

主応力方向固定条件下における 異方性砂の非排水・排水せん断挙動

中田幸男¹・安福規之²・村田秀一³・兵動正幸⁴・永島剛圭⁵

¹学生会員 工修 山口大学大学院 博士後期課程 (〒755 山口県宇部市常盤台2557)

²正会員 工博 九州大学助教授 工学部建設都市工学科 (〒812 福岡市東区箱崎6丁目10番1号)

³正会員 工博 山口大学教授 工学部社会建設工学科

⁴正会員 工博 山口大学助教授 工学部社会建設工学科

⁵学生会員 山口大学大学院 博士前期課程

本研究では、中空ねじりせん断試験機を用いて初期構造異方性を有する2種類の砂供試体に対して、主応力方向を固定した条件でねじり変位制御方式の非排水せん断試験と応力制御方式の排水せん断試験を行った。その結果、限られた応力条件下ではあるが、試料やせん断中の排水条件によらず、異方性砂の変形や強度特性は堆積面と最大応力傾角面とのなす角によって特徴づけられることが示された。

Key Words : *inherent anisotropy, sand, angle of internal friction, undrained and drained shear test, special shear test*

1. まえがき

砂の初期構造異方性に関する研究は、1970年以降、小田¹⁾⁻³⁾やArther and Menzies⁴⁾の研究を端緒として多くの研究者によって行われてきた⁵⁾⁻²⁰⁾。近年、地盤のより厳密な数値シミュレーションや変形を考慮した設計法の確立のためには、地盤の初期構造異方性に関連した問題は無視できないものであることが指摘されるようになってきている。

従来の初期構造異方性に関する実験的な研究は、あらかじめ作成された砂供試体を種々の方向で切り出し、それを対象として三軸試験機^{1)-3), 7), 11)}や平面ひずみ試験機^{5), 6), 8), 9), 11), 12)}、単純せん断試験機¹⁰⁾、真の三主応力試験機⁴⁾等を用いてせん断試験を実施することで行われていた。また、この10年の間に、主応力方向を任意に制御できる中空ねじりせん断試験機を用いて異方性に関する実験的な検討が新たに行われるようになってきている¹³⁾⁻²⁰⁾。その結果、用いた試験機や供試体の形状、寸法および試料によって程度の大小はあるものの、せん断時の変形・強度特性は切り出し角や主応力方向角によってそれぞれ異なることが明らかにされている。加えて、その変形・強度特性の違いは、堆積面と最大応力傾角

面とのなす角が小さくなると共に、変形しやすく、強度が低下する傾向にあることが示されている^{7), 9), 11), 12), 14), 20)}。

上述した実験的な検討は、主に排水条件下におけるものであるが、実地盤の排水環境が非排水条件と完全排水条件との間にあることを考えると、異方性砂の非排水および排水条件下におけるせん断挙動を実験的に検討することが重要となってくる。Symes, Gens and Hight¹³⁾やShibuya and Hight¹⁵⁾は、主応力方向固定条件下での非排水せん断試験を実施し、その結果を基に状態境界曲面の考え方を導入し、主応力回転下の非排水挙動や排水条件下でのせん断挙動の解釈¹⁶⁾に利用している。しかし、非排水条件下における変形・強度特性を堆積面と最大応力傾角面に着目して体系立てて検討した例は見あたらないように思われる。

本研究は、以上のことを鑑み、著者らが既に試作し、有用性や適用性を検討した自動制御・計測可能な中空ねじりせん断試験機²¹⁾を用いて、初期構造異方性を有する2種類の砂供試体に対して主応力方向を固定した条件下で非排水せん断試験および排水せん断試験を実施し、主応力方向の違いが変形・強度特性に及ぼす影響を実験的に検討するものである。

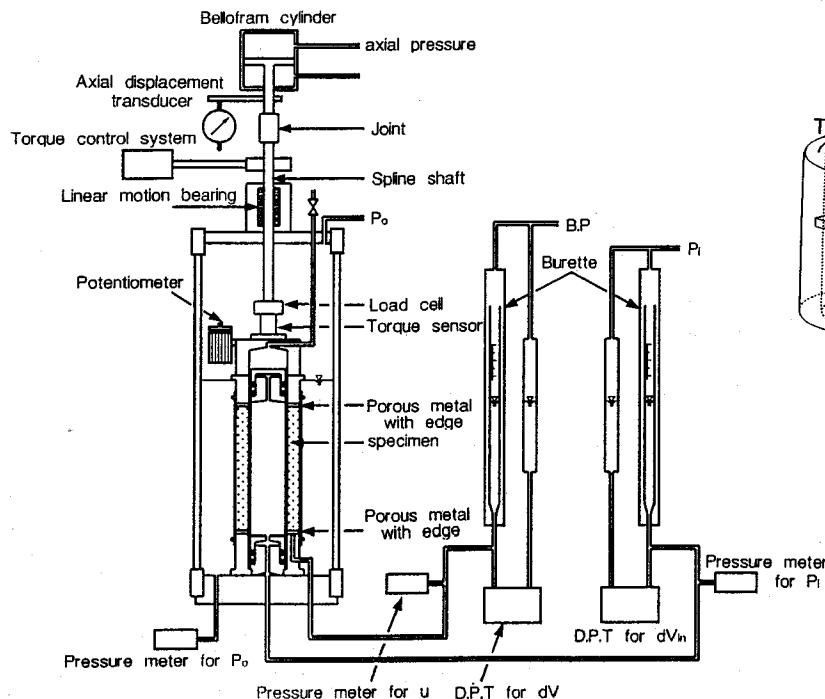


図-1 中空ねじりせん断試験機の概要

特に、本論文では、最大主応力方向あるいは最大応力傾角面と堆積面の関係に着目して、異方性砂の変形・強度特性について考察する。

2. 試験機、試料および実験方法

(1) 中空ねじりせん断試験機

図-1は、自動制御・計測可能な中空ねじりせん断試験機の主要部分の概要を示したものである²¹⁾。中空円筒形供試体は、概ね高さ20cm、外径10cm、内径6cmを目標に作成される。供試体の上下端面は、トルク力の伝達を可能にするために8枚の高さ2mm、厚さ1.5mmの刃を備えたポーラスメタルを用いている。供試体への載荷は、トルク力T、軸荷重W、外圧P_o、内圧P_iおよび背圧BPの5系統で行われるが、トルク力、軸荷重、外圧、内圧は、コンピューターからの命令をD/A変換器を介してそれぞれ独立に制御される。トルク力の制御はドライバーを介してモーターの回転速度、回転方向を変化させることで、軸荷重、外圧、内圧の制御はE/P変換器を用いて空気圧を最小で1kPa変化させることで行われる。計測項目は、トルク力T、軸荷重W、外圧P_o、内圧P_i、間隙水圧u、軸変位z、ねじり変位θ'、体積変化dV、内容積変化dV_{in}の9つで、A/D変換器を介してコンピューターに取り込まれる。

