

九大工学部 正員 山内豊聰  
同 同 ○安原一哉

### 1. まえがき

粘土の種類が多種多様であるように、ひとへに有機質土といっても多くの種類があるが、その生成形態の違いから大別すると、(1)泥炭および黒泥、(2)非泥炭質の沖積層有機質土、(3)火山灰系有機質土、(4)その他の有機質土に分けられるが、それらの間の力学的共通性については、統一した見解は得られていない。圧密についていへば、二次圧密が著しい土では広く認められているが、その原因や取扱いについては研究例も少なく、究明されるべき問題は多く残されている。本文は、泥炭（ローラ層）とローム質火山灰土（黒ボク）を例にとり、その圧密特性の持異性を通常の圧密試験結果に基づいて考察し、さらにその卓越する二次圧密の取扱いについては、圧密試験の整理にどのように生かせばよいのかについて提案を行うものである。

### 2. 有機質土の圧密現象の持異性について

粘土の二次圧密の原因については従来よく言われているが、ここでそれをまとめてみる。次のようになる。

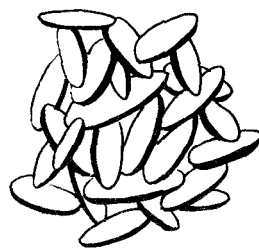


図-1. カードハウス構造  
(Tan による)

(1) 図-1. に示すような土の粒の粗い粒子が薄片状の粒子がより脆弱な状態にあるか、相対的に滑動し合う際、土粒子間に摩擦抵抗（これはきわめて小さいと考えられる）や土粒子と土粒子をよりよく吸着水層の間に粘性抵抗が働くために変形がフリーで早い時間遅れを示すため、(2) 側方拘束状態では、土は三軸圧縮となるが、その際に生じる偏差（軸差）応力によって上記のようなクリープ変形が大きくなるため、(3) 土粒子間をとりまく吸着水が塑性変形を有するため、等であるが有機質土については、以上の三つの外に少なくとも次の点を考慮に入れるなければならない。(4) 有機質土の土粒子自体が双粒集、packet structure<sup>(1)</sup> ともいうべき構造をなしており、外力が粒子自体にかかる段階になると、その土粒子の間がギ（micropore）から土粒子相互間の間がギ（macropore）へ排水または排気を起すため。

いま仮に上記(4)の現象による体積変化が圧密を行う土試体全体の平均主応力  $\sigma_m$  によって起り、(1)、(2)の時間遅れのフリーでが主として偏差応力  $\sigma_d$  によって起すものとすれば、有機質土の二次圧密変形  $\Delta \epsilon_s$  は次式のよう形で表わされるであろう。

$$\Delta \epsilon_s = \alpha \sigma_m + \beta \sigma_d = \frac{1}{3} \alpha (\sigma_1 + 2\sigma_3) + \beta (\sigma_1 - \sigma_3) \quad (1a)$$

二次圧密段階では間がギ水圧  $u \approx 0$  と考えられ、さらに  $\sigma_3/\sigma_1 = \sigma'_3/\sigma'_1 = K_0 = K \approx 0.5$  (ニに  $K_0$ ; 静止土圧係数,  $K$ ; 主応力比) なる実験事実<sup>(2)</sup>を用いれば、(1a)式は、

$$\begin{aligned} \Delta \epsilon_s &= \frac{1}{3} \alpha (\sigma_1 + 2\sigma_3) + \beta (\sigma_1 - \sigma_3) = \frac{1}{3} \alpha (1 + 2K_0) \sigma'_1 + \beta (1 - K_0) \sigma'_1 \\ &= \sigma'_1 \left( \frac{1}{3} \alpha + \frac{1}{3} \beta \right) \quad (1b) \end{aligned}$$

ここに  $\alpha$ ,  $\beta$  は比例定数である。(1a)式にすれば、等力応力状態においても体積増大が起るわけであるが、(1)あるいは(2)の滑動クリープが主として偏差応力に基づくとしても、非均質あるいは非等力性の土であれば、等力応力のもとでもクリープ変形の起ることは十分考えられる。

