

# 粘土骨格変形の粘弾性構成式に基づく一次元圧密方程式

井野 大星<sup>\*1</sup> 横溝 純一<sup>\*1</sup> 村上 文都<sup>\*1</sup> 本間 重雄<sup>\*2</sup>

## One-Dimensional Consolidation Equation Based on the Viscoelastic Constitutive Equation of Clay Skeleton Deformation

by

Taisei INO<sup>\*1</sup>, Jun-ichi YOKOMIZO<sup>\*1</sup>, Ayato MURAKAMI<sup>\*1</sup> and Shigeo HONMA<sup>\*2</sup>

(Received on Sep. 16, 2014 and accepted on Nov. 13, 2014)

### Abstract

We present a one-dimensional consolidation equation that accounts for viscoelastic deformation of a clay skeleton. A Maxwell body that undergoes both elastic compression and viscous compression in series is incorporated with a consolidation equation used to represent secondary consolidation widely observed in laboratory tests. By introducing strain-dependent viscosity as an exponential function, it becomes possible to express the progress of viscous compression proportionally to log elapsed time, and the coefficient of viscosity change can be determined from the coefficient of the secondary consolidation, as obtained from a standard consolidation test. Through application of the proposed viscoelastic consolidation equation to laboratory test data, it is found that instantaneous (elastic) compression is very small in magnitude and is limited to the early stage of consolidation; in contrast, a large proportion of the consolidation process is due to viscous compression. Isotachs are realized to the extent that the constitutive equation for the stress-strain relationship of the soil skeleton is purely inherent.

**Keywords:** One-dimensional consolidation, Effective stress, Viscoelasticity, Secondary consolidation, Isotach

### 1. まえがき

飽和粘土が内部間隙水の排出を伴いながら徐々にその体積を収縮していく現象を圧密といい、一般に Terzaghi の一次元圧密理論<sup>1,2)</sup>に基づいて圧密沈下計算が行われている。Terzaghi は有効応力の原理に基づき、間隙水の流動則に Darcy の法則、粘土骨格の圧縮特性に線形応力-ひずみ関係(体積圧縮係数)を用い、過剰間隙水圧  $u$  を未知数とする熱伝導型微分方程式(1)を提唱した。

$$\frac{\partial u}{\partial t} = c_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (1)$$

ここに  $c_v = k/m_v \gamma_w$  は圧密速度の大きさを表す圧密係数である。式(1)を粘土層の境界条件のもとで積分することにより一次元の圧密沈下が予測できるので、それに必要な土質定数を得るための標準圧密試験の方法が整えられ、現在広く用いられている圧密予測手法が確立した。

しかし、室内の標準圧密試験では Fig.1 に示すように Terzaghi 理論による過剰間隙水圧が消散した後も粘土骨格の粘性変形に基づく圧縮(クリープ変形)が継続し、前者の Terzaghi 理論に従う圧密沈下を一次圧密、後者の一定有効応力のもとで圧密が進行する部分を二次圧密と称している。JIS A 1217「段階載荷圧密試験」では、各載荷

段階で得られた圧密曲線に  $\sqrt{t}$  法または曲線定規法によるフィッティングを行い一次圧密に対する圧密係数を求め、二次圧密は時間の対数に対して直線的に進むとみなし、その速度を二次圧密係数  $C_\alpha = \Delta \varepsilon / \Delta \log t$  として求める<sup>3,4)</sup>。

二次圧密は、圧密試験結果を用いて実地盤の沈下予測を行う際の相似則を検討する上で大きな問題となっている。すなわち、二次圧密の原因である粘性圧縮が一次圧密中にも生じるかどうかで圧密沈下予測の結果が大きく異なる。Fig.2 は粘土層厚を変えて行った有名な網干の圧密試験結果<sup>2,5)</sup>で、排水距離のほぼ2乗に比例して一次圧密時間が長くなり、 $H^2$  則が成立しているように見える。しかし、二次圧密部分の曲線は粘土層厚によらない固有の曲線に漸近しておらず、アイソタック(isotach)は成立していない。この結果は、一次圧密すなわち過剰間隙水圧

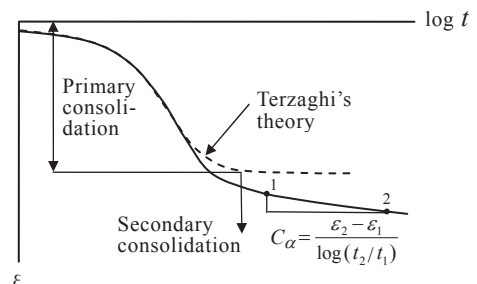


Fig. 1 Time-settlement curve.

