

地盤陥没現象の解明に向けた粘着力モデルを導入した粒子法による固液混相流解析

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. はじめに

近年、我が国では下水管の経年劣化が要因の道路陥没被害が各地で発生しており、老朽化の進行を加味すると、将来的な被害数の増加が危惧されている。現在のところ、陥没までのメカニズムは未だ不明瞭な点も多く、陥没現象の解明に向けて様々な研究が行われてきた。小西らの研究¹⁾では、下水管の損傷を模擬した実物大の土槽を用いて空洞発生から陥没までの実験を行い、①土砂は地下水の流出とともに排出され、下水管が地下水位以下で空洞や緩みが発生する。②地下水位以下で土砂は時間経過とともに緩みながら排出、地下水位以上で空洞が発生。③空洞発生後、空洞上部の力学特性により崩壊が連続して陥没に至る等の結果を得ている。このように、実験による現象解明に関する推測は実施されてきたものの、実験では内部の土砂、水の移動観察に限界があるため、数値計算による詳細な内部状態の把握が求められている。そこで本研究では、地盤内の空洞発達から陥没に至るまでの一連の現象に対し、水・土をそれぞれ粒子法の一つである SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics) と離散要素法 (DEM: Discrete Element Method) にてモデル化した 3 次元数値解析を行い、下水管の損傷に起因する地盤内の空洞発達特性を解析的に解明することを目標にした。

2. 解析手法

既往の研究²⁾により、本研究で用いる SPH-DEM 連成解析手法の妥当性が確認されている。しかし、本対象は地下水で湿潤した不飽和土のため、DEM に含水に伴う見かけの粘着力を新たに考慮することで、乾燥—不飽和—飽和状態まで解析できる粘着力モデルの構築を行った。

2.1 SPH 法による流体解析

流体には非圧縮性流体解析手法の中でも、既往の研究と同様に安定化 ISPH 法を用いた。流体の主な対象は浸透流であるため、連続の式、及び Navier-Stokes 式と拡張ダルシー則を統一表記した運動方程式を支配方程式とする。

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

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

$$\begin{cases} -a(\varepsilon)\varepsilon \mathbf{v}_r - b(\varepsilon)\varepsilon^2 \mathbf{v}_r |\mathbf{v}_r| & (\varepsilon < 0.8) \\ -\frac{3}{4} C_d \frac{(1-\varepsilon)\rho_f \mathbf{v}_r |\mathbf{v}_r|}{d_s} \varepsilon^{-2.7} & (\varepsilon \geq 0.8) \end{cases} \quad (2)$$

式(2)は間隙率 ε をパラメータとし、右辺第 4 項には土粒子からの抵抗力を表す。抵抗力に関しては浸透流域 ($\varepsilon < 0.8$) と固体希薄流域 ($\varepsilon \geq 0.8$) で力の切り替えを行う。水中の固体粒子は抵抗力の反力 (抗力) が作用するため、この力を介して固液の連成を行う。

2.2 DEM による固体 (土粒子) 解析

本研究では球形 DEM 粒子による土粒子解析を行う。土粒子の並進運動方程式は下記の通りである。

$$m_s \frac{d\mathbf{v}_s}{dt} = m_s \mathbf{g} + \mathbf{F}_f + \sum \mathbf{F}_c + \sum \mathbf{F}_{coh} \quad (3)$$

$$\mathbf{F}_d = \begin{cases} a(\varepsilon)\varepsilon \mathbf{v}_r + b(\varepsilon)\varepsilon^2 \mathbf{v}_r |\mathbf{v}_r| \frac{V_s}{1-\varepsilon} & (\varepsilon < 0.8) \\ \frac{3}{4} C_d \frac{(1-\varepsilon)\rho_f \mathbf{v}_r |\mathbf{v}_r|}{d_s} \varepsilon^{-2.7} \frac{V_s}{1-\varepsilon} & (\varepsilon \geq 0.8) \end{cases} \quad (4)$$

ここで、 $\mathbf{F}_c$ は土粒子間での接触力、 $\mathbf{F}_{coh}$ は次節で示す含水に伴う見かけの粘着力、 $\mathbf{F}_f$ は流体力であり、浮力 $\nabla P V_s$ と抗力 $\mathbf{F}_d$ (式(4)参照) を表す。抗力は前節通り、流体の抵抗力の反作用として与える。なお、式(2)は単位体積当たりの力を示すため、土粒子 1 つが受ける力に変換する。接触力の計算には通常の DEM と同様にバネ・ダッシュポットで評価するため、詳細は割愛する。また、本研究では球形 DEM 粒子を用いていることから、土粒子形状から発揮される安息角といった急傾斜を再現できない。そのため、福本ら³⁾を参考に人工的に回転を抑制する転がり摩擦を導入した。その影響の大きさを示すパラメータは円柱供試体を用いた事前解析で決定する。

