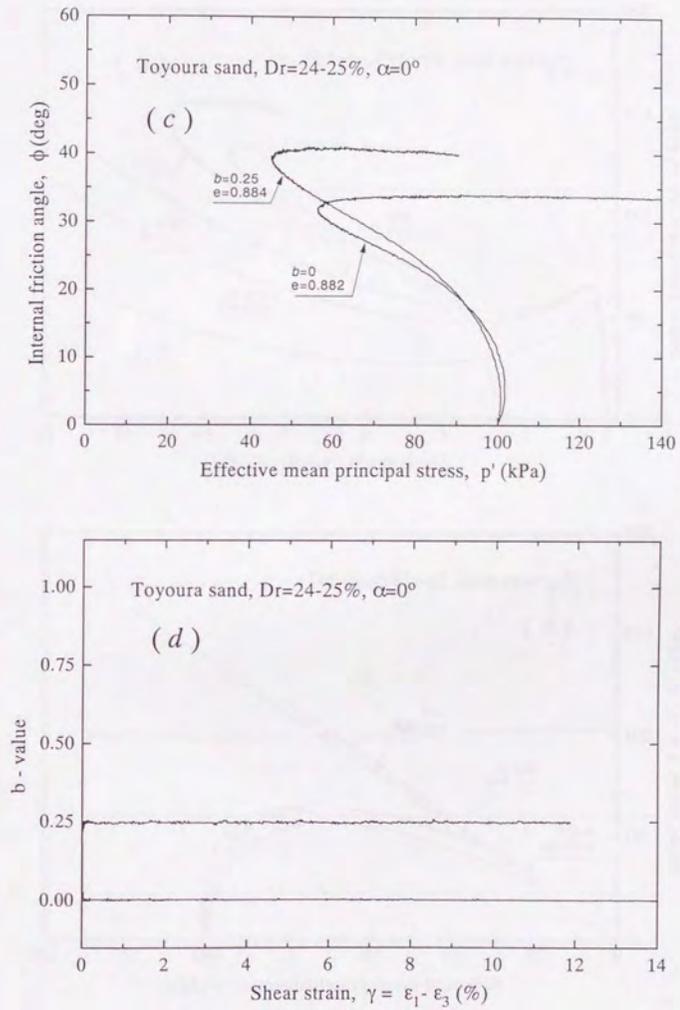
図 5.16  $D_r \approx 25\%$ 、 $\alpha = 0^\circ$ のせん断における  $b$  の影響

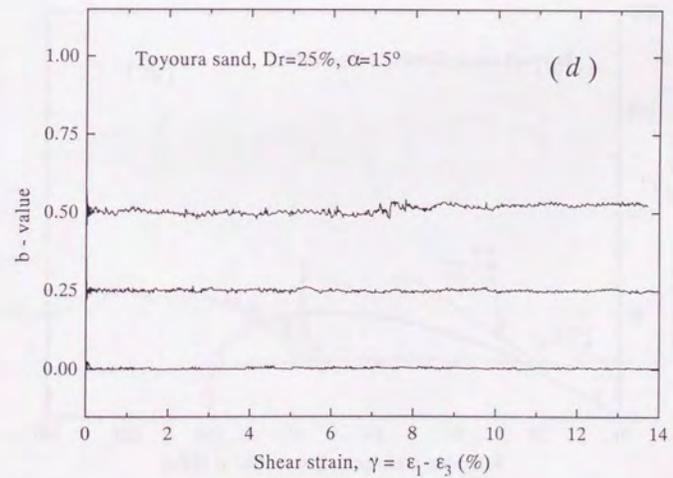
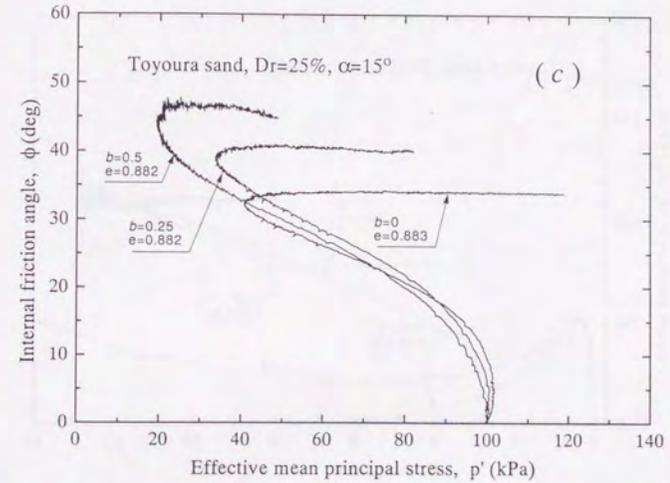
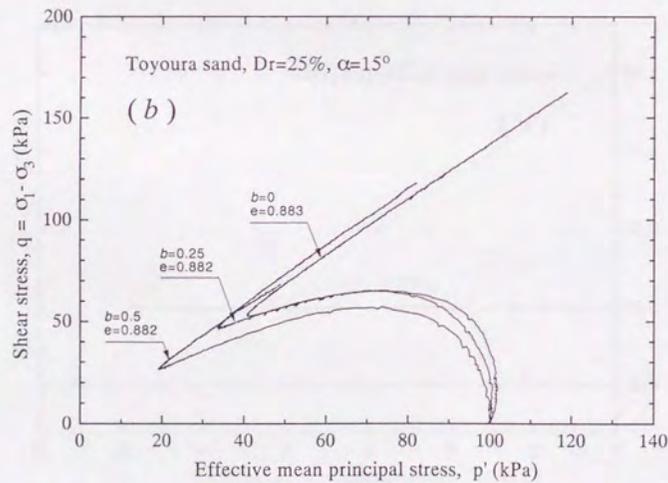
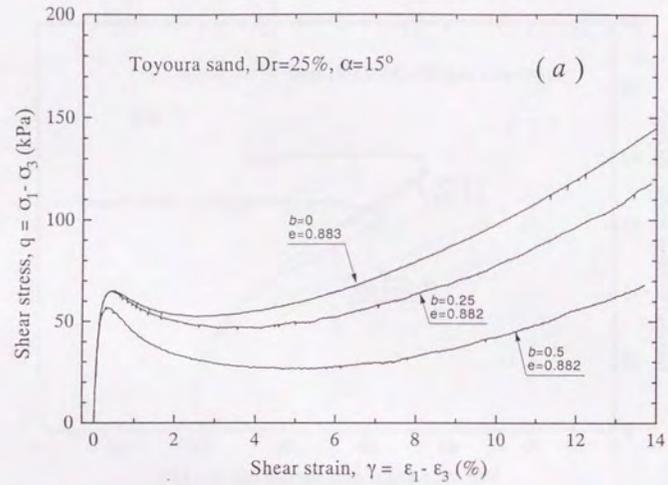


図 5.17  $D_r \approx 25\%$ ,  $\alpha = 15^\circ$  のせん断における  $b$  の影響

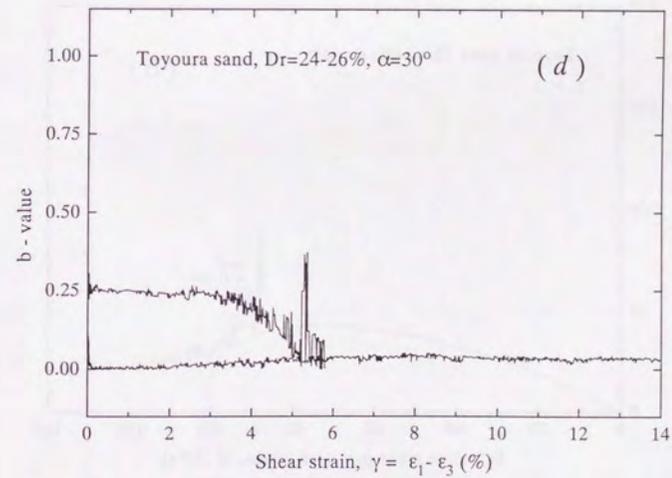
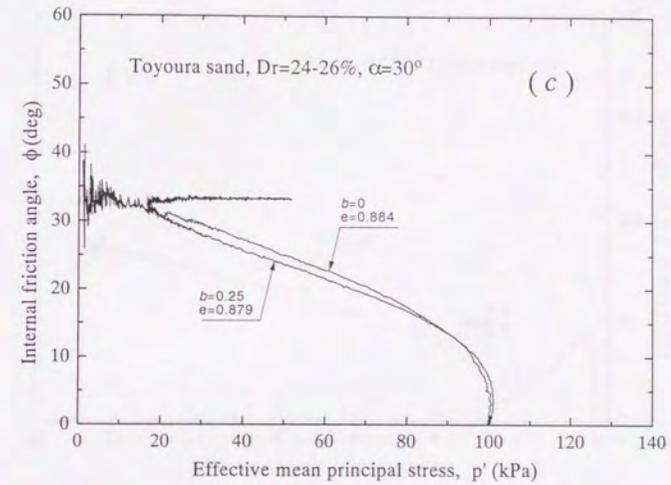
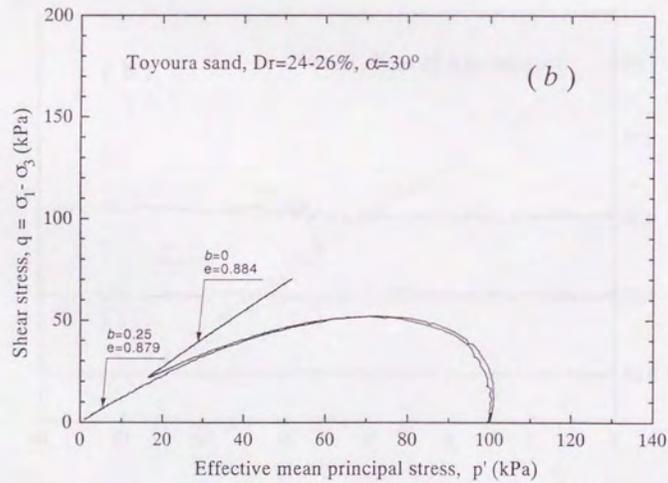
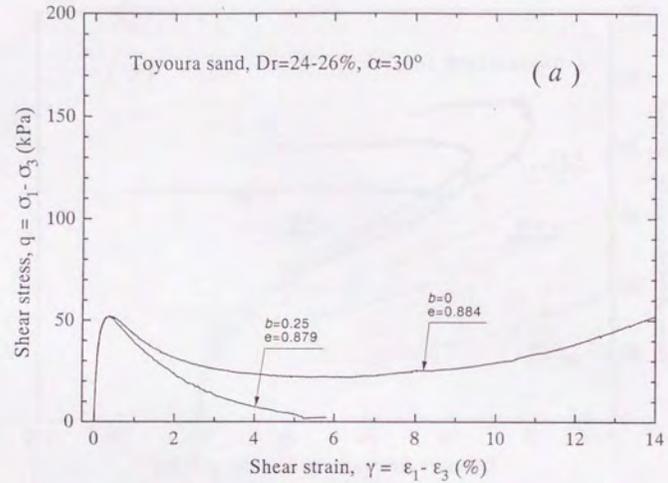


図 5.18  $D_r \approx 25\%$ ,  $\alpha = 30^\circ$ のせん断における  $b$  の影響

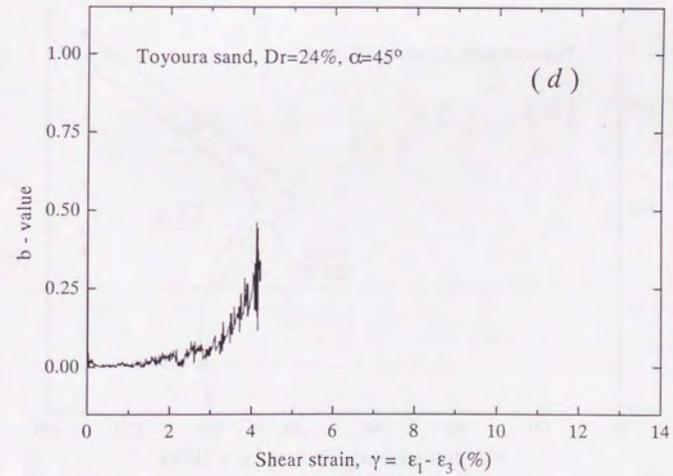
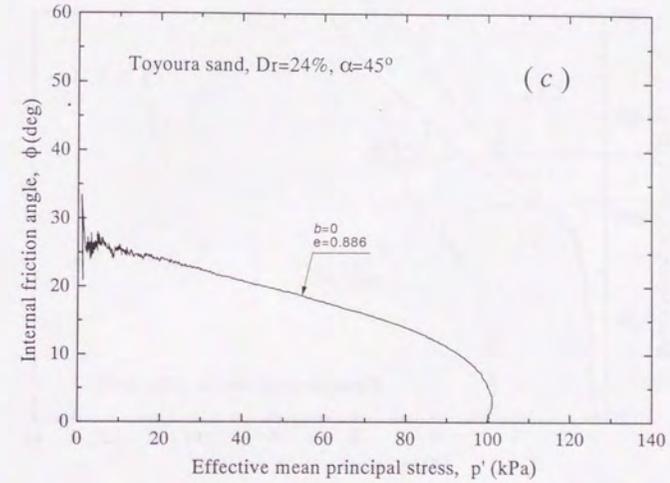
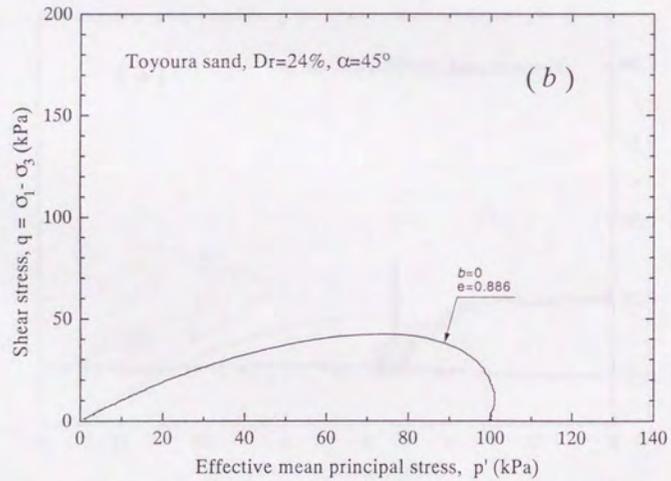
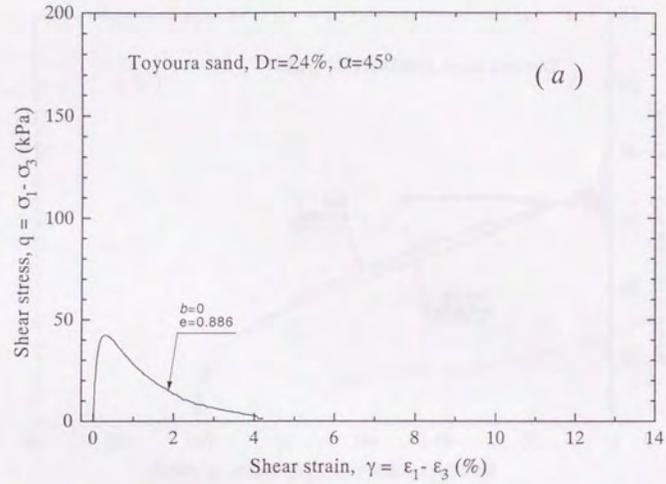


図 5.19  $D_r \approx 25\%$ 、 $\alpha = 45^\circ$ のせん断における  $b$  の影響

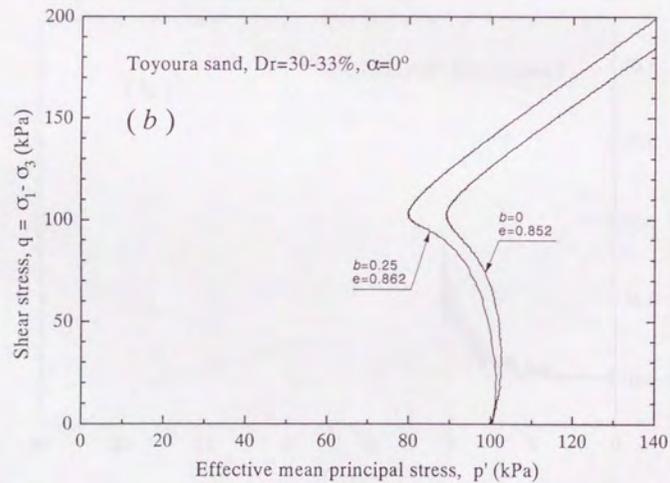
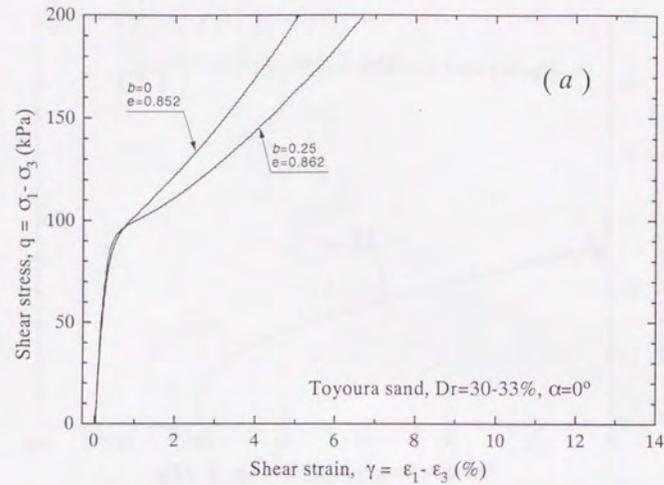
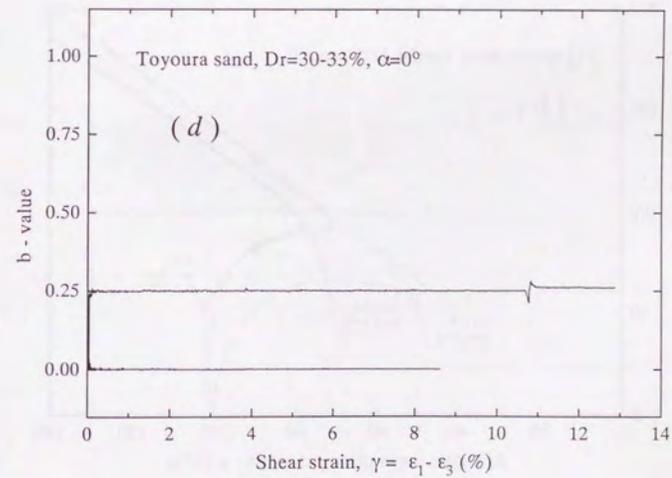
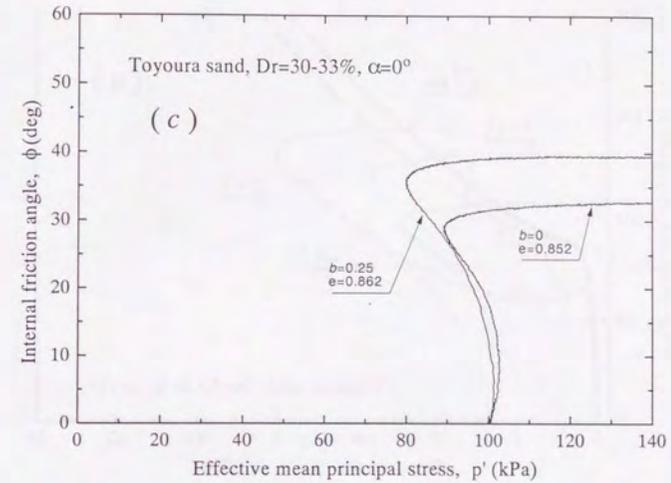


図 5.20  $D_r \approx 33\%$ ,  $\alpha = 0^\circ$ のせん断における  $b$  の影響



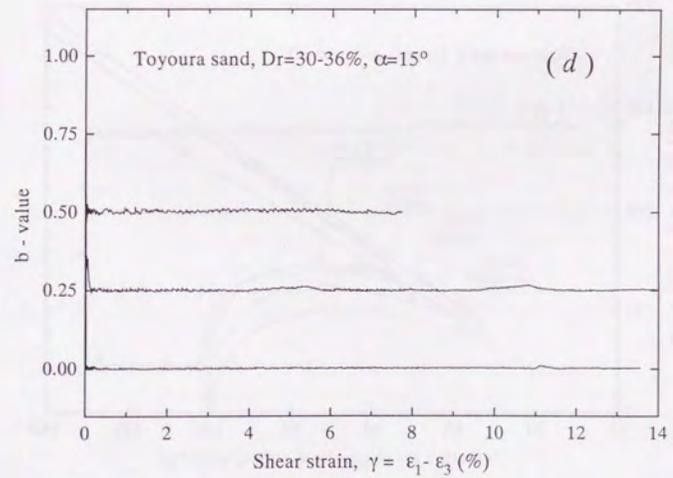
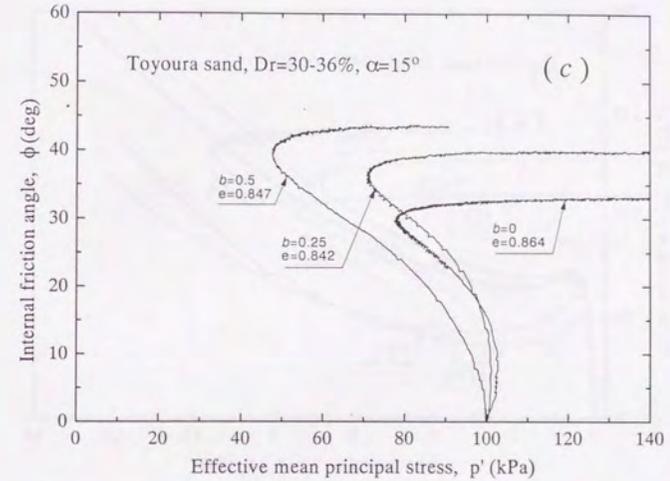
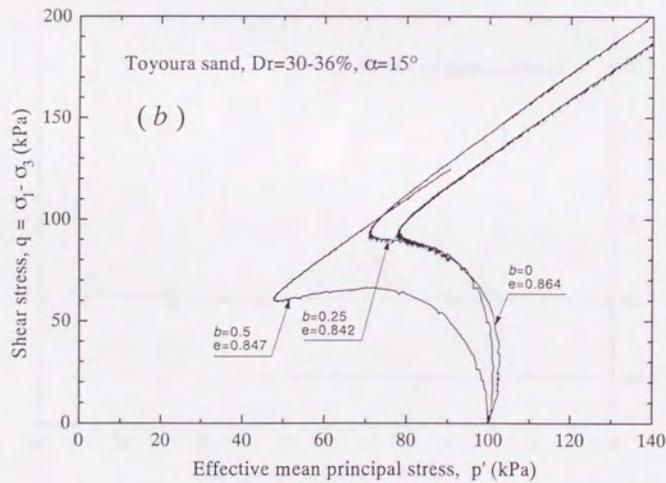
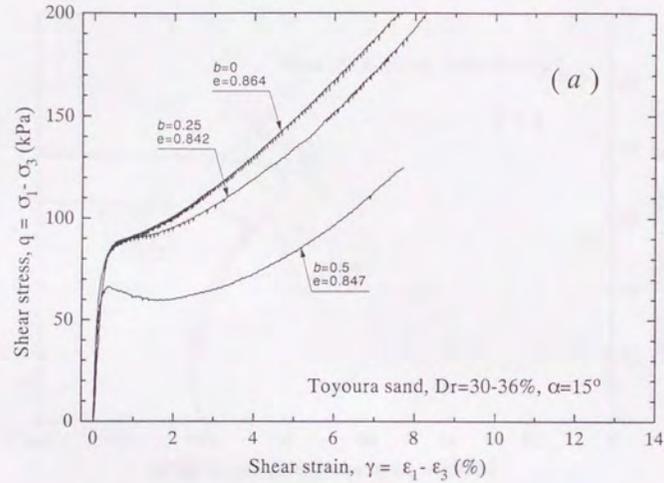


