

粘土の透水係数の実験的研究

—圧密試験による値と実測値との比較—

西田義親* 八木則男*
松村夏樹** 大島英次***

An Experimental Study on Coefficient of Permeability of Clays

—Comparison between the Consideration Test and the Direct Measuring—

by

Yoshichika NISHIDA, Norio YAGI, Natsuki MATSUMURA, and Eiji OSHIMA

Abstract

This paper presents an experimental study on the coefficient of permeability of clays in order to compare the one (k) measured by the consolidation test with the one (k_0) measured by the constant head test. The coefficient of permeability of plastic clays is obtained by the consolidation test using the Terzaghi's theory and the Gibson and Lo's theory, since it is very difficult to measure it by the permeameter of standard type. The authors prepared a special permeameter of high constant head type, of which head was from 10m to 100m.

According to the test results, it is found that

- (1) the coefficient (k_0) is higher than the one (k),
- (2) the coefficient (k_0) is lower than the value 10times (k) at maximum,
- (3) the coefficient of permeability computed by Terzaghi's theory for the consolidation test becomes more closely to the one from the direct measuring, if the clay is in the more over-consolidated condition or under the higher consolidation pressure,
- (4) the coefficient of permeability computed by Gibson and Lo's theory for the consolidation test gives the better agreement with the one obtained from the direct measuring.

1 はじめに

土質工学や基礎工学の諸問題には土の透水性に関する問題が多くある。たとえばアースダムやロックフィルダムには止水用として不透水性の粘土を使用する場合があり、漏水量計算には透水係数が必要となる。粘土の透水係数を求めるには透水試験による方法と Terzaghi 理論より間接的に圧密試験による方法がある。透水試験をする方法には現場で行なうものと室内で行なうものがあるがいずれも

*土木工学科** 旧大学院学生（現鹿島建設）***大学院学生

著しく透水性の低い粘土の場合には問題点が多く精度もおちる。したがってこのような場合には圧密試験による方法が用いられている。

一般におこなわれている標準圧密試験は Terzaghi 理論に基づいて体積圧縮係数および圧密係数を求め、この二つの係数より透水係数を逆算している。粘性土が圧密される場合、Terzaghi 理論と一致しない二次圧密があり、時間～沈下曲線上で過剰間げき水圧が消散した後にも沈下が続く。圧密係数は二次圧密部分を排除して求められるが、一次圧密部分には二次圧密的沈下が同時に生じ、かなり影響を受けていると考えられる。したがって圧密試験より求める透水係数が直接透水試験より求めた値に一致するか疑問である。

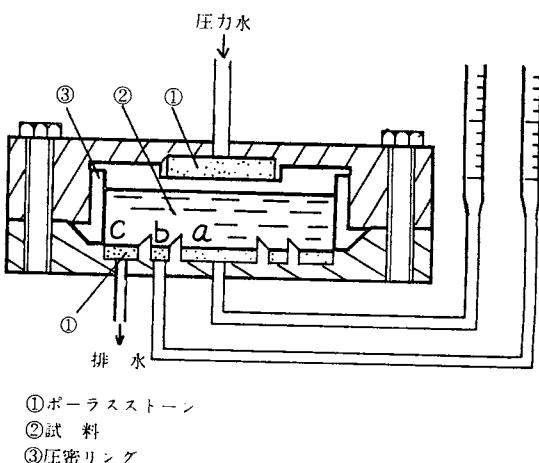
Terzaghi, Cassagrande and Fadum はそれぞれ両者の比較をしており、十分な一致があると報告している。D.W. Taylor²⁾ は練り返し Boston Blue Clay で、変水位透水試験と \sqrt{t} 法で整理した圧密試験結果を用い、両者を比較している。結果は圧密試験から得られた透水係数が透水試験により求められた値よりわずかに小さい値となっており、これは間げき水の排水抵抗の他に土構造の時間に対する圧縮抵抗があるためとしている。G. Mesri and R.E. Olson¹⁾ は練り返しおよび不攪乱粘土を用い、正規圧密領域において圧密試験から得た透水係数が透水試験から得た値より 5～20% 小さくなると報告している。

本研究では練り返し粘土を用いて、一次元圧密試験より Terzaghi 理論で計算された透水係数、Gibson and Lo 理論で計算された透水係数、透水試験から直接求めた透水係数の定性的な相互比較をおこなった。