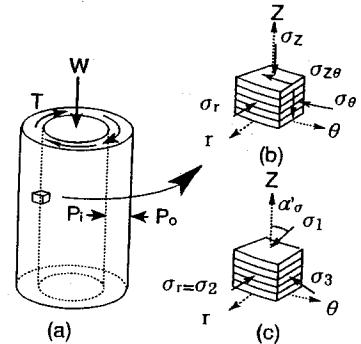


図-2 供試体要素と応力

表-1 供試体要素に作用する平均的な応力とひずみ

	応力	ひずみ
軸方向	$\sigma_z = \frac{W}{\pi(r_o^2 - r_i^2)} + \frac{P_o(r_o^2 - r_i^2) - P_i r_i^2}{r_o^2 - r_i^2}$	$\epsilon_z = \frac{z}{H}$
半径方向	$\sigma_r = \frac{P_o r_o + P_i r_i}{r_o + r_i}$	$\epsilon_r = -\frac{u_o - u_i}{r_o - r_i}$
円周方向	$\sigma_\theta = \frac{P_o r_o - P_i r_i}{r_o - r_i}$	$\epsilon_\theta = -\frac{u_o + u_i}{r_o + r_i}$
ねじり せん断	$\sigma_{z\theta} = \frac{1}{2} \left[\frac{3T}{2\pi(r_o^3 - r_i^3)} + \frac{4(r_o^3 - r_i^3)T}{3\pi(r_o^2 - r_i^2)(r_o^4 - r_i^4)} \right]$	$\epsilon_{z\theta} = \frac{\theta'(r_o^3 - r_i^3)}{3H(r_o^2 - r_i^2)}$

r_o :外半径, r_i :内半径, H :供試体高さ, d_r :ロッドの半径
 z :軸変位, u_o :外半径変位, u_i :内半径変位, θ' :ねじり変位

(2) 応力とひずみパラメーター

中空円筒形供試体にトルク力T、軸荷重W、外圧P_o、内圧P_iを載荷することによって、図-2に示すように、軸方向応力σ_z、半径方向応力σ_r、円周方向応力σ_θ、ねじりせん断応力σ_{zθ}が供試体要素に作用することになる。表-1は、供試体要素に作用する平均的な応力およびひずみの算定式を一覧にしたものである²²⁾。

さて、図-1に示すような中空ねじりせん断試験機では、半径方向に対して垂直な面にはせん断応力を作用させることができないため、半径方向応力は常に主応力となる。本研究では半径方向応力 σ_r が常に中間主応力 σ_2 になる条件で実験を行っている。この場合、最大主応力 σ_1 、中間主応力 σ_2 、最小主応力 σ_3 と平均的な応力の間の関係式は、以下のようにになる。

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_z + \sigma_\theta}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_z - \sigma_\theta}{2}\right)^2 + \sigma_{z\theta}^2} \quad (1a)$$

$$\sigma_2 = \sigma_r \quad (1b)$$

$$\sigma_3 = \frac{\sigma_z + \sigma_\theta}{2} - \sqrt{\left(\frac{\sigma_z - \sigma_\theta}{2}\right)^2 + \sigma_{z\theta}^2} \quad (1c)$$

同様に最大主ひずみ ε_1 、中間主ひずみ ε_2 、最小主ひずみ ε_3 と軸方向ひずみ ε_z 、半径方向ひずみ ε_r 、円周方向ひずみ ε_θ およびねじりせん断ひずみ $\varepsilon_{z\theta}$ との間にも、以下のような関係式が成り立つ。

$$\varepsilon_1 = \frac{\varepsilon_z + \varepsilon_\theta}{2} + \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_z - \varepsilon_\theta}{2}\right)^2 + \varepsilon_{z\theta}^2} \quad (2a)$$

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_r \quad (2b)$$

$$\varepsilon_3 = \frac{\varepsilon_z + \varepsilon_\theta}{2} - \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_z - \varepsilon_\theta}{2}\right)^2 + \varepsilon_{z\theta}^2} \quad (2c)$$

本研究において供試体の応力状態を表すために用いた応力パラメーターは、平均有効主応力 p' 、軸差応力 q 、動員される内部摩擦角 ϕ'_m 、中間主応力係数 b および鉛直軸と最大主応力方向とのなす角で定義される主応力方向角 α'_σ （図-2(c)参照）であり、以下の式で与えられる。

$$p' = \frac{\sigma'_1 + \sigma'_2 + \sigma'_3}{3} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} - u \quad (3a)$$

$$q = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma'_1 - \sigma'_2)^2 + (\sigma'_2 - \sigma'_3)^2 + (\sigma'_3 - \sigma'_1)^2]} \quad (3b)$$

$$\phi'_m = \sin^{-1} \left(\frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{\sigma'_1 + \sigma'_3} \right) \quad (3c)$$

$$b = \frac{\sigma'_2 - \sigma'_3}{\sigma'_1 - \sigma'_3} \quad (3d)$$

$$\alpha'_\sigma = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{2\sigma_{z\theta}}{\sigma'_z - \sigma'_\theta} \right) \quad (3e)$$

ここで、 u は過剰間隙水圧であり、上付きの添字“'”は有効応力表示であることを意味する。また、供試体の変形を表すために用いたひずみパラメーターは体積ひずみ ε_v と軸差ひずみ γ であり、主ひずみを用いて表示するとそれぞれ次のようになる。

$$\varepsilon_v = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 \quad (4a)$$

$$\gamma = \sqrt{\frac{2}{9} [(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2]} \quad (4b)$$

(3) 試料と供試体作成方法

実験に用いた試料は、秋穂砂（比重=2.63、最大間隙比=0.96、最小間隙比=0.58）と豊浦標準砂（比重=2.64、最大間隙比=0.97、最小間隙比=0.64）である。両試料とも石英および長石を主成分としているが、秋穂砂は、天然の海砂であり、豊浦標準砂（以下豊浦砂と記す）と比べて、角張った粒子や偏平な粒子が多く、粒度分布のよい試料である²³⁾。この2つの試料を用いて実験を行うことで、異方性砂の応力ひずみ挙動の特徴をより普遍的に明らかにすることができます。

供試体は、気乾状態にある試料を空中落下法を用い、初期相対密度60%を目標に作成された。空中落下法によって作成された供試体の堆積面は、図-2に示すように鉛直軸に対して直交する面となる。本研究では先にも述べたように σ_r が常に σ_2 となる条件で行っているため、 σ_2 の方向が常に堆積面に対して水平方向となる場合での検討であることに注意が必要である。具体的には、供試体に作用する応力の不均一性を考慮して^{22), 24)}、鉛直軸と σ_1 方向とのなす角 α'_σ が $15^\circ \sim 75^\circ$ の範囲での異方性の現れについて実験的な検討を行っている。

供試体作成後、30kPaの負圧により供試体を自立させ、供試体寸法を測定した後、負圧を側圧に置換した。供試体の飽和は、炭酸ガスの通気と脱気水の通水、そして背圧を負荷することで行った。飽和度の検定は、非排水状態で側圧を50kPa下降させることで行い、間隙水圧係数B値が0.96以上のものを飽和供試体とみなして実験を行った。

(4) 実験方法

実験は、 $p'=100$ kPaまで等方圧密した後行われた。排水せん断試験は、平均有効主応力100kPa一定、中間主応力係数0.5一定で、所定の主応力方向角に固定して応力制御方式で破壊にいたるまでせん断を行うものである。この試験での破壊は、供試体に作用する外力が制御不可能な状態に達した時とした。

表-2 非排水せん断試験結果の一覧
(a) 秋穂砂

α'_σ (deg.)	e_i	Dr_i (%)	e_c	u_{max} (kPa)	q_{umax} (kPa)	ϕ'_{PT} (deg.)	ϕ'_p (deg.)
15	0.744	56.9	0.740	24.3	77.4	36.3	48.6
30	0.722	62.8	0.718	27.0	71.4	34.4	46.4
45	0.727	61.5	0.723	25.6	68.5	32.1	41.9
60	0.746	56.4	0.742	32.0	59.3	30.4	38.7
75	0.733	59.9	0.729	30.2	64.6	32.3	41.7

