

# 圧密過程における粘土の構造変化

## Microstructural changes in consolidated clays

かざ 風 間 秀 彦\* 黒 崎 秀\*\*\* いし 石 井 三 郎\*\* しげる 秀\*\*\*

### 1. まえがき

土の構造に関する研究は古く、Terzaghi (テルツァーギ), Casagrande (キャサグラント) の時代にさかのぼることができる。近年、分析・計測機器の著しい進歩によって、土の構造に関する研究も飛躍的に発展した。とりわけ、走査型電子顕微鏡の普及は、従来巨視的現象あるいは間接的な手法で推定していた微細な構造を直接見ることが可能になった。そして、粘性土の力学的挙動について、説明できない点はすべて構造に起因するとされていたものも徐々に明らかにされつつある。

粘土の圧密現象は間隙水の排出抵抗と土粒子の骨格構造の変形抵抗である。圧密に伴う構造変化については幾つかの報告がある。例えば、Quigly (クイグリー) と Thompson<sup>1)</sup> (トンプソン), 村山と平山<sup>2)</sup>, 岡田<sup>3)</sup>らによる X線回折を用いた研究, 松尾と嘉門<sup>4)</sup>, McConnachi<sup>5)</sup> (マコーナッキー) らによる電子顕微鏡写真を用いた研究などである。

本報告は、一次元の高圧圧密試験を行い、その構造変化について、既に発表した結果<sup>6),7)</sup> に新たなデータを追加し、それらの結果に関して考察したものである。すなわち、構造的な異方性が圧密特性に及ぼす影響、圧密に伴う構造変化を土粒子の骨格構造と間隙分布の両面に着目し、それらを定量的に把握し検討を加えた。なお、粘性土における「土の構造」とは土粒子-水系の物理化学的作用に依存した土粒子と間隙の配列状態を意味する。ここでいう構造は間隙分布も含めた土の幾何学的配列を意味しており、「fabric」という用語に近い内容であるが、適切な和訳がないので構造という語を用いた。現実には構造という場合、このような内容を指すことが多い。

本小特集のテーマは「二次圧密」であるので、本来ならば圧密に伴う構造変化を一次圧密、二次圧密に分けて測定し、その結果について考察すべきである。そのためには与えられた応力条件のもとで、構造がどのように変化するか

を時間とともに連続的に測定しなければならない。しかしながら、現時点では技術的に不可能であるので、各荷重において、一次圧密と二次圧密を一緒に含めた構造変化が中心になっていることを断わっておく。したがって、本報告は小特集の編集趣旨に必ずしも沿っていないと思われまます。その点はお許し願いたい。

### 2. 試料および実験方法

実験に用いた試料はジョージア産のカオリン (ASP 100), 沖積粘土として東京湾川崎沖の海成粘土, 埼玉県志木市の後背湿地堆積粘土の3種類 (以下, カオリン, 川崎, 志木と呼ぶ) である。カオリンは比較的粒径がそろって均質な試料で不活性である。砂の実験でよく標準砂が用いられるのと同様に, カオリンは室内のモデル実験に使用されている。沖積粘土はカオリンに比べて粒度組成の範囲が大きく, また有機物を多少含んでいる。試料の物理的性質を表-1に示した。

供試体はできるだけ均質なものとするために, 試料を蒸留水でスラリー状に溶き, 沖積粘土は 420 μm ふるいで裏ごしして粗大な粒子, 貝殻の破片, 繊維などを取り除いた。スラリーの含水比はカオリン, 川崎, 志木がそれぞれ約 250, 200, 185% であり, これを大型圧密容器 (直径 39 cm) に入れ, 約 50 日かけて 0.78 kgf/cm<sup>2</sup> の先行荷重まで段階

表-1 試料の物理的性質

試料	$G_s$	砂分 (%)	シルト分 (%)	粘土分 (%)	$w_L$ (%)	$w_p$ (%)	$I_p$
カオリン (ジョージア)	2.633	0	1	99	83.8	32.6	51.2
沖積粘土 (川崎沖)	2.658	5	40	55	96.3	42.9	53.4
沖積粘土 (志木市)	2.617	0	56	44	92.5	43.4	49.1

表-2 供試体の初期状態

試料	含水比 $w$ (%)	湿潤密度 $\rho_i$ (t/m <sup>3</sup> )	間隙比 $e$	飽和度 $S_r$ (%)
カオリン (ジョージア)	59	1.63	1.57	99
沖積粘土 (川崎沖)	77	1.54	2.05	100
沖積粘土 (志木市)	83	1.51	2.17	100

\*埼玉大学工学部 建設基礎工学科

\*\*清水建設㈱

\*\*\*埼玉大学 大学院

的載荷により圧密した。この方法により、再現性のよい均質な供試体を作製することができた。供試体の初期状態の平均的な値を表-2に示した。3種類の供試体の初期構造は後述するようにランダムな構造でなくかなり配向の進んだ状態である。

実験は供試体作製時の先行荷重方向と圧密試験の荷重方向とが一致する供試体(Hサンプル)と直交する供試体(Vサンプル)を切り出して、102.4 kgf/cm<sup>2</sup>までの圧密試験を行った。試験方法はJIS A 1217に準拠した。H、Vサンプルの圧密試験の目的は構造的な異方が圧密特性に与える影響を求めるためである。圧密過程における粘土の構造変化を測定するために、各荷重段階の圧密終了後ごとに、走査型電子顕微鏡写真の撮影、水銀圧入試験、およびカオリンについてX線回折を行った。いずれの場合も載荷したままの状態では実験ができないので、除荷してから行った。

