

超小型せん断試験における粘性土の微視的せん断機構

嘉門 雅史

MICRO-SHEARING PROCESS ON CLAY SOIL WITH ULTRA SMALL SHEAR BOX TEST

By *Masashi KAMON*

Synopsis

By using an Ultra Small Shear Box Test (USSBT) apparatus, which was developed by the author in order to introduce into a scanning electron microscope (SEM), the deformation characteristics of consolidated kaolin clay soils are examined. Micro-shearing process on the clay soil is observed by SEM and recorded by a video tape recorder. Then after, image processing of the particle movement during the shear deformation by USSBT are performed. Since the USSBT apparatus is in high vacuum chamber, the pore water in clay soils should be evaporated and the obtained micro-shearing process becomes to be quite different from that in the atmosphere. In this paper, therefore, a pore water exchange technique is tried by using a polyethylene glycol. As the results, the local discontinuity of the micro-shearing rate and the developing process of shearing layer are clearly revealed.

1. はじめに

本研究は、土の挙動を粒子構造とその変形機構からモデル化し、土の内部変数の物理的意味付けを行うための研究の一環であり、実際の粘性土を用いて、その変形挙動を微視的に直接観察する手法を確立することを、第一の目的としている。そのために、ここでは走査型電子顕微鏡 (Scanning Electron Microscope; SEM) 内に導入した超小型せん断試験機 (Ultra Small Shear Box Test; USSBT) を開発し、その有効性を実証し、さらに供試体を真空中に保持するため間隙水の蒸発の問題を検討した。つまり、間隙水を他の物質に置換することにより、粘性を付与した状態 (通常の湿潤状態の近似的状態) での電子顕微鏡観察手法の適用性を検討した。

さらに、粘土の微視的変形機構をモデル化し、せん断帯の形成・局所化の問題について実験で検証することを第二の目的としている。このために、一面せん断型の USSBT 試験で得られた変形挙動を電子顕微鏡で微視的に直接観察・検討を行った。なお、ここでは、巨視的特性に直接結び付くような微視構造の定量的把握よりも、変形挙動のモデル化に重点をおいて検討している。

2. 土のせん断変形と微視的構造

土は、通常、連続体として取り扱われる。しかしながら、土に荷重が加わると一部分に変形が集中し、破壊に近づくに従って滑り層が出現し、土は連続体から不連続体へと変化する。これは土における連続体

力学の適用の限界を示唆しており、このため変形解析の実施時には滑り層のような不均質体はないとして取り扱い、一方では滑り層の存在を前提に安定解析を行うというように同じ土に対して取り扱いを分けているのが一般である¹⁾。

また滑り層の発生は、実験結果の解釈にも問題を提起する。通常の要素試験では、その内部におけるひずみと応力が一様であると仮定しているが、滑り層の発生は、この基本仮定の正当性を否定する。したがって滑り層発生後における供試体の挙動の解釈が問題となっている。

滑り層について、その方向については Mohr-Coulomb 等の破壊基準で表現しうが、最近になって、この滑り層の発生の際の変形の局所化の問題が注目されてきている。滑り層のモデル化には、滑り層を二つの不連続な速度勾配の面に挟まれた薄い層であると考え、ひずみの不連続は、滑り層形成にいたる変形の局所化として解釈される。そして、供試体の挙動を表す構成式と、滑り面の境界から示される不連続面の検証が実施されている。そして、二つの剛体の相対変位方向と滑り層の方向から定めたダイレイタンシー角を用いて破壊後の挙動から、初期には一致していた主応力と主ひずみの軸が、滑り層発生時にはずれてダイレイタンシーの減少をもたらすこと (inversion of dilatancy) が知られている。このような取扱いは、土粒子の微視的構造を無視して変位速度勾配のみを重視しているから、その構成式等の中に長さの次元を持つパラメータが存在せず、滑り層の幅は予見・検討できない。実験では、滑り層の幅が 200 μm 程度、あるいは平均粒径の数倍であるという結果が多く得られている。そこで最近では構成式に二次変形率を導入し、滑り層の幅についての理論的検討が行われるようになってきた¹⁾。

