

# 土のねじり単純せん断試験 (Ⅲ)

## —砂とガラスビーズの強度の拘束圧依存性—

Stress—Strain Behavior of Soil by Torsional Simple Shear Test (Ⅲ)

—Effects of Confining Pressure on Torsional Simple Shear Strength of Sand and Glass Beads—

福 島 伸 二\*・龍 岡 文 夫\*

Shinji FUKUSHIMA and Fumio TATSUOKA

### 1. ま え が き

これまで土の強度は三軸試験により主に調べられてきた。これにより土の強度は土の密度、拘束圧、排水条件などにより異なることがわかっている。しかし、土の応力・ひずみ関係は非線型で異方的であるため、土が原位置で実際に受けている応力・ひずみ関係により、その強度・変型特性は著しく異なるのが普通である。このため、土の強度は原位置により近い応力・ひずみ状態の下で試験を行って求める必要がある。したがって主応力を制御して間接的にせん断応力を供試体に加える三軸試験機では実際に問題となる原位置の応力・ひずみ状態としては限られたものしか再現できない。そこで、ここでは三軸試験機と比較して問題となる原位置により近い応力・ひずみ状態を供試体に再現できるねじり単純せん断試験機を用いて砂の排水せん断強度の拘束圧依存性について調べ三軸圧縮試験により求めた強度との比較を行った。またガラスビーズの排水せん断強度の拘束圧依存性も調べ砂の場合と比較を行った。その結果、粒子が角ばっている豊浦砂の内部摩擦角は拘束圧に強く依存するが、粒子が球形であるガラスビーズの内部摩擦角は拘束圧に全く依存しないことがわかった。

### 2. 実 験 方 法

用いた供試体は外径 10 cm、内径 6 cm、高さ 20 cm の中空円筒形である。試料は豊浦砂（比重  $G_s = 2.64$ 、平均粒径  $D_{50} = 0.14$  mm）と、この豊浦砂の平均粒径に近い粒径範囲をもち完全球形のガラスビーズ（ $G_s = 2.468$ 、粒径範囲  $d = 0.105 \sim 0.210$  mm）である。供試体の作製は空気乾燥状態にある試料を漏斗により雨を降らすように供試体作製用モールド内に自由落下させて行った。供試体の間隙内の空気を二酸化炭素（ $CO_2$ ）を入れかえ、さらにこれを脱気水と入れかえ、背圧  $2.0$  kgf/cm<sup>2</sup> を加え完全に飽和させた。次にこれを等方密圧（ $\sigma_a = \sigma_r = \sigma_c$ ）してから排水状態でひずみ制御（ひずみ速度  $\tau_{at} \approx 0.24$  %/min）でせん断応力を加えた（等方圧密応力  $\sigma_c$  は  $0.5, 1.0, 2.0$  kgf/cm<sup>2</sup>）。このときせん断中の主応力は

$$\sigma_1 = \sigma_c + \tau_{at}, \quad \sigma_2 = \sigma_c, \quad \sigma_3 = \sigma_c - \tau_{at}$$

であり、最大主応力方向は鉛直方向（ $\sigma_a$  方向）から  $\psi = 45^\circ$  傾いており、一定である。またせん断中垂直応力（ $\sigma_a, \sigma_r$ ）は変化させないので平均主応力は一定で  $p = 1/3$

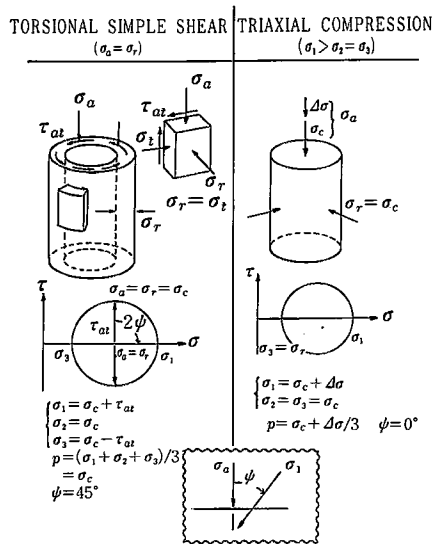


図1 ねじり単純せん断試験と三軸圧縮試験の比較

$(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) = \sigma_c$  である。中間主応力の最大・最小主応力に対する相対的な大きさを表す中間主応力係数  $b = (\sigma_2 - \sigma_3) / (\sigma_1 - \sigma_3)$  は  $0.5$  である。このねじり単純せん断試験（等方圧密後せん断）と三軸圧縮試験における供試体の応力状態を図1に示す。

