

過圧密粘土の微視的構造と一面せん断挙動

中山晴幸*

粘土のせん断挙動を微視的構造の視点から明らかにするため、構造決定条件のうち固相をカオリン粘土に固定し、液相および応力条件を変えた過圧密試料を一面せん断により試験した。その結果、微視的構造のあり方は、固相が同一でも液相および応力条件により変化し、pedの最頻度配向方向とせん断方向を変化させた一面せん断試験では、せん断特性がせん断方向により規則的に変化する傾向を得た。また、せん断中に微視的構造が乱されるせん断ゾーンの幅が、せん断方向によって著しく異なることを確認した。

Key Words: *microstructure, over consolidated clay, direct shear test, shearing zone, anisotropic clay*

1. はじめに

粘土は一般に扁平な形状をした粘土粒子の集合体である。粘土粒子は表面電荷を帯び、その周囲の水との関係から独特の物理化学的特性を示す。この物理化学的特性は、土粒子相互に斥力や引力を作用させながらそれらがある平衡状態に保ち、ベッド (ped 以降 ped と示す) と呼ばれる土粒子の集合体¹⁾を構成している。さらに ped は、それを単位とする粒子配列によって粘土の微視的構造を形成している。このような微視的構造は、それが形成される時の環境によって初期構造が決定され、その後の応力履歴によって配列構造が変化する。ここでいう環境とは、土粒子すなわち固相、およびその周囲を取り巻く液体すなわち液相を指している。固相の特性は粘土粒子自身の表面特性を、液相の特性はその中に含まれる電解質の量やその性質をいう。例えば、粘土が海水中で堆積するか淡水中で堆積するかにより、固相が同じでも形成される微視的構造は異なったものになる。また、粘土が堆積するとき、扁平な形状を持つ粘土粒子は、重力の影響によりその作用方向に対して直交方向に堆積する傾向がある。これが初期における応力の影響である。堆積が進むと、粘土に加わる応力は一般に静止土圧状態であるから異方応力を受ける。これによりさらに微視的構造が異方的になり、構造異方性を持つ粘土となる。このように微視的構造は様々な作用を受けて形成される。

粘土の力学挙動はこの微視的構造に少なからず支配され、方向によって異なる力学的性質すなわち異方性を示す。これを明らかにするために、粘土の微視的構造と力学挙動について多くの研究が行われている。その研究のアプローチ方法には、二つの流れがある。一つは、微視的構造を持つ粘土に対して様々な方向からの応力を加

え、その巨視的応答を得て連続体の挙動として捉えようとするもの、もう一方は、微視的構造そのものに注目し、pedのせん断中における再配列挙動などの微視的挙動の観察から、それら離散的な微視的挙動と巨視的な力学挙動とを結び付けようとするものである。連続体としての扱いでは、松岡ら²⁾、太田ら³⁾の研究がある。松岡らは、複合滑動面に注目した応力-ひずみ関係式を、滑動面が土の堆積面を切る角度を利用して土質パラメータを修正し、初期構造を持つ土に適用を試みた。また、太田らは応力誘導異方性に注目して、提案する限界状態曲面对する応力誘導性の関わりを明確にしようと試みた。

一方、せん断時の微視的挙動に注目した研究には、Morgenstern ら⁴⁾や Vallejio⁵⁾による研究がある。いずれも、せん断時のクラックやせん断ゾーンの発達などせん断中の微視的挙動と巨視的応答に注目した研究である。

本研究の主題は、pedの微視的挙動が巨視的応答である力学挙動に影響すると考え、それがいかに関与しているかを明らかにすることである。粘土粒子の微視的構造は初期の堆積時における環境およびその後の応力履歴によって形成される。したがって、試料には、固相、液相および応力の各条件を設定した。微視的挙動の巨視的応答への影響は、とくに過圧密粘土や固結した粘土に顕著である。本研究は、過圧密条件下での力学挙動について、粘土の微視的構造と一面せん断のせん断方向を変えることにより、微視的構造とそれがせん断を受けた時の巨視的応答である力学特性について検討したものである。

2. 試料作製と実験方法

(1) 試料条件と供試体作製

使用した粘土試料すなわち固相は、市販の工業用カオリン粘土 (ASP-100) ($\rho_s=2.65$) である。この粘土は平滑な六角形板状の結晶体により形成され、均一性がある。本実験ではこのカオリンを固相のモデルとして選択

*正会員 工修 日本大学専任講師 理工学部交通土木工学科 (〒274 千葉県船橋市習志野台 7-24-1)

Table 1 Index properties of clay samples

	W-clay	Na-clay	K-clay
Liquid Limit ω_L	69.5%	71.3%	68.4%
Plastic Limit ω_p	34.7%	32.4%	35.7%
Plastic Index I_p	34.8	38.9	32.7

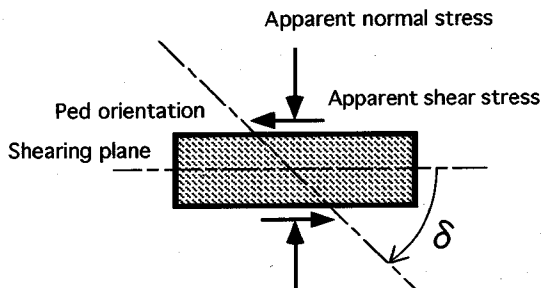


Fig.1 Test Specimens cut at various directions for direct shear tests

した。液相条件は、蒸留水および NaCl, KCl を蒸留水に溶解して 1% モル濃度とした溶液を粘土の初期含水比設定のために用いた。これらによる粘土は、蒸留水による粘土, NaCl 溶液による粘土および KCl 溶液による粘土で、本論文ではそれぞれ W-clay, Na-clay, K-clay と呼ぶことにする。Table 1 にはそれぞれの液相条件における物理的特性を示した。

供試体用試料作製方法は以下のとおりである。粉末状カオリンに液性限界の約 2 倍の含水比 150% となる水分（液相条件によって異なる溶液を使用）を加え、スラリー状になるまでミキサーで練り返した。そのときのせん断強度を電動ベーンせん断試験機で調べると、液相条件の違いによって異なり、蒸留水 > Na 溶液 > K 溶液の順となった。そのスラリー状の粘土を大型圧密装置（直径 300 mm, 深さ 500 mm）に静かに入れ、空気圧を利用して設定する圧密圧力まで 720 時間の圧密をした。圧密圧力条件は、最終圧密圧力で 784, 392, 294, 196, 117.6 kPa の 5 タイプである。圧密終了後試料を取り出し、直径 60 mm 高さ 20 mm の供試体を $\delta = 0^\circ, +30^\circ, +45^\circ, +60^\circ, -30^\circ, -45^\circ, -60^\circ$ および 90° の 8 種類と走査型電子顕微鏡（以下 SEM と表す）の観察用供試体を切り出し試験に供した。供試体の切り出し角度の表現方法は、Fig.1 に示すようにせん断方向と圧密時の最大主応力面（ped の最頻度配向方向と一致する）とのなす角を δ とした。

