

# 全圧密量中の二次圧密の仮定とひずみの圧密方程式

飯沼 孝一<sup>\*1</sup> 杜 磊<sup>\*2</sup> 赤石 勝<sup>\*3</sup> 杉山 太宏<sup>\*4</sup>

## Assumption of Secondary Compression in the Total Compression and Consolidation Equation in Terms of Compressive Strain

by

Koichi IINUMA<sup>\*1</sup>, Lei DU<sup>\*2</sup>, Masaru AKAISHI<sup>\*3</sup> and Motohiro SUGIYAMA<sup>\*4</sup>

(Received on Sep.30, 2013 and accepted on Dec.19, 2013)

### Abstract

This paper examines the validity for the assumption for the coefficient of volume compressibility defined by the primary compression and the adaptability of the explicit finite difference method for a one-dimensional consolidation equation in terms of the compressive strain taking account of secondary compression. The consolidation time curves obtained from one-dimensional consolidation tests have been compared with the results of one-dimensional consolidation analysis incorporated with two types of secondary compression models. It is shown that the consolidation time curve of clays is affected by the assumption of the coefficient of volume compressibility defined by the primary compression, and the problem of similitude for the consolidation of clays exhibiting secondary compression depends on not only the constitutive equation of the clay but also the assumption of the soil constants used in the numerical solution.

**Keywords:** One-dimensional consolidation, Secondary compression, Finite difference method

## 1. 緒言

標準圧密試験では、ほとんどの粘性土が1時間以内で圧密度90%に至る。これは、 $\sqrt{t}$ 法のデータシートの圧密時間の目盛が、1時間までであることから明らかで、残りの23時間以上は二次圧密の経時変化を測定していることを暗に示している。しかし、この二次圧密は室内圧密試験の固有の挙動であり、最大排水距離の大きな実際地盤では一次圧密と二次圧密が分離して現れないと考えられている。したがって、慣用的一次元圧密解析では二次圧密は考慮されていない<sup>1),2)</sup>。

土質試験法で定められた標準圧密試験の圧密時間は、24時間である。24時間以降も沈下量を測定すれば、二次圧密は継続するが、次の載荷段階の荷重が載荷される。圧密沈下量の算定に利用される標準圧密試験の $e-\log p$ 曲線、体積圧縮係数あるいは圧縮指数には、二次圧密の影響が含まれている。慣用的設計法では、標準圧密試験の1日後の全圧密量に対応する圧密沈下量が、現場で発生する最終圧密沈下量と考えられているが、その根拠は明らかでない。また、二次圧密は一次圧密終了後に発生するのか、一次圧密中から発生しているのかについても古くから議論のあるところではあるが、今日においても明確な結論は得られていない<sup>3)-6)</sup>。室内圧密試験では一

次圧密量と二次圧密量の和としての全圧密量を測定しており、両圧密量を分離測定できないためである。

軟弱地盤上の高速道路盛土や宅地造成地の現場で、二次圧密に起因すると考えられる長期沈下が報告されている<sup>7)-9)</sup>。二次圧密を考慮した一次元圧密解析に関する多くの研究では、全圧密量は一次圧密量と二次圧密量の和として考えられており、その一次圧密量の算定には24時間後の全圧密量で定義する圧縮指数 $m_v$ が利用されている。そして、二次圧密量の予測には、24時間以内に測定された二次圧密挙動が参考にされる<sup>10)-16)</sup>。しかし、全沈下量には、上述のように測定時間の大半を費やした二次圧密量が含まれているため、 $m_v$ から一次圧密量を求めてこれに二次圧密量を加える方法では、二次圧密量を二重評価することになる。著者らは、二次圧密を考慮した一次元圧密解析における一次圧密量の予測には、一次圧密量で定義した圧縮指数や体積圧縮係数を用いることの重要性を指摘している<sup>17)</sup>。しかし、全圧密量から一次圧密量を分離測定できないため、全圧密量中の一次圧密量は仮定する必要があるが、仮定値の妥当性の検証は難しいと言わざるを得ない。

