

粘性土の三軸伸張および等方圧縮挙動に対する せん断履歴の影響

清水 正 喜

EFFECTS OF SHEAR STRESS HISTORY ON STRESS-STRAIN BEHAVIOURS IN “TRIAxIAL EXTENSION” AND ISOTROPIC COMPRESSION OF CLAY

Masayoshi SHIMIZU

Synopsis

In order to clarify the effects of shear stress history on stress strain behaviours in triaxial extension and isotropic compression of a remoulded clay, samples which were initially normal-consolidated and subsequently subjected to shear deformation by loading-unloading cycle in triaxial compression, were sheared under p -constant drained condition in triaxial extension or consolidated isotropically.

Conclusively, it is as follows that are clarified:

- 1) inside the State Boundary Surface (SBS) defined in (p, q, e) space, volume change behaviour at const. p is relatively subject to the effect of shear stress history although shear strain behaviour is not.
- 2) plasticity theory of isotropic hardening type is not available to describe the shearing behaviour inside SBS, but is appeared to be predictable for isotropic compression behaviour of samples having subjected to shear stress history, and
- 3) over-consolidation ratio (OCR) defined by Cam Clay model, of pre-sheared samples, in spherical stress condition are not appropriate to describe stress-strain behaviours inside SBS.

1. 序 論

本研究は、三軸圧縮応力条件のもとで与えたせん断応力の履歴が、その後の応力径路による挙動に如何なる影響を与えるかという点について、粘土を対象にして行った実験的研究である。

一般に、応力履歴を最も簡単に表現し得るのは弾塑性論であろうと思われる。実際、弾塑性論に基いて土の応力-ひずみ挙動を記述する試みは古くから行われ、一応の成果を上げている。とくに、近年、解析の手法とそれを解くための手段の著しい進歩のために、少々複雑な式であっても十分実用的解析が行えるようである。

理論を構成する上で立てられた基本的な仮定を検討する作業が必要かと思われる。ここでは、時間効果の無い平衡状態の応力-ひずみ特性を明らかにする立場で、粘土の排水試験を行って、基礎的な現象の理解を目ざしている。

せん断変形の履歴は、平均有効応力を一定にした軸対称三軸圧縮応力下で与え、その後の応力径路として、除荷・伸張応力下のせん断、および除荷・等方応力による圧縮を選んだ。明らかにしたい点は、せん断応力を除荷したときのダクタランスの挙動と、関連したせん断変形挙動、および等方圧縮変形挙動である。弾塑性論に立脚した理論を立てることを目的としているので、考察は、主として Cambridge 理論¹⁾を念頭において行っている。以下用いた記号について説明する：

p : 平均有効応力 ($=(\sigma_a+2\sigma_r)/3$, ここに σ_a は軸方向応力, σ_r は側方応力)

η : 応力比 ($=(\sigma_a-\sigma_r)/p$)

v : 体積ひずみ (供試体の体積の変化から測定)

ϵ : せん断ひずみ ($\epsilon_a-v/3$, ここに ϵ_a は軸方向のひずみで供試体高さの変化から測定)

以上の定義に従えば, 三軸圧縮条件時には $\eta > 0$, 伸張条件時には $\eta < 0$ となる。また, 応力はすべて有効応力である。

2. 実 験

2.1 試料および実験装置

試料は, 市販の粉末乾燥粘土 (通称「藤の森粘土」) を高含水比で練り返した後, 大型圧密リング内で, 圧密圧力 49 kPa で K_0 圧密・膨潤したものをを用いた。粒度分布を Fig. 1 に, 物理特性を Table 1 に示す。実験時には, 断面積 10 cm², 高さ 8.0 cm の円柱形に成形した。

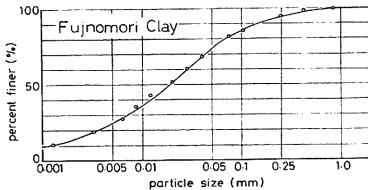


Fig. 1. Grain-size distribution curve.

Table 1. Physical properties of Fujinomori Clay.

G_s	$P.L.$	$L.L.$	$P.I.$
2.64	27.8	54.0	26.2

実験装置は, NGI 型三軸試験機を用いた。同試験機は, 市販の形態のままでは, 応力制御による三軸伸張試験ができないので, 軸荷重載荷用レバーに工夫を施し, 試作した。Photo. 1 に改良前の, Photo. 2 に改良型の載荷装置を示した。

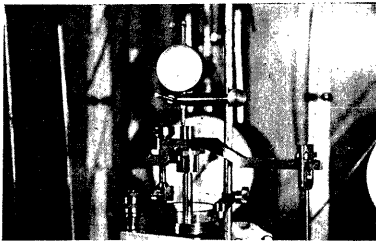


Photo. 1. Axial loading lever available for triaxial compression only.

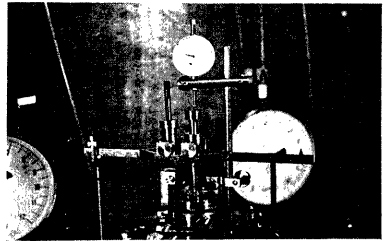


Photo. 2. Improved axial loading lever available both triaxial compression and extension.

2.2 実験方法

すべて応力制御による三軸排水試験である。はじめに 98 kPa で, ついで 392 kPa でそれぞれ約 1 日等方圧密し, 次に述べる 4 種類の応力経路に沿って実験した (Fig. 2):

- 単調載荷試験 (MC または ME): 等方応力状態より p を一定に保って応力比 η を単調に 0.1 ずつ増加 (三軸圧縮: MC) あるいは減少 (三軸伸張: ME) させて, それぞれ圧縮あるいは伸張状態で破壊させる。
- 圧縮・伸張逆転試験 (RCE): 等方応力状態より, p を一定に保ち, 応力比 η を所定の応力比 η_R まで

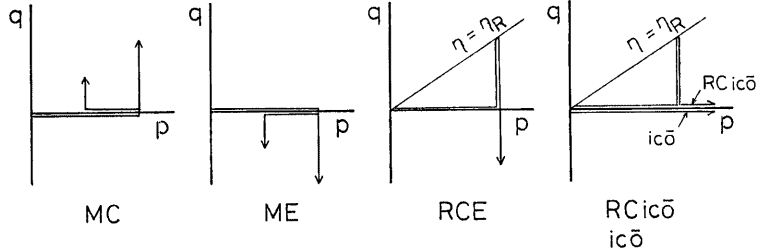


Fig. 2. Schematic representation of stress paths used in this study.

