

研 究 報 告

令和 7 年 3 月 24 日

公益財団法人 前田記念工学振興財団

理 事 長 岸 利 治 殿

研究代表者

所 属 : 京都大学 (現 広島大学)

氏 名 : 木戸 隆之祐

研究課題名 : せん断変形による不飽和土の保水形態変化の解明

助成金額 : 100 万円

研究実施期間 : 自 令和 6 年 4 月 1 日 ~ 至 令和 7 年 3 月 31 日

せん断変形による不飽和土の保水形態変化の解明

Clarification of transition of water retention states in unsaturated soil during shearing

広島大学 准教授 木戸隆之祐

(研究計画ないし研究手法の概略)

本研究の目的は、せん断変形による不飽和土の保水形態変化を解明することである。図1に想定される保水形態の模式図を示す。不飽和土中の間隙水は液架橋（土粒子接触点に存在し粒子間結合力を高める保水形態）とバルク水（土粒子間隙を満たし土粒子骨格の拘束力を高める保水形態）の2種類に大別され、土の力学特性に与えるサクシヨンの役割がそれぞれ異なる。不飽和土が変形すると、粒子が非接触となり液架橋が消失すること、液架橋同士が結合してバルク水となること、バルク水が液架橋に分列すること、といった保水形態変化が生じ、2種類の間隙水が不飽和土の力学特性に与える影響度合いは時々刻々と変化すると考えられる。そこで本研究では、不飽和砂の三軸圧縮試験を実施し、供試体が刻々と変形する過程で応力ひずみ関係を測定する。この変形過程をX線マイクロCT装置で可視化するとともに、変形前後の間隙水の保水形態変化を特定する画像解析法を開発し、変形初期から破壊後に至るプロセスで保水形態変化を解明する。X線マイクロCT装置は、京都大学大学院工学研究科のX線マイクロCT装置を用いたほか、大型放射光施設 SPring-8 の高エネルギーX線イメージング装置を適用し、供試体全域の高解像撮影を試みた（図2）。

(実験調査によって得られた新しい知見)

1. 画像解析アルゴリズムの構築および保水形態変化の特定に成功

X線CT画像解析アルゴリズムを開発し、異なる変形状態における個々の液架橋およびバルク水の保水形態変化を識別した。結果の一例を図3に示す。今回、解析を行った不飽和砂の飽和度が比較的良かったため、液架橋の割合はバルク水の割合よりも大きかった。このような条件下では、不飽和砂のせん断中に液架橋の生成と消失が繰り返された。また、せん断変形中には、液架橋が維持されるパターン、液架橋が結合してバルク水になるパターン、液架橋が粒子間接触から消失するパターン、バルク水が維持されるパターン、バルク水が液架橋に変化するパターン、そしてバルク水が消失するパターン、といった様々な保水形態変化が生じていることを明らかにした。さらに、液架橋の割合が減る傾向は、非排水条件下でのせん断時の方が、排水条件下でのせん断時よりも顕著であることがわかった。一方、画像処理によって識別された間隙水クラスターの数はまだ少ないままであった。この課題を改善するためには、各土粒子の分離精度および粒子追跡アルゴリズムの精度を向上させる必要がある。

2. 不飽和三軸供試体全域の土粒子・水・空気の可視化に成功

京都大学で取得してきた高解像CT撮影は、せん断帯発達領域である微小領域のみ可視化していたが、SPring-8を用いることで高解像撮影を供試体全域に広げることができ、供試体内部に存在する個々の土粒子や保水形態を識別することができた。この画像を解析することで、せん断変形によって供試体のどの領域が圧縮・膨張し、それに伴い飽和度がどのように

変化するかを把握することができた. 図4に供試体全域の間隙率・飽和度分布の変化を示す. 一方, 1. で述べた保水形態変化を特定する画像解析を SPring-8 に適用することが本研究の最終目標であったが, SPring-8 で取得した画像データが数百 GB を超える容量であり, メモリを 256GB 積んだ画像解析用ワークステーションであっても実施が不可能であった. この課題を解決するためには, HPC や富岳といったスーパーコンピュータを用いるなど, ハード環境の整備が必須である.

