

# 飽和粘土の低動水勾配域における非ダルシー流れが 一次元圧密沈下速度に及ぼす影響

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

## Effects of Non-Darcy Flow in the Low Hydraulic Gradient Region on the Progression of One-Dimensional Consolidation of Saturated Clay

by

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

(Received on Sep. 23, 2014 and accepted on Nov. 13, 2014)

### Abstract

Permeability characteristics of saturated clay are investigated at each end of a regular step loading on the clay specimen. Constant-head and falling-head permeability tests are conducted in the laboratory under various hydraulic gradients, and non-Darcy flow is examined in the low hydraulic gradient region in particular. The critical hydraulic gradient,  $i_c$ , that is the lower limit of linearity between the average velocity  $v$  and the hydraulic gradient  $i$ , exists in  $i=6.5-13$  and increases with consolidation pressure. Hydraulic conductivity,  $k$ , is the gradient between  $v$  and  $i$  above  $i_c$ , and decreases with increasing consolidation pressure. Based on the test results, the effects of non-Darcy flow on the progression of consolidation over time are investigated for various clay thicknesses by using numerical simulation and experimental data. Non-Darcy flow is found to have a large effect on time-consolidation curves as the thickness of the clay layer increases. This effect is thought to be involved in the isotach problem for long term consolidation phenomena.

**Keywords:** Consolidation test, Permeability, Low hydraulic gradient, Non-Darcy flow, Time-consolidation curve

## 1. まえがき

飽和粘土の圧密定数の決定は、一般に標準圧密試験に基づいて行われる。その場合、試験結果の整理においては Terzaghi の一次元圧密理論が用いられ、粘土骨格の変形特性としては弾性体 ( $m_v$  一定)、間隙水の流動則には Darcy 則 ( $k$  一定)を仮定している。原位置の粘土地盤の圧密沈下予測に対しても、標準圧密試験から得られた圧密定数を用いて最終圧密沈下量や圧密沈下速度を予測している。

しかし、理論による予測と実地盤における沈下挙動とは、一次元圧密とみなせる状況下であっても相当かけ離れた結果になることが多くの事例で報告されており<sup>1,2)</sup>、その原因として次のような点が指摘されている<sup>3,4)</sup>。

1) 過剰間隙水圧が消散した後の粘土骨格のクリープの沈下(二次圧密)ならびに一次圧密・二次圧密を通じての粘土骨格の粘性圧縮の影響。

2) 圧密中の間隙水の排水における非 Darcy 流れの影響。

ここでは上記要因のうち 2)の非 Darcy 流れが圧密沈下速度に及ぼす影響に論点をしぼり検討することとする。

Darcy の法則は、Henry Darcy (フランス)が 1856 年を過

の透水実験から見出した実験法則で、土中の水頭勾配に対し間隙水の平均流速は  $v=ki$  で表される。ここに  $k$  は透水係数、 $i=dh/dl$  は動水勾配である。しかし、難透水性の粘土においては、動水勾配  $i$  と平均流速  $v$  との関係が原点を通る直線 (Darcy 則)からはずれる場合のあることが Hansbo<sup>5)</sup>、Olsen<sup>6)</sup>、Swartzenruber<sup>7)</sup>、ФЛОРИН<sup>8)</sup>、吉国・桑重<sup>9)</sup>、今井<sup>3)</sup>等によって指摘されており、その状況を Fig.1 に示す。

難透水性の粘土においては、下限動水勾配といわれる値  $i_c$  を超えるまでは間隙水の流動速度は極めて小さく、動水勾配が  $i_c$  以上になると  $v-i$  関係は Darcy 則に従う線形性を示すことが見出されている。

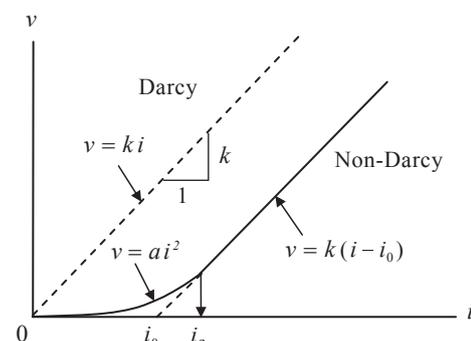


Fig. 1 Non-Darcy flow.

