

土のせん断破断面の微視的観察

嘉門 雅史・前川 憲治

MICROSCOPIC OBSERVATION OF SHEAR PLANE OF SOILS

By *Masashi KAMON* and *Kenji MAEKAWA*

Synopsis

Soil microstructures play important roles on the soil behaviour. The observation technique with a SEM (Scanning Electron Microscope) is considered as an effective method to study microstructure of soils. The object of this research is to study a microscopic deformation behaviour of clays by using the USSBT (Ultra Small Shear Box Test), which was developed by the author.

To observe clay specimens under the wet condition in SEM, it is necessary to replace pore water with the proper material that is bearable under a high vacuum condition. Polyethylene Glycol was introduced for it and a suitable replacing technique for the undisturbed sample was established.

Many effective data were obtained through kaolinite samples. They make possible to verify the past assumption about shearing deformation patterns, some of which are shown the shear band and the special particle movement in it.

1. はじめに

各種の土木構造物の基礎、あるいはその構造材料となる土の力学的挙動を正確に把握することは土質工学上最も重要な課題である。しかし、対象となる土の多様性により、その実態は非常に複雑であり、またモデル化の一般性についてはいままお多くの課題を残している。

通常、土は連続体としてその挙動が把握されているが、本来土は粒状体 (granular material) であり、ダイレイタンスー特性や異方性、せん断面 (shear band) 発生等、巨視的な立場からのアプローチだけではなかなか説明のつかない事柄が多く知られている。特にせん断面の発生挙動は、土の巨視的な強度特性にも大きな影響を及ぼすものであり、土のせん断挙動メカニズムを解明するためにも、巨視的な立場からのアプローチのみではなく、微視的な土の粒子構造、及びその変形機構の研究が重要となる。このような微視的なアプローチは、連続体力学での取り扱い上の大きな問題であるせん断面発生問題の理論的発展に欠くことができず、かつ、現在の連続体力学、粒状体力学による土のモデル化について、その適性、限界等の再検討を試みる上でも大変興味深い。また、より高度なモデル形成、構成式に関する研究と相互補完し合い、土の挙動をより現実に近い形でシミュレーションすることに貢献するものである。

微視的な立場からの土への探求は、近年の電子顕微鏡等の電子機器の発達により、多くの成果が得られている。本研究では、これまでの成果を踏まえ¹⁾、粘性土を電子顕微鏡鏡体内で一面せん断させる方法を確立し、そのせん断破断面における土粒子の変形挙動を微視的に直接観察して、土の微視的な変形機構を解明することを目的としている。

本研究では、均一で作成・観察が容易な試料として、粉末カオリンを圧密して作った供試体と、より自

然な状態の試料として、現地から乱さない状態で採取された洪積粘土の2つを対象とした。これらの試料を走査型電子顕微鏡 (Scanning Electron Microscope; SEM) 中に導入された、超小型せん断試験機 (Ultra Small Shear Box Test; USSBT) で一面せん断し、そのせん断変形挙動を連続的に直接観察し、粘性土のせん断挙動を微視的に考察することを目的としている。

このために、本研究では従来から行われている間隙水の置換の問題、すなわち、間隙水をポリエチレングリコール (Polyethylene Glycol; PEG) に置換する方法を乱さない状態で適用する方法の確立を図り、粘性を付与した状態 (通常の湿潤状態の近似的状態) での現地採取の不攪乱状態の粘性土の SEM 観察を可能にしている。さらに、上記の方法で作られた供試体を USSBT でせん断し、SEM 観察結果を受け、粘性土におけるせん断帯の発生・形成・局所化の問題について考察を加えている。

2. 土の構造の基礎的変形挙動

2.1 圧密による構造変化

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。

圧密挙動をベッドとポアの変形の見方から、一次圧密はベッド間のマクロポアからの水の浸出であり、一方、二次圧密は主としてベッド内のミクロポアからの水の浸出であり、ベッド内部に再配列が生じる時間遅れを伴う現象であると考えられる²⁾。

粘土の微視的構造や異方性が圧密特性に影響することはよく知られている。また、圧密応力によりベッドはそれに垂直な方向に配向し、応力が高く、時間が長いほどその配向性を増す。ただし、完全配向に近い状態にするには極めて高い応力と長い時間を必要とする。

2.2 せん断による構造変化

(1) 摩擦と粘着力²⁾

土のせん断強さ τ は一般に Mohr-Coulomb の破壊条件式

$$\tau = c + \sigma \tan \phi$$

で示される。右辺の第1項の c が粘着力、第2項が摩擦力を表す。すなわち、摩擦力は垂直応力 σ に比例し、その比例定数が内部摩擦角 ($\tan \phi$) である。この摩擦を示す ϕ は土粒子が相互に移動するときに発生するものであり、Rosenquist は、これを粒子間のかみ合い (Interlocking) 現象として次の2つを挙げている。

① 巨視的インターロッキング

土粒子の回転や移動に伴う摩擦であり、破壊面と垂直な方向にも土粒子が移動し、破壊に先立って、変形による体積変化、すなわちダイレイタンスが発生する。

② 微視的インターロッキング

土粒子表面の凹凸によるかみ合いであり、滑り摩擦と呼ばれるものである。土粒子の見かけの接触面積は真の接触面積より格段に大きい。そのため、真の接触面積が負担する応力は、土粒子材料の弾性限界をはるかに越えるものとなり、その部分で塑性流動をきたして微視的な粒子破碎を生じたり、高い圧力と変形のため粒子間に凝着をきたす。

以上のような砂質土における摩擦を粘性土へ展開するためには、土粒子・水系の電気化学的作用とセメンテーション作用の評価が必要となり、微視的挙動の複雑さの原因となっている。

粘性土における摩擦を Fig. 1 のような4つの種類に分けて説明される。また、粘性土では土粒子の外側に吸着水膜が存在するので、粒子間の直接の接触とは異なることに注意しなければならない。一方、粘着力は粒子間の物理化学的な力によって生じる。Lambe は粘着力のいくつかのタイプを Fig. 2 のように

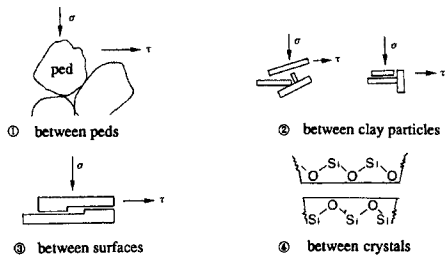


Fig. 1. Frictional forces of clay.

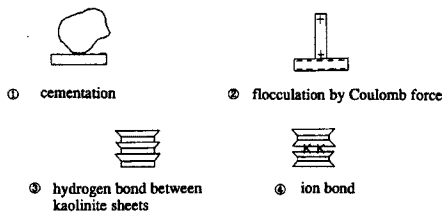


Fig. 2. Cohesion of clay.