この論文は、標準圧密試験で測定される全圧密量中の一次圧密量に関するものである。最大排水距離や荷重増分比を変えた粘土の一次元圧密試験結果を利用して二次圧密を考慮した一次元圧密解析を行い、仮定する二次圧密量、あるいは一次圧密量の影響を検討している。二次圧密は一次圧密の初期段階から発生していること、この論文で扱う粘土の一次圧密量は、全圧密量の65%であ

\*1 ㈱オオバ東京支店設計部係長

\*2 工学研究科土木工学専攻修士課程

\*3 東海大学名誉教授

\*4 工学部土木工学科教授

り、一次元圧密解析においては二次圧密挙動を無視できないことを明らかにする。また、この論文の二次圧密考慮した一次元圧密解析では、実務的視点からプログラミングの簡単な三笠のひずみに関する圧密方程式と差分法を用いた。この方法による計算結果は、これまで多くの研究で採用されてきた過剰間隙水圧に関する圧密方程式の差分法や有限要素法による解と差異のない結果が得られることを示している。

## 2. 二次圧密モデルと一次元圧密解析法

### 2.1 二次圧密モデル

この論文では、一次元圧密粘土の全体積ひずみ  $\Delta v$  を有効応力変化に伴う体積ひずみ  $\Delta v_p$  (一次圧密量) と時間依存性の体積ひずみ  $\Delta v_s$  (二次圧密量) の和として式(1)で表し、二次圧密速度  $\dot{v}_s$  は式(2)で表す<sup>18)</sup>。

$$\begin{aligned} \Delta v &= \Delta v_p + \Delta v_s \\ &= m_p \cdot \Delta p + \alpha \ln \left( \frac{\dot{v}_i}{\dot{v}_s} \right) \end{aligned} \quad (1)$$

$$\dot{v}_s = \dot{v}_i \cdot \exp \left( \frac{-\Delta v_s}{\alpha} \right) \quad (2)$$

ここに、 $m_p$  は、一次圧密量で定義する体積圧縮係数、 $\alpha$  は体積ひずみで定義された二次圧密係数、 $\Delta p$  は鉛直有効応力増分、 $\dot{v}_i$  は二次圧密の初期速度である。

従来、二次圧密を考慮した一次元圧密解析では、二次圧密を時間の対数に比例する式(3)で表すモデルが多く提案さされている<sup>13)-16)</sup>。この論文では、式(3)を  $\log t$  モデルと呼び、式(1)との比較から、一次圧密中に発生する二次圧密挙動を検討する。

$$\Delta v_s = \alpha \cdot \ln \left( \frac{t}{t_i} \right) \quad (3)$$

ここに、 $t$  は圧密時間、 $t_i$  は二次圧密の開始時間である。

三笠の一次元圧密方程式(4)は、圧密荷重一定という仮定を必要としないため、圧密荷重が変化する場合にも成立する。例えば、漸増荷重の解析では、排水境界におけるひずみを時間とともに増加させればよいことがよく知られている<sup>19)</sup>。

$$\frac{\partial v}{\partial t} (= \dot{v}_p + \dot{v}_s) = c_v \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \quad (4)$$

ここに、 $c_v$  は圧密係数、 $y$  は圧密層内の位置である。

一次元圧密試験における全圧密量は、一般的な体積圧縮係数  $m_v$  と  $\Delta p$  の積として式(5)のように二通りで表わされる。すなわち、 $m_v$  一定で載荷面の荷重増分  $\Delta p$  が漸増載荷される場合と載荷面の荷重増分  $\Delta p$  は一定で  $m_v$  が時間依存性の場合で、圧密解析ではいずれも排水面(載荷面とする)の全圧密量を時間依存とすることで対応可能である。式(4)により二次圧密を考慮した一次元圧密解析を行うには、圧密荷重一定で排水境界におけるひずみを時間とともに増加させることになる。あるいは、圧密 FE 解析と同じように時間依存性のひずみに等価な荷重が漸

