

### 不飽和砂のひずみの局所化領域における間隙水分布と軸差応力変化の関係

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

#### 1. はじめに

不飽和土のマクロな変形・破壊挙動や力学特性の変化は、土内部の土粒子挙動や、間隙水分布の変化といった微視的な構造変化の影響を受けると考えられ、そのメカニズムの解明は重要である。

本稿では、排気-排水条件下で密詰め不飽和砂三軸圧縮試験を行い、せん断帯形成領域を可視化した X 線 CT 画像を基に、間隙水の連続性およびサクシオンに寄与する間隙水の個数を調べる Morphology 解析を行った結果を示す。

#### 2. 不飽和砂三軸圧縮試験および X 線 CT 撮影

粒度調整し  $D_{50}=438 \mu\text{m}$  とした珪砂 5 号を用いて、水中落下法により相対密度 90.6 %、直径 35.0 mm、高さ 70.0 mm の飽和供試体を作製した後、水頭差をつけ不飽和化させた。排水平衡時の供試体は飽和度 54.6 %、水頭差は 100 mm となり、供試体上部に 0.98 kPa、供試体下部に 0.29 kPa のサクシオンが作用している。ひずみ速度 0.1 %/min、側圧 50 kPa、空気圧は大気圧条件で排気-排水三軸圧縮試験を行った。

本研究では、Flat Panel Detector を導入した KYOTO-GEO $\mu$ XCT (TOSCANER-32250 $\mu$ hdk)<sup>1)</sup>を用いて CT 撮影を行った。試験中、任意の軸ひずみで载荷を一時中断し、図 1 のように供試体全体の変形と、ひずみの局所化領域を可視化した。Voxel サイズは  $72.6 \times 72.6 \times 80.0 \mu\text{m}^3$ 、 $12.3 \times 12.3 \times 14.0 \mu\text{m}^3$  である。

#### 3. Morphology 解析

図 2 に示す Partial CT scan 全体と、せん断帯内外部の三値化画像を対象に解析を行う。三値化画像から間隙水相のみを抽出し、erosion-dilation 処理を適用して吸着水や Partial Volume Effect<sup>2)</sup>による、サクシオンに寄与しない水相を除去し、メニスカス水のようなサクシオンに寄与する間隙水のみを残す。その後、水相を個々の連続性を有するクラスターに分割するラベリングを行う。ラベリング画像の色は、個々のクラスターを区別する番号を意味し、同じ色を持つ

クラスターは三次元的につながりを持つ。ラベリング画像を基に、個々のクラスター体積および個数を定量化する。画像処理には Avizo9.0.1 (FEI 製)を用いており、解析アルゴリズムは参考文献に詳しい<sup>2)</sup>。

#### 4. 三軸試験結果および画像解析結果

図 3 に軸差応力-軸ひずみ関係、体積ひずみ-軸ひずみ関係を示す。図中の応力緩和は、CT 撮影時に载荷を中断しているため生じている。軸ひずみ 4 %において約 800 kPa のピーク応力を示した後、ひずみ軟化挙動に転じ軸ひずみ 21 %において約 550 kPa の残留応力を示した。図 3 の応力緩和がある各軸ひずみで得た Partial CT 画像を用いて Morphology 解析を