### 3. 圧密特性

3種類の試料のH、Vサンプルの代表的な $e \sim \log p$ 曲線を図-1に示した。同じ試料ならば供試体の間隙比、含水比などほぼ同じであるが、 $e \sim \log p$ 曲線において両者は一致していない。すなわち、過圧密領域ではVサンプルの方が圧密量が大きく、正規圧密領域では逆にHサンプルの方が大きい。そして、荷重が大きくなるにつれて両者は漸近する。更に除荷後の間隙比はHサンプルの方が必ず大きい。圧密降伏応力は当然のことながらHよりVサンプルの方が小さく、約2/3程度の値になる。川崎の時間-沈下量曲線の一例を図-2に示した。図-2の(a)、(b)はそれぞれ圧密圧力 $p=0.4, 12.8$  kgf/cm<sup>2</sup>の場合であり、(c)は12.8 kgf/cm<sup>2</sup>から0.1 kgf/cm<sup>2</sup>に除荷したときの膨張曲

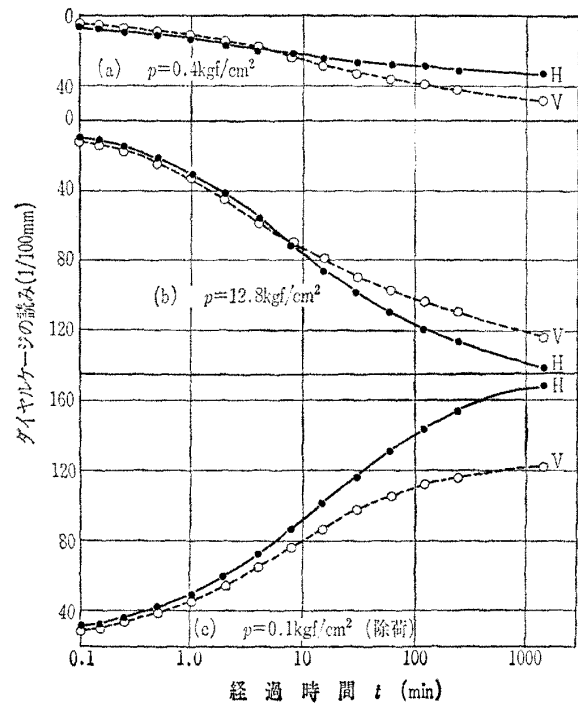


図-2 時間-沈下量曲線(川崎)

線である。前述の点はこの図からも明らかである。 $e \sim \log p$ 曲線と同様にHとVサンプルは同じ曲線にはならない。すなわち、過圧密領域において初期の沈下はHの方が大きい、最終沈下量はVの方が大きい。しかし、正規圧密領域では全く逆の傾向を示す。一次圧密域ではVの方が沈下速度が大きく、50%圧密に要する時間はHよりVサンプルの方が1~2割小さい。これは後述するように透水係数に起因するものである。更に二次圧密域ではHのクリープ的な沈下が大きいのが特徴である。また、除荷時の膨張はHの方が著しく大きく、より弾性的な性状を示すといえる。

いずれにしてもこれらの相違は同じ圧密圧力に対してわずかに間隙比が異なるが、土の構造に起因するものであり、圧密特性に異方性を示すことは明らかである。

圧密試験の結果から得られた透水係数を間隙比に対して示したのが図-3である。志木のデータは図示していないが、ほぼ川崎の結果と一致する。間隙比の大きい過圧密領域ではばらつきが大きい、正規圧密領域では間隙比に対して透水係数はやや上に凸の曲線になる。そして同じ間隙比でもHよりVサンプルの透水係数が大きく、間隙比が小さくてもその差はあまり縮まらない。透水係数の差が最も大きい場合、VはHの2倍程度にも及んでいる。一方、圧密荷重を載荷した状態で変水位透水試験を行った結果<sup>9)</sup>によれば、図-3の結果と概略一致する。したがって、図-3の結果は信頼性が高いと思われる。ただし、沖積粘土の間隙比が0.7以下で透水係数が $10^{-7}$  cm/min以下になると一