\*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

このことは、室内の標準圧密試験で用いる厚さの薄い(2.0 cm)供試体に載荷重を加え圧密した時の非常に大きな動水勾配のもとで進行する圧密現象と、原位置の層厚が大きい粘土層内で相当小さな動水勾配のもとで進行する圧密現象とでは、圧密速度にかなりの相違が生じる可能性を示唆するものである。

本研究は、室内の圧密試験で圧密された粘土について変水位型透水試験および定水位(定加圧)型透水試験を実施し、低動水勾配域における透水特性の変化を確認するとともに、それが現場粘土地盤の圧密沈下速度に及ぼす影響について検討したものである。

## 2. 実験の概要

実験装置は、標準圧密試験の圧密試験容器(直径6.0cm)の下部排水コックに、透水試験用のスタンドパイプ(内径2mm)と二重管ビュレット(内径同じく2mm)を連結したもので、その構成をFig.2に示す。スタンドパイプは低動水勾配の透水係数測定に用い、圧密容器水浸箱にも同径のガラス管を立てて毛管上昇によるスタンドパイプ水位の補正を行った。二重管ビュレットは高動水勾配の測定用で、ビュレット上端から圧力調整器によって設定された空気圧をビュレット内の水面に加圧することにより、高い動水勾配下での透水試験を行えるようにしたものである。

試料には美術工芸用に市販されている彫塑粘土を用いた。物理試験の結果、土粒子の密度  $\rho_s = 2.56 \text{ g/cm}^3$ 、自然含水比  $w_n = 36.2\%$ 、液性限界  $w_L = 58.2\%$ 、塑性限界  $w_p = 18.7\%$ 、粒度は  $75 \mu\text{m}$  通過率 100%、 $5 \mu\text{m}$  以下(粘土分)含有率 77.5%であった。塑性図による分類では、CH(高液性限界粘土)に属する。

圧密粘土に対する動水勾配の小さな領域における変水位透水試験は、降水管水位の降下速度が低動水勾配になるほど非常に遅くなること、前の設定動水勾配による粘

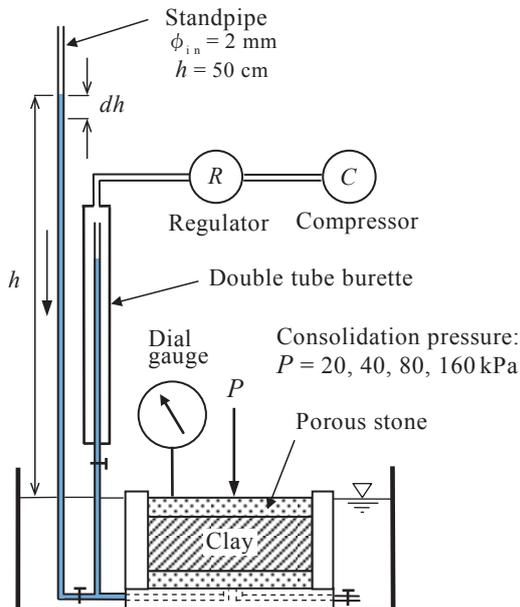


Fig. 2 Experimental apparatus.

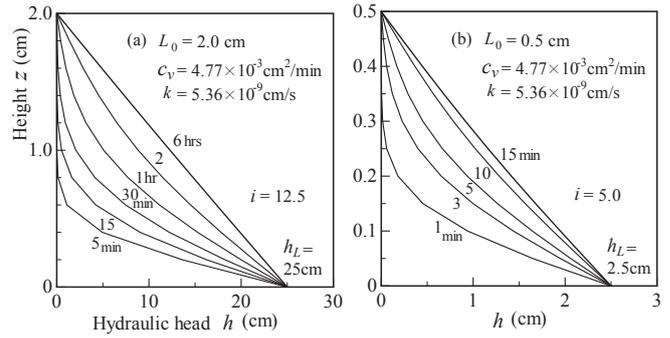


Fig. 3 Change of pore-water pressure in a clay specimen.

土中の残留間隙水圧の影響など試験上非常にデリケートな面があり、多くの研究者にその実施が敬遠される部類の試験である<sup>3)</sup>。

Fig.3 は圧密圧力 20 kPa で圧密された粘土の下端に一定水圧を加えた場合の、粘土中の間隙水圧の変化を示したものである。(水頭に換算して表示。) (a) は標準圧密試験と同じ厚さ 2.0 cm の粘土の場合であり、圧密係数と透水係数は標準圧密試験結果の整理方法によって求めた。間隙水圧の時間変化は  $c_v$  一定とした線形一次元圧密方程式に基づいて計算した。これによると、粘土中の動水勾配が一定(定常)になるまでには非常に長い時間を要し、定常状態に達する以前に透水試験を実施した場合には粘土中への供給水の流入速度が大きくなるため、正しい透水係数が求められないことになる。そこで、粘土層厚を標準試験の 1/4 の 0.5 cm とした場合、(b) に示すとおり動水勾配一定の状態に要する時間は約 15 min と得られ、これをもとに実験では各設定動水勾配に対し 15min ~ 20min の待ち時間をとり透水試験を行った。

