

第5章 地盤の疑似過圧密特性と試料の乱れ

白竜湖軟弱地盤において高速道路の本体盛土を構築するために、どのような対策を施すべきか、試験工事の結果を基に論じてきた。軟弱地盤対策として真空圧密工法を採用した試験盛土の挙動に基づき、複数の解析手法で高速道路の供用開始から20年後の残留沈下量を予測したところ、最大の予測結果でも高々20~30cm程度に収まるという結果となった。東北中央自動車道は、道央自動車道の残留沈下量^[1]の1/3程度の規模の残留沈下に収まるという結果である。信頼できる結果と考えて良いのだろうか。

残留沈下量の予測結果が最大となった解析コードは、Area1, Area3でDACSAR-VS, Area2でDACSAR-MCであった。これらは、どちらも関口・太田モデル^[2]の一部を拡張したモデル^[3]、^[4]を採用している。関口・太田の弾粘塑性構成モデルは、Bjerrumによる正規圧密粘土の疑似圧密効果の概念^[5]、^[6]と調和的である^[7]、^[8]。この、Bjerrumの概念から、地盤が堆積した年代を推定することができるはずである。地盤の堆積年代は、実際に測定した結果と比較が可能である。地盤工学の概念は、地質学と整合するのだろうか。

本章では、まず、関口・太田モデルから疑似圧密効果に関するBjerrumの概念と同様の考えが導かれることを示す。次に、白竜湖軟弱地盤を構成する土層の内、特に更新統の粘性土に着目し、土質試験の結果とBjerrumの概念から推定した地盤の堆積年代が、実際に測定した結果が、多くの場合で大幅に一致しないことを示す。その不一致は、前者が極端に小さくなる場合が多い。両者の不一致の原因を試料採取時の乱れによるものと考え、乱れた試料の特定を試みる。

残留沈下量が小さすぎるのではないかという疑いを持ったが、もし、多くの試料が乱れていたのであれば、逆に地盤の強度を過小評価した可能性も浮上する。その場合、第4章で述べた本体工の設計方針は過大かもしれない。

5-1 序論

正規圧密状態にあるはずの粘土が、圧密試験では過圧密状態にあるという結果になる場合が多い(疑似過圧密効果)。図 5-1 は、Bjerrum による正規圧密粘土の堆積年代と圧縮性についての概念図^{[5] [6]}で、疑似過圧密効果を説明したものである。

今、有効土被り圧 p_0 の下で二次圧密がまだほとんど始まっていない粘土を考える。これを young normally consolidated clay とする。この粘土は、図 5-1 では点 Y に位置している。図 5-1 の点 Y を通る曲線は、有効土被り圧 が瞬間的に载荷された状態を想定した圧縮曲線である^[9]。ここでは、载荷から 1 日後に相当するものとする。この粘土で圧密試験をすると、圧密降伏応力 p_c は、 p_0 とほぼ一致する。この粘土が有効土被り圧 を受け続けて点 A に至り、aged normally consolidated clay になったとする。図 5-1 では、点 A は点 Y より 1 万年の時間が経過している。この粘土で圧密試験をすると、圧密降伏応力 p_c は、 p_0 より大きくなる。時間の経過が、2 万年、5 万年、10 万年と増えていけば、 p_c と p_0 の比も大きくなっていく。つまり、古い粘土ほど過圧密比 OCR が大きくなる。

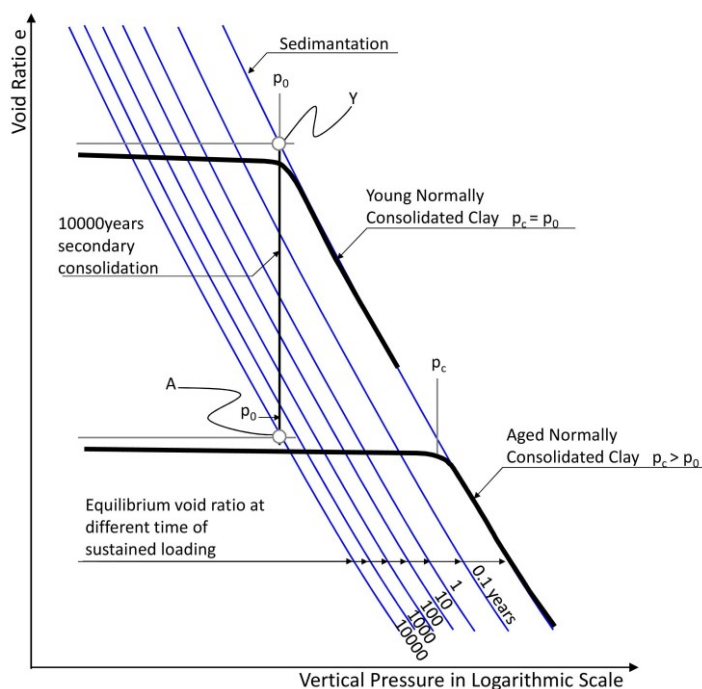


図 5-1 正規圧密粘土の堆積年代と圧縮性の関係^{[5] [6]}

図 5-2 を用いて、堆積した時期の異なる粘土の OCR を求める。図 5-2 では、簡単のため圧縮曲線を直線で表している。今、 t_1 だけ時間が経過した有効土被り圧 p_{01} の粘土の圧密降伏応力が p_{c1} であったとする。 t_1 の間に Δe_1 だけ間隙比が変化している。同様に、 t_2 だけ時間が経過 ($t_1 < t_2$) した粘土は、有効土被り圧 p_{02} 、圧密降伏応力 p_{c2} 、間隙比の変化量 Δe_2 とする。二次圧密の過程では、間隙比の変化量と圧密時間の対数が比例するので、式が成り立つ。

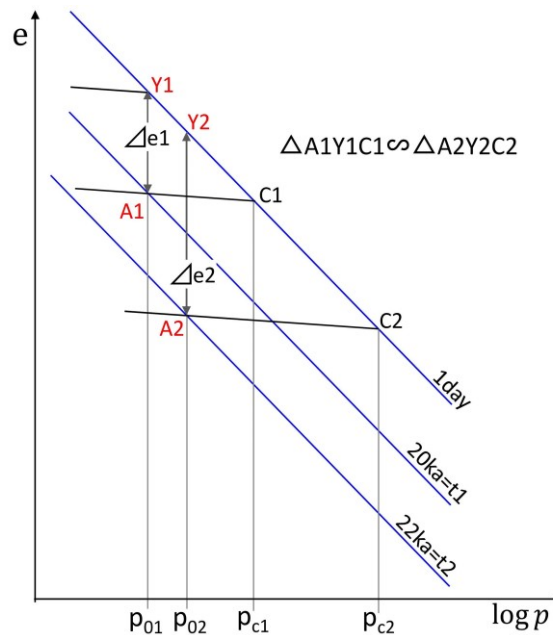


図 5-2 過圧密比の時間経過による増加の図解

$$\frac{\log t_2}{\log t_1} = \frac{\Delta e_2}{\Delta e_1}$$

(5-1)

図 5-2 より,

$$\Delta e_1 \times \log \frac{p_{c2}}{p_{02}} = \Delta e_2 \times \log \frac{p_{c1}}{p_{01}}$$

(5-2)

式 (5-1) と式 (5-2) から, 式 (5-3) を得る.

$$\frac{p_{c2}}{p_{02}} = \left(\frac{p_{c1}}{p_{01}} \right)^{\frac{\log t_2}{\log t_1}}$$

(5-3)

均一な粘土であれば, ある深さの粘土と比較して, それより深い粘土の *OCR* は僅かずつ増加する. 図 5-3 (a) は, 式 (5-3) を作図したものである. また, 図 5-3 (b) は, 図 3-23 (b) から更新統の粘性土のみを抽出したものである. 図 5-3 (b) には, 図 5-3 (a) に示した *OCR* の計算値を併記した. 図 5-3 (a) の計算上の初期値は, (b) の一番浅い深度のプロットを参考に, 深度 15m で *OCR* = 1.8 とした. また, 時間経過は地盤の堆積速度を式 (3-1) より 0.5m/kyr として求めた. 計算値も図 5-3 (b) のスケールでは一

定に見えるが、式(5-3)の計算では深度60mの位置のOCRは約1.9になる。これに対し、実測値はバラつきが大きく評価が難しいが、深度60m付近でOCR=1.0程度に低下している。