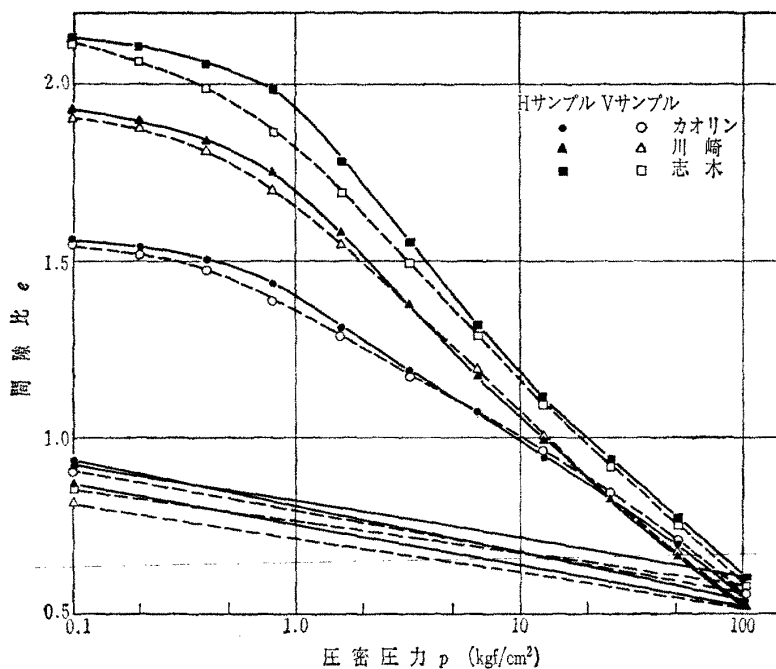


図-1  $e \sim \log p$  曲線

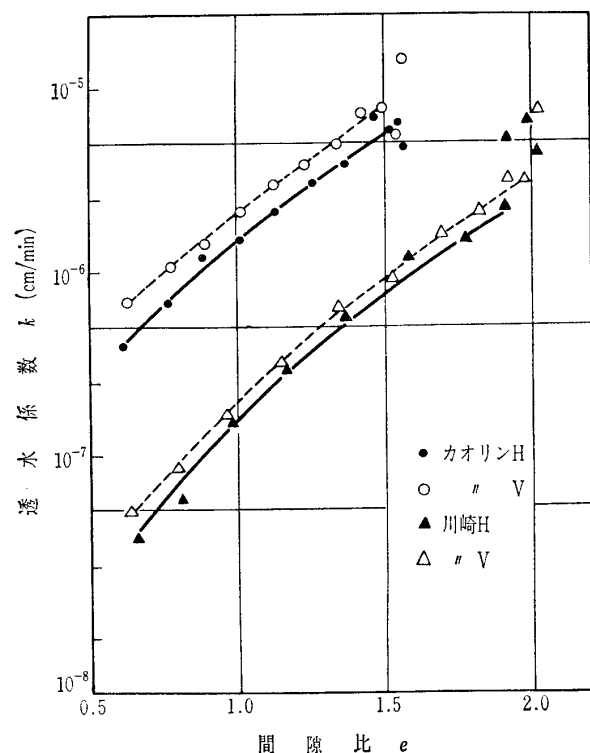


図-3 間隙比と透水係数の関係

致しない。これは変水位透水試験の適用限界を越えるためと考えられる。これらの結果は間隙比が同じでもHとVサンプルの構造が異なる状態の透水係数である。通常の地盤において、いかえると同じ構造における鉛直方向と水平方向の透水係数を変水位透水試験で測定したところ、間隙比が1.0以上では図-3の曲線上にほぼの結果が得られた。したがって、水平方向と鉛直方向の透水係数は2倍程度の差があるといえる。詳しくは別の機会に報告する予定である。

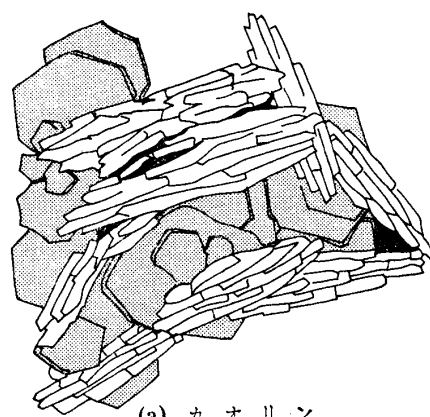
そのほかの圧密定数に対し、体積圧縮係数  $m_v$  は正規圧密領域ではHとVは同じかあるいはわずかにHの方が大きい。したがって、圧密係数  $c_v$  は透水係数と全く同様になり、HよりVの方が1～8割大きい。構造が圧密の異方性に及ぼす影響は沖積粘土よりカオリンの方がやや顕著である。HとVサンプルの圧密特性に与える影響は土の構造によるもので、特に透水係数に大きく影響する。三つの試料の初期構造は後述するように配向度が50%程度である。つまり、Hサンプルは荷重の作用面に平行に配列した土粒子が多く、Vサンプルはそれが少なく、むしろ荷重方向に平行な土粒子が多い。そのために透水流路はHサンプルが大きく、その結果として透水係数が小さくなるためである。配向構造における流れの屈曲度の考え方については既に Youg (ヤン) と Warkentin<sup>9)</sup> (ウォークエンチン) によって指摘されている。このように、土の構造的な異方性(配向度)は程度の差はあるにしても圧密特性に影響を及ぼすばかりでなく、土の強度・変形特性にも影響することは明ら

かであり、多くの研究者によって指摘されている<sup>10)</sup>。

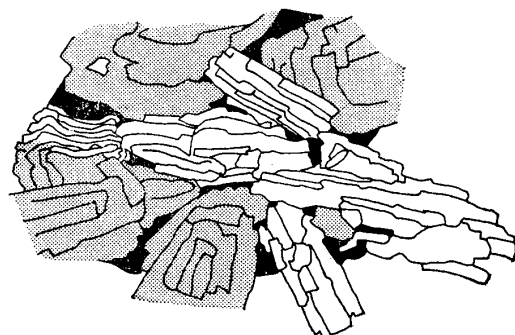
## 4. 構造変化

### 4.1 土粒子とペッド

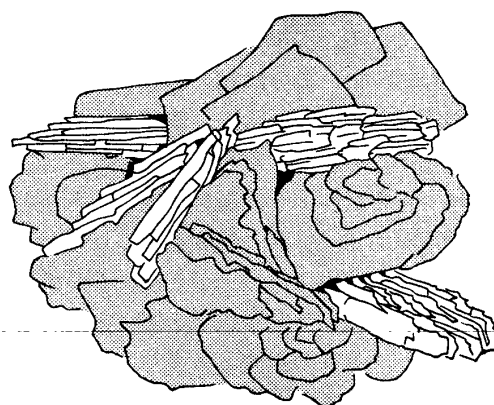
粘土を構成するような微細な土粒子の形状は、一般に薄片状あるいは板状のものが比較的多く、砂粒子のようにだ円体のものは比較的少ない。沖積粘土には珪藻土、有孔虫、花粉などが含まれることが多く、そのほか極めて不規則な形状の土粒子を含む。このような微細な土粒子は、通常単独で存在することはまれであり、複数の土粒子が集まって一つの集合体を構成し、これが何個か集まって更に大きな集合体を構成している。この集合体をペッド (ped) と呼び、粘土の構造を構成する最小単位と考えられている。そ



