

# 直接せん断クリープ試験における 粘土供試体の変形—破壊過程

Creep Deformation and Rupture Process for Bentonite Clay

水野 恵司\*・松倉 公憲\*\*

Keiji MIZUNO and Yukinori MATSUKURA

## I はじめに

近年室内試験から測定した土のクリープ特性に基づいて、斜面崩壊の予知や地すべりの移動速度を解明する試みがいくつかみられる(例えば Saito and Uezawa, 1961; Ter-Stepanian, 1963; 駒村, 1966など)。しかし複雑な自然現象と室内試験から得た単純な応力—ひずみ—時間関係との間には大きな隔りがあり、両者を安易に結びつけることには問題がある。このため土のクリープ特性を数学的に表現するだけでなく、供試体内に実際に生じるひずみやせん断形成過程を明らかにすることは重要であろう。

土のクリープ現象を微視的な立場から解明する試みは多い(例えば Murayama and Shibata, 1964; Christensen and Wu, 1964; Mitchell *et al.*, 1968 など多数)。これらは個々の粒子間の相互作用やレートプロセス理論などに基づいて、極めてミクロな見方からクリープ現象を研究している。従って供試体内部のひずみの分布やせん断形成過程という、よりマクロな土の変形については議論されていない。ひずみ制御試験によるせん断に伴う土の構造変化を観察した例は若干みられる(例えば Morgenstern and Tchalenko, 1967; Tovey and Wong, 1980; 村山・松岡, 1971 など)。しかし、これらの研究結果から応力制御の

クリープ試験における土の構造変化を理解することは難しい。また特に粘性土を対象とした研究ではせん断後の供試体を光学顕微鏡や電子顕微鏡下で観察しているため、せん断時の応力は除荷されている。従って、これらの観察は応力が作用している時の土の構造を正確に把握しているとは言い難い。

そこで、本研究では新たに可視化できるクリープ実験機を作製し、クリープに伴う粘土供試体のひずみとせん断面形成過程を観察し、クリープ曲線との対応を検討した。

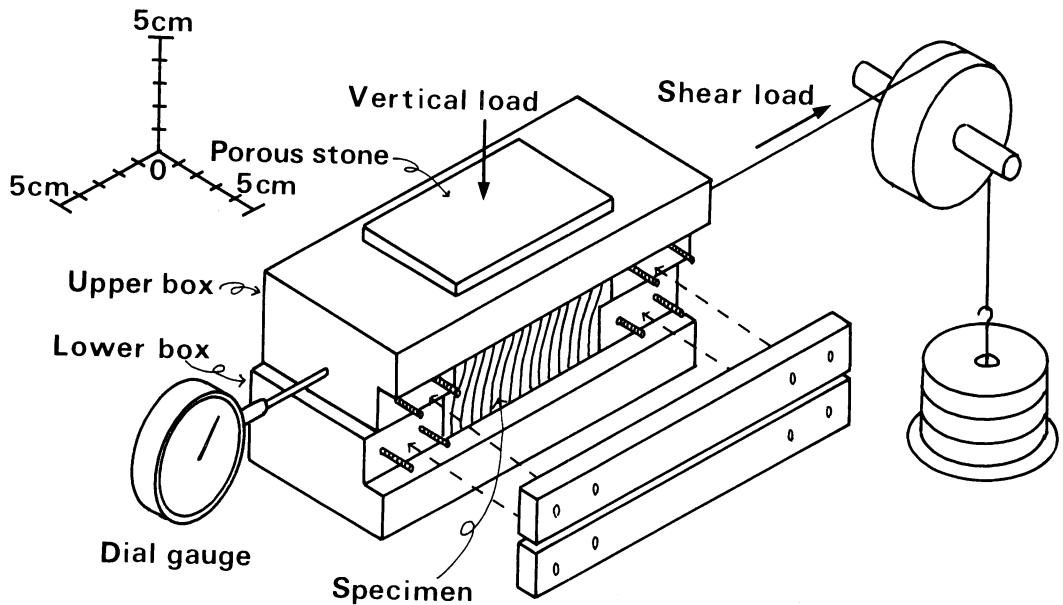
## II 実験方法

新たに作製した一面せん断型のクリープ試験機を第1図に示す。せん断箱は透明なアクリル製で、上箱と下箱とから成る。せん断箱内にセットされる供試体は長さ8 cm、幅5 cm、高さ4 cmの直方体である。せん断箱の一側面は窓をはずすことにより随時供試体を露出させることができる。下箱は試験台に固定されている。上箱はつり糸を介しておもりによって引っ張られ、せん断力を供試体に与えることができる。せん断による上箱の変位はダイヤルゲージによって測定される。

