

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

1. はじめに

土の巨視的応答は、一般に連続体として表現されているが、微視的観点からは土粒子の挙動によって支配されている。この土の微視的挙動の解釈として、土を粒状体として扱いその構造を定量的に表すファブリックテンソルがある。しかし、ファブリックテンソルに必要な三次元的な土粒子構造は、実験による取得が簡単でなく、ファブリックテンソルの土の挙動のモデル化への適用はそれ程多く見られない。本研究では、X線マイクロCTを用いて、三次元条件下での土粒子構造データの取得を実現し、これを用いて三軸圧縮試験中のファブリックテンソルの変化を定量化することを試みた。

2. 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、水中落下法により飽和砂供試体を作製した。ひずみ速度 $0.1\%/\text{min}$ 、側圧 50 kPa で、排水三軸圧縮試験を行った。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 μ hdk)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 $12.2\times 12.2\times 14.0\mu\text{m}^3$ である。

表1 試験条件および供試体諸量

直径 ϕ [mm]	35.00
高さ h [mm]	71.48
間隙比 e	0.76
相対密度 D_r [%]	79.03
初期飽和度 S_r [%]	100.00

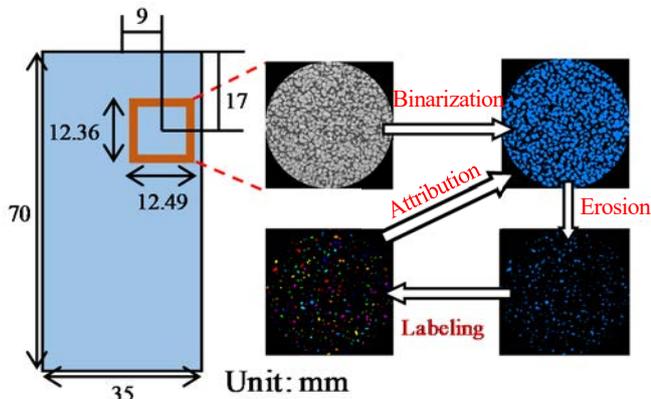


図1 X線撮影位置と画像解析アルゴリズム

3. 画像解析アルゴリズム

取得したCT画像を土粒子・水に二値化し、各粒子のクラスターラベリングを行う。具体的には、図1のように、Erosion処理及び復元処理を複数回行うことにより、各土粒子に分割されたラベル画像が得られる。得られたラベル画像から、粒子同士の接触点を特定する。なお画像処理にはAvizo9.4.0 (FEI社製)を用いた。

4. ファブリックテンソル

構造異方性を評価する方法として、(1)式に示すようなファブリックテンソルが知られている。

$$\mathbf{A} = \frac{1}{N} \sum_c \mathbf{l}^c \otimes \mathbf{l}^c \quad (1)$$

ここで、 \mathbf{l} は枝ベクトルと呼ばれる、接触する粒子同士の質量中心を結んだベクトル、 N は接触点総数、 c は N のうちの各接触点を意味するインデックスである。完全な等方状態であれば、ファブリックテンソルは単位行列となる。したがって、異方状態であれば、単位行列からのずれによってそれが評価されるということになる。

Chang et al. (2003)¹⁾ は、2次元のファブリックテンソルをフーリエ級数と対応させることにより、構造異方性の可視化を行った。まず、以下のようなフーリエ級数の2次の項による極座標の確率密度関数を考える。

$$\bar{E}(\theta) = \frac{1}{2\pi} (1 + a_2 \cos 2\theta + b_2 \sin 2\theta) \quad (2)$$

これをファブリックテンソルの形式に直す、すなわち確率密度関数を θ の関数として積分することでファブリックテンソルの解析解を得ると、(2)式の係数を用いて以下のように表せる。

$$[A_{ij}] = \begin{bmatrix} 1 + a_2 & b_2 \\ b_2 & 1 - a_2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

逆に、(1)式で算出したファブリックテンソルを $2/\text{tr}(\mathbf{A})$ 倍することで正規化し、(3)式の形式に直すことで、(2)式の係数に当たる a_2 、 b_2 を算出することができ、確率密度関数による可視化が可能となる。

また、枝ベクトル \mathbf{l} を用いたファブリックテンソル(以下 \mathbf{A} とする)に加えて、(4)式に示すような、枝ベクトル \mathbf{l} を長さ絶対値で割った方向を表す単位ベクトル \mathbf{n} を用いたファブリックテンソル(以下 \mathbf{F} とする)による解析も行い、グラフの可視化を行う。

$$\mathbf{F} = \frac{1}{N} \sum_c \mathbf{n}^c \otimes \mathbf{n}^c \quad (4)$$

5. 実験結果および解析結果

三軸圧縮試験により得られた応力-軸ひずみ関係、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。軸ひずみ約6.5%において最大主応力約240 kPaとなり、その後はひずみ軟化していることがわかる。体積ひずみは、密詰めによる正のダイレイタンスーにより膨張していることがわかる。

