

K. 過圧密粘土の応力-ひずみ-時間挙動

Stress-strain-time Behaviour of a K<sub>0</sub>-Overconsolidated Clay

叶 正興\* (Zheng-Xing Ye)  
森脇武夫\*\* (Takeo Moriwaki)  
吉国 洋\*\*\* (Hiroshi Yoshikuni)

キーワード: 過圧密/応力径路/クリープ/粘性土/ひずみ/履歴 (IGC:D6)

1. まえがき

一般に、過圧密粘土の圧縮性は正規圧密粘土に比べてかなり小さいため、これまで、プレローディング工法などによって形成された過圧密地盤上に構造物を建設した時の変形及びその後のクリープ沈下はそれほど問題にされることがなかった、しかし、構造物が大型化、精密化している現在では、残留沈下を厳しく制限するなどの施工精度に対する要求も一段と増してきており、過圧密状態となった粘土の応力-ひずみ関係およびその時間依存性をより精密に把握することが望まれている。

これまで、土の変形特性を表すため、数多くの構成式が提案されたが、これらの大部分は弾塑性論に基づき、しかも等方圧密された正規圧密粘土を対象として構築されたものである。その代表的なものとして cam-clayモデル<sup>(1)</sup>、修正 cam-clayモデル<sup>(2)</sup> および cam-clayモデルを異方圧密粘土まで拡張した Ohta-Hataモデル<sup>(3)</sup>などが挙げられる。このうち Cam-clayモデルをはじめとする等方硬化モデルでは、降伏曲面は応力空間で等方的に拡大すると仮定し、降伏曲面の外側では弾性変形と塑性変形がともに生じるが、降伏曲面の内側、いわゆる、過圧密領域では、弾性変形しか生ぜず、しかも等方的であるとしている。ところが、多くの実験データによれば<sup>(5)(6)</sup>、実際の粘土ではそのようにはならず、降伏曲面の内側でも塑性変形が生じ、しかも等方的でないことが明らかにされている。このような過圧密領域で生じる塑性変形を表現するために Pender<sup>(4)</sup>、Adachi and Oka<sup>(8)</sup>、木幡・三田地ら<sup>(11)</sup>は、Dafalias and Popov<sup>(9)</sup>、Hroz<sup>(10)</sup>らの提案する境界曲面の概念に基づいてそれぞれ構成式を提案している。このタイプの構成式においては正規圧密領域と過圧密領域を分ける曲面は降伏曲面ではなく、境界曲面であり、境界曲面内部に応力比一定の降伏曲面があり、過圧密領域でも塑性ひずみが発生するとしている。しかし、これら構成式の多くは、等方的、或いはある特定の応力径路で過圧密状態にした粘土試料を対象に構築されたものであり、自然過圧密地盤やプレローディング工法によって改良された地盤の多くが受けている K<sub>0</sub> 圧密履歴を考慮したものは少ない。

また、粘土のクリープ変形についてもこれまで様々な角度から研究されてきているものの、現時点では統一的な解釈が成されているとは言い難い。特に、プレローディング工法によって生じるような応力履歴を受けた粘土の三次元的なクリープ変形については、まだ未解明の点が多い。

そこで、著者らは自然過圧密地盤およびプレローディング工法で改良され過圧密状態にある粘土地盤上に構造物を建設する際に地盤内のいろいろな点で生じる応力-ひずみ関係、およびその後の長期沈下特性を解明することを目的として、実地盤の K<sub>0</sub> 条件に近い応力条件で載荷、除荷を行った後に、排水条件で様々な応力径路で再載荷し、再載荷過程中の変形を観察するとともに、再載荷終了後の排水クリープ変形を観測するといった実験を数年間に亘って実施してきた。得られた結果の一部はすでに発表しているが<sup>(12)(13)</sup>、本論文では、これらの結果を前述の境界曲面の概念(本論文は過圧密境界面と呼ぶ)に基づいて再整理し、K<sub>0</sub> 条件での載荷、除荷の応力履歴を受けた粘土の応力-ひずみ特性及び排水クリープ特性を明らかにする。

\* 広島大学大学院建設構造工学博士課程後期、 \*\* 広島大学工学部第四類建設構造 助手  
\*\*\* 広島大学工学部第四類建設構造 教授

2. 実験方法

2-1. 試料

本実験に用いた試料は広島湾から採取した沖積粘土で、通称『広島粘土』と呼ばれるものである。

まず、広島粘土を液性限界の2倍の含水比になるように脱気水を加えてスラリー状にし、十分に攪乱した後、真空ポンプで約5時間ほど脱気をしてから、直径25cm、高さ40cmの予圧密容器に入れ、Bellofram Cylinderにより、鉛直応力0.5kgf/cm<sup>2</sup>を加え、約2週間に亘って一次元圧密を行った。予圧密を終了した試料は容器から取り出し、適当な大きさに切断し、含水比の変化を防ぐため、ラップ及びアルミホイルで包み、試験用の供試体として湿潤箱に入れて保管した。広島粘土の物理的性質を表-1に示す、

表-1. 広島粘土の物理性質

Specific gravity	G <sub>s</sub> = 2.67
Liquid limit	W <sub>L</sub> = 70.1%
Plastic limit	W <sub>P</sub> = 38.8%
Plasticity index	I <sub>P</sub> = 31.3%
Soil classification	Clayey silt

2-2. 装置及び実験方法

本実験に用いた三軸圧縮試験機の概要を図-1に示す。漸増(減)载荷装置によって供試体に加える軸圧及びセル圧の载荷(除荷)速度を0.1kgf/cm<sup>2</sup>/dayから7.5kgf/cm<sup>2</sup>/dayまで自由に変えることができる。

予圧密された試料を直径5cm、高さ12.5cmの円柱形供試体に成形した後、供試体にスリットを付けたペーパードレーン用のろ紙を2重に巻き、脱気水中でゴム膜を被せ、三軸セルにセットした。実験中の供試体の軸方向変位は0.01mm精度のダイヤルゲージを用いて測定し、排水量は0.1 cm<sup>3</sup>の精度のビューレットによって測定した。また、実験中の温度変化の影響を避けるため、室温を20±0.5℃に保持した。なおすべての試験において、排水用ビューレットを通じて1.0kgf/cm<sup>2</sup>のバックプレッシャーを加えた。