さて通常の oedometer に於ける圧密試験によつて、時間沈下曲線を求め沖積粘土と比較してみよう。1例を図-2. に示す。ここで示した沖積粘土(ハドリ)に限らず通常の粘土の二次圧密部分は時間の対数に対し直線となる。すなわち沈下量を  $S$  とすると、

$$S = a + b \log t \quad \text{----- (2)}$$

の形で表わされる。ここに  $a, b$  は定数である。この直線性はローム質火山灰土(黒ボク)では特に著しい。これは先の要因の他にロームの劣水性が大きいため、一次圧密が早く終了する点にある。一方泥炭(ヤラ層)の時間沈下曲線はこれらとは全く異なり、(2)式に従わない。むしろその変形量~応力~時間の関係は次式、

$$S = k_0 t^m t^n \quad \text{----- (3)}$$

で表わす方が一般的である。すなわち、両辺の対数をとれば、

$$\log S = \log k_0 + m \log t + n \log t \quad (4)$$

圧密試験におけるように荷重  $\sigma$  が一定とみなされる場合には、

$$\log S = \log k_1 + n \log t \quad (5)$$

また時間  $t$  が一定の場合には、

$$\log S = \log k_2 + m \log \sigma \quad (6)$$

となり、(5)式は  $\log S \sim \log t$  間に、

(6)式は  $\log S \sim \log \sigma$  間にそれぞれ直線

性があることがわかるが、これらは実験的に確か

めることができる(図-3, 図-4. に示す)。

ただ外国の一部の文献<sup>(3)</sup>には、泥炭も対数的クリープを示す例も報告されており、泥炭にも幅広い種類のあることを示しており、圧密・沈下特性も繊維質泥炭とコロイド状泥炭に大別して説明する必要があるものと思われる。

なお図-4. において  $(S-S_0)$  を縦軸と置きかえ

ると  $\log t \sim \log \sigma$  に直線関係が得られることになり、従来軟弱粘土の  $\log t \sim \log p$  が直線的であることと懸った事実のあることがわかる。