図 5.21  $D_r \approx 33\%$ ,  $\alpha = 15^\circ$  のせん断における  $b$  の影響

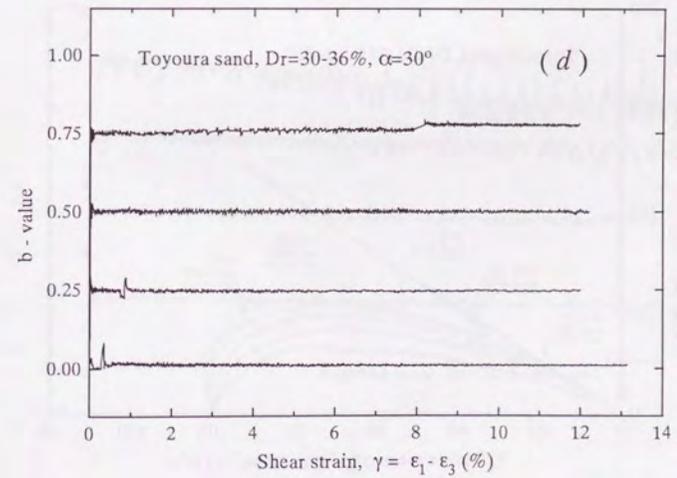
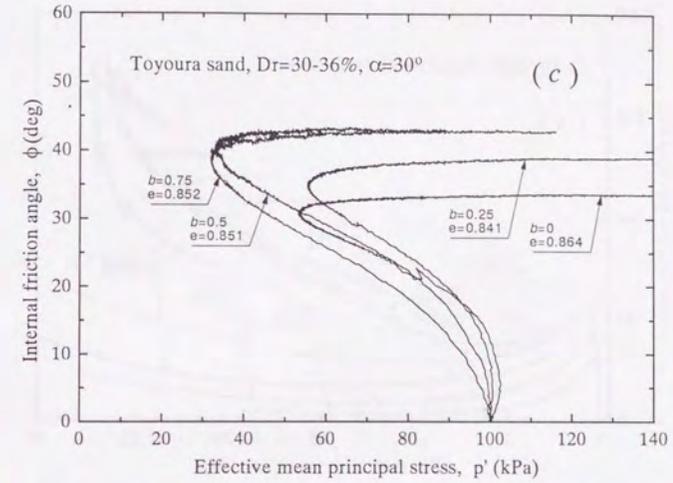
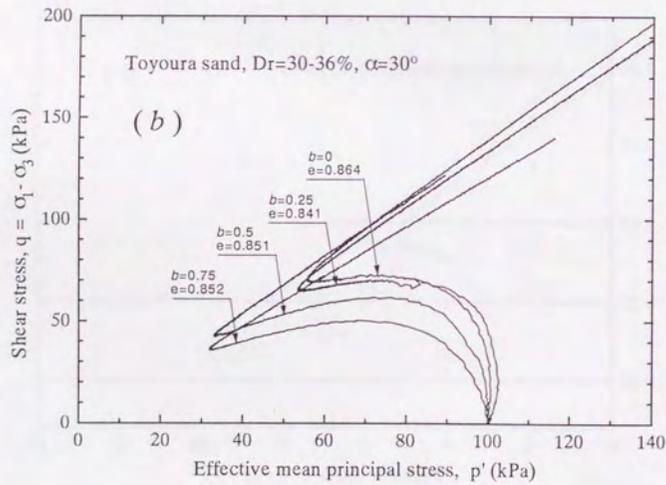
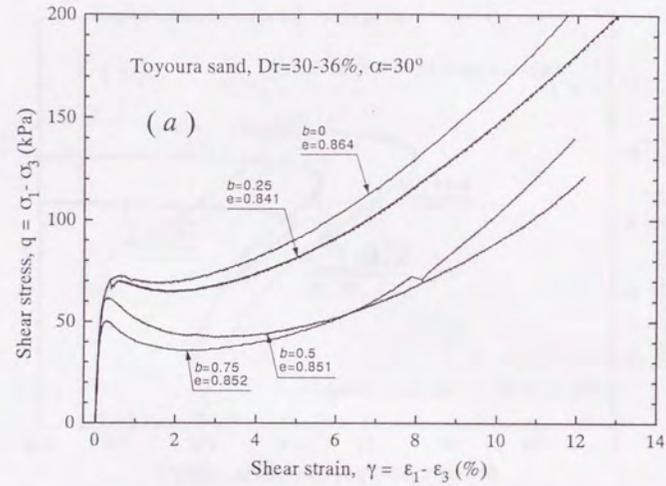


図 5.22  $D_r \approx 33\%$ ,  $\alpha = 30^\circ$ のせん断における  $b$  の影響

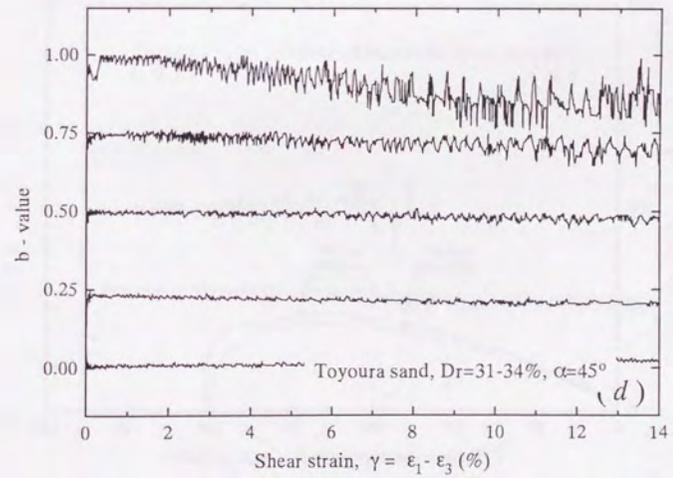
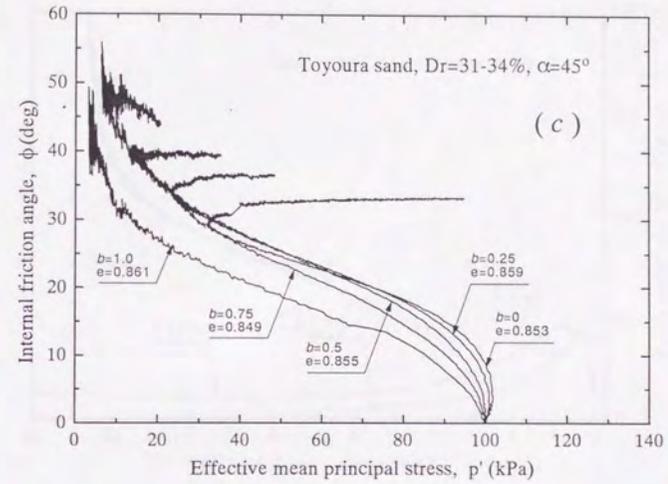
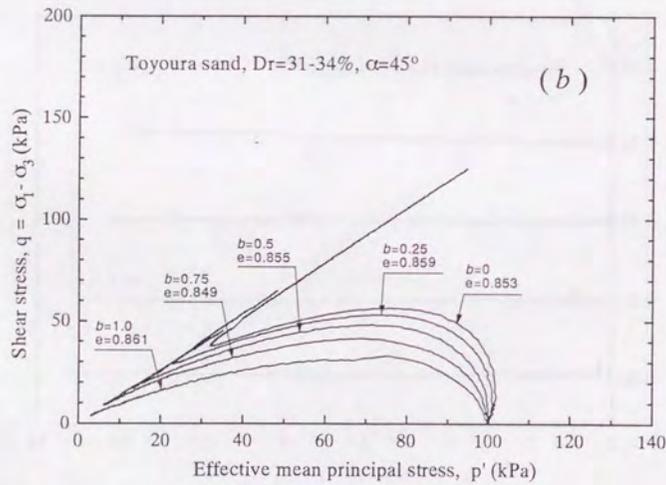
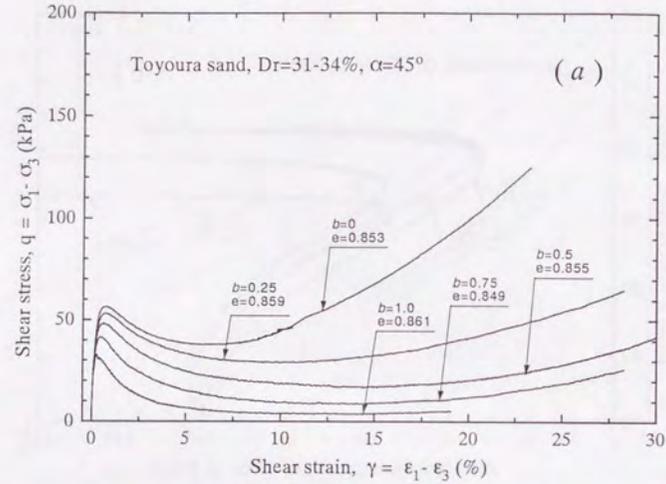


図 5.23  $D_r \approx 33\%$ ,  $\alpha = 45^\circ$  のせん断における  $b$  の影響

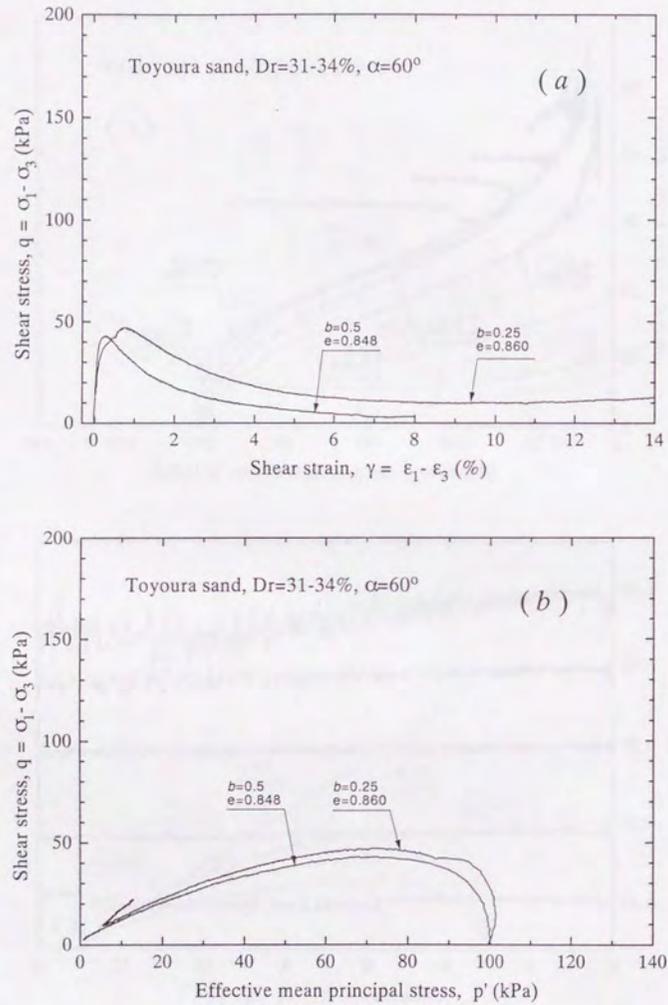
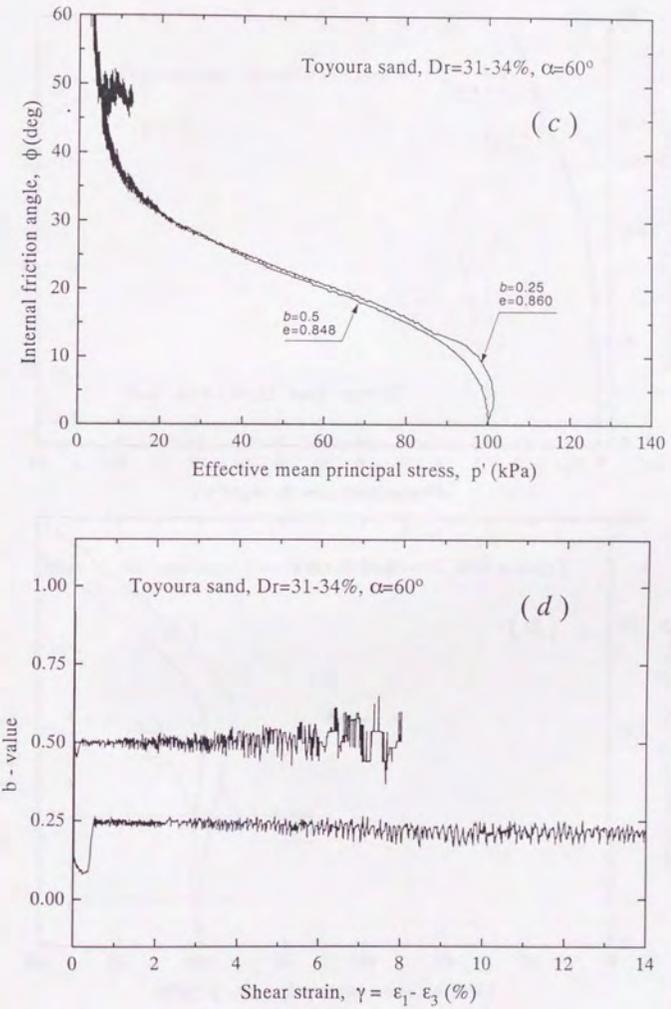


図 5.24  $D_r \approx 33\%$ 、 $\alpha = 60^\circ$ のせん断における  $b$  の影響



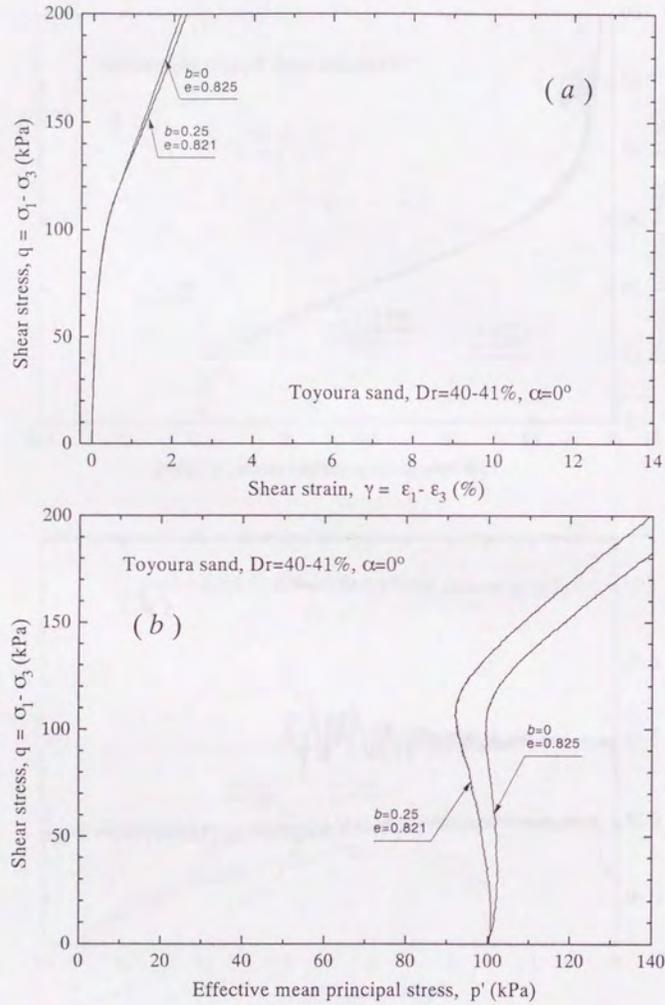
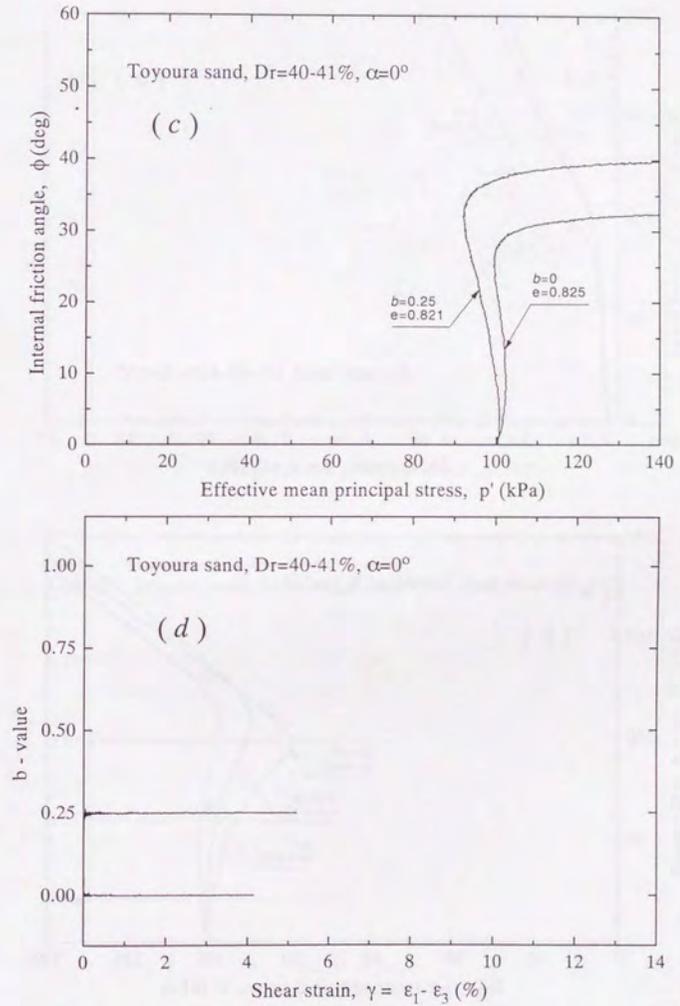
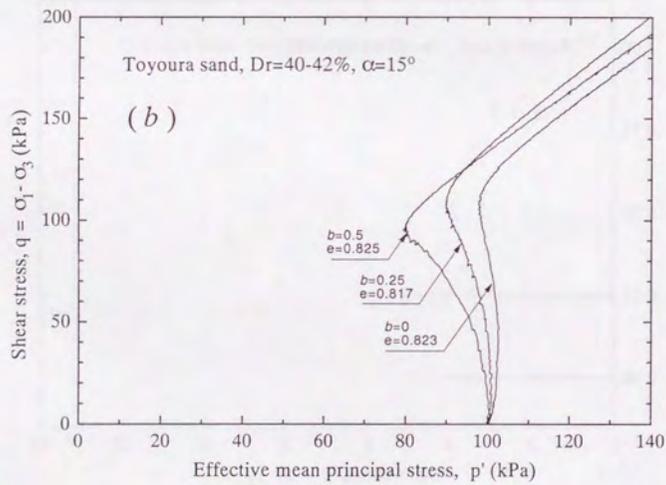
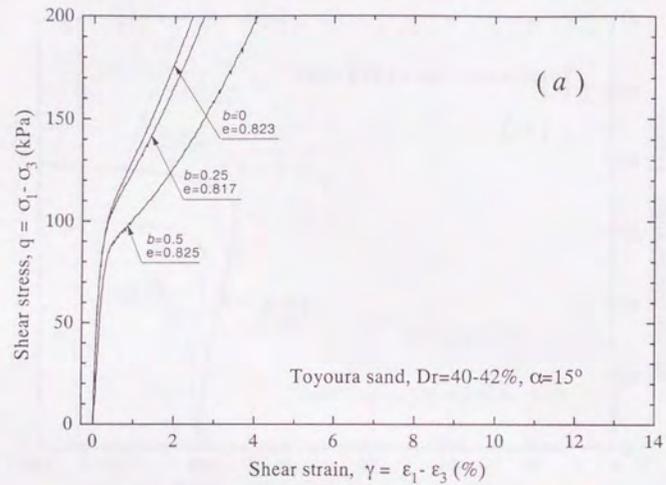
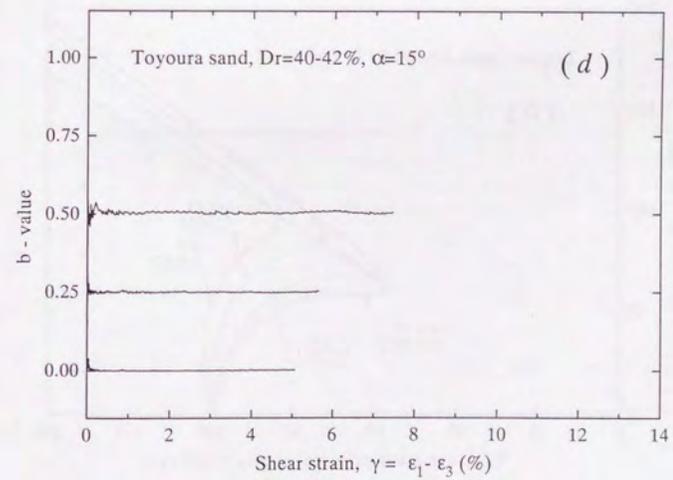
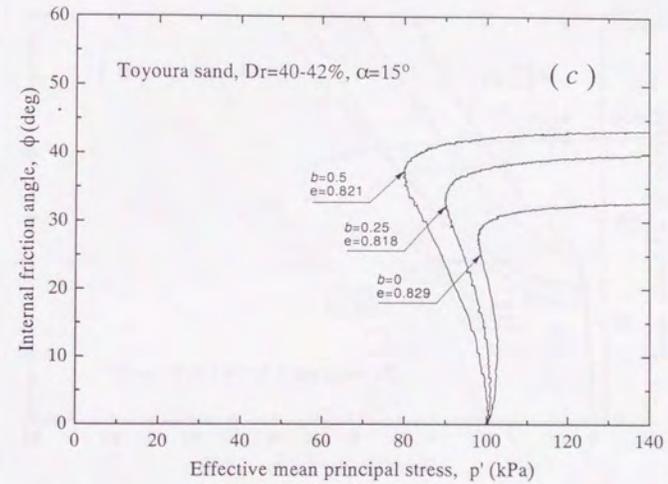


