

大型中空ねじりせん断試験システムの開発

山口大学工学部 正会員 中田幸男 兵動正幸 村田秀一
山口大学大学院 学生会員 ○林勝彦 野田勇一

1. はじめに

土は非線形でかつ異方的な物性をもっている材料である。土のせん断特性を室内試験機で調べるには、その土が実際に置かれた応力・ひずみ状態を供試体にできる限り再現することが望まれる。中空ねじりせん断試験機は 3 つの直応力と 1 つのせん断応力を供試体に独立に載荷可能であり地盤材料の複雑な変形、強度特性を把握する上で有用な試験機といえる。多くの研究者^{2,4,6)}がこれまで実験に用いてきた中空ねじりせん断試験機（高さ $h=20\text{ cm}$ 、外径 $d_o=10\text{ cm}$ 、内径 $d_i=6\text{ cm}$ 、半径比 $r_i/r_o=0.6$ ）では、内外径比による制約からある程度試験条件が制限されることになる。この制限により供試体の半径を大きく供試体厚さを相対的に薄肉にすることで、緩和されるといえる。また、内空部が大きくなることで計測器などを設置することが可能となり、せん断中の供試体の変形がより詳細に把握することができるため中空ねじりせん断試験供試体の大型化は意義があるといえる。以上のことを踏まえ本研究では、大型中空ねじりせん断試験システムの開発を行うとともに試験能力および試験結果の客観性の検討を行った。また、ねじりせん断応力の非一様性についても考察した。

2. 大型中空ねじりせん断試験機の概要

本研究で開発を行った大型中空ねじりせん断試験機（高さ $h=30\text{ cm}$ 、外径 $d_o=30\text{ cm}$ 、内径 $d_i=25\text{ cm}$ 、半径比 $r_i/r_o=0.83$ ）を試験機 A、従来から用いている²⁾中空ねじりせん断試験機（高さ $h=20\text{ cm}$ 、外径 $d_o=10\text{ cm}$ 、内径 $d_i=6\text{ cm}$ 、半径比 $r_i/r_o=0.6$ ）を試験機 B とする。今回開発した試験機 A の概要を図 1 と表-1, 2 に示す。試験機 A の最大の特徴は供試体寸法が試験機 B に比べ大きくなった点である。また、これによりせん断ひずみ・せん断応力の非一様性の改善だけでなく、供試体内空部と外セルの外側にレーザー変位計を設置することで、圧密・せん断中の供試体半径方向の変形が直接計測できるようになっている。

3. 中空ねじりせん断試験における非一様性

試験機 B は半径比が $r_i/r_o=0.60$ であるのに対し試験機 A は $r_i/r_o=0.83$ となり半径比がより 1 に近い。せん断ひずみ分布の非一様性は供試体の半径比 (r_i/r_o) に比例するため、せん断変形が進むほど供試体内・外側のせん断ひずみの差 $\Delta\gamma = \gamma_o - \gamma_i$ は大きくなる。そのためせん断ひずみの非一様性は、半径比をより 1 に近づけることのみで小さくすることが可能となる。図 2 に試験機 A、B の供試体内・外側におけるせん断応力の比 (τ_i/τ_o) とせん断ひずみ (γ) の関係を示す。これは福島²⁾によって示されたように供試体の変形に伴ってせん断応力の半径方向分布の非一様性の程度が変化する様子を、応力 - ひずみ関係に双曲線関数を用いることで示したものである。 τ_i/τ_o は 1 に近いほど供試体内・外でのせん断応力差が少ないといえる。ここで γ は供試体の平均半径 $r=(r_i+r_o)/2$ における値である。供試体の変形が微小では $(\tau_i/\tau_o)=(r_i/r_o)$ に近い値をとるが、変形が進むと τ_i/τ_o の値は半径比 r_i/r_o だけでは表せなくなる。さらに変形が進み土の応力-ひずみ関係が完全塑性的 ($\tau_i=\tau_o=\text{const.}$) となるとせん断応力の分布の非一様性はなくなり τ_i/τ_o の値は 1.0 となる。試験機 A、B ともにせん断変形の増加に伴いせん断応力の分布は一様に近づ

