

研究成果報告書

研 究 題 目		構造物と地盤の境界部の水ミチ発生による空洞及び陥没発生の進行過程及びその評価	実 施 年 度 2019-2020 年度
代 表 研 究 者	所 属	山口大学大学院創成科学研究科	
	氏 名	森 啓年 印	
1. 研究の目的・背景 (1) 背景 国土交通省の「道路の陥没発生件数とその要因（平成 28 年度）」によると、12,334 件の道路陥没が発生し、うち 59 件（0.5%）が電力に関する道路占用物件が陥没の原因であるとしている。電力施設が原因となる道路陥没の発生件数は決して多くないものの、道路が一時的に使用できなくなる社会的な影響を考えると、可能な限りその発生を抑制することが求められている。また、2018 年 7 月の西日本豪雨（平成 30 年 7 月豪雨）においては、中国電力明塚発電所浜原ダムボート練習場の護岸において裏込め土の吸出しによると思われる陥没が発生している。ダムの基幹設備ではないものの、発電施設においても構造物周辺の陥没は問題となっている。 一般的に構造物と地盤の境界部が様々な外力の浸透を繰返し受けると、水ミチの発生が懸念される。一度水ミチが発生するとそれを通じて、土粒子が流出することで空洞が進展し、構造物周辺の陥没に繋がる。近年の気候変動や土地利用の変化などの影響で、地下水位の変動幅や浸透条件が変化しており、陥没の発生するリスクは高まっていると考えられる。しかし、陥没発生の進行過程やその健全性の評価については、未だ不明な点が多く技術的な課題となっている。 (2) 目的 本研究は、管渠や護岸等の構造物と地盤の境界部分の水ミチ発生を原因とする空洞及び陥没を対象に、その進行過程を解明し、健全性評価の方法を提案するため、模型実験と数値解析を組み合わせた検討を実施するものである。 模型実験では、管渠や護岸の損傷部を模した実験模型に、主に地下水による浸透を与えることにより、水ミチの発生から、空洞の進展、陥没の発生までを再現する。また、数値解析では、地盤の変形や土粒子の流出を再現できる粒子法的一种である SPH（Smoothed Particle Hydrodynamic）法を用いて、実験結果を模擬した再現解析を実施する。それらの結果を統合することにより、構造物と地盤の境界部分に発生する空洞及び陥没発生の進行過程を明らかにする。あわせて、模型実験では進行過程に応じて発生する地表変位をレーザーセンサなどの観測機器により把握し、地表変位から健全性を評価する手法について検討を行う。			

2. 研究成果及び考察（申請時の計画に対する達成度合を織込む）

(1) 模型実験

a) 実験方法

図-1 に示す実験模型を用いて、両側の給水槽の水位を上昇させ、土槽の底部中央の管渠等の損傷を模した開口部（幅 5 mm）から土砂及び浸透水を流出させることで、空洞の進展，陥没の発生までを再現した．進行過程に応じて発生する地表変位については，レーザー距離計により中心部 70mm の範囲において複数点計測した．

実験ケースは表-1 に示す，粒径の大きさによる影響を把握するため模型地盤の作成に使用する地盤材料を変更した 4 ケースと降雨による影響を把握するためのケースの全 5 ケースについて行った．

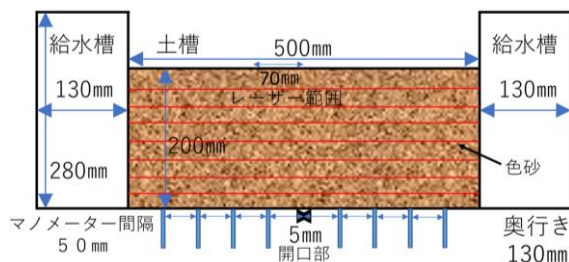


図-1 実験模型

表-1 実験ケース

降雨 材料	雨なし	雨あり
珪砂4号	ケース1	
珪砂7号	ケース2-1	ケース2-2
珪砂9号	ケース3	
岩国真砂土	ケース4	

b) 実験結果

代表的なケースとしてケース 2-1（珪砂 7 号，降雨なし）の実験状況を図-2，地表変位の分布状況を図-3 に示す．ケース 2-1 では，水位 50mm の状態で，空洞の発生に伴い地表も空洞上部を中心に最大 38mm ほど低下した．その後 450 秒で空洞の発達もほぼ落ち着くと，地表変位も特に動きが見られなくなった．次に，600 秒後に水位を 100mm まで上昇させると，空洞が急激に発達し，それに応じて地表変位の見られる範囲が拡大し，その量も大きくなった．780 秒後には，陥没が発生し，実験終了とした．