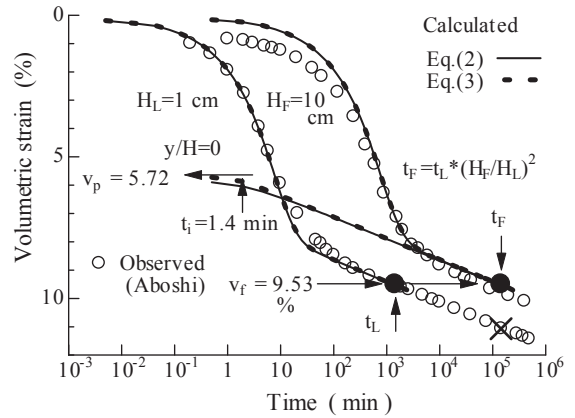


Fig.1 Consolidation time curve of clays with different maximum drainage distances

増すると解釈することもできる。

$$\begin{aligned} \Delta v &= m_v (= const.) \cdot \Delta p (\propto time) \quad or \\ \Delta v &= m_v (\propto time) \cdot \Delta p (= const.) \end{aligned} \quad (5)$$

著者らは、間隙水圧に関する二次圧密を考慮した一次元圧密解析を差分法と有限要素法で行った結果について報告している<sup>17)</sup>。その一部を付録に示した。式(4)の三笠のひずみの方程式を式(6)の境界・初期条件のもと陽的差分法で解くことにより、実測値に対応する計算結果が得られることをこの論文で示す。

$$\left. \begin{aligned} t = 0 \quad & \& \quad y > 0 \quad ; \quad v = 0 \\ t \geq 0 \quad & \& \quad y = 0 \quad ; \quad \dot{v} = 0 \\ t \geq 0 \quad & \& \quad y = H \quad ; \quad \dot{v} = 0 \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

### 2.2 一次元圧密解析法

Fig.1 は、網干の一次元圧密の寸法効果に関する実験結果である。最大排水距離  $H=1$  cm の供試体の実験結果から二次圧密を考慮した一次元圧密解析に必要な土質定数を次の手順で決定する<sup>17)</sup>。

- 1) 荷重増分  $\Delta p = 19.6$  kPa と 1 日後の全圧密量  $v_f = 0.0953$  から全圧密量で定義する一般的な体積圧縮係数  $m_v = 4.86 \cdot 10^{-3}$  kPa<sup>-1</sup> を求める。
- 2) 全圧密量-時間曲線に  $\sqrt{t}$  法を適用し、圧密係数  $c_v = 0.06$  cm<sup>2</sup>/min を求める。二次圧密を含む全圧密量から決定する  $c_v$  は二次圧密の影響を受けている。なお、差分要素分割長  $\Delta y$  は 0.1cm とした。
- 3) 一次圧密量で定義する体積圧縮係数  $m_p$  を仮定すれば、仮定した一次圧密量を用いて 1 日後の二次圧密量を  $v_f$  求めることができる。Fig.1 では、圧密量-時間曲線にフィットするように試行計算した結果、 $m_p = 0.6 \cdot m_v$  となった。当然ではあるが、全圧密量中の一次圧密量を少なく仮定するほど一次圧密の初期から二次圧密が顕著に発生する。
- 4) 仮定した一次圧密量から求めた二次圧密量を用い、式(2)の二次圧密の初期速度  $\dot{v}_i$  を求める。式(3)の  $\log t$  モデルの場合は、式(8)から二次圧密の開始時間

$t_i$  を計算する.

$$\dot{v}_i = \dot{v}_f \cdot \exp\left(\frac{\Delta v_s}{\alpha}\right) \quad (7)$$

$$t_i = t_f \cdot \exp\left(\frac{-\Delta v_s}{\alpha}\right) \quad (8)$$

ここに、 $\dot{v}_f$  は全圧密量を決定した圧密時間  $t_f$  における二次圧密速度である.

式(2)の二次圧密は圧密開始当初から発生するのに対し、式(3)では圧密時間  $t_i$  までは一次圧密のみである. 両式の違いが全圧密量-時間曲線に及ぼす影響は少ないが、一次圧密中の圧密時間  $t_i$  から二次圧密が発生していることを明確にするため、 $\log t$  モデルも検討に採用した.

- 5) 片対数紙上にプロットされた圧密量-時間曲線の圧密末期の直線部分の勾配から二次圧密係数  $\alpha = 3.3 \cdot 10^{-3}$  を求める.

