

K_0 -圧密を受ける粘土の応力-ひずみ特性

柴田 徹*

Stress-Strain Characteristics of Clays under K_0 -consolidation

Toru SHIBATA*

ABSTRACT

The stress(p)-strain(ε) relationship of clays under K_0 -consolidation is influenced by numerous factors: strain rate($\dot{\varepsilon}$), temperature(T), disturbance, and stress path, etc. In this paper, $\dot{\varepsilon}$ and T are considered as the major factors, and their effects are studied. The first part of the paper, on the basis of the published data, $p-\varepsilon-\dot{\varepsilon}$ relationships are developed; the results are shown by the curved surface of Fig.8. In a second part, results of separated type consolidometer, carried out at the Port & Harbour Research Inst., are discussed. In this type of test, the soil layer is divided into five inter-connected subspecimens. At the same time, a study is made of the in-situ $p-\varepsilon$ curves measured at the construction site of the Kansai International Airport. Finally, the combined effect of $\dot{\varepsilon}$ and T has been quantified, and the yield stress p_y can be described as a function of $\dot{\varepsilon}$ and T , [Eq.(4)]. Moreover, it is shown that the $p-\varepsilon$ curves obtained at various $\dot{\varepsilon}$ and T coincide on the conditions of Eq.(5).

Key words: Stress-Strain, K_0 -consolidation, Clay, Strain-rate, Temperature.

キーワード: 応力-ひずみ、 K_0 -圧密、粘土、ひずみ速度、温度。

はじめに

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きた。たとえば有効応力 p 、ひずみ ε 、ひずみ速度 $\dot{\varepsilon}$ の間に

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

の関係が、初めて Taylor・Merchant [1] によって提案されている。

Taylorらは式(1)において、ひずみ ε の代わりに間隙比 e を用いているが、 K_0 -圧密を対象とする場合には、どちらを用いても同様の意味を持っている。

さらに、Suklje[2]は $e = \text{const}$ における $e-p$ 曲線を isotaches(等ひずみ速度曲線)と命名し、Crawford [3] は Constant Rate of Strain(CRS) 試験を提案した。

さらに Leroueil et al. [4] は上記の Suklje モデルの拡張を行なっている。

本論文の Part I では式(1)の検証を目的としているが、これは $p-\varepsilon-\dot{\varepsilon}$ の立体座標で形成される単一曲面の形状を求めることに帰着する。

Part II では、分割型圧密試験の結果に対して考察を加えている。この試験法は、粘土の圧密挙動に及ぼす試験体厚さの影響を調べるために考案されたもので、NGI の Berre・Iversen [5] を以て嚆矢とするようである。

日本ではオエドメータを直列に連結するタイプの分割型装置とその試験について、網干・松田 [6] あるいは今井ら [7] が報告している。最近では、(旧)運輸省港湾技研の M. Kang ら [8] や応用地質(株)の大向ら [9] 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。

Part III では、圧密挙動に及ぼす温度の影響を取り上げている。この課題について、筆者 [10] は以前に報告したが、今回は若干の修正を加えた結果をまとめた。

*建設環境工学科

Part I $p-\epsilon-\dot{\epsilon}$ の相互関係

上述の式(1)の成立を検証するためには、種々の方
法がある。たとえば

- 1) CRS試験、
- 2) $p=$ 一定のクリープ試験、および
- 3) $\dot{\epsilon}=$ 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
るか否かを調べる方法などが考えられる。

1.1 CRSとクリープ試験の比較

クリープ試験：載荷圧力を種々に変えた K_0 -長期圧
密試験の例が、図1に示されている[11]。試料は泉州
沖の海底地盤より採取されたMa-12である。供試体(8
個)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
したものである。

図において、正規圧密領域ではTerzaghi理論に従つ
て一次と二次圧密を区別できるが、過圧密領域ではそ
の判別が難しい。しかし過圧密の場合には、極めて短
時間に過剰隙間水圧が消散するので、載荷後数分以降
は有効応力一定とみてよい。

