

第 III 部門

不飽和三軸供試体の間隙比・飽和度分布の全視野計測

京都大学大学院	学生員	○戸田航太
京都大学大学院	正会員	木戸隆之祐
京都大学大学院	正会員	肥後陽介
高輝度光科学研究センター	非会員	星野真人
高輝度光科学研究センター	非会員	上杉健太郎

1. はじめに

道路盛土や堤防などの多くの土構造物は不飽和状態で存在する。そのため、不飽和土の強度特性、破壊メカニズムの解明は重要である。不飽和土では、構成要素の微視的特性が、強度や剛性といった巨視的応答と密接に関係するため、これまで X 線マイクロ CT 装置を用いて土粒子、水、空気の三相微視構造変化を可視化する研究が行われてきた^{1), 2)}。しかし、これらの先行研究における微視的挙動の分析は、供試体の一部の局所領域に留まっていた。そこで、本研究では、大型放射光施設 SPring-8 の実験機構を使用することにより、不飽和三軸供試体全体を高解像度で撮影し、供試体全体の間隙比、飽和度の分布について調査を実施した。

2. 実験概要

本研究の三軸圧縮試験では、平均粒径 D_{50} が $324 \mu\text{m}$ の珪砂 5 号を用いた。また、供試体は水中落下法により飽和供試体を作製した後、水頭型吸引法により排水させることで不飽和化を行い作製した。本試験では、供試体の相対密度は 82.3%、飽和度は 53.4%であった。三軸圧縮試験の条件は、排気一非排水条件で、ひずみ速度は $0.1\%/\text{min}$ 、拘束圧は 50 kPa とした。以上の三軸圧縮試験の条件及び供試体作製方法は Kido and Higo (2020)²⁾と同様である。

また、三軸圧縮試験中、9 段階の軸ひずみ 0%, 2%, 4%, 6%, 9%, 12%, 15%, 18%, 21%で载荷を一時中断し、CT 撮影を行った。CT 撮影は、大型放射光施設 SPring-8 のビームライン BL28B2 を使用した。BL28B2 で三軸試験装置を設置した状態を写真 1 に示す。BL28B2 は、白色 X 線を利用することができるビームラインであり、重金属フィルターにより低エネルギー成分を除去することにより、中心エネルギー 200 keV 、スペクトル幅約 100 keV の高エネルギー X 線を CT 撮影に利用することが可能である。この高エネルギー X 線を供試体に照射し、高精細型の X 線画像検出器を用いて投影像を取得した³⁾。なお、実際の測定では、画素サイズ $12.07 \mu\text{m}$ 、視野幅 49.4 mm で CT 撮影を行った。このような機構を用いることで、従来の CT 計測手法に比べて、高い透過率により不飽和供試体全体を測定できることに加え、放射光特有の質の高い X 線の利用により高い画像コントラストが得られるため、広範囲の構造情報

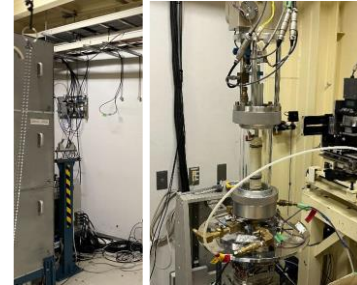


写真1 BL28B2及び三軸装置

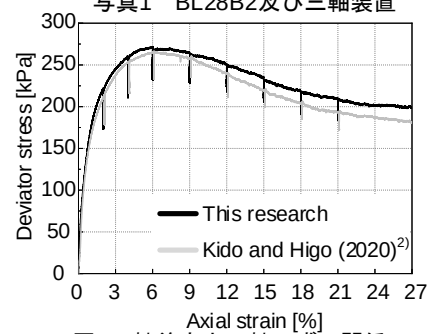


図1 軸差応力-軸ひずみ関係

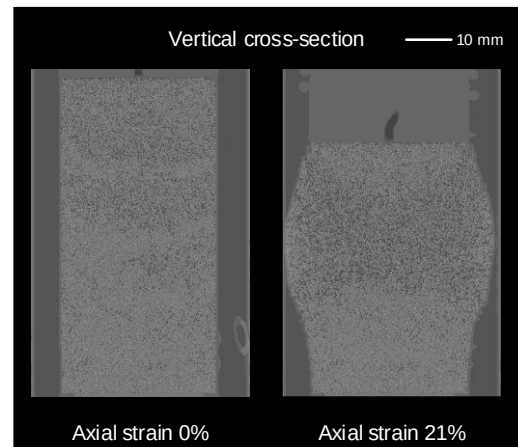


図2 CT画像

をより詳細に CT 撮影することが可能となっている。

3. 三軸圧縮試験の結果

図 1 に本試験及び Kido and Higo (2020)²⁾で得られた軸差応力-軸ひずみ関係を示す。図 1 に示すように、本試験と Kido and Higo (2020)²⁾では、ピーク応力、残留応力、ピーク応力を示す軸ひずみがいずれも近い値となり、類似した軸差応力-軸ひずみ関係が得られた。このことから、本試験では既往の研究と同様の状況が再現できており、比較、検討に用いるのに妥当な結果

