三軸圧縮下の不飽和砂の進行的なせん断帯発達過程における間隙水の微視的特性

木戸 隆之祐¹・肥後 陽介²・高村 福志³

¹学生会員 京都大学 大学院工学研究科社会基盤工学専攻 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)

E-mail: kido.ryuunosuke.87n@st.kyoto-u.ac.jp

²正会員 京都大学准教授 大学院工学研究科都市社会工学専攻 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)

E-mail: higo.yohsuke.5z@kyoto-u.ac.jp

³学生会員 京都大学 大学院工学研究科都市社会工学専攻 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)

E-mail: takamura.fukushi.56s@st.kyoto-u.ac.jp

不飽和土はメニスカス水に働くサクシオンにより高い強度・剛性を示すが、ピーク強度後は完全飽和土や乾燥土に比べて明瞭なせん断帯と顕著なひずみ軟化を伴い脆性的な破壊モードを示す。不飽和土の破壊メカニズムの解明には、せん断帯発達に伴うサクシオンの進行的な変化や、メニスカス水の分布が巨視的な力学挙動に及ぼす影響を把握することが重要である。本研究では、不飽和砂の三軸圧縮過程で生じるせん断帯を X 線 CT で可視化し、間隙水の曲率、存在形態を調べる画像解析を行った。その結果、せん断帯の発達過程でサクシオンの変化は極めて小さいことがわかった。また、メニスカス水の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。特に、せん断帯内部はメニスカス水の数が少なく、軸差応力へのサクシオンの寄与が小さいことが示唆された。

Key Words: *partially saturated sand, shear band, X-ray CT, meniscus water, curvature of pore water*

1. はじめに

土は、土粒子(固相)・水(液相)・空気(気相)から成る多相混合体である。道路盛土や地下水位以上の自然地盤など、土木工学の対象となる地盤は間隙が部分的に水で飽和した不飽和土である場合が少なくない。不飽和土内部の水と空気の境界にはメニスカスが形成され、大気圧以下の負の間隙水圧、すなわちサクシオンが生じる。サクシオンは土粒子間結合力を高めるため、不飽和土は完全飽和土や乾燥土に比べて高い強度・剛性を示す(たとえば 1)~4))。一方、特に低拘束圧下において、不飽和土は明瞭なせん断帯と顕著なひずみ軟化を示し脆性的な破壊モードを示すことが指摘されている^{5)~6)}。このことは盛土や斜面などの土構造物の破壊と密接に関係しており、不飽和土のひずみの局所化挙動を明らかにし破壊予測につなげることが重要である。

不飽和土の力学特性は、三軸試験や保水性試験などの実験的研究や構成式、モデル化に関する研究によって、サクシオン、飽和度、変形性・強度の関係から研究がなされてきた(たとえば 6)~10))。しかしながら、不飽和土のひずみの局所化メカニズムの解明は完全飽和土や乾燥

土のそれに比べて進んでいない。これは、不飽和土の力学挙動が三相の微視的な相互作用に依存するが、微視構造変化の観察は一般に簡単でない上に、一相あるいは二相材料に比べて複雑で解明が困難なことが一因である。土のみの一相系材料のひずみの局所化に関しては、せん断帯発達の様子が X 線 CT で可視化¹¹⁾されて以来、数 μm レベルの観察が可能なマイクロフォーカス X 線 CT を用いた研究が実施され、局所変形の発生・発達に関する微視的観点からの知見が得られている¹²⁾。また、三軸圧縮下の供試体内部における土粒子の運動、変位場・ひずみ場を画像解析で明らかにし、破壊メカニズムが定量的に説明されている^{13)~16)}。

これに対し、著者らの研究グループは、不飽和砂の三軸圧縮試験にマイクロフォーカス X 線 CT を適用した、不飽和土のひずみの局所化における微視構造変化の研究を実施してきた。CT 画像から土粒子相・水相・空気相をセグメンテーション(以下、三値化)した結果、せん断帯内部では間隙比が大きく、飽和度が低い状態になること¹⁶⁾、また、不飽和砂三軸供試体の鉛直方向の飽和度は、間隙比の分布に依存して不均質に分布することを明らかにした¹⁷⁾。一方で、せん断帯の発達過程におけるサクシ

ヨンや間隙水の分布の変化が、不飽和土の巨視的な力学挙動に及ぼす影響について検証した例はない。具体的には、ひずみの局所化により密度・飽和度が不均質に変化する際、強度・剛性に寄与するサクシジョンの効果がどのように変化するかは、十分に理解されていない。

本研究の目的は、せん断変形時における不飽和砂の三相微視構造の変化に着目し、明瞭なせん断帯と顕著なひずみ軟化を伴う破壊メカニズムを明らかにすることである。そこで、不飽和土のひずみの局所化による土粒子構造の変化や、せん断帯の発達過程における間隙水の保水状態といった微視的特性を明らかにする。

この目的のため、不飽和砂の三軸圧縮試験中、所定の軸ひずみで载荷を中断し、供試体全体の変形挙動とせん断帯が発達すると想定される局所領域をマイクロフォーカス X 線 CT で可視化する。後者の CT 画像は、土粒子相・水相・空気相の識別が可能にほど十分高い解像度で撮影を実施し、三値化によってせん断帯の発達に伴う三相割合の変化を定量化する。また、三値化画像を用いて二種類の画像解析を実施する。一つ目は間隙水の存在形態と数を調べるための Morphology 解析、二つ目はせん断変形中のサクシジョン変化を調べるため、間隙水相を対象とする曲率解析である。曲率解析は、既存の豊浦砂の水分保持特性試験データを用いて手法の妥当性を検証している。これらの CT 撮影および画像解析により、せん断変形中の間隙水の微視的特性を明らかにする。

2. 試験方法

(1) 試料と供試体作製方法

これまで著者らの研究グループは、平均粒径 (D_{50}) が約 $200\ \mu\text{m}$ の豊浦砂を使用し、CT 撮影において一つの土粒子を 27 Voxel (Voxel の詳細は後述) で表すと、画像解析で良好な結果が得られた¹⁷⁾。一方、本研究の実験機構での Voxel サイズは約 $12\ \mu\text{m}$ が限界のため、画像解析に耐え得る画像を撮影するためには $324\ \mu\text{m}$ 以上の D_{50} の試料が必要である。そこで本研究では、目開き $328\ \mu\text{m}$, $548\ \mu\text{m}$ のふるいを用いて D_{50} が $324\ \mu\text{m}$ 以上になるように粒度を整えた珪砂 5 号を使用した。本試料の粒径加積曲線を図-1 に示す。土粒子密度は $2.64\ \text{g/cm}^3$ 、最大間隙比は 1.013、最小間隙比は 0.694、 D_{50} は $456\ \mu\text{m}$ 、均等係数は 1.3、細粒分含有率は 0.1 % である。

供試体は、モールド内に貯めた脱気水に気乾砂を直接投入する水中落下法によって作製した。直径 $35.0\ \text{mm}$ 、高さ $70.0\ \text{mm}$ となるよう、所定量の珪砂 5 号を投入しつつ、モールドに振動を与えることで密詰めにした。不飽和状態にする際は、図-2 のような水頭型吸引法¹⁸⁾により、供試体上端と二重管ビュレット内の水面に $20.0\ \text{cm}$ の水