図1の二次圧密曲線を K_0 -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2が得られた。この粘土の降伏応力は $p_y =$
 530 kPa であるから、 $p > 549 \text{ kPa}$ における実線曲線が
正規圧密領域のクリープ挙動を表わしている。

CRS試験：図1と同種のMa-12粘土を用いて、 $\dot{\epsilon}$
を $2 \times 10^{-1} \text{ %/min} \sim 2 \times 10^{-4} \text{ %/min}$ の範囲で4種類に変え
たCRS試験結果が、文献[11]に報告されている。

図3は、上記のクリープとCRSのそれぞれの試験
から得た $\epsilon - \log p$ のロットである。すなわち両試験

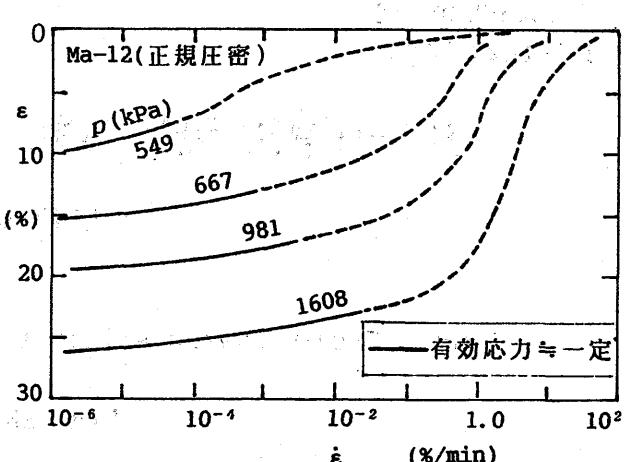


図2 長期圧密試験によるひずみーひずみ速度の関係

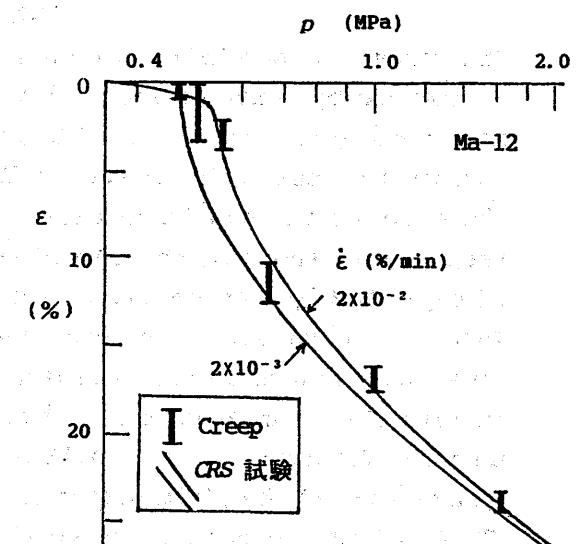


図3 応力ーひずみ曲線(クリープとCRS試験)

とも $\dot{\epsilon}$ を $2 \times 10^{-2} \sim 2 \times 10^{-3} \text{ %/min}$ の範囲に限定して、
クリープの場合には図2を利用して、 p に対する $\dot{\epsilon}$ の
値を求めたものである。