粘土層厚が 1/4 になると、両面排水状態での圧密時間は 1/16 となる。今回の実験では、初期厚さ 0.5cm の飽和粘土に圧密圧力 20, 40, 80, 160 kPa を段階的に加えてそれぞれ 90min 間圧密し、その後透水試験に移行した。透水試験に移る際には載荷レバーを固定し、透水による粘土の体積変化が生じないように留意した。また、圧密容器への試料のセット時には、圧密リング、ガイドリングおよび底版との接合部に耐水性ボンドを充填し、供試体以外の部分における漏水を防止した。

通常の変水位透水試験では、試料の透水係数  $k$  を次式によって算出する。

$$k = 2.3 \frac{aL}{A(t_2 - t_1)} \log_{10} \frac{h_1}{h_2} \quad (1)$$

ここに、 $a$  はスタンドパイプの断面積、 $L$  と  $A$  は試料の厚さと断面積、 $h_1, h_2$  はそれぞれ時間  $t_1$  および  $t_2$  におけるスタンドパイプの水位である。しかし、式(1)は流速  $v$  と動水勾配  $i$  との線形関係を前提とした Darcy 則に基づく計算式であり、ここではその線形性を見極めることを目的にしているため、試料中の平均流速  $v$  を次式によって直接求め、

$$v = \frac{q}{A} = \frac{a(h_1 - h_2)}{A(t_2 - t_1)} \quad (2)$$

試験中の動水勾配は、低動水勾配試験については

$$i = \frac{(h_1 + h_2)/2}{L} \quad (3)$$

高動水勾配試験については

$$i = \frac{p_a/\gamma_w}{L} \quad (4)$$

により求めた。ここに、 $L$ は圧密後の供試体の厚さ、 $p_a$ は二重管ピュレットへの作用空気圧、 $\gamma_w$ は水の単位体積重量である。式(3)によって動水勾配を算定する際、スタンドパイプの水位降下の幅が大きいと透水係数算出への誤差を生じるので、水位降下の幅を0.2~0.5cmに設定した。そして、Fig.1に示した  $v-i$  関係図を描き  $k$ 、 $i_c$ 等を見出した。

### 3. 圧密粘土の透水特性

Fig.4は実験から得られた粘土内の動水勾配  $i$  と平均流速  $v$  の関係を示したものである。(a)は動水勾配が25以下の低動水勾配域を、(b)は測定範囲全体を示している。Fig.4(b)によると、粘土内の動水勾配と平均流速の関係は、いずれの圧密圧力に対しても直線関係を示している。それぞれの直線の勾配、すなわち透水係数  $k$  は、圧密圧力の増加につれて規則的に減少している。Fig.4(b)の各直線は原点をわずかに外れた点に収束しているように見えるが、それを拡大してみたのが(a)である。

Fig.4(a)を見ると、 $v-i$  関係は圧密圧力ごとに異なった動水勾配のところで流速が変化している。この  $v-i$  の線形関係から外れる点より小さな動水勾配では、明らかに粘土の透水性が低下していることになる。この点の動水勾配を限界動水勾配  $i_c$  とすると、 $i_c$  は圧密圧力の増加につれて増大する傾向がみられる。

この現象を指摘した ФЛОРИН<sup>8)</sup>は、その理由を次のように説明している。

「動水勾配が小さい場合、土粒子の表面に引きとめられている粘着水は間隙の狭い通路を満ちし、これによって自由水をより大きい間隙の中に閉じ込めて浸透そのものを阻止する。動水勾配が増大すると、粘着水の閉塞に対する間隙水圧の作用によりそれは破壊され、浸透現象が起こる。さらに定常状態に達した後は、間隙中の自由水

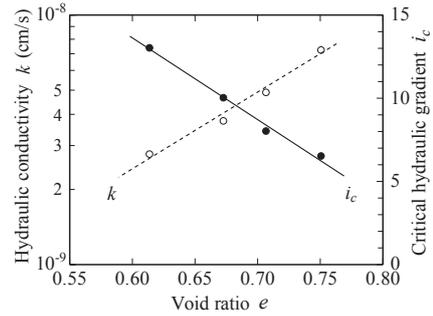


Fig. 5 Change in hydraulic conductivity and critical hydraulic gradient with void ratio.