液相条件を変えた試料は、粘土の物理的特性に対して微妙に影響し、液性、塑性限界の変化や圧密特性の変化が見られた。物理的特性は Table 1 に示すように、Na-clay の塑性指数は W-clay に比較して多少高くなり、K-clay については逆に少し低くなる傾向を得た。

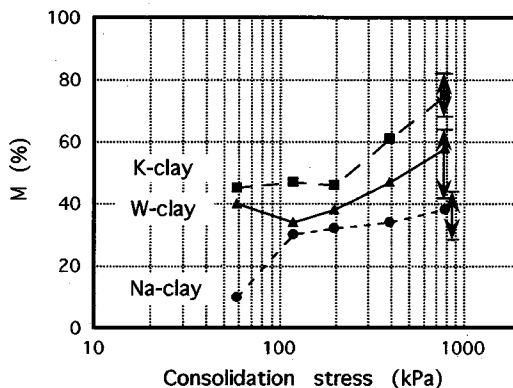


Fig.2 Degree of particle orientation

(2) 一面せん断試験

本実験で使用した一面せん断試験装置は、定圧と定体積せん断条件が可能である。载荷装置は電動ひずみ制御型式で、せん断速度を 0.25 mm/min に調節した。

供試体は、Fig.1 に示すようにせん断方向に対する ped の初期最頻度配向方向（圧密時の最大主応力面にはほぼ一致）の角度が δ となるようにせん断箱にセットした。すなわち、 $\delta = 0^\circ$ は ped の初期最頻度配向方向とせん断面がほぼ一致、 $\delta > 0^\circ$ は ped がせん断方向に対して順目、 $\delta < 0^\circ$ は逆目に配向することになる。セット後、供試体に対して圧密圧力 $\sigma_c = 24.5$ kPa で 1 時間の圧密を行った後、垂直変位が生じないように垂直応力を調整しながら、定体積条件で水平変位 8 mm までせん断した。せん断後試料を取り出し、徐々に空気乾燥して SEM 観察用の試料とした。この他にもせん断途中の状態を観測するための SEM 試料として、水平変位 2, 4 および 6 mm でせん断を中止した試料も併せて採取した。

3. 圧密後の配向度の観察

圧密後得られた試料を SEM により観察した。観察によると、粘土粒子が集合した ped は最大主応力軸に直交する方向、すなわち最大主応力面に沿うように配向する確率が高くなる。この傾向を客観的に知る方法として、配向度 M で表現する方法がある。配向度 M は粒子が完全にランダムなときに 0%、ある一定方向に完全配向しているとき 100% を示す。

Fig.2 には観察した供試体のそれぞれの ped の配向方向 α から配向度 M を計算し、平均値として表示した。 α の計測方法は第 5 章で述べる。W-clay, K-clay の配向度 M は、 $p = 196$ kPa から急激に高い値を示すが、Na-clay のそれは初期状態から圧密圧力が上昇しても他の条件よりも低い値を示す。この結果は液性限界の傾向とは逆に、K-clay > W-clay > Na-clay で、液相条件による粒子間力のあり方の差が現れたものと考えられる。間隙比の結果もこのことを裏付けている。すなわち、 p

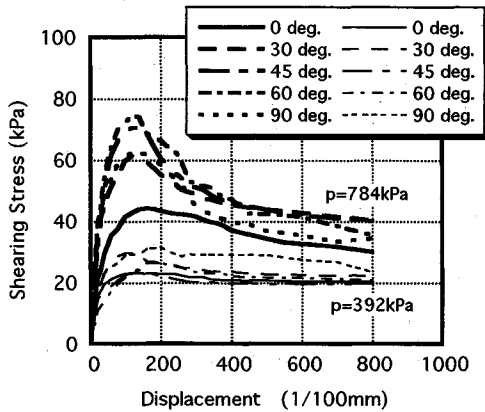


Fig.3 Comparison of shearing stress displacement relationship with different consolidation pressure of W-clay

= 784 kPaにおける間隙比は、K-clayが約1.22, W-clayが約1.28, Na-clayが約1.32で、Na-clayは圧密による間隙比の変化が少なく、試料調整時の微視的構造を保持する。また、K-clayは微視的構造の変化が他に比較して大きく再配列し易い特性を持つと考えられる。

Osipov⁶⁾は、カオリナイトおよびモンモリロナイトに対してNaCl, CaCl₂など塩基類を溶解した溶液で繰り返し圧密特性を調べた。その結果、0.5NのNaCl溶液で作製したカオリナイト、モンモリロナイトの供試体は、蒸留水やCa条件のものと比較して初期状態で大きい間隙比を持ち、その後の圧密量も圧密後の間隙比も他と比較して大きいことを報告している。この結果は、本実験におけるNa-clayの結果と類似しており、Na-clayが初期の試料調整時にある構造を形成し、圧密後もその構造の影響を保持していたことが予測出来る。

4. 一面せん断試験結果

(1) 圧密圧力の影響

一面せん断試験は、W-clayについて最終圧密圧力が784, 392, 294, 196, 117.6 kPaの5タイプ、Na-clayおよびK-clayについては、784 kPa条件のみ実施した。Fig.3には、W-clayの圧密圧力条件784および392 kPaの2条件について、 $\delta > 0$ 供試体に関する一面せん断試験の結果を示した。これら供試体はOCR=32および16であるが、いずれもpedの最頻度配向方向とせん断方向が一致する $\delta = 0^\circ$ 供試体が最も低い強度を示している。換言すれば、 δ が大きくなりpedがせん断面に対して大きな角度になるに従い、 0° 供試体よりも高い強度を示すようになる。その程度は試料作製時の圧密圧力に影響される。