図 5.25  $D_r \approx 40\%$ 、 $\alpha = 0^\circ$ のせん断における  $b$  の影響



図 5.26  $D_r \approx 40\%$ 、 $\alpha = 15^\circ$ のせん断における  $b$  の影響

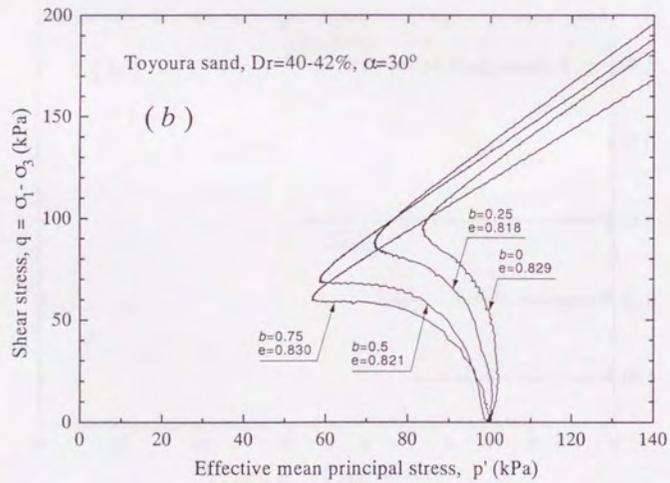
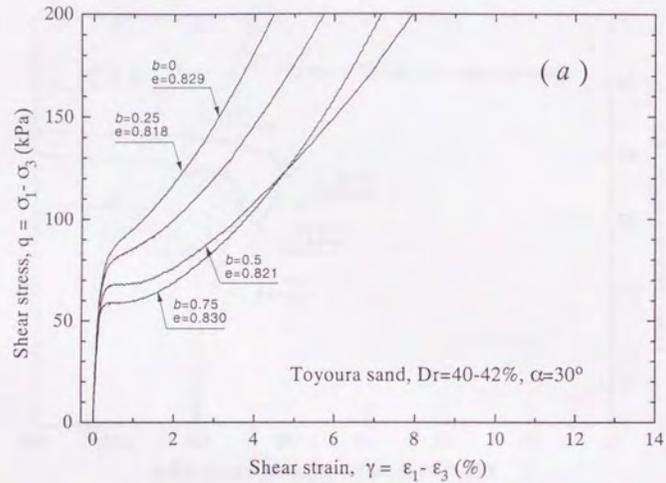
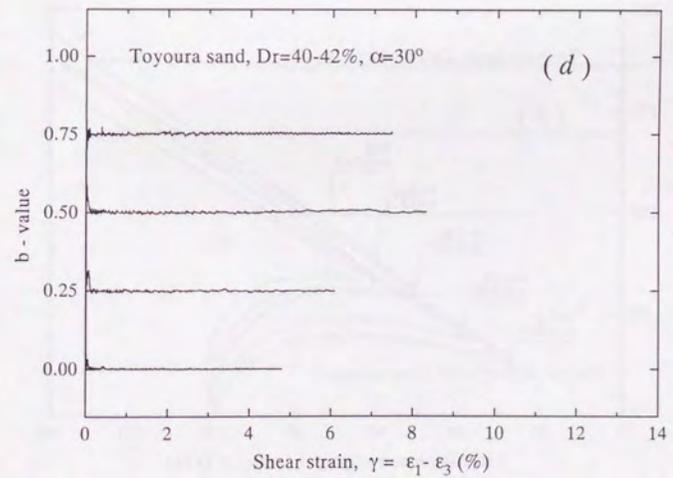
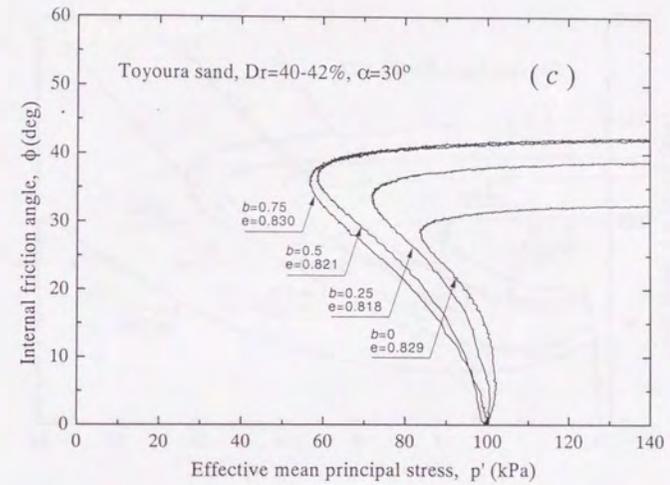


図 5.27  $D_r \approx 40\%$ ,  $\alpha = 30^\circ$ のせん断における  $b$  の影響



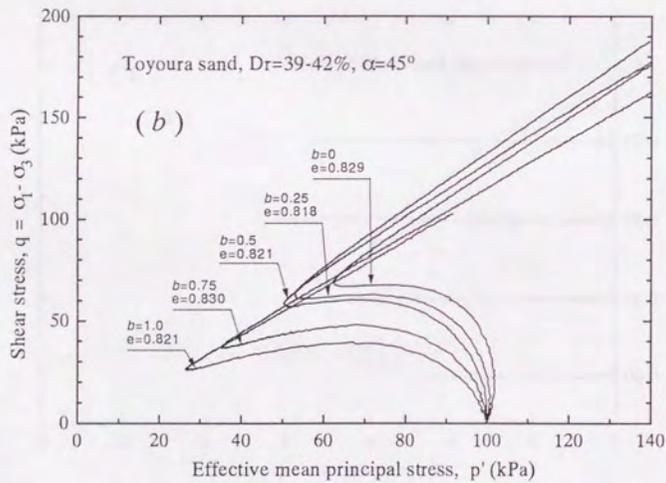
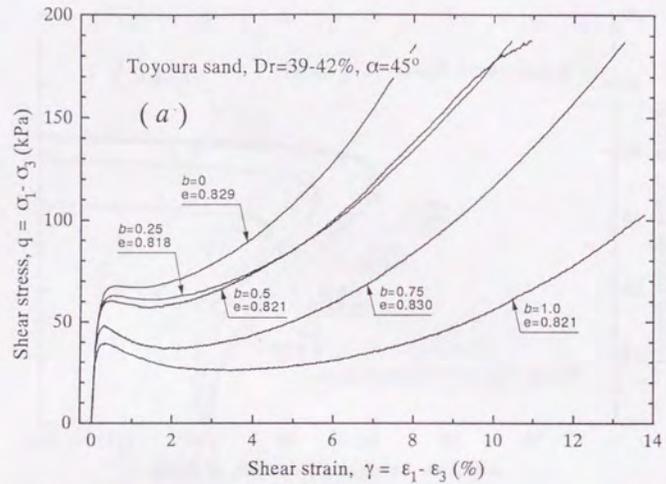
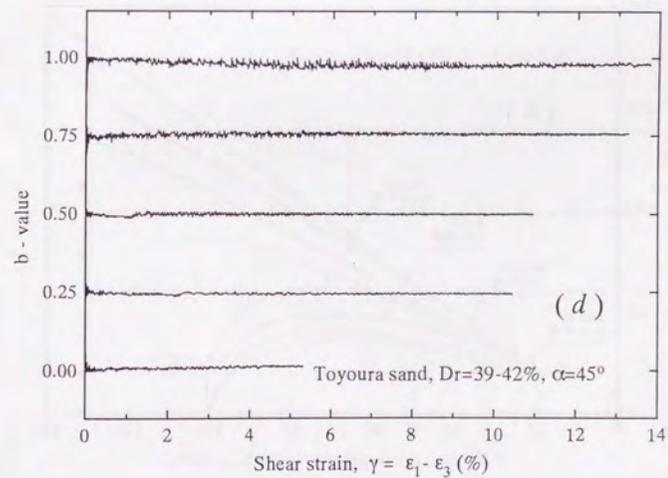
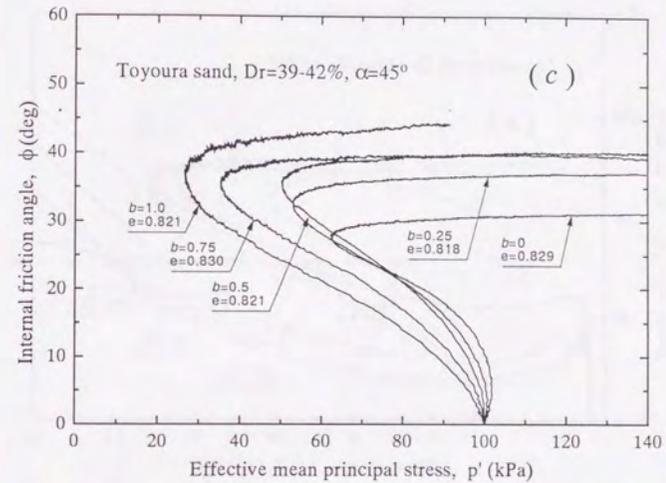


図 5.28  $D_r \approx 40\%$ 、 $\alpha = 45^\circ$ のせん断における  $b$  の影響



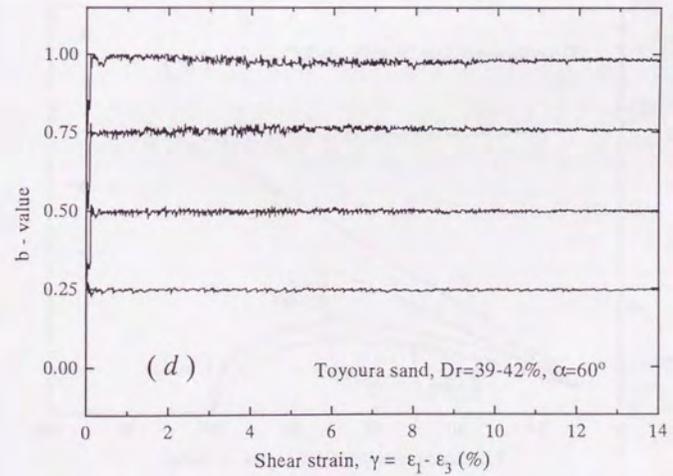
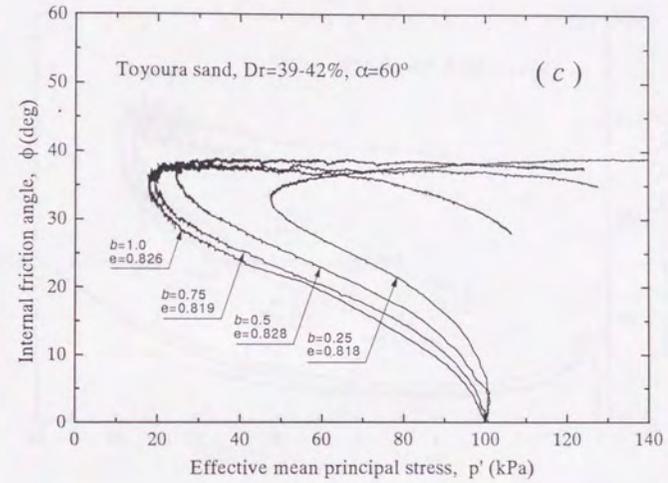
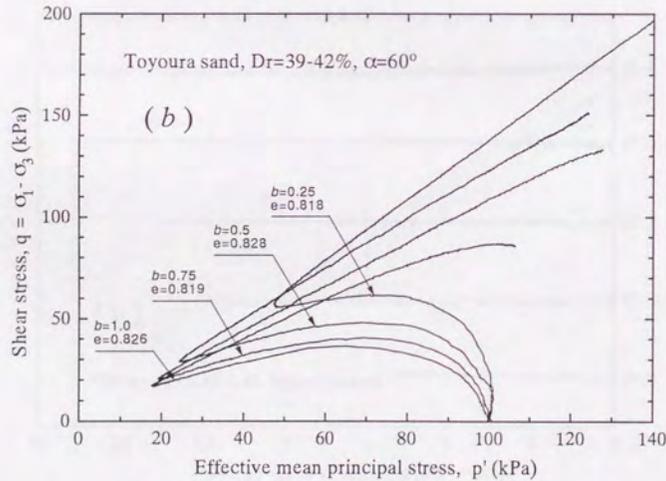
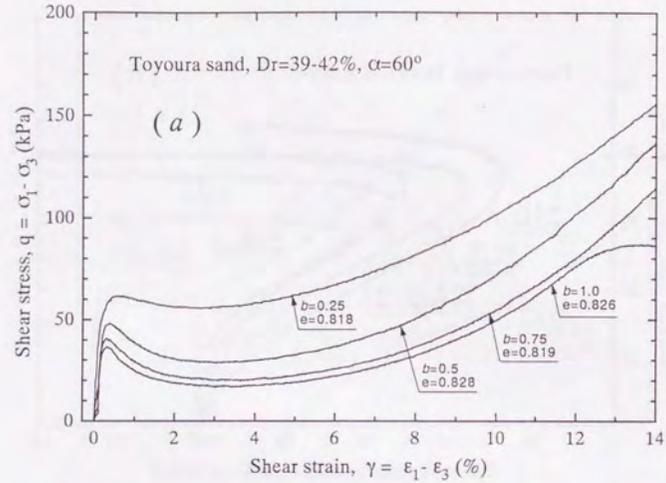


図 5.29  $D_r \approx 40\%$ 、 $\alpha = 60^\circ$ のせん断における  $b$  の影響

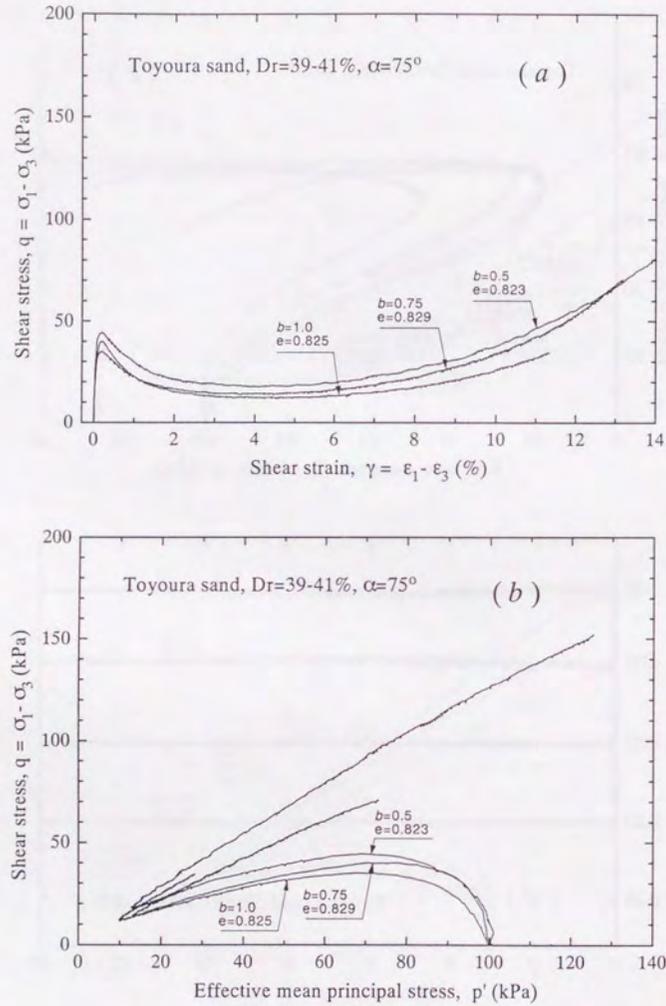
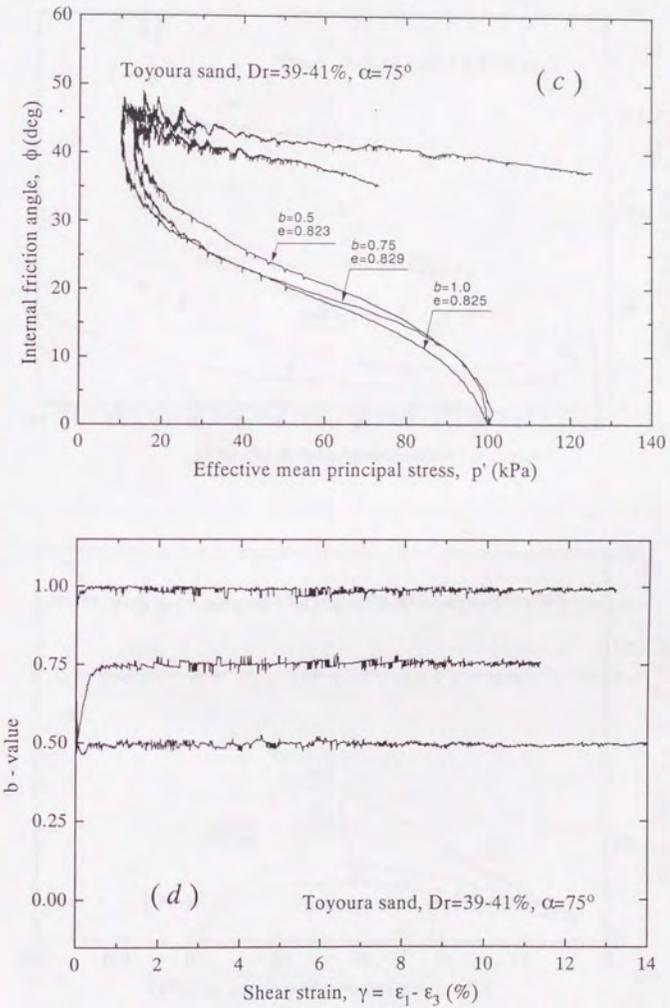


図 5.30  $D_r \approx 40\%$ 、 $\alpha = 75^\circ$ のせん断における  $b$  の影響



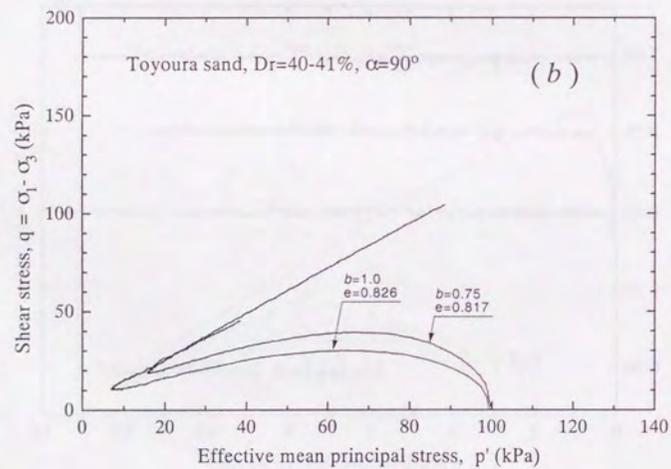
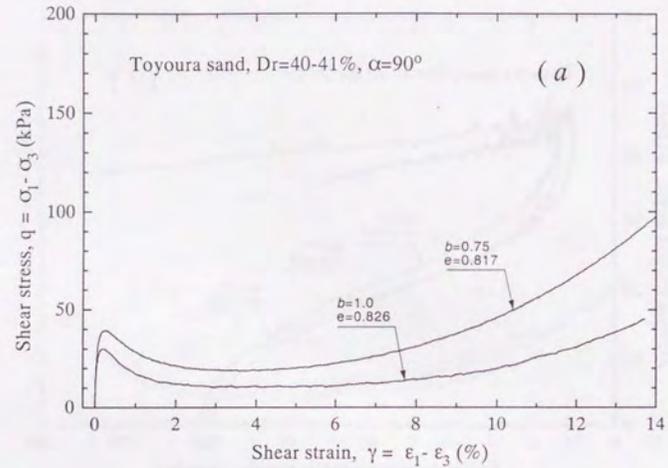
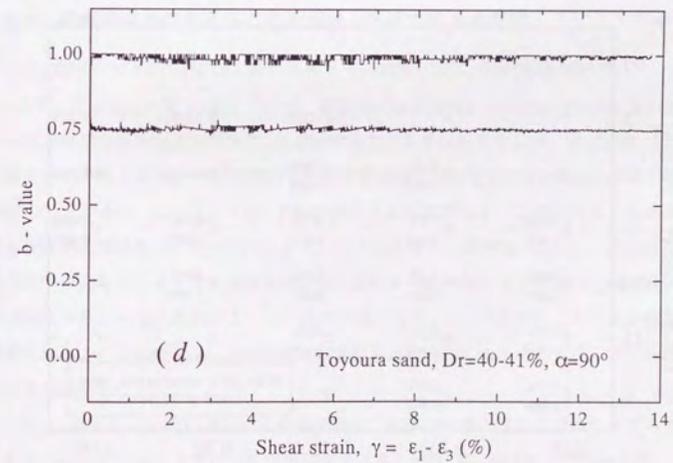
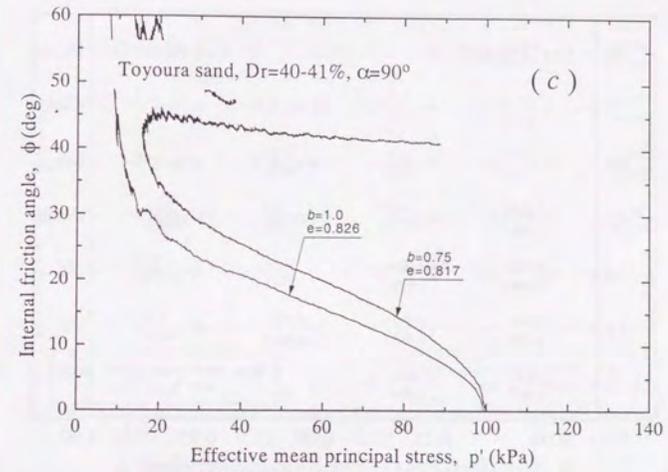


図 5.31  $D_r \approx 40\%$ 、 $\alpha = 90^\circ$ のせん断における  $b$  の影響



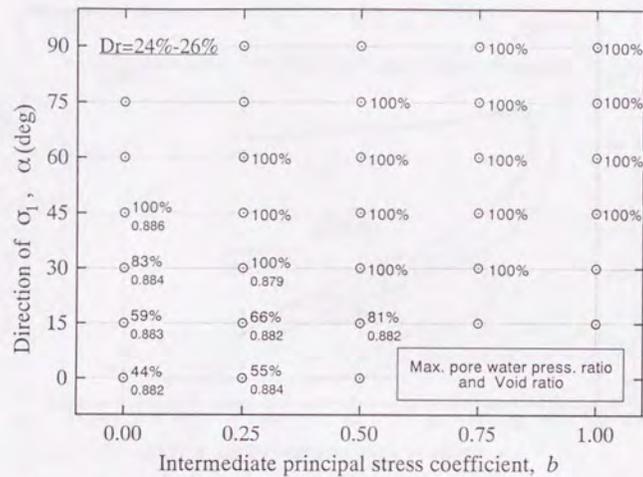


図 5.32  $\alpha \cdot b$  と最大過剰間隙水圧比 (流動ポテンシャル) の相関 ( $D_r \approx 25\%$ )

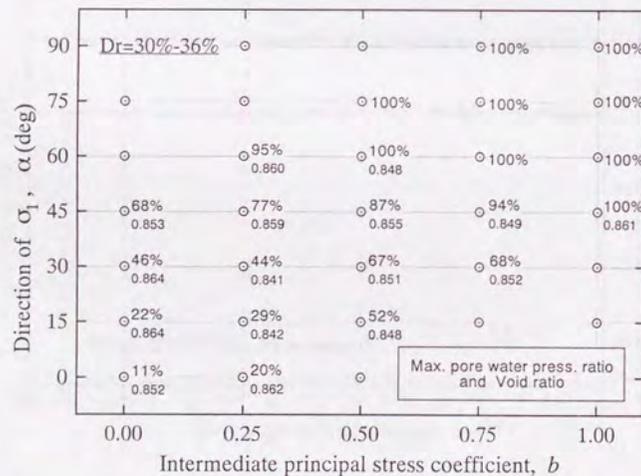


図 5.33  $\alpha \cdot b$  と最大過剰間隙水圧比 (流動ポテンシャル) の相関 ( $D_r \approx 30\%$ )

