

III-415 一面せん断と他のせん断試験による砂の強度の比較

横浜国立大学 正員○ プラダン テージ
横浜国立大学 学員 藤谷 雅義

1. まえがき： 原地盤での応力状態を簡便に再現でき、かつ破壊面（せん断面）上の強度が測定できるという理由により一面せん断試験は古くから行われて来ている。欧米諸国では基準化され多用されているが、日本では今基準化の動きが見られる。その理由の一つに以下の一面せん断試験機の短所が挙げられよう。（a）試験結果が上下せん断箱の隙間の影響を受ける，（b）単純せん断強度より大きい強度が得られる⁴⁾，（c）主応力による内部摩擦角が算定できない，（d）得られるダイラタンシー角が小さい⁴⁾，（e）砂とせん断箱の内面摩擦によりせん断面上の鉛直応力に誤差が生じる。測定誤差をできるだけ少なくする様、新型一面せん断試験機が試作され^{3), 1)}，種々の要因による影響が明らかにされつつある。

本研究では、豊浦砂を用いた一連の実験結果から得られた一面せん断強度を他のせん断試験（ねじり単純せん断試験，平面ひずみ圧縮試験，三軸圧縮試験）より得られた強度と比較し，砂の密度，圧力レベルを考慮した総合的考察を行う。

2. 一面せん断試験結果： 一面せん断試験機の詳細およびその結果に及ぼす(a)上下せん断箱の隙間，(b)密度，(c)鉛直応力の影響については文献1)を参照されたい。変形特性についてはねじり単純せん断試験による結果と類似しているため、一面せん断は単純せん断変形モードで生じるといえる¹⁾。ここでは強度のみに着目した議論をする。

表-1 各種試験法からの測定値および推定値

試験法	測定値	推定値
D S	ϕ_{ds} (式1)	ϕ_{ds} (式2)
T S S	ϕ (式6), ϕ_{ds} (式1)	ϕ_{ds} (式2) (式3, 5)
P S C	ϕ (式6)	---
T C	ϕ (式6)	---

3. 他のせん断強度との比較および考察： 豊浦標準砂 ($G_s = 2.64$, $e_{max} = 0.977$, $e_{min} = 0.605$, $D_{50} = 0.16mm$)を用いた一面せん断試験¹⁾ (D S)，ねじり単純せん断試験²⁾ (T S S)，平面ひずみ圧縮試験³⁾ (P S C)，三軸圧縮試験 (T C)より得られた砂の強度（摩擦角 ϕ ）について比較を行う。それぞれの試験から測定されるあるいは推定される {Davisの式⁵⁾，小田・小西の式⁷⁾} 内部摩擦角の記号を表-1および求め方を式(1)～(6)に示す。

$$\phi_{ds} = \tan^{-1} (\tau / \sigma_v) \quad \text{--- (1)}$$

$$\phi_{ps}^{(5)} = \sin^{-1} \left[\frac{\tan \phi_{ds}}{\cos \nu_r + \tan \phi_{ds} \cdot \sin \nu_r} \right] \quad \text{--- (2)}$$

$$\tau / \sigma_v = \kappa \cdot \tan \alpha^{(7)} \quad , \quad \kappa = (\tau / \sigma_v) \text{ at } \nu = 0 \quad \text{--- (3)}$$

$$\kappa = 1 - K_0^{(8)} \quad \text{--- (4)}$$

$$\phi_{1s} = \phi_{1s} (\kappa, \tau, \sigma_v) \quad \text{--- (5)}$$

$$\phi = \sin^{-1} \{ (\sigma_1 - \sigma_3) / (\sigma_1 + \sigma_3) \} \quad \text{--- (6)}$$

ここで ϕ_{ds} ， ϕ_{ps} はせん断面上の強度および主応力値を用いた平面ひずみ状態での内部摩擦角の推定値⁵⁾，

τ ， σ_v はせん断面上のせん断応力および垂直応力である。 ν_r ， κ は破壊時のダイラタンシー角および小田，小西による材料定数で， α は最大主応力 (σ_1) 軸と鉛直軸とのなす角である。

