

大型中空ねじりせん断試験機による平面ひずみ試験

山口大学大学院 学生会員○長尾孝幸 豆田展崇 高橋 徹
山口大学工学部 正 会 員 中田幸男 兵動正幸 村田秀一

1. まえがき

中空ねじりせん断試験機は供試体形状に起因して、半径方向のせん断応力・せん断ひずみの非一様性、また供試体内の圧力差に起因して要素性を満足した上で再現できる応力域には制限があるなどの問題がある。本研究グループでは、供試体を大きくし、供試体を相対的に薄肉にすることで、これらの問題を改善し、従来の標準供試体よりも要素性を満足させている¹⁾。また供試体の大型化により、供試体内空部にレーザー変位計(LDS)が設置可能となり、供試体側方変位計測システムを開発することで、供試体の詳細な挙動を把握することが可能となった²⁾。また、今回この供試体側方変位計測システムを適用した大型中空ねじりせん断試験機を用いて平面ひずみ状態の再現を試みた。これまで、中空ねじりせん断試験機による平面ひずみ試験は内径の測定精度に起因して主応力方向が回転する単純せん断に限られており^{3),4)}、供試体側方変位計測システムはそれに限らない平面ひずみ試験を可能にする。ここでは大型中空ねじりせん断試験機による主応力方向が固定された二つの制御方法により平面ひずみ試験を行い、その条件下での砂のせん断特性について検討を行う。

2. 大型中空ねじりせん断試験機

図1に本研究で用いた供試体寸法高さ30cm、内径25cm、外径30cmの大型中空ねじりせん断試験機を示す。また供試体内空部とセル外部に2基ずつ計4基のLDSによって、供試体下端から10cm、20cmの供試体側方変位を計測している。そして、圧密・せん断中20秒おきに45°回転させ、一つのLDSにより供試体円周を8ヶ所計測し、これらの結果を平均して供試体の半径を算出している。

3. 試料および試験方法

本研究では豊浦標準砂を用い、相対密度を密詰80%、緩詰55%を目標に空中落下法にて作製した。試験方法として、せん断過程はひずみ制御方式を用いて排水せん断試験を行った。供試体を平面ひずみ状態に保つために、LDSにより半径方向ひずみ ε_r を直接計測し、 $\varepsilon_r = 0$ (図2) になるように内外圧を増減させることで半径方向応力 σ_r を制御している。また、せん断時において主応力方向角 $\alpha_\theta = 45^\circ$ 一定とするために、1)円周方向応力 σ_θ 一定制御方法、2)最小主応力 σ_3 一定制御方法を試みた。

4. 試験結果

図3に相対密度83%の供試体で σ_θ 一定試験と σ_3 一定試験における3主応力-ねじりせん断ひずみ-半径方向ひずみ関係を示す。図3(a)において σ_θ 一定試験は ε_r が単調に収縮し続ける傾向を示した。それに伴い、 σ_r は平面ひずみ制御が起動され減少傾向を示した。図3(b)より、 σ_3 一定試験は初期において膨張を示し、その後収縮傾向に転じ $\varepsilon_{z\theta} = 3 \sim 8\%$ は、比較的平面ひずみ状態に制御できた。 σ_r については初期の膨張を抑制するために急激に増加していたことがわかる。しかし、砂が大きな収縮変形(塑性変形)を起こすと、除荷しても弾性体の