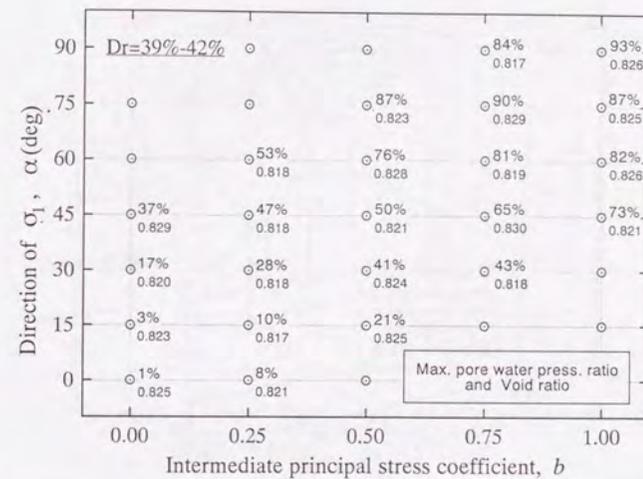


図 5.34  $\alpha \cdot b$  と最大過剰間隙水圧比 (流動ポテンシャル) の相関 ( $D_r \approx 40\%$ )

5.4.3 内部摩擦角に与える主応力方向・中間主応力の影響

図 5.3(c)～図 5.31(c) にせん断ともなう内部摩擦角  $\phi$  の変化を図示した。

まず、図 5.3(c)～図 5.15(c) には、変相点での摩擦角  $\phi_{PT}$  または変相点以降の大変形下での内部摩擦角は最大主応力方向  $\alpha$  によってあまり影響は受けないが、相対密度  $D_r = 40\%$ 、中間主応力係数  $b = 0.5$  の場合 (図 5.13) などを詳細に検討すると  $\phi_{PT}$  は  $\alpha$  によって 2、3 度のばらつきがあり、 $\alpha = 40^\circ \sim 60^\circ$  で最小値をとる傾向がある。この傾向は、排水試験における破壊時の摩擦角が主応力方向によって受ける影響と一致する。しかし、内部摩擦角は有効拘束圧の大きさによっても影響を受け、一般に有効応力が小さくなるほど破壊時等の内部摩擦角は大きくなる。今回のような非排水試験の場合には  $\alpha$  が大きくなるほど変相時の有効拘束圧が小さくなるので、上記の傾向は有効拘束圧の違いによるものも含んでいることに注意する必要がある。

次に、図 5.15(c)～図 5.31(c) を参照すると、 $b$  値が大きくなるにつれてあきらかに  $\phi_{PT}$  は大きくなっている。これは、中実供試体による三軸圧縮・伸張せん断試験 (図 trax-f1(c)～図 trax-f4(c)) では見られなかった傾向である。この場合にも、 $b$  が大きくなるほど変相時の有効拘束圧が小さくなるので、この傾向は有効拘束圧の違いによる効果も含んでいる。

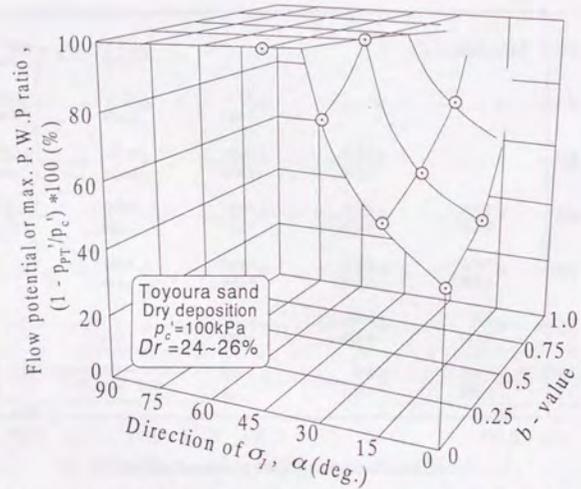


図 5.35  $\alpha \cdot b$  と最大過剰間隙水圧比 (流動ポテンシャル) の相関 ( $D_r \approx 25\%$ )

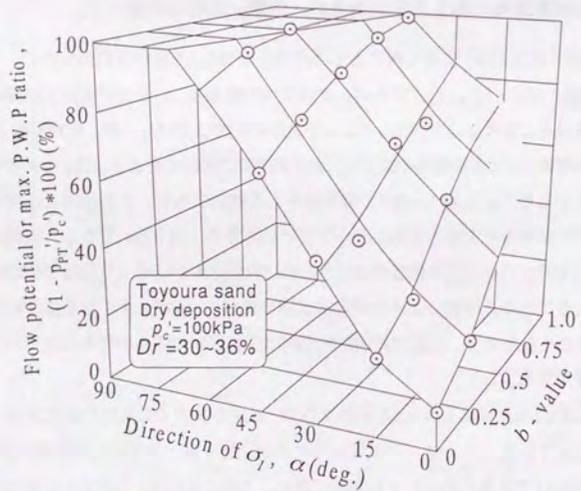


図 5.36  $\alpha \cdot b$  と最大過剰間隙水圧比 (流動ポテンシャル) の相関 ( $D_r \approx 30\%$ )

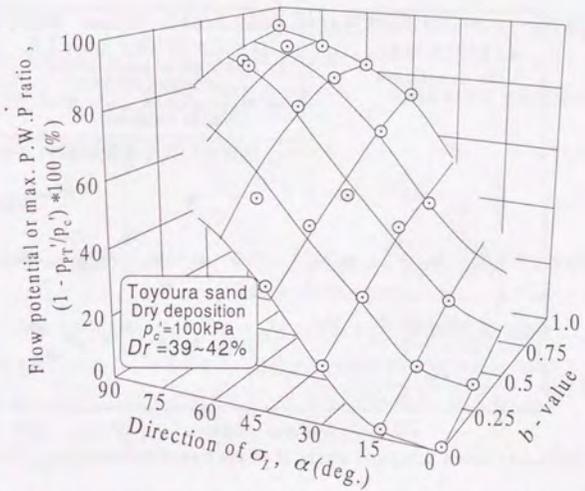


図 5.37  $\alpha \cdot b$  と最大過剰間隙水圧比 (流動ポテンシャル) の相関 ( $D_r \approx 40\%$ )

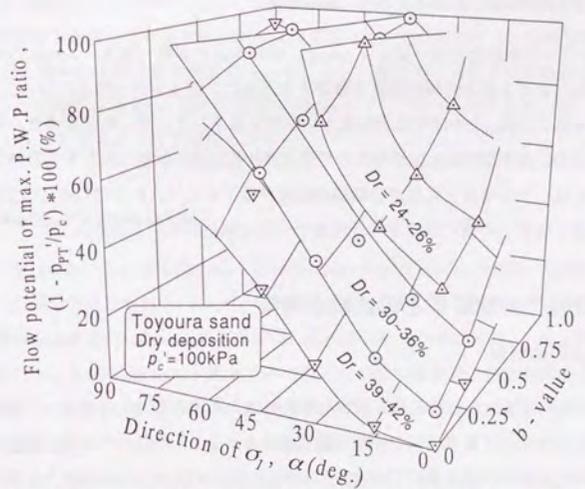
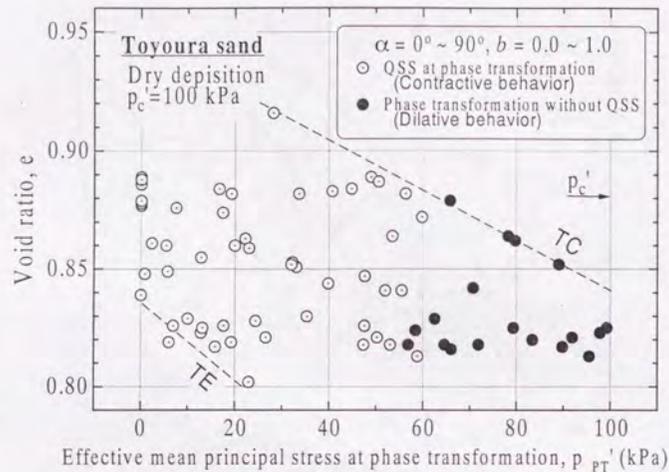


図 5.38  $\alpha \cdot b$  と最大過剰間隙水圧比 (流動ポテンシャル) の相関

図 5.39  $\alpha \cdot b$ 一定試験における変相状態

#### 5.4.4 せん断試験における応力制御の精度

ここで行った主応力方向一定  $\alpha = const.$ 、中間主応力係数一定  $b = const.$  の条件下でのせん断試験における応力制御の精度を確認するために、図 5.3(d)～図 5.31(d) に、せん断にともなう主応力方向  $\alpha$  と中間主応力係数  $b$  の推移を図示した。せん断初期のせん断応力比の小さな部分や、大きな間隙水圧が発生して完全液状化に近い状態になり有効応力レベルが非常に小さくなったときなどには応力制御の精度が低下するが、おおむね主応力方向  $\alpha$  と中間主応力係数  $b$  は所定の値に満足すべき精度で一定に保たれていると言える。

### 5.5 既往の実験結果との比較と考察

#### 5.5.1 比較の対象

上記の実験結果から、砂の非排水せん断挙動は3次元の応力条件によって支配されることがわかった。これまでに、多くの研究者によって中空ねじりせん断試験装置やいわゆる真の三軸せん断試験器を用いて3次元応力状態での土の排水せん断試験や非排水繰返しせん断試験が行われてきた。また、近年本研究と同様に砂の非排水単調せん断挙動に与える3

次元応力条件の影響を調べた研究例も見られるようになってきた。

土の大変形時の強度を決定するものは、主に過剰間隙水圧の発生量、すなわち土のダイレタンシー特性である。そこで、ここでは3次元応力条件下で行われた既往のせん断試験のうち、特にダイレタンシー特性について検討を行い、本研究における実験結果と比較する。

#### 5.5.2 中空円筒供試体を用いた実験

##### 中田らの研究

中田 (1995)、中田ら (1995) は、空中落下法によって作成した豊浦砂と秋穂砂 ( $D_{50} = 0.41mm, e_{max} = 0.958, e_{min} = 0.582$ ) の2種類の砂の供試体に対し、中空ねじりせん断試験器を用いて非排水単調載荷試験を行った。この実験では、初期等方拘束圧を100kPa、せん断中の中間主応力係数を  $b = 0.5$  とし、最大主応力の方向が砂の堆積面の鉛直方向からなす角度  $\alpha$  を  $15^\circ \sim 75^\circ$  に固定した試験を行っている。その結果、図 5.40 に示すようにいずれの砂についても  $\alpha$  が大きくなるほど軟化傾向を示した。

##### Vaid らの研究

Vaid ら (1995) は、水中落下法によって作成した Syncrude 砂の供試体に対し、中空ねじりせん断試験器を用いて非排水単調載荷試験を行った。この実験では、初期等方拘束圧を400kPa、せん断中の中間主応力係数を  $b = 0.5$  とし、最大主応力の方向が砂の堆積面の鉛直方向からなす角度  $\alpha$  を  $0^\circ \sim 90^\circ$  に固定した試験を行っている。その結果、図 5.41 に示すように  $\alpha$  が大きくなるほど軟化傾向を示した。

##### Symes, Hight, Shibuya らの研究

Symes ら (1984)、Symes ら (1985)、Shibuya and Hight (1987)、Symes ら (1988) は、水中落下法によって作成した Ham river 砂の供試体に対し、中空ねじりせん断試験器を用いて非排水単調載荷試験を行った。この実験では、初期等方拘束圧を200kPa、せん断中の中間主応力係数を  $b = 0, 0.5, 1.0$  とし、最大主応力の方向が砂の堆積面の鉛直方向からなす角度  $\alpha$  を  $0^\circ \sim 90^\circ$  に固定した試験を行っている。その結果、図 5.42 および図 5.43 に示すように  $\alpha$  が大きくなるほど、また  $b$  が大きくなるほど軟化傾向を示した。応力制御方式による載荷を行っているために、軟化過程では急激な変形が生じている。 $\alpha - p' - q$  空間におけるこれらのせん断試験結果の応力経路は固定されたそれぞれの  $b$  に対してひとつの曲面を形成

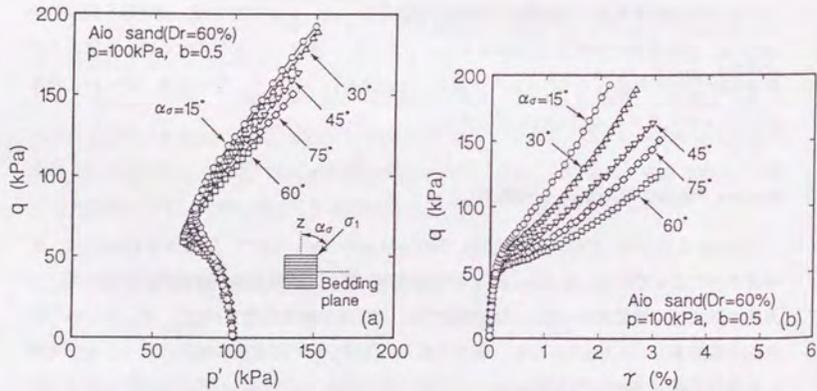
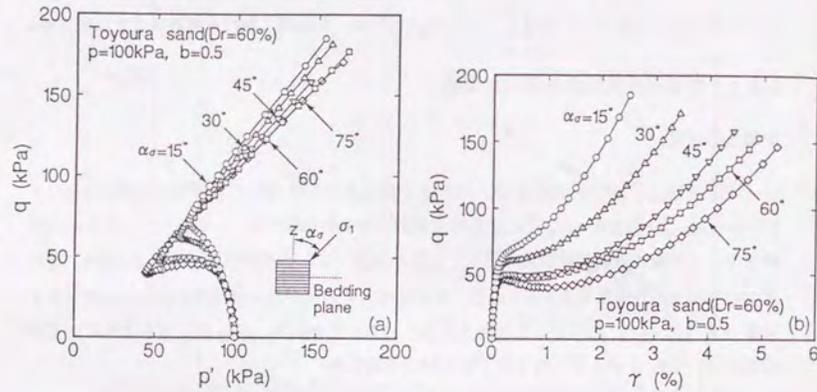


図 5.40 砂の非排水せん断に対する主応力方向の影響 (中田,1995)

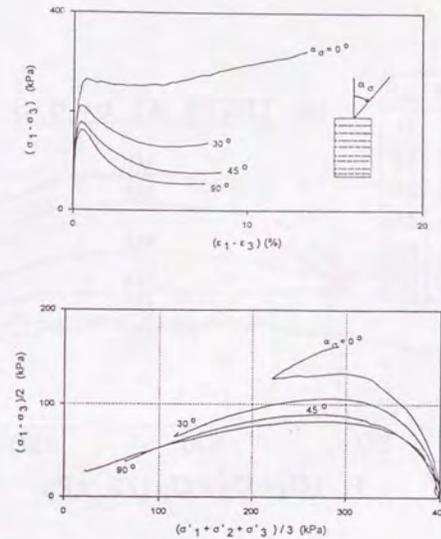


図 5.41 砂の非排水せん断に対する主応力方向の影響 (Vaid et al.,1995)

しており、これを bounding surface と名付けている。この bounding surface は主応力方向が連続的に回転する応力経路に対しても有効であることを確かめた。

Gutierrez の研究

Gutierrez(1989) は、空中落下法によって作成した豊浦砂の中空供試体に対して、平均有効平均主応力  $p' = 98kPa$  のもとで本研究と同様の最大主応力方向  $\alpha$  と中間主応力係数  $b$  の組み合わせ条件での排水単調載荷試験を行った。本研究で用いた中空ねじりせん断試験装置はこの Gutierrez が用いたものを自動化・改良したものである。当時 Gutierrez は応力制御でせん断を行っていた。

まず、主応力方向  $\alpha$  (Gutierrez の表記では  $\beta_\sigma$ ) が同一で中間主応力係数  $b$  の異なる排水せん断挙動を比較したところ、 $b$  が小さいほど圧縮的な挙動を示した (図 5.44)。これは本研究の傾向と正反対のものである。また、中間主応力係数  $b$  が同一で主応力方向  $\alpha$  の異なる排水せん断挙動を比較したところ、 $\alpha$  が大きいほど圧縮的な挙動を示した (図 5.45)。Gutierrez はこれらの観察結果をもとにして主応力方向が連続的に変化する応力経路に対応できる構成則を提案したが、これは 2 次元の構成則であり  $b$  の評価は取り込まれていない。

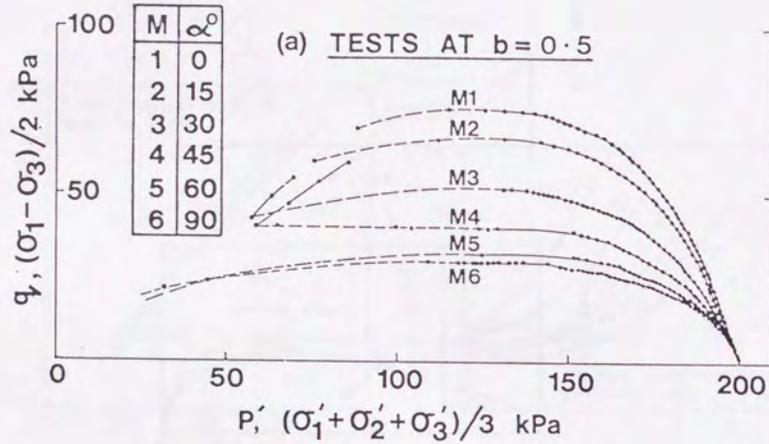


図 5.42 砂の非排水せん断に対する主応力方向の影響 (Symes et al., 1985)

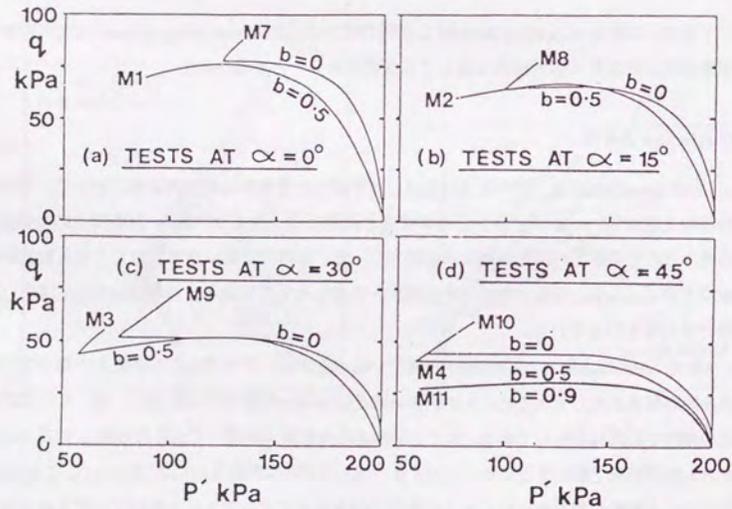


図 5.43 砂の非排水せん断に対する中間主応力の影響 (Symes et al., 1985)

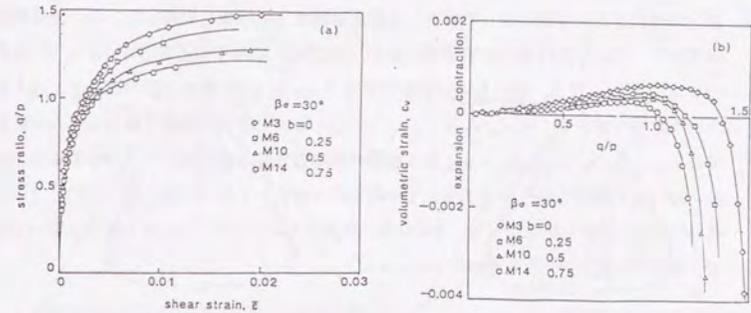


図 5.44 砂の排水せん断に対する中間主応力の影響 (Gutierrez, 1989)

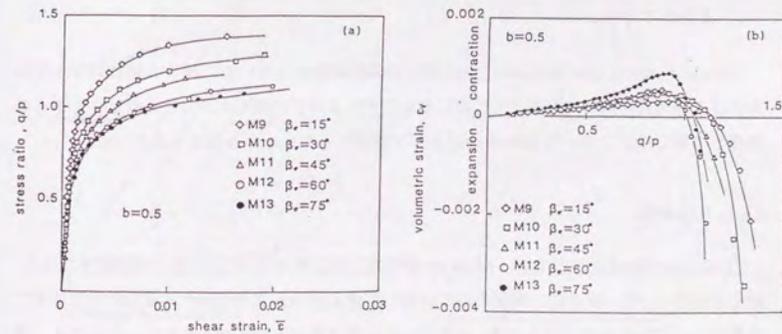


図 5.45 砂の排水せん断に対する主応力方向の影響 (Gutierrez, 1989)

## 5.5.3 直方体供試体を用いた3主応力実験

## 山田らの研究

山田(1979)、Yamada and Ishihara(1979,1981)は、水中落下法によって作成した密な富士川砂の立方体供試体に対して排水・非排水単調せん断試験を実施した。砂の堆積面は水平であり、主応力方向は砂の堆積面に対して直交または水平のどちらか( $\alpha = 0^\circ$  または  $\alpha = 90^\circ$ )に限られる。最大主応力が鉛直の場合( $\sigma_1 = \sigma_z$ )・最大主応力と最小主応力が両方とも水平の場合( $\sigma_1 = \sigma_y, \sigma_2 = \sigma_z, \sigma_3 = \sigma_x$ )・最大主応力が水平で最小主応力が鉛直の場合( $\sigma_1 = \sigma_y, \sigma_2 = \sigma_x, \sigma_3 = \sigma_z$ )の3種類の主応力方向の組み合わせについて平均主応力  $p = 98kPa(1.0kgf/cm^2)$  一定のもとで中間主応力係数  $b$  を0、0.268、0.5、0.732、1.0の5通りに設定してせん断を行った。その結果、排水せん断・非排水せん断の両方について次のようなダイレタンシー特性を得た(図5.46)。

- 最大主応力が鉛直の場合( $\sigma_1 = \sigma_z$ )には、ダイレタンシー特性は  $b$  の影響をあまり受けない。
- 最大主応力と最小主応力が両方とも水平で中間主応力が鉛直の場合( $\sigma_1 = \sigma_y, \sigma_2 = \sigma_z, \sigma_3 = \sigma_x$ )には、 $b$  が大きくなるほどせん断挙動が膨張的となる。
- 最大主応力と中間主応力が水平で最小主応力が鉛直の場合( $\sigma_1 = \sigma_y, \sigma_2 = \sigma_x, \sigma_3 = \sigma_z$ )には、 $b = 0$  および  $b = 1$  で同程度に膨張的であり、その中間ではやや膨張傾向が小さかった。