圧密圧力784 kPaを受けた供試体の $\tau-D$ 関係は、392 kPaに比較してせん断初期に急激な立ち上がりを見

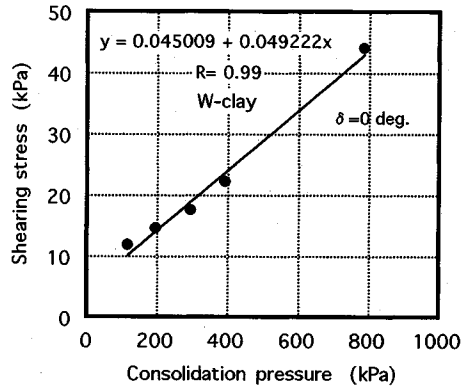


Fig.4 Relationship between shearing stress and consolidation pressure

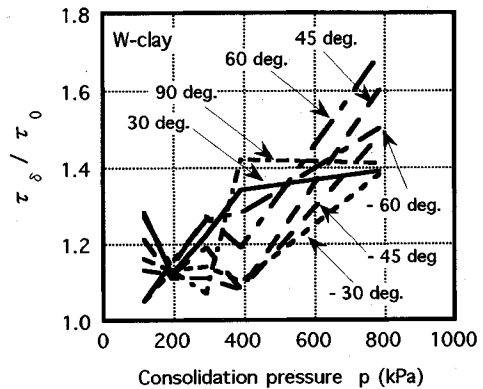


Fig.5 Relationship between shearing strength ratio and consolidation pressure

せ、約1 mmほどのせん断変位付近でピークを迎えた後、急激に軟化して残留強度に向かっている。この差は、圧密による単なる強度増加だけではなく、明らかにpedの配向程度が強度特性に関与していることを示唆している。 0° 供試体について圧密圧力の影響を調べると、Fig.4のように一次式で表すことが出来る。したがってせん断試験結果での変動は、 δ の違いすなわちせん断面とpedとのなす角度の関係がせん断過程に反映したものと考えられる。

Fig.5は、 δ 条件の違いに注目して圧密圧力条件がせん断強度に及ぼす影響を示したものである。図の横軸は圧密圧力を、縦軸はそれぞれの圧密条件における δ が異なる供試体のせん断強さ τ_δ と 0° 供試体のせん断強さ τ_0 の比(τ_δ/τ_0)を示した。圧密圧力が低い供試体は、応力比(τ_δ/τ_0)が1.2程度であるが、圧密圧力が高くなるに従い、(τ_δ/τ_0)は1.4から1.6倍と大きくなり明らかに有意な差が見られる。392 kPaでは、 30° および 90° 供試体は他の供試体に比較して逆転する結果となっているが、それ以上の圧密圧力条件では、ふたたび 45° および 60° 供試体が他の供試体に比較して(τ_δ/τ_0)も

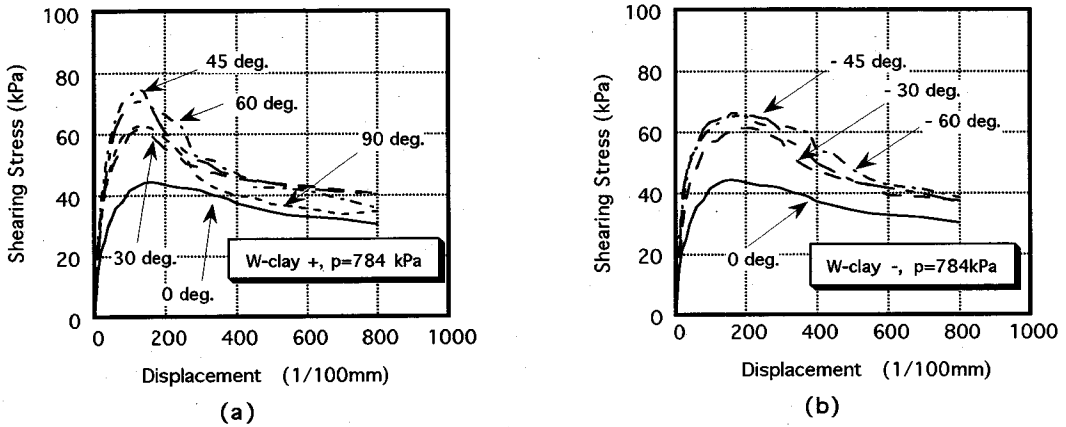


Fig.6 Comparison of shearing stress and displacement of W-clay

大きくなる傾向が見られる。

Fig.2に示すように、W-clayの配向度 M は $p=58.8$ kPaから196 kPaにかけて、 M =約40%付近でありあまり変化しない。Fig.5の結果を比較すると、その傾向がよく似ていることから、pedの配向程度がその後の異方性の発揮に影響したものと考えられる。

(2) δ の違いによるせん断挙動

Fig.6には、圧密圧力 $p=784$ kPa条件のW-clay供試体を正負の各条件別に示した。0°供試体は、双方の条件を比較するために両方に、90°供試体は $\delta>0$ 条件に繰り入れ表示した。pedの配向方向がせん断面とほぼ一致している0°供試体の τ - D 関係は、他の条件とは異なり立上りが緩やかで明確なピークを示さず、ピーク後の軟化傾向も緩やかである。

$\delta>0$ 供試体は、せん断方向とpedの配向方向の関係が順目であり、 $\delta<0$ 供試体は逆目である。これらの2条件の τ - D 関係を比較すると、明らかに異なる点を2点、共通する点を1点挙げられる。異なる点は発揮される強度の違いとピーク値付近で示すせん断挙動の違い。共通点は軟化の傾向である。軟化傾向はせん断応力に差はあるものの、 δ の正負を問わずせん断変位6 mm以降での軟化傾向について、0°供試体とほぼ同一の傾向を示す。

さらに詳細に観察すると、 $\delta>0$ 供試体はせん断初期の立上りが急激で、せん断変位が1 mmほどの位置で明確なピークを示す。さらにその後急激に軟化して、せん断変位4 mm付近で0°供試体より多少高い残留強度に落ち着く。これらはその τ - D 関係から次の3タイプに分けることが出来る。(1)最も強度が低く、明確なピークを持たない0°供試体。(2)明確なピークを持ち残留強度への軟化も急激な45°および60°供試体。(3)その中間的な特徴を持つ30°および90°供試体である。これに対して、 $\delta<0$ 供試体はせん断初期の立上りは正と同様であるが、ピークはせん断変位2 mm付近で示し、

その後約2 mm程度にわたり、ほぼピーク値付近を緩やかに維持する傾向が見られる。軟化の傾向は正のそれと異なり、滑らかな下降を見せてせん断変位6 mm付近で $\delta>0$ 供試体とほぼ同様な残留強度に落ち着く。0°供試体以外は τ - D 関係もよく似ており、 $\delta>0$ 供試体のような有意な差を見いだすことは出来ない。

