粘土の圧密特性に関する実験的研究

軽　部　大　蔵

EXPERIMENTAL STUDY OF THE CONSOLIDATION CHARACTERISTICS OF THE REMOLDED CLAYS.

by Daizo KARUBE

Synopsis

The characteistics of the porewater in the clays under consolidation were investigated using bentonite, Na-bentonite, kaolinite and Na-kaolinite, and following test results were obained :

i) The density of the pore-water in bentonite and Na-bentonite is less than 1 when the void ratio of the clays is less than 2. 5.

ii) The specific electric conductivity of the pore-water decreases when the void ratio of the clays is less than 3. 5 for both bentonite and Na-bentonite, and 1. 2 for both kaolinite and Na-kaolinite.

iii) There are apparent impermeable voids in the clays, that apparent void ratio is 2. 5 for bentonite, 0. 8 for Na-bentonite and 0. 4 for Na-kaolinite.

1. まえがき

粘土のいろいろな力学的挙動は，粘土粒子とそれをとりまく間げき水の微視的な動きの反映である。それで従来，粘土の力学的挙動をその微視的構造から説明しようとする試みがかなり多くなされてきている。

ここで問題を間げき水にしぼると，周知のように，間げき水は帯電した粘土粒子の影響を受けて，普通の水とはちがった状態にあるといわれており，またこのような水が粘土の力学的性質に大きく影響しているともいわれている[1),2)]。

筆者は，圧密中の間げき水の密度および比電気伝導度の測定を試み，また透水性について検討を加えたので，ここにそれらの結果を報告する。

2. 試　料

地盤を構成する粘土は種々の粘土鉱物を含んでいるが，この研究では，単一鉱物で構成される粘土の方がより明瞭な結果を得られそうなので，モンモリロナイトを主成分とするベントナイトおよびカオリン粘土の２種類を用いることとし，また間げき水中のイオンの影響を調べるために，これらの試料に間げき水１ l あたり食塩30 g を添加した試料も用いた。

試料の物理的性質は **Table 1** に示すようであって，ベントナイトは高い塑性指数（L. L. - P. L.）を持ち，カオリンの14倍に達している。また後述するように透水係数もベントナイトは同じ間げき比のカオリンの 10^{-4} 倍となっており，両者は非常にことなった性質を示している。

標準圧密試験から得た圧密荷重～間げき比関係は **Fig. 1** に示すようである。

Table 1 Physical properties of the samples.

Sample	Liquid Limit	Plastic Limit	Specific Gravity
Bentonite	280 %	39.9%	2.54
Na-Bentonite	110 %	37.2%	
Kaolinite	48.0%	29.4%	2.62
Na-Kaolinite	46.0%	25.6%	

("Na" denotes the clay which contains 30g NaCl/1l-H_2O)