図-1 珪砂 5 号の粒径加積曲線

図-2 水頭型吸引法の機構図¹⁸⁾

写真-1 マイクロフォーカス X 線 CT¹⁶⁾

頭差をつけて排水させた。排水した水は二重管ビュレットに流れ込み、差圧計によって測定した排水後の平衡時における供試体上端と二重管ビュレット内の水面との水頭差は $10.0\ \text{cm}$ となった。この水頭差により、供試体上端および下端に作用するサクシジョンはそれぞれ $0.98\ \text{kPa}$, $0.29\ \text{kPa}$ となった。供試体の相対密度は $90.6\ \%$ 、間隙比は 0.724 であり、排水平衡時の飽和度は $54.6\ \%$ 、含水比は $15.0\ \%$ となった。

(2) 三軸圧縮試験方法とマイクロフォーカス X 線 CT

本研究のマイクロフォーカス X 線 CT 装置¹⁶⁾ (KYOTO-GEOμXCT (TOSCANER-32250μhdk, 東芝 IT コントロールシステム製))を写真-1 に示す。最大管電圧は $225\ \text{kV}$ 、最大管電流は $888\ \mu\text{A}$ 、最小焦点サイズは $4\ \mu\text{m}$ であり、最

表-1 X線CT装置およびFPDの仕様

X線源	最大管電圧 [kV]	225
	最大管電流 [μ A]	888
	最大消費電力 [W]	200
	最小焦点サイズ [μ m]	4
Flat Panel Detector (FPD)	マトリクスサイズ [Voxel]	1024 ²
	最大空間分解能 [μ m]	5
	積分時間 [ms]	66-999
	ビュー数	600-4800
	積算枚数	10-50

表-2 X線CT撮影の条件

撮影種類	Global tomography	Local tomography
管電圧 [kV]	160	160
管電流 [μ A]	250	100
Voxel サイズ [μ m]	72.6 $\times$ 72.6 $\times$ 80.0	12.3 $\times$ 12.3 $\times$ 14.0
撮影直径 [mm]	74.4	12.3
撮影高さ [mm]	72.8	12.3
積分時間 [ms]	133	133
ビュー数	2253	4506
積算枚数	5	10

大 5 μ m の空間分解能で物体を可視化する。消費エネルギー200 W 以内に管電圧と管電流を調節し、被検体の大きさに応じて最適な撮影条件を設定する。X線ワークテーブルは上下左右への移動が可能であり、X線管にワークテーブルを近づけるほど大きな拡大率を得ることができる。撮影中はワークテーブルが 360 度回転することで様々な角度から X 線投影画像を撮影し、画像演算を用いて断面画像を再構成する。これらの連続した断面画像を重ね合わせることで、三次元の CT 画像が得られる。

断面画像は、X線減衰係数の空間分布に基づいて再構成される。X線減衰係数は、物質の密度、原子組成および X線エネルギーに依存し、その空間分布は CT 値に換算される。地盤材料を CT 撮影する場合、CT 値は物質の密度とほぼ線形関係にあることが経験的に知られている¹⁾。CT 画像は Voxel (ボクセル)と呼ばれる画素で構成され、各々の Voxel 内に含まれる物質の平均密度に対応する CT 値が 16 ビットの範囲で格納される。

検出器には Flat Panel Detector (FPD)を用いており、従来型の X線検出器に比べて信号劣化を抑え、高解像度の CT 画像が取得できる。X線CT装置および FPD の仕様を表-1 に示す。ここで、表中のビュー数は、ワークテーブルが 360 度回転する間に投影する方向数を決める値である。また、表中の積算枚数は、一度の投影において収集するデータ数であり、データを加算平均することでノイズを抑制する。

供試体は、X線が透過可能な無色透明の円筒型アクリルセル内に設置し、ワークテーブル上に固定することで、三軸圧縮試験中に X線CT撮影を並行して実施できる。試験中、拘束圧として空気圧 50 kPa を与え、排気-排水条件で実施した。試験中、供試体下部は二重管ビュレットの水につないで排水平衡時の水頭差 10 cm を保ち、供試体上部は湿度 99 %以上の大気圧に解放し乾燥を防いだ。せん断するとダイレイタンスーでビュレットの水位が変動するため、ビュレットの高さを調整し水頭差を維持した。排水量は、二重管ビュレットに搭載した差圧計で計測した。供試体が軸ひずみ 21 %に至るまで、ひずみ速度 0.10 %/min の変位制御で載荷した。

本研究では、軸ひずみ 0 %, 2 %, 4 %, 6 %, 9 %, 12 %, 15 %, 18 %, 21%において、2種類の X線CT撮影を実施した(図-3)。1つ目は、供試体全体の変形・破壊形態の可視化を目的とし、解像度を抑える代わりに広範囲を撮影するものである(Global tomography)。2つ目は、せん断帯が発生・発達すると推測される局所領域を、個々の土粒子や水が識別可能な高解像度で撮影するものである(Local tomography)。Local tomographyの撮影位置については、せん断帯が供試体上部の試料キャップの端から 45 度程度の角度で生じると推測し、図-3のように供試体直径の中心から横に 9 mm、供試体上端から下に 17 mm ずらした位置を、軸ひずみ 0 %での撮影位置とした。この撮影位置は載荷によって下方向に動くため、載荷後に軸ひずみに応じて撮影位置を調整し、試験終了まで同じ領域を可視化した。撮影中は供試体が動かないよう、載荷を一時的に中断した。2種類の撮影は合計 3 時間を要し、撮影後に同じひずみ速度で再載荷した。それぞれの撮影条件を表-2に示す。

図-3 X線CT撮影の種類

12 %, 15 %, 18 %, 21%において、2種類の X線CT撮影を実施した(図-3)。1つ目は、供試体全体の変形・破壊形態の可視化を目的とし、解像度を抑える代わりに広範囲を撮影するものである(Global tomography)。2つ目は、せん断帯が発生・発達すると推測される局所領域を、個々の土粒子や水が識別可能な高解像度で撮影するものである(Local tomography)。Local tomographyの撮影位置については、せん断帯が供試体上部の試料キャップの端から 45 度程度の角度で生じると推測し、図-3のように供試体直径の中心から横に 9 mm、供試体上端から下に 17 mm ずらした位置を、軸ひずみ 0 %での撮影位置とした。この撮影位置は載荷によって下方向に動くため、載荷後に軸ひずみに応じて撮影位置を調整し、試験終了まで同じ領域を可視化した。撮影中は供試体が動かないよう、載荷を一時的に中断した。2種類の撮影は合計 3 時間を要し、撮影後に同じひずみ速度で再載荷した。それぞれの撮影条件を表-2に示す。

3. CT画像解析アルゴリズム

三軸圧縮過程で取得した Local tomographyの CT 画像を用いて、三相微視構造の変化を明らかにする。本研究で

は, (1) CT 画像を基に土粒子相・水相・空気相の三相を分割する三値化, (2) 間隙水の存在形態と数を調べる Morphology 解析, (3) せん断変形中のサクシオン変化を調べるために間隙水の曲率解析を実施した. 以下, 各画像解析のアルゴリズムについて述べる.