(a) カオリン

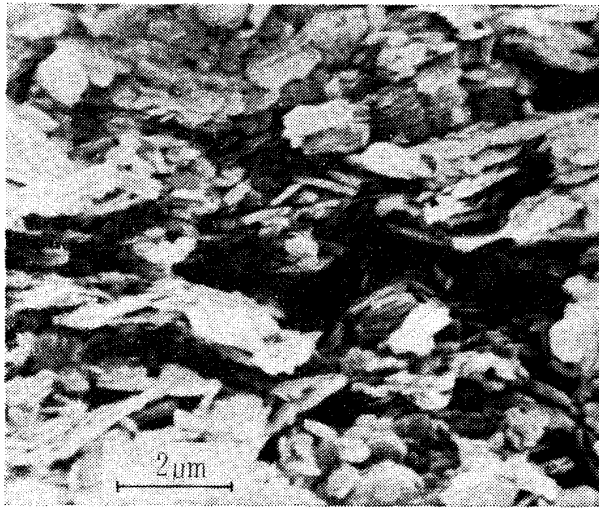


(b) 沖積粘土

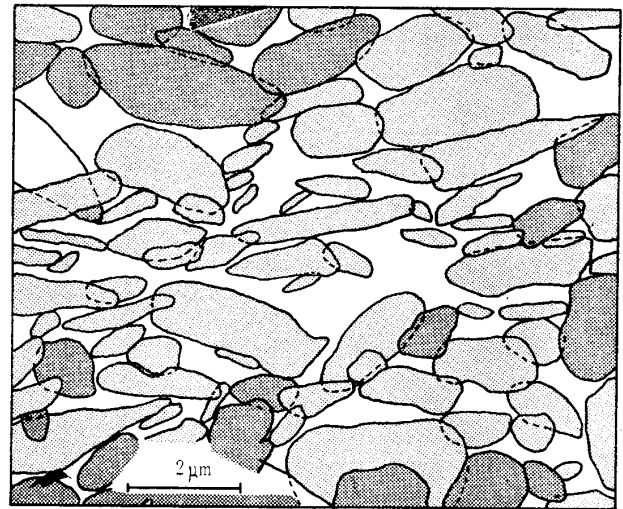


(c) 沖積粘土

図-4 ペッドのスケッチ



(a) カオリンの電子顕微鏡写真



(b) (a)のベッドの構成

図-5 ベッドの構成

してその大きさによって二～四つに分類<sup>11)</sup>されている。このような基本単位としてのベッドは物理化学的な力の作用する上限単位とみなされ、ベッド内部は安定状態にあり、ベッド間には機械的な力のみが作用すると仮定されている。ただし、外力の作用によってベッドは変形、場合によっては分割されることもあり得ると考えられている。

薄片状あるいは板状粒子がベッドを構成する場合の接触方法は面-面接触 (face to face), 面-端接触 (face to edge), 端-端接触 (edge to edge) のいずれかである。一般には面-面接触が多く、面-端, 端-端接触はベッド間に見られることが多い。この傾向はカオリンに顕著に見られる (図-5(a), 口絵写真-1, 3 参照)。

粘土の構造を観察するには電子顕微鏡以外の方法ではほとんど不可能である。透過型電子顕微鏡は像が平面的であるのに対し、走査型電子顕微鏡は焦点深度が深いために立体的に像が見られ、構造の観察には有効な機器である。圧密試験をした供試体の走査型電子顕微鏡写真の代表的な例を口絵写真-1～6 に示した。

電子顕微鏡写真からベッドの構成を模式的にスケッチしたのが図-4 である。図中の黒い部分は間隙, 黒っぽい部分は土粒子の面, 白い部分は端を示している。図から前述のベッドの構成およびその状況が理解できる。しかし, 沖積粘土は不規則な形状の土粒子や有機物質を含むために, 必ずしもベッドを明りように区分できない場合もある。一枚の顕微鏡写真からベッドの構成を示したのが図-5 である。図のように部分的にはベッドとベッドが重なり合っている部分もあり, (b) 図を作成する際に主観的な要素が入ることもあるが, 多少の訓練と数多くのベッドを測定して解析することによって, ある程度は避けることができると思われる。

なお, 以下の構造変化については特に断わりがない場合

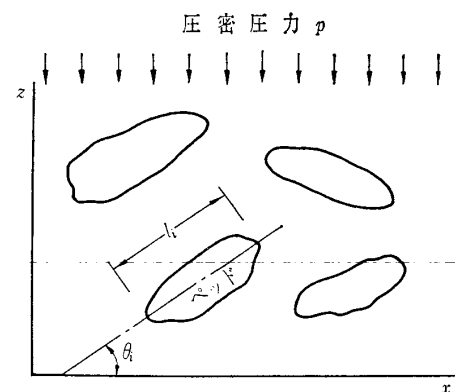
はHサンプルについての結果である。

#### 4.2 電子顕微鏡写真の測定と解析

粘土の構造については各種の実体モデルが提案<sup>12)</sup>されている。しかし, これらのモデルは粘性土のある特定部分の構造形態を説明したもので, あくまで定性的なものであり, 土の力学的性質と直接結びつくものでない。そこで, 骨格構造の配列を定量的に表示する方法として, 配向の程度を表す指標がよく用いられる。圧密荷重の作用方向に平行な面 (鉛直断面) の写真を撮影した。そして, 端部 (edge) が卓越したベッド (図-5(b) の白いベッド) に着目した。この理由は扁平な粒子が多い場合端部の卓越したベッドの方が配向性を表現するのにより有効であると考えられるからである。具体的には Curray<sup>13)</sup> の方法を応用して, 図-6 のようにベッドの長軸方向と荷重面のなす角  $\theta_i$  と長軸の長さ  $l_i$  を測定し, ベッドの配向度  $M$  を次式で求めた。

$$M = \frac{100}{\sum l_i} \sqrt{(\sum l_i \sin 2\theta_i)^2 + (\sum l_i \cos 2\theta_i)^2} \quad (\%)$$