\*1 工学研究科土木工学専攻修士課程

\*2 工学部土木工学科教授

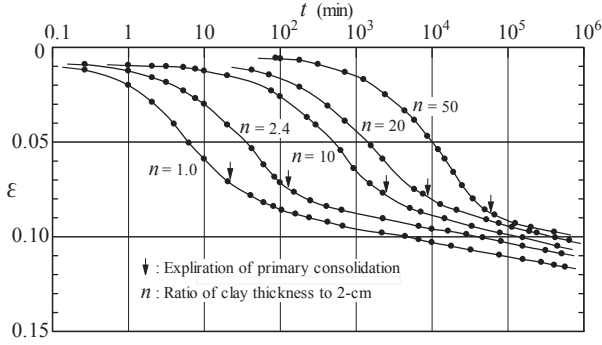


Fig. 2 Influence of clay thickness on the settlement curve<sup>2,5)</sup>.

の消散中においても粘土骨格の粘性圧縮が進行していることを示唆しており、これに対し粘土骨格の粘性遅延圧縮を考慮した圧密理論が種々提案されてきた。その代表的な例として Bjerrum モデルの構成式は、圧密降伏応力  $p_c$  を超えた圧縮応力に対し

$$\Delta e = C_c \log \frac{p_f}{p_c} + C_\alpha \log \frac{t_1 + t}{t_1} \quad (2)$$

で表される<sup>2)</sup>。ここに、 $C_c$  は瞬時圧縮(弾塑性圧縮)曲線の勾配、 $p_f$  は全荷重、 $C_\alpha$  は  $e$ - $\log t$  曲線の勾配、 $t_1$  は瞬時圧縮曲線を求める際の基準時間である。しかし式(2)では、一次圧密中でも時間の対数に比例する二次圧縮(遅延圧縮)を取り込んではいないものの、間隙比の減少が時間の対数に比例する現象をそのまま構成式に組み入れたものであり、なぜ二次圧縮が時間の対数に比例するのかの力学的な根拠は示されていない。また、近年の有限要素法等の圧密数値解析で用いられる弾粘塑性構成モデル(関口・太田モデル<sup>6)</sup>等)においても、時間の対数に比例する二次圧縮係数  $\alpha$  がそのまま構成式に適用されている。

本論文は、粘土骨格の構成式として瞬時圧縮と粘性変形(遅延圧縮)が同時に進行する Maxwell モデルを用いた一次元圧密方程式を誘導し、一次圧密中から発生する粘性変形が粘土骨格のひずみに依存した粘性係数の増加によって進行することを示す。さらに、粘性係数の増加(硬化)率が標準圧密試験で得られる二次圧縮係数で与えられることを明らかにし、粘土層厚の増大に伴うアイソタクの問題についても考察する。

## 2. 粘弾性構成式に基づく一次元圧密理論

Terzaghi の圧密理論の誘導と同様、間隙水の連続式から記述する。飽和粘土の位置  $z$  における間隙水の流速を  $v$ 、 $z+dz$  の流速を  $v+dv/dz$  とし、間隙水の流動則にダルシーの法則を適用すると

$$v = ki = -k \frac{\partial h}{\partial z} = -\frac{k}{\gamma_w} \frac{\partial u}{\partial z} \quad (3)$$

と表され、ここに、 $k$  は透水係数、 $h$  は間隙水の水頭、 $u$  は過剰間隙水圧、 $\gamma_w$  は間隙水の単位体積重量である。一方  $dz$  区間における  $dt$  時間の粘土の圧縮ひずみ量を  $d\varepsilon$  とすると間隙水の連続式は

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = \frac{\partial v}{\partial z} \quad (4)$$

と表される。粘土の透水係数  $k$  は一定で圧密中変化しないと仮定し、式(4)に式(3)を代入すると

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = -\frac{k}{\gamma_w} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (5)$$

となる。さらに、粘土骨格に作用する有効応力  $\sigma_e$  と骨格ひずみの関係が線形( $d\varepsilon = m_v d\sigma_e$ )で、 $m_v$  も圧密中一定で変化しないと仮定すると

$$m_v \frac{\partial \sigma_e}{\partial t} = -\frac{k}{\gamma_w} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (6)$$

となる。ここで、有効応力の原理(応力分担式)  $d\sigma_e = -du$  を式(6)に用いると、過剰間隙水圧  $u$  に関する Terzaghi の一次元圧密方程式(1)が得られる。

Terzaghi の圧密方程式では粘土骨格の圧縮特性を線形としており、それは骨格の応力-ひずみ関係がバネで表現される弾性体に相当する。

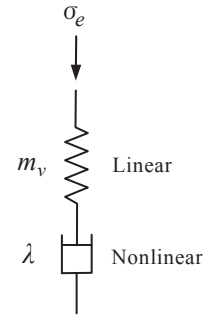


Fig. 3 Maxwell model for a clay skeleton deformation.

