

第Ⅲ部

マイクロフォーカス X 線 CT による土材料内部の可視化

京都大学大学院 学生会員 ○佐藤朋弥、澤田茉伊、佐名川太亮
 京都大学大学院 正会員 肥後陽介、木元小百合
 京都大学大学院 フェロー会員 岡二三生

1. はじめに

近年、X 線 CT は非破壊で地盤材料内部の様子を観察し、密度や体積などを定量的に評価できる検査手法として注目されており、せん断帯における間隙比の変化の観察¹⁾、地盤材料破壊時の特性の評価²⁾、せん断帯の微視構造の可視化³⁾など様々な研究がなされてきた。本研究では空間分解能の高いマイクロフォーカス X 線 CT スキャナ装置を用いて砂および粘土の圧縮試験中に撮影を行い、その変形過程における供試体内部の微視構造の可視化および画像処理ソフトを用いた体積変化の定量的評価を試みた。

2. 装置の概要

本研究で使用したマイクロフォーカス X 線 CT スキャナ装置 (TOSCANER-32250μhdk 東芝 IT コントロールシステム(株製)) の性能を表 1 に示す。本装置は三軸試験用セルを試料テーブルに載せて、実験中の土試料を撮影することが可能である。

表 1 装置の性能

最大管電圧	225kV
最大管電流	0.888mA
最大出力	200W
最小焦点寸法	4μm
検出器視野	9/6/4.5 inches
マトリクスサイズ	2048 ² , 1024 ² , 512 ²
分解能	5μm

表 2 供試体の諸量

供試体形状	円柱
高さ (mm)	73.68
直径 (mm)	35.00
面積 (cm ²)	9.62
体積 (cm ³)	70.89
初期間隙比 e	0.66
初期含水比 w (%)	8.14
相対密度 D_r (%)	87.26

表 3 撮影条件 (圧縮試験)

管電圧	150kV
管電流	200μA
検出器視野	6inch
マトリクスサイズ	1024 ²
ビュー数	1200
積算枚数	10
スライス厚	0.300mm
スライスピッチ	0.100mm
解像度	41μm

3. 豊浦砂の圧縮試験中の試料内部の可視化

(1) 試験条件

試料には豊浦砂 ($D_{50}=0.185\text{mm}$) を用い、水を含ませた試料を数回に分けて締固めながら直径 35mm のモールドに詰めて供試体を作製した。供試体の諸量を表 2 に示す。この供試体に 20kPa の負圧をかけて拘束圧としセルは空気で満たされた状態にして、軸ひずみ速度 0.5%/min で単調載荷して圧縮試験を行い、軸ひずみが 19%に達した時点で試験を終了した。撮影は試験前、軸ひずみ約 5%、8%、15% の時点で行った。撮影条件を表 3 に示す。

表 4 撮影条件 (拡大撮影)

管電圧	150kV
管電流	200μA
検出器視野	4.5inch
マトリクスサイズ	2048 ²
ビュー数	2400
積算枚数	20
スライス厚	0.051mm
解像度	1.7μm

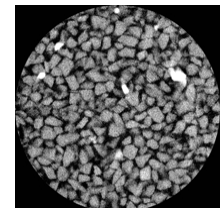


図 1 豊浦砂断面像

(2) 試験および可視化の結果

図 1 は供試体を使用した豊浦砂を乾燥状態で直径 32mm のガラス瓶に締固めずに入れ、間隙比が 0.853 の状態で撮影して得られた断面像である。この時の撮影条件を表 4 に示す。断面像から土粒子を明確に認識することができた。

表 2 に示す密な供試体の圧縮試験により得られた軸差応力～軸ひずみ関係を図 2 に示す。撮影中は載荷を中断したので、その間に発生した応力緩和が見られる。

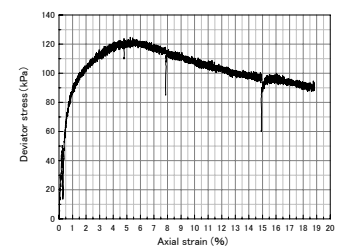


図 2 軸差応力～軸ひずみ関係

図 3 および図 4 はそれぞれ供試体中央および供試体中央より左 20mm の縦方向断面を並べたもので、左から初期状態、軸ひずみ 5%、8%、15% の時点で撮影した

断面像である。初期状態の断面を見ると、締固めた面の真上でやや灰色になっていることから締固めた面の境界で密度差が生じていることが分かる。軸ひずみ 5%における断面では供試体中央で色がやや暗くなっていることが分かるが、これは圧縮により正のダイレイタンスが発生し、密度が低下したとことによるものと考えられる。また、供試体形状が樽型になっている様子も見て取れる。軸ひずみ 8%における断面では供試体中央の密度が低下している領域の端に、さらに色が暗くなっている帯状の領域がある。これはせん断帯と考えられ、その密度はさらに低下していることが分かる。軸ひずみ 15%における断面ではせん断帯が発達し、より複雑になっていることが分かる。供試体中央の水平方向の断面からは放射状にせん断帯が発達している様子が見て取れる (図 5)。

また、各断面の供試体部分とその外部を CT 値を用いて区別し、供試体部分のボクセル数を集計し体積を求めた。各圧縮段階における供試体体積および体積と乾燥重量から求めた供試体全体の間隙比を表 5 に示す。なお、 $\rho_s=2.65\text{ (g/cm}^3\text{)}$

Tomohiro Sato, Mai Sawada, Yosuke Higo, Taisuke Sanagawa, Sayuri Kimoto, Fusao Oka (Kyoto University)

