

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

清水 正喜・谷川 大輝
鳥取大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻土木工学コース

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

Masayoshi SHIMIZU, Daiki TANIGAWA
Civil Engineering Course, Department of Management of Social Systems and Civil Engineering,
Graduate School of Engineering, Tottori University
Tottori, 680-8552 Japan
E-mail: mshimizu@cv.tottori-u.ac.jp

Abstract: A series of oedometer tests were conducted on saturated cohesive soil. The height of specimen was varied as 1, 2 and 4cm. At the specimen's bottom, pore-water pressure was measured to judge the time at which the primary consolidation ends, t_{EOP} . and vertical load was also measured to estimate the friction mobilizing on the side surface of the specimen. The primary and secondary consolidation strains developing before t_{EOP} were estimated based on the secondary compression rate, C_{α} , which was determined from the strain vs. time relationships after t_{EOP} . The estimated primary consolidation strain was compared with the strain predicted by Terzaghi's theory of consolidation.

Key Words: Primary consolidation, Secondary compression, Side friction, Terzaghi's theory, Saturated cohesive soil,

1. はじめに

飽和粘性土の一次元圧密試験を行った。供試体の厚さを 4 cm, 2 cm, 1 cm と変えて、さらに軸変位以外に、底面における軸荷重と間隙水圧を測定した。底面軸荷重は圧密リングと供試体との摩擦を評価するために測定した。また、間隙水圧は一次圧密終了時間を判定するのに利用した。

本研究では、過剰間隙水圧消散後の挙動から二次圧縮速度 C_{α} を決定し、それに基づいて過剰間隙水圧消散前の一次圧密および二次圧密量を推定した。さらに Terzaghi の圧密理論を適用して、一次圧密量の推定値と比較する。

2. 試料および供試体作製方法

繰り返し再圧密した飽和粘性土試料（藤森粘土）を使用した。大型圧密容器で最大圧密圧力 73kPa で予備圧密したものである。表 1 と図 1 に試料の物理的性質を示す。試料を直径 6cm, 厚さ (H_0) を 1, 2 および 4cm の供試体に整形した。

3. 試験装置および試験方法

図 2 に試験装置の全体図を示す。この試験装置を標準圧密試験機に設置し、上面排水・底面非

排水の条件で圧密を行った。

セル圧 100kPa を作用させ、圧密荷重を 9.8 から 1256(kPa)まで荷重増分比 1 で段階的に载荷した。圧密荷重 (図 1 参照) を供試体断面積で除した値

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 (%)	55.5
	粘土分 (%)	45.5
コンシステンシー	液性限界 (%)	56.7
	塑性限界 (%)	31.1
	塑性指数 (%)	25.6

