

飽和粘土の異方圧密における変形挙動の解析

ANALYSIS OF DEFORMATION BEHAVIOR OF A SATURATED SOFT
CLAY IN ANISOTROPIC CONSOLIDATION TESTS

安 原 一 哉*

By Kazuya YASUHARA

1. 緒 言

飽和粘土のための応力・ひずみ関係に関するいくつかの有力な研究^{1),2)}がこれまでに提案されてきた。最近では、さらにこれに時間の要因を考慮する試みも多くみられるようになってきた。このような飽和粘土の応力・ひずみ・時間関係式確立の目的の一つは、種々の载荷条件のもとでの現地盤の変形挙動の解析に役立てることである。

本文では、二次圧密をも含めた粘土地盤上の構造物による三次元的沈下解析のための簡便な方法を提案するために、三軸クリープ試験機を用いて、まず、排水条件のもとで、飽和粘土の応力・ひずみ・時間特性を調べた。その後、いくつかの仮定に基づいてこれらを実験的な構成式として数式化して、同じ飽和粘土供試体のストレス・パスの異なる試験（異方圧密試験および排水クリープ試験）における変形挙動を解析した。このような検討を行った理由は、飽和粘土地盤上に築造された構造物によって、載荷面中央下付近に生じていると考えられる異方圧密時の変形挙動を、得られた構成式がよく説明するならば、少なくとも部分荷重をうける飽和粘土地盤の多次元的沈下計算法の手がかりは得られると考えられるからである。

なお、ここでいう“三軸クリープ試験機”とは、原理的には従来の三軸圧縮試験機となんら変わらないものの、従来のそれに対し、本機は圧密およびクリープ特性を調べることをおもな目的としているため、このように称しているものである³⁾。

2. 飽和粘土の異方圧密におけるストレス・パスと変形特性

正規圧密状態にある飽和粘土地盤上に、有限幅の構造物が負荷される時、載荷面中央下においては鉛直応力が最大主応力と一致し、主応力比一定に近い異方圧密が生じるといわれている（Fig. 1 の AB プロセス）。この場合の粘土の変形挙動を軸対称三軸圧密試験機によって再現するためには、粘土供試体を土被り圧に等しい軸荷重のもとで K_0 圧密させた後、地盤内に載荷重によって生じると考えられる増加主応力 $\Delta\sigma_1, \Delta\sigma_3$ を負荷し異方圧密試験を行う。赤井⁴⁾によれば、このときの地盤内におけるストレス・パスは Fig. 2 における \overrightarrow{ABC} とさ

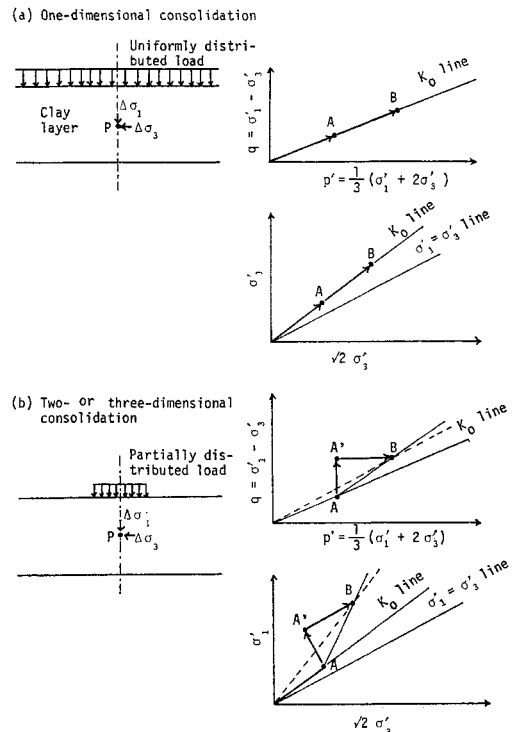


Fig. 1 Stress state and stress path in one-dimensional and two- or three-dimensional consolidations

* 正会員 工博 西日本工業大学助教授 工学部土木工学科

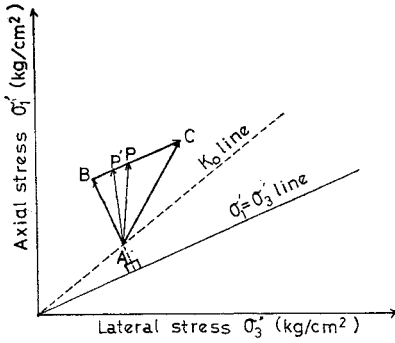


Fig. 2 Stress path in drained creep and anisotropic consolidation tests

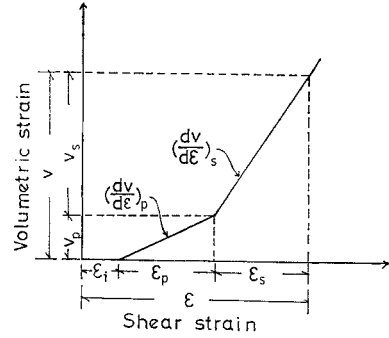


Fig. 4 Schematic relation between volumetric strain and shear strain in triaxial drained creep and anisotropic consolidation tests

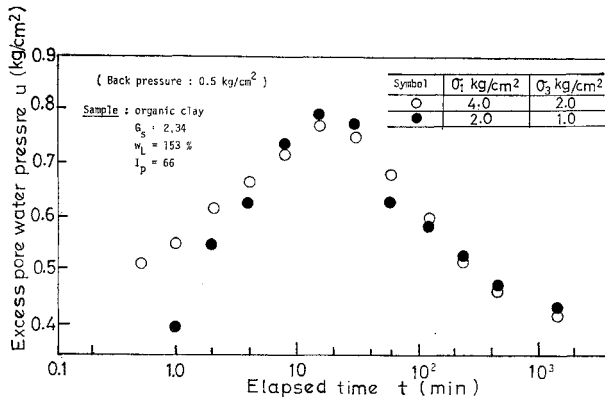


Fig. 3 An example of the variation of excess pore-water pressure with time in the anisotropic consolidation test on an organic clay

れているが、筆者の実験によれば、異方圧密および排水クリープ試験中の間隙水圧の挙動は、たとえば、Fig. 3 のようになり、ABC のようにはならないと考えられる。すなわち、まず載荷後しばらくは、非排水に近い条件下で間隙水圧は上昇し、その値が、

$$\Delta u = \frac{1}{3}(\Delta \sigma_1 + 2 \Delta \sigma_3)$$

にほぼ等しい値に達した後、間隙水圧は消散し始めそれに伴って排水が進み始める。このときのストレス・パスは、載荷直後、すなわち、 $t=0$ において、Fig. 2 の P 点に達し、その後せん断応力一定条件下で平均有効主応力がいったん減少する傾向を示し P' 点または B 点に至る。その後間隙水圧が消散し始め、最終的に C 点に到達すると考えられる。C 点到達後も二次圧密によるクリープ的な変形が進行する。

このような異方圧密中の供試体の体積ひずみとせん断ひずみの関係を模式的に示せば、Fig. 4 のようになるであろう。このようにモデル化すれば、Fig. 2 の $\overrightarrow{APP'}$ 過程では非排水条件下の即時沈下を、 $\overrightarrow{P'C}$ 過程では間隙水圧の消散を伴う一次圧密沈下を、C 点到達後は有効応力一定後の二次圧密を示すことになる。したがって、異方

圧密中の体積ひずみとせん断ひずみは結局次式のような重ね合わせによって表わせることになる。

$$v = v_p + v_s \dots\dots\dots (1)$$

$$\epsilon = \epsilon_i + \epsilon_p + \epsilon_s \dots\dots\dots (2)$$

3. 飽和粘土の異方圧密解析のための 応力・ひずみ・時間関係

(1) 準備的考察

ここで導かれた飽和粘土の異方圧密試験における変形挙動の解析のための応力・ひずみ・時間関係式は以下に述べるようないくつかの仮定に基づいている。

(1) 外力を受ける土要素のひずみ成分 ϵ_{ij} は時間依存成分 $\epsilon_{ij}^{(t)}$ と時間非依存成分 $\epsilon_{ij}^{(0)}$ とから成り立っている。すなわち、

$$\epsilon_{ij} = \epsilon_{ij}^{(0)} + \epsilon_{ij}^{(t)} \dots\dots\dots (3)$$

