

三軸圧縮試験における局所変形の評価

山口大学工学部 正 会 員 中田幸男 兵動正幸 吉本憲正
 山口大学工学部 フェロー 村田秀一
 山口大学大学院 学生会員 ○吉川直孝

1. まえがき 自然地盤には、粒子の比較的硬い材料(豊浦砂)から破碎性材料(宇部まさ土)まで種々存在する。近年、画像処理技術を用いたせん断層の定量的な評価が行われはじめ、せん断帯の間隙比が最大間隙比以上となること¹⁾、限界間隙比に漸近すること²⁾などが報告されている。これらの研究では、粒子の比較的硬い材料が用いられており、圧縮性の卓越する材料ではせん断層が明瞭でないこともあり、局所変形の定量的な評価には至っていない。本研究では、画像解析により三軸圧縮試験時の3次元局所変形を定量化し、豊浦砂と宇部まさ土のせん断変形の評価を行う。

2. 試験概要 用いた試料は、宇部まさ土($G_s = 2.635$, $e_{max} = 1.274$, $e_{min} = 0.763$, Grain size: $0.075 \sim 2.0\text{mm}$, $D_{50} = 0.667$)である。供試体は最適含水比 $w = 12.4\%$ に調整された試料を締め固め密度 $D_c = 92\%$ ($D_r = 142\%$) になるよう締め固めて作成された。三軸試験条件は、載荷速度 0.1mm/min 、拘束圧 $\sigma_c = 100\text{kPa}$ 一定の圧密排水三軸圧縮試験である。本研究で用いた三軸試験機は、1 台のデジタルカメラ(画像サイズ: 3264×2448 pixel)にて供試体全周の計測を行うため、軸と供試体の回転が連動し、かつ 360° 以上回転できるように構造となっている。図-1 に本研究で用いた三軸試験機の全景を示す。図中に示す箇所に観察窓が設けてあり(同図(a)), そこにデジタルカメラのレンズを設置し(同図(b)), 供試体の撮影を行う。試験前に基準点を設けた円柱をセル内に設置し、内部標定・外部標定を行った。図-2 にその結果を示している。画像解析による座標値と実測座標値を比較すると、RMS 誤差で 0.062mm となっている。試験中、所定の軸ひずみにおいて、軸変位を 0 とするよう軸を制御し、その間に 0° から 45° ずつ 315° まで供試体を回転し、各回転角($0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ, 180^\circ, 225^\circ, 270^\circ, 315^\circ$)ごとに、合計 8 枚の画像を撮影した。供試体を覆うメンブレン上に直径 2mm の標点を間隔 5mm で予め設けておき、各標点の 3 次元座標を画像解析により取得した。画像解析による 3 次元座標計測は、参考文献に詳しい^{3), 4)}。また、別途行った豊浦

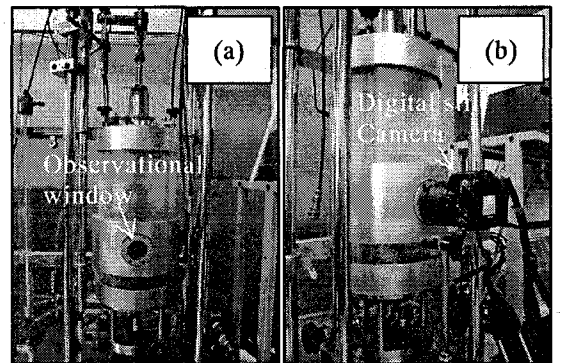


図-1 軸・供試体連動回転三軸試験機

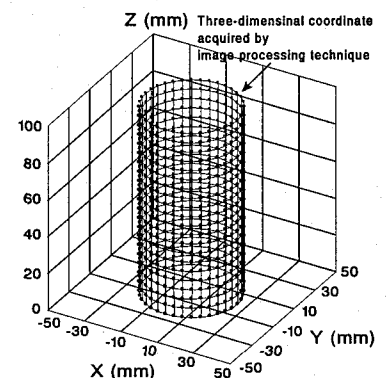


図-2 円柱の三次元座標計測結果

砂($G_s = 2.645$, $e_{max} = 0.939$, $e_{min} = 0.600$, Grain size: $0.075 \sim 0.425\text{mm}$, $D_{50} = 0.206$)の結果⁴⁾も以下に合わせて示す。

3. 実験結果 図-3(a), (b)は、それぞれ宇部まさ土および豊浦砂の全体的な軸ひずみに対して軸差応力と体積ひずみ(全体, 局所)を示したものである。 ϵ_{v_global} , ϵ_{v_top} , ϵ_{v_middle} , ϵ_{v_bottom} , $\epsilon_{v_shearband}$

