

令和 4 年 5 月 30 日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2021

課題番号：18K13827

研究課題名（和文）乾燥過程における不飽和土質特性の解明と乾燥に伴う遺構の損傷抑制法の研究

研究課題名（英文）Elucidation of unsaturated soil behavior in desiccation process and prevention of damage of geo-relics caused by desiccation

研究代表者

澤田 茉伊（Sawada, Mai）

京都大学・工学研究科・助教

研究者番号：50781077

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000 円

研究成果の概要（和文）：本研究では、1) 乾燥過程にある地盤の水分移動の評価、2) 乾燥に伴う体積変化と引張応力の測定方法の開発、3) 水分移動と変形・応力評価に基づく乾燥抑制手法の提案、に取り組んだ。1)では、地盤の蒸発過程の水分熱移動を評価する数値解析プログラムを作成し、実測値との比較を通じて、モデル化の課題を明らかにした。2)では、土の乾燥亀裂発生過程の内部応力を実測する手法を開発し、実測値の妥当性を確認した。3)では、骨格応力を応力変数とする非線形弾性モデルを用いて、2)の内部応力の発現を再現できることを確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

土構造物の損傷は、湿潤過程と乾燥過程の両方で生じるが、乾燥過程の研究事例は希少である。今後の気候変動下に備え、乾燥過程での土の体積変化および引張挙動に関する深い理解が必要である。また、屋内に保存されている古墳等の歴史的遺構や、断層等の災害遺構においては、乾燥による損傷が顕在化しており、良好な保全環境の整備が喫緊の課題になっている。本研究で取り組んだ、地盤の水分熱移動の定量的評価および乾燥亀裂発生過程での引張応力の実測とモデル化、はこれらの課題解決に役立つ成果である。

研究成果の概要（英文）：This study aims 1) to evaluate water transfer in desiccation process, 2) to measure volume change and tensile stress due to desiccation, and 3) to develop countermeasures for desiccation considering water transfer, deformation and stress. The major achievements are 1) development of numerical analysis of water and heat transfer of soil during evaporation, and clarification of its problems via the comparison with experimental results, 2) development and verification of a method for measuring internal stress evolving in desiccation cracking process, and 3) numerical simulation of the internal stress measured with the proposed experiment using a non-linear elastic model which uses skeleton stress as a stress variable.

研究分野：地盤工学

キーワード：不飽和土 乾燥亀裂 引張応力 内部応力 水分熱移動 蒸発 潜熱 文化財

1. 研究開始当初の背景

土構造物の損傷は、湿潤過程と乾燥過程の両方で生じる(図1)。従来、地盤工学では、湿潤過程の研究は精力的に行われてきたのに対し、乾燥過程の研究事例は希少である。土は乾燥過程で体積収縮するが、剛性の異なる材料との境界等で収縮が妨げられた場合、拘束圧の低い地表面では引張応力が発生し、引張強度に達すると亀裂が生じる。また、保水性の低い材料では、乾燥に伴う粘着力の低下によって不安定化する。



図1 本研究領域

湿潤な気候の日本においては、屋外ではこうした乾燥過程の損傷が大きな問題になることは少なかったが、今後の気候変動下に備え、乾燥過程での土の体積変化および引張挙動に関する深い理解が必要である。また、屋内に保存されている古墳等の歴史的遺構や、断層等の災害遺構においては、乾燥による損傷が顕在化しており、良好な保全環境の整備が喫緊の課題になっているが、具体的な対応策がないのが現状である。

2. 研究の目的

本研究では、遺構土に使われていることが多い、細粒分の多い砂質土を対象に、乾燥過程の水分移動および間隙比・引張応力の定量的評価手法を構築することを目的とする。また、本手法を用いて、乾燥過程における力学的影響を考慮した遺構の保全手法を提案することを目指す。具体的には、以下の3つを研究項目とする。

- (1) 乾燥過程にある地盤の水分移動の評価
- (2) 乾燥に伴う体積変化と引張応力の測定方法の開発
- (3) 水分移動と変形・応力評価に基づく乾燥抑制手法の提案

