

# 粘土の一次元圧密特性に及ぼす載荷時間間隔の影響

白子博明<sup>\*1</sup>・杉山太宏<sup>\*2</sup>・赤石勝<sup>\*3</sup>

## Influences of the Duration of Incremental Pressure on One-dimensional Consolidation Characteristics of Clays

by

Hiroaki SHIRAKO, Motohiro SUGIYAMA, and Masaru AKAISHI

(Received on Mar.29,2002, accepted on Jul.10,2002)

### Abstract

Three series of one-dimensional consolidation tests on four remoulded clays and three undisturbed clays were performed to investigate the influence of the duration of incremental pressure of up to 40 days on the characteristics of consolidation of clays. The  $e-\log(p)$  curves of the remolded clays almost matched, irrespective of the incremental duration of pressure, and consolidation was equal. However, the  $e-\log(p)$  curves of some undisturbed clays did not match, but changes in the duration of incremental pressure did not indicate significant variations in the coefficients of secondary consolidation. Experimental results and calculated values show that the equal consolidation can be explained by the increases in the volume of primary consolidation.

**Keywords:** 1D consolidation, incremental duration of pressure, primary consolidation, coefficient of secondary consolidation

### 1. まえがき

標準圧密試験は、土質試験の中で最も試験期間を要する力学試験で、試験期間を短縮するために載荷時間間隔を短くしたり排水距離を小さくするなどの方法が検討され、その影響が調べられている<sup>1)</sup>。また、定ひずみ速度載荷による圧密試験もJIS制定されているが、この報告では検討対象外とする。実際地盤の圧密は、定ひずみ速度で発生しないからである。**Fig.1**は載荷時間を変えて行われた  $e-\log(p)$  曲線の一例である<sup>2)</sup>。各曲線は互いにほぼ平行で、載荷時間の短いものほど間隙比は右上にずれて圧密降伏圧力  $p_c$  が増加するとされている。また、載荷時間の短縮に加え排水距離を減らせば、 $e-\log(p)$  曲線は標準圧密試験とほぼ一致するとされており<sup>3)</sup>、土と圧密リングとの周面摩擦力や二次圧密量の出方の違いがその要因とされている<sup>2),3)</sup>。

吉国らは<sup>4)</sup>、 $p=39.2\text{kN/m}^2$  から  $p=313.6\text{kN/m}^2$  ( $\Delta p/p=1$ )まで載荷時間間隔を 15 分、60 分、120 分、1 日、7 日と変化させて、最終荷重段階では長期間放置する一次元圧密試験を行っている。その結果、各載荷段階の間隙比の減少量は、載荷時間によってやや異なるが、約 1 ヶ月経過後は一致することを示している。また、Crawford<sup>5)</sup>や村上<sup>6)</sup>は、各載荷段階毎の全圧密量は載荷時間に依存しないという結果を示している。この結果によれば、標準圧密試験の全試験期間を例えば 1 日に短縮した結果を利用しても、圧密沈下量の予測には影響がないことになる。

以上のように、載荷時間間隔を短縮した場合の一次元圧密量に関しては、相反する結果が得られており、その要因は明らかでない。今井は二次圧密の観点から、吉国らの試験結果に基づいて、ある圧密段階で十分にクリープ圧縮が生じないうちに次の荷重が加わると、前荷重の下で積残したクリープ圧縮量が、新荷重の一次圧密過程中に生じると説明している<sup>7)</sup>。しかし、一次圧密量と二次圧密量（クリープ圧縮量）は分離して測定できないので、一次圧密中から発生する二次圧密量<sup>7),8)</sup>は変化するのか、するとすればどの程度かなど、不明な点は多い。

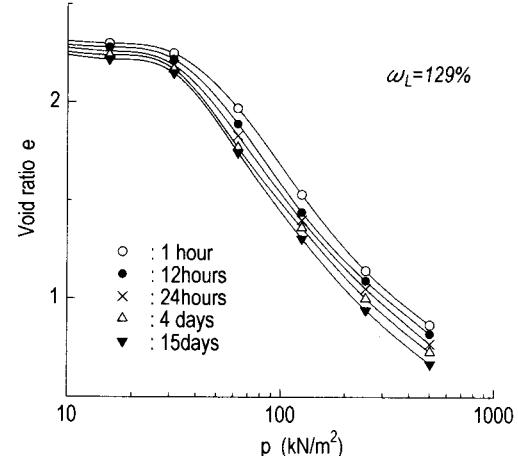


Fig.1 Relation between void ratio and consolidation pressure due to incremental duration of pressure<sup>2)</sup>

\*1 建設企画コンサルタント土質技術部部長

\*2 東海大学工学部土木工学科助教授

\*3 工学部土木工学科教授

この論文は、4種類の再構成粘土と3種類の不搅乱粘土を用いて、載荷時間間隔を変化させた一次元圧密試験を行い、載荷時間間隔の違いが圧密量、圧密係数ならびに二次圧密係数に及ぼす影響を調べている。また、実験結果と二次圧密を含む一次元圧密試験の再現計算<sup>9),10)</sup>から、載荷時間間隔の増減による…次、二次圧密量の変化について検討している。

