

カーボネイト砂の排水せん断挙動に与える 主応力方向の影響

中田幸男¹・兵動正幸¹・村田秀一¹・板倉志保美²・山田泰弘³

¹社会建設工学科・²第一復建株式会社・³山口大学大学院

本研究では、中空ねじりせん断試験機を用いて2種類のカーボネイト砂と1種類のシリカ砂に対して、主応力方向を固定した条件で排水せん断試験を行った。また、その結果を用いて破壊規準を規定した。その結果、試料や拘束圧によらず、変形や強度特性は鉛直軸と最大主応力方向とのなす角によって異なることがわかった。また、初期構造異方性を考慮することによって、カーボネイト砂の破壊規準を規定することが可能であることがわかった。

Key Words : *carbonate sand, inherent anisotropy, angle of internal friction, drained shear test, special shear test, failure condition*

1. まえがき

1970年代から、エネルギー資源需要拡大のため、世界各地で海底油田や天然ガス採掘が発展し、そのためのプラットフォームなどの海洋構造物の建設が盛んに行われるようになってきた。しかし、打ち込み杭基礎で施工されたプラットフォームの多くは、支持力や周面摩擦力が発揮されないという重大な問題を経験している。その基礎地盤には炭酸カルシウムを含んだカーボネイト堆積物で構成されているケースがある。この堆積物は、珊瑚礁や貝殻などの海洋生物の死骸を多く含み、粒子自体にも間隙を有した脆弱な粒子からなっている。1980年頃から、カーボネイト堆積地盤の支持力不足の原因を解明するために、カーボネイト砂についての詳細な力学特性を明らかにする研究が活発に行われるようになってきた。そして、これまでに、排水・非排水条件下における三軸圧縮試験から、拘束圧の変化に着目したカーボネイト砂の力学特性^{1), 2)}が数多く報告されている。

一方で、海洋構造物の支持地盤の応力状態を明らかにする検討がなされている。Vaughan, Davachi, El Ghamrawy, Hanza and Hight³⁾は、波浪荷重を受ける海洋構造物の支持地盤内における主応力方向は、繰返し変動することや、繰返し変動する中心の主応力方向が構造物との距離によって変化すること

を有限要素法を用いた解析によって明らかにしている。多くの研究者⁴⁾⁻²²⁾が、砂質土を対象とした主応力方向に着目した研究を行い、有益な知見を示している。その結果、せん断中の主応力方向の違いによって、せん断剛性や強度定数の低下やダイレイタンシー量の変化を引き起こすことが明らかとなっている。このことは、重力下で堆積した砂供試体が初期に構造的な異方性を有していることを意味し、微視的レベルからの考察で、粒子自体の形状や粒子の幾何学的な配列構造に起因しているものと考えられている。また、主応力方向が変化する場合の砂供試体の変形挙動に対する研究では、主応力方向の変化のみによっても無視できないせん断変形を引き起こすことが明らかになっている。支持力不足の原因を探求することを目指し、カーボネイト砂の力学特性を明らかにするならば、実験の応力条件は三軸圧縮条件下だけでは不十分であり、主応力方向の違いや変化についての検討が必要であるといえる。

本研究は、自動制御・計測可能な中空ねじりせん断試験機を用いて、2種類のカーボネイト砂および1種類のシリカ砂に対して、主応力方向を固定した条件下で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。また、カーボネイト砂の初期構造異方性を考慮した破壊規準について検

討することを目的としている。

2. 試験機, 試料および実験方法

(1) 試験機, 応力とひずみパラメーター

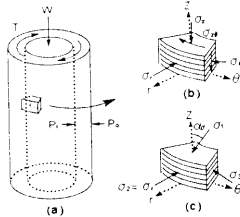


図-1 供試体内の要素と応力

実験は、中空ねじりせん断試験装置²¹⁾を用いて行われた。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。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-1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 $\sigma_{z\theta}$ が供試体要素に作用することになる。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は、Hight et. al.²²⁾の研究を参考に安福ら²³⁾や中田ら²¹⁾において言及している。

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。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-1(c)参照)であり、以下の式で与えられる。

$$p = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} \quad (1a)$$

$$q = \sqrt{\frac{1}{2} \left\{ (\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 \right\}} \quad (1b)$$

$$\phi_m = \sin^{-1} \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 + \sigma_3} \right) \quad (1c)$$

$$b = \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3} \quad (1d)$$

$$\alpha_\sigma = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{2\sigma_{z\theta}}{\sigma_z - \sigma_\theta} \right) \quad (1e)$$