せん断に伴う供試体内の水平ひずみは、供試体内に挿入したマーカーの移動を追跡することによって測定した。マーカーとして直径1 mm、長さ10

\* 筑波大学・院・地球科学研究科 \*\* 筑波大学地球科学系

(1985年7月8日受理)

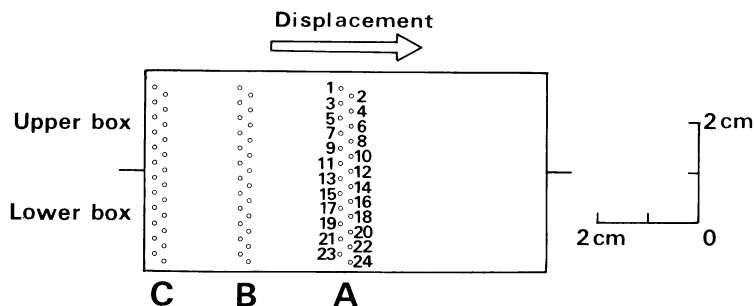


第1図 クリープ試験機の概要

mmのステンレス製のピンを3mm間隔で12本ずつ、せん断応力の作用する方向に対して垂直に一列に挿入した。ピンの列は第2図に示したように、供試体の中央部（A列と呼ぶ）、せん断箱の側面近く（C列）、そしてその中間の位置（B列）にセットした。個々のピンは供試体の上部から順に番号をつけた。クリープ実験中このピンの動きを適時写真撮影し、写真を実物の10倍に拡大して解析した。

実験の試料としてベントナイト粘土を用いた。

この粘土は粘土分（ $2\mu\text{m}$ 以下）80%，シルト分（ $2\sim 63\mu\text{m}$ ）20%から成り、塑性指数が317という値をもつ。試料を液性限界以上であらかじめ練り返し、せん断箱に流し込んだ後、垂直応力 $302.5\text{gf/cm}^2$ で10日間圧密した。クリープ実験のさい供試体に作用させる垂直応力は $75.6\text{gf/cm}^2$ である。せん断応力は最初に $24.6\text{gf/cm}^2$ を与え、以後1時間毎に $9.5\text{gf/cm}^2$ ずつ増加させた。実験中室温は $20^\circ\text{C}$ で一定に保たれた。実験は排水条件で行なわれた。



