

過圧密粘土の圧密特性

Consolidation Properties of Overconsolidated Clay

山 田 洋 右*

1. ま え が き

自然地盤から試料を採取し粘土の圧密試験を行うと、圧密降伏応力までは弾性的挙動が卓越し、その圧力を越えると圧縮量が急増する。過圧密粘土とは、掘削や地下水変動などの応力履歴を受けた弾性的圧縮挙動が卓越する応力状態にある粘土を意味する。これに対し、正規圧密粘土が長時間圧密を受けることによって、その期間中に生じた粒子間結合力の増加により、みかけ上過圧密粘土の性状を示すことがある。

Bjerrum (ベラム) は¹⁾、間隙水圧の消散過程で決まる一次圧密と二次圧密という従来の考え方に変わって、載荷直後に生じる瞬時圧縮と有効応力一定のもとで生じる遅延圧密の概念を示した(図-1)。これによると有効応力一定のもとで遅延圧密された試料を圧縮すると、太線のようにたどってC点に至り(図-1でB→C→D)、みかけ上過圧密挙動を示すというものである。繰り返した試料でも、圧密の途中で長時間荷重を継続すると、みかけ上過圧密粘土になることが Leonards (レオナルド) らによって報告されている²⁾。

正規圧密粘土が遅延圧密を受けることにより、みかけ上過圧密挙動を示すが、その過圧密挙動、すなわち圧密降伏応力の増加は粘土の種類によって異なるものと考えられる。また正規圧密粘土が過圧密挙動を示すか否かは、その粘土の構造と密接に関係していると考えられる。

ところで、自然地盤の粘土粒子はもちろんのこと、繰り返した粘土でも粒子同志がベッド(集合体)を形成している場合が多い³⁾。ベッドとは、van der Waals (バン・デル・ワールス) 力やクーロン力などの凝集力による粘土粒子の集合体を意味する。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⁴⁾、ベッドの構造はこの定義の範囲にあるものである。

今回、初期構造が異なった試料を用いて、圧密荷重0.05～0.2 kgf/cm²まで圧密し、その後0.4 kgf/cm²で圧密時間 t_c (1時間、1日、10日、 t_c は遅延圧密時間である)を変えて膨張・再圧密試験を行った。そして粘土の種類(粘土の構造)と遅延圧密による圧密降伏応力の増加との関係について調べた。その結果 t_c が10日になると、硫酸アルミニウム添加量 $Q=5\%$ および 10% のようなクリープ沈下量が大きい試料では、Bjerrumの遅延圧密現象がみられる

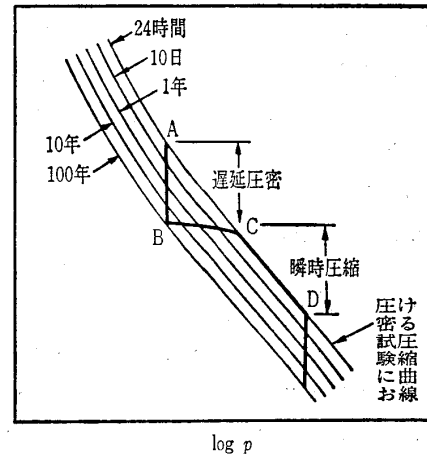


図-1 Bjerrumの遅延圧密概念

ことが明らかとなった。

2. 試料および実験方法

2.1 試料

使用した粘土は、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3段階の質量割合でカオリンと混合した。

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^- イオンと化学反応をおこし、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⁵⁾。したがって粘土粒子の表面に多量の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っって中間に正荷電のアルミニウム粒子を挟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⁶⁾。

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)に基づいて添加量を決定する必要がある。粘土のCECは3.9 meq/100gであったことから、粘土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100gに対して最大0.44gである。

本報告では、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、化学的な反応による凝集を取り扱い検討した。

*北見工業大学助手 工学部土木工学科

表-1 試料の物理的性質

	硫酸アルミニウム量 (%)		
	0	5	10
比 重	2.72	2.84	2.96
液性限界 (%)	52.7	47.5	43.5
塑性限界 (%)	24.0	19.6	16.7

粘土に加える水の温度は約18℃であった。この温度のときの硫酸アルミニウム（無水酸）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表-1に示す。

2.2 実験方法

(1) 電子顕微鏡観察

顕微鏡観察に用いた試料は、初期含水比 w_0 が100%で練り返した試料である。この試料をD-dry法で乾燥させた。D-dry法：練返し粘土をデシケーターに入れ、ジュワーびんにドライアイスと砕いてエチルアルコールとともに満たす。真空ポンプ始動後直ちに試料の水分をトラップに停留、凍結する。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 Q の値ごとにベッドおよびマイクロポア個数を測定した。なお、ベッドのまわりの間隙についてはポアを、ベッド内の間隙についてはマイクロポアとしている。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。本実験で使用した試料のベッド、マクロポアおよびマイクロポアの状態を写真-1に示した。

