

3.8 中空ねじりせん断試験における応力とひずみの制御

3.8.1 制御される応力ひずみ成分

中空ねじりせん断試験では、供試体側面が水圧によって拘束されるために r 軸に関するせん断応力 2 成分が 0 に固定されること (式 (3.19))、および、土の構造が r 軸方向に均一であることを前提として供試体が正しく円筒形を保つと仮定されるために r 軸に関するせん断ひずみの 2 成分も 0 となる (式 (3.20))。そこで、制御可能な応力とひずみはそれぞれ 4 成分ずつとなる。式 (3.31)(3.32)(3.33)(3.42) からわかるように、応力 4 成分を制御することは中空供試体に関する 4 つの外力、すなわち、軸力 F_v 、トルク T 、内セル圧 p_i 、外セル圧 p_o を制御することにほかならない。また、式 (3.51)(3.53)(3.56)(3.57) および式 (3.6)(3.7)(3.8) からわかるように、ひずみの 4 成分を制御することは中空供試体に関する 4 つの変形量、すなわち、高さ変位 ΔH 、供試体体積変化 ΔV_s 、内セル体積変化 ΔV_i 、供試体上面のねじれ角 $\Delta \theta$ 、を制御することにほかならない。

本研究では、せん断試験はすべて非排水条件で行われ、 $\Delta V_s = 0$ なるひずみ制御条件が課せられている。さらに、応力ひずみの制御を簡便に行うために、すべての中空ねじりせん断試験において外セル圧 (全応力) 一定

$$p_o = \text{const.} \quad (3.58)$$

の条件を課した。非排水せん断過程で全応力での拘束圧 (平均主応力) は変化するが、水で飽和した供試体の有効応力経路には影響しない。

本研究では、非排水中空ねじりせん断試験として、

- 単純せん断試験
- 最大主応力 σ_1 が土の堆積面の鉛直線となす角度 α および中間主応力係数 b が一定に保たれる条件でのせん断試験

の 2 種類の試験を実施した。以下に、それぞれのせん断試験における応力ひずみの制御方法を述べる。

3.8.2 非排水単純せん断試験

単純せん断条件とは、物体要素のある断面 (通常は地盤の水平面、土の堆積面) に直交する 2 面に関する 2 つの直ひずみと、2 面に共通に含まれる 1 つのせん断ひずみが 0 であるよ

3.8 中空ねじりせん断試験における応力とひずみの制御

うな変形条件である。この条件下では“ある断面”の形状は変化しない。これを中空供試体に適用すると、単純せん断条件は次のように表される。

$$\epsilon_r = \epsilon_\theta = \epsilon_{r\theta} = 0 \quad (3.59)$$

すなわち、中空供試体の内径と外径は変化せず水平断面の形状が保たれる。 $\epsilon_{r\theta} = 0$ なる条件は式 (3.20) により、常に満足されている。

さらに単純せん断条件に等体積条件 (非排水条件) を課すると残りの一つの直ひずみも 0 となるから、中空供試体の非排水単純せん断条件は次のようになる。

$$\epsilon_r = \epsilon_\theta = \epsilon_z = \epsilon_{r\theta} = 0 \quad (3.60)$$

式 (3.20) により $\epsilon_{zr} = 0$ が満たされているから、結局 0 でないひずみ成分は $\epsilon_{z\theta}$ だけとなる。すなわち、中空供試体の内径、外径、高さは変化せず、供試体の形状や寸法は全く変化しないでねじり変形のみが加えられることになる。

非排水単純せん断条件を実現するために、せん断試験においては鉛直載荷軸の上下動をロックすることにより供試体の高さを固定し、供試体排水バルブを閉じることにより供試体体積を固定し、内セル排水バルブを閉じることにより内セル体積を固定した。すなわち、

$$\Delta H = \Delta V_s = \Delta V_i = 0 \quad (3.61)$$

これらの条件を式 (3.6)(3.7)(3.8) および (3.51)(3.53)(3.57) に適用すれば、非排水単純せん断条件式 (3.60) が満足されることが確かめられる。メンブレンペネトレーションによる供試体と内セルの体積変化は無視している。

ねじりせん断 $\sigma_{z\theta}$ 、 $\epsilon_{z\theta}$ の載荷は単調一定速度のひずみ制御で行った。従って、非排水単純せん断試験では制御される応力成分は存在せず、完全なひずみ制御試験となっている。

3.8.3 α , b 一定条件での非排水せん断試験

最大主応力 σ_1 が土の堆積面の鉛直線となす角度 α および中間主応力係数 b に関する条件式は、式 (3.46)(3.47) である。これを再びここに記載すると、

$$\tan 2\alpha_\sigma = \frac{2\sigma_{z\theta}}{\sigma_z - \sigma_\theta} \quad (3.62)$$

$$b = \frac{1}{2} \left(\frac{\sigma_r - \frac{\sigma_z + \sigma_\theta}{2}}{\sqrt{\left(\frac{\sigma_z - \sigma_\theta}{2}\right)^2 + \sigma_{z\theta}^2}} + 1 \right) \quad (3.63)$$

これらの条件式は有効応力で記述しても間隙水圧項は消去されて全く同じ形となる。ここに現れている応力成分は4つであるが条件式は2つであるので、ほかに2つの応力条件を加えなければ応力成分が定まらない。本研究では、前に述べたように $p_o = \text{const.}$ なる条件を加えると同時に、ねじり載荷または鉛直軸載荷をひずみ制御として $\sigma_{z\theta}$ または σ_z を観測値として与えることとする。 σ_r および σ_θ は両方とも p_i と p_o の関数となっているので直接に制御できない量である。そこで、直接制御できる p_i , p_o , $\sigma_{z\theta}$, σ_z に関する条件式を得るために式(3.31)(3.32)を導入する。

$$\sigma_r = \frac{p_o r_o + p_i r_i}{r_o + r_i} \quad (3.64)$$

$$\sigma_\theta = \frac{p_o r_o - p_i r_i}{r_o - r_i} \quad (3.65)$$

$\alpha \neq 0^\circ$ かつ $\alpha \neq 90^\circ$ の場合

式(3.62)~(3.65)を整理して次の関係式を得る。

$$\sigma_z = p_o + \left(2A - B \frac{r_o + r_i}{2r_o} \right) \sigma_{z\theta} \quad (3.66)$$

$$p_i = p_o + B \frac{r_o^2 - r_i^2}{2r_o r_i} \sigma_{z\theta} \quad (3.67)$$

α と b が一定に保たれるとき A , B は定数であり、次のように表される。

$$A = \frac{1}{\tan 2\alpha} \quad (3.68)$$

$$B = (2b - 1) \sqrt{A^2 + 1} + A = \frac{b - \sin^2 \alpha}{\sin \alpha \cos \alpha} \quad (3.69)$$

ねじり載荷をひずみ制御する場合には $\sigma_{z\theta}$ が観測値として与えられるので、式(3.66)(3.67)をもちいて鉛直荷重と内セル圧を応力制御する。また、鉛直軸載荷をひずみ制御する場合には σ_z が観測値として与えられるので、式(3.66)(3.67)をもちいてねじり荷重と内セル圧を応力制御することによって所定の応力条件を満たすことができる。

いま、 $p_i = p_o$ なる条件を考えると、式(3.67)より $B = 0$ である。したがって式(3.69)より直ちに

$$b = \sin^2 \alpha \quad (3.70)$$

を得る。

$\alpha = 0^\circ$ の場合

式(3.62)から直ちに $\sigma_{z\theta} = 0$ であるから、応力制御によりトルクを0に保ち、ひずみ制御で鉛直載荷を行う。また、明らかに $\sigma_1 = \sigma_z$, $\sigma_2 = \sigma_r$, $\sigma_3 = \sigma_\theta$ であるから $b = (\sigma_r - \sigma_\theta) / (\sigma_z - \sigma_\theta)$ であり、これに式(3.64)(3.65)を代入して次の内セル圧の応力制御条件式を得る。

$$p_i = \frac{\{2r_o r_i - b r_o(r_o + r_i)\} p_o + b(r_o^2 - r_i^2) \sigma_z}{2r_o r_i - b r_i(r_o + r_i)} \quad (3.71)$$

$b = 0$ のとき $p_i = p_o$ となり、中実円柱供試体を用いた通常の三軸圧縮試験と同じ応力条件となる。

$\alpha = 90^\circ$ の場合

同様に、式(3.62)から直ちに $\sigma_{z\theta} = 0$ であるから、応力制御によりトルクを0に保ち、ひずみ制御で鉛直載荷(実際には除荷)を行う。また、 $\sigma_1 = \sigma_\theta$, $\sigma_2 = \sigma_r$, $\sigma_3 = \sigma_z$ であるから $b = (\sigma_r - \sigma_z) / (\sigma_\theta - \sigma_z)$ であり、これに式(3.64)(3.65)を代入して次の内セル圧の応力制御条件式を得る。

$$p_i = \frac{\{(b-1)r_o^2 + (b+1)r_o r_i\} p_o + (1-b)(r_o^2 - r_i^2) \sigma_z}{(b-1)r_i^2 + (b+1)r_o r_i} \quad (3.72)$$

$b = 1$ のとき $p_i = p_o$ となり、中実円柱供試体を用いた通常の三軸伸張試験と同じ応力条件となる。

3.8.4 試験装置の機械制御

上述のように、中空ねじりせん断試験においては8個の応力ひずみ成分(4つの応力成分と4つのひずみ成分)の内の4個の応力またはひずみ成分を制御しなければならない。このうち、ひずみ制御については本研究ではひずみゼロの保持または一定ひずみ速度での単調載荷とするのでくに問題はない。しかし、応力制御を行うためには何らかの方法によって常にその応力成分を監視し、所定の応力条件を満足するように応力の大きさを調整するための工夫が必要である。とくに、 α , b 一定条件のせん断試験では p_i , p_o , σ_z または $\sigma_{z\theta}$ の3つを制御する必要があり、 $p_o = \text{const.}$ の制御にはほとんど手間がかからないとしても、これを人間の目と手を使って行うことは労力の点からもまた試験精度の点からも現実的ではない。

そこで、本研究ではパーソナルコンピュータによる p_i , p_o , σ_z , $\sigma_{z\theta}$ の自動観測と自動制御を行った。本研究で用いた自動制御のアルゴリズムは素人考えの試行錯誤によって作ったものであり、論理的背景はない。基本的には、観測値と目的値の間の誤差を一定時間蓄積し、

それが一定量に達したならば誤差を解消するように負荷を修正する仕組みになっている。制御の正確さ (accuracy, sensitivity) と安定性 (stability) という一般的に相反する条件を同時になるべく向上させるためには、電圧-空圧変換器のあまり頼りにならない線形性を利用するなど、いろいろと工夫する必要がある。計測と制御のハードウェアについては3.5節を、また制御の精度については5.4.4節を参照していただきたい。

なお、自動制御の専門知識を用いれば、本研究に用いた試験装置のように計測と制御動作に相当の時間遅れがありかつ制御専用の演算装置を持たないような系であっても、静的にはもちろん動的な動作についてもかなり精度のよい自動制御が可能なものようである。このような知識が土質実験の分野に導入されれば実験技術は大きく進歩するものと期待される。

3.9 中空供試体の応力とひずみの不均一分布

中空ねじりせん断試験は、制御可能な応力・ひずみ成分が4成分と、他のせん断試験に比べて自由度が大きいという利点があるが、一方で外セルと内セルの圧力差・半径方向のねじり変位差・端面の拘束などに起因する応力やひずみの不均一が供試体内部に発生することが知られている (Hight et al., 1983, Vaid et al., 1990)。この不均一はせん断応力比 (内部摩擦角) が大きくなるほど、また供試体の変形が大きくなるほど著しくなるので、本研究で行うような大変形試験では特に厳しい条件におかれていると言える。

供試体内部に発生する応力・ひずみの不均一性は供試体の構成関係に依存しており、その大きさを見積もることは難しい。理想的な応力・ひずみ状態にある供試体の挙動と、中空供試体の挙動から求められた平均的な応力-ひずみ関係との間に、どれほどの懸隔があるのかを知ることはさらに困難である。

ここでは、 σ_r の供試体半径方向の分布を中心として、本研究で用いた供試体寸法および応力条件のもとで、どの程度の応力・ひずみの不均一が存在するのかを試算した。

外セル-内セル圧力差に起因する σ_r および $\sigma_{z\theta}$ の不均一

式 (3.27) および式 (3.28) より、弾性体を仮定したときに σ_r と $\sigma_{z\theta}$ の供試体半径方向の分布は単調増加または単調減少する関数であって、その最大値と最小値の差は外セルと内セルの圧力差に等しいことがわかる。すなわち、

$$\sigma_r|_{r=r_o} - \sigma_r|_{r=r_i} = \sigma_{z\theta}|_{r=r_i} - \sigma_{z\theta}|_{r=r_o} = p_o - p_i \quad (3.73)$$

従って、外セルと内セルの圧力差が大きくなるに従って σ_r および $\sigma_{z\theta}$ の不均一が大きくなる。式 (3.67), (3.69) より、外セルと内セルの圧力差は

$$p_o - p_i = \frac{b - \sin^2 \alpha}{2 \sin \alpha \cos \alpha} \left[\left(\frac{r_o}{r_i} \right)^2 - \left(\frac{r_i}{r_o} \right)^2 \right] \sigma_{z\theta} \quad (3.74)$$

であるので、せん断条件として $b = \sin^2 \alpha$ を与えれば応力の不均一は生じず、また、供試体の内径と外径の比が1に近いほど応力の不均一は小さくなる。また、せん断応力 $\sigma_{z\theta}$ が大きいほど応力の不均一も大きくなる。

σ_r については、供試体の構成関係にかかわらず、あきらかにその不均一量は $p_o - p_i$ である。本研究で用いた $r_i/r_o = 0.6$ の条件のもとで、最大主応力方向角 α と中間主応力係数 b を様々に組み合わせてせん断を行ったときの半径方向主応力の不均一を表すパラメータ $(p_o - p_i)/\sigma_r$ と供試体に発生する内部摩擦角 $\phi_{mob} = \sin^{-1}(\sigma_1 - \sigma_3)/(\sigma_1 + \sigma_3)$ との関係を図3.10~図3.16に示した。また、 $\phi = 30^\circ$ および $\phi = 40^\circ$ における半径方向主応力の不均一を表すパラメータ $(p_o - p_i)/\sigma_r$ の α - b 平面上での分布を図3.17に示した。ここで、 σ_r は式 (3.31) によって求められる平均的な半径方向主応力 $\bar{\sigma}_r$ のことである。これらの図によれば、表5.6に示した本研究で用いた α および b に関する応力条件のうち、 $(\alpha = 30^\circ, b = 0)$, $(\alpha = 45^\circ, b = 0)$, $(\alpha = 60^\circ, b = 0.25)$ の3つを除けば、応力の不均一は $\phi = 30^\circ$ において20%以内、 $\phi = 40^\circ$ において30%以内となる。この応力の不均一が、平均値として観測される応力-ひずみ関係に与える影響の大きさは明らかではない。

ねじり変位差に起因する $\epsilon_{z\theta}$ と $\sigma_{z\theta}$ の不均一

ねじり変位量は供試体の半径に比例するのでねじりせん断ひずみ γ も供試体の内面で最も小さくなり外面で最も大きくなる。このせん断ひずみの不均一量と平均的なせん断ひずみ量の比は、式 (3.54), (3.56) より、

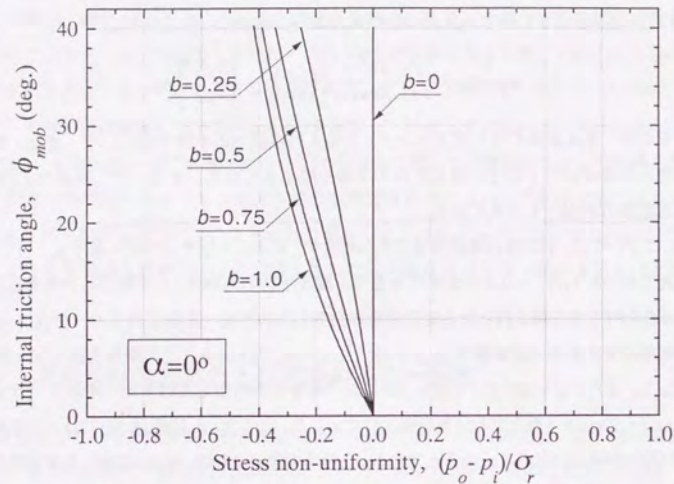
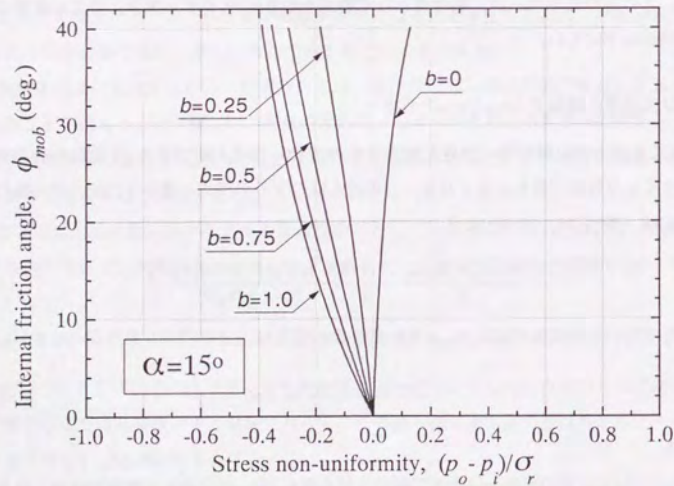
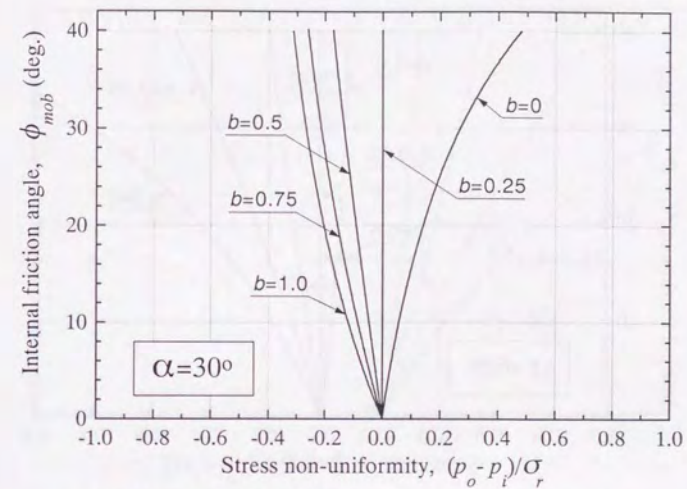
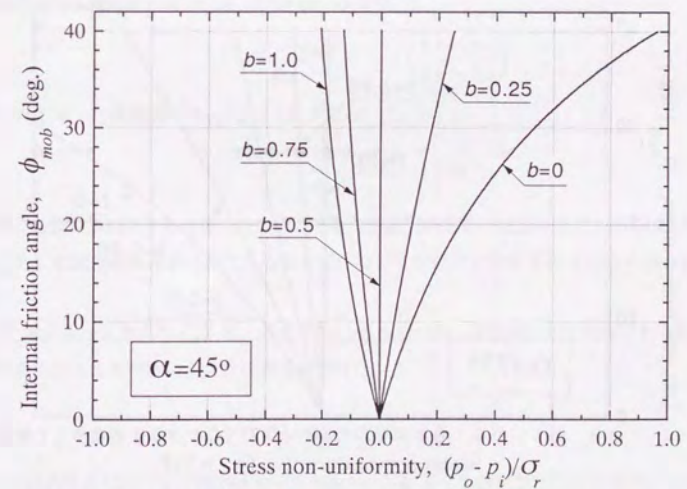
$$\frac{\gamma|_{r=r_o} - \gamma|_{r=r_i}}{\bar{\gamma}} = \frac{3(1 - r_i/r_o)\{1 - (r_i/r_o)^2\}}{2(1 - (r_i/r_o)^3)} \quad (3.75)$$

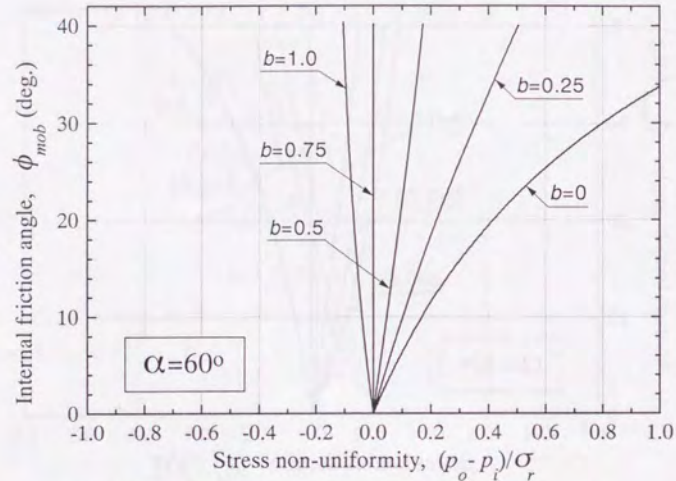
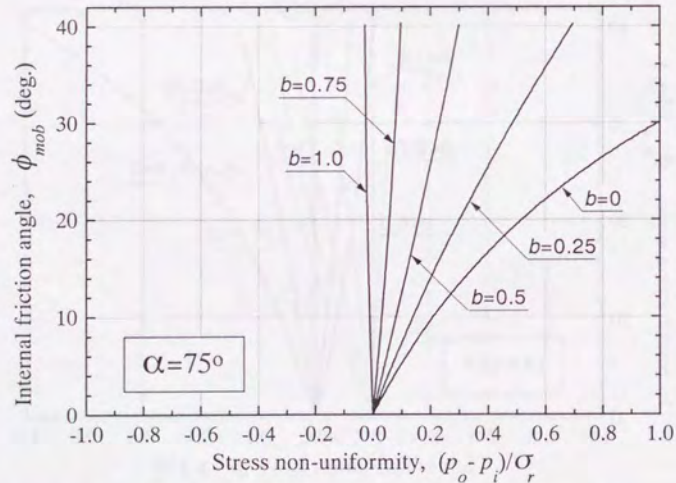
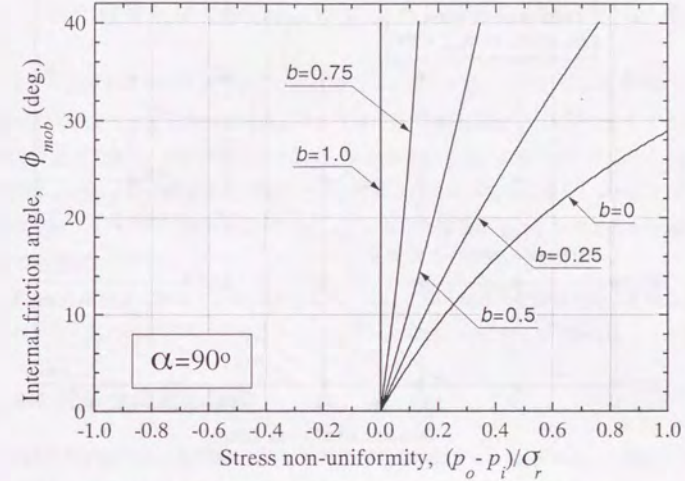
本研究で用いた供試体では $r_i/r_o = 0.6$ であるので、

$$\frac{\gamma|_{r=r_o} - \gamma|_{r=r_i}}{\bar{\gamma}} = 0.49 \quad (3.76)$$

となる。

ねじりひずみ量の不均一によってねじりせん断応力 $\sigma_{z\theta}$ の分布も供試体の内面で最も小さく外面で最も大きくなる。もし供試体が完全弾性体であるならば、せん断応力の不均一量と

図 3.10 中空供試体の半径方向応力分布の不均一 ($\alpha = 0^\circ$)図 3.11 中空供試体の半径方向応力分布の不均一 ($\alpha = 15^\circ$)図 3.12 中空供試体の半径方向応力分布の不均一 ($\alpha = 30^\circ$)図 3.13 中空供試体の半径方向応力分布の不均一 ($\alpha = 45^\circ$)

図 3.14 中空供試体の半径方向応力分布の不均一 ($\alpha = 60^\circ$)図 3.15 中空供試体の半径方向応力分布の不均一 ($\alpha = 75^\circ$)図 3.16 中空供試体の半径方向応力分布の不均一 ($\alpha = 90^\circ$)

