

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

東京大学生産技術研究所 正会員○堤 千花 古関潤一 佐藤剛司

1. はじめに

砂質土の強度変形特性が拘束圧によって変化することは既往の研究により報告されている^{1), 2)}が、データの蓄積が十分でなく、その因果関係については未解明な部分も多い。本研究では拘束圧を 50 kPa から 2400 kPa まで変化させた密な豊浦砂の平面ひずみ圧縮試験を実施し、発揮されるピーク強度の大きさやせん断層の形成される方向に及ぼす拘束圧の影響について特に着目して、既往研究との比較を行いながら検討した。

2. 試験方法

試験には平面観察窓付き中圧平面ひずみ圧縮試験装置を用いた³⁾。供試体は幅 $W=54$ mm, 奥行き $D=80$ mm, 高さ $H=160$ mm の矩形とし、気乾状態の豊浦砂を相対密度が 90 % 程度となるようにモールド内に空中落下させ、湿潤状態にして凍結させることにより作製した。供試体を三軸セル内にセットして解凍後、負圧による拘束圧 30 kPa 下で初期の中間主応力 σ_2 方向の偏差応力 $q_2 (= \sigma_2 - \sigma_3)$ が 30 kPa 程度となるように σ_2 方向の水平変位を抑える拘束板をセットした。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、圧密終了時点での主応力比 $R_0 = (\sigma_1' / \sigma_3')_0$ を 2.2 程度として所定の拘束圧まで異方圧密した。拘束圧としての有効最小主応力 σ_3' を 50, 200, 400, 800, 1600, 2400 kPa にそれぞれ設定し、排水状態で鉛直軸方向にひずみ速度 0.05 %/min. として単調載荷した。拘束板は片側をアクリル製とし、この面と圧力セルの平面観察窓を通して供試体 σ_2 作用面全体の変形過程を 800 万画素のデジタルカメラで記録した。

3. 試験結果

図 1 に各拘束圧における代表的な試験結果として、主応力比 R 、低容量の差圧計を用いて排水量から計測した供試体全体の体積ひずみ ε_{vol} と、外部変位計により計測した供試体全体の最大主ひずみ ε_{1_EXT} との関係を示す。 ε_{1_EXT} は異方圧密終了時点を 0 % として計算しており、体積ひずみは異方圧密終了時点での値を初期値 ε_{vol0} として示してある。図 1 (a) より、拘束圧が 400 kPa まではピーク強度が発揮される ε_{1_EXT} は大きくなるが、ピーク時の主応力比 R_{max} はほぼ等しい。800 kPa 以上の拘束圧下ではピーク強度発揮時の ε_{1_EXT} が同程度となる一方で、 R_{max} は拘束圧が大きくなるほど低下することが分かる。また図 1 (b) より ε_{vol0} は拘束圧が高くなるほど収縮側に大きく、せん断中の体積変化も拘束圧の増大とともに収縮傾向を強く示しており、特に 800 kPa 以上の高拘束圧下においてその傾向が顕著である。このことは R_{max} がこれらの拘束圧下で低下することに対応している。

拘束板のない供試体側面に水平に取り付けた四つの LDT による中間主ひずみの平均値 ε_2 と、二組の非接触式変位計により計測した最小主ひずみ ε_3 の平均値を図 2 および図 3 にそれぞれ示す。図中の凡例に ε_{20} , ε_{30} として示した異方圧密終了時点での ε_2 , ε_3 の値より、拘束板による変形の拘束を受けない ε_3 方向には高圧下ほど収縮側に大きな側方ひずみが生じたことが分かる。図 2 によるとせん断中には各試験で最大 0.35 - 0.70 % の ε_2 が膨張側に生じているが、このひずみは供試体と拘束板との間のベディングエラーによるものであると考えられる。使用したメンブレンの厚さが拘束圧 800 kPa 以下の試験では 0.30 mm, 1600 kPa および 2400 kPa の試験では 0.50 mm であり、端面摩擦除去のために拘束板とメンブレンとの間に設置したグリース層の厚さは 0.12 mm である。供試体の ε_2 方向の奥行き D は 80 mm であるため、計測された ε_2 はグリース層とメンブレンの厚さが片面でそれぞれ 0.14 - 0.28