この点において、Terzaghi 理論式は修正可能であ

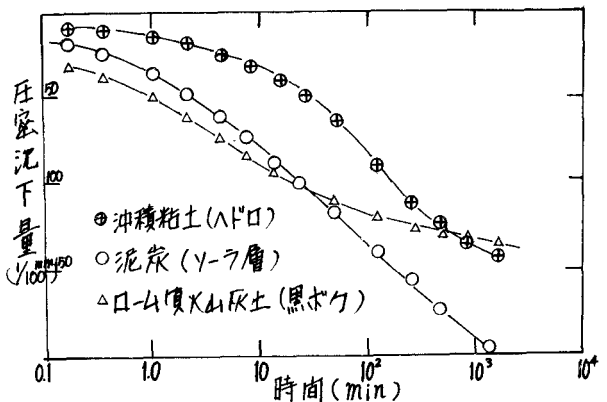


図-2. 時間・沈下曲線の比較

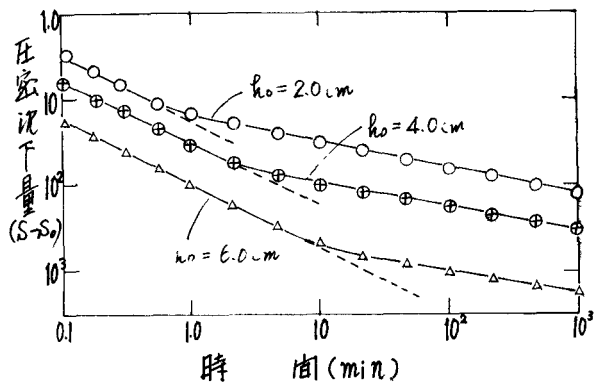


図-3. 両対数表示による泥炭の時間沈下曲線

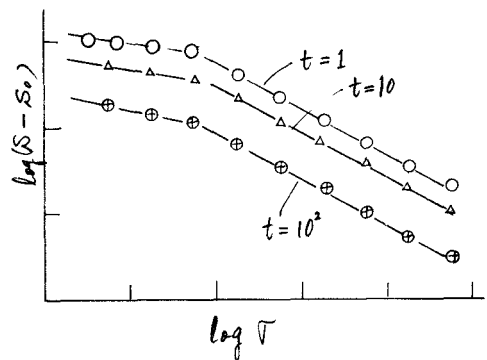


図-4. 時間一定の場合の圧密変形量と圧密荷重の関係

り、WanisやBardonらの修正理論とは多少異った数値解が得られている。

### 3. 有機質土の二次圧密の取扱いについて

有機質土の卓越する二次圧密の取扱いには二つの要因が考えられる。一つは沈下解析にどう生かすかであり、一つは圧密試験の整理にどう生かすかである。前者については、現在の圧密式試験機や試験手法が種々の欠点を有しているために、その試験結果を全面的に信用して沈下解析に利用するのは少なからぬ誤りを犯しかねないこと、また実際の現場では二次元的あるいは三次元的側方流動現象が起る場合があるが、これと二次圧密との関係が明らかでない等の問題があり、いわゆる oedometer 試験の結果を実際の沈下解析にそのまま適用することについては、悲観的意見が大勢を占めている。一方三軸<sup>(4)</sup>二次圧密は圧密試験の整理にこそ生かされるべきであることを強調し、今回改訂された圧密式試験法の圧密試験<sup>(5)</sup>においてはこのことが取り入れられている。すなわち、二次圧密を含めた体積圧縮係数および圧密係数は次のようにして定められる。

$$m_v = m_{v1} + m_{v2}, \quad C_v = k/m_v \cdot r_w = (k/m_{v1} \cdot r_w) \times (m_{v1}/m_v) = C_{v1} \times r \quad \text{--- (7)}$$

ここに、 $m_{v1}$ ,  $m_{v2}$  ; 夫れ一次圧密、二次圧密のみにつきの体積圧縮係数、 $C_{v1}$  ; 一次圧密のみについての圧密係数、 $r$  ; 一次圧密比である。(7)式は載荷してから (24) 時間後を全沈下終了点と便宜的にきめているため、著しく二次圧密を示す土については実用的ではない。すなわち、載荷後どこでクリープ沈下が収束するかを決定するには推定が必要とはいへば二次圧密の処理の問題は解決できないといわなければならない。これについては現段階では理論的に解決するのはかなり困難で、多くの実験事実から推定その他は行わずであり、そのともクリープ沈下が収束するまで実験を続けるとしても多大の時間と労力を要し、実用性に全く欠ける。

著者の泥炭のように著しく圧縮性を示すものについては、(7)式では不十分と考え以下のような方法を講じることにした。体積圧縮係数については、(7)式と同じであるが次のようにある方がよりわかりやすい。

$$m_v = m_{v1} + \sum_{t=0}^{t_{\infty}} m_{v2} \quad \text{--- (8)}$$

ここに、 $t_{\infty}$  ; 一次圧密が終了したときの経過時間、 $t_{\infty}$  ; 二次圧密が収束するまでの時間である。圧密係数については二次圧密を含めた全圧密過程についてのものを  $C_v$ 、一次圧密のみについてのものを  $C_{v1}$  とすると、

$$C_{v1} = k_0/m_{v1} \cdot r_w, \quad C_v = k/m_v \cdot r_w \quad \text{--- (9)}$$

