

# 粘土の圧密挙動に及ぼすひずみ速度/温度の影響

柴田 徹\*

Effects of Strain-Rate and Temperature on Consolidation Behaviour of Clays

Toru SHIBATA

## ABSTRACT

Clay behaviour in one-dimensional condition is influenced by numerous factors: strain rate ( $\dot{\epsilon}$ ) and temperature ( $T$ ), etc. The first part of the paper reviews the effects of [ $\dot{\epsilon}; T$ ]. Leroueil (1996) showed in particular that the combined effects of [ $\dot{\epsilon}; T$ ] can be quantified. In a second part, on the basis of the published data on [ $\dot{\epsilon}; T$ ]-effects obtained by CRS oedometer tests, an attempt was made to propose a new rheological model, which is represented by Eq.(4). Furthermore, it is shown that the  $\sigma - \epsilon$  curves obtained at various  $\dot{\epsilon}$  and  $T$  come into a unique one when the CRS tests are controlled to maintain the  $\dot{\epsilon} - T$  relations given by Eq.(6).

キーワード：粘土、レオロジーモデル、ひずみ速度、時間、温度

Keywords: Clay, Rheological Model, Strain Rate, Time, Temperature

## 1. まえがき

粘土の力学挙動に及ぼす時間/ひずみ速度の影響については、およそ半世紀前から研究が続けられている。一方、土の「力学特性と温度の関係」に関心が寄せられるようになったのは最近のことで、それは放射性廃棄物の地中処理など、熱履歴を受けた地盤の力学特性を知る必要が生じたためである。また「粘土を加熱すれば、見かけの年代効果が加速される現象」への興味も、それに拍車をかけてきたと考えられる。

従来知見によれば、粘土の載荷過程においてひずみ速度を遅くすると、同じ応力に対してひずみ量は増加し、温度を高めてもひずみ量はやはり大となる。高温になれば、定荷重下の二次圧密量も増加する。つまり温度を変化させると、ひずみ速度を変えたのと同じ効果をもつ。本研究では粘土を対象にして[ひずみ速度と温度]の組み合わせを変えたとき、圧密挙動に及ぼす影響を明らかにする。

\* 建設環境工学科

## 2. 従来の研究

### 2.1 ひずみ速度の影響

従来から、定ひずみ速度圧密試験(CRS)に基づく研究が行われており、図1は代表的な結果を引用した[1][2]。ただし原図は縦軸を普通目盛りで表示しているが、図1は両対数プロットに書き直した点が違う。

図のように圧密降伏応力( $\sigma_v$ )は、ひずみ速度( $\dot{\epsilon}$ )の影響で一義的に決まらず、 $\dot{\epsilon}$ が速くなると $\sigma_v$ も大きく測定される。なお図1の縦軸は $\dot{\epsilon}_0 = 1.0 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ に対する $\sigma_v$ を基準値として示している。

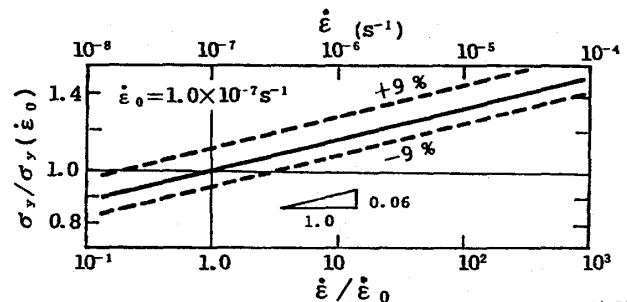


図1 圧密降伏応力に及ぼすひずみ速度の影響<sup>1) 2)</sup>

## 2.2 温度の影響

各種の粘土について、 $\sigma_y$ に与える温度の影響をまとめた結果を、図2に示す[3]。ただし原図は普通目盛りで表示しているが、図2は両対数プロットに書き直した点が違う。ここで図の右側縦軸は  $T=20^\circ\text{C}$  における  $\sigma_y$  を基準とし、同じく左側は  $T=5^\circ\text{C}$  の  $\sigma_y$  を基準として目盛りをとっている。