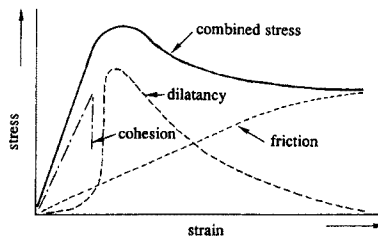


Fig. 3. Components of shear resistance.

スケッチしている。①のセメンテーションは、天然の粘土では、炭酸塩、酸化アルミニウム、ある種の有機物がある種の接着剤として働く。④のカリウム結合は乾燥によって非置換性となり、これを永久的な強さに変える。このようなせん断抵抗と変形の関係は、せん断抵抗を摩擦成分、粘着成分、体積変形による成分の3つに分けられるから、その発現状況を Fig. 3 のように定性的に示しうる。

(2) せん断による微視的構造変化

一面せん断のせん断面発生過程について Skempton と Petley は、5つの段階に分けて説明している³⁾。

① ピーク強度以前

連続的だが不均一なひずみが発生する。

② ピーク強度直前

せん断方向に向かって $10^\circ \sim 30^\circ$ の雁行状の不連続面、すなわちリーデルせん断面 (Riedel shears) が発生する。また、たまに共役せん断面が観察される。

③ ピーク強度直後

リーデルせん断面に沿ったせん断の方向と巨視的なせん断方向が一致せず、せん断の進行が阻害されるため、せん断方向にほぼ平行な新しいすべり面ができる。また、せん断方向から 160° 程度傾いた突き上げせん断面 (Thrust shears) が形成され始める。

④ せん断応力減時

これまででできた不連続面が連なり、波形状の主せん断面が形成される。

⑤ 残留応力時

変位の継続により、主せん断面が平坦になっていく。一度主せん断面が生成されると変位はそこに集中し、その他の部位には変化を生じない。

また土の構造異方性に基づくせん断変形機構としては、土粒子の配向方向に垂直にせん断された供試体の場合 (一面せん断試験)、以下に述べるような変形挙動が仮定されている。

① せん断初期より、比較的広い領域において土粒子の平均配向方向が回転し始める。

② せん断箱の端部では、せん断変位が大きくなるにつれ新しい不連続面が発生し、水平に対する角も小さくなっていく。最終的に、ピーク強度を越えてから1本の不連続面となる。

③ ピーク強度直後では、土粒子回転領域中に局所的なゆがみ (水平からの傾きが平均 12°) が現れ、これが幅 $200 \sim 300 \mu\text{m}$ のせん断面として成長していく。このとき同時に幅数 μm 以下の微小な不連続面が多数に現れる。

④ この微小な不連続面中の粒子は、一様にその不連続面に対して $0^\circ \sim 10^\circ$ 程度の配向を示している。

⑤ さらにせん断変位が大きくなると、せん断面が統合されて連続したものとなる。このときせん断周辺に発生する微小な不連続面はその発生範囲を広げる。

⑥ 残留応力時のせん断面は波形状をしているが、さらなる変位により水平に近づく。

一方、配向方向に平行にせん断されたものでは、垂直にせん断されたものと比べてせん断面の影響が狭く、ピーク強度前の土粒子の回転はあまりみられない。これに代わって、土粒子のよれ (kink band) が発生する。

さらに、粘性土のせん断過程をSEMで直接観察して、上述の仮定を検証しようとした研究結果を以下に紹介する。

まずToveyとWongは、カオリンを用いて、その圧密・せん断変形による微視的な構造変化を電子顕微鏡レベルで観察している。この報告では、せん断層以外の領域では構造変化がほとんどなく、逆にせん断層内では複雑な破壊挙動がみられるとしている⁴⁾。

嘉門らは、USSBTによる一連の研究¹⁾により、粘性土の変形挙動を直接観察して、せん断によるベッドの変形挙動は、回転、層状粒子内の滑り、板状粒子の破碎の3つに分類している。さらに、ポリエチレングリコールと乾燥粉末カオリンを混合、それを試料として用いて、粘性を付与した状態で一面せん断試験を行い、その変形挙動を直接SEMで観察している。こうした粘性土では、その変形が弱面に集中していき、滑り面に成長していく様子が観察されている。これはせん断初期にせん断面周辺にひずみが蓄積されるためであり、滑り面発生によりその部分にひずみが集中していく様子を明確にしている。

3. 変形挙動の微視的直接観察の方法とその改良

3.1 超小型せん断試験機とその改良

本研究では超小型せん断試験機USSBTを用いたが、その詳細は既報のとおりである¹⁾。ここでは試験機の改良点を示すにとどめる。改良USSBTの平面模式図をFig. 4に示す。

ホルダー部とせん断箱に分かれ、せん断箱内で供試体を圧密、もしくはPEG置換した後、ホルダー部にセットしてせん断試験、荷重載荷装置、各種測定装置等の基本的構成は同じである。USSBTはひずみ制御型であり、せん断速度は $75\mu\text{m}/\text{min}$ と $37.5\mu\text{m}/\text{min}$ の2種が選択できたが、基本的に粉末カオリンによる供試体では $75\mu\text{m}/\text{min}$ 、洪積粘土による供試体では $37.5\mu\text{m}/\text{min}$ の速度でせん断している。このせん断変位をせん断方向のポテンシオメーターで測定する。また、せん断抵抗はモーターで動くせん断側ホルダーがせん断箱を押す際の抵抗をロードセルで測定する。

垂直荷重はペロフラムシリンダーを用いて窒素ガスの圧力で載荷し、レギュレーターで制御、垂直方向のロードセルで測定する。また、供試体の垂直載荷方向の長さの変化をペロフラムに剛結したポテンシオメーターで測定する。

なお、この試験機に使われているペロフラムは、SEM鏡体内の空間的制約のため単筒式である。この場合、SEM鏡体内を真空にすると、大気圧差分の荷重が不可避免的に作用するので、同規模のカウンターペロフラムを逆方向に設置し、この死荷重を相殺するように改良した。

3.2 供試体の作成方法とその改良点

本研究では、2種類の試料を用いている。

1つは、供試体内の均質性を、一連の供試体の同質性・再現性、供試体作成過程での攪乱の排除を重視した人工圧密粘土の試料である。土質材料として乾燥粉末カオリン、間隙流体としてポリエチレングリコール(PEG)を用いている。

もう1つは、より自然状態に近い試料として、大阪港よりボーリング採取した洪積粘土を成形し、その間隙水を

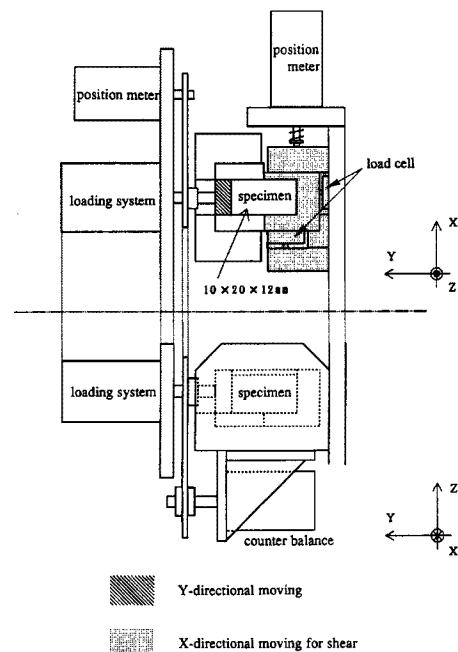


Fig. 4. Direct shear part of USSBT (modified).

