

粘性土の非排水せん断特性に及ぼす中間主応力の影響

池 浦 勲*・中 村 努**

The Influence of Intermediate Principal Stress on Undrain Shear Characteristics of Cohesive Soils

Isao IKEURA and Tsutomu NAKAMURA

要 旨

既報¹⁾においては、飽和粘性土を対象に、平均有効主応力一定条件の下で中間主応力の相対的大きさを変えた排水せん断試験を実施し、その結果を筆者らが提案している軸対称条件下の応力-ひずみ式²⁾を三主応力場に拡張したものに適用した。今回は、同様の目的で、中間主応力の大きさを変えた非排水せん断試験を実施したので報告する。

Abstract

In order to investigate the influence of intermediate principal stress on the shear behavior of cohesive soil, several undrained shear test were carried out under constant intermediate principal stress ratio.

1. まえがき

これまでに筆者らが²⁾が提案している飽和粘性土の応力-ひずみ式は、軸対称排水せん断試験で測定された塑性ひずみ増分比の応力経路依存性に基づいたものである。

しかし、粘性土地盤が載荷を受けた場合に、地盤内応力が軸対称条件であることは少なく、むしろ、三主応力が異なる場合が多い。また、それによる変形も非排水状態で進行すると考えられる。

既報¹⁾においては、平均有効主応力一定の下で中間主応力の相対的大きさを変えた排水せん断試験結果をもとに、提案式を三主応力場に拡張することを試みた。今回は、中間主応力の相対的大きさを変えた非排水せん断試験を実施して、三主応力場における非排水せん断挙動を検討することとした。

2. 実験試料および実験方法

実験に用いた試料は、スラリー状態にして420 μm 篩を通した早来町安平産の自然粘土を、150 kPaの鉛直圧力で再圧密したものであり、初期間

隙比は1.15である。粘土は液性限界 $w_L=53\%$ 、塑性指数 $PI=30$ 、土粒子密度 $\rho_s=2.61\text{gr}/\text{cm}^3$ である。

三主応力載荷装置は、軸差応力、中間主応力、最小主応力をそれぞれベロフラムシリンダー、プレッシャーバッグ、セル水を介して載荷するものである。

供試体の寸法は100×44×60mmであり、その鉛直変位及び短軸（最小主応力方向）変位はひずみゲージ式変位変換器により測定した。また、間隙水圧は下部ベデスタルの中央において測定し、吸排水は供試体に巻いたドレインペーパーを介して供試体上部から行い、その量を二重管ビュレットと差圧計により測定した。

圧密前に、背圧を100kPaまで段階的に増加させた。実験は、有効圧密圧力 $\sigma_c=200$ あるいは300kPaまで等方圧密した後、0.04%/minの定ひずみ速度で非排水せん断を行うものであり、せん断中は、中間主応力の相対的大きさが一定を保つように、1分毎に中間主応力を手動で調節した。

3. 実験結果及び考察

3. 1 応力及び歪パラメータ

以下において用いる応力パラメータは、有効正八面体垂直応力 σ_{oct} 、せん断応力 τ_{oct} 、応力比 η と軸差応力 q とであり、それぞれ次式で表される。

* 教授 環境都市工学科

** 助手 環境都市工学科

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{oct} &= \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} - u \\ \tau_{oct} &= \frac{1}{3} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \\ q &= \sigma_1 - \sigma_3, \quad \eta = \tau_{oct} / \sigma_{oct} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

ここに $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$: 最大, 中間, 最小主応力
u : 間隙水圧
応力の単位は kPaとし、垂直応力 σ は圧縮を正とする。
中間主応力の相対的大きさを表すb値は(2)式で示される。

$$b = \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3} \quad (2)$$

今回は、 $b=0, 0.2, 0.5$ でせん断試験を実施したが、前年までに実施した、 σ_{oct} 一定条件下で $b=0, -1$ (伸張試験) の応力制御排水せん断試験の結果も引用する。

