

令和元年5月31日現在

機関番号：12601

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2017～2018

課題番号：17H06613

研究課題名(和文) 実験・数値解析による地盤陥没発生機構の解明とその評価手法の開発

研究課題名(英文) Experimental and numerical assessment of sinkhole formation and evaluation of cavity growth

研究代表者

大坪 正英 (OTSUBO, MASAHIDE)

東京大学・生産技術研究所・助教

研究者番号：80804103

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では地中空洞の成長と陥没発生メカニズムに関する研究を実施した。乾燥あるいは完全飽和状態の地盤では不飽和によるサクシオンが作用しないため地中空洞が保持されず地表面沈下が発生する。粒径2mmを超える貧配合材料では、不飽和状態でも表面張力が不十分なため空洞が形成されない。地中空洞が保持された状態ではアーチ状の応力伝達機構が発現することで地盤は安定しているが、地下水の上下の繰り返しにより空洞が成長した後に地表面陥没に至ることがある。個別要素解析を用いてアーチ機構を定量的に評価することで、様々な粒径に対する飽和度と地盤安定性の関係、粒子形状によるインターロッキング効果と地盤安定性の関係を整理した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

学術的意義としては、本研究課題に関する縮小模型実験手法を確立させたこと、地中空洞安定性に及ぼす地盤材料の粒径、粒子形状、粒子表面摩擦、締固め密度の影響を検討したこと、新たな数値解析コードを用いて空洞周りのアーチ効果および飽和度の影響を粒子スケールで評価したこと、空洞を有する地盤の弾性波伝播特性を実験・数値解析にて検討したこと、などが挙げられる。今後も基礎的研究を継続することで、地盤材料特性および飽和度データを有効活用した陥没危険度評価手法の高度化に貢献できる。また、地中空洞レーダーで計測可能な空洞形状の情報を基にした安定解析を実施することができ、現行の陥没危険度評価指針の一助となり得る。

研究成果の概要(英文)：This study investigated the development/expansion of a subsurface cavity and the mechanism of subsequent sinkhole. Soils with dry or submerged conditions cannot sustain a subsurface cavity due to lack of inter-particle suction, which causes surface settlement. Similarly, soils comprised of poorly graded large grains cannot sustain a subsurface cavity as the suction force is insufficient even under unsaturated conditions. When a stable cavity is held due to arching effects, the surface settlement appears to be negligible. However, repetition of increase/decrease in underground water level induces growth of cavity followed by a catastrophic collapse of the ground surface. Using the discrete element method, for various median sizes of soil grains, the influence of degree of saturation and shape of soil grain (i.e. interlocking effects) on the stability of ground were analysed.

研究分野：地盤工学

キーワード：地中空洞 地盤陥没 アーチ効果 個別要素法 模型実験 粒状体 波動伝播

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

平成28年9月に発生した宮崎県都城市畑地の陥没および同年11月に発生した福岡県福岡市道路大陥没は社会に大きな衝撃を与えた。同様の災害は国内外問わず頻発しており社会問題として取り扱われる国もある。例えば、ネパールのポカラ山間部における度重なる陥没被害をはじめ、アメリカ合衆国、英国、韓国あるいはオランダ等の先進国でもその被害は絶えない。

地盤内空洞の生成原因は地盤内の潜在水みちに沿う土砂流出（自然型）と下水管路の老朽化や損傷に起因する場合（人工型）がある。後者のみでも国内で年間3千件以上の陥没が発生している。道路延長約1万キロメートルに及ぶ調査結果によると、東京都23区内の主要道路では約2.1個/kmの空洞が存在しているため、空洞位置および陥没危険度の適切な評価は喫緊の課題である。

近年、このような陥没事故を未然に防ぐための地中レーダーによる地盤内空洞探査技術が発達している。その一方、弾性波計測による地中空洞探査は容易ではなく、データ解釈の高度化および精巧な技術の構築のため今後一層の研究が必要である。

