

飽和粘性土の一次元圧密試験における一次および二次圧密挙動

Primary and Secondary Consolidation Behavior in Oedometer Tests on Saturated Cohesive Soil

清水正喜 Masayoshi SHIMIZU (鳥取大学大学院工学研究科)
谷川大輝 Daiki TANIGAWA (鳥取大学大学院工学研究科)

厚さの異なる供試体に対して、底面間隙水圧および周面摩擦力を測定して一次元圧密試験を実施した。過剰間隙水圧が消散した時点を明確にした上で、二次圧密によるひずみと時間の関係を定式化し、その関係から一次圧密中に生じる二次圧縮量を算定した。実測ひずみ量から二次圧縮量を差し引いて一次圧密によるひずみを求め、その時間的変化挙動をテルツァーギの圧密理論と比較した。過剰間隙水圧消散時間に対する供試体厚さの影響、周面摩擦力の特性、一次圧密によるひずみの挙動に対するテルツァーギの圧密理論の適用性について検討した。

キーワード：圧密試験，二次圧密，一次圧密，粘性土 (IGC : D-5, E-2)

1. はじめに

土は本質的に時間依存的 (viscid) である。飽和土の一次元圧密 (圧縮) 試験において、過剰間隙水圧が消散した後も生じるクリープ変形は、その土の持つ本質的な時間依存的性質に起因するものであると考えられており、二次圧密 (圧縮) と呼ばれている。

二次圧密は過剰間隙水圧の消散過程においても生じると考えるべきであり、実際、クリープ変形を記述できる構成式を用いた圧密理論が多く提案された。いわゆるレオロジーモデルを適用した構成式¹⁾、1次元変形を対象にしたひずみ速度依存型構成式^{2),3),4)}、さらに、2ないし3次元変形問題の数値解析を主眼にした、より一般的な時間依存型構成式がある⁵⁾。

一次元圧密試験は、薄い供試体の圧密特性から現場の粘土層の圧密挙動を予測するために行われる。従って、圧密挙動における供試体高さの影響が明らかにされなければならない。圧密理論の適用性または実験的検証に関わる重要な問題であるといえる。Suklje¹⁾は有効応力とひずみの関係がひずみ速度に応じて一義的であるとするアイソタック (isotache) 理論に基づいて圧密挙動における供試体高さの影響を解析した。アイソタック理論から予測される挙動の妥当性について、実験的⁶⁾あるいは理論的²⁾に検討されてきたが、確たる結論は導かれていないと思われる。

このように、土の本質としての時間依存性を考慮しなければ土の圧密挙動を再現できない。しかし、粘性土地盤の圧密沈下量を予測する実務的な問題においては、主としてその簡便さから、時間依存性を考慮しない Terzaghi の圧密理論が適用されることが多いのが実情であろう。

一次元圧密試験で得られる圧密-時間曲線には二次圧密量が含まれている。Terzaghi の理論は二次圧密現象を考慮していないので、実測圧密曲線そのものから同理論のパラメータ (例えば圧密係数) を決定することには必ず

と限界がある。便法として、実測圧密量から二次圧密量を差し引いて、残りの部分に対して同理論を適用するという考え方がある。本研究はそのような考え方に立っている。

一次元圧密試験における他の重要な課題として圧密リングと供試体周面との摩擦 (周面摩擦) の影響がある。この問題も早くから認識されている⁷⁾が、三笠⁸⁾が指摘したように、標準圧密試験の結果を補正する一般的な方法を確立するに至っていない。

本研究では、飽和粘性土に対して、供試体底面を非排水にして圧密試験を実施した。供試体底面で過剰間隙水圧を測定し、さらに供試体底面に作用する軸方向荷重を測定した。また、供試体高さを3通りに変えて試験した。本論文では、試験結果に基づいて、二次圧密量と一次圧密量を分離し、分離された一次圧密-時間関係に対する Terzaghi 理論の適用性を検討する。また、周面摩擦力の特性と層厚の影響についても考察する。

2. 試料・方法

試料は市販の粉末粘性土 (藤森粘土) の 75 μm ふるい通過分である (表-1)。液性限界の約2倍の含水比で練り返し、大型圧密容器を用いて最大圧密圧力 73kPa で予備圧密した。

予備圧密後、直径 6.0cm で高さが 1.0, 2.0 および 4.0cm の供試体に整形して一次元圧密試験に供した。供試体整

表-1 試料の物理的性質

土粒子密度 (g/cm^3)		2.683
粒度	シルト分 (%)	55
	粘土分 (%)	45
コンシステンシー	液性限界 (%)	57
	塑性限界 (%)	31
	塑性指数	26