図より試験時の  $T$  が上昇すると、 $\sigma_y$  が低下する傾向が明らかである。

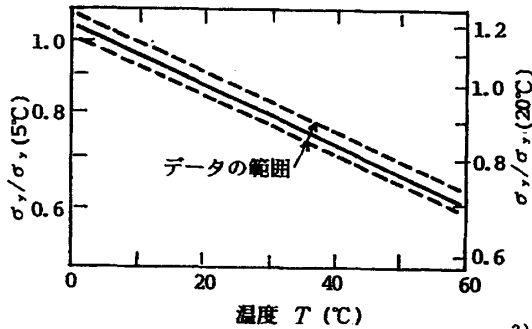


図2 圧密降伏応力に及ぼす温度の影響<sup>3)</sup>

## 2.3 ひずみ速度と温度の影響

図3は、 $\dot{\epsilon}$ と  $T$ の組み合わせを変えた CRS 試験の結果である[3]。試験条件は  $T$  を  $[5, 35^\circ\text{C}]$ 、 $\dot{\epsilon}$  を  $[1.0 \times 10^{-5}, 1.6 \times 10^{-7} \text{s}^{-1}]$  に選び、合計4種類の組み合わせで行なっている。図3より分かることは、

(1) ひずみ速度と温度を変化させても、応力-ひずみ曲線の形、すなわち圧縮指数は変わらない。このことは正規圧密領域を対象にして、それぞれの  $\sigma_y(\dot{\epsilon}, T)$  で基準化した図4をみれば明らかであり、曲線群は狭い範囲内に収まっている。

(2) 注目すべきは、[大  $\dot{\epsilon}$ ; 高  $T$ ] と [小  $\dot{\epsilon}$ ; 低  $T$ ] の組み合わせの中に、応力-ひずみ曲線が完全に一致するケースが存在することである。具体的には  $[1.0 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}; 35^\circ\text{C}]$  と  $[1.6 \times 10^{-7} \text{s}^{-1}; 5^\circ\text{C}]$  の組み合わせがそれに相当する。

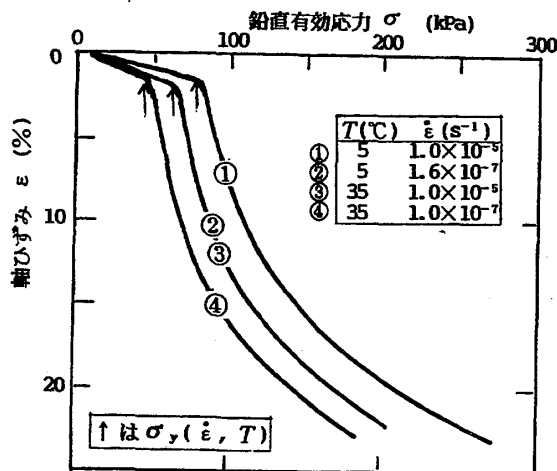


図3  $\dot{\epsilon}$ と  $T$ の組み合わせを変えた CRS 試験<sup>3)</sup>

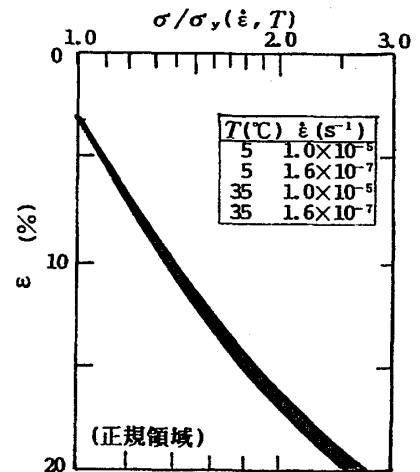


図4  $\sigma_y$ で基準化した応力-ひずみ曲線

## 2.4 Leroueil Model

このモデルは、圧密降伏応力をひずみ速度と温度の関数  $\sigma_y = f(\dot{\epsilon}, T)$  として、図5のように表現するもので、次の仮定より導かれた[4]。