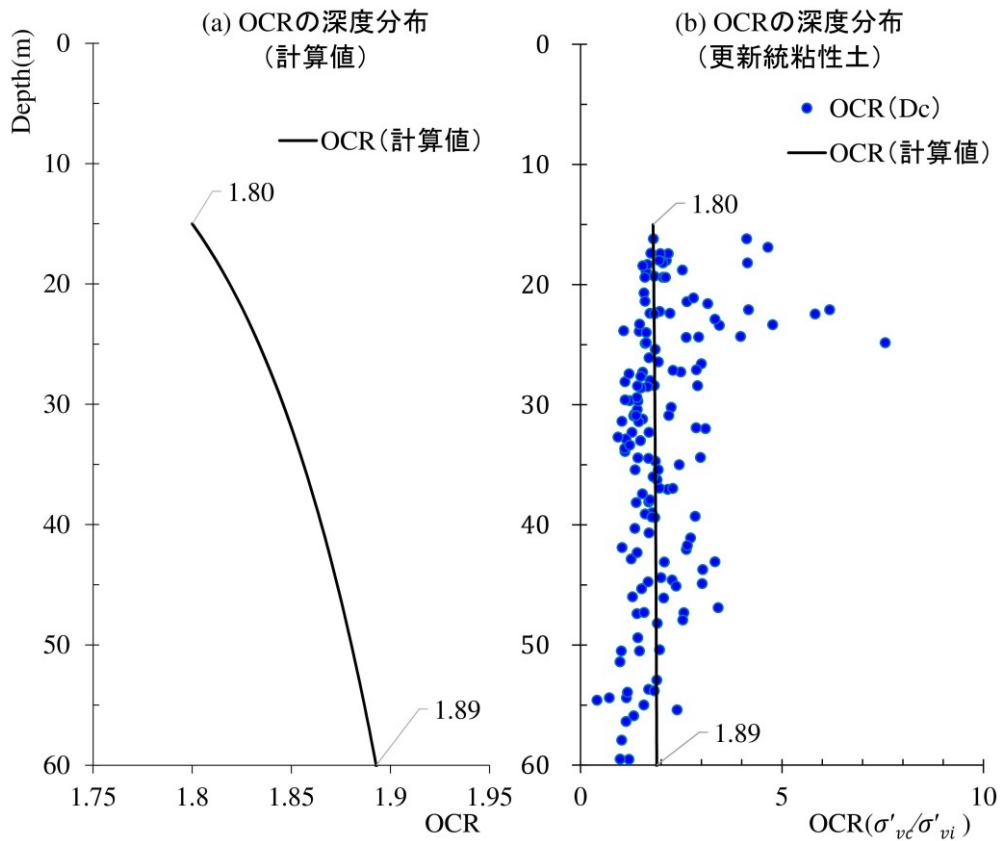


図 5-3 過圧密比の深度による増加の計算値と実測値の比較

Mesri and Choi^[10]や Murakami^[11]は図 5-1 から次式を導いている。

$$OCR = \left(\frac{t_i}{t_c} \right)^{\frac{C_a}{C_c}} \quad (5-4)$$

OCRは過圧密比、 C_c は圧縮指数、 C_a は二次圧密係数である。 t_i を地盤が堆積した後の経過時間(day)、 t_c を試験に要する時間(day)とすると、標準圧密試験では $t_c = 1$ であるので、式(5-4)は式(5-5)のとおり変形できる。

$$t_i = OCR^{\frac{C_c}{C_a}} \quad (5-5)$$

式(5-5)を用いると、地盤の堆積年代を推定できる。陸上に道路構造物などを構築する場合、深度数十メートルまでの地盤が対象となる。およそ数千年から十数万年で堆積した地盤である。当然、通常は古い地盤ほど下層に堆積している。

実際に白竜湖軟弱地盤の粘性土の標準圧密試験の結果を用いて計算してみると、多くの結果がそのようにはならない。圧密試験で求めたデータに基づく計算結果では、 t_i は大きなバラつきが生じるうえ極めて小さな値となる場合が多い。その結果、深い土層から採取した試料が、浅い土層から採取した試料より新しいという答えが導かれてしまう。後に述べるとおり、 C_c と C_a の比は本章で扱う範囲内ではほぼ一定になる。このため、 t_i が小さく計算される原因は、図5-3(b)で見たOCRのバラつきに起因しているように見える。

Bjerrumの概念は広く受け入れられており、例えば関口・太田による弾・粘塑性構成モデル(関口・太田モデル)²⁾もこのアイディアと調和的である。第4章では、複数の解析コードを用いて高速道路供用後の沈下量を予測した結果を示したが、予測結果が最大となった解析コードの構成式は関口・太田モデルに基づいている。このため、Bjerrumの概念から導出した結果が実際の状況と大きく乖離してしまうのであれば、その要因を把握しておきたい。また、式(5-5)によれば、地盤の堆積年代の測定結果は、原位置の状況を示す大きな手掛かりとなり得る。このシンプルな式が正しい限り、矛盾した答えが導かれた場合、それは「圧密試験の結果のどこかがおかしい」ということになる。

5-2 堆積年代の推定式

5-2-1 関口・太田モデルによる導出

まず、関口・太田の弾粘塑性構成モデルで、式(5-4)と同様に疑似過圧密効果を説明できることを示す。ここでは、飯塚による解説^{[7]、[8]}を参考とする。

正規圧密粘土において、間隙比の変化 de は、弾性成分 de^e と塑性成分 de^p の和として表せるものとする。

$$de = de^e + de^p \quad (5-6)$$

この場合、等方的な平均有効応力 p' の変化による間隙比の変化は平均有効応力の対数に比例する(図5-4(a))。自然対数表記の圧縮指数と膨潤指数をそれぞれ λ 、 κ とすると、以下のとおり表せる。

$$\lambda = -\frac{de}{d(\ln p')} \quad (5-7)$$

$$\kappa = -\frac{de^e}{d(\ln p')} \quad (5-8)$$

よって、式(5-6)は、以下のとおり変形できる。

$$de^p = -(\lambda - \kappa)d(\ln p') \quad (5-9)$$

$$d(\ln p') = \frac{dp'}{p'} \text{ より,}$$

$$de^p = -(\lambda - \kappa)\frac{dp'}{p'} \quad (5-10)$$

ここで、塑性ひずみ増分 $d\varepsilon_v^p$ は圧縮を正として、下式のとおり表せる。

$$d\varepsilon_v^p = -\frac{de^p}{1+e_0} \quad (5-11)$$

よって、式 (5-10), (5-11) より、

$$d\varepsilon_v^p = -\frac{\lambda - \kappa}{1 + e_0} \frac{dp'}{p'} \quad (5-12)$$

式 (5-12) について、 $p' = p'_0$ のとき $\varepsilon_v^p = 0$ として定積分すると、塑性体積ひずみ ε_v^p は、式 (5-13) のとおりとなる。

$$\begin{aligned} \int_0^{\varepsilon_v^p} d\varepsilon_v^p + \frac{\lambda - \kappa}{1 + e_0} \int_{p'_0}^{p'} \frac{1}{p'} dp' &= 0 \\ \varepsilon_v^p - 0 + \frac{\lambda - \kappa}{1 + e_0} [\ln p']_{p'_0}^{p'} &= 0 \\ \varepsilon_v^p &= \frac{\lambda - \kappa}{1 + e_0} \ln \frac{p'}{p'_0} \end{aligned} \quad (5-13)$$

同様に、

$$de^e = -\kappa \frac{dp'}{p'} \quad (5-14)$$

より、弾性体積ひずみ ε_v^e は、式 (5-15) のとおりとなる。

$$\varepsilon_v^e = \frac{\kappa}{1 + e_0} \ln \frac{p'}{p'_0} \quad (5-15)$$

一方、図 5-4 (b) は、せん断応力の変化による正規圧密粘土の体積変化を示している。ここで、式 (5-6) において、等方的な平均有効応力の変化に伴う塑性成分を de_c^p と書き直したうへ、塑性成分 de^p は、等方的な平均有効応力の変化に伴う塑性成分 de_c^p とせん断応力の変化に伴う体積変化 de_d^p の和として定義しなおす。

$$de = de^e + de^p = de^e + de_c^p + de_d^p \quad (5-16)$$

せん断応力の変化に伴う体積変化は非可逆的であるものとみなすと、

$$de_d^p = -(1 + e_0) Dd \left(\frac{q}{p'} \right) \quad (5-17)$$

と書き表すことができる^[8]。(D はダイレイタンスー係数^[12]、q はせん断応力。)