2 透水試験装置

透水係数を測定するには定水位透水試験と変水位透水試験が用いられる。前者は透水係数が $10^{-1} \sim 10^{-3} \text{ cm/sec}$ のオーダーの試料に、後者は $10^{-3} \sim 10^{-6} \text{ cm/sec}$ のオーダーの試料に適用されるが 10^{-7} cm/sec より小さい透水係数の測定は試料厚が大きくなると浸透水の流れが定常状態になるまでに長時間を要すること、小量の透水量を得るために長時間を要すること、試料と透水円筒の接触面に沿う漏水が測定値に大きな誤差を与えることから困難である。

本研究では短時間に必要な透水量を得るために、圧力ガスにより水頭を高めた透水試験機を準備した。原理は定水位透水試験と同じで、水頭は最高 300m まで可能である。圧密試験した試料を第 1 図に示すように圧密リングと共にセットする。試料下端の排水部は内側より a, b, c 部に区切り、透水量は a, b 部につながる二つのビューレット管で測定する。試料厚は 1 cm 前後で、水頭が一般的の変水位透水試験に比べ大きいため、定常状態になるまでに要する時間は 15 分前後であり、必要な透水量を得るには短時間でよい。試料と圧密リングの接触面に沿って生ずる漏水は c 部より排水されるが、いくぶん b 部透水量に影響が見られるため、a 部のビューレット管による測定値だけを用いた。

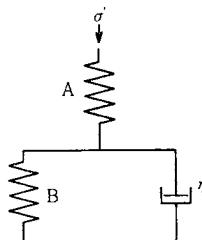


第 1 図

実験に際しては5~100mの水頭を用いた。50m以上の水頭では圧密リングと試料の接触面からの水の吹き出しが生じやすく、100m以上の水頭は用いられなかった。透水試験中の試料が圧密や膨潤することによる間げき比の変化をできるだけ少なくするため圧密圧力に近い水頭を用いた。水頭勾配の異いによる透水係数への影響は本実験の水頭勾配の範囲では見られなかった。温度の透水係数への影響はかなり見られるので実験は20°Cに保って行なった。したがって圧密試験も20°Cの恒温室を使用した。

3 Gibson and Lo 理論による透水係数の算定

Gibson and Lo³⁾は第2図に示すフックのバネとKelvin体を直列につないだレオロジーモデルを基礎に圧密方程式



第2図 Gibson and Lo のレオロジー圧密モデル

$$\frac{k}{\gamma_w} \frac{\partial^2 \sigma'}{\partial z^2} = \frac{1}{A} \frac{\partial \sigma'}{\partial t} + \frac{\sigma'}{\eta} - \frac{B}{\eta^2} \int_0^t \sigma'(z, \tau) \exp\left[-\frac{B}{\eta}(t-\tau)d\tau\right] \quad (1)$$

A: フックのバネ定数

B: Kelvin 体のバネ定数

k: 透水係数

t: 時間

z: 地表面から荷重方向への距離

γ_w : 水の単位体積重量

η : Kelvin 体のダッシュポットの粘性係数

σ' : 有効応力

を解析した。境界条件

$$\left. \begin{array}{l} \frac{\partial \sigma'}{\partial z} = 0, \quad z=h \\ \sigma' = q_0, \quad z=0 \end{array} \right\} \quad (2)$$

h: 地盤厚

q_0 : 荷重

で解を求めるとき、非常に短い時間では

$$\rho(t) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{kt}{\gamma_w A}} q_0 \left[1 + \frac{1}{3} \frac{A}{\eta} t + O\left(\frac{A^2 t^2}{\eta^2}\right) \right] \quad (3)$$

$\rho(t)$: 荷重載荷後時間*t*での沈下量、○はある値

非常に長い時間では

$$\rho(t) = q_0 h \left[\frac{1}{A} + \frac{1}{B} \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{B}{\eta} t\right) \right\} \right] \quad (4)$$

