

粘土の二次圧密特性に関する実験的研究

EXPERIMENTAL STUDY ON SECONDARY COMPRESSION PROPERTIES OF CLAY

山田 洋右*

By Yoou YAMADA

In order to investigate influence of fabric of kaolin clay on secondary consolidation behavior, samples were prepared which have different fabrics, that is, samples with the addition of quantities of aluminum sulfate about 0~10%. The consolidation test were carried out for these samples under various conditions. Some of the obtained results are as follows: (1) The coefficient of secondary consolidation C_α increases with increasing the average size of peds P_{50} . This seems to suggest that the volume decrease of clay due to the compression of micro-pores in the secondary stage were predominated, owing to the number of micro-pores increases with increasing P_{50} . (2) The elapsed time t_s at which e -log t curves give straight lines is affected by $\Delta p/p$ and P_{50} . Namely, t_s increases with increasing P_{50} , and these trends are predominated when $\Delta p/p$ is decreased, but, t_s is not affected by $\Delta p/p$ and P_{50} when the preconsolidation pressure is increased.

1. ま え が き

Terzaghiの圧密理論によると、過剰間隙水圧が消散した後は沈下量が一定値に収束するはずであるが、実際にはほとんどすべての粘土がその後もクリープ的沈下を継続する。このようなクリープ的沈下は有機質土のような高含水比の地盤で、長期間にわたって沈下が継続するので大きな問題となる。

このクリープ的沈下が時間の対数に比例して生ずることから、この直線部分の勾配を $\Delta e/\Delta \log t (=C_\alpha)$ 、あるいは $\Delta \epsilon/\Delta \log t (=e_\alpha)$ で表わし、これを二次圧密係数とよんでいる。これまで二次圧密係数 C_α に及ぼす影響要因について、数多くの研究が行われてきた。たとえば、 C_α と圧縮指数 C_c とは一義的な関係にあること¹⁾、不攪乱試料では、 C_α がピークを示す圧密圧力が存在する²⁾、ことなどが判明してきている。しかし、荷重増加率の影響については研究者によって異なったデータが示されており、いまだ解明されたとはいえない。

二次圧密や荷重増加率の影響など粘土の圧密特性の基本的事項を究明することは、これらが現実の沈下解析にどのようにかかわりあってくるかなど、実用的な面から

も重要である。

この二次圧密については、これまでに粘土粒子の移動が吸着水の塑性抵抗によって遅らされる³⁾、二次圧密中の非等方応力によってクリープの変形が生じ^{4),5)}、あるいは微小間隙 (micro-pore) が圧縮される⁶⁾、などの説明がなされている。

ところで、自然地盤の粘土粒子はもちろんのこと、多くの場合粒子同志が集合体 (ペッド) を形成している⁷⁾。土の構造とは物理・化学的な力に依存した粒子配列を示すものと定義されるが⁸⁾、集合体の構造はこの定義の範囲にあるものである。

一般に上水汚泥の処理過程では、粘土粒子を凝集させるために硫酸アルミニウムが添加され、その処理汚泥はそのほとんどが埋立処分されている。そこで、粘土のペッドを定量的に把握できる試料を得るためにカオリンに硫酸アルミニウムを加え、初期構造の異なる試料を作成した。以前にカオリン系粘土に硫酸アルミニウムを加えたとき、その量が多い試料ほどペッド径が大きくなり、また初期含水比が同じでもペッド径が変化したときには圧縮指数が異なることを報告した⁹⁾。二次圧密係数と圧縮指数とは一義的な関係にあると考えられるから、二次圧密係数と試料のペッド径とは何らかの相関を有していると推測される。

* 正会員 北見工業大学助手 工学部土木工学科
(〒090 北見市公園町165)

このような観点から、本研究はおもに二次圧密特性に及ぼすベッド径の影響について検討したものである。本文では、まずカオリンに硫酸アルミニウムを加えた試料を用いて、 C_a に及ぼす硫酸アルミニウム量の影響について調べ、次に走査型電子顕微鏡でベッド径やベッド内のマイクロポア個数を測定し、二次圧密現象がこれらと密接に関連していることを明らかにした。さらに二次圧密係数と圧密荷重の関係に及ぼす事前圧密時間の影響（ここでの事前圧密とは二次圧密に及ぼす圧密時間の影響を調べるために事前に行った圧密のことである）、ならびに試料のベッド径が異なったとき、圧密沈下曲線や C_a に及ぼす荷重増加率の影響について検討した。

なお、試料として市販のカオリンに水を加えて練返したものを使用した。これはカオリンでは二次圧密量の絶対量が小さいが、本研究の中心課題がベッドの大きさにあるため走査型電子顕微鏡でベッド径を測定しやすいこと、ならびに均一な供試体が必要であると判断したことにある。

2. 試料および実験方法

(1) 試料

使用した試料は、はくとう土（カオリン）である。試料の初期構造を変えるために、硫酸アルミニウム量 Q を 0 %、5 % および 10 % の三段階の質量割合でカオリンと混合した。

粘土に凝集剤を添加するとき、対象とする粘土の陽イオン交換容量（CEC）に基づいて決定する必要がある。試料の（CEC）は 3.9 meq/100 g であった。この場合、試料に加えることができる硫酸アルミニウム $Al_2(SO_4)_3$ 量は粘土乾燥質量 100 g に対して最大 0.44 g である。

本研究では、凝集効果を大きくするために（CEC）に基づいた量以上の硫酸アルミニウムを加え、化学的反応による凝集をおもに取り扱い検討した。

粘土に硫酸アルミニウムを加えると、硫酸アルミニウムは電離して Al^{3+} イオンを生ずる。 Al^{3+} イオンは粘土粒子の水和層内に存在する陽イオンとの間でイオン交換される。それと同時に OH^- イオンと化学反応にあずかり、水酸化アルミニウムが生成される。この粒子が粘土