一方、せん断変形の進行に伴うせん断面の発生過程について Skempton (1966) は、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。せん断力がピークに至る直前では、雁行状のリーデルせん断面がみられ、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達する。そして残留強度領域では、大変形に伴う明瞭なせん断面が生じることを明らかにした。また、せん断速度の土構造の変形過程への影響について、Yong と Warkentin (1966) は、三軸排水試験の急速せん断の場合は緩速せん断に比べてせん断面付近での含水比変化が大きく、かつ含水比変化の領域が狭いとの結果を得ている。これによると、急速せん断時には粒子の攪乱が大きく平行配向が強くなり、逆に緩速せん断時にはせん断領域は広いが、粒子の配向は小さいとしている。これについては、嘉門ら (1983) により直接観察されている²⁾。

さらに、土の構造変化について、電子顕微鏡を用いた研究としては、Skempton の説を電子顕微鏡レベルで Tovey と Wong (1980) が明らかにし、また粒子配向が極端に進んだ主せん断面との複合結果を明らかにし、その他の領域では構造変化がほとんど見られないとした報告がある。この場合、観察に用いられた試料は乾燥状態にあり、現実の粘性土の挙動の把握のためには湿潤状態の試料を用いることが重要である。湿潤粘土の変形挙動を模擬するために溶媒置換などの粘性を付与した供試体での観察が必要とされている²⁾。

3. 土の変形挙動の微視的直接観察法

3.1 SEMによる土の直接観察の基本的問題

土の変形挙動の微視的観察には、以下の理由から SEM が最も適している。SEM は、走査電子プローブとして極めて細いビームを用いているため、焦点深度が光学顕微鏡に比べて著しく大きく、無影照明的なコントラストから、凹凸の激しい試料であってもほぼ全面に焦点が合うという長所がある。また透過型電子顕微鏡 (Transmission Electron Microscope; TEM) と比べて、供試体作成が容易である。

土の変形機構を SEM を用いて直接観察するとは、Fig. 1 に示すように SEM 鏡体内に超小型試験機を導入して、対物レンズの前で土のせん断試験を行うということである。したがって、SEM 鏡体内の高真

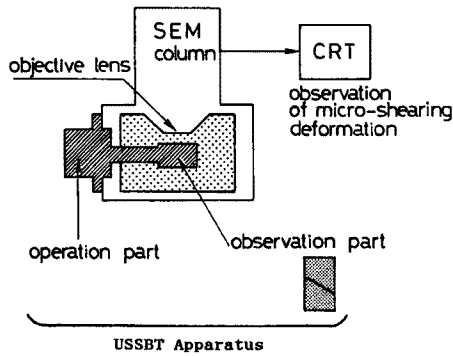


Fig. 1. Schematic feature of USSBT.

空条件 (1.3×10^{-3} Pa) に観察面を露出することが必須条件である。さらに、自然発生的な滑り層は発生位置・形状を特定できない。よって、基本的課題を以下に挙げる5つの制約条件にまとめることができる。

- (1) SEM鏡体という空間的制約(超小型の試験機が必要)。
- (2) 1.3×10^{-3} Paを越える蒸気圧を持つ物質を用いることができない。つまり通常の湿潤状態の土は観察できない。
- (3) 滑り層を特定の位置に、強制的に発生させる形式の試験が必要である。
- (4) 観察面が開放されている必要があり、従って観察面は基本的に応力が作用していない状態となる。

(5) 供試体の帯電対策・観察面の損傷の問題。

これら制約条件のうちの(1)、(3)のために、一面せん断型の試験機の開発を行った。しかしながら、この型の試験機においては、(4)の条件が、宿命的欠点となっている。つまり、巨視的見地からも要素試験ではありえない一面せん断試験であることと、観察面(強制的に発生させる滑り面と直角)が開放されているということである。ここで用いた試験機もこの問題点の解消には至っていない。

(2)の条件のために、従来は乾燥試料を用いている。しかしながら、乾燥供試体の破壊形態は脆性的であり、その観察結果の通常の湿潤粘土への適用には問題がある。そこで間隙水を別の物質(ここではポリエチレングリコール; PEG)に置換し、土に粘性を付与した形での観察が考えられる。