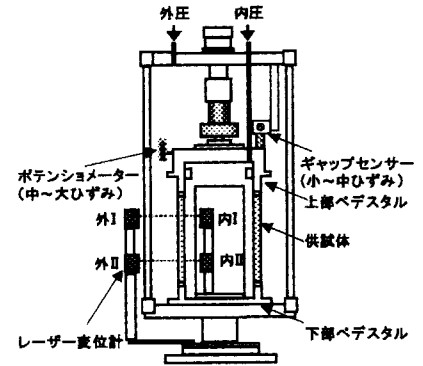
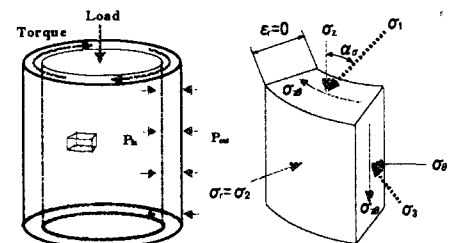
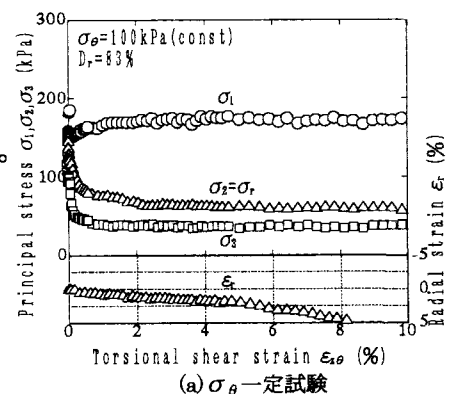
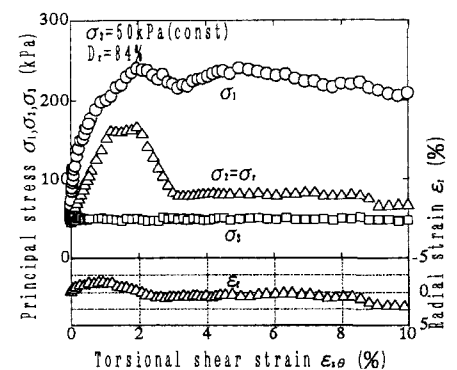


図1. 大型中空ねじりせん断試験機

図2. 平面ひずみ条件と供試体に
載荷される外力(a) σ_θ 一定試験(b) σ_3 一定試験図3. 3主応力-ねじりせん断ひずみ
-半径方向ひずみ関係

ように元の形には戻らないため、収縮変形を許すと比較的平面ひずみを制御しにくい状態となる。 σ_3 一定試験のように膨張傾向にある場合は σ_r を加圧することで膨張を抑えることができる。これより、せん断中にやや膨張傾向にある状態を保てれば平面ひずみ制御をしやすいと考えられる。図4に緩詰供試体における σ_3 一定制御試験の結果を示す。図3(b)と比較すると緩詰供試体は密詰供試体より膨張量は小さく、滑らかな挙動をとっている。また、密詰と同様に初期の膨張傾向以降は比較的良い精度で平面ひずみ状態が再現できている。図5(a)、(b)は密詰および緩詰供試体の主応力比-最大せん断ひずみ-体積ひずみ関係、図6は内部摩擦角 ϕ -間隙比 e_1 の関係を示しており、龍岡、Pradhanら³⁾による平面ひずみ圧縮試験結果と中空ねじり単純せん断試験結果と比較したものである。ここで、最大せん断ひずみ γ_{max} は最大主ひずみ ϵ_1 から最小主ひずみ ϵ_3 を減じたものである。また、LHCPSTSは大型中空平面ひずみねじりせん断試験、HCTSは供試体寸法高さ $H=20\text{cm}$ 、外径 $D_o=10\text{cm}$ 、内径 $D_i=6\text{cm}$ を用いた中空中空ねじりせん断試験、PSCは直方供試体を用いた平面ひずみ圧縮試験、HCTSSは中型供試体による中空ねじり単純せん断試験を示す。図5(a)の密詰の結果において、LHCPSTS(σ_θ 、 $\sigma_3=\text{const}$)は他の研究機関と比較して明確なピークは見られなかった。一般的にPSCは小さいひずみ段階でピークに達するが、 σ_θ 一定試験、 σ_3 一定試験結果はともに他の試験結果に比べて大きいひずみでピークに達している。また、図3より制御方法による中間主応力 $\sigma_2(=\sigma_r)$ 及び半径方向ひずみ ϵ_r に違いがみられたが、両試験の応力ひずみ関係には顕著な違いは見られず、またLHCPSTS($\sigma_3=\text{const}$)においては他の試験結果より体積収縮が大きいことがわかる。これはせん断に伴う負のダイレイタンス成分と拘束圧の増加による成分が足しあわされた結果、大きい収縮が生じたと考えられる。図5(b)よりPSCとHCTSSより少しながら小さい主応力比であることがわかる。また、緩詰供試体ではいずれの試験も明確なピークは見られない。これは密な供試体に比べて、せん断層による局所変形が小さいためである。図6より、 σ_θ 一定試験、 σ_3 一定試験(LHCPSTS)による ϕ は、HCTSSの ϕ とほぼ等しく、同様の強度をもつことがわかる。また、LHCTSの $\alpha_o=45^\circ$ 、 $b=0.25\text{const}$ 、 $p=100\text{kPa}$ 一定試験の ϕ はHCTSSの ϕ と等しい結果となった。PSC($\alpha_o=45^\circ$)の ϕ は σ_θ 一定試験、 σ_3 一定試験の ϕ よりも 2° ほど大きい値を示している。