本論文で使用する各パラメータは次のように定義する。

平均有効応力:  $p = 1/3(\sigma_a + 2\sigma_r)$

主応力差:  $q = \sigma_a - \sigma_r$

有効応力比:  $n = q/p$

軸ひずみ:  $\epsilon_a = 1/n(H_0/H)$

体積ひずみ:  $\nu = 1/n(V_0/V)$

せん断ひずみ:  $\gamma = \epsilon_a - 1/3\nu$

ここに、 $\sigma_a$ と $\sigma_r$ は有効軸圧と有効側圧、 $H_0$ 、 $H$ は初期及び試験中の供試体高さ、 $V_0$ 、 $V$ は初期及び試験中の供試体の体積である。

本実験に用いた応力径路及び最終応力状態をそれぞれ図-2と表-2に示す。すべてのケースにおいて、まず、供試体を径路ONに沿って点NまでK。圧縮し、次に点O'までK。膨張させる。点NとO'においてそれぞれ一日間静置した後、所定の応力径路で一定の応力状態まで再载荷し、そこで、応力状態を一定に保ち、十日間以上の排水クリープ変形を観察した。なお、本実験の载荷-除荷-再载荷のすべて径路では間隙水圧が十分消散できるようにゆっくりとした速度で漸増(減)载荷している。

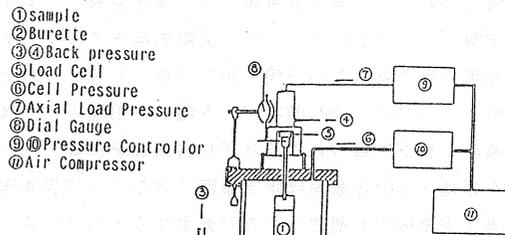


図-1. 実験装置

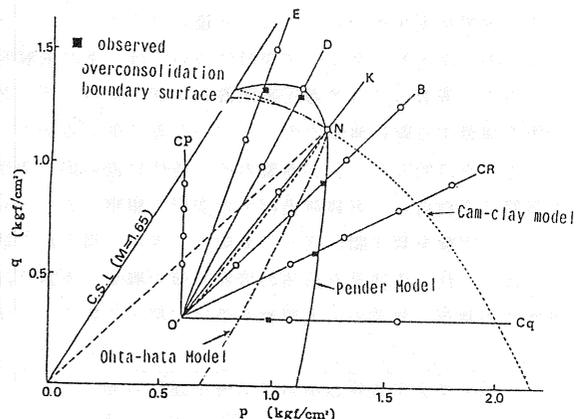


図-2. 応力径路

3. 実験結果と考察

3-1. 過圧密境界面の概念

粘土地盤が過圧密状態か正規圧密状態かによって、載荷される時の応力～ひずみ挙動が大きく違うことはすでに分かっている。従って、過圧密粘土地盤の挙動を解析する際に、応力空間内で過圧密領域と正規圧密領域をいかに設定するかは極めて重要なことであるとともに難しいことでもある。本研究では過去の研究結果<sup>(9)(11)</sup>と今回の実験データを参考に、して次のような過圧密境界面を設定した。過圧密境界面は応力空間内で、粘土の過圧密領域と正規圧密領域を分ける境界曲面であり、現象的には境界面内でひずみの発生量は少なく、境界面外でひずみの発生量は急増する。すなわち、過圧密境界面を同じ応力増分に対してひずみ応答が急変する一種の状態曲面と考え、塑性ひずみの発生を判定する降伏曲面と区別して考える。従って、過圧密領域と正規圧密領域の境界を降伏曲面とする従来の考え方と根本的に違う点は過圧密境界面内でも塑性ひずみの発生を認めることである。過圧密境界面は種々の方法で決定されるが、本研究では図-3に示すように再載荷後の体積ひずみ～平均有効応力関係が初期の直線部分から逸脱する点によって定めた。各応力径路から求めた過圧密境界面を図-2の応力径路上に■印してプロットしている。同図には表-3のパラメータを用いて計算したCam-clayモデルとOhta-hataモデルの降伏曲面及びpenderモデルにおいて過圧密領域と正規圧密領域を分ける境界曲面も示してある。同図より、実験結果から求めた過圧密境界面は、径路cqを除いてPenderモデルとほぼ一致し、等方圧密粘土を対象としたCam-clayモデルとはあまり一致しないことが分かる。

表-2. 各ケースの応力条件

Test No.	Stress path	Effective stress	
		p	q
Cq-1	Cq	1.076	0.306
Cq-3		1.316	0.306
CR-1		1.076	0.552
CR-2	CR	1.316	0.676
CR-3		1.556	0.799
CR-4		1.796	0.921
B-1		0.863	0.546
B-2	B	1.076	0.786
B-3		1.316	1.026
B-4		1.556	1.266
K-2		1.017	0.875
K-3	K	1.227	1.160
D-2		0.939	0.992
D-3	D	1.110	1.335
E-2		0.863	1.106
E-3	E	0.996	1.506
CP-1		CP	0.596
CP-2	0.596		0.666
CP-3	0.596		0.786
CP-4	0.596		0.906

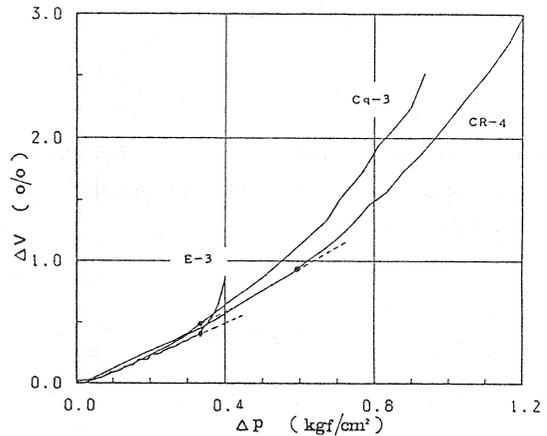


図-3. 過圧密境界面を求めるための Δp～Δv関係図

表-3. 計算に用いたパラメータ

e <sub>o</sub>	λ	κ	D	M
1.260	0.2464	0.020	0.063	1.650

3-2. 再載荷応力径路における応力～ひずみ関係

図-2に示すようなK. 条件で載荷、除荷の応力履歴を受けた過圧密粘土を異なる応力径路で再載荷した時のひずみ径路を図-4に示す。この図では再載荷開始時のひずみをゼロとして、再載荷開始からのひずみで示してある。この図より、次のことが明らかである。  
 ①過圧密境界面(図中破線)に対応するところでわずかではあるが、ひずみ径路が変化しており、これは過圧密領域と正規圧密領域で粘土の変形特性が異なることを示している。

