

沖積粘土の三次元排水クリープ

吉國 洋¹・加納 誠²・森脇 武夫³

¹正会員 工博 広島工業大学教授 工学部土木工学科(〒730 広島県広島市佐伯区三宅2-1-1)

²正会員 工修 舞鶴工業高等専門学校助手 建設システム工学科 (〒625 舞鶴市字白屋234番地)

³正会員 工博 広島大学助教授 工学部第四類 (〒739 広島県東広島市鏡山1-4-1)

著者等はこれまでに一次元の圧密問題に対し弾粘性液体の立場から研究を行い、一次元弾粘性圧密理論を提案してきた。しかし、実際の粘土地盤では排水や沈下は三次元的に生じ、一次元の圧密理論では対応しきれない。本研究では、一次元弾粘性圧密理論を三次元に拡張するため、沖積粘土を用いて様々な応力状態に対して粘土の三次元排水クリープ試験を行い、粘土の三次元排水クリープ挙動について検討した。その結果、すべての応力状態において排水クリープが存在し、粘土はせん断的にだけでなく体積的にも粘性液体とみなされることを示した。また体積クリープ速度平面およびせん断クリープ速度平面の存在を示し、体積粘性係数平面およびせん断粘性係数平面が存在することを示した。

Key Words : creep, consolidation, alluvial clay, triaxial test, viscous coefficient

1. はじめに

圧密は透水現象と変形現象の複合現象であるため、圧密方程式は透水則、連続の条件式、力の釣合方程式、ひずみの適合条件式、応力分担式、構成方程式の6つの式から成り立っている。しかし、これらの中で土の特性に関係するものは透水則と構成方程式のみで、他のものは粘土の種類に関係なく成立するものである。また透水則は構成方程式と比べると、圧密方程式全体に与える影響が少ないため、圧密理論の違いは主に構成方程式の違い、つまり用いるレオロジーモデルの違いとして表される。

ここでこれまでに提唱された圧密方程式についてそのレオロジーモデルに注目しながら概観してみると、大きくTerzaghi¹⁾の弾性モデル、Taylor等²⁾の粘弾性モデル、Roscoe等³⁾の弾塑性モデル、Adachi and Okano⁴⁾の弾・粘塑性モデル等^{5),6),7)}に分類できる。

弾性モデルでは載荷過程のみに限定して挙動の説明を行っており、圧縮曲線が載荷過程と除荷・再載荷過程では異なる経路を通る場合などは取り扱えないうえ、クリープ等の時間依存性挙動も考慮できない。

そこでTaylor等²⁾は粘土の時間依存性挙動を遅延弾性であると見なし、粘弾性固体の立場から粘土の挙動を説明した。しかし、粘土の時間依存性挙動を遅延弾性で見なすかクリープと見なすかは議論の残るところ

である。

ここで、この論文で使用される遅延弾性とクリープの定義を述べる。両者ともに一定有効応力のもとでの変形が時間的に進行する現象であるが、前者ではひずみエネルギーが完全に保存されているが、後者では保存されない。換言すれば、前者には除荷に伴う完全回復が見られるが、後者に回復はない。また、レオロジーモデルで言えば、前者はフォークトモデル(粘弾性固体)の示す挙動であり、後者はマックスウェルモデル(弾粘性液体)の示す挙動である。なお、塑性域における弾粘性固体も、そのモデル構造がマックスウェルと同等なので、後者の挙動を示す。

一定有効応力のもとでの時間依存性の変形がクリープ変形であれば、必ず有効応力緩和現象が存在する。その理由は次のようである。応力緩和はマックスウェルモデルの示す現象で、一定ひずみのもとでひずみエネルギーを失う、すなわち変形の回復能力を失う現象である。クリープと応力緩和は、マックスウェルモデルがひずみエネルギーを失う典型的な二つの形であり、この意味で、両現象は一对の現象である。遅延弾性を示すフォークトモデルはひずみエネルギーを失うことがないので、有効応力緩和やクリープは存在しない。この特性はクリープと遅延弾性とを区別するのに役立つ。また、遅延弾性とクリープの複合変形をする場合でも、複雑ではあるけれど、ひずみエネルギーを失う

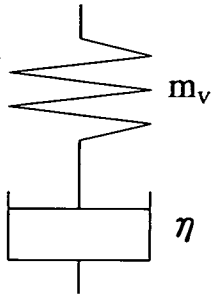


図-1 弾粘性モデル

という意味で基本的にクリープである。

粘土の有効応力緩和現象は現在までに多く報告されている^{8),9)}。つまり粘土の時間依存性挙動はクリープであると認識される。

またRoscoe等³⁾は粘土の除荷過程における変形の非回復性を塑性と見なし、弾塑性固体の立場から粘土の挙動を説明した。しかし、このモデルでは粘土骨格の時間依存性挙動は考慮されていない。

そこでAdachi and Okano⁴⁾やAkai and Oka⁵⁾らは、Perzyna¹⁰⁾の超過応力の概念を導入した粘塑性理論に基づいてRoscoe等³⁾の弾塑性モデルを拡張し、正規圧密粘土の時間依存性挙動を表現できる弾・粘塑性モデルを構築した。一方Sekiguchi⁶⁾は正規圧密粘土の二次圧縮特性とダイレイタンスの時間依存性に対する考察から時間依存性を表現できる流動曲面を導入して弾・粘塑性モデルを提案した。同様な弾・粘塑性モデルはMatsui and Abe⁷⁾らによっても提案されている。これらのモデルでは正規圧密状態でのクリープ現象を説明することができる。

しかし、これらのモデルでも説明不可能な現象が報告された。Leroueil等¹¹⁾が行った交番定ひずみ速度試験や除荷後のクリープ現象¹²⁾等である。Leroueil等¹¹⁾は定ひずみ速度試験期間中にひずみ速度を変化させるとそのひずみ速度に応じた位置に圧縮曲線がシフトし、また元のひずみ速度に戻すと圧縮曲線も元のラインに戻ると報告した。これは標準圧密試験で行われている様に圧縮曲線の屈曲を降伏現象と捉えると一度降伏した材料がまた更に降伏するという説明困難な現象である。

また除荷後の再クリープ沈下現象は正規圧密状態のクリープと過圧密状態のクリープの違いは何かという問題を生じさせた。この問題に対処するために、Kutter等¹³⁾は粘土は無応力状態以外では常に降伏していると仮定したモデルを提案した。しかし常に降伏している物質というものは大変理解しがたいものである。