**Table1** Physical properties of clayey soils

Sample	$\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\omega_L$ (%)	$\omega_p$ (%)	Grading (%)		
				Clay	Silt	Sand
A	2.739	69.3	31.3	6	79	15
B	2.641	65.4	35.8	15	49	36
C	2.571	67.6	46.2	40	38	22
D	2.638	67.0	36.0	11	55	34
E	2.653	100.3	51.2	35	50	15
F	2.595	70.5	34.9	45	45	10
G	2.665	85.2	45.8	12	48	40

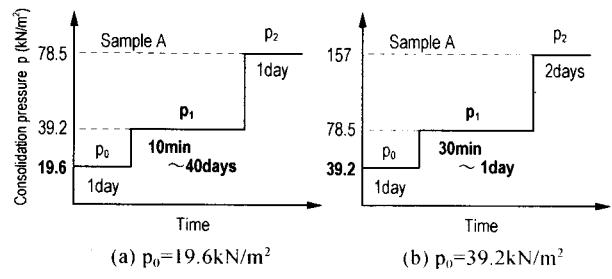


Fig.2 Consolidation period for Test A.

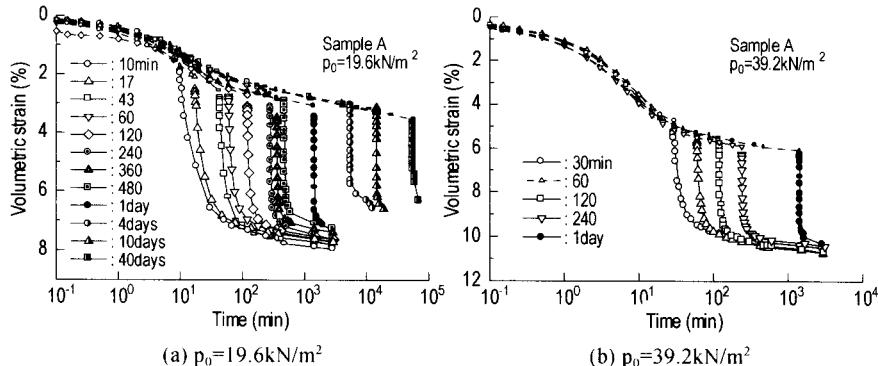


Fig.3 Consolidation time curves due to differences in incremental duration of pressure obtained from Test A.

## 2. 試料および実験方法

試料は、液性限界の1.5倍の含水比で練り返し再構成した4種類の粘性土（試料A, B, C, D）と3種類の不搅乱粘性土（試料E, F, G）で、物理的性質を**Table1**に示した。

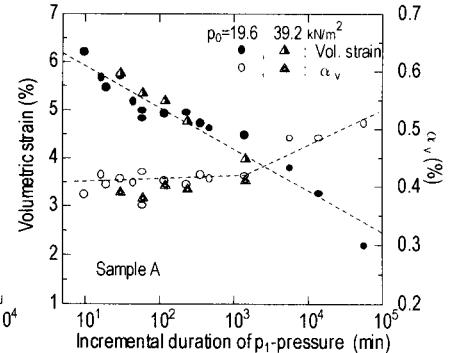
標準圧密試験機を用い、載荷時間間隔が圧密量、二次圧密係数（ $\alpha_v = dV/\log(\Delta t)$ :体積ひずみで定義）ならびに圧密諸定数に及ぼす影響を調べた。

実験A：試料Aを予圧密荷重 $p_0=19.6\text{kN/m}^2$ ならびに $39.2\text{kN/m}^2$ で1日間予圧密後、供試体高さが2cmになるよう上端をカットして、更に $p_0$ で1日間予圧密した。**Fig.2**のように荷重 $p_1$ を10分から40日間載荷した後、荷重 $p_2$ を載荷して圧密量を測定した。この実験では、荷重 $p_2$ を載荷する前の圧密時間が全圧密量と二次圧密係数 $\alpha_v$ に及ぼす影響を調べた。

実験B：実験Aと同じように試料B,C,Dを $p_0$ （9.8, 19.6あるいは $78.5\text{kN/m}^2$ ）で予圧密し、載荷時間間隔 $t_d$ を変化させて $p=p_1+1255.7\text{kN/m}^2$ まで段階的に圧密した（荷重増分比 $\Delta p/p=1$ ）。試料Dの載荷時間間隔 $t_d$ は、標準圧密試験の1日、一次圧密終了時（EOP: End of Primary）、1日とEOPの間の35分～300分ならびに10日である。試料B,Cの $t_d$ は、30分～1日とした。

実験C：不搅乱試料E,F,Gを載荷時間間隔1日、EOP、10日として $p=49.1\text{kN/m}^2$ から圧密した（ $\Delta p/p=1$ ）。また、EOP載荷では二次圧密係数 $\alpha_v$ を求められないので、最終荷重段階に至るまでの全荷重段階（ $p=39.2\sim 1255.7\text{kN/m}^2$ ）で2日間経時変化を測定する圧密試験も行った。

実験BとCのEOPに達する時間 $t_{EOP}$ は、便宜的に $\sqrt{t}$ 法により計算した。供試体の排水条件はすべて上下両面排水である。

Fig.4 Relationships between vol. strain,  $\alpha_v$ , and incremental duration of  $p_1$ -pressure ( $p_0=19.6\text{kN/m}^2$ ).