と表わせる。このひずみの重ね合わせは Fig. 5 におけるキイ・スケッチによってよく理解することができる。おのおののひずみテンソル $\epsilon_{ij}^{(0)}$ 、 $\epsilon_{ij}^{(t)}$ はそれぞれ球テンソルと偏差テンソルとからなるので、

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_{ij} &= e_{ij} + \delta_{ij} \cdot \epsilon_m \\ \epsilon_{ij}^{(0)} &= e_{ij} + \delta_{ij} \cdot \epsilon_m^{(0)} \\ \epsilon_{ij}^{(t)} &= e_{ij}^{(t)} + \delta_{ij} \cdot \epsilon_m^{(t)} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (4)$$

と書くことができよう。ここで、 e_{ij} ：偏差ひずみテンソル、 δ_{ij} ：クロネッカーデルタおよび ϵ_m ：次式で与えられる平均主ひずみである。

$$\epsilon_m = (\epsilon_{11} + \epsilon_{22} + \epsilon_{33})/3 \dots\dots\dots (5)$$

また、このうち時間に依存しないひずみ成分はよく知られているように、ストレス・パスに強く支配されるのに対し、時間依存性のひずみ成分はそれに関係なく、そのときの応力状態のみによってきまるものとする。

(2) 時間依存のない平衡時のひずみテンソル $\epsilon_{ij}^{(0)}$

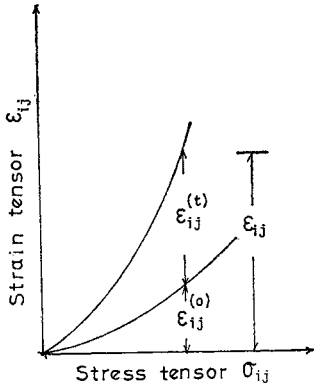


Fig. 5 Key sketch for a relation between strain tensor and stress tensor

は次のように回復性ひずみ ϵ_{ij}^e と非回復性ひずみ ϵ_{ij}^p を重ね合わせによって成り立っている。

$$\epsilon_{ij}^{(t)} = \epsilon_{ij}^e + \epsilon_{ij}^p \quad \dots\dots\dots (6)$$

(3) せん断応力によるひずみの回復成分は認められる。

土の変形理論に塑性学に関するいくつかの知識を取り入れることに成功した Cambridge 大学における力学モデル¹⁾はこのことを認めず、次のようなエネルギーつり合い式がモデルの基礎式となっている。

$$p' \cdot dv^p + q \cdot d\epsilon^p = M \cdot p' \cdot d\epsilon^p \quad \dots\dots\dots (7 \cdot a)$$

$$dv^p/d\epsilon^p = M - q/p' \quad \dots\dots\dots (7 \cdot b)$$

ただし、上式は軸対称圧縮条件下の場合に限られている。

繰返し荷重をうける飽和粘土の変形挙動に関する研究成果をながめていてもわかるように⁵⁾、Cambridge 大学の力学モデルにおけるこのような仮定は普遍的なものではないように思われる。そこで筆者は異方圧密時の時間依存のないひずみ成分 v_p と ϵ_p について、

$$d\epsilon_p = d\epsilon_p^e + d\epsilon_p^p \quad \dots\dots\dots (8 \cdot a)$$

$$dv_p = dv_p^e + dv_p^p \quad \dots\dots\dots (8 \cdot b)$$

のように仮定し、これらを式 (7・a) へ代入して整理すると次のような修正されたひずみ増分比と応力比の関係式が得られる。

$$dv_p/d\epsilon_p = M_p - N_p \cdot (q/p') \quad \dots\dots\dots (9)$$

ここで、

$$\left. \begin{aligned} M_p &= M(1 - d\epsilon_p^e/d\epsilon_p) + (dv_p^e/d\epsilon_p) \\ N_p &= 1 - (d\epsilon_p^e/d\epsilon_p) \end{aligned} \right\} \dots\dots (10)$$

である。

式 (8)~(10) において、下つきサフィックス “p” は一次クリープ (または、一次圧密) を、上つきサフィックス “e”、“p” はそれぞれ elastic または recoverable および plastic または unrecoverable を意味している。

(4) 柴田⁶⁾ や太田⁷⁾ がその構成式の展開で用いてき

た “体積ひずみ増分は圧密によるそれ dv_c とダイレイタンシーによるそれ dv_d との重ね合わせによって成り立つ” という仮定をここでも採用する。すなわち、

$$\left. \begin{aligned} dv_p &= dv_{cp} + dv_{dp} \\ dv_s &= dv_{cs} + dv_{ds} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (11)$$

このようにして、体積ひずみ増分を表現する式として、

$$dv = dv_p + dv_s = dv_{cp} + dv_{dp} + dv_{cs} + dv_{ds} \quad \dots\dots\dots (12)$$

が得られる。

土供試体の体積ひずみに関するこのような仮定は、等方圧密粘土に対する実験から柴田によって提案され、その後、たとえば、太田らによって支持された。後述するように、筆者の異方圧密粘土の実験結果もこのことを裏付けている。

これらの体積ひずみ成分のうち p' に関する体積ひずみ v_c は平均有効主応力によって一義的に、また、 q に関連あるひずみ v_d は応力比 q/p' ($q = \sigma_1 - \sigma_3$, $p' = 1/3(\sigma_1 + 2\sigma_3)$) によって支配されることが広く認められているので、これから次のような関数

$$v_{cp} = f_1(p') \quad \dots\dots\dots (13 \cdot a)$$

$$v_{dp} = f_2(q/p') \equiv f_2(\eta), (\eta = q/p') \quad \dots\dots (13 \cdot b)$$

を仮定することができよう。これらを微分することによって式 (11・a) は、

$$dv_p = dv_{cp} + dv_{dp} = f_1'(p') dp' + f_2'(q/p') d(q/p') \quad \dots\dots\dots (14)$$

のように書き変えることができる。それゆえ、さらに、式 (14) を式 (9) へ代入すれば、一次圧密中に生じるせん断ひずみを与える

$$d\epsilon_p = \frac{f_1'(p') dp' + f_2'(q/p') d(q/p')}{M_p - N_p(q/p')} \quad \dots\dots (15)$$

が得られる。

式 (14) と式 (15) が静的平衡状態における飽和粘土の基礎的な応力・ひずみ関係式であり、これらによって予測されるひずみは一次圧密終了時に対応するひずみと相等しいとみなされる⁷⁾。

(5) (2) における仮定から、式 (14) と式 (15) と結合されるべき二次圧密の表現式として、

$$d\epsilon_{ij}^{(t)} = \left(\frac{\partial \epsilon_{ij}^{(t)}}{\partial t} \right) dt \quad \dots\dots\dots (16)$$

を用いることとし、上式の具体的な形は、室内における供試体に対する試験結果からきめられるものとする。式 (16) を体積ひずみ、せん断ひずみに書き下すと、

$$dv_s = (\partial v_s / \partial t) dt = (\partial v_{cs} / \partial t) dt + (\partial v_{ds} / \partial t) dt \quad \dots\dots\dots (17)$$

$$d\epsilon_s = (\partial \epsilon_s / \partial t) dt \quad \dots\dots\dots (18)$$

となる。上式の実験式の決定に要する室内試験は等方圧密試験および平均有効主応力一定試験であろう。

式 (14)、(15) にそれぞれ式 (17) および式 (18) を

重ね合わせることによって異方圧密中の体積ひずみとせん断ひずみは次のように与えられることになる。

$$dv = dv_p + dv_s$$

$$= f_1'(p') dp' + f_2'(q/p') d(q/p')$$

$$+ (\partial v_{cs} / \partial t) dt + (\partial v_{as} / \partial t) dt \dots (19 \cdot a)$$

$$d\varepsilon = d\varepsilon_p + d\varepsilon_s$$

$$= \{f_1'(p') dp' + f_2'(q/p') d(q/p')\} / \{M_p - N_p(q/p')\} + (\partial \varepsilon_s / \partial t) dt \dots (19 \cdot b)$$