②多くの弾塑性モデルでは、降伏曲面の内側における粘土の挙動を弾性的であるとしているし、Cam-clayモデルにおいては、せん断ひずみには弾性成分が存在しないと仮定している。ところが、図-4に示すように本実験では、明瞭なせん断ひずみの発生が認められた。また、降伏曲面内の挙動をHookeの弾性則に従うものとするれば、ひずみは次式で表される。

$$d\nu = \frac{3(1-2\nu)}{E} dp \quad (1)$$

$$d\gamma = \frac{2(1+\nu)}{3E} dq \quad (2)$$

ここに、Eとνは、それぞれヤング率とポアソン比である。式(1)と式(2)によると、平均有効応力pが一定である時には体積ひずみは生じないし、主応力差qが一定であればせん断ひずみは生じないことになる。しかし、図-4に示すように、平均有効応力pが一定の径路CPでも体積ひずみが減少し、軸差応力qが一定である径路CQでも負のせん断ひずみが生じている。以上のことから、従来の弾塑性モデルにおいて等方弾性域と見なされていた過圧密領域でも異方的なひずみが生じていることが明らかである。

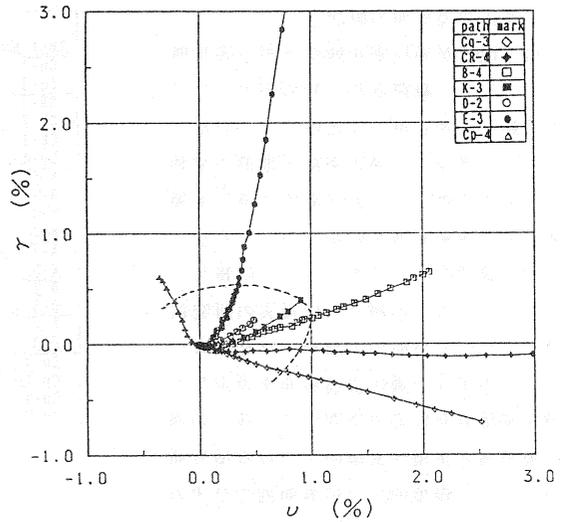


図-4. 再載荷過程のひずみ径路

### 3-3. 体積ひずみ

正規圧密粘土の圧縮過程で生じる体積ひずみは、平均有効応力の変化によるものと有効応力比の変化によるダイレイタンスーの重ね合わせによって表現できると考えられている<sup>(3)</sup>。過圧密粘土の応力～ひずみ挙動が従来の正規圧密粘土を対象として構築された弾塑性モデルで表現できない主な原因は、過圧密領域で生じているダイレイタンスーをこれらのモデルでは正しく評価していないためと思われる。このような過圧密粘土のダイレイタンスー特性を把握するため、発生する体積ひずみがダイレイタンスーのみと考

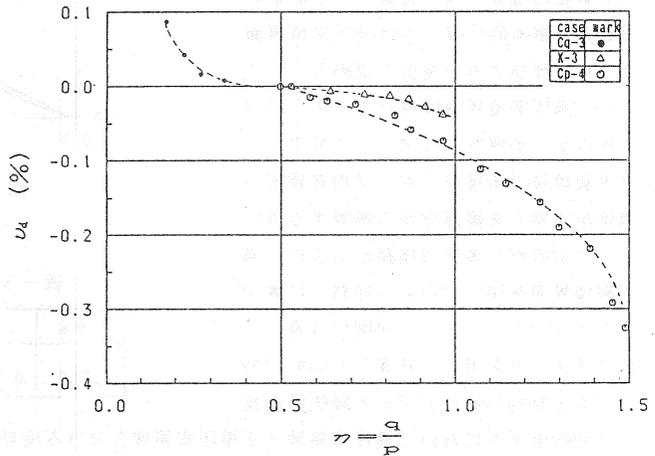


図-5. 応力比～ダイレイタンスー関係

えられる平均有効応力一定の応力径路CPでの応力比ηと体積ひずみ増分Δνの関係を図-5に示す(図中ケースCP-4)。Shimizu<sup>(7)</sup>の実験結果と同様に過圧密粘土においても、平均有効応力一定の応力径路で、正のダイレイタンスーを生じるが、そのダイレイタンスーによる体積ひずみ増分は正規圧密粘土とは異なり、応力比の変化Δη(=η-η₀)の非線形関数になると考えられる。

さらに、K. 過圧密粘土に対しても、正規圧密粘土のように体積ひずみΔνに関する次の重ね合わせ式が成立するか否かを検討する。

$$\Delta\nu = (\Delta\nu)_{\eta=\text{const.}} + (\Delta\nu)_{p=\text{const.}} \quad (3)$$

図-5に示してあるのは径路Cqと径路 K-3で生じるダイレイタンスー成分 $\Delta v_o$ を、応力比 $\eta$ 一定の径路CRの体積ひずみ $[(\Delta v_o)_{\eta=const.}]$ ～平均有効応力の関係を用いて、 $\Delta v_o = \Delta v - (\Delta v_c)_{\eta=const.}$ として求めたものである。この図から、ダイレイタンスーによる体積ひずみ $v_o$ と応力比 $\eta$ の関係は、再載荷径路によって異なり、式(3)は成立しないことが明らかである。