PEG に置換して用いている。

(1) 粉末カオリン圧密試料による供試体

本研究で人工試料として用いた土材料は、乾燥カオリン (ASP 400; Engelhard 社製の工業用カオリナイト) 粉末である。試料の基本物性は既報のとおりである。

人工圧密試料の USSBT への試料として、乾燥粉末カオリンと PEG を混合して圧密した。以下にその作成方法を示す。

① PEG と粉末カオリン、及びカートリッジ純水器を通した純水を、100:100:20 の割合でよく混合し、スラリー状にする。純水を加えるのは、PEG だけでは粘性が強く、試料が十分に混合できないからである。

② 12 時間程度乾燥室内 (40°C) に放置、養生する。

③ 真空中に曝し、試料中の水分を常温沸騰させて除去する。PEG 溶液中の水分が気化するとき、大量の気化熱と反応熱が奪われ、試料の温度が下がり、常温沸騰の阻害要因となる。よって、途中何回か試料を暖めなおし、さらに真空中に曝して、常温沸騰を促し、試料中の水分を取り除く。

④ 高さ 6.0 cm の特製圧密リング (Fig. 5) に、せん断箱及び試料を投入し、圧密する。

⑤ 圧密荷重は 0.05 kgf/cm² から始め、段階的に 12.8 kgf/cm² まで載荷する。載荷間隔は一次圧密終了時間の約 10 倍、2 時間以上とする。ただし、最終載荷は 24 時間以上とする。

⑥ 全載荷終了後、0.1 kgf/cm² で 24 時間以上膨潤させる。

⑦ 供試体が入った状態で、せん断箱全体をカッターで切り出す。

一次圧密終了を示す圧密度 90% までに要する時間 t_{90} が、1.6 kgf/cm² 載荷時で 13 分、同 12.8 kgf/cm² 載荷時で 3 分となった。これはせん断箱の入っていない状態と比べて 30~40% 早い。また沈下量は、せん断箱が入っている方が 10~15% 小さい。また、粉末カオリンと純水を 1:1 で混合した圧密条件と比べると、一次圧密終了までに要する時間は、PEG を用いた試料の方が十数倍かかっている。

(2) 自然洪積粘土による供試体

用いた洪積粘土は、建設中の関西国際空港ターミナルビル直下 (C. D. L. - 76.8 m ~ 78.8 m) から採取された、比較的均質な洪積粘土 (Ma 11 層) である。なおこの粘土は、有効土被り圧が 3.6 kgf/cm² から 8.1 kgf/cm² へ変化する埋立の影響を受け、圧密途上にある。基本的特性を以下に示す。

土粒子密度	$\rho_s = 2.72 \text{ g/cm}^3$
自然含水比	$w_n = 46.9\%$
初期間隙比	$e_0 = 1.24$
飽和度	$S_r = 103.0\%$
液性限界	$w_L = 68.4\%$
塑性限界	$w_p = 29.5\%$
塑性指数	$I_p = 38.9$
圧縮指数	$C_c = 0.556$
圧密降伏応力	$p_c = 4.23 \text{ kgf/cm}^2$
粒度分析	砂分 0%, シルト分 56%, 粘土分 44%

供試体の成形はカッターを使った手作業によった。その方向は Fig. 6 に示すように、地平面に垂直に

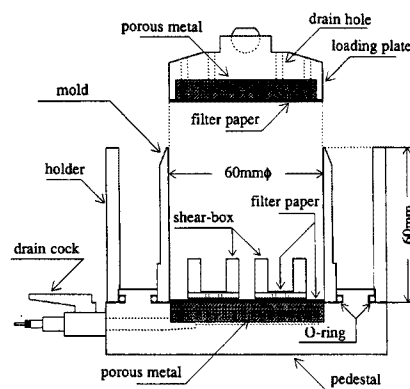


Fig. 5. Consolidation mold.

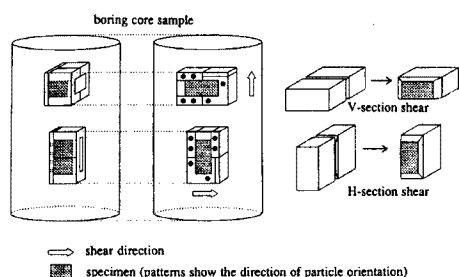


Fig. 6. Specimen for USSBT of diluvial clay sample.

せん断面が入るもの（これをV断面せん断と称する）、水平方向にせん断面が入るもの（これをH断面せん断と称する）の2種類である。

供試体は、観察面を保護するため、まず $20 \times 10 \times 24$ mm程度の大きさに切取り、置換作業を終えてからせん断箱に隙間なくセットできるように丁寧に成形し、最後に、図のように切込みを入れて観察面を割り出した。

自然の粘土を乱さずに、その間隙水をPEGに置換する方法として次の3つが考えられる（Fig. 7）。

- ① 試料をPEG中に完全に沈めて、そのまま真空容器内に入れ脱気し、間隙水を常温沸騰させることにより急速置換する方法。
- ② 試料を一面だけ大気に曝しながらPEG中に沈め、乾燥室（約 40°C ）に入れて間隙水を徐々に蒸発させながら、PEGの浸透を待つ方法。
- ③ 試料をPEG中に完全に沈めて、PEGの吸湿力と浸透力をたよりに置換を待つ方法。

上記の3つの方法の中で、①は簡単であるが、置換中の変化が激しすぎて土の構造になんらかの影響があると予想されるので、この方法は採らなかった。また、②では、間隙水の蒸発が速すぎ、試料の内部が明らかに置換が不完全である場合がしばしばあったので、この方法も採らなかった。③の方法では時間は掛かるが、試料を沈めたPEGを容器ごと乾燥室（約 40°C ）に入れ、PEGに染み出した間隙水を蒸発させることに努め、さらに、水分を含むようになるPEGをこまめに交換することによってPEG置換を促進し、置換時間を短縮するという改善策を採り、この方法を採用した。