## 3. 実験結果と考察

### 3.1 圧密前載荷期間の影響（実験A）

2種類の荷重で予圧密した後、荷重 $p_1$ の載荷期間を変えて得られた $p_1$ と $p_2$ による体積ひずみ～時間関係が**Fig.3(a),(b)**である。 $p_1$ によるひずみ量（ $10^1\text{min}$ から始まる図中の小さい記号）は、各試料の初期状態が同じなので、ほぼ同一線上をたどっている。 $p_1$ の載荷期間が1日よりも長い4日以上の場合（**Fig.3(a)**）、 $p_2$ による1日後のひずみ量と、 $p_1$ と $p_2$ による全ひずみ量は極端に減少している。このような傾向は、吉國らの実験でも観察されており、時間効果によって化学的な結合力が作用したと説明されている<sup>4)</sup>。一方、 $p_1$ の載荷期間が480分までの全ひずみ量は、1日載荷よりもやや大きいが同程度であり、1日以下の載荷期間では、全圧密量に及ぼす載荷期間の影響は少ない。

荷重 $p_2$ によって生じた体積ひずみ量と二次圧密係数 $\alpha_v$ を、 $p_1$ の載荷期間（対数軸）に対してプロットしたのが**Fig.4**である。二次圧密係数は、基準時間の取り方によって異なるので<sup>5)</sup>、各試験の $p_2$ 載荷時を時間原点（体積ひずみゼロ）に取り直して求めたものである。体積ひずみ量は、載荷期間の増加に比例して一様に減少し、10分載荷と40日載荷では4%もの差が生じている。これに対して二次圧密係数は、 $p_1$ の載荷期間1日を境にその大きさが変化する。すなわち、載荷時間が1日以下の二次圧密係数はわずかに増加するのに対して、1日よりも長い3つのデータはいずれも大きく増加している。

一般に、粘土は、時間効果によって疑似過圧密状態になることが知られており、正規圧密粘土よりも圧密量は減少する。また、時間効果は二次圧密を受けた期間で議論されるため、一次圧密が1時間程度で終了する標準圧密試験（1日載荷）にも時間効果があると言える。圧密前 $p_1$ の載荷期間が時間効果を表すとすれば、**Fig.4**の体積ひずみの減少は、時間効果（疑似過圧密）

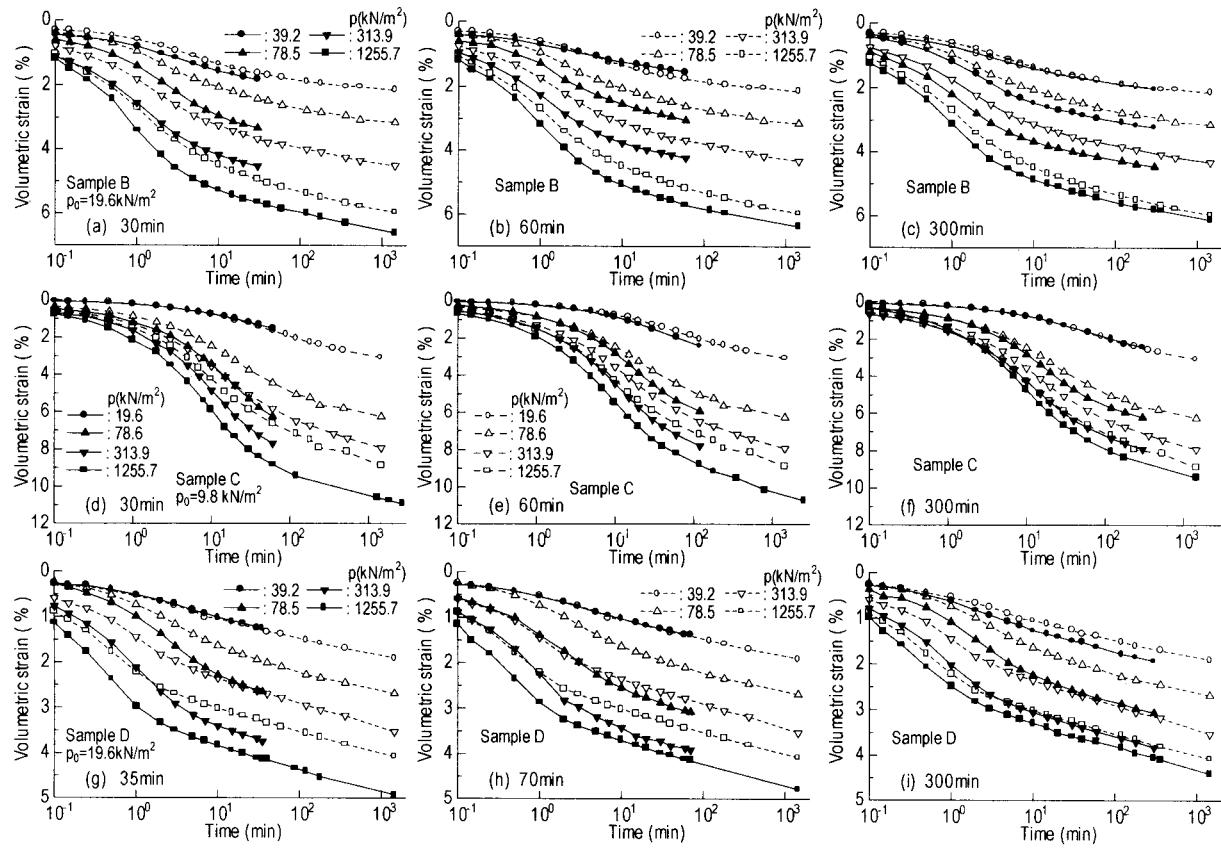


Fig.5 Comparison of strain-time curves (Test B).