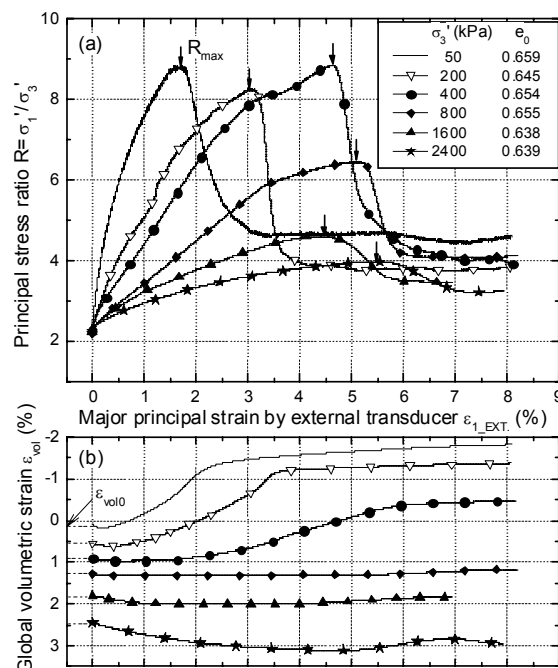


図 1 応力ひずみ関係

平面ひずみ圧縮試験, ピーク強度, 内部摩擦角, せん断層, 拘束圧依存性

〒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

mm ずつ減少したことに起因するものと考えられる。また図 3 より、拘束のない ε_3 方向には供試体の変形により ε_2 と比較して非常に大きなひずみが生じたことが分かる。

図 4 は図 1 の各試験で得られたピーク強度発揮時の内部摩擦角 $\phi_{\text{peak}} = [\sin^{-1}\{(\sigma_1' - \sigma_3')/(\sigma_1' + \sigma_3')\}]_{\text{peak}}$ と拘束圧との関係に、既往の密な砂の三軸圧縮試験あるいは平面ひずみ圧縮試験で得られた結果¹⁾²⁾⁴⁾⁵⁾を重ね合わせたものである。本研究で対象とした拘束圧の範囲では全ての既往研究において ϕ_{peak} が拘束圧の上昇に従って低下しており、本研究で得られた ϕ_{peak} の傾向もこれらと定性的に一致している。しかし本研究の 1600 kPa 以上の拘束圧下における ϕ_{peak} の低下量は既往研究の三軸試験結果と比べて大きく、この違いについては中間主応力の影響なども含め今後も引き続き詳細な検討が必要である。

平均粒径 D_{50} が 0.17 - 0.68 mm の貧配合砂質土／礫質土における既往の平面ひずみ圧縮試験結果より、ピーク強度発揮後に形成されるせん断層の方向 θ は最大応力傾斜角面の方向 $\theta_c = 45 + \phi_{\text{peak}}/2$ (deg.) と伸び縮みのない方向 $\theta_R = 45 + \nu_f/2$ (deg.) の間にあり、拘束圧が高いほど、また粒径が大きいほど θ_R に近い値を示すことが確認されている⁶⁾。ここで ν_f はピーク強度発揮時のダイレイタンシー角 $\nu_f = [-\sin^{-1}\{(\Delta\varepsilon_1 + \Delta\varepsilon_3)/(\Delta\varepsilon_1 - \Delta\varepsilon_3)\}]_{\text{peak}}$ である。図 5 は縦軸に正規化されたせん断層の傾き $Y = (\theta - \theta_R)/(\theta_c - \theta_R)$ 、横軸に供試体の ε_3 方向の幅 W に対する平均粒径 D_{50} の比 D_{50}/W をとって以上の関係をまとめた文献 6) のグラフに、本研究で得られた豊浦砂の試験結果をプロットしたものである。 θ はデジタル写真から読み取った。また $\Delta\varepsilon_3$ は ε_2 の影響が十分に小さいものとして無視し、 $\varepsilon_{1\text{-EXT}}$ と ε_{vol} の計測値から $\Delta\varepsilon_3 = \Delta\varepsilon_{\text{vol}} - \Delta\varepsilon_{1\text{-EXT}}$ として求めた。図 5 より本研究で対象とした粒径の小さい豊浦砂では θ_c に近い方向でせん断層が形成され、文献 6) の既往データの示す傾向と概ね一致したが、せん断層の方向に及ぼす拘束圧の影響は明確に見られなかった。

4. まとめ

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ピーク応力比および内部摩擦角は拘束圧が 400 kPa まではほぼ等しく、800 kPa 以上になると拘束圧が大きいほど低下し、貧配合砂質土における既往研究と同様の傾向を得た。せん断層は拘束圧の違いによらず最大応力傾斜角面に近い方向で形成された。