いま、圧密の全過程を通じて進行する弾粘性変形を表現するため、Fig.3 に示す Maxwell モデルを骨格変形の構成式として考える。Maxwell 体の応力-ひずみ関係は次式で与えられる<sup>7,8)</sup>。

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\dot{\sigma}_e}{G} + \frac{\sigma_e}{\eta} \quad (7)$$

ここに、 $G$  はせん断弾性係数、 $\eta$  は粘性係数、 $\sigma_e$  は作用応力(有効応力)である。横方向への変形が拘束された鉛直一次元圧縮の状態に対しては、式(7)は次のようになる。

$$\dot{\varepsilon} = \frac{3\dot{\sigma}_e}{3K+4G} + \frac{\sigma_e}{\lambda} \quad (8)$$

ここに、 $K$  は体積弾性係数で  $3/(3K+4G) = m_v$  (粘土骨格の体積圧縮係数)、 $\lambda$  は骨格の体積粘性係数である。

式(8)において粘土中の過剰間隙水圧が完全に消散し、骨格に作用する有効応力  $\sigma_e$  が一定の状態を考える。その場合は  $\dot{\sigma}_e = 0$  であるので、右辺 2 項目のみを取り上げ

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\sigma_e}{\lambda} \quad (9)$$

について考える。式(9)を時間について積分すると

$$\varepsilon = \frac{\sigma_e t}{\lambda} + C \quad (10)$$

となり、時間  $t=0$  で  $\varepsilon=0$  とすれば( $C=0$ )、ひずみ  $\varepsilon$  は時

間  $t$  に比例するが時間の対数には比例しない。そこで、式(9)の粘性係数  $\lambda$  がひずみ  $\varepsilon$  の指数関数により増加すると仮定すると

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\sigma_e}{\lambda_0 e^{a\varepsilon}} \quad (11)$$

と書ける。ここに、 $\lambda_0$  は  $\varepsilon=0$  のときの粘性係数である。上式を積分すると

$$\frac{1}{a} e^{a\varepsilon} = \frac{\sigma_e t}{\lambda_0} + C \quad (12)$$

となり、時間  $t=0$  で  $\varepsilon=0$  とすれば積分定数は  $C=1/a$  と求まる。よって

$$e^{a\varepsilon} = \frac{a\sigma_e}{\lambda_0} t + 1 \quad (13)$$

と表され、両辺の対数をとると

$$\varepsilon = \frac{1}{a} \ln\left(\frac{a\sigma_e}{\lambda_0} t + 1\right) \quad (14)$$

となる。式(14)より有効応力  $\sigma_e$  一定、粘土の圧密開始時の初期粘性係数  $\lambda_0$  および定数  $a$  が一定の状態では、粘土骨格のひずみは時間の対数に比例して増加することがわかる。式(11)で導入した定数  $a$  は、粘土の粘性係数がひずみの増大すなわち圧密の進行につれて増加する際の増加率を示しており、ここでは粘性増加係数と呼ぶこととする。

Fig.4 は  $a=100$ ,  $\sigma_e=80$  kPa,  $\lambda_0=1 \times 10^5$  kPa·s と仮定した場合の粘土骨格ひずみの時間変化を示したものである。この場合、ひずみは  $t=3$  min ほどまでは時間の対数に対し急激に増加していくが、 $t \approx 3$  min 以降は直線となる。これは、式(14)の右辺カッコ内 1 項目  $a\sigma_e t / \lambda_0$  の大きさが約 15 を超えたときであり、2 項目 +1 の対数変化率に及ぼす影響は小さくなる。よって式(14)を次のように変形すると

$$\varepsilon = \frac{2.3}{a} \left\{ \log_{10}\left(\frac{a\sigma_e}{\lambda_0}\right) + \log_{10} t \right\} \quad (15)$$

上式右辺の中カッコ内 2 項目より、ひずみ  $\varepsilon$  が時間の対数に直接比例して増加することが明らかである。この部分のひずみの増加率は、Fig.1 に示した標準圧密試験において二次圧密係数  $C_\alpha$  として測定されるので、粘性増加係数  $a$  は二次圧密係数  $C_\alpha$  と次のように関係づけられる。

$$a = 2.3 / C_\alpha \quad (16)$$

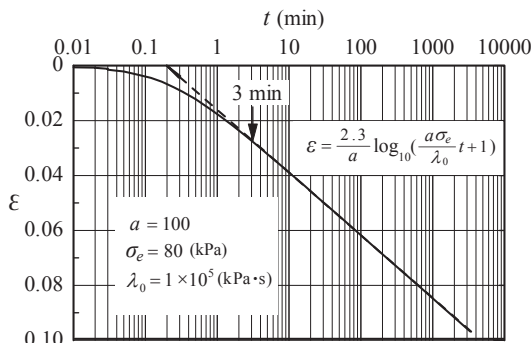


Fig. 4 Change in the strain of clay skeleton with time.

