

地中空洞生成に伴う周辺地盤のゆるみに関する個別要素法解析

東京大学生産研究所 正会員 ○大坪 正英

東京大学生産研究所 非会員 Umail Ali

東京大学生産研究所 フェロー会員 桑野 玲子

1. はじめに： 近年多発する路面・地盤陥没対策は現代社会インフラにおいて深刻な課題である。既往の研究では老朽化した地中埋設管に起因する路面陥没が多く報告されている⁽¹⁾。路面陥没の未然防止に向け、地中空洞生成および成長メカニズムに着目した模型実験が実施されている⁽²⁾。しかし、実験で計測可能な物理量は限られるため、土粒子挙動に基づいた陥没現象の解明には至っていない。本研究では、地中空洞生成に伴う周辺地盤のゆるみを定量的に評価することを目的とし、個別要素法（以下、DEM）を用いた土砂流出解析結果について報告する。

2. 解析手法： 2.1 地盤材料 オープンソース・コードの LAMMPS⁽³⁾を用い、Oakforest-PACS システム上で並列計算を実施した。球体粒子(R1)、剛結 2 粒子(R2)、剛結 4 粒子(R4)および剛結 7 粒子(R7)の 4 種類を用いて解析した(図 1)。球体粒子の直径は 1.2-2.2mm とし、剛結粒子 1 粒の体積が球体粒子 1 粒の体積と一致するように剛結粒子を構成する粒子径を低減させた。使用した総粒子数は 15 万(R1)、30 万(R2)、60 万(R4)、105 万粒(R7)であり、剛結後に 15 万粒となるように設定した。

2.2 地盤作成 粒子同士の接触がないように初期座標および粒子方向を無作為に決定し、重力による自由落下で地盤を作成した。地盤密度を変化させるため、3 種類の粒子間摩擦係数($\mu = 0.01, 0.1, 0.4$)を用い、計 12 の地盤を作成した(表 1)。地盤は幅(X 方向)150mm、奥行き(Y 方向)20mm、平均高さ(Z 方向)は間隙比に応じて 220mm~400mm である。X・Z 方向は剛壁境界、Y 方向は周期境界を適用した。側壁摩擦係数は 0、底壁摩擦は粒子摩擦係数と一致させた。粒子間および粒子-剛壁の接触計算は Hertz-Mindlin 理論を適用し、材料物性値はヤング率 71.6GPa、ポアソン比 0.23、比重 2.5 とした。

2.3 流出解析 堆積した粒子の運動エネルギーが十分低下した後、摩擦係数を 0.5 に増加し、底壁中央に幅 5mm(奥行き 20mm)の開口部を生成することで流出を模擬した。開口幅の影響を評価するため、R4 および R7 地盤においては開口幅 15mm の解析も実施した。すべてのケースにおいて接触力増分の 1 割を低減させる減衰を用いた。

3. 地盤の堆積特性： 地盤の間隙比(e)と粒子一粒あたりの平均接触点数(配位数、 C_N)の関係を図 2 に示す。地盤作成時の摩擦係数が大きいほど、また、粒子形状が複雑なほど間隙比が増大した。剛結粒子の配位数は球体粒子より大きい結果となった。剛結(非球体)粒子地盤では粒子方向の異方性が顕著であったが、これに関する議論は割愛する。

地盤作成時の摩擦係数を 0.1 とした粒子形状の異なる 4 ケースの比較、および R1 地盤における密度の影響について以下に報告する。

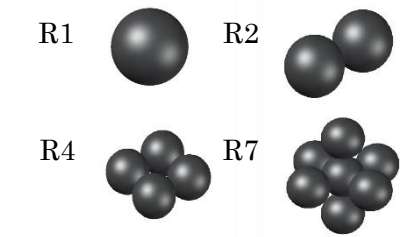


図 1 解析に使用した粒子形状の種類

表 1 解析ケース

粒子種類	摩擦係数(μ)		粒子数(万)		間隙比	配位数
	作成	開口	総数	剛結	e	C_N
R1	0.01	0.5	15	15	0.576	5.78
R1	0.1	0.5	15	15	0.64	5.32
R1	0.4	0.5	15	15	0.711	4.56
R2	0.01	0.5	30	15	0.648	8.77
R2	0.1	0.5	30	15	0.732	7.54
R2	0.4	0.5	30	15	0.89	5.48
R4	0.01	0.5	60	15	0.866	8.83
R4	0.1	0.5	60	15	0.945	8.13
R4	0.4	0.5	60	15	1.14	6.43
R7	0.01	0.5	105	15	1.51	8.23
R7	0.1	0.5	105	15	1.63	7.44
R7	0.4	0.5	105	15	1.9	6.11

