

砂のせん断特性に及ぼす主ひずみ方向の影響

Effect of principal strain directions on shear deformation characteristics of sand

北見工業大学大学院 ○学生員 喜多川俊介(Syunsuke Kitagawa)
北見工業大学工学部 正員 山下 聡(Satoshi Yamashita)
北見工業大学工学部 フェロー 鈴木 輝之(Teruyuki Suzuki)

1. まえがき

堆積構造の異方性により土の変形強度特性は、堆積面に対する主応力方向の違いによって異なることが知られている¹⁾。堆積構造と主応力方向の関係を求める場合、堆積方向が異なる供試体を用いて三軸試験や平面ひずみ試験を行う方法や、単純せん断試験やねじりせん断試験によって同じ堆積条件の供試体に対して試験中の主応力方向を制御する方法が挙げられる。ここで、ねじり試験装置を用いて、堆積方向と主応力方向の関係を求める場合、中空円筒供試体を用いて内外圧、軸力およびねじり力を制御した試験が一般に行われている。しかし、この試験は応力制御で行われるため、破壊までの変形強度特性は求めることができるが、破壊後の残留状態における変形強度特性を求めることはできない。そこで、本研究では、軸方向とねじり方向の載荷をひずみ制御で行うことによって、堆積方向と主ひずみ(主応力)方向が種々異なる条件で残留状態までの変形強度特性を求めた。さらに、小～中ひずみレベルでの繰返し載荷試験を行い、単調載荷試験結果と比較した。

2. 試料と試験方法

試験に用いた試料は、豊浦砂($\rho_s=2.645\text{g/cm}^3$, $e_{\max}=0.966$, $e_{\min}=0.608$, $D_{50}=0.18\text{mm}$, $U_c=1.69$)である。供試体は、高さ20cm、外径10cm、内径6cmの中空円筒供試体を乾燥堆積法で作製した。用いたねじり試験装置は、2種類のデジタルサーボモータを軸載荷およびねじり載荷装置とした、微小なひずみレベルから大ひずみレベルまでの変位制御の繰返し載荷および単調載荷が可能な試験装置である²⁾。

2.1 小～中ひずみレベル試験

供試体作製後、拘束圧30kPaのもとでCO₂および脱気水により飽和させた。その後、有効拘束圧 $\sigma'_c=98.1\text{kPa}$ (背圧196.1kPa)の等方圧密状態から、非排水状態で繰返し載荷試験または単調載荷試験を行った。圧密後の相対密度 $D_{rc}=80\%$ である。供試体の軸変位と回転角は非接触変位計を用いて測定した。図-1は載荷時のひずみ経路を示したもので、繰返し載荷試験では、鉛直軸に対する最大主ひずみ方向角 $2\alpha\{\tan 2\alpha=\gamma_{a0}/(\varepsilon_a-\varepsilon_\theta)\}$ を $0^\circ(180^\circ)\sim 90^\circ(270^\circ)$ の範囲で試験を行った。載荷周波数は0.1Hzで、変位振幅一定の三角波を各ステージで11サイクル与えた。単調載荷試験では、最大主ひずみ方向角 $2\alpha=0^\circ\sim 180^\circ$ の範囲で、ひずみ速度一定(0.5~1.0%/min)の非排水試験を行った。なお、載荷時の内外圧は一定とした。

2.2 中～大ひずみレベル試験

上記と同様な方法で供試体作製後、有効拘束圧 $\sigma'_c=78.5\text{kPa}$ (背圧196.1kPa)の等方圧密状態から、排水状態で単調載荷試験を行った。圧密後の相対密度 $D_{rc}=60\%$ である。供

試体の軸変位と回転角はダイヤルゲージとポテンシオメータを用いて測定した。載荷方向は図-1に示したように小～中ひずみ時の単調載荷試験と同様で、載荷時の内外圧は一定とした。なお、せん断応力と伸張応力に対してメンブレン力($E_m=1650\text{kN/m}^2$)の補正を行っている。