- 増加させ、以後 η を0.1ずつ減少（除荷）させ、等方応力を経て伸張状態で破壊させる。
- c. 圧縮せん断・等方圧縮試験 (RCICO): p を一定に保ち応力比 η を0.1ずつ増加させて所定の応力比 η_R に到れば η を0.1ずつ減少（除荷）させ、等方応力状態に達したとき、等方応力状態のまま p を49 kPa ずつ増加させて圧密を続ける。
 - d. 等方圧縮試験 (ICO): せん断力を与えず、 p を増加させて等方圧縮のみを当る。

Table 2 に、行った実験を一括して示した。

どの試験においても、各荷重段階における載荷時間は約1日であるが、ダイヤルゲージによる軸変位の読みとビュレットで測った体積変化を読みとりつつ、変形が落ち着かないときは、時間に対する関係をプロットしつつ変形が落ち着いてから次の荷重段階へ移った。

3. 単調試験の結果と考察

3.1 三軸圧縮および伸張下の挙動の比較

(1) 強度の比較

Table 2 に破壊時の応力比 (η_f) を記したが、そのときの有効応力状態を Fig. 3 に示す。

OCR=1 の場合、内部摩擦角 ϕ' は、三軸圧縮および伸張に対してそれぞれ、 $\phi'_{comp} = 34.6^\circ$ 、 $\phi'_{ext} = 36.9^\circ$ となり、伸張の方が約 2° 大きくなった。正規圧密状態で破壊したときの、破壊時の供試体の形状は、実験時の観察によれば、Fig. 4 のようである。すなわち、変形が大きくなり破壊に近づくとき、圧縮時には「樽」

Table 2. List of tests.

Test No.	Test Type	OCR	p (kPa)	η_R	η_f
1	MC	1	392	—	1.4
2		2	196	—	1.5
3		8	49	—	1.9
5	ME	1	392	—	-1.0
6		2	198	—	-1.1
7		2	392	—	-1.1
8		8	49	—	-1.3
9	RCE	1	392	0.4	-1.0
10		1	392	0.8	-1.0
11		1	392	1.1	-1.0
12		1	392	1.1	-1.1
13	RCICO	1	392	0.4	—
14		1	392	0.8	—
15	ICO	1	—	—	—

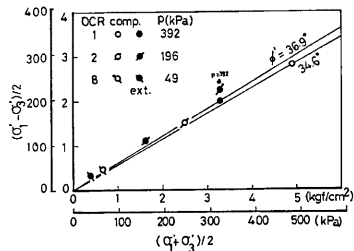


Fig. 3. Effective stress states at failure of monotonous compression (MC) tests and monotonous extension (ME) tests.

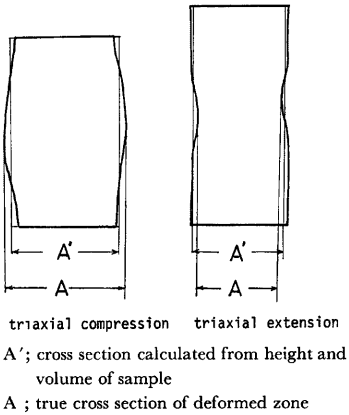


Fig. 4. Schematic representation of the shape of normally consolidated samples which are being failed
 (a) by triaxial compression
 (b) by triaxial extension.

状の、伸張時には「くびれ」状の領域が生じた。破壊面付近の断面積 (Fig. 4 の A) は、供試体の高さ と体積から計算された断面積 (同図の A') と異なるが、圧縮時には $A' < A$ 、伸張時には $A < A'$ となる。したがって圧縮時の破壊面付近での応力は、計算による応力値よりも小さく、伸張時にはその反対となり、 ϕ'_{comp} と ϕ'_{ext} の差は実際はもっと小さいと思われる。

過圧密 ($OCR=2$, または 8) の場合には、破壊時を除いて圧縮と伸張の変形形状の差は明らかではないが、破壊時の傾向としては、 $OCR=1$ の場合と同様のことが言える。

(2) 変形挙動の比較

(a) $OCR=1$ の場合 Fig. 5 に $OCR=1$ の場合の単調試験から得られた応力-ひずみ関係を示す。Fig. 5 (a) からわかるように、 $|\eta| \sim |\epsilon|$ の関係は、 $|\eta| \leq 0.4$ 程度の小さい応力比段階では圧縮側、伸張側の挙動に差はなく、応力比が大きくなるにつれて、両者の関係が異ってくる。

一方、Fig. 5 (b) に示した $|\eta| \sim v$ 関係について

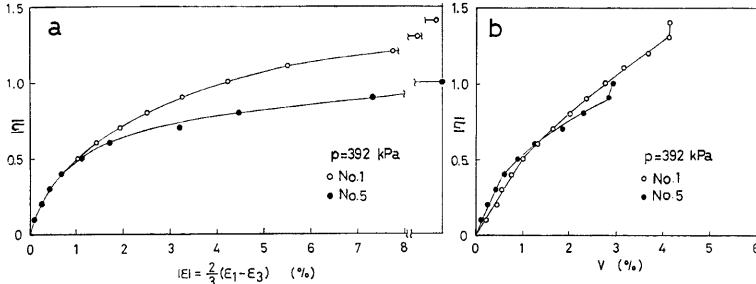


Fig. 5. (a) Stress ratio η and shear strain ϵ of MC and ME ($OCR=1$).
 (b) Stress ratio η and volumetric strain v of MC and ME ($OCR=1$).