形直後の状態を表-2 に示した。間隙比と飽和度が供試体によって異なったが、大型圧密容器での圧密の非均一性や整形作業中に生じた乾燥の影響があると思われる。

表-2 供試体の初期状態

高さ (H_0) (cm)	含水比 (%)	間隙比	飽和度 (%)
1.0	61.1	1.836	89
2.0	59.1	1.608	99
4.0	62.1	1.711	95

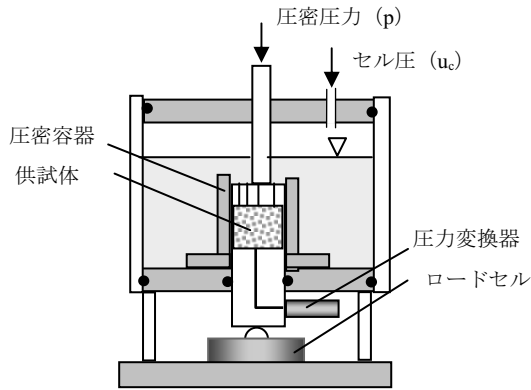


図-1 装置概要

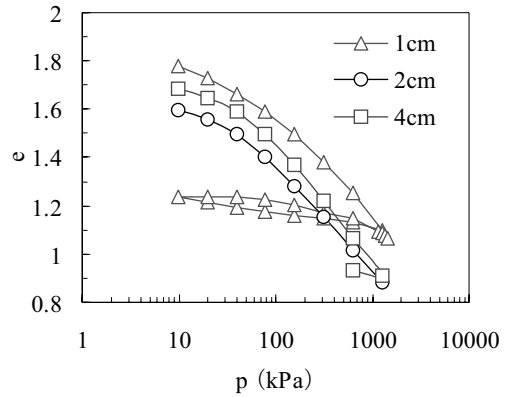
圧密試験に用いた装置の概要を図-1 に示した。圧力セル内で圧密する構造である。供試体の下にある圧密容器の底盤は、ピストン状になっていて、鉛直方向に移動できるが、周囲にOリングを装着して水密性を確保している。底盤の細孔を通して供試体底面の間隙水圧を測定できる。さらに、底盤の下に設置したロードセルで供試体底面に作用する力を測定できる。

図に示した容器全体を標準圧密試験用の荷重装置に設置して、標準的な方法で段階的に荷重した。即ち、荷重増分比1、各段階荷重時間1440分の段階荷重である。ただし、圧密圧力 $p=1256\text{kPa}$ まで荷重した後、除荷および再荷重を行った。本論文では初めての荷重過程の結果のみを対象とする。飽和度を高める目的で背圧としてセル圧 $u_c=100\text{kPa}$ を作用させた。

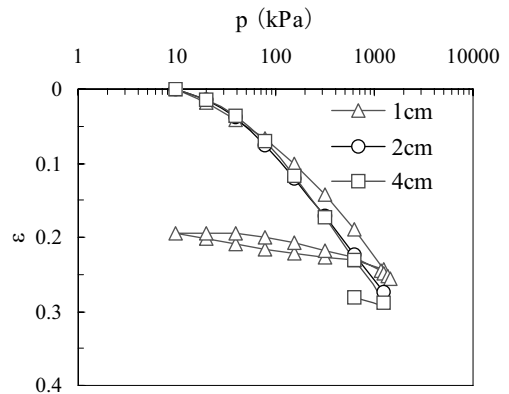
3. 結果と考察

3.1 圧縮曲線

図-2(a)と(b)に圧縮曲線を示す。(a)は間隙比で、(b)はひずみで表したものである。先に指摘したように供試体の初期間隙比が供試体によって異なった(表-2)。その影響で同じ荷重段階で間隙比が異なっている。ひずみは $p=9.8\text{kPa}$ での圧密が終了したときを基準とし、公称ひずみで表現した。図(b)より、初期高さ1cmの供試体の圧縮性が他の2つに比べて小さいことがわかる。これは、初



(a) 間隙比



(b) ひずみ

図-2 圧縮曲線

期の飽和度が他の供試体に比べて低かったことが影響したものと思われる。なお、飽和度が低下すると圧縮性が低下することは不飽和土の1次元圧縮特性に関する従来の研究⁹⁾で指摘されている。

3.2 圧密挙動

例として、圧密圧力 $p=628\text{kPa}$ の段階の間隙水圧の時間的変化挙動を図-3 に示した。どの供試体も間隙水圧は荷重直後から上昇し、最大値に達した後、低下している。過剰間隙水圧が消散した時点をも「+」のマークで示した。また、過剰間隙水圧が消散した時間を t_{EOP} と書く。