また、図-6は、図-2に示した各応力径路で再載荷された時の平均有効応力増分 $\Delta p$ と体積ひずみ増分 $\Delta v$ の関係を示したものである。径路B, K, D, およびEの初期部分の $\Delta p - \Delta v$ 曲線の間には有意な差が見られず、応力比一定の径路CRのやや下側ではほぼ同一線上にある。これは、応力比が増加する( $\eta - \eta_{cr} > 0$ )径路での体積ひずみが、ダイレイタンスーが生じないと考えられる応力比一定の径路より、小さくなっていることを示しており、K。過圧密粘土においては応力比が増加する径路で正のダイレイタンスーが生じていることが分かる。径路Eの後半において $\Delta p - \Delta v$ 曲線が急変するのは、再載荷径路が過圧密境界曲面を越え、正規圧密状態における負のダイレイタンスーが生じ始めたためと考えられる。また、主応力差が一定である径路Cqにおける $\Delta p - \Delta v$ 曲線が径路CRのやや上側に位置することは、過圧密粘土では応力比増分 $\Delta \eta$ が負の時に、正規圧密粘土と同じような負のダイレイタンスーが生じるという木幡・三田地ら<sup>(11)</sup>の結果と一致している。図-6において体積ひずみが等しくなる点の応力状態を $p - q$ 面上に等体積線として示したものが図-7である。これはParry and Nadarajah<sup>(14)</sup>のK。異方過圧密粘土試料に対する非排水せん断試験結果とよく似ている。図中のK。除荷応力径路をほぼ中心とする斜線部分で等体積ひずみ線が $p$ 軸に直交することから、除荷応力径路に近い径路B, K, D, Eで再載荷される時のK。過圧密粘土の体積ひずみは主として平均有効応力増分 $\Delta p$ によって支配されていることが分かる。また、図-4で示したように平均有効応力一定の径路cpで負の体積ひずみが生じ、径路Eでは正の体積ひずみが生じたことを考え合わせれば、図-7において径路cp～Eの間に一点鎖線で示すような $\Delta v = 0$ の径路が存在すると推定される。

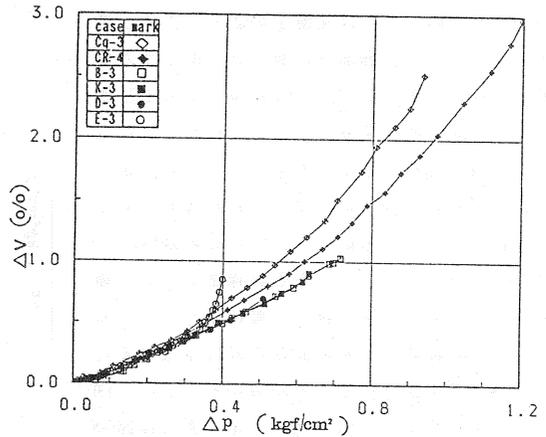


図-6. 再載荷過程の $\Delta p \sim \Delta v$ 関係

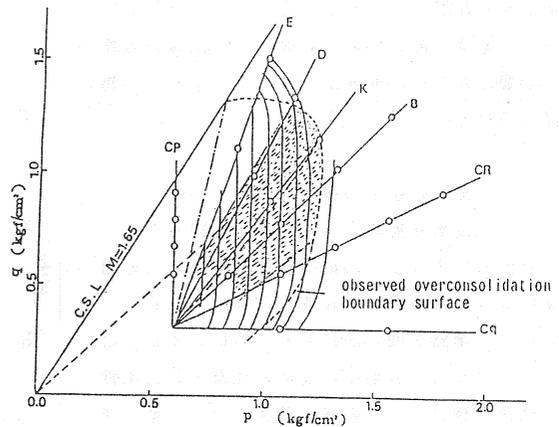


図-7. 等体積ひずみ線

### 3-4. せん断ひずみ

すでに数多くの研究者<sup>(5), (6)</sup>によって報告されたように、粘土は過圧密領域においても等方弾性体ではない。すなわち、主応力差が一定の応力径路でもせん断ひずみが生じることは本研究においても実証されている。このような現象を説明するためには、過圧密領域と正規圧密領域を区別する境界面を弾性域と塑性域を区別する降伏曲面とは考えず、同じ応力増分に対するひずみ応答が急変する一種の状態曲面と考え、この曲

面の内側でも塑性ひずみが生じると考える方が妥当であることは前節で明らかにした。

図-8は各再載荷応力径路における $\Delta\gamma \sim \Delta q$ 関係を示したものである。同図には図-3で求めた過圧密境界面に対応する点も示してある。図-8によれば、ケースCR-4の初期部分を除いて、どのケースでも主応力差がある値（ここでは $\Delta q = 0.20 \text{ kgf/cm}^2$ ）に達するまではほとんどせん断ひずみが発生せず、ほぼ同じ直線上にあるが、それ以後は応力径路によって異なった挙動を示すことが分かる。なお、応力比が一定であるケースCR-4の初期部分の負のせん断ひずみは、初期の応力径路が同じである他のCR径路では認められなかったため、これは実験上の誤差であると考えられる。この初期部分の負のせん断ひずみを無視すれば、応力比一定の径路CR-4の過圧密領域ではせん断ひずみが生じておらず、これはAdachi and OkaモデルとPenderモデルの仮定と一致している。図-8により求めた等せん断ひずみ線を $p-q$ 応力面上に示したものが図-9である。図-7に示してある斜線部分と同じ領域では等せん断ひずみ線が $p$ 軸に平行しているため、この領域でのせん断ひずみは主応力差だけによって支配されることが分かる。また、図-4で示したように応力比が一定である径路CRの過圧密境界面内でせん断ひずみがほとんど生じず、主応力差が一定である径路 $cq$ においては降伏面の外側まで再載荷された後も負のせん断ひずみが生じていることはO-N-O'点までのK。載荷、除荷の応力履歴に伴う誘導異方性の影響がかなり広範囲まで残っていることを物語っている。