ひずみパラメータは、軸ひずみ $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ と体積ひずみ ε_v および正八面体せん断ひずみ ε_{oct} である。

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_v &= \ln\left(\frac{V_o}{V}\right) = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 \\ \varepsilon_1 &= \ln\left(\frac{H_o}{H}\right), \varepsilon_3 = \ln\left(\frac{D_o}{D}\right), \varepsilon_2 = \varepsilon_v - (\varepsilon_1 + \varepsilon_3) \\ \varepsilon_{oct} &= \frac{2}{3} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

ここに V_0, V : 初期および試験中の供試体体積
 H_0, H : 初期および試験中の供試体高さ
 D_0, D : 初期および試験中の短軸長さ
ひずみにおいても圧縮を正とする。

3. 2 結果および考察

(1) 各軸ひずみの関係

図-1には $b=0.2, 0.5$ の試験の鉛直ひずみ ε_1 と、 σ_2 方向ひずみ ε_2 、 σ_3 方向ひずみ ε_3 との関係を示す。なお $b=0$ では側方ひずみの測定は行わず、 $\varepsilon_2 = \varepsilon_3 = -\varepsilon_1/2$ の関係から計算した。
図によれば、全体的に ε_1 の圧縮に対して伸張側にひずみが発生するが、b値が大きくなるにつれて、 ε_2 (伸び) は小さくなり、 ε_3 (伸び) は大きくなる。
特に $b=0.5$ では $\varepsilon_2=0$ 、 $\varepsilon_3=-\varepsilon_1$ に近接した値が得られた。弾性論によれば、非排水せん断では $\varepsilon_v=0$ (ポアソン比= 0.5) ゆえに $b=0.5$ では ε_2

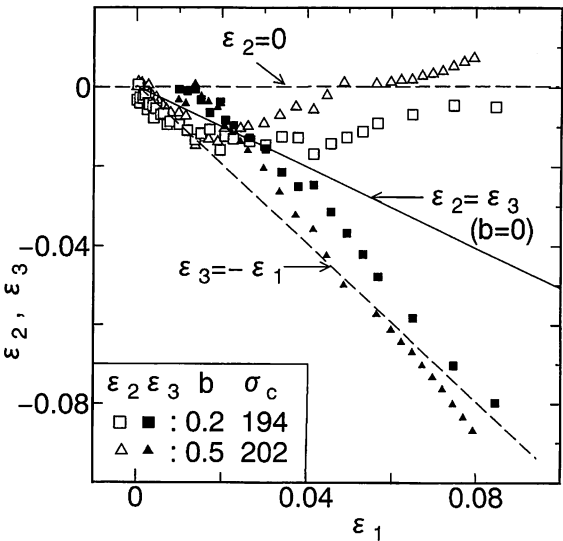


図-1 各軸ひずみの関係

$=0$ (平面ひずみ状態) , $\varepsilon_3=-\varepsilon_1$ となるべきものであり、今回の側方ひずみの計測は妥当なものといえる。

(2) 応力とひずみの関係

図-2(a)は圧密圧力 σ_c で規準化した軸差応力 q とせん断ひずみ ε_{oct} の関係を示す。なお $b=-1$ の q は伸張状態であるから負となるので、その符号を逆にして示している。

図に見るように、非排水せん断(以下ではUDと略記する)では、b値が大きくなるにつれて、勾配および破壊(最大)応力が増加して破壊時のひずみが減少しており、ひずみ硬化型からひずみ軟化型への移行が認められる。すなわち、中間主応力は最大軸差応力 q_{max} に影響を及ぼすといえる。

