自然粘土の一軸圧縮試験中のμフォーカスX線CTによる供試体内部の可視化

大成建設 技術センター(元京大院) 正会員 ○澤田茉伊
京都大学大学院 正会員 肥後陽介
京都大学大学院 学生会員 佐藤朋弥
京都大学大学院 正会員 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

土の破壊特性を理解するためには，変形過程における供試体の内部構造の変化を観察することが必要である。X線CTは，非破壊で供試体内部のせん断帯の三次元的な幾何学的構造を正確に把握できるだけでなく，CT値が密度と比例関係にあることを利用することにより，変形過程における局所的な密度や間隙比の変化を求めることが可能である。既往の研究として，Derues et al.(1996)[1]やOtani et al.(2000)[2]によるX線CTを用いて三軸試験中の供試体内部の可視化を行ったものが挙げられる。これらの研究では，ひずみの局所化の起点と発達を定性的，定量的に評価している。

本研究では，自然粘土を用いた一軸圧縮試験を行い，μフォーカスX線CT装置により変形過程における供試体内部の微視構造変化の観察を行った。

2 装置の概要

μフォーカスX線CT装置は，微小焦点を持つμフォーカスX線装置とX線I.I.(Image Intensifier)を組み合わせ，供試体を拡大撮影することにより，微小構造部の断面画像を再構成するCTである。図1に本研究で用いたμフォーカスX線CT装置(TOSCANER-32251μhdk, 東芝ITコントロールシステム製)の概略図を示す。X線管と供試体の距離(FCD)およびX線管焦点とX線I.I.の距離(FID)を変化させることにより，供試体の大きさや目的に適した再構成エリアと分解能を設定することが可能である。テーブルは回転・昇降を備えており，三軸試験装置を搭載し，変形過程における供試体内部の微視構造変化を観察することができる。最大電圧，最大電流はそれぞれ225kV, 0.888mAで最小焦点寸法は4μmと非常に小さい。そのため幾何学的不鮮鋭が少なく，図2に示すように従来のX線CTより高い分解能を得ることができ，豊浦砂(D_{50}=0.16mm)の粒子レベルの微視構造の観察も可能である。

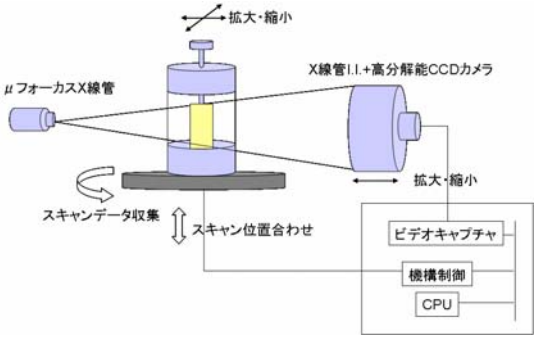


図1 μフォーカスX線CT装置の概略図

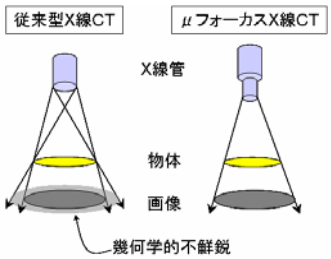


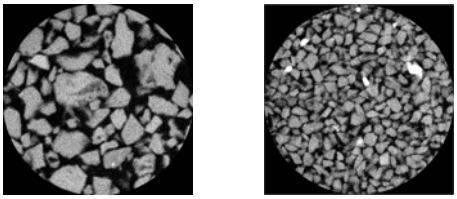
図2 μフォーカスX線CTと従来型X線CTの比較

3 撮影条件の特定

X線CTの撮影を行う際には，管電圧，管電流，断面像の厚さ(スライス厚)といった多くのパラメータを設定する必要があり，鮮明なX線CT画像を得るためには，これらのパラメータを各供試体に適した値に設定しなくてはならない。地盤材料の場合その化学的性質によって電子密度が異なり，X線吸収率が異なるため，本研究では変形過程における供試体内部の撮影を行うにあたり，あらかじめある程度各地盤材料に適した撮影条件の特定を行った。実際に乾燥状態の珪砂5号(D_{50}=0.372mm)および豊浦砂の供試体の断面像の撮影を行い，各パラメータを適切な値に設定することによって図2に示すような粒子レベルでの観察を行うことができた。表1はその時の撮影条件を示したものである。

表1 撮影条件(珪砂5号，豊浦砂)

管電圧(kV)	150	管電流(μA)	200
FID(mm)	1050.0	FCD(mm)	37.5
I.I 視野 (inches)	4.5	スライス厚 (mm)	0.051 (10 画素)
マトリクス サイズ	2048^2	1 画素サイズ (μm)	1.6 (珪砂 5 号), 1.7 (豊浦砂)
ビュー数	2400	積算枚数	20



珪砂5号　豊浦砂

図2 珪砂5号および豊浦砂の供試体の断面像

4 試料

本研究で用いた円山川粘土は，兵庫県豊岡市立野町で採取された自然堆積粘土である。試料が位置する付近の深度(22.00～22.85m)では，ボーリング時の調査結

キーワード μフォーカスX線CT, 自然粘土, ひずみの局所化
連絡先 〒615-8540 京都市西京区京都大学桂 C クラスターC1 棟 京都大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻地盤力学研究室 075-383-3193

果からシルト質粘土の非常に軟らかい粘土であり，深度 20m 付近で貝殻片が少量混入しており，また 24m 付近で火山灰が挟まれていることがわかっている。本研究で用いた試料は上部に貝殻片が目立ち，下部はやや色が黒い特徴が見られた。なお初期間隙比は 1.68，初期含水比は 64.99%であった。