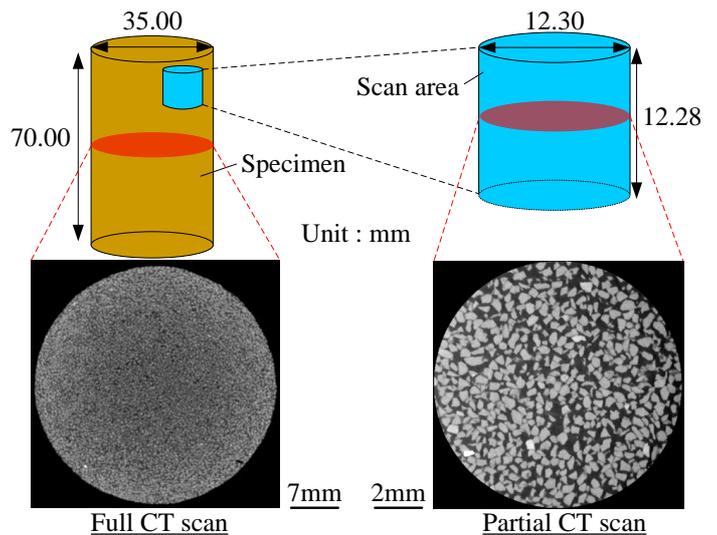


図 1 撮影領域および撮影画像の例

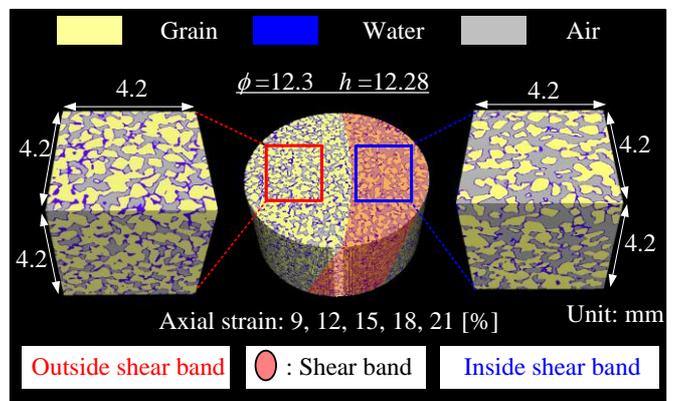


図 2 せん断帯内外部の解析領域

キーワード 不飽和砂 三軸圧縮試験 X 線 CT 軸差応力-軸ひずみ関係 連続性 クラスター数  
連絡先 〒615-8540 京都市西京区京都大学桂 C1-4-587 Tel: 075-383-3193

行い、得られた間隙水の連続性を図4に示す。連続性とは、間隙における水のつながりの度合いを評価する指標であり、間隙水クラスターの総体積  $V_{total}$  に対して最大体積  $V_{max}$  が占める割合と定義し、式(1)で表す。

$$Continuity = V_{max} / V_{total} \times 100 \quad (1)$$

図4より、全ての軸ひずみにおいて間隙水の連続性は3%未満と連続性が低く、軸ひずみ2%では連続性が高くなっている。これより、個々の接触点に空間的に独立して存在していたメニスカス水が、せん断初期におけるひずみ硬化領域では、土粒子の再配列に伴って水が繋がった状態になると考えられる。一方、ピーク応力後は連続性が低くなることから、ひずみの局所化領域では土粒子間接触点に存在するような空間的に独立したメニスカス水が卓越して存在していると推測できる。

図5に Partial CT scan 領域における間隙水のクラスター数の変化を示す。軸ひずみ2%におけるクラスター数の減少は、図4の連続性の上昇と対応し、水が繋がったためと考えられる。ピーク応力を示す軸ひずみ4%でクラスター数が最も多いが、軸ひずみの進展に伴い減少する傾向にある。図3と図5を比較すると、軸ひずみ4%までのひずみ硬化は間隙水のクラスター数が比較的多く、ひずみ軟化はクラスター数が減少する傾向に対応する。これより、ピーク応力までは、サクシオンに寄与するメニスカス水が多く存在し、粒子構造の剛性を高める効果を受けて硬化するが、ひずみの局所化に伴いクラスター数が減少すると、剛性を高める効果が小さくなるため軟化すると考えられる。また、図2に示すせん断帯内外部の画像を対象に解析して算出したクラスター数を図6に示す。軸ひずみ9-21%において、せん断帯内部の方が、間隙水のクラスター数が少ないことがわかる。これより、破壊後の軟化は、せん断帯内部においてサクシオンに寄与する間隙水が比較的少ない状態であることに起因すると推測できる。

5. 結論

本研究では、X線CT画像解析により、不飽和砂のひずみの局所化領域の間隙水の連続性、クラスター数を明らかにした。その結果、せん断帯発達に伴うメニスカス数の減少がひずみ軟化の一因であることを明らかにした。

参考文献

- 1) Higo, Y., Oka, F., Morishita, R., Matsushima, Y. and Yoshida, T., *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B : Beam Interactions with Materials and Atoms*, **324**, pp.63-69, 2014.
- 2) 木戸, 肥後: 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.