(2) 圧密試験

練り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沈下量を測定した後、まず標準圧密試験方法によって圧密荷重0.05~0.2 kgf/cm²まで圧密した。その後圧密荷重 $p_0=0.4$ kgf/cm²で1時間、1日および10日圧密し時間効果の影響を調べた。粘土の過圧密状態は過圧密比(OCR)が4および8になるように段階的に膨張させた。膨張、再圧密の各段階の時間は24時間である。なお、供試体作成時の w_0 は(水の質量)/(カオリンの質量+硫酸アルミニウムの質量)÷50%とした。全供試体の飽和度の平均値は97.5%、その範囲は95.6~100%であった。

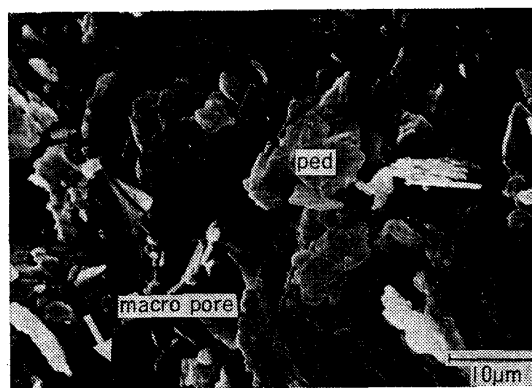
なお、圧密試験においては、摩擦を低減させるためにあらかじめ圧密リングにシリコングリースを薄く塗布して試験を行った。試験温度は水浸箱の水温を調節したが試験中を通して約17±3℃であった。

3. 実験結果および考察

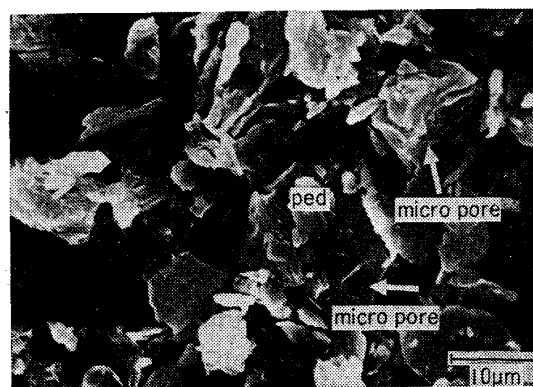
3.1 顕微鏡観察

図-2は、ベッド径およびベッド内のマイクロポア個数 N_p を Q べつに測定した結果である。なお、図-2(1)の縦軸は各ベッド径に対応するベッド個数と全ベッド個数との

$Q=0\%$



$Q=5\%$



$Q=10\%$

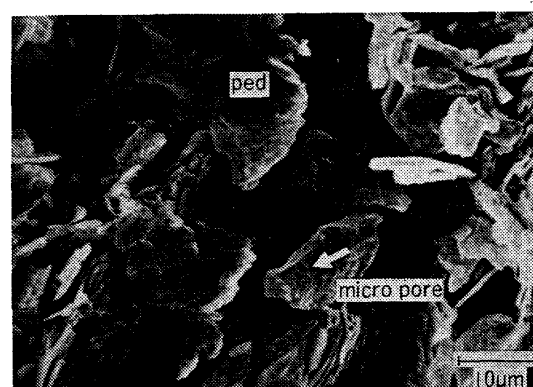


写真-1 ベッド、マクロポアおよびマイクロポアの顕微鏡写真 ($Q=0\%, 5\%, 10\%$, 倍率5000倍)

割合である。平均ベッド径 P_{50} は(ベッド径×ベッド個数の総計)/(全ベッド個数)から求めた。(ベッド径は2.5 μm 間隔で測定。 N_p はベッド径の大きさにかかわらず、ベッド内に存在する1~2.5 μm 径のマイクロポアを測定した個数である。また N_1 は測定した全マイクロポア個数である)。図-2から、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布幅が拡大すること、すなわち P_{50} が増加し、同時に N_p も増加することが分かる。なお、 Q が多い試料ほど圧縮指数 C_c が大きく、また二次圧密係数も大きくなることが既に明らかになっている⁷⁾。