の移動は水頭差の増大に伴って増加し浸透現象が維持される。」

Fig.5は浸透現象と関連する土の状態量である間隙比  $e$  と透水係数  $k$  および限界動水勾配  $i_c$  の関係を示したものである。ここでの透水係数  $k$  は、 $v-i$  の線形性が成立する範囲の値である。Fig.5より、圧密によって粘土の間隙比が減少すると透水係数は対数的に減少し、限界動水勾配は逆に拡大していくことが見て取れる。この傾向は、これまで他の研究者による報告<sup>3,6,7)</sup>でも見られる。

ここで  $i_c$  以下の部分に注目すると、粘土の圧密が進むにつれ、Darcy 則が成立する限界動水勾配(下限動水勾配)が次第に拡大していくため、圧密の後期になるほど  $v-i$  の勾配すなわち透水係数は次第に低下し、それが圧密の時間的推移にかなりの影響を及ぼすことが推測される。このため、 $i_c$  以下の透水特性を圧密解析に取り込む必要性があり、ここではその非線形性を以下のように定式化する。

いま、限界動水勾配  $i_c$  以下の領域における流速と動水勾配の関係を  $v=ai^2$  なる2次曲線で近似し、これを  $i$  について微分すると  $dv/di=2ai$  となる。先の Fig.1を参照し、 $i=i_c$  のとき  $dv/di=k$  であるので、2次曲線の定数は  $a=k/2i_c$  となる。よって、低動水勾配域 ( $i < i_c$ ) における流速は

$$v = \frac{k}{2i_c} i^2 \quad (5)$$

で表される。 $i \geq i_c$  の領域では流速は

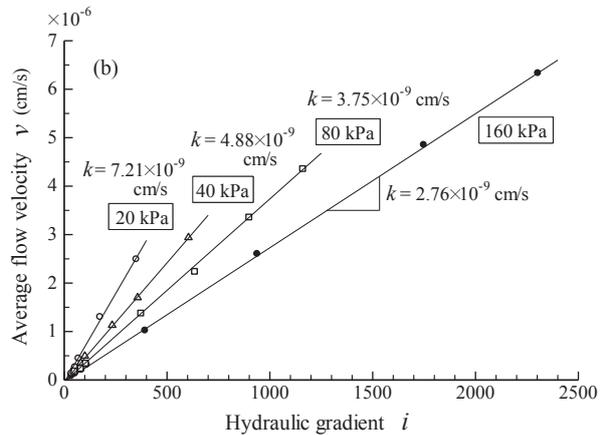
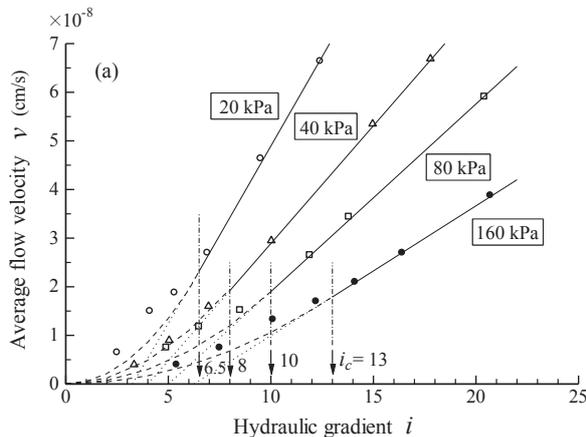


Fig. 4 Relationship between hydraulic gradient and average velocity: (a) Low hydraulic gradient, (b) high hydraulic gradient.

$$v = k(i - i_0) \quad (6)$$

で表される. ( $v$  は  $i_c$  で連続である.) 式(5)を  $i$  について微分すると

$$k_{ND} = k \frac{i}{i_c} \quad (7)$$

となり,  $k_{ND}$  は非 Darcy 流れ(低動水勾配域)に対する透水係数を表す. 式(7)で  $i = i_c$  のとき  $k_{ND}$  は  $k$  に等しい.  $i \geq i_c$  の領域では, 式(6)を  $i$  について微分すれば透水係数は  $k$  そのものである.

#### 4. 非 Darcy 流れが圧密沈下速度に及ぼす影響

前章の結果を踏まえ, ここでは透水則の非線形性を考慮した圧密解析を行う. 過剰間隙水圧  $u$  を未知数とする Terzaghi の一次元圧密方程式は次式で与えられる.