以上の考察をもとに、粘土骨格の変形特性として Maxwell 粘弾性構成式による一次元圧密方程式を誘導する。Terzaghi の一次元圧密方程式(1)は過剰間隙水圧  $u$  を未知数とする偏微分方程式であるが、粘土骨格のひずみを引き起こす直接的な物理量は有効応力であるので、有効応力  $\sigma_e$  に基づく微分方程式を提示することとする。

式(3)に示した間隙水の排出速度は有効応力の原理  $d\sigma_e = -du$  を用いると

$$v = -\frac{k}{\gamma_w} \frac{\partial u}{\partial z} = \frac{k}{\gamma_w} \frac{\partial \sigma_e}{\partial z} \quad (17)$$

と書ける。上式に式(4)を用い、ひずみの時間変化  $\dot{\varepsilon}$  に式(8)の Maxwell 応力-ひずみ構成式と式(11)の粘性硬化関係を適用すると次式が得られる。

$$m_v \frac{\partial \sigma_e}{\partial t} + \frac{\sigma_e}{\lambda_0 e^{a\varepsilon}} = \frac{k}{\gamma_w} \frac{\partial^2 \sigma_e}{\partial z^2} \quad (18)$$

式(18)は粘土骨格を伝搬する有効応力に関する一次元圧密方程式であり、左辺 2 項目の粘性圧縮が加わる以外は Terzaghi の熱伝導型方程式と同型である。骨格の瞬時圧縮特性として線形応力-ひずみ関係 ( $m_v$  一定) を用いていることには異論があるものと思われるが、 $m_v$  一定としても式(18)が圧密試験結果を良好な精度で再現しえることは後述する。また、式(18)は有効応力によって生じる骨格ひずみ  $\varepsilon$  による非線形粘性項が付加される結果、解析的に解を得ることは不可能なため、繰り返し計算を伴う数値計算が必要となる。

ただし前述のとおり、粘性増加係数  $a$  の大きさは標準圧密試験後半で観察される二次圧密係数  $C_\alpha$  から式(16)を用いて直接求めることが可能である。粘土の初期粘性係数  $\lambda_0$  の大きさについては、二次圧密区間での適当な時間  $t_s$  におけるひずみ量を標準圧密試験結果から読み取り、式(13)を用いて次のように求められる。

$$\lambda_0 = \frac{a\sigma_e t_s}{e^{a\varepsilon} - 1} \quad (19)$$

### 3. 圧密試験結果に対する再現性

飽和粘土の圧密現象に関し、前章では粘土骨格の構成式として弾性圧縮(瞬時圧縮)と粘性変形(遅延圧縮)が同時に進行する非線形 Maxwell モデルを用いた一次元圧密方程式を誘導し、一次圧密中から発生する粘性変形が粘土骨格のひずみに依存した粘性係数の増加によって説明できることを示した。ここでは、誘導した粘弾性圧密方程式(18)の圧密試験結果に対する再現性について検討する。

検討対象とする圧密試験データとしては、実験に用いる粘土の物理力学的な特殊性を除外する観点から、一般に広く公開されている圧密試験結果を用いることとする。Fig.5 は(社)地盤工学会が、土質試験法の基準書として発行している「土の試験実習書<sup>9)</sup>」の圧密試験法に示されている段階載荷圧密試験結果例である。試験粘土は港湾護岸工事地盤調査における原位置採取粘土で、自然含水

