

異なる拘束圧下での三軸圧縮試験における流動化処理土の局所変形挙動

東京大学生産技術研究所 正会員 〇堤 千花 古関潤一 佐藤剛司
農村工学研究所 正会員 毛利栄征

1. はじめに

間隙比の高い泥岩や固化強度の比較的小さい改良土などにそれらの強度を上回る荷重が加わると、せん断破壊のみならず圧縮破壊が生じ、結果として大きな体積圧縮を引き起こす可能性のあることが既往の研究により報告されている^{1), 2)}。本研究では流動化処理土の排水三軸圧縮試験を異なる拘束圧下で実施し、画像解析から得られる圧密・せん断過程における局所変形挙動を観察することにより、これらの破壊形態の変化について検討した。

2. 試験方法

5 mm ふるいで粒度調整した礫混じり砂質粘土³⁾に一般軟弱土用固化材を添加して流動化処理土を作成した。固化材添加量は外割りで 50 kg/m^3 、処理土のフロー値は 160、泥水密度は 1.427 g/cm^3 であった。平面観察窓付き中圧平面ひずみ圧縮試験装置⁴⁾を三軸圧縮試験に転用した。恒温・恒湿条件のもとに約二年養生された流動化処理土を、各拘束圧での圧密後の寸法が断面 $58 \text{ mm} \times 76 \text{ mm}$ 、高さ 160 mm 程度となるような異なる初期寸法の矩形供試体に成形し、三軸セル内にセットした。二重負圧を与えた後、背圧を 200 kPa として供試体を飽和化し、拘束圧 σ_3' を $30, 50, 100, 200, 400, 800 \text{ kPa}$ までそれぞれ増加させて等方圧密した。圧密終了後、排水状態でひずみ速度を $0.005 \text{ \%/min.}$ ($\sigma_3' = 200 \text{ kPa}$ の試験のみ $0.01 \text{ \%/min.}$) として鉛直軸方向に単調載荷した (CD 試験)。等方圧密および単調載荷中の体積変化は低容量の差圧計を用いて供試体からの排水量により計測した。圧力セルの平面観察窓を通して矩形供試体の一側面の変形過程を 1200 万画素のデジタルカメラで記録した。このデータの画像解析を行い、メンブレン上の 5 mm 四方の 4 標点からなる要素内での平均的な最大主ひずみ ε_1 、最小主ひずみ ε_3 を計算した。実際の変形は三次元で生じるが、画像解析結果としては観察側面の二次元成分のみを考え、最大せん断ひずみを $\gamma_{\max} = \varepsilon_1 - \varepsilon_3$ 、体積ひずみに相当する成分を $\varepsilon_1 + \varepsilon_3$ とそれぞれ定義した。

3. 試験結果

等方圧密では $\sigma_3' = 30 \text{ kPa}$ から $\Delta\sigma_3' = 3 \text{ kPa/min.}$ で所定の圧力まで拘束圧を増加させた後、等方応力状態を約 3 日間保つことにより過剰間隙水圧の消散を待った。TC-4 のみ拘束圧を 30 kPa から 200 kPa まで一気に増加させた。この間に生じた供試体全体の体積ひずみと平均有効主応力との関係を図 1 に示す。 50 kPa 以下の拘束圧下ではわずかな体積収縮にとどまっているが、 100 kPa 以上の拘束圧下では著しい体積収縮が生じていることが分かる。

TC-1, TC-2, TC-3, TC-5 の等方圧密終了までに蓄積された $\varepsilon_1 + \varepsilon_3$ の分布を図 2 に示す。図では赤が体積膨張、黄が体積収縮を示している。図 1 の体積ひずみの傾向と一致し、c), d) の 100 kPa 以上の拘束圧下で著しい収縮挙動が見られる。これらの供試体の下半分では上部よりも強い収縮傾向を示す領域が点在しているものの、際立ったひずみの局所化傾向は見られない。