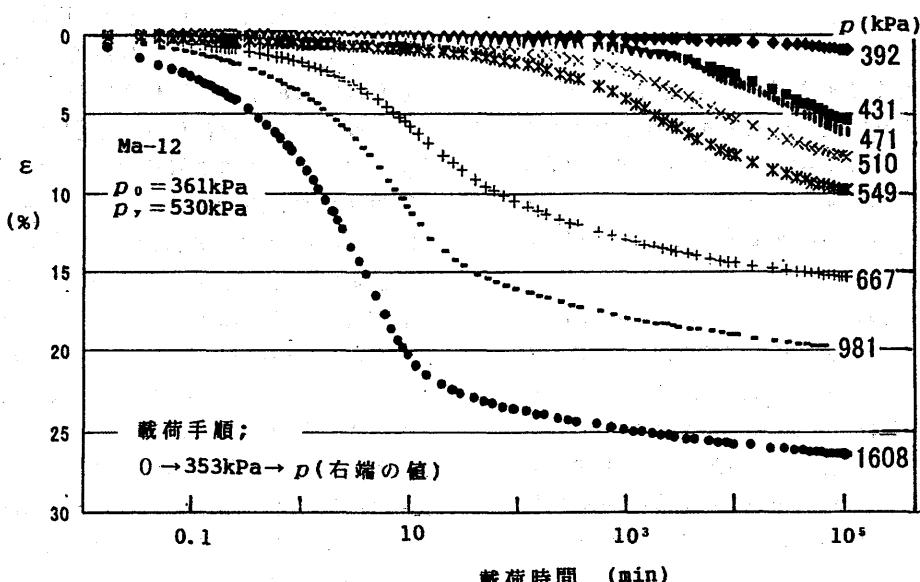


図1 長期圧密(クリープ)試験結果[11]

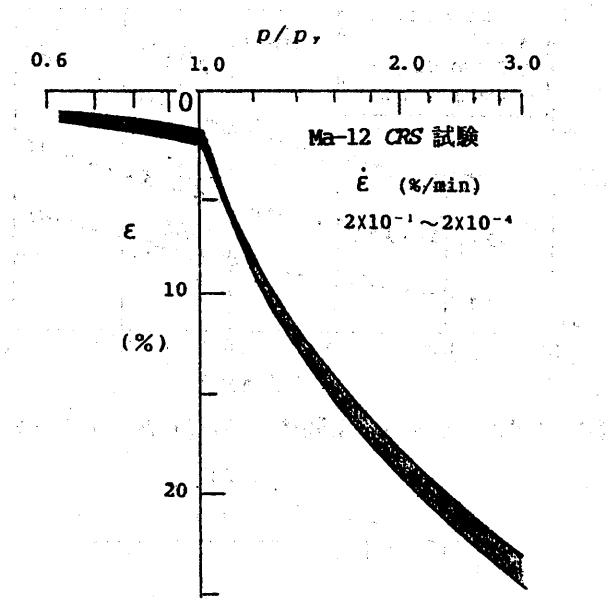


図7 規準化応力ーひずみ関係

1.4 曲面の形

Part I の「まとめ」として、 $\log p - \varepsilon - \log \dot{\varepsilon}$ 座標上での曲面を図8のように描いた。これは正規圧密領域を対象にした曲面形の模式図であり、ちょうど盾を傾けたような曲面を形成することになる。

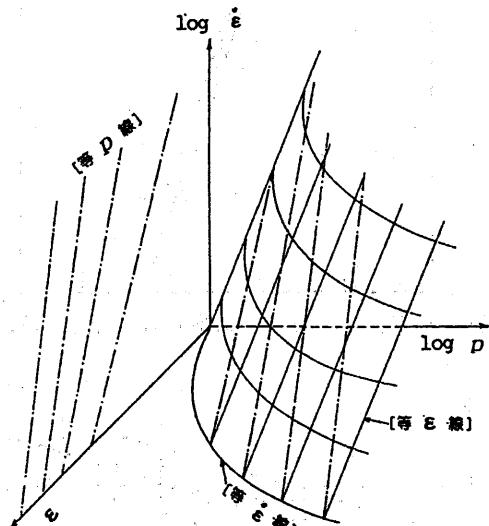


図8 $f(p, \varepsilon, \dot{\varepsilon}) = 0$ 曲面

Part II 分割圧密試験結果の考察

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[9]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。

