

中空ねじり試験中の局所ひずみの安価な計測システムの開発とその適用

東京大学大学院 学生会員 ○橋本 拓幸

東京大学生産技術研究所 久野 洵

東京大学生産技術研究所 フェロー会員 桑野 玲子

1. はじめに 三軸圧縮試験や中空ねじり試験などの要素試験では、せん断ひずみ数%～数十%のせん断変形が起これると、ひずみの局所化が生じてせん断層が形成される。このような大変形時の地盤材料のせん断特性を適切に評価するためには、供試体の平均的なせん断ひずみだけでなく、供試体中のひずみの局所化の度合いやせん断層の変形挙動を定量的に評価する必要がある。しかし、既存の局所ひずみ計測技術は高価なものや複雑なものが多く、広く普及しているとは言えないのが現状である。そこで、本研究では、3軸CNC工作機械を改造したプロッターと産業用USBカメラ、およびオープンソースの無料のプログラムを用いて、中空ねじりせん断試験中のひずみの局所化を安価に評価するシステムを開発し、解析精度を確認するとともに、破碎性粒状体の中空ねじり試験に適用した。

2. 画像解析システム 本研究では、供試体表面に等間隔で打った格子点のせん断中の移動を追跡し、平面座標上に座標変換することで、中空円筒供試体の局所的な変形量を求めるシステムを開発した。まず、3軸CNC工作機械を改造してスピンドルの代わりにペンを持たせたプロッターを用いて、外メンブレンに等間隔で格子点を打った(図1)。試験中、図2に示すようにセルの外側に産業用USBカメラ(画素数3840×2160)を固定し、せん断中の外メンブレン表面の格子点を撮影した。試験後に、せん断中に撮影した動画を用いて、見かけの座標上の各格子点の移動をトラッキングした。追跡した各点を、Zhao & Koseki¹⁾の手法を用いて、図3のように3次元の供試体の写真(図3(a)、見かけの座標)を2次元の平面空間座標(図3(b)、真の座標)に変換した。具体的には、追跡された点を囲む4つの既知の基準点の見かけの座標(A_1 - A_4)と真の座標(T_1 - T_4)、および追跡された点の見かけの座標(u', v')から、その真の座標を双線形補完することで算出した。上述の方法で求めた真の座標を用いて、4つの格子点で囲まれた各グリッドについて、局所せん断ひずみを算出した。局所せん断ひずみは、有限要素解析と同様に形状関数行列と4節点の変位行列を用いて求めており、各グリッドの中心位置で局所せん断ひずみを計算した。試験後のこれらのすべての画像処理は、OpenCV等のオープンソースコードを用いながらPythonで行った。

3. 解析精度の評価 3.0mm間隔のダミー格子点を耐水シールに印刷し、中空ねじり試験装置のキャップに貼り付けた。後述のねじりせん断試験中の隣接ダミー格子点の距離の変動を算出した結果を図4に示す。隣接ダミー格子点の距離は常に誤差±0.1mm以下で計測できており、十分な精度で解析できていると言える。

4. 中空ねじりせん断試験への適用例 上述の画像解析システムを用いて、多孔質で破碎性を有し高間隙(せん断開始時の間隙比 $e=2.11$)な人工軽石²⁾の中空ねじりせん断試験を実施した。供試体の外径は10cm、内径6cm、高さ



図1 CNCによる格子点のプロット



図2 せん断中の供試体の撮影

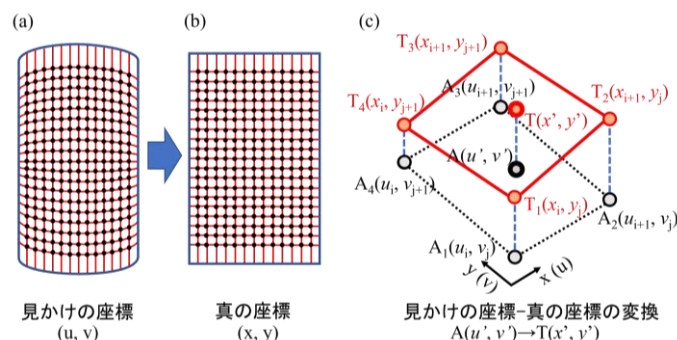


図3 見かけの座標から真の座標への変換

キーワード 画像解析, 中空ねじりせん断試験, 局所ひずみ, 要素試験

連絡先 〒153-8505 東京都目黒区駒場 4-6-1 東京大学生産技術研究所 Bw304 TEL 03-5452-6843

は15cmである。空中落下法で供試体を作成し、二重負圧法で飽和させ、100kPaで等方圧密した後、非排水・軸固定条件で、せん断ひずみ γ_G が30%に達するまで単調ねじり载荷を行った。体積ひずみ・軸ひずみが0のため、半径方向（画像解析時の奥行方向）のひずみは0である。単調ねじり载荷時の応力ひずみ関係を図5に示す。せん断に伴い平均有効主応力 p' が低下し、 $\gamma_G=7\%$ で変相点に達して p' が増加に転じた。その後、 p' やせん断応力 τ がせん断に伴い非常に緩やかに増加していくようになった。このような緩やかな応力の変化は、せん断中の粒子破碎に起因すると考えられる。図6にねじり载荷中の局所せん断ひずみ $|\gamma_L|$ の分布を示す。 $\gamma_G=5\%$ （変相点に達する前）の時点ではひずみ分布は比較的一様であったが、せん断が進むにつれ徐々にひずみの局所化が始まり、特に応力の変化が落ち着いた $\gamma_G>20\%$ の段階で局所化が顕著となり、図6(a)中の黒点線で囲んだ部分でせん断層の形成が確認された。