(1) 三値化

本研究では, 先行研究^{16, 19)}で適用されている Region growing 法によって三値化を行う. Region growing 法とは, 物体を代表する CT 値を持つ Voxel を初期点とし, その Voxel に隣接する Voxel の CT 値が設定した許容値以内にある場合に同じ連続体と見なす処理を繰り返し, 次々と領域を拡張していく領域分割手法の一つである. 不飽和土の CT 画像を Region growing 法で三値化するためには, 各相を抽出するための許容値を決定する必要がある. ここで, 不飽和土の CT 画像では, 一つの Voxel に二つ以上の相が含まれる場合がある. 特に, 土粒子相・空気相が一つの Voxel を占めるとき, 二相の平均密度が水相のそれに近いため, その Voxel が水相と誤認される部分容積効果^{19, 20)}が生じる. このため, Region growing 法に用いる許容値を決定するにあたり, 部分容積効果による Voxel の存在を考慮する必要がある. そこで本研究では, この現象を考慮し, 以下に示す手順で Region growing 法に用いる許容値を決定する¹⁷⁾.

- 1) 土粒子相・水相・空気相の CT 値ヒストグラムが正規分布に, 部分容積効果に起因する三種類の Voxel (土粒子相と水相, 水相と空気相, 土粒子相と空気相を占める) の CT 値ヒストグラムが一様分布関数に従うと仮定する.
- 2) それら六種類による CT 値ヒストグラムを重ね合わせたものが, 元画像の CT 値ヒストグラムと最も類似した形となるよう, 最尤推定法を用いて決定する.
- 3) 推定した CT 値ヒストグラムにおける土粒子相と水相のヒストグラムの交点, 水相と空気相のヒストグラムの交点より, 土粒子相, 空気相への Region growing 法に用いる許容値をそれぞれ決定する. 水相は, 土粒子相と空気相の領域分割後に残った領域とする.

なお, 既知の密度・含水比にある豊浦砂供試体の CT 画像を三値化し, 実験値と解析値が良好な一致を示した. これより, 本手法の妥当性を確認している¹⁷⁾. 得られる三値化画像の例を図-4 に示す.

(2) Morphology 解析

三値化画像から水相あるいは空気相のみを抽出し, 個々の連続性を有する水あるいは空気 (以下, クラスター) に分割するクラスターラベリングを実施する. 以下,

図-4 CT 画像と三値化画像の例 (軸ひずみ 0%)

図-5 水相を対象とする Morphology 解析の手順

水相を対象とするときの解析手順を示す. なお, 本解析は三次元画像解析ソフト Avizo9.1.1 (FEI) を使用する.

- 1) 図-5(a), (b) に示すように, 三値化画像から水相を抽出し, 二値化画像とする. この二値化画像には, 吸着水や, 固相と気相の境界に存在する部分容積効果により水相と誤認された Voxel など, 土粒子接触点周りに存在する間隙水の曲率に寄与しない水相が含まれる.
- 2) これらの水相を除去するために Erosion, Dilation の順に画像処理²¹⁾を行う. Erosion とは, 画像中に存在する突起状のノイズを除去する処理である. 二値化画像中のすべての水相の Voxel の近傍 6 Voxel を検索し, 一つでも水相以外の Voxel があれば, 着目した水相の Voxel を水相以外の Voxel に置換する. これとは逆に Dilation とは, ノイズの影響で物体中にあいた孔や亀裂を埋めるための処理である. 二値化画像におけるすべての水相以外の Voxel の近傍 6 Voxel を検索し, 一つでも水相の Voxel があれば, 着目した水相以外の Voxel を水相の Voxel に置換す

る。図-5(c)に Erosion および Dilation 後の二値化画像を示す。

- 3) 2)で得た画像を基にクラスターラベリングを行う。図-5(d)に示すように、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する。
- 4) 3)で得たラベリング画像を基に、クラスターの数および個々のクラスター体積を定量化する。

本解析では、間隙水と間隙空気連続性を評価する。連続性は、個々のクラスター体積の総和に対する最大体積のクラスターの割合とし、式(1)のように表す。

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

連続性が 100 %に近いほど、間隙水および間隙空気は大きな体積のクラスターが 1 つ存在する状態である。逆に連続性が低くなると、小さな体積のクラスターが多数存在する状態となる。

なお、連続性とは Erosion, Dilation によって吸着水等の曲率に寄与しない水を除去した状態における水の存在形態を評価するため、本研究が定義した指標である。そのため、実際に水が間隙内で連続した状態かを直接的に示すものではないことに注意されたい。

(3) 曲率解析

不飽和土内の間隙水と間隙空気境界は、水の表面張力と土粒子の親水性によって湾曲しており、サクシオンが働く。このとき、理想球を仮定した場合のサクシオンと間隙水の曲率との間には、たとえば式(2)の簡易式²⁹⁾で表されるような正の相関関係がある。

$$u_a - u_w = \frac{T}{r_1} - \frac{T}{r_2} \quad (2)$$

ここで、 u_a は間隙空気圧、 u_w は間隙水圧、 $u_a - u_w$ はサクシオン、 r_1 と r_2 は水と空気の接触面における主曲率半径、 T は水の表面張力で摂氏 20°C のとき 0.074 N/m である。不飽和土では式(2)の左辺、つまりサクシオンが常に正になり、この場合は r_1 が r_2 よりも常に小さい値を示す。

また、図-6 中の土粒子半径 R と水の充填角度 θ を用いて、 r_1 と r_2 は以下のように表せる²⁹⁾。

$$\begin{aligned} r_1 &= R \left(\frac{1}{\cos \theta} - 1 \right) \quad r_2 = R \tan \theta - r_1 \\ 0 \leq \theta < 53^\circ \quad & r_1 < r_2, u_a - u_w > 0 \\ 53 \leq \theta \leq 90^\circ \quad & r_1 \geq r_2, u_a - u_w \leq 0 \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、本研究で用いた試料の D_{50} より $R=230 \mu\text{m}$ と仮定し、式(2)および式(3)を用いると、図-7 のように r_1 、 r_2 とサクシオンの関係が導ける。図-7 より、本研究で作製した不飽和砂供試体に作用する 1.0 kPa のサクシオンにおいて、 r_1 は r_2 に比べて 2 オーダー程度小さいことがわかる。また、 r_1 が小さくなると r_2 の影響も含む式(2)で

図-6 メニスカス水の曲率半径と曲率

図-7 曲率半径とサクシオンの関係

図-8 接触面上の曲線の曲率ベクトルの概念図

評価されるサクシオンは単調に増加することがわかる。以上より、 r_2 がサクシオンに及ぼす影響は小さく、 r_1 の増減を測定すればサクシオンの増減を議論することができる。そこで本研究では、図-6 に示す間隙水の曲率 $1/r_1$ を画像解析によって算出し、せん断変形中のサクシオンの変化を議論することとした。