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。

$$\epsilon_v = \epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3 \quad (2a)$$

$$\gamma = \sqrt{\frac{2}{9} \left\{ (\epsilon_1 - \epsilon_2)^2 + (\epsilon_2 - \epsilon_3)^2 + (\epsilon_3 - \epsilon_1)^2 \right\}} \quad (2b)$$

(3) 試料と供試体作成方法

実験に用いた試料は、カーボネイト砂であるDogs Bay砂、Quiou砂と、シリカ砂である秋穂砂の3種類である。表-1に各試料の物性値を示している。カーボネイト砂は、秋穂砂と比べて粒子内に間隙を有していることを示す粒子内間隙率 N_{intra} の値が大きいために最大・最小間隙比の値も大きくなっている。また、Quiou砂と秋穂砂は粒径が類似しており、粒子形状も球状で角張った粒子が多い試料であるのに対し、Dogs Bay砂は粒径が小さく、針状の細長い粒子を多く含んだ貝殻からなる試料である。

表-1 試料の物理的性質

SAMPLE	G _s	e _{max}	e _{min}	N _{intra} (%)	D ₅₀ (mm)	U _c	CaCO ₃ (%)
Dogs Bay	2.723	2.451	1.621	13.68	0.22	1.92	95.0
Quiou	2.700	1.431	0.915	5.22	0.74	3.61	76.0
Aio	2.623	0.975	0.624	1.63	0.84	2.35	—

供試体は、水中落下振動法を用い、初期相対密度65%を目標に作成された。試料は、事前に脱気水で満たした容器に入れ、真空セルに設置し、70kPaの負圧を24時間以上かけておいたものを使用する。

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、脱気水の通水、そして背圧を負荷させることで行った。

(4) 実験方法

実験は、 $p = 100\text{kPa}$ まで等方圧密した後行われた。せん断は、平均有効主応力100kPa一定、中間主応力係数0.5一定で、ひずみ制御方式²¹⁾で一定速度のねじり変位 ($d\theta' = 0.1^\circ/\text{min}$) を与えながら、所定の主応力方向角 ($15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ$) を保つように軸力、内圧、外圧を制御するものである。ま

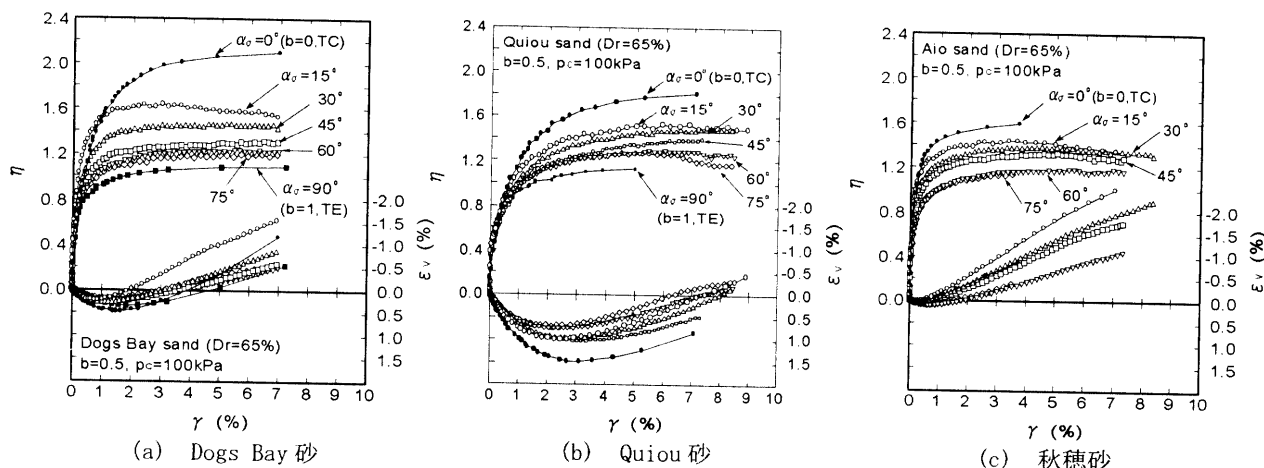


図-2 応力比-軸差ひずみ-体積ひずみ関係

た、併せて三軸圧縮・三軸伸張試験も応力制御方式で行っている。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およびメンブレン貫入量に対する補正を行っている。

