

粘土の一次元圧密におけるひずみ速度と温度の影響

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



柴田 徹 Toru SHIBATA (福山大学工学部)

第2章では粘土の一次元圧密において、応力-ひずみ特性に及ぼすひずみ速度の影響を取り上げた。特に定ひずみ速度型の圧密試験(CRS-試験)と、それに基づく圧密降伏応力について考察した。また分割型圧密試験の結果をひずみ速度の観点から整理して、新たな知見を得たほか、原位置で観測された海底粘土層の応力-ひずみ関係についても独自の解釈を加えた。第3章では粘土の応力-ひずみ特性に及ぼす温度の影響を論じ、第4章においては、前章までのまとめとして「時間-温度換算則」の成立を目標としたユニークな仮説にも言及した。

キーワード：粘土、圧密、ひずみ速度、温度、時間 (IGC: D5/E2)

1. まえがき

粘土の力学挙動に及ぼす時間(あるいはひずみ速度)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きた。それに比べると、温度の影響に関しての研究が活発になったのは、ここ10数年来のことである。かつて40年ほど前に筆者は粘土のレオロジー特性の一環として、「時間と温度」を主題に取り上げたことがある¹⁾²⁾。しかし当時は、研究者の間で土質力学において温度の占める重要性が未だ十分に認識されていなかったためか、影響を呼ぶには至らなかった。

最近になり、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、放射性廃棄物の地中処理あるいは化学的な地盤改良に伴って、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いえる。

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、同じ有効応力に対してひずみ量は増え、温度を高めてもひずみ量はやはり大きくなる。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。そこで本研究では粘土を対象にして、ひずみ速度と温度の相互関係を明らかにし、それに基づいて[温度-時間の換算則]とでもいうべき新しい課題へのアプローチを試みる。

2. ひずみ速度の影響

粘土の力学挙動に及ぼす時間(またはひずみ速度)の影響については、有効応力 p 、ひずみ ϵ 、ひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ の関係として

$$f(p, \epsilon, \dot{\epsilon}) = 0 \quad (1)$$

が初めて Taylor・Merchant(1940)によって提案された³⁾。

Taylorらは、ひずみ ϵ の代わりに間隙比 e を用いて式(1)を表現しているが、一次元圧密の場合にはどちらをとっても同じ意味を持つ。

その後、 $\dot{\epsilon} = \text{const}$ における $e-p$ 曲線を isotach(等ひずみ速度曲線)と名付けたのは Šuklje(1957)であり⁴⁾、その考え方は今井によって解説されている⁵⁾。

関連する研究としては、Crawford(1965)が CRS 試験を提唱し⁶⁾、Leroueilら(1985)は Šukljeモデルの拡張を行なっている⁷⁾。

以下この章での作業は式(1)の検証を目的としており、そのためには次の方法が考えられる。

- 1) $\dot{\epsilon} = \text{一定}$ の CRS 試験、
- 2) $p = \text{一定}$ のクリープ試験、および
- 3) $\epsilon = \text{一定}$ の応力緩和試験

のそれぞれに対して、等ひずみ速度線が一義的にきまるか否かを調べることである(図-1)。

ただし3)の応力緩和試験では、普通は過圧密領域の挙動となる(図-1で←のように p が減少する)ので、正規圧密状態を対象とする場合には適切な方法といえない。

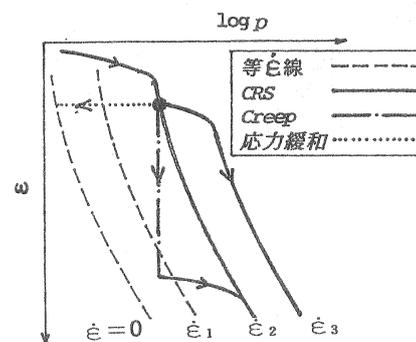


図-1 isotach則を検証するための方法

2.1 圧密降伏応力

粘土の力学特性に及ぼすひずみ速度の影響に関しては、圧密降伏応力 p_v はひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ の影響を受けて一義的には決まらず、 $\dot{\epsilon}$ が速くなると p_v も大きく測定されるという特徴をもっている。図-2 は $\dot{\epsilon}$ と p_v の規準値にそれぞれ下添字 0 を付けて、 $p_v/p_{v0} - \dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_0$ 関係を図示したもので、両対数紙上で直線とみなせば、その勾配は 0.06 と読み取れる。

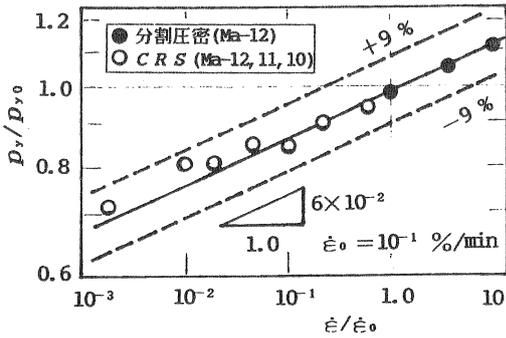


図-2 圧密降伏応力とひずみ速度

また図-2 には大阪湾の海底粘土について、 p_v に与える $\dot{\epsilon}$ の影響を調べた例として、CRS と分割圧密試験結果(後述)を併記してある ($\dot{\epsilon}_0 = 10^{-1} \%$ /min) が、実験データは従来のばらつき範囲内⁷⁾に入っている。以上のことから、次式が成立する。

$$\log \frac{p_v(\dot{\epsilon})}{p_{v0}(\dot{\epsilon}_0)} = \alpha \cdot \log \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \quad (2)$$

