



## 土の構成式入門

### 7. 微視的構造と構成式—その2 粘性土の場合—

か 嘉 門 もん 雅 まさ し 史\* 風 かざ ま ひで ひこ 間 秀 彦\*\*

#### 7.5 構造の取扱い

粘性土の構造の重要性については古くから認識されていた。1920年代ごろから綿毛化構造、蜂の巣構造、団粒構造、単粒構造などの分類が行われ<sup>41)</sup>、砂粒のような粗粒分と粘土マトリックスの結合形式が模式的に示されていた<sup>42)</sup>。これらは巨視的に土粒子配列が異なることや組合わせを推定したものであった。その後、1950年代に入って、土の物理化学的性質の研究に基づいて、粘性土の構造の基本モデル(ランダム構造、綿毛化構造、分散構造、配向構造など)が示され、電気化学的作用の影響を含めた形で扱われるようになった。2枚の板状粘土鉱物の内部に作用する反発力を中心とした平行板モデルを用いて、粒子間の電気化学的作用力と巨視的な外力との相関を検討された<sup>43)</sup>が、自然粘性土へ適用するにはオーダーの差(2~3オーダーも異なる)が大きく一般的モデルに至っていない。1960年代後半には分析技術や電子機器の著しい進歩によって、粘性土の微細構造を直接眼で見ることが可能となった。その結果、自然の粘性土の微視的な粒子配列の変化と巨視的な工学的特性との関連が定量的に明らかにされている。更に、近年ではコンピューター技術の応用によって、構造の分析結果を数量化し、かつ自動測定化がはかられて定量的解析へ取り込まれつつある。

このような粘性土の構造に関する研究は、土の挙動のモデル化を微視的レベルから行うとともに、土の内部変数の物理的意味づけに役立てることなどを主目的としている。しかしながら、このような構成式へのモデル化には、現状では必ずしも成功していない。その最も大きな理由は粘性土の構造の出現パターンに変化がありすぎるためである。よって、ここでは粘性土の構造の出現パターンに関する従来の成果をとりまとめ、粘性土の変形メカニズムに土の構造がどの程度かかわっているかについて述べる。

#### 7.6 構造のパターン

粘性土は微細な土粒子から構成されているために、土粒子-水系の物理化学的相互作用に大きく影響される。自然状態の粘性土の工学的挙動は、風化、運搬、沈降、堆積、

およびその後の変形過程のすべてにおいて、土粒子の物理的性質、土粒子界面の物理化学的性質、間隙水の物理的、化学的性質などに左右される。

例えば、淡水中で自然堆積した場合には土粒子はペッドを形成してもランダム構造に近い配向を示すが、海水中の場合にはイオン濃度が高く粒子間の反発力が引力より小さいために綿毛化構造に近くなる。そして、堆積後の外的および内的条件によって構造も変化を受ける。これらの物理化学的相互作用は粘性土に特有のもので、前節の砂に代表される粒状土では、その影響はほとんどないか、あるいはあっても無視しうるものと考えられている。このように、粘性土の構造とは物理的および物理化学的作用力の結果としての土粒子の配列を示すものである。

粘性土は一次鉱物である長石や石英のような粗大粒子をはじめ、二次鉱物である粘土鉱物から成り立っている。この粘土鉱物の形状は一般に薄片状や板状であり、球状や円体状のものは比較的少ない。更に、不規則な形状の珪藻、有孔虫、放散虫、花粉、その他有機物を含むことが多い。このような多種多様な土粒子は単独で存在することはまれで、通常複数の土粒子が集まって一つの集合体を構成している。従来、この集合体をドメイン、ブロック、アグリゲート、ポケット、ペッドなどの用語で呼ばれていた。それぞれ微妙なニュアンスの違いをもっているが、用語の混乱を避け、かつ簡潔化のために、集合体にはペッド(ped)を、そのまわりの間隙にはポア(pore)を用い、これらは構造の基本単位となっている。ペッドとポアは大きさによって、表-7.1のような四つに分類されている<sup>44)</sup>。

基本単位のペッドは物理化学的力の作用する上限単位とみなし、ペッド内部は安定な状態にあり、ペッド間には機械的力のみが作用すると仮定している。ただし、外力の作用によってペッドは変形し、場合によっては分割細分化されるため、巨視的レベルの変形においてペッドの回転・移動とともにペッドの変形・破碎を考慮しなければならない。

これらの集合体中の粒子の配列接触を示すものとして、面-面接触、面-端接触、端-端接触をとるとして配向性を議論された。しかしながら、これらの接触形態は相互に組み合わさって観察され、土の構造の実体はペッド構造を基本とした多分散構造、ブックハウス構造、規則・不規則・