流動化処理土、三軸圧縮試験、拘束圧依存性、画像解析、局所変形挙動

〒153-8505 東京都目黒区駒場 4-6-1 東京大学生産技術研究所 古関研究室 Tel 03-5452-6421

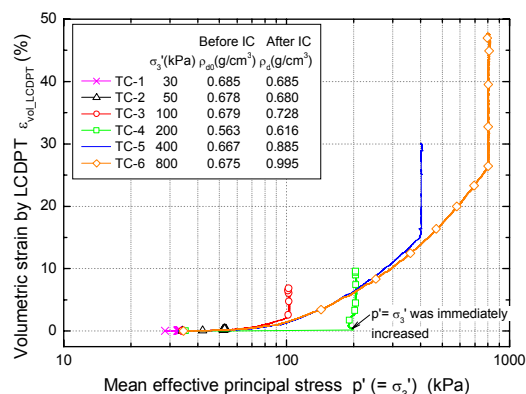


図1 等方圧密による体積変化

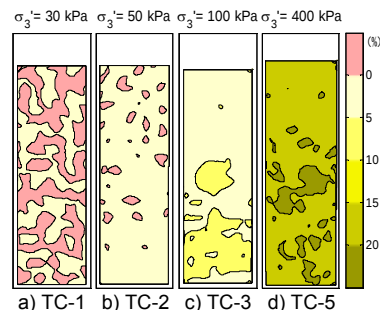
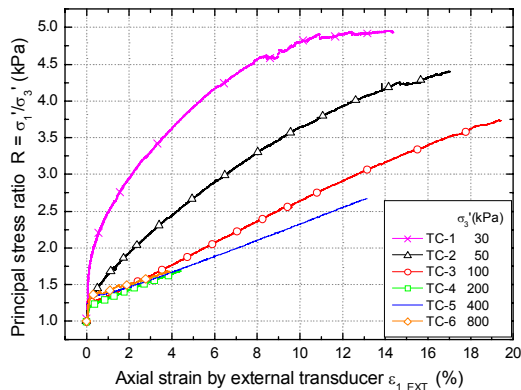
図2 等方圧密後の $\varepsilon_1 + \varepsilon_3$ の分布

図3 主応力比と軸ひずみの関係

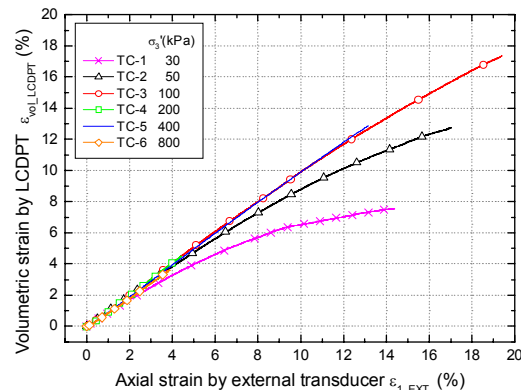


図4 体積ひずみと軸ひずみの関係

CD 試験における主応力比 $R = \sigma_1' / \sigma_3'$ と供試体全体の軸ひずみとの関係を図 3 に、供試体全体の体積ひずみと軸ひずみとの関係を図 4 にそれぞれ示す。軸ひずみ、体積ひずみはいずれも等方圧密終了時点での値を 0 % として計算した。図 3 によると、低拘束圧下ほど同一の軸ひずみにおける主応力比が大きな値を示している。100 kPa 以上の拘束圧下では主応力比と軸ひずみとの関係がほぼ等しくなることが分かる。図 4 によると、いずれの拘束圧下においても軸圧縮中の体積変化は一貫して収縮傾向を示している。大きな軸ひずみまで載荷を継続した TC-1, TC-2, TC-3, TC-5 に着目すると、高拘束圧下ほど軸ひずみと体積ひずみがほぼ等しい状態、すなわち側方ひずみがほぼゼロの状態が長く続き、鉛直載荷方向のみへの圧縮が支配的であることが分かる。

ひずみ速度を 0.1 %/min. として別途実施した一軸圧縮試験では軸ひずみが 3.0 % で一軸圧縮強度 $q_u = 81.9$ kPa を示し、角度が約 32~69 度の複数のせん断層の形成を伴うひずみ軟化挙動が見られた³⁾。今回実施した三軸圧縮試験結果は、一軸圧縮強度 ($q_u = 81.9$ kPa) と同程度の大きさの拘束圧を境に異なる傾向を示していると考えられる。すなわち、固化処理によって発現された強度を上回る軸応力または拘束圧が加わると、土粒子間の結合が損傷するため、本試験の材料である粘土分を多量に含んだ低密度の流動化処理土では、同じひずみで発揮される応力比が低下したと考えられる。

TC-1, TC-5 において、供試体全体の軸ひずみが 13 % までの 5 段階のステップにおける a) 最大せん断ひずみの増分と b) $\varepsilon_1 + \varepsilon_3$ の増分の分布を図 5, 図 6 にそれぞれ示す。図 5 b), 図 6 b) では赤が膨張傾向、緑が収縮傾向を示している。図 5 より、低拘束圧下では初期段階から供試体下部で明確な最大せん断ひずみの局所化領域が現れ、その箇所は強い体積収縮傾向を示していることが分かる。またこのような局所化領域は、全体的な軸ひずみが 13 % となるまでにいくつかの箇所で現れていることが分かる。一方図 6 によると、高拘束圧下では最大せん断ひずみも $\varepsilon_1 + \varepsilon_3$ も供試体全体で一様に増加しており、いずれの段階においても明確な局所化領域は見られないことが分かる。