(5)の供試体の帯電とは、試料が帯電すると走査電子線が不規則に偏向され、観察像が歪んだり不連続像となったり、二次電子の発生が乱されて像に異常コントラストを与える問題である。観察面の損傷とは、試料に電子プローブが照射される際に、試料が局所的に加熱される等により観察表面が変形するものである。通常の帯電対策は、試料に金等の破覆を施し、蓄積される電子をアースに逃がす方法がとられる。しかし、本研究の場合には粘性供試体を被覆する方法をとることができない。また乾燥供試体では問題にならなかった観察面の損傷も粘性供試体では問題となる。そこで、これらの問題に対し次のような方法で対応する。

- a) SEMの加速電圧を下げる。
- b) 粒径の大きい粘土試料を用いて、低倍率による観察を行う。
- c) 同一部位の高倍率での観察時間を短縮する。

3.2 超小型せん断試験機(USSBT)

新しく開発したUSSBT³⁾の概要を説明する。装置の基本的構成は模式的にFig. 2に示すとおりである。

本試験機はひずみ制御型である。変形は、モーターでせん断側せん断箱ホルダーを動かして($75 \mu\text{m}/\text{min}$ または $37.5 \mu\text{m}/\text{min}$)発生させ、この変位をポテンショメーターで測定する。せん断抵抗については、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、ロードセルで測定し、レギュレーター

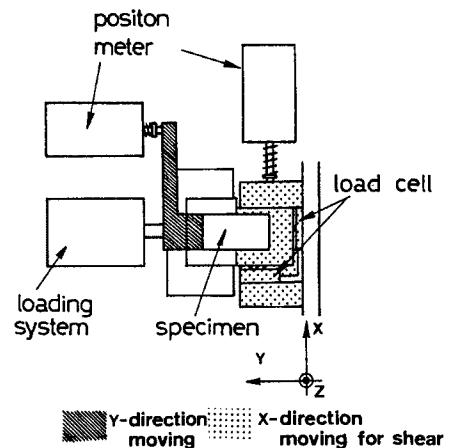


Fig. 2. Plan of direct shear part of USSBT.

で制御する。垂直荷重測定用のロードセルはペロフラムと反対側に置いている。また本試験機では供試体の垂直荷重方向の長さの変化を、ポテンシオメーターにより測定することができる。

せん断箱は、粘土試料と共に圧密リング内に挿入し、PEGと混合した試料を圧密すると同時にせん断箱内に試料を詰める方式のものとした。試験機装着時には、圧密リングから取り出したせん断箱に、圧密用底板とは反対側から底板を取り付けて、丁度蓋をする形として設置した。そしてせん断側・固定側の両せん断箱を固定する圧密用底板は、試験機装着後初めて外すようにして、試料の乱れをできるだけ少なくする工夫をした。このようなせん断箱とそのホルダーを Fig. 3 に示している。

3.3 供試体の選定

(1) 粘土鉱物

土の微視的構造についての研究であるため、本研究で用いる試料には、その構造を微視的レベルまでコントロール（各供試体間で均質にする）することが求められる。したがって様々な粒度・鉱物からなる通常の粘土を用いるよりは、単一の粘土鉱物からなり、また帯電対策を考慮して比較的粒径の大きい粘土が望ましい。

以上より、本研究では England 社製の工業用カオリナイトを用いることにした。これは、アメリカ合衆国ニュージャージー州エディソン市近郊から産出した、結晶性の良好な粘土（ASP 400）である。その基本的性質は次のとおりである。

- ① 土粒子の密度 $\rho_s = 2.610 \text{ g/cm}^3$
- ② コンシステンシー $w_L = 44.3 \%$
 $w_P = 29.0 \%$
 $I_P = 15.3 \%$
- ③ 比表面積（BET 法による） $8.4 \text{ m}^2/\text{g}$
- ④ 粒度分布 85% 以上が $2 \mu\text{m}$ 以下の粘土分である。

(2) 間隙水の置換

間隙水を置換する物質については、常温で液体であり土と化学的変化を生じず、また、その蒸気圧が SEM 鏡体内の高真空状態の気圧より小さければよい。さらに導電性の物質であれば、供試体の帯電対策にもなり極めて望ましい。