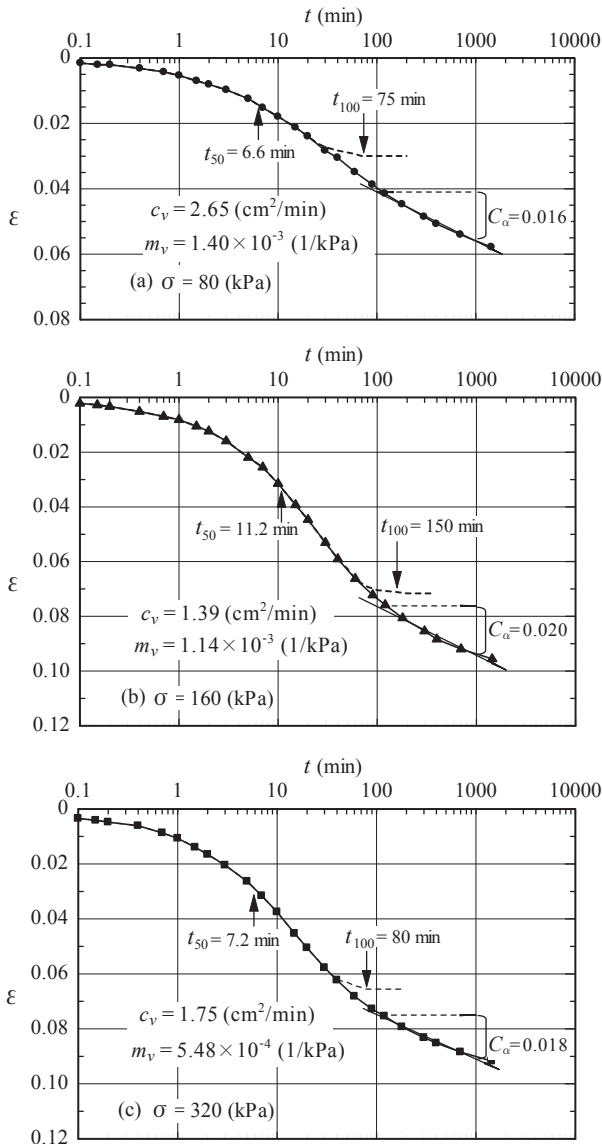


Fig. 5 An Example of laboratory incremental loading consolidation test<sup>9)</sup>.

比  $w_n=78.4\%$ , 液性限界  $w_L=104\%$ , 塑性限界  $w_p=38.1\%$ , 土粒子の密度  $\rho_s=2.66 \text{ g/cm}^3$ , 初期間隙比  $e_0=2.074$  の標準的な沖積粘土である。指導書には荷重段階  $\sigma=80 \text{ kPa}$ ,  $160 \text{ kPa}$ ,  $320 \text{ kPa}$  の圧密曲線が示されており, Fig.5 は各段階の圧密沈下量をひずみ量に直して表示したものである。

Fig.5 には, 測定された圧密量-時間曲線に曲線定規法(図中破線)を適用して得られた一次圧密終了時間や 50% 圧密時間ならびに圧密定数を示してある。Terzaghi 理論に基づく曲線定規法では  $t=75\sim 150 \text{ min}$  で一次圧密が終了することになるが, その後時間の対数に比例する二次圧密が発現している。図にはその二次圧密部分の圧密量-時間変化を直線で近似して得られる二次圧密係数を合わせて示した。

Terzaghi 理論では一次圧密中に発生する粘性圧縮が全く考慮されないので, 曲線定規法によって得られた一時圧密終了時間や圧密係数  $c_v$ , 体積圧縮係数  $m_v$  には粘性圧縮の影響が含まれており, 瞬時圧縮を表すべき  $m_v$  や

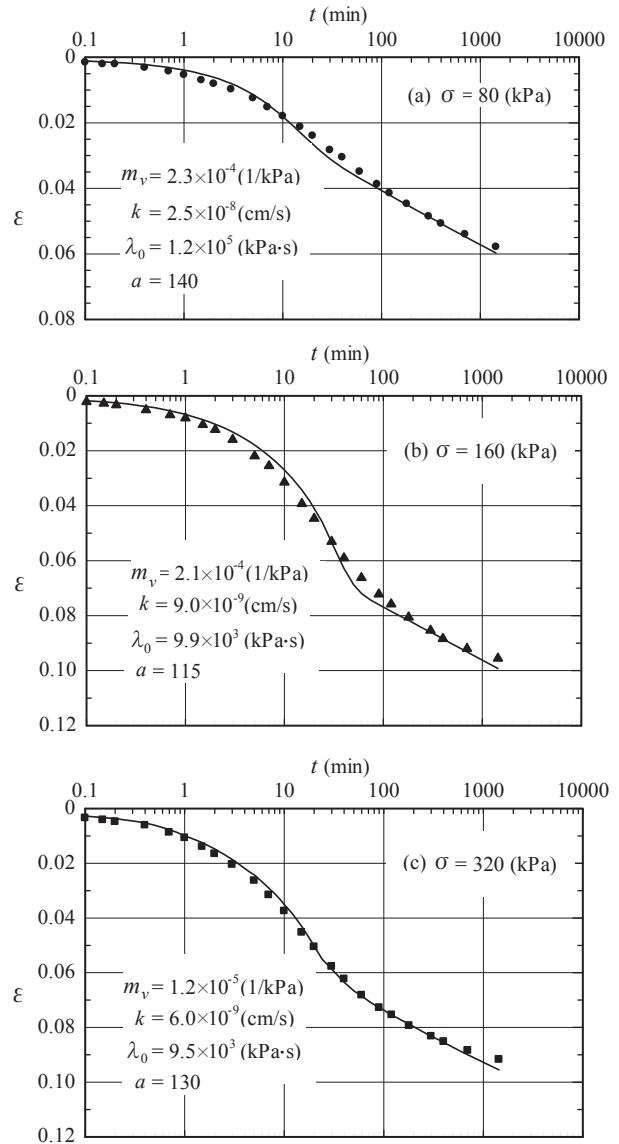


Fig. 6 Comparison of time-rate of consolidation by viscoelastic consolidation theory with laboratory test data.