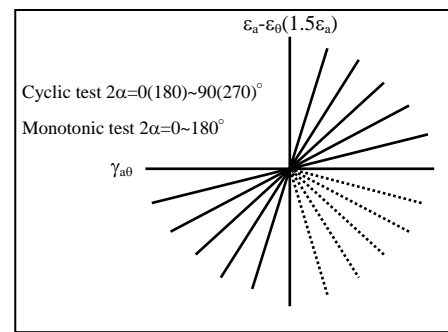


図-1 載荷時のひずみ経路

3. 小～中ひずみレベルでの変形特性

3.1 繰返し載荷試験

図-2は等価最大せん断剛性率($G_{\max}^{\text{eq}}=\tau_{\max}/\gamma_{\max}$)および履歴減衰係数 h_{\max} と片振幅最大せん断ひずみ($\gamma_{\max}^{\text{SA}}$)との関係を示したものである。微小ひずみレベルでは、主ひずみ方向角が 90° に近づくにつれ(G_{\max}^{eq})の値は高くなっているが、ひずみレベルが大きくなるに従ってその差は小さくなっている。図-3は、($\gamma_{\max}^{\text{SA}}$) $=10^{-5}$, 10^{-4} , 10^{-3} における(G_{\max}^{eq})と主ひずみ方向角との関係を示したものである(白抜きマーク)。この図からも、微小ひずみでは主ひずみ方向角が 90° に近くなるに従って、(G_{\max}^{eq})がやや大きくなっていることが分かる。この原因の一つとして考えられることとして、 γ_{\max} は ε_θ を測定していないので、非排水条件でポアソン比 $\nu=0.5$ として求めている($\varepsilon_\theta=-\varepsilon_a/2$)。しかし、メンブレン貫入の影響により非排水条件でも等体積条件が満足されないためポアソン比が低下していることが考えられる。今回用いた供試体寸法でのメンブレン貫入を考慮した微

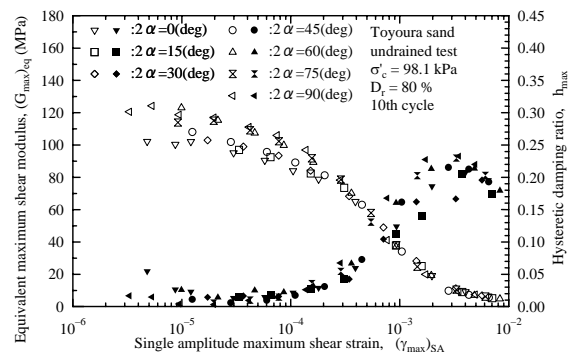


図-2 繰返し載荷時の(G_{\max}^{eq}) $h_{\max}\sim(\gamma_{\max}^{\text{SA}}$)

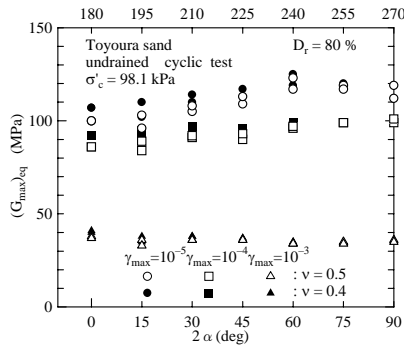


図-3 $(G_{max})_{eq}$ に及ぼす主ひずみ方向の影響

小ひずみレベルでの非排水ポアソン比は0.4程度と推定されている³⁾。そこで、 $\nu=0.4$ として求めた結果が図中の黒塗りマークである。 $\nu=0.4$ と仮定することによって主ひずみ方向の影響がやや少なくなっているが、主ひずみ方向角が 90° に近づくに従って微小ひずみでの $(G_{max})_{eq}$ が大きくなる傾向は変わらない。その他の原因としては、軸方向載荷時のベディングエラーや堆積構造の異方性、中間主応力の影響などが考えられる。