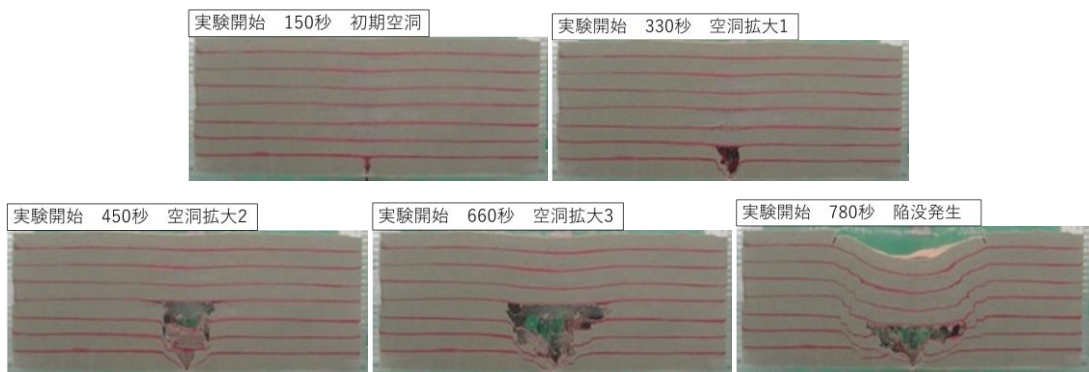


図-2 実験状況（ケース 2-1）

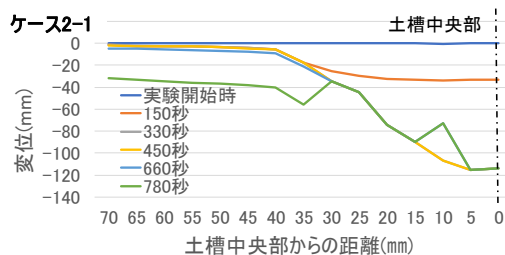


図-3 地表変位（ケース 2-1）

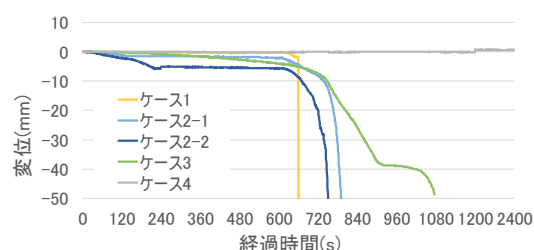


図-4 地表変位（中央部，全ケース）

次にケース 1～4 の実験状況であるが、水位 50mm では、ケース 1～3 では空洞が発生したが、陥没までは至らなかった。水位 100mm では、同様にケース 1～3 において、空洞が急激に発達し、陥没まで至った。一方、ケース 4 では、水位を 200mm まで上昇させても、緩み、空洞の発生は観測されなかった。また、各ケースの土槽中央部から 70mm の位置の地表変位の時間変化を図-4 に示した。ケース 2-1、2-2 及び 3 について、空洞の発生とともに地表変位が増大し、陥没発生時に急激に増加した。また、同じ土質材料を用いたケース 2-1、2-2 では、降雨も加えたケースの方が、空洞の発達、陥没の発生が早い結果となった。一方で、ケース 1 については空洞が発生したにも拘わらず、地表変位はほとんど現れなかったが、陥没が発生すると地表変位は急激に増加した。

以上から、空洞発生により比較的広い範囲に地表変位が発生することが確認され、地表変位から健全性を把握する手法の確立に向け、基礎的なデータを蓄積することができた。一方、地盤材料によってはほとんど現れない場合があることが確認された。その理由として、ケース 1 の場合土粒子のアーチング効果が働くためと考えられる。なお、ケース 4 において空洞や陥没が起きなかったのは、岩国真砂土は粒径分布が幅広く分布し、細粒分が含まれ、粘着力により土粒子が開口部から流出しなかったためと考えられる。また、同じ土質材料でも地下水や降雨の外力が大きくなると、空洞が発達し、その地表変位が大きくなることが確認された。

(2) 数値解析

a) 解析方法

SPH 法にビンガム流体モデルを適用し、模型実験の再現解析の実現可能性を検討した。ビンガム流体の動粘性係数 ν は、液状化した地盤を参考に 1.00 Pa/s とした。このほか、ビンガム流体を表すのに必要なパラメータは内部摩擦角 ϕ 及び粘着力 c である。前者は、液状化地盤を参考に 5° とした。後者は解析ケースごとに变化させてその影響を調べた。SPH 粒子は初期状態の土に対して 0.002m 間隔で生成した。模型実験で使用された土槽の寸法は忠実に再現した。ただし、底部の流出孔の大きさを模型実験と同じにした場合には、SPH 粒子の詰まりが発生し、流動化した土の流出が起こらなかった。この問題を解消するためには、SPH 粒子の生成間隔をさらに細かくする必要があることが分かったが、生成される粒子数