それを内包する  $c_v$  は粘性圧縮の影響を大きく受けることになる。

Fig.6 は粘弾性一次元圧密方程式(18)によって再現された試験結果例の圧密量-時間曲線を示したものである。粘性増加係数は Fig.5 で得られた  $C_a$  から式(16)を用いて算出し, 初期粘性係数  $\lambda_0$  は圧密経過時間  $t_s=100 \text{ min}$  における発生ひずみ量から式(19)により求めた。それらの値をもとに式(18)を差分法により数値計算し, 体積圧縮係数  $m_v$  と透水係数  $k$  を変化させて圧密量-時間曲線全体に亘って最もよく合致するときの値を見出した。なお, 差分計算にあたっては, 各荷重段階の粘土層厚の上半分を 10 分割し, 上端排水面の境界条件  $\sigma_e = \text{一定}$ , 下端対称面の境界条件を  $\partial\sigma_e/\partial z = 0$  とし, 時間差分スキームには Crank-Nicolson 法を用いた。数値計算の手順は,  $n$  時間レベルでの  $\sigma_e^n$  と  $\varepsilon^n$  をもとに式(18)を計算して得られる  $\sigma_e^{n+1}$  を用いて式(8)より  $\varepsilon^{n+1}$  を求め, 同一時間レベルで収束解が得られるまで演算を繰り返した。

Table1 Consolidation constants obtained from elastic and viscoelastic constitutive equations.

$\sigma$ (kPa)	Elastic				Viscoelastic			
	$t_{100}$ (min)	$C_v$ (cm <sup>2</sup> /min)	$m_v$ (kPa <sup>-1</sup> )	$k$ (cm/s)	$m_v$ (kPa <sup>-1</sup> )	$k$ (cm/s)	$\lambda_0$ (kPa·s)	$a$
80	75	$2.65 \times 10^{-2}$	$1.40 \times 10^{-3}$	$6.2 \times 10^{-8}$	$2.32 \times 10^{-4}$	$2.5 \times 10^{-8}$	$1.2 \times 10^5$	140
160	150	$1.39 \times 10^{-2}$	$1.14 \times 10^{-3}$	$2.6 \times 10^{-8}$	$2.14 \times 10^{-4}$	$9.0 \times 10^{-9}$	$9.9 \times 10^3$	115
320	80	$1.75 \times 10^{-2}$	$5.48 \times 10^{-4}$	$1.6 \times 10^{-8}$	$1.21 \times 10^{-4}$	$6.0 \times 10^{-9}$	$9.5 \times 10^3$	130

Table1 は圧密試験結果に対し、曲線定規法によって得られた圧密定数と粘弾性圧密方程式から得られた圧密定数を比較したものである。粘弾性構成式から得られた体積圧縮係数は弾性構成式(Terzaghi 理論)の約 1/5、透水係数は約 1/3 の大きさとなっている。粘性増加係数は 130 前後の一定値を示しており、これは試験結果例ではほぼ同じ大きさの二次圧密係数が得られているためである。初期粘性係数は荷重段階 80kPa で大きな値を示しているが、160, 320kPa ではほぼ同じ大きさとなっている。

これらの結果から、一次圧密中の瞬時圧縮の大きさは Terzaghi 理論で見かけ上求まる圧縮率よりもかなり小さく、瞬時圧縮と粘性圧縮とが同時に進行する粘弾性構成式に基づく圧密方程式では、それらの成分を分離して求めることが可能である。Fig.7 は式(18)の粘性圧縮項を取り除き、Table1 の粘弾性構成式から得られた  $m_v$  と  $k$  を用いて計算した圧密量-時間曲線である。Fig.5 と比較すると一次圧密量は 1/3~1/4 に減少し、一次圧密終了時間も約 1/2~1/3 と短くなっている。

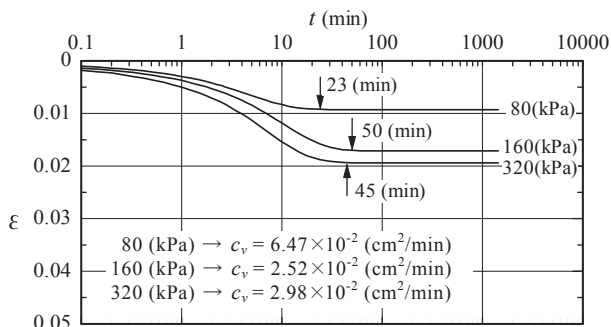


Fig. 7 Time-settlement curves due to elastic compression.