一方、排水せん断(DRと略記)においては、ひずみの小さいうちはUDと差のない挙動を示すものの、ひずみが大きくなっても q は増加を続けてUDよりも大きな q で破壊(図の最終点)に至っている。これはDRの場合、破壊に至るまでの排水によって供試体の含水比が減少することの影響と考えられる。図-2(b)のように q に代えて τ_{oct} を考えても同様であるが、ひずみが大きくなるとUDの曲線が一本に収束する傾向が認められる。一方、図-2(c)のように、応力比 η と ε_{oct} の関係にはb値や排水条件の影響はほとんど認められない。このことは、同じ σ_c であっても、 σ_{oct} と ε_{oct} の関係が、b値や、とりわけ排水条件によって異なることを示しているといえよう。ちなみに σ_{oct} は、DRでは常に σ_c に等しくなるよ

うに制御したのに対して、UDではひずみが大きくなると小さくなる傾向が認められた。

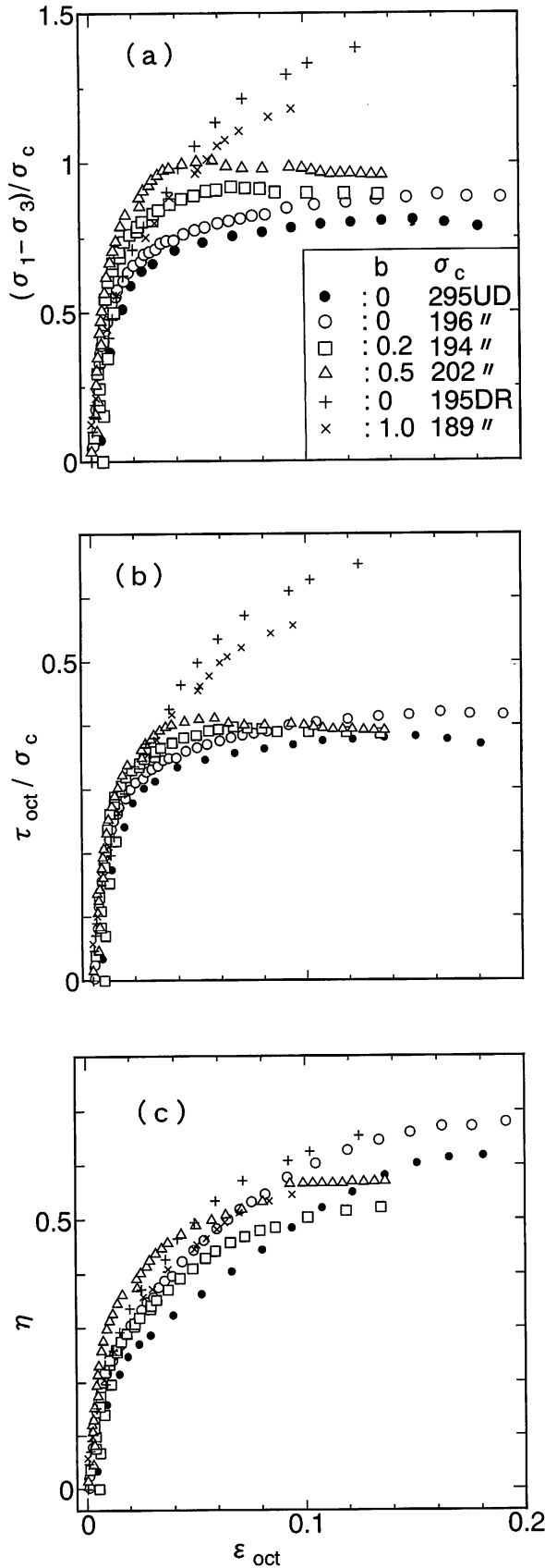


図-2 応力とひずみの関係

(3) 間隙水圧とひずみの関係

図-3には規準化した間隙水圧増分 Δu と ϵ_{oct} の関係を示す。

b 値が大きくなると、たとえ規準化しても Δu は大きくなる。

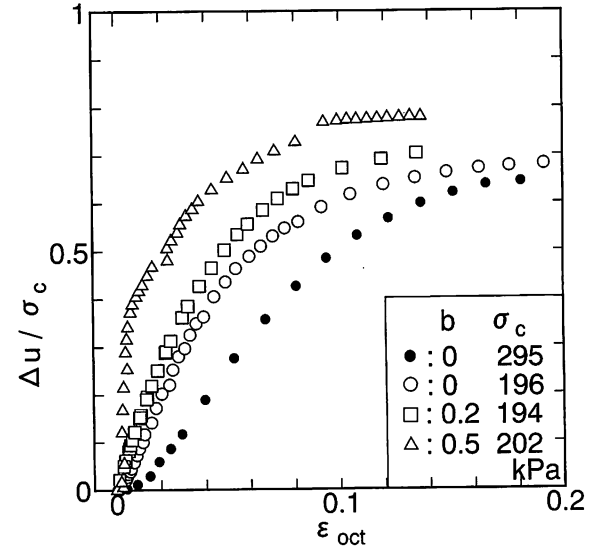


図-3 間隙水圧とせん断ひずみの関係

Henkelは、 Δu が増分 $\Delta \sigma_{oct}$ と $\Delta \tau_{oct}$ によるものとの和で表されるとして、次式を提案した。