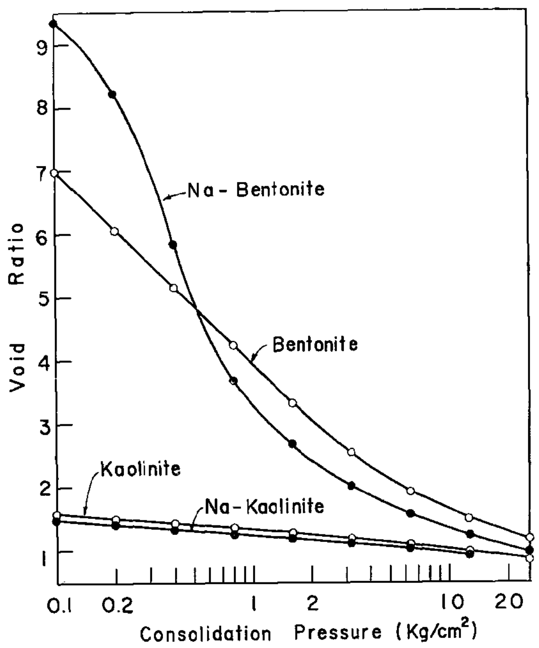

Fig. 1 Consolidation pressure vs. void ratio

3. 間げき水の密度の測定

3.1 測定装置および測定方法 装置は **Fig. 2** に示すように，圧密容器，載荷装置，排水量測定用ビューレットからなっている。圧密容器は内径 6 cm×高さ 8 cmの真ちゅう製円筒に，厚さ 2 cm の載荷板を組合わせたものであって，容器の底面と載荷板下面には厚さ 6 mm の銅製ポーラスストーンがはめこまれている。このポーラスストーンの前面にはろ紙がつけてある。試験中にポーラスストーンへ排水された間げき水は，内径 2 mm，肉厚 1 mm のビニールチューブで，容量 5 cc，最小目盛0.02ccのビューレット 4 本に導かれる。載荷板には標準圧密試験機の載荷装置を利用して 0～25.6kg/cm² の荷重を作用させることができ，また載荷板の移動量は最小目盛 1/100mm のダイヤルゲージで測定される。

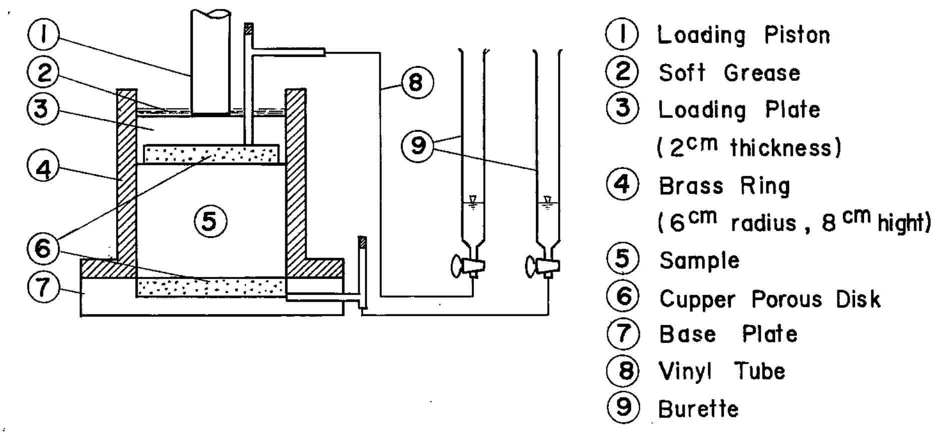

Fig. 2 Apparatus for measuring the density of the pore-water in the clay sample.

測定方法は，まず練り返し飽和試料を容器に流し込み，載荷板をかぶせ，その上に軟かいグリースを厚さ5 mm 程度塗り，試料からの水分の蒸発や外部からの空気の侵入を防止する。次にビューレットを接続し，0.05kg/cm² の荷重で試料に圧密を起させて排水系内の空気を排除する。

試料からの排水が容器と載荷板のすり合せ部から漏らないように，圧密中は常にビューレットの水面が圧密容器の載荷板下面より約 5 cm 低くなるように調節する。

0.05kg/cm² での圧密が終了した後，荷重を 0.1kg/cm² から 25.6kg/cm² まで，荷重増加率2，1段階の載荷期間24時間（圧密は終了する）で段階的圧密を行ない，適当な時間間隔で載荷板の沈下量と排水量を記録する。

つぎに，間げき水が粘土中にあったときに示していた密度と，その水が粘土外に排出されてから示している密度の比を，各荷重段階のはじめを基準として次式で計算する。

間げき水の比密度＝(排水量)÷(体積減少量)……………………………………（1）

ここに排水量はビューレットで求めた値であり，体積減少量は載荷板の沈下量から求めた値である。

なお，ビューレットからの蒸発や温度変化による読みの変動を調べるために，一定量の水を入れたビューレットを測定用ビューレットと並べて備えたが，蒸発は全く認められなかった。

3.2 測定結果　1荷重段階当りの排水量はベントナイトおよび Na-ベントナイトについては40cc～4 cc であった。圧密進行中の値から計算した間げき水の比密度を圧密時間に対してプロットすると，**Fig. 3** に示すように，時間とともに変化する。これは試料に僅かに含まれている空気が圧密の初期には間げき水圧によって体積を減少させ，圧密の終期には間げき水圧の消散とともに元の体積回復するための見かけ上の変化であると思われる。したがって比

