

## 飽和粘土の低動水勾配域における透水特性が一次元圧密沈下速度に及ぼす影響

東海大学大学院 学生会員 ○村上 文都  
東海大学大学院 正会員 本間 重雄

### 1. はじめに

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。原位置の飽和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 1) 過剰間隙水圧が消散した後の粘土骨格のクリープ的沈下(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<sup>1,2)</sup>、2) 圧密中の間隙水の排水における非 Darcy 流れの影響<sup>3,4)</sup>などが指摘されている。本研究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ついて検討した。

### 2. 実験概要

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、その構成を図-1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。

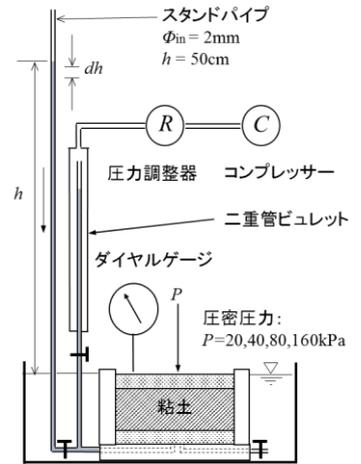


図-1 実験装置

### 3. 圧密粘土の透水特性

図-2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。図-2 (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。図-2(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。図-2(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

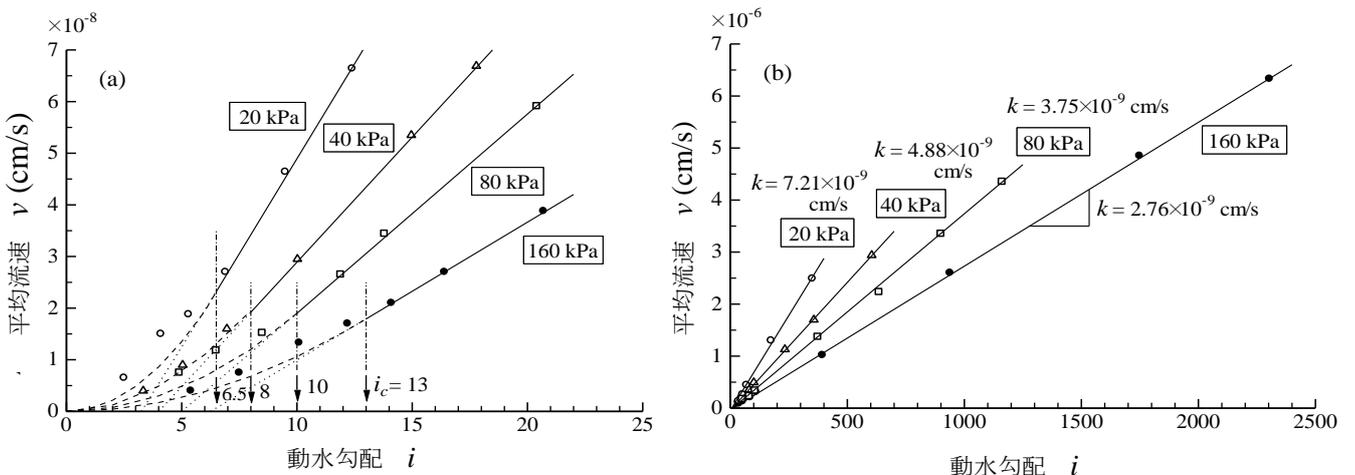


図-2 動水勾配と平均流速の関係

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

キーワード：透水性, 限界動水勾配, 非ダルシー流れ

連絡先：〒259-1292 神奈川県平塚市北金目 1117 東海大学工学部 Tel0463-58-1211 FAX0463-50-2045

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ことを考え、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。また  $i = i_c$  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

$$v = \frac{k}{2i_c} i^2 \tag{1}$$

で表される。 $i \geq i_c$  の領域では流速は

$$v = k(i - i_0) \tag{2}$$

で表される。(v は  $i_c$  で連続である。) 式(1)を  $i$  について微分すると

$$k_{ND} = k \frac{i}{i_c} \tag{3}$$

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(3)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(2)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. 非ダルシー流れが圧密沈下速度に及ぼす影響