$$\Delta u = \Delta \sigma_{oct} + 3a \Delta \tau_{oct} \quad (4)$$

ここに右辺第1項は全応力 $\Delta \sigma_{oct}$ によるものであって圧密成分といえ、したがって第2項の τ_{oct} 成分はダイレイタンシー成分といえる。すなわち水圧係数 a はダイレイタンシーの発生率を示すものである。

図-4は(4)式により求めた係数 a と ϵ_{oct} の関係を示したものであるが、 $b=0.5$ の初期部分を除いては、帯状の範囲内に分布している。すなわち、ダイレイタンシーに及ぼす b 値の影響は小さいようであり、また b 値と共に Δu が大きくなるのは、 $\Delta \tau_{oct}$ が大きくなることに因ると言えよう。

(4) 有効応力経路

図-5には平均有効応力と軸差応力との関係を示す。これは、せん断中の有効応力によるモールの応力円の頂点の軌跡を示すものであり、応力経路の一種である。 b 値が大きくなると、 q_{max} を越えても、なお間隙水圧が上昇して、応力経路が一定状態に収束しない傾向が強くなっている。

図中には q_{max} 時を破壊としたときの有効応力

表示によるせん断抵抗角 ϕ' を併記した。Mohr-Coulombの破壊規準によれば、 ϕ' は b 値の影響を受けないはずであるが、今回の結果からは ϕ' と b 値の関係に一定の傾向は見出せなかった。この点については、より幅広い b 値の実験による検討が必要である。

