

### 三次元 DIC による不飽和砂の三軸圧縮試験におけるひずみ場の定量化

京都大学大学院	正会員	肥後	陽介
京都大学大学院	正会員	佐藤	朋弥
京都大学大学院	学生会員	松島	祥樹
京都大学大学院	フェロー会員	岡	二三生
京都大学大学院	正会員	木元	小百合

#### 1. はじめに

粒状材料である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。本研究で用いた  $\mu$  フォーカス X 線 CT (KYOTO-GEO $\mu$ XCT) はミクロンレベルの分解能を持ち、三軸セルをワークテーブルに搭載できるため、三軸試験中の土供試体内部を高分解能で可視化する事ができる。本研究では三軸圧縮試験下における供試体全体の内部構造変化を可視化し、得られた CT 画像をもとにデジタル画像相関法(Digital Image Correlation、以下 DIC)を用いてひずみ場の定量化を行った。

#### 2. 試験条件および試験結果

試料には豊浦砂を用いた。豊浦砂の平均粒径は 0.19mm、最大間隙比は 0.98、最小間隙比は 0.61 となっている。供試体は Moist-tamping 法を用いて作成しており、初期の間隙比は 0.67、飽和度は 60.4%、含水比は 15.2%である。また、X 線 CT の撮影位置を決めるため、マーカーとして供試体下部から 3/5 および 4/5 の位置に砂鉄層を作成した。この砂鉄は豊浦砂に含まれているもので、掻きほぐした締固め面全体を覆うように砂鉄を 0.5g 撒くことにより作成した。三軸圧縮試験は排気・排水条件、拘束圧は 50kPa、ひずみ速度は 0.5%/min とした。

試験結果を図-1 に示す。なお、試験中に X 線 CT 撮影を行う際は载荷を一時中断しているため、撮影の行われる軸ひずみ 0%、2%、4%、8%、15%、20%では応力緩和が生じている。また、体積ひずみは三次元可視化ソフト VGStudioMAX1.2(アイティティー(株)製)を用いて供試体部分の Voxel を集計することにより求めている。試験結果を見ると、軸ひずみ 2%に応力ピークを迎え、その後は緩やかに応力が減少するという脆性的挙動を示した。体積ひずみに関しては軸ひずみの進展に伴い単調に膨張した。

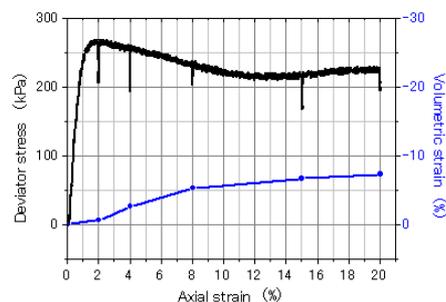


図-1 試験結果

#### 3. DIC 計算手順

デジタル画像相関法(Digital Image Correlation、以下 DIC)とは変形前後 2 つの画像に対して相関係数(類似の程度を示す値)を計算することにより変形前の任意の点が、変形後どこに移動したかを分析する手法である。ここで、相関係数とは選択した領域が持つ CT 値配列の類似程度を示す値である。本研究では Lenoir et al.(2007)<sup>2)</sup>が示した方法と同様の方法を用いている。以下に計算手順を、図-2 に概念図を示す。

- ① 変形前画像において、変形量を求めたい点(相関計算点)を任意に決める。
- ② 変形後どこに移動したかを探するため、変形後画像に検索窓を設置する。検索窓は変形前画像の相関計算点座標を中心とした立方体を基本とした。この格子内検索点が 1Voxel ずつ移動しパターンマッチングを行う。
- ③ 変形前画像の相関計算点および変形後画像の検索窓を中心とした相関計算窓を設置し(20<sup>3</sup>Voxel)、相関係数を計算する。
- ④ 検索点を移動し、さらに相関係数を計算する。
- ⑤ すべての検索点を計算し終わったら、最も相関の高かった検索点を移動点と認識する。

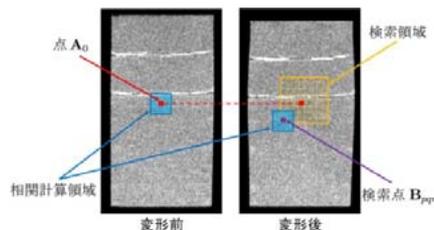


図-2 DIC 概念図

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4C クラスタ-C1 棟 Tel: 075-383-3193

相関係数を求める式は以下のとおりである。ここで、 $f$  は変形前画像の CT 値を、 $g$  は変形後の CT 値を表わす。

$$R = \frac{\sum_x \sum_y \sum_z \{ (f_{(x,y,z)} - \overline{f_{(x,y,z)}}) \times (g_{(x,y,z)} - \overline{g_{(x,y,z)}}) \}}{\sqrt{\sum_x \sum_y \sum_z (f_{(x,y,z)} - \overline{f_{(x,y,z)}})^2 \times \sum_x \sum_y \sum_z (g_{(x,y,z)} - \overline{g_{(x,y,z)}})^2}}$$