上記の結果を踏まえ、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。

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{k}{m_v \cdot \gamma_w} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \tag{4}$$

式(4)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(4)を次のように書き換え

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{1}{m_v \cdot \gamma_w} \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial u}{\partial z} \right) \tag{5}$$

次式で計算される動水勾配

$$i = \frac{1}{\gamma_w} \frac{\partial u}{\partial z} \tag{6}$$

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(3)による  $k_{ND}$  を用いる。式(3)を内包する式(5)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。

図-3 を参照して、式(5)を差分化すると(メッシュ位置を  $j$ 、時間段階を  $n$  とする)

$$\frac{u_j^{n+1} - u_j^n}{\Delta t} = \frac{1}{2m_v \gamma_w \Delta z} \left\{ (k_{j,j+1}^{n+1} \frac{u_{j+1}^{n+1} - u_j^{n+1}}{\Delta z} - k_{j,j-1}^{n+1} \frac{u_j^{n+1} - u_{j-1}^{n+1}}{\Delta z}) + (k_{j,j+1}^n \frac{u_{j+1}^n - u_j^n}{\Delta z} - k_{j,j-1}^n \frac{u_j^n - u_{j-1}^n}{\Delta z}) \right\} \tag{7}$$

となり、整理すると

$$-\lambda k_{j,j+1}^{n+1} u_{j+1}^{n+1} + \{ \lambda (k_{j,j+1}^{n+1} + k_{j,j-1}^{n+1}) + 1 \} u_j^{n+1} - \lambda k_{j,j-1}^{n+1} u_{j-1}^{n+1} = \lambda \{ k_{j,j+1}^n u_{j+1}^n - (k_{j,j+1}^n + k_{j,j-1}^n) u_j^n + k_{j,j-1}^n u_{j-1}^n \} + u_j^n \tag{8}$$

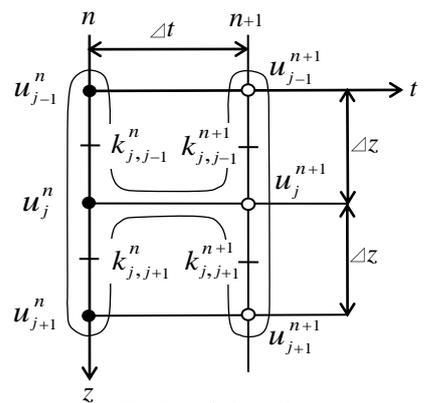


図-3 差分スキーム

となる。ここに、 $\lambda = \Delta t / (2m_v \cdot \gamma_w \cdot (\Delta z)^2)$  である。式(8)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(6)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(8)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>5)</sup>を用いて容易に解くことができる。

図-4 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 2.0 cm 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。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。図-4によると、荷重直後には排水面(上端)で急激な動水勾配が発生し、それが内部の動水勾配を次第に増加させていくが、 $t \approx 2 \text{ min}$  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。図-5 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、荷重後約 50 min で  $\sigma_e$  はほぼ一定値に収斂している。図-4 において  $i_c$  以下の低動水勾配が現れるのは、荷重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図-5 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。