3.2 単調載荷試験

図-4は、単調載荷試験での割線最大せん断剛性率 $(G_{max})_{sec}$ を最大せん断ひずみ γ_{max} に対して圧縮状態($2\alpha < 90^\circ$)および伸張状態($2\alpha > 90^\circ$)の試験別に示したものである。なお、 $2\alpha=90^\circ$ の試験結果は両図に示している。微小ひずみレベルでは、繰返し載荷試験と同様に $2\alpha=90^\circ$ での $(G_{max})_{sec}$ がやや高いようである。また、ひずみレベルが大きくなると、圧縮状態では、 $2\alpha=90^\circ$ よりもやや高く、伸張状態では、 $2\alpha=90^\circ$ よりもやや低くなっているようである。

3.3 単調載荷試験と繰返し載荷試験の比較

図-5は、繰返し載荷試験における $(G_{max})_{eq}$ と単調載荷試験での $(G_{max})_{sec}$ を γ_{max} に対して主ひずみ方向角別に示したものである。また、図-6は $\gamma_{max}=10^{-5}, 10^{-4}, 10^{-3}$ における G_{max} と主ひずみ方向角との関係を示したものである。なお、繰返し試験は圧縮方向と伸張方向に交番する試験であるので、圧縮時と伸張時の両角度に対してプロットしている。

これらの図から、微小ひずみレベルでは単調載荷試験と繰返し載荷試験での G_{max} はほぼ一致しており、砂の初期剛性は載荷方法に抛らないことが分かる。排水状態で求めた三軸圧縮・伸張条件($2\alpha=0^\circ, 180^\circ$)または単純せん断条件($2\alpha=90^\circ$)での繰返し載荷時と単調載荷時の微小ひずみ時のヤング率またはせん断剛性率は一致する⁴⁾とされている。今回行った非排水条件でも同様な結果が得られた。

主ひずみ方向角の影響に関しては、単調および繰返し載荷試験の両方において $2\alpha=90^\circ$ の時の初期剛性が最も高く、 0° または 180° に近づくにつれてやや剛性が低下している。ただし、その差は1~2割程度である。一方、 10^{-3} 程度のひずみレベルになると主ひずみ方向角の影響は小さくなるが、圧縮状態($2\alpha < 90^\circ$)では、繰返し試験よりも単調載荷試験による剛性がやや高く、伸張状態($2\alpha > 90^\circ$)では、逆に単調載荷試験による剛性の方がやや低くなっている。これは、繰返し試験は圧縮方向と伸張方向の繰返し載荷を受けているので、単調試験での平均的な値となったためと考えられる。

