

水 - 土粒子連成現象が関与する道路陥没現象の解明に向けた 3次元 SPH-DEM 連成解析

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. 研究背景・目的

平成 27 年度現在, 日本の下水道の総延長は約 47 万 km であり, そのうち下水管の耐用年数 50 年を超えたものが約 1.3 万 km となっている¹⁾. 近年, 下水管の経年劣化が要因と思われる道路陥没被害が各地で発生しており, 今後は老朽化した下水管の増加に伴い道路陥没被害が増加する傾向にあることが危惧されている. 下水管に欠陥が生じることで, 地下水と同時に土砂が内部に流出し, 地盤内部に空洞が発生・発達することが道路陥没の一因となることは指摘されているが, 陥没に至るまでのメカニズムの詳細は未だ不明な点も多い. 空洞の発達メカニズムを解明するための土層実験や, 2次元数値解析が実施されているものの, 実験では内部観察が困難であり, また2次元解析では実験の再現が出来ていないのが現状である. そこで, 本研究では, 地盤内の空洞発達から陥没までの一連の現象に対し, 粒子法である SPH と DEM を組み合わせた3次元数値解析を行い, 下水管の損傷に起因する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

先行研究として, SPH 法による流体解析と, DEM による土粒子解析を組み合わせ, 防波堤マウンドのパイピング破壊, および鉛直噴流の解析が行われており, 実験との比較によりその妥当性が確認されてきた²⁾. しかし, その対象となっていたのは, 水中の土砂礫(飽和土)や空気中の乾燥土であったため, 本研究対象のような地下水で湿潤し一定の水を含んだ土(不飽和土)に対しては, その見かけの粘着力による団粒体の形成や土塊の自立といった不飽和土特有の挙動は再現できなかった. そのため, 本研究では先行研究での SPH-DEM 連成解析手法に, 含水に伴う見かけの粘着力の効果を組み込むことで, 乾燥, 飽和, 不飽和状態に適応する水-土粒子連成解析手法の開発を行った.

2.1 含水に伴う見かけの粘着力

本研究では, 土粒子の含水に伴う見かけの粘着力として, F. Soulieら³⁾が提案した液体架橋力モデルを採用した.

$$F_{\text{cap}} = \pi\sigma\sqrt{R_1R_2}\left[c + \exp\left(-a\frac{D}{R_2} + b\right)\right]\mathbf{n} \quad (1)$$

ここで σ :水の表面張力, R_1, R_2 :粒子半径($R_1 < R_2$), D :粒子表面間距離, \mathbf{n} :単位法線ベクトル, 定数 a, b, c は架橋体積 V , 接触角 θ , R_2 の関数である(図-1参照). これは, 2つの球体間のメニスカス水の粘着力を水の表面張力によりモデル化した式であり, 至って純粹かつ単純な式である. ただし, 地盤内部では架橋水の体積はバラつき, 加えて土粒子表面の接触角も個体差があるなど, 不確実性の高い地盤材料にこのまま適用することは極めて困難である. また前述のDEM解析では, 複雑な表面形状を有する土粒子を完全な球体としてモデル化しており, また実際の粒度分布をそのまま再現した3次元解析は困難であり, 実際の粒子径とは異なるDEM粒子で解析するため, 式(1)のパラメータを実際の計測と対応させることは非現実的である. このため, 本研究では見かけの粘着力の大きさの見積もりが重要であり, それを簡易的に同定するため, 式(1)のパラメータは推定値にて固定し, その大きさを与える換算パラメータ α を別途定義した次式を使うことにした.

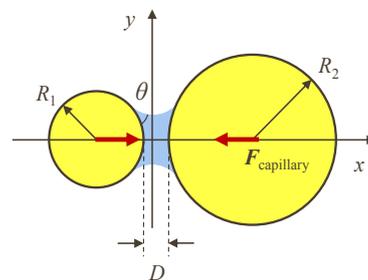


図-1 液体架橋力

$$F_{\text{cap}} = \alpha\pi\sigma\sqrt{R_1R_2}\left[c + \exp\left(-a\frac{D}{R_2} + b\right)\right]\mathbf{n} \quad (2)$$