みると、 v は圧縮・伸張を問わず正であり伸張側で破壊するときの応力比まで両者の傾向がほぼ一致している。伸張状態の破壊時の応力比は、圧縮状態に比べて小さいが、その v は、圧縮時の $\eta \sim v$ 関係より大きくは、はずれていない。このことは、Cambridge 理論¹⁾ に用いられているように、 (p, q, e) 空間で土の状態を表現すると、 p 一定面で切った状態境界面の形が圧縮側と伸張側とで大きくは異なるないことを表わす (ここに e は間隙比)。ただし、破壊時の $|\eta|$ と v が異なる分だけ、伸張状態の限界線 (Critical State Line) の (e, p) 面への投影線は、圧縮側のそれに比べ、処女圧縮曲線に近くなる。すなわち、圧縮、伸張いずれも (e, p) 面上の等応力比線は同じであるが、限界線は圧縮と伸張とで異なる。

さて、破壊時の供試体形状 (Fig. 4) の比較より次の考察が行える。変形の最も進む領域は、Fig. 4 に示したように圧縮時の方が伸張時より大きい。一方、体積変化は供試体全体で測っているため、体積圧縮の程度

は、圧縮側伸張側いずれも過小評価されていて、過小評価の程度は伸張側の方が大きいと思われる。よって、破壊時の体積ひずみは、実験で得られたものより、圧縮・伸張の差が小さくとなると考えられる。

(b) $OCR=2$ の場合 Fig. 6 からわかるように、 $|\eta| - |\epsilon|$ 関係は $OCR=1$ の場合と似た傾向を示している、すなわち、 $|\eta| \leq 0.6$ 程度で圧縮・伸張に差はないが、 $|\eta|$ が大きくなるにつれて同じ $|\eta|$ に対する $|\epsilon|$ は、伸張時に大きくなる。一方、ダイレタンシーは圧縮・伸張ともに $|\eta| \leq 1.0$ まではほとんど発生せず

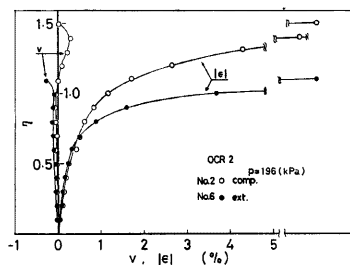


Fig. 6. Stress ratio η and shear strain ϵ or volumetric strain v of MC and ME ($OCR=2$).

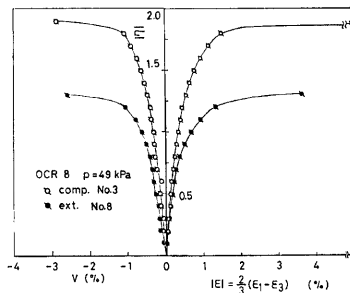


Fig. 7. Stress ratio η and shear strain ϵ or volumetric strain v of MC and ME ($OCR=8$).

ず $|\eta| \geq 1.0$ で、圧縮の場合には、いったん負（体積圧縮）のダイレタンシーを生じてから破壊に至っているのに対して、伸張の場合には、ダイレタンシーの傾向を変えることなく破壊に至っている。このように、伸張側で破壊する応力比までの $|\eta| \sim v$ 関係は、 $OCR=1$ の場合と同様、伸張・圧縮で差がないことがわかる。

(c) $OCR=8$ の場合 Fig. 7 に示したように、 $|\eta| \sim \epsilon$ 関係は、破壊応力比の1段階前の応力比までは変形が小さいが破壊応力に達すると急にひずみが増加している。一方、ダイレタンシー挙動は、圧縮・伸張ともに顕著に正（膨張）の側で発生している。

3.2 Cam Clay モデルとの比較

Cambridge 理論の適用性については種々実験的な検討も加えられているが、ここではそれを過圧密の領域で検討する。

Fig. 8 は、等方応力下で過圧密された土のせん断 (p 一定) 時の挙動を Cam Clay モデルにより定性的に説明したものである。等方応力下で過圧密された土は、 (e, p) 面上に投影された限界線 (Fig. 8 で CSL と記す) の位置との相対関係により、Wet 側と Dry 側に分けられる。Fig. 8 においては、考察を容易にするため (e, p) 面は $(e, \ln p)$ 面としているが、その面上に状態を投影した点が処女圧縮線 (Fig. 8 では VCL と記す) と限界線との間にあるとき Wet 側にあるといい、反対側にあるときを Dry 側にあるという。

(1) Wet 側での挙動

Cam Clay モデルによれば、Fig. 8 において、A 点から p 一定でせん断された土は、初期降伏曲面上の点 A' に達

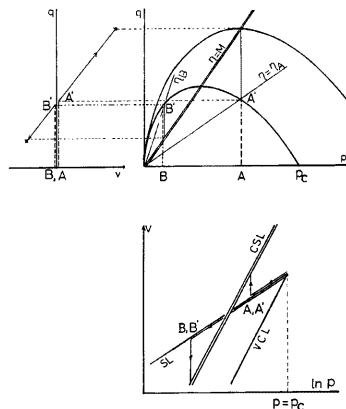


Fig. 8. Volume change behaviour predicted by Cam Clay model for lightly or heavily overconsolidated clay.

するまで弾性的であり、 $d\epsilon=0$ 、かつ p 一定時には $dv=0$ となる。ここに、初期降伏線は

$$\eta + M \cdot \ln(p/p_c) = 0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

で与えられる。 p_c は最大等方圧密圧力である。

Fig. 6 の Test No. 2 ($OCR=2, p=196 \text{ kPa}$, MC) の結果と比較する。初期降伏点 A' の応力比 $\eta_{A'}$ は、(1) 式に $p_c=392 \text{ kPa}$, $M=1.4$, $p=196 \text{ kPa}$ を代入して、 $\eta_{A'}=0.98$ と求められる。Fig. 6 から、 $|\eta| \leq 1.0$ においては体積変化はほとんどなく、 $\eta > 1.0$ において体積ひずみは正の方向に発生していることがわかり、Fig. 8 の定性的予測と合っている。

次に、同じく Fig. 6 に示した Test No. 6 ($OCR=2, p=196 \text{ kPa}$, ME) についてみると、 $\eta_{A'} = -0.7$ ($M = -1.0, p_c=392 \text{ kPa}, p=196 \text{ kPa}$) となるが、Fig. 6 から明らかなように、 $|\eta|$ が 0.7 を越えても体積ひずみはゼロか負のままであって、正に符号を変えていない。

(2) Dry 側の挙動

Fig. 8 の B 点から p 一定でせん断された土は、初期降伏曲線上の B' 点に至って応力比を減じつつ正のダイレタンシーを伴って限界状態 (Critical State) に達する。Fig. 7 の Test No. 3 ($OCR=8, p=49 \text{ kPa}$, MC) についてみると、計算によると $\eta_{B'}=2.91$ ($p_c=392 \text{ kPa}, M=1.4, p=49 \text{ kPa}$) となるが、実際は、 $\eta_{B'}$ 以下の $\eta=1.8$ において破壊している。(応力制御による実験のため、ピーク応力比を越えて軟化する部分は実験できない。) また、先に指摘したように破壊に至るまでも、小さいが正のダイレタンシーの発生が見られる。伸張側の Test No. 8 に対しても同様のことが言える。