(3) 液相条件の違いによるせん断挙動

Fig.7~8には、K-clayおよびNa-clayについて圧密圧力 $p=784$ kPa条件の τ - D 関係を示した。双方の試料ともW-clayと比較して興味深い結果が現れている。第1に、両条件とも δ 条件の正負についてW-clayほど明確な差が現れていない。第2に、Na-clayでは、 δ の条件による差が明確に現れない。第3にピーク後残留強度へ遷移する傾向が、W-clayと同様に各条件も0°供試体の傾向に酷似している点である。発揮されている強度は、配向度の高い順にK-clay>W-clay>Na-clayとなっているが、これは間隙比の低い順でもある。

K-clayは、Fig.7に示すように他の条件に比較して0°供試体も明確なピークを持つ結果が得られ、W-clayに対して約1.7倍の強度を示している。また、W-clayで見られたような、45°および60°供試体が高い強度を示す傾向と異なり、90°供試体が最高強度を示している。ピークを示すせん断変位の位置はW-clayよりも多少遅れており、約2 mm付近である。K-clayは K^+ の影響で試料作製時から液性限界も低く、スラリー状の粘土のベーンせん断結果も低い値を示している。さらに同一の圧密圧力でも圧密後の間隙比が最も低く、pedの配向度 M は最も高い。K-clayが高い強度を示した原因には、間隙比の違いが考えられるものの、pedがせん断面付近でface-to-faceで相対移動していると考えられるK-clayの0°供試体が明瞭なピークを示したことは興味深い。既に述べたように、K-clayでは-60°供試体を除いて正負の供試体の差がW-clayほど明瞭ではない。しかし、 τ - D 関係を詳しく観察すると、W-clayで見

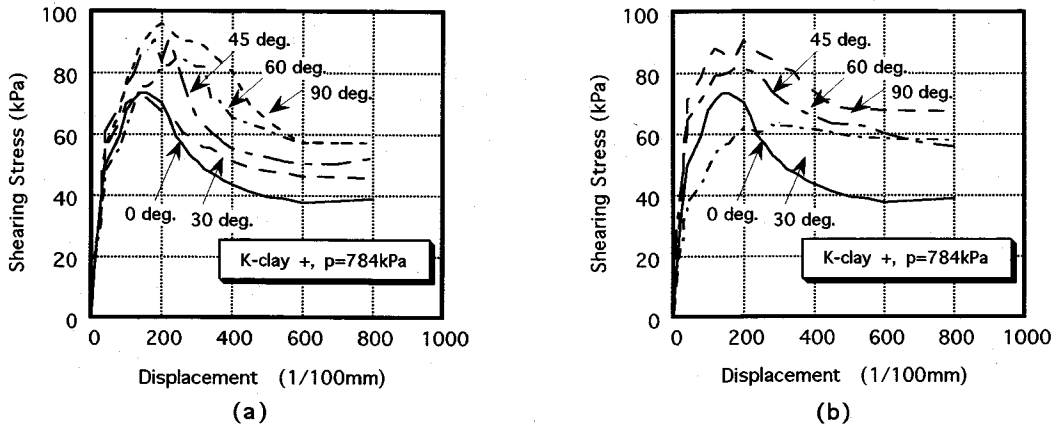


Fig.7 Comparison of shearing stress and displacement of K-clay

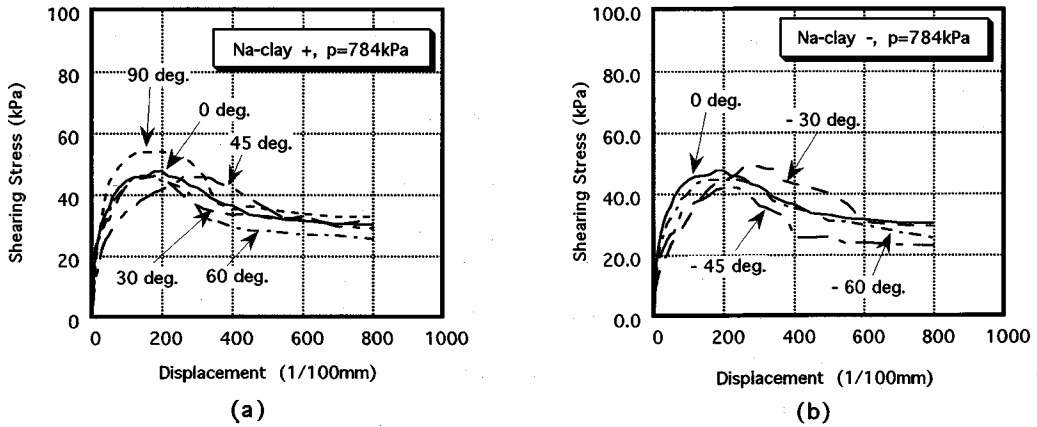


Fig.8 Comparison of shearing stress and displacement of Na-clay

られたようなピーク付近を緩やかに維持する傾向も見られる。さらに、正負両供試体共にピーク後の残留強度に達する傾向が0°供試体と同様の軌跡をたどる。しかし、この傾向はW-clayとは異なり、残留強度に達する応力が δ 条件の影響を受けて広範囲にばらついている。これは、pedの配列構造がせん断面付近の再配列挙動により、ピーク後にほぼ同様な構造に遷移したため、残留強度に至るせん断挙動がほぼ同様な巨視的応答として現れたとともに、残留強度はピーク強度の影響を受けたためと考えられる。

一方、Na-clayはW-clayおよびK-clayに比較してせん断特性に明確な差がない (Fig.8)。圧密による配向度 M の変化が他と比較して少ないNa-clayは、試料調製時に液相条件で既に形成されていた構造がある程度保持されていたと考えられる。5章に示すSEMによる観察結果は、それを裏付けている。

(4) 液相条件の違いによる強度特性

Fig.9には、液相条件別に応力比 (τ_s/τ_0) を表した。 δ の変動による応力比はW-clay>K-clay>Na-clayの

順に低くなり、とくにNa-clayは0.9から1.1の±10%のごく僅かな変動である。これから、Na-clayの持つ微視的構造がせん断方向に対して影響が少ない等方的な構造であると予想できる。これに対してW-clayは1.0から1.7まで変動し、正負供試体の変動も正+負の関係が規則的に現れている。したがって、W-clayの持つ微視的構造はせん断方向に対して敏感にせん断特性を変える異方性を持つ。一方K-clayは、-60°供試体を除けば結果は0°より強度が高いが、W-clayのような規則性は見られずに、変動も0.8から1.3とW-clayに比較してかなり低い。また、配向度、強度ともに3条件のうちでも最高にも関わらず、 δ との関係が明白ではないなど、微視的構造によるせん断特性への影響が明瞭に見られず、他の要因による影響がより卓越していると考えられる。