(b) 豊浦砂

α'_σ (deg.)	e_i	Dr_i (%)	e_c	u_{max} (kPa)	q_{umax} (kPa)	ϕ'_{CSR} (deg.)	ϕ'_{PT} (deg.)	ϕ'_p (deg.)
15	0.766	61.2	0.761	29.4	71.1	—	35.5	44.9
30	0.773	59.1	0.769	35.3	63.9	—	34.8	41.7
45	0.753	65.0	0.749	46.3	49.8	24.9	32.4	39.2
60	0.771	59.7	0.766	48.0	48.0	23.3	32.2	37.5
75	0.758	63.6	0.754	56.3	39.6	20.7	31.6	37.5

表-3 排水せん断試験結果の一覧
(a) 秋穂砂

α'_σ (deg.)	e_i	Dr_i (%)	e_c	ε_{vmax} (%)	ϕ'_{ch} (deg.)	ϕ'_f (deg.)
15	0.743	57.2	0.738	0.094	33.4	50.8
30	0.722	62.7	0.718	0.082	33.4	52.0
45	0.732	60.1	0.727	0.132	33.4	46.5
60	0.724	62.3	0.719	0.147	33.4	40.5
75	0.714	64.9	0.708	0.198	33.0	42.0

(b) 豊浦砂

α'_σ (deg.)	e_i	Dr_i (%)	e_c	ε_{vmax} (%)	ϕ'_{ch} (deg.)	ϕ'_f (deg.)
15	0.777	58.1	0.772	0.118	36.0	45.8
30	0.761	62.6	0.757	0.112	33.2	42.8
45	0.763	62.0	0.759	0.184	30.8	40.0
55	0.778	57.8	0.773	0.187	30.9	38.1
60	0.759	63.2	0.755	0.177	29.9	38.6
65	0.754	64.8	0.750	0.237	31.9	38.0
75	0.767	61.0	0.762	0.284	31.9	38.4

また、非排水せん断試験は、一定速度のねじり変位($d\theta' = 0.1^\circ/\text{min}$)を与えながら、平均主応力100kPa一定、中間主応力係数0.5一定で、所定の主応力方向角を保つように軸力、内圧、外圧を制御するものである²¹⁾。すべての実験に対して、メンブレンの張力や配管膨張に対する補正を行っている²²⁾。

また、メンブレン貫入量に対する補正²²⁾は、圧密時や排水せん断時の径路に対して行っているものの、非排水せん断時の径路に対しては行っていない。表-2は非排水せん断試験の、表-3は排水せん断試験の供試体の状態や主要なせん断試験結果を秋穂砂、豊浦砂の両試料について一覧にしたものである。表中の e_i および Dr_i は、供試体が自立した時の間隙比と相対密度を、 e_c は圧密終了時の供試体の間隙比を示している。

3. 実験結果

(1) 非排水せん断挙動

図-3(a), (b)および図-4(a), (b)は、秋穂砂と豊浦砂の実験結果について、平均有効主応力 p' -軸差応力 q 関係と q -軸差ひずみ γ 関係をそれぞれ示したものである。いずれの試料においても、主応力方向角の違いは、有効応力径路や軸差ひずみの生じ方に影響を与えることがわかる。特に、豊浦砂

に着目すると、 $\alpha'_\sigma = 15^\circ, 30^\circ$ の $q-\gamma$ 関係は、ひずみ硬化挙動を示しているのに対し、 $\alpha'_\sigma = 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ$ の $q-\gamma$ 関係は、変相状態に達する以前に q が減少するひずみ軟化挙動を示している。一方、秋穂砂の $q-\gamma$ 関係は、いずれの α'_σ においてもひずみ硬化挙動を示している。

図-5は、せん断中に生じる最大過剰間隙水圧 u_{max} (図-5中右上参照)と主応力方向角 α'_σ の関係を示したものである。秋穂砂の u_{max} は、 α'_σ が 15° から 75° に変化することで24kPaから32kPa程度の増加を示している。豊浦砂の u_{max} は、 α'_σ の変化によって29kPaから56kPaと約2倍程度の増加を示している。図-6は、 u_{max} に達したときの軸差応力 q_{umax} (図-6中右下参照)と主応力方向角 α'_σ の関係を示したものである。秋穂砂の q_{umax} は、 $\alpha'_\sigma = 15^\circ$ の77kPaから α'_σ の増加と共に減少し、 $\alpha'_\sigma = 60^\circ$ の59kPaで最小値を示している。豊浦砂の q_{umax} も、 $\alpha'_\sigma = 15^\circ$ の71kPaから $\alpha'_\sigma = 75^\circ$ の40kPaと、 α'_σ の増加と共に減少している。以上のことから、軸差ひずみや過剰間隙水圧の生じ方等に着目すると、豊浦砂の方が秋穂砂よりも相対的に大きく α'_σ の影響を受けることが認められる。

図-7は、両試料の q/p' のピーク時の内部摩擦角 ϕ'_p および変相状態の内部摩擦角 ϕ'_{PT} に加えて、豊浦砂については、ひずみ軟化挙動を生じ始める応

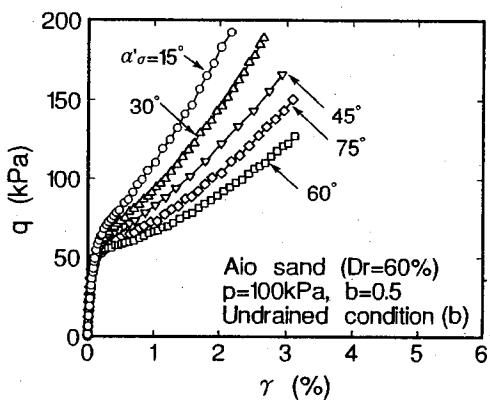
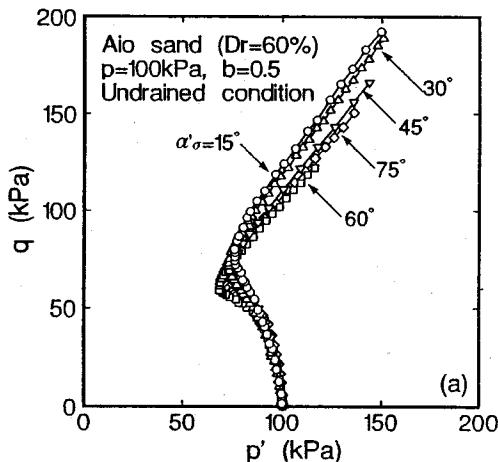


図-3 秋穂砂の非排水せん断挙動;(a)有効応力経路,(b)軸差応力-軸差ひずみ関係

力比(限界有効応力比, $CSR^{25,26}$)における内部摩擦角 ϕ'_{CSR} と主応力方向角 α'_σ の関係を示したものである。ここで、 ϕ'_p 、 ϕ'_{PT} および ϕ'_{CSR} は以下の式で定義される。

$$\phi'_p = \sin^{-1} \left(\frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{\sigma'_1 + \sigma'_3} \right)_{max} \quad (5a)$$

$$\phi'_{PT} = \sin^{-1} \left(\frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{\sigma'_1 + \sigma'_3} \right)_{at\ PT} \quad (5b)$$

$$\phi'_{CSR} = \sin^{-1} \left(\frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{\sigma'_1 + \sigma'_3} \right)_{at\ CSR} \quad (5c)$$

また、図の右座標には、 ϕ'_p の時の応力比 $\eta_p (= (q/p')_{max})$ 、 ϕ'_{PT} の時の応力比 $\eta_{PT} (= (q/p')_{at\ PT})$ および ϕ'_{CSR} の時の応力比 $\eta_{CSR} (= (q/p')_{at\ CSR})$ があわせて示されている。両試料の ϕ'_p は、 α'_σ の増加

