

各種のせん断試験による砂の内部摩擦角

Angle of Internal Friction of Sand by Various Types of Shear Tests

龍岡文夫* プラダン テージ B.S.**
 Lam Woon Kwan 堀井宣幸****

1. はじめに

同一の豊浦砂（粒子比重 $G_s=2.64$ ，平均粒径 $D_{50}=0.16$ mm，均等係数 $U_c=1.46$ ，細粒分0%）を空中落下させて作成した後飽和化した試料を用いて，表-1に示すような各種のせん断試験を行ってきた結果をまとめ，砂のせん断抵抗角（または内部摩擦角） $\phi = \arcsin \{(\sigma_1' - \sigma_3') / (\sigma_1' + \sigma_3')\}_{\max}$ に及ぼす(1) σ_3' の大きさ，(2) $b = (\sigma_2' - \sigma_3') / (\sigma_1' - \sigma_3')$ の値，(3)構造異方性，(4)破壊パターンの影響を論ずる。本来，同一の供試体に対して(1)~(4)によらずに一定の ϕ の値が得られるときに， ϕ をせん断強度を表すパラメータとして用いる意義があるが，実際にはそうはなっていない。しかし，(1)簡明な型の破壊規準である，(2)多くの安定解析は二次元問題として，すなわち σ_1' と σ_3' だけを用いて行うので，多くの場合 ϕ を用いるのが好都合である。

2. ϕ の拘束圧依存性

拘束圧が高くなると一般的に砂の ϕ は減少してゆく。しかし，ある程度の拘束圧以下では，少なくとも飽和している，あるいは空気乾燥している粒子の破砕性が小さいきれいな砂の ϕ の拘束圧依存性は大変小さく，いわゆる粘着力係数=0と考えるとよいようである。このことを最も強調しているのは Hettler (ヘトラー)ら¹⁴⁾であり，三軸圧縮での Karlsruhe (カールスルーエ) 砂の ϕ は実に $\sigma_3'=4 \text{ kgf/cm}^2$ まで σ_3' によらないことを示している。豊浦砂でも三軸圧縮，平面ひずみ，ねじりせん断で共通して，大略 0.5 kgf/cm^2 以下の σ_3' では ϕ は σ_3' によらない（文献5の図-3.2.7参照）。図-1(a)，(b)，図-2は平面ひずみ圧縮試験の結果である。

一方，砂の ϕ は $\log \sigma_m'$ (σ_m' は平均主応力) に比例するという経験式の提案もある (Bolton¹⁵⁾)。恐らくある程度以上の拘束圧に対してだけこの考え方は適切であろう。実際にある拘束圧以下で砂の ϕ が拘束圧に依存しないならば，(1)飽和したあるいは空気乾燥した砂の斜面の浅いすべりの解析，(2)模型実験の解析が著しく簡明になる⁴⁾。

3. ϕ の異方性

砂の ϕ の異方性は小田^{16), 17)}，Arthur (アーサー)¹⁸⁾ の先駆的研究によって明らかにされてきた。実際図-1を見ても $\delta=23^\circ$ ， 34° の時の密な豊浦砂の ϕ は， $\delta=90^\circ$ の時の緩い豊浦砂の ϕ よりも小さい。すなわち， ϕ に対する影響因子としての構造異方性は間隙比とほぼ同等である。

そこで，平面ひずみ圧縮の場合で $\sigma_3'=0.05 \sim 4 \text{ kgf/cm}^2$ に対する豊浦砂の ϕ を (σ_3' ， δ ， e) の関数とした経験式を求めた。ここで e は $\sigma_3'=0.05 \text{ kgf/cm}^2$ の等方応力状態の時に測定した値である。まず，ある一定の $\sigma_3'=(\sigma_3')_0$ 以