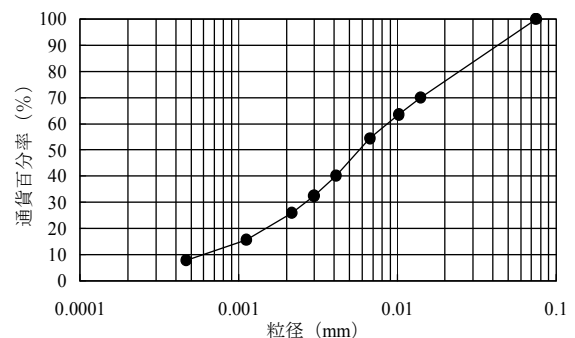


図 1 粒径加積曲線

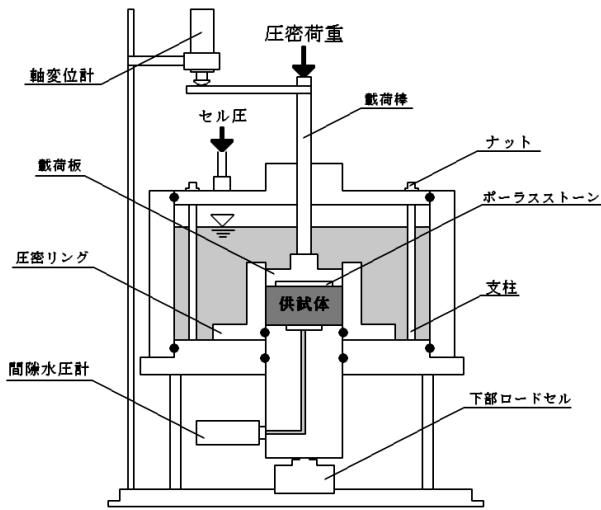


図2 試験装置

を圧密圧力 (p) と呼び、圧密の段階を識別する。セル圧 100kPa を作用させると載荷棒に約 3kPa 分の上向きの力が生じる。従って、正味の圧密圧力は p より約 3kPa 小さい。必要に応じて正味の圧密圧力を p_r と書く。

圧密時間は、各段階で 24 時間である。

4. 試験結果および考察

4.1 間隙水圧の挙動

図 3 (a) ~ (c) に間隙水圧と時間の関係を示す。代表的な例として、 $p=9.8$, 39.2 および 314 (kPa) の段階を示す。下に述べるように例外はあるが、間隙水圧は載荷 ($t=0$) 後、一旦上昇し、その後低下する。この挙動から、過剰間隙水圧が消散したと判断した時間 (t_{EOP}) を決定した (図にはマークで示した)。

$p=9.8$ kPa ($H_0=1$ cm) において、圧密荷重を載荷する前、間隙水圧がセル圧より低く、圧密荷重を載荷した時、間隙水圧はまだ上昇中であつた。また、すべての圧密段階で $H_0=4$ cm の場合に間隙水圧の上昇速度が遅い傾向が見られた。

これらの現象を考慮すると、間隙水圧測定経路のフラッシングが不十分であつた可能性が考えられる。フラッシングは、供試体底面に設置したポーラスストーンと、その下の圧力変換器につながる細孔を脱気することと混入した異物を排除するために行う。

$H_0=1$ cm の試験の $p=9.8$ kPa の段階と $H_0=4$ cm の試験で上記の影響が大きかったと思われる。その結果、特に、 $H_0=1$ cm の $p=9.8$ kPa の場合に t_{EOP} を決定できなかった。

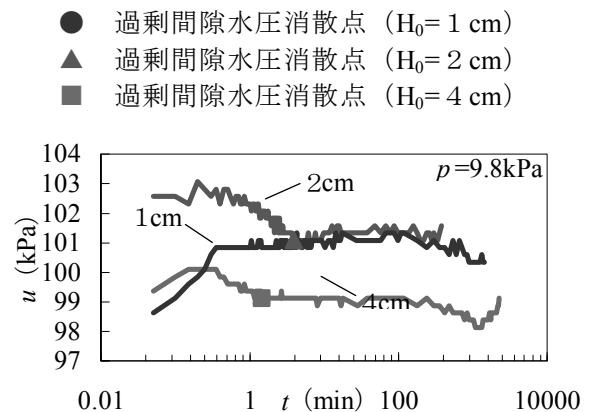
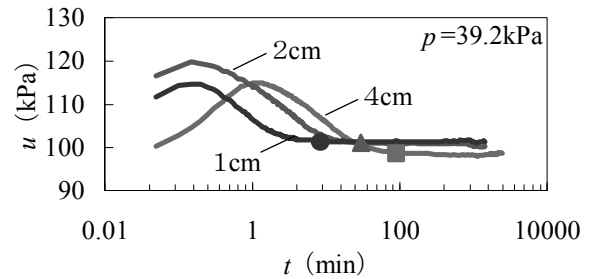
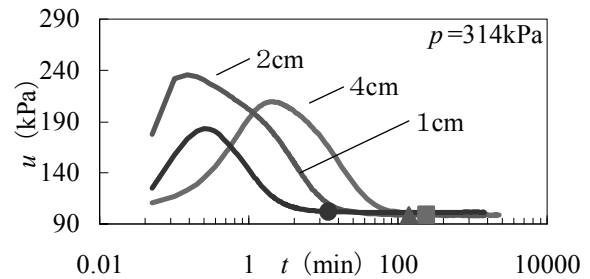
(a) $p=9.8$ kPa(b) $p=39.2$ kPa(c) $p=314$ kPa図3 $u - \log t$ 関係