\*京都大学助教授 工学部土木工学科

\*\*埼玉大学助手 工学部建設基礎工学科

表-7.1 ベッドとポア (松尾と嘉門による<sup>44)</sup>)

ベッ ド (ped)	ポ ア (pore)	備 考
マクロベッド (>50 $\mu$ m)	マクロポア (>10 $\mu$ m)	肉眼あるいは虫眼鏡の範囲( $\times 1$ )
メゾベッド (2~50 $\mu$ m)	メゾポア (1~10 $\mu$ m)	光学顕微鏡の範囲 ( $\times 10^2$ )
マイクロベッド (0.1~2 $\mu$ m)	マイクロポア (0.01~1 $\mu$ m)	走査型電子顕微鏡の範囲 ( $\times 10^4$ )
サブマイクロベッド(<0.1 $\mu$ m)	サブマイクロポア (<100 $\text{\AA}$ )	透過型電子顕微鏡の範囲 ( $\times 10^5$ )

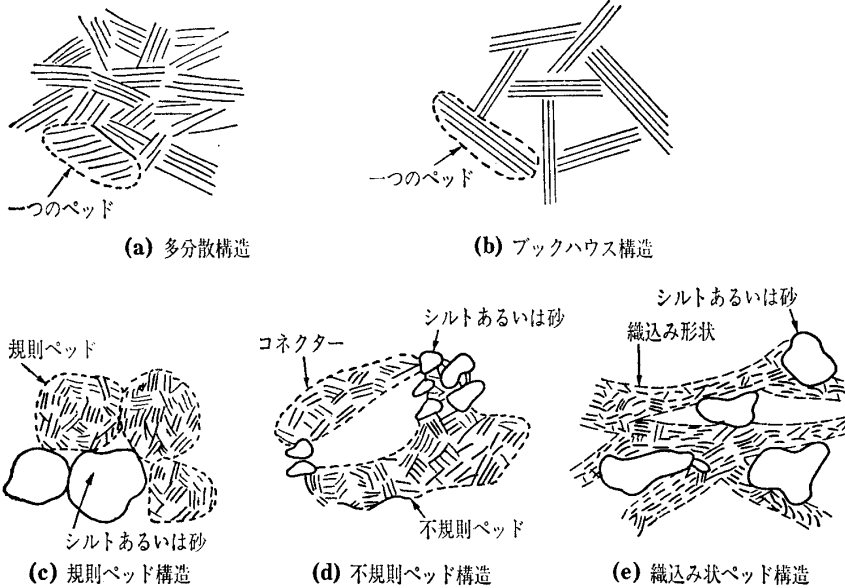


図-7.8 ベッド構造<sup>45)</sup>

織込み状ベッド構造などと称されている。例示すると図-7.8 のようになり<sup>45)</sup>、ベッドそのものの形状の差に着目した区分などに基づいている。

このような構造種別を統合したものとして、Sergeyev (セルゲイフ, 1980)<sup>46)</sup>らは粘性土の構造パターンとして次の八つを提案している。

- |                                  |             |
|----------------------------------|-------------|
| ① 蜂の巣状 (honeycomb) : 間隙は等方的      | } 堆積粘土      |
| ② 骨格状 (skelton) : 間隙は等方的         |             |
| ③ マトリックス状 (matrix) : 間隙は等方的      |             |
| ④ 多分散状 (turbulant) : 間隙は等方的      |             |
| ⑤ 層状 (laminer) : 間隙の異方性は大        | } 堆積・熱水起源粘土 |
| ⑥ 塊状 (domain) : 間隙の異方性は大         |             |
| ⑦ 擬似球状 (pseudoglobular) : 間隙は等方的 |             |
| ⑧ 海綿状 (sponge) : 間隙は等方的          |             |

これらはベッドサイズの分布とポア形状特性とから分類されたものであり、ソ連とポーランドにみられる約300種類の自然粘性土についての検討結果である。

このように粘性土の構造の出現形態は多様性に富むために、単純化のプロセスやモデル化を難しくしている。多様な構造パターンを単に表現するのみでなく、力学的作用による構造パターンの変化を表しうる物理量を見出しうるかどうか今後の課題であると考えられる。