以上のことから、三軸圧縮状態の Wet 側のものは、Cam Clay モデルにより、 p 一定時の体積変化挙動の定性的傾向は説明がつくことがわかったが、Dry 側のものは、Cam Clay モデルによる状態境界面に達するよりはるか以前に破壊してしまうこと、三軸伸張状態に対しては、理論上 Wet とされるものについても定性的にも説明がむずかしく、Dry 側の場合には、圧縮時と同様のことが言えることがわかった。また、Wet, Dry を問わず、理論上の初期降伏点に至るまでも、せん断ひずみの発生が見られ、修正 Cam Clay モデル¹⁾ にとり入れられたように、状態境界面内部での降伏曲面導入の必要性が明らかであろう。

4. 圧縮・伸張逆転試験の結果と考察

4.1 タイレタンシー挙動

(1) 二次圧密の効果について

Fig. 9 に圧縮・伸張逆転試験 (RCE) および $OCR=1$ の場合の単調圧縮 (MC) ならびに単調伸張 (ME) 試験から得られた応力比 η と体積ひずみ v の関係を示す。三軸圧縮側でのせん断の履歴が伸張側での挙動に対する影響をみるためには、履歴を受けていない Test No. 5 の結果と履歴を受けた Test No. 9~12 の結果を比較する必要がある。ところが、履歴を与えた試験では、圧縮側でのせん断とひきつづく除荷の過程で、履歴を与えない試験より多くの時間を要している。そこで、時間効果を取り除くため、つぎのような補正を行った。

Fig. 10 は、Test No. 15 (ICO, $OCR=1$) の、 p を 98 kPa から 392 kPa まで増したときの圧密時間曲線である。同図には、Test No. 5 の結果も示したが、所謂二次圧密の領域で、体積ひずみ v_{sc} の変化は時間の対数に比例していることがわかる。式で表わせば

$$dv_{sc} = \alpha \cdot d \ln(t/t_0) \quad \dots\dots\dots (2)$$

となる。ここに

t : $p=392 \text{ kPa}$ の圧密開始後の経過時間

t_0 : 単位時間

α : Fig. 10 の二次圧密領域の勾配に相当し、定数

今、せん断に先立つ $p=392 \text{ kPa}$ での等方圧密に要した時間を t_c 、せん断を開始して以後の経過時間を dt とおくと、(2) 式は (3) 式で表わされる:

$$v_{sc} = \alpha \cdot \ln \{(t_c + dt)/t_c\} \dots\dots\dots (3)$$

この v_{sc} は、 $dt=0$ 即ちせん断開始点を基準にしたときの、せん断に先立つ等方圧密時の二次圧密による体積ひずみである。せん断の履歴を受けている間の体積ひずみに含まれた時間効果を表わす。Fig.9の横軸の v は、せん断を開始してから測定した体積ひずみから、(3)式による v_{sc} を引いたものである。なお、Fig.10より決定された α の値は、 2.81×10^{-2} である。

また、せん断履歴過程では、せん断応力によるクリープ量の累積も含まれているが、 v_{sc} に比べて小さいので無視した。Fig.10において、No.1 (MC, OCR=1) の結果は二次圧密補正を行っていない v を用いたため、他の試験と比較することにより、二次圧密の影響の程度を知ることができる。

(2) 状態境界面内部でのダイレタンシー挙動

Fig.9では、はじめに圧縮側でせん断した試料の、圧縮側載荷部 ($\eta: 0 \rightarrow \eta_R$) では、Fig.5(b)の結果と同様、負のダイレタンシーがせん断開始直後から発生している。

除荷過程 ($\eta: \eta_R \rightarrow 0$) に入ると、No.9, 10, 11, 12のいずれも、ある応力比までダイレタンシーの発生はないか、あっても無視できるほど小さく、かつ η と v の関係は直線的である。その直線部を過ぎて、再び負のダイレタンシーが発生し、 v の変化の殆んど無い状態で破壊している。

さて、Fig.9のNo.9~12の初期圧縮載荷部 ($\eta: 0 \rightarrow \eta_R$) の曲線と、No.5の曲線全体は、 (p, q, e) 空間における状態境界面を、 $p=392$ kPa一定の面で切った切り口を表わしている。したがって、同図より明らかなように、除荷を受けることにより、状態境界面内部に入ることになる。すなわち、No.9~12の曲線は、状態境界面内部におけるダイレタンシー挙動を表現するものである。

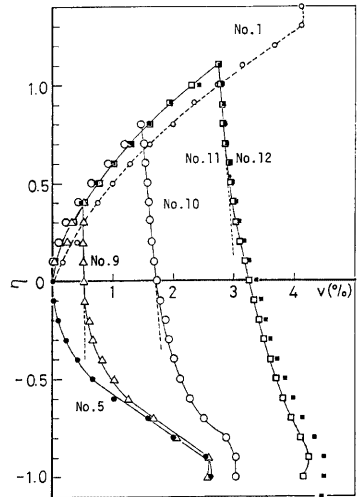


Fig. 9. Stress ratio η and volumetric strain v of RCE, RMC (OCR=1) and RME (OCR=1).

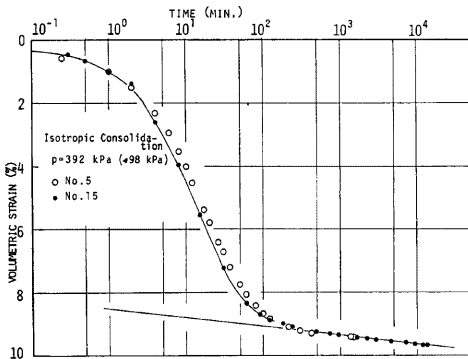


Fig. 10. Isotropic consolidation curves under $p=392$ kPa ($\leftarrow 98$ kPa).

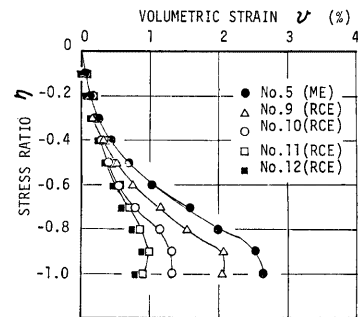


Fig. 11. Comparison of volume change behaviour in "extension" side for ME (OCR=1) and RCE tests. Strains for RCE tests are referred to the isotropic stress state after unloading.

