

不飽和砂のせん断帯発達過程における土粒子接触頻度とメニスカス水の分布の変化

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力学特性は、土粒子接触点に存在するメニスカス水に働くサクシオンに影響を受ける。明瞭なせん断帯を伴う不飽和土の破壊メカニズムを解明するためには、せん断帯発達中のメニスカス水の分布の変化に着目した研究が重要である。そこで本研究では、排気-排水不飽和砂三軸圧縮試験中に発生したせん断帯を X 線 CT で可視化し、画像解析によって土粒子の接触点数を調べ、メニスカス水の数¹⁾との関係を検証した。また、これらに基づき不飽和土のひずみ軟化の要因を考察した。

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、相対密度 90.6 %、直径 35.0 mm、高さ 70.0 mm の不飽和砂供試体を作製した。排水平衡時の飽和度は 54.6 %、水頭差は 100.0 mm となり、供試体上部には 1.0 kPa のサクシオンが作用する。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。

本研究で用いた X 線 CT 装置は KYOTO-GEO μ XCT (TOSCANER-32250 μ hdk)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 のようにせん断帯が発生する領域を可視化した (Local tomography)。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 画像を三値化し、せん断帯内外部を抽出して接触点解析を行う (図 1)。三値化画像から土粒子相を抽出し、Watershed により土粒子を分離する。その後、各土粒子を構成する Voxel に対し固有の番号を付与しクラスター化するクラスターラベリング²⁾を行う。なお、本処理には Avizo9.1.1 (FEI)を用いており、間隙水相を対象にクラスターラベリングすると、間隙水のクラスター数が求まる¹⁾。

Watershed 後、1 Voxel 幅の間隙が 2 つの土粒子間に生じる。本研究ではこの箇所を接触点と見なし検

出を行う。具体的には、図 2 のようにラベリングした画像の水平・鉛直方向に 1 Voxel 間隔で検索点を置き、検索点が土粒子相と一致するとき、検索点を中心に一边 3 Voxel の検索窓をつくる。その中に間隙相が 1 つでもあれば、一边 5 Voxel に窓を拡大し検索を続け、間隙相の隣に検索点とは異なる番号の土粒子相があれば土粒子の接触点と特定する。本解析では、土粒子の総接触点数と、任意の一つの土粒子に対する接触点数、つまり配位数を求める。

4. 実験および解析結果

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、载荷を中断し、軸ひずみを固定して X 線 CT 撮影を行ったため生じた。図 4、図 5 にせん断帯内外部における土粒子の配位数を示す。せん断帯外部は配位数 3、4 の頻

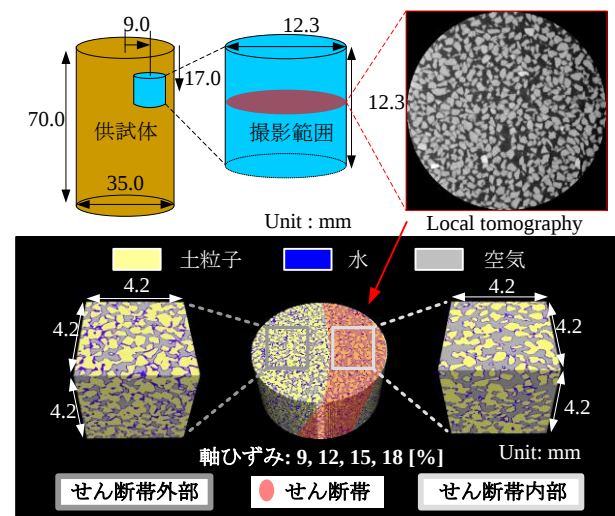


図 1 X 線 CT 撮影位置と解析対象の三値化画像

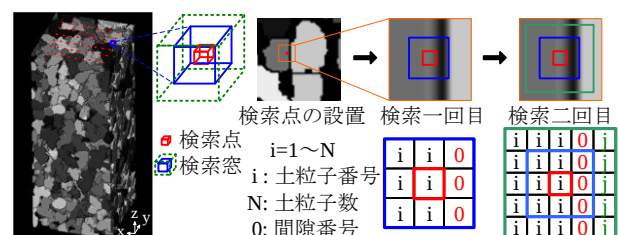


図 2 接触点解析アルゴリズムの概念図

キーワード 不飽和砂 三軸圧縮試験 マイクロフォーカス X 線 CT 土粒子接触点 メニスカス水 せん断帯
 連絡先 〒615-8540 京都市西京区京都大学桂 C1-4-587 Tel: 075-383-3193

度が高く、軸ひずみが増加してもその傾向に大きな変化はない。一方、せん断帯内部はせん断帯外部より小さな配位数 2, 3 の頻度が高く、軸ひずみ 18 % では配位数 2 以外の頻度が低くなっている。これは、せん断帯内部ほどせん断による密度低下の影響が大きいと考えられる。