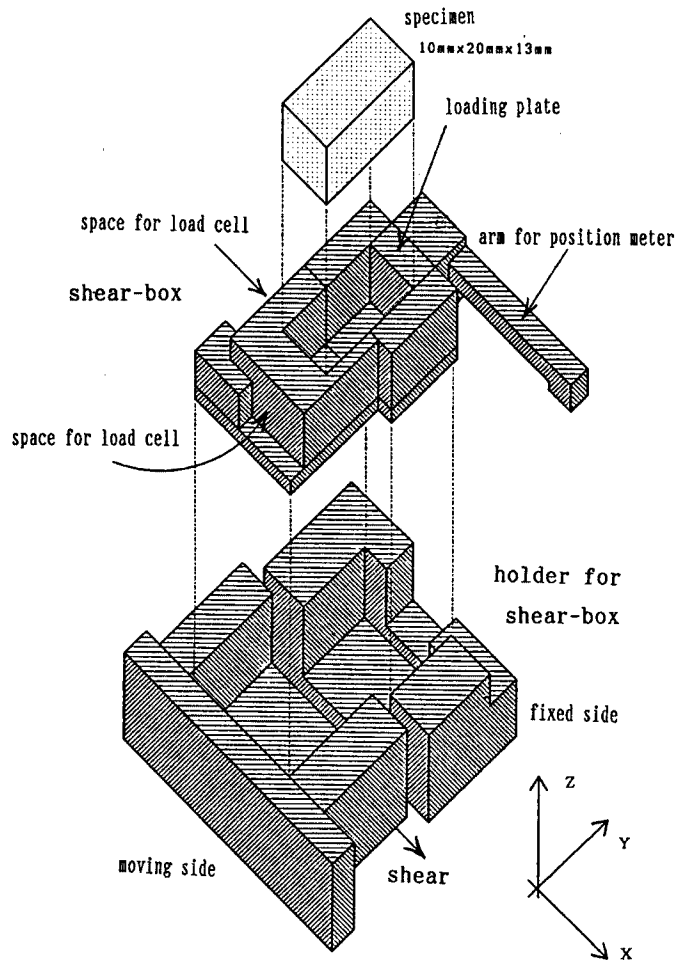


Fig. 3. Shear-box and its holder of USSBT.

Table 1. Physical properties of polyethylene glycol

average molecular weight	# 200	# 300	# 400	# 600
viscosity (CS)	3.6~4.6	5.0~6.2	6.0~8.0	10~12
pH (5% solution)	4.0~7.0	4.0~7.0	4.0~7.0	4.0~7.0
colourness (APHA)	20	20	20	20
freezing point (°C)	—	—	4~8	18~22
specific gravity (/20°C)	1.125	1.125	1.128	1.127
specific heat (cal/gr)	—	—	0.49	—
heat of fusion (cal/gr)	—	37	36	35
surface tension (dyne/cm)	44.5	44.5	44.5	44.5
adsorbed humidity	70	60	55	40
vapor pressure (mmHg)	—	2.9×10^{-3}	9.0×10^{-5}	5.2×10^{-6}
flash point (°C)	171	196	224	246

本研究で用いたポリエチレングリコール (PEG) は導電性こそないが、他の条件は満たしており一応満足できるものである。用いる PEG としては、Table 1 にまとめたように平均分子量 200 ~ 600 のものが考えられる。分子量が小さいほど粘度が水に近くなるが、吸湿性が大きく取扱いが難しくなる。大気中の水蒸気を吸うと、電子顕微鏡鏡体内に導入したときにこれが蒸発する等の影響で、観察が不可能となったり、あるいは観察像が著しく不鮮明になる。これらの点を考慮の上、平均分子量 400 の PEG が最も都合が良いとの結論に達した。

置換方法については、乾燥粉末粘土と PEG を混合し圧密する方法と、圧密試料を PEG に浸し、50°C 程度に保って間隙水を蒸発させながら置換する方法が考えられる。この二つの方法で置換した試料を電子顕微鏡で観察したところ、特に差がみられなかったことから、前者の方法を採用した。

3.4 試験方法

(1) 供試体作成法

供試体として以下のような調整を行った。乾燥粉末の ASP 400 と平均分子量 400 の PEG を質量比 100:90 で混合した試料を、前述の方法に従い 0.1 kgf/cm² から 12.8 kgf/cm² まで段階的に圧密し、0.1 kgf/cm² で膨潤させた。各段階の圧密時間は、一次圧密終了時間の 10 倍以上を基準としている。ただし最終段階と膨潤過程については、24 時間以上を基本としている。最終段階の圧密圧力を 12.8 kgf/cm² と比較的大きくしているのは、試験装置のロードセルの感度の都合上、供試体にある程度大きなせん断強度が要求されるためである。