一面せん断試験（上下箱の隙間3mm，鉛直応力 $\sigma_v = 0.5, 1.0, 2.1 \text{ kgf/cm}^2$ ）による強度 ϕ_{ds} の結果を図-1から図-3に示す。同図に式2および式5による推定内部摩擦角およびT S Sからの ϕ_{ds} および ϕ の平均線²⁾を示した。これらの図より以下の結論が得られる：(a) いずれの圧力レベルにおいてもD S試験から得られるせん断面上の強度 (ϕ_{ds}) はT S S試験より得られる値より大きく，その度合いは圧力レベルが低いほど顕著である，(b) T S S試験の ϕ から式2による ϕ_{ps} よりもD S試験の ϕ_{ds} の方が若干 (2° 程度) 大きい (図-2)，(c)

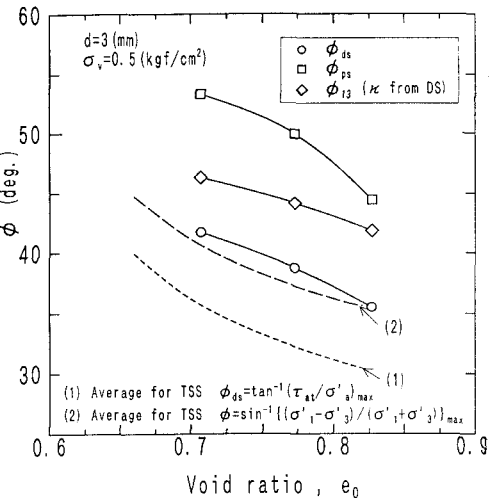
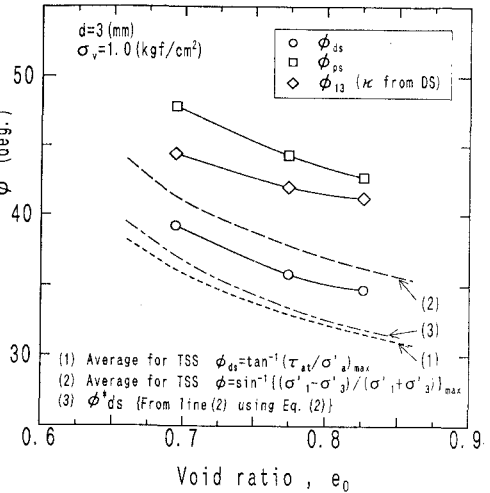
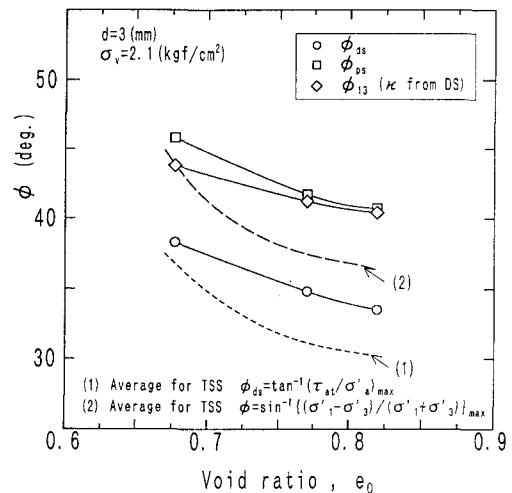
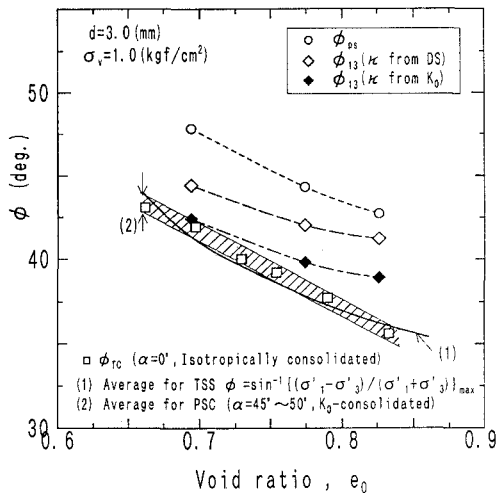