粒子に吸着されるのは、電気的な吸引力によるものではなく、化学的な反応によるものと考えられている¹⁰⁾。したがって粘土粒子の表面に多量にアルミニウム粒子が吸着されると、他の負荷電の粘土粒子と引き合せて中間に正荷電のアルミニウム粒子をはさんだ形での凝集を生じる。粘土に硫酸アルミニウムを加えたときに生成される水酸化アルミニウムが粘土粒子を結合させる働きをもつことが、高倍率の電子顕微鏡によって直接に観察されている¹¹⁾。

粘土に加える水の温度は約 18°C であった。この温度のときの硫酸アルミニウム（無水塩）の水に対する溶解度は 35.6 g/100 g である。本実験での Q は、溶解度 35.6 g/100 g 以下になるように決定した。使用した試料の物理的性質を Table 1 に示す。なお、表の C_c 、 C_a 値は事前圧密しないときの平均値である。

(2) 実験方法

a) 電子顕微鏡観察

顕微鏡観察試料は、初期含水比 W_0 が 100 % で練返した試料と、これを圧密荷重 10 kPa で 10 日圧密した試料である。これらの試料を D-dry 法で乾燥させた⁹⁾。乾燥試料を破断し、破断面をイオンコーターにより金蒸着を行った。その後に Q べつにベッド径およびマイクロポア個数を測定し、圧密前後の変化を調べた。ベッドの形状はそのほとんどが楕円形であったが、ベッド径の測定にあたってはすべて長軸を測定した。

b) 圧密試験

i) 事前圧密しない場合 練返した試料を圧密リングに入れ、加圧板の荷重による沈下量が落ち着くまで圧密沈下量を測定した後、5~640 kPa の荷重をかけ標準圧密試験を行った。 W_0 は 50 %、75 % および 100 % の三種類である。なお、供試体の飽和度はそれぞれ平均 94.8 %、94.3 %、95.1 % であった。この試験は、おもに C_a に及ぼす W_0 とベッド径の影響を調べることにある。

ii) 事前圧密時間 t_r の影響 i) と同様に加圧板の荷重による沈下量を測定後、圧密荷重 10 kPa でそれぞれ 10 日、20 日および 40 日圧密を行った。その後 20~1 280 kPa の荷重をかけ標準圧密試験を行った。事前圧密後の層厚 H を W_0 べつに Table 2 に示す。この試験は標準圧密試験における C_a と圧密荷重 P の関係に及ぼす t_r の影響を調べることにある。

Table 1 Physical properties of tested samples.

| | Quantities of Aluminum Sulfate (%) | | | | | | | | |
|---------------------|------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----|-----|
| | 0 | | | 5 | | | 10 | | |
| G_s | 2.72 | | | 2.84 | | | 2.96 | | |
| W_L (%) | 52.7 | | | 47.5 | | | 43.5 | | |
| I_p (%) | 24.0 | | | 19.6 | | | 16.7 | | |
| W_0 (%) | 50 | 75 | 100 | 50 | 75 | 100 | 50 | 75 | 100 |
| C_c | 0.195 | 0.324 | 0.503 | 0.255 | 0.366 | 0.476 | 0.290 | | |
| $C_a (\times 10^3)$ | 2.5 | 5.6 | 8.9 | 5.0 | 6.6 | 9.8 | 5.6 | | |

Table 2 Relationship between t_r and thickness H .

| W_0 (%) | 50 | | | 75 | | | 100 | | |
|-----------|-------------|------------|----|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| | t_r (day) | 10 | 20 | 40 | 10 | 20 | 40 | 10 | 20 |
| H (cm) | 1.8 1.9 | 1.8 1.9 | | 1.4 1.6 | 1.5 1.7 | 1.5 1.7 | 1.3 1.4 | 1.3 1.5 | 1.3 1.5 |

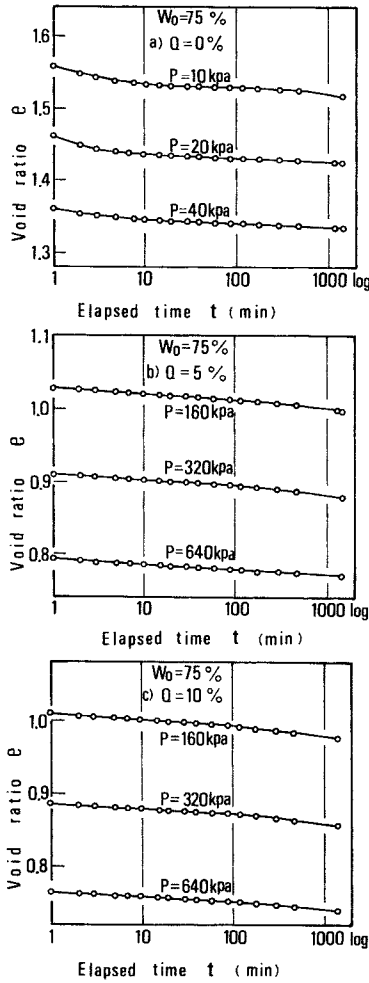


Fig. 1 $e-\log t$ curves of standard consolidation test ($W_0=75\%$).

iii) 荷重増加率 $\Delta P/P$ の影響 加圧板の荷重による沈下量を測定後、 P が 10 kPa および 40 kPa で 10 日圧密した。その後 $\Delta P/P$ が 0.5, 2.0, 4.0 となるように荷重をかけた。 W_0 は 50 % である。この試験は試料のベッド径が異なるとき、 C_α や $e-\log t$ 曲線が直線を示すまでの経過時間 t_s に及ぼす荷重増加率の影響を調べることにある。