3. 研究の方法

(1) 乾燥過程にある地盤の水分移動の評価

土柱の蒸発試験とこれの再現解析を行った。蒸発試験は、温度 20 度、湿度 60%RH に設定した恒温恒湿槽内で 20 日間にわたって実施し、高さ 45cm の土柱の重量、内部の 4 測点でのサクション、水分量、温度を測定した。再現解析は、Wilson et al.(1994)による水分・熱移動式をもとに、蒸発とこれに伴う熱移動を考慮した一次元解析プログラムを作成し、土柱全体からの蒸発量と、各側点における含水比と温度を実測値と比較し、解析の妥当性を検証した。

(2) 乾燥に伴う体積変化と引張応力の測定方法の開発

乾燥過程での土供試体内の水分量のむらを極力減らすため、薄い板状に締固めた供試体(200mm×50mm×20mm)を用いて、供試体の乾燥収縮が妨げられない境界条件下での体積変化の測定(自由収縮試験)を行った。試験は恒温恒湿槽内で実施し、体積変化は画像解析により評価した。また、同形の供試体を用いて、収縮が妨げられる境界条件下での内部応力の測定(拘束収縮応力試験)を行った(図2)。

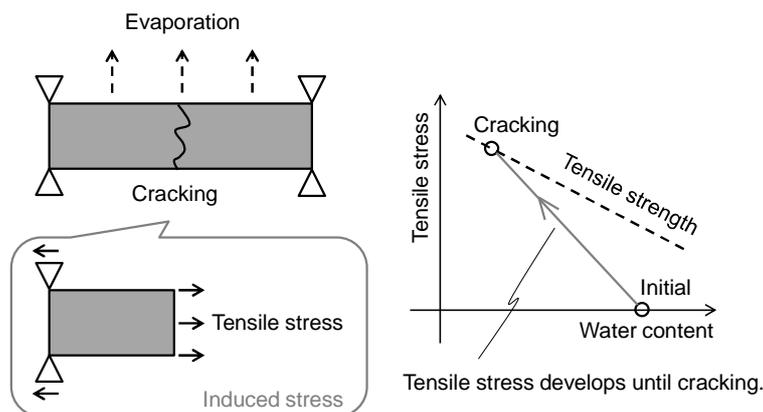


図2 拘束収縮応力試験の概要

供試体内にひずみゲージを貼ったアルミ板を埋め込み、作用反作用の関係を用いて、アルミ板で収縮が拘束された供試体内に発生する応力を評価した。亀裂発生時の引張応力の測定値と、別途実施した直接引張試験で得られた引張強度を比較することにより、本試験法の妥当性を検証した。

(3) 水分移動と変形・応力評価に基づく乾燥抑制手法の提案

上記の拘束収縮試験で得られた内部応力の再現を通じて、乾燥亀裂に至る過程の内部応力の発現を定量的にモデル化した。Jommi et al.(2016)の非線形弾性モデルをもとに、不飽和化す

る供試体の内部応力の評価に適した応力変数を検討した。また、(1)の水分移動の解析結果を用いて、地表面における乾燥亀裂の発生を予測した。

4. 研究成果

(1) 乾燥過程にある地盤の水分移動の評価

作成した蒸発解析のプログラムを用いて、土の透水係数、保水性、初期含水比について、パラメトリックスタディを実施した。パラメトリックスタディを通じて、各パラメータが蒸発挙動に与える影響を理解した上で、蒸発実験の再現解析を実施した。蒸発実験で実測した蒸発量と再現解析の結果を図3に示す。再現解析は、室内試験で求めた浸透特性を用いて、順解析的にパラメータを決定したが、概ね蒸発量の実験値をよく表している。地表面の境界条件は、大気と地表面の水蒸気圧勾配に応じて蒸発量が決まる関数で表現したため、蒸発速度が大気の温湿度に支配される第一段階から、土の浸透特性に支配されて低下する第二段階、ほぼ一定に落ち着く第三段階への移行が再現できている。