となる。(4)式において $t \rightarrow \infty$ にすると

$$\rho_{\infty} = \left(\frac{1}{A} + \frac{1}{B} \right) q_0 h, \quad (5)$$

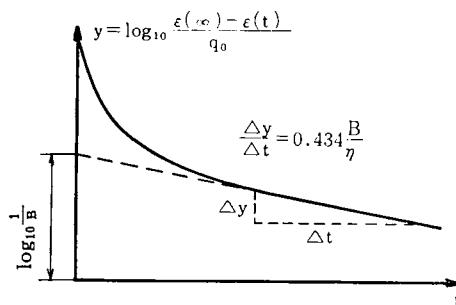
(5)式から(4)式を引くと、 $\epsilon(t)$ は圧縮ひずみ、 $\epsilon(\infty)$ は $t \rightarrow \infty$ のときの $\epsilon(t)$ として

$$\frac{\epsilon(\infty) - \epsilon(t)}{q_0} = \frac{1}{B} \exp \left(-\frac{Bt}{\eta} \right) \quad (6)$$

となり、両辺対数をとると

$$\log_{10} \frac{\epsilon(\infty) - \epsilon(t)}{q_0} = \log_{10} \left(\frac{1}{B} \right) - 0.434 \frac{Bt}{\eta} \quad (7)$$

となる。縦軸に(7)式の左辺を、横軸に時間 t をとると第3図のようになる。透水係数算定には第3図より B 、 η の値を求め、(4)式より A を計算し、 A の値が 10^{-1} のオーダー、 η の値が 10^7 のオーダーであるので、(3)式の第2項以下を無視して k の値を求めた。実験では96時間まで圧密試験を行ない、縦軸に沈下量、横軸に時間を対数でとった時間～沈下曲線において沈下が96時間以後直線的に進むとし、 5×10^4 分の所を最終沈下量 ρ_{∞} とした。



第3図 Gibson and Lo 理論の図解法

4 実験結果

第4図～第8図は正規圧密と過圧密の圧密試験から Terzaghi 理論で求めた透水係数を間げき比 e との関係で比較したものである。過圧密の圧密試験は除荷後、再圧密したものである。いずれも過圧密状態での値が大きい傾向にあり、先行荷重に近づくにつれ両者の値は一致していく。

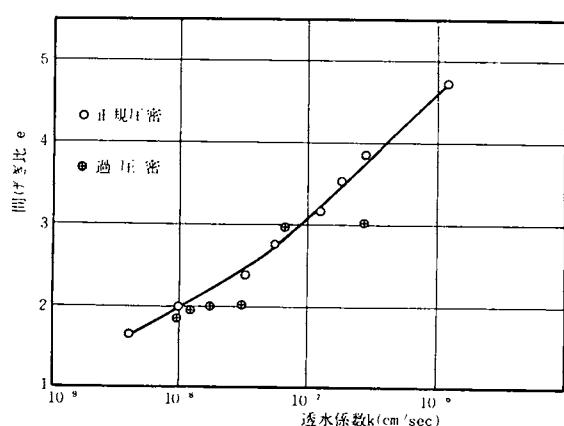
第9図～第12図は透水試験から求めた透水係数と正規粘土の圧密試験から Terzaghi 理論で求めた

第 1 表

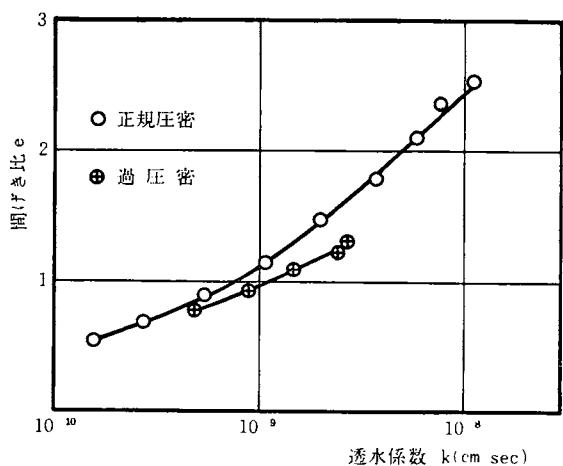
	L.L.	P.L.	P.I.	$D_{60}(\mu)$	比 重	圧密整理法
混合粘土 (Kaolin 20%) (Bento. 80%)	384	33	351			logt
(Kaolin 40%) (Bento. 60%)	261	29	232			logt
(Kaolin 60%) (Bento. 40%)	177	25	152			logt
(Kaolin 80%) (Bento. 20%)	98	18	80			logt
(Kaolin 90%) (Bento. 10%)	64	20	44			logt
Kaolin	35	23	12	11.8	2.63	logt
Bentonite	456	66	390	1.5	2.64	\sqrt{t}
Al-Bentonite	169	73	96			\sqrt{t}
Serisite	37	25	12	11.0	2.73	\sqrt{t}
九谷粘土	60	21	39	4.0	2.69	logt
大阪沖積粘土	116	31	85	9.7	2.71	logt
柴山潟粘土	56	36	20	24.0	2.74	logt