なお、圧密試験においては、摩擦を低減させるためにあらかじめ圧密リングにシリコングリースを薄く塗布して試験を行った。試験温度は水浸箱の水温を調節したが試験中を通して約 $17 \pm 3^\circ\text{C}$ であった。

3. 実験結果および考察

(1) 二次圧密係数 C_α に及ぼす初期含水比 W_0 およびベッド径の影響

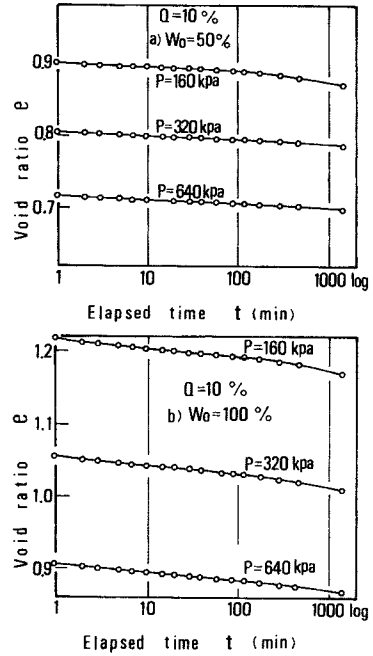


Fig. 2 $e-\log t$ curves of standard consolidation test ($Q=10\%$).

圧密沈下量を間隙比 e で整理し、 Q べつに $e-\log t$ 曲線を示したものが Fig. 1 である ($W_0=75\%$)。ここで $e-\log t$ 曲線の後半部が曲線から直線に変化する過程と P の関係について検討する。 Q が 0 % のとき、 P が 20 kPa の大きになると直線が現われてくる。これに対して Q が 5 % では、 P が 640 kPa まで大きくならないと直線が現われてこないことがわかる。このように W_0 が同じでも、 Q が多い試料ほど $e-\log t$ 曲線の後半部が直線を示すための P が大きくなった。 W_0 が 50 % および 100 % においても同様の傾向を示した。

Fig. 2 は W_0 べつに $e-\log t$ 曲線を示したものである ($Q=10\%$)。 W_0 が 50 % では、 P が 320 kPa の大きさに直線が現われるが、 W_0 が 100 % では、 P が 640 kPa まで大きくなっても直線が現われなかった。 Q が 0 % および 5 % においても、高含水比の試料ほど $e-\log t$ 曲線の後半部で直線が現われるための P が大きくなった。

Fig. 1~2 から明らかなように、 $e-\log t$ 曲線の後半部の形状は W_0 および Q によって大きく異なる。すなわち、 P が小さいときは、 $e-\log t$ 曲線の後半部で直線が現われず、圧密開始から約 7 時間ほど経過した後に沈下量が急激に増加する。そして P が大きくなるとしだいに直線を示すようになった。 $e-\log t$ 曲線が直線を示すようになると、圧密時間 1 日以後も同様に直線を示したので、このような現象が、沈下量が急激に増加する時

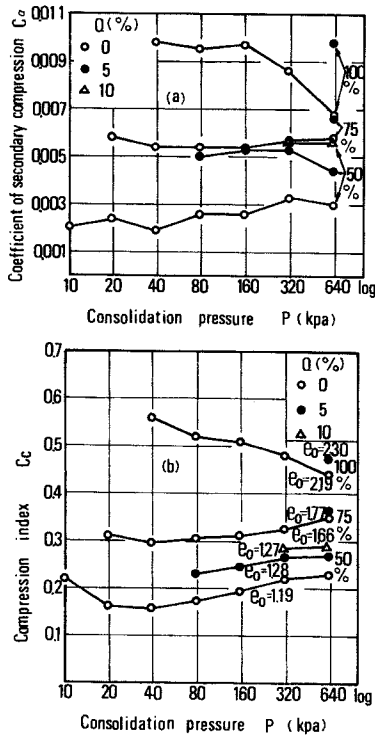


Fig. 3 Relationship between C_a , C_c and $\log P$.

間 ($\log t$) の長短の違いによるものではないといえる。

次に C_a と P の関係ならびに C_c と P の関係を示したものが Fig. 3 である。なお、 $e-\log t$ 曲線が直線として近似できなかったので、各圧密荷重段階での $e-\log P$ 曲線の勾配から $C_c = \Delta e / \Delta \log P$ を求めた。これらの図から、同一 P で比べたとき、 W_0 や Q が大きい試料ほど C_a が大きくなり、同時に C_c も大きくなることわかる。また P の大きさによって C_a が変化するが、その傾向は W_0 によって異なるようである。なお、図中の一部でデータが示されていないのは、その P では $e-\log t$ 曲線の後半部で直線が現われなかったためである。

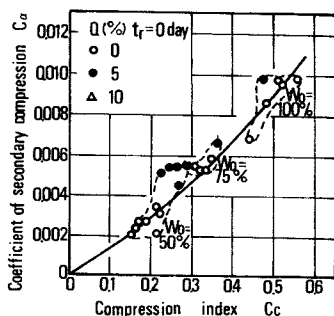


Fig. 4 Relationship between C_a and C_c .