Lewin, Yamada and Ishihara(1982)はこの実験結果をもちいて、同じ  $b$  値に対する主応力主ひずみ関係が同一になるように補正することによって初期等方砂のせん断に与える  $b$  の影響を予測したところ、 $b$  が大きいほど若干膨張的となるという結果を得た(図5.47)。

## Ladeらの研究

Lade and Duncan(1973)は、Montrey砂の立方体供試体を用いて排水せん断試験を行った。最小主応力  $\sigma_3$  を一定とし、明記されていないが最大主応力方向は砂の堆積面に対して常に垂直になっているものと思われる。 $b$  を0から1まで変化させてせん断を行ったところ、せん断初期においては  $b$  が大きくなるほど圧縮量が大きくなった。ただし、 $b$  が大きくなるほど平均主応力も大きくなっている。

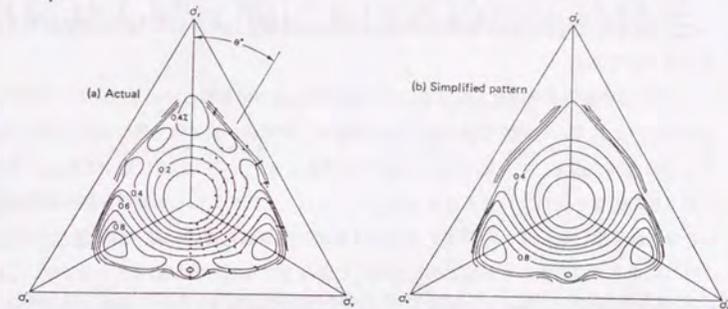


図 5.46 砂の排水せん断に対する3主応力の影響 (Sewin,1982)

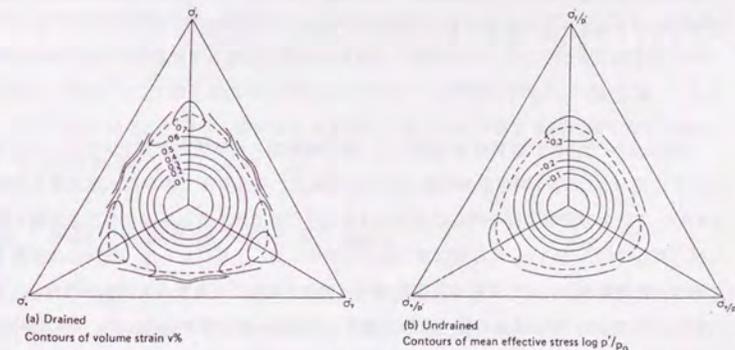


図 5.47 等方供試体のせん断挙動予測 (Sewin,1982)

#### 5.5.4 本研究との比較検討

まず、砂の非排水単調せん断挙動に与える主応力方向の影響について検討すると、すべての研究において最大主応力方向が砂の堆積面に対して鉛直の時にせん断挙動は最も膨張的となり、最大主応力方向が砂の堆積面に対して平行の時に最も収縮的となることで一致している。これは、明らかに砂が堆積時の重力方向には圧縮されにくいという初期構造異方性を有するためである。

一方、砂の非排水単調せん断挙動に与える中間主応力の影響については、その傾向がはっきりせずメカニズムも明瞭ではない。その原因は、供試体が異方性を持つ場合には、たとえ主応力の方向を固定したとしても  $b$  を変化させると3次元的な応力状態が変化して供試体の異方性の影響を免れないことにある。たとえば、上記の山田らの真の三軸試験装置を用いたせん断試験において、中間主応力方向を鉛直に固定した場合には  $b$  が大きくなるほど、すなわち鉛直方向の主応力が相対的に大きくなるほどせん断挙動が膨張的となるが、これは明らかに中間主応力の大きさの影響と言うよりは鉛直に圧縮されにくい供試体の異方性のためである。ひるがえって、本研究のように中間主応力が水平方向に固定され、最大主応力と最小主応力の方向が鉛直面内で変化する場合を考えると、式(3.66)および式(3.69)より  $b$  の増加は鉛直圧縮応力  $\sigma_z$  の減少をもたらすことがわかる。従って、大きな  $b$  値は相対的に供試体の鉛直方向に伸張傾向の変形を与え、供試体の異方性によってダイレタンスー特性が圧縮的となっていることが考えられる。そこで、本研究で明らかになった砂の非排水単調せん断挙動に与える中間主応力の影響は、中間主応力の方向が砂の堆積面に対して平行であるときのものであることを明示することが必要である。

#### 5.6 まとめ

中空ねじりせん断試験装置をもちいて、砂の堆積面の鉛直方向と最大主応力  $\sigma_1$  の方向のなす角度  $\alpha$  および中間主応力係数  $b$  が一定に保たれる条件下での非排水単調せん断試験を行い、主応力方向および中間主応力の大きさが砂の非排水大変形挙動に与える影響を詳細に調べた。中間主応力  $\sigma_2$  の方向は常に砂の堆積面に対して平行とした。試料は豊浦標準砂であり、乾燥堆積法によって相対密度約25%、33%、40%の3種類の供試体を作成し、各々に対して様々な  $\alpha$  および  $b$  の組み合わせ条件下でのせん断試験を実施した。その結果、主応力方向角  $\alpha$  が大きいほど、また中間主応力係数  $b$  が大きいほどせん断挙動は圧縮的となり、大きな間隙水圧を発生して残留強度が小さくなることがわかった。

## 第6章

### 単純せん断状態における砂の流動特性

#### 6.1 はじめに

三軸圧縮・伸張試験および中空ねじり試験器を用いた主応力方向・中間主応力係数一定せん断試験によって、砂の非排水単調せん断特性は、最大主応力の堆積面に対する方向と中間主応力の大きさという2つの応力条件によって著しい影響を受けることが明らかとなった。従って、非排水単調せん断試験によって地盤の液化・流動化を評価するためには原位置において上記の応力条件がどうなっているかを見積もり、土の挙動を正しく予測する必要がある。

一方、広い傾斜地盤、長い線状の盛土などのある程度大規模な構造を対象とする多くの場合、その変形は平面ひずみ状態あるいは単純せん断状態となっている。そこで、地盤中の応力条件の分布を考慮せずに簡易に地盤の液化・流動化を予測するためには平面ひずみ・単純せん断条件での土の非排水せん断特性を用いることが適当である。

ここでは、中空ねじりせん断試験装置を用いて豊浦砂の非排水単調単純せん断試験を行い、そのせん断挙動について考察する。

#### 6.2 単純せん断試験条件と実験結果

3.8節にて説明したとおり、非排水単純せん断試験は中空ねじりせん断試験器を用いて、供試体高さ一定・供試体体積一定(非排水)・内セル体積一定の条件のもとでねじりせん断を加えることによって行った。試料はすべて豊浦標準砂である。本研究では、供試体高さが約20cmもの約10cmのもの2シリーズの単純せん断試験を行った。後で6.7節に述べるように、供試体高さ10cmの実験は供試体上下端面拘束の影響を強く受けていると考えら

れるので、単純せん断時の砂の非排水挙動の評価には供試体高さ 20cm の実験結果を用い、より大変形条件での挙動の評価などに補助的に供試体高さ 10cm の実験結果を用いることとする。以下に、この 2 シリーズの単純せん断試験の概要を述べる。

### 6.2.1 供試体高さ 20cm の単純せん断試験

第5章では、高さ 20cm の色々な密度の中空供試体を用いて主応力方向  $\alpha$  と中間主応力係数  $b$  が一定の条件での非排水せん断試験を行った。これに対応してここでは幅広い密度の豊浦砂中空供試体を非排水単純せん断することにより、単純せん断挙動と主応力方向・中間主応力係数一定の条件下でのせん断特性との比較検討を行う。また、色々な初期圧密拘束圧を与えることにより、第4章で述べた三軸圧縮・伸張せん断試験と同様の方法によって幅広い初期条件下での単純せん断条件における砂の流動ポテンシャルを求め、三軸圧縮・伸張せん断時の流動特性と比較検討する。 $\alpha, b$  一定試験と同様に、試料はすべての試験で豊浦標準砂を用い、供試体作成方法は乾燥堆積法である。

まず、主応力方向・中間主応力係数一定試験の場合と同様に、初期圧密を等方応力状態とする単純せん断試験を行った。圧密有効拘束圧は  $p'_c = 50 \sim 300kPa$ 、背圧はおおむね  $u = 100kPa$  とした。実際の地盤では初期状態が異方圧密状態であるので単純せん断にともなう主応力方向の回転や中間主応力の大きさの変動の傾向が等方圧密状態からせん断した場合と異なることが考えられる。そこで、次に初期応力条件を鉛直有効拘束圧  $p'_v = 200kPa$ 、水平有効拘束圧  $p'_h = \sigma'_r = \sigma'_\theta = 100kPa$ 、背圧  $u = 100kPa$  の異方圧密状態とする単純せん断試験を行った。この場合、初期圧密応力比は  $K_0 = p'_h/p'_v = 0.5$ 、有効平均拘束圧  $p'_c = 133.3kPa$  となる。

これらの単純せん断試験の試験条件を表 6.1 に、また、試験結果を図 6.1~6.5 に示した。

### 6.2.2 供試体高さ 10cm の単純せん断試験

本研究で用いた中空ねじりせん断装置では、ねじり角度が最大  $40^\circ$  であるために、供試体の高さを約 20cm とした場合には最大ねじりせん断ひずみ  $\gamma_{z\theta \max}$  は 12% 程度となる。ここではさらに大きなせん断変形下での挙動を調べるために、供試体高さを約 10cm としてせん断ひずみレベルを供試体高さ 20cm の場合の 2 倍とする。供試体高さを小さくすると、供試体上下端面拘束の影響が大きくなるが、単純せん断試験では供試体水平断面の形状と大き

表 6.1 単純せん断試験 (供試体高さ約 20cm)

試験 番号 No.	初期圧密 応力比 $p'_h/p'_v$	圧密後 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 $r_c$
a17	1.0	0.660	83	50	50	0	1.0
a31	1.0	0.784	51	50	43.0	14	1.2
a15	1.0	0.827	39	50	37.5	25	0.8
a16	1.0	0.844	35	50	28.6	43	1.7
a09	1.0	0.858	31	50	0	100	$\infty$
a27	1.0	0.872	28	50	0	100	$\infty$
a18	1.0	0.804	46	100	83.2	17	1.2
07	1.0	0.816	42	100	66.0	34	1.5
50	1.0	0.818	42	100	64.6	35	1.5
a19	1.0	0.826	40	100	73.9	26	1.4
a12	1.0	0.835	37	100	51.0	49	2.0
a06	1.0	0.840	36	100	18.5	82	5.4
04	1.0	0.841	36	100	52.0	48	1.9
09	1.0	0.844	35	100	39.8	60	2.5
a11	1.0	0.855	32	100	26.9	73	3.7
a10	1.0	0.861	31	100	10.5	90	9.5
06	1.0	0.863	30	100	22.1	78	4.5
05	1.0	0.874	27	100	17.4	83	5.7
03	1.0	0.876	27	100	7.5	92	13.3
a24	1.0	0.878	26	100	17.0	83	5.9
74	1.0	0.888	23	100	0.0	100	$\infty$
a22	1.0	0.825	40	200	135.5	32	1.5
a13	1.0	0.838	37	200	95.7	52	2.1
a07	1.0	0.845	35	200	65.5	67	3.1
a21	1.0	0.857	32	200	81.4	60	2.5
a25	1.0	0.859	31	200	61.7	69	3.2
a30	1.0	0.893	22	200	22.8	89	8.8
a08	1.0	0.838	37	300	129.1	57	2.3
a26	1.0	0.845	35	300	90.7	70	3.3
a28	1.0	0.867	29	300	57.3	81	5.2
a29	1.0	0.885	24	300	36.5	88	8.2
76	0.5	0.835	37	133.3	78.4	41	1.7
75	0.5	0.858	31	133.3	33.2	75	4.0
77	0.5	0.880	26	133.3	0.0	100	—

表 6.2 単純せん断試験 (供試体高さ約 10cm)

試験 番号 No.	初期圧密 応力比 $p_h'/p_v'$	圧密後 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 $r_c$
10	1.0	0.911	17	50	0.0	100	$\infty$
09	1.0	0.909	18	100	0.0	100	$\infty$
08	1.0	0.905	19	200	11.5	94	17.4
04	1.0	0.897	21	300	35.6	88	8.4
06	1.0	0.902	20	50	0.0	100	$\infty$
18	1.0	0.897	21	100	3.9	96	25.6
02	1.0	0.893	22	200	8.1	96	24.7
05	1.0	0.888	23	300	48.4	84	6.2
27	1.0	0.887	24	50	9.0	82	5.5
23	1.0	0.881	24	100	26.9	74	3.7
24	1.0	0.877	26	200	65.7	67	3.0
26	1.0	0.870	28	300	105.2	65	2.9
12	1.0	0.875	27	50	13.0	74	3.8
28	1.0	0.873	27	100	38.2	62	2.6
16	1.0	0.868	29	200	55.1	72	3.6
15	1.0	0.864	30	300	95.1	68	3.2
19	0.5	0.882	25	133	26.3	74	5.1
20	0.5	0.882	25	100	22.7	77	4.4

さが全く変化しないので上下端面拘束の影響は非常に小さいと期待される。ここでは初期拘束圧と供試体密度の影響を調べるために、初期有効拘束圧  $p_c' = 50 \sim 300 \text{ kPa}$ 、圧密前の有効拘束圧 20kPa 時の間隙比  $e_{20} = 0.877 \sim 0.913$  の範囲でせん断試験を行った。

これらの単純せん断試験の試験条件を表 6.2 に、また、試験結果を図 6.6~6.9 に示した。

### 6.3 単純せん断にともなう主応力の回転と中間主応力の変化

主応力方向・中間主応力係数一定試験によって、主応力の方向と中間主応力の大きさが砂の非排水単調せん断特性に非常に大きな影響を与えることがわかった。そこで、単純せん断条件下でのせん断特性を考える上で、主応力の方向と中間主応力の大きさがどのようになっているのかを知ることが重要になってくる。ここでは、図 6.1~図 6.5 に示した、供試体高さ 20cm の単純せん断試験結果を検討する。

#### 等方圧密状態からの単純せん断

まず、図 6.1(c)(d)~図 6.4(c)(d) によって等方圧密状態から非排水単調せん断を行った場合を見ると、最大主応力  $\sigma_1$  が砂の堆積面 (水平面) の鉛直方向からなす角度  $\alpha$  はせん断初期から大変形状態に至るまでほぼ一貫して  $40^\circ \sim 45^\circ$  に保たれていることがわかる。また、中間主応力係数  $b$  は、せん断初期においてはほぼ 0.5 であるが、ピーク強度に達する少し前から  $b$  値が減少し始め、変相点 (準定常状態) では約 0.25 となり、以後の大変形状態では  $b = 0.25$  が保たれる。この主応力の方向と中間主応力の変化の特性は供試体の密度によらず、同様の傾向を示す。

#### 異方圧密状態からの単純せん断

次に図 6.5(c)(d) によって、鉛直応力が水平拘束圧の 2 倍である異方圧密状態から非排水単調せん断を行った場合を検討する。初期状態は三軸圧縮状態にあるので、 $\alpha = 0^\circ$ 、 $b = 0$  である。せん断が開始されると主応力方向は急激に回転し、変相点付近で  $\alpha = 40^\circ$  となり、以後の大変形状態ではほぼ  $\alpha = 40^\circ$  が保たれる。また、中間主応力係数  $b$  はせん断開始と共に増大し、変相点付近でおおよそ  $b = 0.25$  となって、以後の大変形状態で  $b = 0.25$  が保たれる。

以上の観察から、砂を単純せん断条件下で非排水単調せん断した場合、主応力の回転と中間主応力の変化はせん断初期に完了し、変相状態以降の大変形状態では、初期圧密状態によ

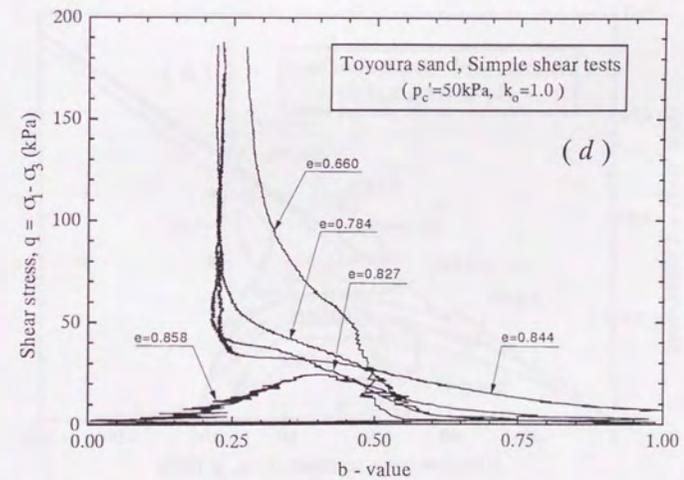
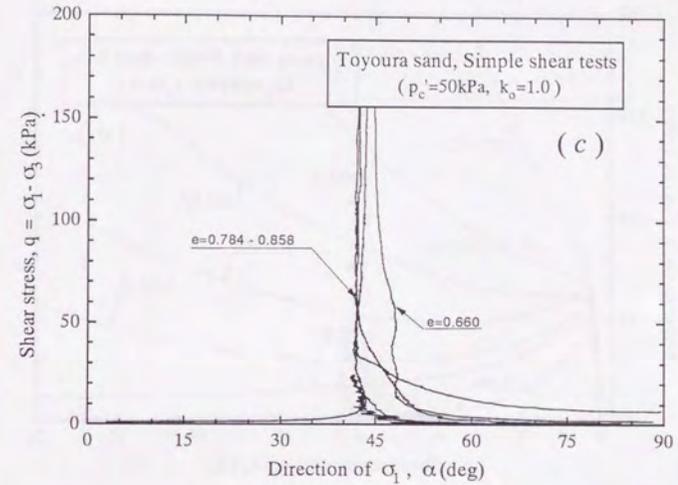
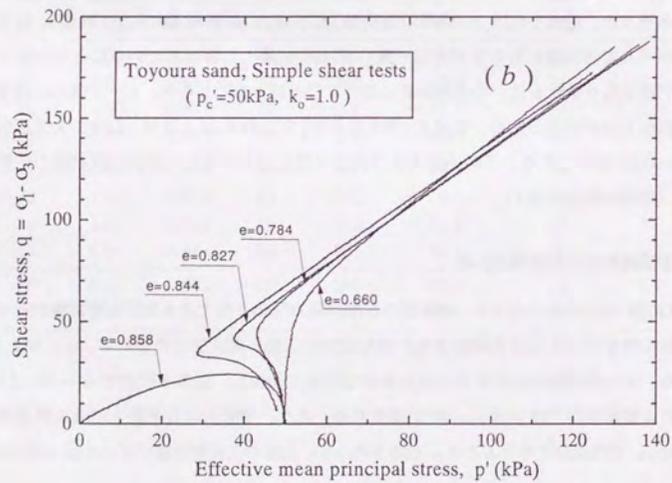
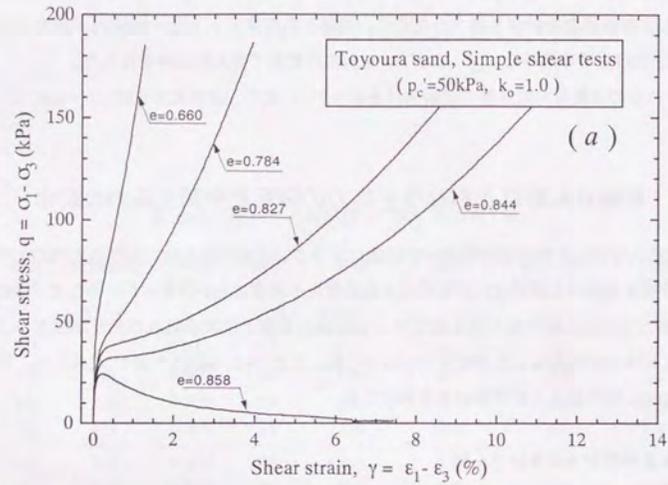
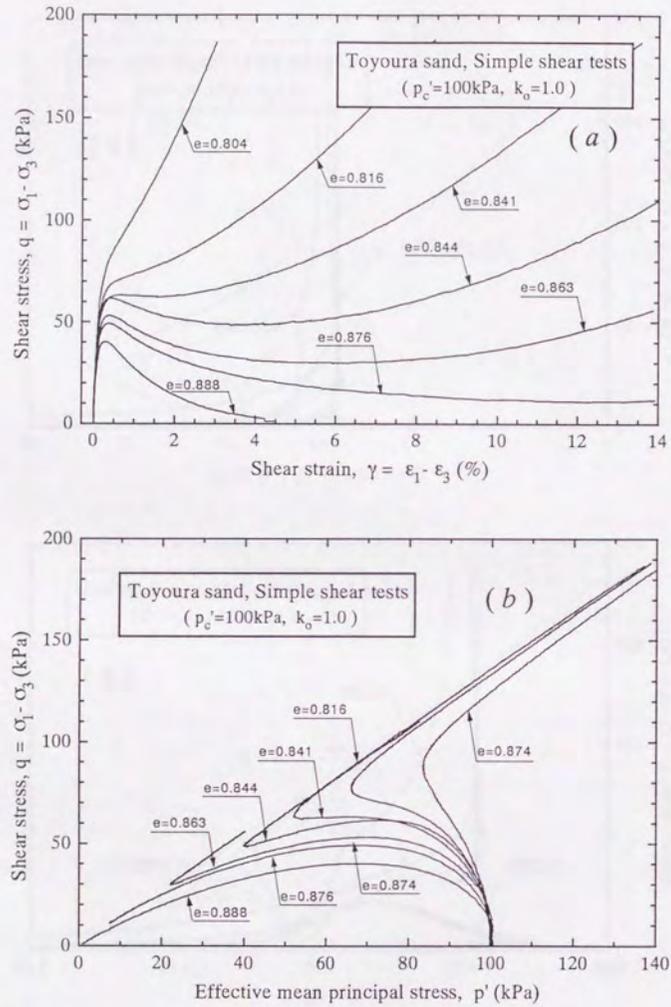
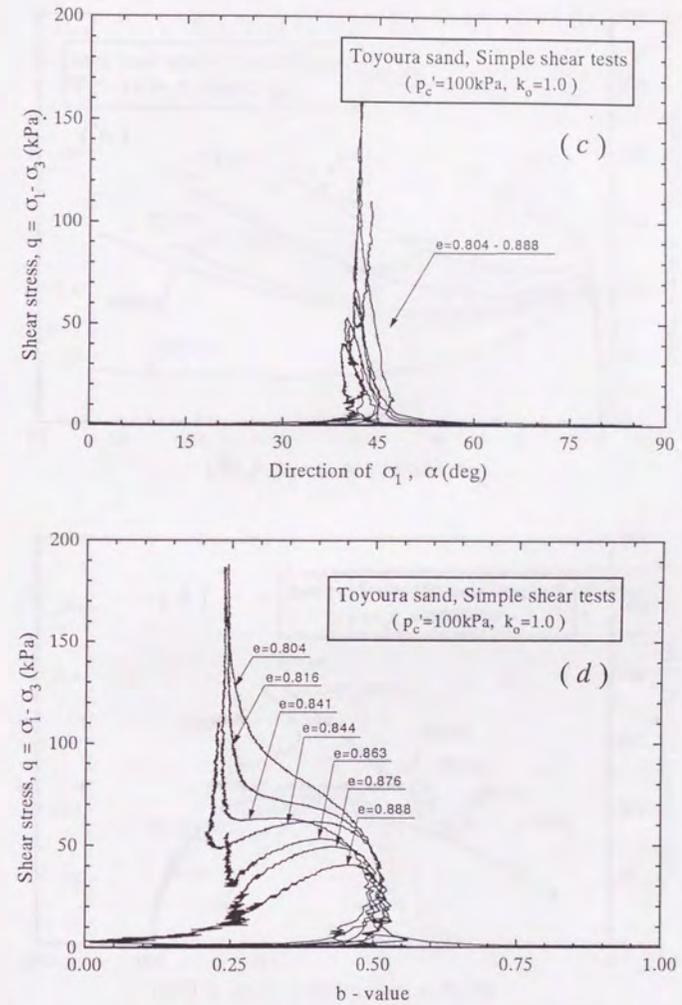