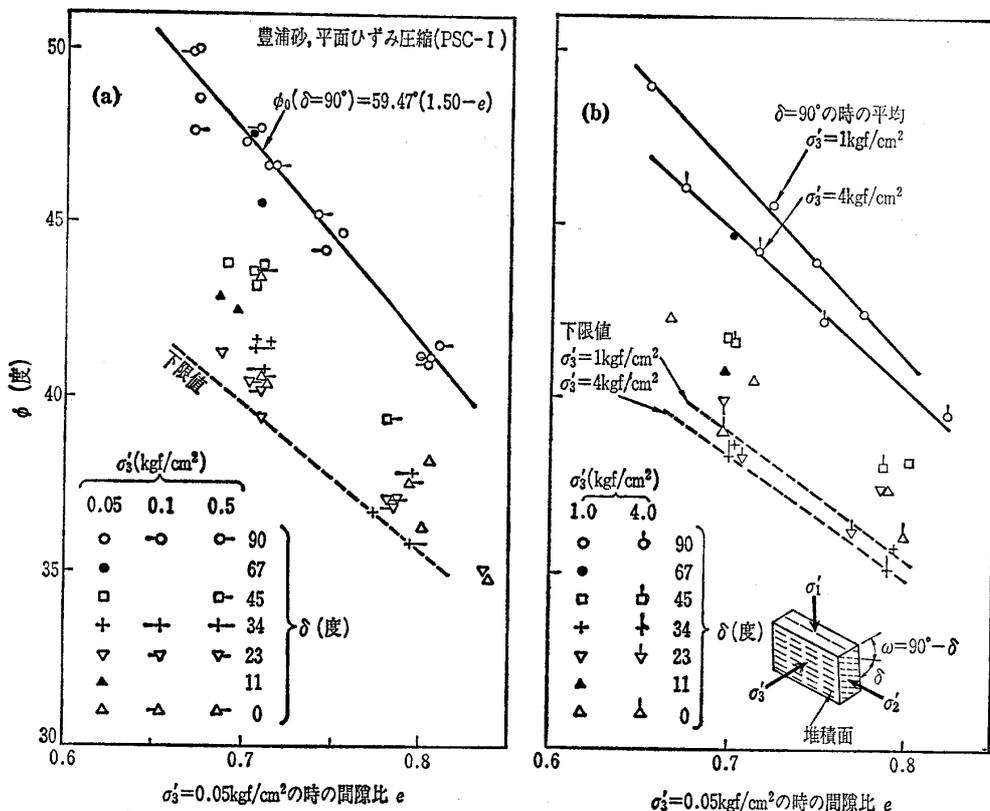


図-1 平面ひずみ圧縮試験による ϕ

*東京大学助教授 生産技術研究所
 **東京大学助手 生産技術研究所
 ***応用地質株式会社 東京事業本部 (元東京大学大学院生)
 ****労働省産業安全研究所 研究員 (元東京大学大学院生)

表一 東京大学生産技術研究所で行われた豊浦砂のせん断試験

試験の種類：略称	供試体寸法 (cm)	端面条件 ほか	圧密方法： 試験時応力 径路	$(\sigma_1'/\sigma_3')_{max}$ の時の応力状態				その他	参考文献										
				σ_3' (kgf/cm ²)	b ①	ω ②	ξ ③												
三軸圧縮： TC-I	高さ(H)=15, 直径(D)=7 (円柱)	上下端面剛 摩擦除去 ¹⁾ 。 側面はメン ブレン。	等方： σ_3' 一定， σ_1' 増加	0.029~4.0	0.0	0	—④	σ_3' が小さい時は メンブレン力に 対する応力補正 が必須。	Fukushima and Tatsuoka(1984) ²⁾ Tatsuoka, et al (1986) ³⁾ 龍岡(1987) ^{4),5)}										
三軸圧縮： TC-II	高さ(H)=幅 (W), 長さ(L) =7.8 ⁵⁾ (立方体)	σ_1' 面はTC では剛, TE ではフレ キシブル。	等方： σ_1' 一定， σ_3' 減少	1.0		0°, 30°, 60°, 90°	—④			この場合， $\delta=90^\circ-\omega$ 図-7(a), 9 (a)参照	Lam and Tatsuoka (1987) ⁶⁾ , (1988) ⁷⁾								
三軸伸張： TE ⁶⁾	H=19.6, D= 9.5(円柱) 正方形断面 (D =7.8), H= 2.0, 7.8, 16 (直方体)			等方： σ_1' 一定， σ_3' 増加	≈1.0	1.0	90°	90°	通常の三軸伸張 図-7(a), 図 -9(a)参照			Lam and Tatsuoka (1987 ⁶⁾ , 1988 ⁷⁾)							
平面ひずみ 圧縮： PSC-I	H=10.5, W= 4, L(σ_2' 方向) =8 (直方体)	上下側面剛， 摩擦除去。 σ_2' 面は剛 で摩擦除去。 σ_3' 面はメン ブレン。	0.05~4.0				0.16~0.4 ⁷⁾	0°, 23°, 45°, 56°, 67°, 79°, 90°		90°	$\delta=90^\circ-\omega$		Tatsuoka, et al. (1986) ⁸⁾ , 龍岡 (1986) ⁴⁾ , (1987) ⁵⁾						
								平面ひずみ 圧縮： PSC-II		H=10.5, ⁵⁾ W=5.5, L=10.5 (直方体)				1.0	e, ω, ξ の 値による。 0.2~0.55	0°, 30°, 60°, 90°	90°	図-9(a)参照	Lam and Tatsuoka (1986) ⁶⁾ , 1987 ⁷⁾
																0°, 30°, 60°, 90°	0		
ねじりせん 断： TS	H=20, 円筒外径(10), 円筒内径(6), (中空円筒)	円筒の内圧 と外圧が等 しい。	等方： σ_a', σ_r' 一定, τ_{at} 増加 異方： σ_a', σ_r' 一定, τ_{at} 増加	0.08~0.79	0.5	45°	90°	$\sigma_t = \sigma_r$ (図-5)	Tatsuoka, et al. (1986) ⁸⁾ , 龍岡 (1987) ^{4),5)}										
				0.31~0.43	0.27~0.47	47°~59°													
ねじり単純 せん断： TSS		せん断中に 円筒の外圧 が内圧より も大きくなる。	K_0 圧密： $\sigma_a' = 1.0$ kgf/ cm ² (一定), τ_{at} 増加	0.36~0.45	0.25~0.29	40.0°~43.5°	90°	円筒内径, 外径 が一定に保たれ る。 $\sigma_t \neq \sigma_r'$ (図 -5)	堀井ら ¹⁰⁾ , プラダン ら ¹¹⁾ , Tatsuoka (1987) ¹²⁾										

注：① $b = (\sigma_2' - \sigma_3') / (\sigma_1' - \sigma_3')$, ②, ③ 図-9(a)参照。④ $\omega = 0^\circ$ のとき ξ は定義する必要はない。
 ⑤ この他の寸法でも行われているが、ここではこの寸法のデーターだけを示す。文献12)の図-8(a)での ϕ は端面摩擦に対して補正した値。ここではこの補正はしていない。
 ⑥ ϕ は供試体のネッキングによる局所的断面積減少に対する σ_3' の補正をし、また図-2を用いて $\sigma_3' = 1.0$ kgf/cm² に対しての値に補正。
 ⑦ $\sigma_3' = 0.05$ kgf/cm² でのみ測定。 b は $e, \omega(\delta)$ による。同一寸法で $\sigma_3' = 0.5$ kgf/cm², $e = 0.65 \sim 0.81$, $\omega = 0^\circ (\delta = 90^\circ)$ の時, $b = 0.25 \sim 0.30$, $e = 0.70$ では $b = 0.255$ (中村¹³⁾)。