なお、乾燥室を利用する利点としては、上記の染み出した間隙水の蒸発の他に、温度上昇によるPEGの粘性の低下、拡散現象の活発化が挙げられる。また交換したPEGは、真空容器中に入れて常温沸騰させ、PEG中に溶出した水分量を推定し、常温沸騰しなくなった置換PEGを得て、置換終了の確認とした。

最終的にSEMの安全管理上、PEG置換後試料を数時間真空中に曝してから試験を行った。なお、置換には20回程度のPEG交換を行い、2週間前後時間を要した。

3.3 USSBT試験による測定方法と巨視的せん断結果

(1) 諸データの定義・測定方法

ここで用いる諸データの定義・測定方法は既報のとおりである。測定機器の問題点として、以下の諸点を挙げねばならない。

荷重測定用に使用したロードセルは、その中を微小電流が流れているが、荷重を掛けることにより電気抵抗が変化を起こす。この変化の割合をもって荷重の大きさを測るのだが、この電気抵抗は熱によっても

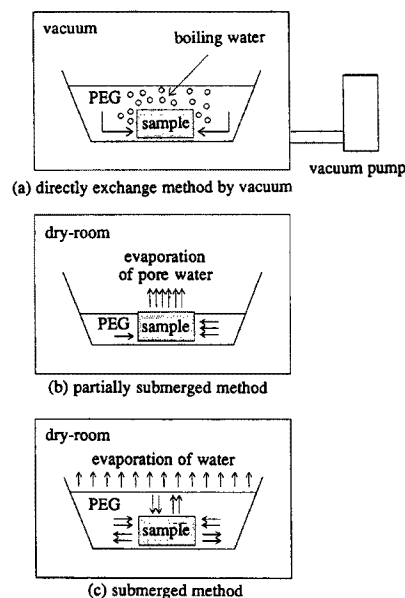


Fig. 7. Pore water displacement methods by polyethylene glycol.

変化する。つまり、ロードセル内を流れる微小電流により微量の熱が発生し、その熱がロードセルの測定精度を狂わすことになる。通常ロードセルを大気圧下で使用する場合、この微量の熱は大気中に放出され、発生する熱量と放出される熱量が均衡し、定常状態に到達する。実験進行中にもその定常状態が大きく崩れることはなく、よい精度で荷重が測定される。しかし、真空中という特殊な条件でロードセルを使用する場合、発生した熱が逃げていく場所はロードセルに接触している物質に限られ、この接触状態の小さな変化でもそれまでであった定常状態が大きく崩れる。よって、その測定精度の信頼性が大きく揺らぐことになる。

本研究では、せん断試験開始直後に荷重データの説明のつかない動きがみられた。これは上記の理由によるものと考えられる。

同様の理由により、荷重データの原点（荷重が掛かっていない点）を判断するのが難しく、本研究では、せん断終了直後にモーターを逆回転させ、理論上荷重が掛かっていない状態をもって一律に原点とした。しかし、垂直方向の荷重はこういった処置が採りにくく、測定精度に問題を残している。

3.4 巨視的せん断データ

カオリン試料を用いた供試体のせん断変形特性は、既報と同様おしなべてせん断変位—せん断応力曲線は緩やかなカーブを描いてピーク強度に達した後、残留応力時でもその値はあまり変化していない。これは一般的な粘性土の挙動を示しているとみられ、またその再現性もあると考えられる。

垂直方向応力では、その曲線一般にみられることだが、せん断初期に応力の低下がみられ、その後せん断が進行し破断面が発生する所に再び初期の垂直応力と同程度かそれを越える応力が発生する。

この時垂直方向変位がほぼ一定であったことを考慮すると、せん断初期には若干の負のダイレイタンスが発生した後、破断面発生時期になって、急速に正のダイレイタンスが発生したとも考えられる。このように垂直方向応力は一定ではなく、垂直応力載荷ベロフラムが有効に作用していないことが推察される。

洪積粘土を用いた供試体のせん断変位—せん断応力曲線を Fig. 8 に示す。これは配向方向に垂直にせん断（Vせん断）した供試体のデータである。なお、図中の試料番号は試験した供試体に付した番号である。

供試体を手作業で作成したため、供試体とせん断箱との間、またはせん断箱とせん断箱ホルダーの間に隙が存在し、せん断応力の立ち上がりがせん断変位に対し遅れているが、せん断初期の異常値を除くとほぼ似たような特性が現れている。このことより、洪積粘土を PEG 置換した供試体においても、巨視的には再現性のあるものと考えられる。ピーク強度を越えてからの残留応力状態においても、応力の低下はあまりみられず、乾燥粘土の脆性的な破壊挙動ではなく、粘性土の破壊挙動を示している。また、配向方向に平行にせん断（Hせん断）した供試体では、Fig. 8 と比べせん断応力の立ち上がりがずれ、全体的なせん断強度が小さくなっている。このせん断強度の違いは、供試体内に堆積時から存在する弱面、もしくは層理面と呼ばれるものに影響されていると考えられる。なお、Fig. 8 の No. 73 の供試体に一時的なせん断応力の低下（矢印）がみられるが、これはせん断途中で写真撮影を行うためせん断を一時中断したためである。

Photo 1 に洪積粘土を用いた供試体の破断面全体図を示す。倍率は 20 倍である。写真の上下にある黒い平面の帯は、観察面を割り出すときにカッターで入れた切り込みである（Fig. 6 参照）。

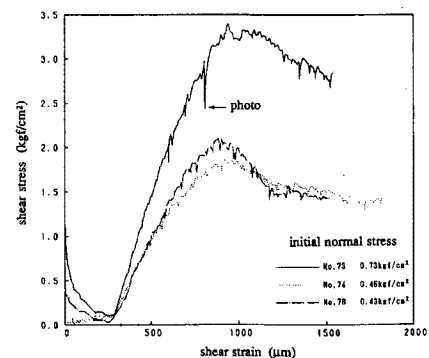


Fig. 8. Characteristics of shear strength (diluvial clay; V-section)



Photo 1. Riedel shear plane (diluvial clay; V-section).