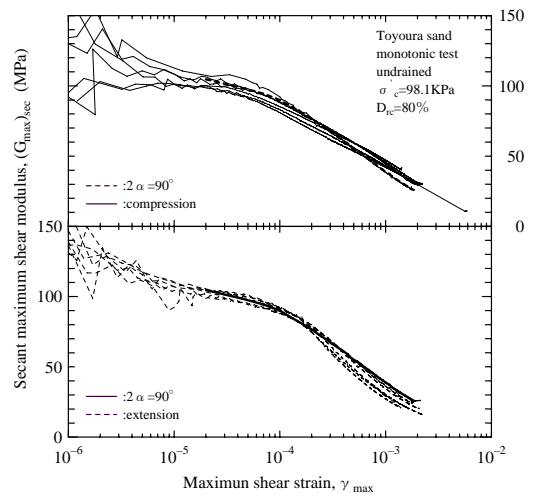


図-4 単調載荷時の $(G_{max})_{sec} \sim \gamma_{max}$

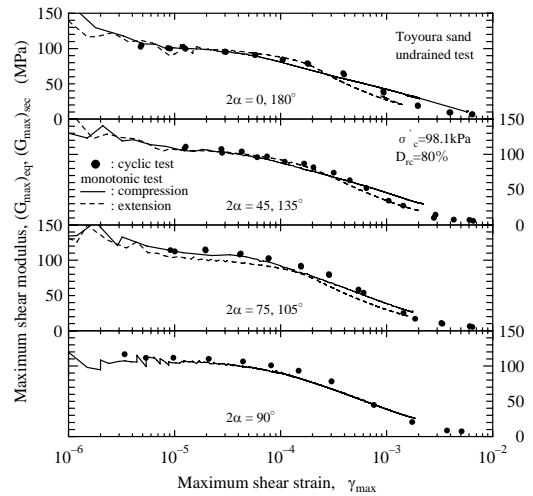


図-5 繰返し載荷試験と単調載荷試験の比較

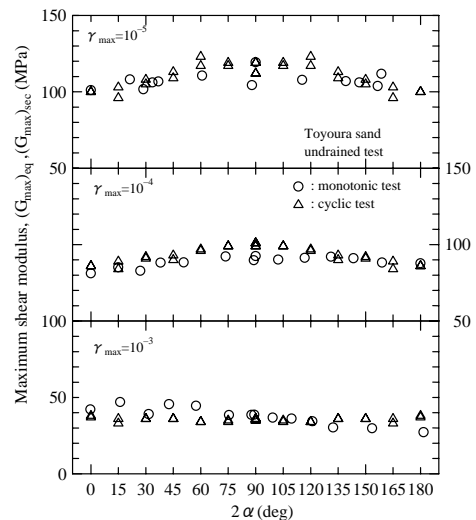


図-6 G_{max} に及ぼす主ひずみ方向の影響

4. 中~大ひずみレベルでの変形強度特性

4.1 せん断時の応力状態の変化

本研究では、軸方向と回転方向の載荷速度を独立に一定速度で載荷することによって主ひずみ方向角を固定した試験を行っている。図-7は単調載荷時の主ひずみ方向角 2α と最大せん断ひずみ γ_{max} との関係を示したものである。図に示すように、試験中ほぼ一定の主ひずみ角で推移してい