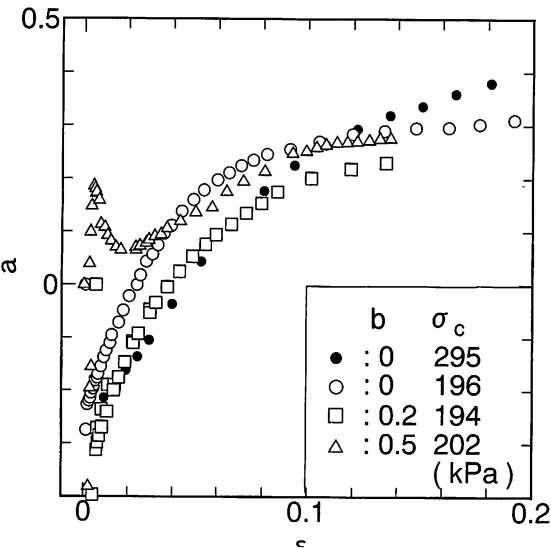


図-4 水圧係数 a とひずみ ϵ_{oct} の関係

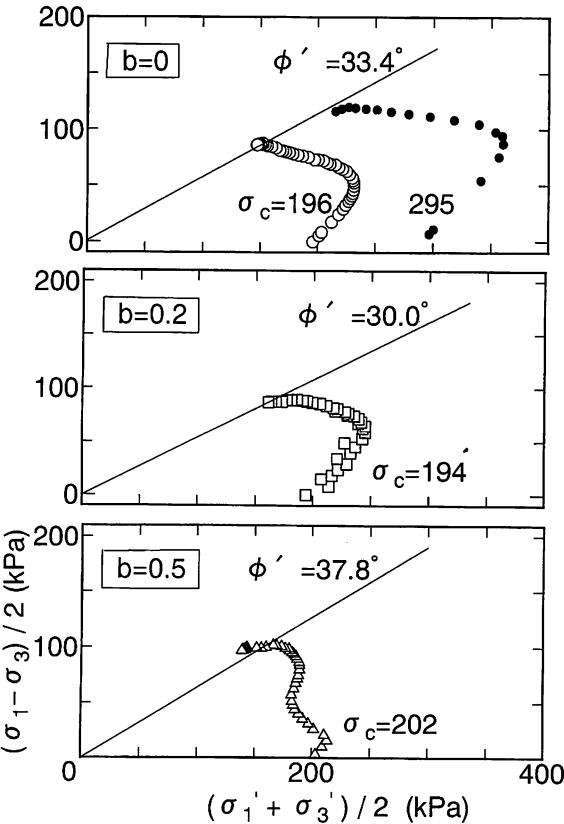


図-5 有効応力経路

(5) ダイレイタンスー
 Δu のダイレイタンスー成分 Δu_d は次式で与えられる。

$$\Delta u_d = \Delta u - \Delta \sigma_{oct} \tag{5}$$

Δu と同様に、 ϵ_v も $\Delta \sigma_{oct}$ によるものとせん断応力によるものとの和として、それぞれ圧密成分・ダイレイタンスー成分と呼ぶ。 σ_{oct} 一定排水せん断の場合は、測定された ϵ_v そのものがダイレイタンスー成分 ϵ_{vd} である。

図-6には、UDの規準化 Δu_d および ϵ_{vd} と η との関係を示す。なお、軸対称三軸試験では規準化 Δu_d を0.022倍したもの（以下では ϵ_{vdU} と略記する）は、応力比との関係においてDRの ϵ_{vd} （以下では ϵ_{vdD} と略記する）に等価であるとの既報³⁾の結果を、三主応力条件下でも用いた。

図によれば、 ϵ_{vdD} は η と直線関係にあり、その傾きは b 値によって変わらないようである。また ϵ_{vdU} は、せん断初期に一旦減少するが、 $\eta = 0.25$ 付近から反転して、その後は ϵ_{vdD} と同様の傾きで増加していく。この場合も b 値の影響は見られない。

Δu_d あるいは ϵ_{vdU} が一旦負になることから、 $\Delta \sigma_{oct}$ に比して Δu の発生に時間的遅れが考えられるものの、上昇に転じた以降の η との関係が ϵ_{vdD} のときと同様の傾向を示すことから、(5)式および、ダイレイタンスーを η で表すことの妥当性がうかがえる。

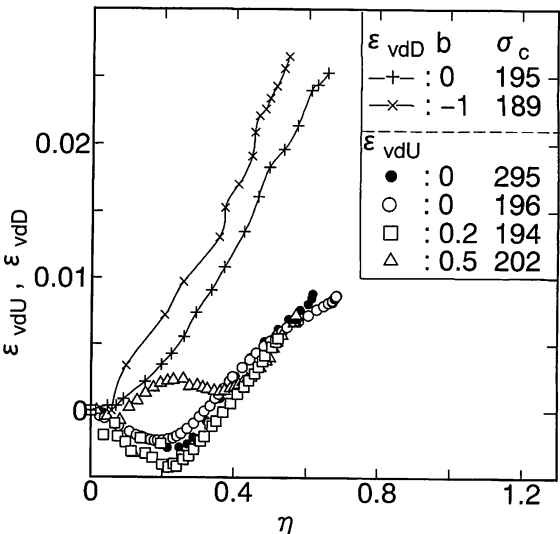


図-6 応力比とダイレイタンスーの関係

(6) 塑性ひずみ増分比

土の構成式を考えるときに、塑性ひずみ増分比（以下ではSIRと略記）が大きな意味合いをもつ。

$$\text{塑性ひずみ増分比 SIR} = \frac{d\varepsilon_{oct}^p}{d\varepsilon_v^p} \quad (6)$$