(2) 飽和粘土の異方圧密解析のための具体的な応力・ひずみ関係式

(1) 等方圧密試験における土供試体の間隙比あるいは体積比 $f(=1+e)$ と平均有効主応力 p' の対数との間に、近似的な良い直線関係があることは周知のことである。筆者によって行われた、繰り返された有機質粘土(物性は Table 1 に示している)に対する等方圧密試験の結果 (Fig. 6) からも

Table 1 Index properties of an organic clay

Specific gravity G_s	2.34
Liquid limit W_L (%)	163
Plasticity index I_p	66

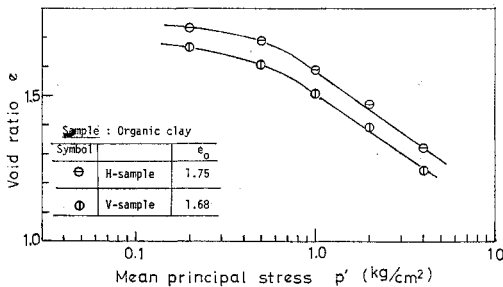


Fig. 6 e - $\log p'$ relations of the organic clay in isotropic consolidation tests

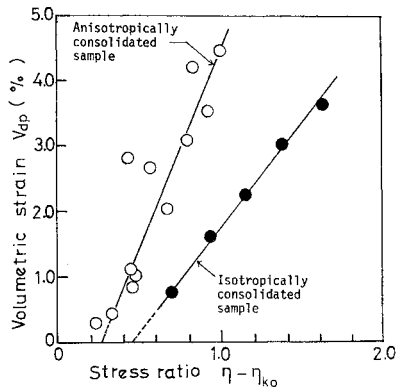


Fig. 7 Relations between the volumetric strain due to primary dilatancy and the stress ratio in p' -constant tests on an organic clay

$$v_{cp} = \frac{C_c}{1+e_0} \log_{10} \frac{p'}{p'_0} \equiv f_1(p') \dots (20)$$

が得られた。ここで、 p_0 : 先行圧密圧力 (Fig. 6 では、 $p_0=0.5 \sim 0.6 \text{ kg/cm}^2$)、 C_c : 圧縮指数、 e_0 : 初期間隙比である。

(2) 一方、関数 f_2 は等方圧密試験と同じ粘土試料を用いた平均有効主応力一定試験(以下、“ p' 一定試験”と称する)で観測される実験結果によって規定される。この試験における全体積ひずみから二次圧密によるひずみを除去した体積ひずみは、静的平衡時における時間非依存のダイレイタンスーに等しいと仮定されているので⁷⁾、ここでもこの仮定を用いることにしこの体積ひずみを K_0 圧密後の応力比に対応させたのが Fig. 7 である。 v_{dp} と $\eta_k (= \eta - \eta_{k_0}, \eta_{k_0}: K_0 \text{ 圧密時の応力比})$ との間のよい直線性から $f_2(q/p')$ として、

$$v_{dp} = f_2(q/p') = D_{kp}(\eta_k - \eta_0)$$

$$= D_{kp}(\eta - \eta_0^*), (\eta_0^* = \eta_{k_0} + \eta_0)$$

..... (21)

なる実験式が得られる。ここで、 η_0 : 異方圧密粘土の一次的ダイレイタンスーが生じ始める応力比、 $D_{kp}: v_{dp}$ と η 関係の直線部分の勾配である。式 (21) は等方圧密粘土に対する柴田⁹⁾ 他の実験式と同形になっており、また、Cambridge 大学において展開されたカム・クレイモデルからも確かめられることである。

なおここで言及した p' 一定試験については文献 3) に詳述している。

(3) 式 (20) および式 (21) を式 (14), (15) へ代入することによって次式が得られる。

$$dv_p = \frac{\lambda}{1+e_0} \cdot \frac{dp'}{p'} + D_{kp} d\left(\frac{q}{p'}\right), (\lambda = 0.434 C_c)$$

..... (22 \cdot a)

$$d\varepsilon_p = \frac{\lambda}{1+e_0} \cdot \frac{dp'}{p'} + D_{kp} d\left(\frac{q}{p'}\right) / \{M_p - N_p\left(\frac{q}{p'}\right)\} \dots (22 \cdot b)$$

式 (22 \cdot a) は太田らによるものと同形であり、 $v_p = g(p', \eta)$ に関する完全微分形であるのでストレス・パスに関係なく積分されるのに対し、式 (22 \cdot b) は土供試体や考えている地盤のストレス・パスを指定することなしに積分できない。この問題については本文の後半で議論されている。

(4) 二次クリープ(二次圧密)を表現する関数のうち、まずせん断による二次クリープが、よく用いられている時間の対数によってその直線性を十分表現しえないという事実を踏まえて、このための実験式を考えてみよう。この類に属するものとしては Singh と Mitchell⁸⁾ の方法がよく知られているので、これを筆者の目的に即応しうよう修正して用いることにする。

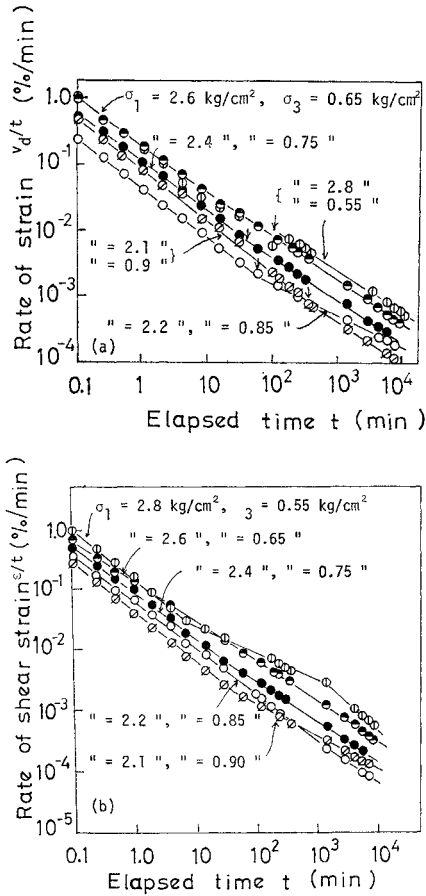


Fig. 8 Strain-time ratio vs. time relationships during p' -constant drained creep tests on an organic clay

K_0 条件で先行圧密された後、 p' 一定試験のもとではひずみ・時間比 (v_d/t および ϵ/t) と経過時間 t とを両対数で表示するとたとえば、Fig. 8 (a), (b) のように特徴的な関係が存在することがわかる。筆者がここで用いているひずみ・時間比というインデックスは、従来用いられているひずみ速度 (dv_d/dt および $d\epsilon/dt$) とは異なっている。ここであえてこのような表現を用いたのは、著者が行ったような多段階のクリープ試験では、 $\log(dv_d/dt) \sim \log t$ (または $\log(d\epsilon/dt) \sim \log t$) より、 $\log(v_d/t) \sim \log t$ (または $\log(\epsilon/t) \sim \log t$) 表示の方が両者の間の直線関係が顕著であるためである。

Fig. 8 (a), (b) の、とりわけそれぞれの曲線の後半部 (二次圧密部分と考えられる) から、次のような数式表示が可能となろう。

$$\log\left(\frac{v_{ds}}{t}\right) = \log\left(\frac{v_{ds}}{t}\right)_{t=t_0} - m_d \log \frac{t}{t_0} \quad \dots\dots\dots(23 \cdot a)$$

$$\log\left(\frac{\epsilon_s}{t}\right) = \log\left(\frac{\epsilon_s}{t}\right)_{t=t_0} - m_s \log \frac{t}{t_0} \quad \dots\dots\dots(23 \cdot b)$$

ここで、 $(v_d/t)_{t=t_0}$, $(\epsilon_s/t)_{t=t_0}$: 時間 t_0 におけるひずみ・時間比, m_d, m_s : Fig. 8 (a), (b) の後半部の直線勾配の絶対値, t_0 : 二次的クリープが開始する時間である。