2.1 等ひずみ速度線

図9、10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。

いま図9を利用して、破線で示すようにひずみ速度 $\dot{\varepsilon} = 1.0\%/\text{min}$ に対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[等 $\dot{\varepsilon}$ 発生時の ε]を、図10における $\varepsilon - \log p$ 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 $\dot{\varepsilon} = 1.0\%/\text{min}$ 線を描くことが可能となる(図中の破線)。

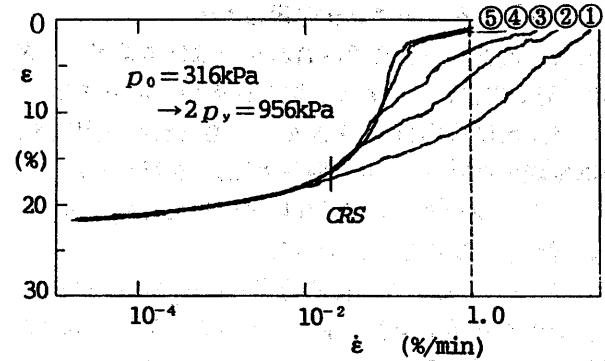


図9 分割要素のひずみーひずみ速度関係[9]

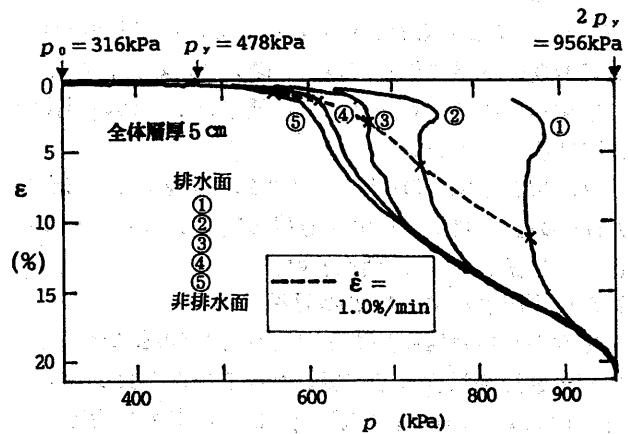


図10 分割要素の応力ーひずみ曲線

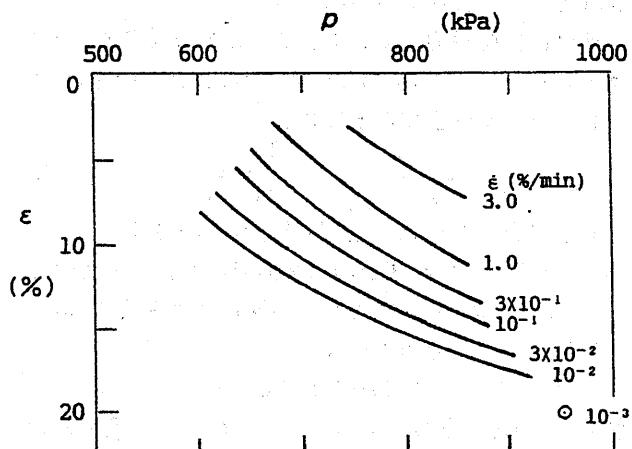


図11 応力ーひずみ関係における等ひずみ速度線群

図3によれば、クリープとCRS試験では、載荷履歴などが異なるにも関わらず、同一の $\varepsilon - \log p$ 関係が得られるとみてよい。ここでMa-12粘土については、図1以外にも多種多様の試験結果が報告されている。

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、 $\dot{\varepsilon}$ 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 $\varepsilon - \log \dot{\varepsilon}$ 関係としてまとめる、図4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、図3で述べたのと同様の結論が得られることが分かる。

1.2 CRSとクリープ試験の組合せ

CRSとクリープを組み合わせた試験結果が、文献[12, 13]に報告されている。図5はその一例である。これは圧密降伏応力 p_y を挟んで、過圧密と正規圧密の両領域でクリープ(=長期圧密)試験を行なったのち、 $\dot{\varepsilon} = 0.01\%/\text{min}$ のCRS試験に移行したものである。この図から、次のことが分かる。