3. 実験結果

図-2 (a), (b), (c)は、Dogs Bay砂, Quiou砂と秋穂砂の実験結果について、応力比 η - 軸差ひずみ γ - 体積ひずみ ϵ_v 関係を示したものである。また、図中には、三軸圧縮・伸張試験の結果も併せて示している。この図から、試料によらず、1) $b=0.5$ の5つの実験のせん断剛性は、ほぼ一定値を示すこと、2) 三軸圧縮におけるせん断剛性は、 $b=0.5$ のそれと比較して小さいこと、3) $b=0.5$ の5つの試験のピーク応力比は、Dogs Bay砂で1.6から1.1、Quiou砂で1.5から1.2、秋穂砂で1.4から1.0と、主応力方向角の増加とともに減少していること、4) 三軸圧縮におけるピーク応力比は、 $b=0.5$ の5つのそれと比較して、大きいことなどがわかる。 $\gamma - \epsilon_v$ 関係から、1) 秋穂砂は、ほとんど収縮挙動を示さず膨張挙動に移行しているが、カーボネイト砂のDogs Bay砂とQuiou砂は収縮量が多いこと、2) カーボネイト砂の三軸圧縮時の体積ひずみ量は、 $b=0.5$ の5つの結果と比較して、大きい値を示すものの、秋穂砂の三軸圧縮時の体積ひずみ量は、 $b=0.5$ のそれよりも小さいこと、などがわかる。このような主応力方向角による応力ひずみ挙動の違いは、シリカ砂においては重力作用下において堆積した粒状体が、粒子の配向性や位置関係などに起因した構造的な異方性を有しているためであること⁴⁾が指摘されている。今回得られたカーボネイト砂の試験結果も構造的な異方性に起因して、応力ひずみ挙動が主応力方向角に依存するものと考えられる。

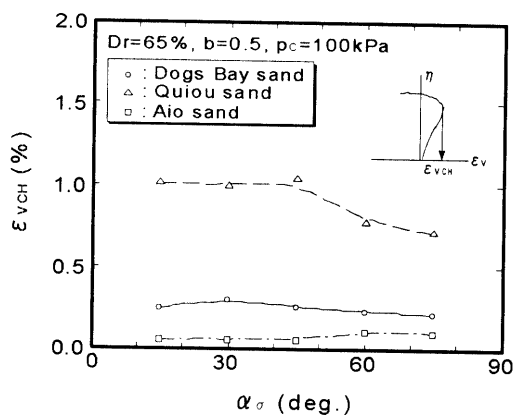


図-3 特性状態における体積ひずみ-主応力方向角関係

図-3は、特性状態に達したときの体積ひずみ ϵ_{vch} - 主応力方向角 α_σ 関係を示している。体積ひずみ量は、いずれの主応力方向角においても、秋穂砂、Dogs Bay砂、Quiou砂の順に大きくなっている。特に、Quiou砂は秋穂砂の約7~10倍の収縮量を示していることがわかる。また、主応力方向角の増加に伴って、Dogs Bay砂の ϵ_{vch} は減少し、Quiou砂のそれはほぼ一定、秋穂砂のそれは増加していることがわかる。

図-4、図-5は、ピーク時の内部摩擦角 ϕ_p および特性状態の内部摩擦角 ϕ_{ch} と主応力方向角 α_σ の関係を示している。いずれの図においても、試験の条件によらず、1) ϕ_p および ϕ_{ch} はカーボネイト砂の方が秋穂砂よりも高いこと、2) 最大主応力方向が鉛直軸から水平軸に傾くにつれ、 ϕ_p および ϕ_{ch} は低下していること、3) $\alpha_\sigma = 15^\circ$ から 75° の ϕ_p の低下は、Dogs Bay砂で 28° 、Quiou砂で 14° 、秋穂砂で 12° となっており、Dogs Bay砂の低下率