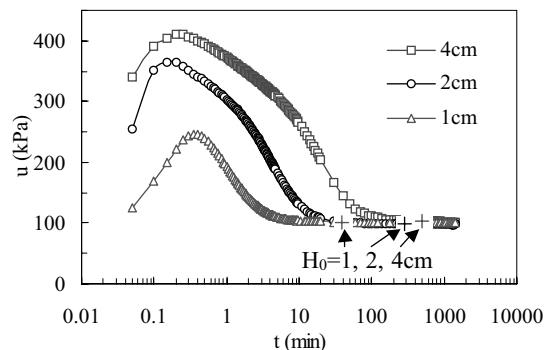


図-3 底面間隙水圧の変化挙動 ($p=628\text{kPa}$)

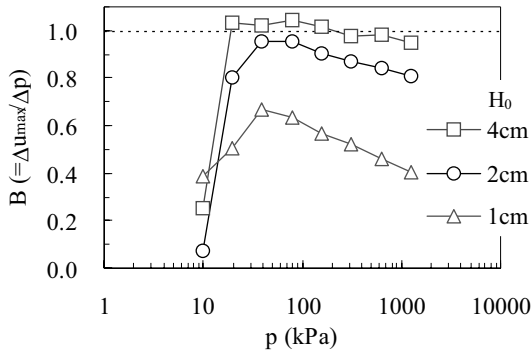


図-4 B値と圧密圧力 p の関係

瞬時载荷しているが間隙水圧は瞬時に最大値に達していない。最大になる時間は供試体によって異なったが大きな違いはない。この例では $H_0=4\text{cm}$ の供試体では 0.2 分、 $H_0=2\text{cm}$ では 0.1 分、 $H_0=1\text{cm}$ では 0.4 分である。ただし間隙水圧の消散は層厚の薄い供試体ほど早い。即ち、 t_{EOP} は供試体高さが小さいほど小さい。このように過剰間隙水圧が瞬時に最大にならなかった理由の一つとして周面摩擦の影響が考えられる。後に示すように、底面軸荷重も時間とともに変動し、それが最大になる時間において過剰間隙水圧が最大になった。即ち、供試体上面に瞬時に作用させた圧力が供試体底面に瞬時に伝わらない。

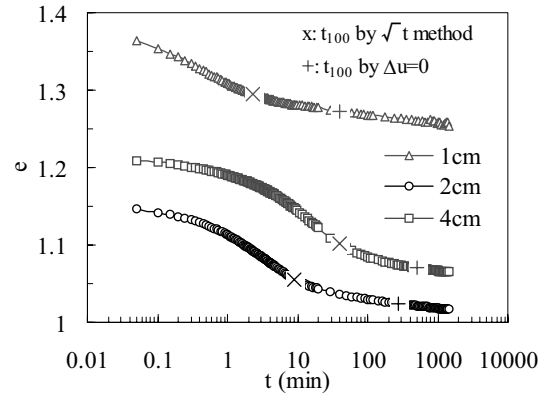
過剰間隙水圧の最大値も供試体によって異なった。過剰間隙水圧の最大値を B 値で表現し、すべての供試体のすべての荷重段階で B 値を算定すると図-4 に示すようになった。どの供試体においても $p=40\sim 80\text{kPa}$ の段階で B 値は最大になり、载荷の段階が進むにつれて低くなっていることが特徴的である。このように B 値の大きさが圧力レベルに依存しており、このことは B 値が圧縮特性と関係していることを示唆している。

$H_0=4\text{cm}$ の試験において $p=19.6\sim 157$ (kPa) の範囲で B 値が 1.0 を超えている。これは測定精度の限界から生じた誤差の影響である。即ち、間隙水圧測定用の圧力変換器の分解能は約 0.25kPa であり、 B 値に換算すると、圧密圧力増分 10kPa に対して 0.025 に相当する。このことを考慮すると $H_0=4\text{cm}$ の試験ではこの p の範囲で B 値はほぼ 1 であると考えられる。

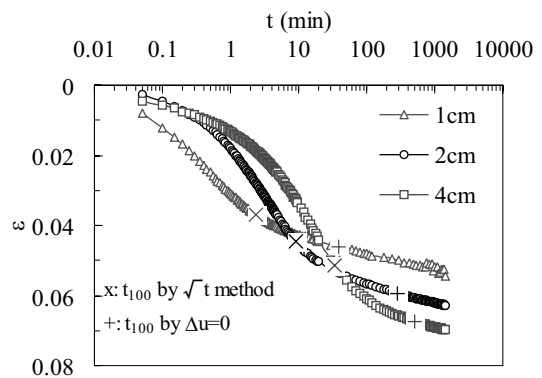
図-5 (a) と (b) は、図-3 と同じ圧密段階における、それぞれ間隙比およびひずみと時間の関係である。過剰間隙水圧消散時点をやはり“+”のマークで示した。また、 \sqrt{t} 法から推定した圧密度 $U=100\%$ に相当する点を“X”で示した。 \sqrt{t} 法では $U=90\%$ のひずみ ε_{90} が決定できるので、それから $U=100\%$ のひずみ ε_{100} ($=\varepsilon_{90}/0.9$) を算定し、実測圧密曲線から ε_{100} に対応する時間を読み取って t_{100} とした。