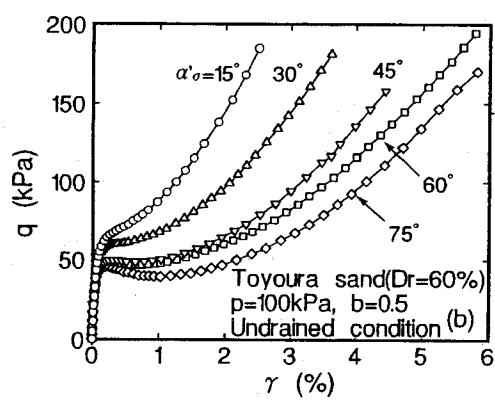
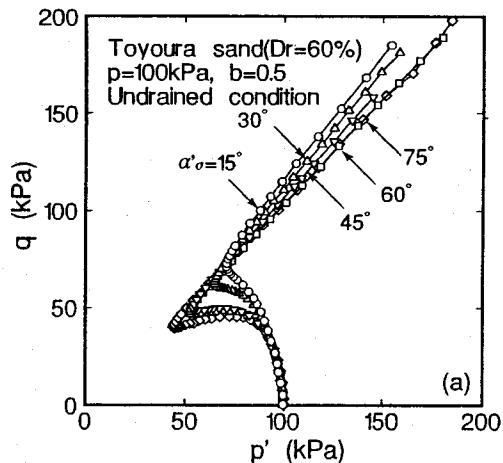


図-4 豊浦砂の非排水せん断挙動;(a)有効応力経路,(b)軸差応力-軸差ひずみ関係

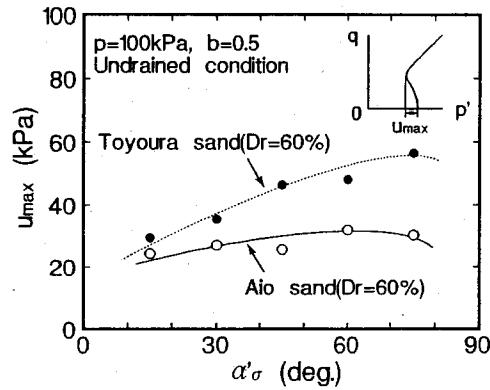


図-5 最大過剰隙間水圧と主応力方向角の関係

とともに減少し、 $\alpha'_\sigma = 60^\circ$ 付近で最小値を示している。また、 ϕ'_{PT} も、 α'_σ の増加とともに若干減少するものの、 ϕ'_p の変化の程度と比較すると小さいことがわかる。両試料の α'_σ の変化に伴う ϕ'_p の変化量は、秋穂砂では $49^\circ \sim 39^\circ$ と 10° 程度、豊浦砂では 45°

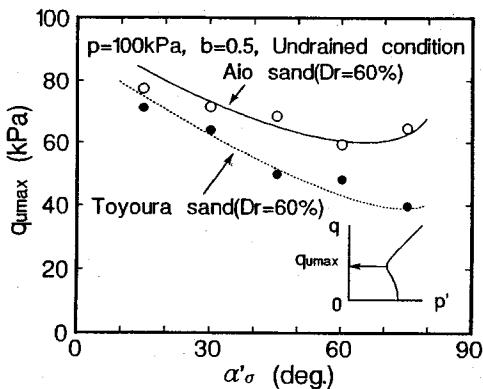


図-6 最大過剰間隙水圧に達した時
の軸差応力と主応力方向角の
関係

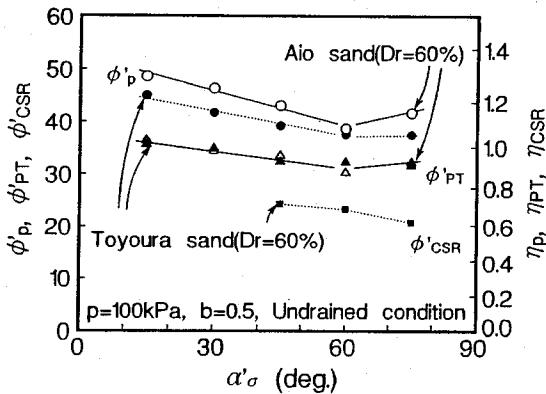


図-7 ピーク時、変相状態、限界有効応力比における内部摩擦角と主応力方向角の関係

~38°と7°程度となっている。つまり、変形に関して α'_σ の影響を相対的に受けにくい秋穂砂の方が、強度特性については、 α'_σ の影響を相対的に大きく受けることを示している。一方、 ϕ'_{PT} は、二つの試料に明確な違いが認められず、ほぼ等しい値となっている。 ϕ'_{CSR} は、豊浦砂の $\alpha'_\sigma = 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ$ で現れているが、 $\alpha'_\sigma = 75^\circ$ で最小の値を示している。このCSRは、特に緩い砂の非排水繰返し試験で見られる流動現象を説明する上で重要な意味を持つパラメーターである^{25), 26)}。上述した異方性砂の非排水せん断挙動に及ぼす α'_σ の影響は、Symes et al.¹³⁾や Shibuya and Hight¹⁵⁾、佐藤ら¹⁹⁾の応力制御試験の結果と同様の傾向を示している。

(2) 排水せん断挙動

図-8(a)-(c)および図-9(a)-(c)は、秋穂砂と豊浦砂の実験結果について、主応力比 σ'_1/σ'_3 と

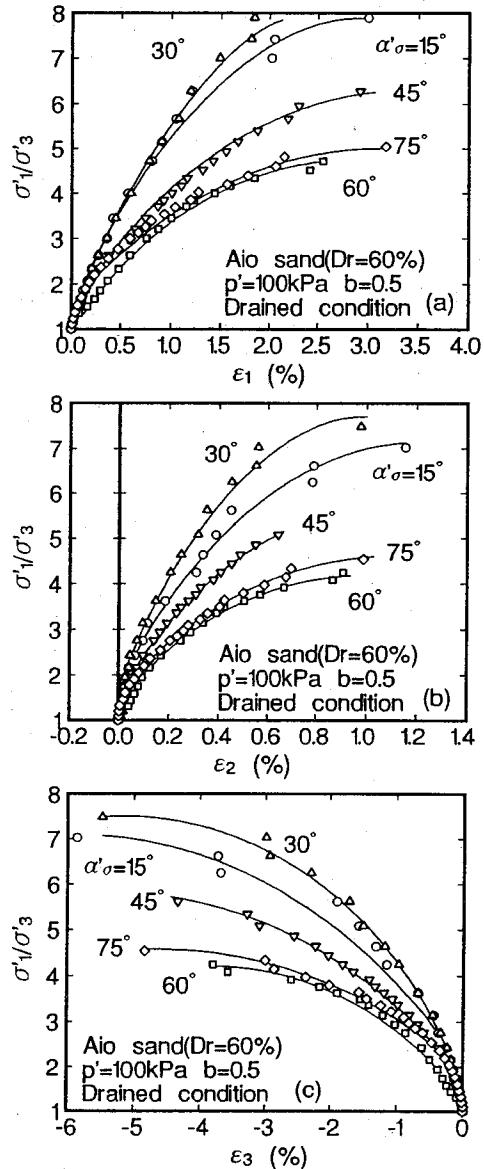


図-8 秋穂砂の排水せん断挙動;(a)主応力比と最大主ひずみの関係、(b)主応力比と中間主ひずみの関係、(c)主応力比と最小主ひずみの関係

最大主ひずみ ϵ_1 、中間主ひずみ ϵ_2 および最小主ひずみ ϵ_3 の関係を示したものである。これらの実験結果がすべて $p' = 100\text{kPa}$, $b = 0.5$ 一定の条件で行われたことに注意すると、主応力方向角の違いは異方性砂の変形・強度特性に大きな影響を与えることがわかる。例えば、破壊時の主応力比は、 $\alpha'_\sigma = 15^\circ$ から 75° に変化することにより秋穂砂で8~4.5、豊浦砂で6~4程度の減少を示している。また、 ϵ_1