<参考文献> 1) 三浦, 山内: 砂のせん断特性に及ぼす粒子破碎の影響, 土木学会論文報告集, 第 260 号, pp. 109 - 118, 1977 2) Fukushima, S. and Tatsuoka, F.: Strength and Deformation Characteristics of Saturated Sand at Extremely Low Pressures, Soils and Foundations, Vol. 24, No.4, pp. 30 - 48, 1984 3) 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局所変形挙動, 第 42 回地盤工学研究発表会, 2007 4) Bishop, A. W.: The Strength of Soils as Engineering Materials, Geotechnique, Vol. 16, No. 2, pp. 89 - 130, 1966 5) Lee, K. L. and Seed H. B.: Drained Strength Characteristics of sands, Journal of Soil Mechanics Foundations Division, ASCE, Vol. 93, No. SM6, pp. 117 - 141, 1967 6) Yoshida T., and Tatsuoka F.: Deformation property of shear band in sand subjected to plane strain compression and its relation to particle characteristics, Proc. 14th ICSMFE, Hamburg, 1, pp. 237 - 240, 1997

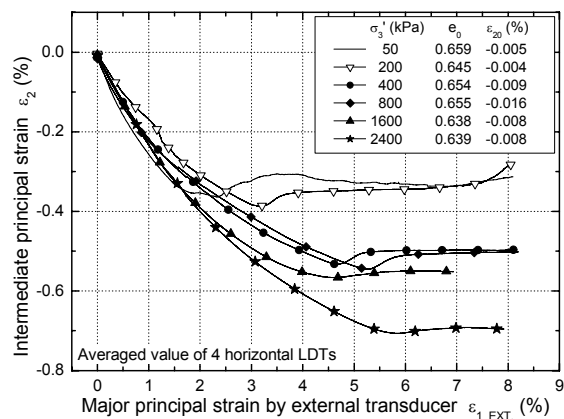


図2 中間主ひずみ

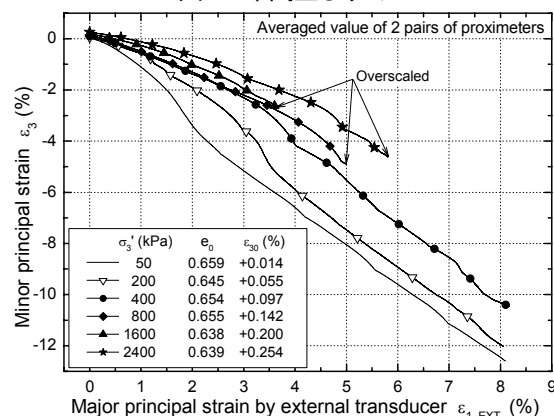


図3 最小主ひずみ

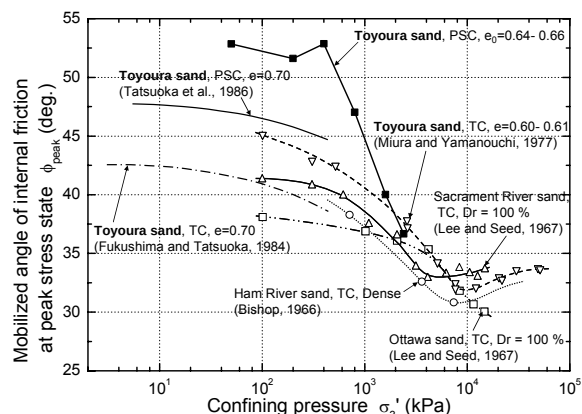


図4 ピーク応力状態における内部摩擦角と拘束圧との関係

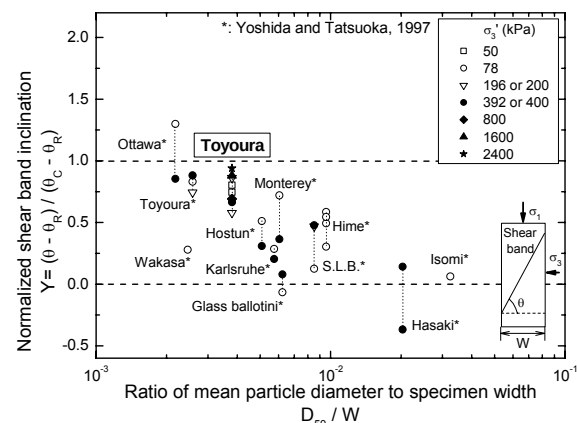


図5 せん断層の方向