- 1)クリープ中には $\dot{\varepsilon}$ が経過時間とともに減少するので、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 $\dot{\varepsilon}$ 線を書くことが可能である(ただし等 $\dot{\varepsilon}$ 線は $2 \times 10^{-4}/\text{min}$ の場合のみを破線で示した)
- 2)クリープ後のCRSにおける $\dot{\varepsilon}$ は、いずれも同じ標準速度の状態に戻している。図5によれば、クリープ履歴が異なるにも関わらず4種類の $\varepsilon - \log p$ 曲線はほぼ重なっている。

なお図5はMa-10粘土に対する結果であるが、Ma-7とMa-3の両試料についても類似の結果が得られていることを付記しておく(図は省略)。

1.3 圧密降伏応力とひずみ速度

従来から圧密降伏応力 p_y は土に固有の値でなく、ひずみ速度や温度などで変わり得ることが分かっている。Leroueil[4]によれば、 p_y は $\dot{\varepsilon}$ の影響を受けて一義的には決まらず、 $\dot{\varepsilon}$ が速くなると p_y も大きく測定されるという特性が示されている。

筆者は前報[10]において、あるひずみ速度 $\dot{\varepsilon}_0$ を標準としたとき、その $\dot{\varepsilon}_0$ に対する p_y を $p_{y0}(\dot{\varepsilon}_0)$ と表わし、次式が成立するとした。

$$\log \frac{p_y}{p_{y0}(\dot{\varepsilon}_0)} = \frac{3}{50} \log \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \quad (2)$$

図6は泉州沖海底粘土(Ma-12, 11, 10)について、 p_y に与える $\dot{\varepsilon}$ の影響を調べた例である。この場合は $\dot{\varepsilon}_0 = 10^{-2}/\text{min}$ としており、実測値は近似的に式(2)の実線で代表できるといえよう。

次に p_y が $\dot{\varepsilon}$ の影響を受けて変化するとして、その際に $\varepsilon - \log p$ 曲線の形状について調べた。そのため $\varepsilon - \log p$ 曲線において、等ひずみ速度線上の $p(\dot{\varepsilon})$ を $p_0(\dot{\varepsilon})$ で規準化し、 $\varepsilon - \log [p(\dot{\varepsilon})/p_0(\dot{\varepsilon})]$ 関係

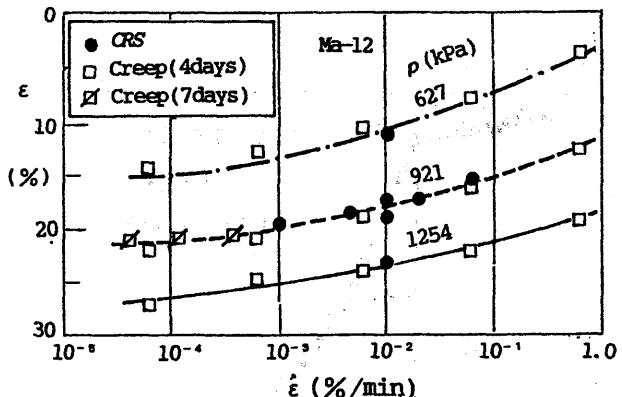


図4 ひずみーひずみ速度関係(各種CRSとクリープ)

