

圧密荷重増分比の二次圧密への影響

白子博明*1・梶山憲介*2・杉山太宏*3・赤石 勝*4

Effects of Consolidation Pressure Increment Ratio on Secondary Compression

by

Hiroaki SHIRAKO, Kensuke KAJIYAMA, Motohiro SUGIYAMA and Masaru AKAISHI

(Received on March 31, 2006 & accepted on June 3, 2006)

Abstract

An experimental study of secondary consolidation characteristics is described. It is observed that secondary compression is dependent on the amount of pressure increment and pressure increment ratio. The relative magnitudes of primary and secondary compressions vary with the amount of pressure increment, and the shape of the consolidation-time curve is markedly influenced by the secondary compression behavior. A new theoretical analysis for evaluating the shape of consolidation-time curves is illustrated using the relationship between the degree of consolidation and time factor. The oedometer test results were compared with theoretical predictions.

Keywords: primary consolidation, secondary compression, clay, pressure increment

1. はじめに

標準圧密試験では、最大排水距離 1cm の供試体に対して荷重増分比 $\Delta\sigma/\sigma$ を 1、荷重時間間隔を 1 日とした試験条件が規定されている。実際の軟弱地盤における平均的層厚と圧密荷重条件を勘考したとき、この試験条件において供試体に生じる圧密量がなぜ現場の圧密量に対応すると考えられるのか、圧密期間や荷重増分比の影響はどうか、明らかにされていない点が多い^{1),2)}。特に 1 という大きな荷重増分比は、現場の荷重条件と比較して過大である。したがって、荷重増分比の小さな、圧密期間の異なる圧密試験から一次元圧密挙動を明確にする必要がある³⁾。

ところで、圧密量-時間曲線の形状は荷重増分比の影響を受けるが、二次圧密は荷重増分比の影響を受けないとする研究が多い⁴⁾⁻⁶⁾。二次圧密は一次圧密中から発生していると考えられるので⁷⁾、圧密量-時間曲線が荷重増分比によって変化する要因は、(1) 一次圧密量が荷重増分比の影響を受ける、(2) 一次圧密中に発生する二次圧密量が一次圧密終了後に観察される一般的な二次圧密と異なる、の 2 点が考えられる³⁾。しかし、Terzaghi の圧密理論（一次圧密量）では、荷重増分比が圧密量-時間曲線に影響することはないので、(2) の“一次圧密中の二次圧密量の変化”が主要因である可能性が高い⁸⁾⁻¹²⁾。

一次圧密中から発生している二次圧密が荷重増分比の影響を受けたとしても、実験では一次圧密量と二次圧密量を分離して測定できないのでこれを確かめられない。しかし、一次圧密中の二次圧密挙動を解明することが一次元圧密解析の信頼性向上

Table 1 Physical property of soils tested

Sample	ρ_s	ω_L (%)	ω_p (%)	sand (%)	silt (%)	clay (%)
M	2.638	67	36	11	55	34
H	2.363	73	51	22	38	40
I	2.333	$\omega_n=219\sim 400\%$				

には不可欠である。一次圧密終了後に観察される二次圧密は圧密時間の対数に比例するので、一次圧密中の二次圧密も圧密時間の対数に比例すると推測するのが合理的と思われる。

このような考えのもと本研究では、荷重増分比を変化させた一次元圧密試験から二次圧密量とその発生開始時間について考察している。また、一次圧密中の二次圧密開始時間を変化させた一次元圧密解析から、二次圧密が圧密量-時間曲線の形状ならびに圧密量に及ぼす影響を検討している。

2. 試料および実験方法

実験には三種類の沖積粘土を使用し、各試料の物理的性質を Table 1 に示した。試料 M と試料 H は、それぞれ宮崎県と神奈川県内で採取し、液性限界の約 2 倍の含水比で十分練り返したもので、試料 I は神奈川県内でブロック状に採取した不攪乱泥炭である。これらの試料に対して、以下の荷重増分比 $\Delta\sigma/\sigma$ を変化させた一次元圧密試験を実施した。

実験 A: $\sigma'_0=19.6\text{kPa}$ で 2 日間予圧密した試料に対し、1 日間間隔荷重、 $\Delta\sigma/\sigma=1$ の標準圧密試験を実施し、圧密量の経時変化を測定した。慣用的設計に利用される標準的圧密試験であり、比較対象の基準とする。

*1 ㈱建設企画コンサルタント東北支店副支店長

*2 工学研究科土木工学専攻博士課程前期

*3 工学部土木工学科助教授

*4 工学部土木工学科教授

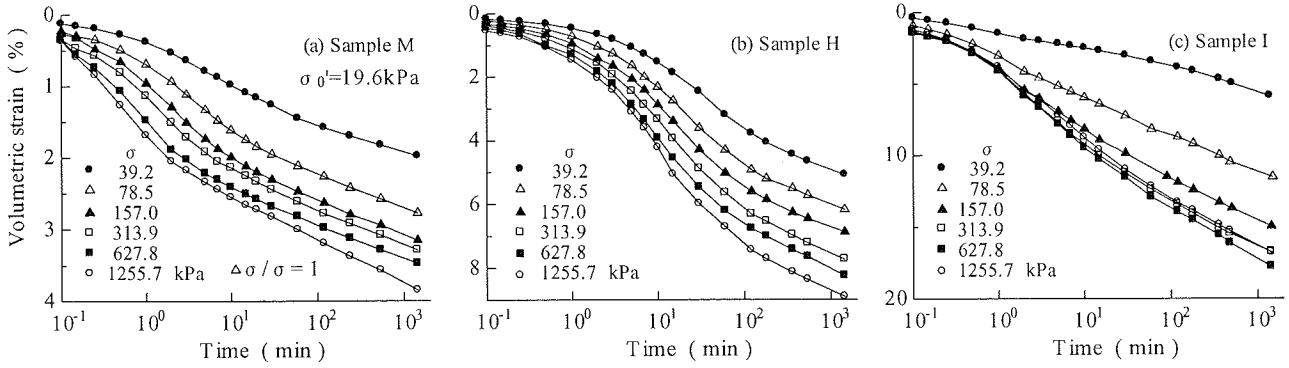


Fig. 1 Volumetric strain-time curves for the standard oedometer test (TEST A)