$M=0\%$  はランダムな配向を,  $M=100\%$  は見かけの長軸が基準軸に完全に配向していることを示す。

図-6  $\theta_i, l_i$  の求め方

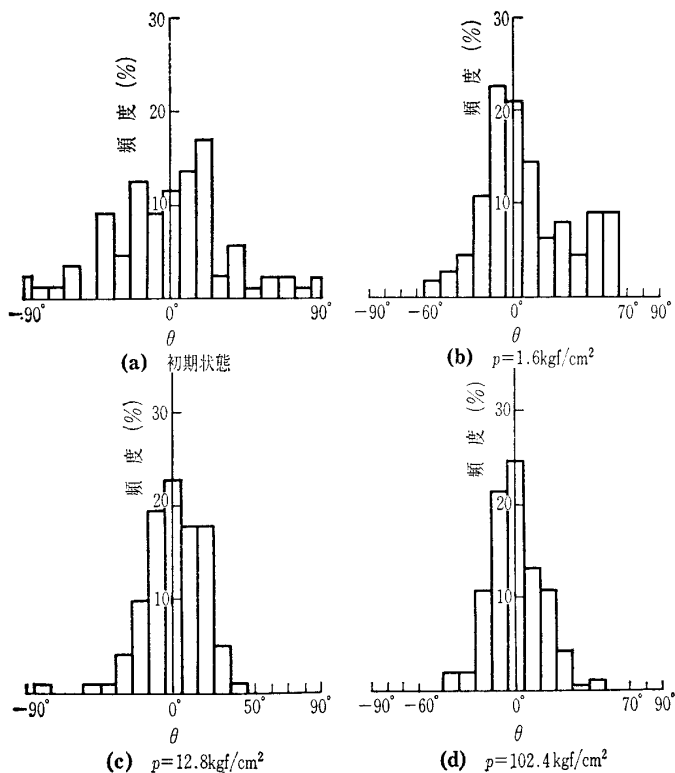


図-7 ベッドの配向頻度分布 (川崎)

図-7は川崎の配向分布図、図-8は圧密圧力と配向度の関係を示した。初期状態では $\theta \leq |15^\circ|$ のベッドが多く、この状態で配向度が50%程度である。自然状態の粘性土について多くの測定例をまとめると $M=10\sim 70\%$ であり、ランダムなものはない。また、繰り返した状態でも $M=13\%$ であるといわれている<sup>14)</sup>。偏平な土粒子は堆積した段階で既に多少の配向が生じ、その後外力の作用によって配向が助長されると考えられる。更に荷重が増加すると $\theta=0^\circ$ 付近にベッドが集中することが図から分かる。このように圧密荷重の増加に伴い、ベッドは次第に荷重面に平行に配列する。そして $102.4 \text{ kgf/cm}^2$ では $M=77\sim 91\%$ になる。 $M$ に関してデータ者のばらつきはあるが、 $12.8 \text{ kgf/cm}^2$ 程度までは配向の増加割合が大きく、それ以降はやや鈍る。通常の圧密試験で圧力を $400 \text{ kgf/cm}^2$ に増加させても完全配向にはならない<sup>15)</sup>。しかし、 $102.4 \text{ kgf/cm}^2$ でも局部的

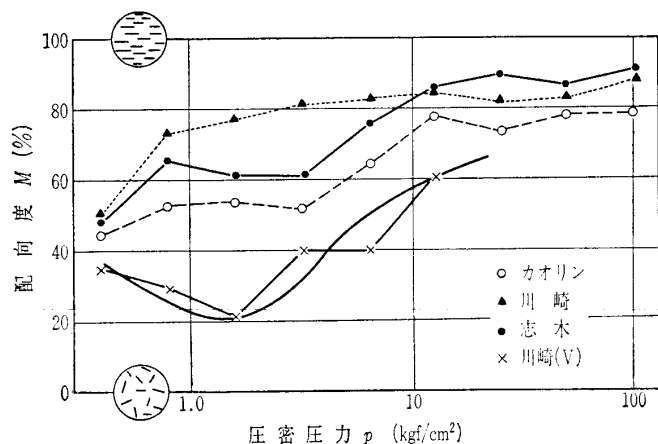


図-8 圧密圧力と配向度の関係

には $M=100\%$ に近いと思われる部分もある。完全配向に近い状態にするには極めて高い圧力と長い時間を必要とするものと思われる。

一方、Vサンプルの構造変化について若干触れておく。図-8の×印は川崎のVサンプルである。 $p=0.4 \text{ kgf/cm}^2$ で $M=35\%$ であったものが、一たんランダム化し、再び配向を増すことを示している。この理由は初期に鉛直面に平行なベッドが多く、圧力の増加に従いランダム化して、次第に荷重面に配列するためである<sup>16)</sup>。そして $12.8 \text{ kgf/cm}^2$ の圧力でもHサンプルと同じにはならず、圧密試験の結果からも考えて、 $102.4 \text{ kgf/cm}^2$ でも両者は一致しないものと思われる。

図-9は一つの荷重段階の荷重時間を、一次圧密の終了(8~16分)、1日、7日の3種類で圧密試験を行い、配向分布を求めたものである。供試体の初期構造は同じであるが、荷重時間が配向に影響することは明らかである。ここで注目すべき点は8~16分の短い荷重時間でも非常に配向が進行し、1日荷重の分布に近いことである。つまり、過剰間隙水圧の消散過程において、間隙水の排出により土の体積が減少するので、当然構造が変わることが予想されるが、この間の構造変化が著しいことである。そして、二次圧密域でクリープ的な変形が生じ、配向を増す。 $12.8 \text{ kgf/cm}^2$ までの圧力に対する $M$ の値は1日荷重に比較して、7日荷重は数パーセント大きく、一次圧密終了後の荷重は数パーセント小さい。

以上の結果から圧密過程におけるベッド挙動を推定すると次のようになる。圧密圧力の作用により、ベッドの長軸と荷重面のなす角 $\theta$ が大きいベッドは次第に $\theta$ の小さくな

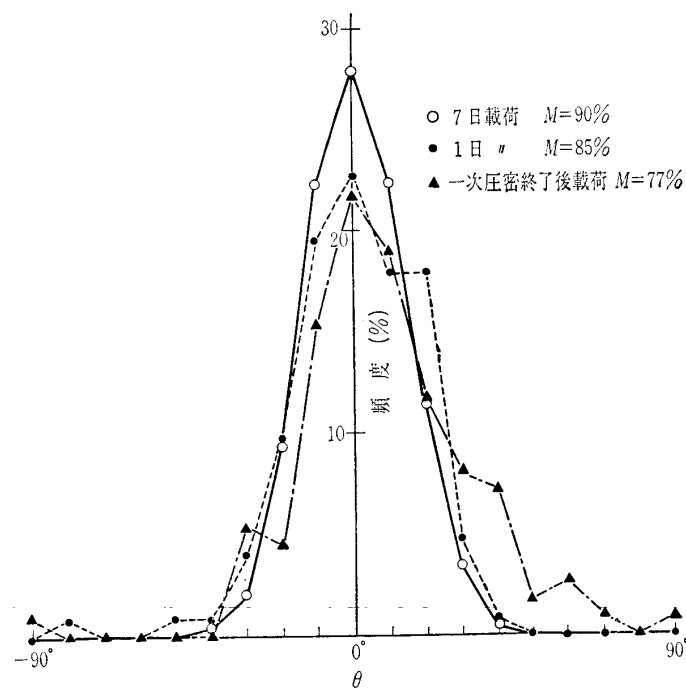


図-9 荷重時間による配向分布の変化 (川崎  $p=12.8 \text{ kgf/cm}^2$ )