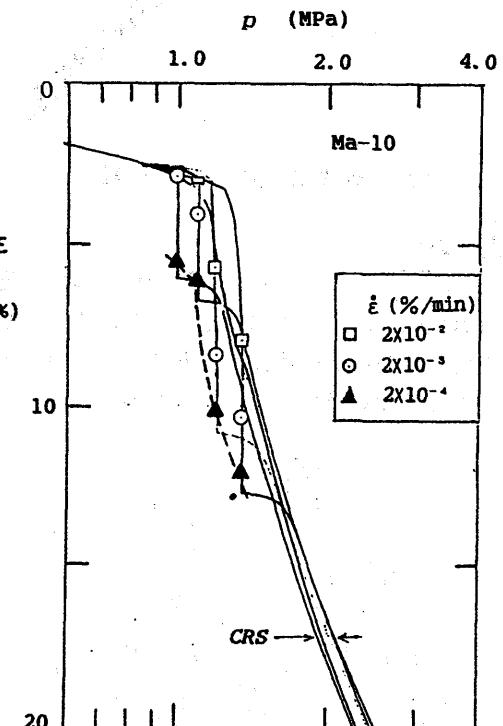


図5 CRSとクリープ試験の組合せ[12, 13]

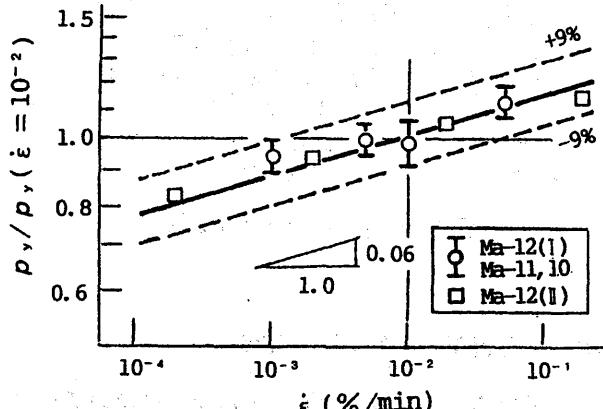


図6 圧密降伏応力ーひずみ速度の関係

として図7に描いている。

この場合の $\dot{\varepsilon}$ は $2 \times 10^{-1} \sim 2 \times 10^{-4}/\text{min}$ であるが、比較的狭い範囲に重なる、すなわち $\dot{\varepsilon}$ の値に関わらず同じ曲線形を持つといえる。

上述の操作を種々のひずみ速度に対して実施した結果、図11のように $\varepsilon-p$ における等ひずみ線群が得られる。またこれより、 $p=一定$ としたクリープ時の $\varepsilon-\log \dot{\varepsilon}$ 曲線も求められる(図12)。

なお図11、12は全体厚5cmに対する関係であったが、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。

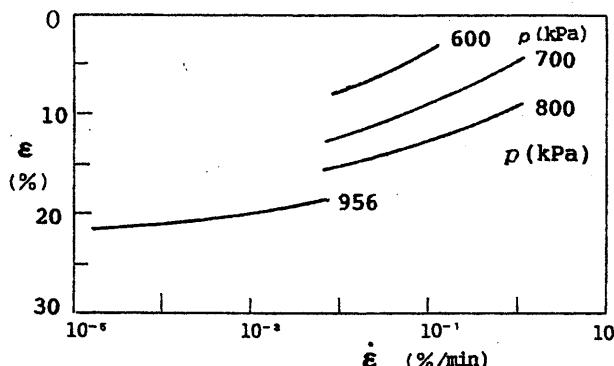


図12 ひずみーひずみ速度の関係

2.2 全体層としての挙動

要素に分割しない全体層としての挙動を、各要素ごとに測定された間隙水圧やひずみから、平均値として表現してみる。

図13は、全体層厚5cmと10cmに対する $\varepsilon-p$ 曲線である。この場合、圧密が進行して有効応力 p が増加する段階において、ひずみ速度は一定とならずおよそ $1.0 \sim 10^{-5} \text{ %/min}$ の範囲で次第に減少する。

図13では、正規圧密領域の曲線を描いており、全体層厚の $\varepsilon-p$ 曲線が分割要素の等ひずみ線を切りながら、100%圧密時の終局値 $p=956 \text{ kPa}$ に近づいていく様子を見ることができる。つまり仮に複数の全体層厚について $\varepsilon-p$ 曲線を追跡して等ひずみ線を描いたとすれば、それらは、分割要素から求めた等ひずみ線と一致することになる。