5. 微視的構造の観察

Photo.1は、W-clay $\delta = +45^\circ$ 供試体のせん断面のSEM画像である。pedの配向方向 α は、SEMにより

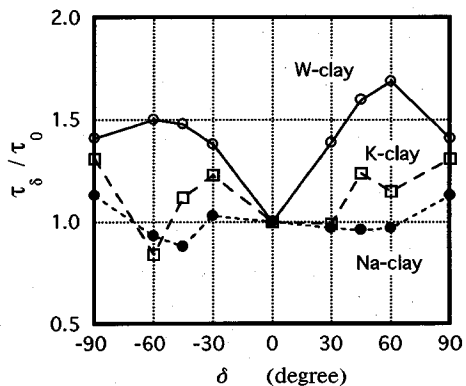


Fig.9 Comparison of shearing strength ratio

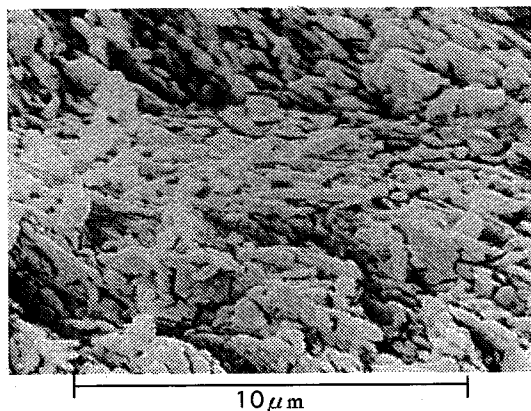


Photo.1 W-clay, +45 deg. Shearing zone $p=784$ kPa, $\times 7\ 000$

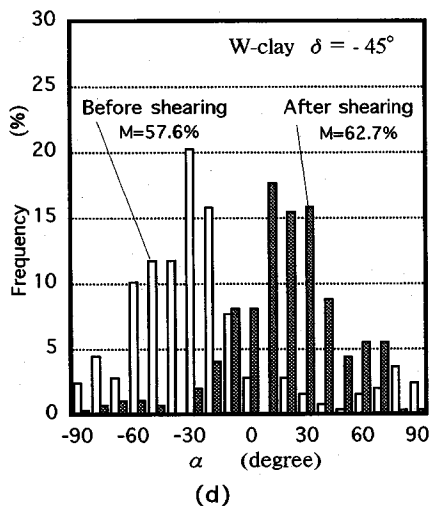
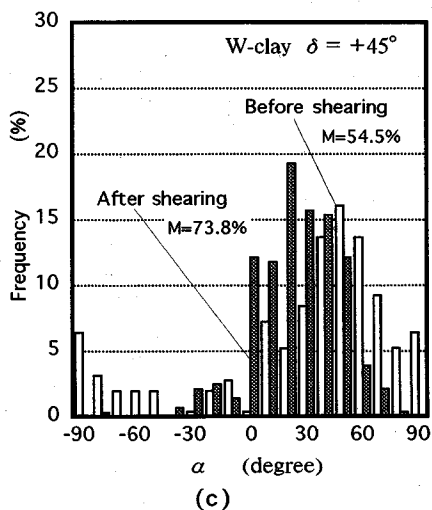
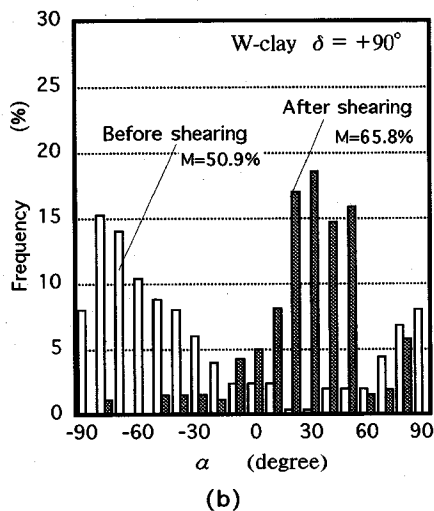
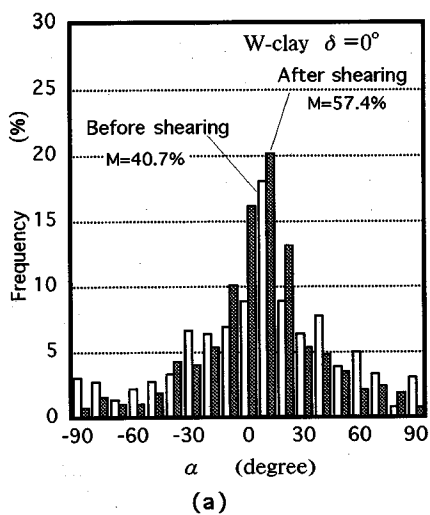


Fig.10 Distribution of ped orientated direction

得られた倍率 7,000 倍の画像を基に、デジタイザを使用して ped の長径方向と水平面とのなす角を Fig.1 に示す δ と同じ時計まわりに計測し、コンピュータに転送して集計処理した。Fig.10 (a)~(d) には、W-clay の圧密後およびせん断後のせん断面と ped の配向方向とのなす角 α をそれぞれ計測し、その頻度を 10° 間隔で集計した結果を示している。この結果は、圧密圧力 $p=784$ kPa, せん断変位が $D=8$ mm のものである。他にも異なる圧密圧力条件や、せん断を途中で中断した供試体のせん断面と ped の配向方向も観察している。

(1) せん断前後の ped 配向頻度分布

Fig.10 (a) は、 0° 供試体の配向頻度分布を示している。白は供試体セット時における予定せん断方向と ped の配向方向とのなす角 α の頻度を、黒はせん断後のせん断面付近における α の頻度を示している。せん断前には 0° 供試体の ped のうち約 36% が $0 \pm 10^\circ$ の範囲に配向していたが、せん断中に ped がせん断面方向に再配列し、配向頻度分布が $+10^\circ$ 付近に集中して配向度 M も高くなったことが分かる。ped の卓越した配向方向をとせん断面とのなす角が 0° であるから、せん断中の ped の再配列挙動はごく少ないと考えられる。しかし、結果は配向度 M が約 17% も高く、せん断面の方向より多少 +側 に再配列したことを示している。他の供試体の結果もせん断前より後のせん断面付近の ped の配向度 M が高い値を示し、せん断中の ped の再配列挙動によって、ped がある特定方向に配向する結果となっている。