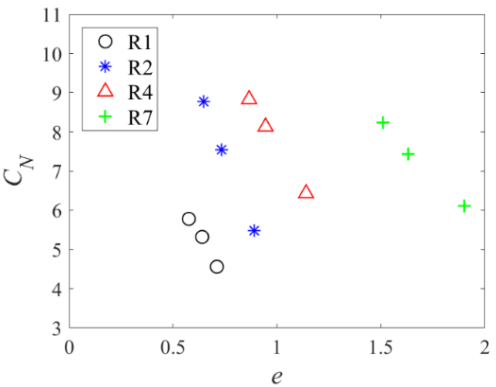


図 2 間隙比と平均接触点数(配位数)の関係

キーワード 地中空洞，地盤変形，土砂流出，個別要素法，粒子形状，アーチ効果
連絡先 〒153-8505 東京都目黒区駒場 4-6-1 東京大学生産技術研究所 TEL 03-5452-6843

4. ゆるみの評価： 4.1 開口幅 5mm 球形粒子 (R1) 地盤の鉛直変位コンター(開口後 0.2、0.6、1 秒)を図 3 に示す。開口直後に発生した円形のゆるみ領域は次第に拡大し、全体的な沈下に至った。R1 地盤における初期密度の影響を図 4 に示す。開口後 0.2 秒において比較すると、密度が低いほどゆるみ領域の拡大が顕著であったが、密詰め地盤においても連続的に流出した。

剛結 2 粒子 (R2) 地盤に対する鉛直変位コンター(図 5)に着目すると、開口部位置から鉛直方向にゆるみ領域が拡大する様子が確認される。この場合も連続的に流出したが、R1 地盤(図 3)と比較して流出速度は減少した。

一方、剛結 4 粒子 (R4) および 7 粒子 (R7) 地盤では、開口部近傍の粒子のみ流出し安定状態に至った。この時の R4 地盤内の粒子間鉛直力 (F_n) を図 6 に示す(接触力の大きい順に 10%のみ表示)。開口部の深度では、開口部両側に接触力が集中しているが、浅い位置では均質な接触力分布が確認される。つまり、地盤内に形成されたアーチ効果により流出が抑制されたと判断される。

4.2 開口幅 15mm 開口幅を 15mm とした場合、R4 地盤に発生したゆるみは鉛直方向に拡大し、連続的に流出した後に地表面の沈下に至った(図 7)。同様の結果が R7 地盤でも確認された。これよりアーチ効果による流出抑制には、粒径に対する開口幅比が重要であると考えられる。

5. 考察： ゆるみ領域の拡大速度および性状は土粒子形状および初期密度に依存することが確認された。一方で流出の有無に関しては、粒子形状および粒径/開口幅比に大きく依存すると考えられる。剛結粒子の平均配位数には顕著な差はないため(図 2)、配位数よりも粒子形状の方が重要であると推察される。ひとたび発生したゆるみ領域は連続的に地表面へと拡大する様子が確認された。

6. 結論： 地中空洞発生時の周辺地盤のゆるみ現象に関して DEM で検討した結果、以下のような知見を得た。(a) 球形粒子を用いた場合、ゆるみ領域が拡大し地盤全体が沈下した。(b) 剛結粒子の場合、開口部位置から鉛直方向にゆるみ領域が拡大した。アーチ効果が発揮されると流出は抑制された。(c) 流出の有無は、粒子形状、粒子径/開口幅比に大きく依存すると考えられる。

参考文献： (1) 桑野、堀井、山内、小橋 (2010) 老朽下水管損傷部からの土砂流出に伴う地盤内空洞・ゆるみ形成過程に関する検討、地盤工学ジャーナル、5(2)、349-361。 (2) 桑野、大原、瀬良 (2018) 模型実験で観察された砂地盤内の空洞の発達過程と陥没メカニズムに関する考察、第 53 回地盤工学研究発表会。 (3) Plimpton S. (1995). Fast parallel algorithms for short-range molecular-dynamics. *Journal of Computational Physics*, 117(1), 1-19.