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{k}{m_v \cdot \gamma_w} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (8)$$

式(8)では圧密中, 透水係数  $k$  および体積圧縮係数  $m_v$  は一定で変化しないと仮定しているが, 本論では非 Darcy 流れによる非線形透水則を考えるので, 式(8)を次のように書き換え

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{1}{m_v \cdot \gamma_w} \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial u}{\partial z} \right) \quad (9)$$

次式で計算される動水勾配

$$i = \frac{1}{\gamma_w} \frac{\partial u}{\partial z} \quad (10)$$

が  $i \geq i_c$  の場合には Darcy 則に従う  $k$  を,  $i < i_c$  の場合には式(7)による  $k_{ND}$  を用いる. 式(7)を内包する式(9)は非線形偏微分方程式であるので, 間隙水の質量保存則を維持するために繰り返しを伴う数値計算が必要となる. Fig.6 を参照して, 式(9)を差分化すると(メッシュ位置を  $j$ , 時間段階を  $n$  とする)

$$\frac{u_j^{n+1} - u_j^n}{\Delta t} = \frac{1}{2m_v \gamma_w \Delta z} \left\{ (k_{j,j+1}^{n+1} \frac{u_{j+1}^{n+1} - u_j^{n+1}}{\Delta z} - k_{j,j-1}^{n+1} \frac{u_j^{n+1} - u_{j-1}^{n+1}}{\Delta z}) + (k_{j,j+1}^n \frac{u_{j+1}^n - u_j^n}{\Delta z} - k_{j,j-1}^n \frac{u_j^n - u_{j-1}^n}{\Delta z}) \right\} \quad (11)$$

となり, 整理すると

$$-\lambda k_{j,j+1}^{n+1} u_{j+1}^{n+1} + \{ \lambda (k_{j,j+1}^{n+1} + k_{j,j-1}^{n+1}) + 1 \} u_j^{n+1} - \lambda k_{j,j-1}^{n+1} u_{j-1}^{n+1} = \lambda \{ k_{j,j+1}^n u_{j+1}^n - (k_{j,j+1}^n + k_{j,j-1}^n) u_j^n + k_{j,j-1}^n u_{j-1}^n \} + u_j^n \quad (12)$$

となる. ここに,  $\lambda = \Delta t / (2m_v \cdot \gamma_w \cdot (\Delta z)^2)$  である. 式(12)は  $n$  時間レベルと  $n+1$  時間レベルの 6 個の節点値がリンクした Crank-Nicolson 差分スキームであり,  $\Delta t$  と  $\Delta z$  の選定に対して無条件安定である. ただし, 式中の  $k_{j,j+1}^{n+1}$  等は動水勾配  $i$  (式(10)により計算)に依存するので, 同一時間レベルで収束解が得られるまで演算を繰り返す必要がある. 連立方程式(12)は始点と終点の境界条件が与えられれば, 三重対角行列ソルバー<sup>10)</sup>を用いて容易に解くことができる.

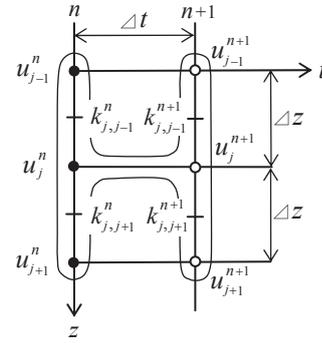


Fig. 6 Finite difference scheme for numerical computation.

Fig.7 は圧密圧力  $p=80$  kPa の実験で得られたデータ ( $k=3.75 \times 10^{-9}$  cm/s,  $i_c=10$ ) を用い, 標準圧密試験と同じ厚さ 2.0cm の飽和粘土について計算した圧密中の動水勾配の変化を示したものである. 解析は粘土の上半分を 10 分割し, 境界条件は上端排水面で  $u=0$ , 下端対称面で  $\partial u / \partial z=0$  とした. 図中の実線は, 粘土内のその位置の間隙水が限界動水勾配  $i_c$  以上の動水勾配(透水係数  $k$ )で, 破線は  $i_c$  以下の低動水勾配で排水されていることを示す.