5. まとめ

今回、大型中空ねじりせん断試験機を用いて砂の平面ひずみ状態を再現するために、 σ_θ 一定制御、 σ_3 一定制御を試みた結果、応力-ひずみ関係においては大きなひずみ段階でピークに達しているものの、強度は中空ねじり単純せん断試験結果とほぼ等しい、ということがわかった。

参考文献 1) 林勝彦、中田幸男、兵動正幸、村田秀一、野田勇一：大型中空ねじりせん断試験システムの開発および有用性の検討、第35回地盤工学研究発表会(2000)、2) 野田勇一、中田幸男、兵動正幸、村田秀一、南幸孝、長尾孝幸：レーザー変位計を用いた中空円筒供試体における側方変位計測、第37回地盤工学研究発表会(2002)、3) Tej B.S. Pradhan, Fumio Tatsuoka: Simple shear testing on sand in a torsional shear apparatus, Soil and Foundations, Vol.28, No.2, pp.95-112, (1988)、4) Tej B.S. Pradhan, Fumio Tatsuoka: Strength and deformation characteristics of sand in torsional simple shear, Soil and Foundations, Vol.28, No.3, pp.131-148, (1988)、5) 龍岡文夫、ブラダン・テージ：中空ねじりによる砂の自動単純せん断試験、第22回土質工学研究発表会(1987)

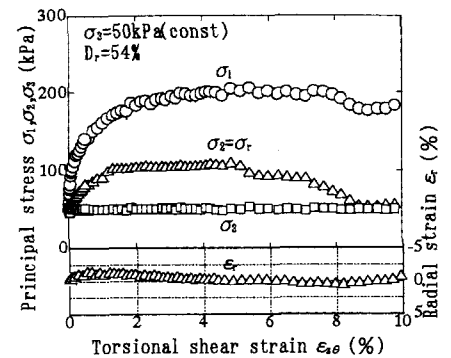
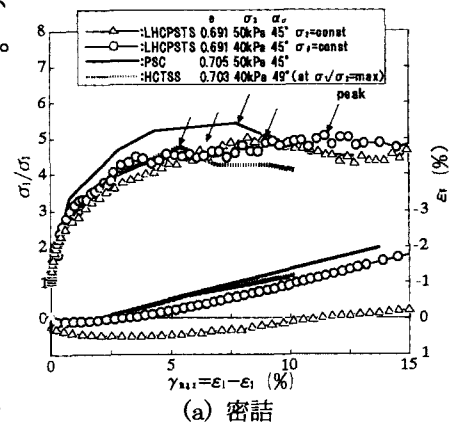
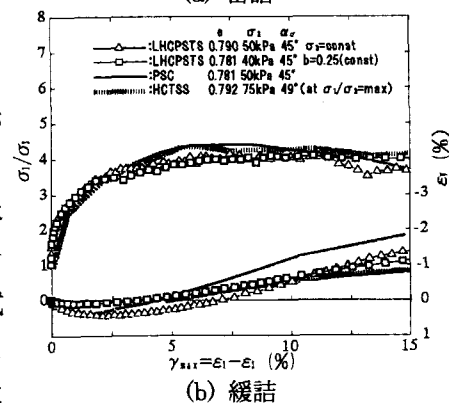


図4. 3主応力-ねじりせん断ひずみ-半径方向ひずみ関係



(a) 密詰



(b) 緩詰

図5. 主応力比-最大せん断ひずみ-体積ひずみ関係

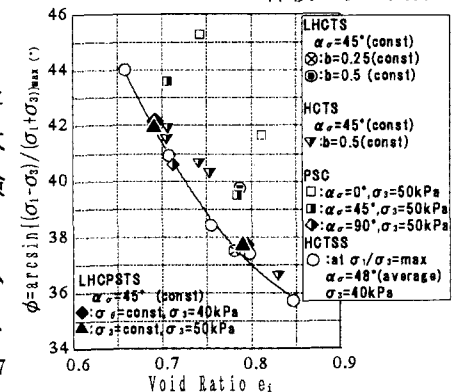


図6. 内部摩擦角-間隙比関係