- (1)  $\log \sigma_y - \log \dot{\epsilon}$  関係は、直線表示ができる(図1参照)。
- (2)  $\dot{\epsilon}$ と  $T$ が変化しても、 $\sigma/\sigma_y(\dot{\epsilon}, T) - \epsilon$  関係はユニークに決まる(図4)。
- (3)  $\sigma_y$ は  $T$ の増加とともに減少する(図2)。このモデルでは、 $\sigma_y(5^\circ\text{C})/\sigma_y(20^\circ\text{C}) = 1.18$ 、ならびに  $\sigma_y(35^\circ\text{C})/\sigma_y(20^\circ\text{C}) = 0.87$ を採用している。

図5によれば Berthierville Clay に対しては、温度が  $5 \sim 35^\circ\text{C}$  の範囲で  $\dot{\epsilon}$  を与えれば、 $\sigma_y$  を求めることができる。図で注目されるのは、クリープ試験や CRS 試験も含めて、多種類の試験結果が  $T = \text{一定}$  のもつで同一の  $\sigma_y - \dot{\epsilon}$  直線上にのることである。

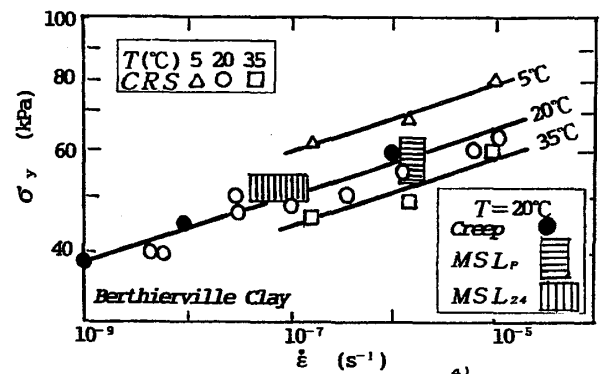


図5 LeroueilのModel<sup>4)</sup>

## 3. モデルの提案

### 3.1 Leroueil Model の拡張

上述のように図5で示されるモデルは、特定の粘土に適用可能であるが、これに一般性をもたせるため、以下のような考察を加えて Leroueil Model の拡張を図った。なお本節以降は  $\sigma_y$  の基準値を  $\sigma_{y0}$  で表わす。

(1) 圧密降伏応力のひずみ速度依存性

先の図1より、圧密降伏応力 $\sigma_y$ を $\sigma_{y0}(1 \times 10^{-7} s^{-1})$ で基準化した $\sigma_y/\sigma_{y0}(1 \times 10^{-7} s^{-1}) - \dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_0(1 \times 10^{-7} s^{-1})$ 関係は、両対数紙上で直線とみなされ、その勾配は0.06と読みとれる。図1を式示すれば、

$$\log \frac{\sigma_y}{\sigma_{y0}(\dot{\epsilon}_0)} = \frac{3}{50} \log \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \quad (1)$$

であり、基準値 $\dot{\epsilon}_0$ は任意の値をとれる。

(2) 圧密降伏応力の温度依存性

図2を用いる。 $\log(\sigma_y/\sigma_{y0}) - T$ の直線性より、 $T_0 = 5^\circ C$ の場合

$$\log \frac{\sigma_y}{\sigma_{y0}(T_0)} = \frac{1}{50} \left( 1 - \frac{T}{T_0} \right) \quad (2)$$