5 実験方法

まず直径35mm，高さ70mmに成型した供試体を三軸室に設置し，初期状態のX線CT撮影を行った後，せん断(軸ひずみ制御0.5%/min)を行い，供試体の変形に変化が現れたところでせん断を停止し，撮影を行った。この手順を軸ひずみ16%に達するまで繰返し行い，初期状態に加え，軸ひずみ4%, 10%および13%の時点の計4回のX線CT画像を得た。撮影は表2に示す条件で円錐状のX線ビームを照射し，断面像を再構成することによって，立体像を得る方法(コーンビームスキャン撮影)で行った。なおX線CT画像の断面図の位置は座標を供試体の高さ方向にZ軸をとるものとして表す。

表 2 円山川粘土撮影条件

管電圧(kV)	130	管電流(μA)	200
FID(mm)	900	FCD(mm)	380
I.I 視野 (inches)	6	スライス厚 (mm)	0.20
スライスピッチ(mm)	0.10	スライス枚数	240
スライス数	3	マトリクスサイズ	1024×1024
1 画素サイズ (μm)	50.6	ビュー数	1200
積算枚数	10		

6 結果および考察

図 3 に応力～ひずみ関係を示す。撮影中は載荷および計測を中断していたため，図中に見られる応力の低下は応力緩和によるものと考えられる。

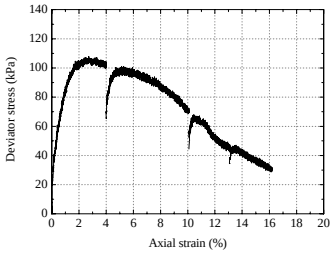
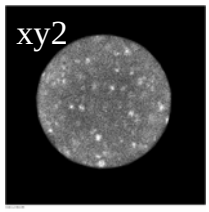
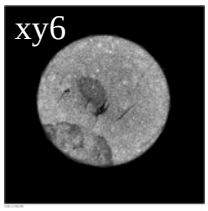


図 3 応力～ひずみ関係（円山川粘土一軸圧縮試験）

図 4 は初期状態における画像の下から 20mm の位置および 50mm の位置の X-Y 平面の断面図を示したものであるが，初期状態の X 線 CT 画像より，供試体の下端から 40mm までの領域とそれより上部の領域では X 線 CT 画像に明確な差が現れており，異なる土性であると考えられる。下部は比較的均質で，上部に比べて密度がやや小さく，直径 1mm 前後の白い斑点(密度が高い)が多く見られる。一方，上部は間隙や亀裂が多く，黒い帯状のむら(密度が低い)がところどころに見られる。

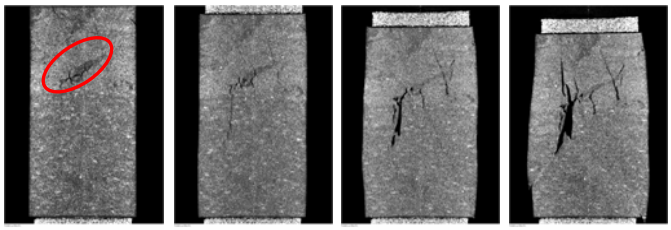
図 5 は各時点での供試体中心を通る X-Z 平面の X 線 CT 画像である。ピーク強度を越えた直後に相当する軸ひずみ 4%の時点では，初期状態で確認された供試体上部の比較的大きな間隙や亀裂を起点として，発達していると考えられる亀裂がいくつか見られる。これらの亀裂は下部の低密度部の方向に発達している傾向が見られ，軸ひずみが 10%に達すると目立ったせん断帯が現れはじめ，その後軸ひずみが 13%に達するとこれらのせん断帯はさらに発達している。特に図中に円で囲んで示した亀裂(初期状態で約 6.7mm)ではその傾向が顕著に現れている。また今回μフォーカス X 線 CT 装置を用いて供試体内部の観察が可能になったことにより，供試体内部の上部に軸ひずみ 13%の時点で 0.3～0.7mm の微小な亀裂が多数発生していることが確認できた。今後これらの亀裂が力学挙動に与える影響を評価していく必要がある。





画像の下から 20mm の位置　　画像の下から 50mm の位置

図 4 円山川粘土の一軸圧縮試験(初期状態，X-Y 平面の断面図)



初期状態　　軸ひずみ 4%　軸ひずみ 10%　軸ひずみ 13%

図 5 円山川粘土の一軸圧縮試験(X-Z 平面の断面図)

7 結論

円山川粘土の一軸圧縮試験を行い，その変形過程における X 線 CT 画像より供試体内部を可視化した。粘土の場合，粒子レベルの微視構造を見ることは難しいが，密度の違いや微視クラックの可視化が可能であり，それらに起因するひずみの局所化挙動を詳細に観察することができた。

今後の課題として，CT 値による密度の定量的評価が挙げられる。密度と CT 値の関係より，変形過程における供試体の局所的な密度および間隙比を求め，定量的にひずみの局所化の評価をすることができる。また，実験結果を内部構造のパラメータの設定等に生かし，内部構造の変化を構成式に適切に導入するための検討を行っていくことが必要である。

参考文献

1) Desrues, J., Chambon, R., Mokni, M. and Mazerolle, F.：Void ratio evolution inside shear bands in triaxial sand specimens studied by tomography, Geotechnique, 46, No.3, pp.529-546, 1996. 2) Otani, J., Mukunoki, T. and Obara, Y.：Application of X-ray CT method for characterization of failure in soils, Soils and Foundations Vol.40, No.2, pp.111-118, Apr. 2000.