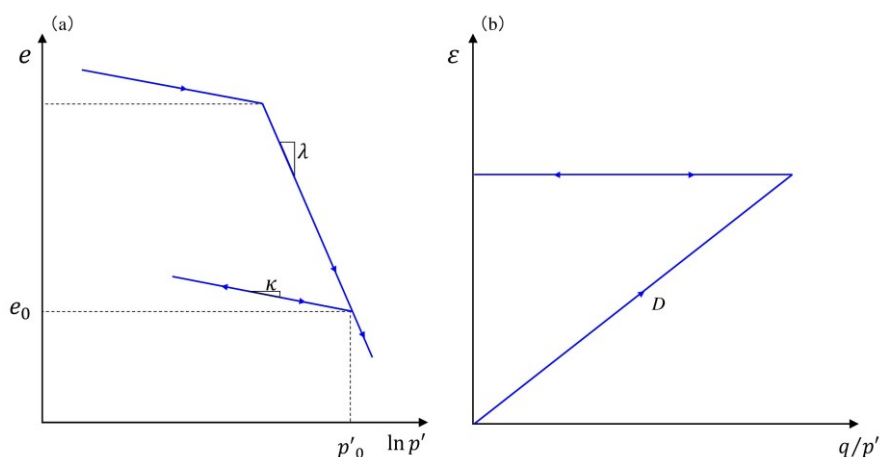


図 5-4 正規圧密粘土の体積変化

よって、式 (5-16) は、以下のとおりとなる。

$$\begin{aligned}
 de &= -\kappa \frac{dp'}{p'} - (\lambda - \kappa) \frac{dp'}{p'} - (1 + e_0) D d\left(\frac{q}{p'}\right) \\
 &= -\lambda \frac{dp'}{p'} - (1 + e_0) D d\left(\frac{q}{p'}\right)
 \end{aligned}$$

(5-18)

さらに、 $p' = p'_0$ のとき $q = 0$ 、 $\varepsilon_v = 0$ の条件を与えれば、体積ひずみは式 (5-19) のとおりとなる。

$$\begin{aligned}
 \varepsilon_v &= \int_0^{\varepsilon_v} d\varepsilon_v \\
 &= \frac{\lambda}{1 + e_0} \int_{p'_0}^{p'} \frac{dp'}{p'} + D \int_0^{\frac{q}{p'}} d\left(\frac{q}{p'}\right) \\
 &= \frac{\lambda}{1 + e_0} \ln \frac{p'}{p'_0} + D \left(\frac{q}{p'}\right)
 \end{aligned}$$

(5-19)

ここで、式 (5-16) の塑性成分に着目すると、

$$de^p = -(\lambda - \kappa) \frac{dp'}{p'} - (1 + e_0) D d\left(\frac{q}{p'}\right)$$

(5-20)

より、同様に、式 (5-21) を得る*1。

*1 この式は、Cam-clay モデル [23]において、塑性体積ひずみを硬化パラメータとした降伏関数とみなすことができる。

$$\begin{aligned}\varepsilon_v^p &= \int_0^{\varepsilon_v^p} d\varepsilon_v^p \\ &= \frac{\lambda - \kappa}{1 + e_0} \int_{p'_0}^{p'} \frac{dp'}{p'} + D \int_0^q d\left(\frac{q}{p'}\right) \\ &= \frac{\lambda - \kappa}{1 + e_0} \ln \frac{p'}{p'_0} + D \left(\frac{q}{p'}\right)\end{aligned}$$

(5-21)

関口・太田の弾塑性構成モデルでは、式(5-19)を次のとおり拡張する。

$$\varepsilon_v = \frac{\lambda}{1 + e_0} \ln \frac{p'}{p'_0} + D\eta^*$$

(5-22)

η^* は、応力比パラメータと呼ばれ、せん断応力と平均有効応力の比が K_0 圧密のときと比べてどの程度変化したかを示す量で、せん断が進むに従い増加するスカラー量^[13]とされている。この拡張により、異方性と主応力の回転に伴う塑性ひずみを表現している^{[2]、[14]}。塑性体積ひずみは、式(5-21)と同様に、式(5-23)のとおりとなる。

$$\varepsilon_v^p = \frac{\lambda - \kappa}{1 + e_0} \ln \frac{p'}{p'_0} + D\eta^*$$

(5-23)

塑性体積ひずみを硬化／軟化パラメータとすると、式(5-23)より、降伏関数として式(5-24)を得る。

$$f = \frac{\lambda - \kappa}{1 + e_0} \ln \frac{p'}{p'_0} + D\eta^* - \varepsilon_v^p = 0$$

(5-24)

さらに、粘土の時間依存性挙動を表現するため、弾粘塑性構成モデル^[2]が提案されている。このモデルにおいては、ひずみ増分が弾性(可逆的)ひずみ増分と粘塑性(時間依存性を含み非可逆的)ひずみ増分との和であるものとする^[15]。本来は、テンソルで表記すべきであるが、ここでは略筆する。

$$\varepsilon_v = \varepsilon_v^e + \varepsilon_v^p$$

(5-25)

式(5-25)の粘塑性成分 ε_v^p が次のような流動曲面 F にあるものとする*2。

$$F = \alpha \ln \left\{ 1 + \frac{t}{t_0} \exp \left(\frac{f}{\alpha} \right) \right\} - \varepsilon_v^p = 0$$

(5-26)

*2 本来は、関連流れ則(塑性ひずみ速度の法線則)を定義すべきであるが、ここでは省略した。

α はひずみで表した自然対数表記の二次圧密係数、 t は時間で t_0 は時間依存性の発現の基準となる時間、 f はスカラー関数で式 (5-24) から以下を用いる。

$$f = \frac{\lambda - \kappa}{1 + e_0} \ln \frac{p'}{p'_0} + D\eta^* \quad (5-27)$$

今、 q/p' が一定の単調負荷経路をとる三軸圧密を考える。このような負荷経路を想定した場合、ダイレイタンシーは生じない [7] [8]。弾性体積ひずみは式 (5-15) のとおりであるので、式 (5-25)、(5-26) より、体積ひずみ ε_v は、式 (5-28) のとおりとなる。

$$\varepsilon_v = \frac{\kappa}{1 + e_0} \ln \frac{p'}{p'_0} + \alpha \ln \left\{ 1 + \frac{t}{t_0} \exp \left(\frac{f}{\alpha} \right) \right\} \quad (5-28)$$

$f < 0$ であれば、関数 $f(x) = \ln\{1 + \exp(x)\}$ の性質 (図 5-5) (ただし、 $t \rightarrow t_0$) より、

$$\varepsilon_v \rightarrow \frac{\kappa}{1 + e_0} \ln \frac{p'}{p'_0} \quad (5-29)$$

$f > 0$ であれば、

$$\varepsilon_v \rightarrow \frac{\kappa}{1 + e_0} \ln \frac{p'}{p'_0} + \left(f + \alpha \ln \frac{t}{t_0} \right) \quad (5-30)$$

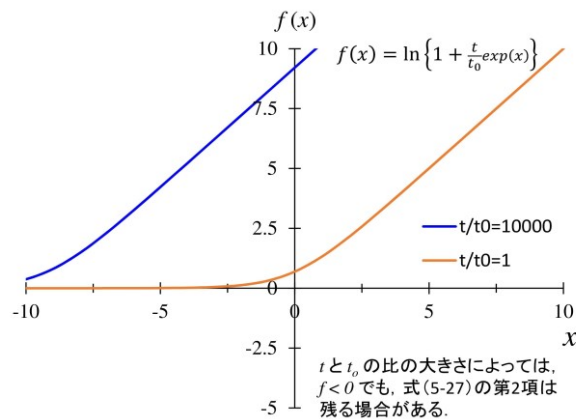


図 5-5 関数 $f(x) = \ln\{1 + \exp(x)\}$ の性質

f に式 (5-24) を用いれば、式 (5-30) は、

$$\varepsilon_v = \frac{\lambda}{1 + e_0} \ln \frac{p'}{p'_0} + D\eta^* + \alpha \ln \frac{t}{t_0} \quad (5-31)$$

想定した圧密の定義より，

$$\varepsilon_v = \frac{\lambda}{1+e_0} \ln \frac{p'}{p'_0} + \alpha_e \ln \frac{t}{t_0}$$

(5-32)