三次元接触面の曲率について述べる。接触面上の任意の点における曲率は、一般に、接触面の曲がり具合を表す第二基本形式から得られる。接平面をつくる一次独立な接ベクトル u, v で表現される接触面 $f(u, v)$ 上の点 $P(f(u, v))$ を通る曲線 C は、弧長変数 s を用いて以下の式(3)のように表せる(図-8(a), (b))。

$$u = u(s) \quad v = v(s) \quad (4)$$

よって、曲線 C は以下のように表せる。

$$C: f(u(s), v(s)) \quad (5)$$

曲線 C 上の点 P の接ベクトル $T(s)$ は以下ようになる。

$$T(s) = \frac{df}{ds} = f_u \frac{du}{ds} + f_v \frac{dv}{ds}, |T(s)| = 1 \quad (6)$$

ここに, f_u および f_v は接触面の接平面方向の偏微分である。曲線 C の曲率ベクトル $T'(s)$ と同じ向きの単位ベクトルを $e(s)$, 曲率を $\kappa(s)$ とすると, 曲率ベクトル $T'(s)$ は以下のように表せる。

$$\begin{aligned} \kappa(s)e(s) &= \frac{dT(s)}{ds} = \frac{d\left(f_u \frac{du}{ds} + f_v \frac{dv}{ds}\right)}{ds} \\ &= f_{uu} \left(\frac{du}{ds}\right)^2 + 2f_{uv} \frac{du}{ds} \frac{dv}{ds} + f_{vv} \left(\frac{dv}{ds}\right)^2 \\ &\quad + f_u \frac{d^2u}{ds^2} + f_v \frac{d^2v}{ds^2} \end{aligned} \quad (7)$$

つぎに, 曲面の法線ベクトル n への曲率ベクトル $T'(s)$ の正射影ベクトルを考える。この正射影ベクトルを法曲率といい, 以下のような第二基本形式 Π で表せる。

$$\begin{aligned} \Pi &= \kappa(s)e(s) \cdot n = f_{uu} \cdot n \cdot \left(\frac{du}{ds}\right)^2 + 2f_{uv} \cdot n \cdot \frac{du}{ds} \frac{dv}{ds} \\ &\quad + f_{vv} \cdot n \cdot \left(\frac{dv}{ds}\right)^2 + f_u \cdot n \cdot \frac{d^2u}{ds^2} + f_v \cdot n \cdot \frac{d^2v}{ds^2} \\ &= L \left(\frac{du}{ds}\right)^2 + 2M \frac{du}{ds} \frac{dv}{ds} + N \left(\frac{dv}{ds}\right)^2 \\ &= \begin{pmatrix} du/ds & dv/ds \end{pmatrix} \begin{pmatrix} L & M \\ M & N \end{pmatrix} \begin{pmatrix} du/ds \\ dv/ds \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (8)$$

ここで, L, M, N は, 接触面 $f(u, v)$ の接ベクトル方向に関する二階導関数の法線成分である。式 (7) より, 第二基本形式 Π は L, M, N という接触面固有の値および曲線 C の接ベクトル $du/ds, dv/ds$ のみで決まる量である。式 (7) で最終的に得られる行列表示より, L, M, N はヘッセ行列の二次形式に相当し, 多変数関数の微分法により法曲率の固有値 κ_1, κ_2 が得られる。固有値 κ_1, κ_2 は, 接触面上の任意の点における法曲率の最大値と最小値に対応する (以下, 主曲率)。本研究では, 主曲率の最大値 κ_1 を間隙水の曲率 $1/r$ として計算する。

本研究の曲率解析は, 三次元画像解析ソフト Avizo 9.1.1 (FEI) を用いて, 以下の手順で実施する。

- 1) **Morphology** 解析と同様に, 二値化画像に存在する吸着水, 部分容積効果に起因する水相を除去するため 1 Voxel の **Erosion, Dilation** をこの順序で行う。
- 2) 三値化画像の元々の水相と 1) で得た水相を置換し, 図-9 のように水相と空気相の接触面を抽出する。
- 3) 図-10 のように, 接触面を多数の三角形面に分割する。このとき, 図-11 のように計算対象の三角形を 0 番とすると, その三角形と辺を共有する三角形が

- 1 番, さらにそれらと辺を共有する三角形が 2 番となり, 最大 20 番まで定義される。
- 4) 計算対象の三角形面に対し, 最大 20 番までの三角形面を近傍と見なし, それらの三角形面の最大主曲率の誤差 (偏差) が最小となるよう, 最小二乗法に準じて近似解を求める。つまり, 接触面上の任意の場所にある三角形面の曲率が, その周辺の三角形面の曲率と等価になるように近似される。
- 5) 接触面を構成するすべての三角形に対して 4) の計算によって得られた曲率の平均値を計算する。

図-9 三値化画像から抽出した水相と空気相の接触面

図-10 水相と空気相の接触面を構成する三角形

図-11 曲率の計算対象の三角形と近傍の三角形

図-12 ゆる詰め豊浦砂の水分特性曲線²⁴⁾

図-13 曲率の標準偏差と近傍の三角形の数との関係

図-14 間隙水の曲率-飽和度関係

図-15 サクション-飽和度関係

4. 曲率解析の妥当性の検証

(1) 検証データ

本解析を実施するに先立ち、曲率計算における三角形の近傍数の影響と、得られた曲率が間隙水の曲率として妥当かどうかを検証する必要がある。そこで、ゆる詰め豊浦砂供試体を用いた水分保持特性試験²⁴⁾の排水・吸水過程で取得した三値化画像を用いて曲率解析を行った。

ここで、豊浦砂の土粒子密度は 2.64 g/cm^3 、最大間隙比は 0.975 、最小間隙比は 0.614 、平均粒径 (D_{50}) は $185 \mu\text{m}$ であり、供試体は直径 18.0 mm 、高さ 17.7 mm 、間隙比 0.822 (相対密度 42.1%) となるように水中落下法で作製している。その後、飽和度 100% から排水・吸水の順に水頭型吸引法¹⁸⁾によってサクシオンを段階的に与え、平衡に至った際に $5.5 \times 5.5 \times 7.0 \mu\text{m}$ の Voxel サイズで CT 撮影を実施している。図-12 に水分特性曲線を示す。なお、図-12 中の点 f, h では CT 画像を取得していないため、解析は実施していない。

(2) 近傍数の影響

図-12 の点 e, i, j の三値化画像を対象に曲率解析を実施した。なお、水相と空気相の接触面を構成する三角形の数は、点 e が 26994261 個、点 i が 30697952 個、点 j が 18454572 個であり、各々の三角形に対して曲率を求めている。近傍数を 1 から 20 まで変え、各三角形で計算した間隙水の曲率の標準偏差を図-13 に示す。なお、 1 つ

の三角形の面積は $74 \mu\text{m}^2$ から $79 \mu\text{m}^2$ 程度とほぼ均一の大きさである。図-13 より、いずれのケースも近傍数が多いほど標準偏差は小さくなっている。特に、近傍数 6 以上においては、近傍数を変えても標準偏差が増減しながら収束する傾向が見られる。そこで本研究では、計算対象の三角形に隣接する 6 番目までの三角形を考慮し、曲率解析を行った。