Fig. 4 は C_a と C_c の関係を示したものである。 C_a/C_c 値は粘土の種類が同じであればその粘土について固有のものでされているが²⁾、図からも C_a/C_c 値は Q の影響を受けないことがわかる。また W_0 を変えたときの C_a と C_c の関係が直線にはならず、 W_0 が高い試料ほど C_a/C_c 値が大きくなった。

前述したように C_a と Q とは密接に関連しており、また Fig. 3 から明らかなように、 C_a と C_c とは相互に関連をもっているので、Fig. 1~2 に示すような現象の原因を究明することは二次圧密機構を知るうえで重要であるといえる。

Mesri らによると²⁾、二次圧密量と $\log t$ の関係が直線からずれる原因として、圧密リングの摩擦、濾紙の劣化、有機物含有量の変化などを挙げている。またこのような要因が存在しなくても直線の勾配が変化することを報告している。そこで次のような試験を行い、直線からずれる原因を調べた。

カオリンに加える Q によって、沈下量の違いが大きく現われる必要があるので、 W_0 を 100% にして事前圧密荷重 P_r が 10 kPa で 10 日圧密した。このときの $e-\log t$ 曲線を Fig. 5 に示す。すべての試料が圧密開始から 7 時間ほど経過すると沈下量が急激に増加し、その傾向は Q が増加するほど大きくなることわかる。

このような現象がすべての試料で、間隙水の移動を伴って生じているか否かを調べたものが Fig. 6 である。図中の縦軸は沈下量がすべて圧密脱水によるものとして計算した予測含水比 W_1 であり、横軸は試験終了後の実測含水比 W_2 である (含水比を測定した圧密時間は 3 日と 10 日である)。この図から、すべての試料で W_1 と W_2 はほぼ等しいとみなすことができる。したがって Fig. 5 に示す沈下量のほとんどすべてが圧密脱水によるものといえる。

(2) 走査型電子顕微鏡による観察

Fig. 5 に示すような現象の原因を調べるために、圧密前の試料と 10 kPa で 10 日圧密した試料のベッド径およびベッド内のマイクロポア個数 N_p を走査型電子顕微鏡で調べた (測定にあたっては倍率 5 000 倍の写真それぞれ 15 枚で観察した。 W_0 は 100% である)。

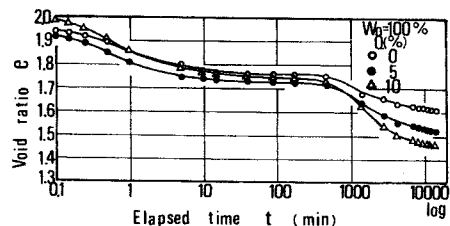


Fig. 5 $e-\log t$ curves of tested pressure = 10 kPa.

カオリンに加える Q を変えたとき、圧密前後のベッド径および N_p の状態を示したものが Photo 1 である。

Fig. 7 は Q べつにベッドの出現状況を示したものである (ベッド径は $2.5\mu\text{m}$ 間隔で測定、ベッドの長さは長軸を測定した)。カオリンに硫酸アルミニウムを加えると、 Q の増加とともにベッド径が均等化されつつ分

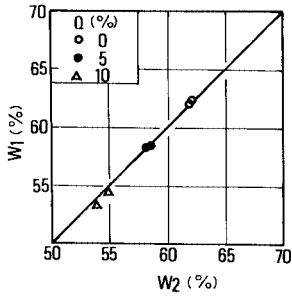
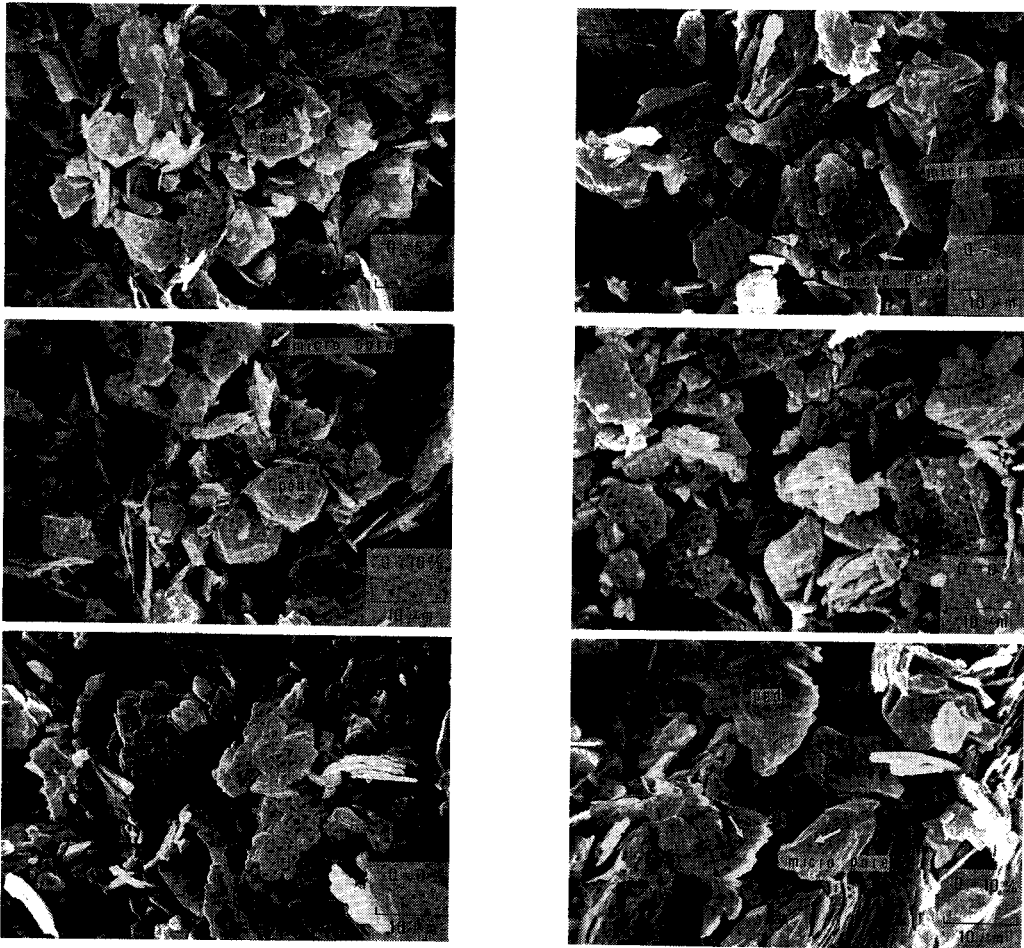


Fig. 6 Relationship between W_1 and W_2 .