図 5-6 に関口・太田の弾粘塑性構成モデルの圧密過程における理論経路を示す^[7]。図 (b) の α_e は，間隙比で表した二次圧密係数（自然対数表記）である。荷重載荷により，図 (a) の初期点 I から点 B に至る。この経路は時間によらず弾性的である。式 (5-29) はこの $t=0$ の直線を示している。この直線の傾きは K である。時間が経過して t_0 になるとすると，粘塑性変形が進行し，図では点 P に至る。（実際には間隙水の消散を伴うため，図の破線に示した経路となると考えられている。）この点 P は，式 (5-32) で時間 t を $t=t_0$ としたときに得られる傾き λ の直線上にある。式 (5-32) の時間 t を変化させると，傾き λ の直線は無数に描ける。時間の経過は図 (b) の横軸と対応している。

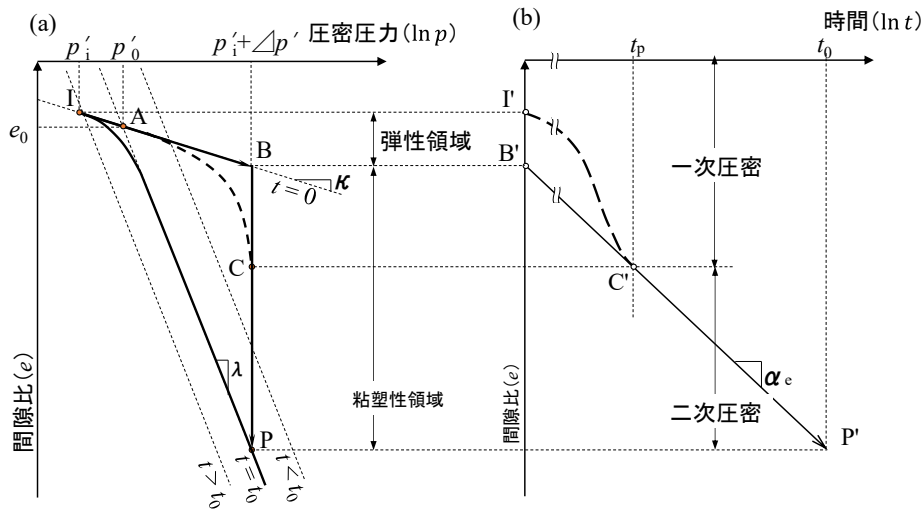


図 5-6 関口・太田の弾粘塑性モデルによる圧密過程^{[7], [8]}

図 5-7 に，式 (5-29) および式 (5-32) を改めて示す。

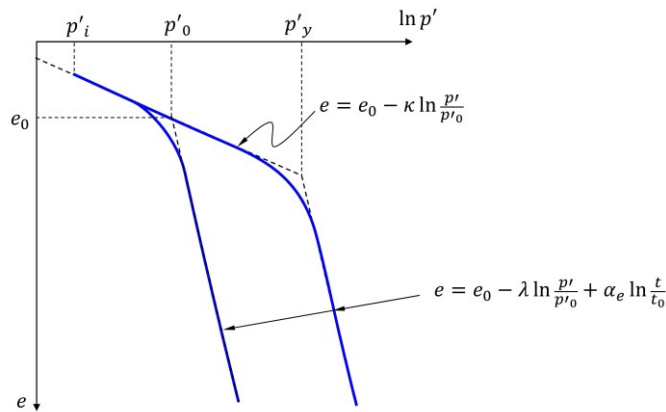


図 5-7 関口・太田の弾粘塑性モデルの理論線群^{[7], [8]}

今、 p'_i なる有効土被り圧を時間 t_i だけ受けた試料がある。この試料を t_c なる載荷ステップで圧密試験に供したところ、図5-8に示すように、圧密降伏応力が p'_c であったとすると、式(5-32)は次式のとおりとなる。

$$e_c - e_i = \lambda \ln \frac{p'_i}{p'_c} + \alpha_e \ln \frac{t_i}{t_c} \tag{5-33}$$

また、式(5-29)より、下式が成り立つ。

$$e_c = e_i - \kappa \ln \frac{p'_i}{p'_c} \tag{5-34}$$

よって、式(5-33)(5-34)より、式(5-35)を得る。

$$\frac{p'_c}{p'_i} = \left(\frac{t_i}{t_c} \right)^{\frac{\alpha_e}{\lambda - \kappa}} \tag{5-35}$$

通常の標準圧密試験では、 t_c は1(day)であるので、式(5-35)は、式(5-36)とおりとなる。式(5-36)は、弾性領域の取り扱いに違いがあるものの、式(5-5)と同形である。

$$t_i = \left(\frac{p'_c}{p'_i} \right)^{\frac{\lambda - \kappa}{\alpha_e}} \tag{5-36}$$

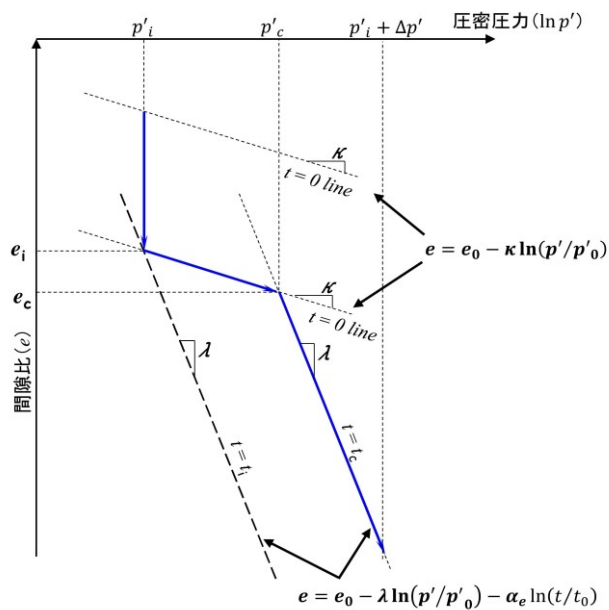


図5-8 時間効果に伴う圧密降伏応力の変化¹⁷⁾

5-2-2 Bjerrum の概念図を基にした導出

図 5-9 は、実際の標準圧密試験の結果の一例を細かく整理したものである。図 5-9 (a) は間隙比と鉛直有効応力、(b) は間隙比と載荷時間の関係で、変位計の読みを記録した時点における間隙比をすべてプロットしている。標準圧密試験なので、わずか1,440分(1日)分のデータではあるが、図 5-9 (a) の圧縮曲線の正規圧密領域に現れる傾き C_c の平行線群は Bjerrum の概念図(図 5-1)と同等である。図 5-10 に、図 5-9 の正規圧密領域をのみを示した。図 5-9 の横軸は、常用対数表示としているが、図 5-10 では自然対数表示としている。供試体が適当な大きさ(厚さ)で、試験時間が十分に長ければ、図 5-10 (a) の平行線群は Bjerrum の概念図のように描画できるものとする。

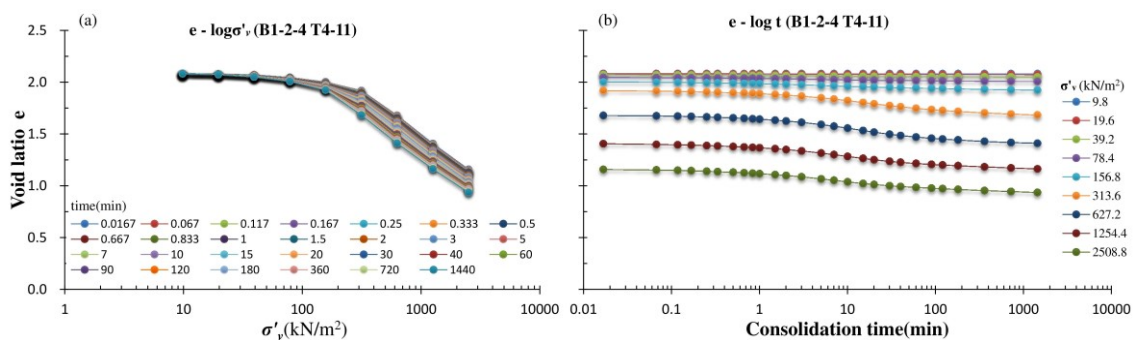


図 5-9 標準圧密試験の結果の一例

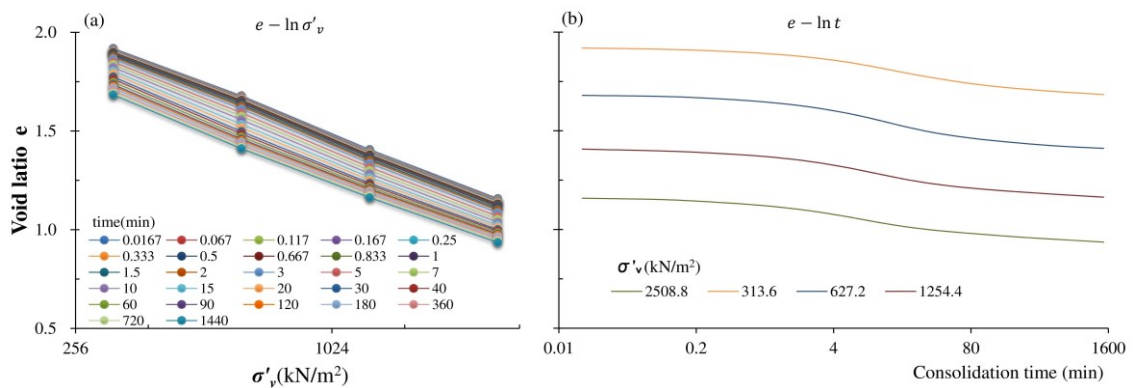


図 5-10 標準圧密試験の結果の一例(正規圧密領域)