(3) 間隙水の曲率としての妥当性

図-12 に示した点のうち、排水過程 (点 c, d, e, g) および吸水過程 (点 i, j, k) で取得した三値化画像を用いて検証する。具体的には、各点で得られる曲率-飽和度関係と図-12 の水分特性曲線を比較し、同様の傾向を示すかどうかを確認する。

図-14 に曲率-飽和度関係を示す。図-14 の点 c, d, e, g において飽和度が低下するほど曲率が概ね増加しており、図-12 の排水過程 (点 c, d, e, g) においてサクシオンが増加する傾向と対応する。また、図-14 の点 g, i, j, k において飽和度が上昇するほど曲率は減少しており、図-12 の吸水過程 (点 g, i, j, k) においてサクシオンが減少する傾向と対応する。また、図-14 の点 c, d, e における曲率が、図-14 の点 k, j, i における曲率に比べてそれぞれ大きな値を示している。これは、図-12 の排水・吸水過程に見られるヒステリシスと対応している。これより、本研究で提案する曲率解析は、水分保持状態の異なる間隙水の曲率を相対的に評価する手法として妥当と

いえる。

つぎに、式(2)を基にサクシンの絶対値の推定を試みた(図-15)。図-12と比較すると、飽和度が最も低い点gを除いて比較的良く一致した。点gが一致しない理由については、解像度以下のメニスカスを取得できていない可能性などが考えられ、今後の課題である。ここで、先述の通り曲率半径 r_2 は r_1 に比べて大きいと考えているため、図-15は r_1 のみを考慮した推定値である。

5. 実験結果および解析結果

(1) 軸差応力-軸ひずみ関係とCT画像

図-16に軸差応力-軸ひずみ関係、体積ひずみ-軸ひずみ関係、および画像相関法¹⁴⁾¹⁶⁾によって求めたせん断ひずみ場の鉛直断面画像を示す。ここで、せん断ひずみとは偏差ひずみの第二不変量を指す。また、画像相関法の解析条件を表-3に示す。体積ひずみは、三次元可視化ソフトVGStudioMAX2.2 (Volume Graphics GmbH)を用いて、供試体全体撮影のCT画像を基に供試体部分のVoxel数を算出して求めている。なお、図-16に見られる応力緩和は、およそ3時間を要するCT撮影時に载荷を中断し、軸ひずみを一定に保っているために生じている。なお、CT撮影による実験の長期化は供試体の応力履歴にほとんど影響しないことが確認されている⁹⁾。図-16より、軸ひずみ0%からひずみ硬化し、軸ひずみ4%で800 kPa程度のピーク応力を示している。その後、軸ひずみ21%に至るまでひずみ軟化しており、約550 kPaの残留応力を示している。体積ひずみについては、軸ひずみ2%以降に徐々に膨張する傾向(負が膨張)が見られ、密詰め砂の典型的なダイレイタンス挙動を示している。

図-17にGlobal tomographyとLocal tomographyのCT画像を示す。CT画像は材料の密度の大きさに対応してCT値が異なり、画像上で白黒の濃淡として現れる。例えば、金属や砂鉄などの密度が高い物質ほど白く表示され、空気のように密度が低い物質、あるいは体積変化による密度低下領域ほど黒く表示される。図-17のGlobal tomographyの鉛直断面画像を見ると、軸ひずみ0%で既に供試体中央から上が比較的黒くなっている。これは供試体作製において排水させる際、供試体上部ほどサクシンの大きく、供試体上部から比較的多く排水したためと考えられる。軸ひずみが大きくなるにつれて供試体中央部分に黒い領域が増加しており、せん断によって密度低下していることがわかる。また、軸ひずみ9%で斜め方向に密度低下が見られ、ひずみの局所化が発生していると推察できる。軸ひずみ9%以降では、この局所化領域が起点となり明瞭な密度低下領域が発達している。ここで、

図-16 軸差応力-軸ひずみ関係、体積ひずみ-軸ひずみ関係およびせん断ひずみ場の鉛直断面画像

表-3 画像相関法の解析条件

Voxelサイズ[μm]	72.6×72.6×80.0
画像寸法[Voxel]	650×650×410
参照点間隔[Voxel]	水平方向: 40 鉛直方向: 30
計算窓サイズ[Voxel]	21×21×21
検索窓サイズ[Voxel]	61×61×61

図-16のせん断ひずみ場を見ると、はじめは全体的にせん断ひずみが発生しているが、局所的に大きなせん断ひずみが徐々に卓越する様子が明らかであり、図-17の斜め方向に発達する密度低下領域に対応している。つまり、CT画像に見られる密度低下領域はせん断帯といえる。

図-17のGlobal tomographyにおいて、軸ひずみ12%以降の水平断面画像より、供試体上部では輪のような形状の密度低下領域が生じている。また、鉛直断面画像からは斜め二方向から密度低下領域が交差していることがわかる。これらより、三次元的にはコーン状のせん断帯が発達したと推測でき、先行研究⁹⁾¹¹⁾の知見と一致する。供試体中央部分では全体的に密度低下が生じている一方で、供試体下部ではほとんど変形が見られない。

図-17、図-18に示すLocal tomographyは、撮影中心と供試体中心をずらして撮影している。そのため、それらの画像の右側が、左側に比べて暗く表示されるアーチファクトが生じる。具体的には、偏心により実際のX線の透過距離が異なるのに対し、CT値を用いた画像演算において透過距離が円形の撮影領域に一律に設定されるため、供試体中心から遠い箇所のCT値が相対的に小さくなる。本研究の三次元Local tomography画像は878枚の水平断面画像が鉛直方向に重なって構成されているが、上記のアーチファクトは鉛直位置の異なる水平断面にお

図-17 供試体全体画像 (Global tomography)およびせん断帯発生部分の CT 画像 (Local tomography)

図-18 軸ひずみ 0%および 21%の Local tomography の CT 画像

いても同様の傾向を示す。そこで本研究では、水平断面で同じ位置にある 878 個の Voxel の CT 値の平均値からアーチファクトの平面的なトレンドを抽出し、原画像との差画像を作製する方法でアーチファクトを補正している²⁵⁾。なお、図-17、図-18 はアーチファクト補正後の CT 画像を示している。

図-18 における軸ひずみ 0%, 21% の Local tomography の CT 画像に見られる白い物質は、珪砂に混在する砂鉄であり、明るい灰色が土粒子、暗い灰色が水、黒色が空気である。初期状態に比べて空気の領域、つまり低密度領域が局所的に多くなっていることがわかる。

図-18(b)に示すように、ひずみの局所化がより顕著である右斜め上方向に発達したせん断帯の幅と角度を計測した。せん断帯と垂直方向に計 10 か所で計測した幅の

平均値は 5.22 mm となり、本試料の D_{50} の 11.4 倍となった。これは、せん断帯の幅が D_{50} の 10 倍程度になるという先行研究^{9, 12)}の知見とほぼ一致する。また、せん断帯の角度は約 60 度となった。