そこで、粘性土の構造変化を定量的に表現する手法について考えてみると、次の二つに大別される。

(1) 土供試体の状態を何らかの測定値として求め、間接的に土の構造特性を把握する。

(2) 土供試体の状態を直接識別して、これを定量的に解析する。

(1)の方法はX線回折による回折強度や水銀圧入法による圧入圧力・圧入量などから土粒子の配向性やポア分布を求めるものである。そのほか、偏光顕微鏡による偏光比や、電気・磁気・熱等を利用した誘電率、伝導度などで構造特性を表現しようと試みられた。解析速度が早いこと、構造異方性を直接測定できることなどから多用されている。しかしながら、この方法はあくまで分析供試体からの巨視情報であって、得られた変数が相対的特性を表すのみで絶対的な構造を示す訳ではないことから、近年その利用が限定されつつある。

一方、(2)の方法は走査型電子顕微鏡に代表される手法であり、構造そのものを直接把握できることに優位性を有している。従来は観察写真の解析を定性的にし

か記述しえず、配向度などの構造変化を数的に表すには多大の時間を要していた。ところが、コンピューター画像処理の導入によって、顕微鏡写真の定量化が迅速に行われうようになって、その利用範囲が広がっている。

土の構造の定量化パラメーターとして、どのような物理量を定義すべきかがここでも問題である。粘性土の構造の変化を説明するパラメーターとして

- ① ベッド面積とその分布 (ped area と distribution)<sup>47)</sup>
- ② ベッド径比 (ped diameter ratio)<sup>47)</sup>
- ③ ポアパターン (Feret's diameter と ped perimeter)<sup>48)</sup>
- ④ ローゼダイアグラム (rosette diagram)<sup>49)</sup>
- ⑤ 粒子形状係数 (Fourier coefficients)<sup>50)</sup>
- ⑥ 配向度 (M-value)<sup>51)</sup>
- ⑦ 異方性比 (anisotropy ratio)<sup>46)</sup>

などが提案されている。

## 7.7 力学挙動と構造変化

粘性土の力学的挙動を土の構造の観点からどの程度まで記述しうるかについての現状をとりまとめてみよう。

### 7.7.1 圧密による構造変化

圧密は外力の作用によって間隙水の排出とそれに伴う骨格構造の変形である。圧密による構造変化については Quigley と Thompson (キグレイトンプソン, 1966) をはじめ多くの研究があり、圧密の進行に伴って粒子の配向性が増すことが明らかにされている。配向度 (M) やペッ