図-5 より、いずれの供試体も、過剰間隙水圧が消散した後、ひずみが時間の対数に比例して増加（間隙比は減少）していることがわかる。また、 \sqrt{t} 法で推定した t_{100} 以降も過剰間隙水圧がまだ消散していないことがわかる。

過剰間隙水圧消散後の挙動について、いわゆるアイソタク則で予測されるようになっていない。即ち、間隙



(a) 間隙比—時間関係



(b) ひずみ—時間関係

図-5 ひずみで表した圧密曲線 ($p=628\text{kPa}$)

比・ひずみによらず圧密曲線が供試体高さによって明らかに異なっている。間隙比で表した場合、圧密曲線は互いに交わっていないが平行でもない。一方、ひずみで表すと、高さが大きいほど大きな最終ひずみが生じていて圧密曲線が交わっている。

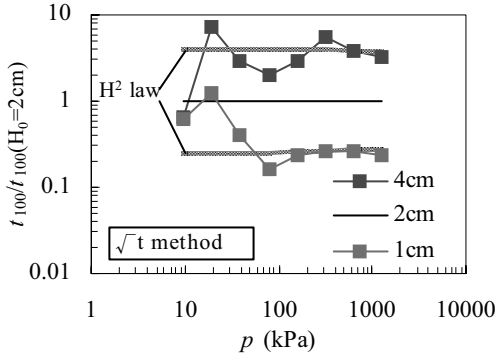
このような挙動は従来の研究で示されたものと異なる。例えば、Aboshi⁶⁾は圧密曲線をひずみで表して供試体高さの影響を調べ、一次圧密終了後の圧密曲線が互いに交わらずに平行になるという結果を示した。

本研究では供試体の初期状態、特に間隙比が異なったことの影響が大きいと考えられるので、用いた試料がアイソタク則に従うかどうかの結論は保留したい。

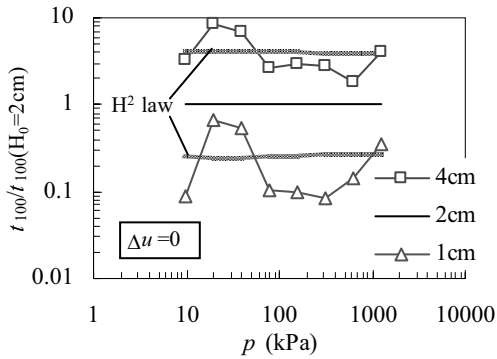
3.3 H^2 則の検証

Terzaghi の圧密理論では圧密時間は層厚の 2 乗に比例して長くなる。このことを検証するために、 \sqrt{t} 法から推定した t_{100} と過剰間隙水圧消散時点 (t_{EOP}) を t_{100} とした各々の場合について層厚の影響を調べた。結果を図-6 (a) と (b) に示す。 $H_0=2\text{cm}$ における t_{100} に対する $H_0=1$ および 4cm における t_{100} の比を p に対してプロットした。

\sqrt{t} 法では (図 (a)), $H_0=4\text{cm}$ の場合も $H_0=1\text{cm}$ の場合も正規圧密状態で圧密圧力の大きい段階で H^2 則がほぼ成り立っている。一方、過剰間隙水圧消散時点から決定し



(a) \sqrt{t} 法から推定した t_{100}



(b) 過剰間隙水圧測定から求めた t_{100}

図-6 H²則の検証

た t_{100} に対しては (図(b)), H² 則が成り立っていない。やや詳細に見ると, t_{100} は過圧密の領域では H² 則で予想されるより小さく, 正規圧密の領域では大きい傾向がある。過剰間隙水圧に基づく t_{100} は, 過剰間隙水圧がどの時点で消散したかを見なすかによってその値が変わる (図-3 参照)。このことも図-6(b)の結果に影響している可能性がある。

\sqrt{t} 法ではひずみのデータに基づいて t_{100} を決定した。一方, 過剰間隙水圧消散時間は間隙水圧のデータに基づいている。このように t_{100} を算定するにあたり使用したデータが異なるので注意しなければならないが, 少なくとも正規圧密の圧密圧力の大きい段階では二次圧密量を含んでいるはずの測定ひずみが Terzaghi の理論で予測し得る可能性を示唆している。

3.4 二次圧密モデル

ひずみ (ε) と時間の対数 ($\log t$) で表した圧密曲線において, $t \geq t_{EOP}$ における直線部分の傾きを C_α とおくと, 直線の式は

$$\varepsilon - \varepsilon_{EOP} = C_\alpha \log_{10} \left(\frac{t}{t_{EOP}} \right) \quad (1)$$