次に、Fig. 8 (a), (b) から K_0 圧密後の応力比とひずみ・時間比の対数との関係に整理し直したのが Fig. 9 (a), (b) である。ここで、せん断の効果を指示するインデックスとして、Singh と Mitchell が用いた偏差応力の代りに応力比 η_k ($\eta_k = \eta - \eta_{k0}$) が使われている。Fig. 9 (a), (b) の結果は、次のような実験式の成り立つことを示唆している。

$$\log\left(\frac{v_{ds}}{t}\right) = \log\left(\frac{v_{ds}}{t}\right)_{\eta_k=0} + \alpha_d \eta_k = A_d + \alpha_d \eta_k \quad \dots\dots\dots(24 \cdot a)$$

$$\log\left(\frac{\epsilon_s}{t}\right) = \log\left(\frac{\epsilon_s}{t}\right)_{\eta_k=0} + \alpha_s \eta_k = A_s + \alpha_s \eta_k \quad \dots\dots\dots(24 \cdot b)$$

ここで、 A_d, A_s は $\eta_k=0$ におけるひずみ・時間比の仮想的な値であり、また、 α_d, α_s はひずみ・時間比と応力比関係図の直線部分の勾配を示すものである。式 (23·a), (23·b) および式 (24·a), (24·b) から最終的にまとめられたひずみ・時間比を表わす式は、

$$\frac{v_{ds}}{t} = A_d \exp(\bar{\alpha}_d \eta_k) \left(\frac{t_0}{t}\right)^{m_d}, \quad (\bar{\alpha}_d = 2.303 \alpha_d) \quad \dots\dots\dots(25 \cdot a)$$

$$\frac{\epsilon_s}{t} = A_s \exp(\bar{\alpha}_s \eta_k) \left(\frac{t_0}{t}\right)^{m_s}, \quad (\bar{\alpha}_s = 2.303 \alpha_s) \quad \dots\dots\dots(25 \cdot b)$$

となる。これらの左辺にある時刻におけるひずみ速度に書き改めるために、上式を時間 t で微分することによって、

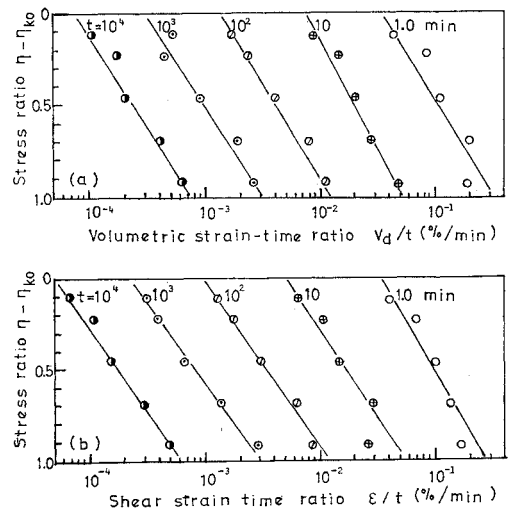


Fig. 9 Strain-time ratio vs. stress ratio relationships in p' -constant drained creep tests on an organic clay

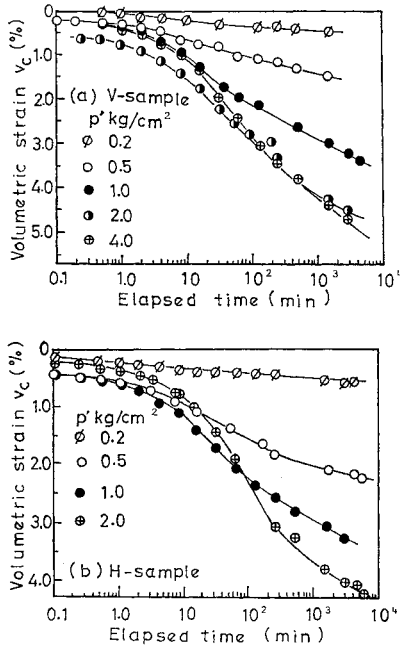


Fig. 10 Variations of volumetric strain with time in isotropic consolidation tests on an organic clay

$$\frac{dv_{ds}}{dt} = (1 - m_d) A_d \exp(\bar{a}_d \eta_k) \left(\frac{t_0}{t}\right)^{m_d} \dots \dots \dots (26 \cdot a)$$

$$\frac{d\epsilon_s}{dt} = (1 - m_s) A_s \exp(\bar{a}_s \eta_k) \left(\frac{t_0}{t}\right)^{m_s} \dots \dots \dots (26 \cdot b)$$

が得られる。

一方、等方圧密試験における二次的クリープは粘土粒子の配列構造の異方性を無視しようとすると、体積クリープのみを考慮すればよいことになる。p'一定試験と同様の有機質粘土に対する等方圧密試験における体積ひずみの経時変化を示したのが Fig. 10 (a), (b) であり、これらの後半部の二次圧密部分を一次元圧密におけると同様に対数二次圧密速度 $dv_{cs}/d \log t$ と表わして試験時の等方圧密圧力 $p' (= \sigma_1 = \sigma_3)$ にプロットすると Fig. 11 が得られる。これらから次のような表示が可能となる。

$$\frac{dv_{cs}}{d \log t} = a_c \log p' + b_c = \beta_{cs} \dots \dots \dots (27 \cdot a)$$

すなわち、

$$\frac{dv_{cs}}{dt} = \frac{0.434}{t} (a_c \log p' + b_c) = 0.434 \beta_{cs} \left(\frac{1}{t}\right) \dots \dots \dots (27 \cdot b)$$

式 (26・a) と式 (27・b) とを結合させることにより、有効応力一定条件下の二次圧密を表わす実験式として、

$$\frac{dv_s}{dt} = \frac{dv_{cs}}{dt} + \frac{dv_{ds}}{dt} = 0.434 \beta_{cs} \left(\frac{1}{t}\right)$$

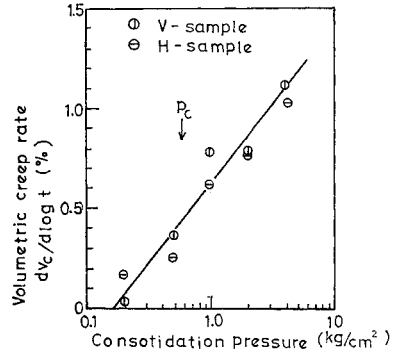


Fig. 11 Dependency of volumetric creep rate on mean effective principal stress in isotropic consolidation tests on an organic clay

$$+ A_d \exp(\bar{a}_d \eta_k) \left(\frac{t_0}{t}\right)^{m_d} \dots \dots \dots (28)$$

が与えられる。

以上を総括して、先行的に K_0 圧密された飽和粘土の異方圧密における変形挙動の解析のための実験的応力・ひずみ・時間関係式は、

$$dv = dv_p + dv_s$$

$$= \frac{\lambda}{1 + e_0} \cdot \frac{dp'}{p'} + D_{kp} d\left(\frac{q}{p'}\right) + \bar{\beta}_{cs} \left(\frac{dt}{t}\right) + A_d \exp(\bar{a}_d \eta_k) \left(\frac{t_0}{t}\right)^{m_d} dt \dots \dots \dots (29 \cdot a)$$

および、

$$d\epsilon = d\epsilon_p + d\epsilon_s$$

$$= \frac{\lambda}{1 + e_0} \cdot \frac{dp'}{p'} + D_{kp} d\left(\frac{q}{p'}\right) + \frac{A_s \exp(\bar{a}_s \eta_k) \left(\frac{t_0}{t}\right)^{m_s} dt}{M_p - N_p \eta_k} \dots \dots \dots (29 \cdot b)$$