(2) 実験データ測定法

試験装置システムを Fig. 4 に示す。ここで、用いる諸データの定義・測定方法は以下のとおりである。

(a) X, Y, Z 方向

Fig. 2, 3 に示す方向、向きと定義する。各方向の意味は次のようである。

X 方向：せん断側せん断箱の変位方向

Y 方向：垂直荷重載荷方向

Z 方向：観察方向、圧密方向も基本的にこの方向である。

(b) 巨視的または平均的ひずみ

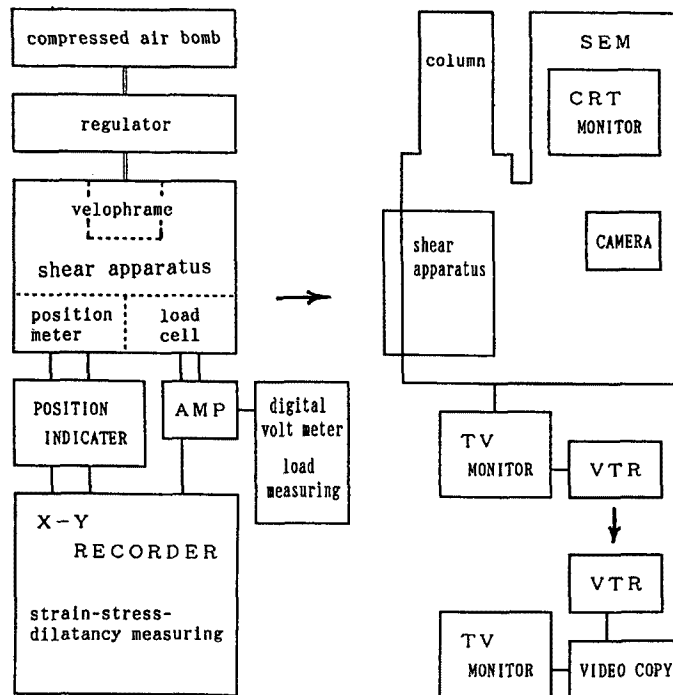


Fig. 4. Experimental system for micro-shearing process.

ポテンショメーターで測定するせん断側せん断箱の変位の、供試体同方向長さ（10 mm）に対する比とする。

(c) 巨視的せん断断面積

両せん断箱のXZ断面（10 mm×13 mm）の面積を初期のせん断断面積とした巨視的せん断断面積。

(d) 巨視的または平均的せん断強度

3.2で述べた方法によりロードセルで測定したせん断抵抗を、その時点における巨視的せん断断面積で除したものを、便宜的にせん断強度とする。

(e) 巨視的または平均的垂直荷重

ベロフラムにより載荷した荷重を、ロードセルで測定し、その時点における巨視的せん断断面積で除したものを垂直荷重とする。

(f) ダイレイタンス

これは、せん断中にポテンショメーターで測定される供試体のY方向長さ変化とする。長さの増加を正とする。そして無次元化には、初期供試体Y方向長さ（20 mm）で除した値を用いる。

ひずみとせん断強度・ダイレイタンス（または垂直荷重）は、試験中XYプロッターで連続的に記録し、試験終了後、そのデータにせん断断面積の減少による補正を行っている。なお、これらの定義は、本研究における試験法の都合を考慮したものであり、土質力学で通常に用いているものとは異なっている。詳しい検討は4章にて行う。

SEM観察像は試験中はVTRで録画し、その後、写真化する。写真撮影時の巨視的データは、試験中せん断速度が一定であるとの仮定のもと、ビデオ録画時間から算定している。また、SEM観察像における供試体の局所の変位（土粒子の動き）は、写真中の像の動きとして、デジタイザーで追っており、この際には一切の補正を行っていない。