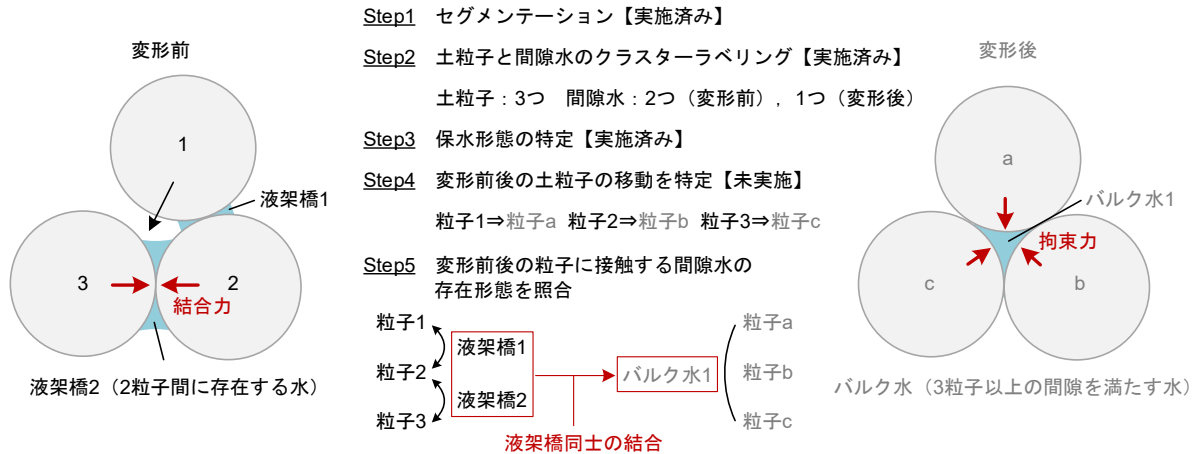


図1 間隙水の保水形態と保水形態変化を特定する画像解析アルゴリズムの概略

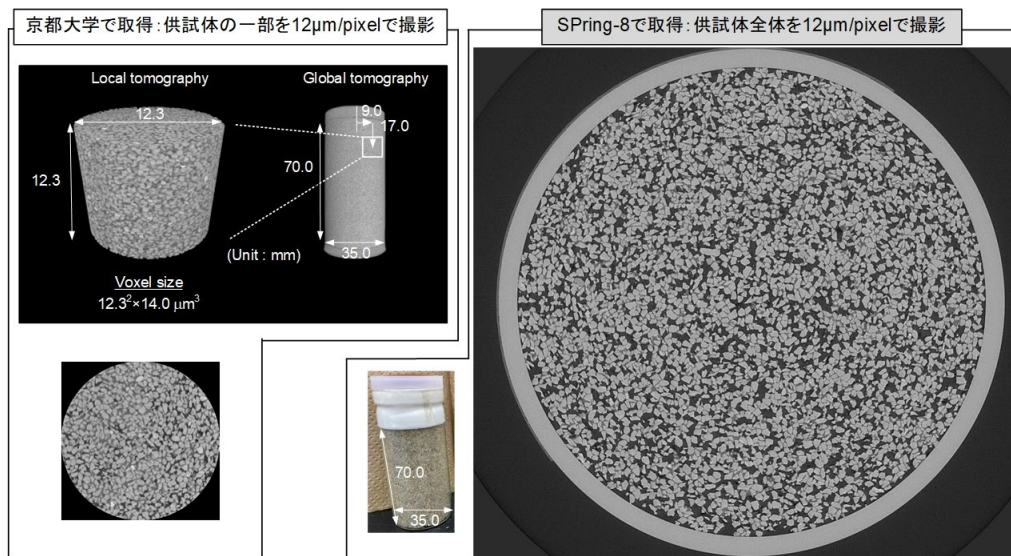


図2 京都大学で取得したCT画像とSpring-8で取得したCT画像の比較(同一試料, 同等解像度)