布幅が拡大すること、すなわち平均ベッド径 P_{50} が増加してくることがわかる。ここで圧密前後の P_{50} を比べてみる。 Q が 0% のときは、ほとんど P_{50} の違いは認められないが、 Q が 10% に増加すると、圧密前に比べて圧密後の P_{50} が小さくなった。同図からは圧密することによって、各ベッドがどのような大きさのベッド径に変化していくかは明らかではないが、すべての試料でベッド径 $5\sim 7.5\mu\text{m}$ の大きさのベッドが増加してくるようである。

このように圧密することによって P_{50} が小さくなるが、その傾向は Q が増加するほど、すなわち P_{50} が大きい試料ほど大きくなった。

Fig. 8 はベッド径とベッド内の N_p の関係を示したものである。図中の N_1 は測定したマイクロポア個数である。Matsuo・Kamon によって¹²⁾、ベッドとポアの対応関係が分類されており、それによるとマイクロポア径は $0.01\sim 1\mu\text{m}$ の範囲とされている。しかし、カオリンに硫酸



(a) Before consolidation

(b) After consolidation

Photo 1 Scanning electron micrograph.

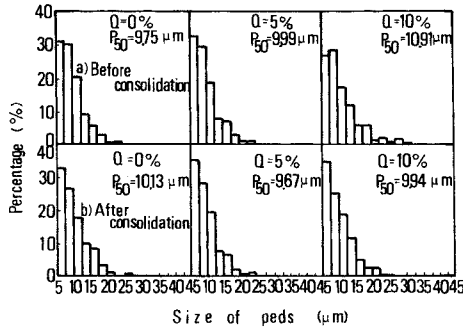


Fig. 7 Distribution of peds before and after consolidation.

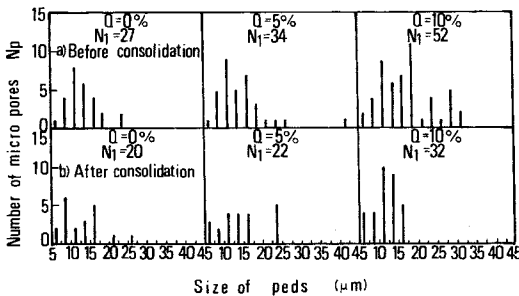


Fig. 8 Number distribution of micro-pore size = 1~2.5 μm before and after consolidation.

アルミニウムを加えた試料では、1 μm より大きなマイクロポアが存在するようである。このとき、1 μm より大きなマイクロポア径のほとんどが1~1.5 μm の範囲にあった。N_p の測定にあたっては、ベッド径を測定した写真を用いて観察したが、写真上で明瞭にマイクロポアと判別する必要があるので、1 μm 以下は省略し1~2.5 μm の範囲の N_p を Q べつに測定した。この図から、圧密前では Q の増加とともに N_p が増加してくることがわかる。また圧密前の N_p に比べて、圧密後の N_p がすべての試料で減少しており、かつ Q が多い試料ほど N_p が減少する割合が大きくなった。

このような実験結果 (Fig. 6~8) から、Fig. 5 に示す現象は次のように説明できると思われる。

カオリンに硫酸アルミニウムを加えたとき、その量が多い試料ほど平均ベッド径 P₅₀ が大きくなる。この場合、P₅₀ が大きい試料ほど N_p (マイクロポア径 1~2.5 μm の範囲) も増大する。このような試料を用いて圧密試験を行ったとき、圧密初期にはベッド粒子間のマクロポアからの脱水によって沈下量が急激に増加する (一次圧密過程)⁶⁾。その後 e-log t 曲線がなだらかな曲線を示す。そして圧密開始から約 7 時間ほど経過すると、ベッド内のマイクロポアの圧縮によって沈下量が急激に増加する。したがって、N_p が多い試料ほど沈下量が大きくなる。

標準圧密試験を行ったとき、P₅₀ が大きい試料ほど C_a が大きくなることを (1) 節で述べたが、これは P₅₀ が大きい試料ほど N_p が増大するので、二次圧密領域での潜在的なクリープ変形量が大きくなるためと思われる。

以上、W₀ が同じで Q が変化したときについて検討したが、Q が同じで W₀ が変化したときにも同様の現象が生じた。以前に W₀ が高い試料ほどベッド粒子間に存在する径の大きなポアが多く占めるようになり、平均間隙径 R₅₀ が大きくなることを報告した⁸⁾。このことから、W₀ によって e-log t 曲線の後半部で沈下量が異なる現象は、試料のポア分布の違いによるものと思われる。

(3) 事前圧密時間 t_r の影響

Fig. 5 から明らかのように、t_r が二次圧密に影響を及ぼすことが予想される。そこで各試料とも事前圧密荷重 P_r が 10 kPa で 10 日、20 日および 40 日圧密し、その後順次 20~1280 kPa の荷重をかけ標準圧密試験を行った。そして C_a と P の関係に及ぼす t_r の影響、ならびに C_a/C_c 値が t_r の影響を受けるか否かを調べた。W₀ は 50%、75% および 100% の三種類である。

Fig. 9 は t_r が 10 日ときの C_a と P の関係を W₀ べつに示したものである。練返し粘土の C_a が P とともに大きくなるという報告があるが³⁾、W₀ が 50% のときの C_a と P の関係が同様の結果を示した。また Q が多い試料ほど C_a が大きくなるのがわかる。しかし、Fig. 3 (a) に比べて、事前圧密することによって Q の影響が小さくなるようである。t_r が 0 日に比べて、t_r が 10 日になると小さな圧密荷重で e-log t 曲線の後半部で直線を示したことから、t_r が 10 日程度でも二次圧密の影響が現われてくるといえる。W₀ が 75% での C_a と P の関係は、W₀ が 50% のときと異なり、P が変化しても C_a がほぼ一定の値を示した。また W₀ が 100% になると C_a が P とともにしだいに減少した。