平均的なせん断応力の比は、式 (3.38), (3.41) より、

$$\frac{\sigma_{z\theta}|_{r=r_o} - \sigma_{z\theta}|_{r=r_i}}{\bar{\sigma}_{z\theta}} = 2 \left(\frac{1 - r_i/r_o}{1 + r_i/r_o} \right) \quad (3.77)$$

本研究で用いた供試体では $r_i/r_o = 0.6$ であるので、

$$\frac{\sigma_{z\theta}|_{r=r_o} - \sigma_{z\theta}|_{r=r_i}}{\bar{\sigma}_{z\theta}} = 0.94 \quad (3.78)$$

実際には供試体は完全弾性体ではないのでせん断応力の不均一はこれほど大きくはなり得ない。もし供試体が完全塑性体であるならば、ねじり変位差に起因する $\sigma_{z\theta}$ の不均一は生じない。

これらのせん断応力 $\sigma_{z\theta}$ とせん断ひずみ $\epsilon_{z\theta}$ の不均一が、平均値として観測される応力-ひずみ関係に与える影響の大きさは明らかではない。

供試体上下端面拘束がもたらすひずみと応力の不均一

中空円筒供試体の上下端面はボラスストーンによって拘束されており水平方向の変形が許されない。すなわち、供試体の上下端面において常に $\epsilon_r = \epsilon_\theta = 0$ となっている。この

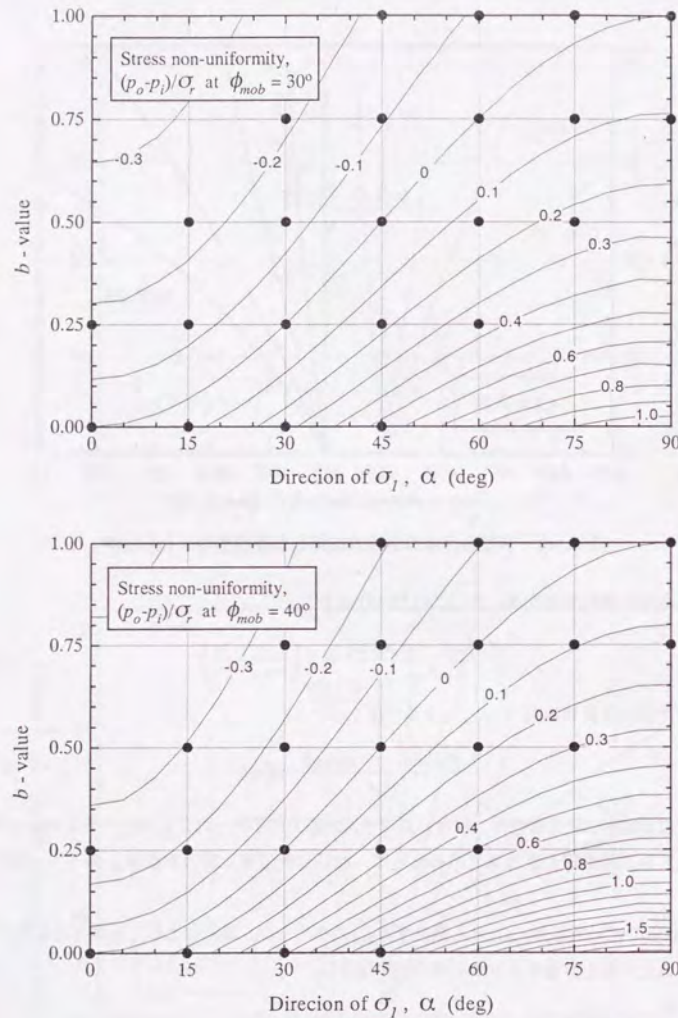


図 3.17 中空供試体の半径方向応力分布の不均一

ことは、 ϵ_r や ϵ_θ の分布の不均一のみならず、供試体端部付近での応力集中を伴う σ_r, σ_θ の不均一、本来ゼロであるべき応力成分 σ_{zr} やひずみ成分 ϵ_{zr} の発生などの複雑な不均一性をもたらす。

外セルと内セルの圧力差やねじり変位量の差によって生じる応力やひずみの不均一は、供試体の半径を大きくしかつ供試体の厚みを薄くして r_i/r_o をなるべく1に近くすることによって軽減できるが、端面拘束による不均一は供試体の寸法によらず発生する。この不均一を解消するためには、供試体上下端において円周方向のねじりせん断力 $\sigma_{z\theta}$ を確実に伝達しつつ供試体の半径方向の運動を自由に許し $\sigma_{zr} = 0$ が保証されるような端面拘束の機構を開発する必要がある。

単純せん断試験においては供試体全体で $\epsilon_r = \epsilon_\theta = 0$ となるので端面拘束の影響は最小になるが、せん断前の圧密時に生じる応力とひずみの不均一の影響を免れることはできない。

3.10 間隙比測定の精度

定常状態理論では、圧密線・定常状態線などの基準線を $e - \log p$ 平面上に設定して土の状態を表現することが多いが、きれいな砂などの圧縮性の小さな土の場合にはこれらの基準線の傾きは小さく、特に低拘束圧になるほどその傾向は著しくなる。従って、わずかな間隙比の相違によって土の応力状態やせん断挙動が大きく変化することになり、実験においては供試体の間隙比を正確に測定することが重要である。

供試体の間隙比 e は次のように計算される。

$$e = \frac{G_s V_v}{m_s} = \frac{G_s V}{m_s} - 1 \quad (3.79)$$

ここで、 G_s は土粒子密度、 V_v は供試体の間隙の体積、 V は供試体の全体の体積、 m_s は供試体の乾燥質量である。間隙比を0.001の精度で求めるためには、土粒子密度 G_s 、供試体間隙体積 V_v 、供試体全体積 V 、乾燥質量 m_s を1/1000の精度で測定する必要がある。

土粒子密度 G_s の測定精度

土粒子密度 G_s の測定は土質工学会(1979)の方法に従って測定され、およそ 2.7 g/cm^3 である。測定値は通常0.01程度の幅でばらつくので、3回程度の測定を平均した数値の0.001の桁には誤差が含まれ、1/1000の精度が保証されているとは言えない。しかし、同じ土の密度を相対的に比較する目的のためには、同じ土粒子密度を用いて密度を計算する限り全く問題はない。

乾燥質量 m_s の測定精度

直径 5cm、高さ 10cm の三軸供試体の場合、乾燥質量は 280g 程度である。また、内径 6cm、外径 10cm、高さ 20cm の中空供試体の乾燥質量は 1400g 程度である。乾燥質量を 0.1g の精度で測定することは容易であり、1/1000 の測定精度が保証されている。

供試体間隙体積 V_v または供試体全体積 V の測定精度

供試体の直径や高さなどの寸法を直接測定することによって供試体の体積を計算すると誤差が大きい。直径 5cm、高さ 10cm の三軸供試体の場合、体積を 1/1000 の精度で計算するためには、高さ誤差 0.1mm、直径誤差 0.25mm 以内としなければならないが、これは砂の供試体の粒径と同程度かそれ以下であり困難である。また、供試体寸法の均一性も一般にこの精度以下である。さらに、載荷軸を接続したりするときの供試体の変形や試料を水で飽和するときの体積変化が測定できないこと、中空供試体では供試体を自立させてから内径を直接測定することが不可能であることなどが原因となって、上記の精度はとうてい望めない。この問題を解決するために試験後に飽和供試体を凍結させて取り出し含水比を測定する方法もあるが非常にめんどろな作業となる。

そこで、本研究では次のような手順で飽和供試体の間隙水体积 V_v を測定した。

1. 試験後の供試体に繰返しせん断を加えるなどしながら圧密し、極大量の間隙水を排出させてその排出量 V_{v1} を測定する。豊浦砂の場合には含水比を 22% 程度まで低下させることができる。
2. 試料をすべて取り出し、その湿潤質量 m_w と乾燥質量 m_d を測定する。含水比を十分に低下させることによってサクションが発生するので、砂であっても供試体を取り出す際に間隙水が流出することはない。
3. 中空供試体の場合にはメンブレンやポーラスストーンに付着している湿潤試料をすばやく完全に取り出すことは困難である。また、ポーラスストーンの体積が大きいため、供試体を取り出す際にポーラスストーンの間隙水が供試体に浸入する恐れがある。そこで、供試体中央部分を取り出してその湿潤質量 m_{w1} と乾燥質量 m_{d1} を測定する。含水比を十分に低下させてあるので、含水比の分布が不均一になることはない。別途、メンブレンやポーラスストーンを水洗いするなどして残りの試料を完全に回収し、その乾燥質量 m_{d2} を測定する。その上で、供試体の間隙の均一分布を仮定して供試体全体の乾燥質量 $m_d = m_{d1} + m_{d2}$ および湿潤質量 $m_w = m_{w1} \cdot m_d / m_{d2}$ を求める。

4. 飽和供試体の間隙水体积 $V_v = V_{v1} + (m_w - m_d) / \rho_w$ を計算する。 ρ_w は水の比重である。

間隙水の排出量はビュレットによって 0.1cm³ まで読みとることができる。また、供試体の湿潤質量や乾燥質量は 0.1g の精度で測定できる。そこで、飽和供試体の間隙水体积 V_v も 0.1cm³ の精度でもとまることになる。供試体の体積は直径 5cm、高さ 10cm の三軸供試体で約 200cm³、内径 6cm、外径 10cm、高さ 20cm の中空供試体で約 1000cm³ であるから、上記の方法は十分に 1/1000 の精度を持っている。間隙比 $e=0.800$ に対して間隙水体积 V_v の測定誤差 0.1cm³ によって生じる間隙比の誤差は、供試体体積が 200cm³ のとき 0.0009、供試体体積が 1000cm³ のとき 0.00018 である。

3.11 実験に用いた試料

実験に用いた試料は、豊浦砂標準砂および川岸町砂、茂原砂 No.1、茂原砂 No.2、関宿砂、釧路町砂、美浜砂、大形砂の 8 種類の砂質土である。これらの試料のうち、豊浦標準砂をのぞく 7 種類の試料はいずれも過去の地震の際に構造物の沈下・転倒・浮上や噴砂などの液化化現象が観察された地点で採取されたものである。美浜砂を除き、オープンカットされた調査溝からブロックサンプリングにより不攪乱試料を採取し、またその際に切り崩した土を採取して再構成供試体の試料とした。以下に試料採取地点、採取方法、試料の物理特性について記載する。また、第 7 章において Verdugo(1989,1992) の研究から 4 つの試料に関する実験結果を引用しているので、これらの試料についても記述する。

3.11.1 試料採取地点

川岸町砂

新潟県新潟市川岸町にある建設コンサルタント会社(株)興和の資材置き場駐車場でサンプリングを行った。この場所はかつての県営アパートの敷地であり、1964 年の新潟地震の際に RC 造 4 階建てのアパート群が沈下・傾斜・転倒して液化化被害の象徴ようになった地点である(Ohsaki,1966)。また付近一帯では数 m の横方向地盤変位が記録されている(地震予知総合研究振興会,1988)。調査溝を掘削すると当時のアパート建築の基礎となっていた直径 30cm ほどの栗石が多数発見された。栗石の下、地表面から約 1.2m の地下水位直上において不攪乱試料・攪乱試料の採取を行った。

茂原砂 No.1・茂原砂 No.2

千葉県茂原市八千代3丁目の宮川左岸の畑地でサンプリングを行った。この地点では、1987年千葉県東方沖地震の際に地割れ・噴砂が観察され、地盤が宮川に向かって流動したと言われている。調査溝の堀削に当たっては簡易な排水井戸を調査溝周辺に設置して地下水位を低下させ、地表面から3m程度まで堀削を行った。堀削面には、千葉県東方沖地震で発生したと見られる砂脈数本が砂層から厚さ1mほどの表層土を貫入して地表近くまで達しているのが確認された。砂層は上下2層に分かれており、上層は比較的締まった砂層、下層はやや細粒分を含むとみられる比較的緩い砂層であった。上層の砂質土を茂原 No.1、下層の砂質土を茂原 No.2として、それぞれ不攪乱試料と攪乱試料を採取した。

関宿砂

千葉県葛飾郡関宿町三軒家の利根川・江戸川分岐点付近の畑地でサンプリングを行った。この地点では、1923年関東地震の際に地割れ・陥没・噴砂が観察された。調査溝の堀削面では砂脈や陥没の痕跡が明瞭に観察できた(森,1993)。地表面から約3mまで堀削したが、砂脈の供給源である液状化層までは達しなかった。そこで、地震時の液状化層よりは上にあると思われる砂層から不攪乱試料と攪乱試料を採取した。

釧路町砂

北海道釧路郡釧路町木場2丁目の下水道修復工事現場でサンプリングを行った。この地点では、1993年釧路沖地震の際に道路脇の歩道に埋設されたマンホールが1.2~1.5m浮上する被害が発生した(山下ら,1993)。この復旧工事に伴って被害状況を観察するためにマンホール周辺地盤の開削が行われた。その結果、マンホールと同時に接続管渠も浮き上がっており、接続部分や管渠本体には大きな損傷は見られなかった。地震後の調査では、マンホール設置時の埋め戻し土はN値1~3程度の砂質土で原地盤の一部にもN値が2程度のシルト質細砂層があった。また、マンホール底盤直下には空洞は見られなかった(古関,1994)。このマンホール及び污水管は1978年に開削工法により敷設され、周囲は旧釧路川の浚渫砂と山砂により埋め戻されたものである(建設省土木研究所,1994)。マンホールを撤去した後、埋め戻し土と思われるマンホール底盤直下の地盤から不攪乱試料と攪乱試料を採取した。なお、釧路沖地震の1年3カ月後に発生した1994年北海道東方沖地震において、同一地点で再びマンホールが10~20cm浮上する被害が発生している。

美浜砂

千葉県千葉市美浜区磯部4丁目の中磯部公園敷地内で行われたボーリング調査孔においてトリプルコアチューブサンプラーを用いてサンプリングが行われた。この地点は1972年から1973年にかけて東京湾に造成された埋め立て地であり、1987年千葉県東方沖地震の際に噴砂が多く観察された(Kazaoka,1991)。埋め立て土の深さは地表面下約10mである。コアサンプルのうち、比較的均質な砂質土である深度6.7m~7.3mの部分から不攪乱試料を採取した。また、これを整形するときの削りくずを攪乱試料とした。

大形砂

新潟市大形本町2丁目、大形小学校正門から西北西約250mの住宅地内空地でサンプリングを行った。この地点では1968年新潟地震の際に著しい地割れ・噴砂が生じるとともに、北西側の通船川に向かって変位量6mに及ぶ地盤側方流動が起こった(地震予知総合研究振興会,1988)。地表面から約2m堀削すると地下水面が現れた。簡易井戸による排水で地下水面を若干低下させた後、自然地下水面直下の砂層から不攪乱試料と攪乱試料を採取した。

3.11.2 既往の実験で用いられた試料

Verdugo(1989,1992)は、千葉砂、清洲砂、小坂砂、木津川砂の4種類の砂質土について不攪乱供試体及び再構成供試体の非排水三軸単調圧縮せん断試験を行っている。本研究ではこの試験結果を引用し、合計11種類の攪乱・不攪乱供試体のせん断挙動を比較検討する。

千葉砂は、千葉県長生郡長南町長南の長南中学校敷地内でサンプリングされた。この地点では、1987年千葉県東方沖地震の際に切り土によって造成された高さ約6mの斜面が流動破壊した(Ishihara,1990,1993)。

清洲砂、小坂砂、木津川砂のサンプリング地点の詳細は明らかではないが、いずれも噴砂などの液状化現象の痕跡が見られる遺跡発掘現場から採取された。液状化を生じた地震年代は、清洲砂と木津川砂はおおよそ400年前、小坂砂についてはおおよそ2000年前と推定されている(Verdugo,1989)。

3.11.3 不攪乱試料の採取方法

美浜砂を除き、他の10種類の不攪乱試料は開削された調査溝内で押し切り式ブロックサンプリングによって採取されたものである。ブロックサンプリングは手堀作業によって塊状の土をできるだけ原位置に近い状態で採取するものであり、人間が内部で作業するための

かなり大がかりな開削が必要であること、地下水位以下での作業はできないこと、従って採取深度に限られることなどの制約があるが、直接の手作業による採取であるために乱れの少ない良質な不攪乱試料を採取できる。本研究で用いた不攪乱試料の採取方法は、土質工学会基準案「ブロックサンプリングによる土の乱さない試料の採取方法 (JSF 1231-1993)」(土質工学会, 1993) に大筋で同等のものである。不攪乱試料運搬時の乱れを防ぐために、試料は採取現場で凍結した後、運搬・保管した。

試料収納容器

試料収納容器 (サンプラー) は黄銅製の円筒であり、一方の先端には外周を削ることで鋭い刃先を設けてある。三軸試験用供試体 (直径約 50mm、高さ約 100mm) のためのサンプラーの寸法は、内径 60mm、長さ 120mm、肉厚 1mm である。また、高圧三軸試験用供試体 (直径約 60mm、高さ約 120mm) のためのサンプラーの寸法は、内径 75mm、長さ 150mm、肉厚 1.5mm である。

サンプリング手順

1. 試料を採取する地盤面を平らに整形する。調査溝の側面から採取するときには堀込みをいれて棚状の水平面を整形する。
2. サンプラーの直径よりも 5cm 程度大きな円柱ブロックを荒削りし、その上面に刃先を下にしてサンプラーを置く。
3. ナイフやへらを用いて、サンプラーの刃先から下方 10mm 程度の範囲のブロックをサンプラーの外径とほぼ同じ直径を持つ円柱に仕上げる。サンプラーを非常に軽く押し下げて、外皮を刃先で削るようにしながら、その部分をサンプラー内に納める。
4. これを繰り返して、サンプラーに取り込んだ試料の上端がサンプラー上端よりも 2cm 程度突出するまでサンプラーを押し下げてゆく。その際、サンプラーが傾かないように注意を要する。
5. スコップ等を用いて試料の底部を地盤から切り離し、サンプルの両端面をナイフやへらで平らに整形する。試料の含水量が多い場合にはサンプルを立てた状態で数時間放置して自然排水させる。これは試料を凍結する際の膨張を防ぐためである。

6. 試料がサンプラーから抜け出ることを防ぐために両端面をプラスチックキャップや布テープなどで保護する。
7. ドライアイスとともに保冷箱の中にいれて約半日間放置し試料を凍結させる。その際、試料の膨張を防ぐために、ドライアイスを保冷箱の底部に置いてその上にサンプラーを立てるなどの工夫をして、なるべく試料の端から端へ方向に凍結が進行するようにする。
8. 試料が完全に凍結したことを確認した後、保冷箱にいれたまま実験室へ運搬する。サンプル量が多かったり遠隔地のために人力での運搬が困難な場合には冷凍宅配便を利用する。
9. 実験室内の冷凍庫にサンプルを移し、保管する。

3.11.4 試料の物理特性

実験に用いた試料の土粒子密度、細粒分含有量、平均粒径、最大間隙比、最小間隙比を表 3.1 にまとめた。美浜砂不攪乱試料はボーリングコアから採取したために供試体によって 60cm 程度の深度差があり、物理特性にも供試体ごとに相違がある。美浜砂の再構成供試体の作成には各不攪乱試料の削りくずを均等に混合した試料を用いた。

また、吉田 (1995) が開発した砂粒子の画像処理システムを用いて取得した各試料の粒子の輪郭画像を図 3.20～図 3.26 に示した。

表 3.1 試料の物理特性

	土粒子密度 $\rho_s(g/cm^3)$	細粒分含有量 $F_c(\%)$	平均粒径 $D_{50}(mm)$	最大間隙比 e_{max}	最小間隙比 e_{min}
豊浦砂	2.650	0.0	0.20	0.977	0.597
川岸町砂	2.664	1.4	0.32	1.054	0.793
茂原砂 No.1	2.672	8.3	0.14	1.274	0.772
茂原砂 No.2	2.663	11.6	0.14	1.442	0.859
関宿砂	2.747	1.8	0.28	1.180	0.752
釧路町砂	2.589	5.9	0.28	1.039	0.767
美浜砂	(2.70)	18.9-35.9	0.12-0.16	—	—
大形砂	2.694	0.8	0.28	1.039	0.655
千葉砂	2.68	18	0.15	1.307	0.685
清洲砂	2.67	9	0.30	1.156	0.629
小坂砂	2.62	9	0.41	0.985	0.502
木津川砂	2.65	22	0.22	1.357	0.544

(千葉砂, 清洲砂, 小坂砂, 木津川砂のデータは Verdugo(1989) による)

(豊浦砂のデータは東畑 (1981) による)

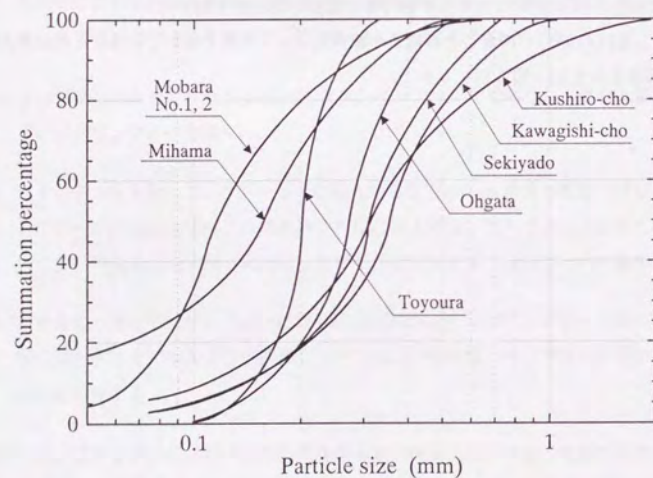


図 3.18 試料の粒径加積曲線 (その1)

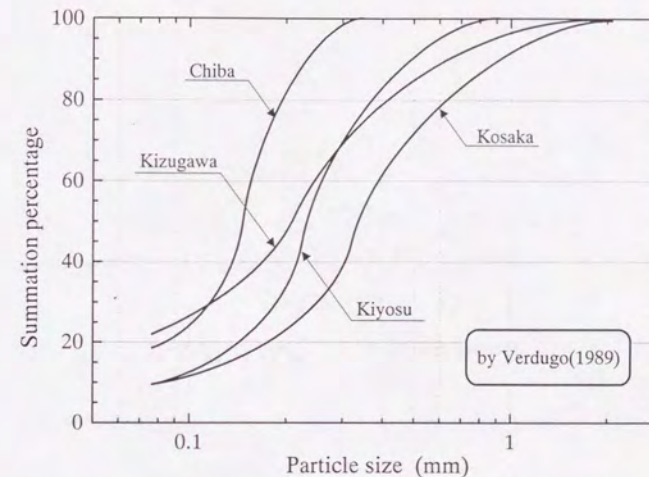


図 3.19 試料の粒径加積曲線 (その2)



図 3.20 川岸町砂の粒子形状

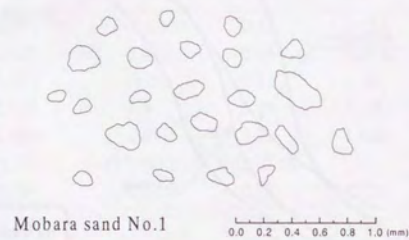


図 3.21 茂原砂 No.1 の粒子形状

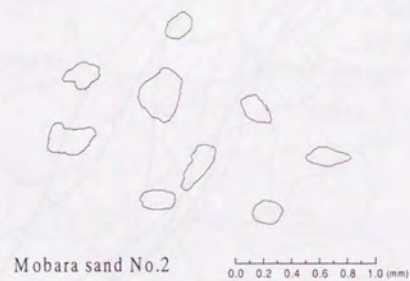


図 3.22 茂原砂 No.2 の粒子形状



図 3.23 関宿砂の粒子形状

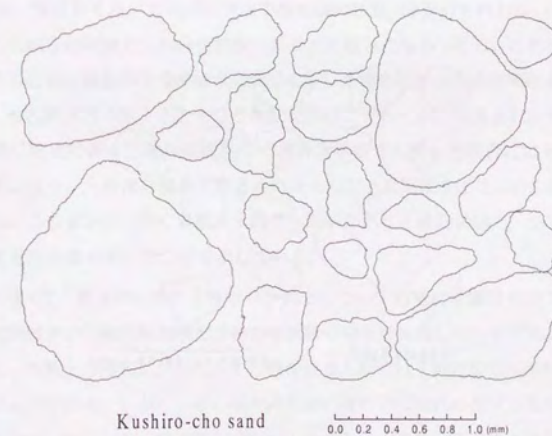


図 3.24 釧路町砂の粒子形状



図 3.25 美浜砂の粒子形状



図 3.26 大形砂の粒子形状

第4章

三軸圧縮・伸張せん断における砂の流動

4.1 いろいろな砂の三軸圧縮・伸張せん断

これまで土の非排水大変形特性は主に三軸圧縮試験によって調べられてきた。ところが、三軸伸張試験における土の非排水大変形特性は三軸圧縮試験によるものと著しく異なっていて、三軸伸張条件では三軸圧縮条件に比べてきわめて土の挙動が圧縮的になることが報告されている (例えば、Vaid et al. 1990)。