Fig.1 において、 $H = 1 \text{ cm}$  の供試体の圧密時間  $t_L = 1440 \text{ min}$  であるから  $\dot{v}_f = \alpha / t_L = 3.3 \cdot 10^{-3} / 1440 = 2.3 \cdot 10^{-6} \text{ (1/min)}$  である. 最大排水距離  $H = 10 \text{ cm}$  の場合、図中に示すように最大排水距離の比の二乗倍の圧密時間  $t_F$  を用いる. これは、最大排水距離によらず Fig.1 中に●印で示すように  $t_L$  と  $t_F$  時間で同じ大きさの全圧密量を予測することが前提である. 最大排水距離が増加しても、室内圧密試験の  $H = 1 \text{ cm}$  の  $\dot{v}_s$  を用いると、Fig.1 中×印の全圧密量を予測することになる. Fig.1 に示した実線は式(2)により、破線は式(3)により計算した結果である. 土質定数を決定した  $H = 1 \text{ cm}$  の計算値が実測値とよく合うのは当然の結果としても、同じ土質定数で計算した  $H = 10 \text{ cm}$  の計算結果、特に二次圧密領域の計算値が実測値とよく合うのは注目される. 排水距離の異なる圧密量-時間曲線の形状が平行移動型かアイソタック型になるかは未だ明確にされていないが、この論文の計算法では最大排水距離の異なる供試体に対し、最大排水距離の比の二乗倍の圧密時間  $t_F$  を用いることで平行移動型の圧密量-時間曲線が計算される. Fig.1 には、最大排水距離  $H = 10 \text{ cm}$  の排水面  $y/H = 0$  における圧密量の経時変化も示している. Fig.1 の粘土では、圧密初期から顕著な二次圧密が発生すると言える.

式(3)の  $\log t$  モデルでは、二次圧密の開始時間  $t_i$  を差分法の時間増分  $\Delta t$  よりも小さくする必要が生じた場合、その時間増分までに発生する二次圧密量を考慮しなければならない. その不具合を避けるために、Fig.1 の計算では圧密層を 45 に分割して  $t_i$  よりも小さな時間増分を採用している. 提案式(2)にはその不具合がないので、式(3)よりも使いやすい. 式(2)では圧密層の分割数 10 でも Fig.1 の計算結果と同じになることを確認している.

### 3. 試料ならびに実験方法

シンウォールサンプリングによって得られた乱れの少ない 2 種類の粘土試料により標準圧密試験機による一次元圧密試験を実施した. 両試料の物理的性質を Table 1 に示した.

Table 1 Soil parameters

Sample	Gs	w <sub>L</sub> (%)	w <sub>p</sub> (%)	Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)
H	2.363	109	49	12	38	52
M	2.638	67	36	11	55	34

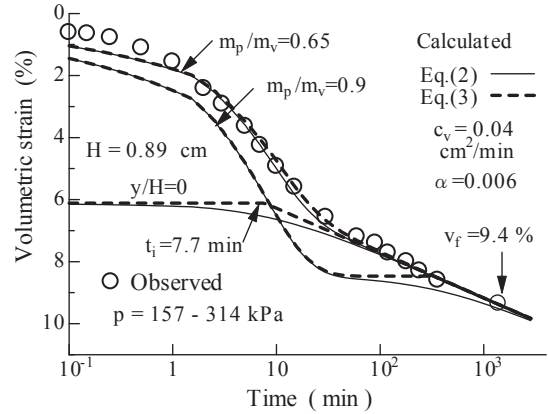


Fig.2 Consolidation time curves and assumptions of  $m_p / m_v$  value (Sample H)

**試料 H:** 正規圧密圧力 157 kPa で 1 日間圧密後、圧密荷重増分 157 kPa を载荷して圧密沈下量の経時変化を測定した. 供試体直径 6 cm は一定であるが、最大排水距離  $H$  を 0.89, 0.4, 0.22 cm の 3 種類とした.  $H$  減少による二次圧密挙動を調べることが目的である.

**試料 M:** 正規圧密圧力で 39.2 kPa で 1 日間圧密後、圧密荷重増分として 9.8~58.9 kPa を载荷し圧密沈下量の経時変化を測定した. 6 種類の荷重増分比  $\Delta p / p = 0.25 \sim 1.5$  の変化が二次圧密挙動に及ぼす影響を調べた<sup>20)</sup>.