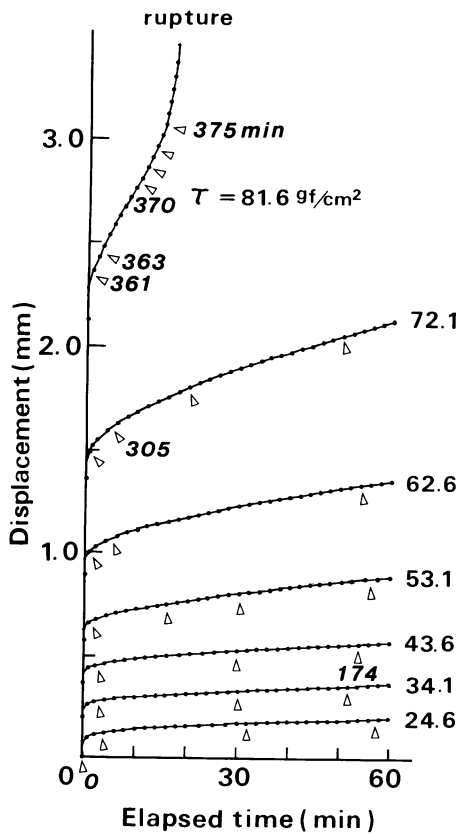
第2図 供試体に挿入されるピンの位置

### III 実験結果

#### 1. クリープ曲線

クリープ実験の結果得た上箱の変位と時間との関係を第3図に示す。せん断応力 $\tau$ が24.6~72.1 gf/cm<sup>2</sup>の範囲でのクリープ曲線は、いずれも変位速度が時間とともに減少する一次クリープを示す。 $\tau$ が81.6gf/cm<sup>2</sup>の場合、せん断応力を作用させたのち4分までは一次クリープを示すが、4~11分では変位速度が0.044mm/minの一定値を保つ二次クリープを示す。さらに11分以後では変位速度が時間とともに増加する三次クリープを示し、19分経過時点で破断した。

供試体に挿入されたピンの変位は、第3図のクリープ曲線の傍に三角印で示された時点において



第3図 時間-変位曲線

それぞれ観察された。変位観察の時点は実験開始からの通算時間で示す。これらのうち、0, 174, 305, 361, 375分の時点でのピンの水平変位を第4図に示した。図の上から順にA列, B列, C列の結果を示している。