次に e-log P 曲線を W₀ べつに示したものが Fig. 10

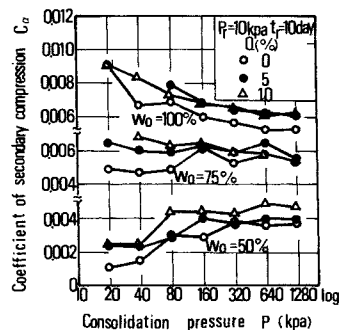


Fig. 9 Relationship between C_a and log P (P_r = 10 kPa, t_r = 10 day).

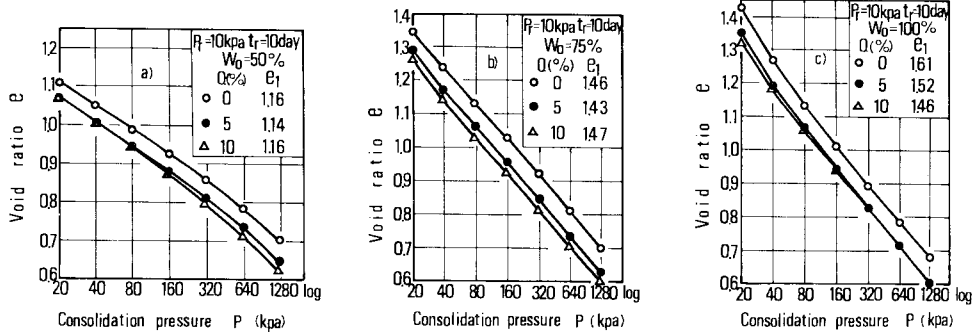


Fig. 10 e - $\log P$ curves ($P_r=10$ kPa, $t_r=10$ day)

である。図中の e_1 は 10 kPa で 10 日圧密した後の間隙比である。 W_0 が 50 % では直線を示さず、上に凸となるような曲線を示した。したがって、 C_c は圧密荷重段階によって異なり、 P とともに大きくなる。また Q が多い試料ほど C_c が大きくなるのがわかる。 W_0 が 75 % では直線となり、 C_c がほぼ一定の値を示した。さらに W_0 が 100 % になると下に凸となるような曲線となり、 P とともに C_c が小さくなった。

このように P とともに C_a が増加する場合、ほぼ一定となる場合、あるいは減少する場合など W_0 の違いによって C_a が変化するが、 C_a と P の関係と C_a と P の関係とは密接な関係をもっていることがわかる。

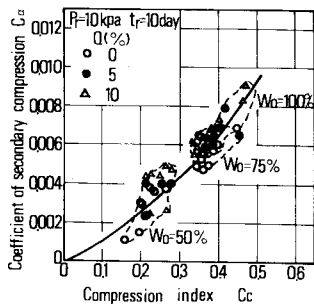


Fig. 11 Relationship between C_a and C_c ($P_r=10$ kPa, $t_r=10$ day)

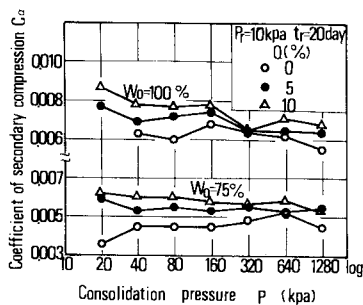


Fig. 12 Relationship between C_a and $\log P$ ($P_r=10$ kPa, $t_r=20$ day)

Fig. 11 は C_a と C_c の関係を示したものである。 C_a/C_c 値は事前圧密しないとき (Fig. 4) とほぼ同じ値を示した。このことから、 C_a/C_c 値は t_r の影響を受けないといえる。また W_0 が高くなると C_a/C_c 値が大きくなるのが明らかである。

Fig. 12, Fig. 13 は t_r が 20 日のときの C_a と P の関係、ならびに C_a と C_c の関係を示したものである。Fig. 12 から、 W_0 が 75 % については t_r が 10 日とほぼ同じ C_a と P の関係を示したが、 W_0 が 100 % では P とともに C_a の減少する割合が小さくなった。また C_a/C_c 値が t_r の影響を受けないことがわかる。 t_r が 40 日では、 t_r が 20 日と比べて差異が認められなかった。

このように、 C_a と P の関係は W_0 および t_r によって変化することが明らかとなった。特に W_0 が C_a と P の関係に大きな影響を及ぼすが、 t_r が 10 日から 40 日に増加しても C_a と P の関係がそれほど変化しないので、 W_0 に比べて t_r の影響が小さいものといえる。 t_r の増加とともに C_a と P の関係が変化する状態を W_0 べつにまとめたものが Fig. 14 である。練返し粘土では、 C_a が P とともに減少する場合 (A 型)、ほぼ一定となる場合 (B 型) および増加する場合 (C 型) の 3 つの傾向を示す。 W_0 が 75 % および 100 % では、 t_r が増加すると A 型から B 型へと変化する。しかし、 W_0 が 50

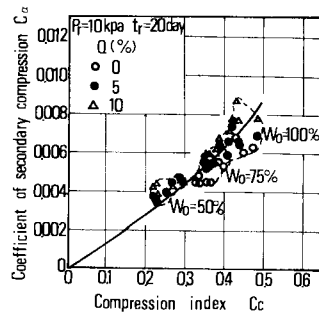


Fig. 13 Relationship between C_a and C_c ($P_r=10$ kPa, $t_r=20$ day)

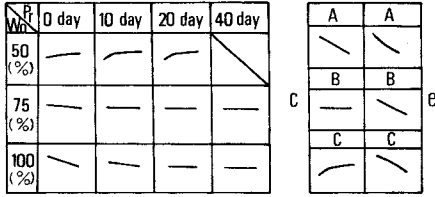


Fig. 14 Relationship between C_a - $\log P$ curves and e - $\log P$ curves.