となる。自然対数で表すと

$$\varepsilon - \varepsilon_{EOP} = \alpha \ln \left(\frac{t}{t_{EOP}} \right) \quad (2)$$

ここに

$$\alpha = \frac{C_\alpha}{\ln 10} \approx 0.434 C_\alpha \quad (3)$$

式(1)の左辺は, $t \geq t_{EOP}$ において生じたひずみであり, 二次圧密によるものである。 t_{EOP} 以前, 即ち $0 < t < t_{EOP}$ においても二次圧密によるひずみが発生することを考慮するために, より一般的な形で表さなくてはならない。 $t \leq t_{EOP}$ において生じる二次圧密によるひずみも式(1)または式(2)の特性 (α 一定) を有すると仮定する。式(2)を時間で微分して

$$\dot{\varepsilon}_s = \frac{\alpha}{t} \quad (4)$$

添え字の s は二次圧密を意味する。 $t=t_0$ のとき $\varepsilon_s=0$ の条件で式(4)を積分すると

$$\varepsilon_s = \alpha \ln \left(\frac{t}{t_0} \right) \quad (5)$$

ここに t_0 は二次圧密が発生し始める時間である。本研究ではこの式を用いて二次圧密によるひずみを算定する。

本研究の二次圧密モデル (式(5)) と Sekiguchi ら³⁾のモデルの関係を明らかにするために, 式(4)を移行方程式に変換する。式(5)から

$$t = t_0 \exp \left(\frac{\varepsilon_s}{\alpha} \right) \quad (6)$$

式(6)を式(4)に代入すると

$$\dot{\varepsilon}_s = \frac{\alpha}{t_0 \exp \left(\frac{\varepsilon_s}{\alpha} \right)} \quad (7)$$

さらに, 式(7)を変形して ε_s を表す式に直すと

$$\varepsilon_s = \alpha \ln \left(\frac{\alpha/t_0}{\dot{\varepsilon}_s} \right) \quad (8)$$

α/t_0 は $t=t_0$ における二次圧密速度を表していることが式(4)からわかる。 $t=t_0$ における二次圧密速度を $\dot{\varepsilon}_{s0}$ とおくと, 式(8)は式(9)のように表せる:

$$\varepsilon_s = \alpha \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}_{s0}}{\dot{\varepsilon}_s} \right) \quad (9)$$

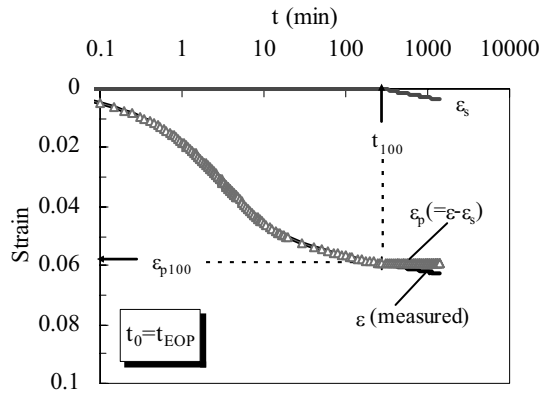
ここに

$$\dot{\varepsilon}_{s0} = \frac{\alpha}{t_0} \quad (10)$$

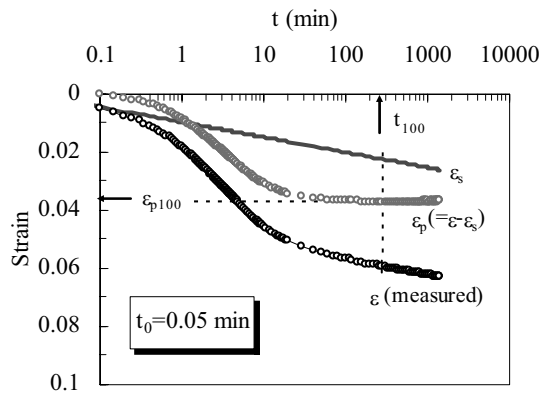
式(9)は, Sekiguchi ら³⁾によるクリープひずみと同じである。同モデルを用いて計算する際に初期ひずみ速度の値をいかに決定するかが問題であろう。それは, 式(10)から明らかのように, t_0 の値をどのように設定するかという問題と同義である。観点を変えれば, t_0 の値を変えることによって最適な二次圧密モデルを設定できることになる。

3.5 モデルによるひずみの挙動

$t_0 = t_{EOP}$ とおくと, $t < t_{EOP}$ において二次圧密が生じないと



(a) $t_0=t_{EOP}$ の場合



(b) $t_0=0.05\text{min}$ の場合

図-7 実測圧密曲線と一次および二次圧密曲線
($H_0=2\text{cm}$, $p=628\text{kPa}$)