がその一要因と考えられる。一方、載荷期間1日を境に二次圧密係数が大きくなるのは、注目される点である。時間効果が二次圧密量に影響するか否かについては、さらに調べる必要があるが、本実験結果を見る限り、載荷期間1日以下の二次圧密係数は、時間効果の影響を受けないパラメーターと言うことができる。

### 3.2 再構成粘土の実験結果（実験B）

#### (1) 体積ひずみ-時間曲線

Fig.5(a)～(i)は、標準圧密試験の1日載荷と載荷時間間隔  $t_d$  の短い体積ひずみ-時間関係を、試料ごとにまとめて比較したものである。図の白記号が1日載荷、黒記号が  $t_d$  の短い結果である。図の左から30(35)分、60(70)分、300分の順に示している。各試料の予圧密期間は全て共通のため当然であるが、予圧密直後の荷重による各  $t_d$  までの沈下曲線(●記号)は、1日載荷と重なっている。しかし、それ以降、 $t_d$  の短い全ての沈下曲線は、圧密圧力によらず1日載荷よりも下方に位置し、 $t_d$  時間後のひずみ量は1日載荷(白記号)1日後のひずみ量と等しいかやや大きい。また、試料B,Dのひずみは、約10分以後で時間の対数に比例し、その傾き(二次圧密係数  $\alpha_s$ )は1日載荷に近い。

Fig.6は、試料DのEOP、1日、10日間隔載荷で得られた最終荷重段階  $p=1255.7\text{kN/m}^2$  の体積ひずみ-時間関係である。図から明らかのように、EOP、1日、10日の順で圧密量は大きくなり、EOP載荷では一次圧密が終了する10分程度までの圧密量が1日載荷の約1.5倍となっている。それ以降は時間の対数に比例して、3者の沈下曲線はほぼ平行である。

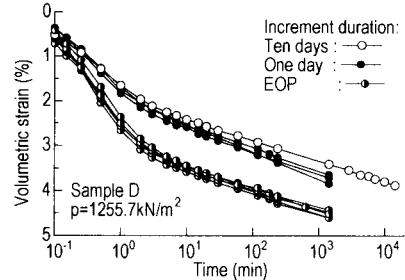


Fig.6 Comparison of strain-time curves for sample D.

#### (2) $e \sim \log(p)$ 曲線と圧密定数

Fig.7(a)～(c)とFig.8(a)～(c)は、載荷時間間隔を変化させた試料Aの  $e \sim \log(p)$  曲線ならびに体積圧縮係数  $m_v (=d_e / dp)$  と平均圧密圧力  $\bar{p}$  の関係である。試験では初期隙間比  $e_0$  が等しくなるよう注意を払ったが、各試料の  $e_0$  には多少のばらつきが生じた。このため各曲線を単純に比較することは難しいが、Fig.1のように  $t_d$  の減少が  $e \sim \log(p)$  曲線を右上方に移動させることはなく、 $t_d$  による顕著な曲線の違いは見出せない。予圧密期間を等しくしたこと、あるいは  $e_0$  の違いから、予圧密直後の  $m_v$  は  $t_d$  が短いものほど小さくなる傾向を示す。しかしそれ以降は、Fig.5の結果を反映してほぼ等しくなることがわかる。

3種類の再構成粘土を利用した今回の圧密試験では、載荷時間間隔  $t_d$  による圧縮性  $m_v$  や  $e \sim \log(p)$  曲線への影響は、極めて少ないものとなった。

Fig.9(a)～(c)は圧密係数  $c_v$  平均圧密圧力  $\bar{p}$  の関係である。  $c_v$  には、 $t_d$  による明確な違いや傾向が見られず、 $c_v$  は比較的ばらつきの大きな力学量であることを考えれば、実用上  $c_v$  は  $t_d$  に影

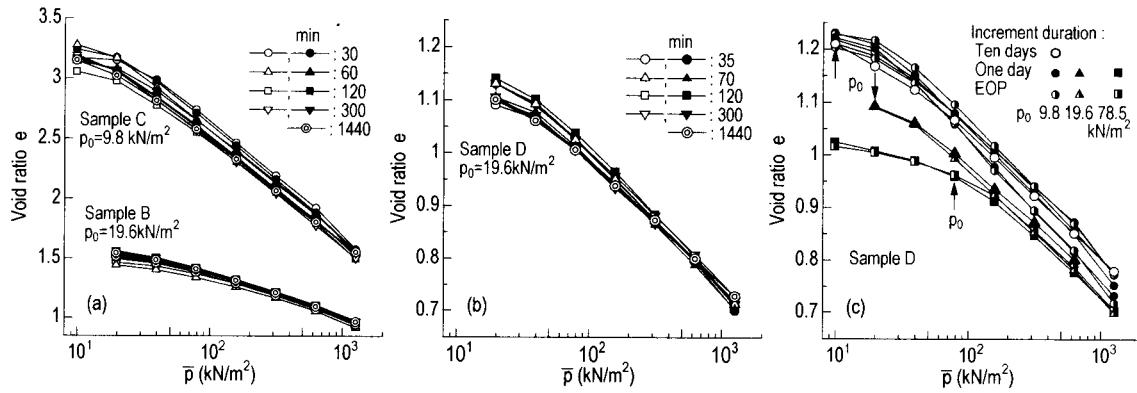


Fig.7 Comparison of  $e$ -log( $p$ ) curves (Test B)