2. 研究の目的

本研究では下記三点を研究開始当初の目的とした。

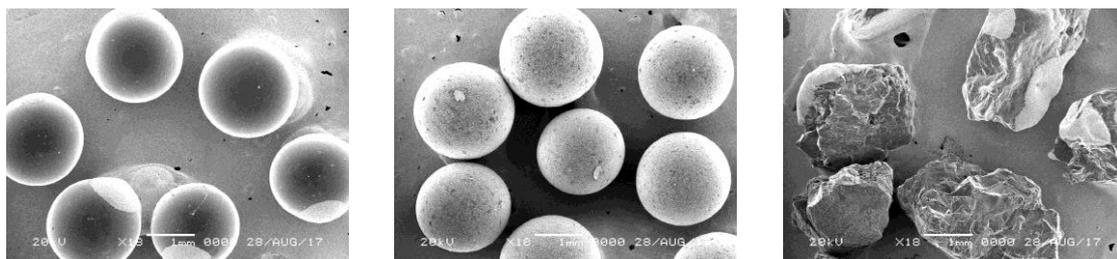
- (1) 地盤内空洞の生成に伴う周辺地盤のゆるみを評価し、空洞拡大から地表面陥没に至る力学的機構の解明を試みる。当該研究分野においては、ゆるみ現象の明確な定義がないため、これを定量化する手法を開発する。
- (2) 空洞生成に伴う周辺部地盤の変形および力の分担機構の変化に着目し、空洞周辺の局所の変状と地表面陥没の因果関係を数式化する。
- (3) 弾性波探査による空洞が存在する場合の弾性波伝播機構を明確にする。

3. 研究の方法

本研究では縮小（約1/10）模型実験と個別要素法数値解析を組み合わせることで多角的視点から研究課題解決に取り組んだ。模型実験では新たに製作した模型土槽を使用し、約0.2mmから2mm程度のガラスビーズを用いた場合と、同粒径の珪砂を用いたより現実的な場合を検討した。実験のパラメータとして、地盤材料の飽和度、締固め密度、初期の地下水位置、土槽底面に設置したスリットから土砂を吸い出すことで地中空洞形成過程を再現した。スリット幅は5mmを基本とし、最大15mmまで広げることができるよう設計した。

模型実験結果のさらなる解釈のために個別要素法数値解析を実施した。剛壁と周期境界を組み合わせた境界を設定し、壁面の影響が十分低下するように模型寸法を設定した。小粒径の材料をモデル化するには粒子数が百万粒を超えるのに加え膨大な解析ステップが必要であるため、Oakforest-PACSシステム上で並列解析を実施した。実験と同様に、粒径、粒子形状、締固め密度の影響について検討した。また、飽和度を入力パラメータとした粒子間付着力モデルを新たに実装し、地盤全体挙動に対するサクシジョンの効果について整理した。

地中空洞を有する地盤の波動伝播特性についても研究した。円筒形の模型土槽にディスタンスデューサーを設置し、珪砂地盤の地表面から起振し、地中を伝播した弾性波を模型土槽底面で受信した。数値解析も実施することで、地中空洞を有する地盤の振動特性を分析した。



表面の滑らかなガラスビーズ

表面の粗いガラスビーズ

珪砂

図1. 実験に用いた材料のSEM（走査電子顕微鏡）画像

4. 研究成果

(4.1) 地中空洞生成に及ぼす材料種類及び状態の影響

本研究では主に表面の滑らかなガラスビーズ、及び珪砂を用いた実験を行った。粒子表面摩擦の影響を評価するために表面の粗いガラスビーズを用いた実験も実施した。模型実験では地中埋設管の破損を想定して、地盤底部のスリットから間隙水と共に土砂を流出させた(図1)。その結果、地中空洞が生成する場合、あるいは土砂が連続的に流出する場合が観測された。