ここに係数 α は直線の勾配で、平均的には $\alpha = 6 \times 10^{-2}$ 。

次に $\dot{\epsilon}$ を種々に変えた CRS 試験を実施すれば、異なる $\dot{\epsilon}$ の数だけ $\epsilon - \log p$ 曲線が描かれる。そして各曲線の形を比較するため、等ひずみ速度線上の $p(\dot{\epsilon})$ を $p_v(\dot{\epsilon})$ で割って規準化し、 $\epsilon - [p(\dot{\epsilon})/p_v(\dot{\epsilon})]$ 関係を求めると図-3 が得られた。この場合に $\dot{\epsilon}$ は $2 \times 10^{-1} \sim 2 \times 10^{-4} \%$ /min であるが、曲線群は比較的狭い範囲に重なっている。すなわち $\dot{\epsilon}$ がこの程度のレベルでは、 $\dot{\epsilon}$ が異なっても $\epsilon - \log p$ は同じ曲線形を持つといえる。

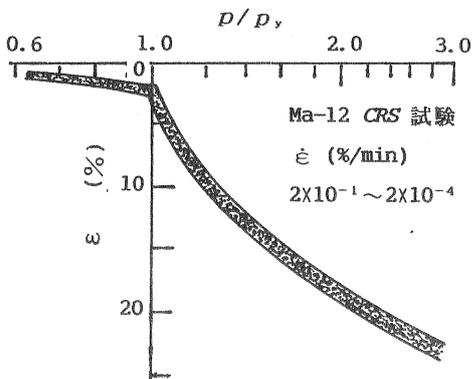


図-3 p_v で規準化した応力-ひずみ曲線

2.2 クリープ曲線

載荷圧力を種々に変えた一次元長期圧密試験の中で、正規圧密領域における例が図-4 に示されている⁸⁾。試験料は大阪湾の海底地盤より採取された Ma-12 層粘土である。供試体は有効土被り圧相当の圧力で 24 時間圧密したのち、図中に示す載荷応力で 70 日間の長期圧密試験を実施した。

図-4 の二次圧密曲線を一次元圧縮状態でのクリープ曲線とみなして、刻々変化(減少)するひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ を読み取る。それらの $\dot{\epsilon}$ を、その時の ϵ に対してプロットすると図-5 が得られる。この粘土の降伏応力は $p_v = 530$ kPa であるから、 $p > 549$ kPa における総ての実線曲線が正規圧密領域のクリープ挙動を表わすことになる。

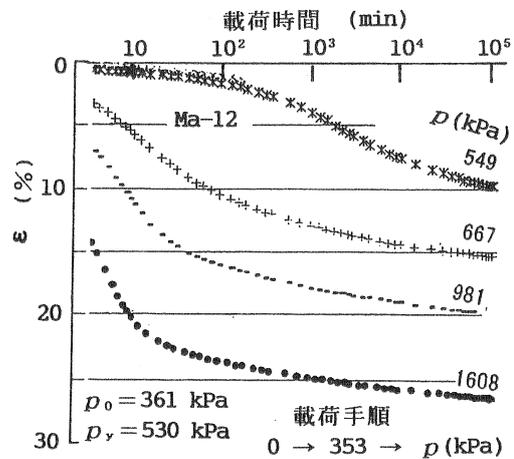


図-4 長期圧密試験の結果⁸⁾

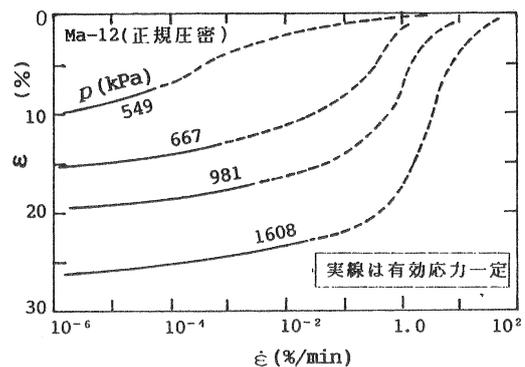


図-5 クリープ中のひずみ-ひずみ速度曲線

ここで Ma-12 層粘土については、図-4 以外にも多種多様な試験結果が報告されている⁹⁾。たとえば載荷圧レベルを変えた 4 日間クリープ、7 日間クリープ、 $\dot{\epsilon}$ を変えた CRS 試験などである。これらを 3 種類の p に対して $\epsilon - \log \dot{\epsilon}$ 関係としてまとめると、図-6 のようになる。図によれば、各載荷圧ごとにクリープと CRS 試験結果が同じ曲線上にプロットされており、両試験では載荷履歴などが異なるにも拘らず、同一の $\epsilon - \log \dot{\epsilon}$ 関係が得られるとみてよい。