ここに上添字P：それぞれの塑性成分

ここでは塑性ひずみ増分 $\Delta\varepsilon_v^p$ と $\Delta\varepsilon_{oct}^p$ は、次の仮定の下に(7)式のように推定した²⁾。

- 1) ダイレイタンシーは全て塑性成分である。
- 2) Δu の σ_{oct} 成分の内、弾性成分は κ/λ の割合を占める（ κ 、 λ ：膨張指数、圧縮指数）。
- 3) $\Delta\varepsilon_{oct}$ の弾性成分は弾性論を準用して求めることが出来る。

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_{vD}^p &= \varepsilon_{vd} \\ \varepsilon_{vU}^p &= 0.022 \left(\frac{\Delta u^p}{\sigma_c} \right) \\ \Delta u^p &= \Delta u_d + \left(1 - \frac{\kappa}{\lambda} \right) \Delta \sigma_{oct} \\ \varepsilon_{oct}^p &= \varepsilon_{oct} - \frac{\sigma_c}{G} \Delta \eta \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

上式で圧縮指数 $\lambda=0.13$ 、膨張指数 $\kappa=0.028$ 、剛性係数 $G=9240\text{kPa}$ として²⁾得た値を図-7に示す。

図は、 ε_{vD}^p に比べて ε_{vU}^p が小さいこと、およびDRでは破壊状態に達していないことを示している。これは図-6のように、UDのダイレイタンシーがDRのそれに比して小さいことや、DRが応力制御方式のせん断のために、破壊状態付近のひ

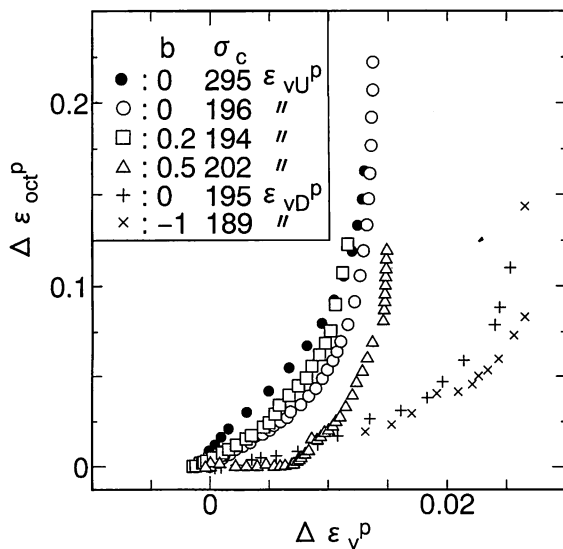


図-7 塑性ひずみの関係

ずみが精度よく計測出来ないことに対応している。

次に、図-7を3次曲線または指数曲線で近似して、その接線勾配をSIRとして求めた。

SIRに関しては、筆者らは、各種経路における K_0 圧密排水三軸試験結果から、修正Cam-clay理論⁴⁾に類似した(8)式を得ている。

$$\text{SIR} = \frac{a(\eta - \eta_0)}{(M - \eta_0)^2 - (\eta - \eta_0)^2} \quad (8)$$

ここに $\eta = q/\sigma_{oct}$

η_0 ：ダイレイタンシーが始まる η

M ：限界状態 η

a ：係数

図-8は、(8)式において、 η を $\eta = \tau_{oct}/\sigma_{oct}$ と置き換えて、さらに η_0 をダイレイタンシーが反転する(図-6)ときの η (=0.25)とし、 M を $b=0$ と-1の実験で得られた η_{max} により低減させた(0.64~0.54)ときのSIRと η の関係を示す。