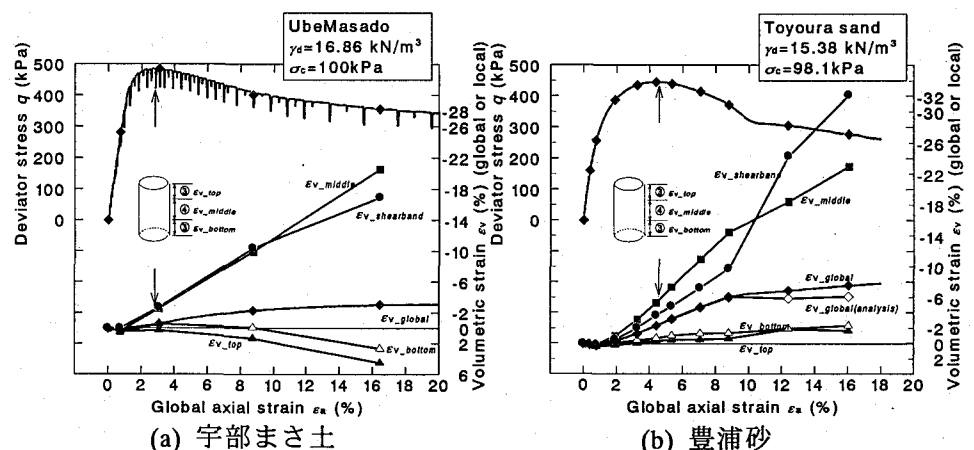


図-3 全体的な軸ひずみに対する軸差応力と体積ひずみ(全体, 局所)

は、各々、供試体全体、供試体上層、中間層、下層、せん断層の体積ひずみを示したものである。上層、中間層、下層は、供試体の高さ方向に各々6, 8, 6要素の箇所分割し決定された。せん断層の求め方については後述する。両図から、中間層、せん断層において、

全体的な体積ひずみよりも膨張側、上層、中間層においては、より圧縮側であることがわかる。材料の違いとしては、豊浦砂がすべて膨張側に存在するのにに対し、宇部まさ土では、上層、下層において圧縮側に存在しており、このようなひずみ軟化挙動を示す非常に密な状態においても、圧縮を伴いながらせん断していることが分かる。

図-4(a), (b)は、それぞれ宇部まさ土および豊浦砂のZ方向の軸ひずみ分布を示したものである。各軸ひずみは、図中に示す四角形要素の4つの格子点の座標から算出した。同図の比較から、豊浦砂は明瞭にせん断層が観察され、同図(b)の供試体左上から右下に確認でき、せん断層とそれ以外の軸ひずみの

値の差が大きい。これに対し、同図(a)の宇部まさ土では、供試体右上から左下にせん断層が確認でき、せん断層以外の部分の軸ひずみの値も大きい。図-5は、直交座標を円柱座標に変換し、せん断層を求める方法を示している。軸ひずみが20%以上となり、かつ図-4(b)から確認される主なすべり面をせん断層と判断し、図-5の太線のように示した。求められたせん断層を図-6の直交座標上で直線により結ぶことでせん断層を表現し、せん断層を構成する1つの四角柱のような物体の体積をスカラー3重積により算出し、体積ひずみを求めた。また、これら四角柱のような物体で表現される要素の体積を合計し、せん断層全体の体積ひずみを求めた。せん断層全体の体積ひずみは、上記した図-4に $\varepsilon_{v, \text{shearband}}$ として示している。さらに、図-7(a), (b)には、宇部まさ土および豊浦砂のせん断層内の各要素の体積ひずみと全体的な軸ひずみの関係を示している。両図の特徴的な差は、豊浦砂、宇部まさ土ともに応力のピーク付近では、ほぼせん断層内の全要素が膨張側に存在するのにに対し、残留時では、宇部まさ土のみ圧縮側に移行している要素が存在する。

4.まとめ 画像解析により、三軸圧縮試験時の軸ひずみ、体積ひずみを定量化し、豊浦砂、宇部まさ土のせん断層の体積ひずみの評価を行った。その結果、宇部まさ土において、応力のピークから残留状態に至る過程で、せん断層内においても圧縮が生じていることが確認された。

参考文献：1) Oda, M. & Kazama, H. : Microstructure of shear bands and its relation to the mechanisms of dilatancy and failure of dense granular soils, *Géotechnique* 48, No. 4, pp. 465~481, 1998., 2) Desrues, J. et al. : Void ratio evolution inside shear bands in triaxial sand specimens studied by computed tomography, *Géotechnique* 46, No. 3, pp. 529~546, 1996., 3) 吉川直孝, 中田幸男, 兵動正幸ら：円柱供試体における3次元局所変位計測, 第40回地盤工学会研究発表会概要集, pp.441-442, 2005. 7., 4) Kikkawa, N., Nakata, Y., Hyodo, M., et al. : Three-dimensional measurement of local displacement using digital stereo photogrammetry in triaxial test, The 2nd international workshop on gas hydrate studies and other related topics -for the future energy and environment considerations-, (contributed).