となる。

(3) 式 (29・a), (29・b) に至るまで、その誘導過程においては即時沈下 ϵ_i についてはなら触れていなかった。ひずみ制御方式のせん断試験、あるいは応力制御方式の異方圧密試験または排水クリープ試験でも載荷荷重が先行荷重に比べて比較的小さい場合には、即時沈下に相当するせん断ひずみ ϵ_i は ϵ_p の中に練り込まれて生じると考えてよいであろう。しかし、荷重段階が大きく載荷と同時に、 $t=0$ において顕著なせん断ひずみを生じる場合には、 ϵ_i は ϵ_p とは分離して取扱かわねばならなくなるであろう。このような即時沈下の評価については、Skempton-Bjerrum⁹⁾ や三笠¹⁰⁾ による方法が提案されているけれども、いずれも弾性定数の求め方などに不明な点がある。ここで提案された応力・ひずみ関係式を用いても ϵ_i を求めることができる。

すなわち、Fig. 2 に示された \overrightarrow{AC} なるストレス・パスにそって積分された主応力増分比一定条件下のせん断

ひずみ $(\epsilon)_{AC} = \int_{AC} d\epsilon_p$ と \overrightarrow{BC} にそってせん断応力一定の条件下で積分されたせん断ひずみ $(\epsilon_p)_{BC} = \int_{BC} d\epsilon_p$ との差が即時沈下に等価なせん断ひずみ ϵ_i に相当すると考えられる。すなわち、

$$\epsilon_i = \int_{AC} d\epsilon_p - \int_{BC} d\epsilon_p \dots\dots\dots (30)$$

が成り立つ。

(3) 飽和粘土の異方圧密試験における変形挙動の解析

a) 解析のための構成式

軸対称三軸圧縮試験における σ_3 一定排水クリープおよび $d\sigma_3/d\sigma_1$ 一定の異方圧密試験は次の関係式を満たす必要がある。

$$\frac{dp'}{p'} = \frac{d\eta}{k-\eta} = \frac{d\eta_k}{k-\eta} \dots\dots\dots (31)$$

ここで、 k は先行圧密後の増分応力比であり、

$$k = \frac{dq}{dp'} (\equiv \text{const.}) \dots\dots\dots (32)$$

によって与えられる。そこで、式 (32) を式 (29・a)、(29・b) へ代入することによって次式となる。

$$dv = dv_p + dv_s = \frac{\lambda}{1+e_0} \ln \frac{d\eta_k}{k-\eta} + D_{kp} d\eta_k + \bar{\beta}_{cs} \left(\frac{dt}{t} \right) + A_d \exp(\bar{a}_d \eta_k) \left(\frac{t_0}{t} \right)^{m_d} dt \dots\dots\dots (33 \cdot a)$$

$$d\epsilon = d\epsilon_p + d\epsilon_s = \frac{\lambda}{1+e_0} \cdot \frac{d\eta_k}{k-\eta} + D_{kp} d\eta_k + A_s \exp(\bar{a}_s \eta_k) \left(\frac{t_0}{t} \right)^{m_s} dt \dots\dots\dots (33 \cdot b)$$

これが異方圧密の解析のための構成式である。

b) 実験定数の決定

構成式 (33・a)、(33・b) 中にはいくつかの実験定数が含まれているので、これをきめることなしに具体的に異方圧密や排水クリープ試験における飽和粘土の変形挙動を解析することはできない。

まず、圧縮指数 $\lambda (= 0.434 C_c)$ は等方圧密試験あるいは通常の圧密試験 (イードメーター試験) からきめられればよいが、実際には供試体の初期含水比や荷重のかけ方に依存してなかなか正確に求められない。計算のために用いるときには、 C_c そのものよりも $C_c/(1+e_0)$ を知る方が都合がよい。この $C_c/(1+e_0)$ は初期含水比によって関係づけられることが多いので、本文で用いた試料のいくつかの圧密試験結果を整理してこれを実行したのが Fig. 12 である。これを利用すれば、異方圧密や排水クリープ試験に先立つ K_0 圧密終了時の供試体の含水比を知って間接的に $C_c/(1+e_0)$ の値を推定すること

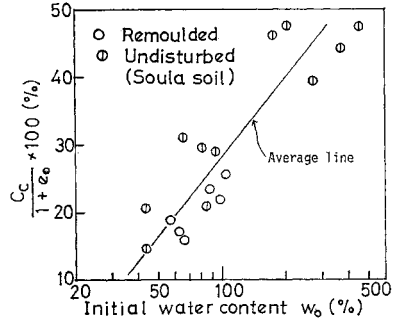


Fig. 12 Relation between value of $C_c/(1+e_0)$ and initial water content in consolidation tests on organic clay specimens

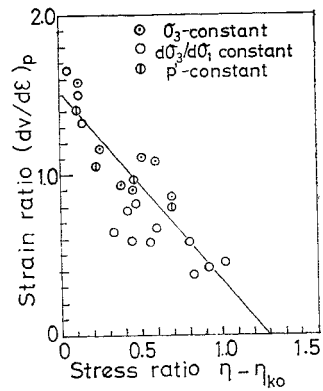


Fig. 13 Relationship between stress ratio and strain ratio in anisotropic consolidation and drained creep tests on an organic clay

ができる。

次に、 D_{kp} についてはすでに示した Fig. 7 の一次的ダイレイタンスと応力比との間の直線関係の勾配からよみとればよいし、 A_d 、 m_d 、 \bar{a}_d あるいは A_s 、 m_s 、 \bar{a}_s は Fig. 8 (a)、(b) および Fig. 9 (a)、(b) から得ることができる。また、式中の t_0 は Fig. 8 (a)、(b) ひずみ・時間比と時間関係の変曲点とすればよい。 $\bar{\beta}_{cs}$ は、Fig. 11 の直線部分の勾配に相当する。

また、ひずみ比と応力比を関連づける式 (9) における M_p 、 N_p は種々の排水クリープ試験結果を Fig. 4 のように整理して得られる Fig. 13 から読みとることができる。

c) 実験の概要

用いた試料の指数的性質はすでに Table 1 に示している。等方圧密試験と p' 一定試験と同じ初期状態になるように大型圧密容器で圧密したのち、三軸圧密試験機を用いて Fig. 14 のストレス・パスを経過するような異方圧密試験と σ_3 一定排水クリープ試験 (文献 1 参照) を行った。測定時間はそれぞれ各段階ごと約 1 週間とした。Table 2 にその試験条件をまとめている。

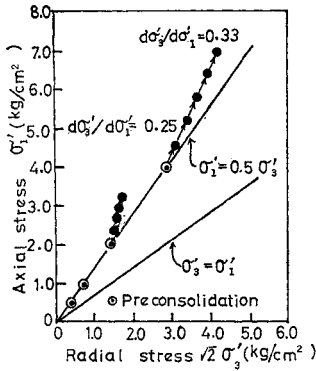


Fig. 14 Stress paths in anisotropic consolidation tests on an organic clay

Table 2 Parameters necessary for analysis of anisotropic consolidation tests

Test No.	σ_{10} (kg/cm ²)	σ_{30} (kg/cm ²)	$d\sigma_3/d\sigma_1$	$C_c/(1+e_0)$ (%)	M_p	N_p	D_{kp}
1	2.0	1.0	0.25	22.0	1.53	1.20	5.7
2	4.0	2.0	0.33	16.5	1.53	1.20	5.7

Table 3 Parameters necessary for analysis of variations of strains with time in anisotropic consolidation tests

Test No.	e_0	$C_c/(1+e_0)$ (%)	σ_{10} (kg/cm ²)	σ_{30} (kg/cm ²)	$\Delta\sigma_1$ (kg/cm ²)	$\Delta\sigma_3$ (kg/cm ²)
1	1.43	18.1	2.0	1.15	0.6	0.15
2	1.12	16.5	4.0	2.0	0.6	0.20

また、ひずみの経時変化の予測の検証のための実験条件は後述の Table 3 に示している。

d) 応力・ひずみ挙動

二次的クリープ（二次圧密）を考慮しない場合、異方圧密あるいは排水クリープ試験結果の解析のための応力・ひずみ関係式は、 $v = \int dv_p, \epsilon = \int d\epsilon_p$ を実行することによって、

$$v = \frac{\lambda}{1+e_0} \ln \frac{k}{k-\eta_k} + D_{kp}\eta_k \dots \dots \dots (34 \cdot a)$$

$$\epsilon = \frac{D_{kp}M_p - \left(kD_{kp} + \frac{\lambda}{1+e_0}\right)N_p}{N_p(N_p - kM_p)} \ln \frac{M_p}{M_p - N_p\eta_k} + \frac{\lambda}{M_p - N_p k} \ln \frac{k}{k-\eta_k} \dots \dots \dots (34 \cdot b)$$