る方向に回転し、より安定な位置や構造に移行する。そして、圧力が大きくなるほど  $\theta = 0^\circ$  付近に集中する。このペッドの回転および移動は一次圧密域においても生じ、更に二次圧密域でも進行してより安定な構造へ移行する。その結果として配向度が増加する。また、荷重時間が配向に影響を及ぼす。

### 4.3 X線回折

X線回折は粘土鉱物の同定や定量を行うのに有効な方法である。X線回折のある底面反射強さは単一物質の場合、その粘土鉱物の存在量に比例する。この性質を利用して土粒子の配列性を定量的に表すことができる。図-10は高島産のカオリンについて同様な圧密試験を行った供試体のX線回折曲線である。水平面（荷重面）のカオリナイトの反射強さは鉛直面に比べて大きい。これは水平面に面（face）、鉛直面に端（edge）を出している粒子が多いことを示している。配向度を定量的に求める方法として、Odom<sup>17)</sup>（オドーム）、Gillott<sup>18)</sup>（ギロット）の方法を多少修正し、図-11のようにしてその面積を算出して、次式から Fabric Index (FI) を求めた。

$$FI = \frac{2H_v W_v}{H_v W_v + H_h W_h} \times 100\%$$

FI=1 はランダム、0 は完全配向を意味する。M と FI は配向度が逆になるので、X線回折による配向度Nを次式で表した。

$$N = 100(1 - M) (\%)$$

高島カオリンを  $102.4 \text{ kgf/cm}^2$  まで圧密した供試体のMとNの関係を図-12に示した。図中の記号は初期構造が多

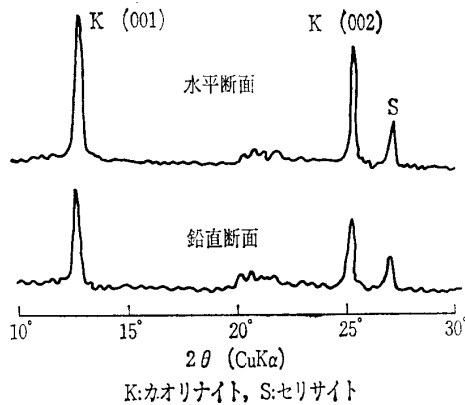


図-10 カオリンのX線回折曲線 ( $p=0.4 \text{ kgf/cm}^2$ )

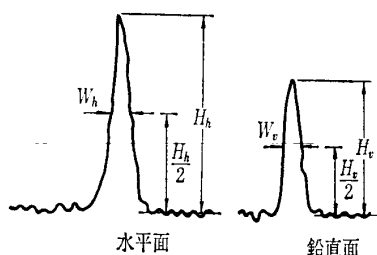


図-11 FI計算のための模式図

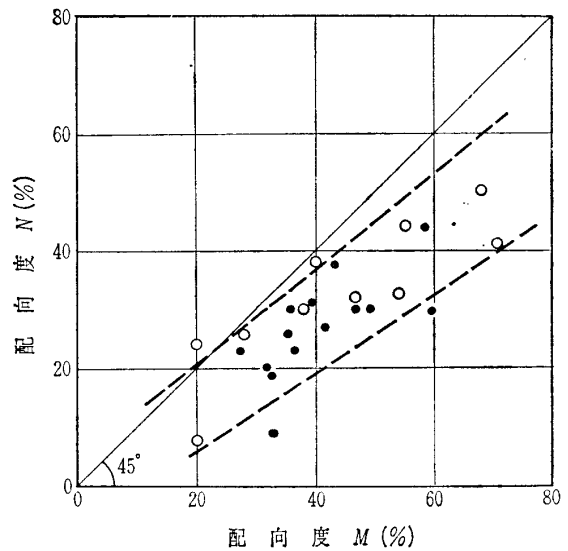


図-12 配向度の相関図

少異なることを示している。MとNとは一致せず、MよりもNの方が小さい傾向にある。これは配向度の測定対象が異なっているためと思われる。すなわち、Mは土粒子の集合体としてのペッド、Nはそれよりも微小な粘土鉱物であるためである。配向度の観点から、MとNは妥当な対応関係にあるといってもよいと思われる。土質工学的な面からみるとX線回折は反射が明りょうに現れる粘土鉱物を含んだ粘土しか適用できないこと、また直接骨格構造を観察し、工学的な現象を説明することができないことなどから、電子顕微鏡写真の方が好都合のように考えられる。しかし、写真からの配向度の測定は経験と多くの労力を必要とする欠点がある。

### 4.4 間隙分布

土の構造を考えるうえで、土粒子の幾何学的配列と表裏一体の関係をなすものが間隙分布特性である。間隙径や分布などについてはLafeber<sup>19)</sup>（ラフィバー）、Diamond<sup>20)</sup>（ダイヤモンド）、西田と青山<sup>21)</sup>らによって試みられ、間隙分布特性は土の構造を表現する一つのファクターであると指摘されている。

そこで、圧密試験後の供試体について水銀圧入試験を行った。水銀圧入試験は供試体内の間隙に水銀を圧入させ、圧入力から間隙径、圧入量から間隙体積を求める方法である。

測定結果の代表例を図-13の加積間隙曲線で示した。圧密圧力の増加につれて大きい間隙が減少し、小さい間隙が増加することがよく分かる。沖積粘土はカオリンよりその傾向が著しく、間隙径の分布範囲が広い。これは沖積粘土は粒度分布が大きく、またカオリンは粒径がそろっているためである。図-13において、間隙分布のヒストグラムを描くと対数正規分布になる。したがって、ピークを示す間隙径が存在し、その間隙径は圧力の増加につれて、カオリン