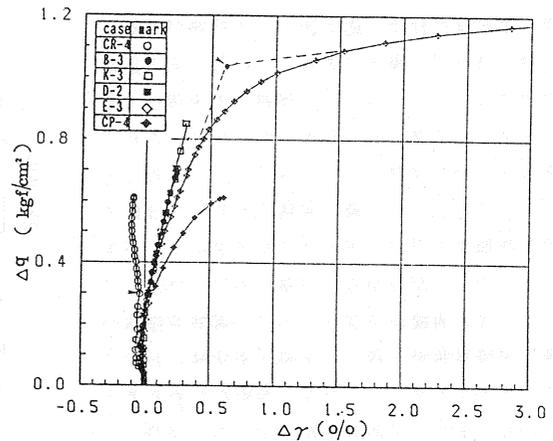


図-8. 再載荷過程の $\Delta\gamma \sim \Delta q$ 関係

#### 4. K. 過圧密粘土の排水クリープ特性

三次元変形状態のもとでの粘土の排水クリープ特性は、それまでの応力履歴とその点の応力条件及び経過時間に依存すると考えられる。このような挙動を明らかにするために、本節では、まず、クリープ変形中のひずみ径路と応力条件の関係を検討し、その後、ひずみをせん断ひずみと体積ひずみに分けてそれぞれと時間及び応力条件との関係を明らかにする。

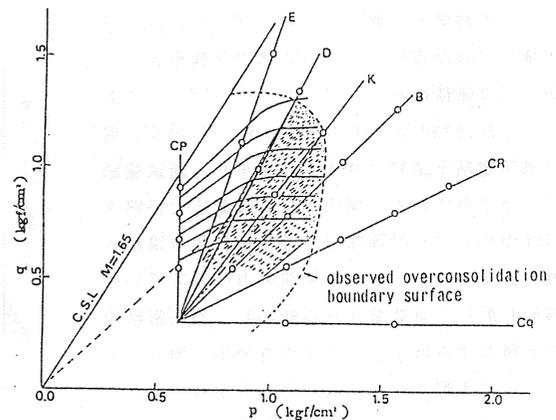


図-9. 等せん断ひずみ線

##### 4-1. クリープ中のひずみ径路

クリープ中に生じる体積ひずみとせん断ひずみの相互関係を明らかにするために、平均有効応力 $p$ 一定の径路で再載荷したケース $cp-1$ 、 $cp-2$ 、 $cp-3$ 、 $cp-4$ と応力比 $\eta$ 一定の径路で再載荷したケースCR-1、CR-2、CR-3、CR-4におけるクリープ中のひずみ径路をそれぞれ図-10の(a)と(b)に示す。

図-10(a)から、平均有効応力 $p$ 一定で載荷された場合のクリープ中のひずみ径路は、クリープ初期段階では、再載荷時に生じていた正のダイレイタンスの影響を受けているが、時間が経過すると $cp-4$

を除く各ケースではほぼ直線となり、その傾き  $d\gamma/d\epsilon$  は応力比  $\eta$  の大きさによって負から正へと変わっているのが分かる。ケース  $cp-4$  におけるせん断ひずみ増分  $\Delta\gamma$  はクリープ初期段階から終始正の値となっているが、体積ひずみ増分  $\Delta\epsilon$  は当初負であったものが途中から正の値に変わっている。最終的には図中の破線で示したように、体積ひずみ増分は再び減少して破壊に至るものと予想されるが、これは、過圧密粘土のクリープ破壊が、図中に一点鎖線のようにひずみ増分比の絶対値  $|d\gamma/d\epsilon|$  が単調に増加して起きる場合だけでなく、応力条件によっては、途中で一度安定化の方向を示す  $d\gamma/d\epsilon = 0$  を経て生じる場合があることを示している。一方、図-10 (b) からは、応力比  $\eta$  が一定であっても、クリープ中のひずみ径路は平均有効応力  $p$  の大きさに影響されることが分かる。すなわち、本研究で行った実験の応力範囲では、平均有効応力  $p$  が大きくなるほど、ひずみ増分比  $d\gamma/d\epsilon$  が大きくなっている。

4-2. 体積ひずみ～時間関係

本研究で取り扱ったような応力履歴を受けた粘土のクリープ変形と時間の関係を調べる際には時間の原点をどこにとるかが問題となる。この点に関しては既に詳しく検討しており<sup>(12)</sup>、その結果も踏まえて、本研究では再載荷開始時を各データの原点とした。各ケースの体積ひずみ  $\epsilon$  と時間  $t$  の関係を図-11 (a)～(g) に示す。図-11 (g) に示す平均有効応力  $p$  一定の径路  $cp$  における4つのケースのほかは、いずれも  $\epsilon - \log t$  曲線の後半には直線部分が現れている。そこで、その勾配によって体積ひずみに関する二次圧縮係数  $C_{\alpha\epsilon}$  ( $d\epsilon/d \log t$ ) を求めた。なお、平均有効応力一定の径路  $cp$  のケースで明白な直線部分が見られなかったのは、再載荷時に生じる正のダイレイタンスがこのケースでは相当大きく、その影響がクリープ段階にも残っていたことと、応力比の大きなケース  $cp-4$  ではクリープ破壊に近付いていたためと思われる。また、図-11 から求めた体積ひずみに関する二次圧縮係数  $C_{\alpha\epsilon}$  と平均有効応力の関係を  $C_{\alpha\epsilon} - p/p_c$  ( $p_c$  は図-2より求めた各再載荷応力径路と過圧密境界面の交点の平均有効応力) として示したものが図-12である。この図によれば、図-2で示した過圧密境界面の外側、すなわち、正規圧密領域での体積ひずみに関する二次圧縮係数  $C_{\alpha\epsilon}$  は再載荷応力径路及び平均有効応力  $p$  に依存せず、ほぼ一定となることがわかる。一方、過圧密境界面の内側の体積ひずみに関する二次圧縮係数  $C_{\alpha\epsilon}$  は、再載荷応力径路に依存し、平均有効応力の増加と共に大きくなっている。近似的には図中に示すような二つの直線で表すことができると考えられる。このような傾向は村山・柴田ら<sup>(13)</sup>によって行われた過圧密粘土の一次元長期圧密試験結果と一致している。