(2) せん断帯発達に伴う三相割合の変化

三値化により、土粒子相・水相・空気相の Voxel 数、つまり体積が得られるため、間隙比と飽和度の算出が可能である。図-17 の各軸ひずみにおける、アーチファクト補正後の Local tomography 全体の CT 画像を三値化して得られた間隙比-軸ひずみ関係を図-19(a)に、飽和度-軸ひずみ関係を図-19(b)に示す。ここで、軸ひずみ 21% の CT 画像は、X 線装置の潜在的なゆらぎに依存して、解像度が他の画像よりも低かったため、画像解析の結果

図-19 Local tomography の CT 画像全体の三値化結果 : (a) 間隙比-軸ひずみ関係 (b) 飽和度-軸ひずみ関係

図-20 Local tomography の三値化画像から抽出したせん断帯内外部の三値化画像

図-21 せん断帯内外部の三値化結果 : (a) 間隙比-軸ひずみ関係 (b) 飽和度-軸ひずみ関係

から除外した。図-19(a)より、軸ひずみ 4 % から間隙比は一貫して増加しているが、図-19(b)を見ると飽和度は徐々に低下する傾向が見られる。つまり、密度低下に伴い保水性の低下が起こっているのである。

つぎに、図-20 のように Local tomography の三値化画像から、せん断帯内部とせん断帯外部を抽出し、それぞれの三相割合を比較する。せん断帯内部は、図-17 の CT 画像において黒く表示される密度低下領域のみを含むように抽出した。せん断帯内外部の間隙比-軸ひずみ関係を図-21(a)に、飽和度-軸ひずみ関係を図-21(b)に示す。解析を行った軸ひずみ 9 % から 18 % にかけて、せん断帯

内部における間隙比はせん断帯外部に比べて大きく、かつ飽和度は低い値を示している。

ここで、せん断帯内部の飽和度の低下に対して初期状態の飽和度分布が影響を及ぼし得るかを検証する。具体的には、せん断帯内部と同じ大きさの領域 (一辺 4.2 mm の立方体) を軸ひずみ 0 % の三値化画像から等間隔で次々と抽出し、飽和度のヒストグラムを作成する。先行研究²⁴⁾と同じ手法により、水平・鉛直方向に 50 Voxel 間隔で抽出を繰り返し、合計 1000 点での飽和度を求めている。図-22 に、初期状態の飽和度のヒストグラムと、軸ひずみ 9 % から 18 % までのせん断帯内外部における飽

図-22 初期状態とせん断帯内外部での飽和度の比較

図-23 間隙水の連続性-軸ひずみ関係

表-4 各軸ひずみにおける Local tomography 全体の間隙水クラスターの最大体積および総体積

軸ひずみ [%]	0	2	4	6	9	12	15	18
最大体積 [mm ³]	4.68	2.02	0.50	0.21	1.04	0.45	0.25	0.23
総体積 [mm ³]	90.61	77.62	61.18	57.03	68.05	53.84	41.61	42.39

表-5 各軸ひずみにおけるせん断帯内外部の間隙水クラスターの最大体積および総体積

	せん断帯内部				せん断帯外部			
	9	12	15	18	9	12	15	18
最大体積 [mm ³]	2.36×10^2	2.31×10^2	1.69×10^2	1.74×10^2	0.14	0.42	0.23	0.71
総体積 [mm ³]	1.88	1.80	1.24	1.27	3.80	4.21	3.77	3.32

和度の比較を示す。前者は、算出した飽和度の最小値 35.5 %, 最大値 47.6 % の範囲内で区間を 3 % として、その度数を計上し図-22 の縦軸に示している。これより、初期状態の飽和度は、軸ひずみ 9 % 以降のせん断帯内部のそれに比べて十分に高いことが明白である。つまり、せん断帯内部の飽和度の低下は、せん断変形中の密度低下に起因するのである。

先行研究²⁹⁾において、限界状態時の密度低下領域では飽和度が低い状態であると報告されている。これに対し本研究では、ひずみの局所化の発生から軸ひずみ 18 % までの進展的な密度・飽和度の変化を定量化し、せん断帯内部は密度低下により一貫して低い保水状態であることを明らかにした。

(3) せん断帯における間隙水の存在形態と数の変化

図-20 に示す Local tomography およびせん断帯内外部の、軸ひずみ 18 % までの三値化画像を用いて Morphology 解析を行った。各領域で得られた間隙水の連続性-軸ひずみ関係を図-23 に示す。また、連続性を求める際に用いた各軸ひずみにおける間隙水クラスターの最大体積、総体積について、Local tomography 全体の結果を表-4 に、せん断帯内外部の結果を表-5 に示す。なお、間隙空気に対して本解析を行った結果、全ての軸ひずみにおいて連続性はほぼ 100 % であった。

図-23 に示すように、間隙水の連続性は最大でも 10 % 程度と非常に低いことがわかる。間隙空気の連続性がほ

ぼ 100 % かつ間隙水の連続性が極めて低いことより、解析領域における間隙水はメニスカス水として土粒子接触箇所に存在していると考えられる。また、せん断帯内部における間隙水の連続性は、せん断帯外部よりも比較的低くなっている。これより、せん断帯内部では小さな体積のメニスカス水が存在していると考えられる。なお、軸ひずみ 2 % で連続性が一時的に高くなる原因は、せん断初期で体積変化が小さい場合、せん断によって土粒子構造が変化する際に間隙水が平衡状態を保てず、流動することによって近傍の間隙水が結合するためと推測する。

つぎに、Local tomography 全体およびせん断帯内外部における軸ひずみ 18 % までの間隙水のクラスター数をそれぞれ図-24、図-25 に示す。連続性に基づく考察から、解析領域における間隙水はメニスカス水として分布すると思われるため、間隙水のクラスター数はメニスカス水の数と同義といえる。図-24 より、せん断初期ではメニスカス水の数が比較的多く、軸ひずみが増加すると数が減少する傾向にある。これは、せん断により土粒子が再配列する際にメニスカス水から吸着水へと存在形態が変化する、あるいは近傍のメニスカス水同士がつながるためと推察する。図-25 より、軸ひずみ 18 % に至るまで、せん断帯内部はせん断帯外部に比べてメニスカス水の数が少ない状態であることがわかる。これは、せん断帯内部では密度低下に伴い、土粒子の接触点の数が減少傾向にあることが原因と考えられる。

図-24 Local tomography 全体の間隙水のクラスター数

図-25 せん断帯内外部における間隙水のクラスター数

図-26 せん断帯内外部における曲率-軸ひずみ関係

図-27 メニスカス水の数が剛性へ及ぼす効果の違い

 表-6 曲率の平均値、標準偏差および簡易式²⁾から求めたサクシヨン

	曲率の平均値 $\kappa_{ave} (\mu m^{-1})$	曲率の標準偏差 $\kappa_{\sigma} (\mu m^{-1})$	サクシヨンの平均値 $s_{ave} (kPa)$	サクシヨンの標準偏差 $s_{\sigma} (kPa)$
せん断帯内部	2.24×10^2	5.08×10^4	1.65	3.70×10^{-2}
せん断帯外部	2.02×10^2	3.02×10^4	1.50	2.23×10^{-2}