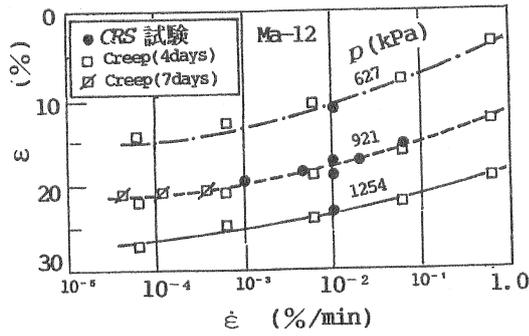


図-6 各種試験におけるひずみ-ひずみ速度関係

2.3 応力-ひずみ曲線

図-4で用いたのと同種のMa-12層粘土を対象にして、 $\dot{\epsilon}$ を $2 \times 10^{-1} \sim 2 \times 10^{-4}$ %/minの範囲で数種類に変えた CRS 試験結果が報告されている⁸⁾ (前述の図-3)。

図-7は、上記のクリープとCRSのそれぞれの試験から得た $\epsilon - \log p$ のプロットである。すなわち両試験とも $\dot{\epsilon}$ を $2 \times 10^{-2} \sim 2 \times 10^{-3}$ %/minの範囲に限定して、クリープの場合には図-5を利用し、 p に対する ϵ の値を求めたものである。図-7によれば、クリープとCRS試験の違いは $\epsilon - \log p$ 曲線上には現れず、図-6で述べたのと同様の結論が得られることが分かる。

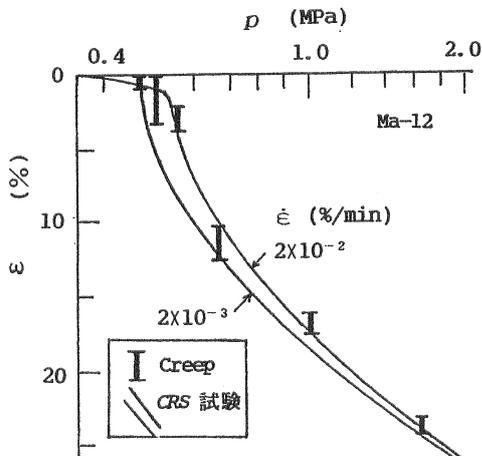


図-7 各種試験から得た応力-ひずみ曲線

次に、CRSとクリープを組合わせた試験結果も報告されている^{9) 10)}。図-8はその一例で、① $\dot{\epsilon} = 0.01$ %/minのCRS→② $p = \text{一定}$ のクリープ→③ $\dot{\epsilon} = 0.01$ %/minのCRSという3ステップ試験の結果である。この図から次のことが分かる。

(1)クリープ中(②の段階)には $\dot{\epsilon}$ が経過時間とともに減少し、その推移が記号別に示されている。そして同じ記号群を結べば、等 $\dot{\epsilon}$ 線を描くことが可能である(ただし等 $\dot{\epsilon}$ 線は 2×10^{-4} %/minの場合のみを破線で示した)。

(2)CRS(③の段階)における $\dot{\epsilon}$ は、いずれも同じ標準速度の状態に戻している。図-8によれば、クリープ履歴が

異なるにも拘らず $\dot{\epsilon}$ が等しければ、4種類の $\epsilon - \log p$ 曲線はほぼ重なる。

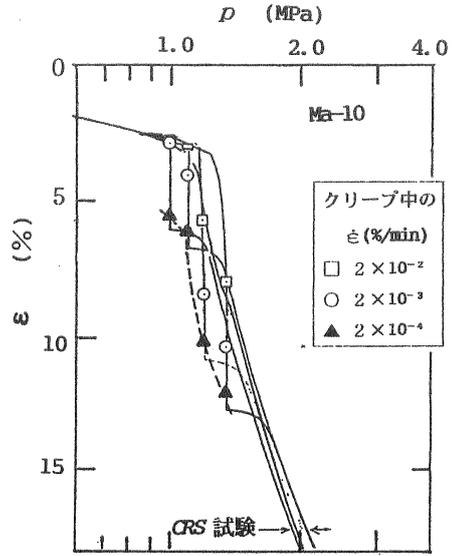


図-8 各種試験から得た応力-ひずみ曲線

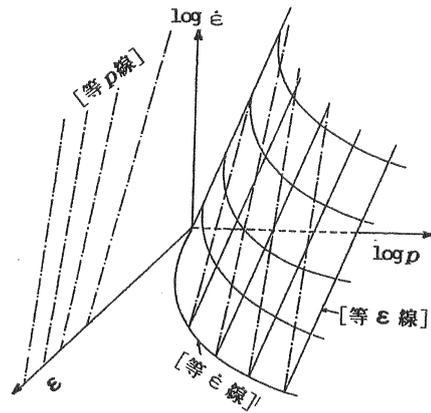


図-9 $f(p, \epsilon, \dot{\epsilon}) = 0$ の曲面形

以上の「まとめ」として、 $\log p - \epsilon - \log \dot{\epsilon}$ 座標上での曲面を図-9のように描くことができる。これは正規圧密領域を対象にした $f(p, \epsilon, \dot{\epsilon}) = 0$ の模式図であり、ちょうど盾を傾けたような曲面を形成することになる。

2.4 分割型圧密試験の考察

分割型圧密の試験法は、粘土の圧密挙動に及ぼす供試体の厚さの影響を調べるために考案されたもので、NGIのBerre-Iversenを以て嚆矢とするようである¹¹⁾。日本では1978年頃から、オエドメータを直列に連結するタイプの分割型装置が開発され、その試験結果について最近までに数編の論文が発表されている。近くは大向ら¹²⁾やM. Kangら¹³⁾が、大阪湾泉州沖の海底地盤から採取した洪積層粘土を用いた試験結果を発表している。