せん断前よりせん断方向に垂直（配向方向）に弱面が存在しているが、せん断途中の破断面は、既在の弱面に沿って発生するのではなくそれに垂直に発生している。せん断初期には比較的明確に雁行状のリーデルせん断面が現れている。また、リーデルせん断面はせん断応力がピーク強度の50～70%に達したころに出現する。

なお、カオリン試料でみられたせん断部の浮き上がりは、洪積粘土による供試体ではほとんど発生しない。これは洪積粘土の方が粘着力が大きく、その粘着力により浮き上がりに抗しているものと考えられる。

4. 粘性土のせん断破断面の微視的挙動

USSBTによって得られたせん断破断面の微視的観察結果は以下のとおりである。

ビデオテープに収録されたSEM画像を、VTRからポラロイド写真へデジタル印刷したものを用いて解析を行った。いずれも縦(X)方向がせん断方向（せん断方向は、写真中上向き）、横(Y)方向が垂直荷重載荷方向である。また、データ整理に当たっては、同一データの写真群には同一の写真番号を与え、せん断変位の早いもの（時間的に早いもの）から、順にa, b, cとアルファベットを付けた。

微視的挙動については、写真中に矢印で示した土粒子の相対位置を各写真ごとに同一記号でプロットすることによって相対変位を図示している。相対変位の基準点として、基本的に左右に2つの点A, Bを取っており（必要ないときは点Aのみ）、それぞれについて相対変位を

図示した。図中の縦横（縦がX方向、横がY方向）が写真と一致しており、縮尺は縦横同じで、図中にそのスケールを示している。また、図中の粒子の動きと同時期の巨視的なせん断変位を図の右側に記号付きの矢印で示している。なお、巨視的な相対変位が図より相対的に大きく、1本の矢印で表示できないときは、複数本に分けて示している。

ここでは、せん断面、破断面、せん断帯（層）、せん断域という術語を用いているが、それぞれ以下のように定義している。

① せん断面

せん断挙動中にひずみが集中し、ひずみの不連続面、さらには変位の不連続面と変化した面、またはその潜在面。

② 破断面

せん断面のうち、特に不連続面が間隙を有し、視覚的にも明らかな亀裂が生じているもの。

③ せん断帯（層）

ひずみが集中していく過程で、ひずみの不連続面に囲まれ、変位の集中したせん断面から強い影響を受けている範囲。

④ せん断域

せん断全体を通じて、土粒子の配向方向の回転や微小なひずみなどの影響が現れる領域。

4.1 カオリン試料

粉末カオリンを用いた供試体による試験では、せん断面の発生・成長過程や、せん断域の範囲、またそのせん断域の大きさに及ぼすせん断速度の影響などを中心に観察している。

(1) せん断面から離れた位置での粒子挙動

せん断面から離れた位置での粒子挙動を観察した図を、通常のせん断速度 ($75 \mu\text{m}/\text{min}$) のものを Fig. 9 に示す。図では写真右端からせん断面までの距離が約 2 mm である。明らかに相対変位の発生がみられ、せん断の影響が出ていると考えられるが、これ以上せん断面から離れた位置での観察は、USSBTの機能上できないので、せん断域の直接の確認はできなかった。しかし、点 A から $500 \mu\text{m}$ 離れた粒子の相対変位が巨視的なせん断変位の約 $1/10$ なので、図の周りでも図の中と同じひずみ状態が連続しているとすれば、せん断域から約 5 mm あればよいという計算が成り立つ。

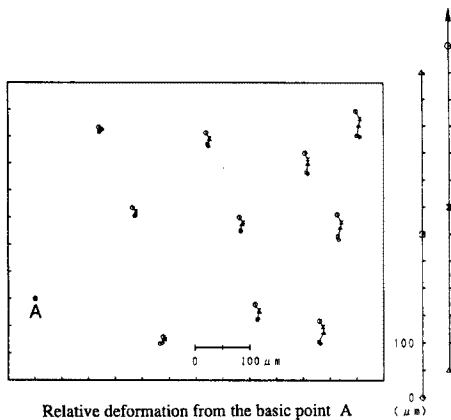


Fig. 9. Particle movement far away from shear plane.

図中では、基準点 A からの Y 軸方向距離と粒子の相対変位がほぼ比例関係にあると考えられ、その他の観察結果でも同様のことがいえるので、図に納まる程度の範囲 ($500 \mu\text{m}$ 四方) で考えるときは、せん断初期のひずみはほぼ一定であると考えられる。

せん断初期の粒子挙動の模式図を Fig. 10 に示す。図中の○は、せん断開始前の粒子位置を表し、●はしばらくせん断させた後の粒子位置を表す。固定側のせん断域外では、粒子の相対変位が現れていないことが示されている。

(2) せん断面発生過程

せん断初期からせん断面が発生するまでの全体図を追った相対変位図を Fig. 11 に示す。図の d (鼓印) までに他

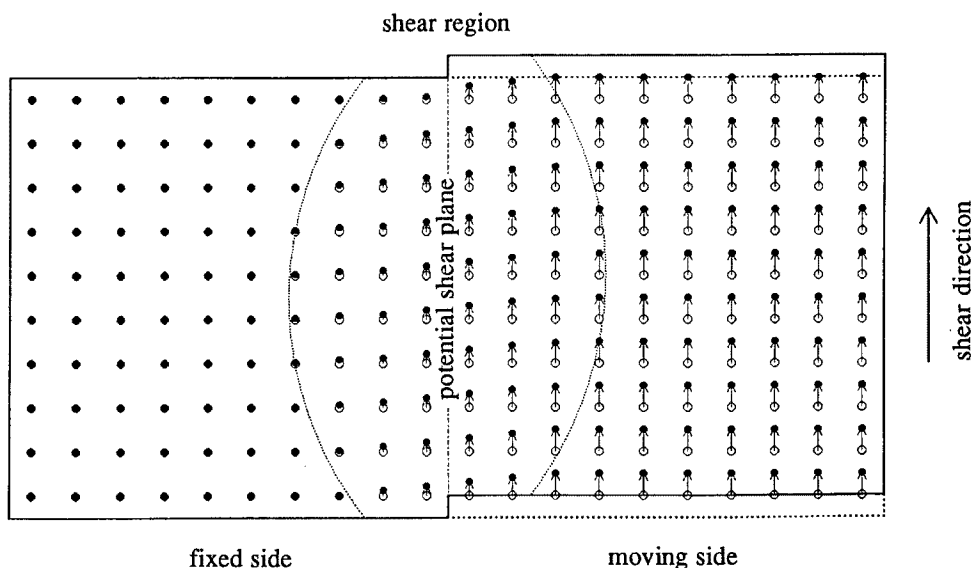


Fig. 10. Model of particle movement in the early stage of shear process.

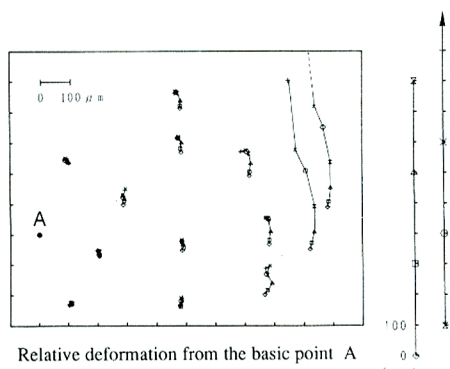


Fig. 11. Appearance of shear plane (kaolinite clay).