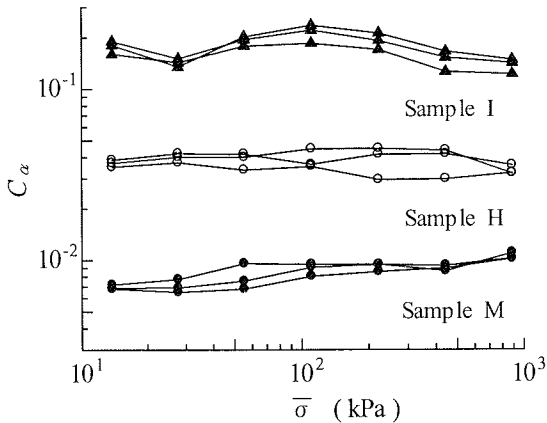


Fig. 2 C_α vs $\bar{\sigma}$ relations (TEST A)

実験 B: $\sigma'_0 = 39.2$ あるいは 78.5 kPa で 14 日間予圧密した試料に対し、 $\Delta\sigma = 9.8 \sim 78.5$ kPa を載荷して $\Delta\sigma/\sigma$ の変化が圧密量-時間関係に及ぼす影響を調べた。

実験 C: $\sigma'_0 = 19.6$ kPa で 2 日間予圧密した試料を 1 日間間隔載荷 ($\Delta\sigma/\sigma = 1$) で圧密し、所定の圧密圧力 ($\sigma' = 39.2$ および 78.5 kPa) とする 1 つ前の載荷段階の圧密期間を 120 分、1 日あるいは 10 日と変化させた。その後、荷重増分 $\Delta\sigma = 9.8 \sim 78.5$ kPa を載荷して、載荷前圧密期間の長短と荷重増分が圧密挙動に及ぼす影響を調べた。

3. 実験結果と考察

3.1 標準圧密試験 $\Delta\sigma/\sigma = 1$ の二次圧密特性 (実験 A)

標準圧密試験の各載荷段階における 3 試料の圧密量 (体積ひずみ)-時間曲線を Fig. 1(a)~(c) に示した。各試料とも 60~120 分以降で圧密量が時間の対数に比例する二次圧密が発生している。荷重増分比 $\Delta\sigma/\sigma = 1$ 、1 日間隔載荷の標準圧密試験では、各載荷段階の二次圧密継続中に次の載荷段階に移り、再び新たな荷重増分による圧密が開始される。二次圧密は一次圧密終了後に観察されるが、既往の研究から一次圧密中にも発生していると推測される⁷⁾。しかし、一次圧密中に発生している二次圧密を分離測定できないため、その挙動は明確にできない。また、現状では前載荷段階で発生していた二次圧密が、次の載荷段階の一次圧密と二次圧密挙動にどのように影響しているか否かも明らかにされていない。

このように、標準圧密試験結果の二次圧密については今もなお不明な点が多いが、各載荷段階における 120 分以降の圧密量

-時間曲線から二次圧密係数 $C_\alpha (= \Delta e / \Delta \log t)$ を求めた結果が Fig. 2 である。物性や試料の状態が異なる 3 試料であるが、 C_α は平均圧密荷重 $\bar{\sigma}$ の大きさによらずほぼ一定であることが観察される。

3.2 $\Delta\sigma/\sigma$ の変化と二次圧密特性 (実験 B)

予圧密期間を 14 日間として二次圧密を十分に発揮させた後、新たな圧密荷重増分 $\Delta\sigma$ の大きさを変化させた圧密量-時間曲線が Fig. 3(a)~(c) と Fig. 4(a)~(c) である。 $\Delta\sigma$ に対応して体積ひずみの大きさが変化するのは当然であるが、 $\Delta\sigma$ が小さくなると圧密量-時間曲線の形状は Terzaghi 理論の逆 S 字形から上に凸となる形状に変化している。また、 $\Delta\sigma$ の減少に伴い二次圧密量も減少する傾向が観察される。

これらの試験結果から二次圧密係数 C_α と荷重増分比 $\Delta\sigma/\sigma$ の関係を調べたのが Fig. 5 である。各試料とも $\Delta\sigma/\sigma > 0.5$ で C_α はほぼ一定であるが、0.5 以下において荷重増分比の影響が顕著に現れ C_α が急激に減少している。現場の荷重増分比 $\Delta\sigma/\sigma$ が標準圧密試験と同じ 1 となることは、まず有り得ない。通常 $\Delta\sigma/\sigma$ は 0.5 以下と考えられるため、標準圧密試験から得られた二次圧密 C_α を設計に採用すると、予測される沈下量は実際よりも過大な値となる可能性がある。

C_α と $\Delta\sigma/\sigma$ の関係を考察するため、これら実験結果の圧密量-時間曲線の形状を Fig. 6 の 2 つに大別して考えることにする。圧密量-時間曲線が逆 S 字形となる場合とならない場合で、前者は $\Delta\sigma/\sigma$ が大 (Fig. 6 の■印)、後者は $\Delta\sigma/\sigma$ が小 (Fig. 6 の○印) に対応する。前述したように一次圧密中に発揮される二次圧密挙動は、明確にされていない。しかしながら、一次圧密中に発揮される二次圧密も、一次圧密後のそれと同じく時間の対数に比例すると考えるのが簡便で合理的な推測であろう。そこで、Fig. 6 のように、圧密量が時間の対数に比例して発生する二次圧密領域の直線部分を延長し、時間軸を横切る圧密量がゼロとなる時間 t_0 を求める。こうして求めた圧密時間 t_0 以前には二次圧密が発生していない、あるいは発生していても無視しうる大きさであると考え、これを二次圧密開始時間と呼び以下で比較する。