ここで引用するのは、(独法)港湾空港技術研究所において実施された試験報告¹²⁾に基づくものである。

試験は全体厚さが5cm(直径6cm,高さ1cm)の供試体を5個連結)と全体厚10cm(直径6cm,高さ2cm)の供試体を5個連結)の2ケースが行なわれた。したがって分割数は、両ケースとも5層となっている。

図-10, 11は全体厚5cmの場合に対して、各分割要素の $\varepsilon - \log \dot{\varepsilon}$ および $\varepsilon - p$ (有効応力)関係を表わしている。図-10において、①は排水面に近い最上端要素、⑤は非排水面に近い最下端要素である。

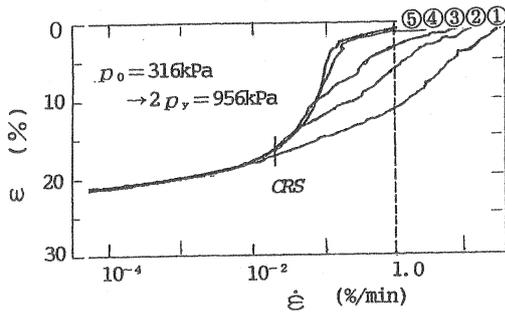


図-10 分割各要素のひずみ-ひずみ速度曲線

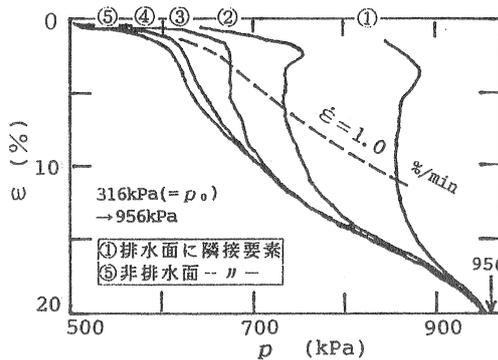


図-11 分割各要素の応力-ひずみ曲線

図-10 を利用すれば、破線で示すようにひずみ速度 $\dot{\varepsilon} = 1.0$ %/min に対応して発生する各要素のひずみ ε を求めることができる。そしてこれらの ε を、図-11 における $\varepsilon - p$ 曲線上にマークしてそれらを結べば、各分割要素に共通の $\dot{\varepsilon} = 1.0$ %/min線を描くことが可能となる(図中の破線)。

このような操作を、種々の $\dot{\varepsilon}$ に対して実施した結果、図-12 のように $\varepsilon - \log p$ における等 $\dot{\varepsilon}$ 線群(isotaches)が得られた。この図-12 に基づけば、以下のような考察ができる。

- ・ 前述の図-2 に示した、 $p_v/p_{v0} = \dot{\varepsilon}/\dot{\varepsilon}_0$ 関係が求められる。
- ・ $p = \text{一定}$ としたクリープ時の $\varepsilon - \log \varepsilon$, $\varepsilon - \log t$ 曲線なども求められる。いわゆるクリープ曲線が 図-13 に示されている。

次に図-14は各isotaches上の $p(\dot{\varepsilon})$ を、それぞれの $\dot{\varepsilon}$ に対応する圧密降伏応力 $p_v(\dot{\varepsilon})$ で除したものである。結果はほぼ単一の曲線に重なっており、またその単一曲線

は、別途CRS試験から求めた曲線(図-3)の範囲内に入っていることも分かる。

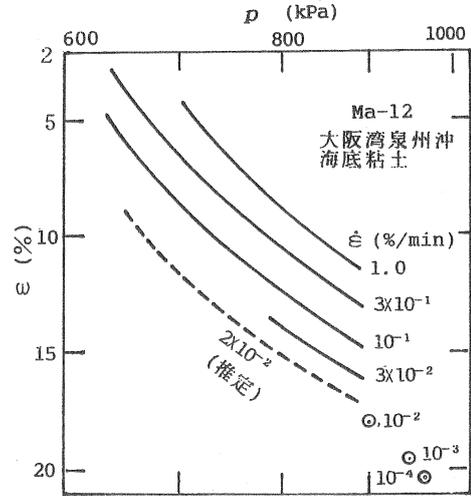


図-12 分割圧密における等ひずみ速度線

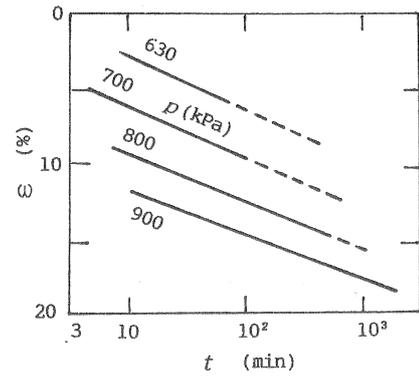


図-13 分割圧密から求めたクリープ曲線

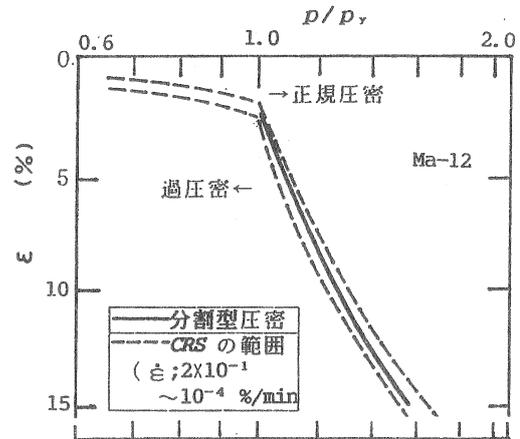


図-14 各種試験における応力-ひずみ曲線

以上は全体厚5cmに対する関係であった。紙数の都合で詳細は省略するが、これらの図は全体厚10cmの場合にもそのまま当てはまる、いわば共通の曲線群であることが認められた。