図3, 4に, A, F によって表されるX線と平行な平面における極座標のグラフを示す。まず, 両ケースに共通した挙動について, 評価と考察を行う。軸ひずみ0%においては, 横に伸びる楕円形で表されることから, 水平方向に接触が卓越することがわかる。これは, 水中落下法による密詰め供試体作製は, 水平方向の接触が卓越するというを意味している。軸ひずみ8%においては, ほぼ円形で表されている。これは, 密詰めで作製された供試体が正のダイレイタンスーによって, 水平方向に接触が卓越していた状態から, 土粒子が土粒子の上に乗るような挙動が生じていると推測され, それにより水平方向の接触点が増加したため, 等方状態に近づいたと推測される。さらにせん断が進むと, 軸ひずみ20%においては, 左斜め上方向に接触が卓越していることが分かる。Kido (2019)²⁾は本研究と同じ試料を用いて不飽和, 飽和三軸圧縮試験を行いせん断帯の角度が約60°であるとしており図3, 4における60°付近と対応する。したがって, このせん断過程が進むにつれて, せん断方向と横断する方向に接触が卓越するといえる。Oda et al. (1998)³⁾は, せん断帯内部においてせん断帯と横断する方向に粒子が連なる構造 (Columnar structure) を発見しており, 本研究の結果はこれと同様の現象を示唆する結果といえる。

続いて両ケースの差異について, 評価と考察を行う。まず初期状態においては, 図4の方がやや円形に近いグラフとなった。つまり, 長さの影響を排除することにより, 水平方向に接触している度合いが弱まったことから, 粒子が長径方向と水平に配列し接触している割合が多いと考えられる。軸ひずみ20%においては, テンソルFによって表すと, 最も接触が卓越している方向は鉛直方向に寄っていることがわかる。既往の研究²⁾では, DICを用いた変位場の解析を行い, 初期から軸ひずみ20%以降に至るまでせん断帯外部の変位はほぼ見られないという結果を得ている。これを踏まえると, 鉛直方向に接触が卓越する原因は, 初期状態から粒子構造がほぼ変化していないと考えられるせん断帯外部において, 水平方向に接触している枝ベクトルの長さの影響が弱まったためと考えられる。

6. 結論

飽和砂排水三軸圧縮試験を実施し, せん断帯を含む領域の土粒子構造を微視的に可視化した。このデータを用いて, 枝ベクトルおよび単位ベクトルによるファブリックテンソルを定量化し, その変化について議論した。その結果, Oda らによって明らかにされていた, せん断帯

内部の columnar structure と等価な土粒子構造の発達を確認した。さらに, 2種類のファブリックテンソルを用いて比較することで, 初期状態においては, 粒子は長径方向と水平に配列し, 接触している割合が多いことが推測された。このように本研究では, X線マイクロCTが与えるデータはファブリックテンソルの定量化を可能とすることを示した。今後は, 供試体作製法が土粒子構造に与える影響などをファブリックテンソルにより検討していく。

参考文献

- 1) Chang C. S., Matsushima T. and Lee X.: Heterogeneous strain and bonded granular structure change in triaxial specimen studied by computer tomography, *Journal of engineering mechanics*, **129** (11), pp.1295-1307, 2003
- 2) Kido, R.: Microscopic Characteristics of Partially Saturated Soil and their Link to Macroscopic Responses, Kyoto University Doctor thesis, pp.73-121, 2019
- 3) Oda, M. and Kazama, H.: Microstructure of shear bands and its relation to the mechanisms of dilatancy and failure of dense granular soils, *Géotechnique*, **48** (4), pp.465-481, 1998.

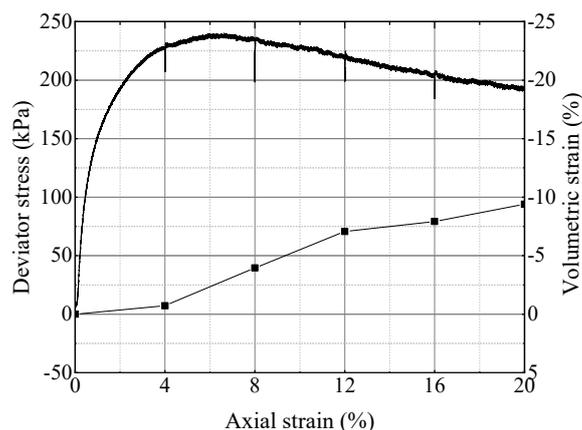


図2 応力-軸ひずみ, 体積ひずみ-軸ひずみ関係

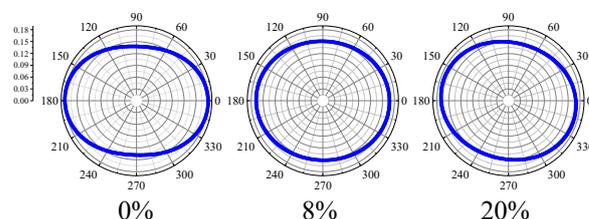


図3 接触点の方向異方性の可視化(テンソル A)

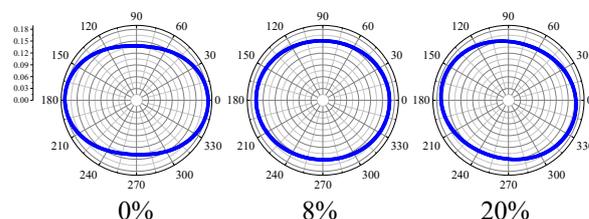


図4 接触点の方向異方性の可視化(テンソル F)