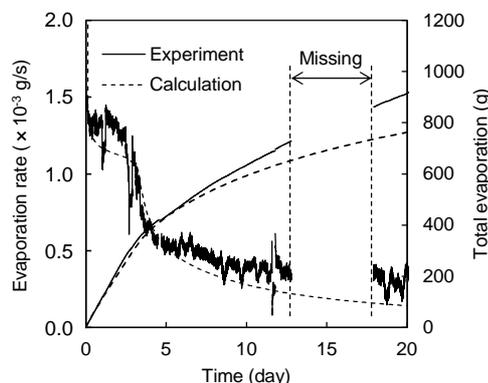


図3 蒸発量の実測値と解析値の比較

しかし、4測点の含水比を比較すると、実験と解析の定性的には同様の結果を示したが、定量的には乖離が見られた。これは、本実験で使用した試料は、細粒分が多く団粒化しやすいため、均質な土柱を作製するのが難しく、不連続な箇所ができやすかったためと考えられる。土柱内にできた亀裂や空気層では、下部からの上向き液状水の移動は遮断される一方、上部では下部からの水分供給がないまま蒸発が進む。その結果、均質な場合に比べて、下部では含水比が高く、上部では低くなり、解析結果とのずれの一因になったと考えられる。比較的均質な締固めができる材料で追加実験を行い、解析の妥当性を再度検証予定である。

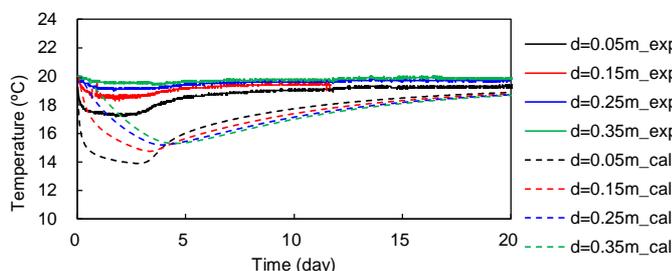


図4 蒸発時の土柱内温度の実測値と解析値の比較

また、4測点の温度については、実験と解析のいずれも潜熱による温度低下を示した後、蒸発量の減少とともに周囲の温度に漸近するように回復する傾向が見られたが、実験のほうが温度変化は小さくなった(図4)。これは、解析では側方からの熱移動を考慮していないが、実験では土柱内よりも相対的に温度が高い周囲からの熱の流入があるためと考えられる。この点については、解析を三次元に拡張し、検証する必要がある。

(2) 乾燥に伴う体積変化と引張応力の測定方法の開発

自由収縮試験については、通常の収縮試験と同様に、含水比 - 間隙比の関係が得られ、試験開始時の湿潤な状態では含水比に対して線形に間隙比が減少し、ある程度乾燥が進行するとほぼ間隙比は一定になる挙動が確認された。このような収縮特性を持つ供試体を用いて、拘束収縮応力試験を実施したところ、図5に示すような測定結果が得られた。亀裂に至るまで、供試体内部の引張応力が増大し、亀裂が生じると急激に低下している。亀裂の発生は、供試体の写真撮影により確認したが、目視で亀裂が確認できる状態においては、すでに応力は低下していた。既往研究では、こうした内部応力の

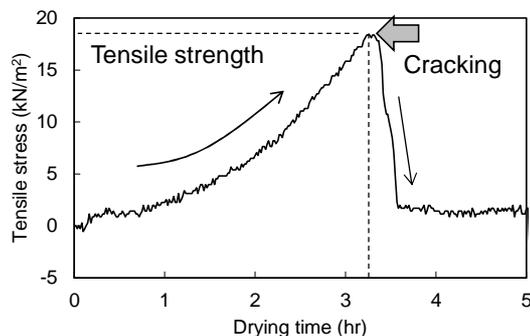


図5 拘束収縮応力試験の測定結果

実測はされておらず、亀裂の発生は目視で観察され、発生時の含水比との関係に関する議論やモデル化が行われてきたが、拘束収縮応力試験の結果は、目視による亀裂の確認は実際とは時差があり、正確さに欠けることを示している。拘束収縮応力試験で測定された亀裂発生時の引張応力と、直接引張試験で得られた引張強度の比較を図6に示す。両者は概ね合致しており、本研究で提案する拘束収縮応力試験は、内部応力を正確に測定できていることが確認された。本試験は、前述のように、乾燥亀裂の発生の瞬間を応力の変化から捉えられることに加え、亀裂に至るまでの過程を通して、内部応力の変化を連続的に測定し、従来の試験法では取得できなかったデータが得られる点が特徴であ