図 5-9 や図 5-10 は、どちらも縦軸を間隙比 e としているため、これを共通の軸として図 (a) と (b) を一つの図に表すことができる(図 5-11)。図 5-11 は、(a)、(b)とも横軸は自然対数表示としているが、(a) は図 5-9、(b) は図 5-10 について、表現を変えて示したものである。圧密試験の結果をこのように表現する方法は、Mesri et al. も示している^[16]。図 5-11 (b) は、Bjerrum の概念図(図 5-1)について、奥行き方向に時間をずらして描画したものと同等である。

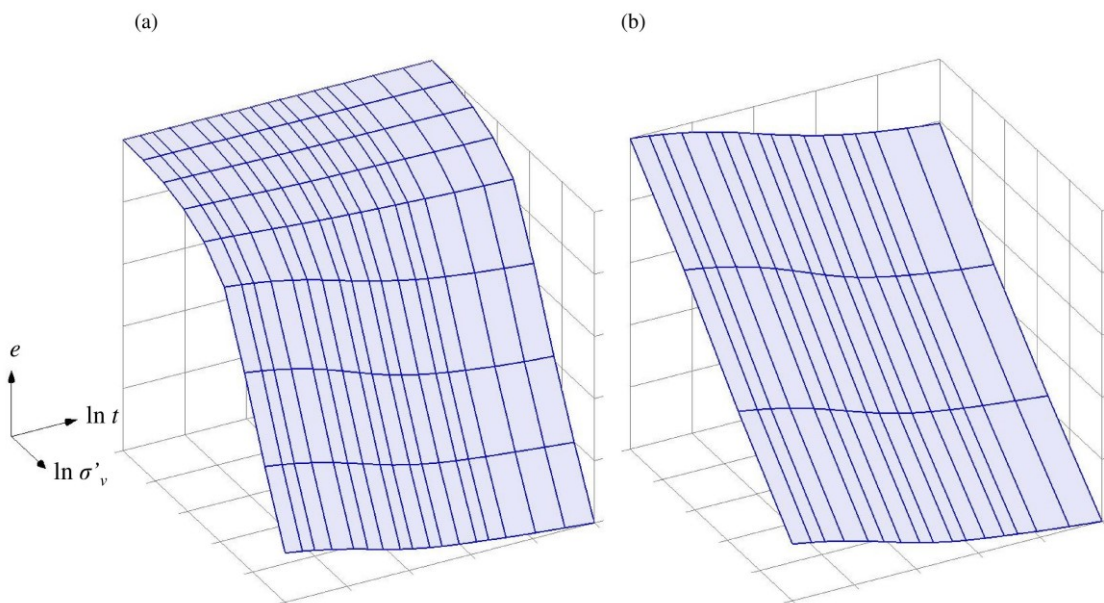


図 5-1.1 標準圧密試験の結果の3軸表示

図 5-1.1 (b) を平面とみなすと、図 5-1.2 のとおりの模式図に示せる。この図より、以下の関係が成り立つ。

$$de + \lambda \frac{d\sigma'_v}{\sigma'_v} + \alpha_e \frac{dt}{t} = 0$$

(5-37)

$e=e_i$ のときの σ'_v 、 t を $e=e_i \rightarrow \sigma'_v = \sigma'_{vi}, t=t_i$ として、式 (5-37) を区間 $[e_i, e]$ 、 $[\sigma'_{vi}, \sigma'_v]$ 、 $[t_i, t]$ で定積分すると式 (5-38) を得る。

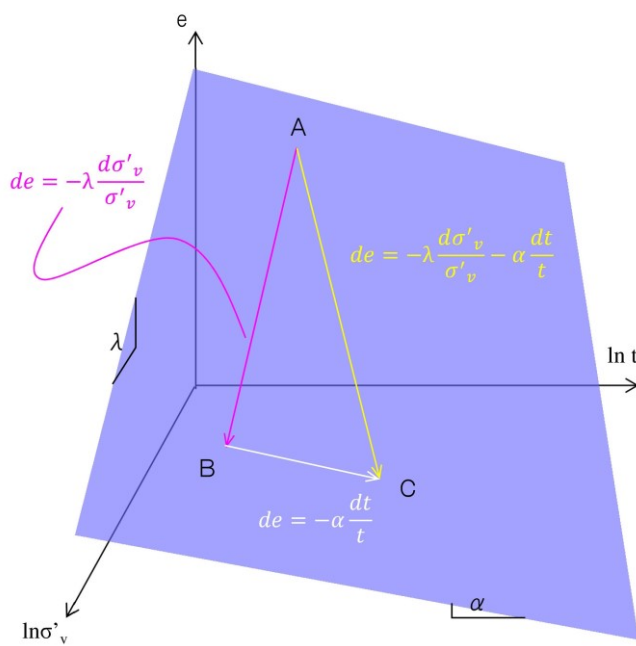


図 5-1.2 正規圧密領域の圧密試験結果の模式図

$$\int_{e_i}^e de + \lambda \int_{\sigma'_{vi}}^{\sigma'_v} \frac{1}{\sigma'_v} d\sigma'_v + \alpha_e \int_{t_i}^t \frac{1}{t} dt = 0$$

$$e - e_i + \lambda [\ln \sigma'_v]_{\sigma'_{vi}}^{\sigma'_v} + \alpha_e [\ln t]_{t_i}^t = 0$$

$$e - e_i + \lambda \ln \frac{\sigma'_v}{\sigma'_{vi}} + \alpha_e \ln \frac{t}{t_i} = 0$$

$$e = e_i + \lambda \ln \frac{\sigma'_{vi}}{\sigma'_v} + \alpha_e \ln \frac{t_i}{t}$$

(5-38)

今、 σ'_{vi} なる有効土被り圧を時間 t_i だけ受けた間隙比 e_i の試料がある。この試料を載荷時間ステップ t_c の圧密試験に供したところ、圧密降伏応力が σ'_{vc} 、間隙比が e_c であった(図5-13)とすると、式(5-38)は以下のとおりとなる。

$$e_c = e_i + \lambda \ln \frac{\sigma'_{vi}}{\sigma'_{vc}} + \alpha_e \ln \frac{t_i}{t_c}$$

(5-39)

また、図5-13の傾き K の直線は、以下のとおりとなる。

$$e_c = e_i + \kappa \ln \frac{\sigma'_{vi}}{\sigma'_{vc}}$$

(5-40)

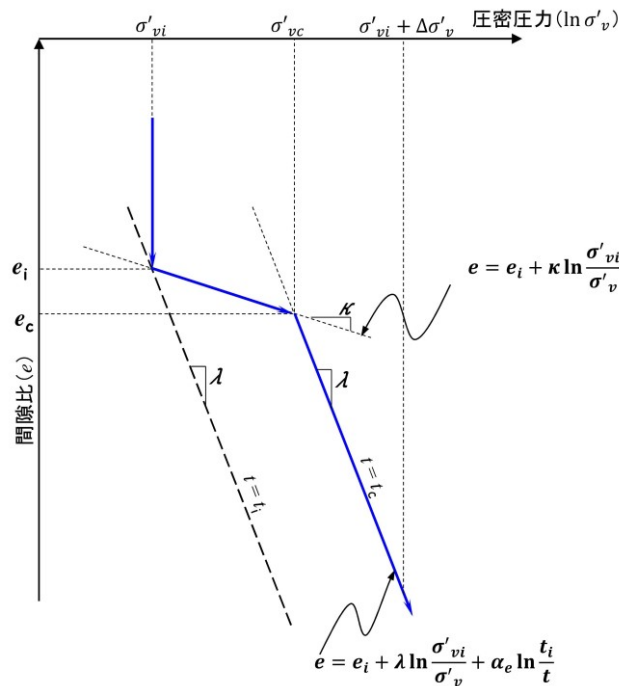


図 5-13 時間効果と試験結果の関係

式 (5-39), (5-40) より, 式 (5-42) を得る.