図にみるように、両者はほぼ直線関係にある。(8)式の a に相当するその傾きは、DRでは b 値に依らず修正Cam-clay理論⁴⁾の $a=2$ に近い関係が得られた。一方UDでは、 b 値が小さくなるにつれて傾きが大きくなり、またせん断終期には直線から離れる傾向が見られた。

この傾きの増加は、(4)や(5)でのべた、UDのダイレイタンシーがDRのそれに比して小さいことに対応しており、傾き a の力学的意味合いを考えるには、UDによる更なる実験の積み重ねが必要と考えられる。

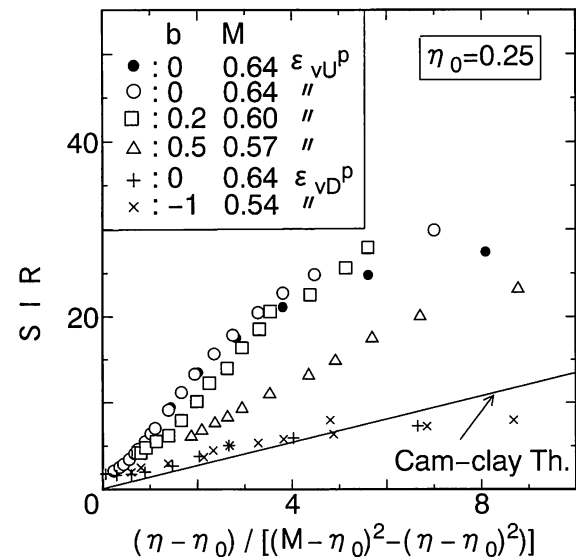


図-8 ひずみ増分比と応力比の関係

4. ま と め

飽和粘性土に対して、中間主応力の相対的大きさを表す b 値を変えた非排水せん断試験を実施して、主としてダイレイタンシーに関して考察を加えた。

考察の要点をまとめると以下のようである。

- 1) b 値が大きくなるにつれて、破壊応力が増加して破壊時のひずみが減少しており、ひずみ硬化型からひずみ軟化型への移行が認められる。
また同じ σ_c であっても、 σ_{oc1} と ε_{oc1} の関係が b 値や、とりわけ排水条件によって異なる。
- 2) ϕ' と b 値の関係に一定の傾向は見出せず、より幅広い b 値の実験による検討が必要である。
- 3) ダイレイタンシー発生割合 a に及ぼす b 値の影響は小さい。
- 4) ダイレイタンシー成分(η 成分)の ε_{vd} と u_d はほぼ等価と見なすことができる。またダイレイタンシーを η との関連で表すことは妥当である。
- 5) 三主応力が異なっても、塑性ひずみ増分比と応力比の関係は軸対称試験で得られたものと類似したものであった。したがって、提案式を三主応力場における非排水せん断挙動の解析に適用することは可能であると思われる。

今後は、せん断ひずみや塑性ひずみ増分比に関する考察を更に進めるとともに、圧密・せん断経路を変えた実験等によって本報告を発展させていきたい。

結びにあたり、実験を実施した本校卒業生の山下一樹（現室蘭工業大学学生）、Mazran Bin Zainondin（現長岡技術科学大学学生）両君に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 池浦勲、小野丘；三主応力条件下での粘性土の応力－ひずみ関係、苫小牧工業高等専門学校紀要、第27号(1992)
- 2) 池浦勲、三田地利之；異方圧密粘土の応力－ひずみ関係に及ぼす応力経路の影響、土質学会論文報告集、第26巻 3号(1986)
- 3) 池浦勲、中村努；粘性土の非排水せん断におけるダイレイタンシー特性、苫小牧工業高等専門学校紀要、第32号(1997)
- 4) Roscoe, K.H. and Burland, J.B. (1968): "On the generalized stress-strain behaviour of 'wet' clay", Engineering Plasticity, Cambridge Univ. Press.

(平成12年11月27日受理)