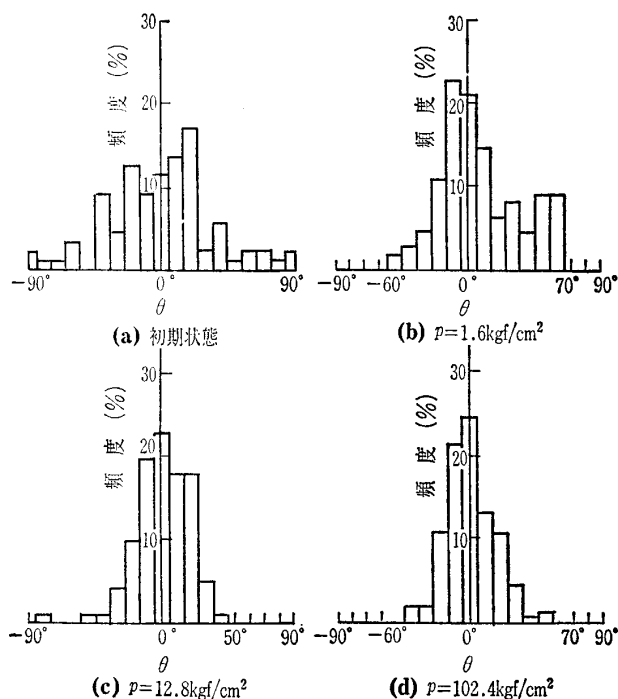


図-7.9 ペッドの配向頻度分布(川崎)(風間らによる)<sup>53)</sup>

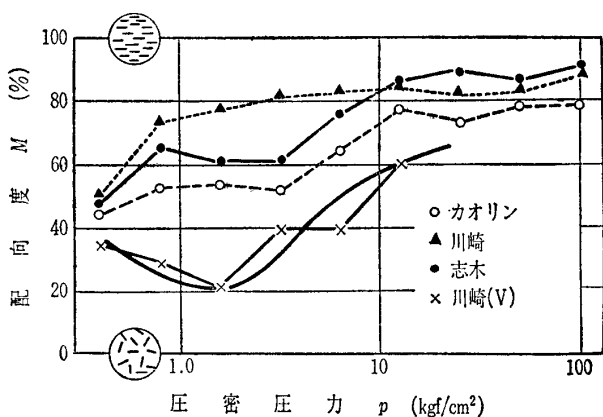


図-7.10 圧密圧力と配向度との関係(風間らによる)<sup>53)</sup>

ド長軸の水平面からなす角度 ( $\theta$ ) を用いて説明すると次のようである<sup>53)</sup>。なお、 $M$ 、 $\theta$  の値は Curry (カーリー, 1956) の方法<sup>51)</sup>に準じて計算されており、 $M=100\%$  は完全配向を、 $0\%$  はランダム配向を示す。圧密圧力によるペッドの配向分布の変化を図-7.9に、圧密圧力と配向度 $M$ の関係を図-7.10に、圧密時間と配向分布の変化を図-7.11に示している。偏平な土粒子は堆積した段階から方向性を持ち、その後の外力の作用によって配向性が進行する。 $\theta$  の大きいペッドは圧密圧力のために次第に $\theta$  の小さくなる方向に回転し、圧力と均衡する位置や構造に移行する。圧力が大きくなるほど荷重面と平行に近い面にペッドが並ぶものの、通常の応力条件では完全配向構造に到達しない。一方、圧密に伴うペッド形状の変化は、自然堆積時における角ばった形から、次第に角がとれて滑らかなだ円体へと移行し、またペッドの平均粒径も小さくなる<sup>45)</sup>。これは圧密によってペッド内に塑性的な変形を生じていることを表

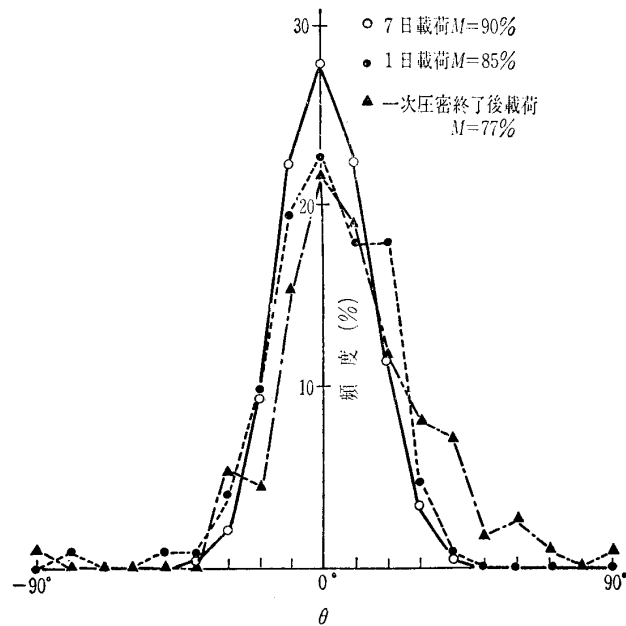


図-7.11 荷重時間による配向分布の変化(風間らによる)<sup>53)</sup>  
(川崎  $p=12.8 \text{ kgf/cm}^2$ )

している。ペッドの変形の時間的遅れ現象として説明される二次圧密領域については、ペッド中のマイクロポアからの水の流出とされている。更に、 $K_0$  状態での長期圧密によって、ペッドの細分化と形状の均等化が生じることが報告されている。

一般に  $e \sim \log p$  曲線から予想されるように過圧密領域では構造変化はほとんどなく、正規圧密領域の荷重で変化が大きい。McConnachie(マッコナーナッキー, 1974)<sup>54)</sup> はカオリンを  $1000 \text{ kgf/cm}^2$  まで圧密し構造変化が継続することを明らかにしている。特に、 $1 \text{ kgf/cm}^2$  以下の領域では粒子間の物理化学的結合の破壊などによって構造変化が大きいとしているが、推論の域を出ていない。

粘性土の初期構造が圧密特性に大きく影響を及ぼす。例えば、同じ間隙比でも配向度の高いものは透水係数が小さいために、沈下速度が小さく一次圧密に要する時間が配向度の低いものより長くなる。また、図-7.10に示したように、初期の先行荷重方向に対して直交する方向から圧密した場合(川崎(V) 試料)には、一たんランダム化してから逆に配向性を増す挙動を示す。更に海成粘土に見られる綿毛化構造とランダム構造の  $e \sim \log p$  曲線は図-7.12のような相違があり<sup>55)</sup>、図の  $k$  より大きい荷重では沈下量の傾向が逆転する。

骨格構造と表裏一体の関係をなすものが間隙分布特性である。図-7.10の川崎沖の粘土の間隙分布の変化を図-7.13に示した<sup>53)</sup>。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。図から分かるように、分布は対数正規分布となり、ピークを示す間隙径が存在する。実際に間隙の変化は圧密に伴って大きな間隙は小さな間隙に移行する。この結果を