Fig.7によると, 載荷直後には排水面(上端)で急激な同水勾配が発生し, それが内部の動水勾配を次第に増加させていくが,  $t \approx 2$  min で  $i$  の分布に変曲が現れ, 内部に間隙水圧を幾分残留させる形で低下していく. この間の動水勾配は非常に大きく, 数 100 から数 1000 の大きさであ

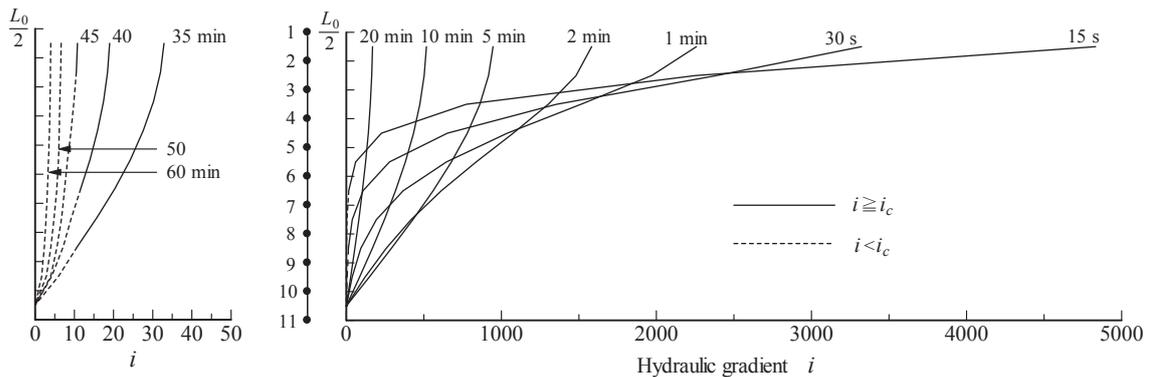


Fig. 7 Calculation results for the change in hydraulic gradients through consolidation of clay.

る。時間が経過し  $t \approx 45 \text{ min}$  以降になると、粘土内の間隙水は低動水勾配下で排水される状況となるが、その時点では粘土の一次圧密はほぼ完了していることが圧密試験結果に対する標準曲線によるフィッティングで確認された。Fig.8 は圧密排水中の有効応力の時間的変化を図示したもので、載荷後約 50 min で  $\sigma_e$  はほぼ一定値に収斂している。

Fig.7 において  $i_c$  以下の低動水勾配が現れるのは、載荷直後の粘土中心面付近と  $t \approx 50 \text{ min}$  以降の粘土全体においてであり、それまでの粘土の変形は Fig.8 よりほぼ最終値に収斂し終えている。したがって、標準圧密試験では  $v-i$  の非線形性の影響は時間-圧密曲線にはほとんど現れないと言うことができる。このことはすなわち、室内の圧密試験では非 Darcy 流れの影響を結果において吟味することができないということである。

粘土層厚の増大に伴い、圧密中に発現する低動水勾配がどの程度時間-圧密曲線に影響を及ぼすのかを調べるため、層厚を標準圧密試験の 2 倍、10 倍、100 倍、500 倍に変えて計算した結果が Fig.9 である。ここでは圧密度としてひずみに関する圧密度 ( $U_\varepsilon$ ) を用いている。これらについては、分割数を 2 倍にして計算を行った。

Fig.9 によると、層厚 20 cm (10 倍) までは非 Darcy 流れの影響はごくわずかであるが、層厚 2 m 以上では圧密速度にかなりの差がみられる。図中の矢印は低動水勾配が発現する時間を示しており、それらは層厚が増すにつれて次第に早期に現れ、層厚 10m (500 倍) では全期間が低

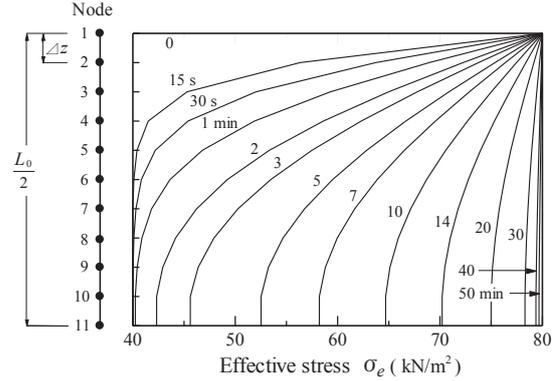


Fig. 8 Change in effective stress during consolidation.