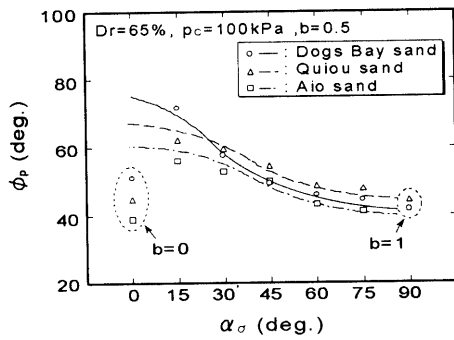


図-4 ピーク時の内部摩擦角—主応力方向角関係

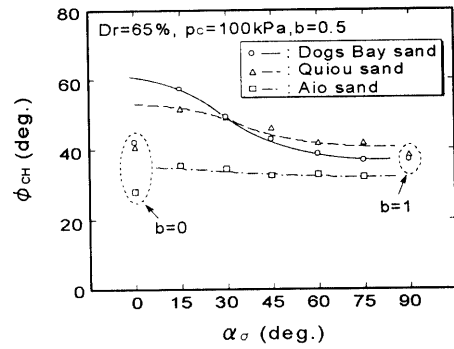
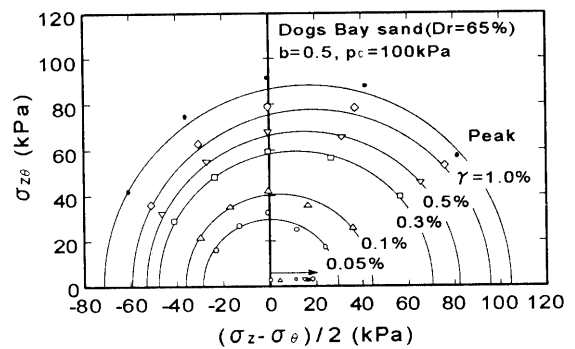


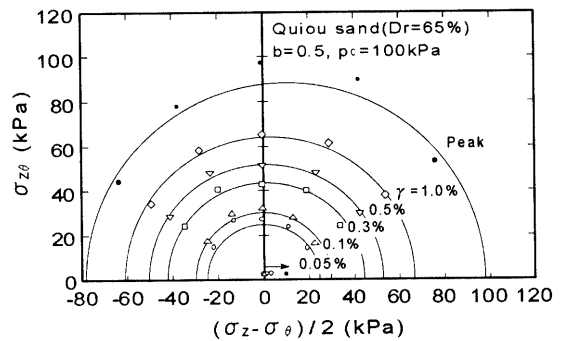
図-5 特性状態の内部摩擦角—主応力方向角関係

が大きいこと、4) Dogs Bay砂の三軸圧縮時の ϕ_p は、 $b=0.5, \alpha_\sigma = 45^\circ$ の ϕ_p とほぼ同じ値を示すこと、5) Quiou砂や秋穂砂の三軸圧縮時の ϕ_p は、今回行った試験の中で最も低い値を示していること、がわかる。また、図-5から、 $\alpha_\sigma = 15^\circ$ から 75° の ϕ_{CH} の低下は、Dogs Bay砂で 21° 、Quiou砂で 10° 、秋穂砂で 4° となっていること、 ϕ_{CH} についても、 ϕ_p で述べた1)~5)の傾向と類似の傾向を示すことがわかる。

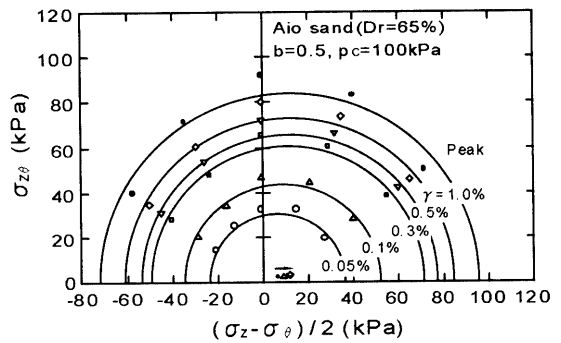
図-6(a), (b), (c)は、軸差ひずみ γ が、0.05%、0.1%、0.3%、0.5%、1%に達したときの応力状態およびピーク時の応力状態を $(\sigma_z - \sigma_\theta) / 2 - \sigma_{z\theta}$ 平面に示したものである。原点付近のプロットは、各々の応力状態を円で近似したときの中心を示しており、プロットの形で対応させている。 $(\sigma_z - \sigma_\theta) / 2 - \sigma_{z\theta}$ 平面は、主応力方向の変化を簡潔に表現できるもので、応力状態のプロットと原点とを結ぶ直線と $(\sigma_z - \sigma_\theta) / 2$ 軸とのなす角が主応力方向角の2倍に対応する。等方性材料であれば、各々の応力状態は同心円上に広がることになるため、各々の応力状態と円で近似したときの円の中心と原点とのずれは異方性の度合いを表すことになる。この図から、Dogs Bay砂の円の中心は、せん断初期において原点付近にあるものの、 γ の増加と共に徐々に右に移動していること、Quiou砂のそれも、せん断初期においては原点付近にあるが、 $\gamma = 1.0\%$ までは変化せず、その後移動していること、秋穂砂のそれは、せん断初期から若干原点より右に位置し、 γ の増加と共に若干右に移動していることがわかる。ピーク時の応力状態に対する円の中心はDogs Bay砂で17kPa、Quiou砂で10kPa、秋穂砂で12kPa程度原点から右に移動