透水係数を比較したものである。第11図の破線は第4図の実線である。一般に透水試験から求めた値が大きくなっているが、間げき比が小さくなるほど両者はより近い値をとるようになる傾向がある。

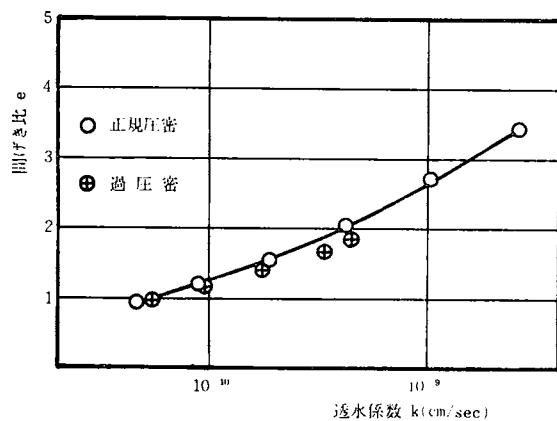
第13図～第15図は Gibson and Lo 理論で求めた透水係数と Terzaghi 理論で求めた透水係数を比較したものである。第13図、第14図、第15図の破線はそれぞれ第9図九谷粘土の実線、第4図の実線、第12図の Terzaghi 理論によるプロットの実線を表わしている。



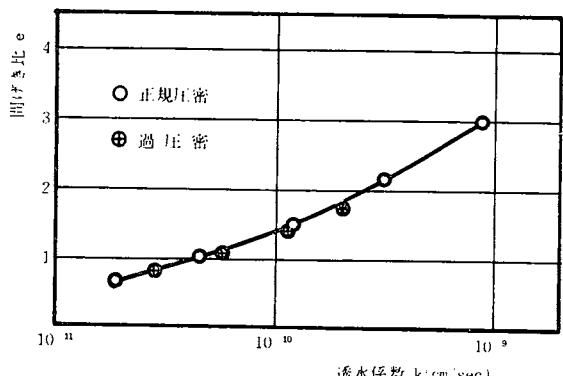
第4図 Al-Bentonite



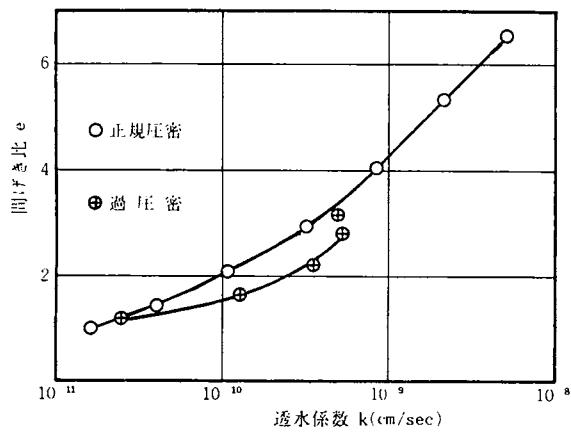
第5図 混合粘土 (K80/B20)



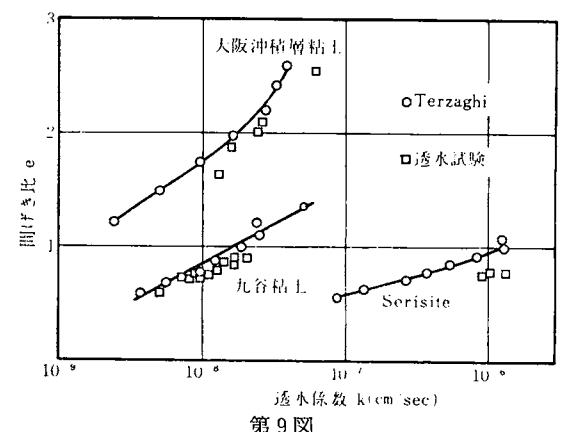
第6図 混合粘土 (K60/B40)