図 6 に土粒子の接触点数－軸ひずみ関係、間隙水のクラスター数－軸ひずみ関係を示す。なお、本解析領域での間隙水の連続性 (クラスターの最大体積と総体積の比として本研究で定義した指標) は 10 % 以下と極めて低く、小さな体積の間隙水クラスターが多数存在する状態のため、土粒子接触点にメニスカス水が分布すると考えられる。そこで、算出した間隙水のクラスター数はメニスカス水の数と同義と考える。図 6 より、せん断帯内部ではせん断帯外部よりも土粒子接触点数が少なく、軸ひずみの増加に伴い接触点数が減少している。このとき、メニスカス水の数もせん断帯内部の方が少なく、徐々に減少する傾向が見られる。したがって、せん断帯内部における土粒子接触点数の減少は、メニスカス水の数も減少する一因になっていると考えられる。

画像解析結果と図 3 を比較すると、軸ひずみ 9 % 以降でせん断帯内部の土粒子の接触頻度が低下する傾向とひずみ軟化が対応している。これは、粒子が連なって形成される *force chains* が、せん断中の粒子接触点数の減少により不安定化し、ひずみ軟化に至る傾向(例えば 2))と類似する。また、せん断帯内部のメニスカス水の数も減少することから、マクロな強度・剛性へのサクシンの効果は小さいと推察され、ひずみ軟化に寄与していると考えられる。

結論

不飽和砂三軸圧縮試験および X 線 CT 画像解析を行った結果、不飽和砂のせん断帯内部において土粒子の接触頻度が低いこと、メニスカス水の数も減少がひずみ軟化に影響し得ることを明らかにした。

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) Marte, G. and Abdalsalam, M.: Micro-mechanical Observations of Strain Localization in Granular Soils During Simple Shear Loading, Bifurcation and Degradation of Geomaterials in the New Millennium, pp.27-32, 2014.

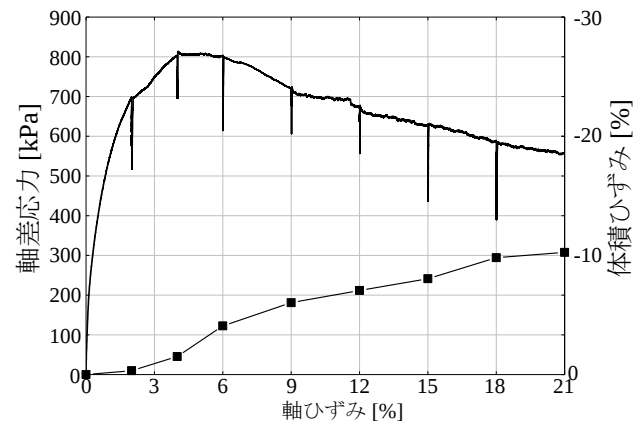


図 3 軸差応力－軸ひずみ関係, 体積ひずみ－軸ひずみ関係

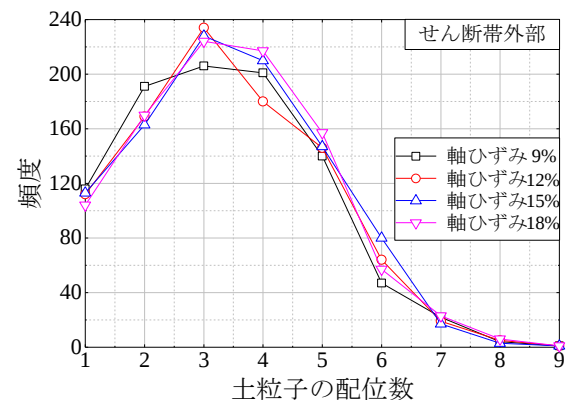


図 4 せん断帯外部の土粒子の配位数

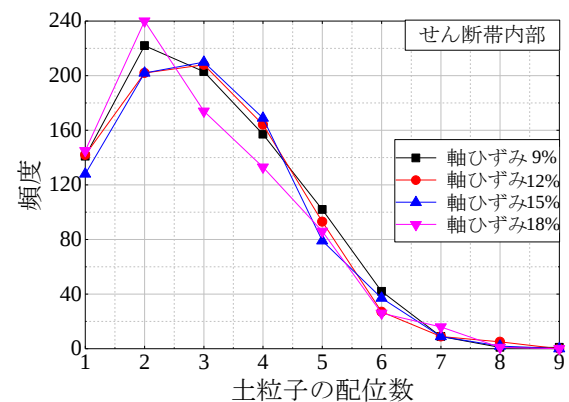


図 5 せん断帯内部の土粒子の配位数

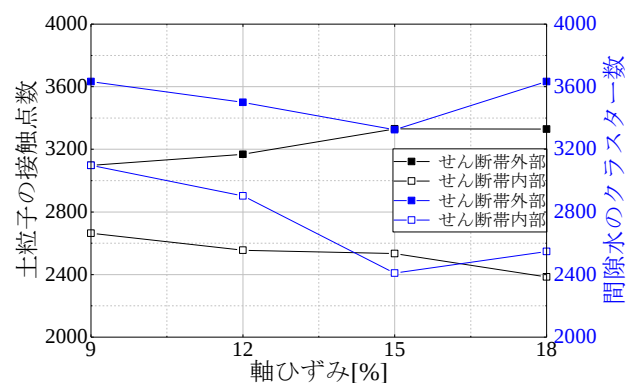


図 6 土粒子の接触点数と間隙水のクラスター数の推移