$\Delta\sigma/\sigma = 1$ の実験 A (Fig. 1) から求めた t_0 と $\bar{\sigma}$ の関係を Fig. 7(a) に、 $\Delta\sigma/\sigma \leq 1$ とした実験 B (Fig. 3 と Fig. 4) から求めた t_0 と $\Delta\sigma/\sigma$ の関係を Fig. 7(b) にそれぞれ示す。 $\Delta\sigma/\sigma = 1$ 、Fig. 7(a) の t_0 は、そのほとんどが 0.1 分以下であるのに対して、 $\Delta\sigma/\sigma < 1$ 、Fig. 7(b) の t_0 は、大半が 0.1 分以上であり荷重増分比による明らかな違いが認められる。荷重増分比が小さくなると Fig. 6

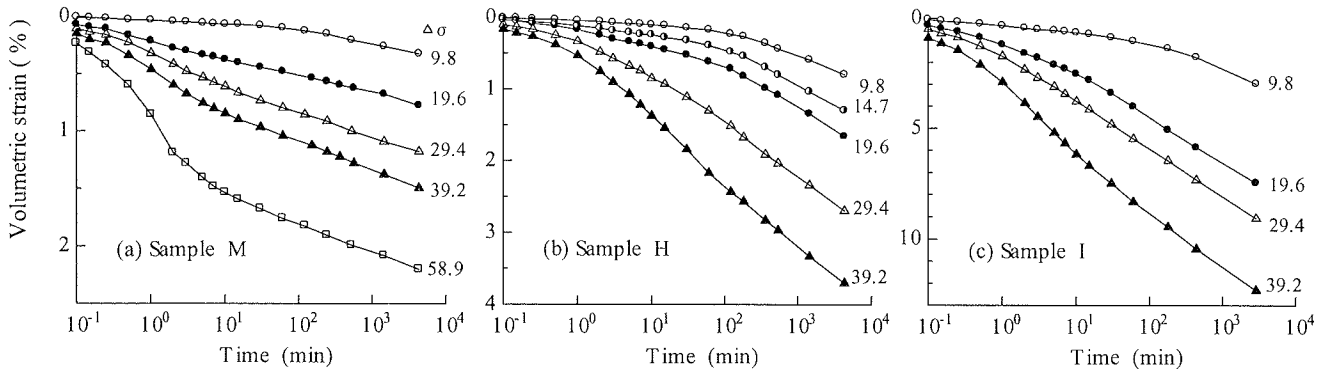


Fig. 3 Volumetric strain-time curves obtained from TEST B ($\sigma'_0 = 39.2 \text{ kPa}$)

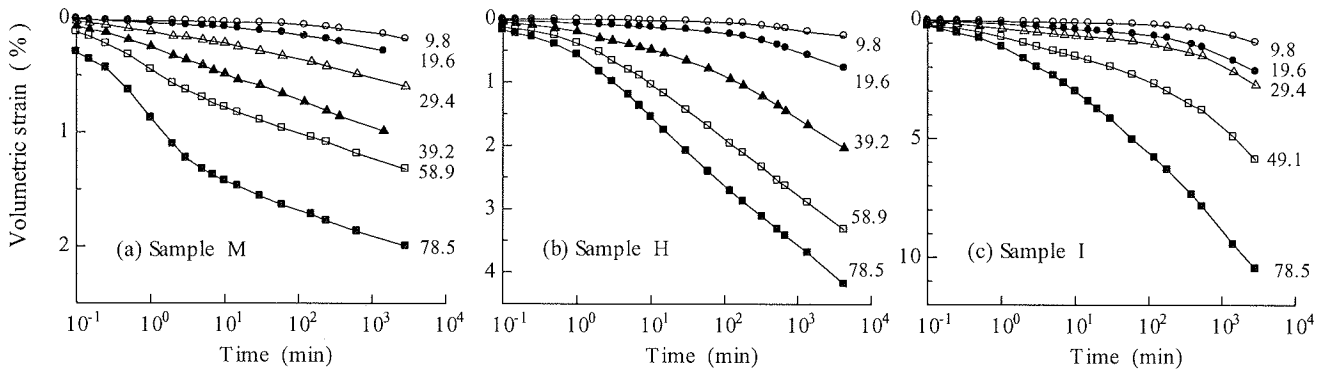


Fig. 4 Volumetric strain-time curves obtained from TEST B ($\sigma'_0 = 78.5 \text{ kPa}$)

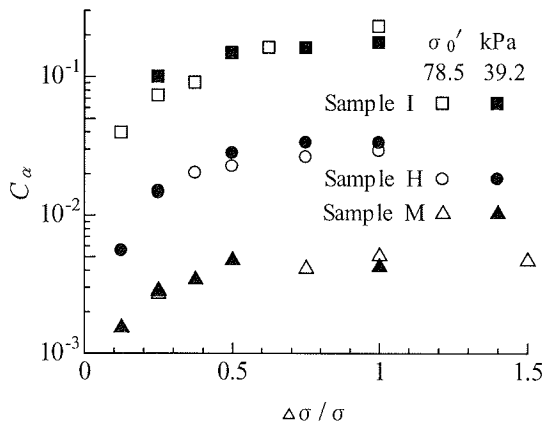
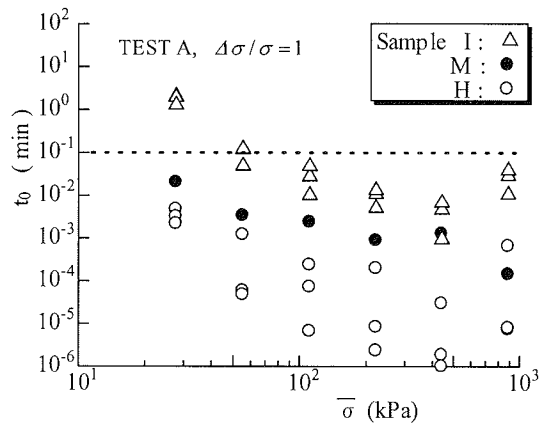