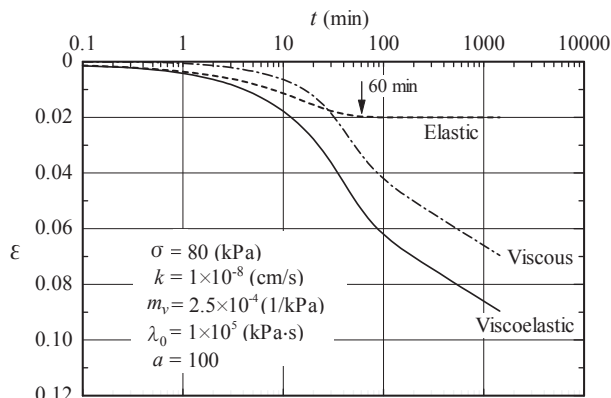


Fig. 8 Effect of elastic and viscous compression on time-settlement curve.

粘土骨格の弾性圧縮と粘性圧縮を取り入れた粘弾性圧密方程式による両ひずみ成分の変化をさらに詳しく見極めるため、粘弾性圧密方程式に含まれる圧密定数に Table1 を参照して代表的な数値を与えて圧密数値計算を行い、弾性

圧縮による沈下成分と粘性圧縮による沈下成分を分離して示したのが Fig.8 である。

弾性圧縮成分による全ひずみ量はこの場合 2%となり、弾性圧縮による一次圧密の終了時間は約 1 時間となっている。これに対し粘性圧縮によるひずみは圧密開始後 10 min あたりから急激に増加し、100 min 以降は時間の対数に比例した二次圧密が継続する。弾性圧縮によるひずみは圧密初期に顕著に現れるが、上述のとおり弾性圧縮による発生ひずみの総量はかなり小さいので、 $m_v$  の非線形性 ( $C_c$  の利用等) を考慮する必要性は小さいと思われる。

Fig.8 の圧密量-時間曲線より、室内の標準圧密試験で得られるひずみは試験開始初期を除きその大半が粘性圧縮によって生じていることが窺われる。このことが他の広範な自然堆積粘土についても同様に見られるのか、実験を通じて検証していく必要がある。

#### 4. 粘土層厚に対する粘性圧縮の影響

最後に、室内において層厚 2cm の粘土供試体に対して行われる標準圧密試験から得られる圧密定数をもとに、原位置における厚い飽和粘土地盤の圧密沈下計算を行う際の問題について考察する。これはいわゆる圧密現象における相似則に係わる問題である。

Fig.9 は先の Fig.8 で用いた粘弾性圧密定数を用い、粘土層厚を 2 倍、10 倍、50 倍、500 倍に変えて粘弾性圧密数値計算を行って得られた圧密量-時間曲線を示したものである。これらについては差分メッシュ間隔を 2 倍にして計算を行った。図中の矢印は弾性圧縮による圧密が完了したときのひずみと時間を示している。しかし粘弾性圧密理論では、この矢印の位置以前にも粘性圧縮による発生ひずみが含まれていることに注意する必要がある。

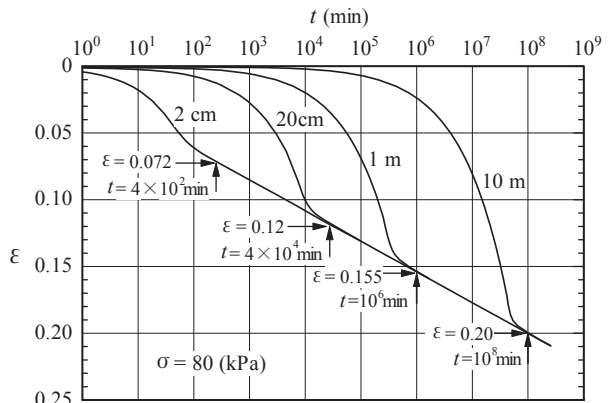


Fig. 9 Influence of viscous compression on clay thickness.