図 4.1は、豊浦砂を用いて乾燥堆積法で最も緩い状態 (締固めを行わない状態) に作成した供試体の三軸圧縮試験と三軸伸張試験の結果を比較したものである。この密度では、等方圧密状態から三軸圧縮条件下で非排水単調せん断した場合に生じる過剰間隙水圧比は50%程度であり、せん断応力の低下をともなう流動変形はごくわずかに観測されるだけである。ところが、同じ密度の砂を三軸伸張条件下で非排水単調せん断した場合にはその挙動はるかに圧縮的となり、大規模な流動変形と共にほとんど過剰間隙水圧比 100%の完全液化に至っている。この事実は、砂の非排水単調せん断挙動がせん断時の応力・ひずみ条件によって非常に大きな影響を受けることを示している。

図 4.2～4.4は、豊浦砂以外の3種類の砂質土について同様に乾燥堆積法で最も緩い状態に作成した供試体の三軸圧縮試験と三軸伸張試験の結果を比較したものである。これらの試験結果から、砂質土の種類にかかわらず三軸伸張せん断では三軸圧縮せん断時よりも軟化傾向が強いことがわかる。しかし、その傾向の強弱の度合いは試料の作成方法が同じであっても土の種類によって異なり、釧路町砂 (図 4.4) のように圧縮せん断挙動と伸張せん断挙動が比較的小さなものもある。図 4.2(c)(d)～4.4(c)(d) を参照すると、三軸圧縮せん断と三軸伸張せん断で強度特性が大きく異なる場合であっても、大変形時の内部摩擦角はほぼ同じであ

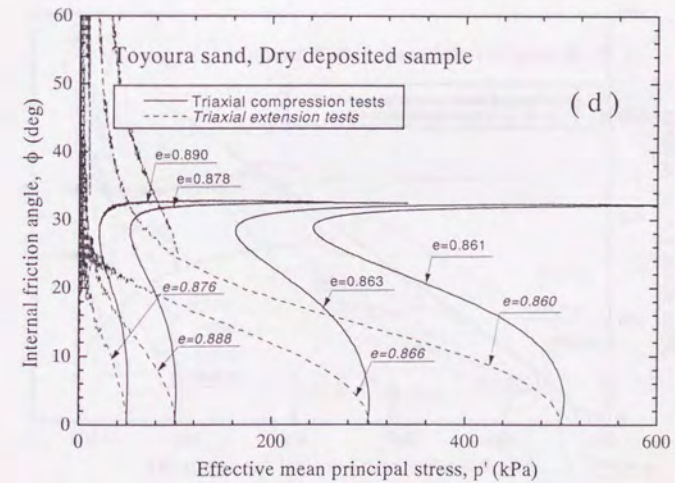
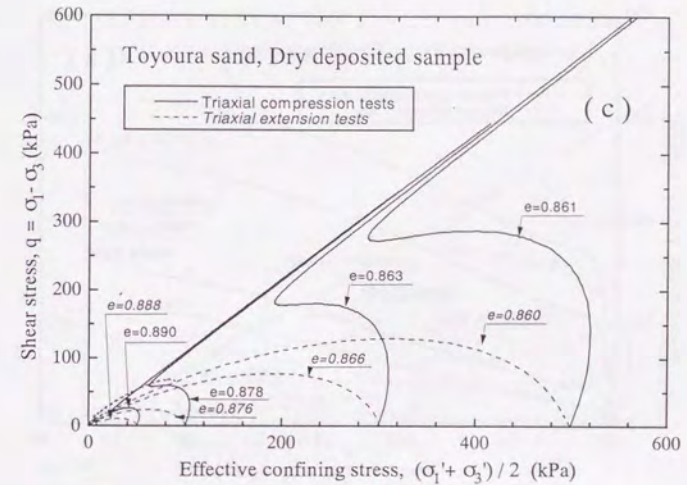
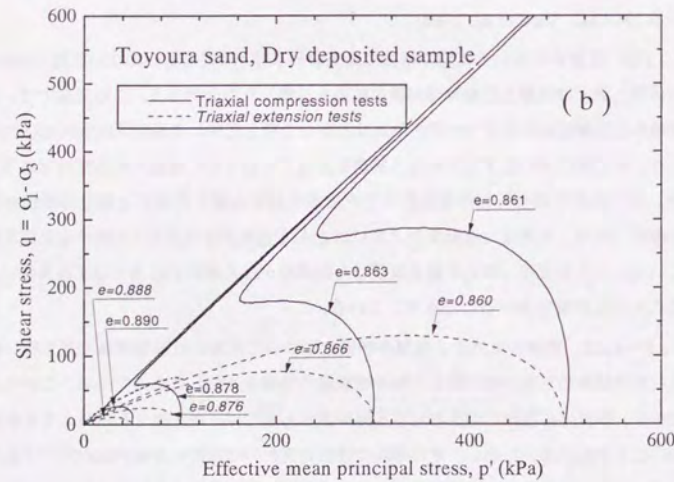
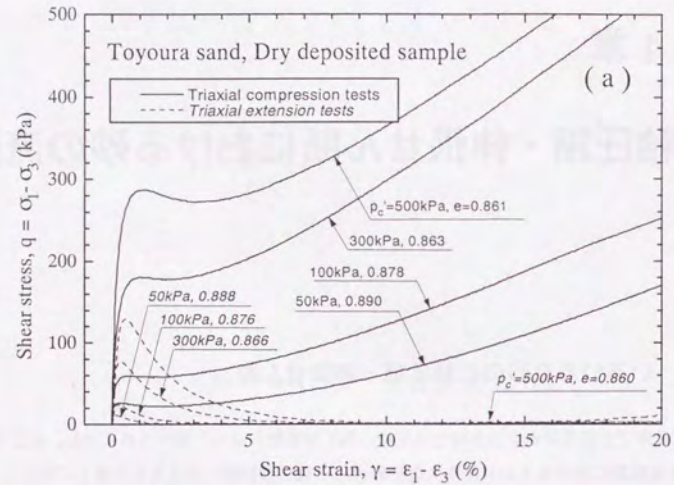


図 4.1 豊浦砂の非排水三軸圧縮・伸張せん断挙動

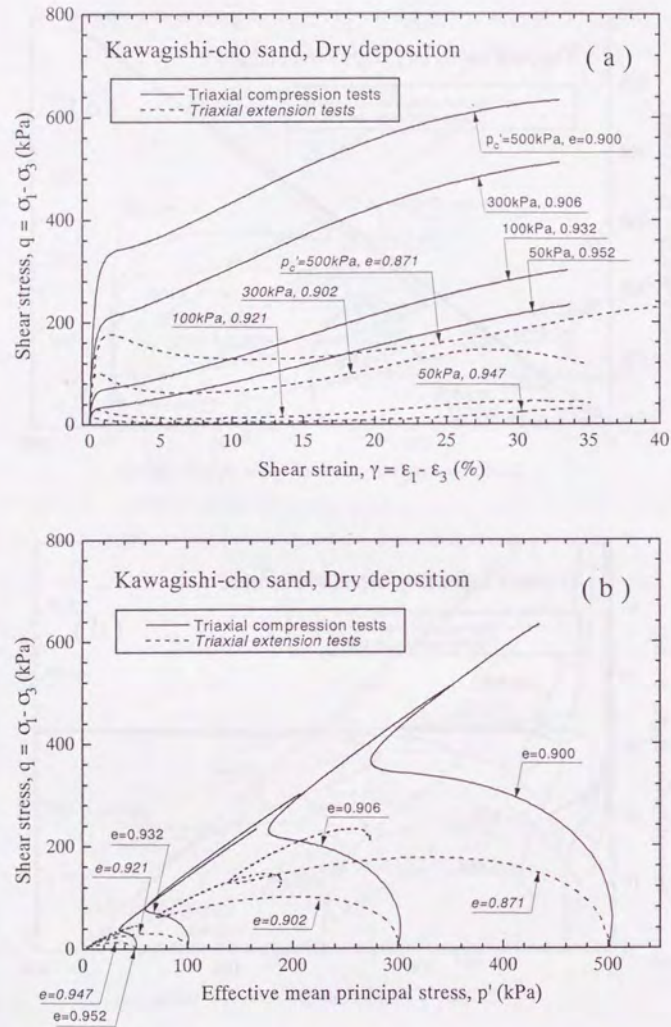
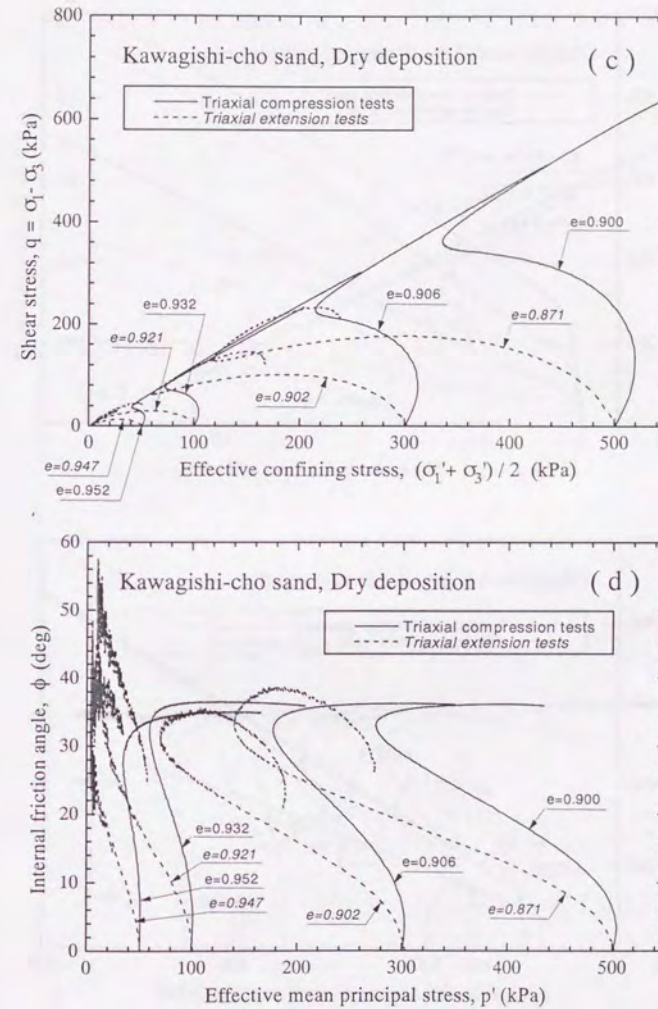


図 4.2 川岸町砂の非排水三軸圧縮・伸張せん断挙動



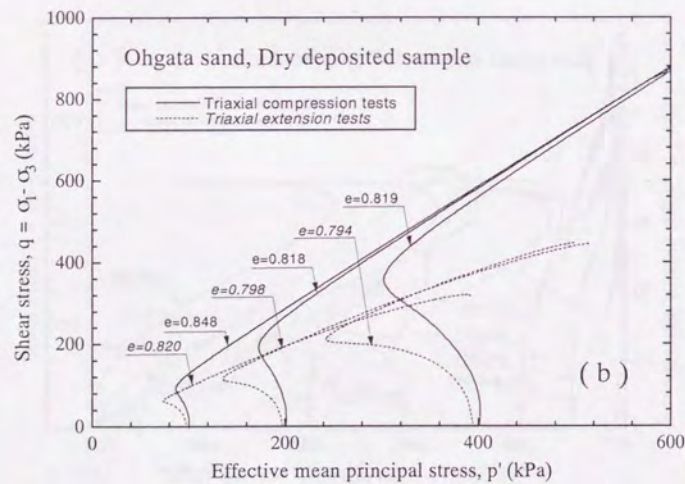
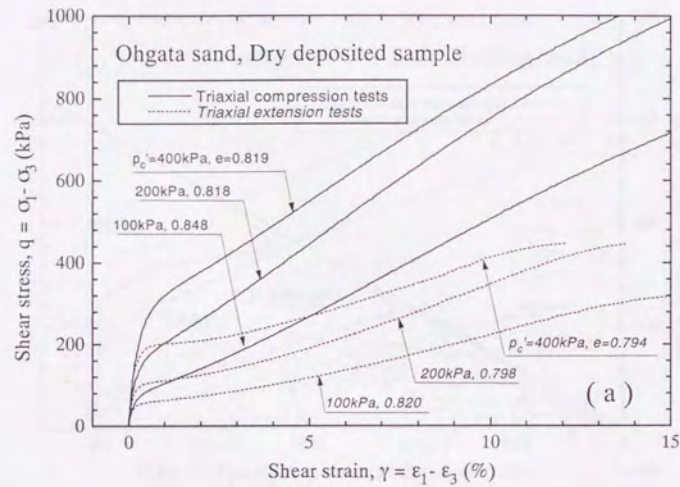
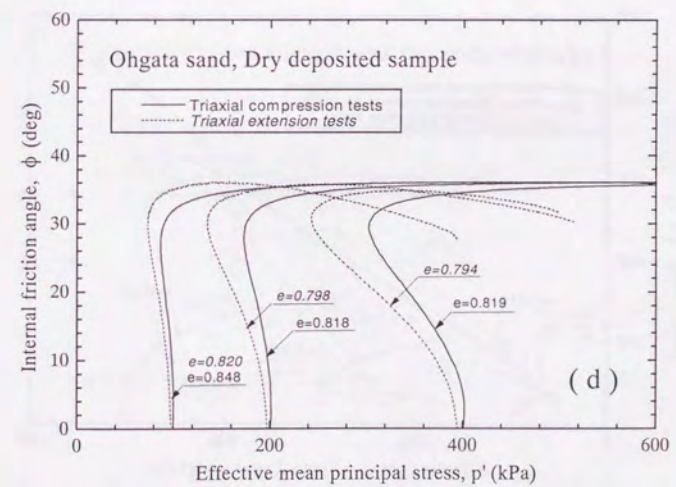
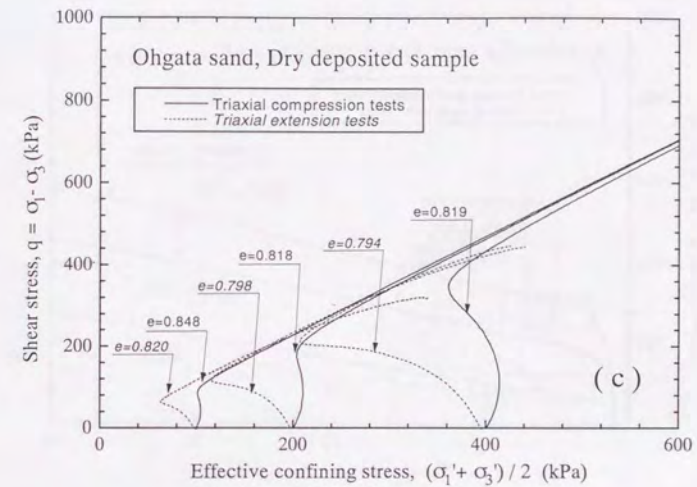


図 4.3 大形砂の非排水三軸圧縮・伸張せん断挙動



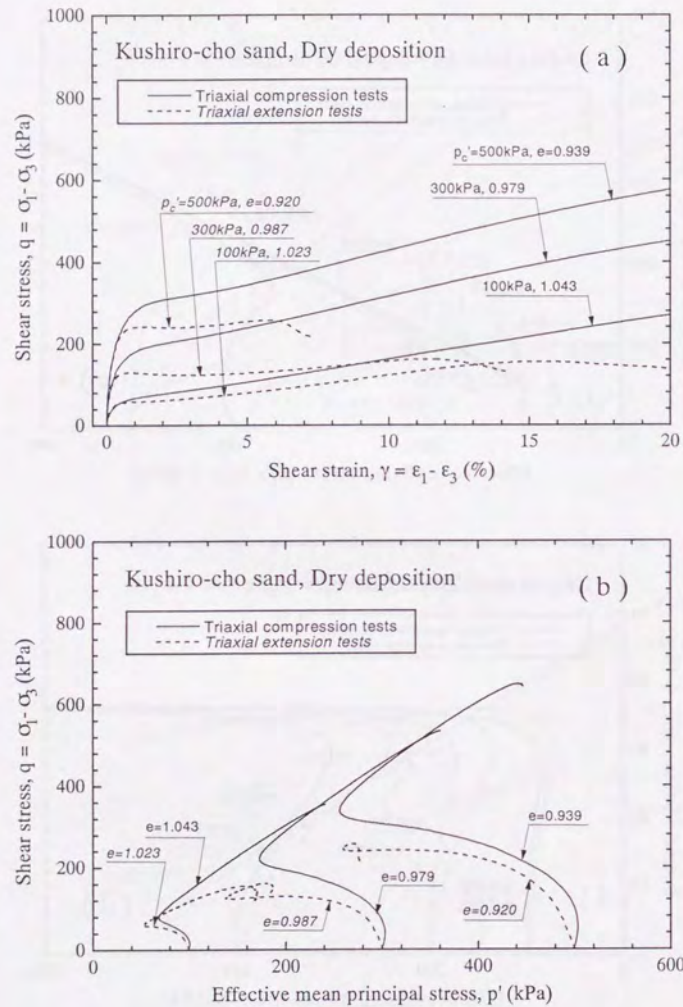
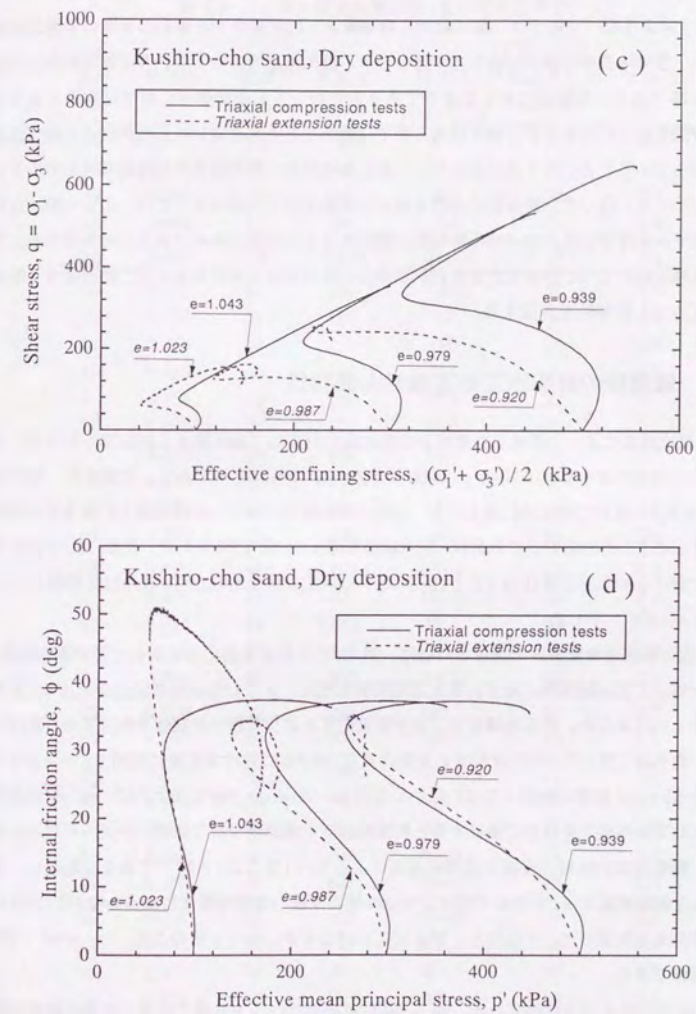


図 4.4 釧路町砂の非排水三軸圧縮・伸張せん断挙動



ることがわかる。

以上のような、砂質土の三軸圧縮せん断挙動と三軸伸張せん断挙動の相違の原因は両者の応力・ひずみ条件の違いであると考えられる。最大主応力方向すなわち圧縮方向が三軸圧縮せん断では土の堆積面に対して垂直であるのに対して三軸伸張せん断では水平であること、中間主応力の大きさが三軸圧縮せん断では最小であるのに対して三軸伸張せん断では最大となっていること、の2点において、三軸圧縮条件と三軸伸張条件は両極端の応力条件にあるといえる。従って、両条件におけるせん断挙動を詳しく調べることは、より一般的な応力・ひずみ条件での砂質土のせん断挙動を理解する上で非常に有益であると考えられる。次に乾燥堆積法によって作成した豊浦砂供試体の三軸圧縮せん断試験および三軸伸張せん断試験によるせん断挙動を分析する。

4.2 豊浦砂の非排水三軸圧縮せん断特性

乾燥堆積法によって作成した豊浦砂の供試体に対する三軸圧縮せん断試験を行った。せん断前の初期圧密有効拘束圧は $p'_c = 50 \sim 500 \text{ kPa}$ の等方応力である。試験条件一覧を表4.1に示す。一連の三軸圧縮試験のうち、初期圧密状態がほぼ同一の圧密線上にあるせん断試験をまとめて、その応力ひずみ曲線・応力経路を図4.5～図4.7に示した。また、 $e - \log p'$ 平面上における初期圧密線 (ICL) とそれに対応する準定常状態線 (QSSL) または変相線 (PTL) を図4.8にプロットした。