2.5 原位置での地盤挙動

関西国際空港第1期埋立てに際して、各層別の沈下量や間隙水圧の深さ分布などが継続して計測されている。これらにより、原位置地盤の $\varepsilon-p$ 関係を求めることが可能となってきた。

図-15はその例で、Ma-12を対象に関空1号槽での計測記録¹⁰⁾を基にして作成したものである。ただし標準圧密試験より求めた圧密降伏応力 p_y (標準圧密)に対して、経験則からCRS($\dot{\varepsilon}=10^{-2}\%/min$)の p_y を1.2倍とし、その形は先の図-3を利用して描いた。

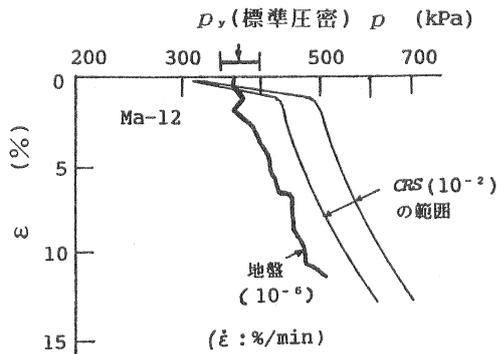


図-15 原地盤の応力-ひずみ関係

図-15によれば、Ma-12層の沈下速度は、埋立て当初から時間経過とともに減少の傾向にあるが、ひずみ速度は約 $10^{-6}\%/min$ で推移している。また原位置における地盤挙動($\varepsilon-p$ 関係)は、ひずみ速度がほぼ等速のライン上をたどって圧密沈下が進んでいると解釈できる。

3. 温度の影響

前章では粘土の荷重過程において、ひずみ速度を遅くすれば同じ応力に対してひずみ量が増えることをみた。一方従来の知見から、供試体の温度を高めると、ひずみ量はやはり大きくなるのが分かっている。つまり温度を変化させると、見かけ上はひずみ速度を変えたのと同じ効果をもつといえる。

3.1 圧密降伏応力

前章において、圧密降伏応力 p_y は、ひずみ速度 $\dot{\varepsilon}$ の影響を受けることを示した(図-2)。同様に p_y に与える温度 T の影響は、図-16のように描かれる。

この図はBoudaliらの報告¹⁴⁾に基づいて作成したものであり、規準温度を T_0 、対応する圧密降伏応力を p_{y0} とすれば

$$\log \frac{p_y(T)}{p_{y0}(T_0)} = -\beta(T - T_0) \quad (3-a)$$

が導かれる。ここに係数 β は直線の勾配で、平均的にみて $\beta = 4 \times 10^{-3} (\text{°C})^{-1}$ となる。

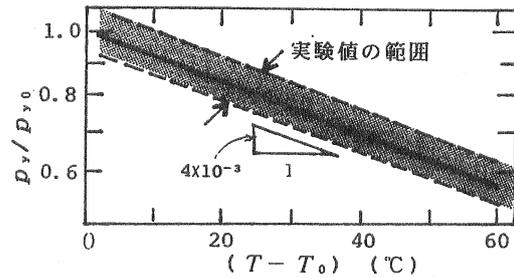


図-16 圧密降伏応力と温度(資料¹⁴⁾より作成)

3.2 温度効果の実験

室内で再構成した粘土試料を用いて、温度を30、45、および60 $^{\circ}\text{C}$ の3種類に変えたoedometer-試験を実施した。供試体作成時の圧密応力は $p_c = 20 \text{ kPa}$ である。

試験は①単一の定荷重を24時間載荷、

②24時間間隔で段階載荷、の2種類とした。

①の定荷重のレベルはそれぞれ78、118、196 kPaで、データの再現性をチェックするために、同一荷重レベルの同じ条件で3回の試験を行なった。

段階載荷試験から得た $\varepsilon-\log p$ 曲線の一部、および単一載荷試験の結果を図-17に示す。図中の段階載荷曲線より明らかなように、高温になるほど同じ p に対する ε は大きく、温度の異なる3本の曲線は互いにはほぼ平行になる。このことから、以下では前章で述べた圧密降伏応力 p_y の代わりに、同じ ε に対する p を用いて考察を進める。