となる。また、二次的クリープを考慮する場合、上式にそれぞれ $v_s = \int_t dv_s, \epsilon_s = \int_v d\epsilon_s$ の積分結果を線形的に重ね合わせることによって、次式が得られる。

$$v = \frac{\lambda}{1+e_0} \ln \frac{k}{k-\eta_k} + D_{kp}\eta_k + \bar{B}_{cs} \ln \frac{t}{t_0} + A_d \exp(\bar{\alpha}_d \eta_k) t_0^{m_d} (t^{1-m_d} - t_0^{1-m_d}) \dots \dots \dots (35 \cdot a)$$

$$\epsilon = \frac{D_{kp}M_p - \left(kD_{kp} + \frac{\lambda}{1+e_0}\right)N_p}{N_p(N_p - kM_p)} \ln \frac{M_p}{M_p - N_p\eta_k} + \frac{\lambda}{M_p - kN_p} \ln \frac{k}{k-\eta_k} + A_s \exp(\bar{\alpha}_s \eta_k) t_0^{m_s} \cdot (t^{1-m_s} - t_0^{1-m_s}) \dots \dots \dots (35 \cdot b)$$

式 (34), (35) を用いて、 σ_3 一定排水クリープ試験 ($k=3$) および主応力増分比一定異方圧密試験 ($k=1.21$ と 1.50) および測定時間 $t=7$ days の条件のもとで計算された結果に基づく二次圧密を考慮した場合と考慮しない場合の計算曲線が Fig. 15 (a), (b) と Fig. 16 (a), (b) および Fig. 17 (a), (b) に示されている。これらとそれぞれの実験結果から読みとられた $t=7$ days におけるひずみをそれぞれの図中にプロットし、計算結果と対応させてみた。計算値と実測値とは比較的良好に近似しているといえよう。

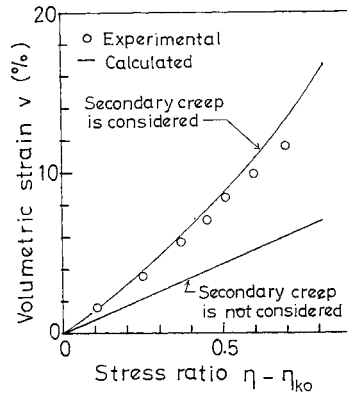


Fig. 15 (a) Comparison between calculated and observed values of volumetric strain-stress ratio relationship in σ_3 -constant drained creep tests on an organic clay

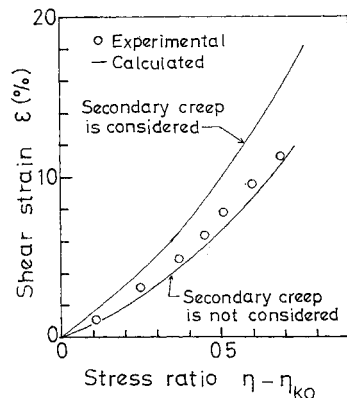


Fig. 15 (b) Comparison between calculated and experimental values of shear strain-stress ratio relationship in σ_3 -constant drained shear creep tests on an organic clay

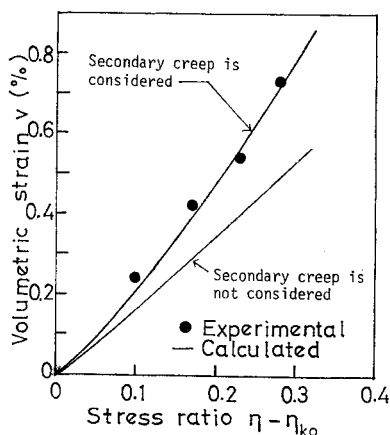


Fig. 16 (a) Observed and calculated volumetric strain-stress ratio relationships for anisotropic consolidation tests on an organic clay

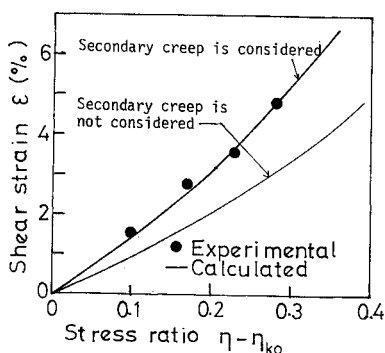


Fig. 16 (b) Observed and predicted shear strain-stress ratio relationships for anisotropic consolidation tests on an organic clay

e) ひずみの経路変化の予測

提案されている応力・ひずみ・時間関係式が異方圧密や排水クリープ試験における変形挙動の解析に成功するためには、与えられた応力・ひずみ・時間関係式が異方圧密や排水クリープに不可避免的に伴う、間隙水圧消散過程における変形の経時変化に対する影響を評価することができなければならない。提案された構成式がこのことに有益であるかどうか確かめることがここで試みられている。

Fig. 2 におけるストレス・パスと変形挙動の項で考えてみたように、パス \overline{APB} (または $\overline{AP'B}$) は近似的に非排水プロセスと考えられるのでここでの変形は即時沈下に相当しよう。したがって、 \overline{BC} (または $\overline{P'C}$) 過程およびC点到着後における変形がここで問題とする経時変化するひずみ成分であり、式 (35) などによって説明可能と考えられる。

まず、 \overline{BC} プロセスにおいて満足すべき条件は、 $dq=0$ なることを考慮すれば、

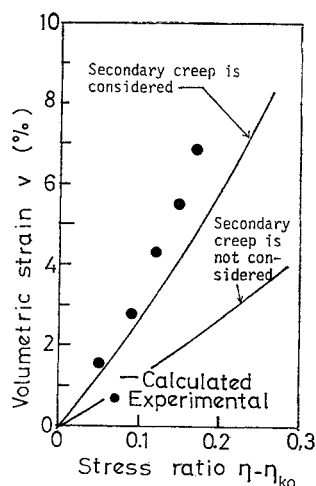


Fig. 17 (a) Comparison between calculated and observed values of volumetric strain-stress ratio relationship in anisotropic consolidation tests on an organic clay

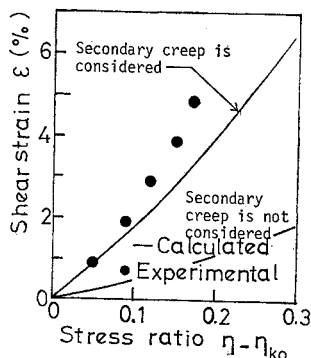


Fig. 17 (b) Observed and predicted shear strain-stress ratio relationships for anisotropic consolidation tests on an organic clay

$$\frac{dp'}{p'} = -\frac{d\eta}{\eta} = -\frac{d\eta_k}{\eta} \dots\dots\dots(36)$$

となることは容易にわかる。これを式 (29・a), (29・b) へ代入すれば、

$$dv = \left(\frac{\lambda}{1+e_0} - D_{kp}\eta \right) \frac{dp'}{p'} + \bar{b}_{cs} \left(\frac{dt}{t} \right) + A_d \exp(\bar{\alpha}_d \eta_k) \left(\frac{t_0}{t} \right)^{m_d} dt \dots\dots\dots(37 \cdot a)$$

$$d\varepsilon = \frac{\lambda}{1+e_0} - D_{kp}\eta \cdot \frac{dp'}{p'} + A_s \exp(\bar{\alpha}_s \eta_k) \left(\frac{t_0}{t} \right)^{m_s} dt \dots\dots\dots(37 \cdot b)$$

となる。前述のように、上式からひずみと時間に関する計算値を求めるためには、間隙水圧の経時変化を知る必要がある。なぜなら、これが知られば、

$$\Delta p' = \Delta p - \Delta u \equiv \Delta p - \Delta u(t) \dots\dots\dots(38)$$