Fig. 5 C_α vs $\Delta\sigma/\sigma$ relations (TEST B)



(a) t_0 vs $\bar{\sigma}$ relations

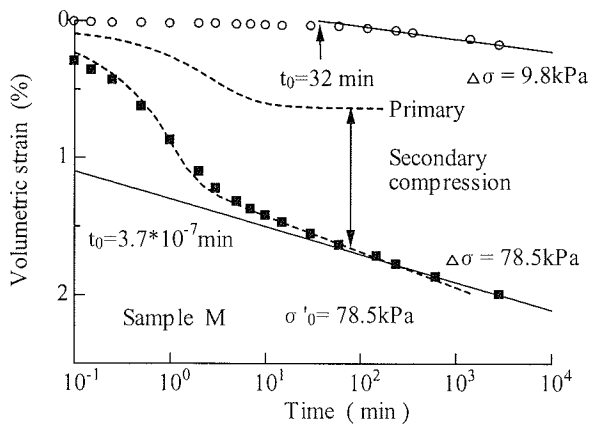
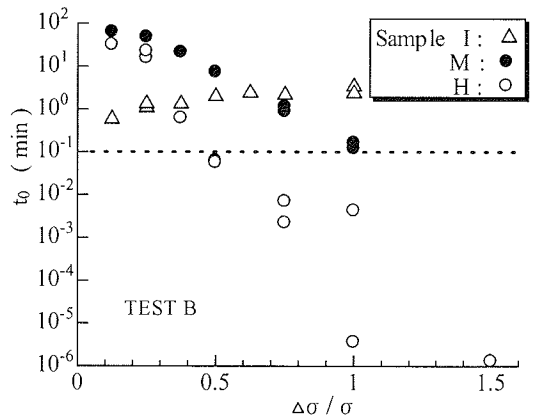


Fig. 6 Comparison of t_0 due to difference in pressure increment



(b) t_0 vs $\Delta\sigma/\sigma$ relations

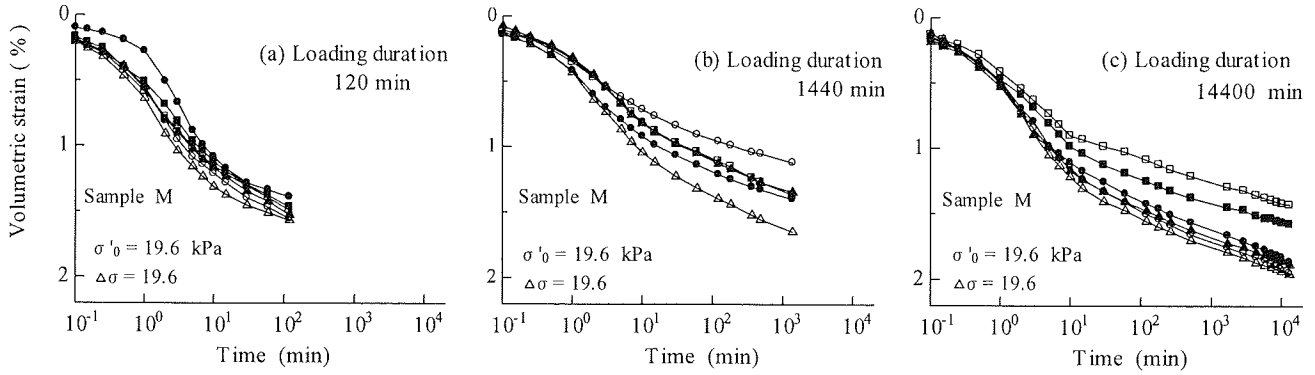


Fig. 8 Volumetric strain-time curves due to different loading duration (TEST C)

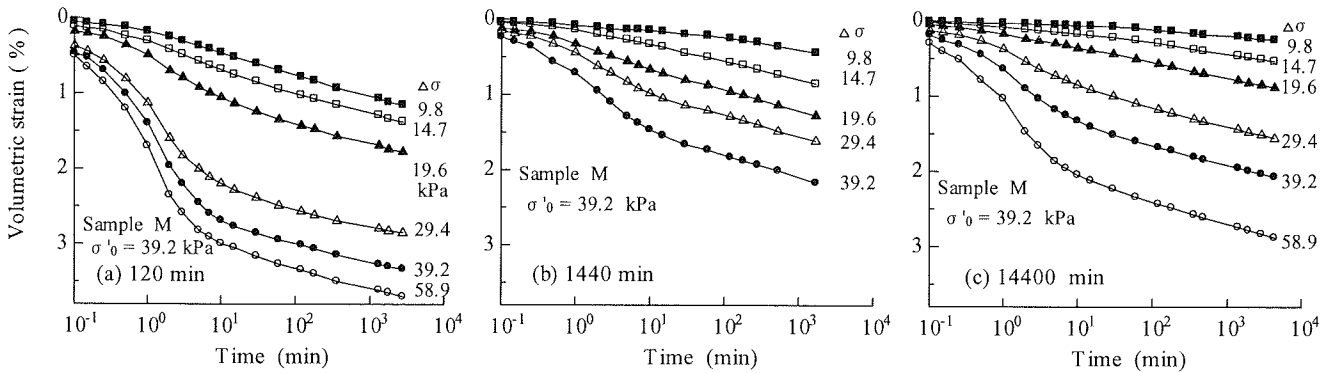


Fig. 9 Volumetric strain-time curves due to different loading duration before loading (TEST C)