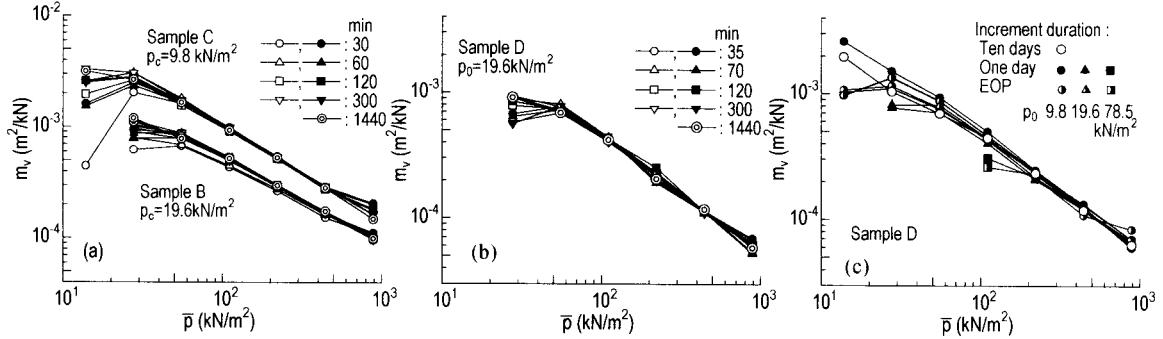


Fig.8 Comparison of relation of  $m_v$  with consolidation pressure (Test B)

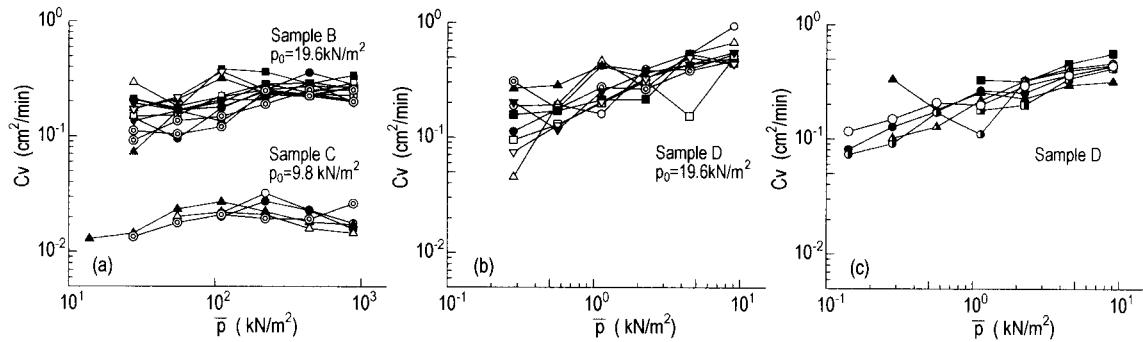


Fig.9 Comparison of relation of  $c_v$  with consolidation pressure (Test B)

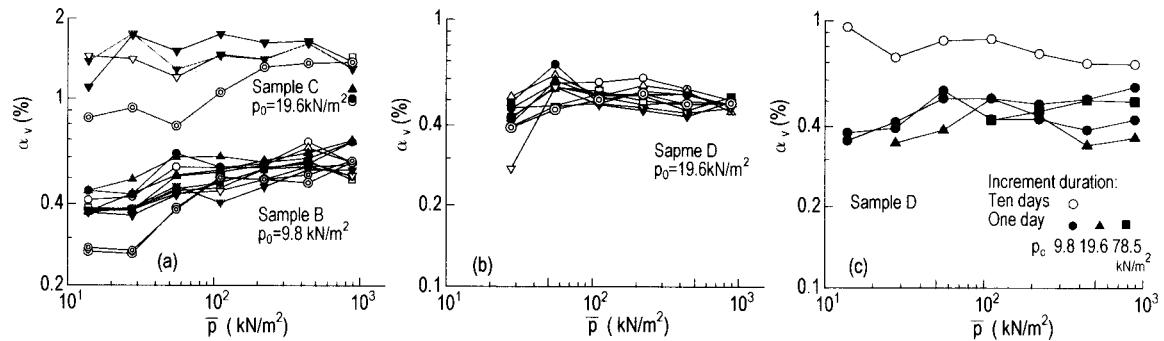


Fig.10 Comparison of relation of  $\alpha_v$  with consolidation pressure (Test B)

響されないと考えて良いであろう<sup>11)</sup>.