(4) せん断帯における間隙水の曲率

図-20 に示すせん断帯内外部の三値化画像を対象に、解析で得た曲率-軸ひずみ関係を図-26 に示す。また、各軸ひずみでの曲率の平均値と標準偏差を表-6 に示す。接触面を構成する三角形の面積は第4章(2)と同様、およそ $74 \mu m^2$ から $79 \mu m^2$ 程度とほぼ均一の大きさである。

図-26 より、せん断帯内外部それぞれの間隙水の曲率は、軸ひずみの増加とともに増減している。この増減の大きさについて、表-6 の曲率の平均値および標準偏差を用いて考察する。それぞれを比較すると、曲率の標準偏差(せん断帯内部: 5.08×10^4 、せん断帯外部: 3.02×10^4)は各軸ひずみの曲率の平均値(せん断帯内部: 2.24×10^2 、せん断帯外部: 2.02×10^2)に比べて2オーダー小さいことがわかる。これより、軸ひずみの増加に伴う間隙水の曲率の変化は、せん断帯内外部それぞれの曲率の平均値に対して十分に小さいといえる。したがって、せん断により密度・飽和度が変化しても、間隙水の曲率はほぼ一定値を維持するといえる。

参考として、曲率の平均値および標準偏差を基に、式(2)から推定したサクシヨンを表-6 に示す。なお、本研

究の三軸圧縮試験は排気-排水条件のため、巨視的なサクシヨンは均一と考えられるが、曲率から求めたサクシヨンはせん断帯内部の方がせん断帯外部に比べて大きくなっている。両者の差は平衡状態に至っていない場合に生じる可能性が考えられ、今後の課題である。

(5) 軸差応力に寄与する間隙水の微視的特性

本解析で得た主曲率と、式(3)の水の充填角度 θ との対応関係を調べ、サクシヨンに及ぼす r_2 の影響を検証する。表-6 より、せん断帯内外部の平均的な曲率 $2.24 \times 10^2 (\mu m^{-1})$ 、 $2.02 \times 10^2 (\mu m^{-1})$ を用いると、充填角度 θ はそれぞれ約33度、35度と求まる。これは式(3)より、 r_2 が r_1 に比べて大きい条件である。また、図-7 の破線で囲んだ部分が、それらの曲率に対応する範囲のサクシヨン-曲率半径の関係であり、 r_2 が r_1 よりも大きいことが明白である。したがって、第3章(3)で述べた通り、主曲率に基づいてサクシヨンの変化を議論する。

曲率解析により、せん断帯内外部それぞれの領域における間隙水の曲率 $1/r_1$ の変化は、せん断帯が発達する過程において十分に小さいことがわかった。つまり、不飽

和土の強度・剛性を高めるサクシジョンのレベルは、せん断帯の進展によらずほとんど変化しないと考えられる。

つぎに、Morphology 解析で明らかにしたメニスカス水の数の変化に着目する。図-24 より、せん断初期ではメニスカス水の数が比較的多いものの、軸ひずみ 6 %以降ではメニスカス水の数が徐々に減少する傾向にあることがわかった。特に、図-25 より、せん断帯内部のメニスカス水数はせん断帯外部に比べて少なく、かつ減少する傾向を示した。ここで、図-27 から明らかなように、同じ土骨格でメニスカス水の数異なり、各メニスカスに同等のサクシジョンが作用している状況を考えると、メニスカス水が多いほど土粒子間力をより強め、土骨格の強度・剛性へのサクシジョンの寄与が大きくなる。つまり、図-24 に見られるように、軸ひずみの増加につれてメニスカス水の数減少することは、サクシジョンの強度・剛性への寄与度が低下していることを意味し、図-16 に見られるひずみ軟化の一因となっていると考えられる。したがって、不飽和土の軸差応力はサクシジョンの大きさだけでなくメニスカス水の数にも依存していると考えられる。

以上のことから、不飽和砂のひずみ硬化は、メニスカス水が多く強度・剛性に対するサクシジョンの寄与が大きいことに起因していると考えられる。一方、ひずみ軟化は、正のダイレイタンスによる密度低下することに加え、メニスカス水の数減少し、強度・剛性に対するサクシジョンの寄与が消失していくことが一因になっているのである。特に、せん断帯内部ではメニスカス水の数より少なくなっていることが、ひずみ軟化の重要な要因の一つになっていると考えられる。

6. 結論

本研究では、不飽和砂の破壊メカニズムを微視的観点から解明することを目的とした。そこで、不飽和砂のせん断帯の発達過程における三相微視構造の変化を X 線 CT により可視化した。さらに、画像解析によって間隙水の微視的特性を明らかにし、軸差応力へ及ぼす影響を考察した。以下、本研究で得られた結論を挙げる。

- 1) 軸差応力-軸ひずみ関係は、ひずみ硬化してピーク応力を示した後、ひずみ軟化する挙動を示した。また、ピーク応力付近でひずみの局所化が生じ、せん断帯を伴う変形・破壊に発展した。
- 2) せん断帯部分を撮影した画像を三値化した結果、間隙比が大きく、飽和度が低くなることを明らかにした。特にせん断帯内部は、せん断帯外部に比べてこの傾向が顕著である。
- 3) Morphology 解析を行った結果、間隙水の連続性が

極めて低く、間隙空気の連続性がほぼ 100 %であることを明らかにし、解析データにおける間隙水がメニスカス水として分布すると推察した。また、メニスカス水数は、せん断に伴い徐々に減少する傾向にあり、特にせん断帯内部ではメニスカス水数が少ないことを明らかにした。

- 4) 曲率解析を実施した結果、せん断過程での間隙水の曲率の変化は十分に小さいことを明らかにした。これより、変形前後においてサクシジョンは変化せず、ほぼ一定の値を維持すると推察した。
- 5) ひずみ硬化は、メニスカス水の数が多い状態で発現している一方で、ひずみ軟化領域では、軸差応力の低下に伴ってメニスカス水の数減少しており、不飽和土の軸差応力はサクシジョンの大きさだけでなくメニスカス水の数にも依存していることを明らかにした。
- 6) 正のダイレイタンスによる密度低下に加えて、「サクシジョンの大きさが一定であってもメニスカス水の数減少する」という不飽和土に特有の間隙水の微視的特性が、不飽和土におけるひずみ軟化の重要な要因の一つになっている。

今後は、せん断に伴い水圧が変化する非排水条件下で実施した三軸試験データを対象に解析を実施する。その後、排水条件のデータと比較することで、不飽和砂の巨視的な力学挙動に寄与する微視構造変化の影響をより詳細に検討していく。