得られた実験データを分析した結果、空洞が安定的に保持されるためには次の条件が必要であることが明らかとなった(重要度の高い順に記載)。**①**乾燥状態あるいは飽和度が高い場合はサクシオンが作用せず空洞は生成しない。**②**粒径が2mm程度より大きい場合(礫材相当)、サクシオンによる粒子間付着力が土粒子の重量を支えきれず地中空洞は生成しない。**③**粒径が0.2mm程度まで小さくなると(細砂)、毛細管現象による表面張力が大きくなり地表面付近まで高い飽和度を示し、結果としてサクシオンの低下による空洞の崩壊が生じることがある。**④**粒度幅が広い場合でも細砂を多く含む場合、**③**同様の結果に至ることが確認された。**⑤**ガラスビーズ地盤の場合、粒子間の噛み合わせによる抵抗が低く、角のある珪砂地盤に比べて空洞が崩壊しやすい傾向にある。また、ガラスビーズは安息角が低く、生成した空洞は横方向に広がりやすい傾向がある(図2、図3)。**⑥**締固め度が大きいと空洞は安定して保持される。**⑦**粒子表面摩擦が大きいと空洞は安定する。

実験と同様の条件で個別要素法による土砂流出解析も実施した。地盤の密度が大きいほど土砂流出速度が低下することが確認された。また、球体以外の粒子形状を用いた場合、地盤の緩み領域が鉛直方向に進展し、空洞が上昇していく様子が確認された(図3)。

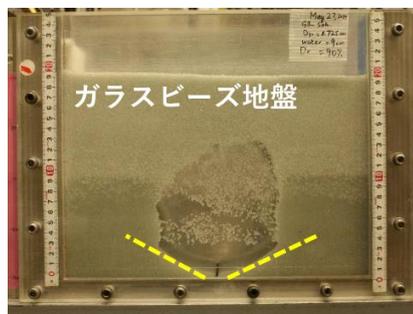
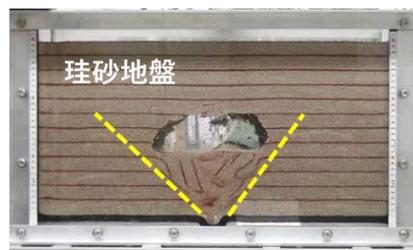


図2. 地中空洞の成長の様子

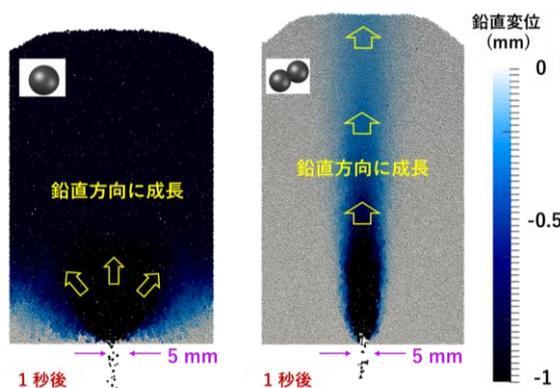


図3. 土砂流出の数値解析

表1. 空洞の安定化と土砂流出特性に関する観測結果

土粒子形状	同密度の場合、角のある材料ではアーチ効果が強く作用。角のある材料では土砂流出抵抗が増加し、空洞はより鉛直方向に成長する。
粒径	礫材(>2mm)では空洞が生成しない。0.2mm程度の細砂を多く含むと飽和度が上昇し易くなり、サクシオンの低下で空洞が保持できなくなる場合がある。
表面摩擦	同間隙比において、粒子表面摩擦が大きいほどアーチ効果が強く作用。
地盤密度	密度が大きいほどアーチ効果が強く作用。土砂流出速度も低下。
飽和度	乾燥状態はサクシオンが作用せず空洞は保持されない。また、飽和度が高くなるとサクシオンが低下するため、空洞が崩壊しやすくなる。

(4.2) 空洞周りアーチ効果における地盤内応力伝達機構

研究目的(2)及び(3)を達成するために、個別要素法を用いて土粒子間の接触力網を図示することで地中の応力伝達機構を可視化した(図4)。上記のように不飽和によるサクシオンが不十分な場合、生成した地中空洞は保持できないため、本解析においては粒子間付着力モデルを新たに実装することでより現実的な数値解析を実施した。地中空洞が存在しない場合の応力分布は等方的であるのに対して(図4左)、地盤底部中央の土粒子群を取り除いた場合は空洞上に大きなアーチ状の応力網が確認された(図4右)。ここで着目したいのが空洞の大きさに対するアーチの大きさである。地中空洞周辺の粒子は一見地盤の骨格構造に寄与しているように見えるが、実際には接触力をほとんど伝達しておらず、粒子間付着力の影響でその場に留まっ