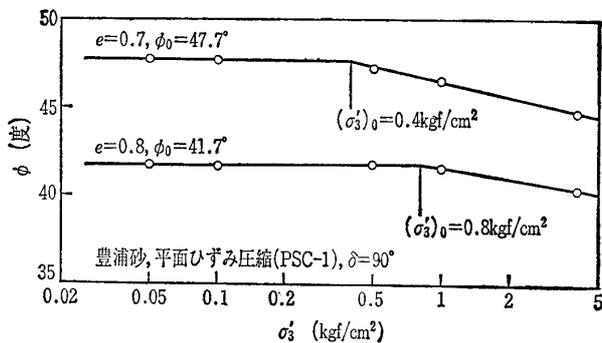


図-2 平面ひずみ圧縮試験における $\phi \sim \sigma_3'$ 関係

下では ϕ は一定 (ϕ_0) とする (図-2)。ここで $(\sigma_3')_0$ は e に比例すると仮定すると、

$$(\sigma_3')_0 = 4.0 \times (e - 0.6) \dots \dots \dots (1)$$

となる。 $\sigma_3' \geq (\sigma_3')_0$ では、 ϕ は $\log \sigma_3'$ に比例して減少するとし、係数 $a = -d\phi/d \log \sigma_3'$ は e に比例するとすると、

$$a = 10^\circ \times (1 - e) \dots \dots \dots (2)$$

となる。一方、 $\sigma_3' \leq 0.5$ kgf/cm² では $\delta = 90^\circ$ のとき

$$\phi(\delta = 90^\circ) = 59.47^\circ (1.5 - e) \dots \dots \dots (3)$$

で表せる (図-1(a))。一方、 ϕ の δ 依存性は σ_3' の値にほとんどよらない⁸⁾。図-3に示すように ϕ の δ 依存性は e によって若干異なっているの、 $e = 0.70$ と $e = 0.80$ で分けて $R = \phi(\delta) / \phi(\delta = 90^\circ) \sim \delta$ 関係式を定式化すると次式が得られる。

$$R(\delta, e = 0.70) = \begin{cases} 1.0 - 4.02 \times 10^{-5} (\delta - 90^\circ)^2 & (\delta = 26^\circ \sim 90^\circ) \\ 0.89 - 7.83 \times 10^{-5} \times \delta^2 & (\delta = 0^\circ \sim 26^\circ) \end{cases} \dots \dots (4)$$

$$R(\delta, e = 0.80) = \begin{cases} 1.0 - 4.18 \times 10^{-5} (\delta - 90^\circ)^2 & (\delta = 34^\circ \sim 90^\circ) \\ 0.9 - 3.33 \times 10^{-5} \times \delta^2 & (\delta = 0^\circ \sim 34^\circ) \end{cases} \dots \dots (5)$$

以上をまとめると、(4), (5)式の R を用いて、 ϕ は次のように定式化される。 0.05 kgf/cm² $\leq \sigma_3' \leq (\sigma_3')_0$ では、

$$\phi(\delta, e, \sigma_3') = \phi_0(\delta, e) = 59.47^\circ (1.5 - e) \times R \dots \dots (6)$$

$(\sigma_3')_0 \leq \sigma_3' \leq 4.0$ kgf/cm² では、

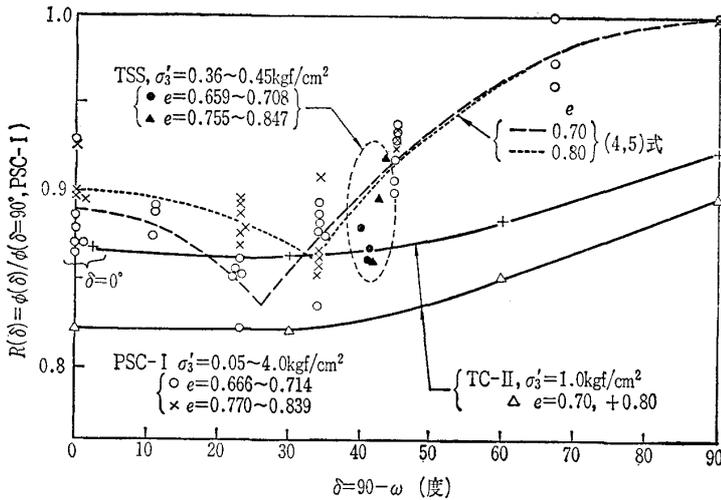


図-3 平面ひずみ圧縮試験、三軸圧縮試験とねじり単純せん断試験 (TSS) における φ の δ 依存性

$$\phi(\delta, e, \sigma_3') = \left\{ 59.47^\circ (1.5 - e) - 10^\circ \times (1 - e) \log \frac{\sigma_3'}{(\sigma_3')_0} \right\} \times R \dots \dots \dots (7)$$

4. 平面ひずみ圧縮と三軸圧縮の φ の比較

φ の異方性のためにこの比較は単純ではない。図-3 を見ると三軸圧縮と平面ひずみ圧縮の φ の差は δ = 90° のときに最も大きい、δ = 30° では両者の差は著しく小さくなっている。このことは、各種の φ を比較した図-4 を見ても分かる。すなわち、δ = 90° では φ (PSC-I) (○; a-a 線) は φ (TC-I) (□; b-b 線) より著しく大きい、δ = 30° では φ (PSC-I) (△, ▽; c-c 線) は φ (TC-II) (□; d-d 線) よりわずかに大きいだけである。