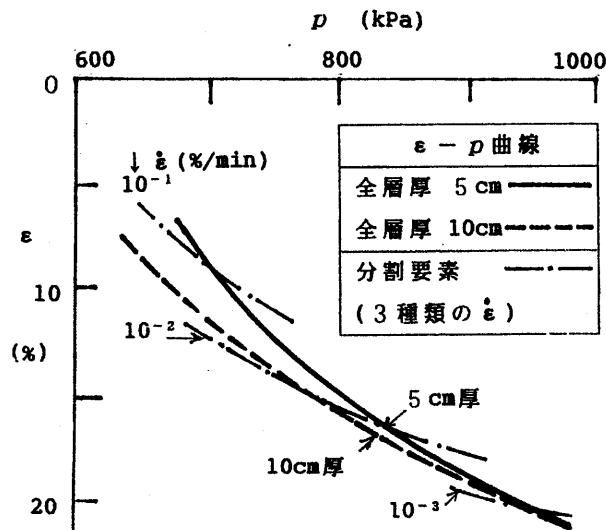


図13 全体層厚に対する応力ーひずみ関係

なお全体層厚が大きいほど、 $\varepsilon-p$ 曲線は左方に移行する傾向をもつ。それは同じひずみ ε あるいは有効応力 p に到達したとき、層厚が大きいほどひずみ速度 $\dot{\varepsilon}$ は小さいのと、等ひずみ線群の形の特徴をみれば理解される。

2.3 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る。

図14はその例でMa-12を対象に、関空1号槽での計測記録[13]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 $p_v(\text{STD})$ に対して、経験則から、CRS($\dot{\varepsilon}=10^{-2} \text{ %/min}$)の p_v を1.2倍とし、その形は先の図7を利用して描いた。

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、ひずみ速度にして約 10^{-6} %/min で推移している。

図14によれば、原位置における地盤挙動($\varepsilon-p$)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。

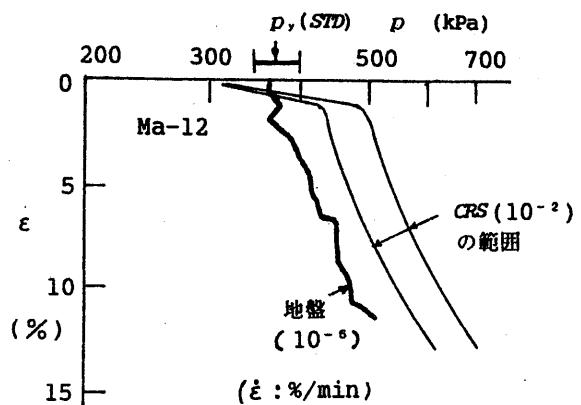


図14 原地盤の応力ーひずみ関係(原図[13])

Part III 温度-時間の換算則

粘土供試体の温度を高めると、同じ圧力に対してひずみ量が大きくなることが、従来の知見から分かっている。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 圧密降伏応力と温度の関係

先の式(1)において、圧密降伏応力 p_v はひずみ速度 $\dot{\varepsilon}$ の影響を受けることを示した。同様に、 p_v に与える温度 T の影響は、文献[14]を参照すれば、次式が近似的に成立する。

$$\log \frac{p_v}{p_{v0}(T_0)} = \frac{1}{250} (T_0 - T) \quad (3)$$

ここに T_0 は規準温度である。

3.2 $p_v = f(\dot{\epsilon}, T)$ モデル

圧密降伏応力 p_v と $\dot{\epsilon}$ および T の関係は、上記の式(2)と式(3)を組み合わせることにより、

$p_v = f(\dot{\epsilon}, T)$ モデルとして、次式が導かれる。

$$\log \frac{p_v}{p_{v0}(\dot{\epsilon}_0, T_0)} = \frac{1}{50} [3 \cdot \log \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} - \frac{1}{5} (T - T_0)] \quad (4)$$