ここに、 $k_0$  ; 一次圧密中の透水係数、 $k$  ; 全経過時間中の透水係数とする。また二次圧密中の透水係数を  $k_f$  とするとき、全経過透水係数は、

$$k = \frac{1}{2} (k_0 + k_f) \quad \text{--- (10)}$$

で表わしうるものとする。さて、 $C_v/C_{v1} = k m_{v1}/k_0 m_v = (k_0 + k_f) \cdot m_{v1}/2k_0 m_v$  --- (11)

より、 $C_v = \{ m_{v1} (k_0 + k_f) / 2k_0 m_v \} \times C_{v1} = (k_0 + k_f) / 2k_0 \times r \times C_{v1}$  --- (12)

いま近似的に  $k_0$  を圧密開始前、 $k_f$  を圧密終了時の透水係数と考えて、 $k_0/k_f = A$  --- (13)

と置き、 $k_0 = A k_f$  を (10) 式へ代入すれば、 $C_v = \{ (A+1)/2A \} \times C_{v1} \times r$  --- (14)

となる。(14) 式を (7) 式と比較し、(7) 式において  $A=1$  とおけば (14) 式と等しくなる。つまり (7) 式は  $k_0 = k_f$ 、あるいは偏圧縮のある荷重下では透水係数が不変であると仮定した場合に成り立つにすぎない。泥炭等の圧縮性の著しい土では、一段階の荷重下でも透水係数がかなり変化すると思われ、(7) 式は不十分といふことになる。(14) 式の  $A$  の値は粘土の種類や状態によって異なるであろうが、例えば泥炭を例にとれば、適宜にするとその間隙比と透水係数の比には、

$$\log k = B e \quad (\text{ここで } B \text{ は比例定数}) \quad \text{--- (15)}$$

(15) 式を利用すれば、 $\log k_0 = B e_0$ ,  $\log k_f = B e_f$  より  $A = 10^{B(e_0 - e_f)}$  とし (14) 式へ代入すると、

$$C_v = \frac{10^{\frac{B(e_0 - e_f)}{2}} + 1}{2 \times 10^{\frac{B(e_0 - e_f)}{2}}} \times C_{v1} \times r \quad \text{--- (16)}$$

となる。泥炭の圧密試験と透水試験の結果から(4)式によつて求めた圧密係数 $C_v$ と三軸に対する(7)式によつて求めた圧密係数 $C_v$ との比較の一例を図-5に示す。同一の試験結果から $C_v$ や $C_v$ を求めるときは $r$ は定数から、

$$C_v' = \frac{2A}{A+1} C_v \quad \text{----- (17)}$$

で求められるが、<sup>圧密</sup>経時間によつて $r$ が大きく変化する場合は問題なのである。次にその点について触れてみる。

一次圧密による間水比の変化量を $\Delta e_p$ 、二次圧密によるものを $\Delta e_s$ 、  
とくに二次圧密が収束した段階での間水比の変化量を $\Delta e_{s,\infty}$ とすれば、  
その時の二次圧密比 $R_{s,\infty}$ は次のようになる。

$$R_{s,\infty} = \frac{\Delta e_{s,\infty}}{\Delta e_p + \Delta e_{s,\infty}} \quad \text{----- (18)}$$

また $\log \sim \log$ 表示における二次圧密直線部分の直線の勾配を $C_\alpha$ とすると、 $\Delta e_{s,\infty} = C_\alpha (t_{\infty} - t_{100})$  --- (19)

(19)式を(18)式へ代入すると、 $R_{s,\infty} = \frac{C_\alpha (t_{\infty} - t_{100})}{\Delta e_p + C_\alpha (t_{\infty} - t_{100})}$  --- (20)

ここに、 $t_{\infty}$ ：二次圧密が収束する時間、 $t_{100}$ ：一次圧密が終了する時間とする。(20)式を变形すると、

$$t_{\infty} = \frac{\Delta e_p \cdot R_{s,\infty}}{C_\alpha (1 - R_{s,\infty})} + t_{100} \quad \text{----- (21)}$$