より一般的には、空中落下して作成した試料は堆積面に直交する方向 (図-9 (a) の n) が構造の対称軸であり、φ はこの n の方向 (図-9 では角度 ω, ξ で表されている) の関数である。今まで使ってきた δ は ξ = 90° の時の 90° - ω に等しい。したがって、φ は少なくとも (e, σ₃', ω, ξ, b, 破壊パターン) の関数となり、e, σ₃' を固定しても φ を (ω, ξ, b, 破壊パターン) の総合的な関数として表す必要がある。

5. 単純せん断、平面ひずみ圧縮、三軸圧縮の φ の比較

これも φ の異方性のために複雑な関係にある。最近、K₀ 圧縮された中空供試体を用いて内径と外径を常に一定に保ちながら排水状態で鉛直圧一定のままねじりせん断することがかなり精度高くできるようになった^{10), 11)}。この試験では常に水平断面の形と大きさは一定に保たれているので単純せん断ひずみ条件は満たしている (図-5)。図-6 は e = 0.70 のときの σ₁' / σ₃' ~ ω (= 90° - δ) ~ γ_{max} (= ε₁ - ε₃) 関係を示したものである¹¹⁾。ω = 90° - δ 一定の径路は平面

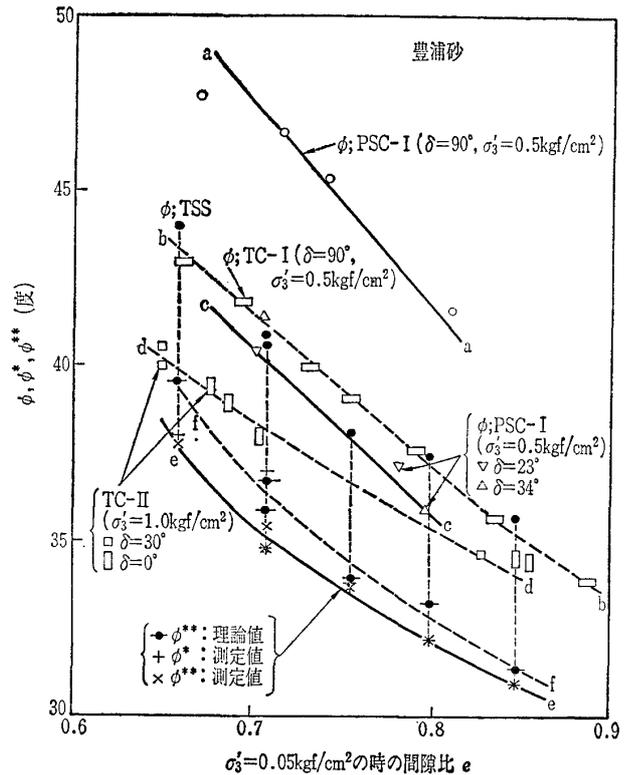


図-4 各種のせん断試験による φ の比較

ひずみ圧縮試験 (PSC-I)⁹⁾ によるものである。なお、ここに示す応力径路はすべて連続的に記録されたデータに基づいており、○印は γ_{max} = 1, 2, …, 10% の点を表している。TSS の径路は①の径路での点 B から出発して作図した。この図からねじり単純せん断試験 (TSS) による径路は平面ひずみ圧縮試験での径路が形づくる曲面上を移動していることが分かる。すなわち、この (σ₁' / σ₃' ~ ω ~ γ_{max}) 関係には、この試験の範囲で主応力方向の連続的回転の影響がほとんど見られない。恐らくこれはねじり単純せん断試験においてせん断初期に極めて急速に σ₁' 方向が回転し、γ_{max} > 1% ではほとんど回転していないからであろう。

以上のことから図-3, 4 に示すようにねじり単純せん断試験 (TSS) での φ が、類似の σ₃', δ = 90° - ω, b の平面ひずみ圧縮試験 (PSC-I) の φ とよく似ているのは納得できる。すなわち、単純せん断試験も一種の平面ひずみせん断試験であると考えてよい。

δ = 90° (ω = 0°) の場合の三軸圧縮の φ (□印, 線 b-b) と TSS の φ がよく一致しているのは偶然である。すなわち、ねじり単純せん断試験と三軸試験では b と δ の両方が異なり、この両者の影響が打ち消し合っているためと思われる。

一面せん断試験や単純せん断試験では通常水平面上の直応力 σ_{a'} とせん断応力 τ_{at} しか測定しない (図-5 (b))。従来時としてこの 2 つの応力から内部摩擦角として