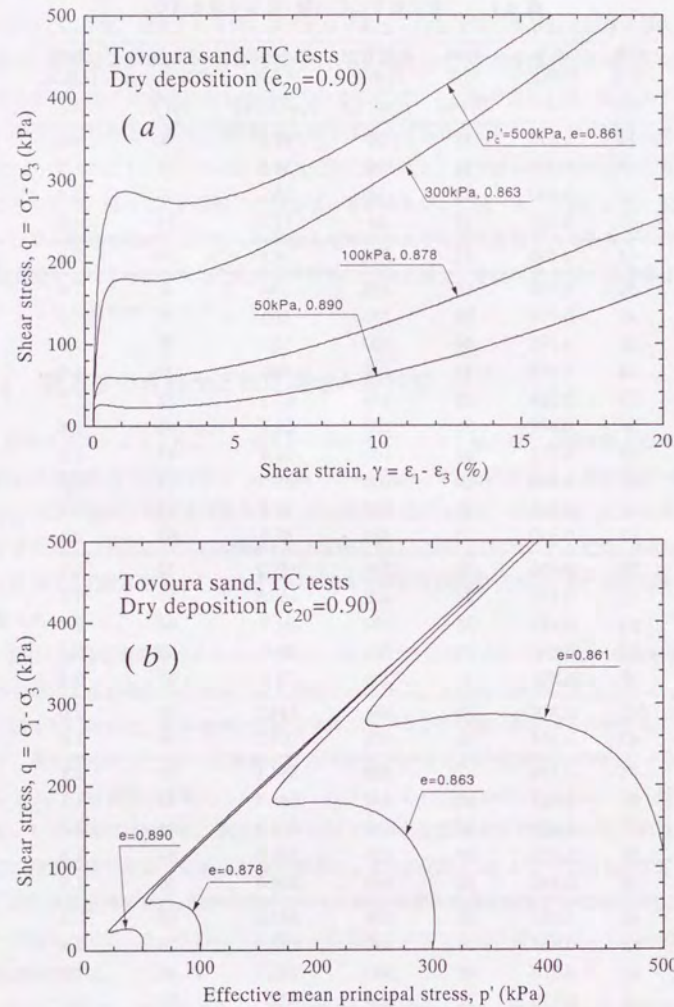
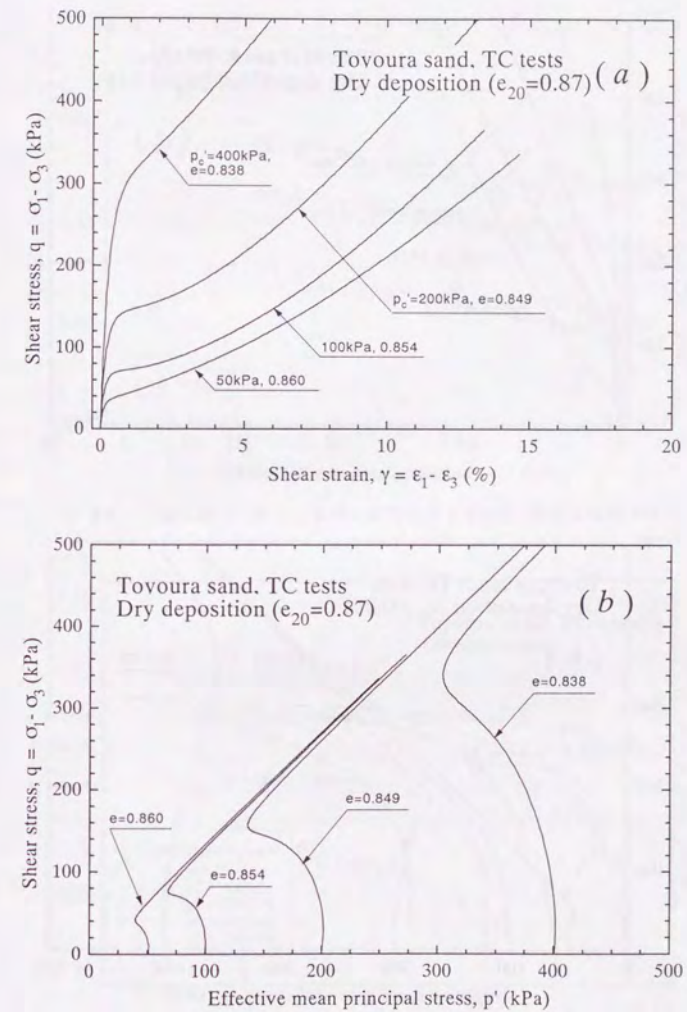
前述の湿潤堆積豊浦砂の場合と同様に、図4.9に各圧密有効応力に対して変相線を描き、これを用いて各初期条件に対する最大過剰間隙水圧比、すなわち流動ポテンシャル u_f を求めて図4.10に示した。乾燥堆積法では完全液化化するような緩い供試体を作成することはできず、最も緩く作ったもの (圧密前の有効拘束圧 20 kPa における間隙比が約 $e_{20} = 0.90$) でおよそ $u_f = 50$ 程度の挙動となる。しかしながら、Verdugo (1992) によれば、せん断の最終状態としての極限定常状態に着目すると乾燥堆積砂と湿潤堆積砂では違いが見られない。そこで、極限定常状態線の位置は湿潤堆積法によるもの (図2.12) と同一であると仮定し、また、完全流動を表す $u_f = 100$ のポテンシャル線の位置も湿潤堆積法によるもの (図2.23) と同一であると仮定した。すなわち、図4.10におけるポテンシャル線のうち、 $u_f = 60 \sim 100$ は推定線である。

図2.23と図4.10を比較すると、 $u_f = 50$ 付近のポテンシャル線の位置は乾燥堆積砂の場合には湿潤堆積砂の場合に比べて下方に位置しており、同じ密度の砂に対しては乾燥堆積法で作成した供試体の方が若干流動ポテンシャルが大きくなると言える。また、ポテンシャル

表 4.1 三軸圧縮せん断試験 (乾燥堆積豊浦砂)

試験 番号 No.	圧密後の 間隙比 e	相対 密度 $D_r(\%)$	初期有効 拘束圧 $p'_c(\text{kPa})$	最小有効 拘束圧 $p'_{PT}(\text{kPa})$	最大過剰 間隙水圧比 $u_f(\%)$	初期 状態比 r_c
73	0.813	43	50	47.4	5	1.1
59	0.860	31	50	39.6	23	1.3
u7	0.890	23	50	20.5	59	2.4
y1	0.905	19	50	12.5	75	4.0
r4	0.890	23	58.8	24.1	59	2.4
35	0.719	68	100	100	0	1.0
40	0.728	66	100	100	0	1.0
55	0.763	56	100	100	0	1.0
19	0.819	42	100	100	0	1.0
50	0.854	32	100	67.8	32	1.5
56	0.878	26	100	54.6	45	1.8
u5	0.878	26	100	52.8	47	1.9
15	0.879	26	100	49.5	51	2.0
r5	0.886	24	98.1	49.9	49	2.0
y2	0.890	23	100	35.2	65	2.8
75	0.806	45	200	181.2	10	1.1
57	0.849	34	200	135.8	32	1.5
y3	0.885	24	200	91.5	54	2.2
17	0.888	23	200	89.6	55	2.2
16	0.897	21	200	76.5	62	2.6
r3	0.870	28	294	144.2	51	2.0
u2	0.863	30	300	162.2	46	1.8
74	0.799	47	400	354.1	11	1.1
62	0.824	40	400	348.7	13	1.1
77	0.830	39	400	304.4	24	1.3
58	0.838	37	400	303.6	24	1.3
79	0.880	26	400	208.0	48	1.9
u9	0.861	31	500	242.5	52	2.1
r2	0.867	29	490	205.9	58	2.4
u1	0.870	28	500	268.0	46	1.9
y4	0.875	27	500	230	54	2.2
r1	0.858	31	569	275.6	52	2.1

(r1-5 は Verdugo, 1992 による)

図 4.5 豊浦砂の非排水三軸圧縮せん断 (乾燥堆積法、 $e_{20} = 0.90$)図 4.6 豊浦砂の非排水三軸圧縮せん断 (乾燥堆積法、 $e_{20} = 0.90$)

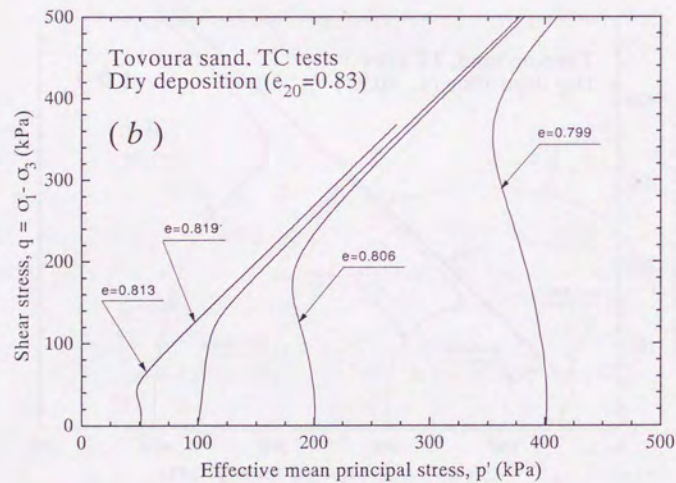
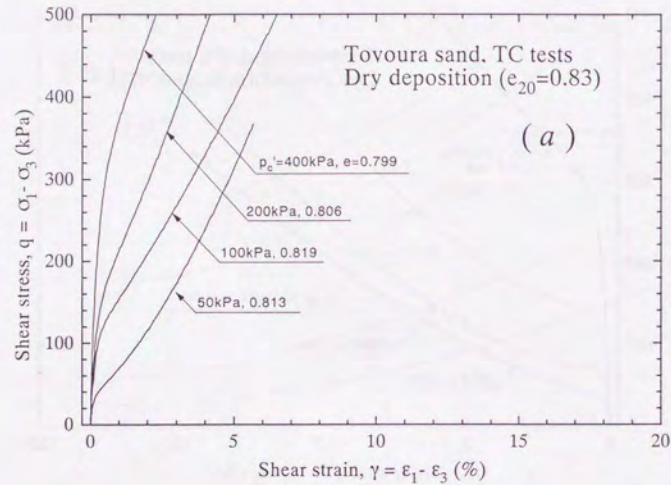
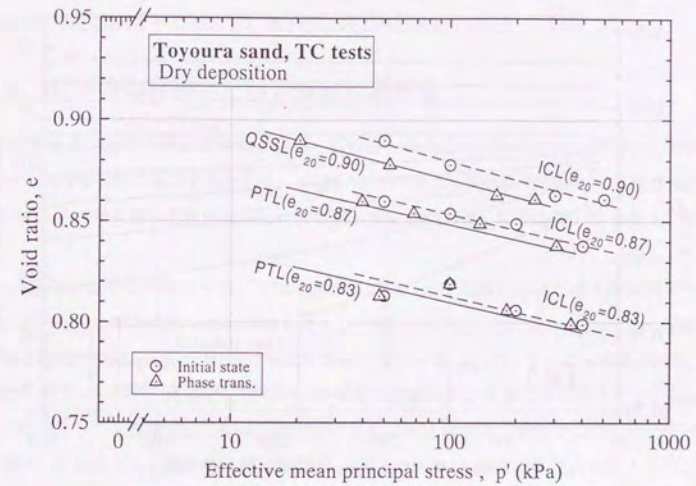
図 4.7 豊浦砂の非排水三軸圧縮せん断 (乾燥堆積法、 $e_{20} = 0.90$)

図 4.8 三軸圧縮せん断における準定常状態線と変相線 (乾燥堆積豊浦砂)

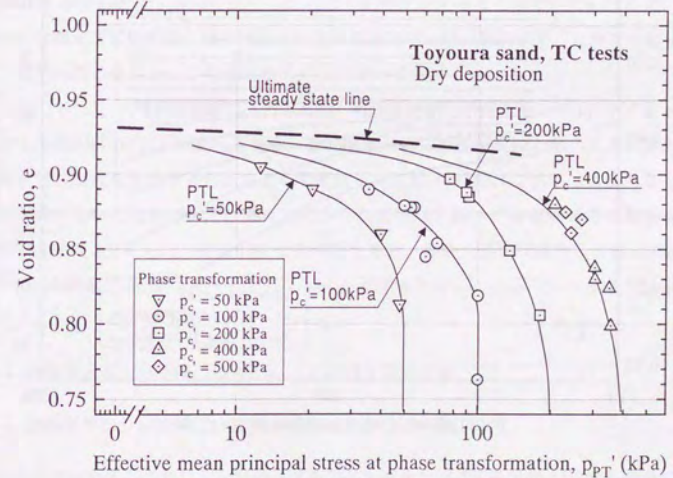


図 4.9 三軸圧縮せん断による変相線と極限状態線 (乾燥堆積豊浦砂)

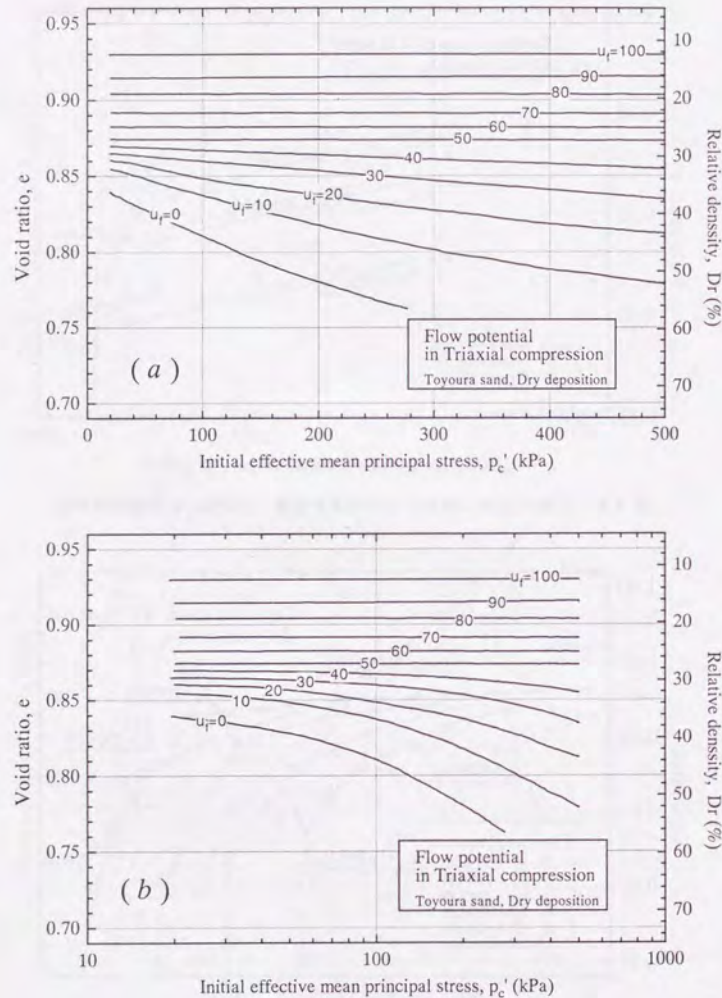


図 4.10 三軸圧縮せん断による流動ポテンシャル (乾燥堆積豊浦砂)

線の密度は乾燥堆積砂の場合には湿潤堆積砂の場合ほどは密ではなく、せん断挙動は極端に密度に対して敏感であるというわけではないことを示している。

4.3 豊浦砂の非排水三軸伸張せん断特性

三軸圧縮条件での砂の非排水単調せん断特性との比較を行い、より一般的な応力状態でのせん断特性を明らかにするために、一連の三軸伸張せん断試験を行った。すべての実験において、豊浦砂を用いて乾燥堆積法により供試体を作成した。試験条件一覧を表 4.2 に示す。

一連の三軸伸張試験のうち、初期圧密状態が同一の圧密線上にあるせん断試験をまとめて、その応力ひずみ曲線・応力経路を図 4.11～図 4.16 に示した。また、 $e - \log p'$ 平面上における初期圧密線 (ICL) とそれに対応する準定常状態線 (QSSL) または変相線 (PTL) を図 4.17 にプロットした。図 4.17 によれば、準定常状態線は各圧密線ごとに別々に $e - \log p'$ 平面上に存在し、湿潤堆積法で作成したサンプルの三軸圧縮試験の場合のように唯一には定まらないことがわかる。準定常状態は間隙比 $e = 0.75 \sim 0.86$ 程度の範囲内に広く分布している。変相状態または準定常状態の高圧側・緩詰め側の極限として極限定常状態が定義されることは前に述べた。三軸伸張試験においては高圧三軸試験装置が使用できず、また極限定常状態 (Ultimate steady state) に至るほどの大変形を加えることができないために、変相状態または準定常状態の高圧側の極限としての極限定常状態は観測することができない。そこで、緩詰め側の極限としての極限定常状態について検討する。

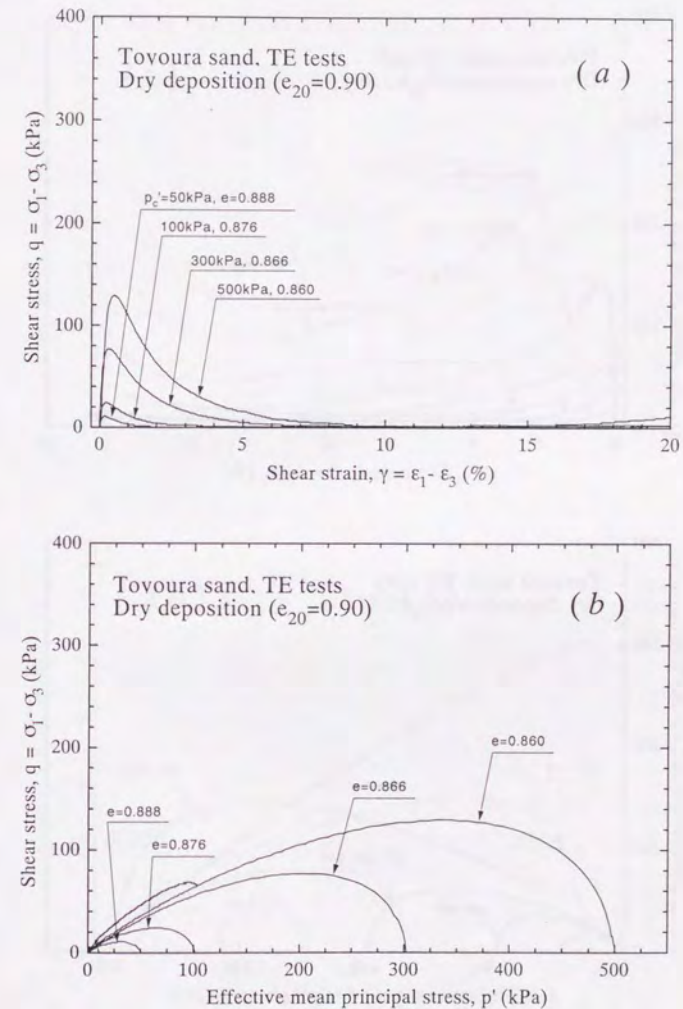
図 4.18 には、三軸伸張試験によって求められた各初期圧密拘束圧レベルに対する $e - \log p'$ 平面上の変相線 (PTL) が描いてある。この図を用いて各変相線の上側への漸近線としての極限定常状態線を見積もると、およそ間隙比 $e = 0.86$ 付近のほぼ水平な直線となる。三軸圧縮試験の場合と同様にして、図 4.18 に示した変相線を用いて各初期状態に対する最大過剰間隙水圧比 $u_f = u_{max}/p'_c \times 100$ を求めたうえで、等最大過剰間隙水圧比線 (流動ポテンシャル) を間隙比-初期拘束圧平面 ($e - \log p'_c$ 平面または $e - p'_c$ 平面) に描き、図 4.19 に示した。これを三軸圧縮条件のものとは比べると

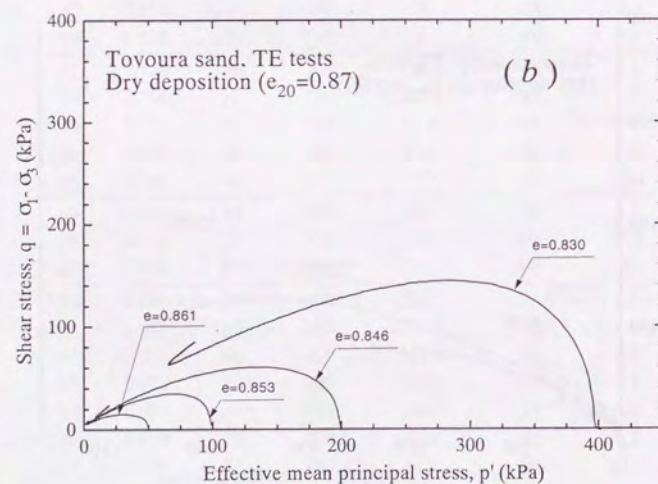
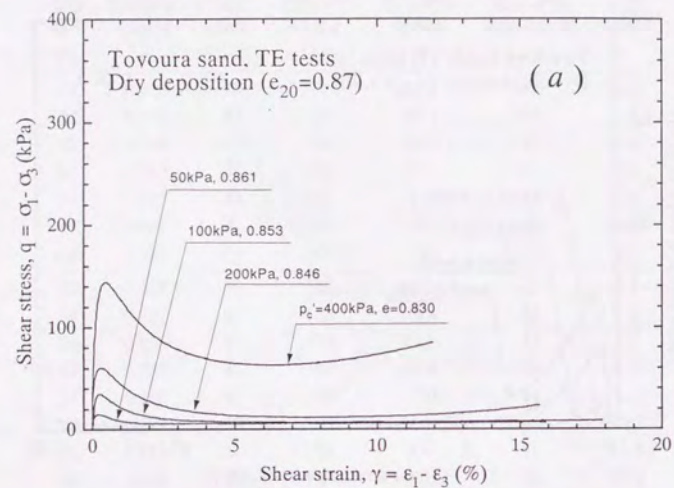
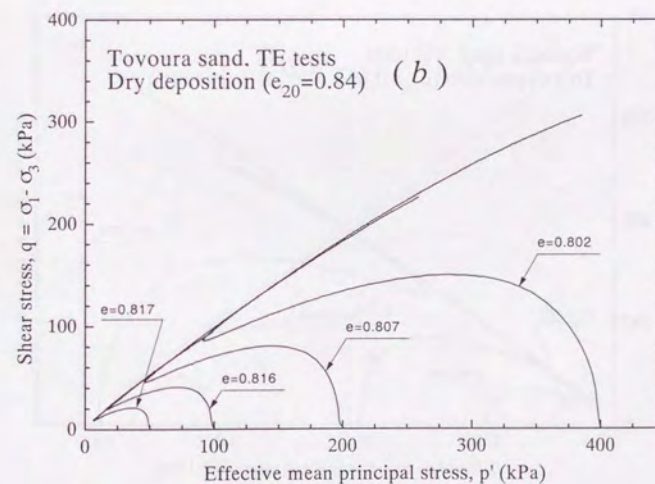
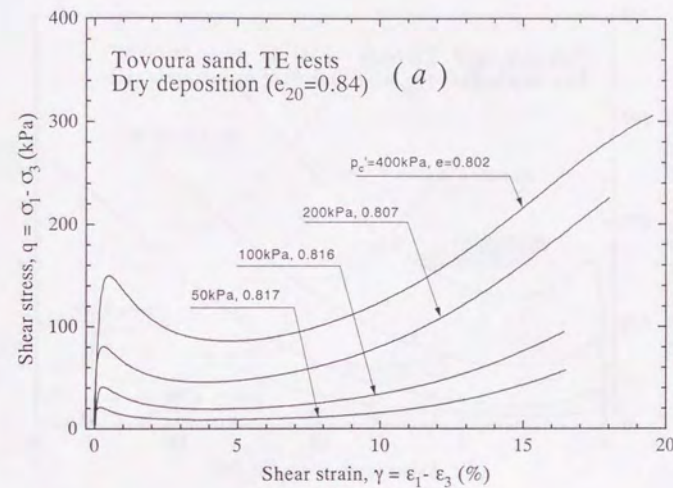
- 流動ポテンシャル線の傾きが小さくほぼ水平である。
- 流動ポテンシャルが広い密度の範囲に分布している。

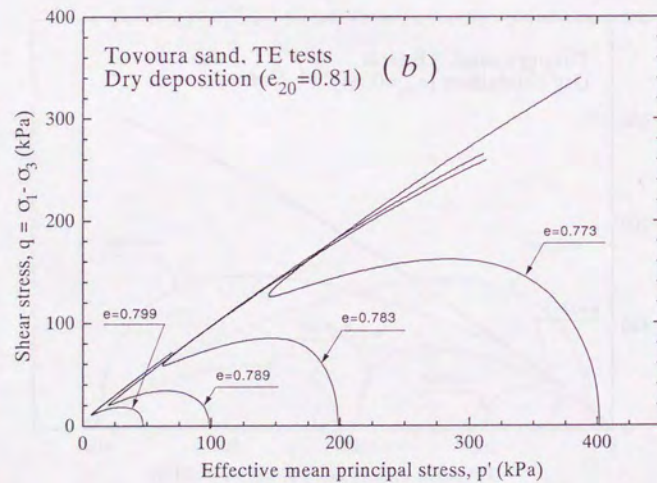
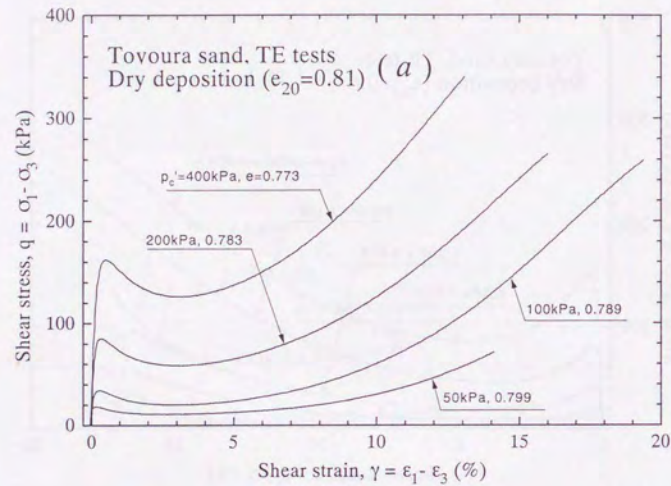
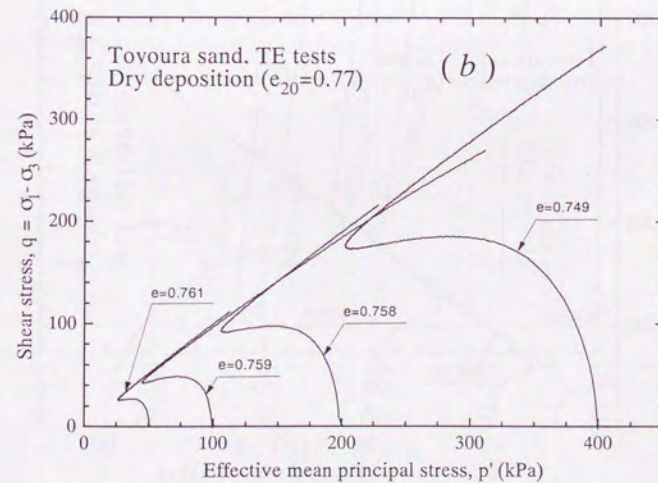
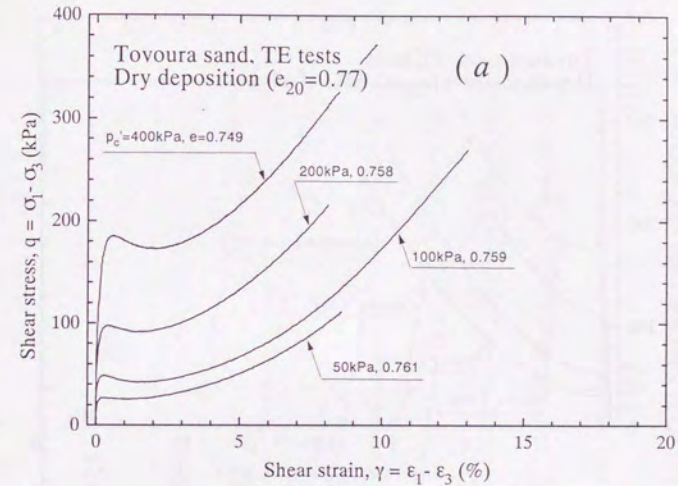
という特徴がある。これは、三軸伸張状態での非排水単調せん断特性が三軸圧縮時に比べて土の密度の影響や初期拘束圧の影響を受けにくいということを示している。初期拘束圧が小