のように粒子同士が摩擦し、影響を及ぼし合わないようなせん断では、Fig. 11 でみられたせん断面発生時期のせん断面周辺での相対変位の増加はみられず、破断面発生直前までほぼ一様なひずみ状態が続き、破断面発生後は粒子の逆戻りも観察されている。

(3) せん断帯の粒子挙動

まず、高倍率 (× 1,000) で撮影し、図化したせん断帯付近の相対変位図を Photo 2, Fig. 12

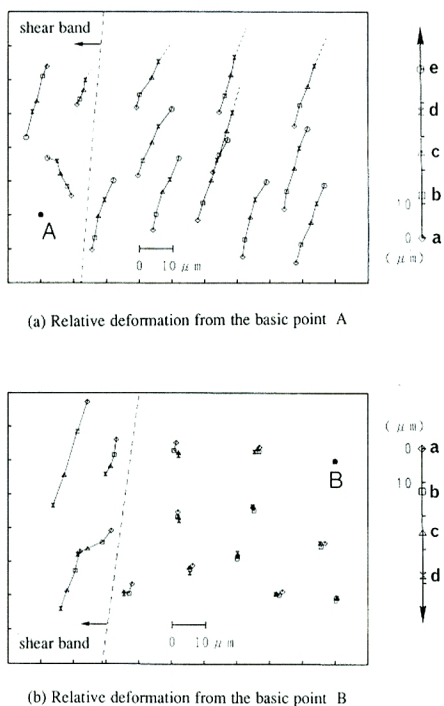
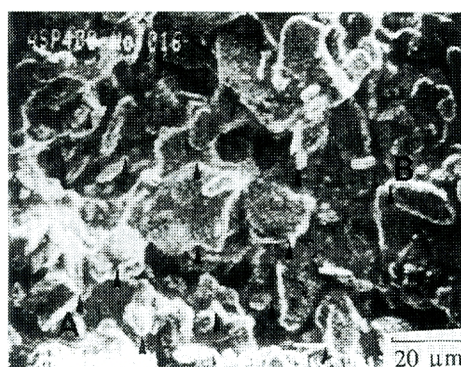


Fig. 12. Particle movement in shear band (Part 1).

とは違った相対変位や現れ始めるが、同時期の写真でもわずかにせん断面らしき現象が現れている。

点 A を基準とした図では、せん断面に近い側の粒子が、せん断面が発生する時期に大きく変位し、その後せん断面が発達した後はほとんど相対変位を起こしていない。また、破断面発生時期にせん断応力が上昇していくことも観測されている。

ここでは主せん断面が発達していく位置に破断面が発生したのに対し、せん断帯の端部からせん断方向に斜めに発生する、曲げ応力を伴った破断面も生じている。こ



a



c



e

Photo 2. Particle movement in shear band (Part 1).

に示す。図では、図の左端にせん断面ができた。基準点 A はせん断帯内にあると考えられ、そのため点 A を基準とした Fig. 12(a) では一番左の粒子が他の粒子と逆方向に点 A の方へ進んでいる。また、粒子の相対変位も、せん断初期に現れる一様なひずみと比べると、その撮影間隔から考えてかなり大きい。これは初期の広範囲のひずみとは違ったせん断面そのものの影響であると考えられる。

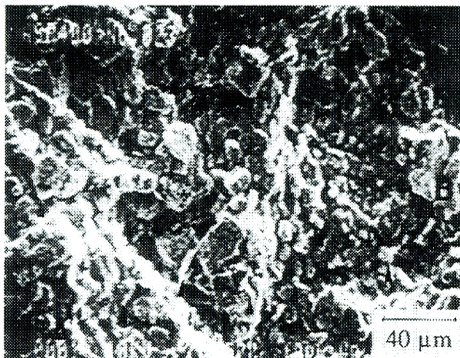
結論的には、1,000 倍の高倍率では視野が狭すぎ、せん断帯の全体構造は非常に捉えにくい。したがって、以下では倍率を下げて観察したものを示す。

Photo 3, Fig. 13 はせん断帯の特徴をよく捉えた図だと考えられる。

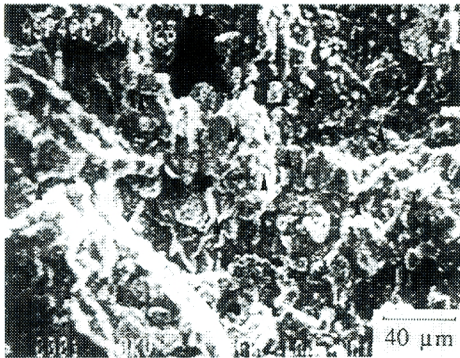
図では、中央の 4 点をせん断帯内部と考えれば、せん断帯の幅は約 $50\mu\text{m}$ であるが、点 A を基準とした図では基準点の上部の 3 点が基準点に近づく動きを示しており、せん断面の影響ではないかとも考えられる。また、他の写真結果では、せん断帯の幅は大きくても $200\mu\text{m}$ 程度までである。これらの結果はせん断帯の初期の段階であるが、その後せん断が進むにつれその幅を狭め、最終的に破断面となる場合が多い。

相対変位を起こしている粒子の変位速度は一定していないが、これはせん断進行に対する摩擦力の影響だと考えられる。すなわち、粒子と粒子がぶつかりそれを乗り越えて行く際の抵抗により、微視的なせん断変位速度が、変化するものと考えられる。これは特に短い撮影間隔で観察する場合には、ごく普通に観察できる挙動である。

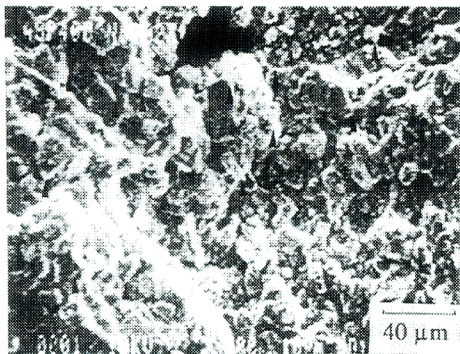
次に, Photo 4, Fig. 14 は、ほぼ同一の位置で、連続した粒子挙動を観察したものである。時間的に早い段階ではせん断帯が幅 $40\mu\text{m}$ 程度で存在するが、図ではせん断帯がほとんど存在せず、せん断面に変位が集中している。写真では図の途中から破断面が現れている。すなわち、せん断面の発生初期は幅の広いせん断帯を伴っており、その後せん断が進行するにつれて、せん断帯はその幅を狭めてゆき、最終的にせん断変位は狭いせん断面に集中するものと考えられる。別の表現をすると、せん断面の発生は広範囲の均一な、もしくは連続なひずみが、狭いせん断面に集中していく過



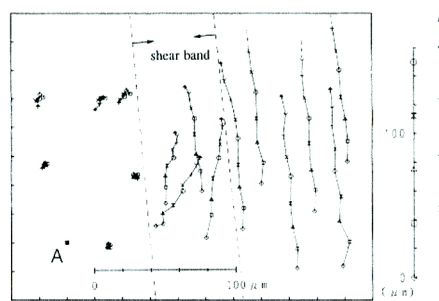
a



e



h



Relative deformation from the basic point A

Photo 3. Particle movement in shear band (Part 2).