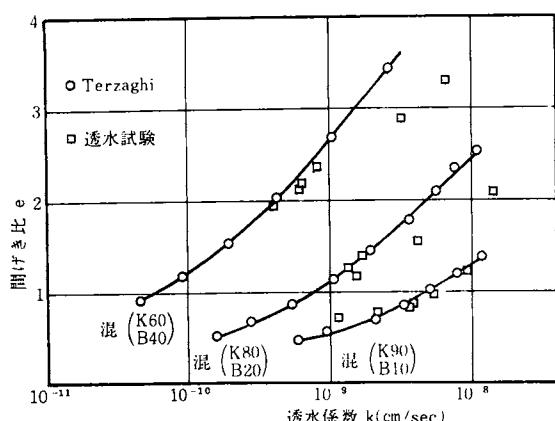
第7図 混合粘土 (K40/B60)



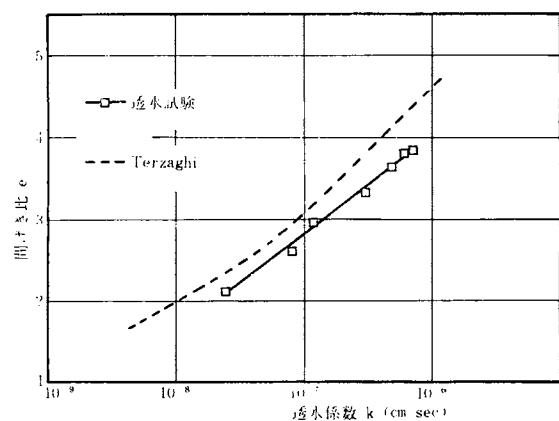
第8図 混合粘土 (K20/B80)