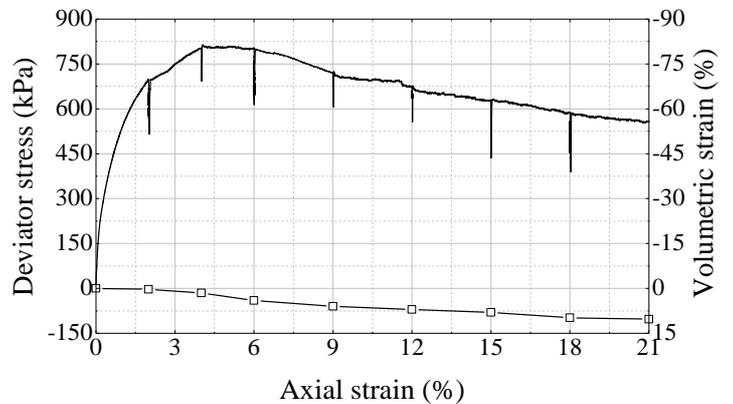


図3 軸差応力-軸ひずみ関係

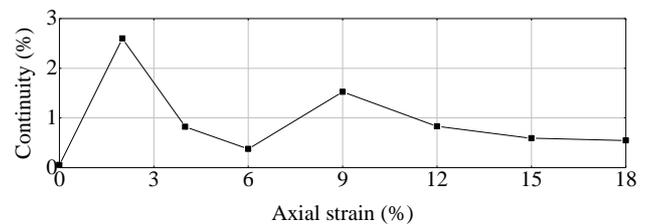


図4 間隙水の連続性の変化

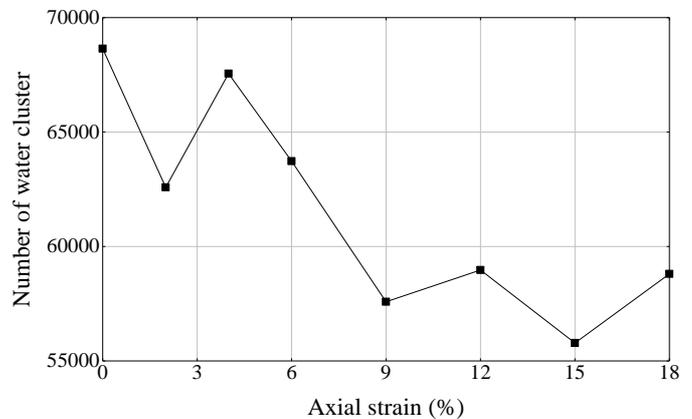


図5 間隙水のクラスター数の変化

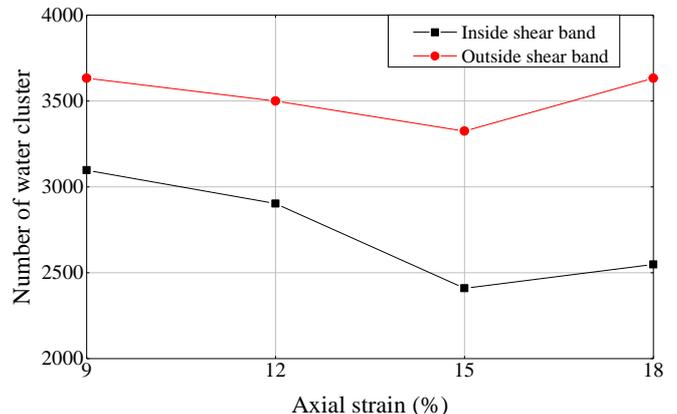


図6 せん断帯内外部の間隙水のクラスター数