### 3. 実 験 結 果

図2に中位の密度の砂（密度はせん断開始時の間隙比  $e_i = V_v/V_s = G_s/\rho_d - 1$  で表す。ここで  $V_s, V_v$  : 供試体の砂粒子部と間隙部の容積、 $\rho_d$  : 供試体の乾燥密度）の拘束圧  $\sigma_c = 0.5, 1.0, 2.0$  kgf/cm<sup>2</sup> におけるせん断中の応力比（ $\tau_{at}/\sigma_a$ ）と体積ひずみ（ $\epsilon_v$ ）の変化の典型的な例を示した。このとき体積ひずみ  $\epsilon_v = (\Delta V/V) \times 100$  (%) は体積が収縮する場合を止としている。この図からほとんど同じ密度であっても砂の応力比—ひずみ曲線、体積変化特性は拘束圧により異なり拘束圧が低いほどより大きな応力比を示し、体積変化はより膨張する傾向が大きくなることがわかる。これらの傾向は三軸試験の結果と同様である。次にいろいろな密度の砂について得られた応力比—ひずみ曲線から最大の応力比（ $\tau_{at, max}/\sigma_a$ ）より内部摩擦角  $\phi_d$  を求め、初期間隙比  $e_i$  に対して拘束圧ご

\* 東京大学生産技術研究所 第5部

研究速報

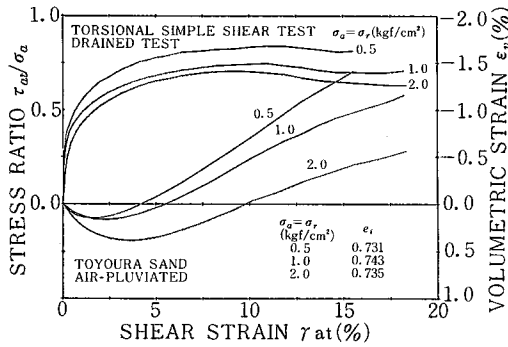


図2 砂の  $\tau_{d1}/\sigma_a$ ,  $\epsilon_v \sim \gamma_{d1}$  関係

とにプロットしたのが図3である。この  $\phi_d$  はせん断応力 ( $\tau_{d1} \cdot \max$ ) 時の Mohr の応力円の座標原点を通る接線が水平となす角度であり  $\phi_d = \sin^{-1}(\tau_{d1} \cdot \max/\sigma_a)$

より計算したものである。この図から拘束圧により  $\phi_d - e_i$  関係は異なり、同じ密度でも低拘束圧ほどより大きな  $\phi_d$  に、また同じ拘束圧では密度が大きいくほど、より大きな  $\phi_d$  になることがわかる。これは砂のせん断抵抗が主に粒子間の摩擦とかみ合わせ、体積変化に起因しているものと考えられるが、密な砂ほど粒子間のかみ合わせの程度が大きく、体積が膨張するために内部的に消費されるエネルギーがより大きいため強度が大きくなるからであろう。この図からそれぞれ間隙比  $e_i = 0.80$  (ゆるい砂) と  $e_i = 0.65$  (密な砂) における  $\phi_d$  を破壊時の平均主応力に対してプロットし、 $\phi_d$  が拘束圧から受ける影響をみたのが図4である。図中には比較のために三軸圧縮試験 (供試体の直径 7.5cm, 高さ 15cm, 端面はポラス・ストーン) により求めた  $\phi_d$  もプロットしてある。この図から同じ拘束圧、同じ密度においてねじり単純せん断による  $\phi_d$  は三軸圧縮による  $\phi_d$  より大きい、拘束圧が大きくなると両者の差は小さくなる傾向があるようである。またねじり単純せん断における  $\phi_d$  は低拘束圧においてかなり大きな値を示している。このように両試験における  $\phi_d$  には差があるが、両試験の間には供試体の形状や寸法、供試体内の応力・ひずみの一様性の程度、中間主応力の大きさ、せん断型式 (直接せん断か間接せん断か)、異方性の影響の仕方などの相違があるので、 $\phi_d$  はこれらの影響を受けて異なるのであろう。すなわち  $\phi_d$  は一般的には下式で表せるであろう。

$$\phi_d = \phi_d(e_i, \text{pat failure}, \sigma_2, \text{inherent anisotropy})$$