W-clay の 0° 供試体以外の供試体について、せん断後の ped の配向頻度分布に注目すると、 δ 条件に関係なく、 $\delta > 0$ 供試体では ped の卓越した配向方向すなわち、最頻度の α_{mode} が $\alpha = +20 \sim +30^\circ$ 付近に、また、 $\delta < 0$ 供試体では $\alpha = +30 \sim +50^\circ$ 付近に集中する。この傾向は、圧密圧力 $p=392$ kPa の供試体についても、 $\delta > 0$ 供試体のせん断後の α_{mode} が $10 \sim 20^\circ$ と低くなるもの、ほぼ同様な結果を得た。

供試体セット時とせん断後のせん断面付近における ped の最頻度配向方向 α_{mode} の比較を Fig.11 に示した。セット時における α_{mode} は、多少のばらつきはあるがほぼ予定の角度 δ に設定されている。しかし、せん断後の α_{mode} は、 δ に関わりなく約 $+30^\circ$ 付近に落ち着く。この結果は、せん断後のせん断面付近の ped がほぼ一定方向に再配列したことを示唆している。また、 $\delta < 0$ 供試体が正のものに比較してせん断面付近における ped の再配列挙動が極端に大きいことを示す。Fig.12 に示すように、K-clay, Na-clay などは、せん断後の α_{mode} がほぼ $+10^\circ$ 付近になる結果を得た。せん断後の α_{mode} がせん断面より +側へ少し偏向することは共通した結果のようである。

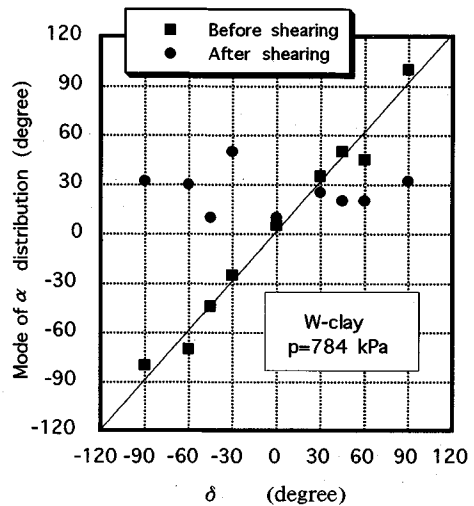


Fig.11 Comparison of before and after shearing of α mode

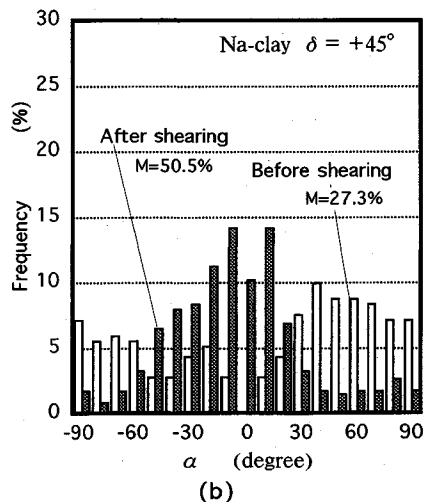
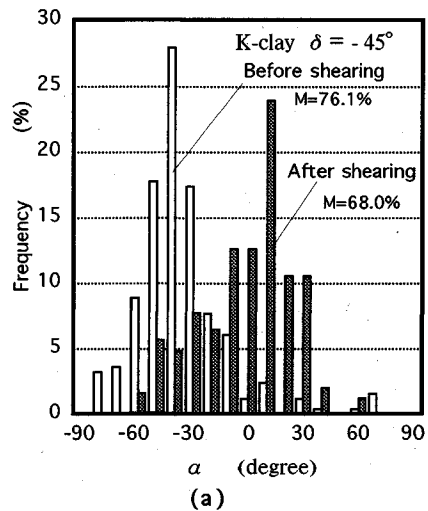


Fig.12 Distribution of ped orientated direction

Fig.12 (a) に示す K-clay は、せん断前の ped の配向度が $M=76.1\%$ と非常に高いが、せん断後の配向度は、 $M=68.0\%$ とせん断前よりも低い。これは、せん断により構造が乱されたと推察できる。これに対して、Fig.12 (b) に示す Na-clay のせん断前の配向方向は、配向度 M が極端に低く、試料作製時から他の条件のものに比較して異なる初期構造を持つことは明白である。また、せん断後の ped の再配列結果を見ても、せん断面方向へ再配列はするもののその程度は低い。

(2) せん断中の ped の再配列挙動

せん断面付近の微視的構造変化に関する観察結果から、せん断中の ped の再配列挙動が、 δ の正負で異なることが分かった。Fig.13 (a) は、せん断中の ped の挙動をせん断変位と配向度 M およびその時点での ped の最頻度方向 α_{mode} を矢印で示している。すなわち、 $\delta > 0$ 供試体 (図中白矢印) はせん断に伴う α_{mode} の変化があまり見られないが、せん断途中で配向度 M は一旦低くなり、その後のせん断変位の進行に伴って高まる。これに対し、 $\delta < 0$ 供試体はせん断変位が進行するに従い、一旦乱されて配向度 M が極端に落ち込み、さらにせん断変位の進行に伴って再配列により M が急上昇する。この傾向は程度の差はあるものの $\delta > 0$ 供試体とほぼ同様であるが、ped の最頻度方向 α_{mode} が約 120° にわたり左まわりに回転したことを示しており、せん断に伴う再配列挙動の回転角度が大きいことを確認できた。ped がせん断中にこのように大きな回転を起こすためには、せん断面付近だけの再配列挙動では不十分で、その影響領域が広いことを示唆する結果である。

せん断変位の異なる供試体のせん断面付近を SEM により観察すると、せん断変位 2 mm では明瞭なせん断面を見いだせない。この変位では、 $\delta > 0$ 供試体は既にピークを越えて軟化状態にあり、 $\delta < 0$ 供試体はピーク付近である。一面せん断供試体のせん断面を詳細に観察した Morgenstern ら⁴⁾ によれば、この程度の変位では非常に微小なクラックの進行があるもののせん断面に沿って進行していないため、せん断面付近で微小なクラックを見いだすことは困難とレポートしている。しかし、変位が 4 mm に達した $\delta > 0$ 供試体では、せん断面が確認できるようになる。この時点でのせん断面の幅は約 10~20 μm 以下の狭い範囲で、それ以外の部分では初期の配向設定が保存されている。さらにせん断が進んだ 8 mm の供試体でも、そのせん断面の幅にそれほど変化がない。

(3) せん断に伴う再配列の影響範囲

$\delta < 0$ 条件供試体のせん断面に対する SEM の観察では、あたかも正の条件のものと同じけがつかないほど全ての ped の配向方向が正方向になっていることを確認した。例えば、Photo.2 に示すような広い視野 (低倍率) の画像からは、せん断面の上下 2 mm ほどの位置で初期