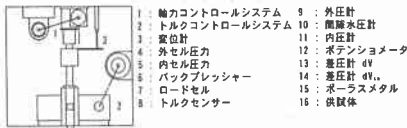


図 1 試験機 A の概要

表-1 供試体寸法

試験機	A	B
高さ $h\text{ cm}$	30	20
外径 $d_o\text{ cm}$	30	10
内径 $d_i\text{ cm}$	25	6
半径比 r_i/r_o	0.83	0.60

表-2 測定項目、測定機器と能力

測定項目	測定計器	試験機 A		試験機 B	
		最大	最小	最大	最小
トルク	トルクセンサー	$\pm 50\text{ kN}\cdot\text{cm}$	$\pm 1\text{ N}\cdot\text{cm}$	$\pm 2\text{ kN}\cdot\text{cm}$	$\pm 1\text{ N}\cdot\text{cm}$
軸荷重	ロードセル	$\pm 10\text{ kN}$	$\pm 1\text{ N}$	$\pm 2\text{ kN}$	$\pm 1\text{ N}$
外圧	圧力計	1000kPa	0.1kPa	500kPa	0.5kPa
内圧	圧力計	1000kPa	0.1kPa	500kPa	0.5kPa
潤滑水圧	圧力計	1000kPa	0.1kPa	500kPa	0.5kPa
軸変位	変位計	10cm	0.01mm	4cm	0.01mm
回転変位	ポテンシオメータ	150°	0.01°	40°	0.01°
体積変化	差圧計	1000cc	0.02cc	50cc	0.02cc
内容積変化	差圧計	2000cc	0.05cc	150cc	0.05cc

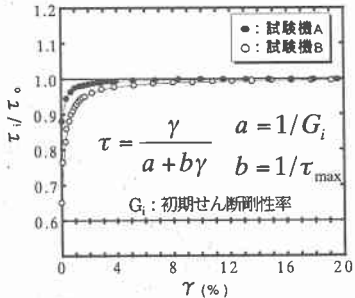
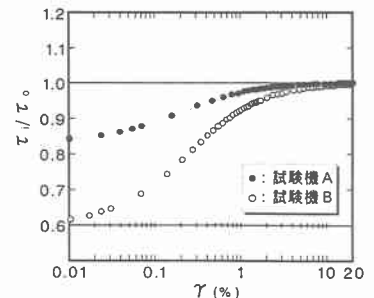


図 2 τ_i/τ_o - γ 関係 (A, B) 比較

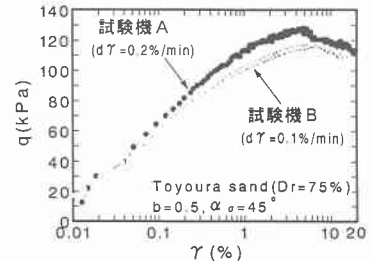
くことがいえるが、試験機 B に比べ試験機 A のほうがより早い段階のひずみでせん断応力が一樣になることがわかる。

4. 実験結果

実験に用いた試料は豊浦砂で、試験機 A は相対密度 $Dr=75\%$ を試験機 B は $Dr=60, 75, 85\%$ をそれぞれ 目標に空中落下法にて供試体を作成した。試験は排水条件下で拘束圧 $p_c=100\text{kPa}$ 一定、中間主応力係数 $b=0.5$ 一定で行った。図 4 (a) の $\tau_i/\tau_o - \log \gamma$ 関係は図 3 の関係を書き直したものである。図 4 (b) において試験機 A, B の $q - \log \gamma$ 関係の軌跡が異なる結果が得られたのは、供試体の大型化によるせん断応力分布の非一様性改善による影響ではないかと考えられる。図 5 に応力比-せん断ひずみ-体積ひずみ関係を示している。(a) は主応力方向角 $\alpha_s=45^\circ$ 一定における試験機 A, B を比較したものでピーク時での応力比は試験機 B のほうが高く、早い段階のひずみ変位でピークをむかえている。体積ひずみの増加率は試験機 A, B 間に大きな差が生じる結果となった。これは供試体寸法の外径/高さ比の違いや破壊後の試験機 A, B 間の供試体高さに対するせん断層の割合の違いが原因として考えられる。試験機 A の試験システムが正常に作動することを確認するため、(b) は主応力方向角 α_s を $\pm 45^\circ$ として行った場合、(c) は $\alpha_s=45^\circ$ 一定でひずみ速度 $d\theta$ を $0.04/\text{min}$ と $0.2/\text{min}$ に変えて行った試験結果を示している。この図からねじり方向を変えても応力・ひずみに影響は無くほぼ同一の挙動を示し、試験システムが正常に作動していることを示している。ひずみ速度を速くするとピーク時の応力はほぼ一致したが体積ひずみ量がやや減少する結果となった。図 6 にねじりせん断応力のみを増加させる試験で得られた破壊時の内部摩擦角 ϕ_p と自立時の供試体間隙比 e の関係を示す。試験機 B の試験結果(図中▲)と比較すると、試験機 A (図中●) のほうが破壊時の内部摩擦角 ϕ_p が高い値となる結果となった。しかし同じ条件で Tatsuoka (1986) から得られた曲線(図中○)と比較した場合ほぼ一致する結果となり、 ϕ_p は他の研究機関³⁻⁶⁾と試験機 B の結果のほぼ平均的な値を示しており客観性の高い結果が得られた。