Fig. 9 において, No. 9 ($\eta_R=0.4$) は, 除荷後 $\eta=-0.1$ までダイレタンスーの変化はなく, さらに伸張側でせん断を続けることにより, 負のダイレタンスーが再び顕著に発生するとともに, $\eta=-0.6$ あたりから No. 5 (ME) の曲線と一致, すなわち状態境界面上に達し, No. 5 と同じ挙動を示しつつ, 破壊に至っている。

ところが, η_R が No. 9 のそれより大きい No. 11 (または 12, $\eta_R=1.1$) は, No. 5 の曲線に達する前に, すなわち Wet 側の状態境界面に達せず Dry 側で破壊している。また, No. 10 ($\eta_R=0.8$) は, No. 5 と No. 11 (または 12) との中間の挙動を示している。結局, η_R がある大きさ以上になると, 圧縮側で受けたせん断によって発生したダイレタンスーにより, 伸張側では Dry 側で破壊すると言える。 η_R が小さいときは, wet 側で状態境界面に達し, その面上でダイレタンスー挙動は, 履歴を受けない場合と変らない。

(3) 伸張側ダイレタンスー挙動の比較

伸張側に入ってから挙動を比較するため, 除荷後の等方応力状態を基準にした体積ひずみと応力比の関係を Fig. 11 に示す, 同図より, η_R が大きくなるほど, v の出方は小さい。Fig. 5, 6 および 7 における No. 1 (OCR=1), No. 6 (OCR=2) および No. 8 (OCR=8) の挙動との類推から, η_R が大きいほど, ダイレタンスーの挙動は所謂過圧密的になっていくと言える。

4.2 せん断ひずみの挙動

(1) 瞬時変形について

Fig. 12 に RCE 試験から得られた応力比 η とせん断ひずみ ϵ との関係を示す。同図において, ϵ は, 各応力段階において, 載荷 (または除荷) に際して瞬時に発生する軸ひずみ (6 秒後のひずみで代用) をひいた軸ひずみを用いて計算したものである。

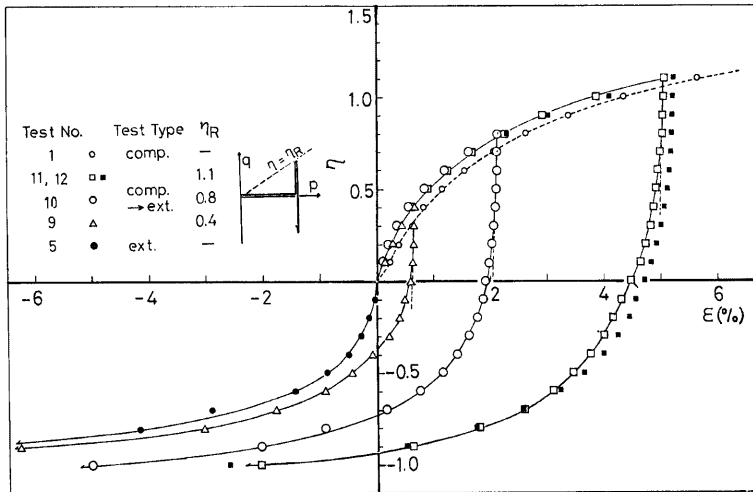


Fig. 12. Stress ratio η and shear strain ϵ of RCE, MC (OCR=1) and ME (OCR=1).

Fig. 13 は, Fig. 12 に示した試験について, 応力比と各載荷段階で生じた瞬時軸ひずみ (ϵ_{ai}) の累積量 $\Sigma(\epsilon_{ai})$ をプロットしたものである。No. 1 および No. 9~12 の初期圧縮載荷部 ($\eta: 0 \rightarrow \eta_R$) では, η と $\Sigma(\epsilon_{ai})$ との間には線型関係が見られ, ひずみ量そのものも小さい。除荷時には, 完全にはもとの載荷線上を戻っていないが, 戻った量の占める割合は, Fig. 12 の結果と比べて非常に大きい。このことから, 各応力

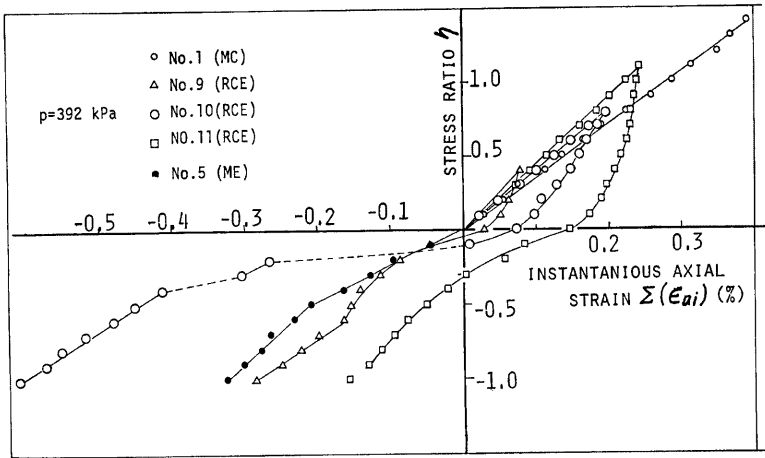


Fig. 13. Stress ratio η and cumulated instantaneous axial strain $\Sigma(\epsilon_{ai})$.

段階で生じた瞬時ひずみを差し引くことは、弾性的変形の大部分を取り除く意味をもつと思われる。

さらに、同図において、除荷後、等方応力状態から伸張応力状態へ入るときに、とくに、No. 10 において顕著であるが、不連続的に大きい瞬時軸ひずみが生じている。これは、圧縮と伸張の両用載荷用キャップと載荷ラム（ピストン）との接続を剛な機構にしていな²³ため、軸方向力の向きが反対になるときに生じるあそびによるものである。したがって、瞬時変形量を引くことにより、とくに圧縮から伸張へと変化するような実験においては、得られたデータの整合性を増すことになる。

なお、Fig. 12 の No. 1 の結果は、この瞬時変形量の補正を施していないので、他の結果と比べることにより、瞬時変形の影響の程度を知ることができる。

(2) 状態境界面内部のせん断ひずみの挙動について

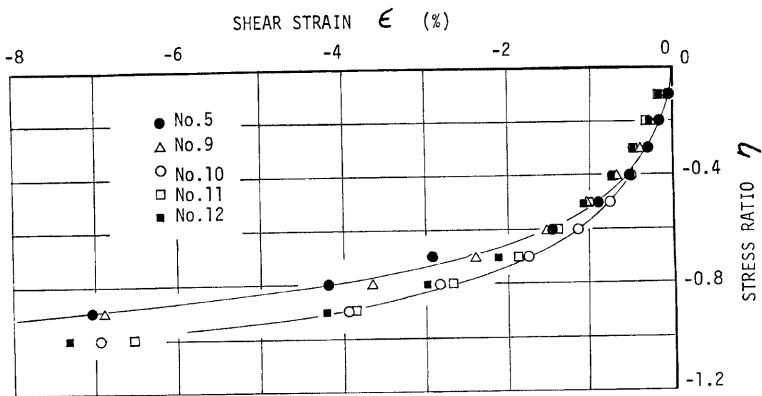


Fig. 14. Comparison of shear strain behaviour in "extension" side for ME ($OCR=1$) and RCE tests. Strains for RCE tests are referred to the isotropic stress state after unloading.