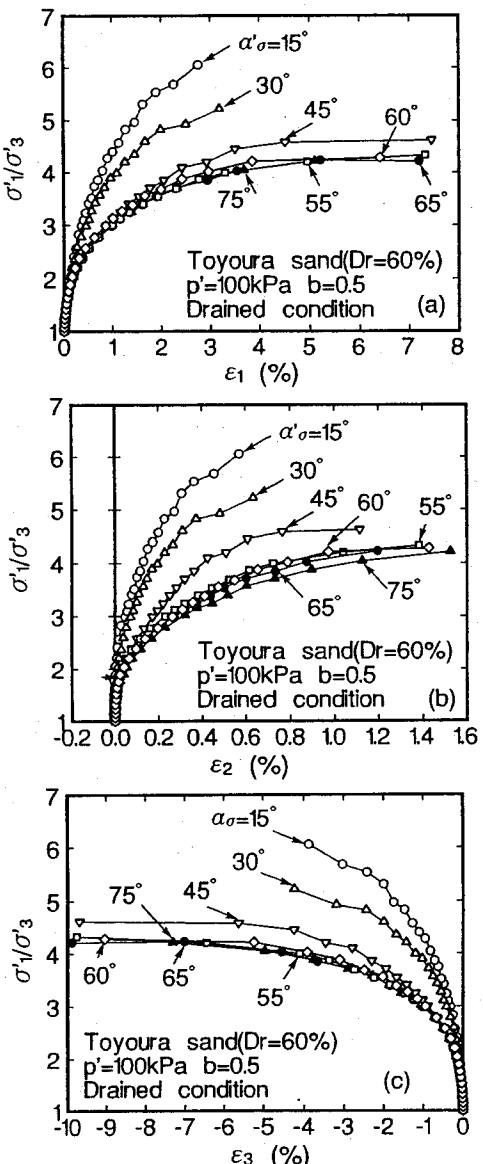


図-9 豊浦砂の排水せん断挙動;(a)主応力比と最大主ひずみの関係,(b)主応力比と中間主ひずみの関係,(c)主応力比と最小主ひずみの関係

のひずみ量は、 $\sigma'_1/\sigma'_3 = 4$ 付近の結果に着目すると、秋穂砂の場合では $\alpha'_\sigma = 15^\circ$ で0.5%と $\alpha'_\sigma = 60^\circ$ で1.5%，豊浦砂の場合では $\alpha'_\sigma = 15^\circ$ で1%と $\alpha'_\sigma = 75^\circ$ で3%となっており、 α'_σ の増加と共に増加する傾向にある。一方、 ϵ_3 のひずみ量も、 $\sigma'_1/\sigma'_3 = 4$ 付近の結果に着目すると、秋穂砂の場合では $\alpha'_\sigma = 15^\circ$ で-1%と $\alpha'_\sigma = 60^\circ$ で-3%，豊浦砂の場合では $\alpha'_\sigma = 15^\circ$ で-1%と $\alpha'_\sigma = 75^\circ$ で-5%となっており、

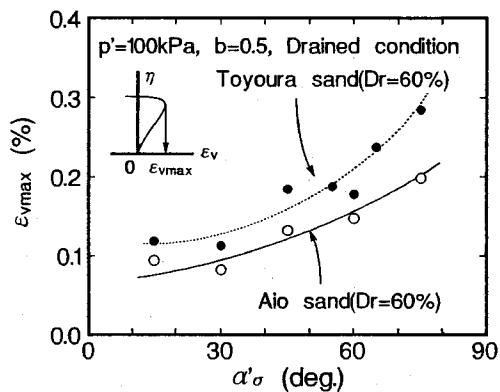


図-10 最大収縮時の体積ひずみと主応力方向角の関係

α'_σ の増加と共に負のひずみが増加する傾向にある。さらに、 ϵ_2 のひずみ量は、 σ'_1/σ'_3 の大きさによらず α'_σ の増加とともに大きくなるが、横軸のスケールに注意すると ϵ_1 のひずみ量と比較してかなり小さいことがわかる。

図-10は、両試料の実験結果について、せん断中に得られる体積ひずみの収縮時の最大値 ϵ_{vmax} (図-10中左上参照)と主応力方向角の関係を示したものである。秋穂砂の ϵ_{vmax} は $\alpha'_\sigma = 15^\circ$ で0.1%， $\alpha'_\sigma = 75^\circ$ で0.2%を示し、主応力方向角の増加と共に大きくなることがわかる。また、豊浦砂の結果も秋穂砂と同様の傾向を示すものの、 ϵ_{vmax} の値は、 $\alpha'_\sigma = 15^\circ$ で0.1%， $\alpha'_\sigma = 75^\circ$ で0.3%を示し、秋穂砂と比較すると、 α'_σ の増加に伴う変化量が大きくなっている。以上のことから、非排水せん断挙動と同様、排水せん断時のひずみの生じ方やダイレタンシーの生じ方についても、豊浦砂の方が秋穂砂と比較して相対的に α'_σ の影響を大きく受けることがわかる。

図-11は、破壊時の内部摩擦角 ϕ'_f および最大収縮時の内部摩擦角 ϕ'_{ch} と主応力方向角の関係を示したものである。ここで、 ϕ'_f および ϕ'_{ch} は以下の式で定義される。

$$\phi'_f = \sin^{-1} \left(\frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{\sigma'_1 + \sigma'_3} \right)_{at \text{ failure}} \quad (6a)$$

$$\phi'_{ch} = \sin^{-1} \left(\frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{\sigma'_1 + \sigma'_3} \right)_{at \epsilon_{vmax}} \quad (6b)$$

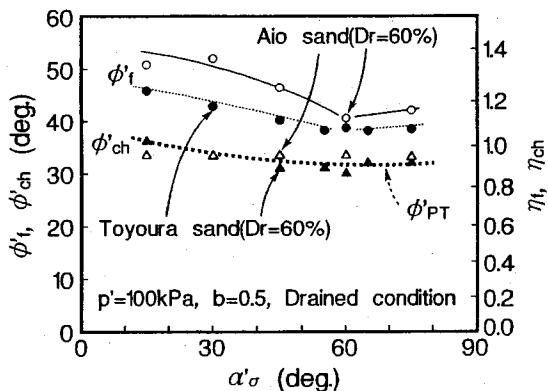


図-1-1 破壊時および最大収縮時の内部摩擦角と主応力方向角の関係

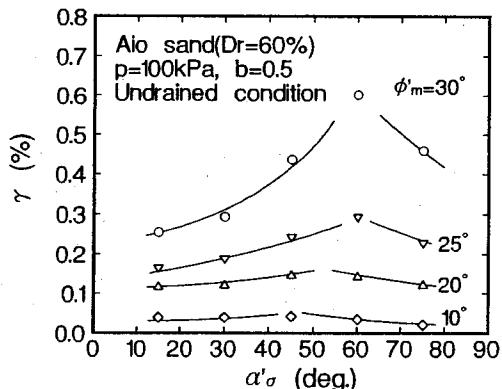


図-1-2 非排水せん断試験から得られた秋穂砂のある動員される内部摩擦角に達した時の軸差ひずみと主応力方向角の関係

また、図の右座標は、 ϕ'_f の時の応力比 $\eta_f (=q/p'_{at\ failure})$ および ϕ'_{ch} の時の応力比 $\eta_{ch} (=q/p')$ $at\ \epsilon_{v\ max}$ を示している。 ϕ'_f は、主応力方向角の違いによって秋穂砂で $52^\circ \sim 40^\circ$ 、豊浦砂で $46^\circ \sim 38^\circ$ の範囲の値を示し、秋穂砂の方が豊浦砂と比較して α'_σ の増加に伴う ϕ'_f の変化量が大きいことを、非排水試験結果の ϕ'_{pt} の傾向と同様示している。以上の試料の違いに対する結果の相違、つまり変形については豊浦砂の方が相対的に大きく主応力方向角の影響を受け、強度については秋穂砂の方が相対的に大きな主応力方向角の影響を受けるという結果は、主に粒子の形状や粒度分布の違いによるものと考えられる。一方、 ϕ'_{ch} は、 α'_σ が異なることで 5° 程度変化しているが、試料の違いによる明瞭な差はみられないことがわかる。また、図中に示した破線は、非排水試験の変相状態の内部摩擦角 ϕ'_{PT} を示したもの