が成立する。

なお $T_0 = 20^\circ C$ としたときの $\sigma_y/\sigma_{y0}(20^\circ C)$ は、図中の右側縦軸に示されており、次式の関係が成立する。

$$\log \frac{\sigma_y}{\sigma_{y0}(T_0)} = \frac{4}{50} \left( 1 - \frac{T}{T_0} \right) \quad (3)$$

(3)  $\sigma_y = f(\dot{\epsilon}; T)$ モデル

$T_0 = 5^\circ C$ の場合には、 $\sigma_y = f(\dot{\epsilon}; T)$ モデルとして式(1)と(2)より

$$\log \frac{\sigma_y}{\sigma_{y0}(\dot{\epsilon}_0, T_0)} = \frac{1}{50} \left( 3 \log \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} + 1 - \frac{T}{T_0} \right) \quad (4)$$

図6は $\dot{\epsilon}_0 = 1 \times 10^{-7} s^{-1}$ としたとき、式(4)の関係を表わしており、 $\dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_0 = 1$ から1対数サイクル増える毎の、温度推移をみる事ができる。

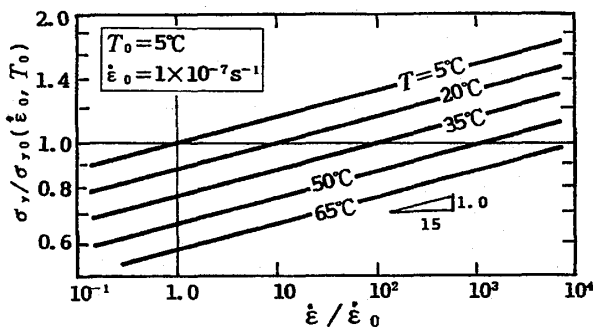


図6 今回提案のモデル

3.2 モデルの検証

いま図5に引用した粘土(Berthierville clay)で、 $\sigma_{y0}(1 \times 10^{-7} s^{-1}, 20^\circ C) = 50$  kPaが得られたとする。この値を基にして、他の[ひずみ速度; 温度]における $\sigma_y$ を推定する。 $T_0 = 20^\circ C$ の式(3)を用いた結果、 $\dot{\epsilon}_0 = 1 \times 10^{-7} s^{-1}$ に対して、 $\sigma_y(5^\circ C) = 57.4$  kPa,  $\sigma_y(35^\circ C) = 43.5$  kPaを得る。図7はモデル化の結果を図示したもので、直線群は、それぞれの温度に対するプロット点を良く代表できている。

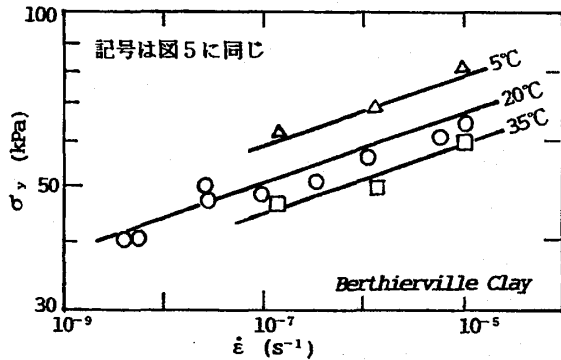


図7 モデルの検証例

次に St-Polycarpe clay について、ひずみ速度と温度を制御した実験結果[5]を検討する。この実験では、 $\dot{\epsilon} = 2 \times 10^{-6} s^{-1}$ のもとで $T$ を5, 20, 50°Cの3種類に変えている。実測値 $\sigma_{y0}(2 \times 10^{-6} s^{-1}, 5^\circ C) = 16.0$  kPaに基づいて、他の条件下での $\sigma_y$ を推定すると表1となる。実測/推定の比較ができるのは、 $T = 20$ と $50^\circ C$ の2例のみであるが、いずれも差は $\pm 4\%$ 以内に収まっている。表1 実測値と推定値の比較例