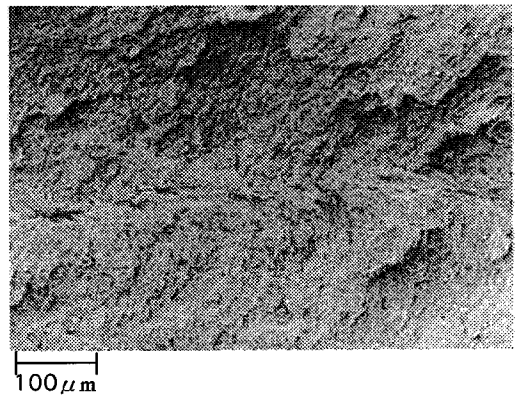
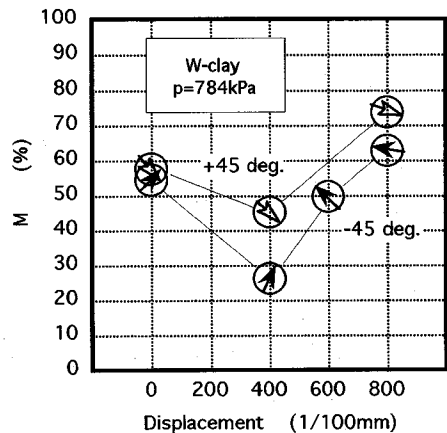
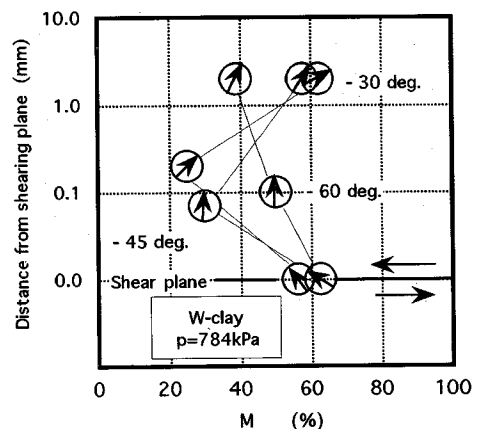


Photo.2 W-clay, -45 deg. Shearing zone $p=784\text{ kPa}$, $\times 100$



(a) Re-orientation of ped during shear test



(b) Comparison of shear zone

Fig.13 Relationship between re-orientation of ped and its degree of orientation M

配向方向が保持され、せん断面に向かってその配向構造がまるで褶曲するように曲っている様子が観察出来た。 $\delta < 0$ 供試体のせん断に伴う再配列の影響範囲は、正のものとは異なり広大な領域に及ぶようである。

せん断に伴う ped の再配列挙動の影響範囲がせん断面から上方向にどのあたりまで及んでいるかを調べた結果を Fig.13 (b) に示した。これらは全てせん断変位 8 mm まで実施した結果で、せん断面からの距離はせん断面の位置を除き対数で表示した。また、円中の矢印の示す方向は ped の最頻度方向 α_{mode} を表している。

観察によると、せん断面から約 2 mm 離れるとほぼせん断による影響が無くなり、せん断面から 0.1 mm 付近では配向度 M も低く、構造がかなり乱されていることが分かる。このように、 $\delta < 0$ 供試体のせん断に伴う影響域は、1 mm 以上の広い領域であることが確認できた。さらに、せん断によって ped が完全に相対移動していると考えられる領域をせん断面と呼ぶことにすれば、その領域はほぼ 10~20 μm 程度の狭い範囲であることを確認した。また、これらを総称してせん断ゾーンとすれば、その幅はせん断面から ± 1 mm を越える範囲である。これに対して、 $\delta > 0$ 供試体のせん断面は負のそれとほぼ同様の狭い領域を持つが、せん断に伴う明確な影響域は確認できなかった。したがって、せん断ゾーンの差は正負の供試体で約 100 倍にも達する。

(4) 微視的構造と巨視的応答について

$\delta > 0$ 供試体のせん断に伴う ped の再配列挙動は、 $\delta < 0$ 供試体に比較してごく僅かな角度である。しかし、 $\delta = 0^\circ$ に対するせん断中の垂直応力 σ_n の比を計算すると、W-clay の $\delta = 30^\circ$ 供試体を除いた W-clay および K-clay の $\delta > 0$ 供試体はせん断中に大きな垂直応力を示し、せん断中のダイレイタンスー特性が大きいのことを示唆している。 $\delta > 0$ 供試体のうち、とくに $+45$ および $+60^\circ$ 供試体については、ped がせん断方向に対して鋸の刃のように配列しているため、せん断時に ped が ped を乗り越える状況となり、大きな垂直応力が生じてせん断初期に高いせん断応力を発揮するものと考えられる。その後、せん断応力は ped の再配列に伴い急速に軟化する。構造の変化は非常に狭いせん断ゾーン内で生じるとともに ped と ped の相対的なすべりが生じ、 δ 条件に関係なく一定方向へ配向する。そのため、ピーク後の巨視的応答では δ 条件に関わらずほぼ一定の挙動を示すと考えられる。

W-clay および K-clay の $\delta < 0$ 供試体は、せん断ゾーンが広範囲である。ped の再配列挙動も広い範囲で随時進行したのと考えられ、 τ - D 関係ではピーク付近でピーク値を維持するような緩やかな挙動となっている。ピーク後の残留強度への移行では、せん断ゾーン内の ped の大きな回転よりも、むしろせん断面付近での挙動が $\delta > 0$ 条件とほぼ同様なものになる。そのため、巨視的挙動も酷似した結果が得られたものと考えられる。

Na-clay は、他の条件に比較して低いダイレイタンスー特性を示す。Na-clay の初期構造が W-clay や

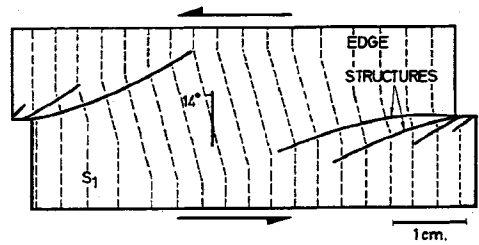


Fig.14 Rotation of structure prior to peak strength after Morgenstern⁹⁾

K-clay のそれと比較してよりランダムな構造を持つため、せん断時に一度に多くの ped が再配列するよりも、むしろ部分的に定向配列をする傾向があったためと考えられる。