体積ひずみで定義した二次圧密係数  $\alpha_v$  と平均圧密圧力  $\bar{p}$  の関係が Fig.10(a)～(c)である。30 分から 300 分載荷の  $\alpha_v$  は、便宜的に体積ひずみ-時間曲線の直線部から求めたが、試料 C は一次圧密終了に約 1 時間を要するため 300 分のみの結果である。やや強引に求めた二次圧密係数であるが、載荷時間間隔  $t_d$  が 300 分まではほぼ等しい結果が得られた。Fig.10(a)の 1 日載荷との差は、 $\alpha_v$  の求め方によるものと思われる。

Fig.10(c)の 10 日載荷の  $\alpha_v$  は、1 日載荷よりも 1.5～2 倍大きくなつた。これは、実験 A でも観察されたので、物性の違いや時間効果（疑似過圧密）を考慮して、さらに調べる必要がある。

再構成粘土を利用した以上の圧密試験結果では、EOP から数 100 分載荷を採用しても載荷時間間隔が圧縮性  $m_v$  や  $e$ -log( $p$ )曲線に及ぼす影響は見られなかった。また、載荷時間間隔を短縮した  $\alpha_v$  は、1 日載荷とほぼ等しいことが明かとなつた。

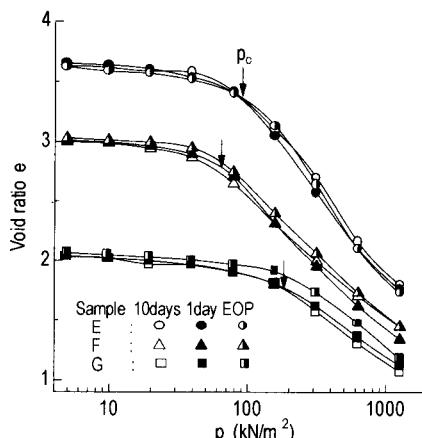


Fig.11 Comparison of  $e$ - $\log(p)$  curves for undisturbed clays (Test C)

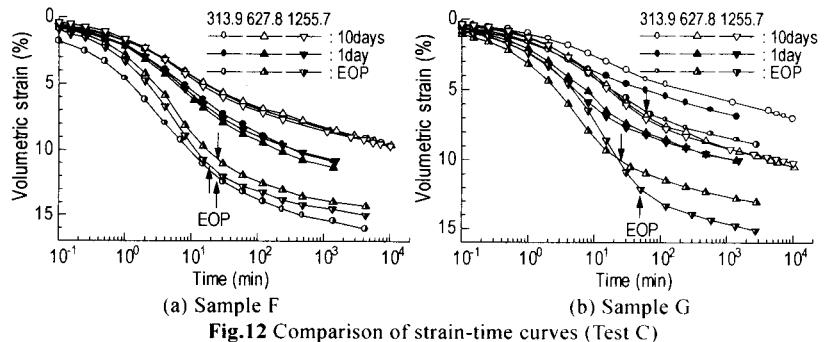
### 3.3 不搅乱粘土の実験結果（実験C）

3種類の不搅乱粘土から得られた  $e$ - $\log(p)$ 曲線を示したのが Fig.11 である。矢印で示した  $p_c$  は、1日載荷から得られた圧密降伏応力である。 $p_c$ に関して Ladd らは、標準圧密試験から求まる  $p_c$  は、EOP と比較して 10%前後小さいとしており<sup>12)</sup>、土田らは、日本の海成粘土では平均で 23%小さくなり、粘土の塑性とは関連性がないとしている<sup>13)</sup>。EOP 載荷された試料 F, G の  $e$ - $\log(p)$ 曲線は、右上にずれて  $p_c$  が増加し、正規圧密領域では互いに平行である。しかし、間隙比の差は Fig.1 の結果ほど大きくなく、試料 E では載荷時間間隔の影響がないようである。

Fig.12(a),(b)は、体積ひずみ-時間関係の一例として、圧密荷重  $p=313.9\sim 1255.7 \text{ kN/m}^2$  で得られた試料 F, G の結果を示したものである。図の矢印は、一次圧密終了時(EOP)を表している。1日後の圧密度は、載荷時間間隔が短いほど大きくなり、EOP(図の矢印)の圧密度と1日載荷1日後ならびに10日載荷10日後の圧密度は、 $EOP > 1\text{ day} > 10\text{ days}$  の順、あるいは3三者がほぼ等しいことがわかる。

3試料の圧密係数  $c_v$  ならびに二次圧密係数  $\alpha_v$  と平均圧密圧力  $\bar{p}$  の関係を比較したのが Fig.13 と Fig.14 である。EOP 載荷した試料 F, G の正規圧密領域における  $\alpha_v$  が僅かに小さくなっている以外は、載荷時間間隔によって各係数の大小を判定することは難しく、試料ごとにその傾向は異なっている。 $c_v$  と  $\alpha_v$  は各試料で比較的近い値を示しているので、両係数に及ぼす載荷時間間隔の影響は少ないものと思われる。

以上、段階載荷の載荷時間間隔が一次元圧密特性に及ぼす影響について調べた実験Bと実験Cから、以下の点が明らかになった。再構成粘土の  $e$ - $\log(p)$ 曲線は載荷時間間隔によらずほぼ一致し圧縮性は等しくなる。不搅乱粘土の  $e$ - $\log(p)$ 曲線ならびに圧縮性は、等しくなる試料とならない試料が存在したが、異なる場合でもその差は大きくなかった。また、二次圧密係数や圧密係数に及ぼす載荷時間間隔の影響は少ない。以上の実験結果を踏まえ次章では、載荷時間間隔による全圧密量の変化を考えるため、一次圧密量に着目した二次圧密を含む一次元圧密解析によって検討する。



(a) Sample F      (b) Sample G

Fig.12 Comparison of strain-time curves (Test C)