3.2 圧密係数、体積圧縮係数

体積圧縮係数 m_v と圧密荷重 p を両対数紙にプロットし

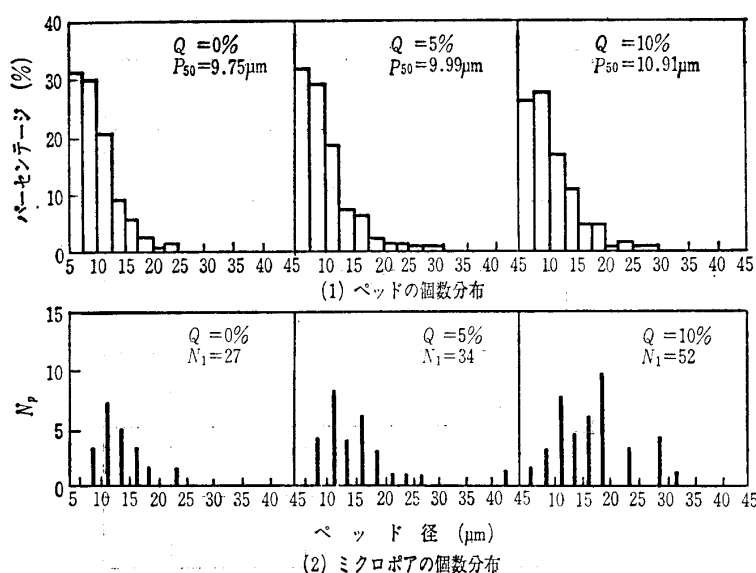


図-2 ベッドおよびマイクロポアの個数分布

た場合、正規圧密の領域では p とともに m_v が直線的に減少する。

図-3は t_r が1時間、1日および10日で $\text{OCR}=8$ のときの c_v と p の関係を示したものである。 t_r が1時間および1日の場合、過圧密粘土では c_v は p が 0.8 kgf/cm^2 より小さい間は p が増加するに従い減少し、 0.8 kgf/cm^2 以上では増加した。しかし、 t_r が10日の場合では、 p が 0.4 kgf/cm^2 以上で c_v は必ずしも増加しないようである。このことから、膨張前の圧密時間によって過圧密粘土の c_v 値が正規圧密粘土の値に移行する状況は異なってくると言える。

図-4は m_v と p の関係を示したものである。 m_v と p の関係は c_v と p の関係と異なり、すべての t_r で m_v は p が 0.8 kgf/cm^2 より小さい間は、 p が増加するに従い増加し、 0.8 kgf/cm^2 以上では直線的に減少した。図から m_v は圧密荷重 p_0 の2倍の大きさに正規圧密状態に移行すると言え。なお、 $\text{OCR}=4$ についても $\text{OCR}=8$ と同じ結果となった。

3.3 e -log p 曲線

図-5は t_r が1日で $\text{OCR}=8$ のときの e -log p 曲線を示

したものである。この場合では、すべての試料が応力解放による膨張を示すことから通常の過圧密粘土であることが分かる。これに対して t_r が10日の場合の e -log p 曲線を図-6示す。 $Q=0\%$ では t_r が1日と同様に膨張現象を示したが、 $Q=5\%$ および 10% では膨張指数 C_e がほぼ0になった。通常の過圧密粘土と長時間効果を受けた過圧密粘土とでは C_e の大きさが異なるとされている⁸⁾。しかし、図-6から明らかなように、 $Q=0\%$ が $Q=5\%$ および 10% と同じ時間効果を受けたにもかかわらず、通常の過圧密粘土と同様の現象を示した。また、 $Q=5\%$ および 10% では圧縮曲線が処女圧縮曲線上にのってくるが、 $Q=0\%$ では処女圧縮曲線上にのらず、その下側にずれることが分かる。このように試料の種類(粘土の構造)によって遅延圧密後の圧縮曲線が異なってくるようである。

Bjerrumは遅延圧密による過圧密挙動を次のように説明している¹⁾。遅延圧密中の含水比の減少は粘土構造を安定させる。そして粒子間の接触数の増加は強度の増加をもたらす、さらなる圧縮に対して抵抗力を増大させる。

本実験で用いた試料の遅延圧密については次のように説明できると考えられる。載荷荷重が除去されたとき、粘土は膨張を生じて含水比を増すが、この際粒子間に結合力をもつ粘土と、結合力をもたない粘土とによって膨張曲線に相違が現れる。 $Q=5\%$ および 10% のような試料では、粒子間の結合力が強く膨張ひずみを拘束するため膨張指数 C_e がほぼ0になる。この結合力のためさらなる圧縮に対して抵抗力が強くなり、みかけ上過圧密挙動を示すと考えられる。これに対して、 $Q=0\%$ のような試料では粒子間の結合力が弱く、時間効果を受けても通常の過圧密粘土と同様の現象を示す。