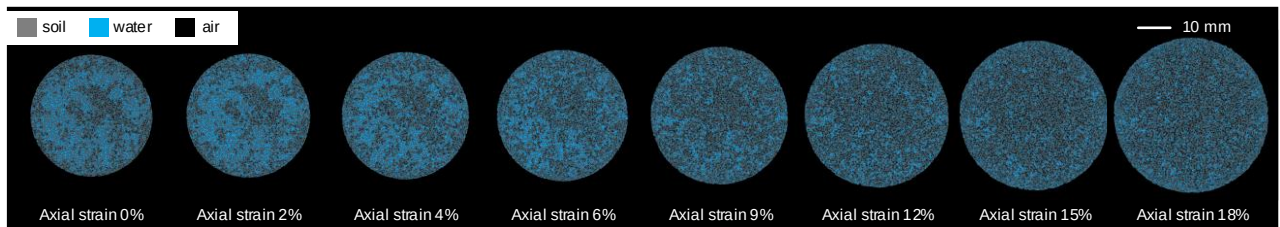


図3 三値化画像

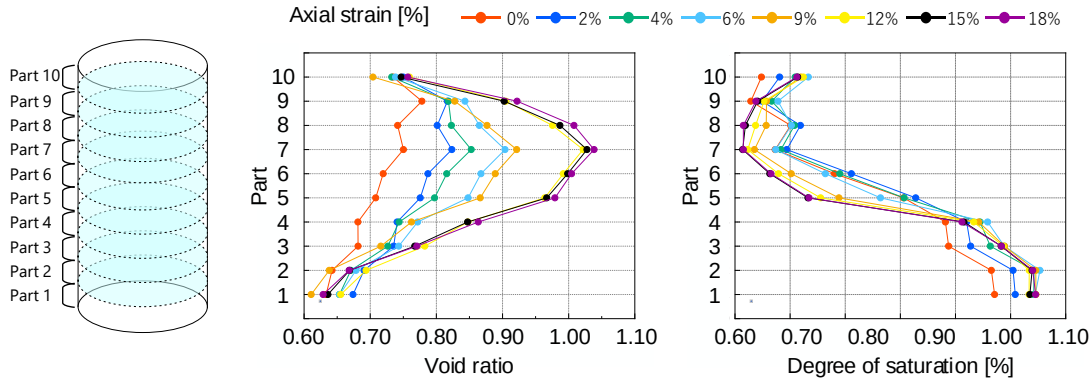


図4 間隙比, 飽和度の鉛直分布

が得られたと考えられる。

4. CT 撮影及び三値化の結果

図2に9段階の軸ひずみで実施したCT撮影により得られた供試体全体の鉛直断面画像のうち軸ひずみ0%及び21%のものを示す。図2のように、土粒子、水、空気をそれぞれ識別可能な解像度で供試体全体を撮影することに成功した。せん断に伴い、供試体中央部から密度低下領域が斜め方向に拡大し、一方で、供試体下部では微視構造の変化が小さいことが確認できる。

また、供試体全体を対象に三値化を適用し、土粒子相、水相、空気相の三相にCT画像を分割した。得られた三値化画像のうち供試体中央に対応する水平断面画像を図3に示す。なお、軸ひずみ21%については、三値化に伴う処理が困難であったため除外している。図3に示すように、供試体中央部では、軸ひずみが増加するにつれて、水相の占有率が減少している様子が確認できる。これはせん断に伴う保水性の低下を示していると考えられる。

5. 供試体鉛直方向の間隙比と飽和度の分布

本研究では、三値化画像を10個のPartに分割して読み込み、各Partで三値化画像から各相のvoxel数をカウントし、各相のvoxel数の比が各相の体積の比に対応していると仮定し、間隙比及び飽和度を算出した。このようにして算出した間隙比及び飽和度の鉛直方向の分布を図4に示す。

図4に示すように、初期状態では、供試体の下部になるほど間隙比は小さく、飽和度が高くなっていることがわかる。これは、水中落下法により供試体を作製したこと、水頭型吸引法による不飽和化により供試体上部ほど優先的に排水が進んだことにそれぞれ対応していると考えられる。また、軸ひずみが増加するにつれて、Part5からPart8の部分で間隙比が増加し、飽和度が低下している様子が確認できる。このことから、せん断に伴い、供試体中央からやや上の部分を中心に

密度低下領域が拡大し、保水性が低下することがわかる。一方で、供試体の最上部と下部では、間隙比、飽和度ともにほとんど変化が見られない。つまり、三軸圧縮試験において間隙水の存在形態や分布の変化は主に供試体中央付近の密度低下領域及びせん断帯部分で起こり、この領域の微視構造の変化が強度、剛性といった巨視的応答に影響を及ぼすと考えられる。

6. 結論

大型放射光施設 SPring-8 の実験機構を用いることで、不飽和三軸供試体全体の間隙比、飽和度の分布を調査した。その結果、三軸圧縮試験の初期状態で、供試体の下部ほど密な状態かつ高飽和度であることが明らかになった。さらに、せん断に伴い、供試体中央やせん断帯と考えられる領域では間隙比が大きくなり、保水性が低下し、一方、供試体下部や最上部では、三軸圧縮試験中、間隙比や飽和度の変化が小さいということが明らかになった。

謝辞

本研究は、科学研究費補助金 20K14825 (代表: 木戸隆之祐), 20K20434 (代表: 肥後陽介) の助成を受けて実施した。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) Higo, Y., Oka, F., Sato, T., Matsushima, Y. and Kimoto S.: Investigation of localized deformation in partially saturated sand under triaxial compression using microfocus X-ray CT with digital image correlation, *Soils and Foundations*, Vol. 53, No. 2, pp. 181-198, 2013.
- 2) Kido, R. and Higo, Y.: Microscopic characteristics of partially saturated dense sand and their link to macroscopic responses under triaxial compression conditions, *Acta Geotechnica*, Vol. 15, pp. 3055-3073, 2020.
- 3) Hoshino, M., Uesugi, K., Shikaku, R. and Yagi, N.: High-energy, high-resolution x-ray imaging for metallic cultural heritages, *AIP Advances*, Vol. 7, No. 105122, pp. 1-8, 2017.