$$\phi^* = \arctan(\tau_{at} / \sigma_{a'})_{\max} \dots \dots \dots (8)$$

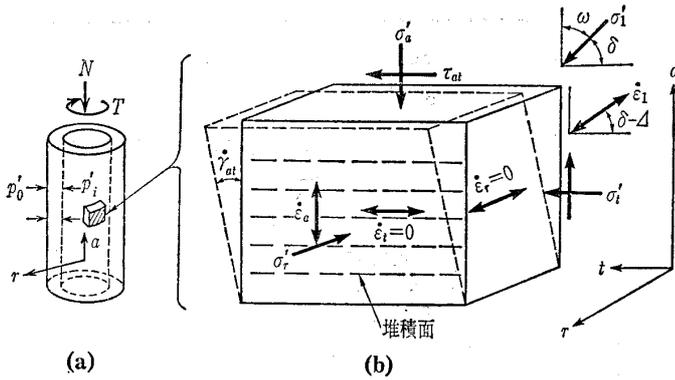


図-5 単純せん断変形条件の説明¹⁰⁾

を用いることがあった。しかし、図-4に示すようにねじり単純せん断試験では ϕ^* は $\phi = \arcsin \{(\sigma'_1 - \sigma'_3) / (\sigma'_1 + \sigma'_3)\}_{\max}$ よりも相当小さい。なお、 ϕ^{**} は $(\sigma'_1 / \sigma'_3)_{\max}$ の時の $\arctan(\tau_{at} / \sigma'_a)$ であり、図中に示すいくつかのデータでは ϕ^* よりも若干低い。これは ϕ^{**} または $(\sigma'_1 / \sigma'_3)_{\max}$ が発揮された後に更に τ_{at} / σ'_a が増加し、 ϕ^* または $(\tau_{at} / \sigma'_a)_{\max}$ が発揮されたからである。

$\phi^{**} < \phi$ となる理由は水平面が最大応力傾角の面になっていないためである。このことは、次の2つの条件によって求まる(9)式によって説明できる(詳しくは文献19)参照)。(1)水平方向は伸び縮みしない ($\dot{\epsilon}_t = 0$)、(2)破壊時には σ_1 方向と $\dot{\epsilon}_1$ 方向は一致する。

$$\phi^{**} = \arctan\left(\frac{\sin \phi \cos \phi}{1 - \sin \phi \sin \phi}\right) \dots\dots\dots(9)$$

ここで、 ϕ は破壊時のダイレイタンス角であり

$$\phi = \arcsin\left(-\frac{\dot{\epsilon}_1 + \dot{\epsilon}_3}{\dot{\epsilon}_1 - \dot{\epsilon}_3}\right) \dots\dots\dots(10)$$

で定義される。(9)式による ϕ^{**} の値は図-4では●印(線 f-f)で示されているが、測定値より若干大きいことが分かる。これは上記の2つの条件の内2番目の条件が満たされていないためである。実際、 ϕ が発揮される時には σ'_1 方向よりも $\dot{\epsilon}_1$ 方向の方が水平方向に角度 Δ だけ近い。

この時(9)式は

$$\phi^{**} = \arctan\left(\frac{\sin \phi \cos(\phi - 2\Delta)}{1 - \sin \phi \sin(\phi - 2\Delta)}\right) \dots\dots\dots(11)$$

となり、 ϕ^{**} は(9)式による値よりも小さくなる¹⁹⁾。

図-4を見ると、 ϕ^* (線 e-e) は $\delta = 90^\circ$ の時の三軸圧縮による ϕ (線 b-b) よりも相当小さい。一方、従来時として一面せん断での(8)式による ϕ^* と $\delta = 90^\circ$ の時の三軸圧縮による ϕ の比較が行われた。実際に $\phi^* < (\text{三軸圧縮による } \delta = 90^\circ \text{ のときの } \phi)$ であるということは次のことを意味している。仮に図-5(b)のような供試体で、 $\phi^* = (\text{三軸圧縮による } \delta = 90^\circ \text{ のときの } \phi)$ であったならば ϕ^* は過大評価されており、これはその一面せん断試験ではせん断面の τ_{at} , σ'_a の値が正確に測定されていない、などのその一面せん断試験機特有の問題によるためであろう。

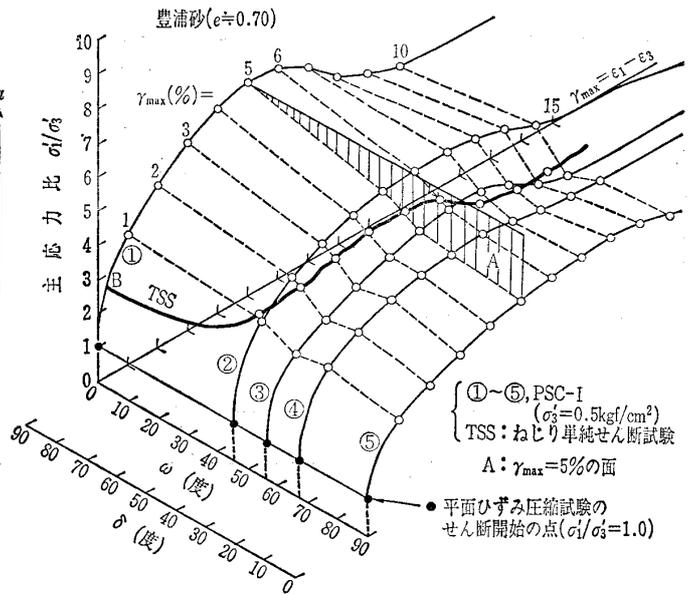


図-6 ねじり単純せん断試験 (TSS) と平面ひずみ圧縮試験 (PSC-I) での $\sigma'_1 / \sigma'_3 \sim \omega \sim \gamma_{\max}$ 関係の比較¹¹⁾

6. 三軸圧縮, 平面ひずみ圧縮, 三軸伸張の ϕ の比較

まず図-7に示す σ'_1 , σ'_2 , σ'_3 方向が堆積面に平行か直交している場合 ($\omega = 0^\circ$ または 90° , $\xi = 0^\circ$ または 90°) を考える。この場合でも比較を複雑にしているのは、(1)強度異方性と、(2)特に三軸伸張試験で顕著な ϕ の破壊モード依存性である。前者は供試体に対して定義した3つの主応力 (σ'_y = 堆積面に直交する直応力, σ'_x , σ'_z ; 堆積面方向の直応力) の空間で考えればそれなりに整理がつく。すなわち、図-7(b)は σ'_x , σ'_y , σ'_z 3主応力空間内の $\sigma'_x + \sigma'_y + \sigma'_z = \text{一定}$ の π 面上を表して、番号①~⑦の応力状態では、それぞれ $(\sigma'_x, \sigma'_y, \sigma'_z)$ の $(\sigma'_1, \sigma'_2, \sigma'_3)$ の組み合わせ方が異なる。