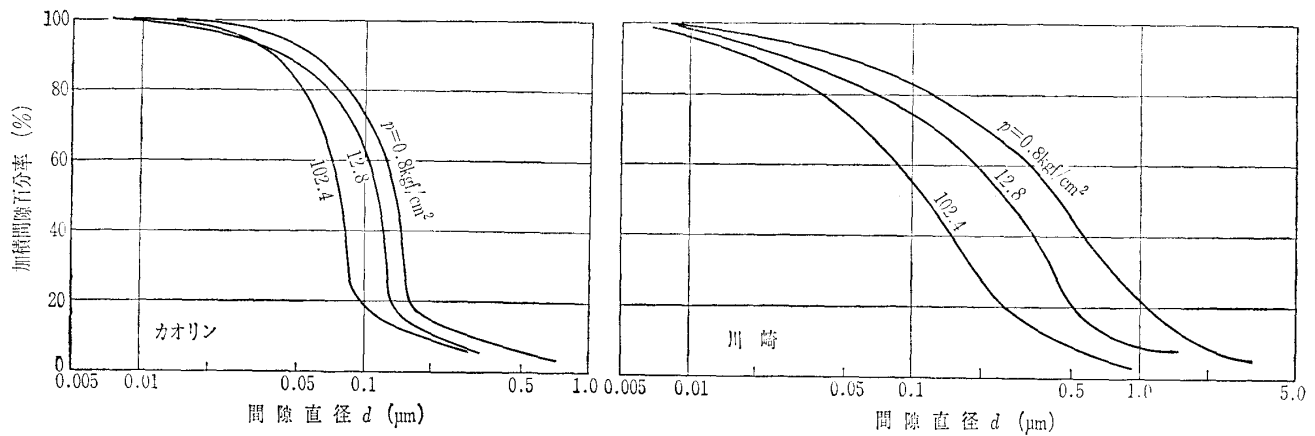


図-13 加積間隙曲線

は  $0.14\mu\text{m}$  から  $0.098\mu\text{m}$  に、川崎は  $0.5\mu\text{m}$  から  $0.15\mu\text{m}$  に、志木は  $0.5\mu\text{m}$  から  $0.2\mu\text{m}$  に減少する。カオリンについて間隙径を考慮して間隙量を間隙比に換算して、 $e \sim \log p$  曲線に示したのが図-14である。図から圧密に伴う間隙の減少の様子が理解できる。すなわち、 $0.15\mu\text{m}$  以上の比較的大きな間隙は直線的に減少するが、 $102.4\text{kgf/cm}^2$  の圧力でも約  $1/3$  残る。 $0.08\mu\text{m}$  以下の間隙も同様である。これに対して、 $0.1 \sim 0.15\mu\text{m}$  の間隙は最終的に  $1/10$  に著しく減少する。前述のピークの生じる間隙径はこの範囲にある。したがって、この部分の間隙径は圧密沈下に大きな役割を演じている。沖積粘土についても大きく影響される間隙径は粒度組成によって異なるが、ほぼ同様なことがいえる。実際には大きな間隙は小さい間隙に、小さい間隙はより小さい間隙に移行し、その過程において、間隙分布に関する特性が現れる。

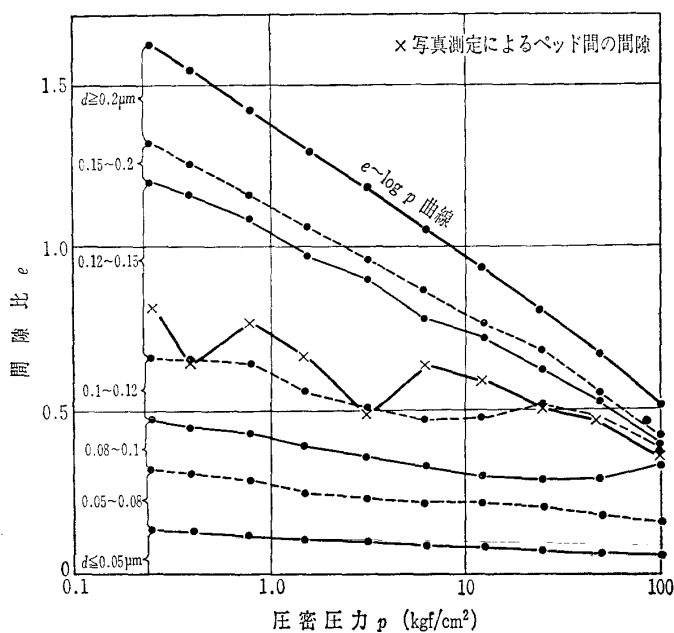


図-14 圧密圧力に対する間隙径分布図 (カオリン)

間隙の存在形態はベッド間の間隙、ベッド内の間隙、ベッドとベッドの接触部付近の間隙に分けられる。電子顕微鏡写真から求めたベッド間の間隙を立体に換算した間隙比を図-14の×印で示した。ばらつきは大きいですが、水銀圧入から求めた間隙径  $d=0.12\mu\text{m}$  に近い。また、写真測定の結果によればベッド内間隙は  $0.12 \sim 0.01\mu\text{m}$  以下である。ベッドとベッドの接触部の間隙もこれとほぼ同じ程度と予想される。したがって、圧密沈下量の大半はベッド間の間隙であり、それ以外の部分の間隙もかなりある。その割合は圧力によって変わるが、概略前者が7割、後者が3割程度といえる。また、Hサンプルの除荷時の膨張が大きいのは、主にベッド内の膨張に起因し、そのほかにベッド間の接触部の弾性変形によるものと推定される。

