

Partial CT scan による三軸圧縮試験における不飽和砂のせん断帯内部構造に関する研究

(財)鉄道総合技術研究所(元京都大学大学院) 正会員 ○佐名川 太亮
 京都大学大学院 学生会員 松島 祥樹
 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

地盤材料のひずみの局所化の研究において、内部構造の変化は重要な研究課題である。X 線 CT 撮影を行うことにより被検体の内部構造を非破壊観察することができるが、特に、被検体の関心のある部位について拡大スキャンする事を Partial CT scan と呼ぶ。本研究では Partial CT scan により三軸圧縮試験における不飽和砂供試体のせん断帯砂内部の微視構造の可視化を試みた。不飽和土内部の土粒子、メニスカス水、間隙空気を可視化すると共に、せん断帯内部と外部の内部構造を詳細に比較した。

2. μ フォーカス X 線 CT 装置と実験条件

本研究では KYOTO-GEO μ XCT(TOSCANER-32250phdk, 東芝 IT コントロールシステム(株)製)を用いた¹⁾。本装置は X 線の焦点寸法が微小であり(最小 4 μ m)、ミクロンレベルの高分解能で CT 画像を得ることが出来る。またワークテーブルに三軸試験機を搭載することができ、拘束圧下で供試体をスキャンすることが可能である。

この μ フォーカス X 線 CT 装置上で不飽和豊浦砂($D_{50}=0.185$ mm)の排気・排水三軸圧縮試験を行った。供試体は直径 35mm, 高さ 70mm のモールドを用いて Moist-tamping 法で作成し、初期間隙比 0.673, 含水比 15%, 飽和度 58.6%, 有効拘束圧 50kPa とした。軸ひずみ速度は 0.5%/min とし、軸ひずみ 20%まで三軸圧縮した。

3. Partial CT scan

被検体のある部位だけをスキャンする事を Partial CT scan と呼び、非破壊のまま関心のある領域の CT 画像を拡大して得る事ができる(図 1)。本研究の μ フォーカス X 線 CT 装置はワークテーブルと I.I.(受像機)の位置及び I.I.のサイズを任意に変えられるため、あらゆる拡大率を自由に設定することができる。

まず、通常の CT スキャンにより軸ひずみ 20%まで三軸圧縮した供試体の全体を拘束圧下で撮影した後、せん断帯が明確に発生した部分において十分な拡大率の CT 画像を得るため、セルを外した状態で供試体をできる限り X 線源に近づけて Partial CT scan を行った(写真 1)。ここで、拘束圧は-20kPa の負圧に置き換えており、軸圧は除荷している。Partial CT scan の撮影条件を表 1 に示す。マルチコーンビーム法を用いて撮影し、直径 7mm, 高さ 4.4mm の範囲について 3 次元画像の再構成を行った。

4. Partial CT scan による不飽和砂のせん断帯内部構造の可視化

通常の CT スキャン画像における Partial CT scan の撮影位置及び撮影範囲を図 2 に、Partial CT 画像を図 3, 4 に示す。図 3, 4 を見ると、高密度を表す白で表示されている箇所が土粒子であり、間隙部分には黒で表示されている空隙と、土粒子が近接している箇所に灰色で表示されているメニスカス水として存在する間隙水が可視化されてい

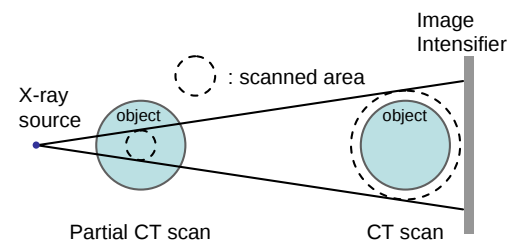


図 1. Partial CT scan の模式図

表 1. Partial CT scan 条件

Voltage (kV)	120
Current (μ A)	150
I.I. size (inch)	6.0
Matrix size	1024 ²
Shooting views	1800
Accumulation	30
Voxel size (μ m)	6.9 ² ×11.0



写真 1. Partial CT scan の様子

キーワード Partial CT scan, 不飽和砂, せん断帯, 内部構造

連絡先 〒615-8540 京都市西京区京都大学桂 4 C クラスター C1 棟 Tel: 075-383-3193

る事がわかる．それぞれは当該箇所の CT 値と密度の関係から特定する事ができる²⁾．図 2 の全体画像においては，せん断帯はダイレイタンスにより低密度領域として黒く表されているが，分解能の高い図 3 および図 4 ではせん断帯内部において土粒子間の空隙が広がっていることがわかる．また，三次元的に見て，せん断帯内部では土粒子が相互に接触している割合がせん断帯外部よりも少ない．図 5 は図 4 の内部を奥行き方向 0.1mm (土粒子半個～1 個分) の厚さで抜き出し，土粒子がせん断帯を横切るように少ない接触面積で相互に繋がっているチェーンのような構造をした部分のうち特に分かりやすいものを色づけしたものであるが，Oda et al. (2004)²⁾ が乾燥砂のせん断帯で観察した Columnar structure と同様の構造が不飽和砂においても見られた．すなわち，Columnar structure が形成されることで土粒子が骨格を持ち大きな間隙を形成すると共に，相互に繋がることで強度が増加し構造を保つ事ができていると考えられる．