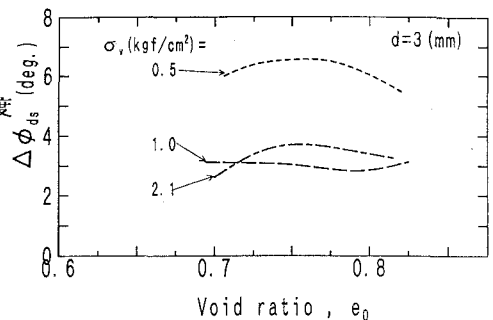
図-1 $\phi - e_0$ 関係 ($\sigma_v = 0.5 \text{ kgf/cm}^2$)

$\sigma_v = 0.5 \text{ kgf/cm}^2$ の時, DS 試験の ϕ_{ds} は TSS の ϕ と近いが, 他はいずれも ϕ (TSS) より $2 \sim 3^\circ$ 小さい。図-4 に DS 試験による ϕ_{ds} と TSS による ϕ_{ds} の差 ($\Delta \phi_{ds}$) を初期間隙比に対してプロットした。間隙比に関係なく, $\Delta \phi_{ds}$ は σ_v が 0.5 kgf/cm^2 のとき 6° 程度, $1 \sim 2 \text{ kgf/cm}^2$ では 3° 程度であることが分かった。種々の試験からの主応力による強度 (ϕ) と間隙比の関係を図-5 に示した。DS 試験においてせん断面が Zero-extension の方向でありかつ同軸性が成り立つとすると破壊時の α が $45 \sim 50^\circ$ になり, TSS からのその値と一致する。比較するため主応力方向が回転しない PSC 試験において $\alpha = 45 \sim 50^\circ$ の結果を図-5 に示した⁶⁾。TSS, PSC, TC による ϕ は比較的良く一致している²⁾。DS 試験から3種類の ϕ が推定される(表-1)。式2による ϕ_{ds} は ϕ (TSS) より 6° 高い。 ϕ_{ds} の計算には $\kappa = 0.64$ (式3), および $\kappa = 0.58$ (式4) を用いた。式4(緩い状態の砂の $K_0 = 0.42$) より計算される κ は TSS の κ と同値である²⁾ が DS 試験からの κ は大きい。これは DS 試験において Constant Volume 状態における応力比が高いためであろう。 K_0 値より計算される κ を用いた場合, DS 試験からの ϕ の推定値が他のせん断試験の ϕ と近くなることが分かった。


 図-2 $\phi - e_0$ 関係 ($\sigma_v = 1.0 \text{ kgf/cm}^2$)

 図-3 $\phi - e_0$ 関係 ($\sigma_v = 2.1 \text{ kgf/cm}^2$)

 図-5 $\phi - e_0$ 関係 ($\sigma_v = 1.0 \text{ kgf/cm}^2$)

4. まとめ: 一面せん断試験から得られたせん断面上の強度 (ϕ_{ds}) は圧力レベル依存性であり, ねじり単純せん断より得られた値より $3 \sim 6^\circ$ ほど高いことが分かった。

参考文献: 1) 藤谷アザンら: 一面せん断における砂の強度・変形特性, 土木学会第48回年次学術講演会, 1993 (投稿中)。2) アザンら: Strength and deformation characteristic of sand in torsional simple shear, S&F, 28-3, 1988。3) 洪谷ら: 豊浦砂の一面せん断強度の定量的評価に関する一考察, 土木学会第47回年次学術講演会, 1992。4) R. A. Jewell: Direct shear tests on sand, Report to Univ. of Oxford, No. QUEL 1719, 1988。5) Davis E. H.: Theories of plasticity and the failure. Selected topics (Ed. by I. K. Lee), London Butterworth。6) Tatsuoka et al.: Strength and deformation characteristics of sand in plane strain compression at extremely low pressure, S&F, 26-1, 1986。7) Oda and Konishi: Rotation of principal stresses in granular material in simple shear, S&F, 14-4, 1974。8) Oda: On the relation $\tau/\sigma_N = \kappa \tan \phi$ in the simple shear test, S&F, 15-4, 1975。


 図-4 $\Delta \phi_{ds} - e_0$ 関係