TC-1, TC-2, TC-3, TC-5 において、軸ひずみが 13 % での a) 最大せん断ひずみの分布と b) $\varepsilon_1 + \varepsilon_3$ の分布を図 7 に示す。図中の点線は、試験後の供試体で目視観察により確認された連続的な局所変形の様子を示している。低拘束圧下ほど最大せん断ひずみの局所化がより顕著に見られ、それらの箇所と連続的な局所変形、すなわちせん断層の観察箇所とが一致していることが分かる。最も拘束圧の低い TC-1 では図 7 a) で図示したものを含め、角度が約 22~61 度の連続的な局所変形が三次元的に複数個所で確認された。一方最も拘束圧の高い TC-5 では、目視観察からもひずみの局所化領域は確認されなかった。

4. まとめ

流動化処理土の三軸圧縮試験において、一軸圧縮強度を上回る拘束圧が加わると圧密に伴って大変形が生じ、せん断時に同一の軸ひずみで発揮される主応力比が低下した。また流動化処理土の破壊形態は、拘束圧が増加するに従って明確なひずみの局所化を伴うせん断破壊から鉛直載荷方向のみへの圧縮破壊へと移行する傾向が見られた。

<参考文献>

- 1) 太田ら：画像解析及び X 線 CT 法による能登珪藻泥岩のひずみの局所化挙動の観察，土木学会第 61 回年次学術講演会概要集，2006
- 2) 岩淵ら：載荷重を受ける流動化処理土の変形パターンに関する実験的研究，土木学会第 61 回年次学術講演会概要集，2006
- 3) 堤ら：異なる拘束圧下における圧密が流動化処理土の破壊形態に与える影響，第 44 回地盤工学研究発表会，2009
- 4) 堤ら：異なる拘束圧下での平面ひずみ圧縮試験における密な豊浦砂の強度変形特性，土木学会第 63 回年次学術講演会概要集，2008

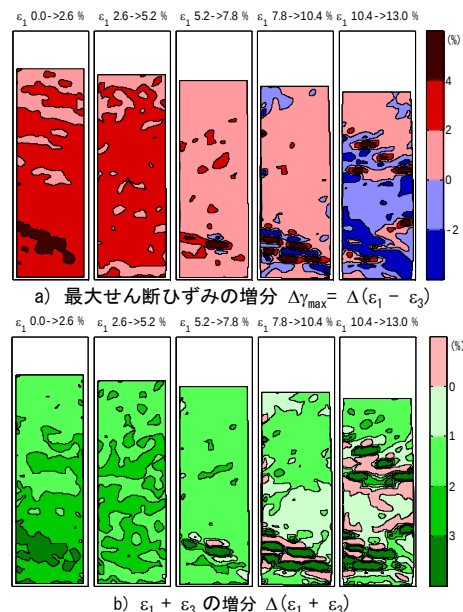


図 5 CD 試験中のひずみ分布 (TC-1)

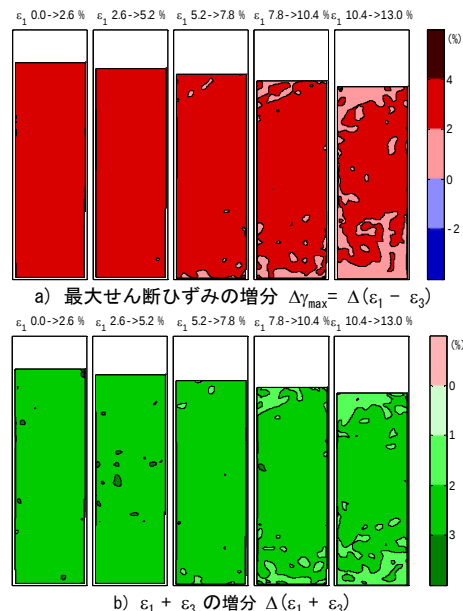


図 6 CD 試験中のひずみ分布 (TC-5)

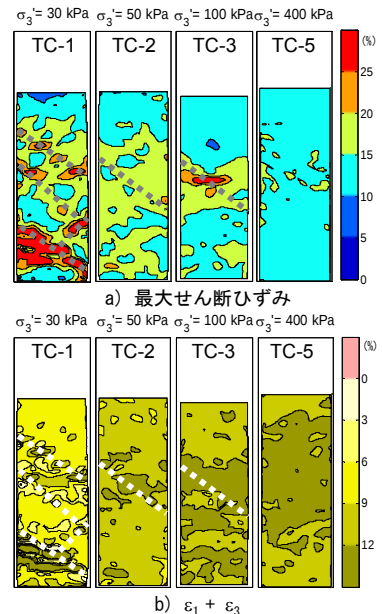


図 7 軸ひずみ 13 % でのひずみ分布