ところで、 $Q=5\%$ および 10% では $Q=0\%$ に比べてベッド径が大きくなるので、ベッド間の接触数が減少すると思われる。しかし、上述したように $Q=5\%$ および 10% では粒子間の結合力が強くなることから、粘土はベッド同志を細かいベッドが連結した、いわゆるリンク構造によって形成されていると考えられる。

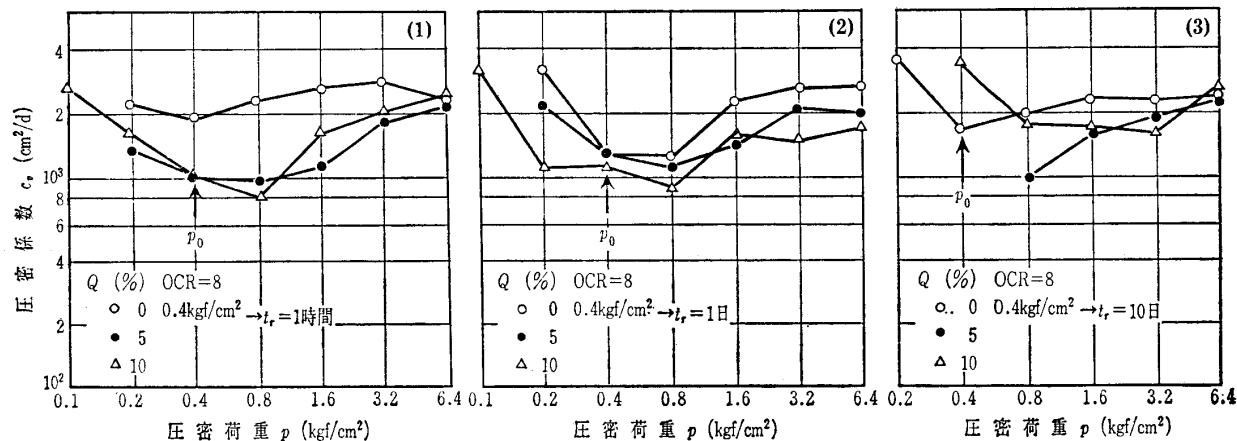


図-3 圧密係数と圧密荷重の関係

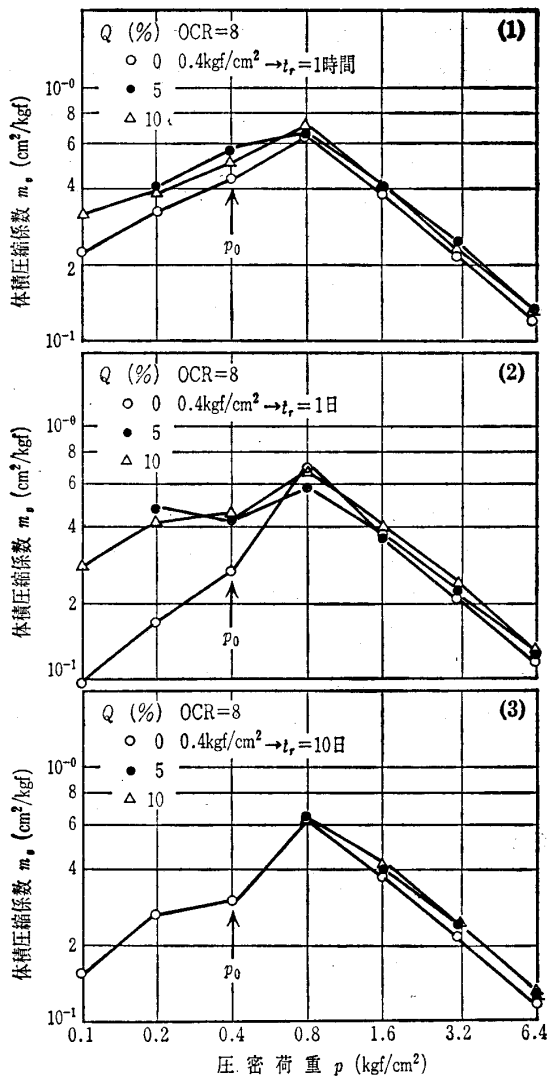


図-4 体積圧縮係数と圧密荷重の関係

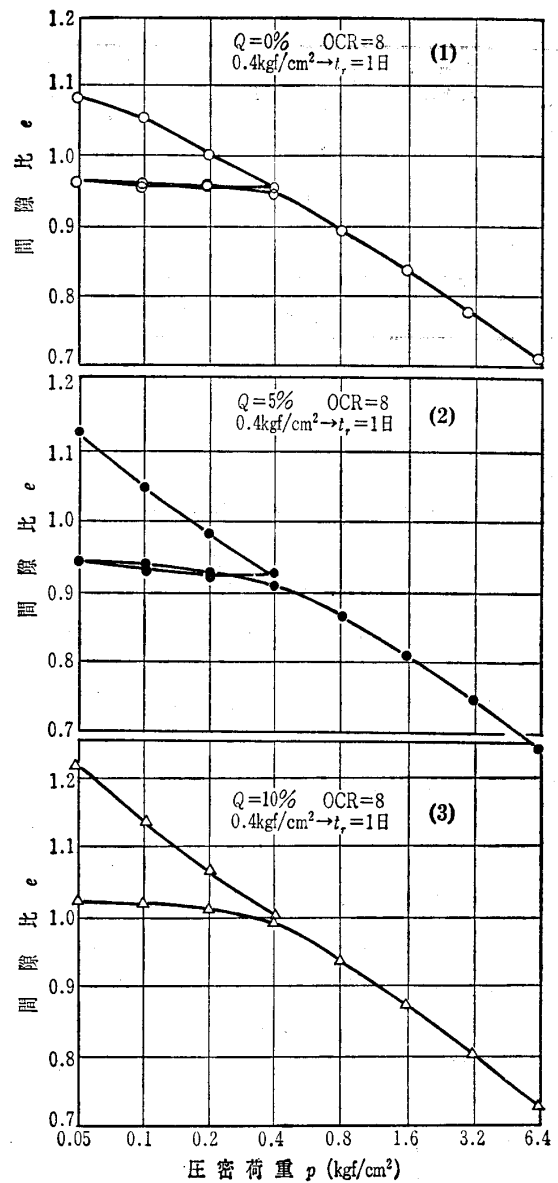
粘土が実際にリンク構造を形成しているかどうかを電子顕微鏡で調べたのが写真-2である ($w_0=50\%$, $Q=5\%$, 倍率 10 000 倍)。なお、観察に用いた試料は圧密前のものである。写真から、細かいペッドがペッド同志を連結している状態がよく分かる。 $Q=5\%$ および 10% のような試料では、このリンクの結合が強くなると考えられる。

3.4 二次圧密係数