5. まとめ 本研究では、3軸CNC工作機械を改造したプロッターと産業用USBカメラを用いて、中空ねじりせん断試験中のひずみの局所化を安価に評価するシステムを開発した。ダミー格子点の測定誤差は0.1mm以下と高い測定精度を有することが確認された。破碎性材料の非排水・軸固定単調ねじり载荷に画像解析を適用した結果、提案した手法により、ひずみの局所化が発生し進行していく様子を定量的に評価できることが示された。今後は排水せん断中の体積変化（半径方向ひずみ）を考慮する方法などを検討していく予定である。

参考文献 1) Zhao, C. and Koseki, J., 2020. An image-based method for evaluating local deformations of saturated sand in undrained torsional shear tests, *Soils and Foundations*, 60, pp. 608-620. 2) 橋本拓幸, 桑野玲子, 2023(発表予定). 破碎性人工土の排水ねじりせん断時のひずみの局所化の評価, 第58回地盤工学研究発表会.

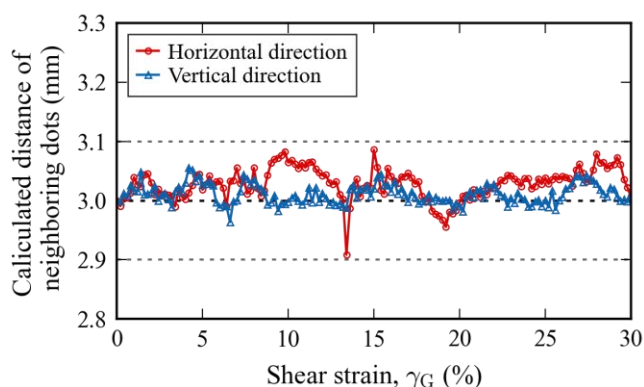


図4 隣接ダミー格子点間の算出された距離の推移

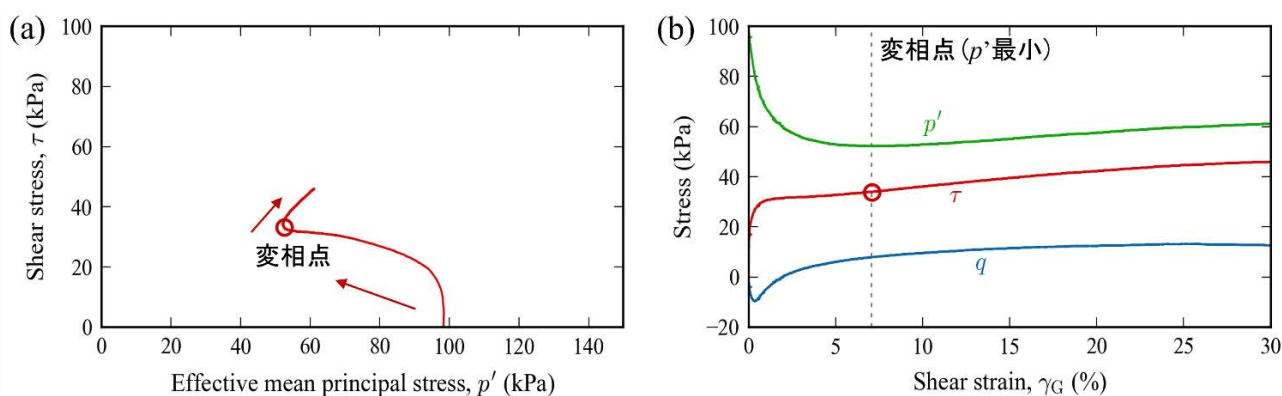


図5 人工軽石の非排水・軸固定単調ねじり载荷時の応力-ひずみ関係

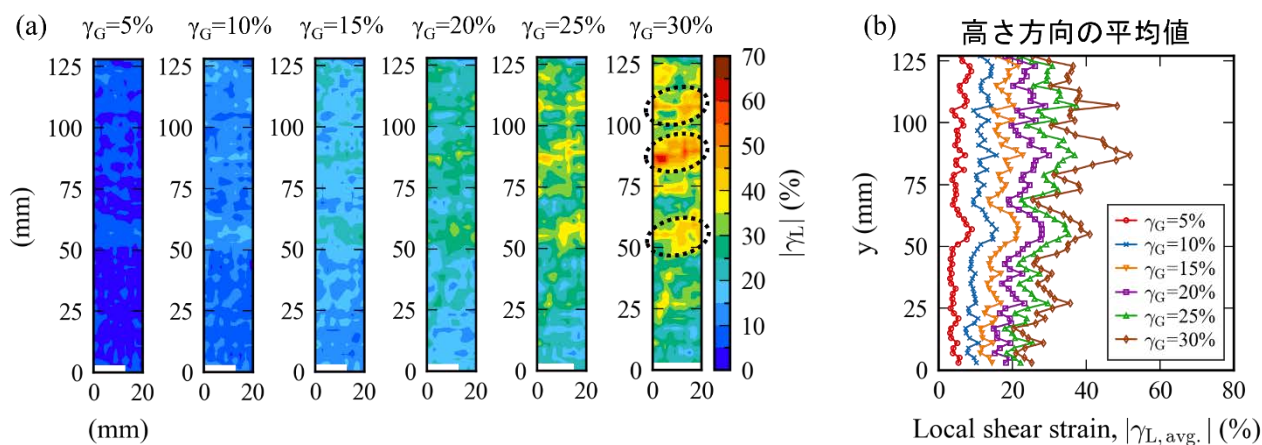


図6 画像解析による人工軽石の排水単調ねじり载荷時の局所ひずみ分布の評価（格子間隔は2mm）