謝辞：本研究は、京都大学「知の越境」：融合チーム研究プログラム SPIRITS による経済的支援を受けた。また、京都大学工学研究科の木村亮教授、Université Grenoble Alpes の Simon Salager 氏、マックスネット(株)の石村貴暢氏から多くのご支援・ご指導を賜った。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 軽部大蔵, 苗村康造, 森田 登, 岩崎哲雄: 不飽和土の力学的性質に関する基礎的研究, 土木学会論文報告集, No. 269, pp. 105-119, 1978.
- 2) Alonso, E. E., Gens, A. and Josa, A.: A constitutive model for partially saturated soils, *Géotechnique*, Vol. 40, No. 3, pp. 405-430, 1990.
- 3) Kohgo, Y., Nakano, M. and Miyazaki, T.: Verification of the generalized elastoplastic model for unsaturated soils, *Soils and Foundations*, Vol. 33, No. 4, pp. 64-73, 1993.
- 4) Fredlund, D. G. and Rahardjo, H.: *Soil Mechanics for Unsaturated Soils*, John Wiley and Sons, New York, 1993.
- 5) Cunningham, M. R., Ridley, A. M., Dineen, K. and Burland, J. B.: The mechanical behaviour of a reconstituted unsaturated silty clay, *Géotechnique*, Vol. 53, No. 2, pp. 183-194, 2003.
- 6) Higo, Y., Oka, F., Kimoto, S., Sanagawa, T. and Matsu-

- shima, Y.: Study of strain localization and microstructural changes in partially saturated sand during triaxial tests using microfocus X-ray CT, *Soils and Foundations*, Vol. 51, No. 1, pp. 95-111, 2011.
- 7) Soulie, F., Cherblanc, F., El Yousoufi, M. S. and Saix, C.: Influence of liquid bridges on the mechanical behaviour of polydisperse granular materials, *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol. 30, No. 3, pp. 213-228, 2006.
- 8) 軽部大蔵, 加藤正司, 浜田耕一, 本田道識: 不飽和土の間隙水の状態と土塊の力学的挙動の関係について, 土木学会論文集, No. 535/III-34, pp. 83-92, 1996.
- 9) Cui, Y. J. and Delage, P.: Yielding and plastic behaviour of an unsaturated compacted silt, *Géotechnique*, Vol. 46, No. 2, pp. 291-311, 1996.
- 10) D'Onza, F., Gallipoli, D., Wheeler, S., Casini, F., Vaunat, J., Khalili, N., Laloui, L., Mancuso, C., Mašin, D., Nuth, M., Pereira, J. M. and Vassallo, R.: Benchmark of constitutive models for unsaturated soils, *Géotechnique*, Vol. 61, No. 4, pp. 283-302, 2011.
- 11) Desrues, J., Chambon, R., Mokni, M. and Mazerolle, F.: Void ratio evolution inside shear bands in triaxial sand specimens studied by computed tomography, *Géotechnique*, Vol. 46, No. 3, pp. 539-546, 1996.
- 12) Oda, M., Takemura, T. and Takahashi, M.: Microstructure in shear band observed by microfocus X-ray computed tomography, *Géotechnique*, Vol. 54, No. 8, pp. 539-542, 2004.
- 13) Andò, E., Hall, S. A., Viggiani, G., Desrues, J. and Bésuelle, P.: Grain-scale experimental investigation of localised deformation in sand: a discrete particle tracking approach, *Acta Geotechnica*, Vol. 7, No. 1, pp. 1-13, 2012.
- 14) Hall, S. A., Bornert, M., Desrues, J., Pannier, Y., Lenoir, N., Viggiani, G. and Bésuelle, P.: Discrete and continuum analysis of localised deformation in sand using X-ray μ CT and volumetric digital image correlation, *Géotechnique*, Vol. 60, No. 5, pp. 315-322, 2010.
- 15) Takano, D., Lenoir, N., Otani, J. and Hall, S. A.: Localised deformation in a wide-grained sand under triaxial compression revealed by X-ray tomography and digital image correlation, *Soils and Foundations*, Vol. 55, No. 4, pp. 906-915, 2015.
- 16) 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.
- 17) Kido, R. and Higo, Y.: Evaluation of distribution of void ratio and degree of saturation in partially saturated triaxial sand specimen using micro x-ray tomography, *International Mini Symposium Chubu, JGS Special Publication*, Vol. 5, No. 2, pp. 22-27, 2017.
- 18) Vanapalli, S. K., Nicotera, M. V. and Sharma, R. S.: Axis Translation and Negative Water Column Techniques for Suction Control, *Geotechnical and Geological Engineering*, Vol. 26, pp. 645-660, 2008.
- 19) Higo, Y., Oka, F., Morishita, R., Matsushima, Y. and Yoshida, T.: Trinarization of μ X-ray images of partially saturated sand at different water-retention states using a region growing method, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B : Beam Interactions with Materials and Atoms*, Vol. 324, pp. 63-69, 2014.
- 20) Hashemi, M. A., Khaddour, G., François, B., Massart, T. J. and Salager, S.: A tomographic imagery segmentation methodology for three phase geomaterials based on simultaneous region growing, *Acta Geotechnica*, Vol. 9, No. 5, pp. 831-846, 2014.
- 21) 高木幹雄, 下田陽久: 新編 画像解析ハンドブック, pp. 866-871, 東京大学出版会, 2004.
- 22) Lu, N. and Likos, W. J.: *Unsaturated Soil Mechanics*, John Wiley Sons, Hoboken, NJ, 2004.
- 23) Dallavalle, J. M.: *Micrometrics*, Pitman, London, 1943.
- 24) Higo, Y., Morishita, R., Kido, R., Khaddour, G. and Salager, S.: Local water-retention behavior of sand during drying and wetting process observed by micro x-ray tomography with trinarisation, *The 15th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, JGS Special Publication*, Vol. 2, No. 16, pp. 635-638, 2015.
- 25) 肥後陽介, 岡二三生, 木元小百合, 松島祥樹, 吉田竜也, Hall, S., Viggiani, G.: 三軸圧縮過程における不飽和砂の三相割合変化の μ X 線 CT による定量的評価, 第 46 回地盤工学研究発表会, No. 6, pp. 15-16, 2011.
- 26) Higo, Y., Oka, F., Morishita, R. and Matsushima, Y.: Quantitative observation of strain localisation in a partially saturated triaxial specimen using microfocus X-ray CT with image analysis, *Proceedings of the 10th International Workshop on Bifurcation and Degradation in Geomaterials*, pp. 325-330, 2015.

(2016.11.11 受付)

MICROSCOPIC CHARACTERISTICS OF PORE WATER DURING PROGRESSIVE DEVELOPMENT OF SHEAR BANDS OF PARTIALLY SATURATED SAND UNDER TRIAXIAL COMPRESSION

Ryunosuke KIDO, Yosuke HIGO and Fukushi TAKAMURA

It is well known that partially saturated soils show higher strength and stiffness due to suction which works at meniscus water, however, they also exhibit more brittle failure with relatively large strain softening as well as clear shear bands than fully saturated soils and dry soils. It is important to understand the mechanism of brittle failure of partially saturated soils by investigating relation between macroscopic mechanical behavior and three-phase microstructural change such as progressive changes in suction and distribution of meniscus water with development of shear bands. In the present study, shear bands region generated in triaxial compression test of partially saturated sand specimen was observed by x-ray computed tomography. Image analysis provided the curvature, retention states and the number of pore water in order to evaluate the contributions of suction and meniscus water to the deviator stress. It was found that variation in suction due to the development of shear bands is very small. It was also found that relatively large number of meniscus water exists during strain hardening, while the decrease in the number of meniscus water seems to be one of the reason to cause strain softening. It seemed that lower number of meniscus water exists inside shear band so that the contribution to deviator stress is smaller than outside shear bands.