3.3 等価な $[\dot{\epsilon}, T]$ の組合せ

K_0 圧密における $p - \epsilon$ 曲線は載荷時間 t や温度 T の影響を受けるが、両者の組み合わせ、すなわち[低温; 長時間載荷]と[高温; 短時間載荷]の選び方によつては、同じ $p - \epsilon$ 曲線を得ることが可能である。

CRSでは、所定のひずみ ϵ を生じるまでの載荷時間 t は $t = \epsilon / \dot{\epsilon}$ であるから、上記の[載荷時間の長短]は $\dot{\epsilon}$ の小大と同義である。つまり同じ応力-ひずみ関係が得られる場合を、等価な $[\dot{\epsilon}, T]$ の組合せと称することにした [10]。

等価な条件は、両者の p_v が一致するとして、式(4)において $p_v / p_{v0} = 1$ とおけばよい。さらに2種類の温度 T と T_0 を考え、 T と T_0 におけるひずみ速度を $\dot{\epsilon}(T)$, $\dot{\epsilon}_0(T_0)$, 載荷時間を $t(T)$, $t_0(T_0)$ とすれば、

$$\log \frac{\dot{\epsilon}(T)}{\dot{\epsilon}_0(T)} = \log \frac{t_0(T_0)}{t(T)} = \frac{1}{15} (T - T_0) \quad (5)$$

となり、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る。

むすび

主な結論をまとめると、次のようにある。

(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。換言すれば、圧密挙動の軌跡は、 $p - \epsilon - \dot{\epsilon}$ を座標とする曲面(図 8)上を動く。

(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) 原位置で測定された層別沈下/間隙水圧の記録と、室内 CRS 試験結果とを対比することにより、原地盤(Ma-12層)の $p - \epsilon$ 曲線が持つ意味は、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。

付記

本研究は、平成14・15年度文部省科学研究費(代表:筆者)の補助を受けた。

参考文献

- [1] Taylor, D. W. & W. Merchant : A theory of clay consolidation accounting for secondary compression, J. Math. Phys., 19, pp. 167-185, (1940).
- [2] Suklje, L. : The analysis of the consolidation process of the isotache method, Proc. 4th Int. Conf. Soil Mech. Fnd Engng, 1, pp. 200-206, (1957).
- [3] Crawford, C. B. : The resistance of soil structure to consolidation, Can. Geotech. J., 2, No. 2, pp. 90-97, (1965).
- [4] Leroueil, S. et al. : Stress-strain-strain rate relation for the compressibility of sensitive natural clays, Geotechnique, 35, No. 2, pp. 159-180, (1985).
- [5] Berre, T. & Iversen, K. : Oedometer tests with different specimen heights on a clay exhibiting large secondary compression, Geotechnique, 22, No. 1, pp. 53-70, (1972).
- [6] 網干寿夫、松田博 : 分割型一次元圧密試験による粘土の圧密特性について、第33回土木学会年次講演会、pp. 97-98, (1978).
- [7] 今井五郎ほか : 分割型圧密試験装置を用いた均質粘土の一次元圧密特性、第21回土質工学研究発表会、pp. 191-194, (1986).
- [8] 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).
- [9] 大向直樹ほか : 大阪湾洪積粘土の圧密挙動に関する考察、第38回地盤工学研究発表会、pp. 267-268, (2003).
- [10] 柴田徹 : 粘土の圧密挙動に及ぼすひずみ速度/温度の影響、福山大学工学部紀要、第24巻、pp. 37-40, (2000).
- [11] 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).
- [12] 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).
- [13] 大阪湾地盤情報の研究協議会 : ベイエリアの地盤と建設、pp. 384-401, (2002).
- [14] Boudali, M. et al. : Viscous behavior of natural clays, Proc. 13th ICSMFE, 1, pp. 411-416, (1994).