

μ X 線 CT を用いた不飽和砂の三軸試験における体積変化測定

京都大学大学院 学生会員 ○松島 祥樹
 (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 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
 中日本高速道路株式会社(元京都大学大学院) 正会員 矢吹 太一

1. はじめに

不飽和土の排気・排水三軸試験では、空気と水の両方の体積変化を測定する必要があり、非排気・非排水三軸試験においても空気の圧縮性が大きい体積変化を測定しなければならない。一般に、不飽和土の体積変化は二重セルによる測定や非接触変位計で計測した側方ひずみからの計算で求められるが、厳密に体積変化を測定する事は困難である。そこで本研究では、排気・排水三軸圧縮試験中の不飽和土供試体の X 線 CT スキャンを実施し、3次元構成した CT 画像を用いて供試体体積を計測した。この手法では、スキャン時に寸法校正を正しく行う事により正確に体積を求める事ができる。まず、排水量から概ね妥当な体積変化が計測できる飽和土の排水試験で、CT 画像を用いた体積計測結果と排水量を比較した後に、不飽和土の排気・排水試験における、従来の体積計測手法である非接触変位計で計測した側方変位を用いて求めた体積変化と CT 画像から計測した体積変化を比較し、三軸試験における体積変化計測方法について検討を行った。

2. CT 画像を用いた体積計測方法

本研究では μ フォーカス X 線 CT スキャナ装置 (KYOTO-GEOμXCT, 東芝 IT コントロールシステム(株)製) を使用した¹⁾。コーンビーム法で得られる CT 画像は、X 線の減衰量を示す CT 値を算出し白黒の濃淡に変換した水平断面のデジタル画像であり、鉛直方向に積み重ねることにより三次元的な画像を構成する事ができる。また、本装置はワークテーブルに三軸セルを搭載可能であり、実験中の供試体を応力解放せずに CT スキャンする事ができる。

体積変化の計測には三次元画像処理ソフトの VGStudio MAX 1.2(アイティーティー(株)製)を使用した。このソフトでは CT 値を 14bit の Gray value に変換し画像を表示している。まず、この Gray value のヒストグラムを作成し(図 1)、供試体とその外部の空気を分ける閾値を選び、CT 画像を供試体内部を表す黒と供試体外部の空気を表す白に二値化する。図 2 に示すように供試体に内部に白の箇所、供試体外部に黒の箇所が存在しない閾値を設定し、閾値以上の Gray value を有する Voxel を積分する事により体積を計算する。なお、スキャン前に寸法が既知のアルミのファントムをスキャンすることにより寸法校正をすれば、正確な Voxel サイズを得る事ができるため、計測した体積の精度は高いものと言える。

不飽和土の場合、1Voxel が間隙の空気のみを占める時、供試体内部にも空気を表す白の箇所が存在する事になる。図 2 は飽和度 58.62%、間隙比 0.673 の不飽和豊浦砂供試体を用いた結果であるが、この CT 画像は Voxel サイズが $0.052^2 \times 0.080\text{mm}$ であり、 D_{50} が 0.185 の豊浦砂の場合 partial volume effect の影響で空気だけの間隙を示す Voxel がなかったため、空気を表す白の箇所は見られていない。一方、分解能がより高い CT 画像の場合は、供試体内部に空気だけを現す Voxel が存在する事になるが、この場合はメンブレンの Gray value で供試体の境界を定め、その内部の Voxel を積分する事で体積を求める事ができる。

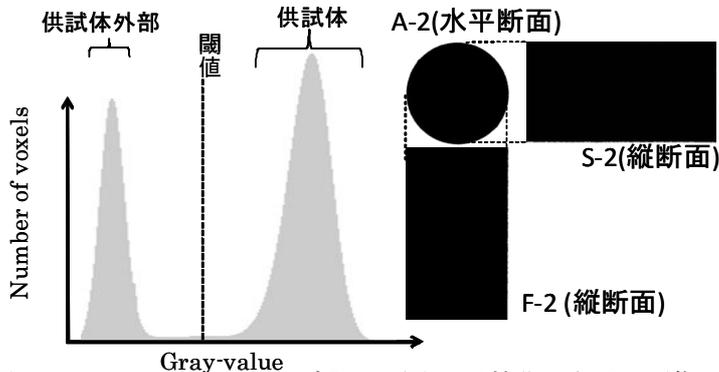


図 1 Gray value のヒストグラム 図 2 二値化した CT 画像

キーワード μ XCT, 不飽和土, 体積変化計測

〒615-8246 京都府京都市西京区京都大学桂 C クラスターC1-4 棟 Tel 075-383-3193

3. 飽和砂の排水三軸試験における体積変化計測

排水量によって体積変化が計測可能な飽和豊浦砂($e_0=0.659$, $\sigma_0=50\text{kPa}$)の排水三軸試験を行い、ビュレットで計測した排水量から計算した体積ひずみと CT 画像を用いて計測した体積ひずみを比較した(図3)。せん断に伴う正のダイレイタンスによる体積膨脹が見られ、両結果は良い一致を示している。軸ひずみ 10%以降はビュレットによる計測結果の方が若干膨脹量が小さくなっている事がわかる。この事から飽和度の試験においても、水自体の圧縮や排水径路内の残存空気の圧縮により排水量と体積変化が必ずしも一致しないと言える。