4-3. せん断ひずみ～時間関係

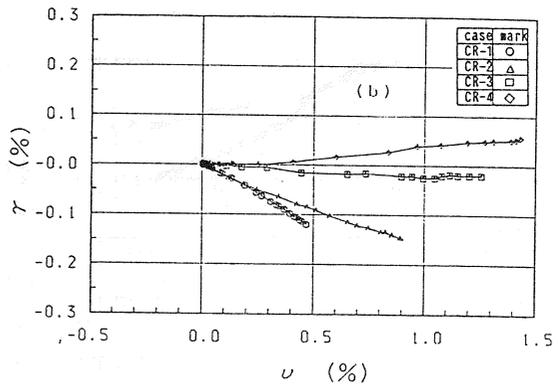
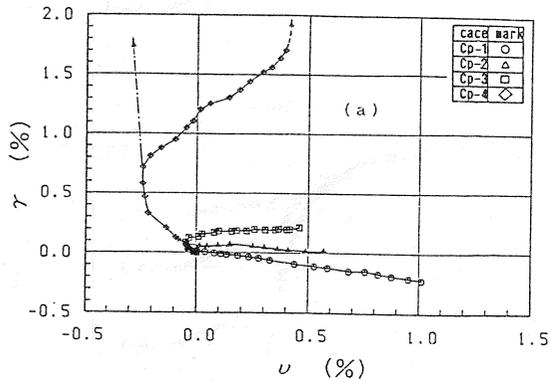