ところが(2)の問題は相当難しい。測定された ϕ の値の客観性にかかわる問題であるからである。つまり、図-8に例示するように ϕ が供試体の形状に著しく支配されるからである^{6)~7)}。ここで、 α は図-7(b)における π 面上の σ'_y 軸からの角度で

$$\tan \alpha = \frac{\sqrt{3}(\sigma'_z - \sigma'_x)}{(\sigma'_y - \sigma'_x) + (\sigma'_y - \sigma'_z)} \quad (0 < \alpha < 180^\circ),$$

$$\tan \alpha = \frac{\sqrt{3}b}{2-b}, \quad b = \frac{\sigma'_2 - \sigma'_3}{\sigma'_1 - \sigma'_3} \quad (0 < \alpha < 60^\circ) \dots(12)$$

である。つまり、 $\alpha = 60^\circ$ の三軸伸張試験 ($b = 1.0$) では $\sigma'_y = \sigma'_z = \sigma'_1$, $\sigma'_x = \sigma'_3$ であり、 $\alpha = 180^\circ$ の三軸伸張試験では $\sigma'_x = \sigma'_z = \sigma'_1$, $\sigma'_y = \sigma'_3$ である。この場合、 H/D とは $(\sigma'_3$ 方向の剛な端面間の距離) / $(\sigma'_1$ 方向のフレキシブルな側面間の距離) と定義される。

図-8を見て分かるように、 $H/D = 2.0$ の場合はすべり面が上下端面と全く交差しない破壊モード (図-8では NO と表現してある) が表れ、この時の ϕ が最も小さい。

$H/D=2.0$ と 1.0 の時にはすべり面が上か下の端面と交差する破壊モード (SINGLE と表現してある) が表れ, ϕ は NO の場合より大きくなる。 $H/D=0.25$ の時はすべり面が上下両方の端面と交差している破壊モード (DOUBLE と表現してある) が表れ, この時の ϕ が最も大きい。応力~ひずみ曲線を見ると, 1.0 と 2.0 の場合は供試体を写真撮影して求めたネッキング部の断面積を用いて応力計算をしてから図-8 に示す ϕ の値を求めてある。また, H/D が大きいほど小さいひずみの時にピーク応力状態が表れ, 供試体が一様に変形するときと比較すると早すぎる破壊が生じているように見える。

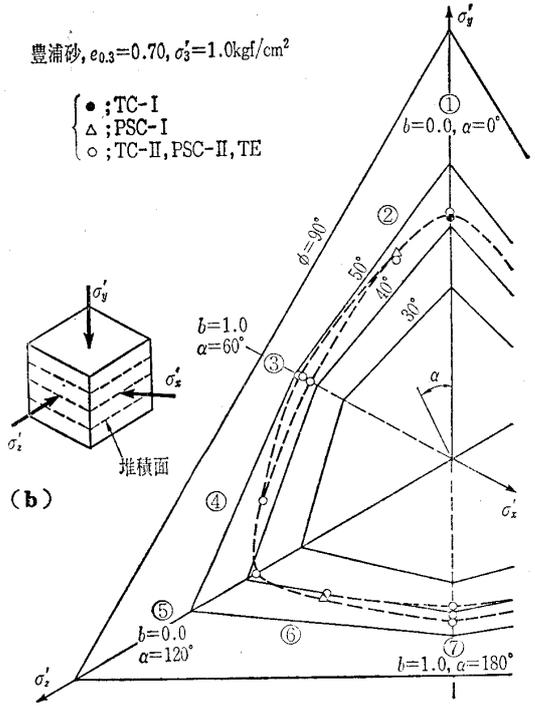
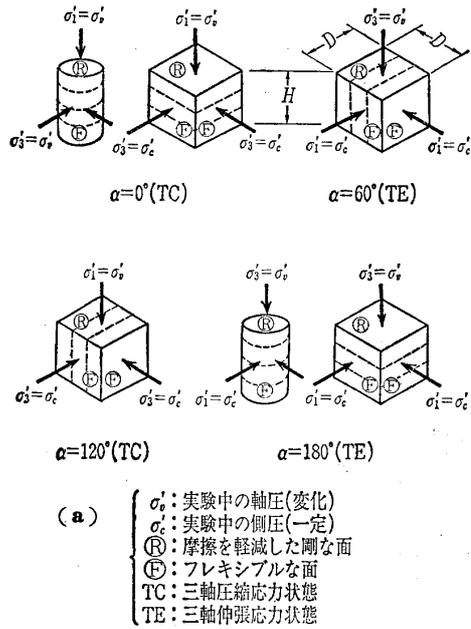


図-7 σ_1' , σ_2' , σ_3' の方向が堆積面と平行か直交している時の ϕ , (a) 試験法の説明, (b) 実験結果

表-1 に示す各種の試験のうち三軸伸張試験だけが σ_1' の作用面がメンブレンである。図-8 に示すような破壊モードの相違によるこのような著しい変形・強度特性の変化は, $b=1.0$ である理由によるものなのか, σ_1' の作用面がメンブレンであるためなのか, その両方によるためなのか, 現在の段階ではよく分かっていない。