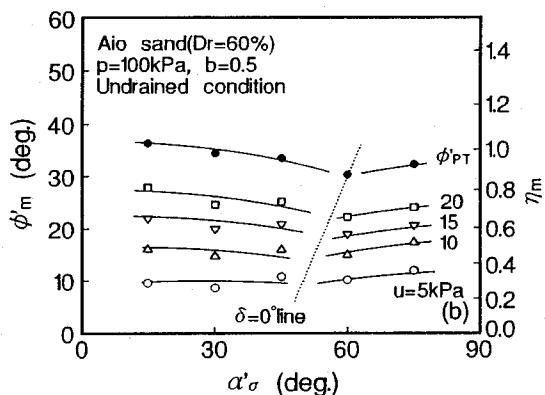
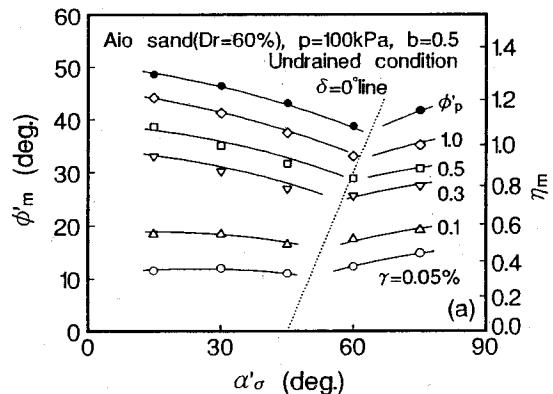


図-1-3 非排水せん断試験から得られた秋穂砂の動員される内部摩擦角と主応力方向角の関係；(a)等軸差ひずみ線，(b)等過剰間隙水圧線

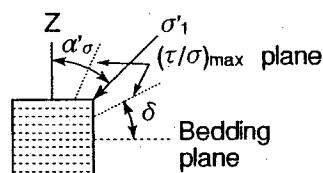


図-1-4 堆積面と最大応力傾角面とのなす角の定義

であるが、 ϕ'_{ch} と ϕ'_{PT} の間に有意な差がないことがわかる。

(3) 堆積面に着目した変形・強度特性の考察

図-1-2 は、動員される内部摩擦角 ϕ'_m が 10° 、 20° 、 25° 、 30° に達したときの、軸差ひずみ γ と主応力方向角 α'_σ の関係を非排水条件下で行った秋穂砂の実験結果について示したものである。この図か

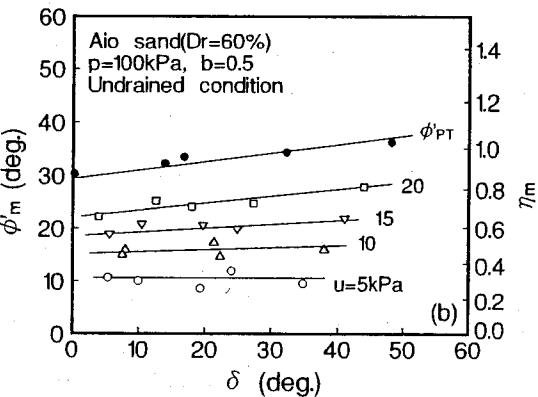
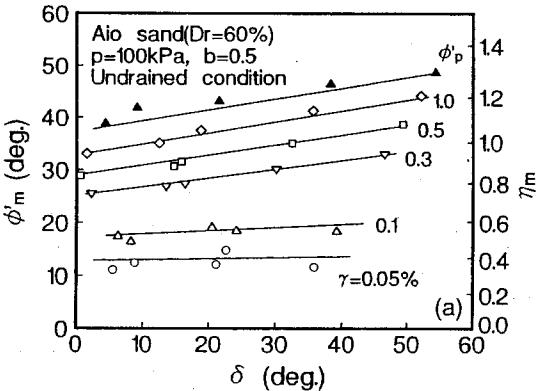


図-1-5 非排水せん断試験から得られた秋穂砂の動員される内部摩擦角—堆積面と最大応力傾角面のなす角関係;(a)等軸差ひずみ線,(b)等過剰間隙水圧線

ら、 10° のラインは、 α'_σ の違いによらずほぼ一定の γ の値を示しているものの、 20° のラインの最大値は $\alpha'_\sigma = 45^\circ$ と 60° の間で、 25° と 30° のラインの最大値は $\alpha'_\sigma = 60^\circ$ 付近で見い出せる。このことは、 ϕ'_p の増加と共に変形しやすい主応力方向角が変化していることを示している。

図-1-3(a)は、秋穂砂の非排水条件下における実験結果について軸差ひずみ γ が 0.05% 、 0.1% 、 0.3% 、 0.5% 、 1.0% に達した時に動員される内部摩擦角 ϕ'_m と主応力方向角 α'_σ の関係および、 ϕ'_p と α'_σ の関係を示したものである。また、図中の点線は、2つの最大応力傾角面(潜在的な滑り面に対応)の1つが堆積面に一致する状態($\delta = 0^\circ$)を示したものである。ここで、 δ は、堆積面と堆積面に近い最大応力傾角面とのなす角度であり、図-1-4に δ の定義を模式的に示している。また、 δ は α'_σ と ϕ'_m を用いて表すと、 $\delta = |45 + \phi'_m/2 - \alpha'_\sigma|$ で与え

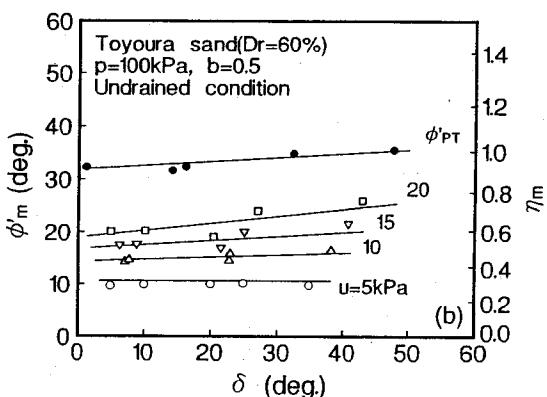
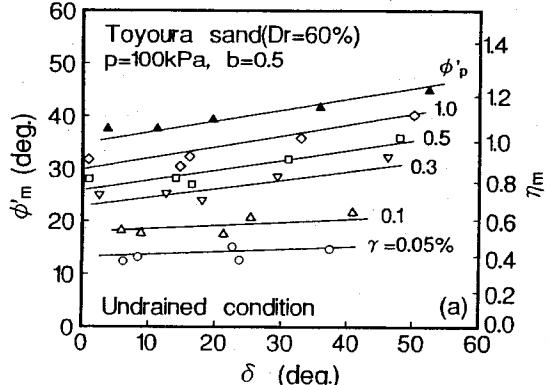