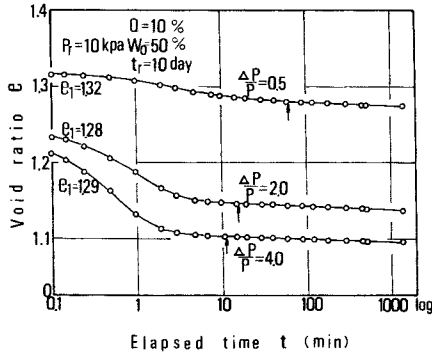


Fig. 15 Effect of load-increment rate on shape of e - $\log t$ curves ($W_0 = 50\%$, $Q = 10\%$, $P_r = 10$ kPa, $t_r = 10$ day).

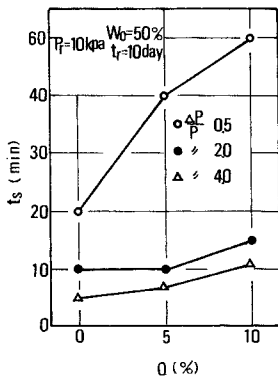


Fig. 16 Relationship between t_s and Q ($W_0 = 50\%$, $P_r = 10$ kPa, $t_r = 10$ day).

%では、A、B型を示さずC型となった。このように C_a の分布特性は試料の W_0 によって変化する。同時に試料の種類、あるいは W_0 が異なっても e - $\log P$ 曲線と C_a の分布特性とは明らかに相関を有しているといえる。

(4) 荷重増加率 $\Delta P/P$ の影響

$\Delta P/P$ が圧密沈下曲線の形状に影響を及ぼすことが Newland によって報告されている¹³⁾。一方、 C_a は荷重増加 ΔP や $\Delta P/P$ に無関係であり、初期間隙比 e_0 のみの関数であることを Wahls¹⁴⁾、Leonard¹⁵⁾、によって

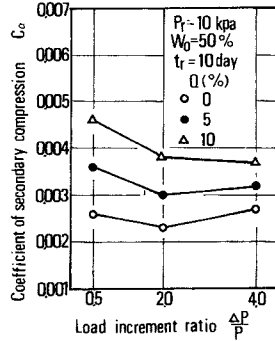


Fig. 17 Relationship between C_a and $\Delta P/P$ ($W_0 = 50\%$, $P_r = 10$ kPa, $t_r = 10$ day).

報告されている。このように ΔP や $\Delta P/P$ の影響について、研究者によって異なったデータが示されておりまだ定説がないようである。

カオリンに硫酸アルミニウムを加えて試料のベッド径を変えたとき、圧密沈下曲線や C_a に及ぼす $\Delta P/P$ の影響について調べた。 P_r が 10 kPa および 40 kPa で 10 日圧密し、その後 $\Delta P/P$ が 0.5, 2.0, 4.0 になるように荷重をかけた。 W_0 は 50% である。

P_r が 10 kPa で Q が 10% のときの e - $\log t$ 曲線を Fig. 15 に示す。図中の ↑印は e - $\log t$ 曲線が直線を示すまでの経過時間 t_s である。この図から、 $\Delta P/P$ が 0.5 のときの t_s が $\Delta P/P$ が 2.0 および 4.0 に比べて非常に大きくなるのがわかる。

t_s と Q の関係を $\Delta P/P$ べつに示したものが Fig. 16 であり、 C_a と $\Delta P/P$ の関係を Q べつに示したものが Fig. 17 である。Fig. 16 から、 t_s は Q が増加するほど大きくなるが、特に $\Delta P/P$ が 0.5 のときこの傾向が著しくなった。またすべての試料において、 $\Delta P/P$ が小さくなると t_s が大きくなった。

Fig. 17 から、 $\Delta P/P$ が 2.0 のときの C_a が 0.5 に比べてやや小さくなったが、 $\Delta P/P$ が 0.5 から 4.0 に増加しても C_a の変化はほぼ一定とみなすことができる。また $\Delta P/P$ が同じであれば、 Q が多い試料ほど C_a が大きくなるのがわかる。

次に P_r が 40 kPa で Q が 10% のときの e - $\log t$ 曲線を Fig. 18 に示す。 P_r が 10 kPa に比べて、 P_r が 40 kPa になると t_s が小さくなるようである。

Fig. 16~17 と同じ内容を、 P_r が 40 kPa について示したものが Fig. 19~20 である。Fig. 19 から明らかなように、 P_r が 40 kPa になると Q および $\Delta P/P$ が増加しても t_s の違いが小さくなった。また Fig. 20 から、 C_a が $\Delta P/P$ に影響されないことがわかる。

このように圧密沈下曲線や C_a に及ぼす $\Delta P/P$ の影響は、試料の違いや P_r の大きさによって異なる。すな

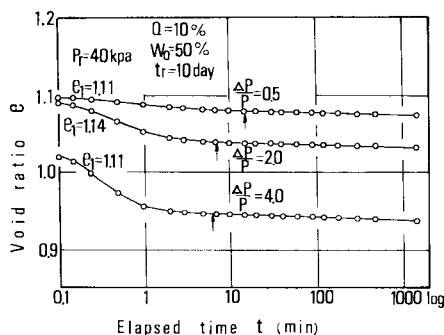


Fig. 18 Effect of load-increment rate on shape of e - $\log t$ curves ($W_0 = 50\%$, $Q = 10\%$, $P_r = 40$ kPa, $t_r = 10$ day).