図 6.1 豊浦砂の単純せん断試験 ( $p'_c = 50$  kPa)

図 6.2 豊浦砂の単純せん断試験 ( $p'_c = 100 \text{ kPa}$ )

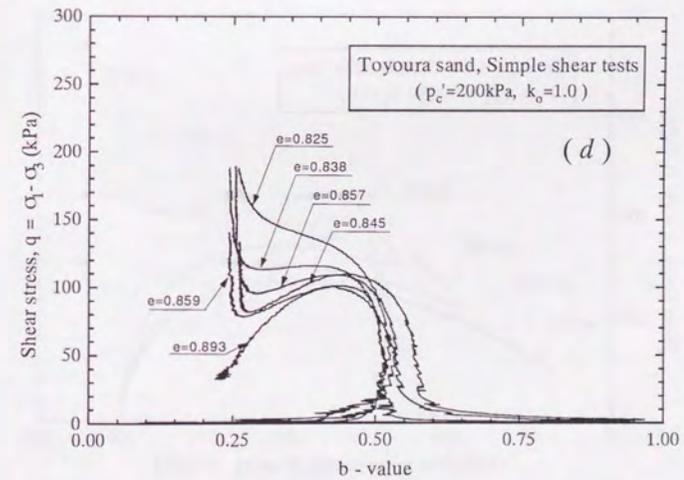
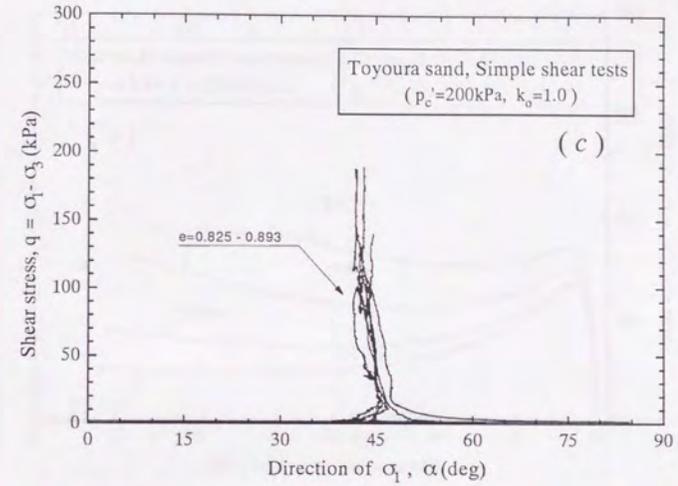
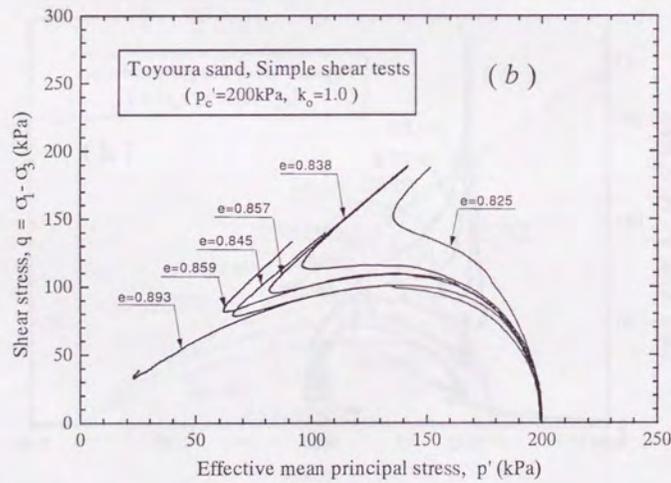
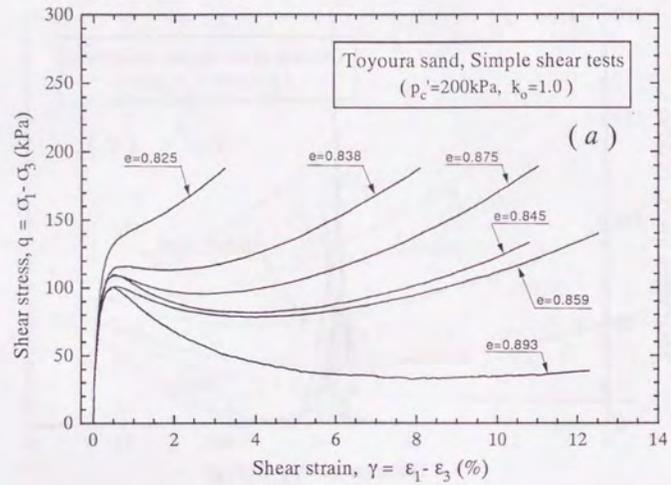


図 6.3 豊浦砂の単純せん断試験 ( $p'_c = 200$  kPa)

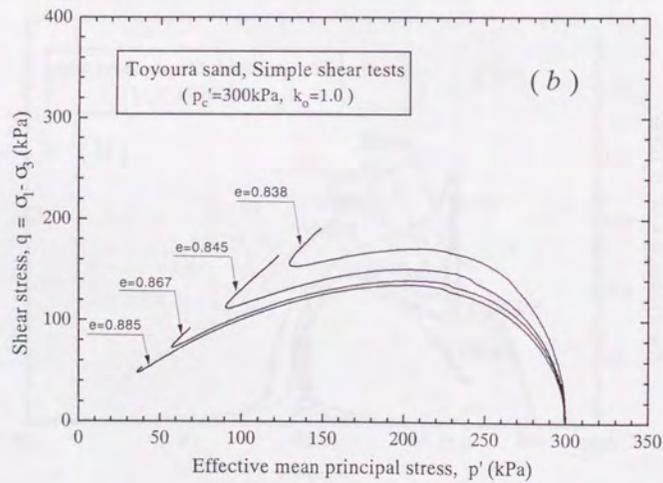
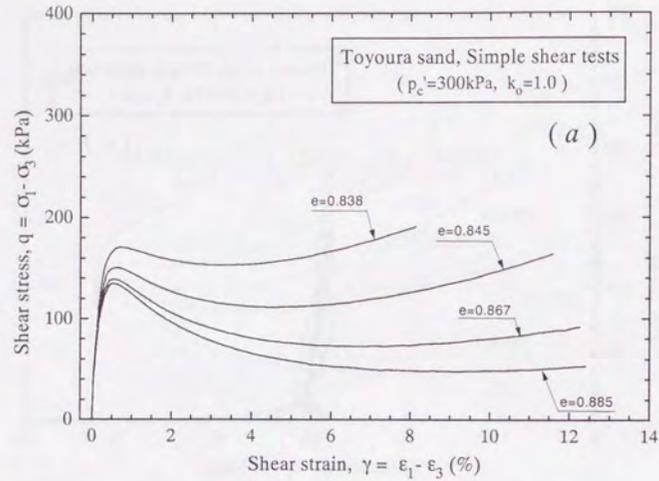
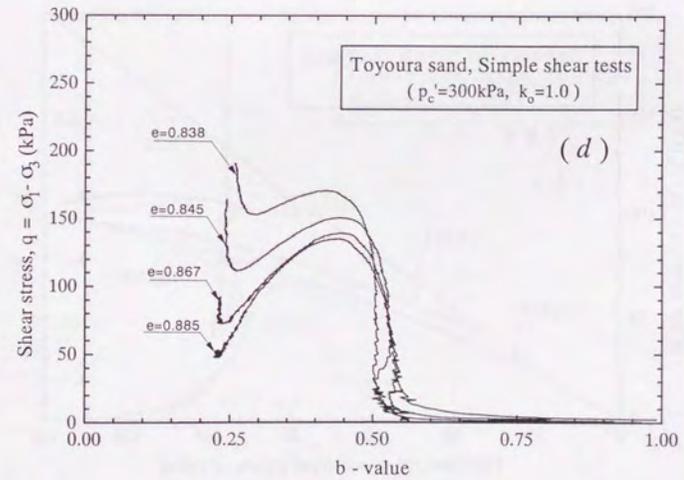
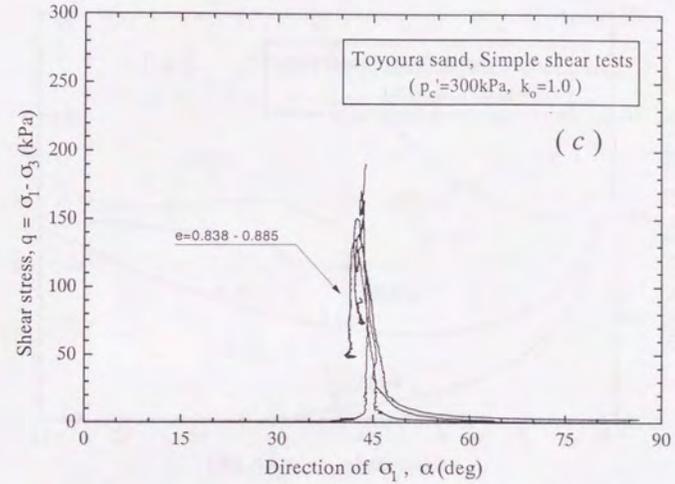


図 6.4 豊浦砂の単純せん断試験 ( $p'_c = 300\text{kPa}$ )



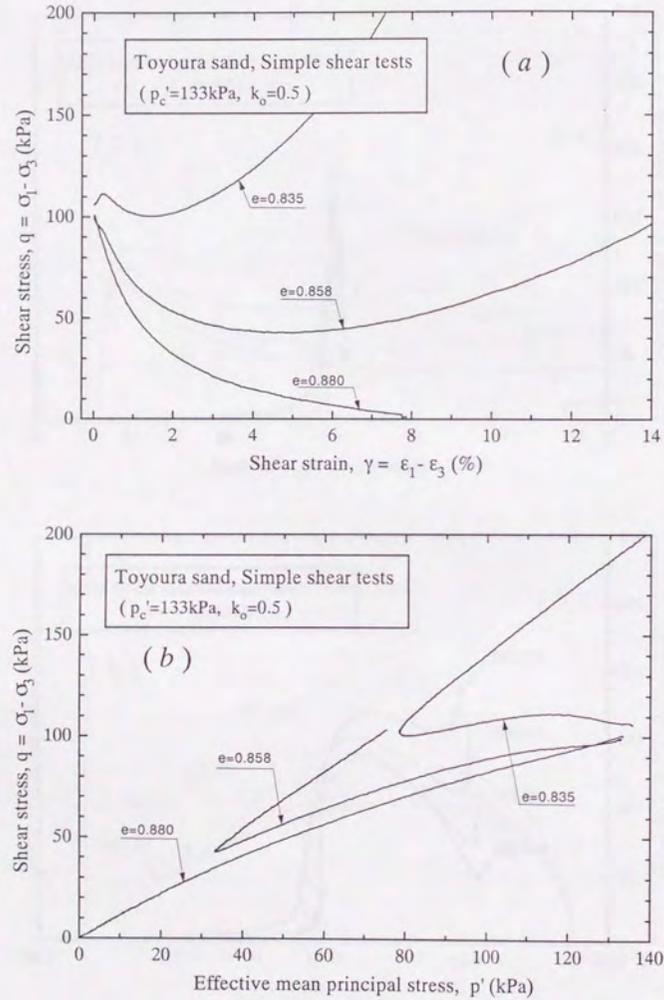


図 6.5 豊浦砂の単純せん断試験 (初期異方圧密)

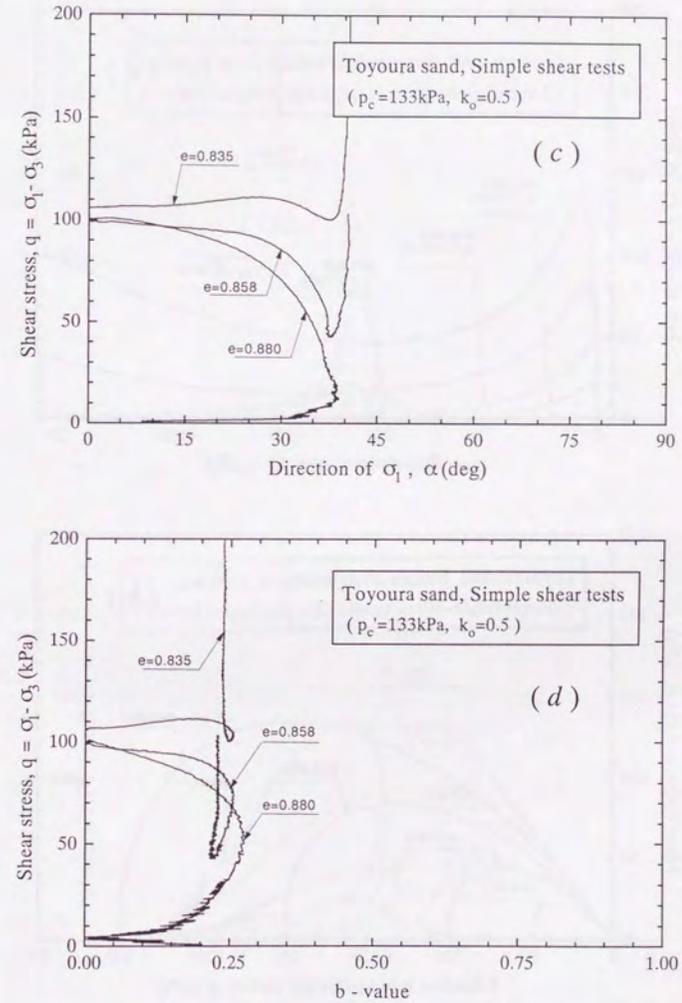


図 6.5 豊浦砂の単純せん断試験 (初期異方圧密)

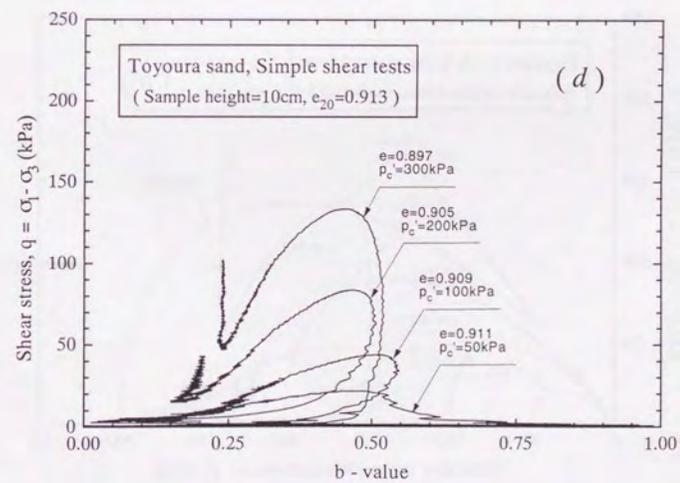
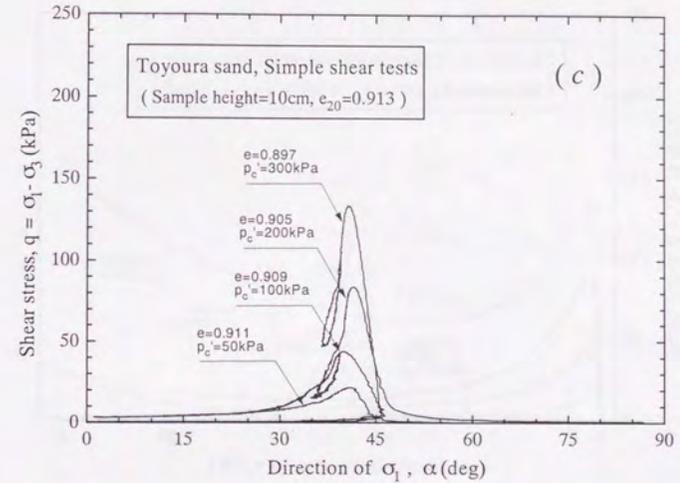
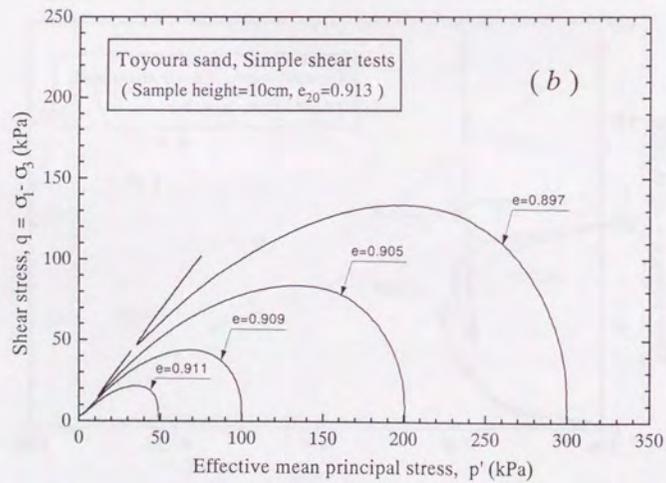
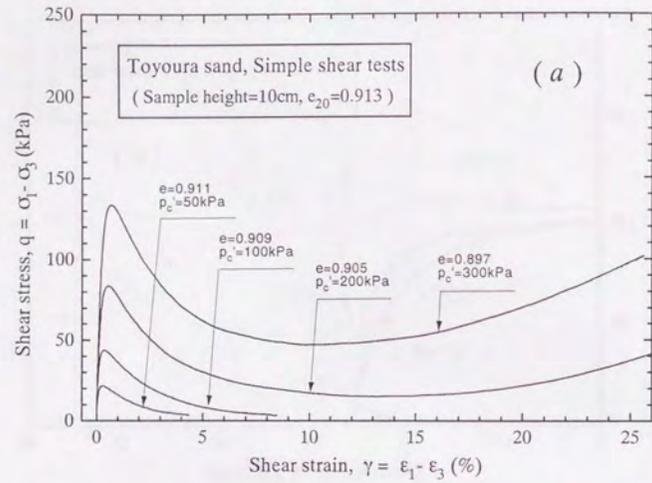


図 6.6 豊浦砂の単純せん断試験 (供試体高さ約 10cm,  $e_{20} = 0.913$ )

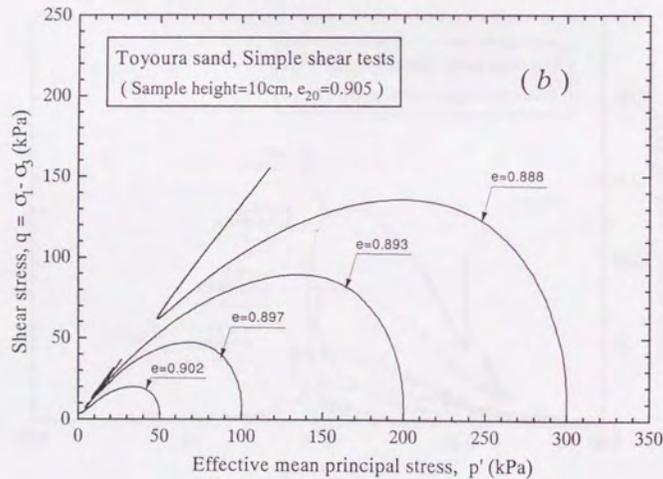
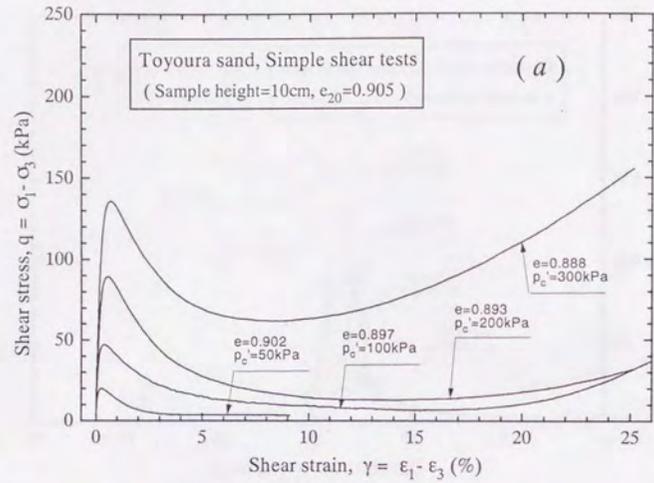
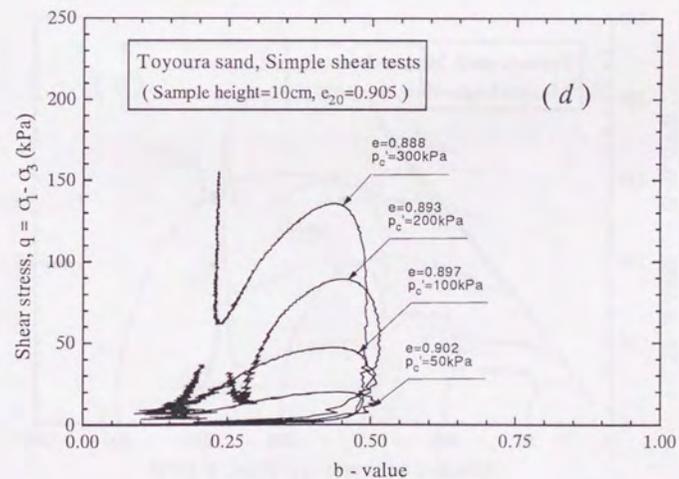
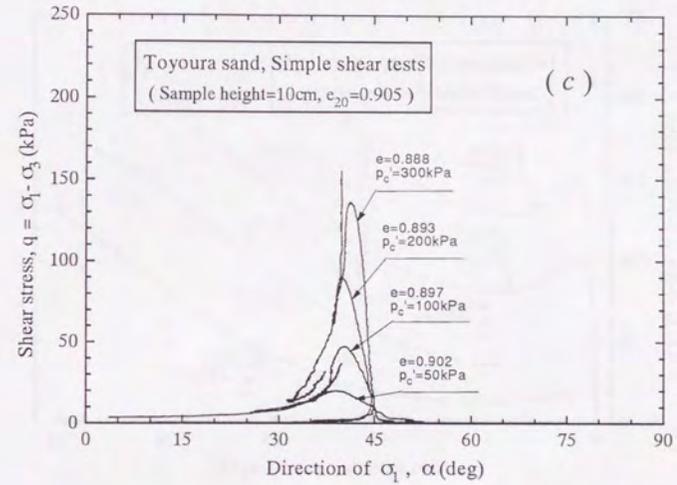