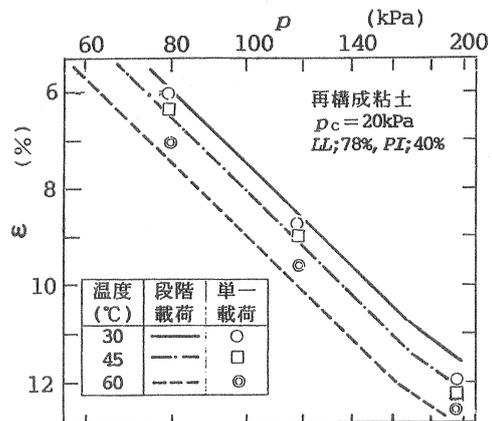


図-17 応力-ひずみ曲線と温度の影響

前述の式(3-a)において、 p_y を p と読み代えると、

$$\log \frac{p(T)}{p_0(T_0)} = -\beta'(T - T_0) \quad (3-b)$$

式(3-b)の係数 β' を求めるために、 $\varepsilon = 8\%$ (ただし6~10%の範囲内であればどの ε を取ってもよい)に対する p を選び、温度差($T - T_0$)の関係として図-18を得た。温度の組合せは図中に記入してあり、 $\beta' = 3.8 \times 10^{-3}$ の値は $\beta = 4 \times 10^{-3} (\text{°C})^{-1}$ に近似している。

以上は、段階荷重試験に対する考察である。図-17における単一荷重のプロット点も、若干のばらつきは避けられないものの、結果は比較的良好な傾向を示すといえよう。

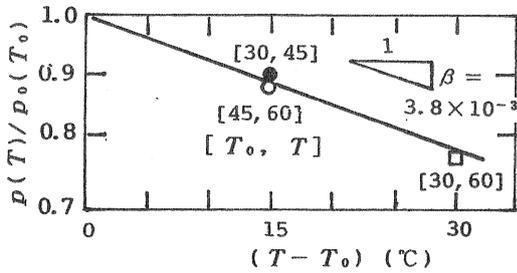


図-18 式(3-b)の根拠

4. 温度-時間換算則

4.1 ひずみ速度と温度の組合せ

一次元圧密における $p-\varepsilon$ 曲線は $\dot{\varepsilon}$ や T の影響を受けるが、両者の組み合わせ、すなわち $[\dot{\varepsilon} \rightarrow \text{小}; T \rightarrow \text{低}]$ と $[\dot{\varepsilon} \rightarrow \text{大}; T \rightarrow \text{高}]$ の選び方によっては、同じ $p-\varepsilon$ 曲線を得ることが可能である。具体例を示そう。

図-19 は $\dot{\varepsilon}$ と T の組合せを変えた CRS 試験の結果である¹⁴⁾。試験条件は T を $[5^\circ\text{C}$ と $35^\circ\text{C}]$ 、 $\dot{\varepsilon}$ を $[6.0 \times 10^{-2}$ と $9.6 \times 10^{-4} \text{ \%}/\text{min}]$ に選び、合計 4 種類の組合せで行なっている。図-19より分かることは、

(1) ひずみ速度と温度を変化させても、図の範囲では CRS 試験の応力-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 $p_v(\dot{\varepsilon}, T)$ で基準化した図-20をみれば明らかであり、図の曲線群は狭い範囲内に収まっている。

(2) 図-19によれば、 $[\text{ひずみ速度} \rightarrow \text{大}; \text{温度} \rightarrow \text{高}]$ と $[\text{ひずみ速度} \rightarrow \text{小}; \text{温度} \rightarrow \text{低}]$ の組合せによっては、応力-ひずみ曲線が一致するケースが存在する。すなわち図中の②③曲線のように、

- $[\dot{\varepsilon} = 6.0 \times 10^{-2} \text{ \%}/\text{min}; T = 35^\circ\text{C}]$ と
- $[\dot{\varepsilon} = 9.6 \times 10^{-4} \text{ \%}/\text{min}; T = 5^\circ\text{C}]$ との場合である。

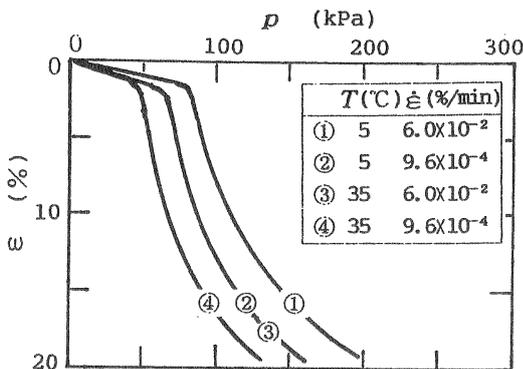


図-19 $\dot{\varepsilon}$ と T の組合せを変えた試験結果¹⁴⁾

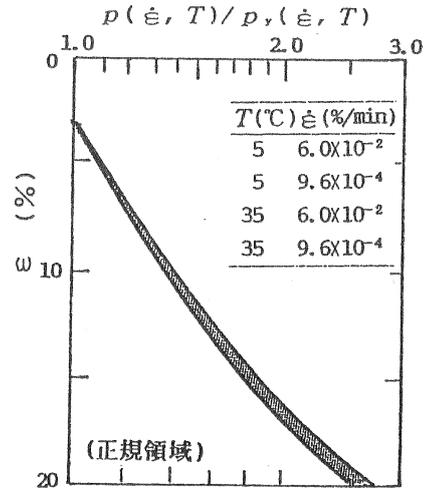


図-20 p を p_v で標準化した応力-ひずみ関係

4.2 $p_v = f(\dot{\varepsilon}, T)$ モデル

圧密降伏応力 p_v と $\dot{\varepsilon}$ および T の関係は、それぞれ式(2)および式(3-a)で表現できた。よって両式を組み合わせれば、 $p_v = f(\dot{\varepsilon}, T)$ モデルとして次式が導かれる。

$$\log \frac{p_v(\dot{\varepsilon}, T)}{p_{v0}(\dot{\varepsilon}_0, T_0)} = \alpha \cdot \log \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} - \beta(T - T_0) \quad (4)$$