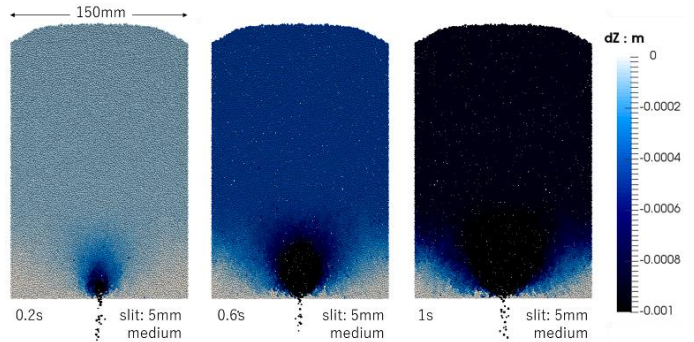


図 3 球体粒子(R1)の鉛直変位 (0.2, 0.6, 1 秒後)

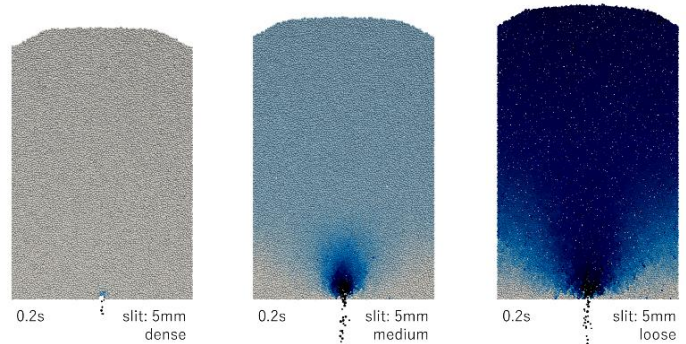


図 4 球体粒子(R1)における初期間隙比の影響 (0.2 秒後)

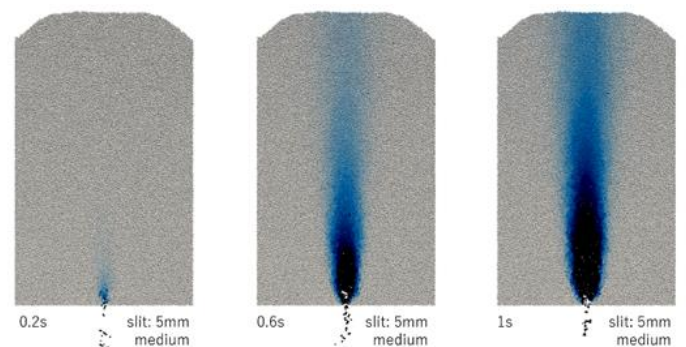


図 5 剛結 2 粒子(R2)の鉛直変位 (0.2, 0.6, 1 秒後)

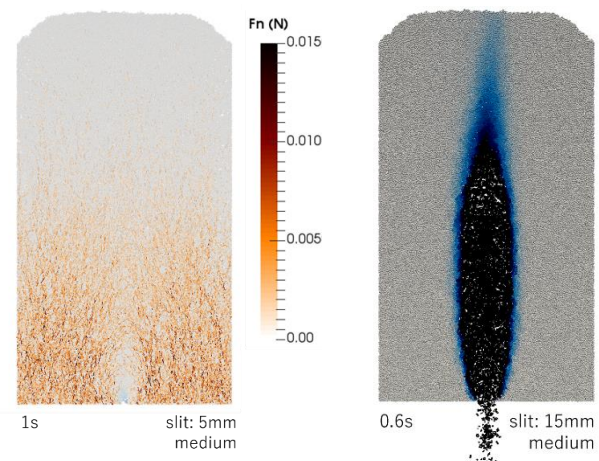


図 6 剛結 4 粒子(R4)の鉛直変位と粒子間接触力 (開口幅 5mm、1 秒後)

図 7 剛結粒子(R4)の鉛直変位(開口幅 15mm、0.6 秒後)