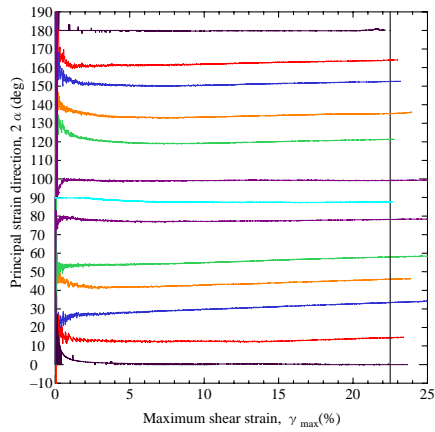


図-7 せん断中の主ひずみ方向角 2α の変化

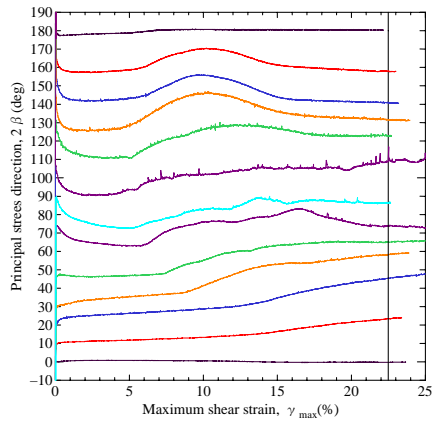


図-8 せん断中の主応力方向角 2β の変化

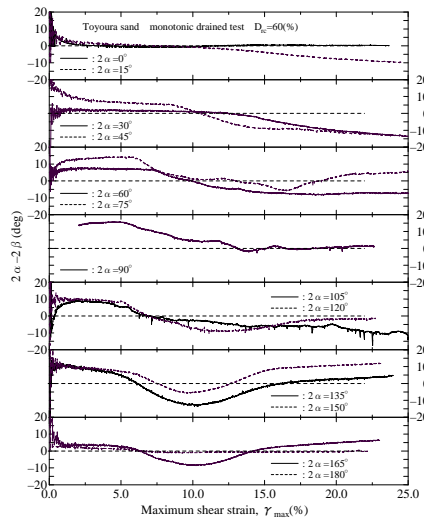


図-9 $(2\alpha - 2\beta) \sim \gamma_{max}$ の関係

ることが分かる。一方、図-8は主応力方向角 2β ($\tan 2\beta = 2\tau_{\alpha\theta} / (\sigma'_a - \sigma'_\theta)$) と γ_{max} との関係を示したものである。主応力角については、堆積構造の異方性とダイレタンシー特性の相違により主ひずみ方向とは一致せず、試験中変動している。そこで、主ひずみ方向と主応力方向の相違を表すために図-9では、主ひずみ角と主応力角の差と γ_{max} との関係を示している。図から γ_{max} が6%付近まで主応力方向角が主ひずみ方向角よりも小さく、その後、圧縮状態の試験では10%付近から主応力方向角の方が大きくなる。一方、伸張試験では15%付近まで主応力方向角の方が大きい、その後また小さくなる。このように、主ひず

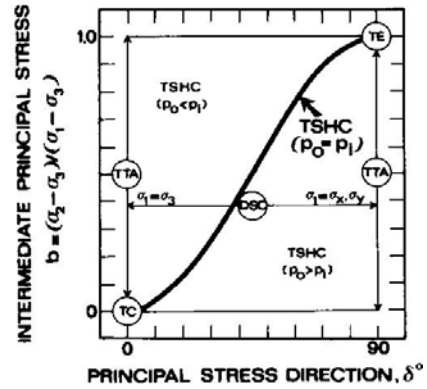


図-10 異なるせん断試験での b と δ の関係⁵⁾

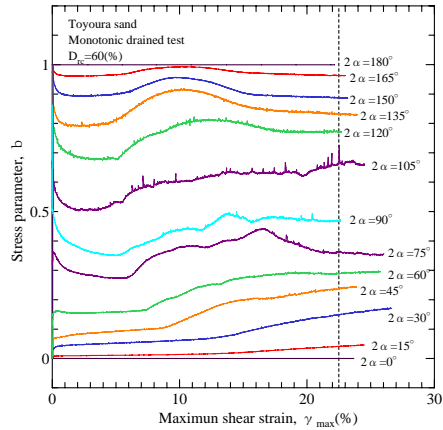


図-11 せん断中の中間主応力係数 b の変化

み方向角を固定した場合でも、堆積構造の異方性により力学特性が異方的であれば、主ひずみ軸と主応力軸の方向は一致しないことが分かる。

図-10は、種々の室内せん断試験における、中間主応力係数 $b = (\sigma'_2 - \sigma'_3) / (\sigma'_1 - \sigma'_3)$ と堆積面に対する主応力方向 $\delta (= \alpha)$ との関係⁵⁾を示したものである。室内せん断試験の種類によってせん断中の応力状態は異なり、例えば三軸圧縮試験では $b=0, \delta=0^\circ$ 、三軸伸張試験では $b=1, \delta=90^\circ$ となる。ねじりせん断試験の場合は、内外圧を独立に制御することによって、任意の b と δ の試験が可能である。一方、本研究で行ったねじりせん断試験は、内外圧を一定としているので、図中の曲線で表される $b = \sin^2 \delta$ の関係となり主応力方向によって b 値は異なっている。図-11は、試験中の b 値の変化を示したもので、図-8に示したようにせん断中に主応力方向が変化するため、 b 値も同様に変動している。

4.2 強度特性におよぼす主ひずみ方向の影響

図-12は主応力比 σ'_1 / σ'_3 と γ_{max} との関係を示したものである。図から、 $2\alpha=90^\circ$ に近い試験では、応力ひずみ曲線のピークが明確でなく、大ひずみレベルまで主応力比の変動が少ない。それに対して、三軸圧縮 ($2\alpha=0^\circ$) および三軸伸張 ($2\alpha=180^\circ$) に近くなるに従って、ピーク強度の発現が早く、特に伸張状態においてその後の強度低下が著しい。