2.3 含水に伴う見かけの粘着力のモデル化

本研究においては、含水に伴う見かけの粘着力として、F. Soulie ら⁴⁾が提案する実験ベースの粘着力モデルと、X. Sun ら⁵⁾が提案するトロイダル近似を用いた架橋形状の算出による理論ベースの粘着力モデル（図-1 参照）、これら2種について検討を行った。実地盤においては、様々な粒子形状を有しているために、その地盤の粘着力が十分に発揮される。しかし、提案する計算モデルでは、粗粒子のみを DEM 粒子としてモデル化し、細粒分を無視していることから、見かけの粘着力が過小評価される恐れがある。それらの影響を考慮するために両モデルに換算パラメータ α を導入することとする。本発表においては X. Sun らのモデルのみ紹介し、換算パラメータを考慮した場合の見かけの粘着力を次式に示す。

$$F_{coh} = \alpha(\Delta p \rho_{in}^2 + 2\gamma \rho_{in})n \quad (5)$$

ここで α は換算パラメータ、 Δp はラプラス圧、 ρ_{in} は架橋内部半径、 γ は表面張力、 n は単位法線ベクトルを表す。

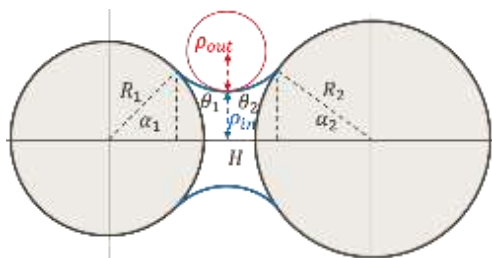


図-1 水分を保持した二球間に作用する液体架橋力

3. 地盤陥没実験の再現解析

本研究では過去の小西らの実験¹⁾と対応する条件にて、地盤陥没の再現実験における土流出の流出、地盤の崩壊プロセスを定性的に表現することを試みた。解析モデルとして幅 300mm、高さ 200mm、奥行 50mm の小型土層モデルを作成し、底部に下水管の損傷部を再現した 20mm のスリットを設けた。さらに、地下水の存在を想定した高さ 5cm の水位を設定し、水（SPH）と土

（DEM）の連成解析を行った。この際、不飽和地盤・飽和地盤ともに DEM 計算における見かけの粘着力を与えることとし、地下水位以下の地盤（飽和地盤）では不飽和地盤の粘着力よりも小さくなるように設定した。その結果、実験と同様に水の流出により、水平方向に空洞が成長し、天井部が不安定化、崩落、崩落土の流出、天井部のアーチ状の安定を繰り返す様子が確認できた（図-2、図-3 参照）。

4. 結言

本研究では、既往の研究の DEM 解析に含水に伴う見かけの粘着力を考慮することで、不飽和土の挙動解析を試みた。その結果、下水管の損傷を模した実験の再現解析においては、実験同様の結果を定性的に再現することができた。しかし、時系列変化といった定量的な再現はできていないため、今後は透水係数の調整、粘着力モデルの改良等を実施することが必要である。また、不飽和浸透を考慮した SPH の開発も望ましいと考えられる。

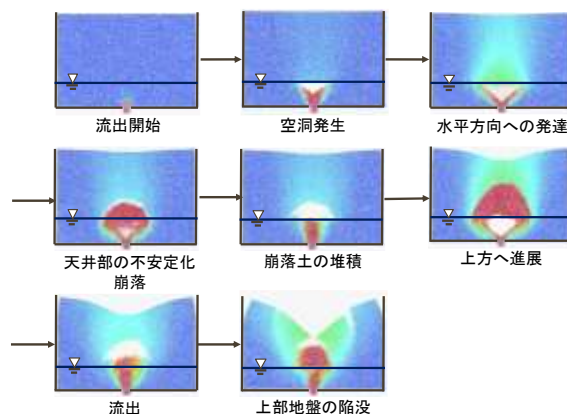


図-2 地盤陥没の再現解析結果



図-3 小西ら¹⁾による地盤陥没再現実験

参考文献

- (1) 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, 下水道協会誌, Vol.55, No.670, pp.124-133
- (2) 原崎健輔, 浅井光輝, SPH-DEM による固液混相流解析の妥当性確認と粗視化粒子モデルによる洗掘現象解析, 日本計算工学会論文集, No.20182001, 2018.
- (3) 福元豊, 坂口秀, 村上章, 地盤材料の破壊基準を表現するためのシンプルな個別要素モデル, 土木学会論文集 A2(応用力学), Vol.67 No.1, pp.105-112, 2011.
- (4) F. Soulie, F. Cherblanc and M.S.El Youssoufi and C.Salix, Influence of liquid bridges on the mechanical behavior of polydisperse granular materials, *Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech.*, 30: 213-228, 2006.
- (5) X. Sun, M. Sakai, A liquid bridge model for spherical particles applicable to asymmetric configurations, *Chemical Engineering Science*, 182: 28-43, 2018.