(a) Dogs Bay 砂



(b) Quiou 砂



(c) 秋穂砂

図-6 直応力空間における等軸差ひずみ線

している。Quiou砂の原点からのずれがDogs Bay砂や秋穂砂と比べて小さいことから、Quiou砂は若干等方的な材料であるといえる。また、Dogs Bay砂のずれが最も大きくなっているがこれは、Dogs Bay砂が針状の粒子を多く含み、供試体作成時にこれらの粒子が水平方向に卓越して配列することによって、初期構造異方性の影響が強く現れたためと考えられる。

4. カーボネイト砂の初期構造異方性を考慮した破壊規準

(1) 三次元状態における破壊規準

一般によく用いられているMohr-Coulomb, Lade²⁴⁾, 松岡・中井²⁵⁾の破壊規準と本研究で提案する破壊規準に対して検討を行う。以下にそれぞれの規準式を示す。

・ Mohr-Coulomb

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_3} = \frac{1 - \sin\phi}{1 + \sin\phi} \quad (3a)$$

・ Lade

$$\frac{I_1^3}{I_3} = k_1; \quad k_1 = \frac{729}{(3 - \eta_{pc})^2 (2\eta_{pc} + 3)} \quad (3b)$$

・ 松岡・中井

$$\frac{I_1 \cdot I_2}{I_3} = k_2; \quad k_2 = \frac{27(3 + \eta_{pc})}{(3 - \eta_{pc})(2\eta_{pc} + 3)} \quad (3c)$$

・ 提案式

$$\eta_p = \eta_{pc} \frac{A}{\left[A^2 \cos^2 \frac{3}{2}\theta + \sin^2 \frac{3}{2}\theta \right]^{\frac{1}{2}}} \quad (3d)$$

ここで、 ϕ や η_{pc} は、三軸圧縮時の内部摩擦角あるいはピーク時の応力比である。この破壊規準式を π 面上に表したものが図-7である。

この図は、 $p=100\text{kPa}$ の条件のもので、 $\phi=50^\circ$

($\eta_{pc}=2.06$)の結果を示している。提案式は幾何学的に求めたものであるが、ロードアングル θ の項が導入されているので σ_2 の影響を考慮することになる。式中の A の値を変えることで破壊規準の形状を任意に選定できる特徴を有している。 $A=1$ の場合は π 面上で円を与えるが、 A の値には許容範囲が存在し、小さくなると内側に凸の曲面形状になる。今回は、0.75を用いた。

図-7中のプロットは、実験から得られた破壊時の応力状態を示したものである。 $\theta=30^\circ(330^\circ)$

や $\theta=210^\circ(150^\circ)$ のプロットは、図-5中の実線のように推定される値を用いて示した。いずれの結果においても、 $\theta=180^\circ$ のプロットは、 $\phi=50^\circ$ の破壊規準よりも小さい値を示している。一方、 $\theta=0^\circ$ や 30° の結果は、 $\phi=50^\circ$ の破壊規準と等しい値を示している。つまり、実験結果には初期構造異方性の影響が含まれているために、いずれの破壊規準も強度特性をうまく捉えられないことがわかる。