図-1-6 非排水せん断試験から得られた豊浦砂の動員される内部摩擦角—堆積面と最大応力傾角面のなす角関係;(a)等軸差ひずみ線,(b)等過剰間隙水圧線

られる。この図から、最小の ϕ'_m を示す α'_σ は、 $\gamma = 0.05\%$ では明確に現れないものの、 $\gamma = 0.1\%$ で 45° と 60° の間、 $\gamma = 0.3\%$ 、 0.5% 、 1.0% で 60° となっており、 $\delta = 0^\circ$ 線に沿ったかたちで変化することがわかる。さらに、最小の ϕ'_p を示す α'_σ は、 60° の時であり、 $\delta = 0^\circ$ 線に最も近い主応力方向角となっていることがわかる。図-1-3(b)は、過剰間隙水圧 u が 5kPa 、 10kPa 、 15kPa 、 20kPa に達した時に動員される内部摩擦角 ϕ'_m と主応力方向角 α'_σ の関係を、秋穂砂の実験結果について示したものである。図中には、 ϕ'_p と α'_σ の関係もあわせて示している。 u が小さい場合には明確に現れないものの、 u が 15kPa や 20kPa 、さらに変相状態での最小の ϕ'_m は、軸差ひずみ同様、 $\delta = 0^\circ$ 線付近に存在しそうである。以上の結果は、非排水せん断時の異方性砂の変形・強度特性が δ に依存して現れることを示唆しており、以下では δ に着目した結果の整理を試みる。

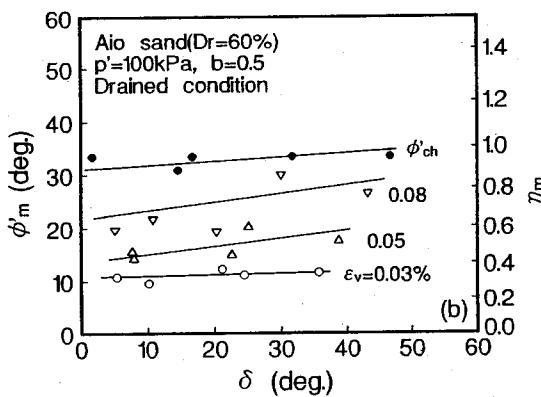
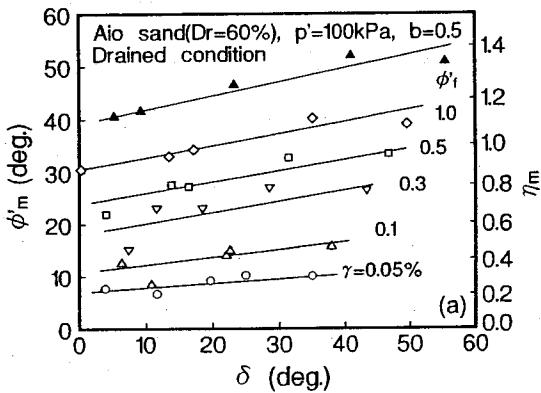


図-17 排水せん断試験から得られた秋穂砂の動員される内部摩擦角-堆積面と最大応力傾角面のなす角関係²⁰⁾; (a)等軸差ひずみ線, (b)等体積ひずみ線

図-15は、堆積面と最大応力傾角面とのなす角 δ に着目して図-13を再整理したので、 $\phi'_m-\delta$ 関係における等軸差ひずみ線および等過剰間隙水圧線を示したものである。図-15(a)の等 γ 線に着目すると、 $\gamma=0.05\%$ 線は、 δ の増加による ϕ'_m の変化が明確に現れないが、 $\gamma=0.3\%, 0.5\%, 1.0\%$ 線および ϕ'_p 線は、 δ の増加とともに顕著に ϕ'_m が増加する傾向を示している。また、図-15(b)の等 u 線に着目すると、 $u=5\text{kPa}$ 線は、 δ によらずほぼ一定の ϕ'_m を示している。この $u=5\text{kPa}$ 線の傾向や先に示した $\gamma=0.05\%$ 線の δ の増加による ϕ'_m の変化が明確に現れない傾向は、微小ひずみレベルにおけるひずみの生じ方が初期構造異方性の影響を受けない¹²⁾という結果を示唆するものと考えられる。さらに、 $u=10\text{kPa}, 15\text{kPa}, 20\text{kPa}$ 線および ϕ'_{PT} 線は、 δ の増加とともに ϕ'_m が増加する傾向を示している。このような特徴は、豊浦砂の非排水せん断試験結果に対して同様の整理を行った図-16からも認められる。

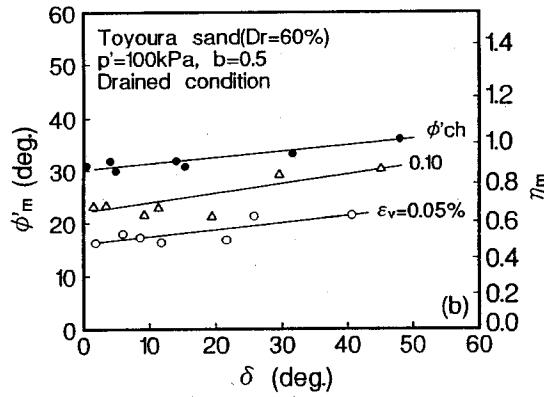
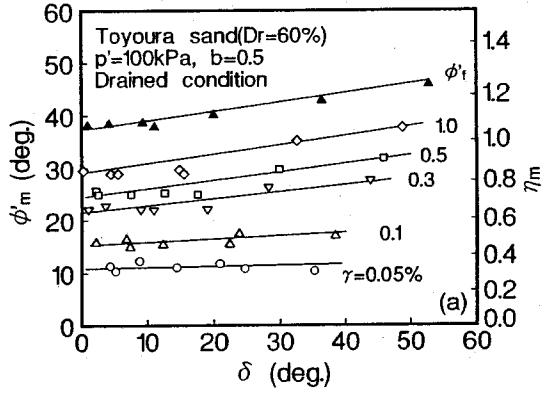


図-18 排水せん断試験から得られた豊浦砂の動員される内部摩擦角-堆積面と最大応力傾角面のなす角関係; (a)等軸差ひずみ線, (b)等体積ひずみ線

図-17は秋穂砂の排水せん断試験結果について、 $\phi'_m-\delta$ 関係における等軸差ひずみ線と等体積ひずみ線をそれぞれ示したものである。各々の図には、 ϕ'_f と δ 、 ϕ'_{ch} と δ の関係もあわせて示している。この図から、排水せん断時と非排水せん断時の $\phi'_m-\delta$ 関係は、定性的に類似の傾向を示すことがわかる。つまり、 γ や ϵ_v が、ひずみ量の小さなせん断初期には δ に明確に依存しないものの、ひずみ量の増加と共に、 δ の小さな応力状態ほど生じやすくなることを示している。また、 ϕ'_f は δ が小さくなると共に低下することを示している。このような変形・強度特性が δ によって特徴づけられる傾向は、豊浦砂の実験結果に対して図-17と同様の整理を行った図-18においても伺える。また、構造異方性に着目して行われた研究^{7)-9), 11), 12), 14), 20)}においても、用い

た試験機や試料、供試体の作成方法、有効拘束圧の違いはあるものの、上述した結果と類似の傾向が示されている。以上のことから、非排水せん断と排水せん断の条件によらず、異方性砂のせん断挙動に及ぼす主応力方向の影響は堆積面と最大応力傾角面とのなす角 δ によって特徴づけられることがわかる。

4. 結 論

本研究では、中空ねじりせん断試験機を用いて初期構造異方性を有する秋穂砂と豊浦砂の初期相対密度60%の供試体に対して、主応力方向を固定した条件でねじり変位制御方式の非排水せん断試験と応力制御方式の排水せん断試験を行った。得られた主要な結果をまとめると以下のようになる。