Fig. 13. Particle movement in shear band (Part 2).

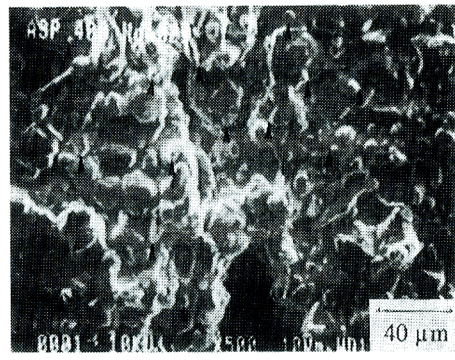
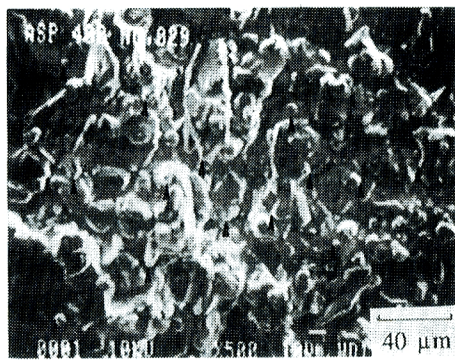
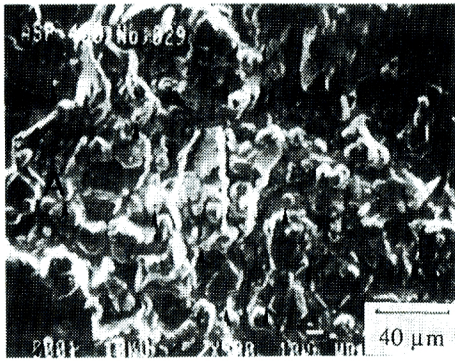
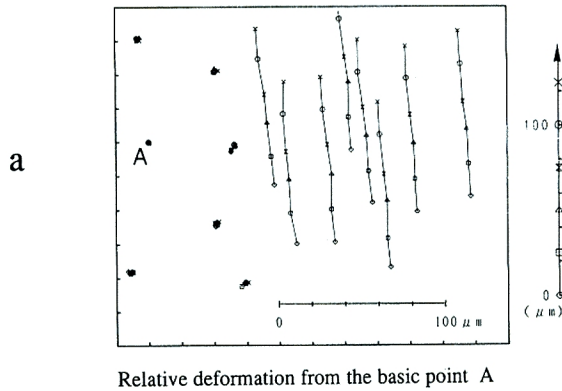


Photo 4. Particle movement in shear band (Part 3).



Relative deformation from the basic point A

Fig. 14. Particle movement in shear band (Part 3).

程であると考えられる。

最後に、このせん断帯の成長過程を示した模式図を Fig. 15 に示す。様式は Fig. 10 と同様である。

4.2 洪積粘土

洪積粘土を用いた供試体による試験では、その異方性に注目して観察を行った。

(1) せん断面から離れた位置での粒子挙動

せん断面から離れた位置での粒子挙動を追った観察では、洪積粘土の供試体が粉末カオリンのものより多少脆性的であるので、相対変位がわずかに発生する程度である。その絶対量は小さく、かつ、せん断速度の違い、せん断面までの距離の違いもあり、せん断域の広さ、異方性の影響等の有意な差はみられない。

(2) せん断面発生過程

Fig. 16 はせん断初期からせん断面が発生するまでの全体図を追った相対変位図である。この図より、わずかなひずみの後に急激に相対変位が増加しているのが観察できる。写真では e (○印)

の時期にはもう大きな破断面が現れているが、相対変位図においても同時期になってからせん断変位が急激に発生している。また、巨視的データと比べると、e ではせん断応力はピーク強度の 5 割にも達していない時期である。こういった挙動は粉末カオリン試料のデータとは大きく異なるものである。

(3) 層理面付近の粒子挙動

せん断開始前より供試体に弱面(層理面)があったものでは、弱面がリーデルせん断面が発生する方向と垂直に近い角度をなしていた場合、この弱面に沿ったような相対変位は観察されず、一樣な微小ひずみが広がっている。また、写真からは、せん断初期にあった弱面の開口が閉じていくのが観察された。一方、リーデルせん断面の発生方向とほぼ平行に弱面が走っていたものでは、相対変位が急速に発生している。せん断面はこの弱面に沿って発生している。この時のせん断応力はピーク強度の 5 割程度である。

つまり、せん断前にあった弱面は、ある時期より急速に相対変位が生じるというせん断発生形態には

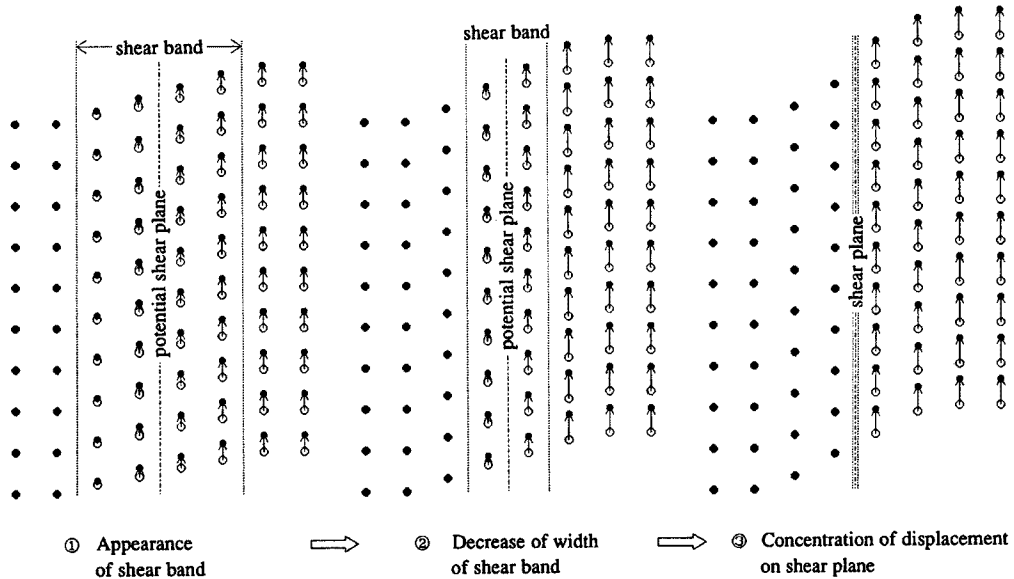
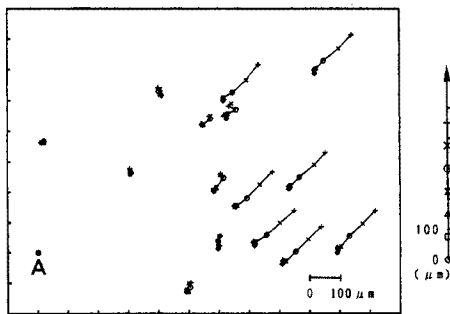
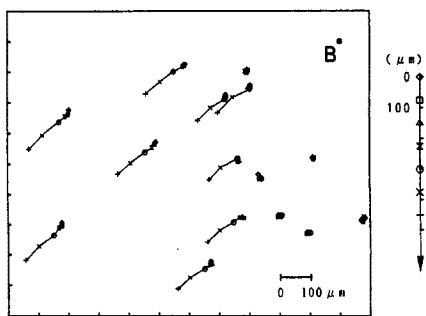


Fig. 15. Model of particle movement in shear band.