る。亀裂発生過程の応力が明らかになることにより、数値解析モデルの妥当性検証において、引張強度に達する亀裂発生時だけでなく、過程を通じて検証することが可能になり、モデルの精度向上に貢献する成果である。

(3) 水分移動と変形・応力評価に基づく乾燥抑制手法の提案

Jommi et al.(2016)では、飽和に近い粘土試料を対象としたため、体積変化は蒸発量に等しいものとし、応力変数には Terzaghi の有効応力を用いて、乾燥収縮をモデル化している。しかし、このモデルを本研究の拘束収縮応力試験の再現に用いたところ、飽和度が比較的高いケースでは再現できた一方、初期から飽和度の低いケースでは実験結果との乖離が大きかった。そこで、本モデルでは、自由収縮試験で得られた収縮曲線を Fredlund et al.(2002)の関数を用いて近似し、サクシヨンの変化に伴う体積変化を表した。また、応力変数には骨格応力 (Bishop の有効応力式 (1) が飽和度に相当) を用いたところ、飽和度の低いケースも再現できるようになった。拘束収縮応力試験中の含水比と引張応力の関係を再現した結果を図7に示す。

側方が拘束された地盤が乾燥する場合を想定し、水分移動は(1)の蒸発解析で、また地表面に発現する引張応力は上記のモデルを用いて評価し、乾燥亀裂の発生を予測する解析を実施した。乾燥に伴って引張応力が增大する結果は得られたが、水分移動と変形の連成には至っておらず、今後の課題である。

本研究では拘束収縮応力試験を湿度が高い条件 (20度, 90%RH) でも実施したが、低速で乾燥が進行しても引張応力が強度に達すると亀裂が生じた。また、直接引張試験においても乾燥速度は引張強度には影響しない結果が得られた。すなわち、大気の温湿度によって、地盤の蒸発速度は変化するが、含水状態に対応する強度は変わらない。ただし、(1)の研究でまだ検討が不十分であるが、パラメトリックスタディの結果を鑑みると、蒸発速度によって、地盤内の水分分布が変わる可能性が高い。高湿で乾燥がゆっくり進行する場合は、地盤深部からの上向きの水分移動による水分供給が蒸発による損失を補うため、最も亀裂が生じやすい地表面付近の含水比を高く保つことができると考えられる。本研究で得られた基礎的な知見をもとに、今後さらに研究を進め、乾燥抑制方法の提案を目指す。