すなわちこれらの問題は正規圧密状態と過圧密状態

での挙動に本質的な差はあるのか、粘土に降伏現象は存在するのかといった問題に帰着する。

Yoshikuni等¹⁴⁾は、それまでの研究や問題点を踏まえたうえで、圧密のようにひずみ速度の小さい範囲では粘土は粘性液体と見なせば様々な挙動が説明できるとし、弾粘性圧密理論を発表した。これは前述したような今までの圧密研究が抱えていた多くの問題点を解決し、粘土の挙動を忠実に表現することができる。また今井¹⁵⁾も様々な実験より正規圧密領域は粘性体、過圧密領域は弾性体と見なしたほうがよいと指摘している。

しかし、Yoshikuni等¹⁴⁾の提案した弾粘性圧密理論は一次元の試験データを基に一次元圧密に対して構築された理論であるため、その適用範囲は限られており、より一般的な境界条件の地盤に適用するためには理論の三次元化が必要不可欠である。しかし破壊の問題まで取扱うには問題が大きすぎるので、一次元圧密に近い三次元圧密、例えばパーチカルドレンによる圧密を対象に考え、吉國の一次元弾粘性圧密理論の三次元化の為の基礎研究を行った。具体的には応力比や応力レベルを種々に変化させた三次元長期圧密試験を行い、沖積粘性土の三次元排水クリープ挙動について実験的検討を行った。なお、本研究では、三軸セルでの長期圧密試験において体積ひずみを安定的に求めるために、レーザーセンサーを用いて側方変位を直接測定した。

なお、本論文では、間隙比の変化速度 \dot{e} と本来のひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ を厳密に区別する必要がある場合を除いて、両者を区別なくひずみ速度と呼んでいる。

2. 弾粘性圧密理論と三次元化への予備的検討

粘土の変形を図-1に示す弾粘性液体すなわちMaxwell液体と仮定すれば、ひずみ速度 de/dt は、弾性ひずみ速度 de_e/dt とクリープひずみ速度 de_v/dt との和であり、そのレオロジー方程式は、

$$\frac{de}{dt} = \frac{de_e}{dt} + \frac{de_v}{dt} \quad (1)$$

$$-\frac{de}{dt} = m_v \cdot \frac{d\sigma'}{dt} + \frac{1}{\eta} \sigma' \quad (2)$$

である。ここに

$$m_v = -\frac{de_e}{d\sigma'} \quad (3)$$

$$\sigma' = \frac{1}{\eta} \left(-\frac{de_v}{dt} \right) \quad (4)$$

である。

ここで式(2)中の一次元の弾性係数 m_v と一次元の粘性係数 η の性状を決めるために、次の仮定を置く。

仮定(1) $e - \log t$ 平面に画かれたクリープ曲線は直線でその傾き、二次圧密係数 C_α は σ' によらず一定で

ある。すなわち平行直線群である。(図-A1参照)
 仮定(2) クリープ速度 de_v/dt は間隙比 e と有効応力 σ' によって決まり、 $e - \log \sigma'$ 平面に画かれた等クリープ速度線は直線で、その傾き C_β はクリープ速度によらず一定である。すなわち平行直線群である(図-A2参照)。

仮定(3) $e - \log \sigma'$ 平面に画かれた除荷膨潤曲線は直線で、その傾き C_γ は、除荷前の有効応力や間隙比によらず一定である。すなわち平行直線群である。

ここに

$$\begin{aligned} C_\alpha &= \Delta e_v / \Delta(\log t) \\ C_\beta &= \Delta \dot{e}_v / \Delta(\log \sigma') \\ C_\gamma &= \Delta e_\varepsilon / \Delta(\log \sigma') \end{aligned}$$

である。

上述の仮定(3)のもとでは、式(2)における m_v は、

$$m_v = 0.434 C_\gamma \frac{1}{\sigma'} \quad (5)$$

として求められる。ついで、式(2)の中の一次元の粘性係数 η を求めるために、次の議論を行う。

仮定(1)および(2)のもとでは、 $e - \log \sigma' - \log t$ 空間に一つの平面が存在し(図-A5参照)、これを一次元のクリープ平面と呼ぶことにする。そして、 $\log t$ と $\log(-\dot{e}_v)$ との間には、

$$\log t = -\log(-\dot{e}_v) \quad (6)$$

の関係があるので[式(A16)参照]、上述のクリープ平面は $e - \log \sigma' - \log(-\dot{e}_v)$ 空間においても平面をなす(図-A6参照)。

一方、式(4)の対数をとると、

$$\log \sigma' = \log \eta + \log(-\dot{e}_v) \quad (7)$$

となり、この関係と $e - \log \sigma' - \log(-\dot{e}_v)$ でのクリープ平面の方程式とを関係づけると、 $e - \log \sigma' - \log \eta$ 空間でも一つの平面が存在し(図-A7)、この平面を一次元の粘性係数平面と呼ぶことにする。その平面の方程式は、

$$\log \frac{\eta}{\eta_0} = C_{\eta e}(e - e_0) + C_{\eta \sigma'} \log \left(\frac{\sigma'}{\sigma'_0} \right) \quad (8)$$

であり[式(A22)参照]、 η_0 は (e_0, σ'_0) における粘性係数である。ここに、 $C_{\eta \sigma'}$ は粘性係数平面の $e =$ 一定における傾きであり、それぞれ、

$$C_{\eta e} = \frac{1}{C_\alpha} \quad (9)$$

$$C_{\eta \sigma'} = \frac{C_\beta - C_\alpha}{C_\alpha} \quad (10)$$

で与えられる。 C_α と C_β と (e_0, σ'_0) におけるクリープひずみ速度 \dot{e}_v を実験的に求めれば、式(4)と式(8)を使い、

任意の間隙比 e と有効応力 σ' における粘性係数 η を決めることができる。

上述の一次元粘弾性理論は、弾性圧密理論の延長線上で考え、破壊の問題を考えていないので、三次元への拡張に当たっても、破壊の問題を含まず、かつ平均的に一次元圧密に近いバーチカルドレーンによる圧密を念頭に置いている。このような立場にあるので、一次元変形を体積変形とせん断変形に区分して考え、それぞれの変形が弾粘性体として挙動すると仮定して考えを進めている。