動水勾配下で圧密が進行する結果となる。層厚 2 m のケースでは、 $i_c$  以上の動水勾配での排水は初期の排水面近くのみで発生し、残りの期間は全て低動水勾配下で排水が進行する。

以上の結果から、非 Darcy 流れが一次元圧密沈下速度に及ぼす影響は、標準圧密試験のような薄い供試体では見極めることができず、原位置の数 m の厚さの粘土層に対しては確実に現れると言うことができる。

室内の圧密試験結果をもとに現場の長期圧密沈下を予測する際、沈下量や沈下速度が観測値とくい違う原因の一つとして、この非 Darcy 流れの影響が指摘されてきた。Hansbo<sup>5)</sup>はかつて圧密後半でみられる二次圧密の原因が  $v-i$  関係の非線形性によるものであるとし、吉国・桑重<sup>9)</sup>

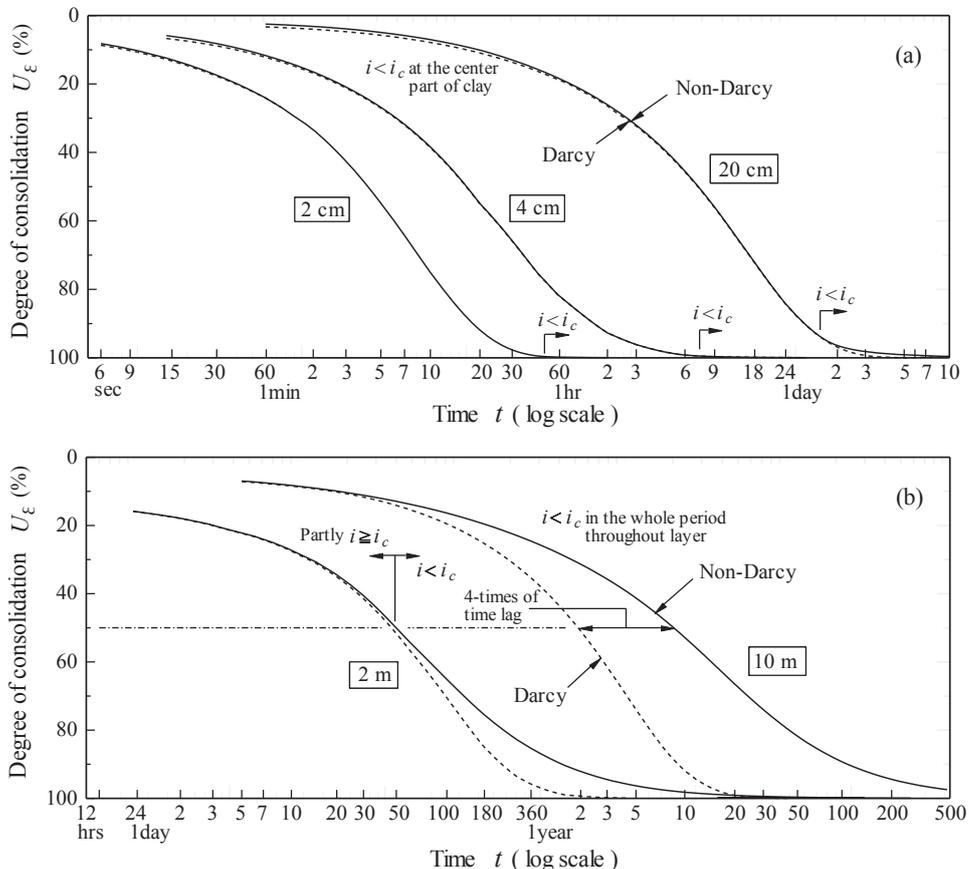


Fig. 9 Effects of Non-Darcy flow on the time-consolidation curves by clay thickness.

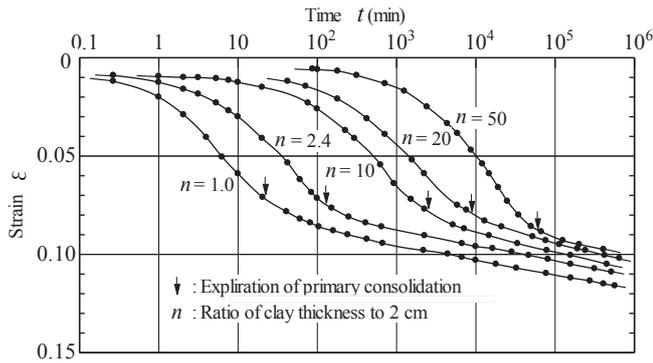


Fig. 10 Effects of clay thickness on the settlement curve<sup>11)</sup>.