ねじり単純せん断では中間主応力は三軸圧縮におけるものと異なり (図1参照)、 $b$  値から考えると平面ひずみ試験 ( $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ ) に近いといえる。そこで Oda et al. (1978)<sup>11</sup> が行った平面ひずみ試験の結果と比較してみたのが図5である。Odaらの結果によると砂では一般に同じ密度の供試体であっても、せん断の方向で強度、体積変化、剛性などが異なる。これは砂粒子は完全に球形ではないため堆積するときその長軸方向がある方向に卓越して向いて堆積し、粒子間の接触面の方向が水平方向に卓越するため、強度・変形特性に異方性をもつため

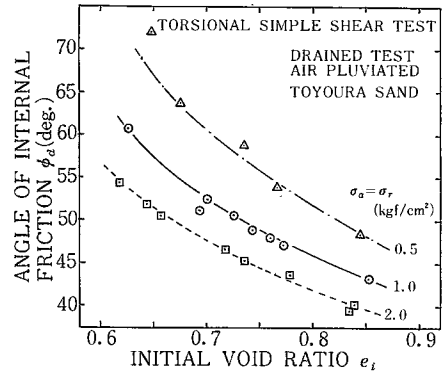


図3 砂の内部摩擦角と拘束圧の関係

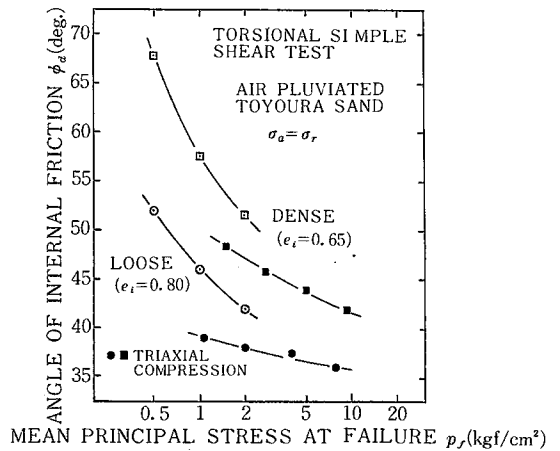


図4 内部摩擦角と拘束圧の関係 (砂)

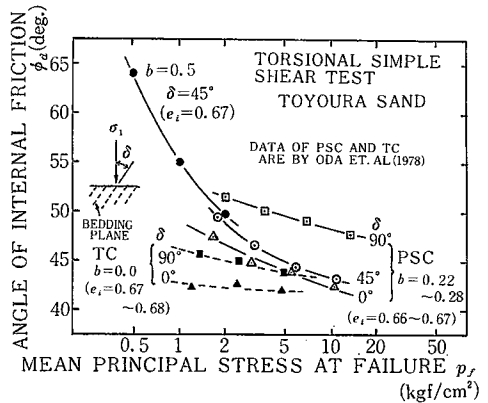


図5 内部摩擦角と拘束圧の関係 (砂)

あると説明されている (Oda, et al. (1978)<sup>11</sup>)。図5に示するのは供試体作製時の試料の堆積面と最大主応力方向とがなす角度 ( $\delta$ ) をいろいろ変えて砂の平面ひずみ試験 (主応力制御,  $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3, \epsilon_2 = 0$ ) と三軸圧縮試験での  $\phi_d$  を求めたものである。なお、ねじり単純せん断では  $\delta = 45^\circ$  である。このことから、ねじり単純せん断による  $\phi_d$

の値は平面ひずみで  $\delta = 45^\circ$  のときの  $\phi_d$  に近いことが予測されるが、実際図5でも、そのようになっている。すなわち  $\delta = 45^\circ$  となっているねじり単純せん断 (TSS) における  $\phi_d$  と、一般の  $\delta = 90^\circ$  である三軸圧縮 (TC) における  $\phi_d$  は主に次の理由によって異なっている。

