0.8) \\ -c(\varepsilon) |\mathbf{v}_r| \mathbf{v}_r & (\varepsilon \geq 0) \end{cases} \quad (1)$$

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

ここで C_r は仮想質量係数、 ν_E は粘性係数、 $\bar{\mathbf{v}}_f$ はダルシー流速であり間隙率を ε 用いて $\bar{\mathbf{v}}_f = \varepsilon \mathbf{v}_f$ で示される。式 (1) は間隙率をパラメータとして、地表流と浸透流の両方に挙動を変える式となっており、 $\varepsilon=1$ の場合は

Navier-Stokes 式に収束し、 $\varepsilon < 1$ の場合には右辺第 4 項以降の抵抗力項が作用することで拡張ダルシー則に相当する。また $\varepsilon < 0.8$ の固体が密な領域と $\varepsilon \geq 0.8$ の固体が希薄な領域とで抵抗力項を切り替えている。この際、抵抗力項において流体と固体の連成を行っており、以下に示す相対速度 $\mathbf{v}_r$ によって各層を相対的に評価している。

$$\mathbf{v}_r = \mathbf{v}_f - \mathbf{v}_s \quad (3)$$

ここで $\mathbf{v}_f$ は流体の速度、 $\mathbf{v}_s$ は固体の速度である。

2.2. 固体の計算手法

本研究の固体解析には個別要素法 DEM を採用している。流体中の固体並進運動方程式を以下に示す。

$$m_s \frac{d\mathbf{v}_s}{dt} = m_s \mathbf{g} + \sum \mathbf{F}_{\text{contact}} + \sum \mathbf{F}_{\text{fluid}} + \sum \mathbf{F}_{\text{cohesion}} \quad (4)$$

ここで $\mathbf{F}_{\text{fluid}}$ は流体から受ける抵抗力の反作用と浮力からなる流体力、 $\mathbf{F}_{\text{contact}}$ は固体どうしの接触力、 $\mathbf{F}_{\text{cohesion}}$ は含水に伴う見かけの粘着力である。流体中の固体には外力として、重力、流体力、接触力が作用する。接触力に関しては、一般的に DEM 解析に用いられる Voigt モデルを採用している。含水に伴う見かけの粘着力に関しては後述する。

回転運動方程式は球形粒子であることを考慮して実際の土粒子形状による噛み合わせ効果を表現するために、以下に示す転がり摩擦を導入した。

$$I \frac{d\boldsymbol{\omega}}{dt} = \sum (\mathbf{M}_c - \mathbf{M}_r) \quad (5)$$

$$\mathbf{M}_r = \lambda r |\mathbf{F}_n| \hat{\boldsymbol{\omega}} \quad (6)$$

ここで I は慣性テンソル、 $\mathbf{M}_c$ は外力モーメント、 $\mathbf{M}_r$ は転がり摩擦、 $\mathbf{F}_n$ は法線方向接触力、 $\hat{\boldsymbol{\omega}}$ は単位角速度ベクトルである。転がり摩擦係数 λ を調節することで粒子形状による影響を表現する。

3. 地盤陥没解析の概要と再現解析結果

1. 節で説明した通り、本研究では特にアーチ効果による地盤内空洞発生後の長時間安定化の再現を試みた。

解析対象としては、小西ら⁽²⁾によって行われた地盤陥没実験を参考にした小型化モデルを採用した。図-1 に解析モデルを示す。

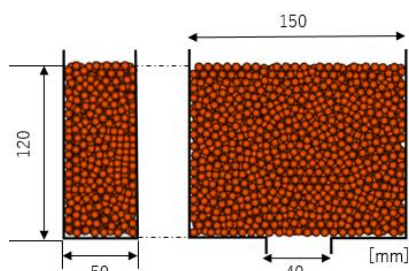


図-1 解析モデル

図-1 のように、スリットを開放することで土砂の流出を再現している。また解析のために事前に転がり摩擦のパラメータを決定する必要があるため、安息角試験により事前に見積もり、その値を用いてアーチ効果による空洞の安定化の再現解析を行った。図-2 に安息角試験による転がり摩擦のパラメータ決定の様子、表-1 に解析条件を示す。現段階では、粒子形状による噛み合わせ効果をテトラ型の粒子によって表現し、それと比較することで転がり摩擦を同定した。