## 5. まとめ

以上の実験および解析結果をまとめると次のようになる。

- 1) 粘土の構造的な異方性は圧密特性に影響する。すなわち、体積圧縮係数にはあまり影響しないが、透水係数と圧密係数に影響し、その結果、時間-沈下量曲線に差が生じる。水平方向の透水係数は鉛直方向のその2倍程度に及ぶこともある。
- 2) 圧密過程における構造(ベッド)変化は圧力の作用により、ベッドの傾斜角が小さくなる方向に移動し、より安定な位置や構造に移行する。圧力が大きくなるほど荷重面に平行な位置に集中し、配向度を増す。 $102.4\text{kgf/cm}^2$  の圧力で配向度は80~90%程度である。
- 3) 一次圧密域においてもベッドの配向度は増加し、また、载荷時間が長いほど配向度を増す。
- 4) 圧密に伴い間隙分布は著しく変化し、大きな間隙は小さい間隙に移行する。そして、沈下量の約7割程度はベッド間隙に依存している。
- 5) 以上のことはカオリンと2種類の沖積粘土に対して程度の差こそあれ、共通していえることであり、人工的なカオリンの結果が自然界の粘土にも適用できる可能性が

見いだされた。

本研究を行うにあたって御助言いただいた埼玉大学の芥川真知教授、関陽太郎教授、また実験などに協力していただいた岡米男、竹内信次の各氏に厚く感謝の意を表します。

なお、本研究は昭和53、54年度文部省科学研究費補助金(一般研究D)を得て進められたものであることを記し謝意を表す。

#### 参 考 文 献

- 1) Quigley, R. M. and Thompson, C. D.: The Fabric of Anisotropically Consolidated Sensitive Marine Clay, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 3, No. 2, pp. 61~73, 1966.
- 2) 村山朔郎・平山英磨: X線回折による圧密時の粘土構造に関する研究, 京都大学防災研究所年報, 第17号 B, pp. 1~14, 1974.
- 3) 岡田富士夫・山内豊聡・松田 滋: 一次元圧密の海成堆積粘土の構造変化について, 九州大学工学集報, Vol. 47, No. 6, pp. 707~711, 1974.
- 4) Matsuo, S. and Kamon, M.: Microscopic Research on the Consolidated Samples of Clayey Soils, Proc., Int. Symp. Soil Structure, pp. 194~203, 1973.
- 5) McConnachie, I.: Fabric Changes in Consolidated Kaolin, Géotechnique, Vol. 24, No. 2, pp. 207~222, 1974.
- 6) 風間秀彦・吉中龍之進・久保島信行: 圧密過程におけるカオリンの構造変化, 第8回土質工学研究発表会講演集, pp. 97~100, 1973.
- 7) 風間秀彦・岡 米男・石井三郎: 圧密過程における土粒子構造と間ゲキ変化, 第13回土質工学研究発表会講演集, pp. 197~200, 1978.
- 8) 風間秀彦・黒崎 秀・小川正治: 圧密時の透水係数の異方性, 第15回土質工学研究発表会講演集, pp. 193~196, 1980.
- 9) Yong, R. N. and Warkentin, B. P.: Soil Properties and Behavior, Elsevier Scientific Pub. Co., pp. 141~159, 1975.
- 10) 例えば, Duncan, J. H. and Seed, H. B.: Anisotropy and Stress Reorientation in Clay, Proc., ASCE, Vol. 92, No. SM 5, pp. 21~50, 1966.
- 11) 松尾新一郎・嘉門雅史: 粘土の構造に関する用語について, 土と基礎, Vol. 24, No. 1, pp. 59~64, 1976.
- 12) Collins, K. and McGown, A.: The Form and Function of Microfabric Features in a Variety of Natural Soils, Géotechnique, Vol. 24, No. 2, pp. 223~254, 1974.
- 13) Curray, J. R.: Analysis of Two Dimensional Orientation Data, Jour. of Geology, Vol. 64, pp. 117~136, 1956.
- 14) Matsuo, S. and Kamon, M.: Microscopic Study on Deformation and Strength of Clays, Proc., 9th ICSM-FE, Vol. 1, pp. 201~204, 1977.
- 15) 風間秀彦・石樽保則・沢野 裕: 圧密過程におけるカオリンの構造変化(その2), 第9回土質工学研究発表会講演集, pp. 77~80, 1974.
- 16) 風間秀彦・竹内信次・黒崎 秀: 圧密に伴う沖積粘土の微視的構造の変化, 第35回土木学会年次学術講演会講演概要集, III, p. 81, 1980.
- 17) Odom, I. E.: Clay Fabric and Relation to Structural Properties in Mid-Continent Pennsylvanian Sediments, Jour. of Sedimentary Petrology, Vol. 37, No. 2, pp. 610~623, 1967.
- 18) Gillott, J. E.: Fabric of Leda Clay Investigated by Optical, Electron-Optical, and X-Ray Diffraction Methods, Engineering Geology, Vol. 4, No. 2, pp. 133~153, 1970.
- 19) Lafeber, D.: Soil Structure Concepts, Engineering Geology, Vol. 1, No. 4, pp. 261~290, 1966.
- 20) Diamond, S.: Pore Size Distributions in Clays, Clays and Clay Minerals, Vol. 18, pp. 7~23, 1970.
- 21) 西田一彦・青山千彰: 花コウ岩風化層の間隙径分布と水分吸着特性について, 応用地質, Vol. 20, No. 1, pp. 3~12, 1979.

(原稿受理 1981, 1, 16)

### 学会刊行物案内

#### 入門シリーズ

##### 1. 土質工学入門

172ページ 会員特価 1,200円 定価 1,500円

##### 2. 土質・基礎工学へのコンピュータ利用入門

277ページ 会員特価 2,000円 定価 2,500円

##### 3. 土質・基礎工学のための地質学入門

199ページ 会員特価 2,000円 定価 2,600円

##### 4. 構造物基礎入門

301ページ 会員特価 2,300円 定価 2,900円

B 6判 送料各1冊 300円

申込み先 社団法人 土 質 工 学 会

東京都千代田区神田淡路町2-23 菅山ビル

〒101 ☎03-251-7661(代)

郵便振替

東京4-40786