図 3 において、過剰間隙水圧は圧密圧力の増分と同じだけ上昇していない。これは載荷と同時に圧密が進行し、過剰間隙水圧が減少していくためである。

図 4 に過剰間隙水圧の最大値 (Δu_{max}) と圧密圧力増加分 (Δp) の比 (B 値) と圧密圧力の関係を示す。 $p=40$ kPa の段階で B 値が最大になり、それ以降は、 p の増加とともに低下する傾向にある。

図 5 に各供試体厚さ H_0 における圧密圧力 (p) と t_{EOP} の関係を示す。

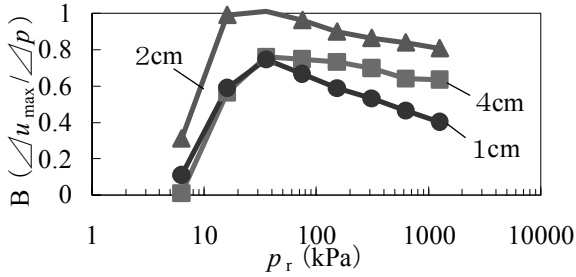


図4 B値 - log p 関係

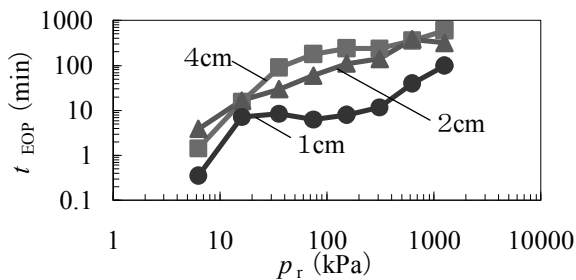


図5 t_EOP - log p 関係

この図から、どの圧密段階においても供試体厚さが小さいほど、過剰間隙水圧の消散が早いことがわかる。これは、供試体厚さが小さいほど最大排水距離が短いからである。

また、各供試体厚さ H_0 に対して、 p が大きくなるほど、 t_{EOP} は大きくなっている。

図6に、 t_{EOP} を \sqrt{t} 法で求めた t_{100} と比較した。 \sqrt{t} 法で求めた t_{100} を t_{EOP} で除した値を供試体毎に示している。ここで、供試体厚さ 1cm の $p = 9.8\text{kPa}$ の段階では、先に述べた理由により正確な t_{EOP} を決定できなかったため、図示していない。

図から、どの荷重段階でも t_{100} (\sqrt{t} 法) $< t_{EOP}$ の関係にあることがわかる。また、荷重が大きくなるにつれて、その差が大きくなっている。

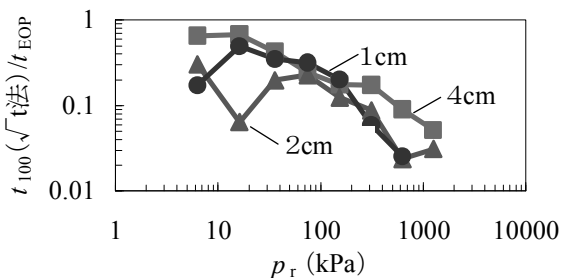


図6 t_EOP と t_100 (sqrt t 法) の比較

4.2 ひずみの挙動

図7 (a) ~ (h) にひずみと時間の関係を示す。同じ圧密圧力に対して、厚さの異なる各供試体の挙動を比較している。どの荷重段階においても過剰間隙水圧が消散した時点のひずみ (ϵ_{EOP}) は供試体厚さによって異なった。正規圧密状態 ($p \geq 157\text{kPa}$) では、供試体厚さが大きいほど ϵ_{EOP} が大きくなる傾向が見られる。このことは、一次圧密中においても二次圧密が起こっている可能性を示唆している。