式(4)を $\alpha = 6 \times 10^{-2}$ 、 $\beta = 4 \times 10^{-3}$ を用いて図示すると、図-21 のように表現される。

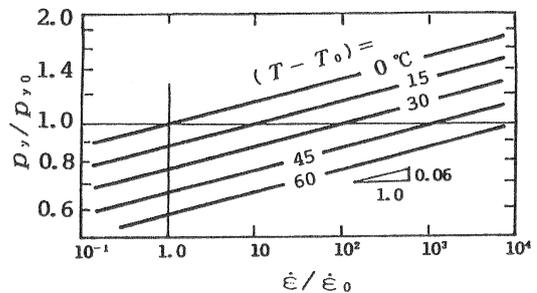


図-21 式(4)の図表示

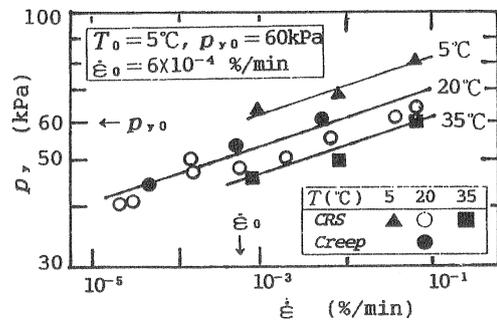


図-22 式(4)の検証例

かつてLeroueilは $\dot{\varepsilon}$ と T を種々に変えて、それらが p_v に及ぼす影響を調べた¹⁵⁾。そのデータを引用して式(4)の妥当性を検討した結果、図-22に示すようになった。

図-22の作成に当たっては、記載した $[T_0, p_{y0}, \dot{\epsilon}_0]$ の諸値を式(4)に代入して、 $p_y - \dot{\epsilon}_0 - T$ に関する3本の実線を得た。なお係数 α と β は前述の値を採っている。

図によれば、引用した実験値と式(4)との整合性は良好である。

4.3 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、 $[\dot{\epsilon}, T]$ の組合せによっては応力-ひずみ曲線が一致する場合のあることを、先の図-19においてみた。本文ではこれを等価な組合せと称することにした。

ここでCRS試験のときは、所定のひずみ ϵ を生じるまでの荷重時間 t は $t = \epsilon / \dot{\epsilon}$ となることに留意し、等価な組合せの条件を考えてみる。それには圧密降伏応力 $p_y(\dot{\epsilon}, T)$ と $p_{y0}(\dot{\epsilon}_0, T_0)$ が一致するとして、式(4)の $p_y(\dot{\epsilon}, T) / p_{y0}(\dot{\epsilon}_0, T_0) = 1$

とおけばよい。

さらにの温度 T と T_0 に対応するひずみ速度を $\dot{\epsilon}(T)$ 、 $\dot{\epsilon}_0(T_0)$ 、荷重時間を $t(T)$ 、 $t_0(T_0)$ とすれば、

$$\log \frac{\dot{\epsilon}(T)}{\dot{\epsilon}_0(T_0)} = \log \frac{t_0(T_0)}{t(T)} = \frac{\beta}{\alpha} (T - T_0) \quad (5)$$

となる。

上式が等価な応力-ひずみ曲線を得るために必要な $\dot{\epsilon}$ あるいは t と T の一般的な関係であり、換言すれば、温度-時間の換算則ともいえる。ただし、温度変化による粘土の物性変化が考慮に入っていない、という問題を今後の検討課題として残している。

図-23は温度差 $(T - T_0)$ が30℃までの範囲で、式(5)を表現したものである。鎖線直線の勾配を $\beta/\alpha = 1/15$ ($= 4 \times 10^{-3} / 6 \times 10^{-2}$)とすれば、温度差15℃に相当する時間比率 t_0/t は10倍の延長となる。

図中には実験結果^{14, 15)}が示されており、点は少ないものの、式と実験値の傾向は一致している。

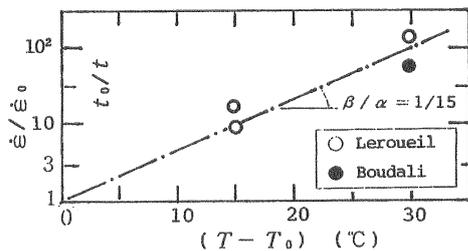


図-23 式(5)の検証

[例題]を以下に示す。

20℃の室温で、100日間の長期CRS試験を実施したと仮定する。1日の短期CRS試験で100日後の $\epsilon - p$ 曲線を推定するためには、短期の温度を何度に設定すればよいか。

[解答] 式(5)中に $t_0 = 100$ 日、 $T_0 = 20$ ℃、 $t = 1$ 日を代入して所定の温度 T を計算すると、 $T = 50$ ℃が求められる。つまり $(T - T_0) = 30$ ℃で $t_0/t = 100$ 。結果は

$[100日; 20℃]$ と $[1日; 50℃]$ が等価な[時間-温度]の組合せとなる。

なおCRS試験を実施するには、ひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ を設定する必要がある。求めようとするひずみ範囲を $\epsilon \leq 20\%$ に限定すれば、

$$\dot{\epsilon}_0 = 1.4 \times 10^{-4} \%/\text{min}, \quad \dot{\epsilon} = 1.4 \times 10^{-2} \%/\text{min}$$