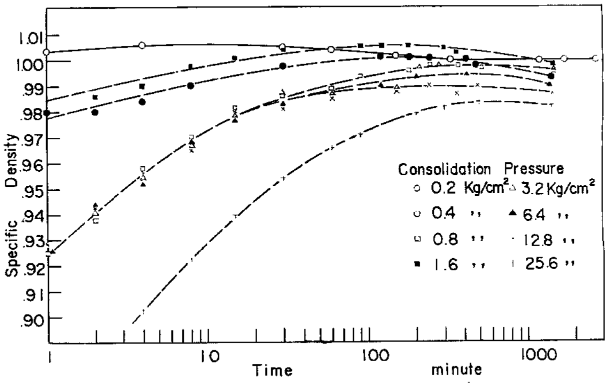

Fig. 3 Specific density of the pore-water in Na-bentonite. (vs. consolidation time)

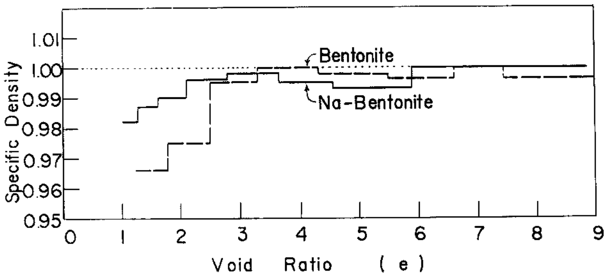

Fig. 4 Specific density of the pore-waterin the clays. (vs. void ratio)

密度の計算は間げき水圧のない状態での測定値を用いて行なわなければならない。**Fig. 4** は各荷重段階における全排水量と全沈下量から求めた比密度と，その荷重段階の試料の間げき比の関係である。

粘土が圧密される場合に，粘土粒子からはなれたところにある水から順に排水されると仮定すると，**Fig. 4** は，粘土粒子の近くに存在する間げき水の密度が小さいことを示しているであろう。密度が明らかに小さくなりはじめる間げき比は，ベントナイトおよび Na- ベントナイトともに $e \approx 2.5$ あたりからと思われる。なお，試験中の室温は 20～17°C であった。3°C の変動は排水量の測定値にかなりの影響を及ぼしたようであった。

4. 間げき水の比電気伝導度の測定

4.1 測定装置および測定方法 装置は **Fig. 5** に示すように圧密容器と電源部，および電流，電圧測定器部から成っている。圧密容器は内径 6 cm × 高さ 4 cm のベークライト円筒で，載荷板は高さ1.5cmの真ちゅう製である。容器底面および載荷板下面にはポーラスストーンがはめこんであり，それらの前面に細かい真ちゅう網がハンダ付けしてあって，これが電極となっている。金網と試料の間にはろ紙（厚さ0.2mm）が入っているが，このろ紙の電気抵抗も後述の計算に考慮されている。電源部は 100V, 60c/s の電灯線にオートトランスおよびベルトランスをつないで 0 ～10Vの交流電圧をとり出せるようにしたものである。通過電流を計測するための電流計は端子の切換えによって 0 ～ 5 mA, 5 ～25mA, 25～100mA, 50～200mAの測定範囲をフルスケールの 1/100 の目盛で読みとれるものである。極板間の電圧を測定する電圧計は横川電機の回路計（JIS C1202）を利用した。