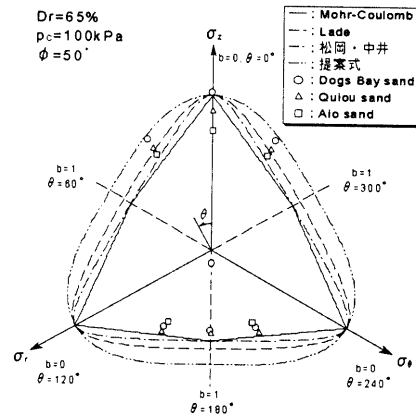


図-7 π 面上に表現した破壊基準と試験結果

(2) カーボネイト砂の初期構造異方性を考慮した破壊規準

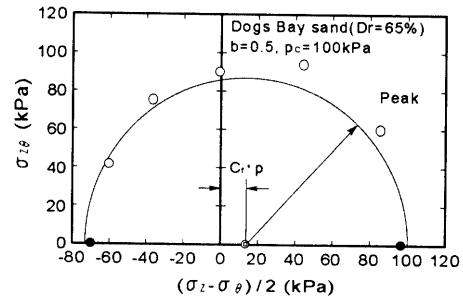


図-8 $(\sigma_z - \sigma_\theta)/2 - \sigma_{z0}$ 空間における

ピーク時の応力状態

Gutierrez¹⁷⁾と同様の修正応力を用いる方法により、初期構造異方性を考慮した破壊規準を提案する。図-8に示すように、ピーク時の応力状態を $(\sigma_z - \sigma_\theta)/2 - \sigma_{z0}$ 平面に表すと、近似した円の中心は原点から右側にずれることになる。 $(\sigma_z - \sigma_\theta)/2$ 軸と原点と円の中心のずれを $C_f \cdot p$ とし、 C_f を初期構造異方性に起因する強度異方性の程度を評価するパラメーターとする。得られた C_f の値を表-2に示す。

表一 2 構造異方性の程度を評価する定数 C_f

SAMPLE	C_f
Dogs Bay sand	0.13
Quiou sand	0.06
Aio sand	0.08

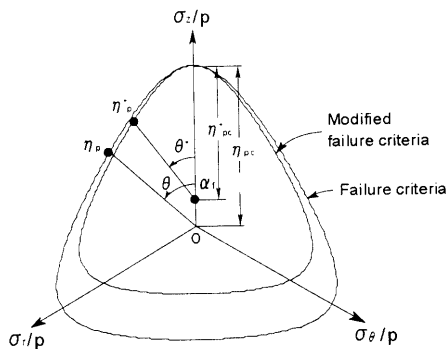


図-9 π 面上における破壊基準

初期構造異方性を評価するためのテンソル α_f (軸差異方テンソル)は, Gutierrez¹⁷⁾や中田²⁶⁾を参考にすると以下の式で与えられる.

$$[\alpha_f] = \begin{bmatrix} \alpha_{fz} & \alpha_{fzr} & \alpha_{fz\theta} \\ \alpha_{fzr} & \alpha_{fr} & \alpha_{fr\theta} \\ \alpha_{fz\theta} & \alpha_{f\theta r} & \alpha_{f\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{4}{3}c_f & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{2}{3}c_f & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{2}{3}c_f \end{bmatrix} \quad (4)$$

軸差異方テンソルを用いて修正応力を算出すると,

$$\sigma_{z}^* = \sigma_z - \alpha_{fz} \cdot p^* = \sigma_z - \alpha_{fz} \cdot p \quad (5a)$$

$$\sigma_r^* = \sigma_r - \alpha_{fr} \cdot p^* = \sigma_r - \alpha_{fr} \cdot p \quad (5b)$$

$$\sigma_{\theta}^* = \sigma_{\theta} - \alpha_{f\theta} \cdot p^* = \sigma_{\theta} - \alpha_{f\theta} \cdot p \quad (5c)$$

$$\sigma_{z\theta}^* = \sigma_{z\theta} \quad (5d)$$

となる. 最大・中間・最小主応力や, その他の応力パラメーターは, 上記した修正応力を応力と書き換えることで求められる. 軸差異方テンソルの大きさは, 次式で与えられる.

$$\alpha_f = \sqrt{\frac{3}{2}(\alpha_{fz}^2 + \alpha_{fr}^2 + \alpha_{f\theta}^2)} = 2 \cdot c_f \quad (6)$$

ここでは, 修正応力を用いて種々の破壊規準を書き換えることで, 初期構造異方性を評価できる破壊規準を与えられると考える. この修正応力を用いて示される破壊規準は, 図-9に示すように結果として π 面上では α_f を中心として描かれる規準となる.

それぞれの破壊規準式を示すと以下ようになる.

・ Mohr-Coulomb

$$\frac{\sigma_1^*}{\sigma_3^*} = \frac{1 - \sin \phi^*}{1 + \sin \phi^*} \quad (7a)$$

・ Lade

$$\frac{I_1^{*3}}{I_3^*} = k_1^*; \quad k_1^* = \frac{729}{(3 - \eta_{pc}^*)^2 (2\eta_{pc}^* + 3)} \quad (7b)$$

・ 松岡・中井

$$\frac{I_1^* \cdot I_2^*}{I_3^*} = k_2^*; \quad k_2^* = \frac{27(3 + \eta_{pc}^*)}{(3 - \eta_{pc}^*)(2\eta_{pc}^* + 3)} \quad (7c)$$