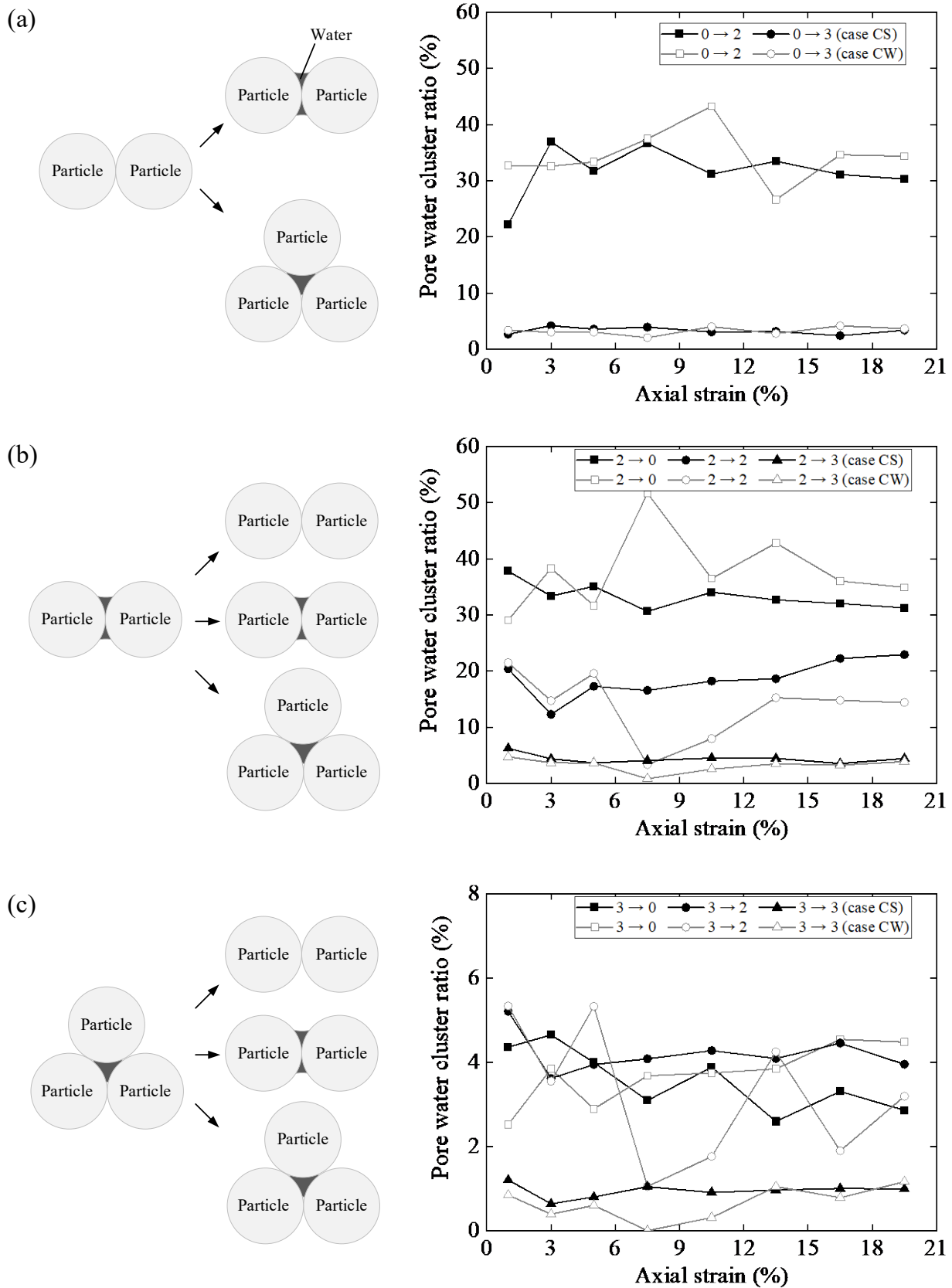


図 3 開発した画像解析アルゴリズムによる保水形態変化の特定結果

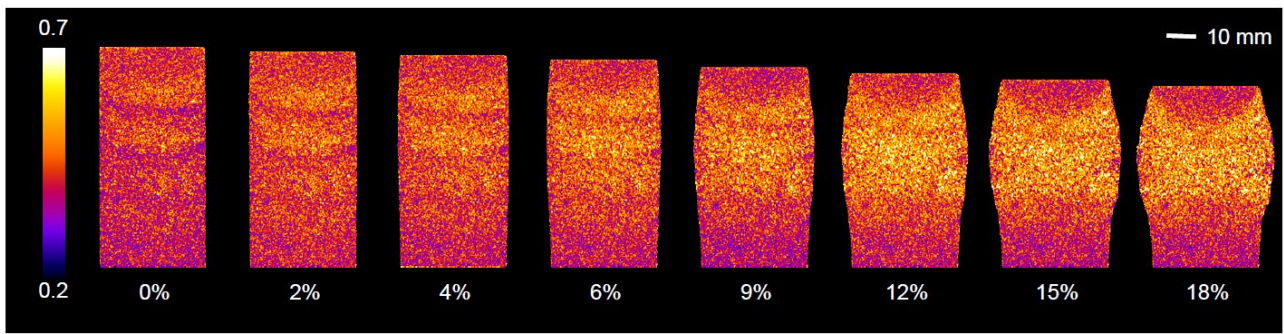


図 4 供試体内部の間隙率の空間分布変化

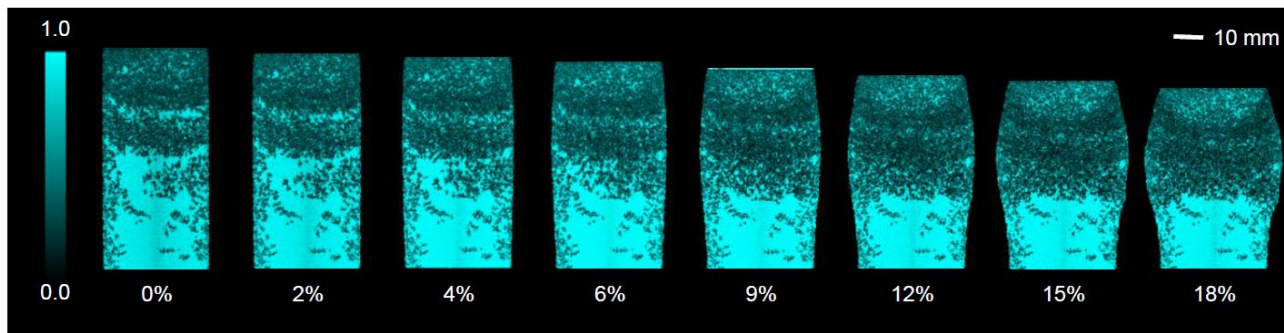


図 5 供試体内部の飽和度の空間分布変化

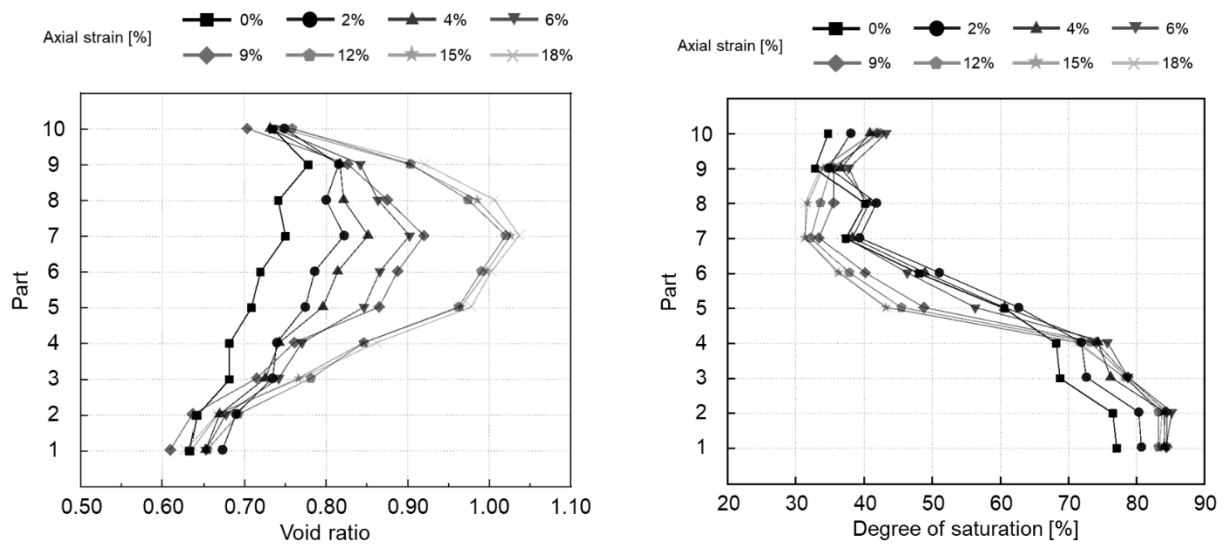


図 6 供試体鉛直方向の間隙比（左）および飽和度（右）の分布変化

（ 発 表 論 文 ）

- 1) Kido, R. and Higo, Y.: Identification of morphological transition for pore water in partially saturated sand due to shear deformation, Proc. of the AP-UNSAT2024, Melborn, Australia, No.167, pp.346-352, 2024-11.
- 2) Kido, R. and Higo, Y.: Full-Field Measurement of Three-Phase Microstructures in Partially Saturated Triaxial Specimen Using SPring-8, ICSMGE2026, 2026. (投稿中)