$\Delta p / p = 1$  の二次圧密係数は、網干粘土で  $\alpha = 3.3 \cdot 10^{-3}$ 、試料 H は  $\alpha = 6.3 \cdot 10^{-3}$ 、試料 M は  $\alpha = 1.1 \cdot 10^{-3}$  で、比較的大きい試料 H から小さい試料 M まで 3 種類である.

## 4. 実験ならびに計算結果と考察

### 4.1 全圧密量中の一次圧密量の仮定

全圧密量から一次圧密量を分離測定できないので、一次圧密量と全圧密量の比  $m_p / m_v$  値を 0.95 あるいは 0.65 と仮定した圧密量-時間曲線の計算結果を試験結果と併せて Fig.2 に示した. 計算に必要な定数の決定手順は、2 章の手順に準拠した.

$m_p / m_v = 0.95$  と仮定した圧密量-時間曲線は、一次圧密がほとんど終了した後で二次圧密が発生し始めるため、この計算結果は実測値と大きく異なることが明らかである.  $m_p / m_v$  値の仮定が大き過ぎる、すなわち、全圧密量中の一次圧密量の仮定が大き過ぎることがわかる.  $m_p / m_v$  値を減少させた試行計算を行い、実測値によく一致する値として  $m_p / m_v = 0.65$  を得たが、 $\sqrt{t}$  法で決定した  $c_v$  値を変化させ、さらに  $m_p / m_v$  値も変えた試行計算を行えば、より実測値に近い計算結果を得られる可能性もある. この結果だけでは、 $m_p / m_v = 0.65$  の仮定に対す

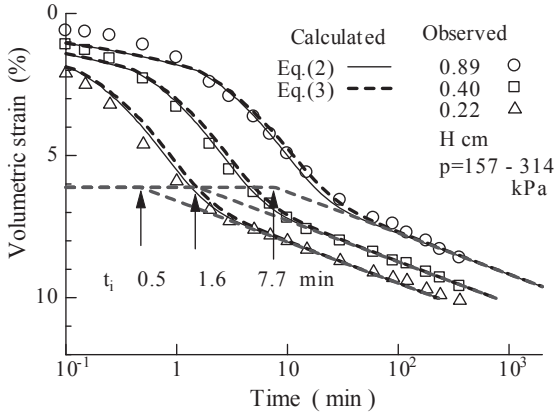


Fig.3 Consolidation time curves with different maximum drainage distances (Sample H)

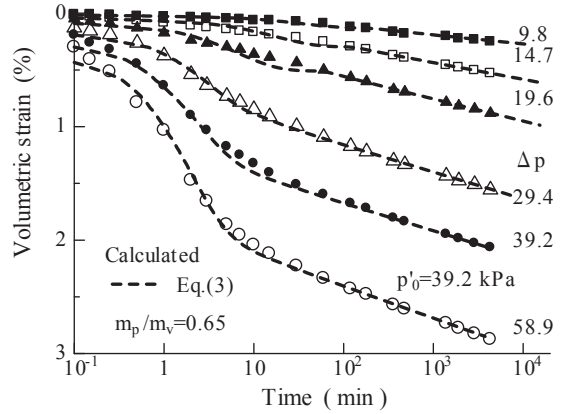


Fig.4 Consolidation time curves with different load increment ratios (Sample M)

Table 2 Soil constants of Sample M

$\Delta p$ (kPa)	9.8	14.7	19.6	29.4	39.2	58.9
$(\Delta p / p)$	(0.25)	(0.38)	(0.5)	(0.75)	(1.0)	(1.5)
$m_v \cdot 10^{-4}$ (1/kPa)	2.07	3.11	4.00	4.87	4.97	4.64
$\alpha \cdot 10^{-3}$	0.342	0.636	0.845	1.03	1.05	1.22
$c_v$ (cm <sup>2</sup> /min)	<u>0.01</u>	<u>0.02</u>	<u>0.05</u>	0.1	0.18	0.2
$t_i$ (min)	174	112	54	11	2.1	0.6