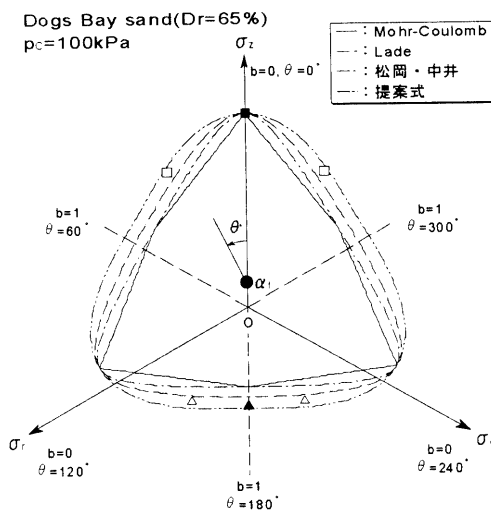
・ 提案式

$$\eta_{pc}^* = \eta_{pc}^* \frac{A}{\left[A^2 \cos^2 \frac{3}{2} \theta^* + \sin^2 \frac{3}{2} \theta^* \right]^{\frac{1}{2}}} \quad (7d)$$

ここで, η_{pc}^* は以下のように与えられる.

$$\eta_{pc}^* = \eta_{pc} - \alpha_f = \eta_{pc} - 2 \cdot c_f \quad (8)$$

図-10 (a), (b), (c)にその結果を示す. いずれの結果も, 初期構造異方性を考慮することによって, 実験結果の傾向をうまく捉えていることがわかる. Dogs Bay砂とQuiou砂の実験結果は, Ladeと提案規準の中間に位置している. 秋穂砂の実験結果は, 全ての破壊規準の外側に位置しているために, カーボネイト砂よりも実験結果との対応性が悪いが, 全体的には実験結果をうまく捉えているといえる. よって, 今回提案した修正応力を導入する手法は簡便ではあるが, カーボネイト砂の初期構造異方性をうまく捉えていることが明らかとなった.



(a) Dogs bay 砂

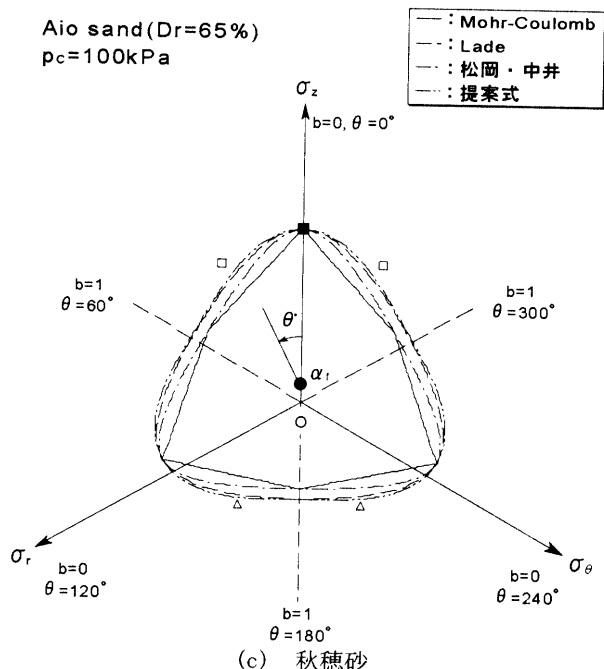
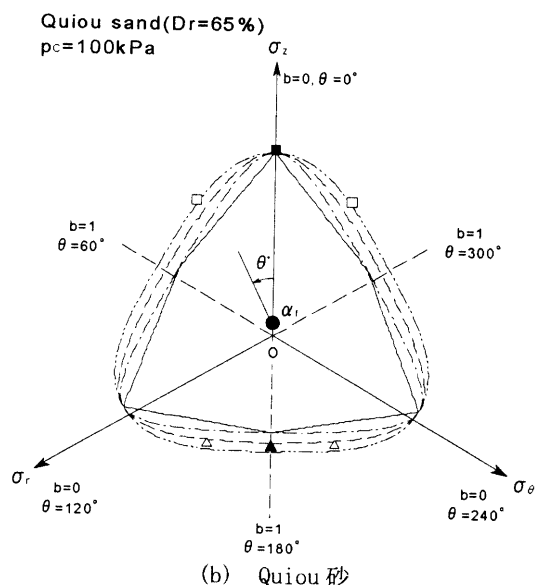


図-10 π 面上における初期構造異方性を考慮した破壊基準と試験結果

5. 結論

本研究では、中空ねじりせん断試験機を用いてカーボネイト砂の排水せん断挙動に与える主応力方向の影響を把握するためのせん断試験を行った。得られた結果をまとめると以下ようになる。