図 6.7 豊浦砂の単純せん断試験 (供試体高さ約 10cm、 $e_{20} = 0.905$ )



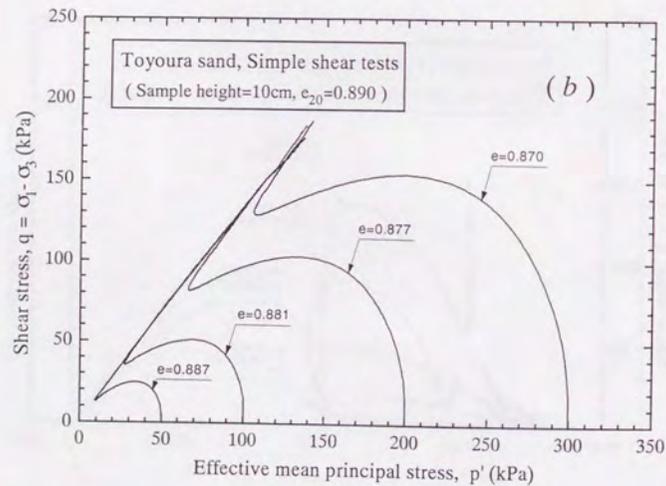
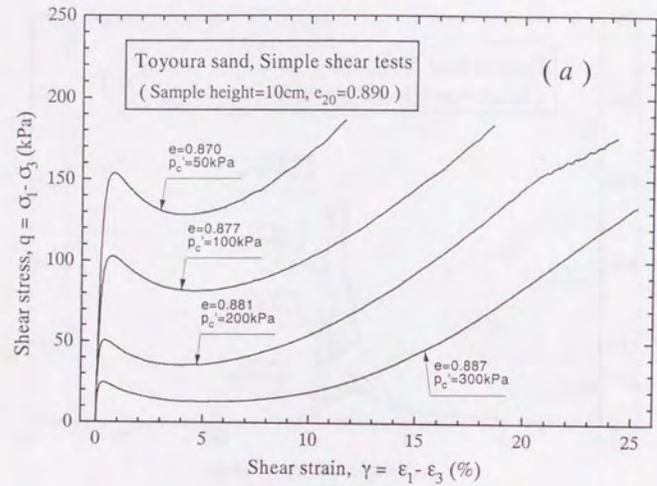
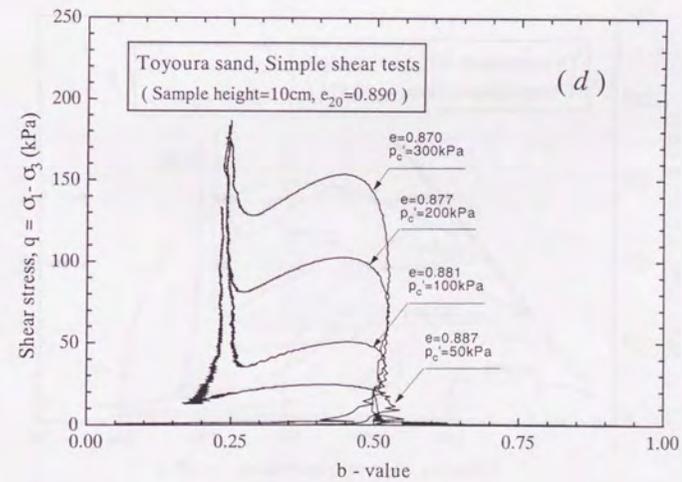
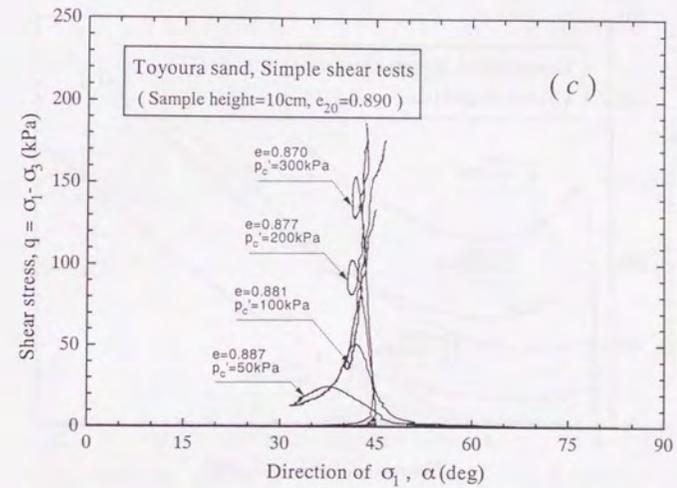


図 6.8 豊浦砂の単純せん断試験 (供試体高さ約 10cm,  $e_{20} = 0.890$ )



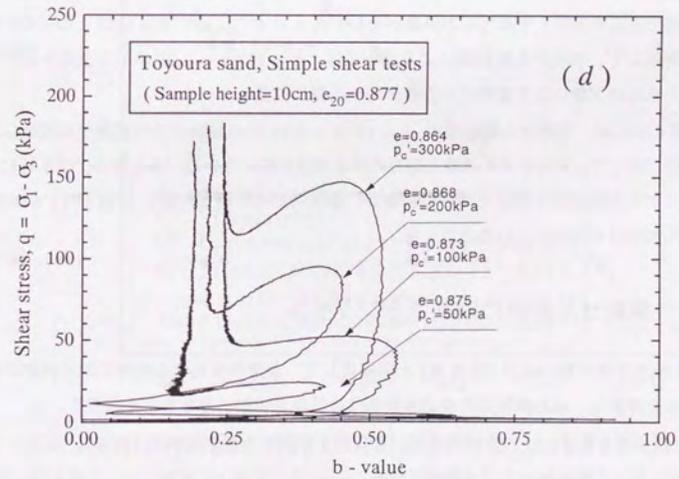
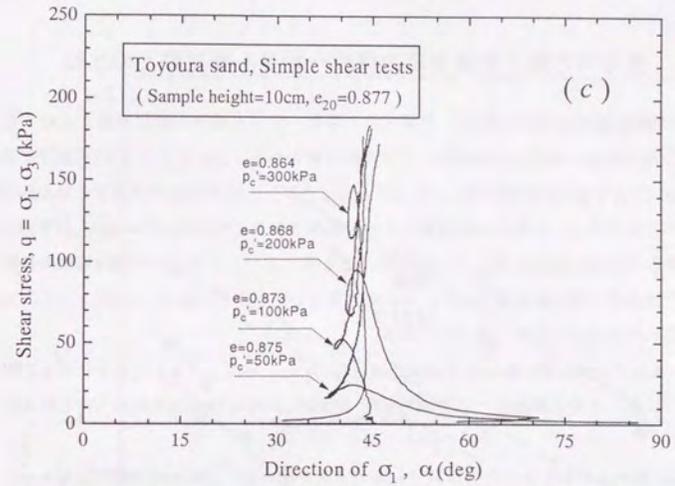
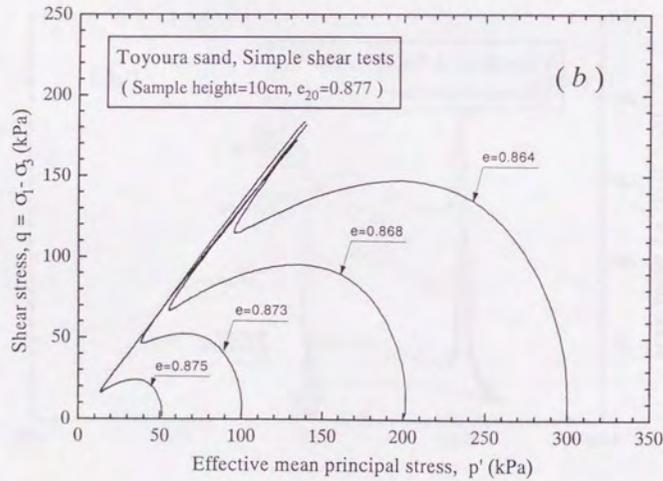
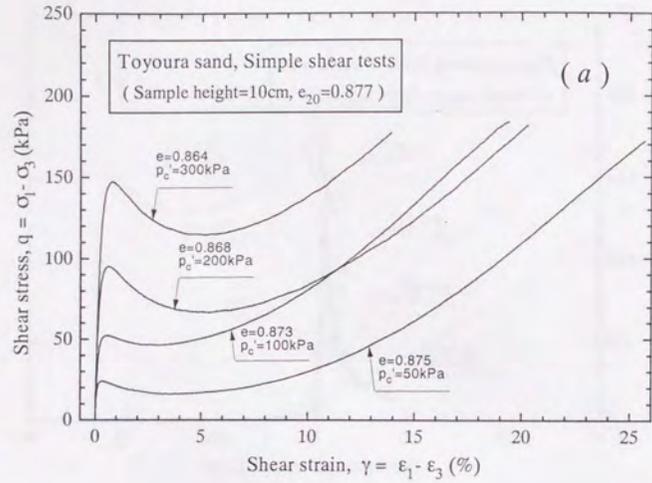


図 6.9 豊浦砂の単純せん断試験 (供試体高さ約 10cm、 $e_{20} = 0.877$ )

らずに最大主応力角度  $\alpha = 40^\circ \sim 45^\circ$ 、中間主応力係数  $b = 0.25$  となると言える。

#### 6.4 主応力方向・中間主応力係数一定せん断試験との比較

単純せん断時と主応力方向・中間主応力係数一定せん断時の軟化挙動を比較するために、主応力方向・中間主応力係数一定せん断試験のうち、 $\alpha = 0^\circ, b = 0.0$  (三軸圧縮状態)、 $\alpha = 90^\circ, b = 1.0$  (三軸伸張状態)、および  $\alpha = 45^\circ, b = 0.25$  の各応力条件でのせん断試験で得られた変相点と、単純せん断試験によって観測された変相点を、 $e - \log p'_{PT}$  平面上にプロットして図 6.10 に示した。この図には、第 4 章において記述した中実円筒形の供試体を用いた通常の三軸圧縮試験 ( $\alpha = 0^\circ, b = 0.0$ ) および三軸伸張試験 ( $\alpha = 90^\circ, b = 1.0$ ) によって得られた変相点も併せて表示している。

各条件でのせん断試験による変相点は  $e - \log p'_{PT}$  平面上でそれぞれ変相線を形成している。これらの変相線はすべて初期拘束圧  $100 \text{ kPa}$  のせん断試験結果から得られたものである。

この図からわかるように、単純せん断による変相点は、三軸圧縮試験によるものと三軸伸張試験によるもののほぼ中間に分布している。また、単純せん断での変相状態を含む大変形領域で主応力方向と中間主応力係数がそれぞれ  $\alpha = 40^\circ \sim 45^\circ, b = 0.25$  となっていることに対応して、単純せん断試験による変相点は、 $\alpha = 45^\circ, b = 0.25$  の応力条件を固定して行ったせん断試験による変相点の近傍かやや上側に位置している。

図 6.11 には、単純せん断試験と  $\alpha = 45^\circ, b = 0.25$  での試験のうち密度がほぼ等しいものを選び出して、応力ひずみ曲線と応力経路を直接比較している。密な場合には単純せん断のほうがやや膨張的な挙動を示しているが、全体的には単純せん断と  $\alpha = 45^\circ, b = 0.25$  でのせん断特性は類似していると言える。

#### 6.5 単純せん断時の流動ポテンシャル

三軸せん断試験の場合 (第 4 章) と同様にして、非排水単純せん断時の砂の流動ポテンシャルを評価し、せん断初期条件と流動特性の関連を明確にすることを試みる。

一連の高さ約 20cm の供試体を用いた非排水単純せん断試験結果 (表 6.1、図 6.1~6.5) を用い、各せん断試験における変相状態を  $e - \log p'_{PT}$  平面上にプロットして図 6.12 を得た。また、各せん断試験で観測された流動ポテンシャルすなわち変相点における最大過剰間隙水圧比  $u_f$  を直接  $e - u_f$  平面上にプロットしたものが図 6.13 である。これらの図から初期圧密

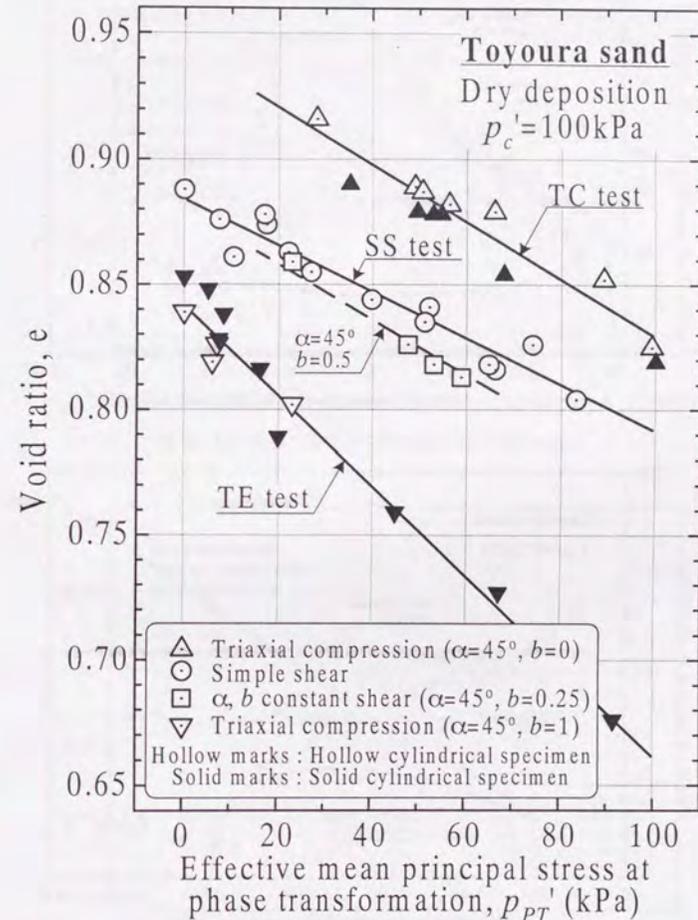


図 6.10 単純せん断と主応力方向・中間主応力係数一定せん断における変相状態

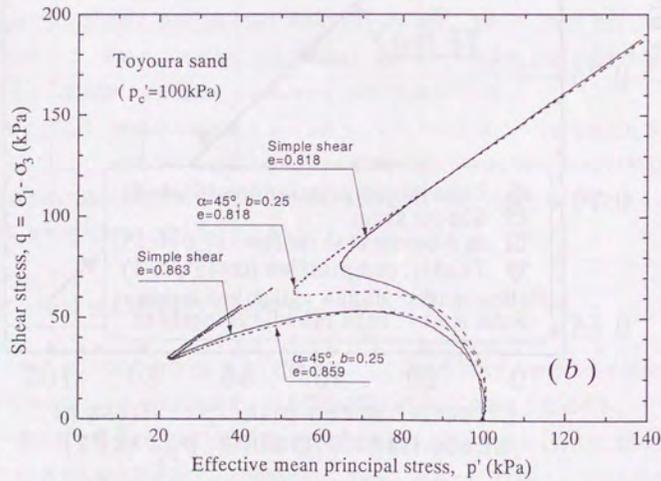
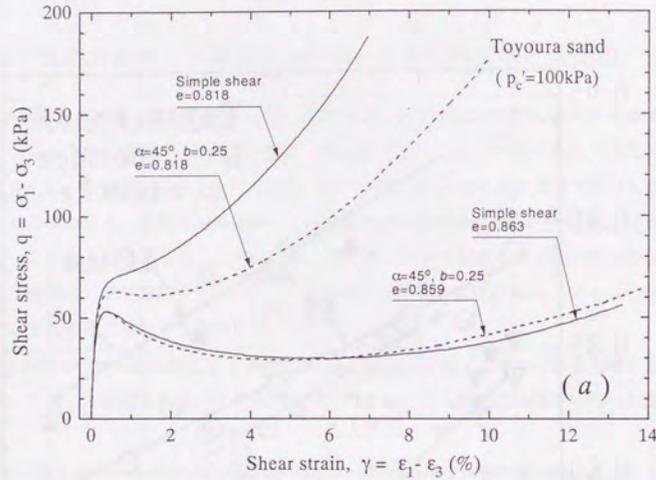


図 6.11 単純せん断と主応力方向・中間主応力係数一定せん断の非排水せん断挙動の比較

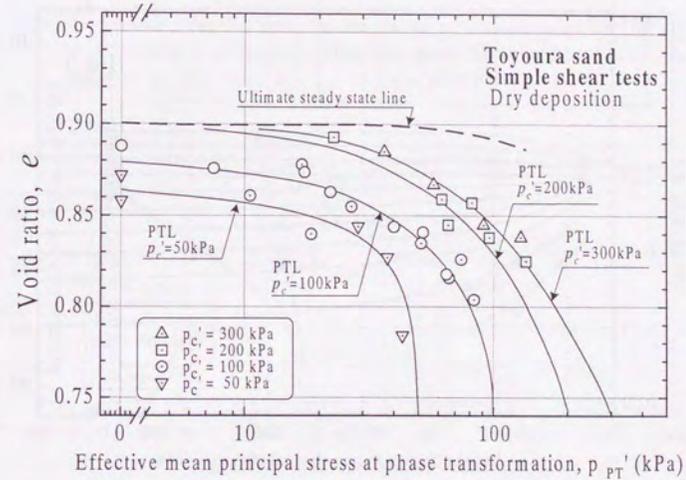


図 6.12 非排水単純せん断試験における変相状態

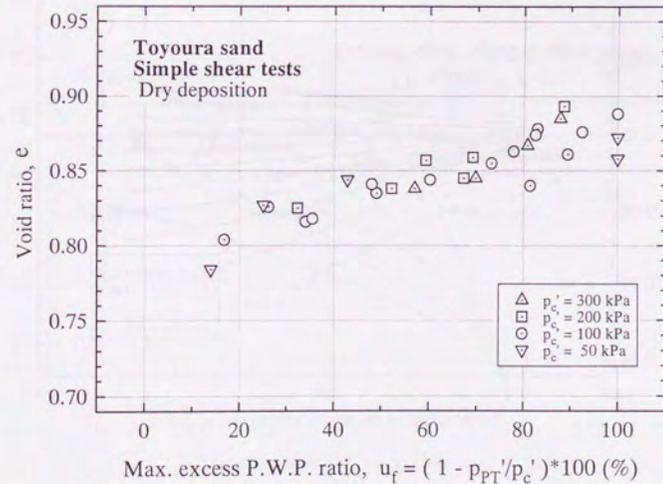


図 6.13 非排水単純せん断試験における最大過剰間隙水圧比

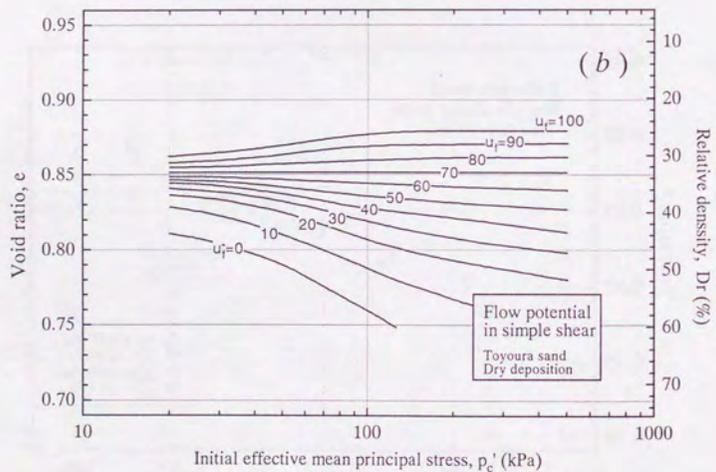
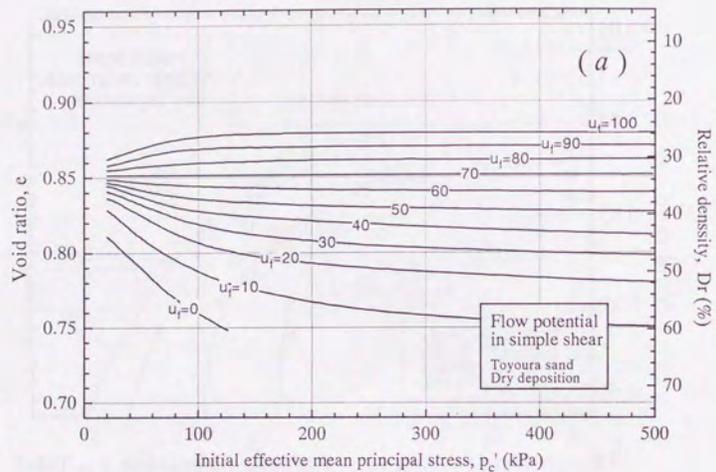


図 6.14 非排水単純せん断試験での流動ポテンシャル

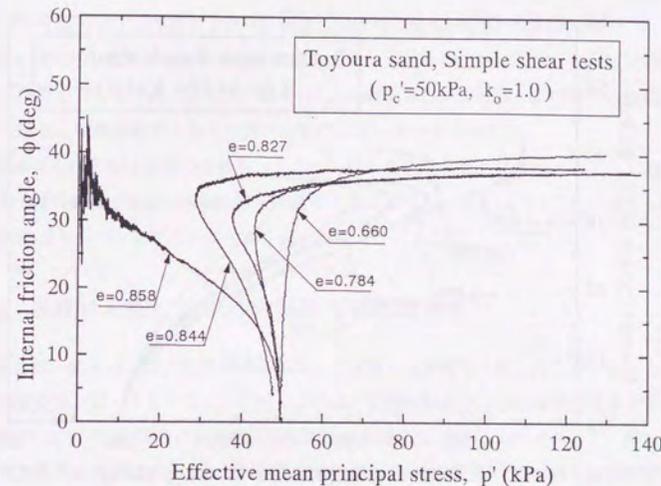


図 6.15 豊浦砂の単純せん断における摩擦角の変化 ( $p'_c = 50 \text{ kPa}$ )

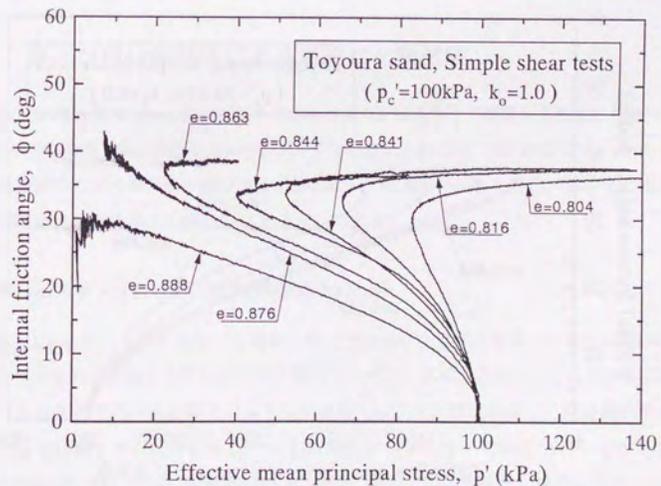


図 6.16 豊浦砂の単純せん断における摩擦角の変化 ( $p'_c = 100 \text{ kPa}$ )