表 4.2 三軸伸張せん断試験 (乾燥堆積豊浦砂)

試験 番号 No.	圧密後の 間隙比 e	相対 密度 $D_r(\%)$	初期有効 拘束圧 $p'_c(\text{kPa})$	最小有効 拘束圧 $p'_{PT}(\text{kPa})$	最大過剰 間隙水圧比 $u_f(\%)$	初期 状態比 r_c
72	0.699	73	50	43.7	13	1.1
39	0.736	63	50	33.2	34	1.5
52	0.761	57	50	26.0	48	1.9
27	0.799	47	50	6.3	87	7.9
36	0.817	42	50	6.3	87	7.9
47	0.861	31	50	0	100	∞
u98	0.888	23	50	0	100	∞
25	0.676	79	100	91.5	9	1.1
26	0.727	66	100	66.8	33	1.5
24	0.759	57	100	44.8	55	2.2
22	0.789	49	100	19.9	80	5.0
34	0.816	42	100	16.0	84	6.3
18	0.828	39	100	7.3	93	13.7
41	0.838	37	100	8.4	91	11.9
43	0.848	34	100	5.1	95	19.6
44	0.853	33	100	0	100	∞
45	0.871	28	100	0	100	∞
u96	0.876	27	100	0	100	∞
37	0.726	66	200	138.2	31	1.4
53	0.758	58	200	105.8	47	1.9
30	0.783	51	200	61.9	69	3.2
32	0.807	45	200	45.8	78	4.4
48	0.846	34	200	8.7	96	23.0
u5	0.814	43	300	44.2	85	6.8
u4	0.856	32	300	8.0	97	37.5
u94	0.866	37	300	0	100	∞
66	0.688	76	400	338.1	15	1.2
38	0.721	67	400	219.6	45	1.8
54	0.749	60	400	202.0	50	2.0
29	0.773	54	400	144.5	64	2.8
33	0.802	46	400	91.6	77	4.4
49	0.830	39	400	65.4	84	6.1
51	0.853	33	400	14.6	96	27.4
70	0.859	31	400	0	100	∞
u2	0.802	46	500	99.1	80	5.0
u1	0.831	38	500	27.5	95	18.2
u93	0.860	31	500	7.9	98	63.3

図 4.11 豊浦砂の非排水三軸伸張せん断 (乾燥堆積法、 $e_{20} = 0.90$)

図 4.12 豊浦砂の非排水三軸伸張せん断 (乾燥堆積法、 $e_{20} = 0.87$)図 4.13 豊浦砂の非排水三軸伸張せん断 (乾燥堆積法、 $e_{20} = 0.84$)

図 4.14 豊浦砂の非排水三軸伸張せん断 (乾燥堆積法, $e_{20} = 0.81$)図 4.15 豊浦砂の非排水三軸伸張せん断 (乾燥堆積法, $e_{20} = 0.77$)

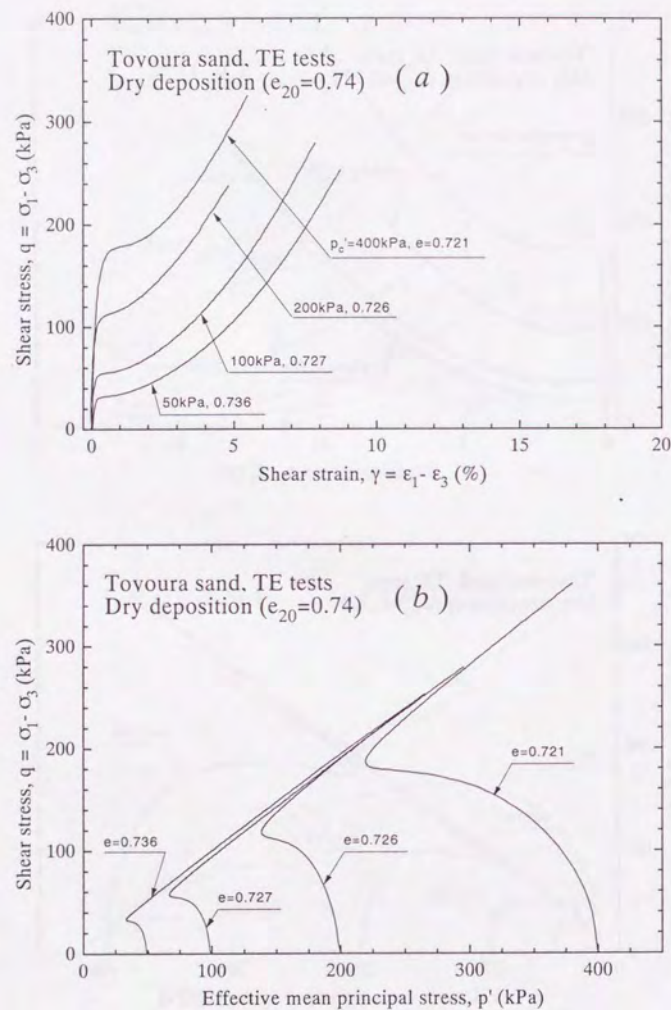
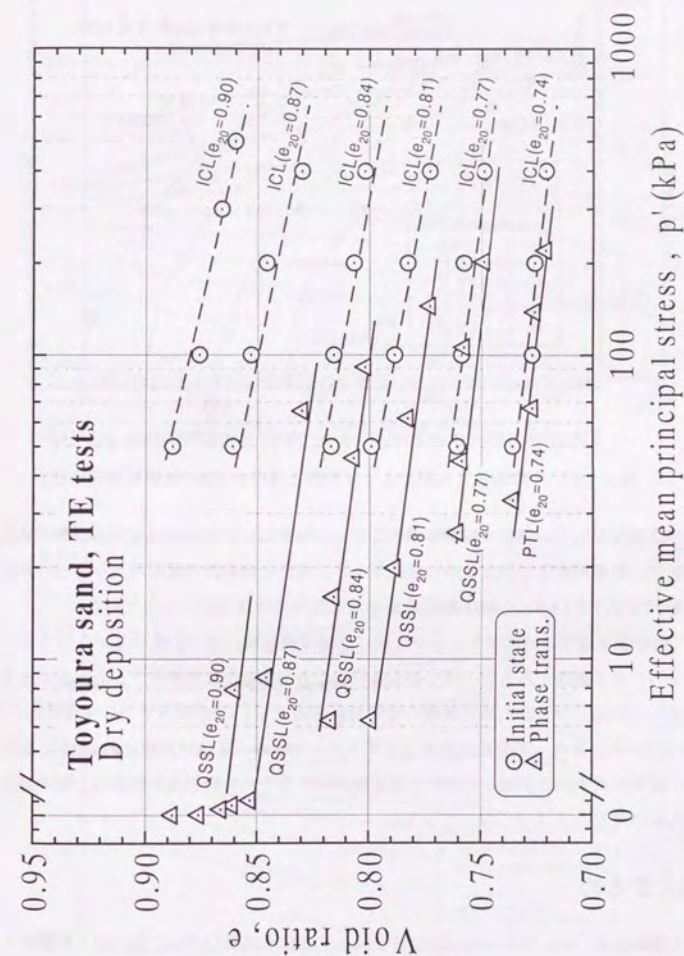
図 4.16 豊浦砂の非排水三軸伸張せん断 (乾燥堆積法, $e_{20} = 0.74$)

図 4.17 三軸伸張せん断における準定常状態線と変相線 (乾燥堆積豊浦砂)

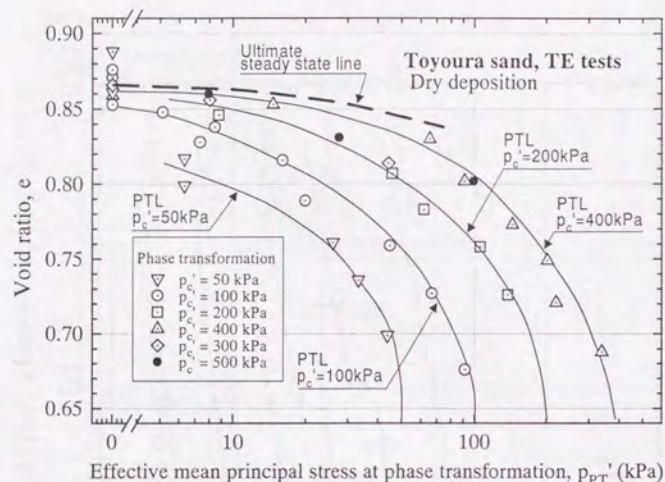


図 4.18 三軸伸張せん断による変相線と極限状態線 (乾燥堆積豊浦砂)

さくかつ密度が小さい領域では、等ポテンシャル線がむしろ左下がりとなる傾向がある。この事実は、初期拘束圧が小さくかつ密度が小さい場合には初期拘束圧がより小さい方がより軟化傾向を示すという、三軸圧縮時の挙動とは反対の性質を表すものである。

三軸伸張状態での流動ポテンシャル線は三軸圧縮試験のものと比べてかなり下方に位置しており、同じ密度であるならば三軸伸張試験の方がはるかに流動ポテンシャルが大きいことを示している。非流動と限定流動の境界条件を表す $u_f = 50$ のラインは間隙比約 0.75 に位置している。また、完全流動条件を表す $u_f = 100$ のラインは間隙比約 0.86 に位置しており、両者に挟まれる領域、すなわち限定流動条件を与える初期条件範囲は三軸圧縮条件の場合に比べてかなり大きくなっている。

4.4 まとめ

豊浦砂をはじめとするいろいろな砂を用いて非排水単調ひずみ三軸圧縮・伸張せん断試験を行った。その結果、三軸圧縮試験と三軸伸張試験の間では非排水せん断強度特性に大きな差が見られた。三軸圧縮せん断に比べ、三軸伸張せん断時にははるかに大きな間隙水圧が発生し、大きな強度低下が見られた。また、三軸圧縮試験と三軸伸張試験の間では非排水せ

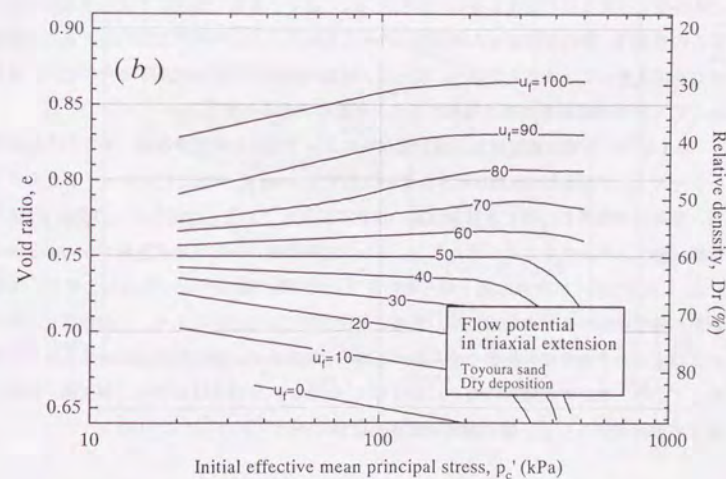
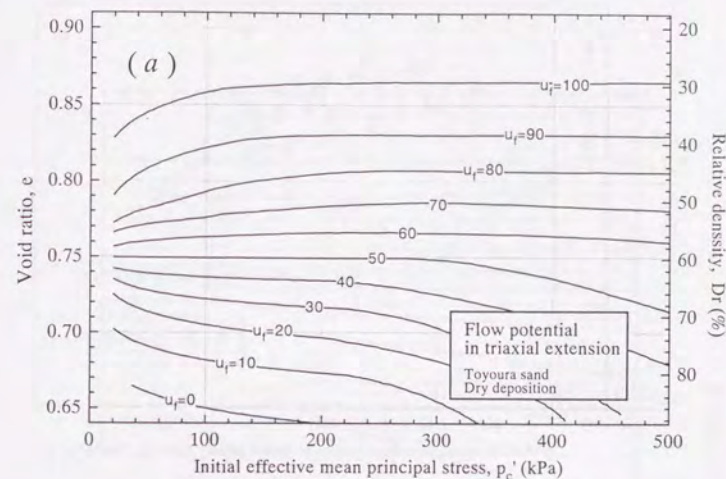


図 4.19 三軸伸張せん断による流動ポテンシャル (乾燥堆積豊浦砂)

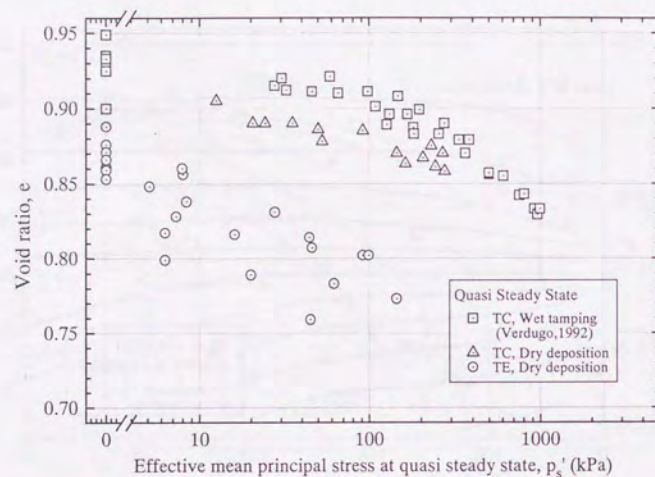


図 4.20 三軸圧縮および伸張せん断における準定常状態

ん断特性に与える砂の密度の違いや初期拘束圧の違いの影響の傾向にも違いが見られた。これらの事実は、砂の非排水せん断挙動に与える主応力の方向や中間主応力の大きさの影響がきわめて大きいことを示している。従って、地盤の流動化特性を把握するためには、せん断時の応力条件の影響を的確に処理することが重要であると言える。

図 4.20は、三軸圧縮試験と三軸伸張試験によって現れた準定常状態、すなわち流動ポテンシャル u_f がおよそ 50 より大きな変相状態を $e - \log p'_c$ 平面上にプロットしたものである。湿潤堆積豊浦砂の準定常状態は細い帯状に分布しており、ほぼひとつの曲線(準定常状態線, QSSL)が存在するように見える。これは変相状態が極限定常状態線(Ultimate steady state line, USSL)に非常に近くなるとせん断挙動が圧縮的とならないために、準定常状態が極限状態線直下の非常に狭い領域に限定されているためである。三軸伸張せん断の場合にはより大きな密度の範囲でせん断が圧縮的となるために準定常状態の分布範囲も大きくなっており、準定常状態線は唯一にはならない。 $e - p'$ 平面上における三軸圧縮・伸張せん断での流動ポテンシャル線の関係を図 4.21に示した。

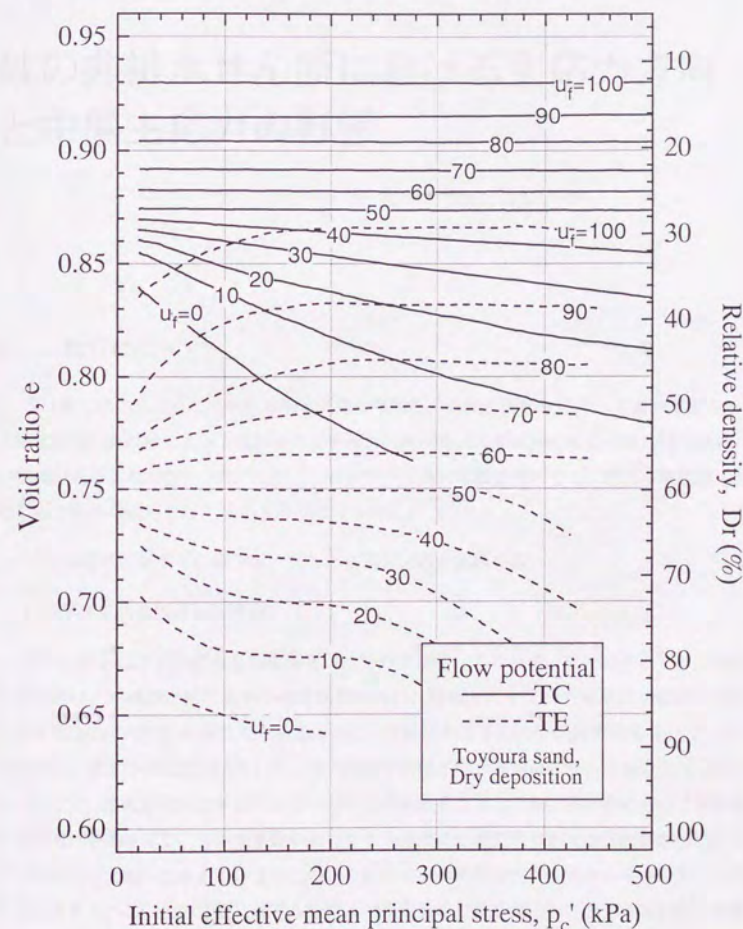


図 4.21 三軸圧縮・伸張せん断での流動ポテンシャルの比較



第5章

砂の非排水せん断における主応力方向と中間主応力の影響

5.1 はじめに

第4章に述べたように、砂の非排水大変形挙動を三軸せん断試験によって調べたところ、三軸圧縮せん断試験によって観測される挙動と三軸伸張せん断試験による挙動の間には著しい相違があることがわかった。このせん断特性の相違の原因を考えると、両せん断試験における応力条件の違いとして次の2点が挙げられる。

- 土の構造に対する圧縮方向、すなわち最大主応力方向の違い
- 中間主応力の大きさの違い

第一の要因は土の初期異方性に関連したものである。すなわち、重力のもとで形成された供試体は、再構成試料であれ不攪乱試料であれ、堆積方向すなわち堆積面に鉛直な方向には圧縮されにくく、堆積面に平行な方向には圧縮されやすい力学的異方性を有している。しかるに、通常の方法で形成された三軸供試体では軸方向が堆積面に対して鉛直となっている。従って、土の堆積面に対して鉛直方向に圧縮変形を与える三軸圧縮試験において供試体が膨張的な挙動を示し、土の堆積面に対して水平方向に圧縮変形を加える三軸伸張試験において供試体が圧縮的な挙動を示すことは、上記の土の初期異方性の性質から考えて全く当然のことである。この土の構造に対する圧縮方向を定量的に表す量として、土の堆積面の鉛直方向と最大主応力方向のなす角度 α を用いる。三軸圧縮試験では $\alpha = 0^\circ$ であり、三軸伸張試験では $\alpha = 90^\circ$ である。実際の地盤や土構造物の中の土の変形における α は 0° と 90° の間にあると考えられる。

一方、第二の要因として挙げた中間主応力の大きさに注目すると、言うまでもなく三軸圧縮試験では中間主応力は最小値をとり、最小主応力と等しくなっている ($\sigma_2 = \sigma_3$)。また、三軸伸張試験では中間主応力は最大値をとり、最大主応力と等しくなっている ($\sigma_2 = \sigma_1$)。この中間主応力の大きさを表す量として、中間主応力係数 $b = (\sigma_2 - \sigma_3) / (\sigma_1 - \sigma_3)$ を用いる。三軸圧縮試験では $b = 0$ であり、三軸伸張試験では $b = 1$ である。実際の地盤や土構造物の中の土の変形における b は 0 と 1 の間にあると考えられる。

上記のように、最大主応力の方向・中間主応力の大きさという2つの応力条件に関して、三軸圧縮条件と三軸伸張条件は正反対・両極端のせん断条件であることがわかる。そして、三軸圧縮試験結果と三軸伸張試験結果の著しい相違は、これら2つの応力条件が土の非排水せん断特性に対して非常に大きな影響を持っていることを示唆している。

5.2 中空ねじりせん断試験の概要と試験条件

本研究では、土の非排水単調せん断試験を用いて地盤の流動ポテンシャルを評価することが試みられている。ところが、三軸圧縮試験と三軸伸張試験における砂のせん断特性の著しい相違は、せん断時の応力条件がせん断挙動に大きく影響することを示唆している。そこで、ここでは中空ねじりせん断試験器を用いて主応力の方向と中間主応力の大きさの組み合わせを様々な設定してせん断試験を行うことにより、これらの応力条件が砂の非排水単調せん断挙動に及ぼす影響を詳しく検討する。

すべての試験において初期せん断応力条件は、有効拘束圧 $p'_c = 100 \text{ kPa}$ 、背圧 $u = 100 \text{ kPa}$ の等方応力状態とした。せん断中の応力条件は、中間主応力を水平に保ち ($\sigma_r = \sigma_2$)、非排水条件 ($\epsilon_v = 0$)、外セル圧 (全応力) 一定 ($p_o = 200 \text{ kPa} = \text{const.}$)、主応力方向一定 ($\alpha = \text{const.}$)、中間主応力係数一定 ($b = \text{const.}$) とした。最大主応力 σ_1 が鉛直方向となす角度 α を $0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ, 90^\circ$ の7種類に設定し、また中間主応力係数 b を $0.0, 0.25, 0.5, 0.75, 1.0$ の5種類に設定し、これらの α と b の組み合わせ条件下でせん断試験を行った。ただし、 α が大きいかつ b が小さいとき、あるいは α が小さいかつ b が大きいときには外セルと内セルの圧力差が大きくなり供試体内の応力分布の不均一が増大するため、 α と b の組み合わせを表5.6の範囲に限定した。

試料はすべての試験で豊浦標準砂を用いた。供試体作成方法は乾燥堆積法とし、モールドの打撃 (tapping) による締固めを行って相対密度がおよそ 25%, 33%, 40% の3種類の供試体を対象として試験を行った。また、三軸圧縮・伸張モードでの試験すなわち、 $\alpha = 0^\circ, b = 1.0$ および $\alpha = 90^\circ, b = 0.0$ の試験条件ではさらに広範な密度でのせん断試験を行った。

表 5.1 中空ねじりせん断試験一覧 ($b=0.0$)