(3) 実験手順

(1) において述べた方法により供試体を試験機に装着した後は、以下の手順に従いせん断試験を行い、土の変形挙動を SEM で直接観察を行う。

1) 垂直荷重を載荷する。

垂直荷重については、初期載荷時に制御するのみで、試験中には一切の調整を行わない。

2) SEM 鏡体内を排気し、高真空状態にする。

3) 垂直荷重による供試体の変形が終了したと見なされるまで放置 (約 1 時間) する。

4) せん断の開始と記録。

せん断側せん断箱の変位速度は $75 \mu\text{m}/\text{min}$ とし、せん断強度・ダイレイタンス (または垂直荷重) の測定を行い、同時に SEM 観察像を録画する。実験終了後、巨視的データと比較検討する。SEM 観察像は、必要に応じてビデオ画面を写真撮影し検討する。

4. USSBT による試験法と巨視的せん断特性

用いた試験法について巨視的せん断特性から検討し、USSBT の性能の実証を以下に試みる。

4.1 供試体の圧密特性

ポリエチレングリコール (PEG) と乾燥粉末カオリン粘土 (ASP 400) を混合、圧密して作成した供試体を用いた。この供試体作成法の影響について、圧密特性から検討する。影響要因は、間隙水を PEG 置換したこと、圧密リング中にせん断箱を挿入して圧密を行ったことである。

圧密の時間沈下特性を Fig. 5 に例示する。これらは $p = 12.8 \text{ kgf}/\text{cm}^2$ で圧密したものである。図中の W1 と P は高さ 4.5 cm のリングにせん断箱を挿入したものであり、W2 は高さ 2.0 cm のリングを用いた通常の圧密データである。また、W1 と W2 は初期含水比 90% で圧密を開始したものであり、P は ASP 400 と PEG を質量比 100:90 で混合したものである。圧密による間隙水の排水時間は、せん断箱挿入にはほとんど影響を受けない。しかしながら、PEG 置換ではその粘性のため大きく影響を受ける。通常の状態での ASP 400 は、いずれも約 1 分内外で一次圧密が終了するのに対し、PEG 置換したものは、一次圧密終了に約 10 分程度を要する。

圧密における $e-\log p$ 曲線を Fig. 6 に示す。Fig. 6 (a) 中の W1 は、いずれも同一リングからの試料である。圧密リング内にせん断箱を挿入したために、リング内の部位によって圧密の仕方に若干の差が生じている。リング内のせん断箱とリングの蓋との間の試料 (W1-A) が最も圧密が進んでおり、せん断箱周辺部の試料 (W1-B 及び W2-D) の圧密

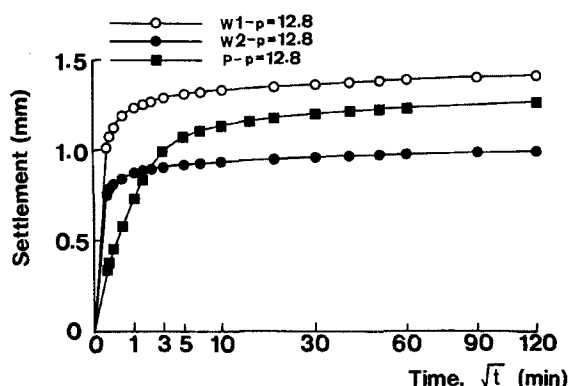


Fig. 5. Settlement behavior of ASP400.

の度合はそれより若干劣る。せん断試験に用いる箱内部の試料 (W1-C) は、箱の周辺のものよりも圧密の度合が大きくなっている。PEG 置換供試体の圧縮曲線を、ばらつきを含めて Fig. 6 (b) に示している。これは PEG の粘性が温度によって変化したことに基づいており、一般に夏期のデータの方が間隙比が小さい。また、圧密前に、真空に晒したことにより空隙は完全に除去され、飽和状態である。これまでに述べたとおり、供試体ごとに間隙比に若干のばらつきは生じているが、圧密リング中にせん断箱を挿入したことによる供試体の誤差は無視しうるものといえる。