の増加に伴い解析に要する時間が大幅に増大する．そのため，流出孔を 2 倍の大きさに設定して解析を行うことにした．解析で使用した SPH 粒子は，土槽に用いた境界粒子を含めて 28,060 個となった．

b) 解析結果

地盤全体をビンガム流体としてモデル化した場合に粘着力 c が及ぼす影響を示したものが図-5 である．左は流出が生じる前の初期状態である．中央は $c=10.0$ kPa，右は $c=100.0$ kPa のケースで，いずれも流出開始から同一時間が経過した状態を示している．この結果により，ビンガム流体の材料強度の一つである粘着力の値によって，流出の状況を制御できることが確認された．

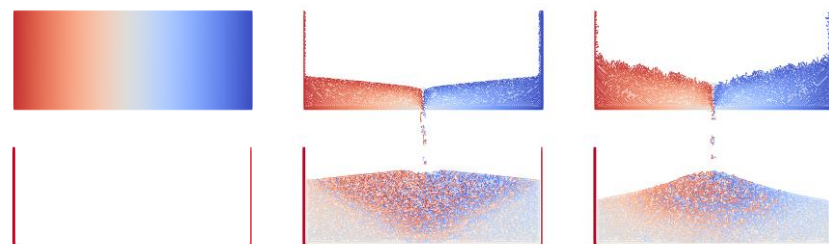


図-5 解析結果（粘着力 c が及ぼす影響）

次に，地盤を浸透水の影響で流動化した領域と，浸透水がなく流動化していない領域に分割したケースを解析した．図-6 の左は流出が始まる状態を示している．この図において，赤色の領域は流動化しない地盤，灰色の領域は流動化した地盤に対応している．流動化しない地盤は，ビンガム流体の粘着力を 1000 倍することで設定した．青色は土槽である．上図の中央は流出開始から 1 秒後，右は 2 秒後の地盤の状態である．流動化した地盤の流出が進むことで，流動化しない地盤において大きな変形が生じており，地表が陥没している．

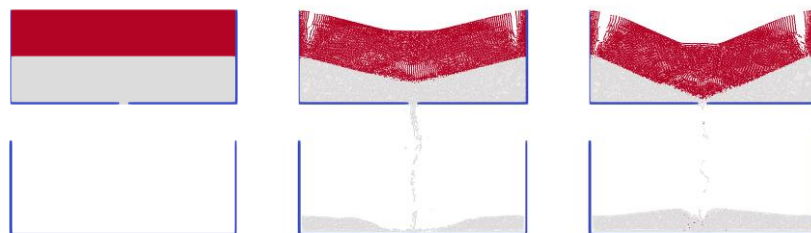


図-6 解析結果（浸透水が及ぼす影響）

以上の結果から，SPH 法を用いた数値解析により，地下空洞に地盤が流出することで，地表に陥没を生じる現象を再現できることが確認できた．また，今回の検討の結果を踏まえると，地表の陥没の深さ，範囲はビンガム流体の材料強度を適切に設定することで制御できると予想できる．

3. 経費の使用状況（申請時の計画に対する実績を記述）

実験及び解析の実施に伴い、一部の変更はあったものの予定通り執行した.

4. 将来展望（今後の発展性、実用化の見込み等について記述）

模型実験及び解析の結果，研究開始時に立てた仮説の通り，空洞の発生により，地表変位が発生することが確認できた．しかし，地盤材料によっては，陥没が発生するまで地表面の変形がほとんど現れない場合があることも確認された．地表面の変形から健全性を評価する技術の確立のためには，引き続き，研究を継続し，様々な地盤材料や外力による地表面の変形の傾向やその定量的な評価が必要である．

5. 成果の発表（学会での発表、学術誌への投稿等を記載。予定を含む）

1. 宅見和弘，渡邊魁，中川翔太，森啓年，下川大介：空洞及び陥没の進行過程と地表変位に関する模型実験，第 55 回地盤工学研究発表会，23-12-1-02，2020.7
2. 中川翔太，宅見和弘，渡邊魁，森啓年，下川大介：空洞及び陥没の進行過程と地下水位に関する再現解析，第 55 回地盤工学研究発表会，23-12-1-03，2020.7