そこで、 K を体積弾性係数、 G をせん断弾性係数、 η_v を体積粘性係数、 η_s をせん断粘性係数とすれば、式(2)は次のように分離して書くことができる。

体積変形に対し、

$$-\frac{de}{dt} = \frac{1}{K} \frac{d\sigma'_m}{dt} + \frac{\sigma'_m}{\eta_v} \quad (11)$$

せん断変形に対し、

$$\frac{d(\varepsilon_1 - \varepsilon_3)}{dt} = \frac{1}{G} \frac{d(\sigma'_1 - \sigma'_3)}{dt} + \frac{(\sigma'_1 - \sigma'_3)}{\eta_s} \quad (12)$$

ここに、

$$\frac{1}{K} = \frac{de_\varepsilon}{d\sigma'_m}$$

$$\frac{1}{G} = \frac{d(\varepsilon_1 - \varepsilon_3)}{d(\sigma'_1 - \sigma'_3)}$$

$$\frac{1}{\eta_v} = \frac{de/dt}{\sigma'_m}$$

$$\frac{1}{\eta_s} = \frac{d(\varepsilon_1 - \varepsilon_3)/dt}{(\sigma'_1 - \sigma'_3)}$$

および σ'_m は平均有効応力であって、

$$\sigma'_m = \frac{\sigma'_1 + 2\sigma'_3}{3}$$

である。

そこで、一次元の場合に置いた前述の仮定(1)と仮定(2)が、分離された体積変形とせん断変形にも適用できるかどうか、その可能性を実験的に検討した。

3. 試験方法

本試験では側方変位が直接測定できる改造型三軸セルを用いて16ケースの三次元長期圧密試験を行った。試験装置の概略図を図-2、試験条件の模式図を図-3に示す。各Caseとも最終荷重段階までは荷重増加率1で各段階30分の急速圧密させ、最終荷重に達した後は2週間放置して排水クリープ試験を行った。

一般の三軸試験においては、供試体の排水量と鉛直軸変位を測定し、側方変位が求められる。しかし、本

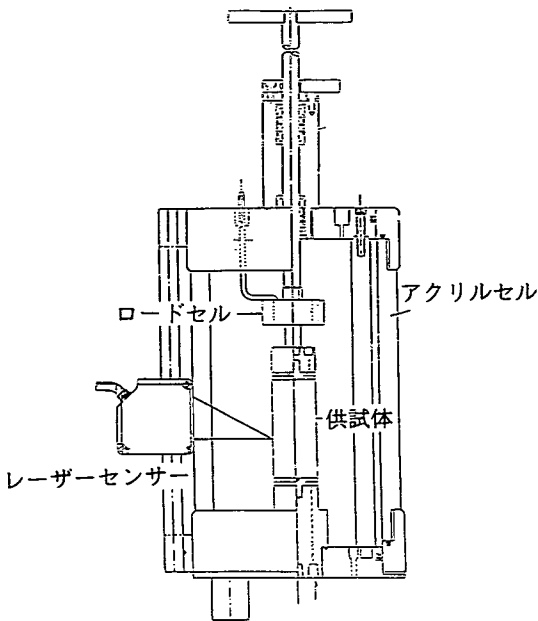
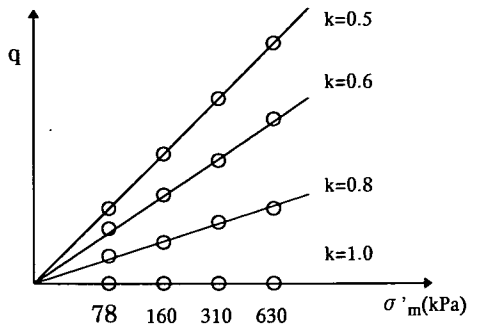


図-2 試験装置の概略図



	$\sigma'_m=78$	$\sigma'_m=160$	$\sigma'_m=310$	$\sigma'_m=630$
k=1.0	Case1-1	Case1-2	Case1-3	Case1-4
k=0.8	Case2-1	Case2-2	Case2-3	Case2-4
k=0.6	Case3-1	Case3-2	Case3-3	Case3-4
k=0.5	Case4-1	Case4-2	Case4-3	Case4-4

図-3 試験条件の模式図

表-1 試料の物理特性

$W_L(\%)$	$W_P(\%)$	I_p	G_S
110	42	68	2.60

試験のようなクリープ試験においては、メンブレンの透気・透水性や排水のビューレット内蒸発など克服困難な問題があって、所要の精度での排水量の測定が望めない。そこで本試験ではレーザーセンサーを三軸セルの周囲3方向に取付け、円柱形供試体(直径35mm、高さ70mm)の中央位置の変位を求め、それを平均して側方変位とした。その側方変位と軸変位より体積変化を求めた。レーザーセンサーの読取り精度は $1.5\mu\text{m}$ で、軸変位計の読取り最小目盛りは $10\mu\text{m}$ である。

なお、試験状況を把握するために行われた排水量測定では、圧密圧力が大きい場合に1週間前後から排水経路に気泡が生じ排水量が正しく測定できなくなったが、それ以外は排水量による体積変化とレーザーセンサーで測定した側方変位と軸変位より算出した体積変化はよく一致していた。同時に2-3週間程度の三軸排水クリープ試験では、メンブレンの遮水性能に問題がないことが確認されている。

試験に用いた試料は広島県五日市沖で採取された沖積粘性土を室内で練返し、 49kPa で予圧密(一次元圧密)した試料を用いた。表-1にその物理的特性を示す。

4. 試験結果と考察

(1) 体積変形

図-4と図-5は応力比 $k=1.0, 0.5$ の各Caseの圧密曲線($e - \log t$ 関係)を表すものである。この図より二次圧密曲線は半対数紙上で直線的に減少しており、今回試

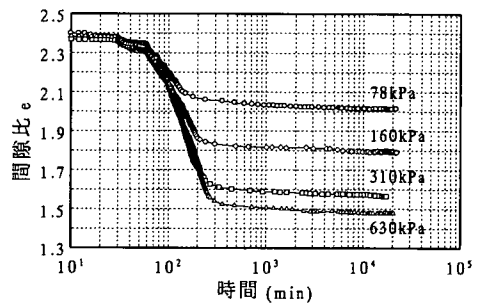


図-4 圧密曲線($k=1$)