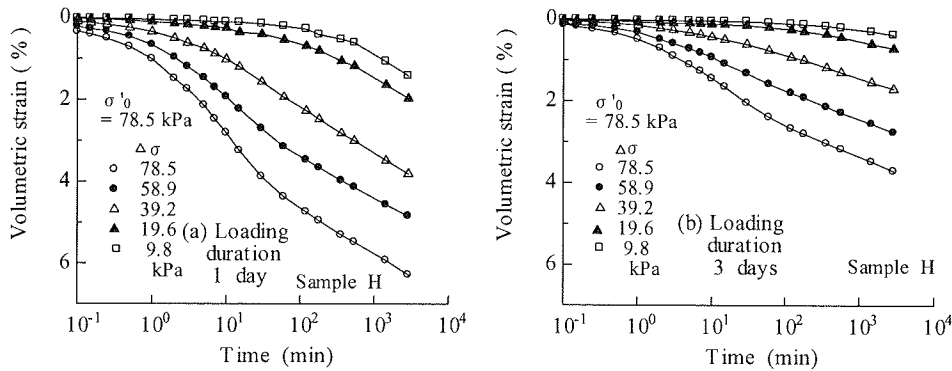


Fig. 10 Volumetric strain-time curves due to different loading duration before loading (TEST C)

に示すように C_a が減少するだけでなく、圧密開始後の一定時間 t_0 付近まで新たな圧密荷重増分による二次圧密は発生しない、あるいは発生していても荷前二次圧密と同じく極めて小さく無視できる大きさと考えられる。

3.3 荷前圧密期間と二次圧密特性 (実験 C)

試料 M に対して 3 種類の圧密期間で圧密後、圧密荷重増分 $\Delta\sigma$ を変化させて圧密量への影響を調べた。Fig. 8(a)~(c)は圧密期間、Fig. 9(a)~(c)は $\Delta\sigma$ をそれぞれ変化させた圧密量-時間曲線で、Fig. 8(a)と Fig. 9(a)のようにアルファベットの同じ図が対応する。Fig. 8 に示す荷重段階では、圧密期間を変えても二次圧密量が比較的少ない試料であることから、データにばらつきはあるものの全圧密量と二次圧密係数に大きな違いは見られない。これに対して次の段階、Fig. 9 に示した二次圧密と圧

密量-時間曲線からは、荷前圧密期間が長くなると全圧密量が減少し、また、 $\Delta\sigma$ が小さいほど二次圧密量も減少することが読みとれる。これは、荷前圧密期間が 1 日以下の場合と比べて期間の長い 10 日で著しい。Fig. 10 (a), (b)は、試料 H に関する同様の圧密試験の結果で、荷前圧密期間の長短による圧密量-時間曲線への影響がより顕著に現れている。Fig. 9 の試料 M はシルト質粘土、試料 H は粘土であり、圧密期間の影響は物性によっても異なると言える。

実地盤の堆積後の経過年数や最大排水距離を考慮すると、標準圧密試験の“1 日間隔荷重”による圧密挙動は、荷前圧密期間が 1 日の結果を示すだけであって、圧密期間が短いあるいは長くなると変化するため、実地盤で起きる沈下とはかなり異なる可能性が高い¹²⁾。したがって、実際の設計で遭遇する圧密問題を考える場合には、圧密試験の荷重増分や圧密期間などの

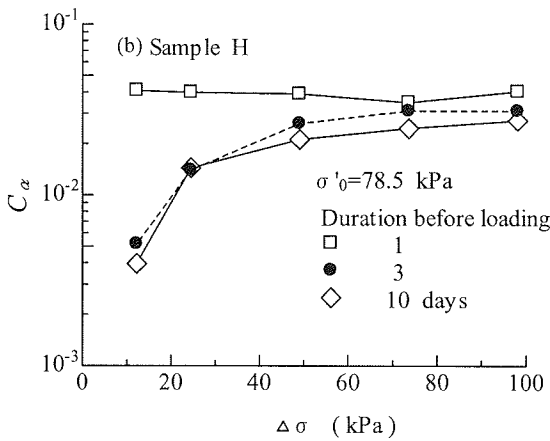
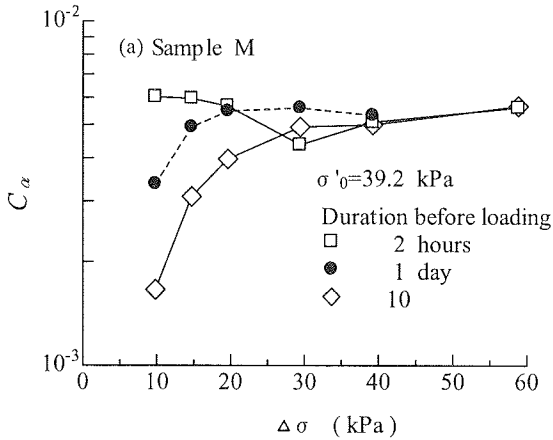


Fig. 11 C_α vs $\Delta\sigma$ relations (TEST C)