より有効応力の経時変化を知ることができるからである。このことを解決するためには、多次元圧密理論解に依存するのがよいことはいままでのない。しかし、本章で筆者らが行った異方圧密や排水クリープ試験はともに、放射方向のみに排水を許したので、この種の試験の解析に用いられる次のような Da Silveira¹¹⁾ の解をこでも用いることにした。

$$\Delta p' = \Delta p - \Delta u = \Delta p \left\{ 1 - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\beta_n^2} \exp(-\beta_n^2 T_h) \right\} \dots\dots\dots (39)$$

ここで、 $\beta_n : J_0(x) = 0$ の解、 $T_h : c_h \cdot t / R^2$ (R : 供試体半径、 c_h : 水平方向圧密係数) である。

なお、Da Silveira の解は放射方向 K_0 圧密にのみ適用されるべきで、筆者がここでやっている側方変形非拘束条件下での放射圧密には厳密には適用すべきでないという吉国ら¹²⁾ の結論もあるが、あくまでここでは近似的に計算値をうるという立場で Da Silveira の解を用いている。

式 (39) を用いることによって、圧密中のある時刻 t における全有効応力 p' は、

$$p' = p_0' + \Delta p' = p_0' + \Delta p \left\{ 1 - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\beta_n^2} \exp(-\beta_n^2 T_h) \right\} \dots\dots\dots (40)$$

となる。式 (40) を式 (37・a), (37・b) へ代入して、

$$dv = \left[\frac{\lambda}{1+e_0} - D_{kp} \frac{q}{p_0' + \Delta p \left\{ 1 - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\beta_n^2} \exp(-\beta_n^2 T_h) \right\}} \right] \times \frac{\Delta p \left\{ \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{c_h}{R^2} \right) \exp(-\beta_n^2 T_h) \right\}}{p_0' + \Delta p \left\{ 1 - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\beta_n^2} \exp(-\beta_n^2 T_h) \right\}} \cdot dt + \bar{b}_{cs} \left(\frac{dt}{t} \right) + A_d \exp(\bar{\alpha}_d \eta_k) \left(\frac{t_0}{t} \right)^{m_d} dt \dots\dots\dots (41 \cdot a)$$

$$d\varepsilon = \frac{\frac{\lambda}{1+e_0} - D_{kp} \frac{q}{p_0' + \Delta p \left\{ 1 - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\beta_n^2} \exp(-\beta_n^2 T_h) \right\}}}{M_p - N_p \left[\frac{q}{p_0' + \Delta p \left\{ 1 - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\beta_n^2} \exp(-\beta_n^2 T_h) \right\}} \right]} \times \frac{\Delta p \left\{ \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{c_h}{R^2} \right) \exp(-\beta_n^2 T_h) \right\}}{p_0' + \Delta p \left\{ 1 - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\beta_n^2} \exp(-\beta_n^2 T_h) \right\}} \cdot dt + A_s \exp(\bar{\alpha}_s \eta_k) \left(\frac{t_0}{t} \right)^{m_s} dt \dots\dots\dots (41 \cdot b)$$

が得られるので、積分を実行すれば次式となる。

$$v = \left(\frac{\lambda}{1+e_0} + D_{kp} \eta_{k_0} \right) \ln \frac{p_0' + \Delta p \left\{ 1 - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\beta_n^2} \exp(-\beta_n^2 T_h) \right\}}{p_0'} + D_{kp} q \left[\frac{1}{p_0' + \Delta p \left\{ 1 - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\beta_n^2} \exp(-\beta_n^2 T_h) \right\}} - \frac{1}{p_0'} \right] + \bar{b}_{cs} \ln \frac{t}{t_0} + A_d \exp(\bar{\alpha}_d \eta_k) \cdot t_0^{m_d} \cdot (t^{1-m_d} - t_0^{1-m_d}) \dots\dots\dots (42 \cdot a)$$

$$\varepsilon = \left(\frac{\lambda}{M_p + N_p \eta_{k_0}} - \frac{D_{kp}}{N_p} \right) \ln \frac{(M_p + N_p \eta_{k_0}) \left[p_0' + \Delta p \left\{ 1 - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\beta_n^2} \exp(-\beta_n^2 T_h) \right\} \right] - N_p q}{(M_p + N_p \eta_{k_0}) p_0' - N_p q} + A_s \exp(\bar{\alpha}_s \eta_k) t_0^{m_s} (t^{1-m_s} - t_0^{1-m_s}) \dots\dots\dots (42 \cdot b)$$

Fig. 18 (a), (b) および **Fig. 19** (a), (b) は式 (42・a), (42・b) によって計算された体積ひずみとせん断ひずみと時間の対数との関係と有機質粘土の異方圧密試験におけるひずみの実測値を比較したものである。実験条件と実験定数は **Table 4** に示している。なお、式 (42) における二次的クリープ開始時間 t_0 は圧密度 $U_h = 95\%$ に相当する時間 t_{95} によって近似させている。また、実測値のうち、即時沈下に相当するひずみ ε_i を、通常の圧密試験結果の整理の際に行われるのと同等の方法によって、除去している。今回の試験では、増加荷重が先行荷重に比べてそれほど大きな値ではないので、 ε_i も ε_p や ε_s に比べるときわめて小さいようである。

Fig. 18, 19 における計算曲線と観測値との対応は比

較的よく、ここで提案された理論式が異方圧密における飽和粘土の変形の経時変化の解析にも有用であることが示唆される。

Table 4 Stress conditions and experimental constants employed in analyses of anisotropic consolidation tests on a saturated organic clay

No.	e_0	$C_c/(1+e_0)$ (%)	σ'_{10} (kg/cm ²)	σ'_{30} (kg/cm ²)	$d\sigma'_{10}$ (kg/cm ²)	$d\sigma'_{30}$ (kg/cm ²)
1	1.43	18.14	2.0	1.15	0.6	0.15
2	1.07	14.0	4.0	2.0	0.6	0.2

A_d A_s	α_d α_s	m_d m_s	t_0 (min)
1.38×10^{-3}	2.24	0.62	100
9.40×10^{-4}	2.55	0.65	

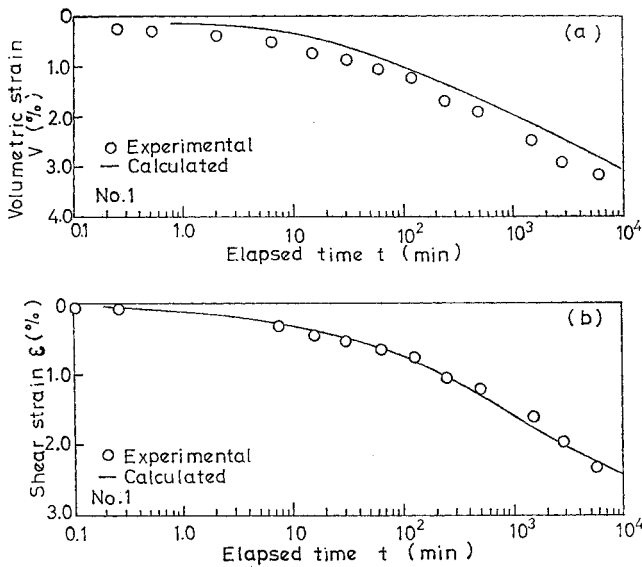


Fig. 18 (a), (b) Changes of volumetric and shear strains with the lapse of time in anisotropic consolidation test on an organic clay

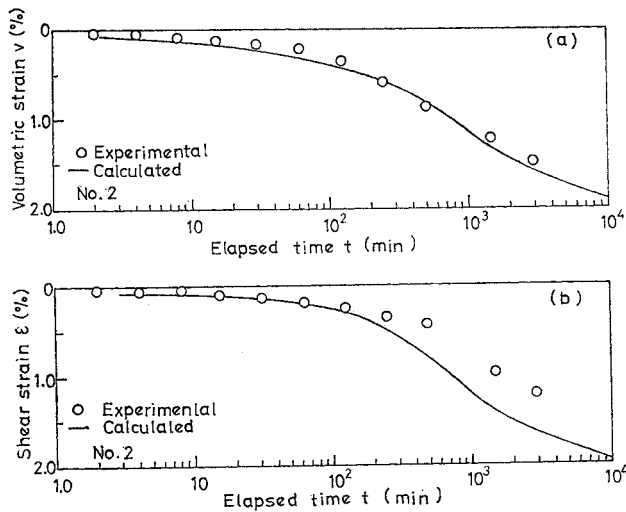


Fig. 19 (a), (b) Changes of volumetric and shear strains with the lapse of time of the anisotropic consolidation test on an organic clay