$T(^\circ C)$	$\dot{\epsilon}(s^{-1})$	実測 $\sigma_y$ (kPa)	推定 $\sigma_y$ (kPa)
5	$2 \times 10^{-6}$	16.0	( $\sigma_{y0} = 16.0$ )
20	〃	13.4	13.9
50	〃	10.9	10.6

以上 Berthierville clay と St-Polycarpe clay を用いた実験結果を引用して、著者の提案するモデルの妥当性を検討した。実測と推定値との比較は図8に示すように、良い精度で実測値を推定できる。

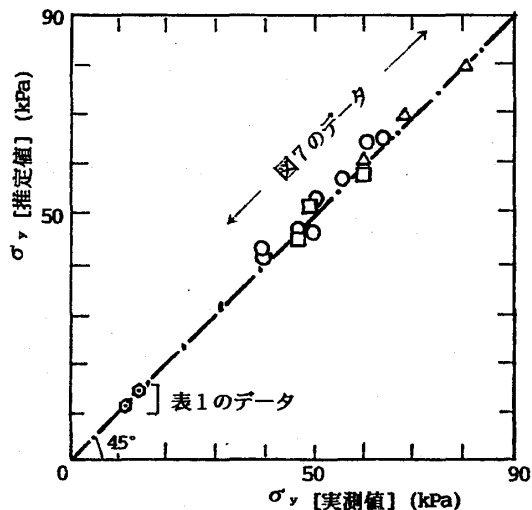


図8 実測/推定値の比較

4. 等価な  $[\dot{\epsilon}, T]$  の組合せ

ひずみ速度と温度を種々に変えてCRS試験を実施したとき、先に図3でみたように、

$[1.6 \times 10^{-7} s^{-1}; 5^\circ C]$  と  $[1.0 \times 10^{-5} s^{-1}; 35^\circ C]$  の組合せに限り、応力-ひずみ曲線が一致した。本論文では、これを等価な  $[\dot{\epsilon}; T]$  の組合せと称する。

等価な条件は、両者の圧密降伏応力 $\sigma_v$ が一致するとして、式(4)において $\sigma_v/\sigma_{v0}(\dot{\epsilon}_0, T_0)=1$ と置けばよい。

すなわち $T_0=5^\circ\text{C}$ の場合、

$$\log \frac{\dot{\epsilon}(T)}{\dot{\epsilon}_0} = \frac{1}{3} \left( \frac{T}{T_0} - 1 \right) \quad (5)$$

さらに2種類の温度 $T_1$ と $T_2$ を考え、 $T_1 > T_2$ とすれば、式(5)より

$$\log \frac{\dot{\epsilon}(T_1)}{\dot{\epsilon}(T_2)} = \frac{1}{15} (T_1 - T_2) \quad (6)$$

が導かれる。上式が、等価な応力-ひずみ曲線を得るために必要な $\dot{\epsilon}$ と $T$ の一般的な関係である。

またCRS試験において、所定のひずみ $\epsilon$ を生じるまでの経過時間 $t$ は $t = \epsilon / \dot{\epsilon}$ であるから、式(6)の右辺は

$$\frac{\dot{\epsilon}(T_1)}{\dot{\epsilon}(T_2)} = \frac{t(T_2)}{t(T_1)} \quad (7)$$

となる。

図9は、温度差( $T_1 - T_2$ )が $30^\circ\text{C}$ までの範囲で、式(6)(7)を表現したものである。図中には、前述の実験結果が示されており、ばらつき幅は大きいものの、モデルと実測値の傾向は一致している。