図-10. クリープ変形のひずみ径路

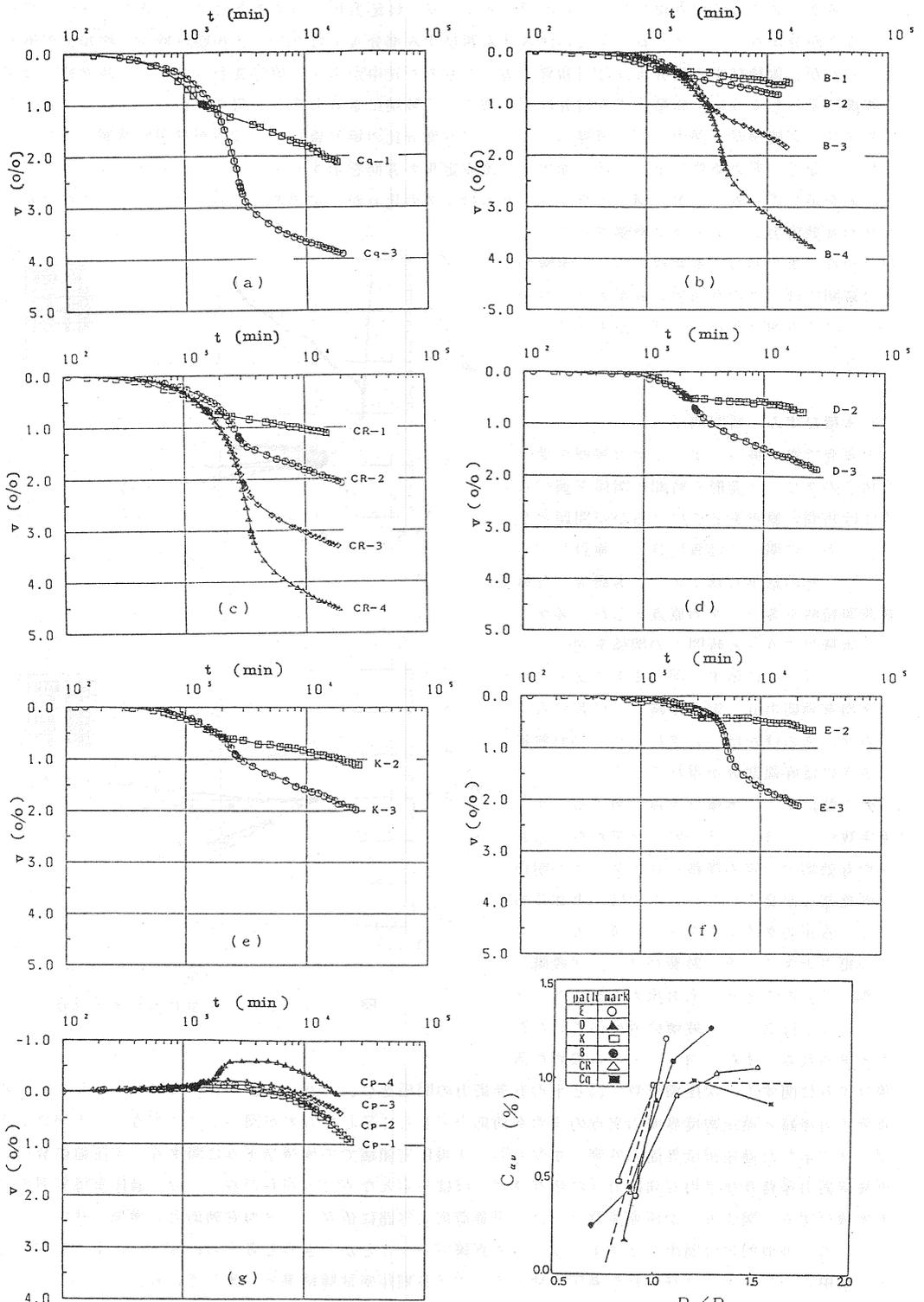


図-1 1. 再載荷開始後の  $\nu \sim \log t$  関係

図-1 2.  $C_{uv} \sim P/P_c$  関係

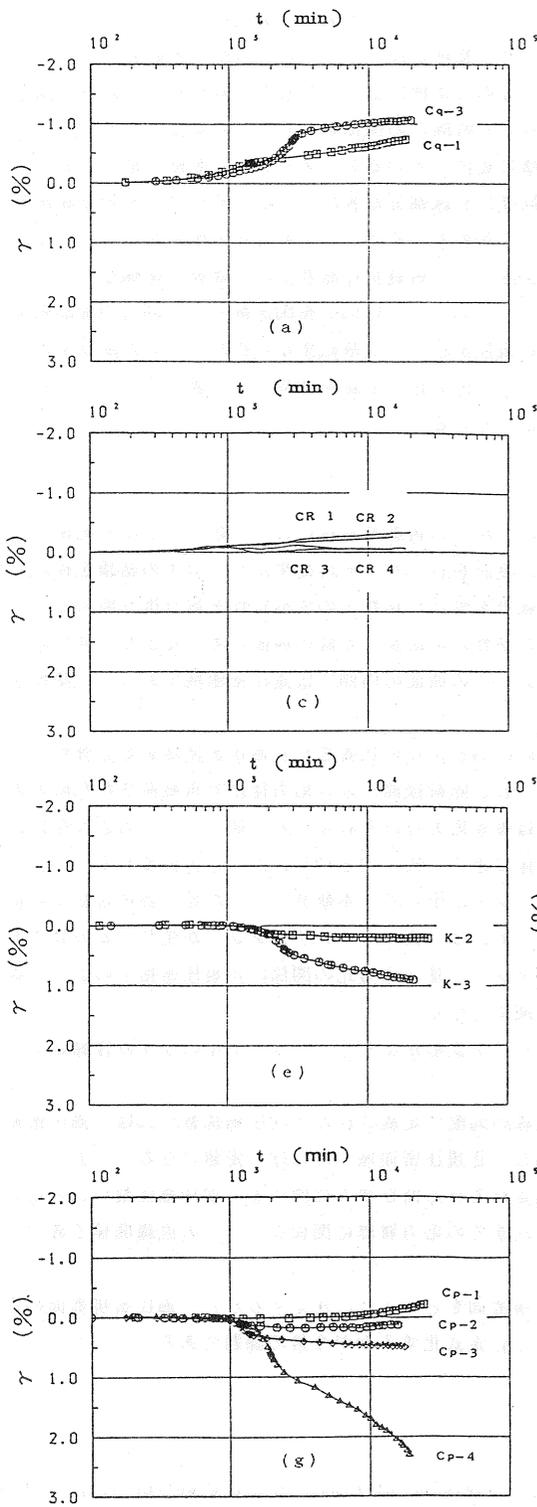


図-13. 再載荷開始後の $\gamma \sim \log t$ 関係

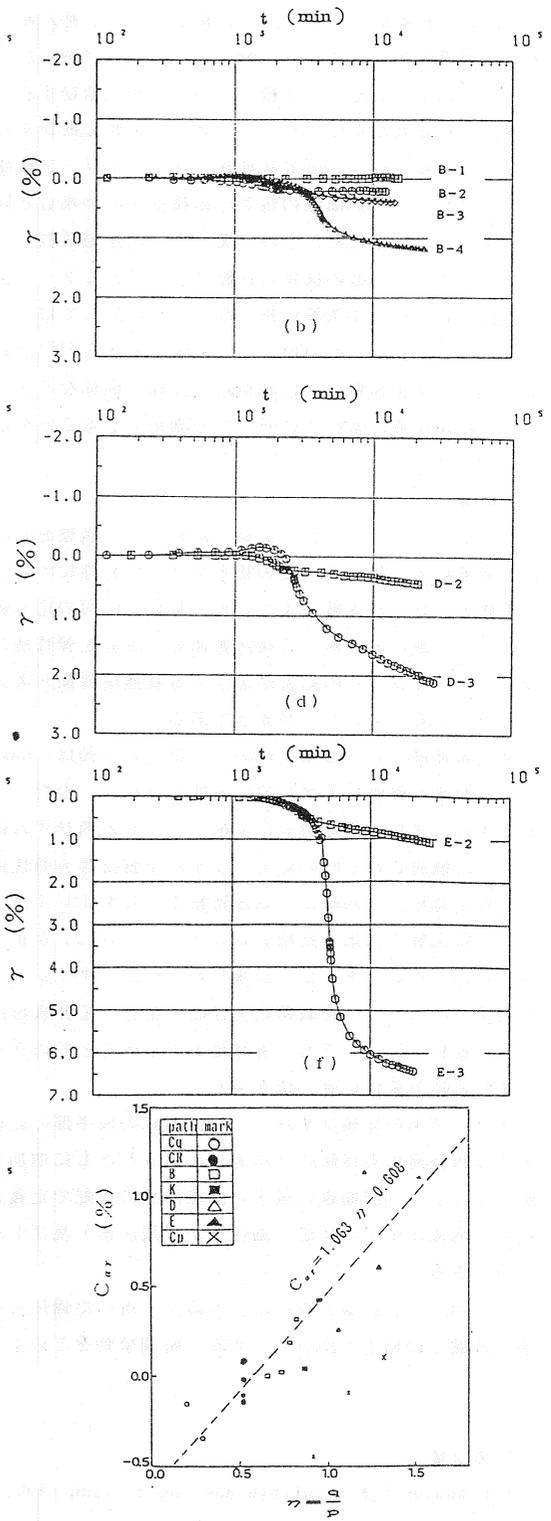


図-14.  $C_{ar} \sim \gamma$ 関係

一次元変形状態においては、体積ひずみ $\nu$ とせん断ひずみ $\gamma$ は1対1の関係( $\gamma=2/3 \nu=2/3 \epsilon_s$ )にあり、通常は体積ひずみ $\nu$ と軸ひずみ $\epsilon_s$ はどちらか一方で整理されている。ところが、本研究で行ったような三次元変形状態では体積ひずみ $\nu$ とせん断ひずみ $\gamma$ は応力条件によって1対1に対応せず、両者は個別に検討する必要がある。そこで、クリープせん断ひずみ $\gamma$ と時間 $t$ の関係を示したものが図-13(a)~(g)である。粘土の限界状態線に近く、クリープ破壊に近付いているケースc p-4を除く他のいずれのケースにも $\gamma-\log t$ 曲線の後半に体積ひずみの場合と同様に直線部分が表れている。そこで、その直線部分の勾配によってせん断ひずみに関する二次圧縮係数 $C_{\alpha r}$ を求める。その $C_{\alpha r}$ と応力比の関係を示したのが図-14である。両者の関係は径路c p上にあるケースを除いて、再載荷径路及び応力履歴に関係なく、一本の直線で表せる。本実験に用いたケースに対しては $C_{\alpha r}=1.063 \quad \eta=0.608$ (相関係数 $r=0.901$ )の線形関係式を得た。これは、walker<sup>(16)</sup>、柴田・大槌<sup>(17)</sup>が正規圧密粘土の実験結果から得た、「せん断ひずみに関する二次圧縮係数 $C_{\alpha r}$ は載荷応力径路に関係なくクリープ応力比 $\eta$ の線形関数として表すことができる」という結論が過圧密粘土に対しても適用できることを示している。