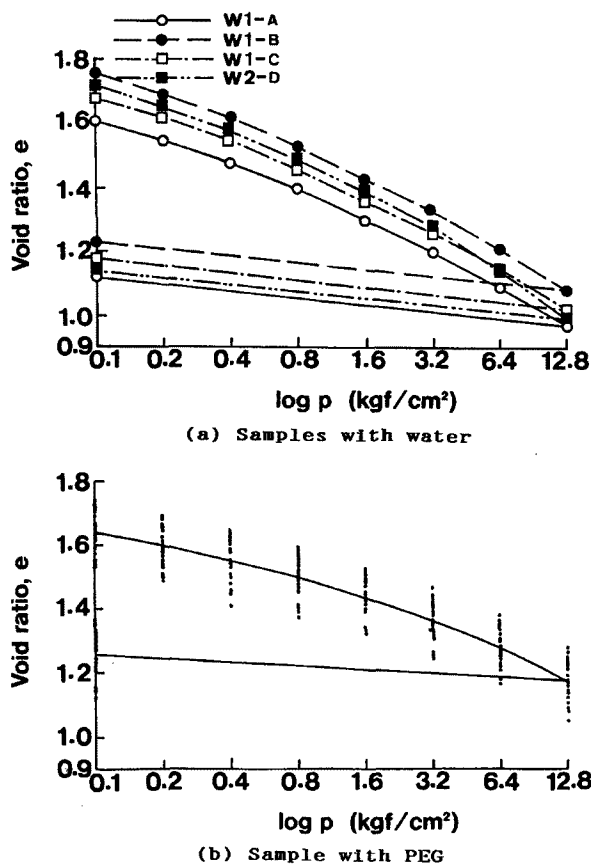


Fig. 6. Compression line of ASP400.

せん断強度・ダイレイタンスーには明瞭なピークが現れていないので、以降の供試体ごとの比較には、ひずみが10%の時の値を代表値として用いる。なお、SEM導入供試体について比較検討を行うため、大気圧下でも実験を行っている。

(2) 巨視的応力

垂直荷重とせん断強度について Fig. 8 にまとめている。SEMでの微視的観察供試体は、図中の“●”である。

垂直荷重とせん断強度は、垂直荷重 1.0 kgf/cm^2 未満（いずれも大気圧下での実験）では妥当な相関を示している。しかし、垂直荷重が 1.5 kgf/cm^2 を越えると（SEM導入供試体はいずれも垂直荷重 2.0 kgf/cm^2 以上）、せん断強度と垂直荷重の相関がみられない。また垂直荷重が 1.0 kgf/cm^2 以上では、時に非常に大きなせん断強度を示すが、その平均値は垂直荷重 1.0 kgf/cm^2 未満における値から考えられる値より小さくなる。

(3) ダイレイタンスー

本試験状態では、平均主応力が一定ではないため、せん断中に生じる体積変化がすなわちダイレイタンスーというわけではない。厳密に言うならば、体積変化を平均主応力の変化によるものと、ダイレイタンスーに分けて考察すべきであろう。しかし本試験では、それは事実上不可能である。また、観察面が解放されているという試験条件から、正確な体積変化の測定は不可能である。

そこで本試験では、供試体のZ方向変化（条件によって隆起のみられることが多い）は無視し、Y方向長さの変化のみをダイレイタンスーとして捉えている。しかし、Fig. 9に示す結果では、SEMでの観

以上より、本研究で用いた供試体の物性は、次のようにまとめられる。カオリン（ASP400）と平均分子量400のPEGから構成される飽和粘土であり、 12.8 kgf/cm^2 の先行圧縮を受けており、間隙比は概ね1.2～1.3である。

4.2 巨視的せん断特性

(1) 応力-ひずみ関係

せん断強度データの例を Fig. 7 (a) に示す。本試験におけるせん断強度特性は、一般にひずみ硬化型であり、強度ピークは明瞭でない。せん断強度は、ひずみ2%程度までに急上昇し、その後、漸増または停滞し、急激な応力降下はみられない。これは、SEM導入のために用いた湿潤粘土の挙動の近似法として、PEG置換が適切であることを表す。ダイレイタンスー発現特性を Fig. 7 (b) に例示する。一般に正のダイレイタンスーが現れている。その挙動は、ひずみ5%程度までは急増し、その後漸増している。