仮定することと同義である。一方、 $t_0 < t_{EOP}$ とおくと $t < t_{EOP}$ においても二次圧密が生じると仮定したことになる。この二つの仮定に基づいて二次圧密量を算定した。

式(5)は二次圧密によるひずみを推定するための一つのモデルである。実測ひずみからモデルによる二次圧密量を引くことによって一次圧密量を求めることができる。このようにして求めた一次圧密量をモデルによる一次圧密量と呼び、 ϵ_p と書く。

$$\epsilon_p = \epsilon - \epsilon_s \quad (11)$$

実測ひずみ (ϵ) とモデルによる二次および一次圧密ひずみ量の時間的変化の一例を図-7 に示す。 $H_0=2\text{cm}$ の試験の $p=628\text{kPa}$ の段階の結果であり、モデルは $t_0=t_{EOP}$ および $t_0=0.05\text{min}$ として計算した。

$t_0=t_{EOP}$ の場合 (図-7(a)), $t < t_{EOP}$ で $\epsilon_p = \epsilon$ であり、 $t > t_{EOP}$ で ϵ_s が生じている。 $t_0=0.05\text{min}$ の場合 (図-7(b)), ϵ_s は図に示した最初の時間 (=0.1min) から生じているが、初期の時間 ($t < 1\text{min}$) において ϵ_s が ϵ_p より大きいという奇異に見える結果になっている。 t_0 を 0.05min として機械的に計算したためであって、 t_0 の値を適宜大きくすればそのような結果を回避できる。

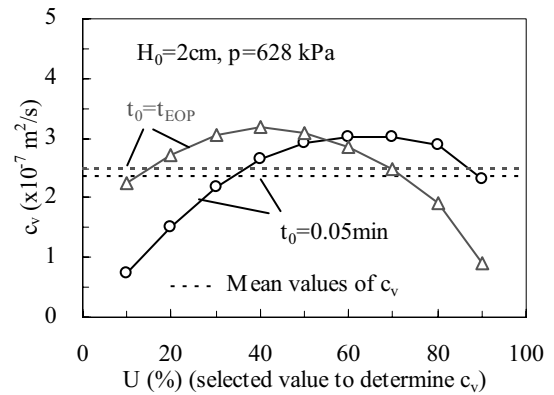


図-8 ϵ_p-t 関係から決定した圧密係数 c_v と決定時に選択した圧密度 U の関係。

3.6 一次圧密よりひずみ：モデルと理論の比較

モデルによる一次圧密量、即ち、式(11)で推定した一次圧密量 ϵ_p の挙動と Terzaghi の圧密理論を比較する。

はじめに圧密係数の決定方法を述べる。

ϵ_p-t 関係から、過剰間隙水圧消散時間 ($t=t_{EOP}$) に相当するひずみ、即ち、圧密度 100%のひずみ (ϵ_{p100}) を求めることができるので、任意の圧密度 U に対応するひずみ $\epsilon_p(U)$ と対応する実時間 $t(U)$ を決定できる。ここに、

$$\epsilon_p(U) = \epsilon_p(100) * U / 100 \quad (12)$$

一方、理論から圧密度 U に対応する時間係数 $T_v(U)$ が与えられるので圧密係数 c_v を次式で決定することができる。

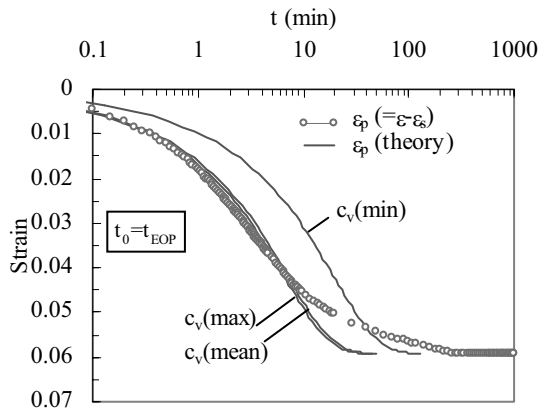
$$c_v = \frac{T_v(U) H^2}{t(U)} \quad (13)$$

ここに H は最大排水距離である。この方法では c_v を機械的にかつ簡単に、また、主観が入ることなく決定できる。

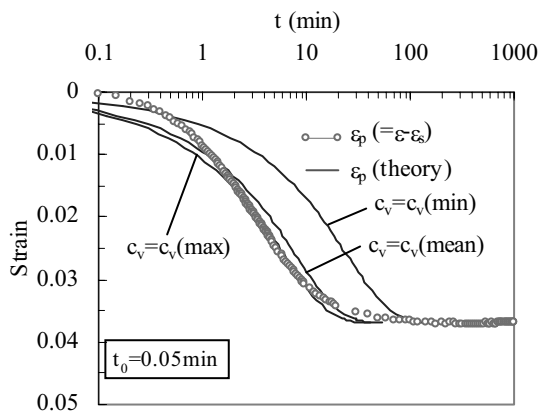
ただし、実測圧密曲線が基本になっているので選択する圧密度によって c_v の値は異なる。実際、 $H_0=2\text{cm}$ の $p=628\text{kPa}$ の段階を例にとると図-8 のようになる。 c_v の最大値と最小値は、 $t_0=t_{EOP}$ の場合約 3 倍、 $t_0=0.05\text{min}$ の場合約 4 倍の違いが生じた。それぞれの場合において平均値を破線で示した。