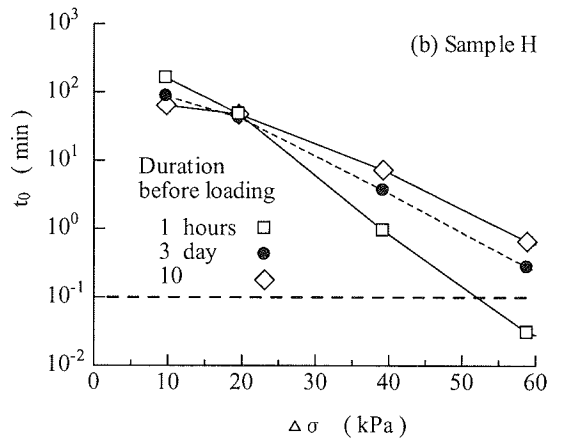
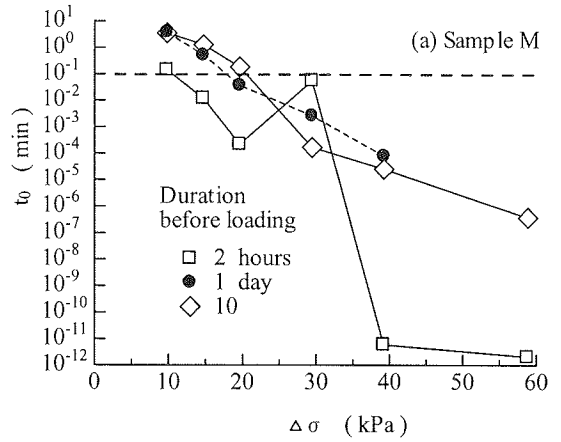


Fig. 12 t_0 vs $\Delta\sigma$ relations (TEST C)

影響を十分考慮した上で、現場の設計・施工条件を反映させた試験も行う必要があると考えられる。

両試料の試験結果から二次圧密係数 C_α を求め、荷重増分 $\Delta\sigma$ との関係調べたのが Fig. 11 (a), (b) である。両図から、 C_α は載荷前圧密期間が標準圧密試験の1日よりも長く且つ $\Delta\sigma$ (あるいは $\Delta\sigma/\sigma$) が小さい時に著しく減少している。現場では、より多くの載荷段階で長期間かけて盛り立てると、その後の長期沈下も軽減できる可能性を示すものである。

Fig. 9,10 の圧密量-時間曲線から、二次圧密開始時間 t_0 と $\Delta\sigma$ の関係を調べた結果を Fig. 12 (a), (b) に示す。図から、荷重増分が小さいほど t_0 は増加すること、 t_0 に及ぼす圧密期間の影響は明確でないことは両試料に共通している。また、 t_0 の大きさには試料(物性)の違いが現れており、試料 H では $\Delta\sigma$ の大小によらず 0.1 分(6秒)以上である。今回定義した t_0 は圧密層内各点の厳密な二次圧密の開始時間ではなく、図のように試料によってまた $\Delta\sigma$ の大きさによって異なるが、 t_0 以前から新たな圧力増分による二次圧密が発生しているとしても、その量は極めて少ないと考えられる。一次圧密中に発生する二次圧密を明確に規定できない現状であるが、 $\Delta\sigma$ に依存する二次圧密を定義した圧密時間 t_0 以降に発生するとして取り扱うのは、二次圧密を評価する上で合理的な方法と考える。

4. 二次圧密を含む一次元圧密解析による考察

4.1 二次圧密を考慮した圧密度と時間係数の関係

Terzaghi の一次元圧密理論では、圧密時間 t 、圧密層内位置 y における圧密度 $U_y(t)$ は、式(1)で表される。

$$U_y(t) = 1 - \frac{u(t)}{u_0} \quad (1)$$

ここに、 $u(t)$ は時間 t で変化する圧密層内の過剰間隙水圧、 u_0 は初期過剰間隙水圧である。

$U_y(t)$ を圧密層全体(層厚 H) で積分すれば、式(2)に示す平均圧密度 $U(t)$ が得られる。

$$U(t) = \frac{1}{H} \int_0^H U_y(t) dy = 1 - \frac{1}{H} \int_0^H \frac{u(t)}{u_0} dy \quad (2)$$

一次元圧密方程式を式(3)の境界条件で解き、式(2)の $u(t)$ を求めれば、 $U(T_v)$ は式(4)で表される。

$$\begin{aligned} u(t > 0, y = 0) &= u(t > 0, y = 2H) = 0 \\ u(t = 0, y) &= u_0 \end{aligned} \quad (3)$$

$$U(T_v) = 1 - \sum_{m=0}^{\infty} \frac{2}{M^2} \exp(-M^2 T_v) \quad (4)$$

ここに、 $M = (2m+1)\pi/2$ 、 $T_v = c_v \times t/H^2$ で c_v は圧密係数、時間係数 T_v は無次元化された時間である。

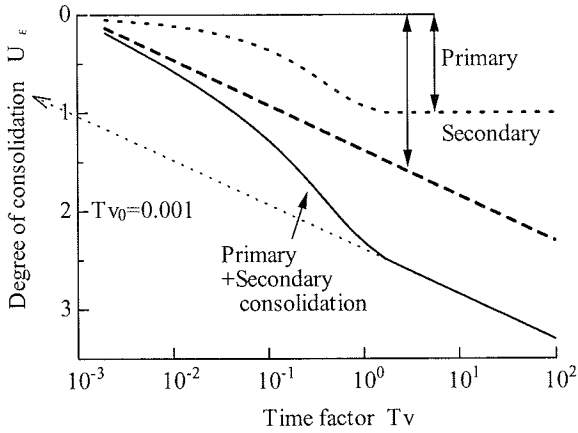


Fig. 13 U_ϵ vs T_v relations for primary and secondary consolidation

三笠は、ある圧密時間 t における圧密度 $\epsilon(t)$ と最終圧密度 ϵ_f の比で定義される、ひずみに関する平均圧密度 U_ϵ を提案した。

$$U_\epsilon = \epsilon(t) / \epsilon_f \quad (5)$$

三笠は、式(5)をひずみの圧密度 U_ϵ 、式(4)を応力の圧密度 U_σ と呼んで区別している。式(5)の $\epsilon(t)$ は圧密層全体の平均圧縮ひずみ (=体積ひずみ) であるが、 $\epsilon(t)$ を y における圧縮ひずみと解釈すれば、式(5)は $U_y(t)$ を表すことになる。また、線形の応力-ひずみ関係を用いれば、式(4)と式(5)の平均圧密度 U は一致する。