となるから、

$[1.4 \times 10^{-4} \%/\text{min}; 20℃]$ と $[1.4 \times 10^{-2} \%/\text{min}; 50℃]$ が等価な $[\dot{\epsilon} - T]$ の組合せである。

5. むすび

鋭敏性の高い正規圧密粘土の一次元圧密において、圧縮特性に与えるひずみ速度と温度の影響を明らかにし、「温度-時間換算則」へのアプローチを試みた。

主な結論をまとめると、次のようである。

(1)有効応力一定のクリープ試験、およびCRS試験の結果より、有効応力-ひずみ-ひずみ速度の間には、ユニークな関係があり、式(1)すなわち

$$f(p, \epsilon, \dot{\epsilon}) = 0$$

が成立する。これはŠuklje(1954)のisotach説の実証に他ならない。

(2)分割型圧密試験において、分割各要素のひずみ/間隙水圧データを整理したところ、分割要素の厚さが異なる場合にも、上記(1)の結論の妥当性が検証された。

(3)関西国際空港島の造成工事においては、原位置で層別沈下量/間隙水圧が計測されており、それらのデータから、原地盤(Ma-12層)の応力-ひずみ曲線を描くことができる。このような実地盤の $p - \epsilon$ 曲線を持つ意味は、室内CRS試験結果と対比して、ひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ を考慮すれば解釈できることを示した。

(4)粘土供試体の温度 T を制御するCRS試験においては、幾種類もの $[\dot{\epsilon}; T]$ の組合せが考えられる。それらの中で、応力-ひずみ曲線が一致する $[\dot{\epsilon}; T]$ の組合せを本論文では「等価」と呼び、等価となるための条件、すなわち「温度-時間換算則」を求めた。今回対象とした「構造を有する」粘土の範囲では、温度差15℃は時間比にして10倍に相当することが導かれた。

例題として、常温下のCRS試験で100日後に得られるひずみを1日で求めようとするれば、温度を50℃に制御したCRS試験を行えばよいことを示した。

付記 本論文は、文献(16)(17)で報告した内容を、更に補足・整理したものである。

謝辞

本研究には、平成14・15年度文科省科学研究費(代表:筆者)の補助を受けた。研究分担者として、また卒業研究の学生指導に尽力された、福山大学工学部教授 西原晃 教授に深甚の謝意を表す次第である。

参考文献

- 1) Murayama, S. & T. Shibata: Rheological properties of clays, Proc. 5th ICSMFE, 1, pp. 269-273, 1961.
- 2) Murayama, S. & T. Shibata: Flow and stress relaxation of clays, Int. Sympo. Rheology & Soil Mecha. Grenoble, pp. 99-129, 1964.
- 3) Taylor, D. W. & W. Merchant: A theory of clay consolidation accounting for secondary compression, J. Math. Phys., 19, pp. 167-185, 1940.
- 4) Šuklje, L.: The analysis of the consolidation process of the isotaches method, Proc. 4th Int. Conf. S. M. F. E., 1, pp. 200-206, 1957.
- 5) 今井五郎: isotach則、土と基礎、Vol. 52, No. 2, pp. 51-52, 2004.
- 6) Crawford, C. B.: The resistance of soil structure to consolidation, Can. Geotech. J., 2, No. 2, pp. 90-97, 1965.
- 7) Leroueil, S. et al.: Stress-strain-strain rate relation for the compressibility of sensitive natural clays, Geotech., 35, No. 2, pp. 159-180, 1985.
- 8) Ohmukai, N. et al.: Estimation of the strain rate effect influenced to the consolidation characteristic of Osaka Bay Pleistocene clay, The Nakase Memorial Symposium, pp. 55-60, 2002.
- 9) 山本浩司ほか: 大阪湾海成粘土の圧密降伏応力付近の長期圧密特性、第35回地盤工学研究発表会、pp. 721-722, 2000.
- 10) 大阪湾地盤情報の研究協議会: バイエリアの地盤と建設、pp. 384-401, 2002.
- 11) Berre, T. & Iversen, K.: Oedometer tests with different specimen height on a clay exhibiting large secondary compression, Geotech., 22, No. 1, pp. 53-70, 1972.
- 12) 大向直樹ほか: 大阪湾洪積粘土の圧密挙動に関する一考察、第38回地盤工学研究発表会、pp. 267-268, 2003.
- 13) Kang, M. ほか: 分割型圧密試験による構造を有する洪積粘性土の圧密挙動、港湾技術研究所報告 40, 第2号、pp. 23-44, 2001.
- 14) Boudali, M. et al.: Viscous behavior of natural clays, Proc. 13th ICSMFE, 1, pp. 411-416, 1994.
- 15) Leroueil, S.: Compressibility of clays, Fundamental and practical aspects, J. Geotech, Eng., pp. 534-543, 1996.
- 16) 柴田徹: K_0 -圧密を受ける粘土の応力-ひずみ特性、福山大学工学部紀要、27巻、pp. 65-70, 2003.
- 17) 柴田徹: K_0 圧密を受ける粘土の「時間-温度換算則」への試み、第39回地盤工学研究発表会、1, pp. 207-208, 2004.

(2004年7月4日 受付)