図-13は、主応力比最大時の動員摩擦角 $\sin \phi = (\sigma'_1 - \sigma'_3) / (\sigma'_1 + \sigma'_3)$ と 2α および 2β との関係を示したものである。本研究で行った主ひずみ方向角を固定した試験においても、ピーク時の主ひずみ角と主応力角に大きな違いは認められず、動員摩擦角との関係もほぼ同様となっている。また、ピーク時の動員摩擦角は、主ひずみ(応力)角が 90° 付近で

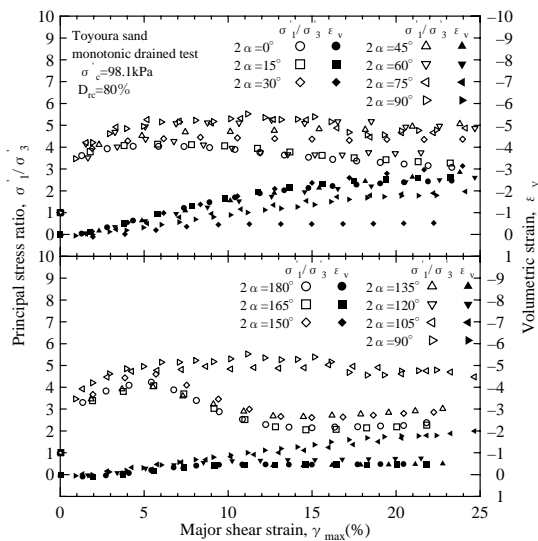


図-12 単調載荷時の σ_1'/σ_3' , $\varepsilon_v \sim \gamma_{max}$

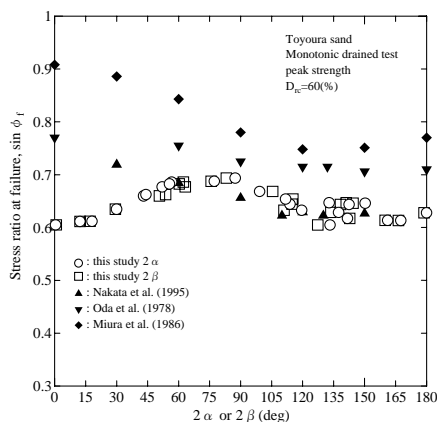


図-13 破壊強度に及ぼす主ひずみ(応力)方向の影響

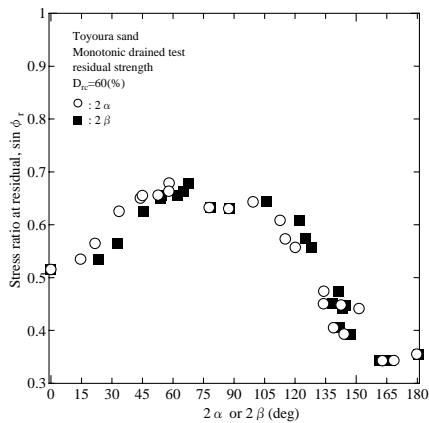


図-14 残留強度に及ぼす主ひずみ(応力)方向の影響

最大値となり 0° および $135 \sim 150^\circ$ 付近で最小値となっている。また、動員摩擦角の変動は $0.6 \sim 0.7$ の範囲で、主ひずみ方向角の違いによる差はそれほど大きくはない。

図中には、 $b=0.5$ 、平均主応力 $p'=100\text{kPa}$ 一定で $D_r=60\%$ の豊浦砂に対してねじりせん断試験を行った中田ら⁶⁾の結果、 $b=0.5$ 、平均主応力 $p'=98\text{kPa}$ 一定で $D_r=82\%$ の豊浦砂に対してねじりせん断試験を行った三浦ら⁷⁾の結果、および拘束圧 $\sigma'_c=98\text{kPa}$ 一定で $D_r=90\%$ の豊浦砂に対して平面ひずみ試験を行った小田ら¹⁾の結果も示している。これら b 値を 0.5 と固定した試験および平面ひずみ試験では、ピーク時の動員摩擦角は、 $2\beta=120 \sim 150^\circ$ の間で最小値を取ってお