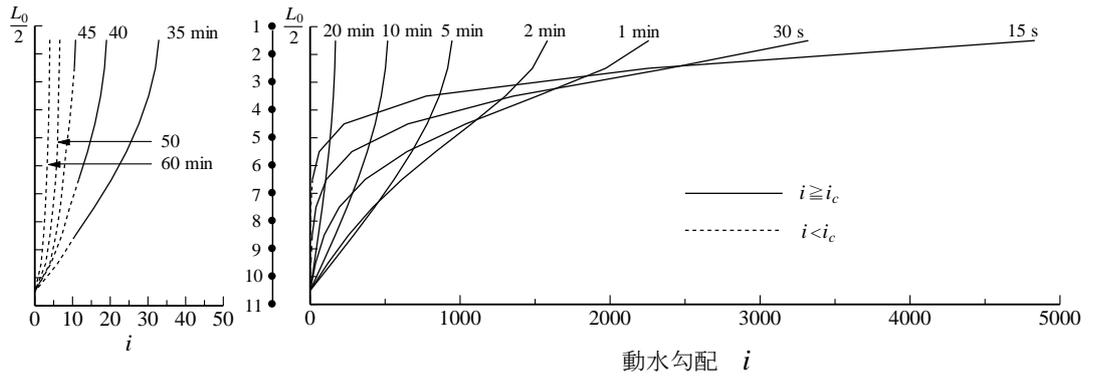


図-4 圧密中の動水勾配の変化

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図-6 である。ここでは圧密度としてひずみに関する圧密度( $U_e$ )を用いている。図-6 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 10 m (500 倍)では全期間が低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、非ダルシー流れが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。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。