標準圧密試験では1日後の圧密度が最終圧密度 ϵ_f とされているが、1日後を基準とする理論的根拠は存在しない。そこでこの報告では ϵ_f を一次圧密度 ϵ_p に変更し式(6)で表す。

$$\epsilon_p (= \epsilon_f) = m_p \Delta \sigma'_v \quad (6)$$

ここに、 m_p は一次圧密度のみを表す体積圧縮係数、 $\Delta \sigma'_v$ は鉛直方向の有効応力増分であり、圧密終了時の大きさは初期過剰間隙水圧の大きさに等しい。

また、時間の対数に比例する二次圧密度 ϵ_s を式(7)で表す。

$$\epsilon_s(T_v) = \alpha \log(t/t_0) = \alpha \log(T_v/T_{v0}) \quad (7)$$

ここに、 α は体積ひずみで定義した二次圧密係数、 t_0 は二次圧密の開始時間、 T_{v0} は t_0 に対応する時間係数である。

一次元圧密における全圧密度を一次圧密度 ϵ_p と二次圧密度 ϵ_s の和として表せば、二次圧密を考慮した圧密度と時間係数の関係が得られる。そこで、 ϵ_p と ϵ_s をそれぞれ式(6)と式(7)により計算した一例が Fig. 13 である。計算では二次圧密係数 $\alpha=0.46$ としたが、この大きさに特別な意味はなく、 $T_v=22.1$ における圧密度 $U_\epsilon=3$ 、すなわち二次圧密による U_ϵ が一次圧密度の U_ϵ に対して2倍となるよう設定した。 $T_v=22.1$ は平均的な沖積粘性土において1日後の圧密度に相当する程度の時間係数である。また、圧密開始直後から二次圧密が発生するように、 T_{v0} は0.001としている。

Fig. 13 に点線で示した一次圧密度は式(4)で計算される厳密解と一致しており、破線で示した二次圧密は $T_{v0}=0.001$ から時間の対数に比例する。これらの和である実線で示した全圧密度、

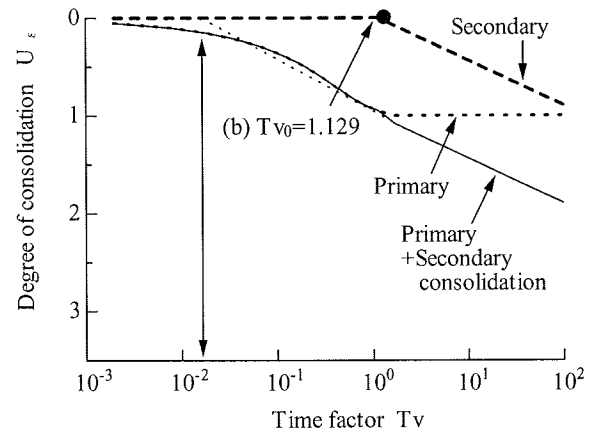
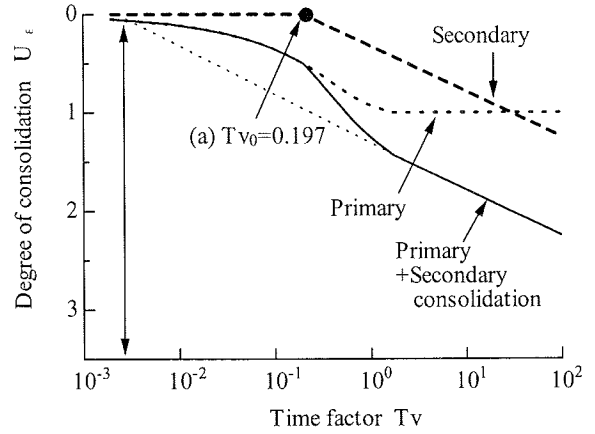


Fig. 14 U_ϵ vs T_v computed by two T_{v0}

すなわち圧密度と時間係数の関係は、Fig. 1 ($\Delta\sigma/\sigma=1$) の典型的な圧密度-時間曲線の形状に酷似している。前章で二次圧密開始時間 t_0 を求めたのと同じように、全圧密度 (U_ϵ) が時間係数 T_v の対数に比例する直線部分を延長して求まる T_v 値 ($U_\epsilon=0$) は 10^{-5} 以下である。

圧密度-時間曲線の形状に及ぼす二次圧密開始時間の影響を比較するために、時間係数 T_{v0} を0.197と1.129として計算した結果が Fig. 14 (a), (b) である。Fig. 13 とあわせて比較すると、二次圧密の発生時期が遅れる T_{v0} の増加は、 $U_\epsilon=0$ となる時間係数を増加させることが確認できる (図の黒丸の位置)。また、全圧密度 (U_ϵ) と時間係数 T_v の関係は、 T_{v0} の増加とともに荷重増分比 $\Delta\sigma/\sigma$ の小さな場合の圧密度-時間曲線の形状に類似してくる。これらの計算結果は、前章の実験結果で観察された荷重増分比による圧密度-時間曲線の形状変化が、全圧密度に占める二次圧密度の変化と二次圧密の発生開始時間の遅れに起因している可能性を示唆するものである。