$t > t_{EOP}$ での挙動を見ると、どの荷重段階においても供試体厚さに関わらず、ひずみは時間の対数に対して直線的に変化している(増加している)ことがわかる。

4.3 Terzaghi の圧密理論との比較

(1) 二次圧密特性

$t > t_{EOP}$ において発生したひずみはすべて二次圧密によるひずみ ϵ_s であり、4.2で指摘したように ϵ_s は

$$\frac{d\epsilon_s}{d \log t} = C_\alpha \quad (1)$$

の関係に従って変化すると仮定することができる。 $t \geq t_0$ において二次圧密が生じると考えて、式(1)を $t = t_0$ において $\epsilon_s = 0$ の初期条件の下で積分すると

$$\epsilon_s = C_\alpha \cdot \log \frac{t}{t_0} \quad (2)$$

となる。

(2) 仮定

一次圧密量 ϵ_p を

$$\epsilon_p = \epsilon - \epsilon_s \quad (3)$$

として評価する。ここに ϵ は実測ひずみである。

さらに、下の2つの仮定を設けて、それぞれの仮定の下で一次および二次圧密量を推定した。

仮定1: $t_0 = t_{EOP}$ と仮定する、即ち、 $t < t_{EOP}$ において二次圧密が生じない、従って $t < t_{EOP}$ における実測ひずみ ϵ はすべて一次圧密量であると仮定する。

仮定2: $t_0 < t_{EOP}$ と仮定する。 $t < t_{EOP}$ において、二次圧密が発生する。二次圧密 ϵ_s は式(2)で表わされ、一次圧密量 ϵ_p は式(3)で表わされる。