図 6 は図 3 の Partial CT 画像の土粒子，水，空隙をスケッチしたものである．その結果，せん断帯外部にはメニスカス水の存在が確認できるのに対し，せん断帯内部の大きな間隙部にはあまり存在していない．この理由として，密詰めである初期状態においては，土粒子間は広い面積で接触しているが，せん断に伴い，せん断帯発生箇所においてダイレイタンスにより土粒子が回転し，その際にメニスカスが切れてしまうためであると考えられる．

なお，せん断帯の幅を測ったところ 2.4mm であり，豊浦砂の D_{50} との比は 13 となり Oda et al. (2004)²⁾ が乾燥砂で示した 10 に近い．以上のように，不飽和砂におけるせん断帯内部の構造は乾燥砂のそれと似ており，別報⁴⁾に筆者らが示すように初期間隙比と拘束圧が等しい気乾砂，不飽和砂，飽和砂の残留応力がほぼ一致する事などから，含水状態によらず限界状態における砂の挙動はユニークであると考え事ができる．一方で，せん断帯内部に存在するメニスカス水に起因して強度が増加しているとも考えられ，さらなる検討が必要である．

5. まとめ

排気・排水三軸圧縮試験後の不飽和豊浦砂供試体において，せん断帯発生箇所の Partial CT scan を行い，土粒子，間隙水，間隙空隙を明確に可視化すると共に，不飽和土のせん断帯内部における微視構造について検討を行った．本研究の結果は除荷の影響を含んでいるが，今後は拘束圧下で検討し結果を精査していく．

参考文献

1) Higo, Y., Oka, F., Kimoto, S., Sato, T., Sawada, M. and Sanagawa, T.: Proc. 21st KKCNN Symp. on Civil Engrng., October 27–28, 2008, Singapore, pp. 444-447, 2008. 2) 肥後，佐名川，松島，木元，岡：第 44 回地盤工学研究発表会，横浜，2009. 3) Oda, M., Takemura, T. and Takahashi, M.: *Géotechnique*, 54, 8, pp.539-542, 2004. 4) 佐名川，肥後，松島，佐藤，木元，岡：第 44 回地盤工学研究発表会，発表予定，横浜，2009.

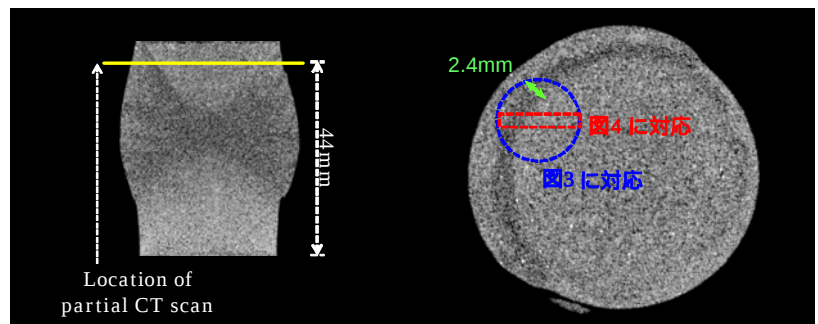


図 2. 通常の CT スキャン画像と Partial CT scan の撮影位置 (拘束圧 50kPa，軸圧除荷前)

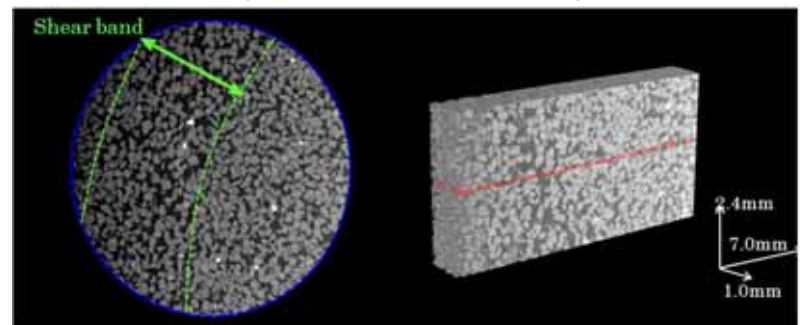


図 3 Partial CT 画像(水平断面図) (拘束圧 20kPa，軸圧除荷後)

図 4 Partial CT 画像(三次元表示) (拘束圧 20kPa，軸圧除荷後)

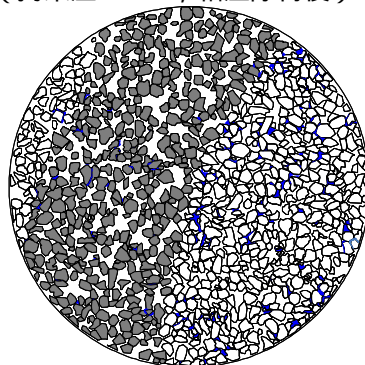


図 6. 図 3 のスケッチ (灰色：せん断帯，青色：メニスカス水)

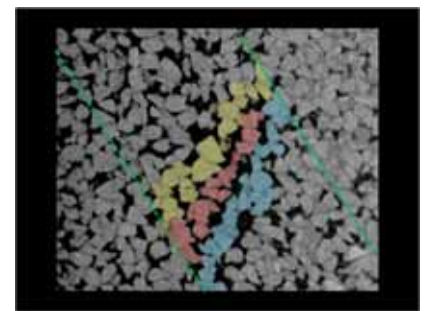


図 5. せん断帯内部の Columnar structure