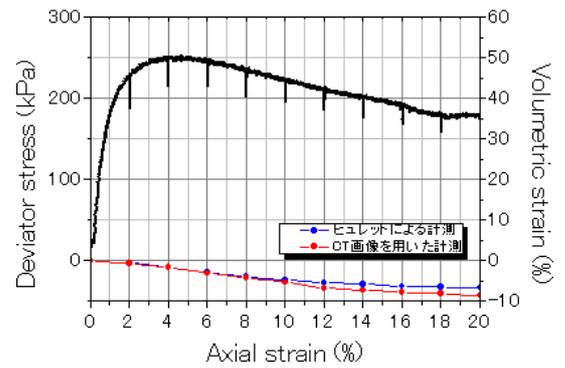


図3 応力-ひずみ関係と体積ひずみ-軸ひずみ関係

4. 不飽和砂の排気・排水試験における体積計測

淀川堤防砂を用いて不飽和砂の排気・排水三軸圧縮試験を行い、4つの非接触変位計で計測した側方変位から求めた体積変化(例えば参考文献²⁾)と CT 画像から計測した体積変化を比較した(図4)。実験条件は $D_r=85\%$, $e_0=0.616$, $S_r=54.79\%$ であり、間隙空気圧と間隙水圧は共に 100kPa とした。両試験における応力-ひずみ関係についてはほとんど一致しており、変形モードも供試体が樽型に変形し明確なせん断帯は発生しないモードで似通っていた。しかし、体積ひずみにはせん断初期の段階から差異が生じており、側方変位から計算した結果は実際よりも大きな体積変化を評価していると考えられる。

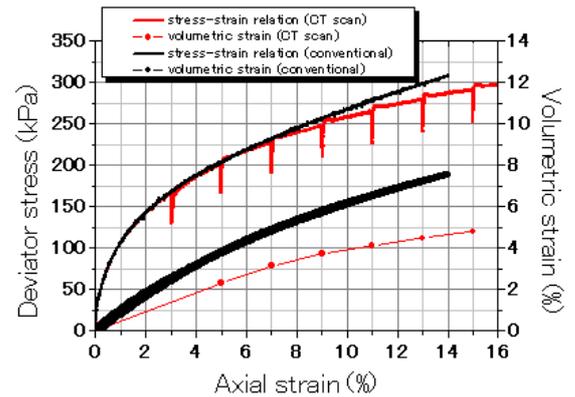


図4 応力-ひずみ関係と体積ひずみ-軸ひずみ関係

次に、Gray value の閾値の選定が体積の計測結果に与える影響を不飽和豊浦砂の実験について検討した(図5, 表1)。実験条件は参考文献³⁾のケース U-6 を参照されたい。図5のヒストグラムにおいて、供試体外部の空気と供試体を示す二つの領域の間に二値化の閾値をとる。そこで、この領域の間から任意に5つの閾値を採り、体積を計測した。二値化後の CT 画像⑤を見ると、供試体内部に白い箇所が見られ閾値が大きすぎる事がわかる。しかし、図4で用いた③の体積に対するその他の計測結果の誤差は 1%程度であり、閾値の選定が体積計測結果に及ぼす影響は少ないと言える。

5. まとめ

CT 画像を用いた三軸試験における体積計測方法について示した。また、CT 画像を二値化する際の閾値の選定が体積計測結果に与える影響を検討したが、ごく小さいものである事を示した。従来、不飽和土の体積変化を精度よく計測することは困難であったが、本手法により正確に体積変化を計測することができ、飽和土においてもビュレットで計測した体積変化を検証するのに有効であると言える。

参考文献

- (1) Higo, Y., Oka, F., Kimoto, S., Sato, T., Sawada, M. and Sanagawa, T.: Proc. 21st KCCNN Symp. on Civil Engrng., October 27-28, 2008, Singapore, pp. 444-447, 2008. (2) 西松, 金, 小高, 木元, 岡: 第39回地盤工学研究発表会, 新潟, pp. 831-832, 2004. (3) 松島, 佐名川, 肥後, 木元, 岡: 第44回地盤工学研究発表会, 発表予定, 横浜, 2009.

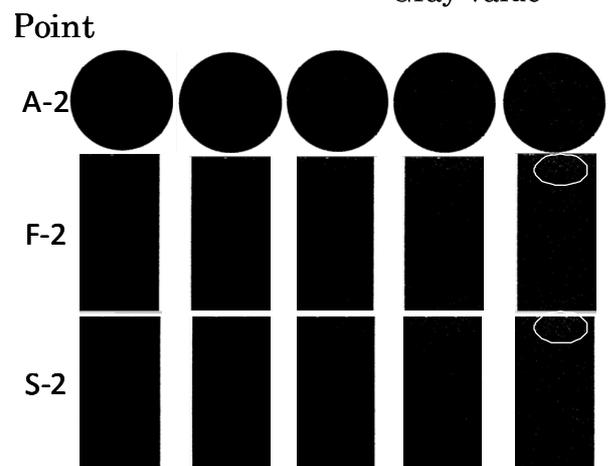
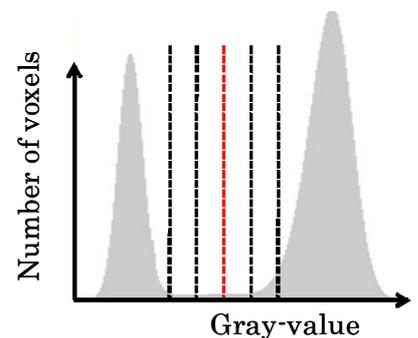


図5 ヒストグラム(上)と CT 画像(下)

表1 各ポイントにおける体積及び誤差

Number	①	②	③	④	⑤
Gray-value	102	137	173	206	241
体積(cm^3)	70.094	69.749	69.357	68.999	68.597
誤差(%)	1.06	0.57	0.00	-0.52	-1.10