Underline Note) assumption values

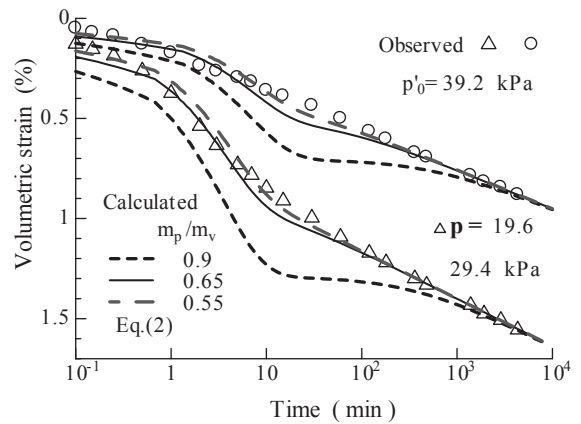


Fig.5 Consolidation time curves and the assumption of  $m_p / m_v$  value (Sample M)

る妥当性を確認できない。

一次圧密中に二次圧密が発生していても、それを分離測定できない限り一次圧密量の大きさは確定できない。全圧密量の経時変化が片対数紙上で直線ならば、一次圧密は終了していると推測される。供試体の最大排水距離が標準圧密試験より短くなれば二次圧密期間が増加し、より確からしく一次圧密量を推測できると考えられる。そこで、最大排水距離を 0.4cm と 0.22cm と短くして行った圧密試験結果とその計算結果を比較したのが Fig.3 である。最大排水距離の減少とともに片対数紙上で直線関係となる二次圧密期間が増大している。図の計算結果から、全圧密量中の一次圧密量の比  $m_p / m_v = 0.65$ 、つまり一次圧密量を全体の 65% と推測して不具合はなさそうである。

$\log t$  モデルでは、排水距離の減少とともに二次圧密の開始時間  $t_i$  が減少し、一次圧密中に発生する二次圧密量は無視できない大きさであることを確認できる。また、全圧密量中の二次圧密量をこのように大きく仮定しないと、実測値に対応する圧密量時間関係が計算できないことは、二次圧密が一次圧密終了後に発生するのではなく、一次圧密初期から発生していると推測することの合理性を表している。

#### 4.2 荷重増分比の異なる圧密量-時間関係

Fig.4 は、二次圧密係数  $\alpha$  の比較的小さな試料 M の荷

重増分比の異なる圧密量-時間曲線である。図の破線は、荷重増分比の変化によらず全圧密量中の一次圧密量の割合を 65% と仮定した式(3)による計算結果で、計算に用いた土質定数を Table 2 に示した。荷重増分が変化しても  $m_v$  や  $\alpha$  の変化は小さい。Table 2 に記述したように、荷重増分比の変化によらず全圧密量中の一次圧密量の割合は 65% 程度であることが確認できる。

荷重増分比の減少は、圧密量-時間曲線の形状を逆 S 字から上に凸に変化させることが Fig.4 から明らかである。式(2)を用いて荷重増分比が 1 よりも小さい荷重増分 29.4 kPa と 19.6 kPa の再現計算結果を Fig.5 に再度示した。図には、Fig.4 の計算結果に  $m_p / m_v = 0.9$  と 0.55 で計算した結果を加えている。 $m_p / m_v = 0.9$  で計算した場合には、前述したように、一次圧密と二次圧密の発生する時間が分離して実測値と全く異なる経時変化となる。また、二次圧密係数の小さな試料 M でも全圧密量中の一次圧密量の割合は、65% と仮定できそうである。しかし、 $m_p / m_v = 0.55$  と仮定した計算結果も実測値に近い。いずれの仮定がより合理的かは、残念ながら実験では確認できない。



## 6. 結 言

三笠のひずみに関する圧密方程式と差分法による二次圧密を考慮した一次元圧密解析を行い、解析に利用する一次圧密量で定義する体積圧縮係数の仮定が、圧密量-時間曲線に及ぼす影響を検討した。得られた結果は、次のように要約される。