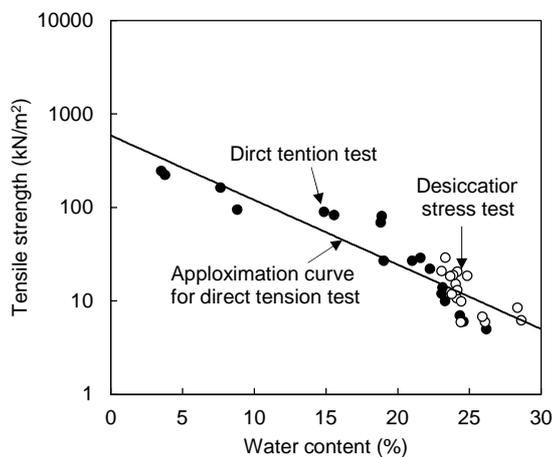


図6 直接引張試験との比較による妥当性検証

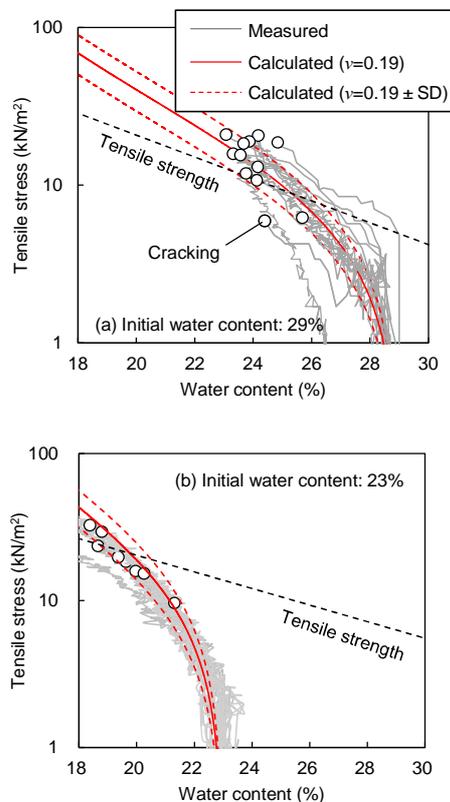


図7 拘束収縮応力試験の再現

文献

- Fredlund, M.D., Wilson, G.W., Fredlund, D.G., 2002. Representation and estimation of the shrinkage curve. In: Proceedings of the 3rd International Conference on Unsaturated Soils, 145–149.
- Jommi, C., Valimberti, N., Tollenaar, R. N., Della Vecchia, G., & Van Paassen, L. A. 2016. Modelling desiccation cracking in a homogenous soil clay layer: comparison between different hypotheses on constitutive behaviour. In E3S Web of Conferences (Vol. 9, p. 08006). EDP Sciences.
- Wilson, G.W., Fredlund, D., & Barbour, S.L. 1994. Coupled soil-atmosphere modelling for soil evaporation. Canadian Geotechnical Journal, 31: 151-161.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Sawada Mai、Sumi Yusuke、Mimura Mamoru	4. 巻 61
2. 論文標題 Measuring desiccation-induced tensile stress during cracking process	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Soils and Foundations	6. 最初と最後の頁 915 ~ 928
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.sandf.2021.03.006	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計12件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 藤谷咲希
2. 発表標題 曲げ試験による不飽和土の引張強度の妥当性に関する研究
3. 学会等名 土木学会関西支部
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 藤谷咲希
2. 発表標題 載荷速度が土の引張強度に与える影響に関する実験的研究
3. 学会等名 地盤工学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 澤田茉伊
2. 発表標題 Experimental Study on the Evolution of Internal Stress in Desiccation Cracking Process
3. 学会等名 The 20th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Sydney 2021（国際学会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 澤田茉伊
2. 発表標題 被災土構造物の維持管理のための遮水・保湿シートの降雨実験
3. 学会等名 土木学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 澤田茉伊
2. 発表標題 乾燥亀裂の発生過程における内部応力の測定方法の開発
3. 学会等名 地盤工学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 吉川和秀
2. 発表標題 乾燥過程の力学挙動に対する初期含水比と乾燥速度の影響
3. 学会等名 地盤工学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 吉川和秀
2. 発表標題 乾燥亀裂の発生過程における力学挙動に関する研究
3. 学会等名 土木学会関西支部
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 中川正貴
2. 発表標題 地震で被災した釜尾古墳の一時的保護を目的とした保護シートによる墳丘の乾燥抑制に関する研究
3. 学会等名 日本建築学会近畿支部
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 中川正貴
2. 発表標題 地震で被災した釜尾古墳の一時的保護を目的とした保護シートによる墳丘の乾燥抑制に関する研究
3. 学会等名 日本建築学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 澤田茉伊
2. 発表標題 地盤遺跡保存のための土の乾燥亀裂メカニズムに関する実験的研究
3. 学会等名 文化財科学会第36回大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 角裕介
2. 発表標題 乾燥過程における土の力学特性と亀裂の発生メカニズムに関する研究
3. 学会等名 第54回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 角裕介
2. 発表標題 乾燥過程における土の応力測定に基づくひび割れ生成メカニズムの考察
3. 学会等名 2019年度土木学会関西支部年次学術講演会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------