4. 簡易沈下計算法の提案

3. で得られた応力・ひずみ・時間関係式が仮に広範囲の圧縮条件下の異方圧密および排水クリープの解析に成功したとしても、主応力の回転を伴う現地盤へ適用するのはなかなか容易ではない。しかし、載荷面中央下の沈下の予測に限れば、次のような方法が考えられる。

- i) 自重による先行応力状態を知る。
- ii) 載荷重による主応力増分を求める。

iii) 現地から得られた試料に対して、平均有効主応力一定試験および等方圧密試験を行い必要な実験定数をきめる。

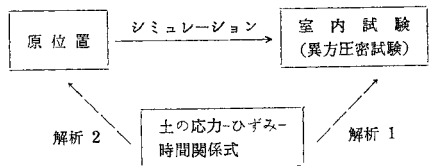
iv) i), ii) の条件を応力・ひずみ・時間関係式へ代入して、深さごとにひずみ量とひずみの経時変化を知る。

v) ひずみを沈下量に換算する。

以上の考え方を要約すると、Table 5 が得られることになる。

Table 5 Summary of a method of predicting the settlement of saturated clays

(a) 沈下計算法の考え方



原位置	室内試験	備考
帯状荷重	平面ひずみ	載荷重面中央直下では、軸対称条件に近い応力状態にあると仮定
円形荷重	軸対称三軸	ストレスパスを忠実に再現しようとする三軸的異方圧密試験

(b) 近似的沈下計算法の手順

- Step 1: 原位置の応力状態を室内試験で再現
- Step 2: 室内三軸異方圧密試験における土供試体の変形挙動の解析 (解析 I)
- Step 3: 応力-ひずみ-時間関係式による沈下の計算値と原位置における載荷面中央直下の沈下の観測値との比較 (解析 2)

5. 結論

本文では、飽和粘土の異方圧密や排水クリープ試験における変形挙動を解析しようとする応力・ひずみ・時間関係式の提案を行うために、まず次のような仮定を用いた。

i) 三軸圧縮試験における粘土供試体のひずみの球テンソル成分と偏差テンソル成分とが全ひずみに寄与している。したがって、等方圧密試験と平均主応力一定試験による結果を実験式化することによって構成式が得られている。

ii) ひずみ成分は時間に依存しないひずみと依存するひずみとから成り立っている。

iii) Roscoe らによって提案された Cam Clay モデルを修正した新しい応力比・ひずみ増分関係式を使用する。

iv) 時間に依存するひずみも等方圧密試験における体積クリープと p' 一定試験におけるせん断クリープ (ダイレイタンスを含めて) とから成り立っている。

v) せん断クリープは Singh と Mitchell の提案するクリープ関数式を修正したものを用いる。

vi) 間隙水圧の消散に伴う変形領域では、Da Silveira による放射圧密の解が適用される。

著者がここで提案した飽和粘土のための応力・ひずみ・時間関係式は、他の構成式に比べて次のような特徴を有している。

i) 従来の構成式は排水状態でも間隙水圧が収束した状態における変形について議論しているものが多いのである。本文で提示した構成式は間隙水圧の消散過程における変形の時間的変化について言及し、あわせて有効応力一定後の二次圧密をも包括しうるように工夫した。

ii) 従来困難であるとされていた飽和粘土の主応力増分一定の異方圧密における変形挙動を解析することができる。

iii) その基礎式は一般的な関数式で与えられているので、圧縮時のみでなく、伸長状態の構成式にも拡張することができる可能性がある。

なお、構成式中のいくつかの実験定数はすでに単一の p' 一定試験および等方圧密試験によって決められる。ただし、使用する粘土試料の透水性にもよるが、 p' 一定試験は有効応力一定後の二次圧密挙動を十分観測するために、一段階の荷重について最低1週間～2週間の載荷時間が必要であることに注意を要する。

このようにして、具体化された実験的応力・ひずみ・時間関係式が飽和有機質粘土の三軸的異方圧密および排水クリープ試験における変形挙動へ適用された。理論による計算値と実験における観測値の比較から、次のような結論が得られた。

(1) 負荷荷重によって生ずる土要素のひずみは、時間依存性のひずみと時間非依存性のひずみの重ね合わせによって成り立つという仮定は、三軸装置による異方圧密や排水クリープ試験における変形挙動を解析する限りでは十分妥当なものである。

(2) したがって、飽和粘土の異方圧密や排水クリープ試験におけるひずみは、完全あるいは近似的に非排水条件のプロセス、間隙水圧が消散するいわゆる圧密のプロセス、一定有効応力下における二次圧密の領域に分けられる。

(3) 飽和粘土供試体の三軸的異方圧密や排水クリ

プ試験における変形挙動は、時間を考慮した構成式によって解析する必要があり、ここで提案された応力・ひずみ・時間関係式が異方圧密試験や排水クリープ試験における変形挙動の時間依存性を比較的よく予測しうることが明らかになった。

(4) 時間の経過に伴う有効応力の変化に関する知識を得るために、Da Silveira の二次元放射圧密に関する理論解を用いることが可能なことが確かめられた。

謝 辞 本文は、九州大学工学部 山内豊聡教授(水工土木学教室)の御指導の下で行われたものである。また、図面の作製にあたっては、西日本工業大学助手 平尾和年氏(土木工学教室)の御協力によるところが大きい。付記してともに心から感謝の意を表する次第であります。

参 考 文 献

- 1) Schofield, A.N. and M.A. Wroth : Critical State Soil Mechanics, Mac Graw-Hill, London, 1968.
- 2) Ohta, H. and S. Hata : A Theoretical Study of the Stress-Strain Relations for Clays, Soils and Foundations, Vol. 11, No. 3, pp. 65~90, 1971.
- 3) 安原一哉・山内豊聡：異方圧密粘土の三軸圧密における変形特性，土木学会論文報告集，No. 246, pp. 93~103, 1976.
- 4) 赤井浩一：盛土載荷試験における圧密解析の問題，第19回土質工学シンポジウム論文集，pp. 111~114, 1975.
- 5) Sangrey, D.A. : The Behavior of Soils Subjected to Repeated Loading, Ph. D Thesis at Cornell University, 1968.
- 6) 柴田 徹：粘土のダイレイタンスーについて，京大防災研年報，Vol. 6, pp. 128~136, 1963.
- 7) Roscoe, K.H. and J.B. Burland : On the Generalized Stress-Strain Behaviour of 'Wet' Clay, Engineering Plasticity, Cambridge University Press, pp. 535~609, 1969.
- 8) Singh, A. and J.K. Mitchell : General Stress-Strain-Time Function for Soils, Proc. ASCE, Vol. 94, SM 1, pp. 21~46, 1968.
- 9) Skempton, A.W. and L. Bjerrum : A Contribution to the Settlement Analysis of Foundations on Clay, Geotechnique, Vol. 17, No. 1, pp. 168, 1957.
- 10) Mikasa, M. : On the Settlement of Clay Layer by Partial Load, Proc. 1st Japan Natl. Cong. Appl. Mech., pp. 303~307, 1957.
- 11) Da Silveira, I. : Consolidation of a Cylindrical Clay Sample with External Radial Flow of Water, Proc. 3rd Int. Conf. SMFE, Vol. 1, pp. 55~58, 1953.
- 12) Yoshikuni, H. and H. Nakanodo : Consolidation of a Clay Cylinder with External Radial Drainage, Soils and Foundations, Vol. 15, No. 1, pp. 17~44, 1975.

(1978.1.10・受付)