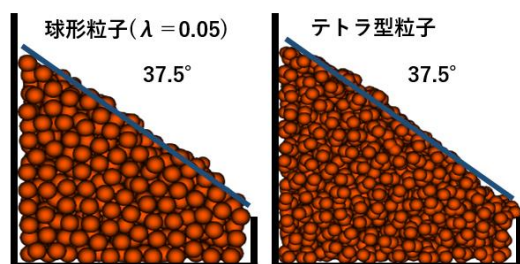


図-2 安息角試験の解析結果

表-1 解析条件と各パラメータ

	球形粒子	非球形粒子	単位
粒子数	2150	8600 (2150 clusters)	-
バネ乗数		1000000	N/m
粒子間摩擦係数	0.514		-
粒子-壁摩擦係数	0.713		-
粒子間反発係数	0.1		-
粒子-壁反発係数	0.79		-
重力加速度	9.81		m/s ²
時間増分	10 ⁻⁶		sec
ゲート上昇速度	0.043		m/s

表-1 に示している通り、転がり摩擦係数 λ を 0.05 と同定した。また、現段階では地下水位を考慮せず、DEM のみの解析のため、以後の解析でも DEM のみで解析を行っている。

図-3 に粘着力を導入せず、形状評価のみの場合の空洞の再現結果を示す。解析結果としては、粒子形状の評価は評価しない場合と比較すれば明らかに効果があるものの、それだけではアーチの再現には至らず、粘

着力が必須であることが確認できる。

図-3 粒子形状の評価のみでの解析結果

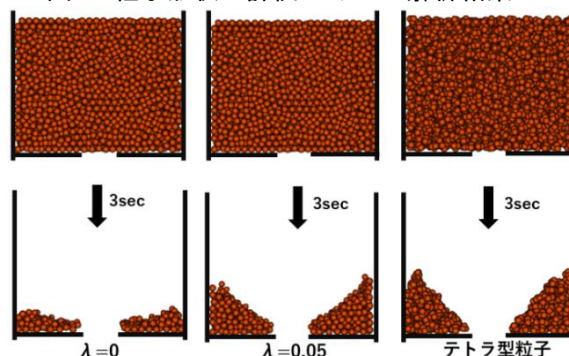


図-4 に粘着力を導入した場合の、アーチの再現解析結果を示す。粘着力 $c = 75 \text{ kN/m}^2$ として下記のようなモデルを与えた場合にアーチ形成の傾向が見られた。

$$F_{\text{cohesion}} = cA = \pi c \delta^2,$$

$$\delta = \begin{cases} 0.1r & (0 \leq L \leq 0.01r) \\ \frac{1}{2} \sqrt{4r|L| - L^2} & (L < 0) \end{cases} \quad (7)$$

ここで、 A は粒子同士の接触面積、 δ は接触半径、 r は粒子半径、 L は粒子表面間距離である。

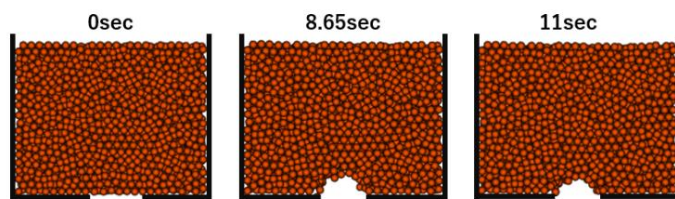


図-4 粘着力を導入した球形粒子での解析結果

4. 結論

SPH-DEM による陥没再現解析の精度向上のため、特にアーチの長時間安定化に着目した再現解析を実施した。粒子形状に伴う噛み合い効果については、従来の転がり摩擦でも定量的に表現できる可能性を示した上で、粘着力として粒子間距離によらない一定の力が働くモデルを採用することで、空洞の安定について一定の精度向上を示すことができた。しかしながら、現時点では実際よりも安定する時間がまだ短い傾向にあるため、特に DEM 粒子では解像できない細粒土粒子に伴う粘着力をいかにモデル化するかを今後検討していきたい。

参考文献

- (1) 辻勲平, 浅井光輝: 含水に伴う見かけの粘着力を考慮した SPH-DEM 連成解析による地盤陥没現象の再現, 土木学会論文集 A2 Vol. 75, No. 2 p. 1_203-1_213, 2019.
- (2) 小西康彦, 福永健一, 大峯秀一, 深谷渉, 竹内大輔: 下水道管起因の地盤内空洞発生と地表面陥没危険度の実験的研究, 下水道協会論文集 Vol. 55, No. 670, pp. 124-133, 2018.