$$\begin{aligned} \lambda \ln \frac{\sigma'_{vi}}{\sigma'_{vc}} + \alpha_e \ln \frac{t_i}{t_c} &= \kappa \ln \frac{\sigma'_{vc}}{\sigma'_{vi}} \\ \alpha_e \ln \frac{t_i}{t_c} &= (\lambda - \kappa) \ln \frac{\sigma'_{vc}}{\sigma'_{vi}} \\ \ln \frac{\sigma'_{vc}}{\sigma'_{vi}} &= \frac{\alpha_e}{\lambda - \kappa} \ln \frac{t_i}{t_c} \\ \ln \frac{\sigma'_{vc}}{\sigma'_{vi}} &= \ln \left(\frac{t_i}{t_c} \right)^{\frac{\alpha_e}{\lambda - \kappa}} \end{aligned} \tag{5-41}$$

$$\therefore \frac{\sigma'_{vc}}{\sigma'_{vi}} = \left(\frac{t_i}{t_c} \right)^{\frac{\alpha_e}{\lambda - \kappa}} = \left(\frac{t_i}{t_c} \right)^{\frac{C_\alpha - C_s}{C_\alpha - C_s}} \tag{5-42}$$

図 5-13 を Bjerrum の概念図で示せば, 図 5-14 のとおりとなる. また, 式 (5-42) より, 式 (5-43) を得る. $t_c = 1$ (day) とすれば, 式 (5-36) との違いは, 式 (5-36) が平均有効応力を用いた記述であるのに対し, 式 (5-43) は鉛直有効応力を用いている点だけである.

$$\therefore \frac{t_i}{t_c} = \left(\frac{\sigma'_{vc}}{\sigma'_{vi}} \right)^{\frac{\lambda - \kappa}{\alpha_e}} = \left(\frac{\sigma'_{vc}}{\sigma'_{vi}} \right)^{\frac{C_e - C_s}{C_\alpha}} \tag{5-43}$$

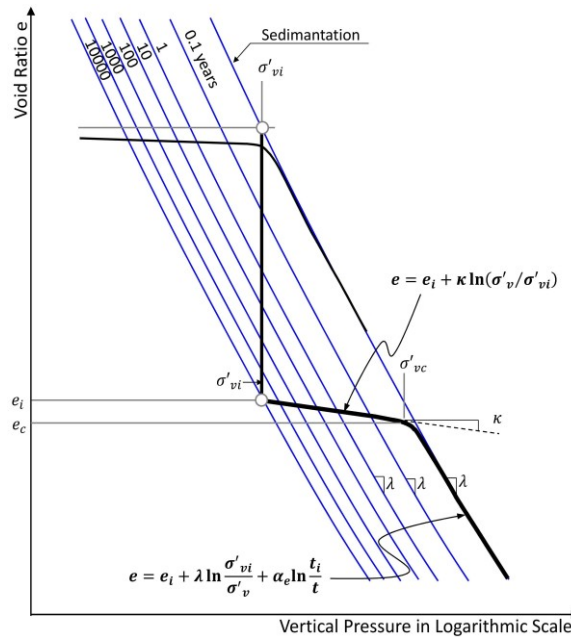


図 5-14 正規圧密粘土の堆積年代と圧密試験

5-3 堆積年代の測定値と推定値の比較

5-2で示したとおり，関口・太田の弾粘塑性構成モデルの圧密荷重過程における負荷経路から求めた式(5-36)は，Bjerrumの疑似過圧密効果の概念図から求めた式(5-43)と同形で両者は極めて調和的である。

ここでは，白竜湖軟弱地盤の更新統粘性土の標準圧密試験の結果(追加試験を除き全153データ)により，式(5-43)を用いて試料を採取した土層の堆積年代を推定する。そのうえで，第3章で示した白竜湖軟弱地盤の堆積年代の測定結果，つまり式(3-1)で求めた t_a と比較してみる。なお，式(5-43)の t_i は，有効土被り圧が瞬間的に σ'_v になった後の経過時間であるのに対し，式(3-1)の t_a は，地盤が厚さ d になるのに要した時間である。土被り圧の荷重過程に関していえば，瞬間荷重と漸増荷重の違いがある。

5-3-1 圧密定数の設定

式(5-43)において，標準圧密試験を想定すると t_c は1(day)であるため，3つの圧密定数と圧密降伏応力および有効土被り圧が求まれば，未知数は t_i だけになる。圧密降伏応力と有効土被り圧は既に示したとおりである。

圧縮指数 C_c や膨潤指数 C_s は，通常の標準圧密試験で求めれば良い。また，二次圧密係数 C_α は，長期圧密試験で求めることが多い。長期圧密試験は有効土被り圧に増加予定の上載荷重を加えた程度の荷重を採用することが多いが，これでは正規圧密領域の試験結果とならない場合が多い。このため，今回は式(3-1)の導出過程を勘案して標準圧密試験の結果で圧縮曲線が平行になる正規圧密領域を対象に， $e-\log t$ 関係により C_α を求めた。図5-15にその概念を示す。(実際には荷重ステップと測定時間に応じで複数の曲線を描画することになるが，図5-15では省略している。)また，図5-16に具体的に一例を示した。図5-16の例では，荷重時間180分から1440分の範囲で $e-\log t$ 曲線の傾きが一定になる範囲の平均値を採ることとした。

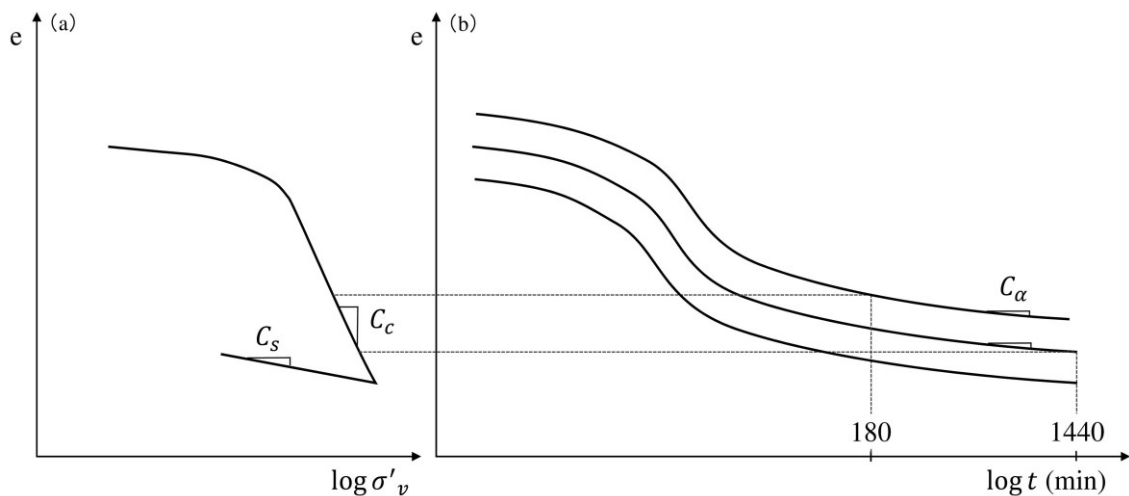
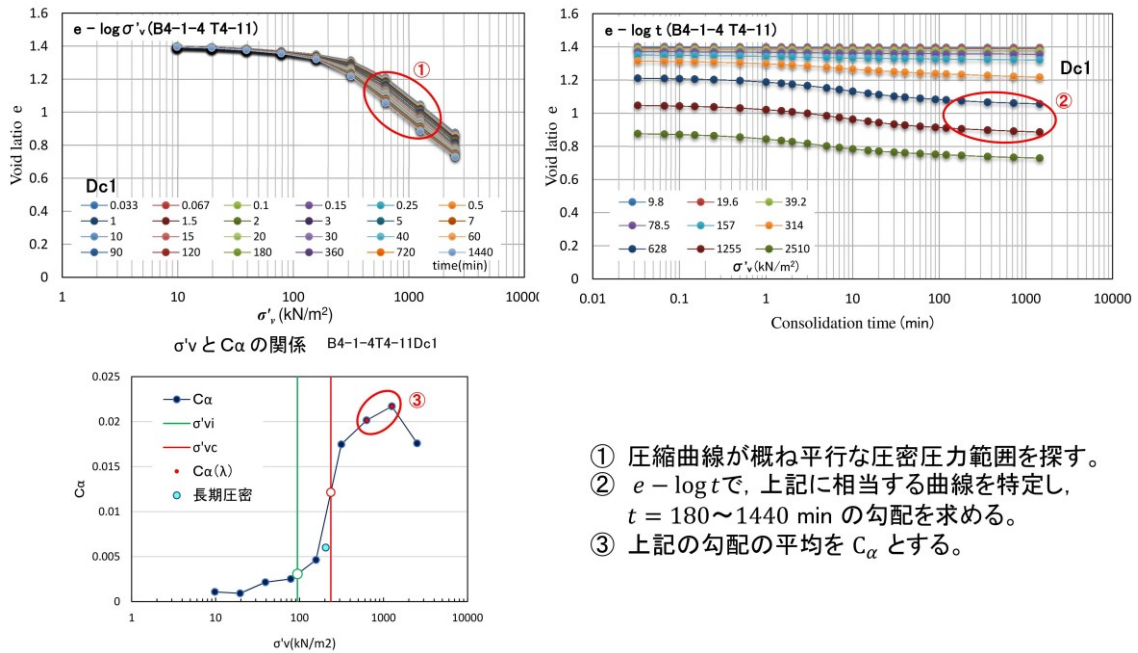