(3) 仮定1に基づく一次圧密の理論値

実時間 t に相当する時間係数 T_V は

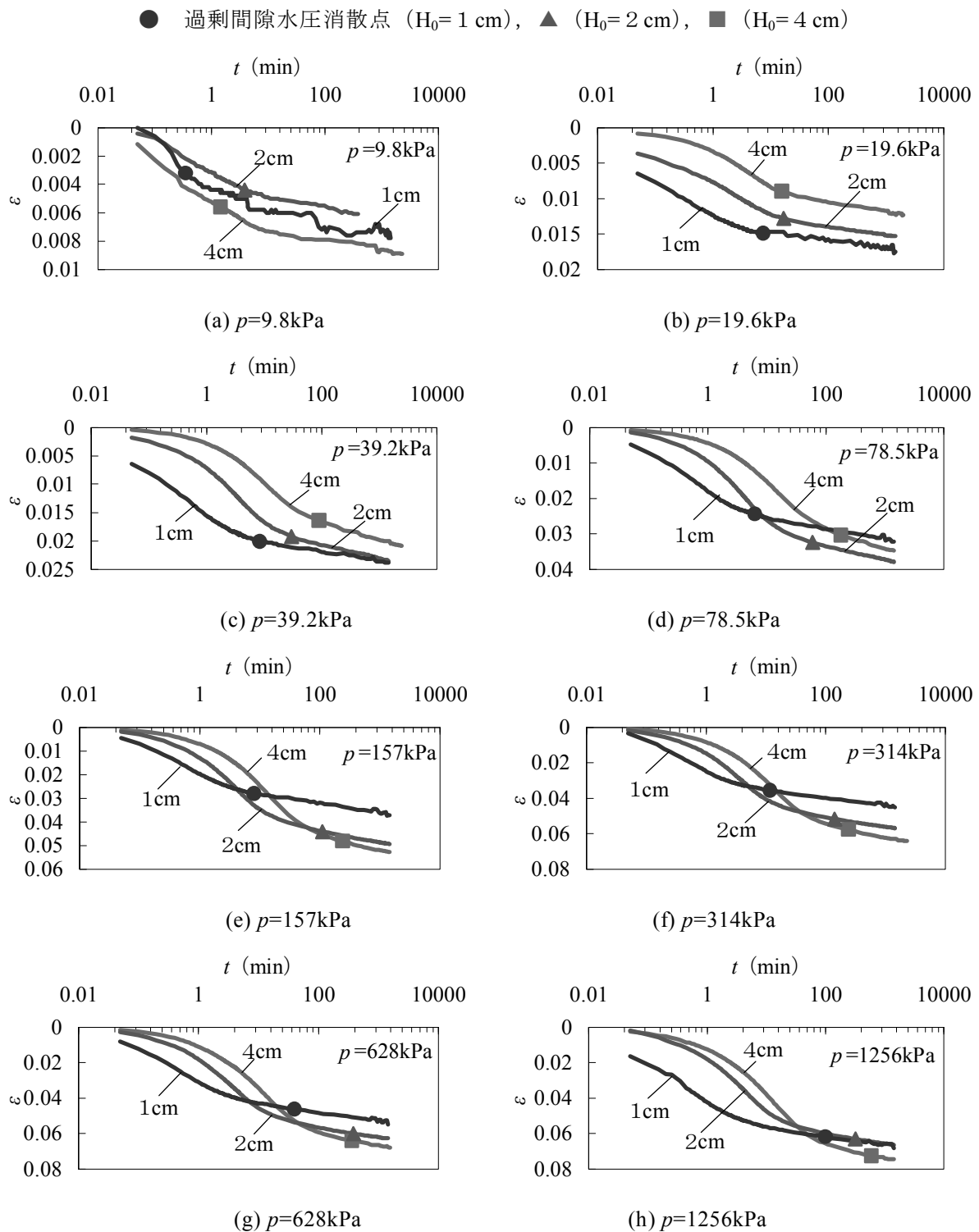


図7 $\varepsilon - \log t$ 関係

$$T_v = \frac{t \cdot H^2}{c_v} \quad (4)$$

で求められる．ここに c_v は実測データに \sqrt{t} 法を適用して求めた圧密係数である． T_v に相当する

圧密度は、理論より、

$$U = 1 - \sum_{m=0}^{\infty} \frac{2}{M^2} \exp(-M^2 \cdot T_v) \quad (5)$$

ここに

$$M = \frac{2m+1}{2}\pi \quad (m=0, 1, 2\cdots)$$

で与えられる。仮定より、 $U=100\%$ に相当するひずみ ε_{100} は

$$\varepsilon_{100} = \varepsilon_{EOP} \quad (6)$$

で与えられる。任意の圧密度 U に対するひずみを ε' とおくと、 ε' は式(6)より

$$\varepsilon' = \varepsilon_{EOP} \cdot U \quad (7)$$

で求められる。

式(4), (5), (7)より、 $\varepsilon'-t$ の理論的關係を求めることができる。

(4) 仮定2に基づく一次圧密の理論値

図8参照を参照する。 ε_p-t 關係より $t=t_{EOP}$ におけるひずみ (ε_{pEOP}) を決定することができるので、 ε_{p90} は

$$\varepsilon_{p90} = \varepsilon_{pEOP} \times 0.9 \quad (8)$$

で求められる。さらに ε_p-t 關係より、 ε_{p90} における実時間 (t_{90}) を推定できるので、 c_v は式(4)より、

$$c_v = \frac{T_{V90} \cdot H^2}{t_{90}} \quad (9)$$

で求められる。実時間 t に相当する時間係数 T_v は式(4)で求められる。 T_v に相当する圧密度は、理論より、式(5)で与えられる。任意の圧密度 U に対するひずみを ε_p' とおくと、 ε_p' は