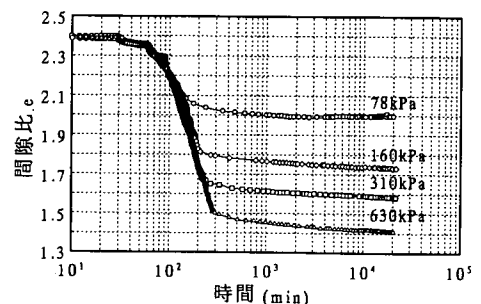


図-5 圧密曲線($k=0.5$)

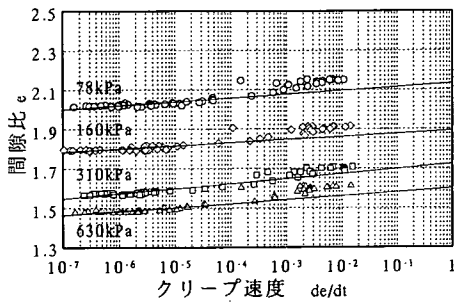


図-6 間隙比とクリープ速度の関係 (k=1)

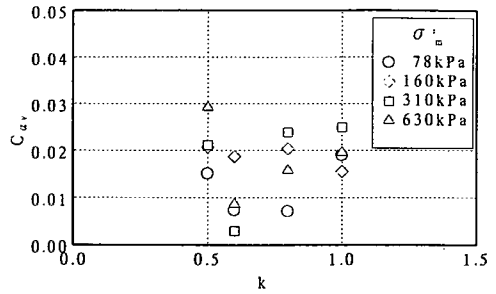


図-9 体積クリープ速度係数と応力比の関係

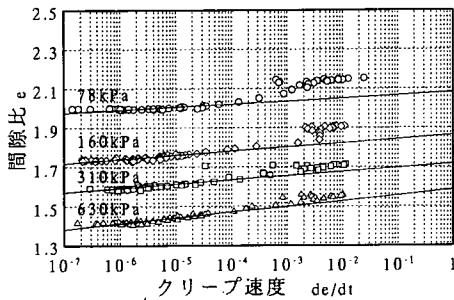


図-7 間隙比とクリープ速度の関係(k=0.5)

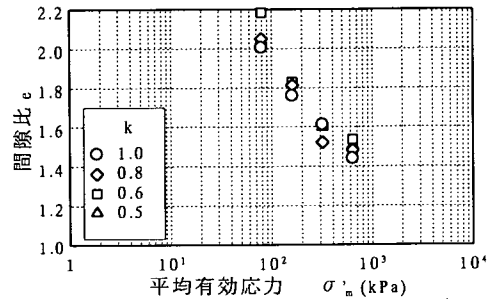


図-10 等体積クリープ速度線
($de/dt = 10^{-5}$ (1/min))

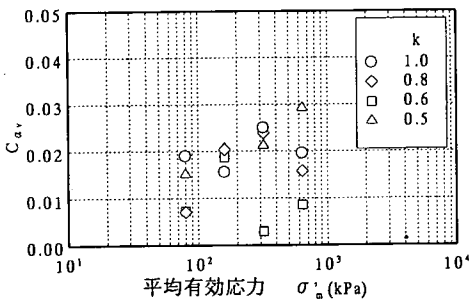


図-8 体積クリープ速度係数と平均有効応力の関係

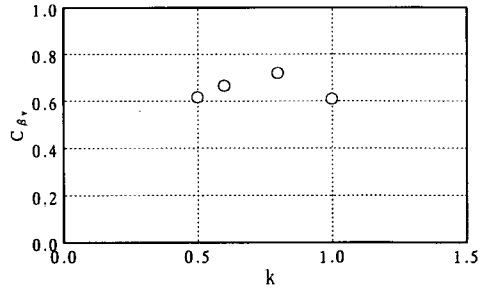


図-11 等体積クリープ係数と応力比の関係

験を行った範囲ではすべての応力状態において体積クリープが存在することが分かる。しかも各圧密曲線は平行であり、本研究のように荷重増分比が一定の場合はほぼ等間隔となることが分かる。図は省略するが他Caseも同様であった。

図-4で示した等方応力状態での体積クリープの存在は、粘土の骨格構造が体積粘性を有していることを示し、その変形は非収束的で粘土はせん断変形だけでなく体積変形的にも粘性液体であると認識される。

図-6と図-7はそれぞれ図-4と図-5を $e - \log(de/dt)$ 平面に書き直したものであり、クリープ過

程は同図の右上より左下に行進する。ひずみ速度の大きい範囲で観測データに乱れがあるが、これはいわゆる一次圧密の影響が幾分残る範囲であり、さらにクリープが進行すると、半対数紙上でほぼ直線となるクリープ状態が観測されている。この直線を体積クリープ速度線と呼ぶことにする。その傾きは一次元の二次圧密係数に相当し、体積クリープ速度係数 $C_{e,v}$ と呼ぶことにする。

図-8は、先に定義した体積クリープ速度係数 $C_{e,v}$ を平均有効応力 σ'_m に対しプロットしたもので、ばらつ

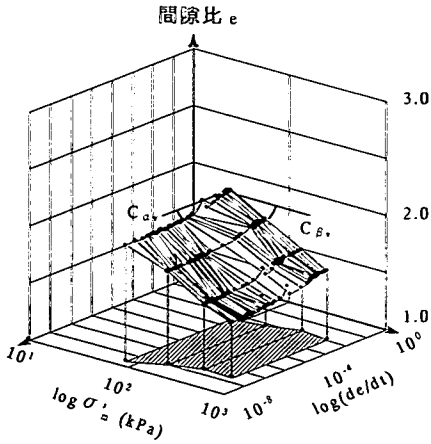


図-12 体積クリープ速度面(k=1.0)

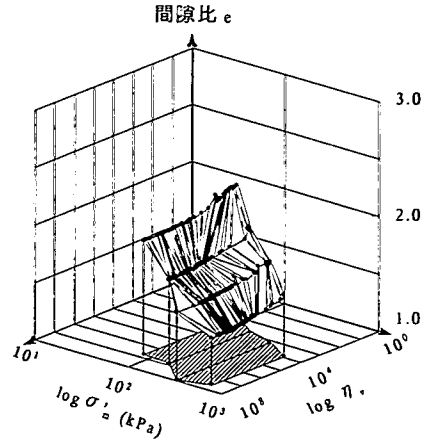


図-14 体積粘性係数平面(k=0.5)