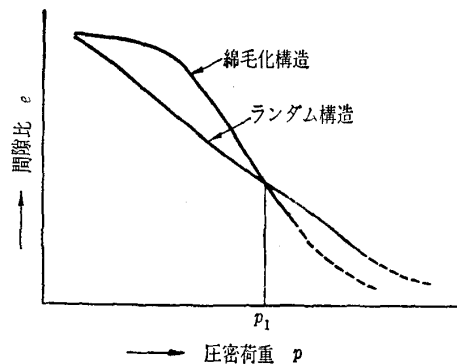


図-7.12 構造の違いが  $e \sim \log p$  曲線に及ぼす影響 (Yongらによる)<sup>55)</sup>

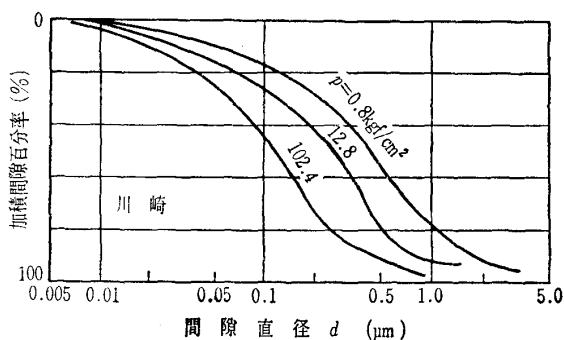


図-7.13 間隙分布の変化 (風間らによる)<sup>53)</sup>

電子顕微鏡による間隙量と照合すると、圧密量の大半はベッド間の間隙であり、その量は圧力によって変わるが圧密量の概略7割である。残りの約3割はベッド内およびベッド間の接触部付近の間隙である。

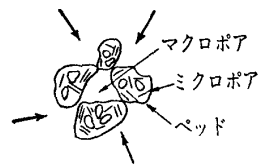
以上の圧密によるベッドとポアの変化から、圧密現象をまとめると図-7.14のように示される<sup>45)</sup>。すなわち、ベッド間のマクロポアからの水の排出とマイクロポアからの水の排出になり、一次圧密は主に前者に、二次圧密は後者に起因する現象である。更に除荷時の膨張はベッドの膨潤によるものである。

なお室内圧密試験において、排水境界付近（排水面から2~3mmの範囲まで）で粘土粒子の配向が大きく、供試体内部での構造と顕著な差を生じることを Tovey (トベイ, 1980)<sup>49)</sup> がローズダイアグラムによって明らかにしている。圧密終了時における供試体中の間隙比分布は一様である (例えば Mesri と Godlewski, 1979)<sup>55)</sup> と意見を異にしており、試験中の供試体の一様性については試験方法そのものとの関係から今後とも検討されるべき課題であろう。

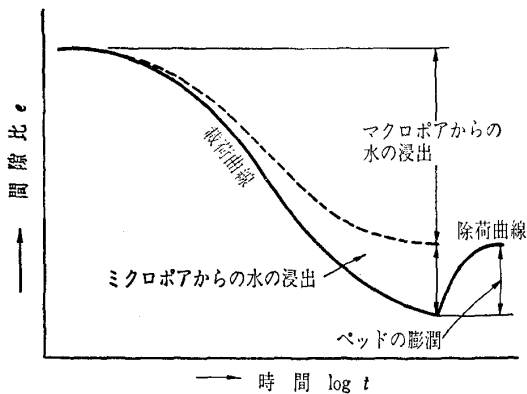
7.7.2 せん断による構造変化

粘性土の構造が強度・変形特性に影響する割合は大きい。例えば、綿毛化構造は応力-ひずみ曲線において明りょうなピークを示すのに対し、ランダム構造では多くの場合ピークを生じない。また、綿毛化構造のせん断強度は分散構造の3倍にも及ぶことがある。