4. 三次元 DIC 条件および結果

供試体全体撮影で得られた CT 画像をもとに三次元 DIC を行い、求めたせん断ひずみおよび体積ひずみの分布を図-3 に示す。なお、図中には示していないが全てのケースにおいて相関係数は 0.99 と非常に高い値を示した。また、図中の供試体 3D イメージにおける供試体上部の物体は三軸試験機のキャップが撮影時に映り込んだものであり、ケース E-F 最上部一面はキャップを画像解析した結果となっている。図を見ると、初期のケースではせん断ひずみは少なく、その集中度合いは小さいが、軸ひずみが進展したケース B-C および C-D ではせん断ひずみ分布断面から×印状の弱いせん断ひずみの集中が確認でき、供試体中央部ではせん断ひずみがより集中している。ケース C-D では×印状の弱いせん断ひずみ集中領域の中で、特に画像向かって左上から右下にかけて存在するひずみ集中帯が局所化しており、ケース D-E ではそのひずみ集中帯がより卓越し、せん断ひずみがさらに局所化することにより一本の帯状のせん断帯を形成するに至っている。このせん断ひずみ分布は供試体 3D イメージから確認することのできるせん断帯の滑り面や、CT 画像における密度低下領域と対応していることから、CT 画像で観察される低密度領域はせん断帯であると言える。

体積ひずみ分布を見ると、初期のケースでは供試体中央部が膨張傾向を示し、圧縮傾向は供試体上部および下部で多少確認できる程度で、軸ひずみが進展しても圧縮傾向に大きな変化はない。しかし、せん断帯が発生するケース D-E 以降では圧縮および膨張傾向共にせん断帯付近でのみ大きな値を示している。図-4 は各要素の体積ひずみから求めた供試体全体の体積ひずみと実験結果の体積ひずみを比較したものであるが、図を見るとケース E-F での解析値は実験値と離れているが、それ以外のケースでは実験結果と同様の膨張傾向を示していることがわかる。なお、ケース E-F の各要素の体積ひずみの平均値を求めるにあたって供試体上部のキャップを含む要素である最上部一面の解析値は除外している

5. まとめ

三軸圧縮試験下における不飽和豊浦砂の内部構造変化を可視化し、得られたCT画像をもとにDICを行いひずみ場の定量化を行った。その結果、CT画像における密度低下領域はせん断帯と対応する事が確認され、供試体内部では正のダイレイタンスにより膨張していることも示された。

参考文献

1) Higo, Y., Oka, F., Kimoto, S., Sanagawa, T., Sawada, M., Sato, T., and Matsushima, Y.: Advances in Computed Tomography for Geomaterials, Proc. GeoX2010, March 1-3, 2010, New Orleans, Louisiana, pp. 43-51, 2010. 2) N.Lenoir : Volumetric Digital Image Correlation Applied to X-ray Microtomography Images from Triaxial Compression Test on Argillaceous Rock, 2007 Blackwell Publishing Ltd | Strain (2007) 43, 193-205

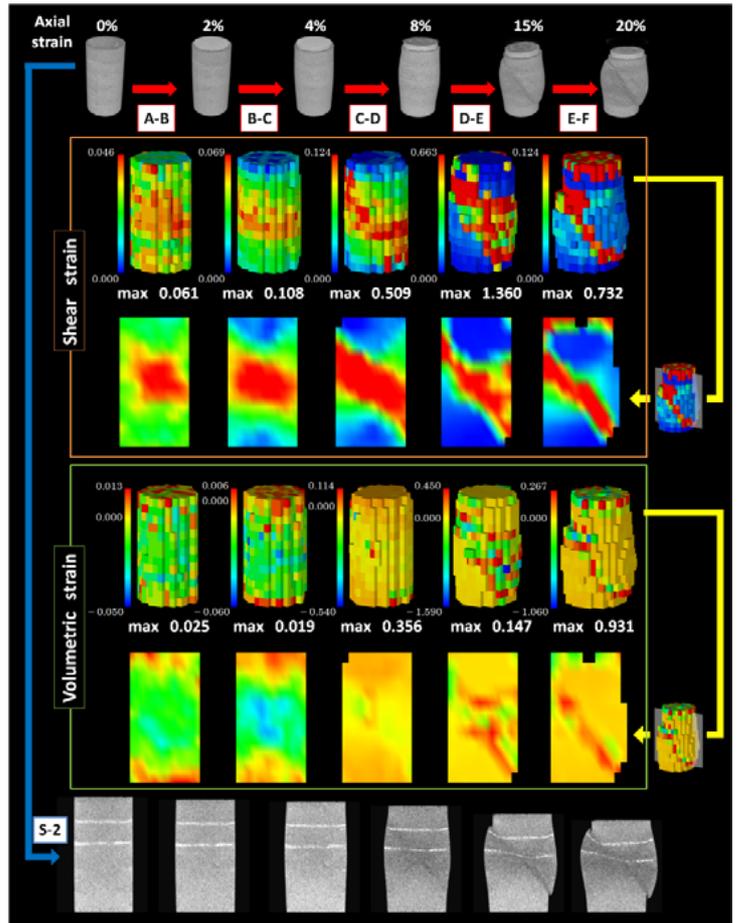


図-3 せん断ひずみ分布および体積ひずみ分布

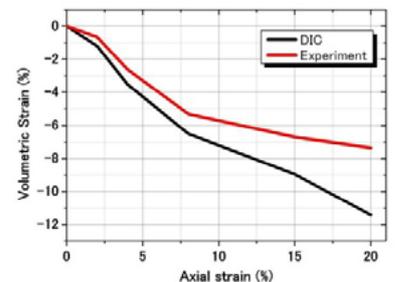


図-4 体積ひずみの比較