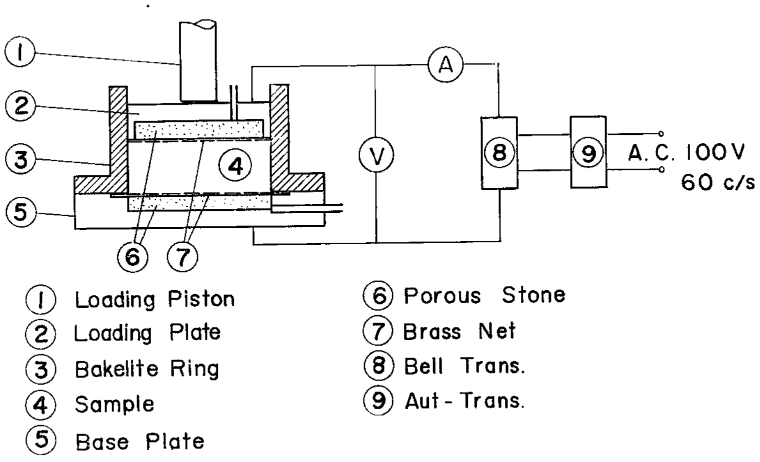

Fig. 5 Apparatus for measuring the specific electric conductivity of the pore-water in the sample.

試験操作は3と同様であって，電流および電圧は，各荷重段階での圧密開始直前，開始後4分，1時間，7時間および24時間（次の段階の直前）に測定した。測定は極板間に1～5Vの電圧を1Vきざみに短時間かけ，対応する通電量を測定する方法をとった。

間げき水の比電気伝導度は，電流の流れる距離として試料の厚さを採用し，流路の断面積として間げき水のみの見かけの断面積を採用して次式によって計算した。

$$\mho=\frac{(i/A_w)}{E'/h} \quad : \text{単位}\left(\frac{A/cm^2}{V/cm}\right) \cdots\cdots (2)$$

ここに，i：通過電流（A），A_w：間げき水のみの見かけの断面積（cm^2），h：試料高さ（cm），$E'=E-R\cdot i$（Eは極板間の電圧，Rはろ紙の電気抵抗）。

また圧密によって排水された間げき水の電気伝導度を別に測定した。

3.2 測定結果 極板間の電圧を変化させるとわずかに電気伝導度が変化したが，この現象は排出された状態の間げき水についても見られたので，計器の誤差によるものと思われる。またベントナイトおよびNa-ベントナイトに交流を長時間かけておくと電気伝導度が増加するのが見られた。

Table 2

Specific electric conductivity of the drained water from clays.

Sample	Specific Electric Conductivity
Bentonite	$1.4\times10^{-3}\mho$
Na-Bentonite	$29.5\times10^{-3}\mho$
Kaolinite	$1.0\times10^{-3}\mho$
Na-Kaolinite	$29.5\times10^{-3}\mho$

圧密中の間げき水の比電気伝導度を試料の間げき比eに対してプロットすると **Figs. 6，7** のようである。これらの図からベントナイトおよびNa-ベントナイトでは$e\approx3.5$，カオリンおよびNa-カオリンでは$e\approx1.2$あたりから間げき水の電気伝導度が間げき比の減少とともに小さくなることがわかる。また試料から排出された間げき水の電気伝導度は **Table 2** のように測定された。**Table 2** と **Figs. 6.7** を比較すると，Na-ベントナイトおよびNa-カオリンでは排出された間げき水の電気伝導度は試料中の間げき水のそれよりも大きいが，ベントナイトおよびカオリンではその逆の結果となっている。105°Cの炉で乾燥した試料の電気伝導度は実事上無視できる程度であったから，この矛盾する現象は，ベントナイトやカオリンでは粘土粒子のまわりに十分なイオンの吸着がないために帯電した粘土粒子自身が交流電圧に対

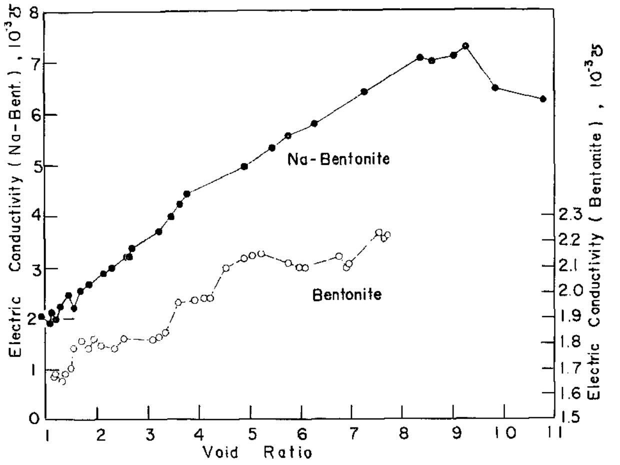

Fig. 6 Specific electric conductivity of bentonite and Na-bentonite.