試験 番号 No.	応力条件	圧密後の 間隙比 e	相対 密度 $D_r(\%)$	初期 拘束圧 $p'_c(\text{kPa})$	最小 拘束圧 $p'_{PT}(\text{kPa})$	最大過剰 間隙水圧比 $u_T(\%)$	初期 状態比 r_c
47	$\alpha = 0^\circ, b = 0.00$	0.825	40	100.0	99.2	1	1.0
22	$\alpha = 0^\circ, b = 0.00$	0.852	33	100.0	89.0	11	1.1
60	$\alpha = 0^\circ, b = 0.00$	0.879	26	100.0	65.8	34	1.5
61	$\alpha = 0^\circ, b = 0.00$	0.882	25	100.0	56.3	44	1.8
63	$\alpha = 0^\circ, b = 0.00$	0.887	24	100.0	50.6	49	2.0
62	$\alpha = 0^\circ, b = 0.00$	0.889	23	100.0	49.0	51	2.0
78	$\alpha = 0^\circ, b = 0.00$	0.916	16	100.0	28.1	72	3.6
46	$\alpha = 15^\circ, b = 0.00$	0.823	41	100.0	97.7	2	1.0
20	$\alpha = 15^\circ, b = 0.00$	0.864	30	100.0	78.2	22	1.3
66	$\alpha = 15^\circ, b = 0.00$	0.883	25	100.0	40.7	59	2.5
45	$\alpha = 30^\circ, b = 0.00$	0.820	41	100.0	83.4	17	1.2
19	$\alpha = 30^\circ, b = 0.00$	0.864	30	100.0	53.5	46	1.9
67	$\alpha = 30^\circ, b = 0.00$	0.884	24	100.0	16.6	83	6.0
38	$\alpha = 45^\circ, b = 0.00$	0.829	39	100.0	62.5	37	1.6
16	$\alpha = 45^\circ, b = 0.00$	0.853	33	100.0	32.1	68	3.1
73	$\alpha = 45^\circ, b = 0.00$	0.886	24	100.0	0.0	100	—
72	$\alpha = 45^\circ, b = 0.00$	0.889	23	100.0	0.0	100	—

5.3 中空供試体と中実供試体のせん断挙動の比較

砂の非排水大変形特性を調べるために中空円筒型供試体と中実円柱型供試体の両方を用いたときに、供試体の形・寸法・境界条件などの違いのために、その挙動に違いが現れるかどうかを検証する。そのために、中空供試体による三軸圧縮試験 ($\alpha = 0^\circ, b = 0$) と三軸伸張試験 ($\alpha = 90^\circ, b = 1$) を行い、これを通常の中実供試体による三軸圧縮試験および三軸伸張試験と比較した。

図 5.1 は初期圧密応力 $p'_c = 100 \text{ kPa}$ でのせん断試験で観測される変相状態 (準定常状態) を $e - p'_{PT}$ 平面上に表示したものである。三軸圧縮状態、三軸伸張状態のそれぞれについて、中空円筒型供試体と中実円柱型供試体の両方の変相状態 (準定常状態) はほぼ同一の変相状態線上に存在すると言える。

表 5.2 中空ねじりせん断試験一覧 ($b=0.25$)

試験 番号 No.	応力条件	圧密後の 間隙比 e	相対 密度 $D_r(\%)$	初期 拘束圧 $p'_c(kPa)$	最小 拘束圧 $p'_{PT}(kPa)$	最大過剰 間隙水圧比 $u_r(\%)$	初期 状態比 r_c
9	$\alpha = 0^\circ, b = 0.25$	0.813	43	100.0	95.4	5	1.0
56	$\alpha = 0^\circ, b = 0.25$	0.821	41	100.0	91.8	8	1.1
23	$\alpha = 0^\circ, b = 0.25$	0.862	30	100.0	79.7	20	1.3
68	$\alpha = 0^\circ, b = 0.25$	0.884	24	100.0	44.8	55	2.2
48	$\alpha = 15^\circ, b = 0.25$	0.817	42	100.0	89.8	10	1.1
21	$\alpha = 15^\circ, b = 0.25$	0.842	36	100.0	70.7	29	1.4
69	$\alpha = 15^\circ, b = 0.25$	0.882	25	100.0	33.6	66	3.0
44	$\alpha = 30^\circ, b = 0.25$	0.818	42	100.0	71.8	28	1.4
28	$\alpha = 30^\circ, b = 0.25$	0.841	36	100.0	55.5	44	1.8
71	$\alpha = 30^\circ, b = 0.25$	0.879	26	100.0	0.0	100	—
55	$\alpha = 45^\circ, b = 0.25$	0.813	43	100.0	58.8	41	1.7
58	$\alpha = 45^\circ, b = 0.25$	0.818	42	100.0	53.0	47	1.9
37	$\alpha = 45^\circ, b = 0.25$	0.826	40	100.0	47.5	52	2.1
15	$\alpha = 45^\circ, b = 0.25$	0.859	31	100.0	22.9	77	4.4
51	$\alpha = 60^\circ, b = 0.25$	0.818	42	100.0	47.3	53	2.1
24	$\alpha = 60^\circ, b = 0.25$	0.860	31	100.0	5.4	95	18.5

表 5.3 中空ねじりせん断試験一覧 ($b=0.5$)

試験 番号 No.	応力条件	圧密後の 間隙比 e	相対 密度 $D_r(\%)$	初期 拘束圧 $p'_c(kPa)$	最小 拘束圧 $p'_{PT}(kPa)$	最大過剰 間隙水圧比 $u_r(\%)$	初期 状態比 r_c
34	$\alpha = 15^\circ, b = 0.50$	0.825	40	100.0	79.3	21	1.3
59	$\alpha = 15^\circ, b = 0.50$	0.847	34	100.0	47.6	52	2.1
70	$\alpha = 15^\circ, b = 0.50$	0.882	25	100.0	19.2	81	5.2
33	$\alpha = 30^\circ, b = 0.50$	0.824	40	100.0	58.4	42	1.7
12	$\alpha = 30^\circ, b = 0.50$	0.851	33	100.0	33.0	67	3.0
30	$\alpha = 45^\circ, b = 0.50$	0.821	41	100.0	50.2	50	2.0
10	$\alpha = 45^\circ, b = 0.50$	0.855	32	100.0	12.8	87	7.8
01	$\alpha = 45^\circ, b = 0.50$	0.877	26	100.0	0.0	100	—
02	$\alpha = 45^\circ, b = 0.50$	0.878	26	100.0	0.0	100	—
31	$\alpha = 60^\circ, b = 0.50$	0.828	39	100.0	24.3	76	4.1
11	$\alpha = 60^\circ, b = 0.50$	0.848	34	100.0	0.8	99	—
32	$\alpha = 75^\circ, b = 0.50$	0.823	41	100.0	12.8	87	7.8

表 5.4 中空ねじりせん断試験一覧 ($b=0.75$)

試験 番号 No.	応力条件	圧密後の 間隙比 e	相対 密度 $D_r(\%)$	初期 拘束圧 $p'_c(kPa)$	最小 拘束圧 $p'_{PT}(kPa)$	最大過剰 間隙水圧比 $u_r(\%)$	初期 状態比 r_c
52	$\alpha = 30^\circ, b = 0.75$	0.818	42	100.0	56.8	43	1.8
29	$\alpha = 30^\circ, b = 0.75$	0.852	33	100.0	31.9	68	3.1
35	$\alpha = 45^\circ, b = 0.75$	0.830	39	100.0	35.2	65	2.8
14	$\alpha = 45^\circ, b = 0.75$	0.849	34	100.0	5.7	94	17.5
39	$\alpha = 60^\circ, b = 0.75$	0.819	42	100.0	19.2	81	5.2
41	$\alpha = 75^\circ, b = 0.75$	0.829	39	100.0	10.0	90	10.0
54	$\alpha = 90^\circ, b = 0.75$	0.817	42	100.0	15.8	84	6.3

表 5.5 中空ねじりせん断試験一覧 ($b=1.0$)

試験 番号 No.	応力条件	圧密後の 間隙比 e	相対 密度 $D_r(\%)$	初期 拘束圧 $p'_c(\text{kPa})$	最小 拘束圧 $p'_{PT}(\text{kPa})$	最大過剰 間隙水圧比 $u_r(\%)$	初期 状態比 r_c
36	$\alpha = 45^\circ, b = 1.00$	0.821	41	100.0	26.5	73	3.8
17	$\alpha = 45^\circ, b = 1.00$	0.861	31	100.0	2.3	98	43.5
40	$\alpha = 60^\circ, b = 1.00$	0.826	40	100.0	17.6	82	5.7
42	$\alpha = 75^\circ, b = 1.00$	0.825	40	100.0	13.1	87	7.6
25	$\alpha = 75^\circ, b = 1.00$	0.860	31	100.0	19.9	80	5.0
53	$\alpha = 90^\circ, b = 1.00$	0.802	46	100.0	22.9	77	4.4
27	$\alpha = 90^\circ, b = 1.00$	0.819	42	100.0	6.0	94	16.7
43	$\alpha = 90^\circ, b = 1.00$	0.826	40	100.0	6.9	93	14.5
26	$\alpha = 90^\circ, b = 1.00$	0.839	36	100.0	0.0	100	—

表 5.6 中空ねじりせん断試験条件

	$\alpha = 0^\circ$	$\alpha = 15^\circ$	$\alpha = 30^\circ$	$\alpha = 45^\circ$	$\alpha = 60^\circ$	$\alpha = 75^\circ$	$\alpha = 90^\circ$
$b = 0.00$	○	○	○	○			
$b = 0.25$	○	○	○	○	○		
$b = 0.50$		○	○	○	○	○	
$b = 0.75$			○	○	○	○	○
$b = 1.00$				○	○	○	○

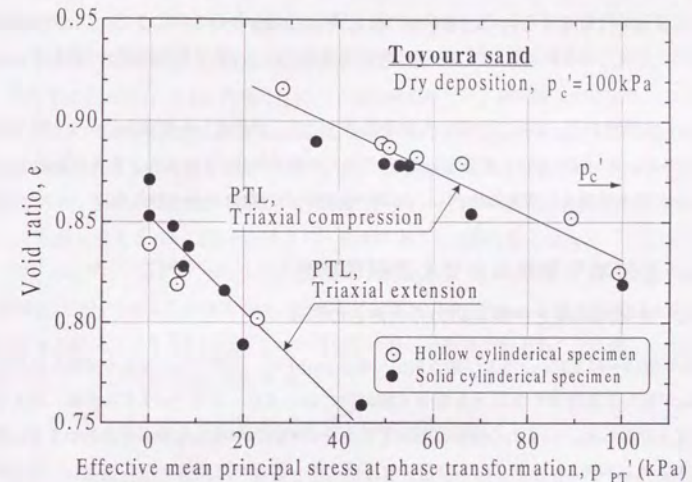
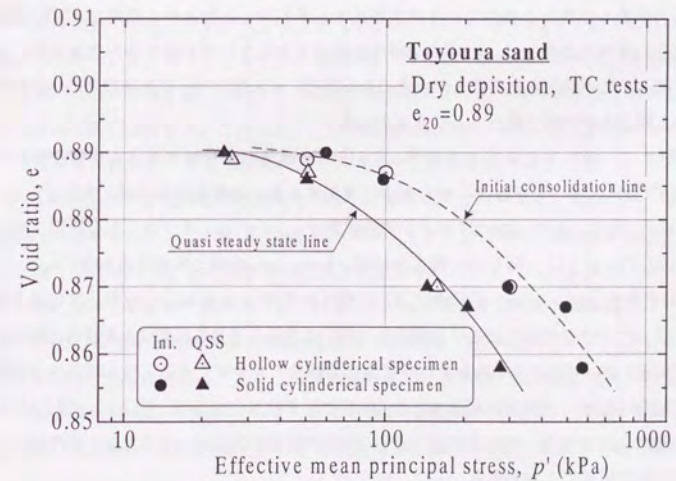
図 5.1 中空供試体と中実供試体による三軸圧縮・伸張試験での変相状態 ($p'_c = 100 \text{ kPa}$)

図 5.2 中空供試体と中実供試体による準定常状態の比較

図5.2は同一の初期圧密線上から非排水せん断を行ったときの準定常状態を $e - \log p'$ 平面上に表示したものである。三軸圧縮状態、三軸伸張状態のそれぞれについて、中空円筒型供試体と中実円柱型供試体の両方の準定常状態はほぼ同一の準定常状態線上に存在すると言える。

以上の観察から、本研究で用いた乾燥堆積法によって作成した豊浦砂の中空円筒型供試体(外径10cm、内径6cm、高さ20cm)と中実円柱型供試体(直径5cm、高さ10cm)はほぼ同一の非排水単調せん断挙動を示し、定量的な比較の対象になると言える。

5.4 非排水中空ねじりせん断試験結果

5.4.1 主応力方向と中間主応力の大きさの影響

図5.3(a)～図5.15(a)および図5.3(b)～図5.15(b)に、中間主応力係数 b が等しく主応力方向 α が異なる条件での非排水単調せん断試験におけるせん断応力-ひずみ曲線、および応力経路を比較した。いずれの密度においてもまたいずれの中間主応力条件においても、明らかに主応力方向 α が大きくなるほど、せん断に伴って大きな間隙水圧が発生し、せん断応力が大きく低下することがわかる。

次に、図5.16(a)～図5.31(a)および図5.16(b)～図5.31(b)に、主応力方向 α が等しく中間主応力係数 b が異なる条件での非排水単調せん断試験におけるせん断応力-ひずみ曲線、および応力経路を比較した。いずれの密度においてもまたいずれの主応力方向条件においても、明らかに中間主応力係数 b が大きくなるほど、せん断に伴って大きな間隙水圧が発生し、せん断応力が大きく低下することがわかる。

中間主応力係数 b と主応力方向 α が非排水単調せん断特性に与える影響をわかりやすく示すために、 $b - \alpha$ 平面上にせん断中に発生する最大過剰間隙水圧比(流動ポテンシャル) $u_f = (1 - p'_{PT}/p'_c) \times 100(\%)$ および初期状態比 $r_c = p'_c/p'_{PT}$ をプロットし、図5.32～図5.34に示した。さらに、図5.35～図5.38には、 $b - \alpha - u_f$ 空間に試験結果を図示した。

相対密度約25%($e=0.88$)の場合には、三軸圧縮条件($\alpha=0, b=0$)においては最大間隙水圧比は44%で流動変形によるせん断応力の低下はほとんど見られずせん断特性は膨張的な傾向が大きい。主応力方向 α および中間主応力係数 b を大きくするとせん断特性が急激に収縮的傾向に転換し、容易に間隙水圧比100%の完全液状化に至る。図5.32、図5.35より、相対密度約25%の場合、間隙水圧比100%の完全液状化を生じないような応力条件領域は非常に限られていることがわかる。

相対密度約33%($e=0.85$)の場合には、三軸圧縮条件付近では最大過剰間隙水圧比は10

～20%程度であり、流動挙動は全く観測されないが、主応力方向 α および中間主応力係数 b の増加にともないせん断特性が収縮的傾向に転換して流動が発生するようになり、かなり広範な応力条件で間隙水圧比100%の完全液状化に至る。

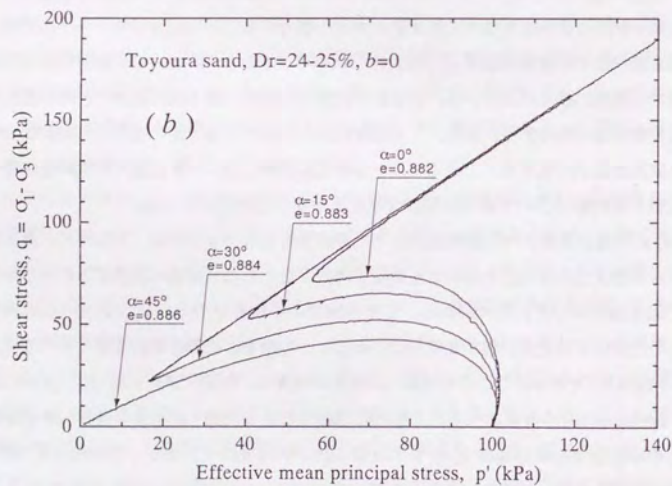
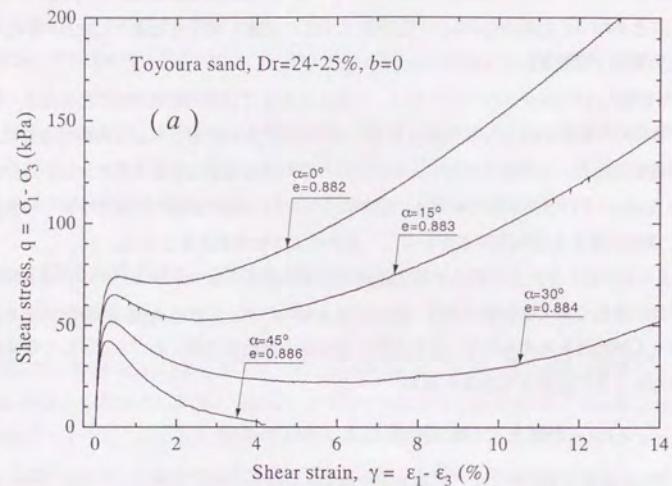
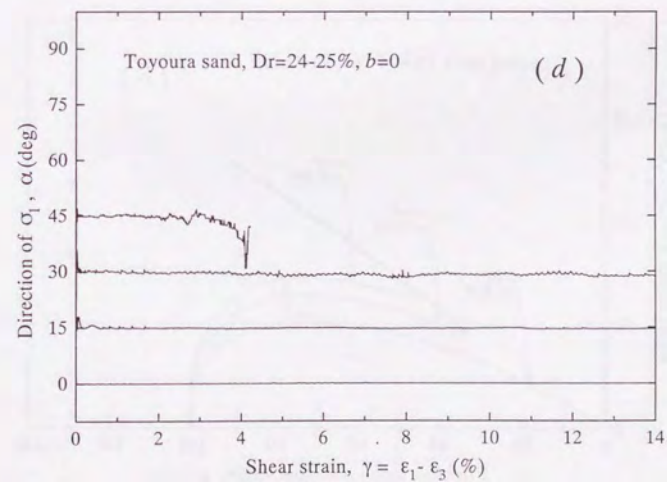
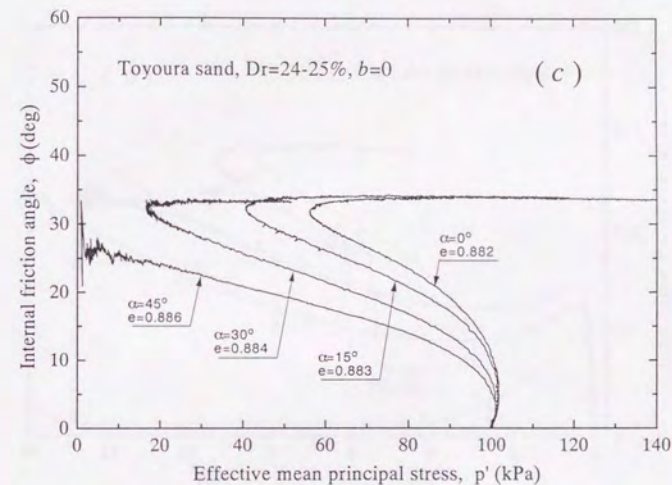
相対密度約40%($e=0.82$)の場合には、三軸圧縮条件では過剰間隙水圧の発生は全く見られず、きわめて膨張的なせん断挙動となる。全応力が十分に大きければせん断の進行によって砂の強度はほとんど無限に増加し、岩石のような非常に強固な性質を示す。しかしながら主応力方向 α および中間主応力係数 b の増加にともない三軸伸張条件付近では著しい軟化を生じて90%を越える過剰間隙水圧を生じ、泥水のような流動状態となる。

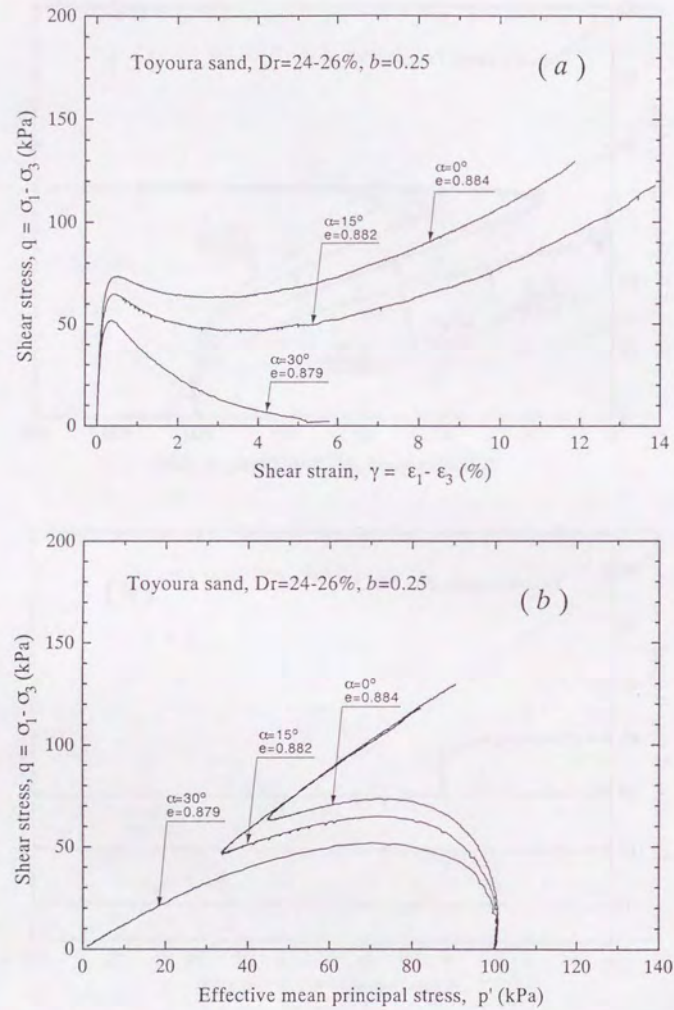
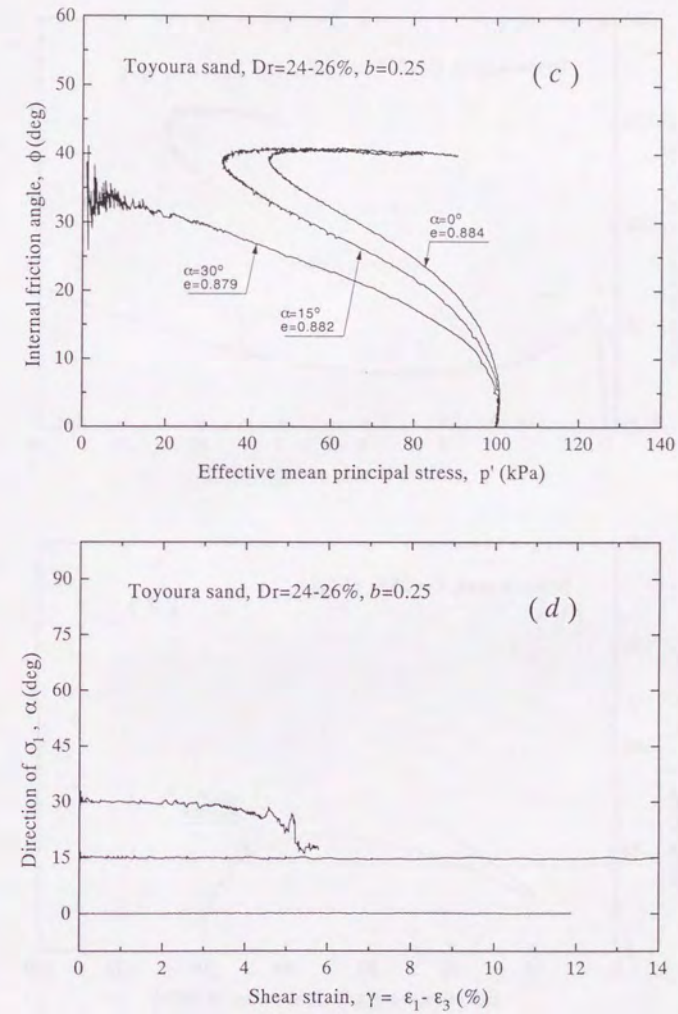
以上のように、主応力方向と中間主応力の大きさという応力条件は、砂の非排水単調せん断挙動に対して重大な影響力を持っていることがわかる。特に、三軸圧縮条件は最も強い非排水せん断強度を与えるので、これを用いて地盤の挙動を予測することは著しく危険側の判断となることに注意する必要がある。