4.2 実験結果の再現計算

前章 Fig. 3(b) に示した荷重増分比の異なる圧密度-時間曲線を例に、実験の再現計算から二次圧密挙動について考察する。Fig. 15 の白丸と白四角印はそれぞれ荷重増分比 $\Delta\sigma/\sigma$ が1と1/4の実験結果で、破線で示した計算結果は、圧密開始と同時に二次圧密が発生する $t_0=0$ の場合である。計算には二次圧密係数以外全て同じ土質定数を用いているが、荷重増分比 $\Delta\sigma/\sigma=1$ の再現性が非常に高いのに対して、 $\Delta\sigma/\sigma=1/4$ では

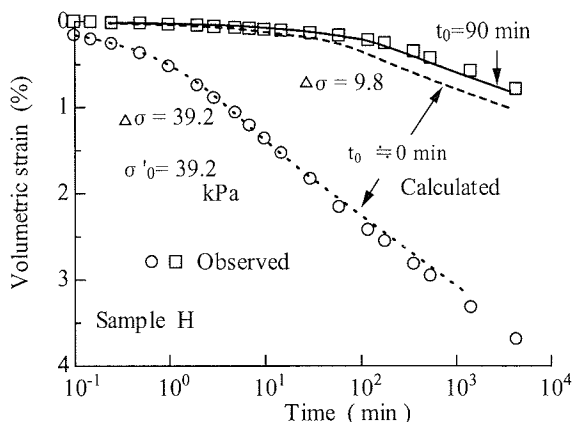


Fig.15 Experimental and calculated volumetric strain-time curves

計算結果と実験結果のずれが認められる。そこで、前節の検討結果を参考にして計算結果を実験結果に近づけるために、二次圧密開始時間 t_0 を 90min とした計算結果が図中の実線である。 t_0 を導入することで、荷重増分比が小さい場合の圧密量-時間曲線の計算結果は、実測値に近づくことがわかる。

以上の計算結果より、一次圧密中から生じる二次圧密の開始時間は、荷重増分比の影響を受けると推測される。

5. 結 言

荷重増分比や載荷圧密期間が圧密量-時間関係、特に二次圧密挙動に及ぼす影響について、実験と一次元圧密解析により検討した。まず、実験的検討から得られた結果は次のように要約される。

- 1) 本研究で使用した3種類の試料における標準圧密試験で観測された二次圧密係数 C_α は、粘性土の種類や圧密荷重の大きさによらずほぼ一定である。
- 2) 載荷前圧密期間が1日以下では、荷重増分比 $\Delta\sigma/\sigma$ の減少による二次圧密係数 C_α の変化がほとんど生じない。圧密期間が1日より長くなると、荷重増分比 $\Delta\sigma/\sigma$ の減少により二次圧密係数 C_α が減少する。特に、荷重増分比 $\Delta\sigma/\sigma$ が1/4以下の C_α は荷重増分比 $\Delta\sigma/\sigma$ の減少とともに著しく減少する。
- 3) 圧密層内で平均的に二次圧密が発生し始める時間は、対数軸上で二次圧密直線部を延長した直線が横軸(圧密量ゼロ)と交差する時間 t_0 で判断できる。 t_0 以前に二次圧密が発生していても極めて小さいと考えられる。
- 4) 荷重増分比 $\Delta\sigma/\sigma$ の減少は、二次圧密開始時間 t_0 を大きく

遅れさせると同時に二次圧密量も減少させる。すなわち、荷重増分比の減少は一次圧密中の二次圧密量を減少させて t_0 を増加させ、圧密量-時間曲線の形状に影響を与える。二次圧密を含む一次元圧密解析から得られた結果は、次のように要約される。

- 5) 二次圧密は一次圧密中から時間の対数に比例して発生するとして一次圧密と二次圧密を個別に計算し、これを足し合わせる簡便な計算方法に二次圧密開始時間 t_0 を取り入れることで、形状の異なる圧密量-時間曲線を得ることができる。
- 6) 二次圧密開始時間 t_0 を取り入れることは、荷重増分比の異なる圧密量-時間曲線を再現する上で有効である。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) 今井五郎：粘土の圧密機構 一原論一，わかりやすい土質力学原論，土質工学会，pp.45-91，1987.
- 4) Leonards, G.A. and A.G. Altchaeffl : Compressibility of clay, Proc. of ASCE, Vol.90, SM5, pp.133-155, 1964.
- 5) Wahls, E. : Analysis of primary and secondary consolidation, Proc. of ASCE, Vol.88, SM6, pp.207-231, 1962.
- 6) 安川郁夫，嘉門雅史：粘性土の二次圧密における荷重条件の影響，土質工学会論文報告集，Vol.27, No.2, pp.93-106, 1987.
- 7) Imai, G: Analytical examinations of the foundations to formulate consolidation phenomena with inherent time-dependence, IS-Hiroshima'95, Keynote Lecture 2, pp.75-120, 1995.
- 8) 白子博明，廖紅建，杉山太宏，赤石勝：低盛土による軟弱地盤の一次元圧密，東海大学工学部紀要，Vol.36, No.2, pp.85-90, 1996.
- 9) 白子博明，杉山太宏，外崎明，赤石勝：荷重増分比の一次元圧密特性への影響，土木学会第56回年次学術講演会講演概要集 (CD-ROM)，pp.312-313, 2001.
- 10) 白子博明，杉山太宏，五十畑修，赤石勝：荷重増分比と二次圧密，第38回地盤工学研究発表会講演集 (CD-ROM)，pp.931-932, 2003.
- 11) 網干寿夫，松田博：粘土の二次圧密と沈下解析，土と基礎，Vol.29, No.3, pp.19-24, 1981.
- 12) 今井五郎：実務における標準的な圧密試験-その役割・今後-，土と基礎，Vol.54, No.2, pp.18-21, 2006.