

第Ⅲ部門

異なる排水条件の不飽和砂三軸圧縮試験における間隙水の微視的挙動に関する研究

京都大学大学院 学生会員 ○福島 陽, 木戸 隆之祐
 京都大学大学院 正会員 肥後 陽介

1. はじめに

不飽和土は完全飽和土や乾燥土に比べて強度・剛性が高いが、破壊時にはより顕著なひずみ軟化とひずみの局所化現象によって、脆性的な破壊挙動を示す。不飽和土の強度増加にはメニスカス水におけるサクシオンが寄与していると考えられており、破壊時にはこのサクシオンが何らかの形で消失していると推測される。

そこで本研究では、排気－非排水条件と排気－排水条件の不飽和砂三軸圧縮試験過程のひずみの局所化領域を X 線 CT で可視化した。また、排水条件が異なることによりサクシオン分布に違いが生じることに着目し、サクシオンの媒体である間隙水の微視的挙動を画像解析によって調べた。

2. 不飽和砂三軸圧縮試験および X 線 CT 撮影

$D_{50} = 456 \mu\text{m}$ の珪砂 5 号を用いて、水中落下法および水頭型吸引法により不飽和砂供試体を作製した。そして、ひずみ速度 $0.1 \text{ \%}/\text{min}$ 、側圧 50 kPa 、空気圧は大気圧条件で、排水条件の異なる三軸圧縮試験を行った。それぞれの実験ケースにおける試験条件および作製した供試体の諸量を表 1 に示す。

本研究で用いた X 線 CT 装置は KYOTO-GEO μ XCT (TOSCANER-32250 μhdk)¹⁾である。試験中、任意の軸ひずみで载荷を一時中断し、図 1 のようにひずみの局所化が発生する領域を可視化した。Voxel サイズは $12.3 \times 12.3 \times 14.0 \mu\text{m}^3$ である。

3. 画像解析アルゴリズム

取得した CT 画像を土粒子・水・空気に三値化し、図 1 のようにひずみの局所化領域内部と外部から 1 辺 3 mm の立方体をそれぞれ 3 つずつ切り出す。それぞれの立方体領域における間隙水の微視的挙動を定量化し、ひずみの局所化領域内部と外部の違いについて比較する。

まず、三相のそれぞれの Voxel 数から、局所的な間隙比や飽和度を算出する。次に、間隙水に作用するサクシオンとメニスカス水の微視的な曲率の間には正の相関があることに着目し、この曲率を算出する画像解析を行う。

曲率解析では、切り出した立方体における水と空気の接触面を抽出し、各接触面の最大主曲率を算出する²⁾。そして、得られた値の中央値をその立方体における曲率とする。なお、画像処理には Avizo9.4.0 (FEI 社製) を用いた。

4. 実験結果および解析結果

不飽和砂三軸圧縮試験により得られた応力－軸ひずみ

表 1 試験条件および供試体諸量

試験条件	排気－非排水	排気－排水
直径 ϕ [mm]	35	35
高さ h [mm]	69.36	69.41
間隙比 e	0.709	0.710
相対密度 D_r [%]	95.35	94.97
初期飽和度 S_r [%]	60.52	63.60
含水比 w [%]	16.25	17.11
試験後含水比 w [%]	-	14.36
サクシオン s [kPa]	1.67	1.66

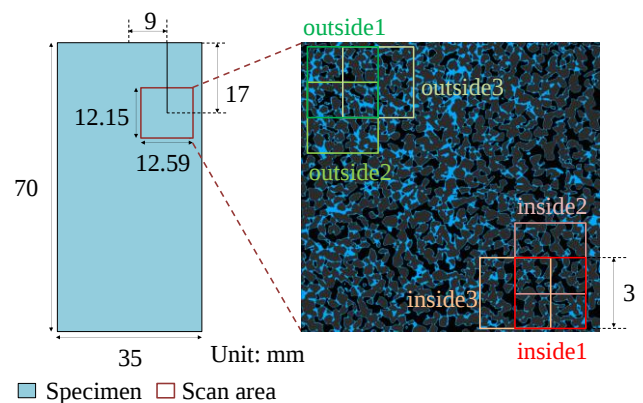


図 1 X 線撮影位置と画像解析対象の立方体領域

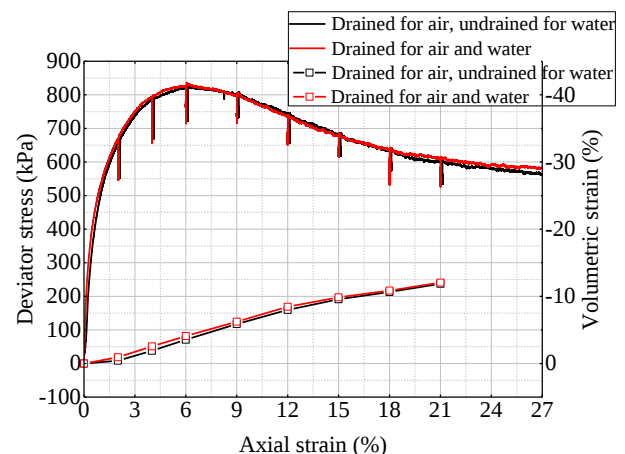


図 2 応力－軸ひずみ関係、体積ひずみ－軸ひずみ関係

関係、体積ひずみ－軸ひずみ関係を図 2 に示す。図中の応力緩和は、約 2 時間程度を要する X 線 CT 撮影のために载荷を一時中断していることから生じた。図より、排水条件が異なっても、巨視的応答はほぼ同等となってい