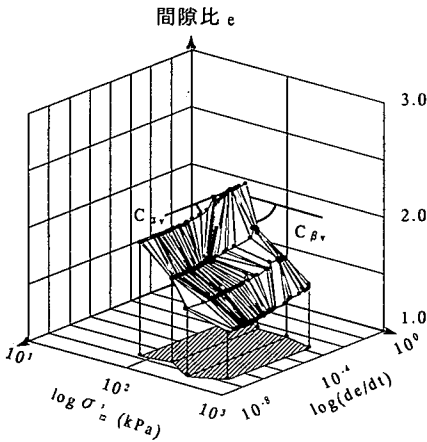


図-13 体積クリープ速度面(k=0.5)

きは大きい、 $C_{\alpha v}$ が0.02前後である。応力比kの違いによる $C_{\alpha v}$ の変化もデータのばらつきの中であって特別な傾向は見えていない。

図-9は体積クリープ速度係数 $C_{\alpha v}$ を応力比に対し、平均有効応力 σ'_m をパラメータにして示している。ばらつきも大きい、応力比kによる特段の傾向は認められない。

図-10は、図-3に示したCase1~Case4-4までの16個のクリープ試験において、ある体積クリープ速度 $de/dt (=10^{-5} \text{ (1/min)})$ が現れたときの空隙比と平均有効応力の関係を示す。これによって形成される線を等体積クリープ速度線と呼ぶことにする。等体積クリープ速度線は直線的で、その傾き、等体積クリープ速度

係数 $C_{\beta v} (= \Delta e / \Delta \log \sigma'_m)$ は、図-11に示すようにこの粘土では0.6~0.7で、応力比kが0.5~1.0の範囲ではほぼ一定値と見做すことができる。

$C_{\alpha v}$ および $C_{\beta v}$ はそれぞれ、一次元の慣用圧密試験における二次圧密係数 C_{α} と C_{ϵ} に相当する。沖積粘土層に対する一次元慣用圧密計算においてはしばしば C_{α} を無視することもあるように、 C_{α} よりも C_{ϵ} の働きが支配的である。三次元の圧密解析においても同様に、 $C_{\alpha v} / C_{\beta v}$ の値も1/40程度であり、 $C_{\beta v}$ が圧密量に対しきわめて支配的である。この意味で図-8に見られる $C_{\alpha v}$ のばらつきはあまり大きな問題でないと考えている。

図-12および図-13は図-4から図-11までに示したことを $e - \log \sigma'_m - \log(de/dt)$ 空間に示したもので、そこに見えるものはそれぞれk=1.0および0.5に対する体積クリープ速度面である。これが平面と見做せるならば、体積クリープに対し、仮定(1)および仮定(2)が満たされることになる。筆者等は図-12および図-13を平面として扱うことが可能と考えている。

図-14は、同様な意味で、上述のことを $e - \log \sigma'_m - \log \eta$ 空間に示したもので、そこに見えるものは体積粘性係数平面である。そして先に見た体積クリープ速度面を平面と見做せば、この体積粘性係数面も自動的に平面と見做すことになる。

(2) せん断変形

図-15に応力比k=0.5の各Caseの主ひずみ差と経過時間の関係 $(\epsilon_1 - \epsilon_3) - \log t$ 関係を示す。この図より二次圧密部分の $(\epsilon_1 - \epsilon_3)$ と $\log t$ の関係は直線的である

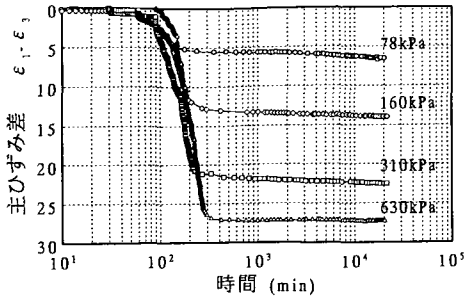


図-15 主ひずみ差と時間の関係(k=0.5)

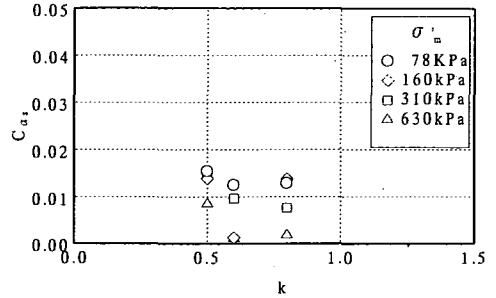


図-18 せん断クリープ速度係数と応力比の関係

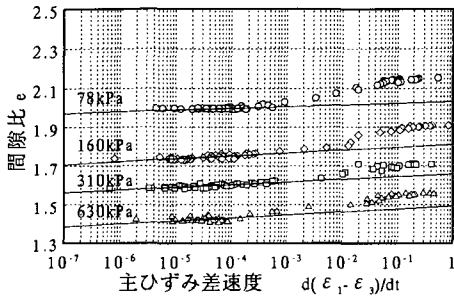


図-16 間隙比と主ひずみ差速度の関係(k=0.5)

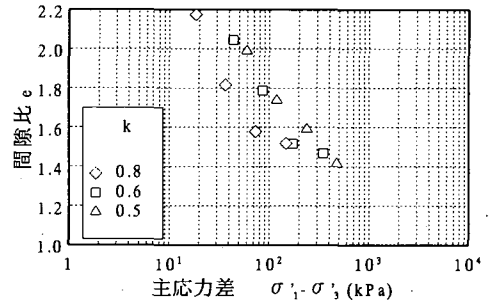


図-19 等せん断クリープ速度線
($d(\epsilon_1 - \epsilon_3)/dt = 10^{-5}(1/min)$)