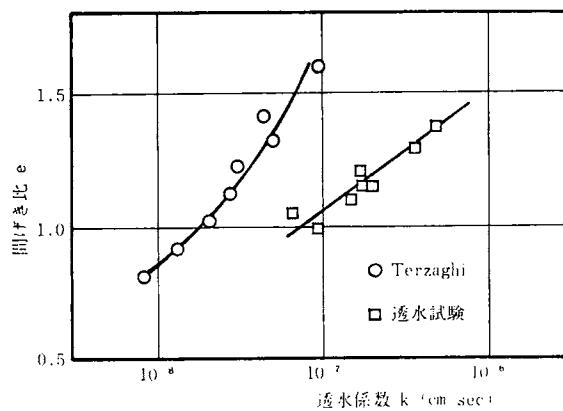
第9図



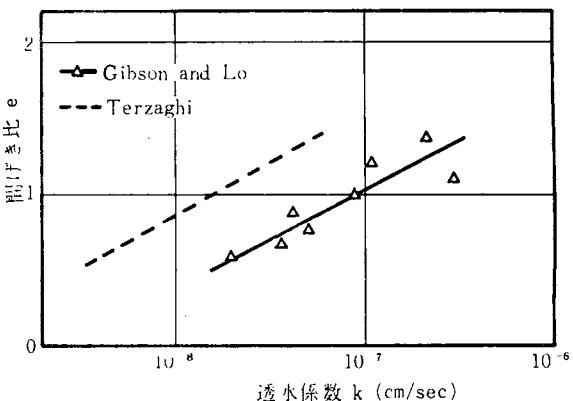
第10図 混合粘土



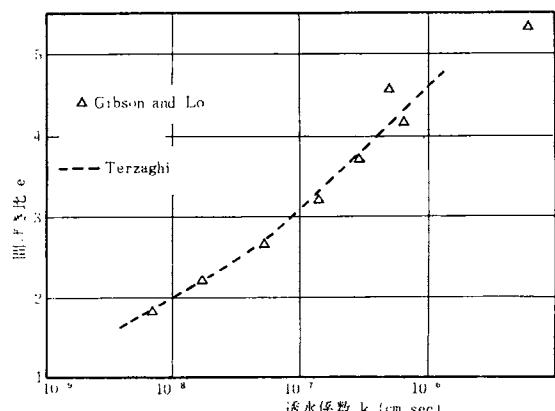
第11図 Al-Bentonite



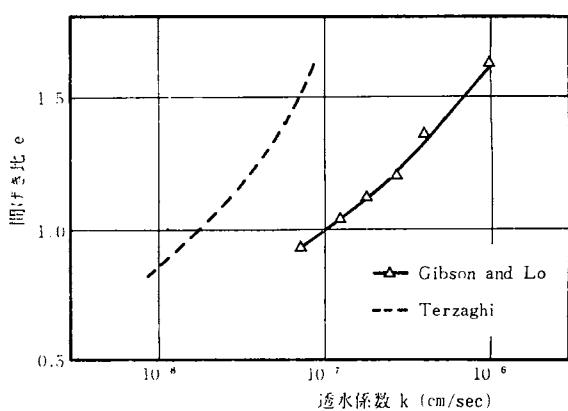
第12図 柴山渦粘土



第13図 九谷粘土



第14図 Al-Bentonite



第15図 柴山渦粘土

5 考 察

5・1 Terzaghi 理論における仮定

Terzaghi の圧密理論は数個の仮定の基に組み立てられている。これらの仮定の中に一部検討を要する点がある。それは

- (1) 間げき水の流れは Darcy の法則に従う,
- (2) 有効圧密応力 σ' と粘土の圧縮ひずみ量とは直線関係にある,
- (3) 粘土の透水係数 k は圧密過程中変化しない,

の点である。(1)については動水勾配がごく小さいと間げき水の移動がないという事実があり、荷重増加率が 1 よりごく小さい場合に問題となろう。(2)の仮定では σ' と間げき比 e が直線関係にあるとしているが、実際は $\log \sigma'$ と e が直線関係になっている。しかし各荷重段階の e の変化が小さいため、この仮定は近似的に成立つであろう。(3)も同様の理由から成立つ。これらの点はいずれも練り返した飽和粘土を室内で標準圧密試験をする場合には満足されるものであり、透水係数への影響はほとんど無視できるであろう。

問題は有効圧密応力 σ' と圧縮ひずみ e の関係が時間に無関係に一義的に定まることである。

$$\Delta e = f(\Delta \sigma') \quad (8)$$

実際の圧密沈下では過剰間げき水圧が消散後、さらにクリープ的沈下が生ずる。これは二次圧密といわれ、実際の地盤の沈下では室内実験に比べ少なくなっている。試料厚が大きくなると一次圧密に要する時間が厚さの 2 乗に比例して長くなるため、クリープ的沈下である二次圧密が一次圧密期間中にほとんど終わってしまうからである。室内試験による圧密においても一次圧密中に二次圧密が重なって生じていると考えられる。つまり圧縮ひずみは有効圧密応力と時間の関数であると考えられる。

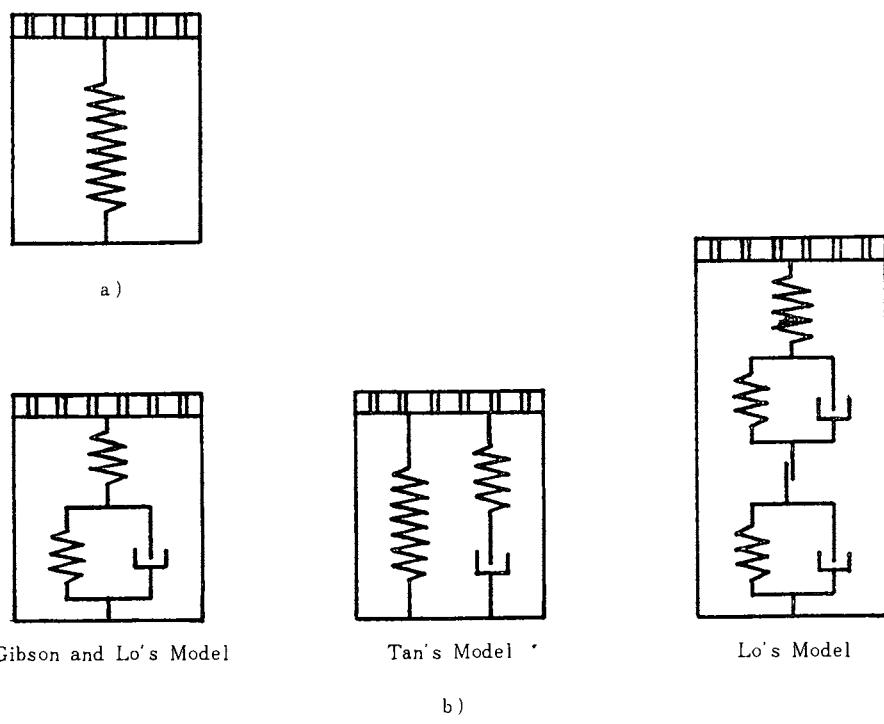
$$\Delta e = f(\Delta \sigma', t) \quad (9)$$