- (1) TSSでは  $\delta = 45^\circ < 90^\circ$  であるから、これにより  $\phi_d$  は小さくなる。
- (2) TSSでは  $b = 0.5 > 0.0$  であるから、これにより  $\phi_d$  は大きくなる。

しかし、今回の実験において両者は必ずしも上の(1)、(2)はキャンセルせず、同じ破壊時の平均主応力の値に対して、TSSでの  $\phi_d$  がTCの  $\phi_d$  より大きい。一方  $\delta = 45^\circ$  のTSSと平面ひずみ試験とでは上の2つの要因が互いに一致しているので、両者の  $\phi_d$  が一致しているのであろう。この原因として試験機自身の精度上の問題があるかもしれないので、ねじり単純せん断試験におけるガラスビーズの内部摩擦角の拘束圧依存性について調べた。これまでに吉越 (1971)<sup>2)</sup> が三軸圧縮試験で、小田・西<sup>3)</sup> (1978) が平面ひずみ試験で、それぞれガラスビーズの内部摩擦角には拘束圧依存性がほとんどないことを示している。そこで、この実験はガラスビーズの内部摩擦角が本質的に拘束圧依存性がないものならねじり単純せん断試験機によるガラスビーズのせん断試験が一種の検定になるので実験したものである。図6はガラスビーズの供試体のせん断中の応力比 ( $\tau_{at}/\sigma_a$ ) と体積ひずみ ( $\epsilon_v$ )

の典型的な例である。これは不連続的にサンプリングしたデータより計算したため細かな変動を必ずしも忠実にとらえていないが、ガラスビーズに加わるせん断応力はせん断初期を除き鋸状に上・下に変動していることがわかる。これはおそらく供試体内で局部的な破壊が全体的な変形の進行となりやすいためと考えられる。またせん断応力の変動に対して体積変化もやや変動しているのがわかる。このようにせん断応力が変動しているので、 $\phi_d$  は鋸状の応力比-ひずみ関係を包絡するような仮想的な曲線の最大の応力比 ( $\tau_{at, \max}/\sigma_a$ ) より計算して求めた。このようにして各拘束圧に対して求めた  $\phi_d \sim \epsilon_i$  関係から  $\epsilon_i = 0.628$  (ゆるい),  $\epsilon_i = 0.546$  (密) における  $\phi_d$  を読み取り、破壊時 ( $\tau_{at, \max}/\sigma_a$ ) の平均主応力に対してプロットしたのが図7である。この図には、吉越の三軸圧縮による  $\phi_d$ 、小田・西の平面ひずみによる  $\phi_d$  もプロットしてある。このうち小田・西の  $\phi_d$  は彼らの文献の図5から読み取った値を中間主応力  $\sigma_2$  が未知なので  $b = 0.5$  と仮定して平均主応力を求めてプロットしたものである。この図で  $\phi_d$  の値そのものを比較することはガラスビーズの粒子径、粒度分布が必ずしも同じでないので重要でないが、 $\phi_d$  に及ぼす平均主応力の影響をみると、ねじり単純せん断による  $\phi_d$  は、三軸圧縮、平面ひずみの場合と同様に拘束圧に対してほぼ一定と考えてよいようである。したがって、ねじり単純せん断は砂とガラスビーズどちらに対しても三軸圧縮、平面ひずみと同様の傾向を示しており、今回用いたねじり単純せん断試験の精度上の問題はないといえよう。

次に強度の拘束圧依存性のある砂とそうでないガラスビーズの体積変化特性の相違から砂はなぜ拘束圧により  $\phi_d$  が異なるのか考えてみる。せん断ひずみ  $\gamma_{at} = 3\%$ 、 $6\%$  のときの砂の体積ひずみと間隙比 ( $\epsilon_i$ ) の関係を求め、その平均曲線から  $\epsilon_i = 0.80$  (ゆるい砂) と  $\epsilon_i = 0.65$  (密な砂) に対するそれぞれ体積ひずみを平均主応力に対してプロットしたのが図8(a)である。図8(b)には同様にして求めたガラスビーズの関係を示してある。これより砂では同じ密度、同じせん断変形であっても拘束圧により体積変化量は異なり、低拘束圧ほどより膨張していることがわかる。一方、ガラスビーズでは拘束圧に関係なく同じ密度、同じせん断変形であれば体積変化量は