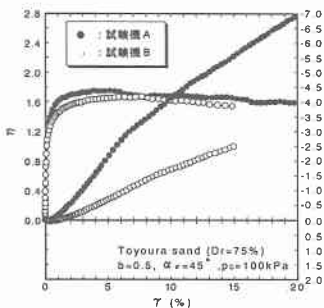


(a) $\tau_i/\tau_o - \gamma$ 関係

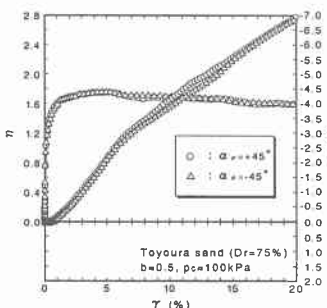


(b) $q - \gamma$ 関係

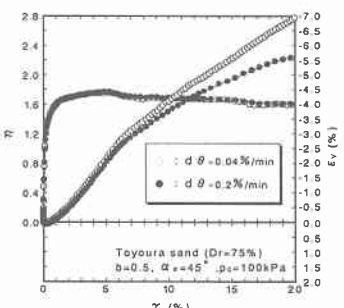
図4 せん断初期の非一様性の程度と試験結果との比較



(a) 試験機 A, B の比較



(b) ねじり方向の違い



(c) ひずみ速度の違い

図5 応力比-せん断ひずみ-体積ひずみ

5. まとめ

供試体寸法、高さ 30cm 外径 30cm 内径 25cm (半径比 0.83) の大型中空ねじりせん断試験システムを開発し、その客観性の検討を行った。その結果、排水せん断試験結果から求められた破壊時の内部摩擦角と初期間隙比の関係は従来の研究成果¹⁾⁻⁶⁾と比較的良好な対応関係にあり、試験装置は客観性の高い試験結果を与えることが確かめられた。

参考文献 1) 福島伸二：ねじりせん断試験による砂の変形・強度特性の基礎的研究 東京大学博士論文 (1982) 2) 中田孝男、山本修三、安部昌弘、村田秀一、兵動正幸：自動制御・計測可能な中空ねじりせん断試験装置の製作とひずみ・体積ひずみへの適用 土木学会論文集 No. 505/III-29, pp. 329~332, (1994.12) 3) Gutierrez: Behavior of sand during rotation of principal stress directions, D. Eng. thesis, Tokyo Univ. (1989) 4) Miura, K.: Deformation behavior of anisotropic dense sand under principal stress axes rotation, Soils and Foundations, Vol. 26, No. 1, pp. 36-52, (1986) 5) 鈴木孝一：初期構造異方性を有する砂の排水せん断挙動特性 土木学会論文集 No. 481/III-25, pp. 117-124, (1993) 6) Tatsuoka, F.: Failure and deformation of sand in torsional shear, Soils and Foundations, Vol. 26, No. 4, pp. 79-97, (1986)

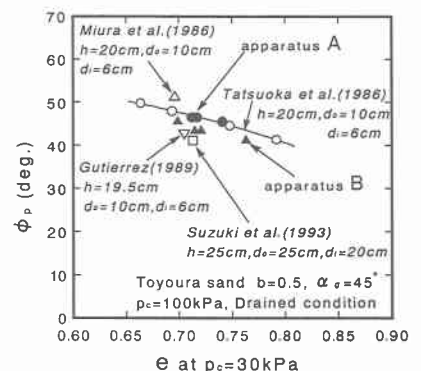


図6 破壊時の内部摩擦角と自立時の間隙比