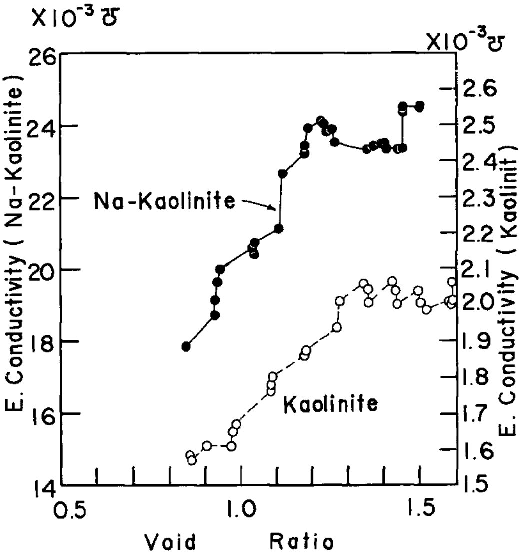

Fig. 7 Specific electric conductivity of kaolinite and Na-kaolinite.

して見かけ上のイオンの如く振舞うために起るものと推察される。なお試験中の室温は18～15°Cであった。

5. 透水係数の検討

先述3，4の試験はすべて圧密試験であるから，圧密中の試料の体積減少量（または排水量）～時間関係から透水係数の計算が可能である。計算に用いたおもな仮定は，排水距離は試料高さの1/2とすること，水

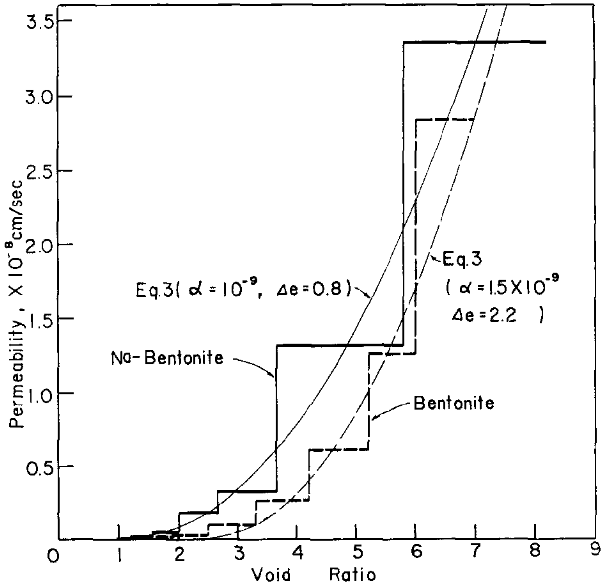

Fig. 8 Permeability of bentonite and Na-bentonite.

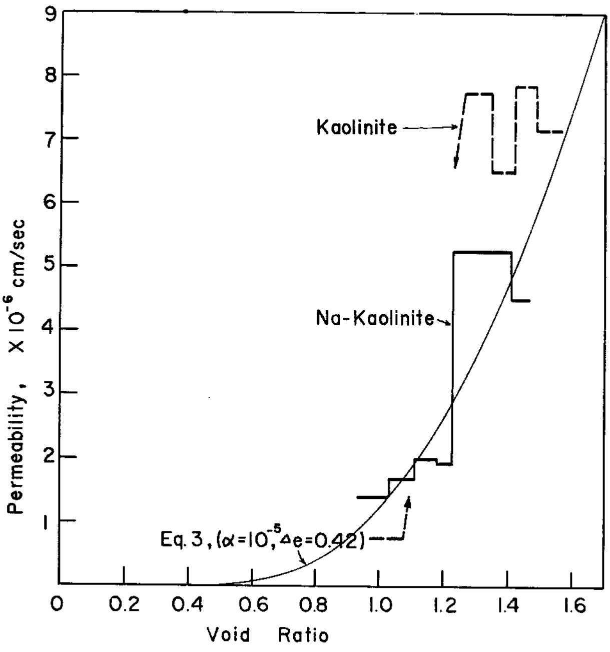

Fig. 9 Permeability of kaolinite and Na-kaolinite.