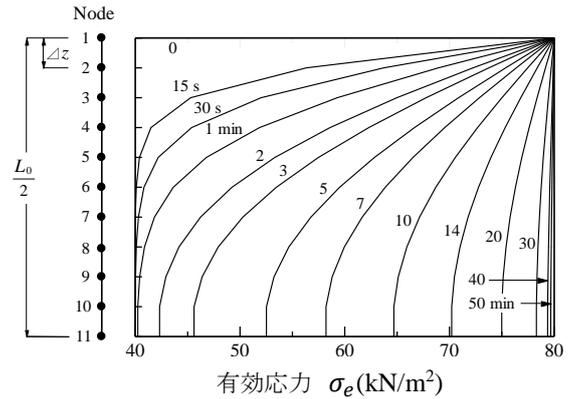


図-5 圧密中の有効応力の変化

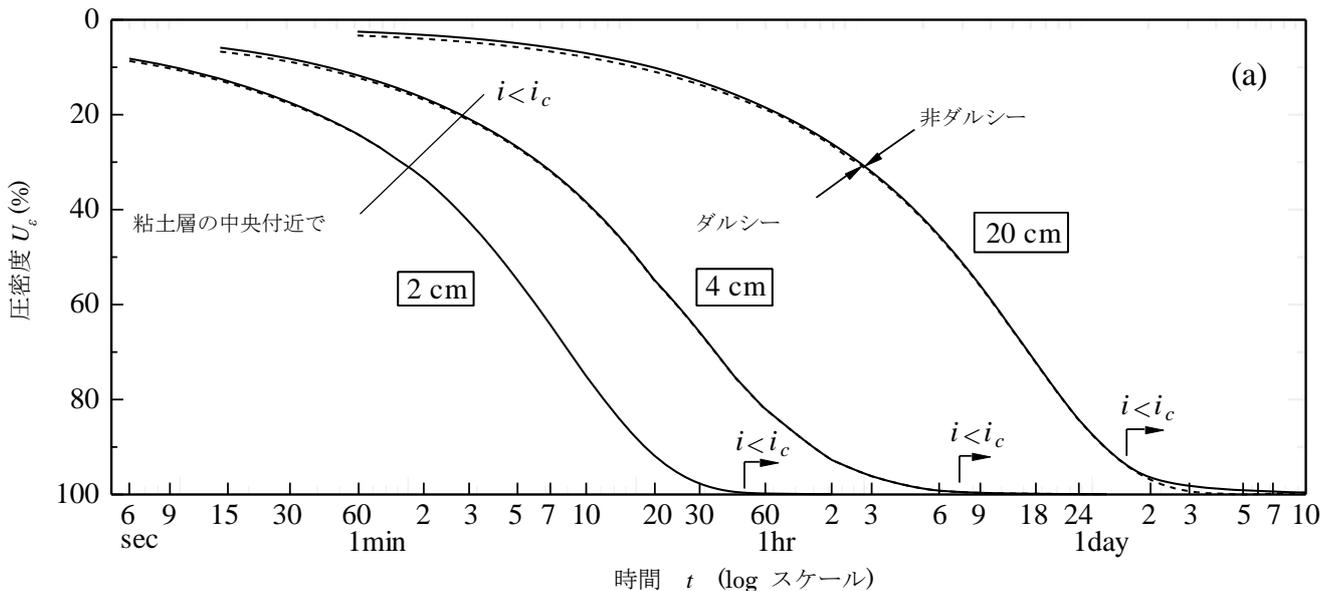


図-6(a) 非ダルシー流れが圧密沈下速度に及ぼす影響

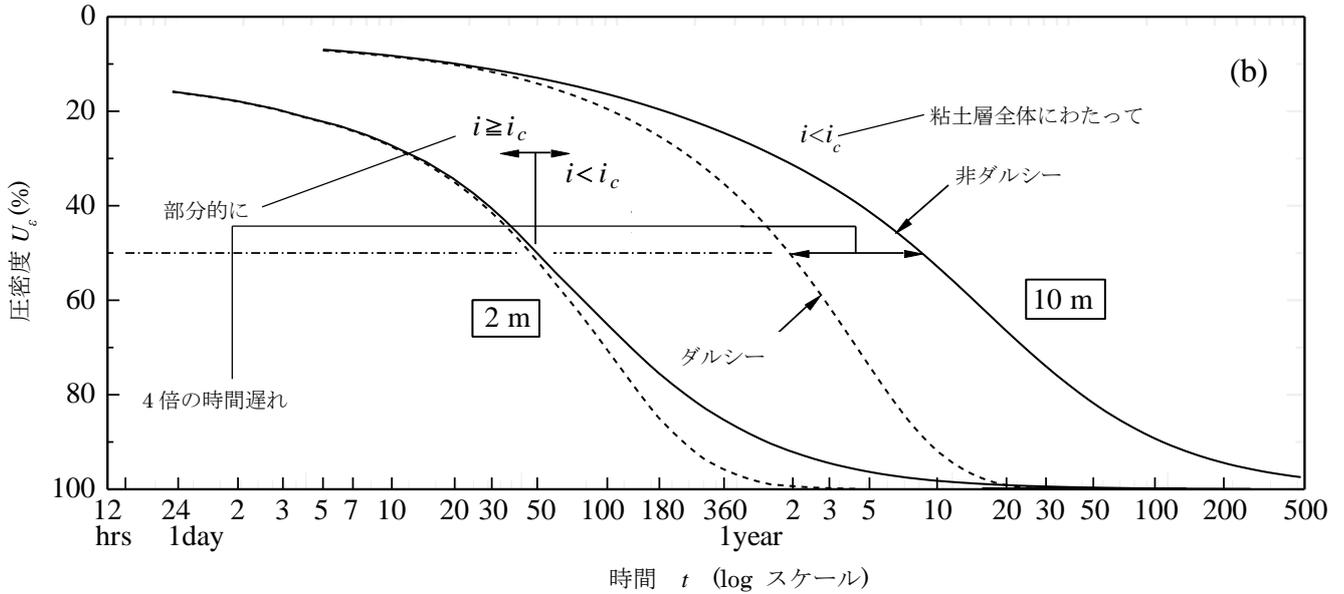


図-6(b) 非ダルシー流れが圧密沈下速度に及ぼす影響

5. まとめ

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。本研究より以下に示す結論が得られた。

- 1) 圧密粘土内の間隙水の平均流  $v$  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結果、圧密沈下速度が大きく遅れることが明らかとなった。

【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) P.J.Roache, Computational Fluid Dynamics, Hermosa Publishers (1982)