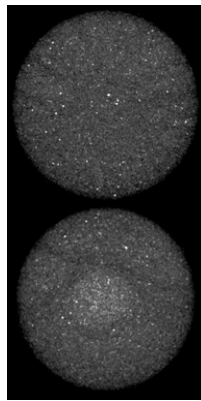


図5 水平断面

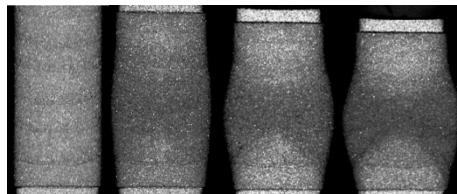


図3 供試体中央 (豊浦砂)

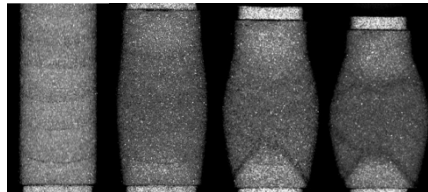


図4 供試体中央より左 20mm (豊浦砂)

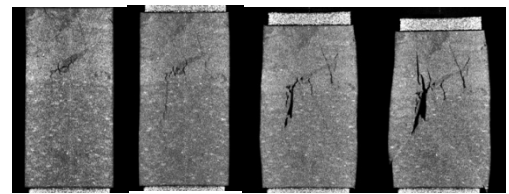


図7 供試体中央 (円山川粘土)

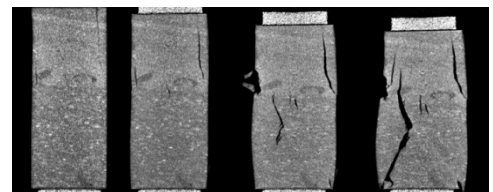


図8 供試体中央より左 20mm (円山川粘土)

とした。供試体作成時に測定した体積と比べると、軸ひずみが増加するにつれて体積も増加していることが分かった。これは正のダイレイタンスによる影響と考えられる。

4. 円山川粘土の一軸圧縮試験中の試料内部の可視化

(1) 試験条件

試料には兵庫県豊岡市を流れる円山川の立野地先、深さ 22.00m~22.85m から採取された粘土を用いて、直径 35mm、高さ 70mm に成形し、供試体とした。供試体の諸量を表 6 に示す。この供試体に拘束圧をかけずにセルは空気を満たされた状態にして、軸ひずみ速度 0.5%/min で単調載荷して圧縮試験を行い、軸ひずみが 16%に達した時点で試験を終了した。撮影は試験前、軸ひずみ約 4%、10%、13%の時点で行った。撮影条件を表 7 に示す。

(2) 試験および可視化の結果

圧縮試験により得られた軸差応力~軸ひずみ関係を図 6 に示す。図 7 および図 8 はそれぞれ供試体中央および供試体中央より左 20mm の縦方向断面を並べたもので、左から初期状態、軸ひずみ 4%、10%、13%の時点で撮影した断面像である。初期状態の断面像から、供試体上部は密度が高いが貝殻や小さな亀裂が存在しており、供試体下部は密度が小さいことが分かる。試験中、上部の初期クラックを起因としたひずみの局所化が見られたが、最終的には下部の低密度領域で発達した。

5. 結論と今後の課題

豊浦砂の圧縮中の供試体内部の様子をマイクロフォーカス X 線 CT スキャナ装置により可視化した。その結果、供試体を締め固めた面や、せん断帯など密度差の大きい部分は断面像に鮮明に映し出された。さらに、各段階で得られた断面像を見比べることによりせん断帯の発達の様子を観察することができた。断面像を用いて供試体体積を求めた結果、体積は軸ひずみの進展とともに正のダイレイタンスに起因して大きくなっていった。粘土の圧縮試験では内部の密度差や微小な構造および破壊の発達の様子が観察できた。

今後、豊浦砂の三軸圧縮試験中の内部微視構造変化の可視化、密度絶対値の定量化、画像処理ソフトを用いて断面像から体積を求める方法についてさらに検討をする予定である。

参考文献

- (1)Desrues, J., Chambon, R., Mokni, M. and Mazerolle, F. : *Geotechnique*, 46, No.3, pp.529-546, 1996.(2)Otani, J., Mukunoki, T. and Obara, Y. : *Soils and Foundations*, Vol.48, No.2, pp.17-20, 2000.(3)Oda, M., Takemura, T. and Takahashi, M. : *Geotechnique*, 54, No .8, pp.539-542, 200

表 5 体積および間隙比

	軸ひずみ5%	軸ひずみ8%	軸ひずみ15%
体積 (cm ³)	71.02	72.43	72.60
間隙比 e	0.66	0.69	0.70

表 6 供試体の諸量

供試体形状	円柱
高さ (mm)	70.22
直径 (mm)	35.00
面積 (cm ²)	9.77
体積 (cm ³)	68.59
初期間隙比 e	1.68
初期含水比 w (%)	64.99

表 7 撮影条件

管電圧	130kV
管電流	200μA
検出器視野	6inch
マトリクスサイズ	1024 ²
ビュー数	1200
積算枚数	10
スライス厚	0.200mm
スライスピッチ	0.100mm
解像度	51μm

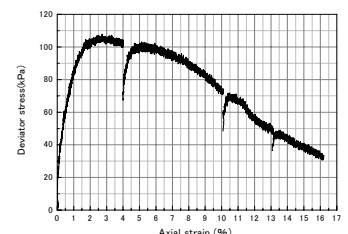


図6 軸差応力~軸ひずみ関係