5・2 レオロジー圧密モデル

5・1 で述べた観点に沿って数種のレオロジー圧密モデルが発表されている。第16図の a) は Terzaghi 理論をレオロジーモデルで表わしたものであり、b) は粘土の粘弾性的性質を考慮した Gibson and Lo, Tan⁴⁾, Lo⁵⁾ のモデルである。a) の場合は沈下の時間遅れは透水性の良否だけによって影響されるのに対し、b) の場合は土構造の圧縮抵抗の粘弾性、つまりダッシュポットの粘性抵抗を加えたものによって影響されるのである。このダッシュポットによる粘性抵抗が無視できない程度の大きさであると、Terzaghi 理論により計算された透水係数が透水試験から求めた透水係数より小さく表わされてくると考えられる。

Gibson and Lo 理論に基づいて計算された三種の粘土の透水係数のうち九谷、柴山潟粘土で約 1 オーダー Terzaghi 理論による値より大きくなっていることは注目されよう。さらに柴山潟粘土については Gibson and Lo 理論による値が透水試験による値に一致している。Al-Bentonite の実験結果では三種の方法で求めた透水係数の間に違いは見られず、ほぼ一致した値となっている。

Al-Bentonite では二次圧密量が大きく、すなわち粘性抵抗を伴う変形が大きいにもかかわらず、Terzaghi 法、Gibson and Lo 法、透水試験による透水係数の値が一致した理由は次のように考えられる。Al-Bentonite は Na-Bentonite に凝集剤として硫酸アルミニウム $Al_2(SO_4)_3$ を加えたものであり、粘土構造は水酸化アルミニウム $Al(OH)_3$ を核とし、そのまわりに Bentonite 粒子が凝集したフロックを一単位として集まったものと考えられる。圧密に際して、第一段階で間げき水の流出に伴なって個々のフロック間距離が近づく一次圧密が生じ、次に第二段階として個々のフロックが変形する二次圧密が生ずる。Al-Bentonite の構造上の特殊性のため一次圧密と二次圧密がはっきり



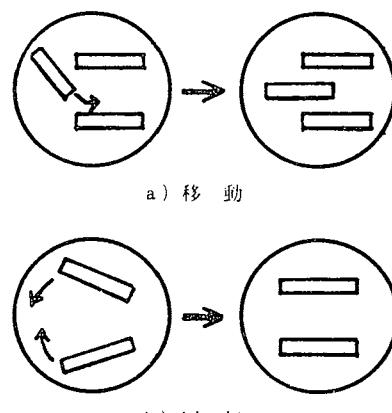
第16図 種々の圧密モデル

分離され、一次圧密中に含まれる二次圧密が極めて少ない。つまり Gibson and Lo のモデルで考えると、はじめフックのバネが最終ひずみまで圧縮され、その後に Kelvin 体のひずみが生ずると考えられる。

5・3 粘土構造

Terzaghi 理論から計算された透水係数が実際の透水係数より小さく現われる原因是、理論を組み立てる上で仮定された粘土構造の変形がフックのバネに對応するとした点にあろう。この仮定は粘土構造が弾性的性質を示すとしたものであるが、実際にはもっと複雑な粘弾塑性挙動を示すことは二次圧密が存在すること、正規圧密か過圧密であるかによる粘土の力学挙動の違い、粘性土における吸着水の存在などから推測されよう。練り返した粘土を圧密すると、はじめランダム構造であった土構造は有効応力が増加するに従い配向構造に変化する。このとき第17図に示す粘土粒子の移動、回転が時間と共に徐々に生ずると考えられる。⁶⁾ この変化は有効応力の増加すると瞬時に生ずるのではなく、ある時間を伴なってクリープ的に生ずるのである。このクリープ的変形は粘土粒子表面に存在する吸着水相互の粘性抵抗が原因であろう。

第4図～第8図において、Terzaghi 理論で求めると過圧密の透水係数が正規圧密の値より大きくなっているが、これは次のように解釈される。正規圧密において配向構造に変化した土構造は、除荷