キーワード SPH-DEM, 陥没, 空洞, 土砂流出

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

3. 円柱供試体試験の再現による各パラメータの同定

平均粒径 $D_0=0.65\text{mm}$ の試料を用いて、直径 5cm、高さ 10cm の円柱供試体引上げ試験を 10 回繰り返した結果、26.5 度の安息角を得た。この再現のため、乾燥状態を想定し（見かけの粘着力の効果を無視）、転がり摩擦のパラメータを変更すると、ある値の時に実験の安息角に最も近い角度、さらに実験後の砂錐と同様の径が得られた(図-2 参照)。続いて、湿潤土の崩壊形態の再現のため、見かけの粘着力の換算パラメータ α を変化させ挙動を観察した。ここでは、土の含水状態によって挙動が大きく変化することを考慮し、粘着力の大きさは試料の平均粒径を模した DEM 粒子間に働く液体架橋力 f_0 に換算パラメータをかけて数値実験を行った。その結果、座屈状の崩壊挙動、安息角の増加、崩壊後の団粒形態が再現できた。また、粘着力をさらに大きくすることで、供試体の自立までを再現することが出来た (図-3 参照)。

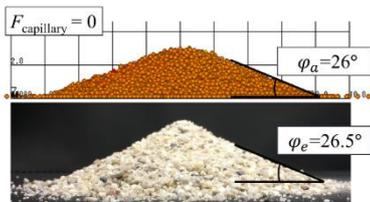


図-2 安息角実験と解析の比較

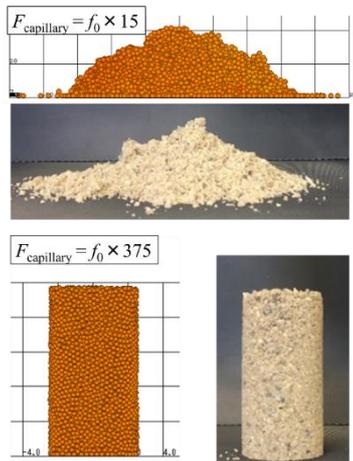


図-3 湿潤土の挙動解析

4. SPH-DEM 連成解析による地盤陥没の再現解析

本研究では過去の実験と対応する条件にて、地盤陥没の再現実験における地盤の崩壊プロセスの定性的な表現を試みた。なお、本研究では桑野ら⁴⁾の実験を参考にし、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。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・飽和地盤ともに DEM 計算における粘着力を与え、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小さくなるように設定した。その結果、実験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。

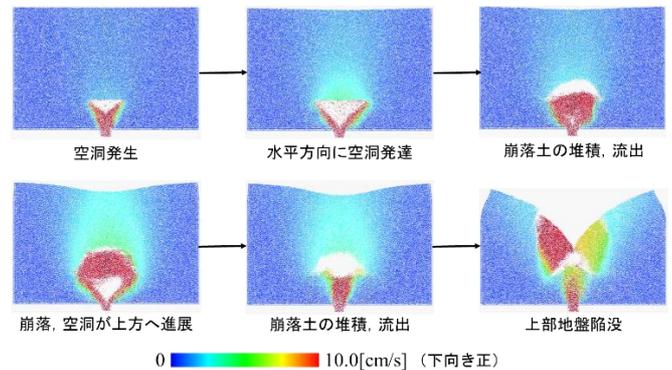


図-4 地盤陥没現象の再現シミュレーション

5. 結論

円柱供試体の実験の再現解析から、転がり摩擦モデルより乾燥砂の安息角を表現し、また見かけの粘着力を適切に付与することで湿潤土特有の団粒形態の崩壊形状を再現した。また、下水管の損傷を再現したモデルの解析においては、粘着力により流出速度は大幅に低下し、また団粒状の落下を表現できることを確認した。しかし、見かけの粘着力の決定方法が不明瞭であり、今後サクシオン等の関係を解析手法に組み込みながら、地盤力学で培われた不飽和土の力学モデルとの整合性を議論していく予定である。特に、不飽和土の挙動はその含水量によって大きく変化するため、含水比に応じた粘着力を適切にモデル化の改良が必要である。

参考文献

- 1) 国土交通省下水道局：「計画的な改築・維持管理」, http://www.mlit.go.jp/mizukokudo/sewerage/crd_sewerage_tk_000135.html, 2018/02/26 閲覧。
- 2) 原崎健輔, 浅井光輝, SPH-DEM カップリング解析による 防波堤マウンドのパイピング破壊解析, 土木学会論文集 A2 (応用力学), Vol.73, No.2
- 3) F. Soulie, et al.: Influence of liquid bridges on the mechanical behavior of polydisperse granular materials, *Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech.*, 30: 213-228, 2006.
- 4) 桑野玲子, 他: 地盤陥没未然防止のための地盤内空洞・ゆるみの探知に向けた基礎検討, 地盤工学ジャーナル, Vol.5, pp.219-229, 2010.