- 1) 三笠のひずみに関する圧密方程式と差分法による二次圧密を考慮した一次元圧密解析による計算結果は、過剰間隙水圧に関する圧密方程式の差分法や有限要素法による解と同じ結果が得られた。
- 2) 圧密試験で観測される全圧密量の経時変化に近い計算結果を得るには、一次圧密量を全圧密量の6割程度に仮定する必要がある。二次圧密は一次圧密終了後ではなく、圧密初期から発生していることになる。
- 3) 一次元圧密試験の圧密量-時間曲線は、最大排水距離や圧密荷重増分の影響を受けるが、 $m_p/m_v$ を一定と仮定し圧密係数の大きさを変化させる計算によって実測値に近い結果が得られた。圧密荷重増分が1よりも小さい場合には、荷重増分比1の圧密試験から得られる圧密係数を1桁近く減少させる必要がある。

二次圧密考慮した一次元圧密解析では、解析に利用する土質係数の多くが仮定あるいは推定されている。今後は、これら係数の妥当性を明確にするために、例えば圧密試験において間隙水圧の挙動を測定するなど、計算と実験からアプローチする必要がある。

## 付 録

ひずみの圧密方程式を用いたこの論文の計算が、間隙圧に関する一次元圧密方程式の差分法や有限要素法によるそれと同じ結果となることを、Fig.Aの網干の試験結果で示す。

間隙水圧に関する二次圧密を考慮した圧密方程式は式(A1)で表される<sup>17),18)</sup>。多次元圧密連成FE解析における力のつり合い方程式と圧密方程式(連続の式)は、離散化を行うことで式(A2)となり、これを時間に関して一次補完して後方差分をとることによって、式(A3)のように表わされる<sup>21)</sup>。

$$\frac{\partial u}{\partial t} = c_v^* \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\dot{v}_s}{m_p} \quad (A1)$$

$$\left. \begin{aligned} K \underline{d} + \underline{C} \underline{u} &= \underline{F} + \underline{F}_s \\ \underline{C} \frac{\partial \underline{d}}{\partial t} - \underline{P} \underline{u} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (A2)$$

$$\begin{bmatrix} \underline{K} & \underline{C} \\ \underline{C}^T & \Delta t \cdot \underline{P} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{d}_1 \\ \underline{u}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{0} & \underline{0} \\ \underline{C}^T & \underline{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{d}_0 \\ \underline{u}_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \underline{F} + \underline{F}_s \\ \underline{0} \end{bmatrix} \quad (A3)$$

ここに、 $c_v^* = k/\gamma_w/m_p$ は一次圧密量から決定される圧密係数、 $\underline{K}$ 、 $\underline{C}$ 、 $\underline{P}$ はそれぞれ剛性、連成、透水マトリッ

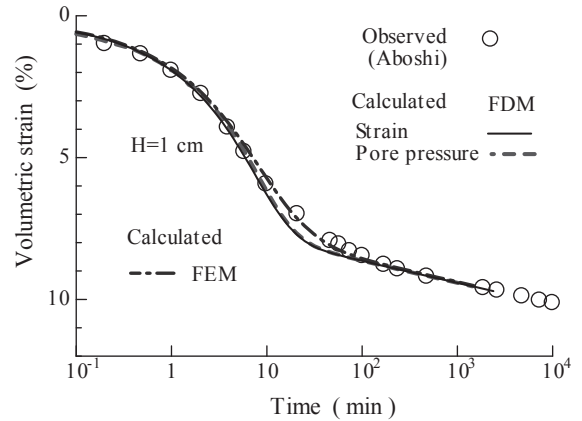


Fig.6 Comparisons of observed and calculated consolidation time curves by finite difference method and finite element method by using consolidation equation in terms of excess pore pressure.

クス、 $\underline{d}$ 、 $\underline{d}_1$ 、 $\underline{d}_0$ は節点変位、 $\underline{u}$ 、 $\underline{u}_1$ 、 $\underline{u}_0$ は節点水圧、下付き添え字1は添え字0の $\Delta t$ 時間後を意味する。 $\underline{F}$ は節点外力、 $\underline{F}_s$ は二次圧密 $v_t$ による等価節点力であり、式(A4)で計算する。

$$\underline{F}_s = \int \underline{B}^T \underline{D} \underline{\varepsilon}_s \, dv \quad (A4)$$

ここに、 $\underline{D}$ は応力ひずみマトリックス、 $\underline{B}$ はひずみ変位マトリックス、 $\underline{\varepsilon}_s$ は時間依存性のひずみ成分である。