次に, π 面上で $\sigma_3' \approx 1.0\text{kgf/cm}^2$, $e_{0.3}(\sigma_3'=0.3\text{kgf/cm}^2)$ のときに測定した $e=0.70$ のときの三軸圧縮, 平面ひずみ圧縮, 三軸伸張試験での ϕ を比較してみる (図-7(b))。この図は σ_y' 軸に対して左右対称であるので左半分だけを示す。強度異方性と三軸伸張試験における破壊モードの違いによる ϕ の相違のため, 複雑な形の破壊包絡線になっている。しかし, $\alpha=0\sim 60^\circ$, $60^\circ\sim 120^\circ$, $120^\circ\sim 180^\circ$ のそれぞれにおいて次の特徴が見られる。(1) $b=0$ (三軸圧縮) から $b=0.2\sim 0.3$ (平面ひずみ圧縮) になるにつれて ϕ は必ず増加してゆく。(2) $b=1.0$ (三軸伸張) でのすべり面が上下端面と交差せず, ネッキングが生ずる破壊モード (NO で表されている) はほかの試験法で生ずる破壊モードとは著しく異なるので, この場合の ϕ を取り除いてみると, $b=0.2\sim 0.3$ から $b=1.0$ になると ϕ は一定か, 増加する。(3) $b=1.0$ (三軸伸張) での NO の破壊モードの ϕ でも $b=0.0$ (三軸圧縮) での ϕ よりも小さいことはない。

図-9 に示すように σ_1' , σ_2' , σ_3' の方向がいずれかが堆積面に平行でない場合も含めた場合の ϕ はどのようなものになるであろうか。図-9(b) の3つの場合の $\sigma_3'=1.0\text{kgf/cm}^2$, $e_{0.3}=0.70$ のときの ϕ を b と角度 (ω , ξ) の関数

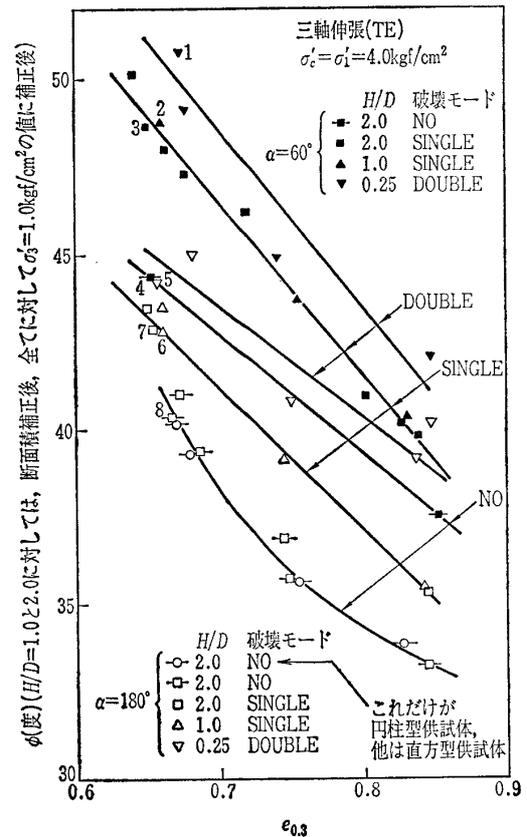


図-8 三軸伸張試験 (TE) における ϕ の供試体破壊モード依存性^{6)~7)}

として, 三次元的に示したのが図-9(c)である。この場合, 実線は $b=1.0$ (三軸伸張) ですべり面が上, 下端面の1つと交差する破壊モード (SINGLE) の時の ϕ を用いて描いた。また, 番号①~⑦は図-7(b)中の番号に対応している。 b の影響は ($\xi=90^\circ$, $\omega \approx 60^\circ$) (または $\delta \approx 30^\circ$)

No. 1753

の時最も小さく、($\xi=0^\circ$, $\omega=90^\circ$) の時に最も大きい。このように見ると、 ϕ は常に (b , 角度 ξ , ω , 破壊モード) の関数として総合的に考えなければならないことが分かる。

7. あとがき

同一の供試体でもせん断方法によって著しく異なった ϕ が得られる。 ϕ を境界値問題に適用しようとするときに、(e , σ_3') のほかに (b , 強度異方性, 破壊モード) の影響を考慮しなければならない。とりわけ破壊モードの影響の取扱いはよく分かっていない。

謝 辞

参考文献に挙げた方々のほか、試験装置の設計・製作に携った本研究所佐藤剛司氏、山田真一氏 (現在基礎地盤コンサルタント)、大河内保彦氏 (現在東急建設)、(1)~(7)式を導くの協力していただいた黄景川氏に感謝する。

参 考 文 献

- 1) Tatsuoka, F., Molenkamp, F., Torii, T. and Hino, T.: Behavior of lubrication layers of platens in element tests, *Soils and Foundations*, Vol.24, No.1, pp.113~128, 1984.
- 2) Fukushima, S. and Tatsuoka, F.: Strength and deformation characteristics of saturated sand at extremely low pressures, *Soils and Foundations*, Vol.24, No.3, pp.30~48, 1984.
- 3) Tatsuoka, F., Goto., S. and Sakamoto, M.: Effects of some factors on strength and deformation characteristics of sand at low pressures, *Soils and Foundations*, Vol. 26, No.1, pp.105~114, 1986.
- 4) 龍岡文夫: 土のせん断変形・強度およびその試験法, 土質工学会, わかりやすい土質力学原論講習会テキスト (2月), pp.1~44, 1987.
- 5) 龍岡文夫: 講座「海洋・海岸工学と土質」3. 海底・海岸土層の工学的性質, 3.2 海砂, 土と基礎, Vol.35, No.2, pp. 81~87, 1987.
- 6) Lam, W-K, and Tatsuoka, F.: Triaxial compression and extension strength of sand affected by strength anisotropy and sample slenderness, ASTM, STP 977, Advanced Triaxial Testing of Soil and Rock (to appear), 1987.
- 7) Lam, W-K. and Tatsuoka, F.: Effects of initial anisotropic fabric and σ_2 on strength and deformation characteristics of sand, *Soils and Foundations*.
- 8) Tatsuoka, F., Sakamoto, M., Kawamura, T. and Fukushima, S.: Strength and deformation characteristics of sand in plane strain compression at extremely low pressures, *Soils and Foundations*, Vol.26, No.1, pp.