せん断変形の進行に伴うせん断面の発生について Morg-

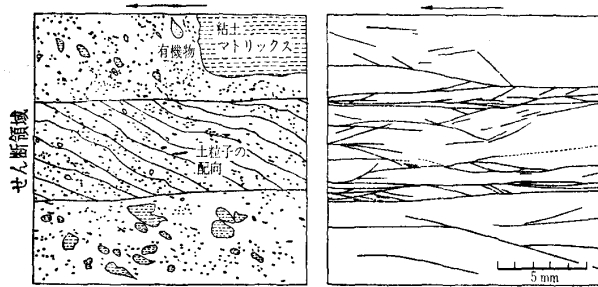


(a) 基本単位



(b) 巨視的な圧密曲線の意味

図-7.14 圧密現象の概念図 (嘉門による)<sup>45)</sup>



(a) 構造 (b) せん断面の状況

図-7.15 せん断面 (Morgensternらによる)<sup>57)</sup>

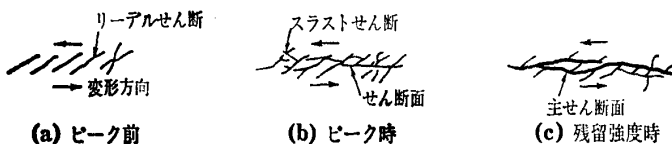


図-7.16 せん断面の発生過程 (Skemptonによる)<sup>58)</sup>

enstern と Tchalenko (モルゲンスタンとチャレンコ, 1967)<sup>57)</sup> は10~60 $\mu$ mの幅で入り組んだ不連続なせん断面が発生し、これが発達してせん断破壊に至ることを指摘した。その例を図-7.15に示す。Skempton (スケンプトン, 1966)<sup>58)</sup> は図-7.16に示すように直接せん断試験のせん断機構を三つに分けて説明している。せん断力のピークに到る直前は図のような雁行状のリーデルせん断面が見られ、ピーク付近ではせん断方向にリーデルせん断面をつなぐようなせん断面が発達すると同時にリーデルせん断面に直交する不連続なせん断面が発生する。そして残留強度領域では大変形に伴う明りょうなせん断面が見られる。これを電子顕微鏡レベルで明らかにしたものが、Tovey と Wong (トベイとワン, 1980)<sup>59)</sup> によって報告されており、粒子配向が極端に進んだ主せん断面と、リーデルせん断面との複

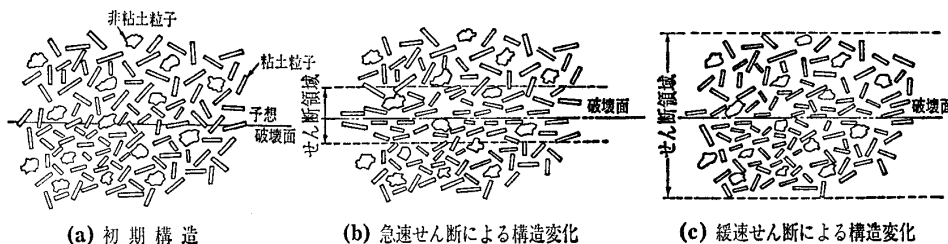


図-7.17 カオリナイト系粘土のせん断による構造変化の想定図 (Yong らによる)<sup>55)</sup>

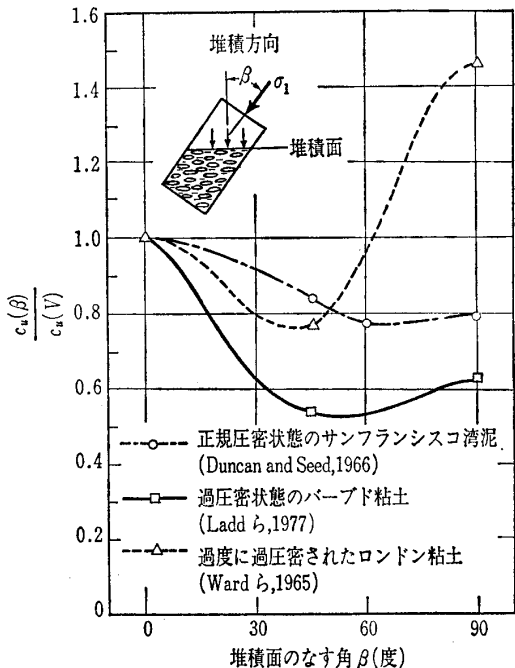


図-7.18 堆積構造による粘性土の強度異方性 (Ladd らによる)<sup>11)</sup>

合結果を明らかにし、そのほかの領域では構造変化がほとんど見られないと述べている。

せん断速度と土の構造との関係について、Yong と Warkentin (ヤンとワーケンティン, 1966)<sup>55)</sup>は三軸排水試験の結果から図-7.17の構造変化を想定している。急速せん断の場合は緩速せん断に比べて、せん断面付近の含水比変化が大きく、かつその含水比変化領域が狭い。図はこの結果に基づいて、急速せん断時に粒子のかく乱が大きく、平行配列が強くなり、逆に緩速せん断ではせん断領域は広いが、土粒子の配向は小さいとした。このような土構造は嘉門ら (1983)<sup>60)</sup>によって電子顕微鏡で観察され、 $K_0$  圧密カオリン試料の非排水せん断試験の強度差を、せん断速度がベッド径比に及ぼす影響として示している。得られた構造変化はせん断面からの距離の関数として表しうることを明らかにしている。