図-9 は、一次圧密量 (ϵ_p) と理論圧密曲線を比較したものである。理論曲線は圧密係数の代表値 (上述の最大、平均、最小値) に対して計算した。 $t_0=t_{EOP}$ の場合では、圧密係数の最大値と平均値を用いた理論曲線はモデルの挙動をよく表しているが、圧密度 70%以上ではひずみを過大に評価している。一方、 $t_0=0.05\text{min}$ とした場合では、圧密係数の最大値と平均値を用いると、圧密初期ではひずみを過大に評価しているが全体として再現できている。いずれの場合でも c_v の最小値を用いると任意の時間でひずみを過小に評価している。

図-9 の結果から、 t_0 のとり方によってモデルの一次圧密曲線と理論曲線との関係が変わることがわかる。理論に最も適合する t_0 が存在し、それを探求することは可能であるが、それは本論文の目的ではない。よって、ここでは $t_0=t_{EOP}$ の場合と $t_0=0.05\text{min}$ の場合についてのみ比較



(a) $t_0 = t_{EOP}$ の場合



(b) $t_0 = 0.05 \text{ min}$ の場合

図-9 一次圧密によるひずみ ϵ_p と理論の比較

するに留める。

Terzaghi 理論に設けられた仮定が実際に供試体内部で満たされているかどうか検討する。理論では载荷直後 ($t=0$) において過剰間隙水圧 Δu が最大でかつ供試体高さ方向で一定であるという初期条件の下で解が求められている。一方、実供試体では図-3 に示したように $t=0$ において底面で Δu が最大にならず、 Δu が最大になる時間は供試体高さ方向で異なると予想される。よって $t=0$ で Δu が高さ方向で一定という条件は満たされない。このように、供試体内部で生じている条件は理論の仮定と異なる。この影響を評価することは容易でなく今後の研究に待たなければならない。

4. 周面摩擦の評価

本研究では、供試体底面に作用する力を底盤下部のロードセルによって測定しているため周面摩擦力の大きさを推定することができる。

周面摩擦力は時間とともに変動する。図-10 に $p=628 \text{ kPa}$ の段階において、ロードセルによって測定された力を供試体断面積で除した量 (底面軸荷重; f_b) の時間的変化を示した。底面軸荷重は圧密荷重を载荷した後、

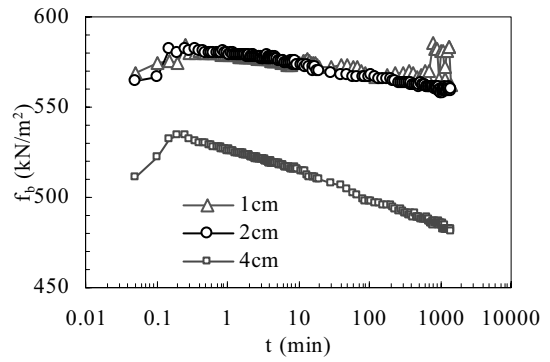


図-10 底面軸荷重の時間的変化 ($p=628 \text{ kPa}$)

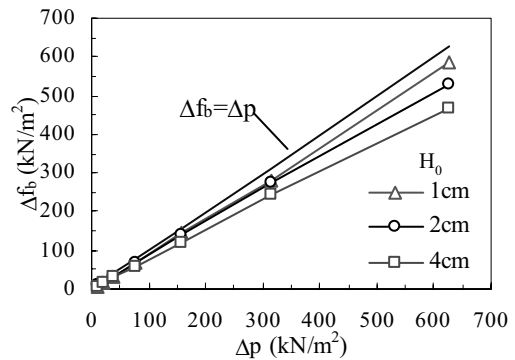


図-11 底面軸荷重増分と圧密荷重増分の関係

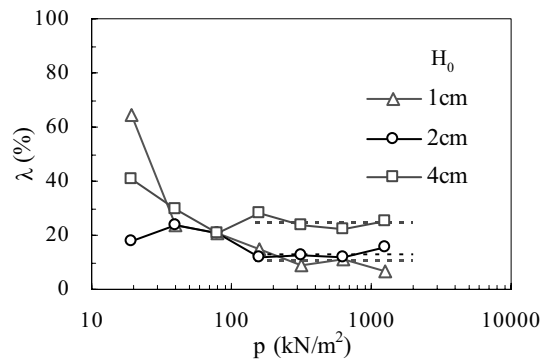


図-12 摩擦による軸荷重損失率と圧密荷重の関係 (点線は正規圧密領域での λ の平均値)