5.4.2 $e - \log p'$ 平面上での変相状態および準定常状態

すべての実験結果に対して、間隙水圧が増加から減少に転じる時点、すなわち変相状態を $e - \log p'$ 平面上にプロットして図5.39に示した。主応力方向と中間主応力の大きさという応力条件が砂の非排水単調せん断挙動に大きく響くことを反映して、一つの密度 e に対する変相状態での有効拘束圧 p'_{PT} は大きな幅を持っており、 $e - \log p'$ 平面上における変相状態点は広範囲に散らばっている。この変相状態の分布の一番上側の限界に三軸圧縮条件における変相状態が存在する。また、この変相状態の分布の一番下側の限界に三軸伸張条件における変相状態が存在する。このことは、三軸圧縮試験において砂は最も膨張的な挙動を示し、三軸伸張試験において最も収縮的な挙動を示すことを表している。

この $e - \log p'$ 平面上の変相状態点を準定常状態とそうでないもの、すなわち、等方圧密状態から非排水せん断したときにせん断応力の低下をとまなう流動が発生するかどうかを区別して図5.39に示した。この図から、変相状態での平均有効主応力 p'_{PT} が50～60%以下となるものにおいて準定常状態が発生していることがわかる。初期有効拘束圧はすべての実験で $p'_c = 100\text{kPa}$ であるので、この流動・非流動の境界は、初期状態比 $r_c = p'_{PT}/p'_c$ が約2となる。Ishihara(1993)等によって、三軸圧縮試験における流動・非流動の境界が等方圧密状態からの非排水せん断の場合 $r_c = 2$ であることが指摘されているが、初期拘束圧100kPaの豊浦砂ではこれが一般的な応力条件下でも成立することが確かめられたと言える。

図 5.3 $D_r \approx 25\%$, $b = 0$ のせん断における α の影響

図 5.4 $D_r \approx 25\%$, $b = 0.25$ のせん断における α の影響

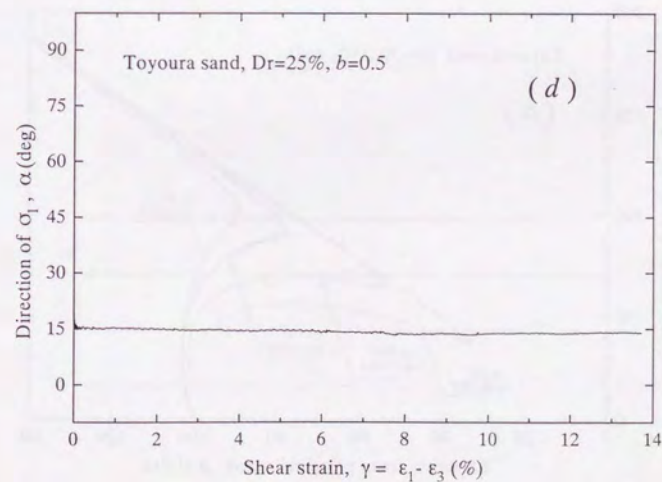
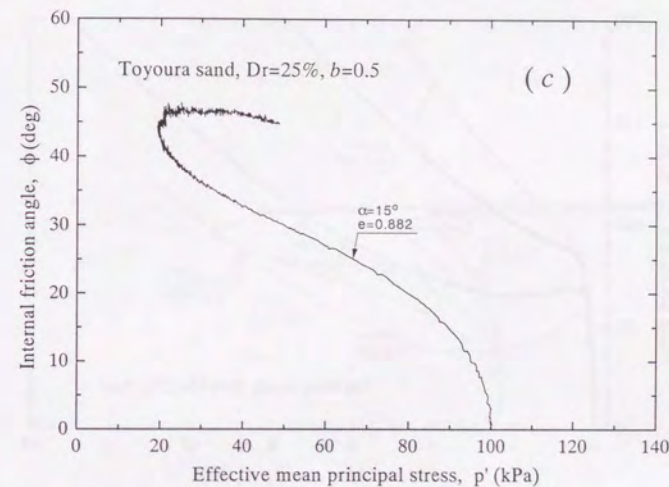
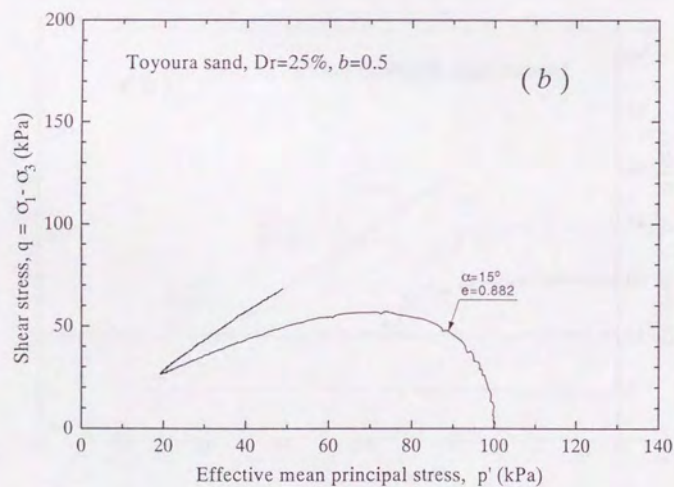
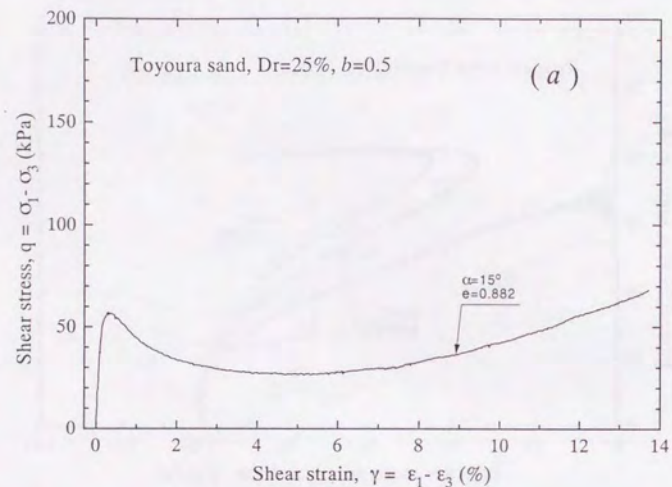
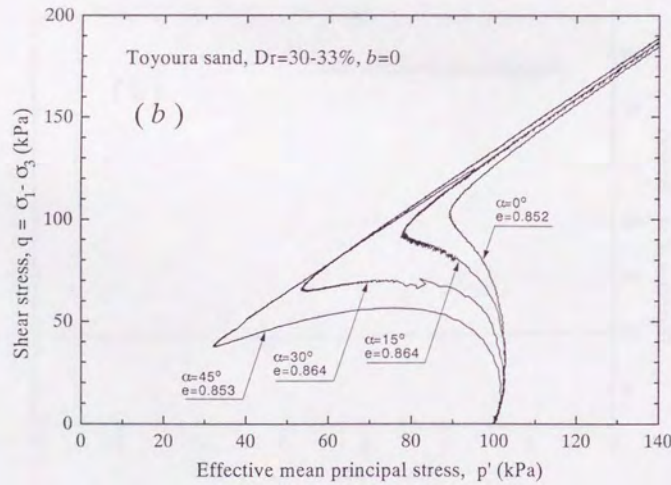
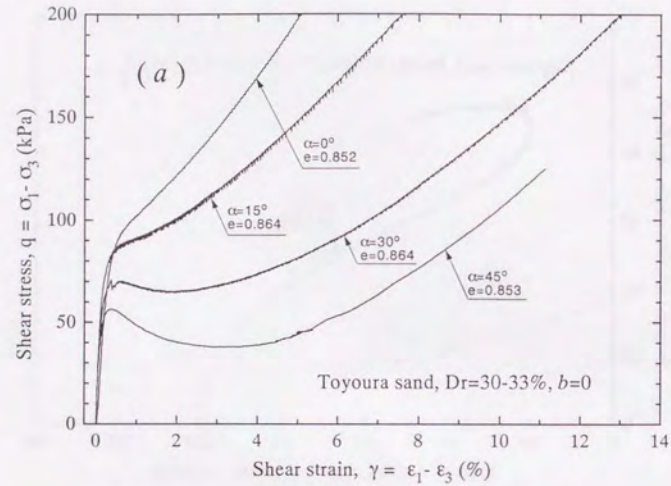
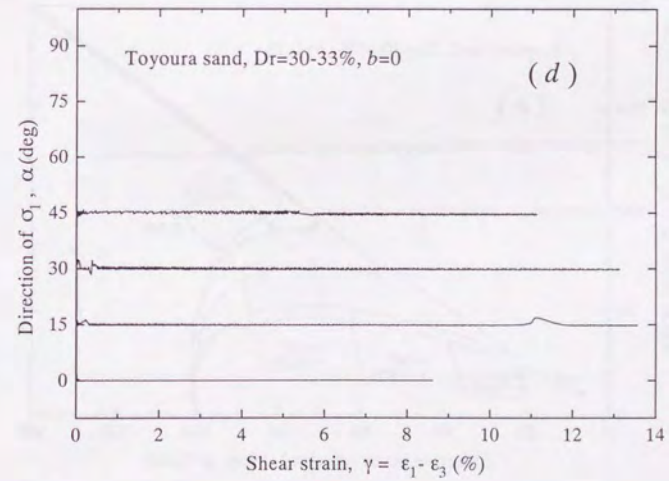
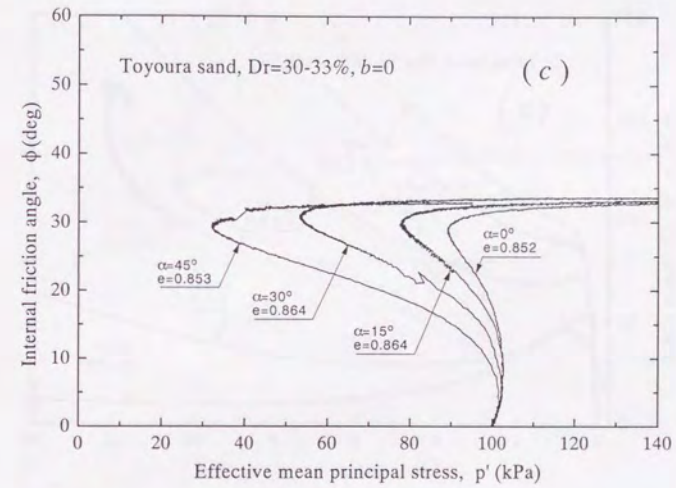
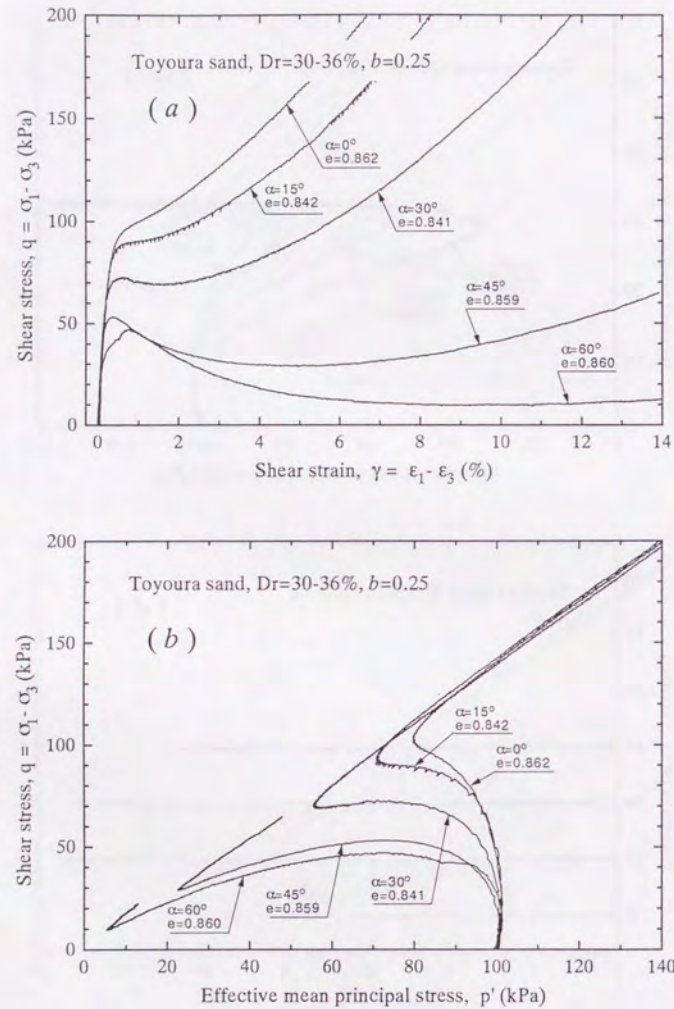
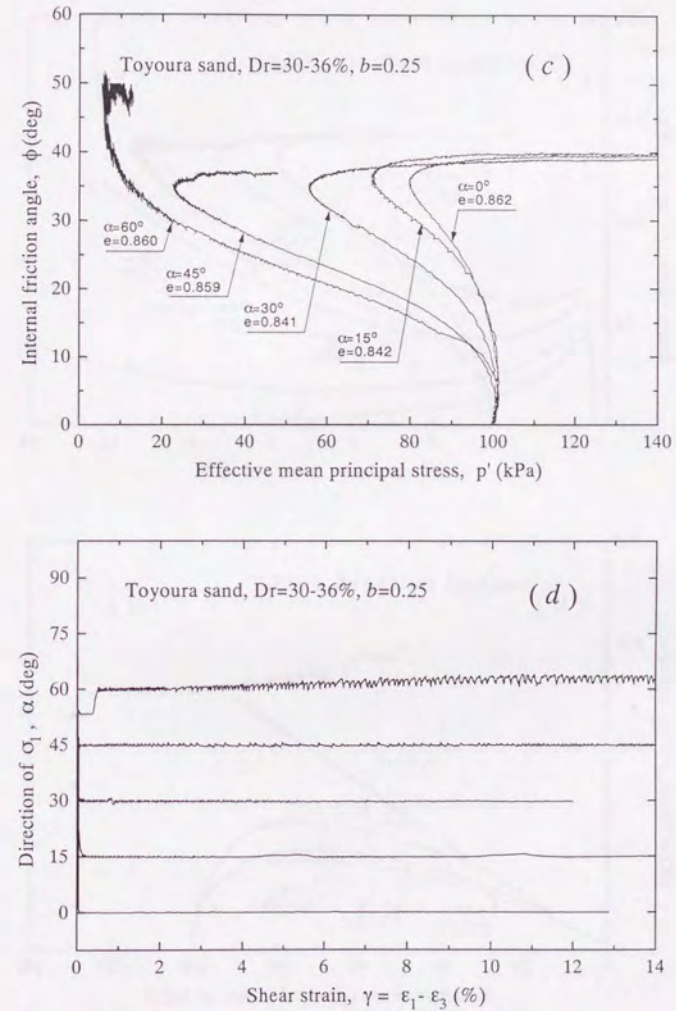
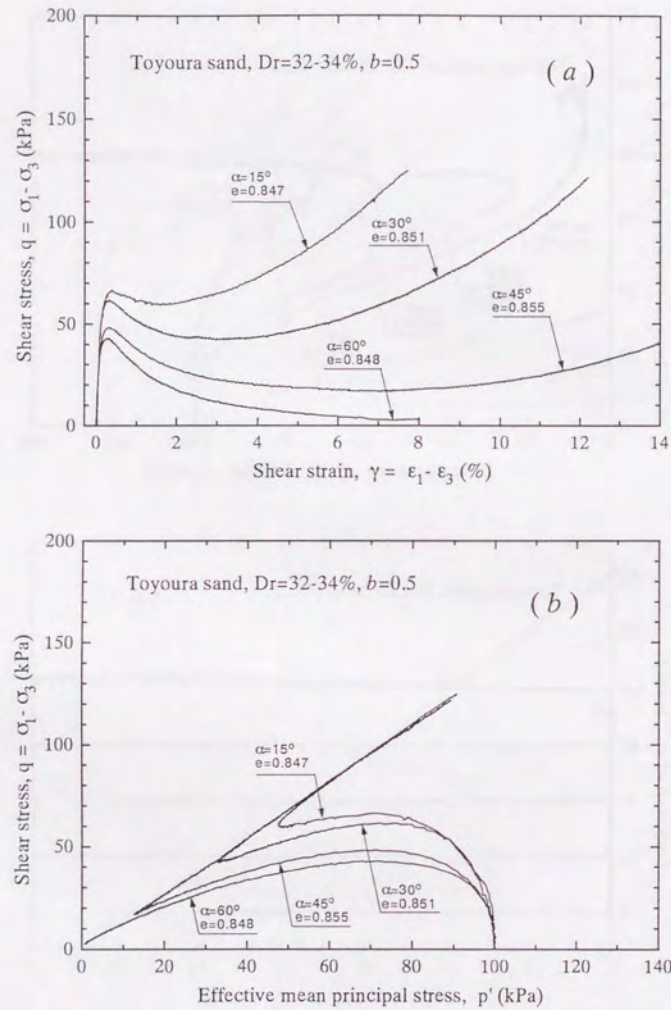
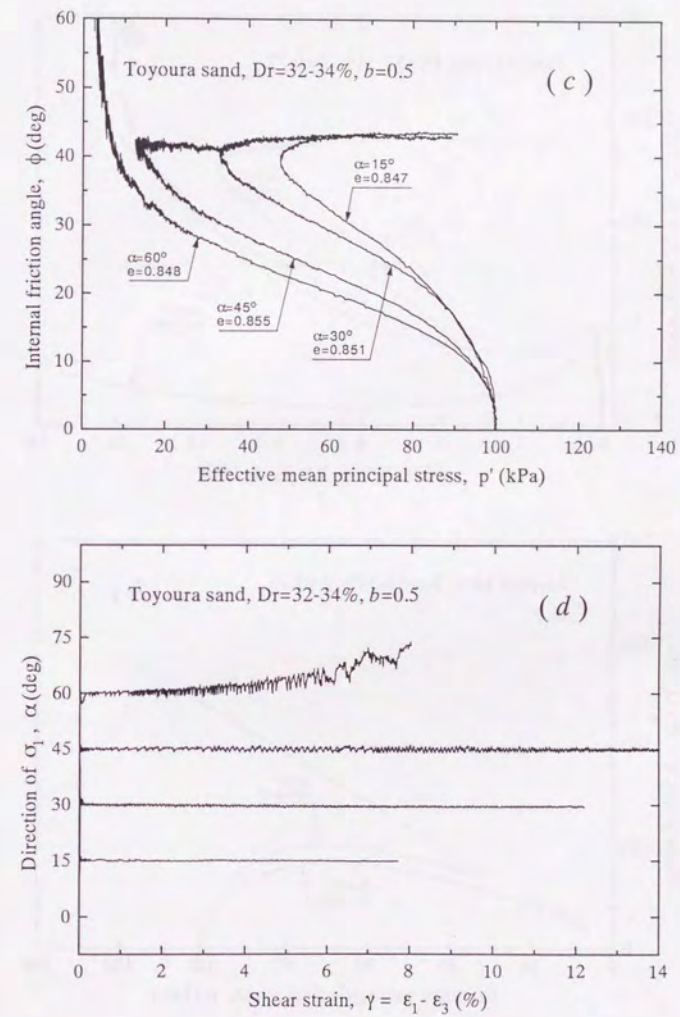