(5) 既往の研究との比較

Morgenstern ら⁴⁾は、せん断初期における V-サンプル ($\delta = 90^\circ$ に相当) の微小クラックが、せん断箱の両サイドのエッジからそれぞれ約 $20 \sim 45^\circ$ の方向に発生し、最大強度に近付くと Fig.14 に示すようになる。さらにせん断が進むと、この微小クラックはしだいにせん断面に沿うと報告している。また、せん断によって生じるねじれ幅 (Kink-Band) は、H-サンプル ($\delta = 0^\circ$ に相当) の方が V よりも狭いことを示した。Skempton⁷⁾ も同様に、せん断方向に対して逆目に微小クラックが進行し、次第にせん断面が形成されることを示している。これらは、本研究で確認した $\delta > 0$ 供試体および $\delta > 0$ 供試体のせん断ゾーンの形成とその幅の違いと対応できる。

Vallejo⁵⁾ は過圧密粘土の一面せん断におけるせん断面の形成に引張応力とそれによる微小引張クラックが関与していることを指摘している。さらに、一面せん断供試体内の応力解析を FEM により解析した Kutter⁸⁾ は、微小クラックの発生方向とほぼ同方向に最大主応力が作用し、一部の最小主応力は引張応力となることを指摘しており、その方向は Morgenstern らの微小クラックの位置とほぼ一致している。Potts⁹⁾ も一面せん断箱内の供試体の応力状態を FEM により解析し、せん断初期の応力とせん断ひずみの分布の状況はこれらの結果とほぼ同様な傾向で、そのせん断ひずみ分布は最終的にせん断面より $-10 \sim 20^\circ$ 程度の偏角で生じることを示唆している。これらの結果は、いずれもせん断初期に生じる微小クラックがせん断方向に対して逆目の方向に発生すること。さらに、その微小クラックの幾つかが互いに結合してせん断面が発達することを示唆している。

本研究での SEM による観察結果では、上記のような初期微小クラックの発生や微小引張クラックを確認出来なかった。しかし、Skempton⁷⁾ が指摘するように、せん断方向に対して逆目になるような微小引張クラックの進行とせん断面の形成は、せん断面に対する ped の初

期配列を変えた本研究の供試体に対して、明瞭な ped 再配列とせん断特性の変動として現れたものと考えられる。また、本研究での $\delta < 0$ 供試体が示した広大なせん断ゾーンと広範囲に及ぶ ped の回転もこのような現象の一つとして挙げることが出来る。

6. ま と め

本研究の成果は以下のようにまとめられる。

(1) 液相条件と微視的構造について

同一圧密圧力では、液相条件による配向度 M が、 $K\text{-clay} > W\text{-clay} > Na\text{-clay}$ の順に高い。この結果は混合時にすでに液相条件によるある構造が形成されていたことを示唆している。この構造の剛性の違いは、圧密後 $Na\text{-clay} > W\text{-clay} > K\text{-clay}$ の順に間隙比が大きくなる結果となる。すなわち、構造の剛性が高い順に圧密変形が少なく、結果として間隙比の小さい $K\text{-clay}$ が高い強度を発揮した。

(2) せん断と微視的構造の変化について

せん断中の配向度 M は、せん断の進行に伴い一旦低くなり、その後の再配列挙動により最終的には高くなる。 $\delta < 0$ 供試体の再配列角度は、 $\delta > 0$ のものより非常に大きく、せん断ゾーンの幅は $\delta > 0$ 供試体の約 100 倍もの広範囲に及ぶ。また、せん断ゾーンの広さは $\tau-D$ 関係におけるピークの発生挙動と関係がある。

(3) 巨視的応答について

$W\text{-clay}$ は、 δ による影響が明白に現れ、異方性の発現も規則的。 $K\text{-clay}$ は、 $W\text{-clay}$ に比較して強度は高いが δ 条件との関係が不明瞭である。 $Na\text{-clay}$ は、ランダム構造のためにせん断特性、強度特性共に δ による影響はほとんどない。せん断後のせん断面付近における

ped の最頻度配向方向 α_{mode} は、 $+20 \sim +30^\circ$ 付近に落ち着く。残留強度への移行傾向は、せん断面における ped が構成する構造がほぼ確定する $D=4 \text{ mm}$ 付近からほぼ同様な傾向を示す。

参 考 文 献

- 1) 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.
- 2) 松岡 元・中井照夫・石崎 仁：複合滑動面に基づいた異方性土の応力・ひずみ関係、土木学会論文報告集、No. 300, pp. 57~67, 1980.
- 3) Ohta, H. and Nishihara, A. : Anisotropy of undrained shear strength of clays under axi-symmetric loading conditions, Soils and foundation, Vol. 25, No. 2, pp. 73~86, 1985.
- 4) Morgenstern, N.R. and Tchalenko, J.S. : Microscopic structures in Kaolin subjected to direct shear, Geotechnique 17, pp. 309~328, 1967.
- 5) Vallejo, L.E. : Development of a shear zone structure in stiff clays, Proc 4th Int Conf Number Methods Geotech, Vol. 1, pp. 255~262, 1982.
- 6) Osipov, V.I. : Practical applications of the clay micro-fabric studies, Proc. of IV Congress International Association of Engineering Geology, Vol. II, pp. II.239~II.251, 1982.
- 7) Skempton, A.W. : Some observations on tectonic shear zone, Proc. First Int. Congress on Rock Mechanics, Vol. 1, pp. 329~335, Lisbon, 1966.
- 8) Kutter, H.K. : Stress distribution in direct shear test samples, Proc. of Int. Symposium on Rock Fracture, Vol. 1, pp. II.6-1-II.6-12, Nancy, France, 1971.
- 9) Potts, D.M., Dounias, G.T. and Vaughan, P.R. : Finite Element Analysis of the Direct Shear Box Test, Geotechnique 37, No. 1, pp. 11~23, 1987.

(1994. 1. 14 受付)

MICROSTRUCTURE OF OVERCONSOLIDATED CLAYS AND ITS SHEARING BEHAVIOR DURING DIRECT SHEAR TESTS

Haruyuki NAKAYAMA

Direct shear tests have been done to determine shearing properties of overconsolidated clays under consideration of microscopic view. The conditions of the clay are selected as follows. Kaolin clay is using as solid phase and conditions of liquid phase are selected for following three types, $W\text{-clay}$, $Na\text{-clay}$, and $K\text{-clay}$. The conditions of consolidation pressure are also selected five conditions. The microstructure of the clays are changed by these conditions. The degrees of the ped orientation are also changed. The results of the direct shear tests are shown different shearing characteristics that are selected different direction of ped (clay particle's orientation). The width of the shearing zone that the specimens with minus direction of ped are shown greater than plus conditions.