図 5-15 間隙比と圧密圧力および圧密時間の関係と圧密定数の設定

第5章 地盤の疑似過圧密特性と試料の乱れ



- ① 圧縮曲線が概ね平行な圧密圧力範囲を探す。
- ② $e - \log t$ で、上記に相当する曲線を特定し、 $t = 180 \sim 1440 \text{ min}$ の勾配を求める。
- ③ 上記の勾配の平均を C_α とする。

図 5-16 t_i の計算に使用した C_α の求め方

図 5-17 (a) に、 C_s と C_c の関係、(b) に、 C_α と C_c の関係を示す。 C_α と C_c の関係は、他のデータから大きく乖離している7点を除外して求めた。なお、153データ中の56データは圧密試験時の記録が不足して C_α を求めることができなかった。この場合は、図 5-17 (b) の関係を利用して C_c から C_α を求めることとした。

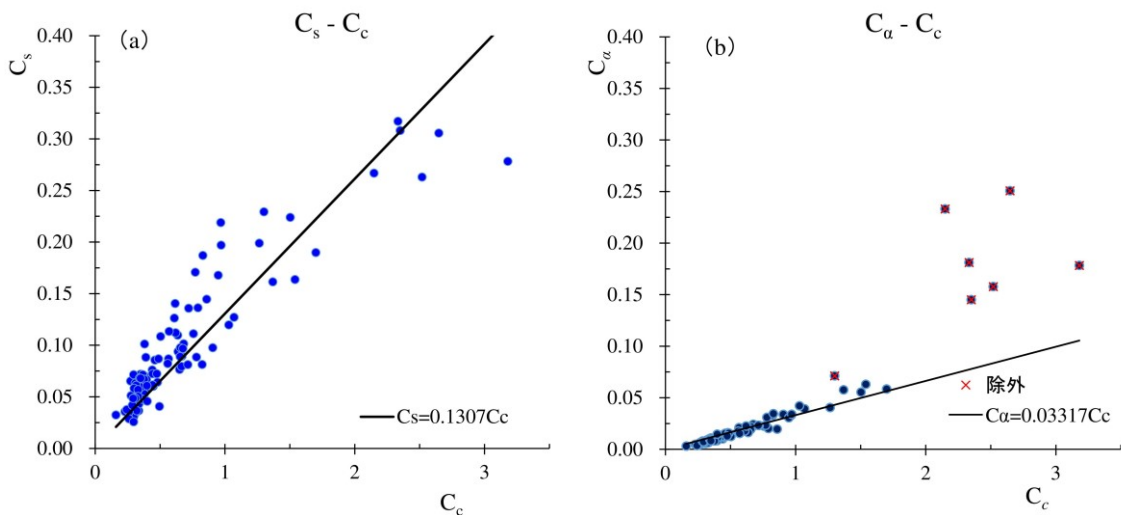


図 5-17 膨潤指数および二次圧密係数と圧縮指数の関係

なお、 C_α の異常値は、図 5-17 (b) のとおり、統計的に処理して特定した。Mesri and Castro によれば、 C_α と C_c の関係として $C_\alpha/C_c = 0.04 \pm 0.01$ が成り立つとされる^[17]。図 5-17 (a) に示した赤色の点線は、その範囲である。両者の関係は、概ね Mesri and Castro が示した範囲内にある。

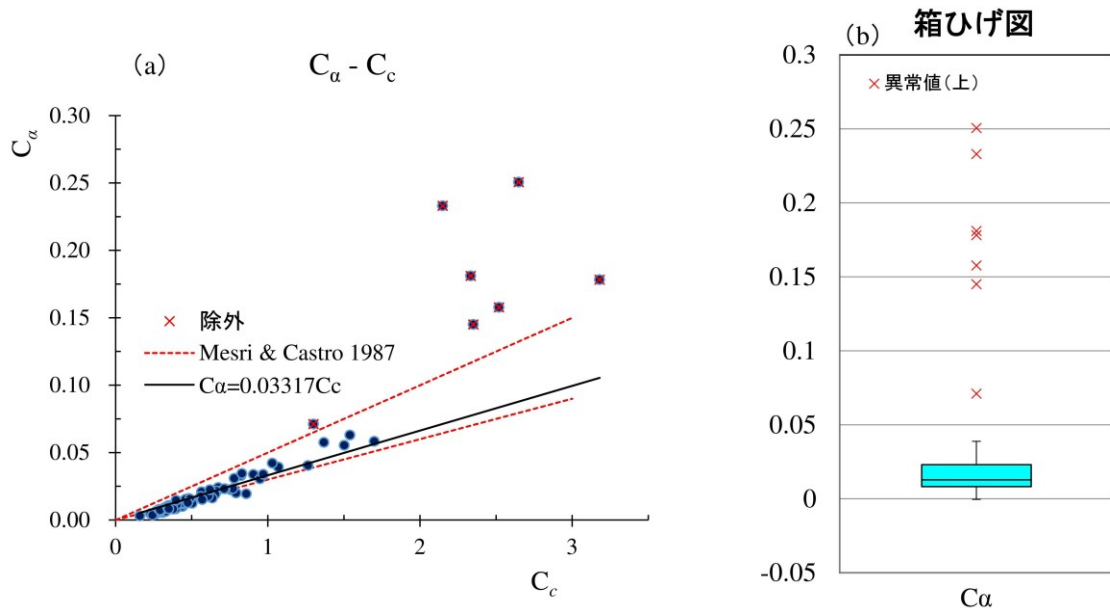


図 5-18 C_α の異常値の除外

式(5-43)は、堆積年代が過圧密比OCRの $(C_c - C_s)/C_\alpha$ 乗で求められることを示している。式(5-36)は、過圧密比が平均有効応力で示されている*3が、べき指数の部分は図5-17の関係からほぼ一定で、式(5-43)のべき指数と同値となる。仮にすべての計算で図5-17の関係を用いるとすると、式(5-44)のとおり、堆積年代は過圧密比の約25乗ということになる。

$$\frac{\lambda - \kappa}{\alpha_e} = \frac{0.4343C_c - 0.4343C_s}{0.4343C_\alpha} = \frac{C_c - C_s}{C_\alpha} = \frac{C_c - 0.1307C_c}{0.03317C_c} \approx 26.207 \quad (5-44)$$

図5-19は、実際の計算で用いた $(C_c - C_s)/C_\alpha$ の深度分布を示したものである。全体の約1/3のデータで図5-17(b)の関係を利用しているが、 C_c と C_s については各々実測の圧密定数を使用しており、バラつきが生じている。また、深度分布からは明確な傾向を読み取ることができない。