(a) Relative deformation from the basic point A



(b) Relative deformation from the basic point B

Fig. 16. Appearance of shear plane (diluvial clay).

せん断変形挙動には、せん断初期の影響範囲の広い様なひずみ（せん断域）と、せん断面発生時のより狭い領域（せん断帯）の2つの段階の存在を明らかにした。

以下にこれまでに述べてきた結果・考察をまとめて、本研究の結論とする。

大きな影響を与えなかったと考えられる。これはこの弱面、もしくは層理面では、表面の凹凸が整合しているため、せん断により発生したせん断面とは違って、せん断変形挙動に及ぼす影響が小さいためであると考えられる。

(4) 破断面の粒子挙動

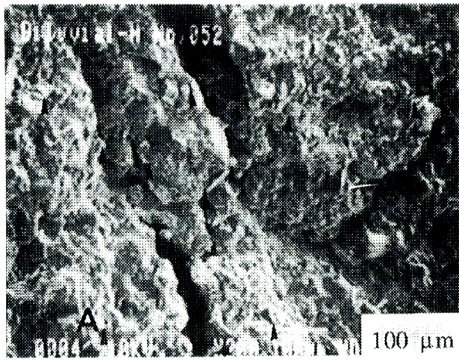
Photo 5, Fig. 17 は、破断面内の凸部分が衝突している状態を追った図である。これだけ破断面が広がっていても衝突部付近では粒子の相対変位が観察でき衝突の影響があるものと考えられる。

5. 結 論

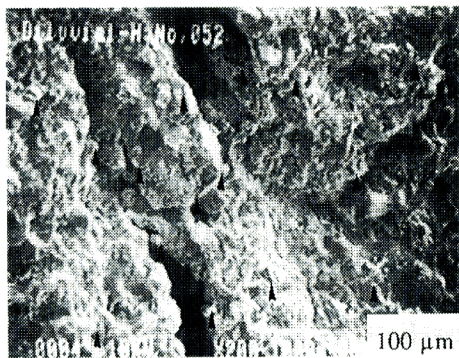
本研究では、粘性土のせん断破断面の挙動について、微視的立場から研究を行ったものである。

微視的な観察を行うため走査型電子顕微鏡を用いたが、このときの鏡体内の高真空という制約条件を間隙流体にポリエチレングリコールを使うことで解決し、粘性を付与した状態のままの観察を可能として、土のせん断変形挙動を実験的に考察した。

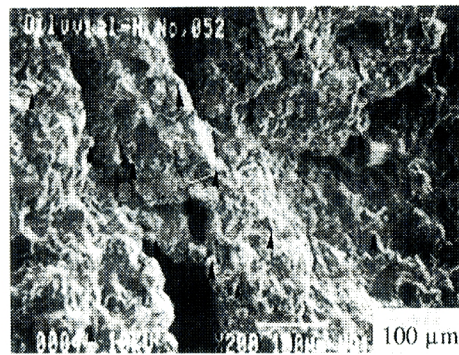
その結果、これまで断片的に得られていた粘性土の微視的変形挙動を連続したビジュアルな形で検証した。特に、



a

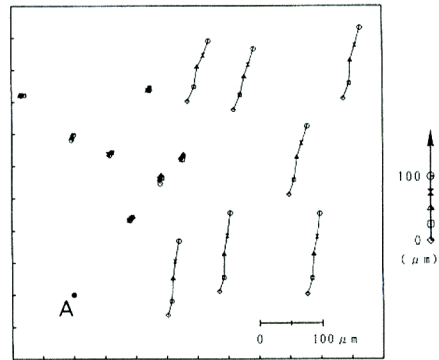


c



e

Photo 5. Particle movement in failure plane.



Relative deformation from the basic point A

Fig. 17. Particle movement in failure plane (diluvial clay).

(1) 試験方法について

① 走査型電子顕微鏡鏡体内においてのせん断試験について、ほぼ信頼できる実験結果が得られるようになった。

② 洪積粘土の間隙水をポリエチレングリコールで置換し、擬似的な湿潤状態を得る方法が確立された。

③ 今後改良すべき主なものとして、垂直荷重を載荷するペロフラムの問題が残っている。

④ 観察面に応力を作用させえないことにより、高い垂直応力でのせん断試験はできなかったが、応力を下げることでよい観察像が得られた。

(2) 粘性土(粉末カオリン)の微視的変形挙動について

① せん断初期には、広範囲に均一もしくは連続的なひずみが生じ、せん断の進行にともなって、そのひずみがせん断面に集中していく。

② せん断変位はせん断面に集中し、最終的に変位の不連続面ができる。

③ せん断面が視覚的に明らかになる前に微視

的なせん断変位はせん断面に集中している。

④ 空隙をとまなう変位の不連続面(破断面)が発生した後は、その周辺の粒子の相対変位はほぼ止まる。

(3) 洪積粘土の微視的変形挙動について

① 粉末カオリンの試料ほどせん断面の影響が周囲に強く現れることはないが、乾燥試料とは違い若干ながらせん断面の影響がみられた。

② せん断面発生形態は、粉末カオリンの試料とは違いかなり脆性的で、小さなひずみ状態から急速にせん断面が発生する。

③ せん断開始前からあった亀裂(層理面)では、その表面の凹凸が整合していることもあり、せん断挙動への影響は必ずしも大きくない。

参考文献

- 1) 嘉門雅史：超小型せん断試験における粘性土の微視的せん断機構，京都大学防災研究所年報，No.34 B-2，1991，pp.45-60.
- 2) 嘉門雅史・浅川美利：新体系土木工学 16 土の力学（I）—土の分類・物理化学的性質—，技報堂出版，1988，p.134.
- 3) Skempton, A. W. and D. J. Petley: The Strength along Structural Discontinuities in Stiff Clays, Proc. of Geotech. Conf., Vol. 2, 1967, pp.29 ~ 46.
- 4) Tovey, N. K. and K. Y. Wong: The Microfabric of Deformed Kaolin, Jour. of Microscopy, Vol.120, pt 3, 1980, pp.329 ~ 342.