- 65~84, 1986.
- 9) Tatsuoka, F., Sonoda, S., Hara, K., Fukushima, S. and Pradhan, T.B.S.: Failure and deformation of sand in torsional shear, *Soils and Foundations*, Vol.26, No.4, pp.79~97, 1986.
- 10) 堀井宣幸: プラダン T.B.S.・龍岡文夫: 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講演概要集, pp.363~366, 1987.
- 11) プラダン, T.B.S.・堀井宣幸・龍岡文夫: ねじり単純せん断における砂の変形特性, 同上, pp.355~358, 1987.
- 12) Tatsuoka, F.: Discussion of Bolton, *Geotechnique*, Vol. 37, No.2, pp.219~225, 1987.
- 13) 中村伸也: 砂の平面ひずみ圧縮試験における供試体内のひずみ分布, 東京大学修士論文, 1987.
- 14) Hettler, A. and Vardoulakis, I.: Behaviour of dry sand tested in a large triaxial apparatus, *Geotechnique*, Vol. 34, No.2, pp.183~198, 1984.
- 15) Bolton, M.D.: The strength and dilatancy of sand, *Geotechnique*, Vol.36, No.1, pp.65~78, 1986.
- 16) Oda, M.: The mechanism of fabric changes during compressional deformation of sand, *Soils and Foundations*, Vol.12, No.2, pp.1~18, 1972.
- 17) Oda, M.: Anisotropic strength of cohesionless sands, *Jour. GE Div., Proc. ASCE*, Vol.107, No. GT9, Sept., pp.1219~1231, 1981.
- 18) Arthur, J.R.F. and Menzies, B.K.: Inherent anisotropy in a sand, *Geotechnique*, Vol. 22, No.1, pp.115~129, 1972.
- 19) Tatsuoka, F.: On the angle of interface friction for cohesionless soils, *Soils and Foundations*, Vol.25, No. 4, pp.135~141, 1985.

(原稿受理 1987.5.9)

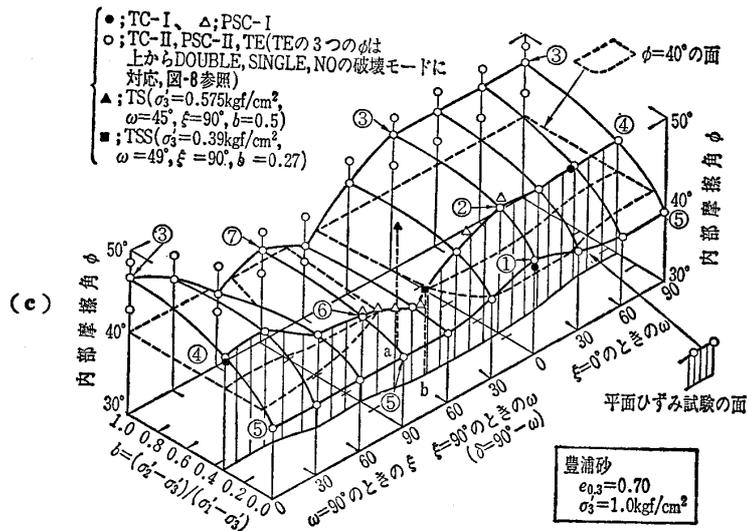
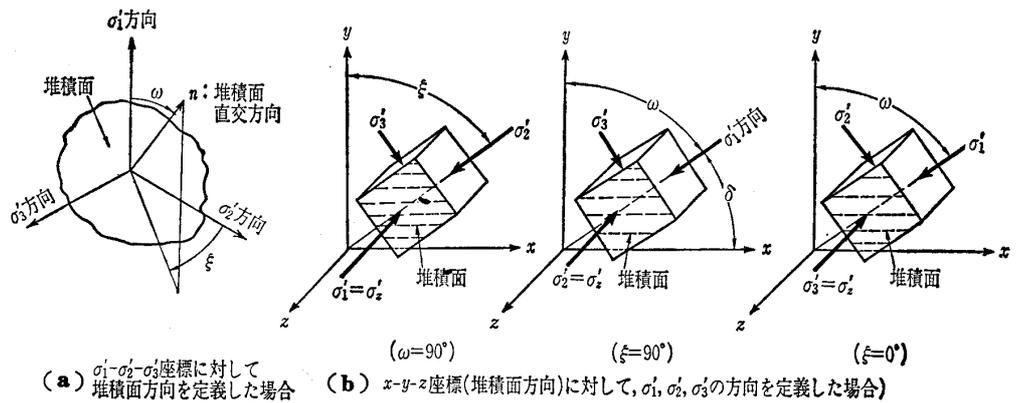


図-9 (a), (b) ω , ξ の定義, (c) $e_{0.3}=0.7$ のときの (b , ω , ξ) の関数としての ϕ (TE, TS, TSS の ϕ は(7)式を用いて補正した $\sigma_3'=1.0\text{kgf/cm}^2$ に対する値)