## 5. 結論

本研究では、K。条件で載荷、除荷の応力履歴を受けた粘土の再載荷過程における応力-ひずみ関係、および有効応力一定のもとでの排水クリープ特性について検討を行った。その結果から、以下の結論を得た。  
①本研究で行った実験のようにK。載荷・除荷の応力履歴を受けた粘性土の変形特性を取り扱う時には、従来のように過圧密領域と正規圧密領域の境界を弾性域と塑性域を区別する降伏曲面と考えるより、同じ応力増分に対してひずみの応答が急変する状態境界面と考え、この曲面の内側では過圧密領域であっても塑性ひずみが生じると考えた方が妥当である。

②過圧密領域における粘土の応力-ひずみ挙動は、Cam-clayモデルに代表される過圧密領域を等方弾性と仮定した従来の弾塑性モデルでは説明できない。ただし、K。除荷径路に近い応力径路で再載荷された時の体積ひずみは平均有効応力 $p$ に支配され、せん断ひずみは軸差応力 $q$ に左右される。従って、このような応力径路で再載荷される時の応力-ひずみ挙動は等方弾性体に近く、式(1)と(2)によって近似できる。

③正規圧密粘土と同様に、過圧密粘土でもダイレイタンスが生じる。本研究で行ったK。過圧密粘土の排水せん断試験では応力比増分 $\Delta \eta (= \eta - \eta_{cr})$ が正であれば、正のダイレイタンスが生じ、 $\Delta \eta$ 負であれば負のダイレイタンスが生じる。しかもダイレイタンス量と応力比の関係は正規圧密粘土のように線形関係とはならず、再載荷応力径路に依存する非線形関係となる。

④過圧密粘土においても、有効応力一定のもとでのクリープ変形が生じる。クリープ中のひずみ径路はクリープ時の応力条件に強く依存する。

⑤クリープ中の体積ひずみ $\nu \sim \log t$ 曲線の後半部の直線の勾配で定義される二次圧縮係数 $C_{\alpha r}$ は、過圧密領域では再載荷応力径路の平均有効応力 $p$ とともに増加し、正規圧密領域ではほぼ一定値になる。一方、せん断ひずみ $\gamma \sim \log t$ 曲線の後半の直線部分の勾配で定義されるせん断ひずみに関する二次圧縮係数 $C_{\alpha r}$ と応力比 $\eta$ の関係は粘土の状態(過圧密か正規圧密)及びそれまでの応力履歴に関係なく一つの直線関係で表すことができる。

以上のような結論を得たが、本論文で用いた過圧密境界面をどのように決定するかと、過圧密境界面の内側と外側での粘土の応力-ひずみ-時間挙動をどのように定式化するかが今後の課題である。

## 参考文献

- 1) K. H. Roscoe, A. N. Schofield and Thurairajah: (1963) "Yielding of Clays in State Wetter Than Critical", *Geotechnique*, Vol. 13, pp. 211-240.
- 2) J. B. Burland (1968): "The Yielding and Dilatancy of Clay", *Correspondence, Geotechnique*, Vol. 15.

No.2 pp.211-214.

- 3) H. Ohta and S. Hata (1971): "on the State surface of Anisotropically Consolidated Clay", Proc., JSCE, Vol.196, pp.117-124.
- 4) M. J. Pender (1977): "A Unified Model for Soil Stress-Strain Behaviour", Proc. 9th. ICSMFE, Tokyo Special Session, No. 9, constitutive equations, pp.213-222.
- 5) 森脇・木口など (1989): Stress Probe 試験による異方圧密粘土の変形特性, 広島大学工学部研究報告, 第37巻、第2号、pp.145-155
- 6) A. S. Balasubramaniam (1975): "Stress strain behaviour of a saturated clay for states below the state boundary surface", Soils and Foundations, Vol.15, No.3, pp.13-25.
- 7) M. Shimizu (1982): "Effective of Overconsolidation on Dilatancy", Soils and Foundations, Vol.22, pp.121-135.
- 8) T. Adachi and T. Oka (1982): "Constitutive equations for sands and overconsolidated clays, and assigned works for sand", Results of the International Workshop on Constitutive Relations for Soils Grenoble, pp.141-157.
- 9) Y. F. Dafalias (1986): "Bounding surface plasticity. I. Mathematical foundation and hypoplasticity" ASCE, Vol.112, No.9, pp.966-987, 1986.
- 10) Z. Mroz, V. A. Norris and O. C. Zienkiewicz (1979): "Application of anisotropic hardening model in the analysis of elasto-plastic deformation of soils", Geotechnique, Vol.29, No.1, pp.1-34.
- 11) 木幡・三田地 (1989): 異方的に軽く過圧密された粘性土の応力～ひずみ挙動のモデル化, 土木学会論文集, 第406号, pp.147-155
- 12) 叶・森脇・吉国 (1988): 過圧密粘土の二次圧縮係数, 土木学会第43回年次学術講演会, pp.356-357.
- 13) Z. Ye, T. Horiwaki and H. Yoshikuni (1989) "An Experimental Study on Creep Settlement Behaviour of a K<sub>0</sub>-Overconsolidated clay", Memoris of the Faculty of Engineering, Hiroshima University, Vol.10, No.2, pp.63-68.
- 14) R. G. H. Parry and V. Nadarajah (1973): "Observations on laboratory prepared, lightly overconsolidated specimens of kaolin", Geotechnique 24, No.3, pp.345-358.
- 15) 村山・柴田 (1961): 粘土のレオロジー的特性について, 土木学会論文集40号, pp.1-31
- 16) K. Walker (1969): "Secondary Compression in the Shear of Clays", ASCE, SM1, Jan., pp.167-188.
- 17) 柴田・大模 (1972): 粘土の排水クリープに関する2、3の考察, 土木学会第27回年次学術講演会, pp.157-160.