実際の圧密試験においては、過剰間隙水圧がほぼ消散した後にも沈下が継続するが、このクリープ的沈下は時間の対数に比例して生ずる。このようなクリープ的沈下の進行を示す定数として直線の勾配を $\Delta e / \Delta \log t (=c_\alpha)$ 、あるいは $\Delta \varepsilon / \Delta \log t (=s_\alpha)$ で表し、これを二次圧密係数と呼んでいる。

図-7 は正規圧密粘土の c_α と p の関係を示したものである。この場合では、 p とともに c_α がわずかに増加するかあるいはほぼ一定となること、また Q が多い試料ほど c_α が大きくなること分かる。

図-8 は t_r が 1 日および 10 日で $OCR=8$ のときの c_α と p の関係を示したものである。過圧密粘土の c_α が正規圧密粘土に比べて小さくなるとされているが、図からもその

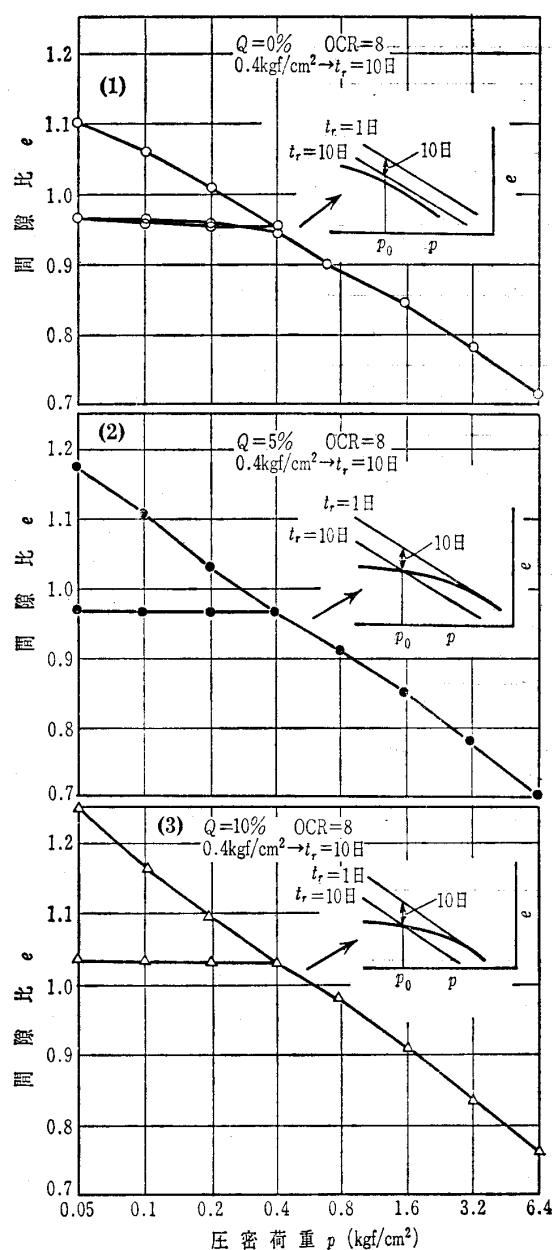
図-5 $e-\log p$ 曲線 ($0.4 \text{ kgf/cm}^2 \rightarrow t_r=1 \text{ 日}$)