- 1) 非排水せん断挙動の場合、せん断中の最大過剰間隙水圧 u_{max} は主応力方向角 α'_σ （鉛直軸と最大主応力方向とのなす角）の増加とともに増加し、 u_{max} に達したときの軸差応力 q_{umax} は、 α'_σ の増加と共に減少し、秋穂砂については $\alpha'_\sigma=60^\circ$ 付近で最小値となる。また、排水せん断挙動の場合、せん断中の最大収縮時の体積ひずみ量は α'_σ の増加と共に増加する。
- 2) 非排水試験結果における変相状態の内部摩擦角 ϕ'_{PT} や排水試験結果における最大収縮時の内部摩擦角 ϕ'_{ch} は、いずれも主応力方向角の増加と共に5°程度の減少を示すが、 ϕ'_{PT} と ϕ'_{ch} の間に有意な差がみられない。
- 3) 非排水試験結果のピーク時の内部摩擦角や排水試験結果の破壊時の内部摩擦角は、主応力方向角の増加と共に減少する傾向にある。また、試料の比較から、変形の生じ方に對して α'_σ の影響を相対的に受けにくい秋穂砂の方が、強度特性に関しては、 α'_σ の影響を相対的に大きく受けることがわかった。
- 4) 非排水試験結果から、軸差ひずみや過剰間隙水圧は、ひずみの小さなせん断初期には、堆積面と最大応力傾角面とのなす角 δ に明確に依存しないものの、ひずみの増加と共に、 δ の小さな応力状態ほど生じやすくなることが確認された。また、ピーク時の内部摩擦角は δ が小さくなると共に低下することが示された。
- 5) 4)と類似の傾向が、排水せん断挙動においても認められ、異方性砂のせん断挙動に及ぼす主応力方向の影響は堆積面と最大応力傾角面とのなす角 δ によって特徴づけられることが明らかとなった。

参考文献

- 1) Oda, M.: Initial fabrics and their relations to mechanical properties of granular materials, *Soils and Foundations*, Vol.12, No.1, pp.17-36, 1972.
- 2) Oda, M.: The mechanism of fabric changes during compressional deformation of sand, *Soils and Foundations*, Vol.12, No.2, pp.1-18, 1972.
- 3) Oda, M.: Deformation mechanism of sand in triaxial compression tests, *Soils and Foundations*, Vol.12, No.4, pp.45-63, 1972.
- 4) Arthur, J.R.F. and Menzies, B.K.: Inherent anisotropy in a sand, *Géotechnique*, Vol.22, No.1, pp.115-128, 1972.
- 5) Oda, M., Koishikawa, I. and Higuchi, T.: Experimental study of anisotropic shear strength of sand by plane strain test, *Soils and Foundations*, Vol.18, No.1, pp.25-38, 1978.
- 6) Oda, M.: Anisotropic strength of cohesionless sands, *Jour. of Geotechnical Eng. Div.*, Vol.107, No.GT9, pp.1219-1231, 1981.
- 7) Haruyama, M. and Kitamura, R.: Anisotropic deformation-strength properties of soft sedimentary rock 'Shirasu' originated from pyroclastic flows, *Soils and Foundations*, Vol.24, No.4, pp.84-94, 1984.
- 8) 松岡元、平尾淳一、福武毅芳：異方性を考慮した砂の変形・強度論、土と基礎、Vol.32, No.11, pp.31-36, 1984.
- 9) 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.65-85, 1986.
- 10) 落合英俊、林重徳、大津俊郎、広重圭一：単純せん断における異方性砂の応力・変形特性、第23回土質工学研究発表会講演集、pp.461-464, 1988.
- 11) Lam, W.K. and Tatsuoka, F.: Effects of initial anisotropic fabric and σ_2 on strength and deformation characteristics of sand, *Soils and Foundations*, Vol.28, No.1, pp.89-106, 1988.
- 12) 朴春植、坂田仁徳、龍岡文夫：平面ひずみ圧縮状態における密詰め砂の変形・強度異方性、第27回土質工学研究発表会講演集、pp.205-206, 1992.
- 13) Symes, M.J.P.R., Gens, A. and Hight, D.W.: Undrained anisotropy and principal stress rotation in saturated sand, *Géotechnique*, Vol.34, No.1, pp.11-27, 1984.
- 14) Miura, K., Miura, S. and Toki, S.: Deformation behavior of anisotropic dense sand under principal stress axes rotation, *Soils and Foundations*, Vol.26, No.1, pp.36-52, 1986.
- 15) Shibuya, S. and Hight, D.W.: A bounding surface for granular materials, *Soils and Foundations*, Vol.27, No.4, pp.123-136, 1987.
- 16) Symes, M.J.P.R., Gens, A. and Hight, D.W.: Drained principal stress rotation in saturated sand, *Géotechnique*, Vol.38, NO.1, pp.59-81, 1988.
- 17) Gutierrez, M.: Behavior of sand during rotation of principal stress directions, D. Eng. thesis, University of Tokyo, 1989.
- 18) 鈴木輝一、菅野高弘、柳澤栄司：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.

- 19) 佐藤研一, 安原一哉, 見郷浩二: 砂の非排水せん断挙動に及ぼす主応力方向の影響, 第28回土質工学研究発表会講演概要集, pp.565-566, 1993.
- 20) 安福規之, 中田幸男, 兵動正幸, 村田秀一, 浜田透: 等方的な圧密履歴を受けた異方性砂の排水せん断挙動に及ぼす主応力の方向と回転の影響, 地盤と建設, Vol.11, No.1, pp.43-56, 1993.
- 21) 中田幸男, 山本修三, 安福規之, 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機の試作とひずみ制御試験への適用, 土木学会論文集, No.505/III-29, pp.329-332, 1994.
- 22) 安福規之, 村田秀一, 兵動正幸, 山本修三, 浜田透: 中空ねじりせん断試験機の試作とその適用, 地盤と建設, Vol.10, No.1, pp.83-92, 1992.
- 23) Yasufuku, N., Murata, H. and Hyodo, M.: Yield characteristics of anisotropically consolidated sand under low and high stresses, *Soils and Foundations*, Vol.31, No.1, pp.95-109, 1991.
- 24) Hight, D.W., Gens, A. and Symes, M.J.P.R.: The development of a new hollow cylinder apparatus for investigating the effects of principal stress rotation in soils, *Géotechnique*, Vol.33, NO.4, pp.355-383, 1983.
- 25) Vaid, V.P. and Chern, J.C.: Cyclic and monotonic undrained response of saturated sands, *Advances in The Arts of Testing Soils under Cyclic Conditions*, ASCE, Convention, Detroit, pp.120-147, 1985.
- 26) Hyodo, M., Tanimizu, H., Yasufuku, N. and Murata, H.: Undrained cyclic and monotonic behaviour of saturated loose sand, *Soils and Foundations*, Vol.34, No.1, pp.19-32, 1994.

(1994.7.29受付)

UNDRAINED AND DRAINED SHEAR BEHAVIOUR OF INHERENT ANISOTROPIC SAND REFERENCE TO FIXED PRINCIPAL STRESS DIRECTIONS

Yukio NAKATA, Noriyuki YASUFUKU, Hidekazu MURATA
Masayuki HYODO and Takayoshi NAGASHIMA

In order to investigate the effects of principal stress directions on undrained and drained shear behaviour of inherent anisotropic sand, a series of strain controlled undrained shear tests and stress controlled drained shear tests for air-pluviated two kinds of sand has been carried out under fixed principal stress directions using hollow cylinder torsional shear apparatus. As a result, it was found that, in spite of the drain and undrained condition, the deformation and strength characteristics of two sands was characterized by the smaller angle of between the bedding plane and the planes of maximum stress obliquity.