第17図 土粒子の相互運動

膨潤においてその構造変化はなく、単に粘土粒子相互の反発力によって一次元的に体積を増すのである。したがって再載荷する場合、先行荷重より小さい応力範囲では土構造自身の変化は少なく、土構造の圧縮変形は Terzaghi 理論で仮定したフックのバネに近い挙動を示すものと考えられる。

第10図、第12図では正規圧密より Terzaghi 理論で計算された透水係数は荷重が大きくなるにつれて透水試験から求めた透水係数に近づいている。これはランダム構造から配向構造に変化するにつれて、土構造の圧縮変形が粘弾塑性的性質から弾性的性質に近づいていることが想像される。

5・4 塑性指数との関係

透水性に及ぼす塑性指数の影響については著者の一人はすでに発表したことがあり、⁷⁾ 塑性指数の小さい粘土では比較的透水性がよく、透水係数は大きい。したがって土構造の圧縮変形に際して同程度の粘弾性を示す場合、塑性指数が小さい粘土ではいずれの方法で透水係数を求めてても、その値に大きな違いは見られないと考えられる。第10図の Kaolin と Bentonite の混合比を変え、塑性指数を変化させた粘土の実験結果では圧密初期段階（圧密荷重0.1～0.4kg/cm²）で Terzaghi 理論による値と透水試験による値の差が、塑性指数（第1表参照）が小さくなるにつれて見られなくなっている。この実験結果から同種の粘土についてはランダム構造である圧密初期段階で塑性指数が大きいほど透水係数測定法の違いによる差が現われるものと思われる。しかし異種の粘土では塑性指数の小さい柴山鴻粘土、Serisite が比較的大きな差を示すことから簡単に測定法の違いによる透水係数の差と塑性指数の関係を論ずることはできない。

5 まとめ

本研究によって Terzaghi の圧密理論から計算される正規圧密の透水係数は実際の透水係数より小さい値として現われることが明らかになった。さらにその原因として一次圧密中の粘土構造の圧縮変形による粘性抵抗が考えられ、沈下の時間遅れの原因には間げき水の排水抵抗の他に粘性抵抗のあることが確かめられた。この意味から正規圧密のモデルを考える際には、粘弾塑性を考慮したモデルがより実際の圧密挙動を正確に表わしている。

圧密試験から Terzaghi 理論に基づいて透水係数を求める場合には、正規圧密であるか過圧密であるかの考慮が必要であろう。しかし実際の透水係数との違いは大きくとも1オーダー内に留まるから、オーダー程度が必要な場合には一般に行なわれている圧密試験による方法で十分であろう。以下本研究によって明らかになった点を列挙する。

- (1) Terzaghi 理論により計算された透水係数は直接透水試験より求めた値より小さい。
- (2) この差は大きくとも1オーダー以内である。
- (3) 粘土が過圧密状態であれば、また圧密荷重が大きくなるに従い Terzaghi 理論による透水係数の値は直接透水試験から求めた値に近づく。
- (4) Gibson and Lo 理論による透水係数は実際の値に近い。

最後に本研究の実験には元金沢大学工学部学生（現大阪市）の片山貴美君の協力があったことに感謝する。

参考文献

- 1) Mesri, G. and Olson, R. E. Mechanisms Controlling the Permeability of Clays, Clays and Clay Minerals, 1971, Vol. 19, pp. 151—158., Pergamon Press. Printed in Great Britain. (1970).
- 2) Taylor, D. W. Research on Consolidation of Clays, Serial 82, Massachusetts Institute of Technology, Department of Civil Engineering, Cambridge. (1942).
- 3) Gibson, R. E. and Lo, K. Y., A Theory of Consolidation of Soils Exhibiting Secondary Compression, Acta Polytechnica Scandinavica, Ci 10. (1961).
- 4) Tan Tjong-Kie, Consolidation and Secondary Time Effect of Homogeneous, Anisotropic, Saturated Clay Strata, Proc. 5th Int. Conf. S. M. Found. Eng., Paris, 1,367—373 (1961).
- 5) Lo, K. Y., Secondary Compression of Clays, Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, Proc. ASCE, 87, NO. SM4, 61—87 (1961).
- 6) Lee, I. K., Soil Mechanics, pp. 48—54, Butterworths, London (1968).
- 7) 西田義親, 堀文二, 粘土の透水係数の一推定式, 土と基礎, Vol. 9, No. 3, pp. 34—36 (1961).

(昭和48年5月18日受理)