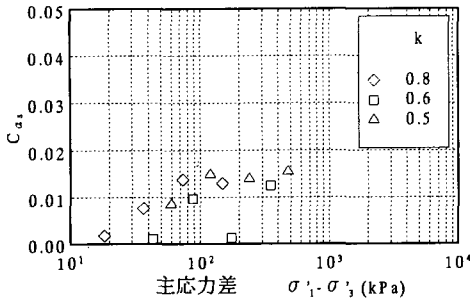


図-17 せん断クリープ速度係数と主応力差の関係

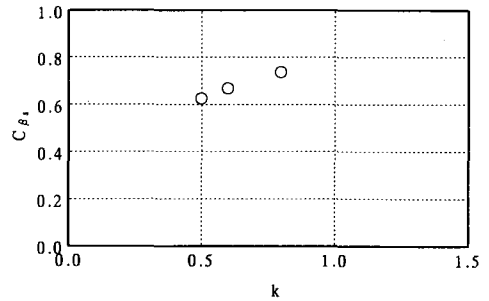


図-20 等せん断クリープ速度係数と応力比の関係

ことが分かる。

次に応力比 $k=0.5$ の各Caseの間隙比と主ひずみ差速度の関係($e - \log(d(\epsilon_1 - \epsilon_3)/dt)$ 関係)を図-16に示す。図-7と同様にクリープ過程は同図の右上より左下に向かって進行する。一次圧密過程の影響を脱した後は半対数で直線的に安定したクリープ過程が進行している。そして、本図における直線の傾き $\Delta e / \log(\dot{\epsilon}_1 - \dot{\epsilon}_3)$ をせん断クリープ速度係数 C_α と呼ぶことにする。

図-17は C_α を主応力差($\sigma_1 - \sigma_3$)に対しプロットしたものであり、ばらつきはあるものの、 $k=0.5 \sim 0.8$ の範囲で C_α の値はほぼ0.01前後であり、主応力差に

対し、さほど鋭敏な変化を見せていない。

図-18は同じく C_α と応力比 k の関係を調べたものであるが、そこには特筆すべき変化は見られていない。

次いで応力比 $k=1.0$ (等方)を除いた $k=0.5 \sim 0.8$ の12ケースについて、あるせん断クリープ速度($\dot{\epsilon}_1 - \dot{\epsilon}_3 = 10^{-5}(1/min)$)が出現したときの間隙比 e と主応力差($\sigma_1 - \sigma_3$)の関係を図-19に半対数で示した。それらの各点を連ねて得られる等せん断クリープ速度線は直線的であり、その傾き($\Delta e / \Delta \log(\sigma_1 - \sigma_3)$)を等せん断

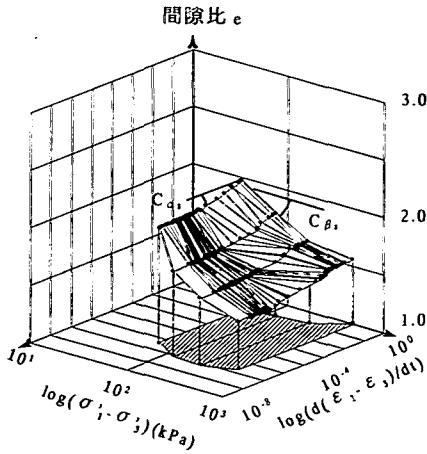


図-21 せん断クリープ速度面(k=0.5)

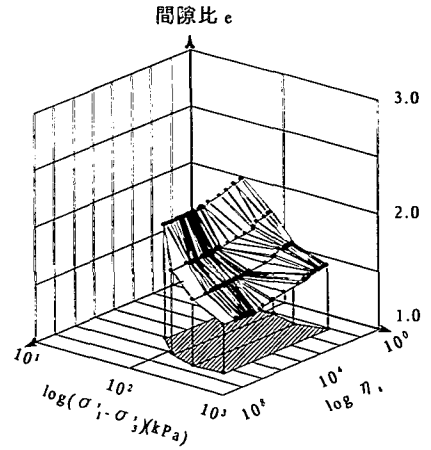


図-22 せん断粘性係数平面(k=0.5)

クリープ速度係数 C_{β} と呼ぶことにする。

図-20は C_{β} に及ぼす応力比 k の影響を調べたもので、 C_{β} は k の増加とともに増加傾向にあるものの、実測点が3点であること、バラツキも判断に入れて、 C_{β} は $k=0.5 \sim 1.0$ の範囲で0.7前後の一定値と考えたい。

なお、粘土は完全等方材料ではないので、応力比 $k=1.0$ (等方) の場合にも僅かではあるがせん断クリープが生じている。しかし、本研究の目的が土の等方性を仮定しての圧密理論の構築にあるので、ここでは等方応力状態で発生するせん断クリープを無視した。

図-21は図-15から図-20までに示したことを $e - \log(\sigma'_1 - \sigma'_3) - \log(\dot{\epsilon}_1 - \dot{\epsilon}_3)$ 空間に示したもので、そこに見えるものはせん断クリープ速度面である。これが平面と見做せるならば、せん断クリープに対し、前述の仮定(1)および仮定(2)が満たされることになる。筆者等は体積クリープの場合と同様、せん断クリープ速度面も平面として取扱うことが可能と考えている。

図-22は同様な意味で、上述のことを $e - \log(\sigma'_1 - \sigma'_3) - \log \eta$ 空間に示したもので、そこに見えるものはせん断クリープ速度面を平面と見做せば、これも自動的に平面と見做すことになる。

5. 結論

応力比 $k=1.0$ (等方) から $k=0.5$ (k_0 圧密) の範囲で三軸排水クリープ試験を行った。得られたクリープ情報を体積クリープとせん断クリープに分け、その特性を検討し、次の結論を得た。

1) 体積クリープ成分について

1-1) $e - \log t$ または $e - \log(de/dt)$ 曲線は σ'_m をパ

ラメータにした平行直線群と見做すことができる。

1-2) その平行直線群の間隔は $\log \sigma'_m$ に比例している。すなわち等体積クリープ速度線は $e - \log \sigma'_m$ 平面で直線的である。

1-3) 1-1) および 1-2) の結論を考え合わせると、 $e - \log \sigma'_m - \log(de/dt)$ 空間に一つの平面が形成される。

2) せん断クリープ成分について

2-1) $e - \log t$ または $e - \log(\dot{\epsilon}_1 - \dot{\epsilon}_3)$ 曲線は $(\sigma'_1 - \sigma'_3)$ をパラメータにした平行直線群と見做せる。

2-2) その平行直線群の間隔は $\log(\sigma'_1 - \sigma'_3)$ に比例的である。すなわち等せん断クリープ速度線は $e - \log(\sigma'_1 - \sigma'_3)$ 平面で直線的である。

2-3) 2-1) および 2-2) の結論を考え合わせると、 $e - \log(\sigma'_1 - \sigma'_3) - \log(\dot{\epsilon}_1 - \dot{\epsilon}_3)$ 空間に一つの平面が形成される。