Fig. 12 から、圧縮側せん断の履歴を与えたものは、除荷後ある応力比までほとんどひずみの発生しない、かつ直線の部分が存在する。この直線部を過ぎると、ひずみは、符号を反対に変えて発生を始め、破壊している。

前節で明らかにしたように、No. 9 は、 $\eta = -0.6$ あたりで状態境界面に達しており、Fig. 12 においても、履歴のない No. 5 の曲線に近い挙動を示していることがわかる。一方、 η_R の大きい No. 10~12 は、破壊する迄、 ϵ は同じになることはない。

(3) 伸張側せん断ひずみ挙動の比較

前節同様、伸張側におけるせん断ひずみの挙動を比較するために、除荷後の等方応力状態を基準にしたひずみと応力比の関係を Fig. 14 に示した。 η_R が小さく、かつ、Wet 側の状態境界面上に至ることがわかっている No. 9 の挙動は、 η_R のより大きい No. 10, 11 (または 12) と異なり No. 5 の挙動に極めて似ていることがわかる。Fig. 13 から見る限り η_R の大きい 3 つの挙動には、 η_R の大きさに依存した傾向は見られず、 η_R がある程度大きくなれば、 η_R の大きさに依らない関係線上にプロットされるようである。

4.3 弾塑性理論の仮定について

(1) 状態境界面内部での弾性領域について

4.1 および 4.2 で考察したように、圧縮側でせん断の履歴を受けた試料は、除荷後ある範囲において弾性的挙動を示す。すなわち、ダイレタンスの挙動からは、その量が小さく応力と線型になる部分、一方、せん断ひずみの挙動からは、やはり発生量が小さく応力と線型関係になる部分が存在した。また、この領域の大きさは、 (p, q) 面上において除荷開始点の p 軸に関する対称点に至る領域よりはるかに小さい。言い方を代えれば、除荷を受けたとき、古典的弾塑性論における等方硬化理論で予測されるよりも早く降伏を開始しており、このような除荷時の挙動を記述するうえで、等方硬化理論を適用できないことを示唆している。

(2) 応力比-ひずみ増分比関係に与えるせん断履歴の影響

Fig. 9 または Fig. 12 に示したすべての実験から得られた応力比とひずみ増分比の関係を Fig. 15 に示す。同図においては、せん断ひずみ増分 $d\epsilon$ の算出に際して、4.2 で述べた理由から、瞬時変形によるひずみをひ

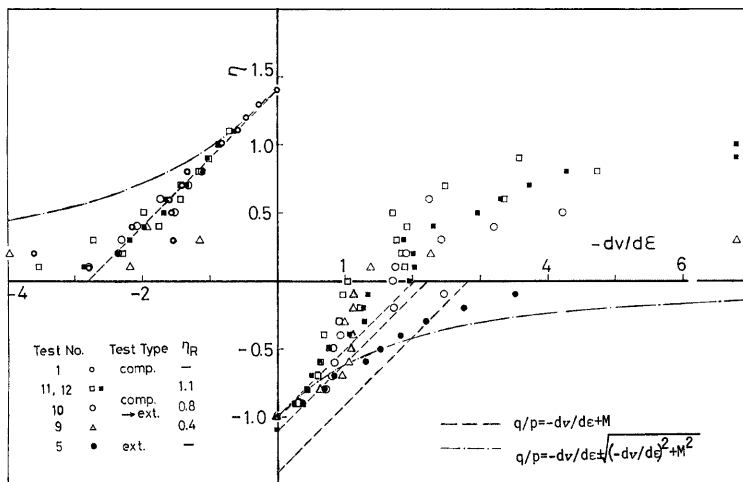


Fig. 15. Stress ratio η and strain increment ratio $-dv/d\epsilon$ for RCE, MC ($OCR=1$) and ME ($OCR=1$).

いたものを用いた。ただし、体積ひずみ増分 dv には、二次圧密の補正は行っていない。

Fig. 15 において、破線は (4) 式で表わされる Original Cam Clay モデルにおいて仮定されたエネルギー式を、一点鎖線は、(5) 式で表わされる修正 Cam Clay モデルにおける関係を、それぞれ表わす：

$$q/p = -dv/d\epsilon + M \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$q/p = -dv/d\epsilon \pm \sqrt{(-dv/d\epsilon)^2 + M^2} \quad \dots\dots\dots (5)$$

まず、せん断の履歴を受けていない処女載荷部の関係を見る (Fig. 14 の第 2 象限のすべてのプロットおよび第 4 象限の No. 5 のプロット)。圧縮側 (第 2 象限) においては、(4) 式に近い関係に、反対に伸張側 (第 4 象限の No. 5) ではむしろ (5) 式に近い関係にそれぞれプロットされていることがわかる。

つぎに、圧縮側せん断履歴を受けた No. 9~12 の除荷後の部分 (第 1, 4 象限) は、ばらつきはあるが、 η_R の大きさにより定性的な差異が見出される。いずれも、伸張側である η の値に達すると、履歴を受けていない No. 5 の関係に近づき、その線上を移動して破壊に至っていることがわかる。No. 5 の関係は、状態境界面上の関係を表わしていることを考えると、Fig. 9 において明らかであったように、状態境界面に達していない (あるいは Dry 側で達する) No. 10~12 においても、ある応力比以上までせん断されると、応力比-ひずみ増分比関係は、状態境界面上の関係で表わされるといえる。さらに、このことは、状態境界面に至らずとも、そ性ポテンシャル関数が、状態境界面のものと同じ形になることを示す。