ことが言える。 $Q=5\%$ および 10% の c_α が圧密荷重 p_0 を境にして $0.8 \sim 1.6 \text{ kgf/cm}^2$ まで急増し、その後はほぼ一定となった。しかし、 p_0 以後における $Q=0\%$ の c_α の増加勾配が $Q=5\%$ および 10% に比べて緩くなり、また c_α も小さくなること分かる。

図-9 は、 $OCR=4$ について示したものであるが、この場合も $OCR=8$ と同じ結果となった。

安川・嘉門は⁹⁾、 $e-\log p$ 曲線と $c_\alpha-\log p$ 曲線の相関性を調べ、粘土の構造や塑性の違いなどによって $c_\alpha-\log p$ 曲線が異なることを報告している。それによると構造の発達した乱さない高塑性粘土ではピークが現れること、またある程度構造が発達した乱さない低塑性粘土では、 $Q=5\%$ および 10% のような $c_\alpha-\log p$ 曲線になることを示している。このことから、 $Q=5\%$ および 10% のような練り返した粘土であっても、圧密されることによってある程度構造が発達し、乱さない試料と同じ挙動を示すものと考えられる。

図-7 と図-8 で p_0 以下の c_α を比べて分かるように、正規圧密粘土の c_α が過圧密粘土に比べて大きくなり、か

図-6 e - $\log p$ 曲線 ($0.4 \text{ kgf/cm}^2 \rightarrow t_r=10 \text{ 日}$)

つ正規圧密粘土では Q が多い試料ほど c_a が大きくなった。正規圧密粘土の c_a が Q が多い試料ほど大きくなるのは、ミクロポアの圧縮による体積減少が大きくなるためであることを以前に報告した⁷⁾。

応力解放による膨張、その後の再圧密過程では、構造の変化はほとんど生じないとされている。一方、一次圧密では圧縮変形量が大きくなるために粒子配向が生じ、3.3で述べたようにリンク構造が形成されると考えられる。載荷荷重が p_0 より大きくなると、リンク構造が破壊されるために変形量が大きくなる。この変形が二次圧密領域でも継続されるため、 $Q=5\%$ および 10% の c_a が p_0 を境に急増すると考えられる。 t_r が1日と10日の c_a - p 曲線から分かるように、 t_r が10日に増加しても c_a - p 曲線の形はほとんど変化しないようである。

t_r が1日で $\text{OCR}=8$ のときの膨張曲線を示したものが図-10である。図から、 $Q=0\%$ における膨張量が $Q=5\%$

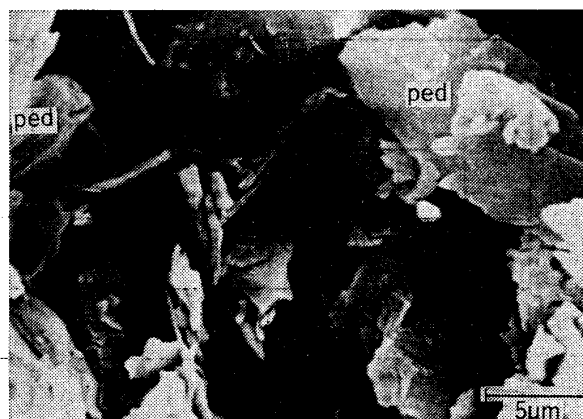
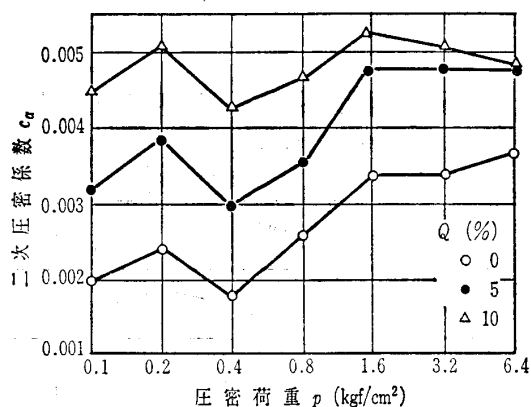
写真-2 リンク構造の顕微鏡写真 ($Q=5\%$, 倍率10 000 倍)