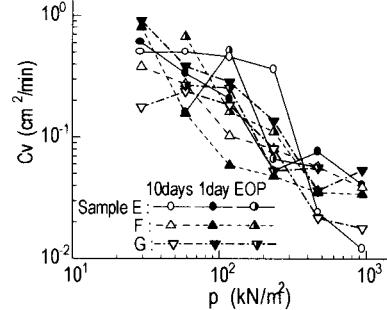


Fig.13  $C_v$  vs.  $\bar{p}$  (Test C)

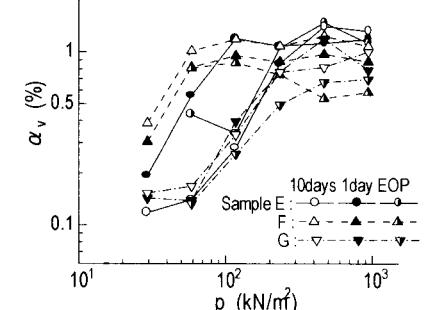


Fig.14  $\alpha_v$  vs.  $\bar{p}$  (Test C)

## 4. 圧密量-時間関係の数値解析

### 4.1 一次圧密量と二次圧密量

圧密量が、載荷時間間隔によって変化する場合と変化しない場合の体積ひずみ-時間関係を、二次圧密を含む一次元圧密解析手法を利用して検討する。一次元圧密における体積ひずみ  $\epsilon$  (全圧密量)を鉛直有効応力  $\sigma'$  (あるいは  $p$ )と時間  $t$ の関数と仮定し、その変化量を式(1)～(3)で表す<sup>9,10)</sup>。

$$d\epsilon = d\epsilon_i + d\epsilon_c = m_i d\sigma' \quad (1)$$

$$d\epsilon_i = m_i d\sigma' \quad (2)$$

$$d\epsilon_c = 0.434 \cdot \alpha_v \cdot U_y \cdot dt/t \quad (3)$$

ここに、 $\epsilon_i$  は有効応力の增加に伴い即時に発生する体積ひずみ (一次圧密量)、 $\epsilon_c$  は時間の対数に比例して発生するクリープ体積ひずみ (二次圧密量)、 $m_i$  は一次圧密に関する体積圧縮係数、 $U_y$  は圧密度である。二次圧密は、式(3)のように有効応力の増加に伴い発生すると仮定する。

Fig.15 中に示す定数  $\alpha_v$ 、 $m_i$ 、 $c_v$  と最大排水距離  $H=1\text{ cm}$ 、圧密荷重増分  $dp=98.1\text{ kPa}$  ならびに1日載荷と仮定した一次元圧密の計算結果が図中の実線である。定数  $\alpha_v$  をゼロとした点線では、二次圧密が計算されない。

今回の実験のように圧密量が載荷時間間隔の影響を受けない場合、載荷時間の短い一次圧密終了時(EOP)と長い10日間隔の圧密量は、1日のそれと等しくなる。上式によってこれを再現するには、 $\alpha_v$ 、 $m_i$  あるいは  $c_v$  を変化させる必要がある。前節の実験から  $c_v$  は等しいと考えられるので、Fig.15 の計算例 (破線) では、1次圧密量すなわち体積圧縮係数  $m_i$  のみを載荷時間に応じて増減し圧密量を一致させている。一方、既往の研究のように圧密量が載荷時間によって異なる場合には、 $m_i$  と  $\alpha_v$  が同時にあるいは個別に変化する場合と、両者が全く変化しない場合が考えられる。

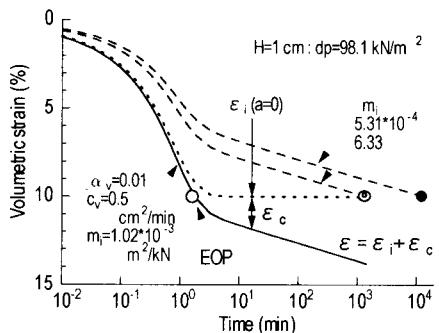
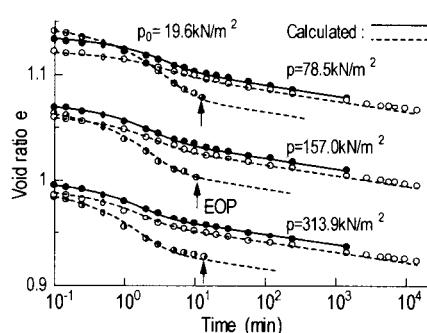
Fig.15 Strain-time curves by the change of the  $m_i$ 

Fig.16 1-D consolidation analysis results

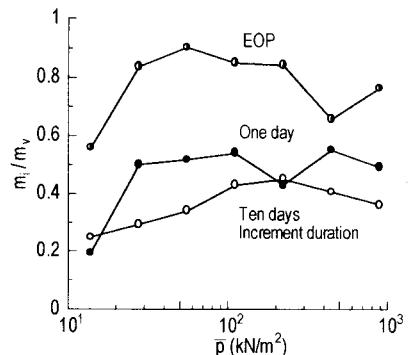
Fig.17 Comparison of relations of  $m_i/m_v$  with  $\bar{p}$ 