- 1) 主応力方向角の違いはカーボネイト砂の応力ひずみ挙動に影響を与える。最大主応力の方向が鉛直軸から水平軸方向に傾くにつれ、ピーク時の応力比は、低下し、せん断ひずみは生じやすくなる。
- 2) 排水せん断挙動に現れる異方性が、偏差応力空間上で議論された。Dogs Bay砂と秋穂砂の

異方性の度合いは、せん断の進行に伴って徐々に強くなるが、Quiou砂の異方性の度合いは $\gamma = 1.0\%$ まで変化せず、その後、徐々に強くなる。また、ピーク時の強度異方性の程度をみると、Dogs Bay砂や秋穂砂に比べ、Quiou砂が小さく、今回用いた試料の中ではQuiou砂が等方的な材料であることがわかった。

- 3) 実験結果から初期構造異方性の程度を評価するパラメーターを求め、そのパラメーターを導入することで与えられる修正応力を用いた破壊規準によって、Dogs Bay砂、Quiou砂および秋穂砂の強度特性を表すことが可能となった。

参考文献

- 1) Golightly, C.R. and Hyde, A.F.L.: Some fundamental properties of carbonate sands, *Engineering for Calcareous Sediments*, Jewell and Andrews(eds), pp.69-78, 1988.
- 2) Hull, T.S., Poulos, H.G. and Alehossein, H.: The static behaviour of various calcareous sediments, *Engineering for Calcareous Sediments*, Jewell and Andrews(eds), pp.87-96, 1988.
- 3) Vaughan, P.R., Davachi, M.M., El Ghamrawy, M.K., Hamza, M.M. and Hight, D.W.(1976): "Stability analysis of large gravity structures," *Proc. 1st. Intl. Conf. on the Behavior of Off-Structures (BOSS 76)*, Trondheim, Vol.1, pp.449-487.
- 4) Oda, M.: Initial fabrics and their relations to mechanical properties of granular materials, *Soils and Foundations*, Vol.12, No.1, pp.17-36, 1972.
- 5) Oda, M.: The mechanism of fabric changes during compressional deformation of sand, *Soils and Foundations*, Vol.12, No.2, pp.1-18, 1972.
- 6) Oda, M.: Deformation mechanism of sand in triaxial compression tests, *Soils and Foundations*, Vol.12, No.4, pp.45-63, 1972.
- 7) Arthur, J.R.F. and Menzies, B.K.: Inherent anisotropy in a sand, *Géotechnique*, Vol.22, No.1, pp.115-128,1972.
- 8) 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.
- 9) Oda, M.: Anisotropic strength of cohesionless sands, *Jour. of Geotechnical Eng. Div.*, Vol.107, No.GT9, pp.1219-1231, 1981.
- 10) 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.
- 11) 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.
- 12) 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.
 - 13) 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.
 - 14) 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.
 - 15) 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.
 - 16) Shibuya, S. and Hight, D.W.: A bounding surface for granular materials, *Soils and Foundations*, Vol.27, No.4, pp.123-136, 1987.
 - 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時せん断挙動特性, 土木学会論文集, No.481/III-25, pp.117-124, 1993.
 - 19) 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.
 - 20) 中田幸男, 安福規之, 村田秀一, 兵動正幸, 永島剛圭: 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, 土木学会論文集, No.505/III-30, pp.209-220, 1995.
 - 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) 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.
 - 23) 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.
 - 24) Lade, P.V. and Duncan, J.M.(1975): "Elastoplastic stress-strain theory for cohesionless soil" Jour.G.E.Div., Proc.ASCE, Vol.101, GT10, Oct., pp.1037-1053.
 - 25) Matsuoka, H. and Nakai, T.(1974): "Stress-deformation and strength characteristics of sand under three different principal stress" Proc.JSCE, No.232, pp.59-70.
 - 26) 中田幸男(1995): "主応力方向変動下における異方性砂の変形および強度特性に関する研究" 山口大学博士論文

(1997. 4. 15受理)

EFFECT OF PRINCIPAL STRESS DIRECTIONS ON DRAINED SHEAR BEHAVIOUR OF CARBONATE SAND

Yukio NAKATA, Masayuki HYODO, Hidekazu MURATA,
Shihomi ITAKURA and Yasuhiro YAMADA

In order to investigate the effects of principal stress directions on drained shear behaviour of carbonate sand, a series of strain controlled drained shear tests three kinds of sand has been carried out under fixed principal stress directions using hollow cylinder torsional shear apparatus. It was found that the deformation and strength characteristics of two carbonate sands was depend on the principal stress direction during shear as well as the behaviour of silica sand.