$$\varepsilon_p' = \varepsilon_{pEOP} \cdot U \quad (10)$$

で求められる。

式(4), (5), (8), (9), (10)より、 $\varepsilon_p'-t$ の理論的關係を求めることができる。

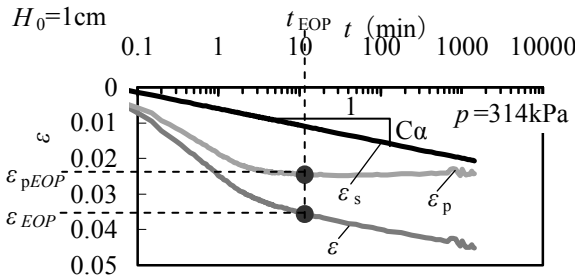


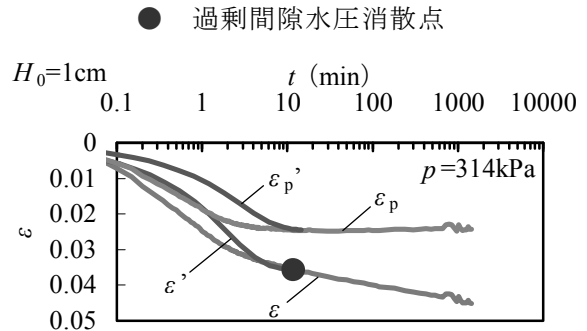
図8 $\varepsilon, \varepsilon_s, \varepsilon_p$ 關係

(5) 結果の比較

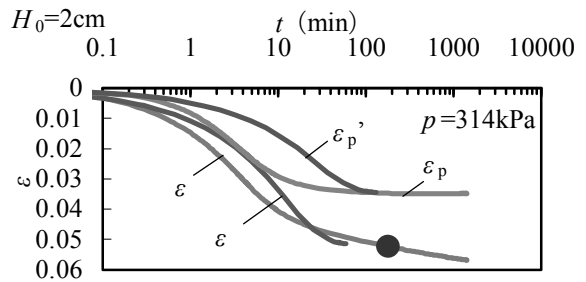
図9(a)~(c)に $p=314\text{kPa}$ (正規圧密状態) における

- 1) 実測 $\varepsilon-\log t$ 關係
 - 2) 仮定1に基づく理論的 $\varepsilon'-\log t$ 關係
 - 3) 仮定2に基づく $\varepsilon_p-\log t$ 關係
 - 4) 仮定2に基づく理論的 $\varepsilon_p'-\log t$ 關係
- を示した。仮定2に基づいて ε_p' を求めるには、 t_0 の値が必要である。図9は t_0 をそれぞれ図キャプションに示したように仮定したものである。

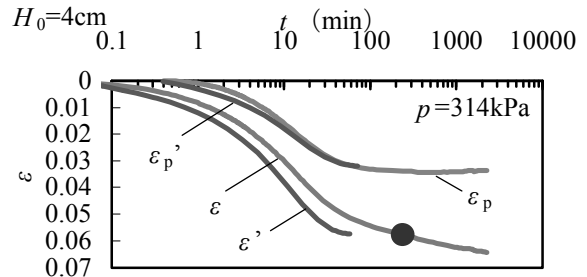
図9において ε と ε' を比べる。 $H_0=1\text{cm}$ と 2cm の場合には、 ε と ε' の挙動が全く異なっている。同じ時間において理論値よりも実測値が大き



(a) $H_0=1\text{cm}$ ($t_0=0.05\text{min}$)



(b) $H_0=2\text{cm}$ ($t_0=0.05\text{min}$)



(c) $H_0=4\text{cm}$ ($t_0=0.4\text{min}$)

図9 $\varepsilon-\log t$ 關係 (理論値との比較, $p=314\text{kPa}$)

いことから、 $t < t_{EOP}$ においても二次圧密が生じていると考えるべきである。 $H_0 = 4\text{ cm}$ の場合には ε と ε' の曲線は似た形状ではあるが、時間が大きく異なっている。このように、一次圧密終了を t_{EOP} で判定してもTerzaghiの理論で実測値を説明できない。