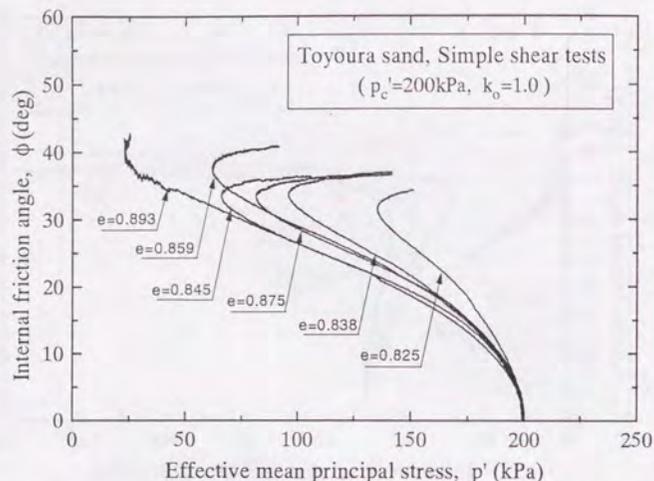


図 6.17 豊浦砂の単純せん断における摩擦角の変化 ( $p'_c = 200 \text{ kPa}$ )

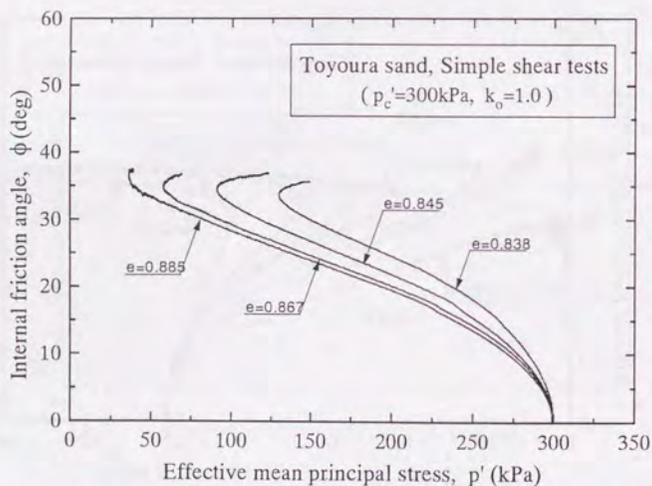


図 6.18 豊浦砂の単純せん断における摩擦角の変化 ( $p'_c = 300 \text{ kPa}$ )

応力および砂の間隙比に対する流動ポテンシャルを見積もり、初期状態平面 ( $e - \log p'_c$  平面または  $e - p'_c$  平面) に等ポテンシャル線として表現したものが図 6.14 である。

図 6.14 に示した単純せん断状態での流動ポテンシャルを三軸圧縮状態または三軸伸張状態での流動ポテンシャル (図 4.10・図 4.19) と比較すると、単純せん断状態での流動特性は三軸圧縮と三軸伸張のちょうど中間的な特性となっていると言える。

単純せん断状態は地盤の変形モードの中で最も代表的な変形状態であるといえる。そこで、第 8 章において地盤の流動特性を評価する場合には主に図 6.14 に示した単純せん断状態での流動ポテンシャルを用いて考察を進めてゆくこととなる。

## 6.6 単純せん断における内部摩擦角の大きさ

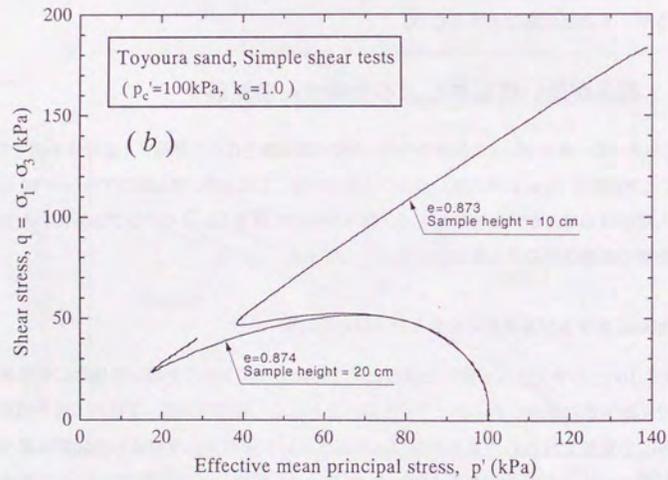
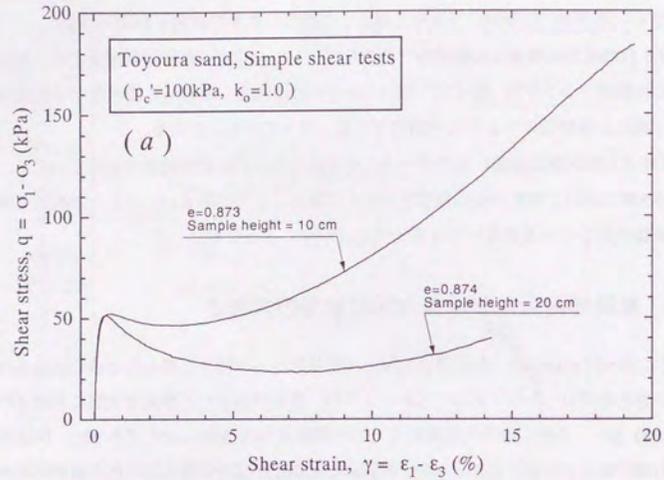
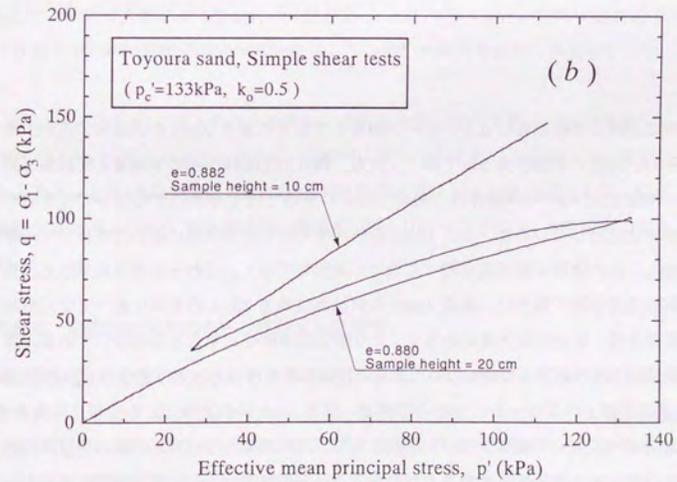
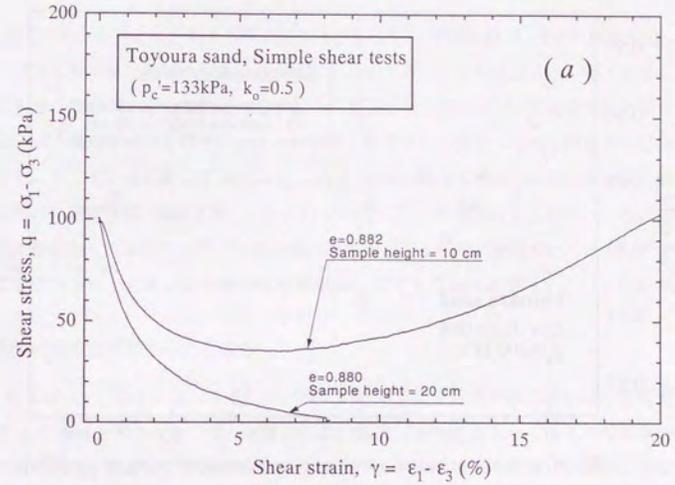
図 6.15～図 6.18 には、豊浦砂のを等方圧密状態から単純せん断したときの動員される摩擦角の変化をプロットしてある。これによれば、変相状態または準定常状態における内部摩擦角は約  $33^\circ$ 、それ以後の大変相状態での内部摩擦角は  $35^\circ \sim 40^\circ$  であって、供試体の密度や初期拘束圧の大きさによらない。供試体の密度が小さく、せん断に伴う過剰間隙水圧の発生によって有効拘束圧が小さくなるほど準定常状態における内部摩擦角は大きくなる傾向があるが、その変化量は大きくない。

## 6.7 高さが低い供試体による単純せん断試験

これまでに、高さ 20cm の供試体を用いたせん断試験を行って単純せん断特性を調べてきたが、ここでは高さ 10cm の背の低いサンプルを用いることにより、せん断ひずみ  $\gamma = 20 \sim 25\%$  での大变形時のせん断挙動を観察する。図 6.6～6.9 に高さ 10cm のサンプルを用いた初期等方圧密時の非排水単純せん断試験結果を示してある。

### 高さ 20cm のサンプルを用いたせん断試験との比較

高さ 10cm のサンプルを用いた場合と高さ 20cm のサンプルを用いた場合に観測される砂のせん断挙動に相違があるかどうかを調べるために、初期拘束圧・圧密応力比や間隙比がほぼ等しい条件で行われた高さの異なる供試体に対する非排水単純せん断試験結果を比較する。図 6.19 は、等方圧密状態 ( $K_0 = 1.0$ ) からせん断を行った場合の応力-ひずみ曲線および応力経路、図 6.20 は、圧密応力比  $K_0 = 0.5$  からせん断を行った場合の応力-ひずみ曲線および応力経路である。等方状態からせん断を開始すると、ピークせん断応力状態までは

図 6.19 豊浦砂の単純せん断特性に与える供試体高さの影響 ( $K_0 = 1.0$ )図 6.20 豊浦砂の単純せん断特性に与える供試体高さの影響 ( $K_0 = 0.5$ )

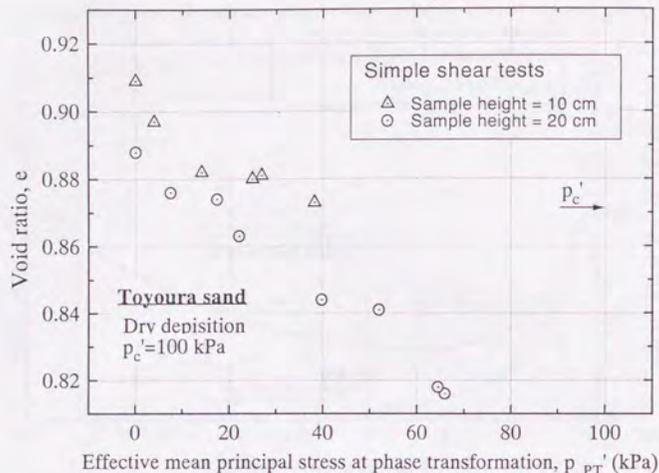


図 6.21 豊浦砂の単純せん断特性に与える供試体高さの影響 ( $K_0 = 1.0$ )

ほぼ両者が同じ挙動を見せるが、ピーク強度をすぎると高さ 20cm の供試体の方が大きな軟化を示し、両者の挙動が異なってゆく。一方、異方圧密条件からの単純せん断試験結果を見ると、間隙比約 0.88 の供試体は、高さ 20cm のものではせん断にともなって有効応力 0 の完全液状化に達しているが、高さ 10cm の供試体では準定常状態に達した後再びせん断抵抗が増加し、応力経路は破壊線に沿って大きく上昇してゆく。これらの実験結果から、高さ以外の試験条件が同じ場合に、高さ 10cm の供試体は高さ 20cm のものに比べてせん断時の間隙水圧発生量・応力の低下量が小さく、より膨張的挙動を示すことが明らかである。図 6.21 は、初期等方圧密応力 100kPa の条件から単純せん断を行ったときの変相点 (準定常状態) を  $e - \log p'$  平面上にプロットしたものである。高さ 10cm の供試体による変相点は高さ 20cm のものに比べてやや上側にプロットされており、この事実からも高さが低い供試体の方が膨張的な非排水せん断挙動を示すことがわかる。以上の事実は、供試体の水平断面が変化しない単純せん断試験においても、実験結果が供試体上下端面の拘束の影響 (3.9 節) を受けていることを示していると考えられる。

#### 大ひずみ時 ( $\gamma = 15 \sim 25\%$ ) の砂の非排水せん断挙動

図 6.5(a)~6.9(a) に、各せん断試験における応力-ひずみ曲線が、また、図 6.5(b)~6.9(b) に、各せん断試験における応力経路がプロットしてある。これを見ると、いずれの試験においてもせん断応力のピーク後にせん断応力の低下が生じているが、完全液状化に至ったものを除けば、準定常状態を経た後にせん断挙動が膨張傾向に変化してせん断応力の回復が生じている。そして、せん断ひずみ  $\gamma = \epsilon_1 - \epsilon_3$  が 25% に達しても応力経路は破壊線に沿って上昇し続け、定常状態 (極限状態, ultimate state) に達する気配は全くない。これは、変相後のせん断応力・拘束圧の上昇が三軸圧縮試験におけるものほど大きくなく、大ひずみ時においても応力平面上の応力点が極限状態線 (USL) よりもなおほど遠いためだと考えられる。

#### 主応力の回転と中間主応力の変化

図 6.5(c)~6.9(c) には、各せん断試験における最大主応力が砂の堆積面の鉛直方向となす角  $\alpha$  の変化を図示した。せん断初期においては  $\alpha = 45^\circ$  となっているがせん断の進行と共に若干角度が減少し、定常状態付近でおよそ  $\alpha = 40^\circ$  となった後、変相後の大変形領域では再び  $\alpha = 45^\circ$  に近づくような変化を見ることができる。このような挙動を供試体高さ 20cm での単純せん断結果 (図 6.1(c)~図 6.5(c)) と比べてみると、定常状態付近での  $\alpha$  の低下が高さ 10cm の供試体の方がやや大きいものの、大略両者は同じ挙動を示していると言える。

図 6.5(d)~6.9(d) には、各せん断試験における中間主応力係数  $b$  の変化を図示した。せん断初期においては  $b = 0.5$  となっているがせん断の進行と共に  $b$  は減少し、定常状態付近でおよそ  $b = 0.25$  となった後、変相後の大変形領域では  $b = 0.25$  が保たれる。このような挙動は供試体高さ 20cm での単純せん断結果 (図 6.1(d)~図 6.5(d)) と同じのものであると言える。

#### 砂の密度・初期拘束圧の大きさと単純せん断特性

図 6.22 には、各せん断試験における初期圧密状態 (ICS) と準定常状態 (QSS) を  $e - \log p'$  平面および  $e - p'$  平面にプロットしてある。各初期圧密線 (ICL) に対応して、別々の準定常状態線 (QSSL) が形成されている。特に、 $e - \log p'$  平面の上部に位置する準定常状態線よりも下側にある初期圧密線に対してもより下位の定常状態線が形成されている。従って、三軸伸張試験の場合と同様に、単純せん断条件においては  $e - \log p'$  平面上の定常状態線は唯一には定まらず、準定常状態は密度だけでなく圧密線の位置によって変化するものだけとい

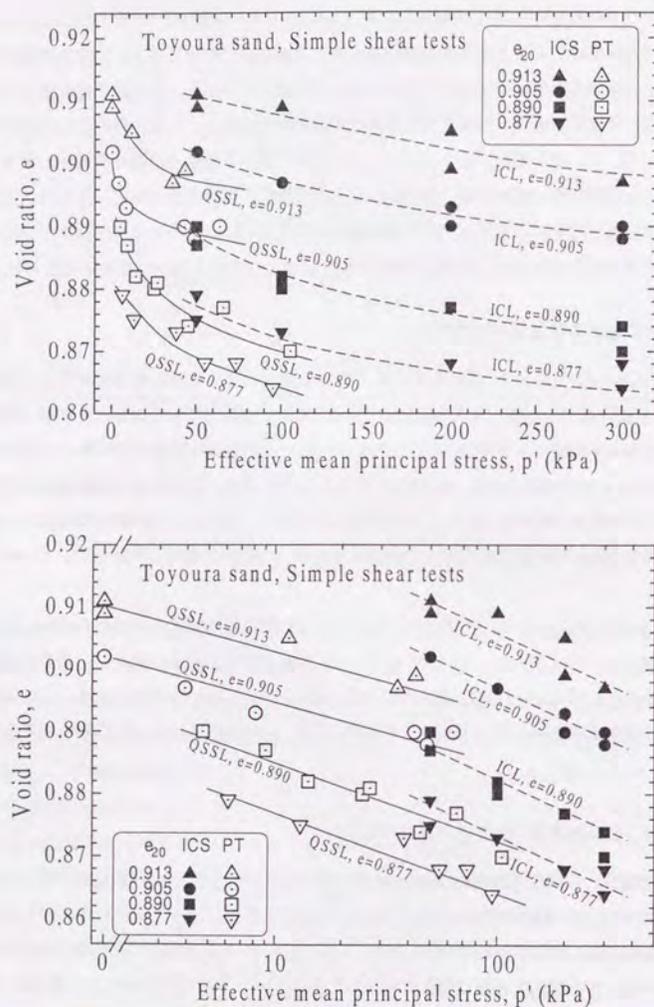


図 6.22 豊浦砂の単純せん断特性 (供試体高さ約 10cm)

える。

また、 $e - \log p'$  平面上での初期圧密線と準定常状態線の傾きを調べると、準定常状態線の傾きの方が若干小さくなっている。従って、同一の圧密線上からせん断を行った場合、圧密応力が小さい方がより大きな軟化を示し、圧密応力が大きいほどせん断挙動は膨張的な傾向となる。図 6.5 および図 6.6 において、初期圧密応力の小さなものが完全液状化に達しているのに対して初期圧密応力が大きくなると変相が生じ準定常状態後に硬化が生じていることはこの事実を反映したものである。

#### 極限状態

本研究で実施した単純せん断試験では、初期圧密応力が 300kPa 以下の比較的低下領域の試験であり、またせん断ひずみが 25% を越えるような大変形時にも定常状態に至らないことから、高圧側の変相極限としての極限状態 (ultimate state) あるいは最終定常状態としての極限状態は観察できない。そこで、低密度側の変相極限としての極限状態がどのようになっているかを検討してみる。完全液状化と非完全液状化の境界条件を図 6.21 を参照して調べると、初期拘束圧  $p'_c = 50 \text{ kPa}$ 、間隙比  $e = 0.902$  で完全液状化に達していること、初期拘束圧  $p'_c = 200 \text{ kPa}$ 、間隙比  $e = 0.905$  の条件では  $p' = 11.5 \text{ kPa}$  で変相していること、これらよりも密度が小さい場合にはすべて完全液状化に達していることなどがわかる。従って、有効拘束圧  $p' = 20 \sim 30 \text{ kPa}$  以下の領域では、間隙比  $e = 0.900 \sim 0.905$  が極限状態となっていると言える。 $e - \log p'$  平面上の極限状態線 (USL) は、 $p' = 20 \sim 30 \text{ kPa}$  以下の領域において間隙比  $e = 0.900 \sim 0.905$  のほぼ水平な線となる。

#### 6.8 既往の実験結果との比較

Riemer(1992) は、Monterey #0 砂 ( $D_{50} = 0.35 \text{ mm}$ ,  $e_{max} = 0.86$ ,  $e_{min} = 0.53$ ) を用いて非排水三軸圧縮試験、非排水三軸伸張試験および非排水単純せん断試験を行った。三軸試験の供試体寸法は直径 7cm、高さ 15cm である。また、単純せん断試験の供試体寸法は直径 10cm、高さ 2.5cm である。単純せん断試験では柔らかいメンブレンを用いて側方拘束圧を載荷している。したがって、非排水条件で供試体高さが一定であれば供試体断面積は一定であるが、断面形状は変化しうる点、また側面にせん断力が発生しない点において厳密な単純せん断条件とはなっていない。相対密度  $Dr = 5 \sim 20\%$  程度の砂に対して初期有効拘束圧がおおよそ  $p'_c = 100 \sim 900 \text{ kPa}$  の条件でせん断を行ったところ、 $e - \log p'_{PT}$  平面上での変相線が各せん断モードに対して得られた (図 6.23)。単純せん断挙動が三軸圧縮挙動よりもよ

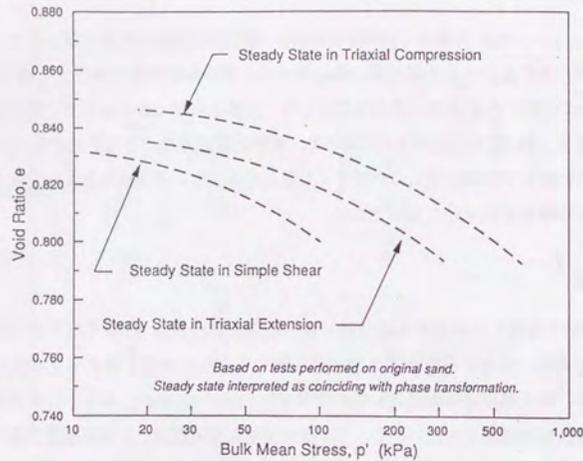


図 6.23 三軸圧縮・伸張および単純せん断による変相線 (Riemer, 1992)

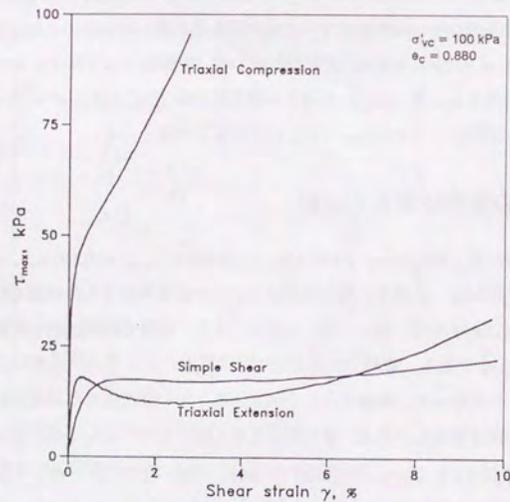


図 6.24 三軸圧縮・伸張および単純せん断挙動 (Vaid and Sivathayalan, 1996)

り圧縮的となっている点が本研究の実験結果と大きく異なっている。

Vaid and Sivathayalan(1996)は、Fraser Delta 砂 ( $D_{50} = 0.30\text{mm}$ ,  $e_{max} = 1.00$ ,  $e_{min} = 0.68$ ) を用いて非排水三軸圧縮試験、非排水三軸伸張試験および体積一定単純せん断試験を行った。単純せん断試験機は供試体側面がワイヤーで補強されたメンブレンによって拘束される NGI 型であり、供試体寸法は直径 7.1cm、高さ 2.0-2.2cm である。供試体密度・初期有効拘束圧が同じ条件での三軸圧縮試験・三軸伸張試験・単純せん断試験を比較して図 6.24 に示す結果を得た。

本研究による実験結果では、砂の非排水せん断において単純せん断挙動は三軸圧縮挙動と三軸伸張挙動のちょうど中間に位置しているのに対して、上記 2 つの実験結果では単純せん断挙動が三軸伸張挙動とほとんど同じかむしろ三軸伸張挙動よりも軟化傾向を示している。上記 2 つの既往の試験では三軸試験と単純せん断試験で異なる試験機を用いており、特に供試体の寸法や形状が全く異なる条件での試験結果を比較している点を考慮すると、本研究の試験結果の方が信頼性があるように思われる。