(1) の考察結果と併せて考えると、状態境界面内部の塑性ポテンシャルの形 (Associated flow rule に従う材料と仮定すると降伏曲面の形) は、せん断後除荷を受けた場合にも、ある応力比レベルに達すれば等方的に拡大していくタイプのものであると推察される。

なお、状態境界面上の関係になる前の応力比-ひずみ増分比関係については、 η_R との関係において明らかにされねばならない。今後の課題としたい。

5. 等方応力下の変形挙動に対するせん断履歴の影響

Fig. 16 に RCICO 試験および ICO 試験の結果を示した。同図の上半分は応力比 η と体積ひずみ v の関係を、下半分は $\log p$ と v の関係を表わしている。ひずみは、RCICO 試験において、せん断に先立つ $p = 392 \text{ kPa}$ での圧密終了時 (1440分の圧密) のを基準にしたものであり、ICO の No. 15 の v は、 $p = 392 \text{ kPa}$ においても $v \approx 0$ である (Fig. 10 に $p = 392 \text{ kPa}$ での圧密時間曲線を示す) のは、この試験 (No. 15) は、No. 13 (RCICO) が圧縮領域でせん断を受けている時間 (11,520分) だけ、 $p = 392 \text{ kPa}$ で圧密をつづけたからである。したがって同図より、No. 13 の結果は、せん断・除荷後の等方応力状態で、 $p = 392 \text{ kPa}$ 一定での二次圧密の効果 (約 0.5% の v) を含んでいることがわかる。

また、除荷後の等方圧縮過程における各応力段階での圧密時間については、No. 15 と No. 13 はほぼ等しくなるように調整した (No. 14 は少し異なる)。No. 13 の全応力段階における圧密時間曲線を Fig. 17 に、No. 15 の $p = 392 \text{ kPa}$ での圧密段階における 1440 分経過後の時間曲線を Fig. 18 にそれぞれ示した。Fig. 17 と 18 を比較すること

により、圧密特性に及ぼすせん断履歴の影響を調べることができる。例えば $p = 490 \text{ kPa}$ における挙動と比較すると、No. 15 の方が同じ時間で圧縮する速さ大きい、 $p = 686 \text{ kPa}$ の挙動と比較すると両者に殆んど差がないことがわかる。云いかえれば、せん断の影響は p の値が大きくなるに従って消えている。

次に、Fig. 16 に戻って、せん断の履歴の等方圧縮過程への影響について考察する。せん断の履歴を受け

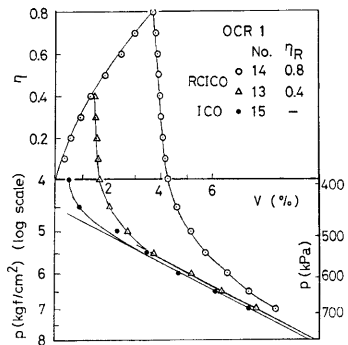


Fig. 16. Results of RCICO and ICO.

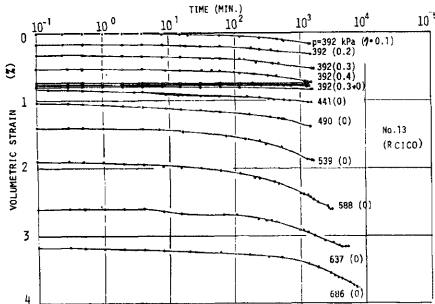


Fig. 17. Volumetric strain-time relation for Test No. 13 (RCICO) subjected to the shear history.

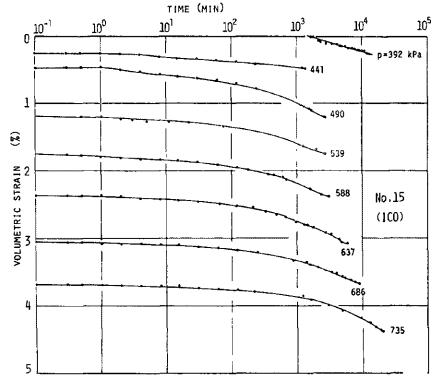


Fig. 18. Volumetric strain-time relation for Test No. 15 (ICO) without shear history.

た No. 13, 14 は、 p の増加とともに、No. 13 では $p=490\sim 540$ kPa, No. 14 では $p=690$ kPa あたりから、同じ勾配をもった直線上にプロットされてくる。図にひいた直線は、せん断に先立つ圧密段階 ($p=196, 392$ kPa) から求めた処女圧縮指数 ($C_c=0.551$) に基いたものである。このことから、せん断・除荷により状態境界面内部に入って、 p 軸に沿う等方圧縮を続けることにより、状態境界面に対し、同面上での体積変化挙動はせん断の履歴を受けないものと同じであることを示す。

p 軸上で、状態境界面に達するときの p の値: p_0 を、Cam Clay モデルにより計算すると、No. 13 ($\eta_R=0.4$) に対して $p_0=522$, No. 14 ($\eta_R=0.8$) に対して $p_0=694$ kPa と求められる。これらの p_0 の値は Fig. 16 から求めた結果と良く一致する。

以上の考察は、すべて Fig. 17 に示した程度の時間の載荷による結果に基いていて、同図からもわかるように、 p の増加とともに圧密性は悪くなり、変形が落ちつくのに長時間を要している。Cam Clay モデルが時間効果を含まない平衡時の応力-ひずみ関係を記述するためのモデルであることを考えれば、理論の予測と実験値の比較を行う上で、長期にわたる実験を行うことが必要であるといえる。

6. 等方過圧密履歴とせん断の比較

6.1 せん断に帰因する過圧密比

前章 5. で得られた結果は、最大先行圧密圧力 p_c の過圧密試料を再圧縮したとき p_c を越えると処女圧縮曲線上で変形するという性質と同じである。従って、せん断・除荷によって過圧密的 (等方応力状態で状態境界面内に存在) になった試料の過圧密比を p_0/p

Table 3. OCR defined by Cam Clay model for RCE and by preconsolidation for ME.