後述するように、供試体厚さが大きいほど周面摩擦が大きくなる。 $H_0 = 4\text{ cm}$ の場合には、周面摩擦の影響が大きいことが関係しているかもしれない。

次に、 ε_p と ε_p' を比べる。 $H_0 = 1\text{ cm}$ と 2 cm の場合には、挙動が全く異なっている。 $H_0 = 4\text{ cm}$ の場合には似た形状ではあるが、時間が若干異なっている。仮定2では、 $t > t_{EOP}$ において生じる二次圧密特性を C_α で評価して、それを $t < t_{EOP}$ に対しても拡張した。このように $t < t_{EOP}$ において生じる二次圧密量を考慮しても、一時圧密量 ε_p の挙動はTerzaghiの理論と異なった。

このことは、仮定の適用性に限界があることを示していると考えられるが、あるいは過剰間隙水圧消散前であってもTerzaghiの理論で説明できない挙動を示すという可能性も否定できない。

4.4 H²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、各荷重段階で t_{90} を供試体間で比較した。 $H_0 = 2\text{ cm}$ の t_{90} を基準にして比で表す。 t_{90} として \sqrt{t} 法によって求めた場合と t_{EOP} の90%の値(t_{90EOP})の場合について、それぞれ、図10および図11に示した。

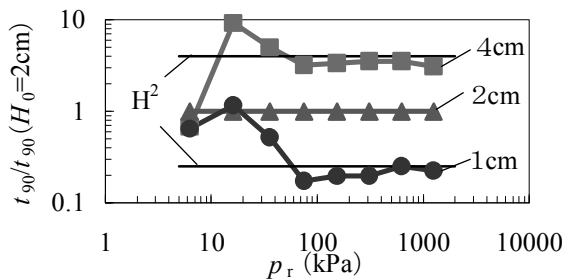


図10 \sqrt{t} 法によって求めた t_{90} による H^2 則の検証

ここで t_{100} ではなくで t_{90} で比較したのは、 \sqrt{t} 法では t_{100} を決定できないからである。また、図中の H_p^2 は、供試体厚さ 2 cm を基準にした場合の各供試体の H^2 則の理論値である。なお、供試

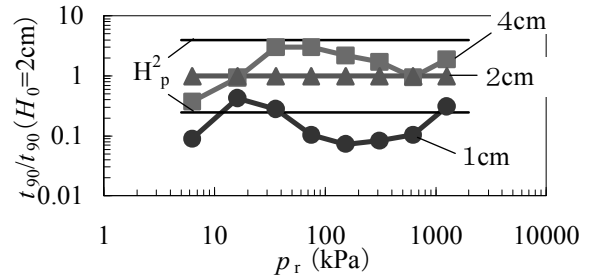


図11 t_{90EOP} による H^2 則の検証

体厚さは初期厚さ H_0 により評価した。

図10より、 \sqrt{t} 法では正規圧密状態に入ると H^2 則はほぼ成立している。 $t < t_{90}$ における実測圧密量はTerzaghiの理論で説明できることを表す。一方、図11において、 t_{90EOP} ではどの段階でも H^2 則が成立していない。このことは過剰間隙水圧の消散時点をと t_{100} とすると t_{100} 以前の挙動がTerzaghiの理論に従わないことを表している。

\sqrt{t} 法は軸変位から t_{90} を求めており、 t_{90EOP} は間隙水圧(消散時間 t_{100})から求めているため、使用しているデータが異なっている。これが H^2 則の検証結果に差が生じた理由と考えられる。

4.5 周面摩擦について

図12に、 $p = 314\text{ kPa}$ における、底面軸荷重の測定値(単位面積当たりの力に換算)からセル圧を引いた値(p_u)と時間の関係を示す。測定値は底面に作用する全応力に相当する。

p_u は H_0 が大きいほど小さくなった。 H_0 が大きいほど供試体周面積が大きいので予想された結果である。ただし、周面摩擦力の大きさ($=p - p_u$)は H_0 に比例していない。