り、本研究とほぼ同様な結果が得られた。しかし、圧縮状態($2\alpha < 90^\circ$)での動員摩擦角は、他の研究結果と異なり値が低くなっている。これは、中田らや三浦らの研究は、 $b=0.5$ 一定で試験を行っているが、本研究では b 値を固定していないため圧縮状態では $b=0 \sim 0.5$ の範囲にある。そのため、 b 値の相違の影響により特に $2\alpha < 90^\circ$ の範囲で、他の結果と異なったものと考えられる。このように、内外圧を一定として b 値を固定しない試験では、ピーク強度の最小値は b 値を固定した試験と同様に堆積面と主応力方向の角度が $135 \sim 150^\circ$ 付近で最小値となるが、最大値は $2\alpha=90^\circ$ 付近となる。

図-14は、同様に残留状態の動員摩擦角と主ひずみ方向角および主応力方向角との関係について示したものである。ピーク時と同じく主ひずみ、主応力方向角による動員摩擦角の違いはないことが分かる。また、 70° 付近で残留状態の最大値を取り 165° 付近で最小値を取ることが分かる。さらに、残留時の動員摩擦角は、 $0.3 \sim 0.7$ の範囲でありピーク時よりも主ひずみ(応力)方向角の影響が大きい。図-13に示したピーク時の値と比較すると、 $2\alpha=60 \sim 90^\circ$ 付近では、ピーク強度と残留強度に大きな差は認められないのに対し、図-12にも示したように、特に伸張状態($2\alpha > 90^\circ$)でのピーク強度に対する残留強度の低下が著しい。

5. 結論

- 1) 繰返しおよび単調載荷時の最大せん断剛性率は、微小ひずみレベルでは最大主ひずみ方向角 2α が 90° に近くなるに従ってやや高くなる。
- 2) 単調載荷試験と繰返し載荷試験による微小ひずみ時の最大せん断剛性率は排水試験と同様に非排水試験でもほぼ一致する。
- 3) 主ひずみ軸を固定した試験においても堆積構造の異方性により材料の力学的特性が異方的であれば、主ひずみ軸と主応力軸の方向は一致しない。
- 4) 内外圧を一定として b 値を固定しない試験では、ピーク強度の最小値は b 値を固定した試験と同様に堆積面と主応力方向の角度が $135 \sim 150^\circ$ 付近で最小値となるが、最大値は 90° 付近となる。
- 5) 残留強度はピーク強度と比較すると、 $2\alpha=60 \sim 90^\circ$ 付近では、大きな差は認められないのに対し、特に伸張状態($2\alpha > 90^\circ$)でのピーク強度に対する残留強度の低下が著しく、圧縮状態よりも伸張状態の試験の方が残留状態に早く到達する。

【参考文献】 1)Oda et al.: Experimental study of anisotropic shear strength of sand by plane strain test, S&F, 18(1)1, 31-36, 1978. 2)Yamashita et al.: Young's and shear moduli under different principal stress directions of sand, IS-Torino'99, 1, 149-158,1999. 3)Yamashita et al.: Effect of membrane penetration on modulus and Poisson's ratio for undrained cyclic triaxial conditions, S&F, 36(4), 127-133,1996. 4)山下聡:砂の繰返し載荷試験結果に及ぼす諸因子の影響と試験結果の適用に関する研究, 北海道大学博士論文,1993. 5)Jamiolkowski et al.: New developments in field and laboratory testing of soils, Proc. of 11th ICSMFE, 1, 57-153, 1985. 6)中田ら: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, 511/III-30, 209-220, 1995. 7)Miura et al.: Deformation behavior of anisotropic dense sand under principal stress axes rotation, S&F, 26(1), 36-52, 1986.