付録 レオロジーモデルとパラメータ決定法

この付録は参考文献 16) の部分再録である。

吉國は、粘性土の圧縮や圧密に関する過去の研究の要約やレオロジーの観点から見て役立つ情報を説明するために非線型弾性液体モデルを提案した。

提案されたモデルのレオロジー方程式は

$$-\frac{de}{dt} = m_v(\sigma') \frac{d\sigma'}{dt} + \frac{\sigma'}{\eta(e, \sigma')} \quad (A1)$$

と表される。ここで e は間隙比、 σ' は有効応力、 m_v は過圧密領域での圧縮係数、 η は粘土骨格の粘性係数を示

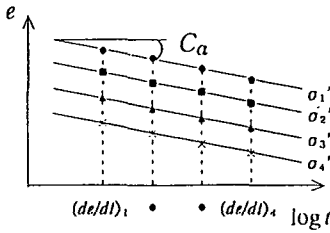


図-A1 $e - \log t$ 平面上的クリープ線

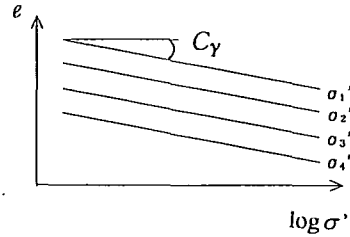


図-A3 $e - \log \sigma'$ 平面上的除荷曲線

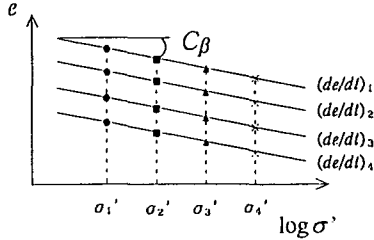


図-A2 $e - \log \sigma'$ 平面上的等クリープ速度線

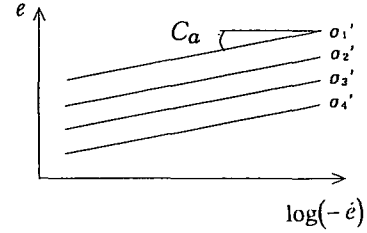


図-A4 $e - \log t$ 平面上的 $e - \dot{e}$ 関係

し、それらは

$$m_v(\sigma') = -\frac{de}{d\sigma'} \quad (A2)$$

$$\sigma' = \eta(e, \sigma') \left[-\frac{de}{dt} \right]_{\sigma' = \text{const}} \quad (A3)$$

と定義される。

次の議論のために、以下のように変数変換を行う。

$$T = \log t \quad (A4)$$

$$\Sigma' = \log \sigma' \quad (A5)$$

$$\dot{E} = \log \left(-\frac{de}{dt} \right) \quad (A6)$$

$$H = \log \eta \quad (A7)$$

さらに、以下の仮定 (A-1~4) を設ける。

仮定(A-1) クリープ曲線は $e - T$ 平面上で C_α の勾配を持つ直線群で、各線は平行となっている(図-A1)。

仮定(A-2) 等クリープ速度線は $e - \Sigma'$ 平面上で C_β の勾配を持つ直線群で、各線は平行となっている(図-A2)。

仮定(A-3) $e - \Sigma'$ 平面上的除荷・再載荷曲線は C_γ の勾配を持つ直線群で、各線は平行となっている(図-A3)。

仮定(A-4) m_v は σ' のみの関数で、 η は e と σ' のみの関数である。

この(A-1)~(A-3)までの仮定は、

$$\left. \frac{de}{dt} \right|_{\sigma' = \text{const}} = -C_\alpha \quad (A8)$$

$$\left. \frac{de}{d\Sigma'} \right|_{e = \text{const}} = -C_\beta \quad (A9)$$

$$\frac{de}{d\Sigma'} = -C_\gamma \quad (A10)$$

とも表される。

式(A4)を考慮すれば、ひずみ速度 \dot{e} は以下の関係を持つ。

$$-\frac{de}{dt} = -0.434 \frac{1}{t} \frac{de}{dT} \quad (A11)$$

式(A11)の対数を取り、式(A4)と式(A6)を代入すれば、

$$\dot{E} = \log \left(-0.434 \frac{de}{dt} \right) - T \quad (A12)$$

と表される。

粘土は $\sigma' = \text{const}$ 状態でクリープが進行することを考えれば式(A8)を式(A12)に代入し次式が得られる。

$$\dot{E}_v = \log(0.434 C_\alpha) - T \quad (A13)$$

ここに

$$\dot{E}_v = \log(-\dot{e}_v) \quad (A14)$$

$$\dot{e} = \dot{e}_e + \dot{e}_v \quad (A15)$$

であり、 \dot{e}_e および \dot{e}_v はそれぞれ弾性ひずみ速度およびクリープひずみ速度である。

式(A13)を微分すれば、

$$d\dot{E}_v = -dT \quad (A16)$$

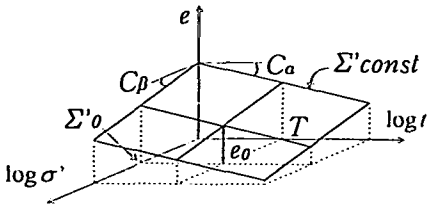


図-A5 $e - T - \Sigma'$ 空間における粘土の挙動

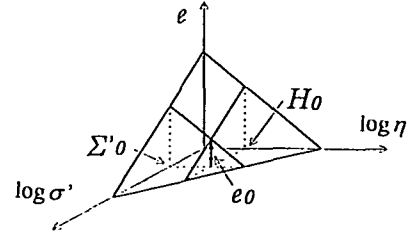


図-A7 $e - \Sigma' - H$ 空間における粘性係数平面

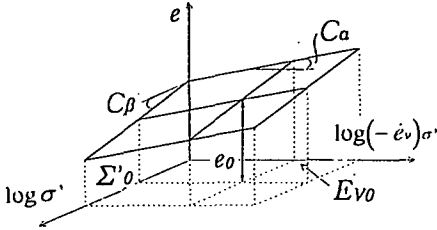


図-A6 $e - \dot{E}_v - \Sigma'$ 空間における粘土の挙動

上式を整理し直すと,

$$\begin{aligned} H - H_0(e = e_0, \Sigma' = \Sigma'_0) \\ = \frac{C_\alpha - C_\beta}{C_\alpha} (\Sigma' - \Sigma'_0) - \frac{1}{C_\alpha} (e - e_0) \end{aligned} \quad (A22)$$