ている状態であると考察される。この領域は既往の研究で表現される“ゆるみ”に相当すると考えられる（図4中央）。模型実験では地中の応力分担を評価できないが、図4右に示すように局所的な変位が生じている領域の相関が大きいのではないかと推察される。ゆるみ領域の外側に安定したアーチ効果が発現しているため、大きな外力が作用する場合あるいは完全飽和/乾燥状態に変化する場合を除いて地盤陥没のリスクは低いと考えられる。しかし、豪雨や地震の際には陥没の危険度が高くなる可能性はあるため空洞充填等の措置は必要である。

地中空洞形成に及ぼす粒子形状効果について数値解析を実施した結果、球形のガラスビーズ相当の材料よりも、複雑な形状の粒子を用いた場合は粒子間かみ合わせが向上することで、地盤全体としてより安定したアーチ機構が発現することを確認した。非球体粒子を用いた場合、インターロッキングと粒子間付着力の相乗効果により安定したアーチの形成が確認された。

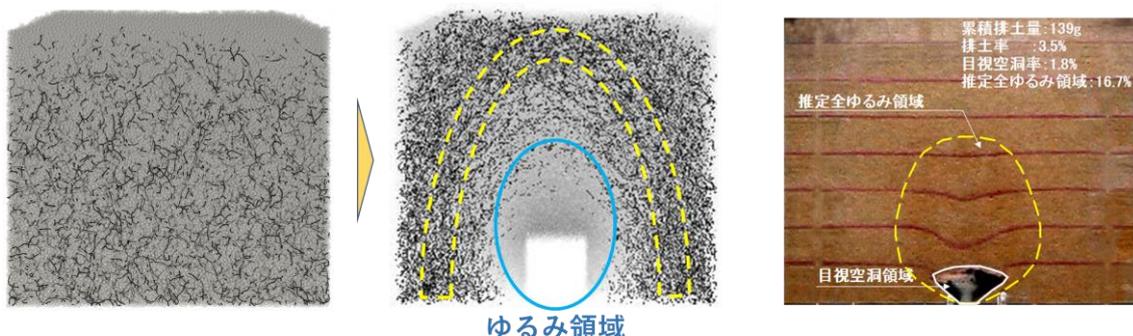


図4. 地中空洞生成に伴う応力分担の変化とゆるみ領域の解釈（右図：桑野玲子教授提供）

(4.3) 地中空洞を有する地盤の弾性波伝播特性

研究目的（3）に関して、地中空洞を有する地盤に対する波動伝播特性について取り組んだ。実験では珪砂地盤に対して地表面から起振し、地中を伝播した弾性波を模型土槽底面で受信した。地中空洞付近を伝播する弾性波速度は低下し、さらに受信した波形について高周波成分が減衰した。この傾向は地中空洞が大きくなるほど顕著になり、空洞を有する地盤の振動特性を評価する際に重要となり得る。数値解析では現実よりも大きな粒子間付着力を作用させ、大きな空洞を有する地盤に対する検討も行った（図5）。実験結果と同様の傾向を確認したことに加え、空洞天端における弾性波の反射現象、および空洞位置における回折現象を観測することができた。



図5. 弾性波伝播解析の様子

(4.4) まとめ

本研究を実施した結果、材料の種類および地盤の状態次第で、①空洞は生成せず土砂流出が継続する場合、②アーチ状の応力伝達網が形成されることで地中空洞が安定化する場合の2種類に大別できることを示唆する結果を得た（表1）。地盤内サクシオンが小さい場合は現象①が発生し、土砂流出領域が短期間のうちに地表面まで到達することで地表面の沈下に繋がる（図3）。一方で地中空洞が安定化している場合は地表面における変状は確認されず、図2に示すように時間をかけ徐々に拡大・成長を続けることで大規模の陥没を引き起こす可能性がある。