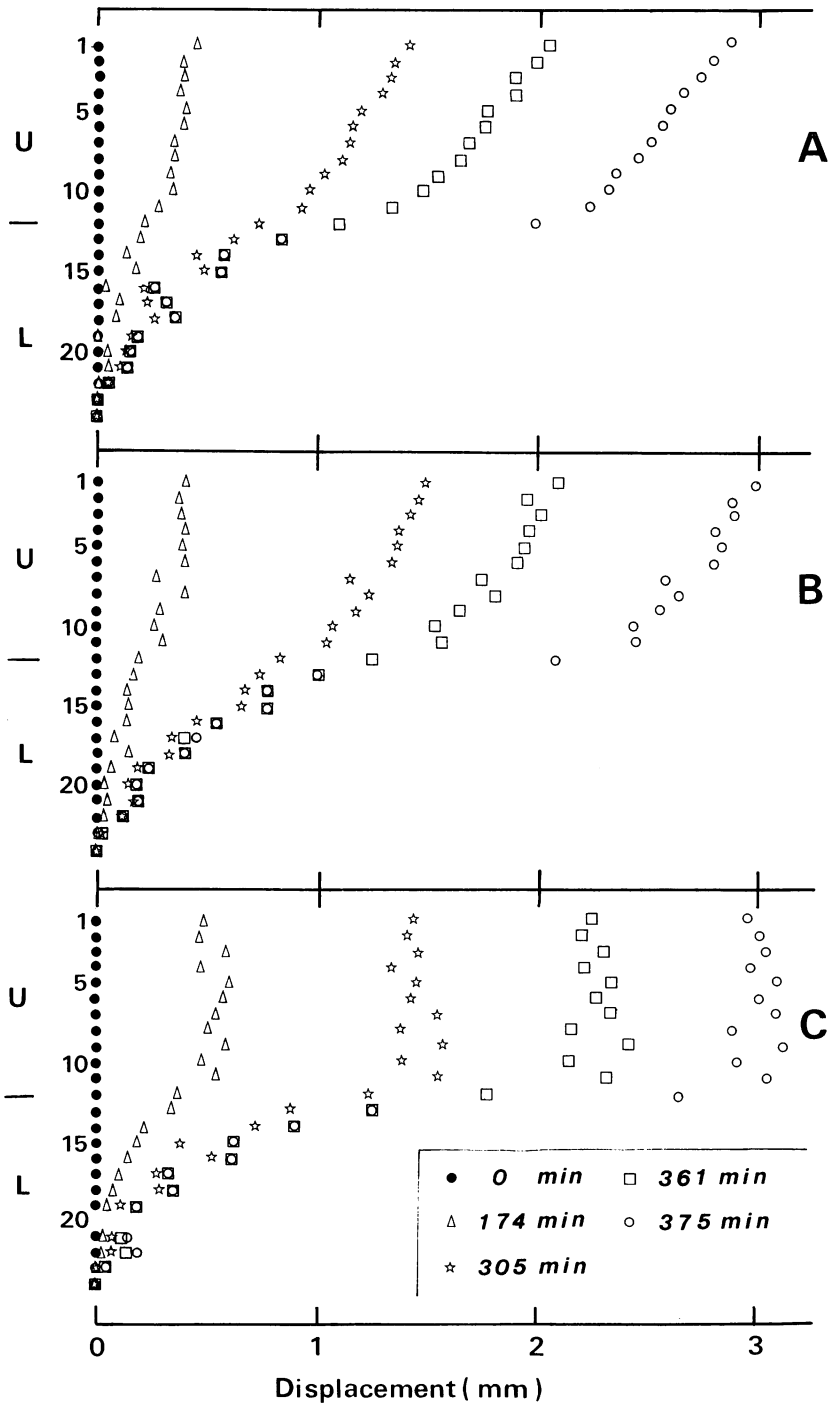
#### 2. 一次クリープ中の変形

まず始めに174, 305, 361分経過時、すなわち一次クリープの範囲での変形結果をみる。174分と305分におけるA列の最上位のピン1の変位量は、それぞれ約0.5mm, 1.5mmである(第4図)。この値は第3図のそれぞれの時点におけるクリープ変位量にほぼ匹敵する。一方ピン24の変位量はゼロである。従って、クリープ曲線に示されている変位量は、ピン1~24の変位に表われる供試体内の変形によってもたらされることになる。このことはB列, C列においても同様である。

供試体内にみられる変形は、各列のピンが一直線上に並ぶように均一なものではない。例えば、B列では、ピン1~6とピン7~16とピン17~23は、それぞれほぼ一直線上に位置していることから、ピン1~23の分布は3本の直線に近似される。同様にA列においてもピン1~10とピン11~15とピン16~23の3本の直線に分かれる。C列においてもピン1~11とピン12~16とピン17~23とに分かれ、それぞれが直線に近似される。これらの直線と鉛直線とのなす角度 $\gamma$ は、供試体のせん断ひずみを表わしている。従って供試体の変形は、ひずみ量の等しい3つの領域から構成されていることになる。第4図からは次の2つのことが読みとれる。1つは供試体の中央部では上部や下部の領域より $\gamma$ が大きく、従って大きなひずみ量をもつことである。もう1つは、時間の経過とともに、3つの領域ではそれぞれ徐々にひずみ量 $\gamma$ が大きくなっていくということである。ただし、C列の上部の領域は例外で、時間の経過にもかかわらず、上部のピンの分布は鉛直に近いままであり、ひずみ量がほぼゼロに保たれる。

#### 3. 二次, 三次クリープ中の変形

375分経過後に観察されたひずみの分布は、それ以前とは異なる傾向をみせている。ところでク



第4図 せん断に伴うピンの水平変位

リーブ曲線を見ると、361分から375分の間に約0.8mmの変位が示されている(第3図)。しかしその間、A、B、C列の下部のピン13~23はほとんどその位置を変えていない(第4図)。一方、ピン1~12はすべて約0.8mm変位しているが、隣接したピン間の相対的位置は全く変化していない。すなわち、このことはピン1~12の領域とピン13~23の領域ではひずみ量が全く増加せず、ピン12とピン13との間わずか1.5mmの厚さの部分にひずみが集中したことを示している。このような明瞭なひずみの集中は、A、B、C列を通じて363分の時点では認められず、370分以後観察された。

#### IV 考 察

一次クリープの段階では、供試体内部の変形に次のようなパターンが観察された。それは、上部、中央部、下部に供試体を3分割するように等しいひずみ分布をもつ領域が存在し、時間の経過とともにそれぞれの領域において均一のひずみ増加が発生する。そしてこれらの領域で累積されたひずみ量が供試体全体の変位をもたらしているというものである。C列の上部では例外的に時間の経過に拘わらずひずみ量がゼロを保つが、これはC列がせん断箱の側面近くに位置するためピンの移動が拘束されていることが原因と考えられる。しかし、下箱側では、供試体が側面から剝離するため、ピン12~23には変位が与えられる。