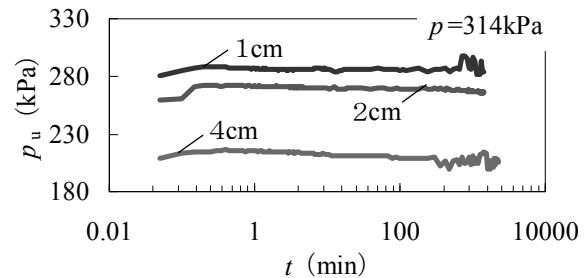


図12 $p_u - \log t$ 関係

図13に p_u の最大値($p_{u\max}$)と p_r の比($p_{u\max}/p_r$)を p に対して示した。この比($p_{u\max}/p_r$)が小さいほど周面摩擦の影響が大きいことを表す。

図より、ほとんどの荷重段階で、 $p_{u\max}$ は p_r よ

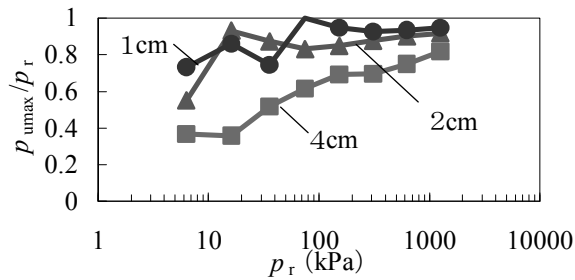


図 13 $p_{u_{max}}/p_r$ 関係

り小さいことがわかる。

試験後に試料がない状態で圧密荷重と底面荷重の関係を調べたが、常に一定の関係にならないことがわかった。これは、圧密容器の底板がピストン状になっており、水密性を確保するためピストン周面に O リングを装着しているためであると考えられる。

しかし、このような装置の構造上の摩擦を考慮したとしても、摩擦力は H_0 が大きいほど大きくなる。

周面摩擦力が H_0 によって異なることは、 t_{EOP} に対して H^2 則が成り立たなかったことのひとつの要因である可能性がある。

また、 $H_0=1\text{cm}$ で $p=80\text{kPa}$ において $p_{u_{max}}/p_r=1$ となり摩擦がなかったと判断されるが、 $p=20$ から 40kPa に载荷したとき、 $p_{u_{max}}/p_r$ の値が下がっているため载荷板等に引っ掛かりが生じ、 $p=80\text{kPa}$ になった時引っ掛かりが外れ、その反動により $p_{u_{max}}/p_r$ が 1 という値にまで上昇したと思われる。

5. 結論

本研究で得られた主な知見をまとめる：

(1) 一次圧密終了時 (t_{EOP}) のひずみ ϵ_{EOP} は、供試体の厚さ (H_0) によって異なった。

(2) 同じ圧密圧力に対して、 t_{EOP} は H_0 が大きいほど大きくなった。

(3) 仮定 1 検証結果から、 $t < t_{EOP}$ での圧密挙動は Terzaghi の圧密理論だけでは評価できない。

(4) 仮定 2 の検証結果から、 $t < t_{EOP}$ で生じる二次圧密特性を、 $t > t_{EOP}$ における二次圧縮速度 C_α で評価するには限界がある。

(5) H_0 が大きいほど、周面摩擦力が大きくなる。しかし、実験機の構造上発生する摩擦が存在し、その摩擦も一定でないため、一定にするまたは小さくする必要がある。

本研究の問題点を挙げ、今後の課題とする：

(1) t_{EOP} を $u - \log t$ 関係から決定するとき主観が入る。

(2) $H_0=1\text{cm}$ と 4cm の試験は間隙水圧の応答がよくない。再現性を確かめるべきである。

謝辞

本研究の一部は第二著者の卒業研究（工学部土木工学科）として実施されたものである。ご指導を賜った榎明潔教授に謝意を表す。また岩成敬介技術職員には技術的なご指導をいただいた。謝意を表す。

(受理 平成 21 年 10 月 7 日)