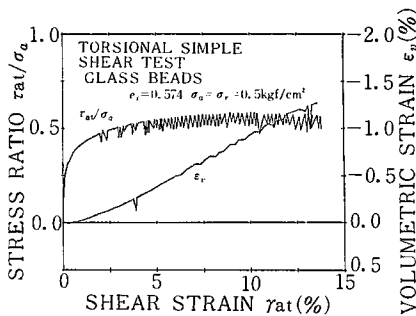


図6 ガラスビーズの  $\tau_{at}/\sigma_a$ ,  $\epsilon_v \sim \gamma_{at}$  関係

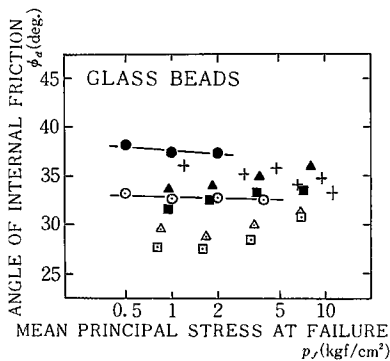


図7 内部摩擦角と拘束圧の関係 (ガラスビーズ)

TEST	SYMBOL	GRAIN SIZE (mm)	$\epsilon_i$	SPECIMEN PREPARATION	REFERENCE
TSS	○	0.105	0.628	A. P. ( $\delta = 45$ )	
	●	~0.210	0.546	A. P. ( $\delta = 45$ )	
T. C.	△	0.105	0.66	W. P. WATER TAMPED	YOSHIKOSHI (1971)
	▲	~0.149	0.58	W. P. WATER TAMPED	YOSHIKOSHI (1971)
	■	~0.210	0.58	W. P. WATER TAMPED	YOSHIKOSHI (1971)
PS	-	-	0.56 ~ 0.58	A. P. ( $\delta = 90$ )	ODA & NISHI (1978) ( $b = 0.5$ )

研究速報

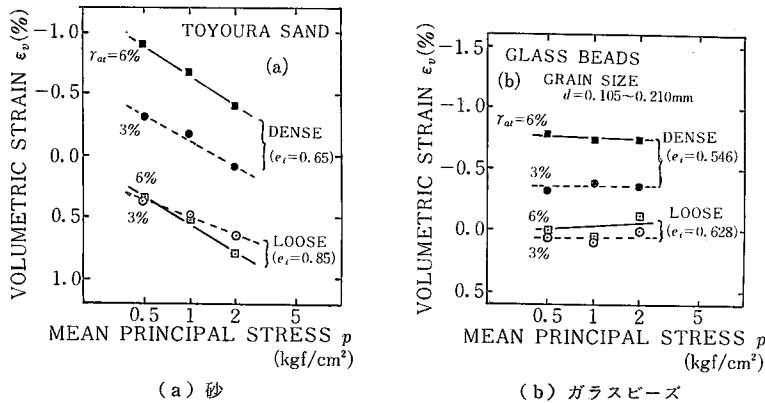


図8 体積ひずみと拘束圧の関係

ほとんど同じであることがわかる。すなわち砂では体積変化量は初期密度が同じでも拘束圧が異なれば異なり、このために強度が拘束圧により異なるものと考えられる。これを Taylor's Model を引用して問題を単純化して考えてみよう。図9(a)を参照して、最大せん断応力  $\tau_{at}$ , max までの供試体のエネルギー量の関係を考えると、