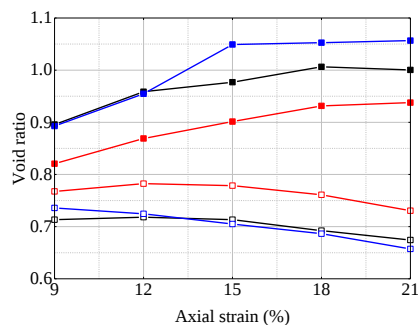


図3 排気-非排水条件の局所的な間隙比、飽和度曲線

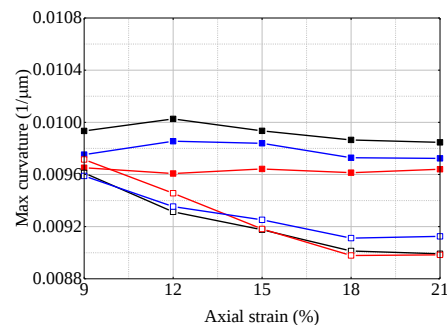
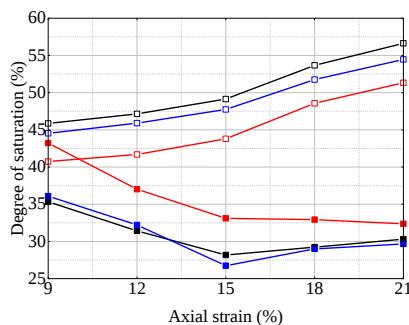


図5 排気-非排水条件の曲率変化

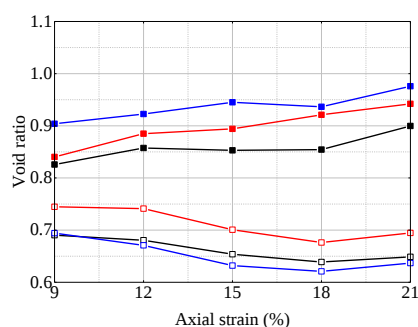


図4 排気-排水条件の局所的な間隙比、飽和度曲線

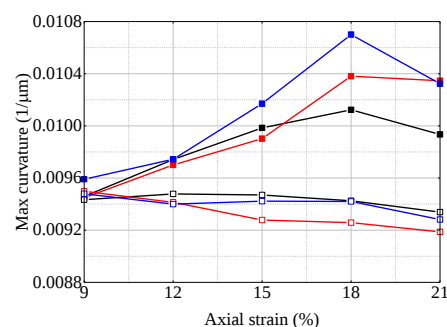
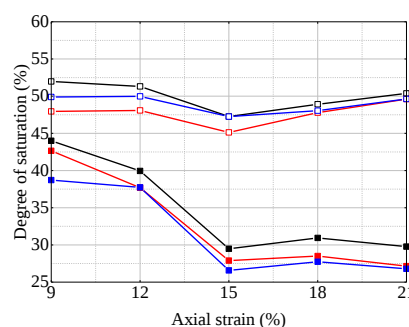


図6 排気-排水条件の曲率変化

—■— inside1 —■— inside2 —■— inside3 —□— outside1 —□— outside2 —□— outside3

ることが確認できる。

図3、図4にひずみの局所化領域内外部の局所的な間隙比、飽和度の変化を示す。これを見ると、間隙比はどちらの実験ケースにおいてもひずみの局所化領域内部の方が外部よりも大きく、ダイレイタンスにより密度が疎になっていることが確認できる。一方で、飽和度はどちらの実験ケースにおいてもひずみの局所化領域外部の方が内部より高く、内部において密度が疎になることにより保水性が低下していることが確認できる。

図5、図6にひずみの局所化領域内外部の曲率変化を示す。これを見ると、どちらの実験ケースにおいても、ひずみの局所化領域内部の方がひずみの局所化領域外部よりも曲率が大きいという結果となった。このサクシジョンの差は、ひずみの局所化領域内部と外部の間に動水勾配が生じているということであり、X線CT撮影時には供試体内部の間隙水分分布が平衡状態に至っていないということを示唆する。これは、実験時の载荷速度が間隙水分分布の平衡状態に至る速度よりも速いために生じていると考えられ、この時ミクロスケールではどちらも非排水的挙動となっていたのではないかと推測される。このミクロスケールでの挙動が等価であったために、図2における巨視的応答にも違いが生じなかったという可能性が考えられる。

次に、曲率変化と、局所的な間隙比・飽和度変化との関係性について考察する。ミクロスケールではどちらも

非排水的挙動であったことから、間隙構造、間隙水分分布が変化しながら、微視的なサクシジョンは複雑に変化していると推測される。例えば排気-非排水条件のひずみの局所化領域外部では、間隙比はそれほど変化していないが飽和度が上昇していることから、水分特性曲線の吸水過程をたどってサクシジョンが低下したと推測される。また、排気-排水条件のひずみの局所化領域内部では、間隙比の変化量は少ないが飽和度は減少していることから、水分特性曲線の排水過程をたどってサクシジョンが上昇したと考えられる。

5. 結論

排水条件の異なる不飽和砂三軸圧縮試験およびX線CT画像解析を行った。その結果、ひずみの局所化領域内部と外部で微視的なサクシジョンに違いがあることを確認し、どちらの実験ケースもミクロスケールでは非排水的挙動での破壊が生じていると推察した。また、微視的な曲率変化と間隙比・飽和度変化との関係性を考察し、微視的な水分保持特性を明らかにした。

参考文献

- 1) 木戸隆之祐, 肥後陽介: 不飽和砂の排水および湿潤過程における間隙水の連続性の評価, 第50回地盤工学研究発表会, 2015.
- 2) 木戸隆之祐, 肥後陽介, 高村福志: 三軸圧縮条件下の不飽和砂内部における局所的な間隙水の曲率特性, 第52回地盤工学研究発表会, No.302, 2017.