Table 2 Properties of materials for 1-D consolidation analysis

$p$ (kN/m <sup>2</sup> )	One Day		EOP		Ten days
	$m_i$ (*10 <sup>-4</sup> )	$\alpha_v$	$c_v$ (cm <sup>2</sup> /min)	$m_i (*10^{-4})$ (m <sup>3</sup> /kN)	$m_i (*10^{-4})$ (m <sup>3</sup> /kN)
78.5	2.638	0.0120	0.10	7.65	2.34
157.0	2.653	0.0062	0.15	3.57	1.73
313.9	2.665	0.0030	0.20	1.83	1.02

#### 4.2 計算結果と考察

Fig.16 は、試料 D の EOP, 1 日, 10 日載荷で測定された間隙比の経時変化(記号)と、式(1)～式(3)による再現計算結果を示したものである。二次圧密を考慮した再現計算に必要な土質定数  $c_v$  と  $\alpha_v$  は、1 日載荷の圧密試験結果から決定し、EOP と 10 日載荷にも同じ値を使用している。 $m_i$  は、Fig.15 と同様に各載荷時間の実測値に一致するよう試行錯誤的に決定し<sup>8)</sup>、その結果を Table 2 に示した。EOP と 10 日の  $c_v$  と  $\alpha_v$  が 1 日載荷の値であるにもかかわらず、一次圧密量のみを変化させることで、計算結果(実線と破線)は、実験値をよく再現している。計算から求めた各  $m_i$  と 1 日載荷の  $m_i$  の比をとり、平均圧密圧力との関係を調べたのが Fig.17 である。載荷時間間隔の違いにより体積圧縮係数比  $m_i/m_v$  は大きく変化し、EOP 載荷の  $m_i/m_v$  は増加、10 日載荷では減少することがわかる。

一次圧密中の二次圧密を分離して測定できないので推論の域を出ないが、二次圧密係数  $\alpha_v$  は載荷時間間隔により大きく変化しないので、圧密量の変化は一次圧密量  $m_i$  の増減が大きな要因と考えられる。

## 5. 結 言

一次元圧密試験の載荷時間間隔が、圧密特性に及ぼす影響を調べる目的で、7種類の粘土による圧密試験と二次圧密を考慮した一次元圧密計算を行った。得られた結果は、以下のように要約される。

- 1) 圧密前の載荷期間が1日よりも短い場合、二次圧密係数はほぼ等しく圧密量は増加する。1日よりも長くなると時間効果によって圧密量は大きく減少し、二次圧密係数は増加する。
- 2) 段階載荷した再構成粘土の  $e$ -log( $p$ )曲線は、載荷時間間隔によらずほぼ一致したが、不攪乱粘土では等しくなる試料となる試料が存在した。二次圧密係数と圧密係数は載荷時間

間隔の影響の少ないパラメーターと言える。

- 3) 載荷時間間隔によって異なる圧密量-時間関係は、一次圧密量に関する体積圧縮係数  $m_i$  のみを増減させることで再現できることから、載荷時間間隔による圧密量の変化は、一次圧密量  $m_i$  の増減が大きな要因である。
- 参考文献
- 1) 特殊圧密試験法に関する研究委員会：委員会報告 I-2、段階載荷圧密試験について、特殊圧密試験に関するシンポジウム論文集、土質工学会、pp.15-26、1988。
  - 2) 地盤工学会：土質試験の方法と解説、第6編 第3章 土の段階載荷による圧密試験、pp.377-378、2000。
  - 3) 土質工学会：土質試験の方法と解説、第6編 第2章 土の圧密試験、pp.302-305、1990。
  - 4) 吉国 洋、池上慎司、平尾隆行：飽和土の圧密・圧縮特性に及ぼす載荷速度の影響、第26回土質工学研究発表会、Vol.26、pp.279-280、1991。
  - 5) C.B.Crawford : Interpretation of the Consolidation Test. Proc. ASCE, Vol.90, SM5, pp.87, 1964.
  - 6) 村上幸利：載荷時間と荷重増分比が圧密試験結果に及ぼす影響とその解釈、土質工学会論文報告集、Vol.34, No.2, pp.153-157, 1994.
  - 7) Imai, G. : Analytical examinations of the foundations to formulate consolidation phenomena with inherent time-dependence, Key Note Lecture, IS-Hiroshima, 1995.
  - 8) 稲田信徳、赤石 勝：ダイレイタンシーを考慮した一次元圧密解析、土質工学会論文報告集、Vol.20, No.2, pp.119-127, 1980.
  - 9) 白子博明、杉山太宏、前田浩之助、赤石 勝：二次圧密を含む一次元圧密解析における土質定数、土と基礎、地盤工学会、Vol.49, No.6, pp.14-16, 2001.
  - 10) 白子博明、杉山太宏、外崎 明、赤石 勝：載荷時間間隔の一次元圧密特性への影響、第36回地盤工学研究発表会、pp.969-970, 2001.
  - 11) 石田昌達、及川 洋：短時間載荷による軟弱土の圧密試験方法についての一考察（第二報）、土木学会第44回年次学術講演会概要集、pp.374-375, 1989.
  - 12) Ladd, C.C. : Stability Evaluation During Staged Consolidation, J. Geotech. Eng., ASCE, 117(4), 1991.
  - 13) 田中 孝、永野賢司：一次圧密終了条件(EOP)で求められる圧密降伏応力について、第29回地盤工学研究発表会、pp.283-284, 1994.