与えたエネルギー:  $\tau_{at, max} \cdot A \cdot u$

消費されるエネルギー:  $f \cdot \sigma_a \cdot A \cdot u - \sigma_a \cdot A \cdot v$

ここで  $f$  は固体摩擦的係数(仮に一定としておく)で、具体的にはせん断変形をしながら体積変化がない状態(critical state)での摩擦係数であり、 $u, v$  は供試体の水平・鉛直変位で、 $v$  は収縮する場合を正とする。また簡単のため供試体の断面積  $A$  は一定としておく。したがって、

$$\tau_{at, max} \cdot A \cdot u = f \sigma_a A u - \sigma_a A v$$

また、 $u = \gamma_{at} h$ ,  $v = \epsilon_v h = \epsilon_v h$  より、最大応力比 ( $\tau_{at, max}/\sigma_a$ ) は  $\tau_{at, max}/\sigma_a = f - \epsilon_v/\gamma_{at}$  と表される。この式は土の強度には摩擦的成分と体積変化による成分があることを示しているといえる。そこで体積変化量を表す  $\epsilon_v$  は初期密度と拘束圧により異なるので  $\epsilon_v = \epsilon_v(e_i, p)$  とおける。したがって同一拘束圧のときの ( $\tau_{at, max}/\sigma_a$ ) の  $e_i$  に対する傾向は図9(b)のようになり(図3参照)、同一密度のときの ( $\tau_{at, max}/\sigma_a$ ) は拘束圧に対して図9(c)のようになり(図4参照)、それぞれ  $\tau_{at, max}$  のときに  $\epsilon_v$  が正であるか負であるかにより ( $\tau_{at, max}/\sigma_a$ ) は異なり、ある  $e_i, p$  に対しては図9(d)のような関係にあるものと考えられる。実際の砂の強度は図9に示すような単純なものではないが、これにより体積変化が強度に及ぼす影響がわかる。

4. 結論

ねじり単純せん断試験により砂とガラスビーズの強度の拘束圧依存性を調べた結果、次のことがわかった。

- (1) 砂の内部摩擦角  $\phi_d$  は拘束圧依存性があり、低拘束圧ほど大きな値を示す。このような  $\phi_d$  の拘束圧依存性は砂が同じ密度でも拘束圧が低いほど大きな体積膨張を生じるためであると考えられる。
- (2) ねじり単純せん断による  $\phi_d$  は同じ密度、同じ拘束

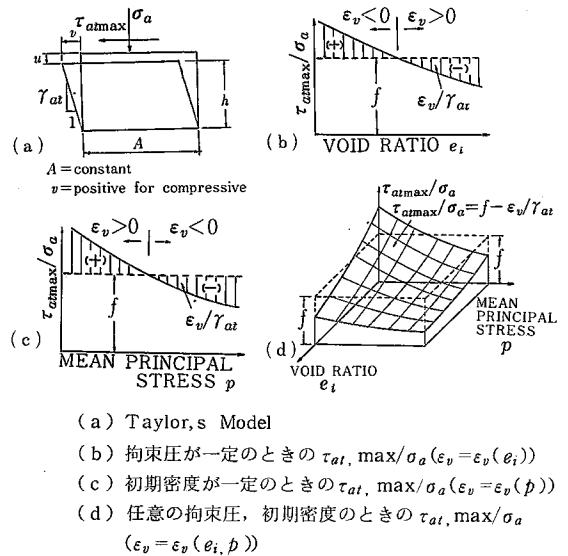


図9

- (a) Taylor's Model
  - (b) 拘束圧が一定のときの  $\tau_{at, max}/\sigma_a (\epsilon_v = \epsilon_v(e_i))$
  - (c) 初期密度が一定のときの  $\tau_{at, max}/\sigma_a (\epsilon_v = \epsilon_v(p))$
  - (d) 任意の拘束圧、初期密度のときの  $\tau_{at, max}/\sigma_a (\epsilon_v = \epsilon_v(e_i, p))$
- 東圧において三軸圧縮による  $\phi_d$  よりも大きく、初期異方性に関する条件を同一とした平面ひずみ試験による  $\phi_d$  に近い。
- (3) ガラスビーズの  $\phi_d$  は同じ密度であれば拘束圧に関係なく殆ど一定である。(1981年6月8日受理)

参考文献

- 1) Oda, M., Koishikawa, I and Higuchi, T. (1978): Experimental Study of Anisotropic Shear Strength of Sand by Plane Strain Test, Soils and Foundations, Vol. 18, No. 1, P. 25 ~ 38
- 2) 古越 (1971): 粒状体の内部摩擦角に影響する因子について, 東京大学博士論文
- 3) 小田・西 (1978): 砂の強度異方性, 第13回土質研究発表会