Fig.9より粘土層厚が増大するにつれ、弾性圧縮の終了時間は排水距離の2乗に比例して増加し、排水距離の2乗則が成立している。弾性圧縮が終了した後の圧密量変化は同じ二次圧密曲線に収斂し、いわゆるアイソタックが成立している。このことは、粘土の骨格点(物体点)に関する応力-ひずみ関係に関する構成則が同一である限りひずみの発生率は同一であることを意味する。粘土層厚の増大に対する圧密の時間的遅れは、排水距離の拡大に伴う排水時間の増加によって生ずる。

Fig.9の結果はFig.2に示した網干の実験結果と一致していない。特に圧密の後半部分で、網干の実験結果は過剰間隙水圧が存在しない場合に骨格がたどると考えられる同一のクリープ曲線(二次圧密曲線)に漸近していない。その要因の一つに、低動水勾配域における非ダルシー流れの影響が考えられるが<sup>10,11)</sup>、これについては論を改めて考察することとしたい。

また、二次圧密曲線の形状に関しては時間の経過に伴い本来ある有限のひずみ量に収束するはずであり、それを表現するレオロジーモデル(Kelvin等)や、圧密の全過程に対し骨格の弾粘塑性変形を取り込んだより複雑なレオロジーモデルによる研究が多々なされてきたが、モデルに含まれる力学定数を実験的に定めることが困難、同一現象を説明し得るモデルを任意に作り得る等の欠点が指摘されている<sup>12)</sup>。その点、本論で展開した粘弾性圧密方程式は、瞬時圧縮と粘性圧縮を単純な粘弾性体として方程式に取り込み、含まれる圧密定数が現行の標準圧密試験結果から容易に決定可能であることが大きな利点と考えられる。

## 5. あとがき

本研究は、古典的圧密理論であるTerzaghiの一次元圧密理論では考慮されない粘土構造骨格の粘性圧縮を取り入れた粘弾性圧密方程式を誘導し、方程式に含まれる圧密定数の力学的特性について考察するとともに、室内で行われる標準圧密試験結果に対し理論の再現性を検討したものである。本研究により得られた知見を要約すると以下のとおりである。

- 1) 圧密中の粘土骨格の変形に対する応力-ひずみ関係としてMaxwell体による粘弾性構成式を適用し、粘性圧縮に係わる粘性係数の変化を発生ひずみの指数関数として与えることにより、粘性圧縮が時間の対数に比例して生ずることを明らかにした。骨格の粘性増加係数 $a$ (本文中式(11)~(14))は標準圧密試験の後半で測定される二次圧密係数 $C_\alpha$ から決定できることを示した。
- 2) 公表された圧密試験結果に対し粘弾性圧密方程式に

よる圧密再現計算を行ったところ、二次圧密を含めた圧密の時間変化全体が良好に再現し得た。弾性圧縮による圧密量はTerzaghi理論で見かけ上求まる一次圧密量よりもかなり小さく、かつ一次圧密の終了時間も早期にずれ上がることが示された。室内の標準圧密試験で得られる圧密量変化は、試験開始初期を除きその大半が粘性圧縮によって生じていることが示唆された。

3) 粘土層厚の増大に伴う圧密量-時間変化については、粘土の骨格点に関する応力-ひずみ関係に関する構成則が同一である限り、排水距離の2乗則とアイソタックが成立する。粘土層厚の増大に対する圧密の時間的遅れは排水距離の増大に伴う排水時間の遅れによって生じ、アイソタックの不成立には透水則の非線形性が関与するのではないかと考えられる。

## 参考文献

- 1) T.W. Lambe and R.V. Whitman: Soil Mechanics, SI Version, John Wiley & Sons (1979)
- 2) 地盤工学会「土質工学ハンドブック」第5章 土の圧縮と圧密, pp.146-185 (1982)
- 3) 石橋勲・Hemanta Hazarika「土質力学の基礎」第9章 地盤の沈下, 共立出版, pp.137-170 (2011)
- 4) J.N. Cernica: Soil Mechanics, Chap.9 Compressibility; Settlement, John Wiley & Sons, Inc. pp.221-258 (1995)
- 5) Abohi: An experimental investigation on the similitude in the consolidation of a soft clay, including the secondary creep settlement, Proc. 8th Int. Conf. SMFE. Vol.4-3, p.88-89 (1973)
- 6) 地盤工学会「地盤の変形解析—基礎理論から応用まで—」第4章 構成式とその役割, pp.39-64 (2002)
- 7) Y.C. Fung / 大橋義夫・村上澄男・神谷紀生共訳「連続体の力学入門」培風館, pp.189-231 (1973)
- 8) Y. Klausner: Fundamentals of Continuum Mechanics of Soils, Chap.11 Volumetric Stress-Strain Phenomena, Springer-Verlag London, pp.263-342 (1991)
- 9) 地盤工学会「土の試験実習書—第二回改訂版—」, 第18章 圧密試験, pp.121-132 (1992)
- 10) N. Janbu: Consolidation of clay layers based on non-linear stress strain, Proc. 6th Int. Conf. SMFE, pp.83-87 (1965)
- 11) 吉国洋・桑重和昭: 飽和粘土の低動水勾配域における透水特性, 第14回土質工学研究発表会講演集, pp.213-217 (1979)
- 12) 今井五郎「飽和土の一次元圧密, わかりやすい土質力学原論(第1回改訂版)」地盤工学会, pp.187-239 (1992)