が与えられる。

これも図-A7のように $e - \Sigma' - H$ 空間において平面を表し、粘性係数平面と呼ぶ。

参考文献

- 1) Terzaghi, K. : Die theorie der hydrodynamischen Spannungserscheinungen und ihr erdbautechnisches anwendungsgebiet, Proc. Int. Cong. Appl. Mech., 1-288, 1924.
- 2) Taylor, D. W. and Merchant, W. : A theory of clay consolidation accounting for secondary compression, Journ. Math. and Phys., Vol.19, 3-167, 1940.
- 3) Roscoe, K. H., Scofield, A. N. and Thrairajah, A. : Yielding of Clays in states wetter than critical, Geotechnique, Vol.13, No.3, pp.211-240, 1963.
- 4) Adachi, T. and Okano, M. : A constitutive equation for normally consolidated clay, Soils and Foundations, Vol.14, No.1, pp.55-73, 1974.
- 5) Akai, K. and Oka, F. : Thermodynamic theory of in elastic materials and its application to stress wave propagation in cohesive soils, Proc. of JSCE, No.253, pp.109-122, 1976.
- 6) Sekiguchi, H. : Theory of One-dimensional consolidation of Clays with consolidation of the Rheological Properties, Soil and Foundations, No.1, pp.27-44, 1976.
- 7) Matsui, T. and Abe, N. : Multi - dimensional consolidation analysis of soft clay, Proc. of 4th International Conference on Numerical Methods for Geotechnics, Vol.1, pp.337-347, 1982.
- 8) Murayama, S. and Shibata, T. : Flow and stress relaxation of clays, Proc., IUTAM symposium on Reology and Soil

となり、以下の関係が得られる。

$$\left. \frac{de}{d\dot{E}_v} = - \frac{de}{dT} \right|_{\sigma' = \text{const}} = C_\alpha \quad (A17)$$

式(A17)より、図-A1 から図-A4 が得られる。

式(A9)と式(A17)は、 $e - T - \Sigma'$ 空間と $e - \dot{E}_v - \Sigma'$ 空間の両方にかユニークな平面であることを示し、それらは

$$\begin{aligned} e - e_0(T = T_0, \Sigma' = \Sigma'_0) \\ = -C_\alpha(T - T_0) - C_\beta(\Sigma' - \Sigma'_0) \end{aligned} \quad (A18)$$

$$\begin{aligned} e - e_0(\dot{E}_v = \dot{E}_{v0}, \Sigma' = \Sigma'_0) \\ = C_\alpha(\dot{E}_v - \dot{E}_{v0}) - C_\beta(\Sigma' - \Sigma'_0) \end{aligned} \quad (A19)$$

と表され、それらの平面を図-A5 と図-A6 に示す。

$e - T - \Sigma'$ 空間上の Σ' 一定線の $e - T$ 面への投影図は図-A1 であり、 $e - \dot{E}_v - \Sigma'$ 空間上の \dot{E}_v 一定線の $e - \Sigma'$ 平面の投影図は図-A2 となる。

式(A3)は式(A5)、式(A6)、式(A7)を使って、

$$\dot{E}_v = \Sigma' - H \quad (A20)$$

と表され、式(A20)を式(A19)に代入すると、

$$\begin{aligned} e - e_0(H = H_0, \Sigma' = \Sigma'_0) \\ = C_\alpha[(\Sigma' - \Sigma'_0) - (H - H_0)] - C_\beta(\Sigma' - \Sigma'_0) \\ = (C_\alpha - C_\beta)(\Sigma' - \Sigma'_0) - C_\alpha(H - H_0) \end{aligned} \quad (A21)$$

が得られる。

- Mechanics, pp.99-129, 1966.
- 9) 赤井浩一, 足立紀尚, 安藤信夫 : 飽和粘土の応力～ひずみ～時間関係., 土木学会論文報告集, 第225号, pp.53-61, 1974.
 - 10) Perzyna, P. : The constitutive equations for work - hardening and rate sensitive plastic materials, Proc. of Vibration Problems, Vol.3, No.4, pp.281-290, 1963.
 - 11) Leroueil, S., Kabbaj, M. and Bouchard, R : Stress - strain rate relation for the compressibility of sensitive natural clays, Geotechnique, Vol.35, No.2, pp.327-340, 1985.
 - 12) 池上慎司, 吉國洋, 中ノ堂博文, 福原和顕 : 過圧密粘土の二次圧密特性, 地盤と建設, Vol.17, No.1, pp.15-24, 1989.
 - 13) Kutler, B. L. and Sathialingam, N. : Elastic - viscoelastic modeling of the rate - dependent behavior of clays, Geotechnique, Vol.33, No.3, pp.327-340, 1992.
 - 14) Yoshikuni, H., Kusakabe, O., Hirao, T. and Ikegami, S. : Elasto-viscous modeling of time-dependent behaviour of clay, Proc. 13th ICSME, New Delhi, India, Vol.1, pp.417-420, 1994.
 - 15) 今井五郎 : 飽和土の一次元圧密, わかりやすい土質力学原論(第1回改訂版), 土質工学会, pp.187-243, 1992.
 - 16) Yoshikuni, H., Okada, M., Ikegami, S. and Hirao, T. : One-dimensional consolidation analysis based on an elasto-viscous liquid model, Proc. of the International Symposium on Compression and Consolidation of Clayey Soils, Vol.1, pp.505-512, 1995.

(1996. 5. 10受付)

THREE-DIMENSIONAL CREEP BEHAVIOUR OF AN ALLUVIAL CLAY

Hiroshi YOSHIKUNI, Seiji KANO and Takeo MORIWAKI

In order to apply one-dimensional elasto-viscous theory to practical problems, it is necessary to extend it to three-dimensional theory. With this in mind, three-dimensional creep tests under drained conditions were carried out on a reconstituted alluvial clay in a triaxial cell. A question of whether volumetric and shear viscous coefficients are independent of stress conditions or not, was examined. The result revealed that volumetric and shear viscous coefficients of clay are independent of stress condition. Furthermore, a unique plane termed 'viscous coefficient plane' exists in a space of e , $\log \sigma'$ and $\log \eta$.