Test type	Test No.	p	OCR	
			p_0/p	p_c/p
RCE	9	392	1.3	—
	10	392	1.8	—
	11, 12	392	2.2	—
ME	6	196	—	2
	7	392	—	2

(ここに、 p_0 は、圧縮により処女圧縮線上に達するときの p の値) で定義することができる。本章では、このように定義された過圧密比によって、せん断の挙動を統一的に論じることができるといえる。

以上の観点から、RCE 試験 (No. 9~12) に対して、せん断・除荷後等方応力に達したときの過圧密比を計算すると Table 3 のようになる。No. 9~12 に対して、 p_0 の算定には、前章の結果から、Cam

Clay モデルを用いた。同表より、No.6 または 7 の OCR は、No. 10 と 11 (または 12) の中間にあることがわかる。

さらに、 p の影響が入るのを防ぐため、No. 7 と No. 10, 11 とを比較する。

6.2 応力変形挙動の比較

Fig. 19 は、No. 10 と No. 11 の除荷後の等方応力状態を基準にした体積ひずみと応力比の関係を示し、No. 7 (ME) の結果と比較したものである。No. 7 は、 OCR が No. 10 と 11 の中間の値であるにも拘らず、 OCR では説明できない挙動を示し、せん断変形の履歴の影響が強くなることを示している。No. 7 のこの結果は、Fig. 6 に示した No. 6 の結果と同じであり、せん断の履歴を受けない場合には、 $OCR (=p_c/p)$ により、ダイレタンシー挙動が統一的に記述し得るという従来の成果に反しない。

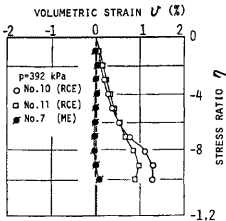


Fig. 19. Comparison of volume change behaviour for "shear-unloading"-induced O.C. state and real preconsolidation-induced O.C. state.

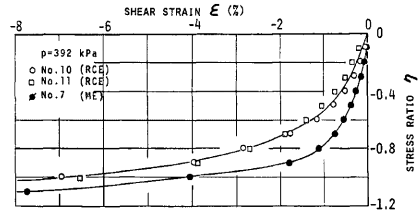


Fig. 20. Comparison of shear strain behaviour for "shear-unloading"-induced O.C. state and real preconsolidation-induced O.C. state.

Fig. 20 は、同じ実験から得られた応力比 η とせん断ひずみの関係である。この図においても、No. 10 と 11 の挙動は、No. 7 の挙動と離れていることがわかり、せん断ひずみ挙動も、 OCR によって説明できず、せん断の履歴の影響が大きいことを表わす。

6.3 応力比～ひずみ増分比関係の比較

せん断の履歴を受けない等方応力履歴のみの過圧密試料に対しては、応力比～ひずみ増分比が、 OCR の関数として表現できることは既に報告した通りである³⁾。Fig. 21 に、Test No. 2, 3, 6, 7 および 9 の応力比～ひずみ増分比関係を示した。同図の No. 7 の結果に着目し、Fig. 12 の No. 10, 11 の伸張側の部分と比較する。両図から明らかなように、せん断の履歴を受けない No. 7 は、No. 10, 11 の挙動と全く異った挙動をしている。すなわち、No. 7 は、せん断の初期に $-dv/de < 0$ の象限にあり、応力比 $|\eta|$ の増大につれて Cam Clay モデルのエネルギー式 ((4) 式) で表わされる線上に至るのに対し、No. 10, 11 は既に指摘したように、伸張条件下に入っても $-dv/de > 0$ のままであって、(4) 式の関係線上に至る応力比 $|\eta|$ も No. 7 に比べ小さい。結局、応力比～ひずみ増分比関係に対してもせん断の履歴の影響は強いと言える。昨年の報告³⁾ において述べたように、塑性ポテンシャルとして、等方圧密による体積ひずみの関数と、ダイレタンシーによる体積ひずみによる関数を考える必要性が、肯定されたことになる。

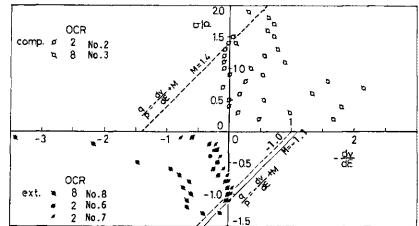


Fig. 21. Stress ratio η and strain increment ratio $-dv/de$ for MC ($OCR=2, 8$) and ME ($OCR=2, 8$).

7. 結 語

せん断応力履歴が、せん断挙動および等方圧縮挙動に及ぼす影響を中心に、平均主応力一定の単調三軸圧縮または伸張試験と、圧縮・除荷・伸張試験の結果に基づいて述べた。得られた主な結論を列挙すると、

- 1) 圧縮応力下のせん断・除荷を受けた場合の伸張応力下におけるダイレタンシー挙動は、圧縮側最大応力比 η_R の大きさによる影響を顕著に受けるが、伸張応力下でのせん断ひずみの挙動は、 η_R が、ある程度大きくなれば、その影響を受けなくなる。
- 2) その場合、 η_R が小さいときは、伸張側で、wet の状態境界面に達し、状態境界面上を移動しダイレタンシー、せん断ひずみともに、せん断履歴の影響を受けなくなる。
- 3) せん断の履歴を受けても、応力比-ひずみ増分比関係は、伸張側である応力比に達すると状態境界面のそれに従う。
- 4) せん断の履歴を受けた試料を等方的に圧縮したときの特性は、過圧密粘土の再圧縮特性と同じであり、処女圧縮線に達する応力は、Cam Clay モデルにより予測できる。
- 5) Cam Clay モデルによる過圧密比を、せん断・除荷により状態境界面内部に至ったものに適用し、せん断の履歴を受けずに同じ過圧密比をもつものと伸張側でのせん断挙動を比較したが、単に OCR のみでは説明できず、せん断履歴の影響が大きいことがわかった。

謝 辞

末筆ではありますが、御指導を賜っている本研究所柴田徹教授、同足立紀尚助教授に心より謝意を表します。本研究は、京都大学工学部今里悦二君との共同実験から生れたものであり、ここに記して謝意を表します。また、実験に際しては、清水博樹技官に多大の援助を賜り、感謝する次第です。

参 考 文 献

- 1) Roscoe, K. H. and Burland, J. B.: On the generalized stress-strain behaviour of "Wet" clay, Engineering Plasticity, Cambridge Univ. Pres., 1968, pp. 535-609
- 2) 髙部大蔵, 栗原則夫: 繰り返し粘土のダイレタンシーとせん断強度について, 土木学会論文集, 第135号, 1966, pp. 16-24
- 3) 清水正喜: 正規・過圧密粘土のダイレタンシー特性と応力-ひずみ関係, 京都大学防災研究所年報第22号 B-2, 1979, pp. 85-105
- 4) 清水正喜: 繰り返し過圧密粘土の低応力下でのダイレタンシー・強度特性, 京都大学 防災研究所年報第21号 B-2, 1978, pp. 1-18