は粘土層厚が大きい場合、非 Darcy 流れが圧密曲線をクリープ的にすると述べている。

しかし、二次圧密は粘土骨組みの粘性やクリープによる構造変化に起因するものであり、それは骨格の応力-ひずみ関係に関する構成式の観点において検討されるべきものである。筆者らは、別論で粘土骨格の即時圧縮と粘性圧縮を取り込んだ粘弾性構成式に基づく一次元圧密方程式を誘導し、骨格点における応力-ひずみに関する構成関係が同一である限り、排水距離の 2 乗則とアイソタックが成立することを示した。この問題の議論の発端となった網干の実験結果(Fig.10)に見られる圧密終期の沈下曲線のずれには、粘土構造骨格の遅延圧縮と非 Darcy 流れによる間隙水の排水の遅れの双方が関与するものと考えられ、それについては論を改めて検討することとしたい。

## 5. あとがき

本研究は、低動水勾配域における間隙水の非 Darcy 流れが圧密沈下速度に及ぼす影響を定量的に評価するため、圧密粘土供試体について直接透水試験を実施し、動水勾配の変化に対する透水特性の非線形性を確認するとともに、非 Darcy 流れが圧密沈下速度に及ぼす影響を粘土層厚との関連において検討したものである。本研究を通じて得られた知見を要約すると以下のとおりである。

- 1) 圧密粘土内の間隙水の平均流速  $v$  と動水勾配  $i$  の関係は、低動水勾配において原点を外れる直線関係を示し、下限動水勾配  $i_c$  の存在が確認された。下限動水勾配  $i_c$  以上の動水勾配では、透水係数  $k$  と間隙比  $e$  との間に  $e-\log k$  上で直線関係が認められる。また、 $i_c$  の値は圧密圧力の増加に伴って増加し、本実験で得られた  $i_c$  の大きさは圧密圧力 20 kPa~160 kPa に対し 6.5~13 であった。 $i_c$  は間隙比  $e$  との間に直線関係が認められる。
- 2) 下限動水勾配  $i_c$  以下の  $v-i$  関係を原点を通る 2 次曲線で近似し、過剰間隙水圧を未知数とする Terzaghi 型の一次元圧密方程式に取り込むことにより、非 Darcy 流れを考慮した一次元圧密解析を行うことができる。2 次曲線

( $v=ai^2$ ) による近似では曲線の係数が  $a=k/2i_c$  で与えられ、流速  $v$  と透水係数  $k$  は  $i_c$  のところで高動水勾配のそれと連続するため単純かつ合理的な近似である。

3) 非 Darcy 流れの圧密沈下速度に及ぼす影響は、室内圧密試験(標準圧密試験)のような薄い供試体では見極めることができず、粘土層厚が増大するにつれ影響が顕在化する。十分に厚い粘土層(供試体厚さの 500 倍程度)では、圧密開始当初から間隙水の排水は  $i_c$  以下の低動水勾配の下で進行する。供試体の数 10 倍から 100 倍程度の厚さの粘土層においては、動水勾配は  $i \geq i_c$  から  $i < i_c$  の状態へと推移し、圧密度の増大に伴って非 Darcy 流れの影響が増大する。

4) 圧密沈下曲線の後半で観測される二次圧密については、粘土骨格の応力-ひずみ関係に関する構成関係において検討されるべきものであり、非 Darcy 流れによる圧密沈下速度の遅れとは分離して考えるべきである。圧密終期の沈下曲線にみられるアイソタックの問題には、粘土骨格変形の遅延圧縮と非 Darcy 流れによる排水の遅れの双方が関与するのではないかと考えられる。

## 参考文献

- 1) 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.159-162 (1982)
- 2) 土と基礎: 沈下予測の実際(小特集), Vol.41, No.2, pp.1-28 (1993)
- 3) 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)
- 4) 地盤工学・実務シリーズ 12: 基礎の沈下予測と実際, 地盤工学会, pp.157-208 (2000)
- 5) S. Hansbo: Consolidation of clay with special reference to influence of vertical sand drains, Swedish Geotechnical Institute Proc. No.18 (1960)
- 6) H.W. Olsen: Hydraulic flow through saturated clays, Proc. 9th National Conf. Clay Minerals, New York, Pergomon Press (1961)
- 7) D. Swartzendruber: Non-Darcy flow behavior in liquid-saturated porous media, J. Geophysical Res. Vol.67, No.13, pp.5205-5213 (1961)
- 8) 大草重康訳: フローリンの土質力学, 第1巻, 森北出版, pp.58-61 (1976)
- 9) 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)
- 10) P.J.Roache, Computational Fluid Dynamics, Hermosa Publishers (1982)
- 11) H. 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)