約 0.2~0.4 分経過した時に最大値を示しそれ以降徐々に低下している。底面軸荷重が最大になった時間は過剰間隙水圧が最大になった時間と符合している (図-3 参照)。

図-11 に、各圧密段階における圧密圧力 p の増分 Δp と底面軸荷重 f_b の増分 Δf_b を比較した。 Δp と Δf_b の差が周面摩擦に起因する。なお、 f_b は各圧密段階で時間的に変動するので、次の段階に移る直前の値をとっている。また、図-12 に次式で定義した摩擦による損失率 λ を示した。

$$\lambda = \frac{\Delta p - \Delta f_b}{\Delta p} \quad (14)$$

これらの図より、初期の圧密段階では周面摩擦力と供試体高さの関係に一定の傾向を読み取ることができない

が、正規圧密領域での段階では供試体高さが高いほど周面摩擦力が大きいという傾向を読み取ることができる。正規圧密領域での平均的な損失率 λ は、 $H_0=4\text{cm}$ の場合に約 25%、 2cm の場合約 13%、 1cm の場合約 10% になった。このように、正規圧密の段階で載荷圧力増分の 10~25% が周面摩擦力として失われることがわかった。

5. 結論

過剰間隙水圧を測定して圧密試験を実施すれば、過剰間隙水圧消散時点 t_{EOP} を明確にできる。

過剰間隙水圧消散時点 t_{EOP} が明確になると一次・二次圧密量を分離することができる。本研究では $t > t_{EOP}$ で測定される二次圧密の挙動を二次圧縮速度 C_α で評価して二次圧密のモデルを作成した。モデルに基づいて $t < t_{EOP}$ における二次圧密量 ε_s を算定し、測定ひずみ量から ε_s を引いてモデルによる一次圧密量 ε_p を算定した。

モデルによる一次圧密量 ε_p の時間的変化に Terzaghi の理論を適用した。モデルでは圧密度と実時間の関係が既知であるので任意の圧密度に対応して圧密係数を機械的に決定できる。圧密係数は決定のために選択した圧密度によって異なるが、最大値または平均値を用いると一次圧密モデルの挙動を再現できることがわかった。よってモデルの一次圧密挙動は Terzaghi の理論で十分説明できると言える。

本研究では周面摩擦力を測定した。

周面摩擦力は時間的に変動し、そのため、供試体上面に作用させた圧密荷重は瞬時に底面に作用しない。この影響のため底面過剰間隙水圧は瞬時に最大にならない。

周面摩擦力は、低い荷重段階では供試体高さとの間に一定の傾向を読み取ることができなかったが、正規圧密段階では、供試体高さが大きいほど大きくなる傾向を示した。正規圧密段階で載荷圧力増分の 10~25% が周面摩

擦力として失われるという知見を得た。

参考文献

- 1) Šuklje, L.: Rheological Aspects of Soil Mechanics, John Wiley & Sons Ltd., pp.151-222, 1969.
- 2) 今井五郎：粘土の圧密機構－原論－，わかりやすい土質力学原論，土質工学会，pp.45-91，1987.
- 3) Sekiguchi, H. and Toriihara M.: Theory of one dimensional consolidation of clays with consideration of their rheological properties, Soils and Foundations, Vol.16, No.1, pp.27-44, 1976.
- 4) 白子博明，杉山太宏，外崎明，赤石勝：一次圧密中に発生する二次圧密の推定，土木学会論文集 C，Vol.64，No.3，pp.565-570，2008.
- 5) Sekiguchi, H. and Ohta, H.: Induced anisotropy and time dependency in clays, Proc. 9th ICSMFE, Specialty Session 9, pp.229-237, 1988.
- 6) Aboshi, H.: An experimental investigation on the similitude in the consolidation of a soft clay, including the secondary creep settlement, Proc. 8th ICSMFE, Vol.4, No.3, pp.88-89, 1973.
- 7) Monden H.: One-dimensional consolidation affected by side friction, Soil and Foundation, 9 (1), pp.42-74, 1969.
- 8) 三笠正人：総括（圧密試験の問題について），第 19 回土質工学シンポジウム－圧密試験法とその結果の解釈－，昭和 49 年度発表論文集，pp.37-46，1974.
- 9) 例えば，清水正喜，福田尚弘，田原志典：不飽和土の 1 次元圧縮特性に及ぼす応力径路の影響，第 40 回地盤工学研究発表会発表講演集，pp.867-868，2005.

(2009 年 6 月 29 日 受付)