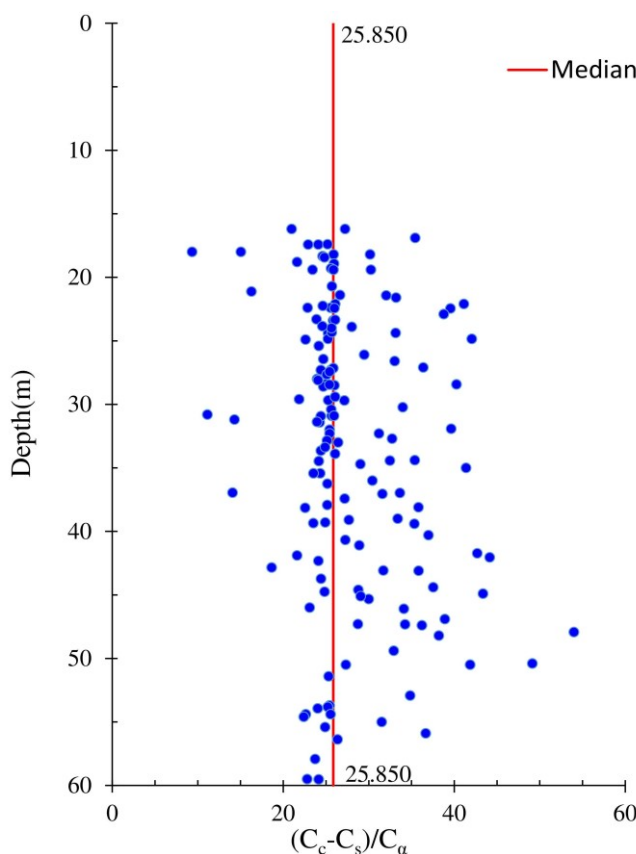


図 5-19 $(C_c - C_s)/C_\alpha$ の深度分布

*3 t_i を平均有効応力で求めた場合、計算結果が全体的に小さくなり、バラつきも小さくなる。

5-3-2 測定値と推定値の比較

図 5-2 0 に、式 (5-4 3) で試料を採取した土層の堆積年代を推定した結果 (t_i) と、第 3 章で述べた白竜湖軟弱地盤の堆積年代の測定結果 (t_a) との比較を示した。 t_a は、第 3 章で述べたとおり放射性炭素年代測定とテフラの同定によるもので、深度 40m 程度までしかない。図は深度 60m までの比較となっているが、 t_a は外挿して求めている。また、 t_i は、その計算結果の単位が「日」であるが、 t_a に合わせて「10ka」とした*4。図 5-2 0 (a) は、横軸を対数表示としてある。また、参考として、 t_a の 0.01 倍と 100 倍の線を併記した。 t_a は数万年というレベルの大まかな比較対象ではあるが、多くの場合 t_i は t_a とかけ離れてしまう。どちらかと言えば、 t_i は t_a より桁違いに小さくなる場合が多い ($t_i < 0.01t_a$; 63 データ, $100t_a < t_i$; 45 データ)。図 5-2 0 (b) は、(a) の横軸を線形表示としたものであるが、 $t_i < t_a$ となる場合、「ほとんどの t_i がほぼゼロ」という計算結果となっている。また、「下位の土層の堆積年代が上位の土層の堆積年代より新しい」という矛盾した結果も多い。図 5-2 1 に、図 5-2 0 (a) について $t_i < 0.01t_a$ となる場合と、 $100t_a < t_i$ となる場合の t_i のプロットを強調して表示した。

なお、計算結果が瞬間載荷と漸増載荷の違いの影響を受けたのであれば、傾向の顕著な偏りが生じるはずであるが、そのような傾向はなかった。

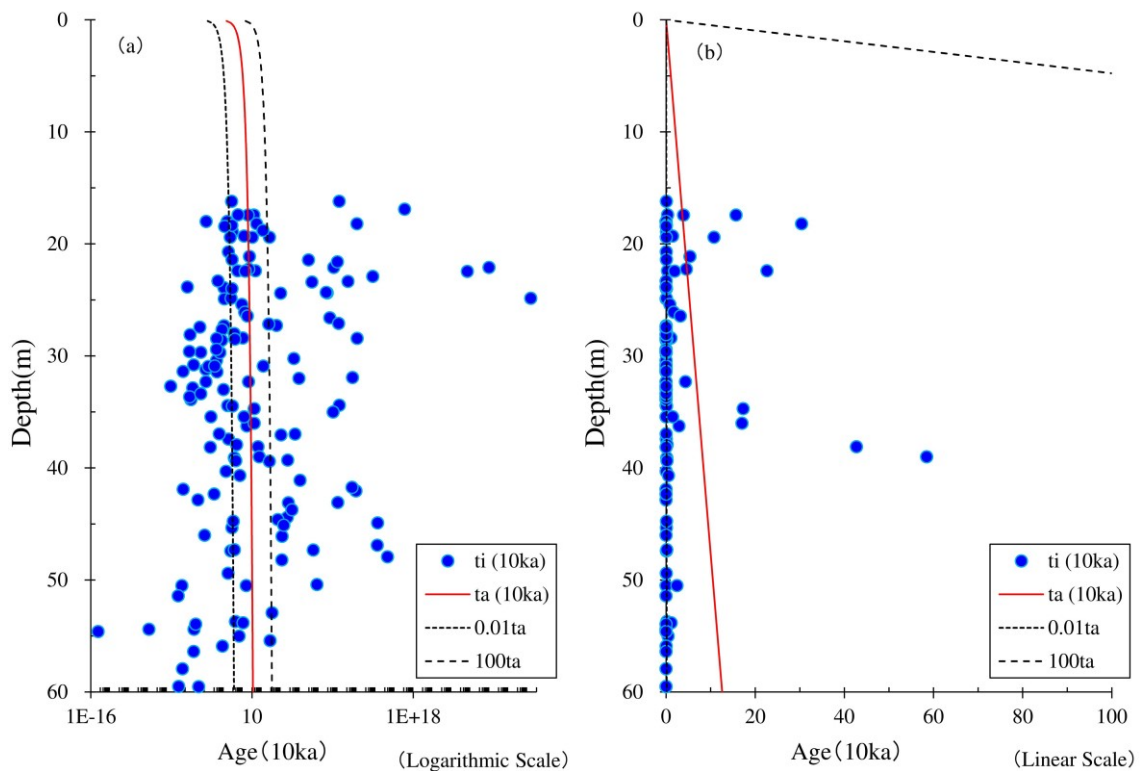


図 5-2 0 地盤の堆積年代の推定値と測定値の比較

*4 ka は「kilo annum」の略で、西暦 2000 年を基準に 1000 年前を示す単位。

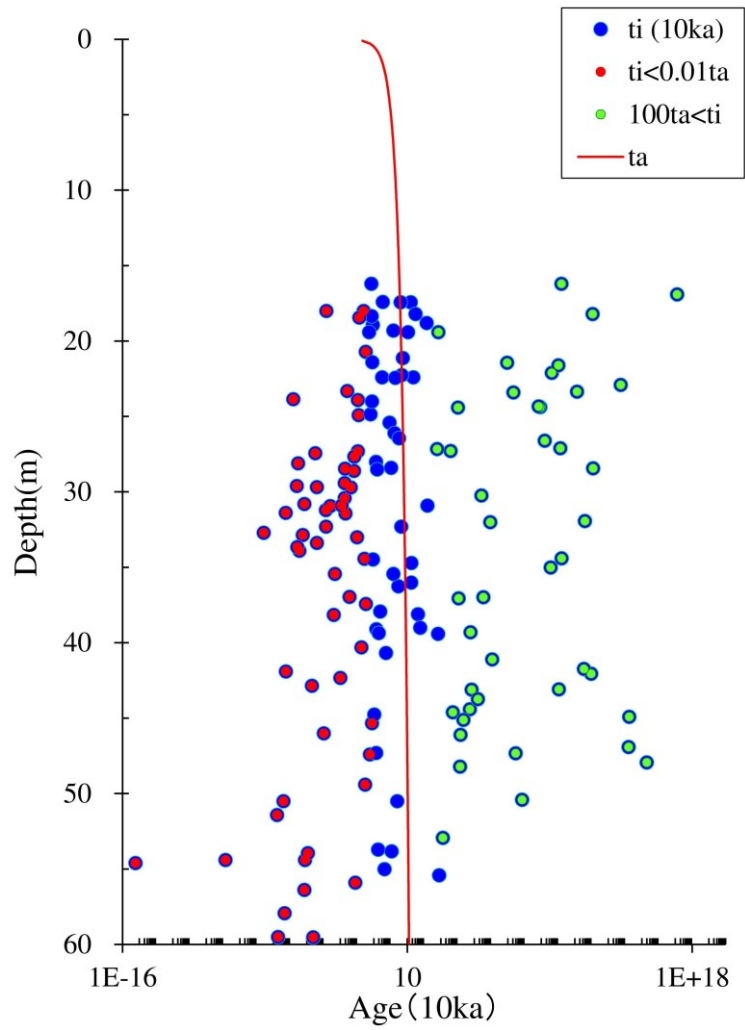


図 5-2 1 地盤の堆積年代の推定値と測定値の比較 (乖離データの強調)