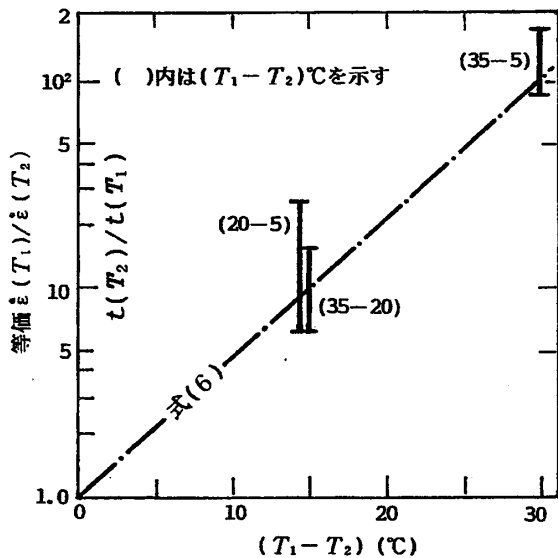


図9 式(6)の検証

次に例題を示す。

粘土について、長期と短期のCRS試験を想定する。試験条件は表2に示す。長期試験で得られる6カ月後の応力-ひずみと同じ値を短期試験(1週間)で求めるには、表中の?をいくらにすればよいか。

表2 例題における試験条件

	期間	ひずみ速度( $\text{s}^{-1}$ )	温度( $^\circ\text{C}$ )
長期試験	6カ月	$1.0 \times 10^{-8}$	18
短期試験	1週間	?	?

解答;

式(7)で $t(T_2)=6 \times 30=180$ 日、 $t(T_1)=7$ 日より  
 $\dot{\epsilon}(T_1)=1.0 \times 10^{-8} \times 180 / 7=2.6 \times 10^{-7} \text{s}^{-1}$ 。

次に式(6)より、 $T_1=39^\circ\text{C}$ となる。

つまり $[1.0 \times 10^{-8} \text{s}^{-1}; 18^\circ\text{C}]$ と等価な $\dot{\epsilon}$ と $T$ の組合せは $[2.6 \times 10^{-7} \text{s}^{-1}; 39^\circ\text{C}]$ と求まる。

## 5. むすび

既往の文献資料よりのデータに基づいて、粘土の力学挙動に及ぼすひずみ速度と温度の影響を考察した。主な結論は次のように要約できるが、これらは当大学の土質実験室において、さらなる実証が望まれる。

(1) 圧密降伏応力 $\sigma_v$ をひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ と温度 $T$ の関数 $\sigma_v = f(\dot{\epsilon}, T)$ として表現する Leroueil Model がある。しかしそれは特定の粘土を対象としているので、より一般性をもたせるモデルを提案した。

(2) 定ひずみ速度圧密試験(CRS)では、幾種類もの $[\dot{\epsilon}, T]$ の組み合わせがある。それらの中で、応力-ひずみ曲線が一致するものを等価と呼ぶ。そして等価な組み合わせを得るために、 $\dot{\epsilon}$ と $T$ の間に成立すべき条件を求めた。

(3) 「等価な組み合わせ」の考え方に基けば、試料の温度を高めることにより、試験時間を短縮して、同じ応力-ひずみ関係を得ることができる。例題で示したように、[6カ月間;  $18^\circ\text{C}$ ]と[1週間;  $39^\circ\text{C}$ ]は等価な組み合わせであり、温度を $18 \rightarrow 39^\circ\text{C}$ にあげると、試験期間は6カ月 $\rightarrow$ 1週間に短縮できることになる。

## 参考文献

- [1]Leroueil,S. et al.;Preconsolidation pressure of Champlain clays,Part II:Laboratory determination, Can.Geotech. J.,20,pp.803-816,(1994).
- [2]Leroueil,S. et al.; Stress-strain-strain rate relation for the compressibility of sensitive natural clays, Geotech.,35, pp. 159-180,(1985).
- [3]Boudali,M. et al.; Viscous behaviour of natural clays, Proc.13th ICSMFE,1,pp.411-416,(1994).
- [4]Leroueil,S.;Compressibility of clays:Fundamental and practical aspects,J.Geotech. Eng.,July,pp.534-543,(1996).
- [5]Leroueil,S.; Factors influencing clay behaviour under one-dimensional conditions, 関西空港沈下問題討議資料,(1998).