自然の粘性土は重力の影響で程度の差こそあるが配向性を持ち、構造的に異方状態にあり、更に土中の応力も異方状態にある。そのために主応力の方向が変わるとせん断強度に異方性が現われる。その一例を図-7.18に示す<sup>61)</sup>。図では、 $\beta=0$ 、すなわち堆積方向に一致する通常非排水せん断強さ  $c_u(V)$  で規準化された任意の角度  $\beta$  のときの

$c_u(\beta)$  を表している。一般に  $\beta \div 60^\circ$  で最小値をもつが、ロンドン粘土では特殊な性状を示している。力学的な異方性は構造異方性と主応力の回転に起因するが、両者を区別して考えることは難しい。粘性土の応力-ひずみ関係に現れる異方性は非排水せん断において間隙水圧の発生挙動に依存する割合が大きく、有効応力で整理すると異方性はほとんどみられない。したがって、逆に排水せん断ではダイレイタンス時に異方性が現れる。過圧密比との関係で示したものが図-7.19である<sup>62)</sup>。破壊時の間隙圧係数 ( $A_f$ ) の変化と規準化された非排水せん断強さ ( $c_u/\sigma'_c$ ) を示しているが、 $A_f$  の出方が鉛直方向の供試体 ( $\beta=0^\circ$ ) と水平方向の供試体 ( $\beta=90^\circ$ ) とで異なり、強度の差が  $A_f$  の差に対応していることを表している。

粘性土の構造異方性は変形の異方性に及ぼす影響が大きい (Kirkpatrick と Rennie, 1972)<sup>63)</sup> もの、有効応力パラメーター  $c'$ ,  $\phi'$  については等方的とみなしうるものである。Barden (バーデン, 1972)<sup>64)</sup> によれば、ピーク有効応力比ではほとんど再配列が生じず、大変形に至る残留領域ではじめて目にみえるせん断面が発生するとしている。このことは、さきに述べたせん断面の構造変化と矛盾しており、せん断面における構造が破壊後のすべりによる結果にすぎ

せん断面における構造が破壊後のすべりによる結果にすぎ

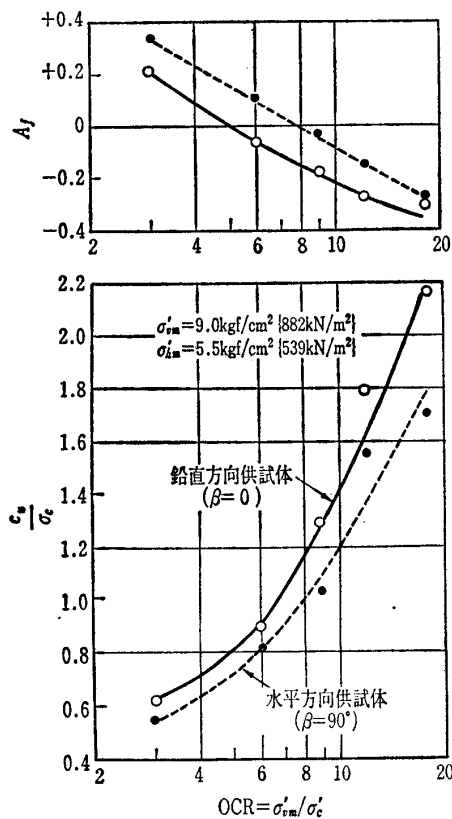


図-7.19 過圧密カオリン粘土の強度異方性と破壊時の間隙圧係数 (Duncan ら<sup>62)</sup>による)

## 講座

ないものかどうかについて、応力経路に沿った構造の動的  
研究（せん断変形中の微視的構造の変化を直接観察するこ  
と）が必要である。

## 7.7.3 締固めによる構造変化

土の締固めの過程は境界値問題として本質的に解析しえ  
ないものであるが、締固めによって得られた地盤の構造に  
ついては特徴ある挙動を示す。そこで、ここでも締固め結  
果によって得られる土構造について簡単に触れる。

土の締固め時の含水比や締固め方法によって締固めの程  
度が変化することがよく知られている。最適含水比の乾燥側  
で締め固めた場合はランダム構造に近いが、含水比が増加  
すると次第に配向性を増し、最適含水比の湿潤側では不完  
全な配向構造を示すといわれている。含水比の増加に伴い、  
全体的には配向を増すが、最適含水比の湿潤側ではランマ  
ーが土中に深く貫入するので局部的に微しゅう曲構造（粒  
子配列にゆがみが生じている）が観察された報告<sup>65)</sup>もある。  
このような構造の差異が透水性やせん断強さに影響を及ぼ  
している。特に透水係数は同じ間隙比でも湿潤側で配向度  
が高いために小さくなり、盛土のような構造物の水浸安定  
性を飽和度で規定されうることの構造的な証明となってい  
る。