このパターンは比較的小さな応力と小さな変位量での時点(174分)において、また最終的に破断に至るような大きな応力と大きな変位量での時点(361分)においても不変であることから、応力や変位量には無関係に一次クリープという巨視的状态に対応するものであると考えられる。またこのパターンはA、B、C列とも同様に存在することから供試体内部に均一に生起しているものであると考えられる。これらの観察事実から、巨視的なクリープ曲線にみられる一次クリープとは、供試体全体にひずみが分散し、土粒子全体がせん断力に対する抵抗として動員されている過程であると考えられる。

二次および三次クリープの段階では、ひずみが供試体中央すなわち上箱と下箱の接する部分に集中し、そこでのひずみが供試体全体の変位と同一になる。このことは二次クリープ段階に入り、せん断面が形成されたことを意味すると思われる。このせん断面の形成は、A、B、C列を通して363分の時点では認められず、370分の時点から始まる。このことからせん断面は、供試体の一部分からしだいに全体に拡大するのではなく、供試体全体にかけてほぼ同時に形成されるものと考えられる。

Morgenstern and Tchalenko(1967)は、ひずみ制御の直接せん断試験によってカオリナイト粘土の構造変化を観察し、応力が集中する、上箱と下箱の接点から供試体中央に向かって、数本の微小なせん断面がせん断の進行とともに徐々に発達し、最終的にそれらが連絡して主要なせん断面が形成されると述べている。これは、すべり面の形成が供試体の一部から全体へ進行性破壊的に進むことを示しており、本研究の観察と大きく異なる。試験機のタイプや応力など試験条件が同一であることから判断して、この差異はひずみ制御と応力制御とのせん断試験方法の違いによってもたらされたものかもしれない。

#### V お わ り に

クリープ変形に伴う供試体内のひずみ分布やせん断面形成過程を知るために、可視化できる新たな試験機を作製し、以下のような試験結果を得た。巨視的な変位-時間曲線に表わされる一次クリープの段階では、供試体内部のひずみは上部、中央部、下部においてひずみ量が異なるが、全体的に分散されている。その結果、せん断応力は供試体全体で支持される。二次クリープの段階では供試体全体にせん断面が形成され、以後三次クリープをへて破断するまでせん断面に沿う変位量が供試体全体の変位量となる。

#### 謝 辞

本研究を行なうにあたり、水理実験センター・小島

豊盛技官には、試験装置の作成に多大の御協力を頂いた。記して感謝の意を表する。

#### 参 考 文 献

- 駒村富士弥 (1966) : 粘弾性理論による地すべり運動の解析. 地すべり, **2**-2, 1-5.
- 村山朔郎・松岡 元 (1971) : 2次元モデルによる粒状体のせん断現象の微視的考察. 京都大学防災研究所年報, **13**, 505-523.
- Christensen, R. W. and Wu, P. L. (1964) : Analysis of clay deformation as a rate process. *Proc. Am. Soc. Civ. Eng.*, **90** (SM 6), 125-157.
- Mitchell, J. K., Campanella, R. G. and Singh, A. (1968) : Soil creep as a rate process. *Proc. Am. Soc. Civ. Eng.*, **94** (SM 1), 231-253.
- Morgenstern, N. R. and Tchalenko, J. S. (1967) : Microscopic structures in kaolin subjected to direct shear. *Géotechnique*, **17**, 309-328.
- Murayama, S. and Shibata T. (1964) : Flow and stress relaxation of clays. *Proc. IUTAM Symp. Rheology and Soil Mech.*, Grenoble, Springer-Verlag, 99-129.
- Saito, M. and Uezawa, H. (1961) : Failure of soil due to creep. *Proc. 5th Int. Conf. on Soil Mech. & Found. Eng.*, **1**, 315-318.
- Ter-Stepanian, G. (1963) : On the long-term stability of slopes. *Publication of Norges Geotekniske Institute*, **52**, 1-14.
- Tovey, N. K. and Wong, K. Y. (1980) : The microfabric of deformed kaolin. *Jour. Microscopy*, **120**, 329-342.