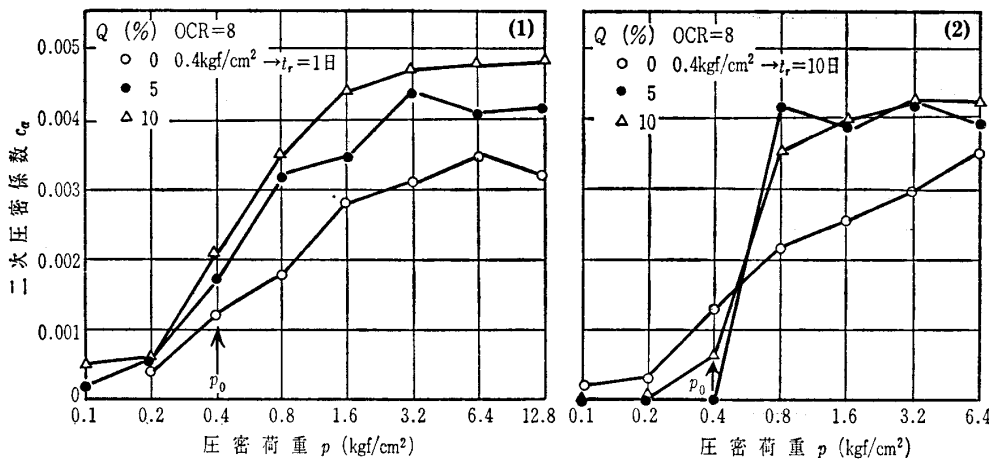
図-7 二次圧密係数と圧密荷重の関係 (正規圧密粘土)

および 10% に比べて常に小さくなる事が分かる。しかし、 $Q=5\%$ と $Q=10\%$ の膨張量との間には一定の関係が認められなかった。このような膨張の傾向が図-8(1)に示す c_a - $\log p$ 曲線と同じ傾向で現れないことが分かる。また $Q=0\%$ の膨張量が常に $Q=5\%$ および $Q=10\%$ に比べて小さくなることから、本実験で用いた試料の膨張は、一次圧密で生じたリンク構造に対する弾性的な回復とベッドの膨潤の時間的遅れに基づくものと考えられる。

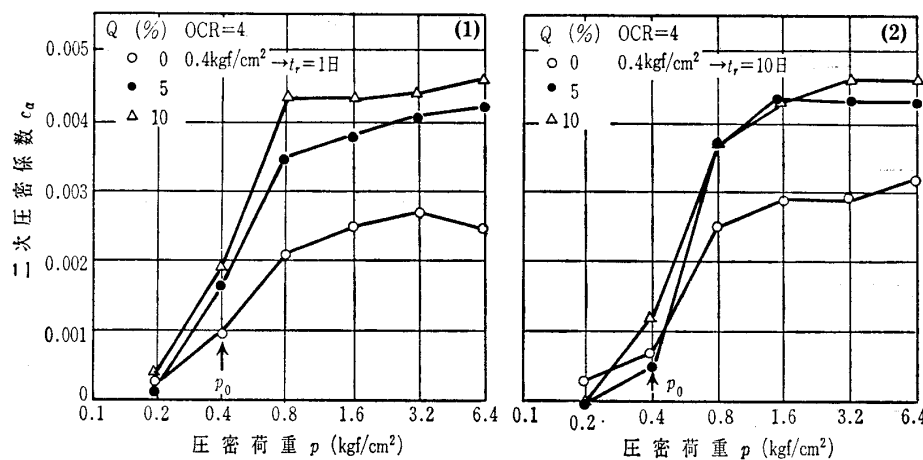
4. ま と め

粘土の初期構造が異なった試料を用いて、おもに粘土の種類(粘土の構造)と遅延圧密による圧密降伏応力の増加との関係について調べた。得られた結果は次のようなものである。