## 参考文献

- 41) Terzaghi, K.: Erdbaumechanik, Franz Deuticke, Leipzig und Wien, p. 10, 1925.
- 42) Casagrande, A.: The Structure of Clay and its Importance in Foundation Engineering, Jour. Boston Soc. Civ. Engng., Vol. 19, pp. 168~208, 1932.
- 43) Bolt, G.H.: Physico-chemical Analysis of the Compressibility of Pure Clays, Géotechnique, Vol. 6, pp. 86~93, 1956.
- 44) 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.
- 45) 土壌物理研究会編：土の物理学, 森北出版, pp. 84~88, 1979.
- 46) Sergeyev, Y.M., et al.: The Classification of Microstructure of Clay Soils, Jour. Microscopy, Vol. 120, Pt. 3, pp. 237~260, 1980.
- 47) Matsuo, S. and Kamon, M.: Microscopic Study on Deformation and Strength of Clays, Proc. 9th ICSMFE, Vol. 1, pp. 201~204, 1977.
- 48) Bullock, P. and Murphy, C.P.: Towards the Quantification of Soil Structure, Jour. Microscopy, Vol. 120, Pt. 3, pp. 317~328, 1980.
- 49) Tovey, N.K.: A Digital Computer Technique for Orientation Analysis of Micrographs of Soil Fabric, Jour. Microscopy, Vol. 120, Pt. 3, pp. 303~315, 1980.
- 50) Gillott, J.E.: Use of the Scanning Electron Microscope and Fourier Methods in Characterization of Microfabric and Texture of Sediments, Jour. Microscopy, Vol. 120, Pt. 3, pp. 261~277, 1980.
- 51) Curray, J.R.: Analysis of Two Dimensional Orientation Data, Jour. Geology, Vol. 64, pp. 117~136, 1956.
- 52) Quigley, R.M. and Thompson, C.D.: The Fabric of Anisotropically Consolidated Sensitive Marine Clay, Canadian Geotechnical Jour., Vol. 3, No. 2, pp. 61~73, 1966.
- 53) 風間秀彦・石井三郎・黒崎 秀：圧密過程における粘土の構造変化、土と基礎, Vol. 29, No. 3, pp. 11~18, 1981.
- 54) McConnachie, I.: Fabric Changes in Consolidated Kaolin, Géotechnique, Vol. 24, No. 2, pp. 207~222, 1974.
- 55) Yong, R.N. and Warkentin, B.P.: Introduction to Soil Behavior, New York, Macmillan, 1966.
- 56) Mesri, G. and Godlewski, P.M.: Time-and Stress-Compressibility Interrelationship, Proc. ASCE, Vol. 105, GT1, pp. 106~113, 1979.
- 57) Morgenstern, N.R. and Tchalenko, J.S.: Microscopic Structures in Kaolin Subjected to Direct Shear, Géotechnique, Vol. 17, pp. 309~328, 1967.
- 58) Skempton, A.W.: Some Observations on Tectonic Shear Zone, Proc. Inter. Congr. Rock Mechanics, 1st., Lisbon, pp. 329~335, 1966.
- 59) Tovey, N.K. and Wong, K.Y.: The Microfabric of Deformed Kaolin, Jour. Microscopy, Vol. 120, Pt. 3, pp. 329~342, 1980.
- 60) 嘉門雅史・金剛一智：せん断変形時におけるカオリン粘土の土構造変化、第18回土質工学研究発表会講演集, pp. 407~408, 1983.
- 61) Ladd, C.C., et al.: Stress-Deformation and Strength Characteristics, Proc. 9th ICSMFE, S-O-A Report of Main Session 1, Vol. 2, pp. 421~494, 1977.
- 62) Duncan, J.H. and Seed, H.B.: Anisotropy and Stress Reorientation in Clay, Proc. ASCE, Vol. 92, SM5, pp. 21~50, 1966.
- 63) Kirkpatrick, W.M. and Rennie, I.A.: Clay Structure in Laboratory Prepared Samples, Proc. Int. Symp. Soil Structure, pp. 103~111, 1973.
- 64) Barden, L.: The Influence of Structure on Deformation and Failure in Clay Soil, Géotechnique, Vol. 22, No. 1, pp. 159~163, 1972.
- 65) Yoshinaka, R. and Kazama, H.: Micro-Structure of Compacted Kaolin Clay, Soils and Foundations, Vol. 13, No. 2, pp. 19~34, 1973.

(原稿受理 1984.1.17)