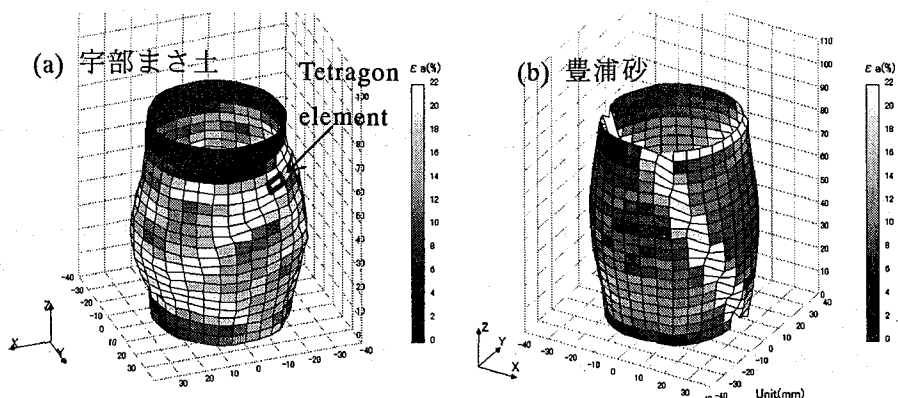


図-4 全体的な軸ひずみ $\varepsilon_a = 16\%$ 付近の軸ひずみ分布

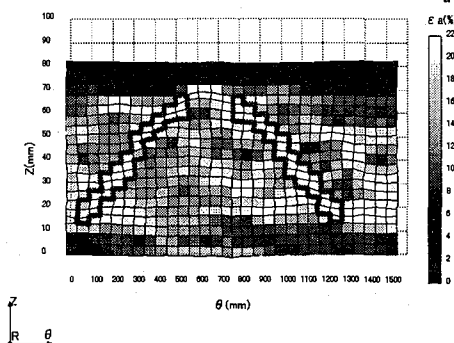


図-5 円柱座標系におけるせん断層の求め方(宇部まさ土)

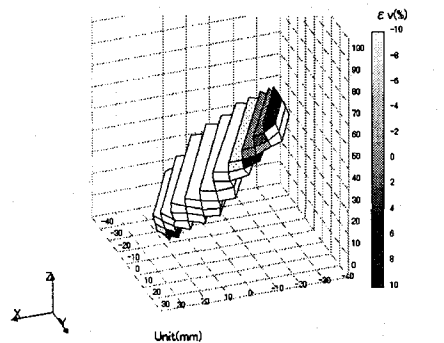


図-6 せん断層の体積ひずみ分布(宇部まさ土, $\varepsilon_a = 16.4\%$)

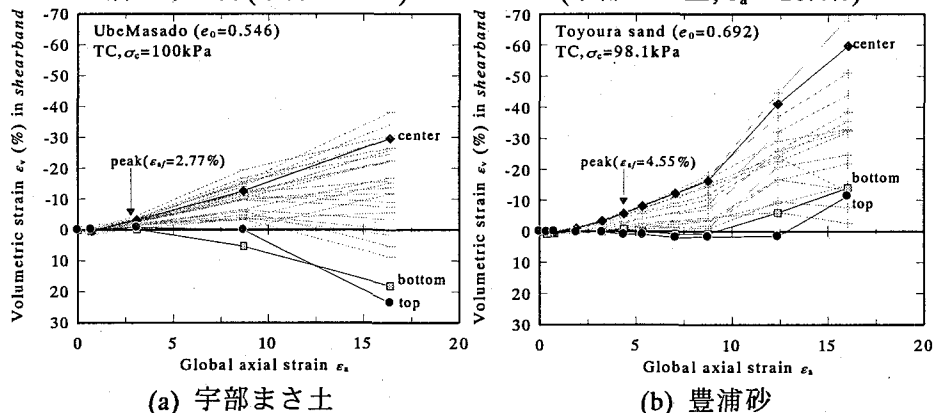


図-7 せん断層内の各要素の体積ひずみと全体的な軸ひずみの関係