式(A1)右辺第二項 $\dot{v}_s/m_p$ と式(A2)右辺 $\underline{F}_s$ は、漸増荷重に等価な外力項である。ひずみの圧密方程式(2)において、排水面のひずみが漸増荷重とともに変化することに対応する。

Fig.6には、ひずみの圧密方程式を用いた差分法による圧密量-時間曲線を実線で、間隙圧に関する圧密方程式を用いた差分法と有限要素法による計算結果をそれぞれ破線と一点鎖線で示した。二次圧密は式(2)により計算している。いずれの計算も実測値<sup>22)</sup>とよく合う結果を示しており、圧密方程式ならびに計算法による計算結果への影響はないことが明らかである。

## 参考文献

- 1) 網干寿夫, 三笠正人: 第6章土の圧縮と圧密, 土質工学ハンドブック, 土質工学会, pp.135-166, 1965.
- 2) 社団法人地盤工学会: 新編 土と基礎の設計計算演習, 第8章圧密沈下の検討, 2001.
- 3) Terzaghi, K. and Peck, R.B.: Soil Mechanics in Engineering Practice, John Wiley & Sons, Inc., pp.76, 1948.
- 4) Taylor, D.W.: Fundamentals of Soil Mechanics, John Wiley & Sons, Inc., pp.243, 1948.
- 5) Mesri, G.: Primary Compression and Secondary Compression. Soil Behavior and Soft Ground Construction, ASCE Geotechnical Special Publication

- No. 119, pp.122-166, 2001.
- 6) Imai, G. : A constitutive equation of one dimensional consolidation derived from interconnected tests, *Soils and Foundations*, Vol.32, No.2, pp.83-96, 1992.
  - 7) 竹嶋正勝 : 軟弱地盤盛土における長期沈下に関する二, 三の知見, *土と基礎*, Vol.27, No.3, pp.37-44, 1979.
  - 8) 能登繁幸 : 泥炭地盤の沈下量の予測に関する考察, *土質工学会論文集*, Vol.27, No.2, pp.107-117, 1987.
  - 9) 稲田倍穂, 赤石勝, 山田道男, 深見史郎 : 泥炭質地盤に生じる二次圧密速度の推定, *土と基礎*, Vol.25, No.12, pp.33-38, 1987.
  - 10) 網干寿夫 : 圧密 (最上武雄編著, 土質力学, 第4章), 技報堂, pp.331-478, 1969.
  - 11) 今井五郎 : わかりやすい土質力学原論, 土質工学会, pp.73, 昭和62年.
  - 12) 松尾 啓 他 : 弾・粘塑性モデルによる泥炭の一次元圧密 FEM 解析, *土質工学会論文集*, Vol.32, No.4, pp.193-202, 1992.
  - 13) Sekiguchi, H. and Torihara, 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.
  - 14) Murakami, Y. : Effect of loading duration on results of one-dimensional consolidation tests, *Soils and Foundations*, Vol.17, No.4, pp.59-69, 1977.
  - 15) Mesri, G. and Rokhsar, A. : Theory of consolidation for clays, *Proc. of ASCE*, Vol.100, No.GT8, pp.889-904, 1974.
  - 16) 稲田倍穂, 赤石勝 : ダイレイタンス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.
  - 17) 今村紘子, 杉山太宏, 外崎 明, 赤石 勝 : 二次圧密を考慮した一次元圧密解析における圧縮指数, *土木学会論文集 C (地圏工学)*, Vol. 67, No. 2, pp.210-215, 2011.
  - 18) 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.
  - 19) 三笠正人 : 軟弱粘土の圧密, 鹿島研究所出版会, pp.3-19, 1963.
  - 20) 白子博明, 梶山憲介, 杉山太宏, 赤石勝 : 圧密荷重増分比の二次圧密への影響, *東海大学紀要工学部*, Vol.46, No.1, pp.47-53, 2006.
  - 21) Smith, I.M. : Programing the finite element method with application to geomechanics, John Wiley & Sons, Inc., 1982.
  - 22) Aboshi, H. : An experimental investigation on the similitude in the consolidation of a soft clay, including the secondary settlement, *Proc. 8th ICSMFE*, Vol.4, No.3, pp.88-89, 1973.