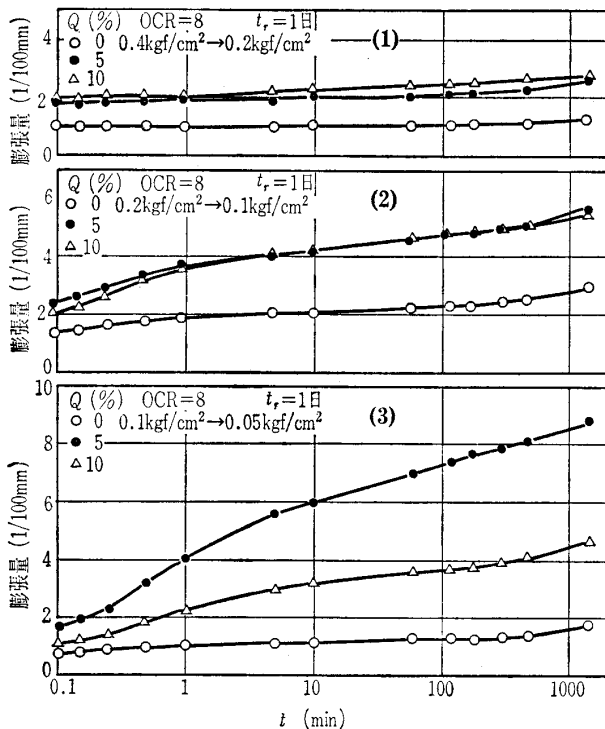
- 1) 膨張前(圧密荷重 $p_0=0.4 \text{ kgf/cm}^2$)の圧密時間によって過圧密粘土の圧密係数 c_0 が正規圧密粘土の値に移行する状況は異なる。また体積圧縮係数 m_v は圧密荷重 p_0 の2倍の大きさで正規圧密状態に移行する。
- 2) 硫酸アルミニウム添加量 $Q=5\%$ および 10% のような試料、すなわちクリープ沈下量が多い試料では、遅延圧密によって圧密降伏応力が増加する。
- 3) t_r が10日になると $Q=5\%$ および 10% の膨張指数 C_e がほぼ0となった。しかし、 $Q=0\%$ では通常の過圧密粘土と同様に膨張を示した。これは $Q=5\%$ および 10% のような試料では、粒子間の結合力が強く膨張ひ



図—8 二次圧密係数と圧密荷重の関係 (過圧密粘土, OCR=8)



図—9 二次圧密係数と圧密荷重の関係 (過圧密粘土, OCR=4)



図—10 膨張曲線

ずみを拘束するために C_e がほぼ 0 になると考えられる。この結合力のためさらなる圧縮に対して抵抗力が

強くなり、みかけ上過圧密挙動を示すものである。これに対して、 $Q=0\%$ のような試料では、粒子間の結合力が弱いため時間効果を受けても通常の過圧密粘土と同じ現象を示すものと考えられる。

4) $Q=5\%$ および 10% では、二次圧密係数 c_a が p_0 を境に急増し、正規圧密領域でほぼ一定の値を示した。これらの試料の c_a-p 曲線は、

乱さない低塑性粘土の c_a-p 曲線と同じであることから、練り返した粘土であっても $Q=5\%$ および 10% のような試料では、圧密されることによってある程度構造が発達し、乱さない粘土と同じ挙動を示すものと考えられる。

5) $Q=0\%$ の膨張量が $Q=5\%$ および $Q=10\%$ に比べて常に小さくなり、かつ $Q=5\%$ と $Q=10\%$ の膨張量との間には一定の関係が認められなかった。このよ

うな膨張の傾向が $c_a-\log p$ 曲線の傾向と異なることから、本実験で用いた試料の応力解放による膨張は、一次圧密で生じたリンク構造に対する弾性的な回復とベッドの膨潤の時間的遅れに基づくものと考えられる。

参考文献

- 1) Bjerrum, L.: Engineering Geology of Norwegian Normally-Consolidated Marine Clays as Related to Settlement of Buildings (7th Rankine Lecture), Geotechnique, Vol. 17, No. 2, pp. 83~117, 1967.
- 2) Leonards, G.A. and B.K. Ramiah: Time Effect in the Consolidation of Clay, Am. Soc. Test. Mater., STP. No. 254, pp. 116~130, 1959.
- 3) 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.
- 4) Lambe, T.W.: The structure of compacted clay, Proc. ASCE., SM2, pp. 68~74, 1982.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) 山田洋右: 粘土の二次圧密特性に関する実験的研究, 土木学会論文集, 第370号, pp. 251~260, 1986.
- 8) 安原一哉・平尾和年・藤原東雄・上 俊二: 擬似過圧密粘土のせん断特性, 土と基礎, Vol. 33, No. 3, pp. 29~35, 1985.
- 9) 安川郁夫・嘉門雅史: 粘性土の二次圧密における荷重条件の影響, 土質工学会論文報告集, Vol. 27, No. 2, pp. 93~106, 1987.

(原稿受理 1989. 2. 2)