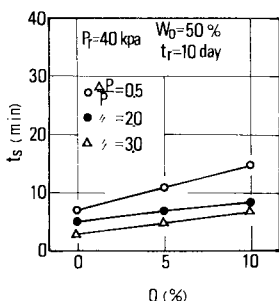


Fig. 19 Relationship between t_s and Q ($W_0 = 50\%$, $P_r = 40$ kPa, $t_r = 10$ day).

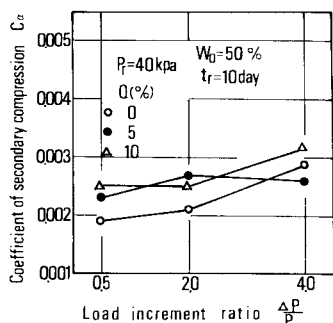


Fig. 20 Relationship between C_a and $\Delta P/P$ ($W_0 = 50\%$, $P_r = 40$ kPa, $t_r = 10$ day).

わち、 Q や P_r が異なっても C_a は $\Delta P/P$ の影響を受けないが、 t_s については Q が多い試料ほど $\Delta P/P$ の影響を受ける。また P_r が大きくなると t_s に及ぼす $\Delta P/P$ や Q の影響が小さくなることが明らかとなった。

4. まとめ

カオリンに硫酸アルミニウムを加えて、人工的に構造を変化させ、そのときの初期構造と二次圧密特性の関連

を調べる目的で実験を行った。得られたおもな結果は次のようなものである。

(1) カオリン粘土の二次圧密係数 C_a は、初期含水比 W_0 が高い試料ほど大きくなる。また加える硫酸アルミニウム量 Q が多い試料ほど、すなわち平均ベッド径 P_{s0} が大きい試料ほど C_a が大きくなった。これは P_{s0} が大きい試料ほどマイクロポア個数 N_p が増大し、二次圧密領域でマイクロポアの圧縮による体積減少が大きくなるためと思われる。

(2) 練返し粘土の C_a と圧密荷重 P の関係は、 W_0 によって異なった形状を示す。すなわち P が大きくなると C_a がしだいに減少する型、ほぼ一定となる型および漸増する型の3つの傾向を示した。また C_a と P の関係は、 C_c と P の関係と密接な相関を有しているといえる。

(3) W_0 が50%のときの C_a と P の関係は、事前圧密時間 t_r の影響を受けない。また t_r が40日程度では、 W_0 が75%および100%の高含水比の試料でも C_a と P の関係に及ぼす t_r の影響は小さいものといえる。

(4) C_a/C_c 値は Q が異なってもほぼ同じ値を示すが、 W_0 が高くなるとしだいに C_a/C_c 値が大きくなる。また t_r が40日程度では、 C_a/C_c 値は t_r の影響を受けない。

(5) カオリン粘土においては、 C_a よりも e - $\log t$ 曲線が直線を示すまでの経過時間 t_s が荷重増加率 $\Delta P/P$ や Q の影響を受ける。 Q が多い試料ほど、すなわち P_{s0} が大きい試料ほど t_s が大きくなり、かつ $\Delta P/P$ が小さくなるとこの傾向が著しくなる。しかし、事前圧密荷重 P_r が大きくなると t_s に及ぼす $\Delta P/P$ や Q の影響が小さくなった。

謝 辞：本論文をまとめるにあたり、京都大学工学部 嘉門雅史助教授に有益なご助言をいただいた。ここに厚く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Ladd, C. C. et al. : Stress, deformation and strength characteristics, state-of-the-Art Report, Proc. 9th ICSMFE, Vol. 2, pp. 421~494, 1977.
- 2) Mesri, G. et al. : Time and stress-compressibility inter-relationship, Proc. ASCE, Vol. 103, No. GT 5, pp. 417~430, 1977.
- 3) Mesri, G. : Coefficient of secondary compression, Proc. ASCE, Vol. 99, No. SM 1, pp. 123~137, 1973.
- 4) 赤井浩一・足立紀尚：有効応力よりみた飽和粘土の一次元圧密と強度特性に関する研究，土木学会論文報告集，No. 113, pp. 11~27, 1965.
- 5) 稲田倍徳・赤石 勝：ダイレイタンスーを考慮した一次

- 元圧密解析，土質工学会論文報告集，Vol.20，No.2，1980.
- 6) Yong, R.N. et al. : Fabric unit interaction and soil behaviour, Int. symp. soil structure, pp.179~183, 1973.
- 7) 山田洋右：粘土のチクソトロピーに関する研究，粘土科学，Vol.22，pp.68~74，1982.
- 8) Lambe, T.W. : The structure of compacted clay, Proc. ASCE, SM 2, pp.1~34, 1958.
- 9) 山田洋右：粘土の工学的性質に及ぼす初期構造の影響，土質工学会論文報告集，Vol.24，No.1，pp.183~191，1984.
- 10) 石橋多聞：凝集機構の新理論，水道協会雑誌，第409号，pp.2~12，1968.
- 11) 石橋多聞：電子顕微鏡による凝集機構の解明，水道協会雑誌，第513号，pp.12~22，1977.
- 12) Matsuo, S. and Kamon, M. : Microscopic study on deformation and strength of clay, 9th ICSMFE, Vol.1, pp.201~204, 1977.
- 13) Newland, P.L. et al. : A study of the consolidation characteristics of a clay, Geotech, Vol.10, pp.62~74, 1960.
- 14) Wahls, H.E. : Analysis of primary and secondary consolidation, Proc. ASCE, Vol.88, No. SM-6, pp.207~231, 1962.
- 15) Leonard, G.A. et al. : Compressibility of Clay, Proc. ASCE, Vol.90, No. SM-5, pp.133~155, 1964.

(1985.12.12・受付)