埋設管破損に起因する比較的浅い位置では空洞がもたらす路面陥没は比較的小規模であるのに対して、地中深く生成する自然由来の空洞は成長するに従い幅も広がるため大陥没発生の危険性が生じる。陥没を未然に防ぐには、地中空洞が安定して存在している間に効率良く発見し、充填剤の注入等の適切な措置をとる必要がある。

地中レーダーによる空洞探知技術は深度 1.5m程度までは精度良く適用できるが、より深い場所にある空洞検知に関しては弾性波データを上手く活用できる可能性が示唆された。波動伝播速度のみならず周波数の空間的な変化を検知することで、地中空洞探査技術の高度化に繋がることが期待されるため、今後も研究を継続する予定である。

5. 主な発表論文等

[学会発表] (計 10 件)

- ① Umair Ali, Masahide Otsubo (2019) A study on arching mechanism in trapdoor model test and equivalent discrete element simulations, The 16th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (16ARC), 10 月, Taipei, Taiwan. (国際学会)
- ② 中田 祐輔, 桑野 玲子, 大坪 正英 (2019) 地中空洞周りの波動伝播特性に関する個別要素法解析, 土木学会第 74 回年次学術講演会, 9 月, 香川県高松市.
- ③ Umair Ali, Masahide Otsubo, Reiko Kuwano (2019) Particle-scale analysis of soil arching during underground cavity formation using suction-tension model in DEM, 8th International Conference on Discrete Element Methods (DEM8), 7 月, Enschede, The Netherlands. (国際学会)
- ④ 中田 祐輔, 大坪 正英, Umair Ali, 桑野 玲子 (2019) 弾性波伝播特性における地盤内空洞の影響に関する基礎的検討, 第 54 回地盤工学研究発表会, 7 月, 埼玉県大宮市.
- ⑤ Takehiko Nitta, Hiroaki Miyatake, Toshikazu Sawamatsu, Tomohiro Fujita, Noboru Sato, Masahide Otsubo (2019) Inclined model experiment and discrete element method simulation of reinforced soil wall with leakage of backfill material, 7th International Symposium on Deformation Characteristics of Geomaterials (IS-Glasgow 2019), 6 月, Glasgow, UK. (国際学会)
- ⑥ 大坪 正英, Umair Ali, 桑野 玲子 (2018) 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, 土木学会第 73 回年次学術講演会, 第 53 回地盤工学研究発表会, 7 月, 香川県高松市.
- ⑦ Umair Ali, 大坪 正英, 桑野 玲子 (2018) Arch formation during trapdoor tests - Experimental and numerical verification, 第 53 回地盤工学研究発表会, 7 月, 香川県高松市.
- ⑧ Masahide Otsubo, Reiko Kuwano, Umair Ali, Hiroaki Ebizuka (2018) Trapdoor model test and DEM simulation associated with arching, 9th International Conference on Physical Modelling in Geotechnics, 7 月, London, UK. (国際学会)
- ⑨ Masahide Otsubo, Reiko Kuwano, Catherine O'Sullivan (2018) Numerical assessment on shear wave propagation through narrowly gap-graded packing, 6th European Conference on Computational Mechanics, 7th European Conference on Computational Fluid Dynamics, 6 月, Glasgow, UK. (国際学会)
- ⑩ Umair Ali, Masahide Otsubo, Reiko Kuwano (2018) Verification of trapdoor discrete element method simulation, 6th European Conference on Computational Mechanics, 7th European Conference on Computational Fluid Dynamics, 6 月, Glasgow, UK. (国際学会)

[その他]

Researchmap の個人ページ: <https://researchmap.jp/momap/>

6. 研究組織

(1) 研究分担者

なし

(2) 研究協力者

研究協力者氏名 : 桑野 玲子

ローマ字氏名 : (KUWANO, reiko)

研究協力者氏名 : Catherine O'Sullivan

研究協力者氏名 : Kevin J. Hanley

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。