図 5.5 $Dr \approx 25\%$ 、 $b = 0.5$ のせん断における α の影響

図 5.6 $D_r \approx 33\%$, $b=0$ のせん断における α の影響

図 5.7 $D_r \approx 33\%$ 、 $b = 0.25$ のせん断における α の影響

図 5.8 $Dr \approx 33\%$ 、 $b = 0.5$ のせん断における α の影響

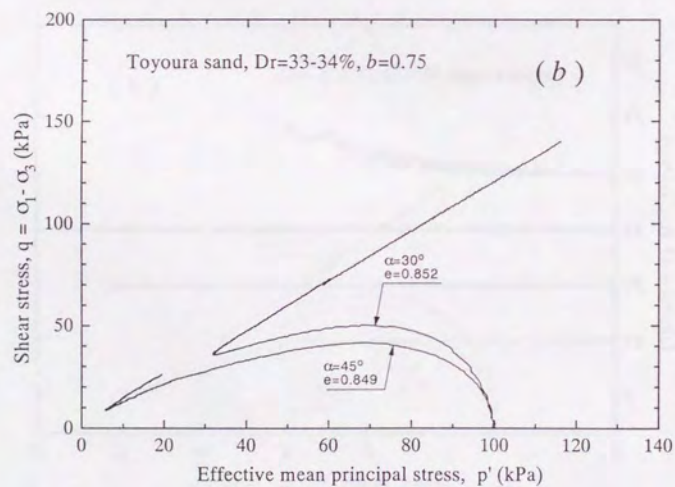
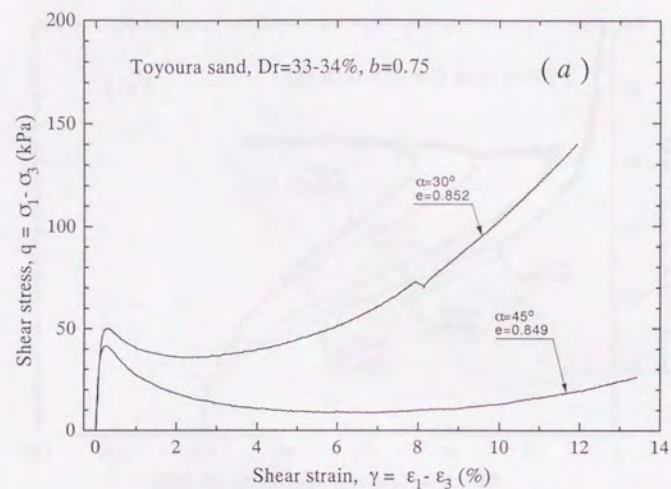
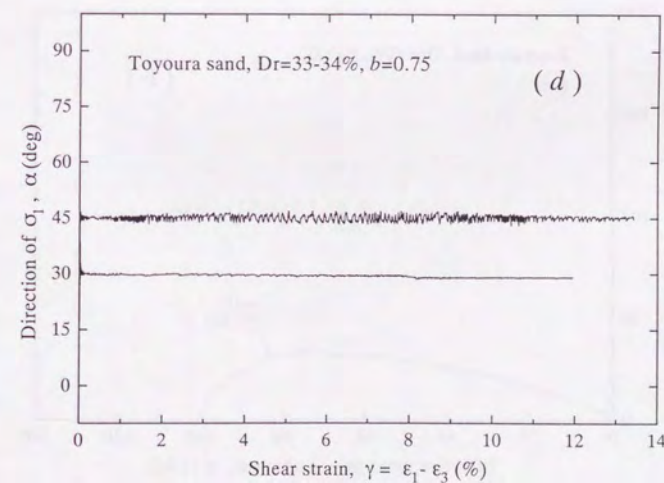
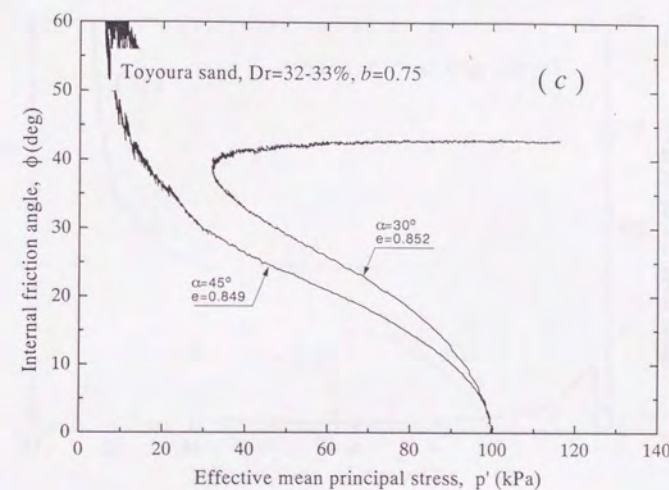
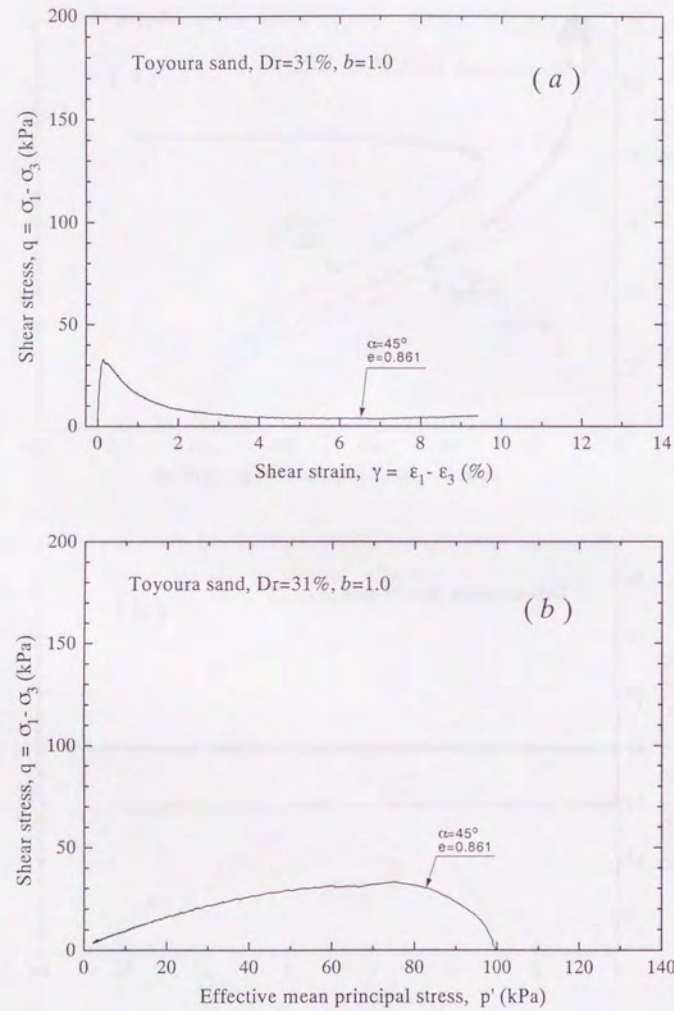
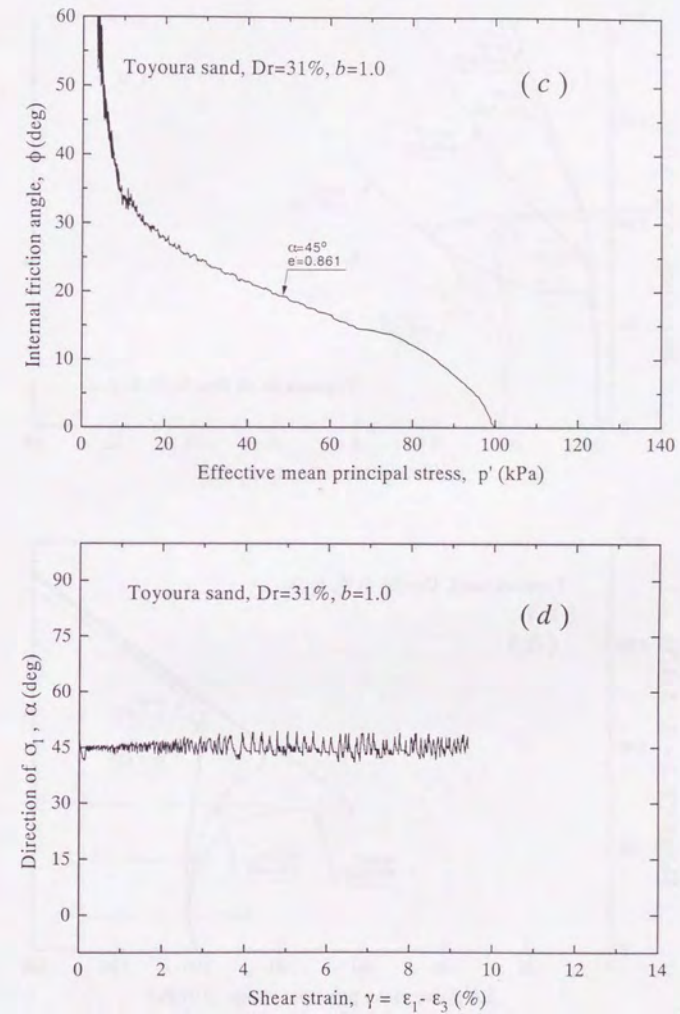
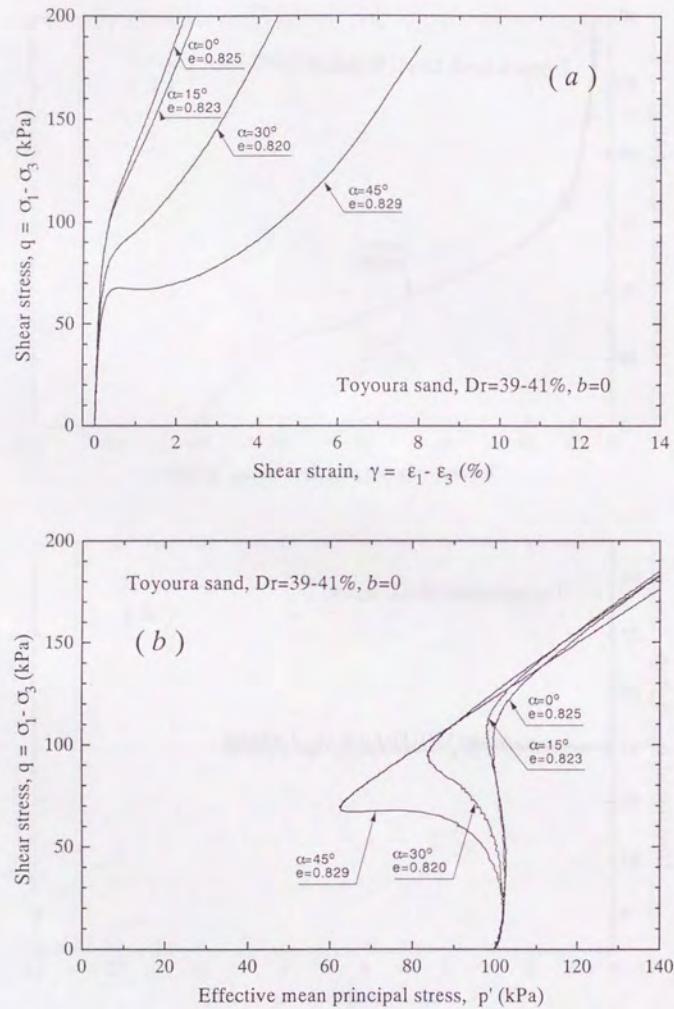
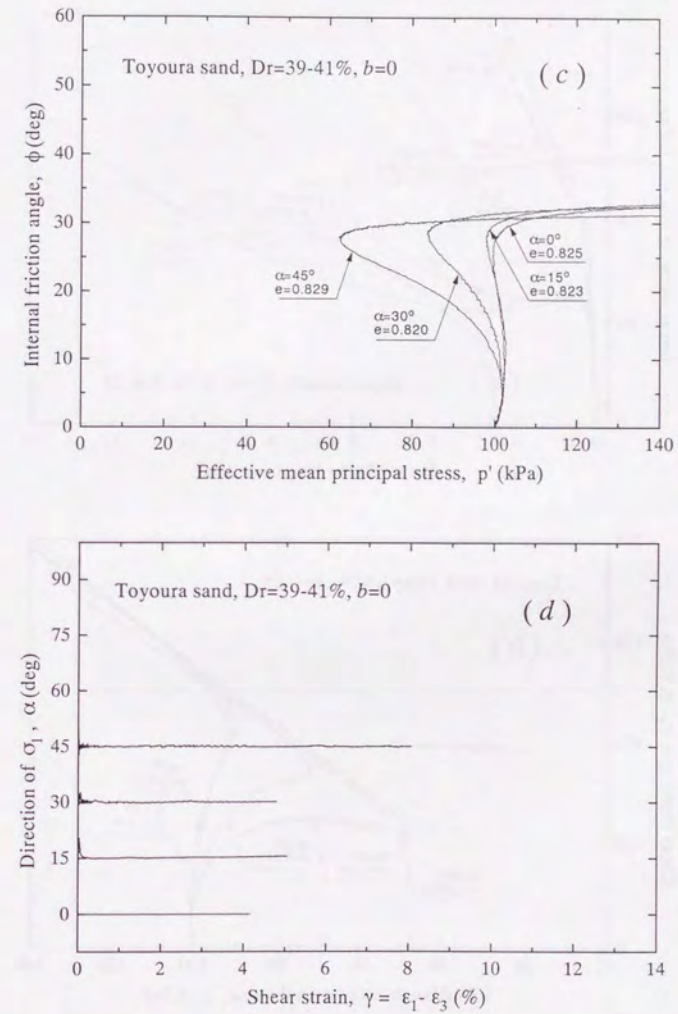
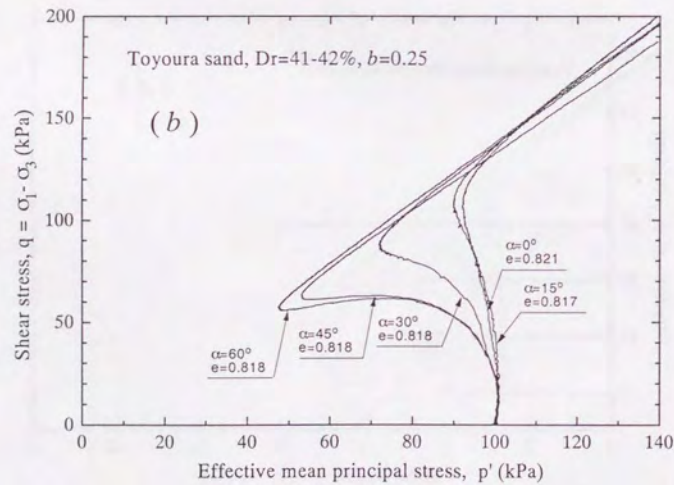
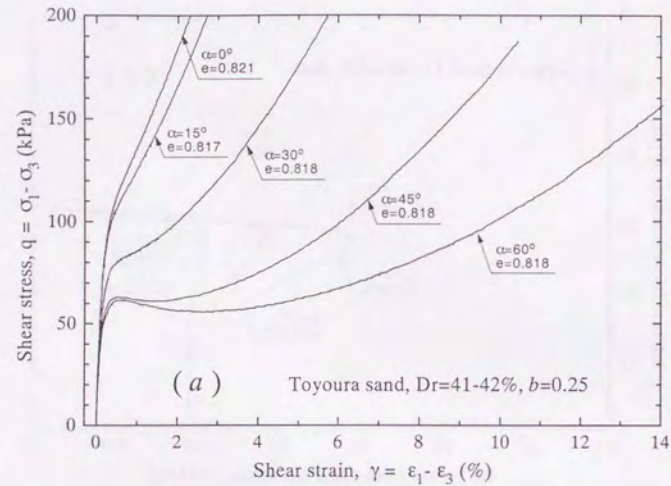
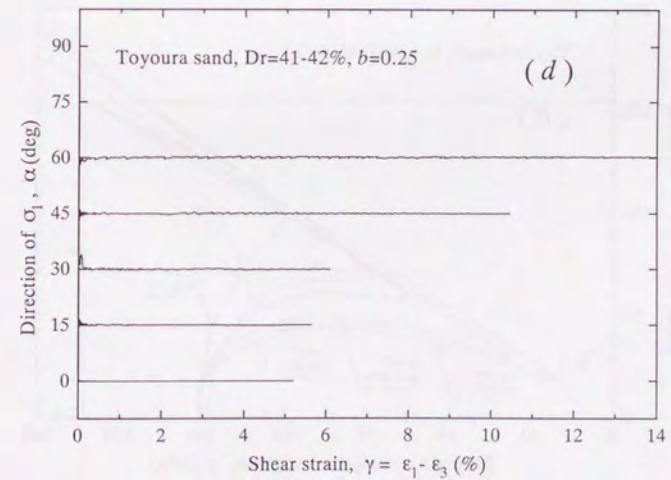
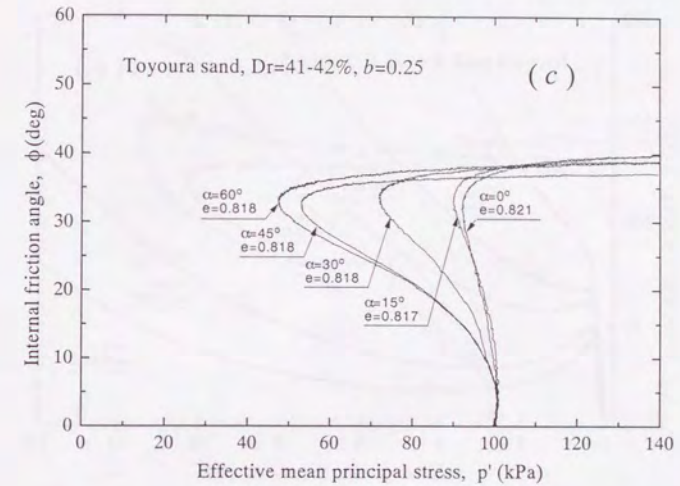


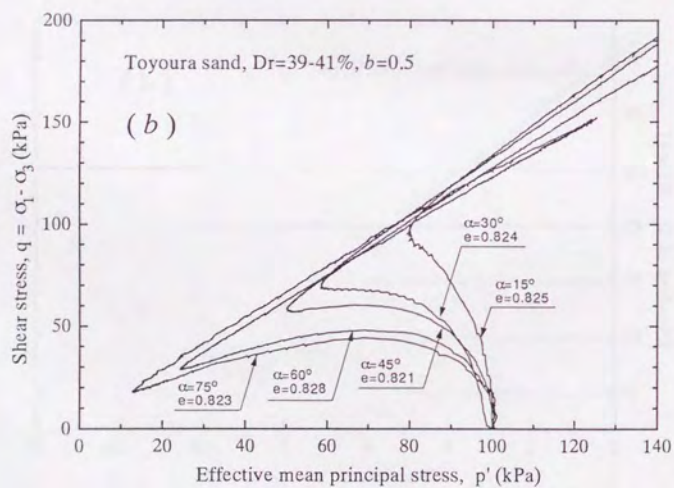
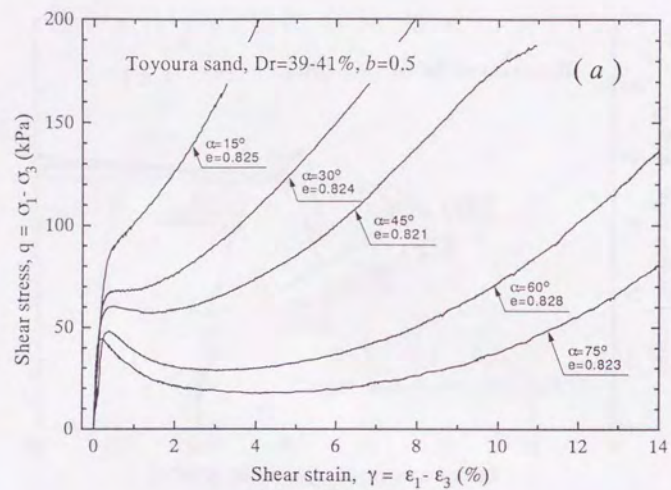
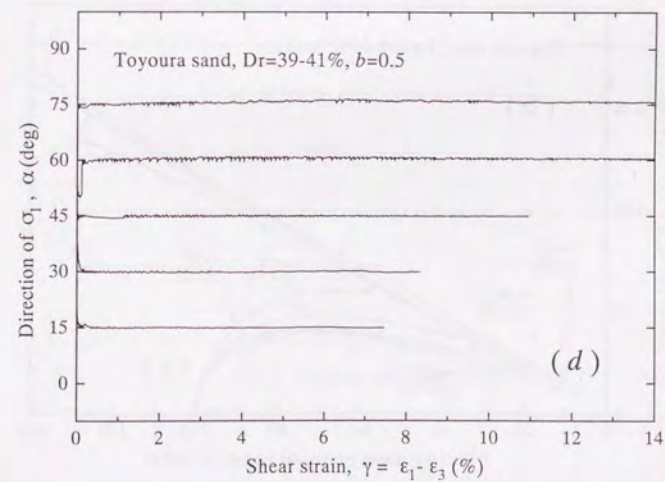
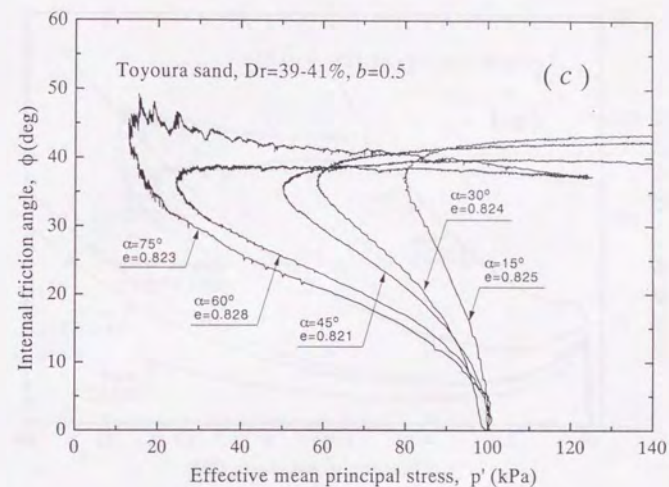
図 5.9 $D_r \approx 33\%$, $b = 0.75$ のせん断における α の影響

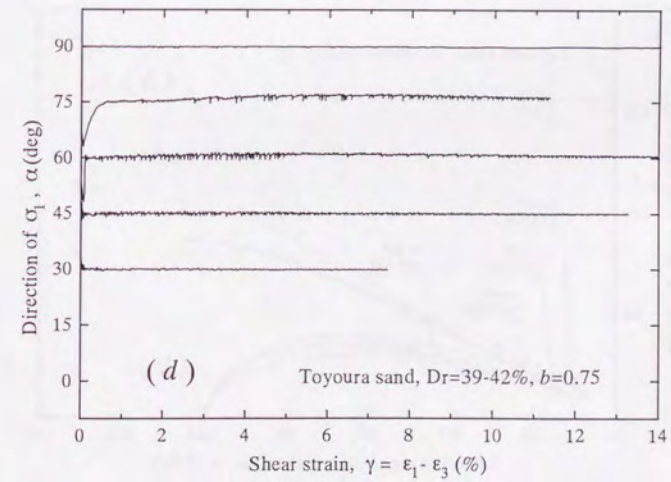
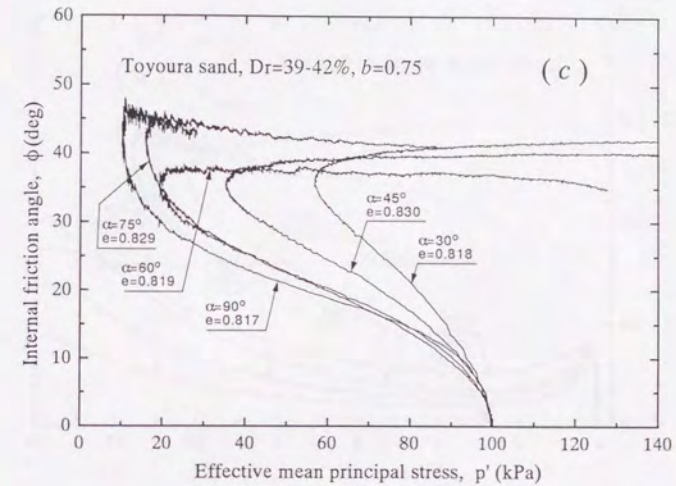
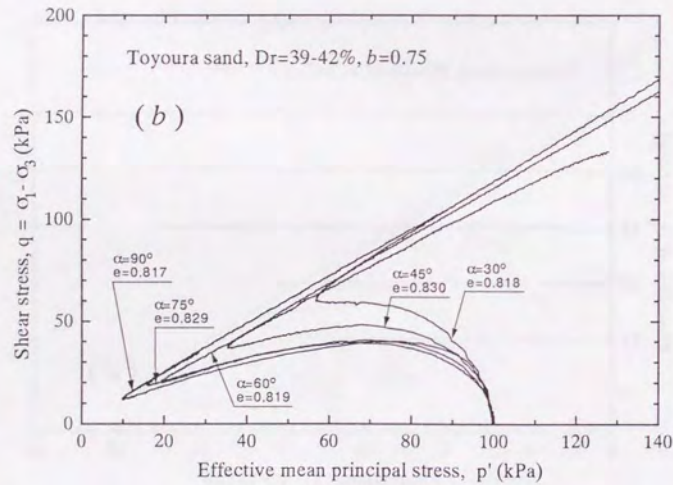
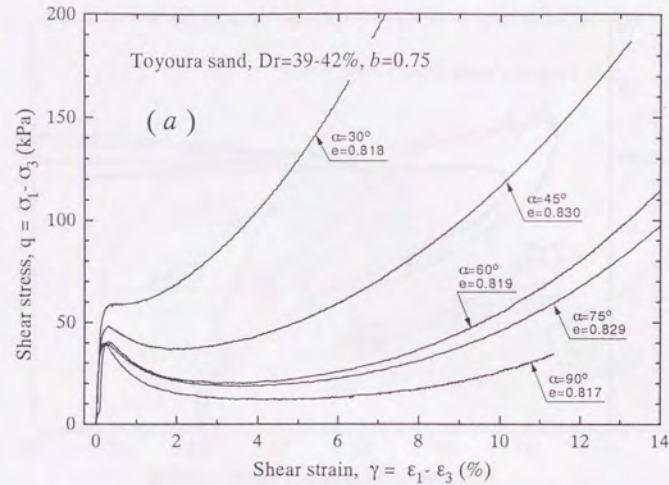


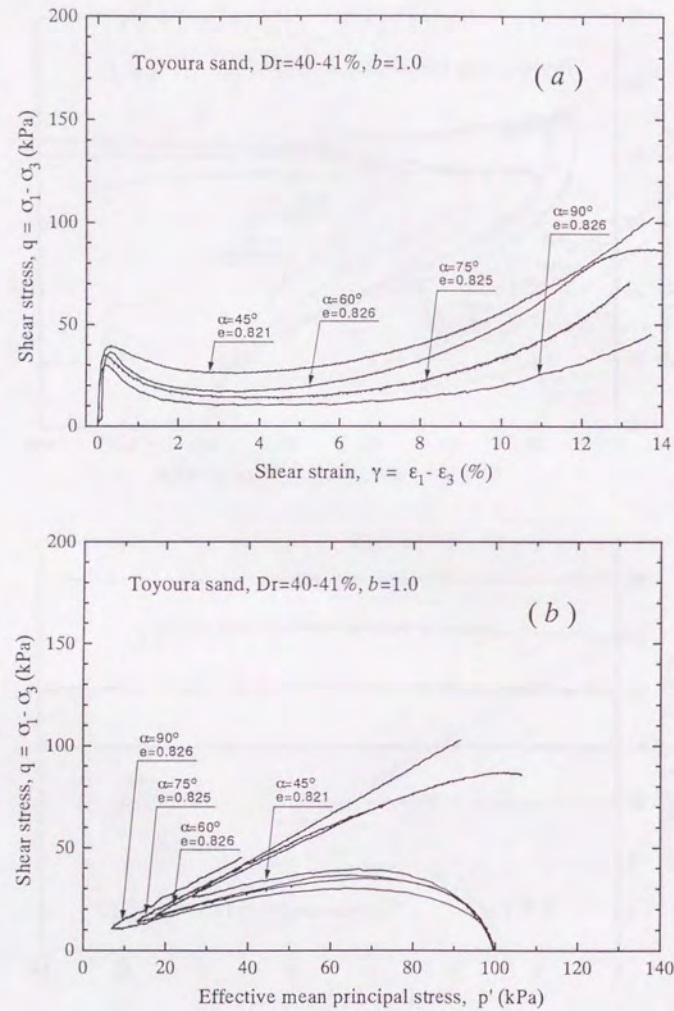
図 5.10 $D_r \approx 33\%$, $b = 1.0$ のせん断における α の影響

図 5.11 $Dr \approx 40\%$ 、 $b = 0$ のせん断における α の影響

図 5.12 $Dr \approx 40\%$, $b = 0.25$ のせん断における α の影響

図 5.13 $D_r \approx 40\%$, $b = 0.5$ のせん断における α の影響

図 5.14 $D_r \approx 40\%$ 、 $b = 0.75$ のせん断における α の影響

図 5.15 $D_r \approx 40\%$ 、 $b = 1.0$ のせん断における α の影響