の移動はダルシーの法則に従うことなどである。計算から求められた透水係数を試料の間げき比に対してプロットすると **Figs. 8，9** の折線のようである。

粒状体中を流れる流体の透水係数は Kozeny-Karman によれば

$$K=\left(\frac{\rho\cdot g}{\eta}\cdot\frac{1}{k_0\cdot S^2}\right)\times\frac{e^3}{1+e} \quad\cdots\cdots\cdots\cdots (3a)$$

ここにK (cm/sec)：透水係数，ρ (g/cm^3)：流体の密度，g：重力の加速度 980cm/sec^2，η (g/cm•sec)：流体の粘性係数，k_0：間げきの形，実流路長と見かけ流路長の比などで決る係数，S (cm^{-1})：比表面積，e：試料の間げき比である。この式で（ ）内は圧密中に全体として変化するものであろうが，簡単のために一定値と仮定し，e のかわりに $(e-\Delta e)$ とおくと，**eq. 3a** は次のように書きあらためられる。

$$K=\alpha\cdot\frac{(e-\Delta e)^3}{1+(e-\Delta e)},\quad \alpha=\frac{\rho\cdot g}{\eta}\cdot\frac{1}{k_0\cdot S^2} \quad\cdots\cdots\cdots\cdots (3)$$

eq. 3 が **Figs. 8，9** と最もよく合致するようにαとΔeを選ぶと **Figs. 8，9** の細い曲線が得られる。このΔeは透水に関係のない仮想の間げき比をあらわしている。

6. まとめ

粘土を圧密させるとき，粘土粒子から遠いところに存在する間げき水から順に排水されていくと仮定すると，上述の試験結果から，"粘土粒子附近の水は普通の水とは違った性質を持っている"との結論が導かれる。各試験から得られた特別な水の存在領域およびその性質を要約すれば次のようである。

1）ベントナイトおよび Na-ベントナイト 粒子付近の間げき水は密度の低い状態にある。密度が小さくなりはじめる間げき比は両者とも$e\approx2.5$であって，$e=1.2$付近ではそれぞれ 0.966，0.982 に低下する。この現象は，粒子付近の水がある程度配列しているために起るものと考えられる。

2）粘土粒子付近の間げき水の比電気伝導度は他の部分に比べて小さい。電気伝導度が減少しはじめる間げき比は，ベントナイトおよび Na-ベントナイトでは $e \approx 3.5$，カオリンおよび Na-カオリンでは $e \approx 1.2$ である。この現象は粘土粒子附近のイオンが配列した水に運動を妨げられるために起るものと考えられる。

3）粘土の間げきのうちには透水しにくい部分が存在する。この部分の大きさを全く透水性のない間げのき大きさに換算すると，ベントナイトでは $\Delta e \approx 2.2$，Na-ベントナイトでは $\Delta e \approx 0.8$，Na-カオリンでは $\Delta e \approx 0.4$ である。これは Δe を計算した際に圧密の進行にともなう粘土の内部構造の変化を無視したために起る見かけ上のものも含まれているが，また粒子付近の水の粘性が高いことを示しているとも考えられる。

4）この研究では間げき水中のイオンの影響を調べるために，間げき水1 l 当り食塩 30g を添加した試料を併用したが，ベントナイトのL．L．が大きく減少した以外は，食塩添加の影響は明らかには現われなかった。

以上の結果を総合すれば，ベントナイトでは土粒子の2倍～3倍の体積の間げき水が特別な状態にあり，カオリンでは1倍程度の間げき水が特別な状態にあるといえよう。

参　考　文　献

1）Earl Ingerson (Editer in chief) "Clays And Clay Minerals", vol. 9, 1962. pp. 12～60.

2）山口真一 "粘土の鋭敏比の研究"，防災研究所年報，第1号，昭32年12月，pp. 73～78