(21)式において $R_{s,\infty}$ の値、つまり(18)式の値が求まれば、 $t_{\infty}$ が求まるわけであるが、(2)式は $e_{s,\infty}$ が未知数であつて、  
これから求まれば $t_{\infty}$ が求まることになる。Wilsonらに示す、二次圧密段階のある点( $t_2$ )までの間水比の  
変化量 $\Delta e_{s,t_2}$ は、 $\Delta e_{s,t_2} = \int_{t_{100}}^{t_2} \left( \frac{de}{dt} \right) dt = \int_{t_{100}}^{t_2} C \cdot t^{\frac{\theta}{\theta+1}} dt = C \frac{1}{\theta+1} [t_2^{\frac{\theta+1}{\theta}} - t_{100}^{\frac{\theta+1}{\theta}}]$  --- (22)

$\theta$ は圧密試験結果を $\log (de/dt) \sim \log t$ で表示した場合の二次圧密直線の直線の勾配である。実験によれば $\theta+1 < 0$ なる事実から、 $\Delta e_{s,\infty} = (\Delta e_{s,t_2})_{t_2 \rightarrow \infty} = C \frac{1}{\theta+1} [-t_{100}^{\frac{\theta+1}{\theta}}]$  --- (23)

以上によつて、二次圧密の収束点を求めることができるが、二次圧密を各めに形に体積圧縮係数や圧密係数をより正しく求めることができ圧密試験の整理に役立つ(2)である。

4.まとめ 以上をまとめると次のようになる。(1)有機質土の二次圧密は<sup>静水</sup>偏差応力にちとずく $\sigma_{vm} - \sigma_{va}$ と平均主  
応力にちとずく $\mu_{micropore}$ (土粒子間の間水)の容積変化に比例する。おのから $\Delta d_s = \alpha \sigma_{vm} + \beta \sigma_{va}$ の形で  
表わされる。(2)有機質土の土粒子骨格も粘土と同様にカチウム構造を有していると仮定すれば、土質が非均質であ  
る非等方性のちとでは、等圧力状態でも二次圧密は起る。 (3)有機質土の圧密試験から得られる  
応力～変形～時間関係は、一般に $d = k \cdot t^m$ で表わすことができる。 (4)泥炭の圧密試験の着目土  
に対する圧密係数を求めるに類しては、従来の方法では不十分で次のような形に求めねばならない。 $C_v = (A+1)/2A$   
 $\times C_{vm} \times r$  (5)体積圧縮係数 $m_v (= m_{v1} + \frac{t_2}{t_{100}} m_{v2})$ も二次圧密収束点を推定できれば正確に求め  
得るが、ここではその試案を示した。

参考文献 (1)赤井浩一他；静水圧力による飽和粘土の一次圧密圧縮度特性に関する研究、林学会論文集、Vol.113、  
1965 (2)Tschubaroff, G. P. 著、石井清丸訳；土質工学、上巻、(3)Vanrahan, E. T.; An Investigation of Physical\* (4)三笠正人；圧密試験の整理方法について、第19回土木学会年次大会講演会講演記録、1962  
(5)Watanabe, S.; Consolidation Characteristics of Peat, Soil and Foundation, vol. 5, No. 1,  
1964 (6)Wilson, N. E., et al.; Rate of Consolidation for Peat, Proc. 6th Int. Conf. S.M.F.E., 1965 \*Properties of Peat, geotechnique, vol. 4, 1954

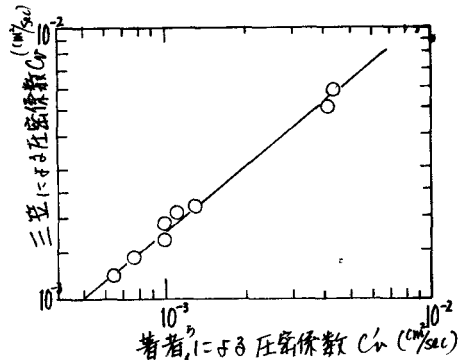


図-5. 圧密係数の比較