これらせん断強度・ダイレイタンスー特性には、粘土の巨視的・微視的挙動に対応したもの（例えば滑り面の出現に対応した低下等）はみられない。

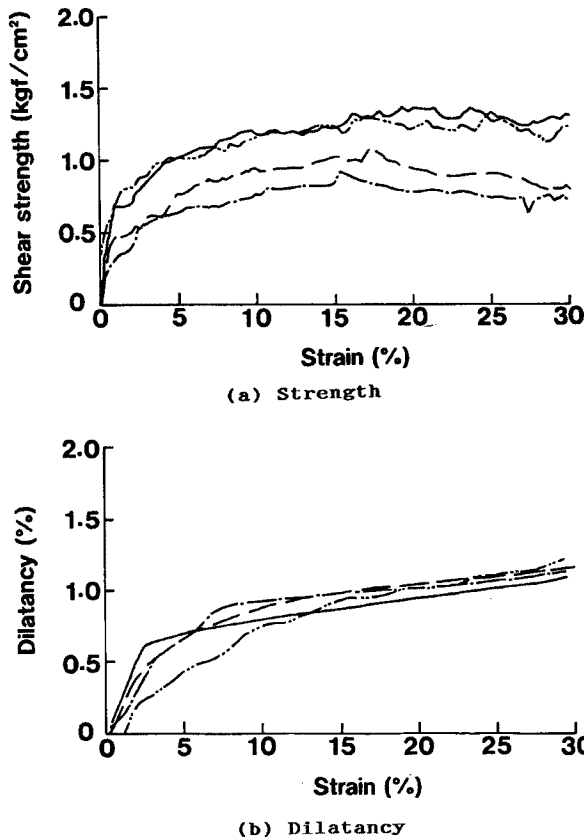


Fig. 7. Macro-deformation behavior.

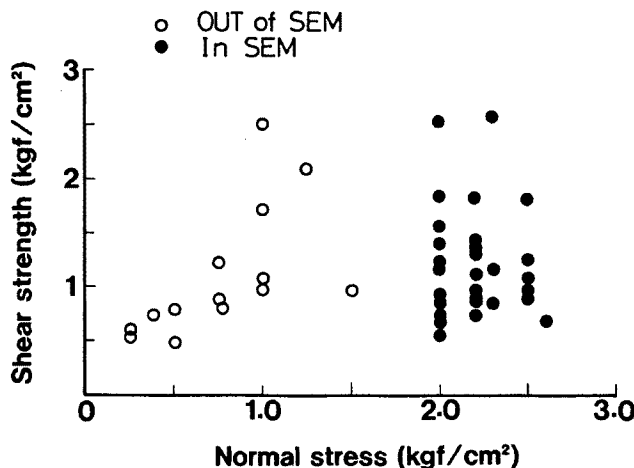


Fig. 8. Shear strength at 10% strain.

観察結果は、観察面に明確なせん断面が現れるまでについてののみ、巨視的データとの比較検討が可能であるということになる。

(5) PEG の排水条件

試験中の垂直荷重載荷時の PEG 間隙圧については次のように想定できる。

察供試体に体積増加が測定され、同一条件下の供試体の相互比較と、せん断に伴うダイレイタンスー発現の様子を定性的に把握できる。さらに微視的観察においても、観察面の変形挙動を基本的には XY 面における平面ひずみ状態と仮定している。そのため、ここで用いたダイレイタンスー測定法は、微視的特性と巨視的特性を比較検討する上で同一特性を示すものである。ダイレイタンスーと垂直荷重との間には相関がみられないが、前述の垂直荷重載荷が必ずしも間隙の減少を伴っていないことを示している。SEM での観察供試体におけるばらつき小ささは、観察供試体ごとの均質性が高いことを表しており、ダイレイタンスーがせん断部において中心的に生じていることを確認しうる。

(4) 巨視的せん断面

Photo. 1 に破壊後の供試体の観察面の様子を示す。一面せん断型の滑り破壊面を示している。SEM 内に導入した供試体では、せん断部の観察面が一部剝離し、Z 方向に変位することが多い。これは、観察面が開放されており、これが最小応力面であることが、せん断面と観察面とが直交しない原因の一つになっている。しかしながら、観察部における剝離は、表面部におけるみの挙動であり、SEM 内に導入して剝離が生じた供試体についても、観察面から 1~2 mm 下 (Z 方向) では、一面せん断型のせん断面が生じていることが解る。このことが観察表面付近のみの挙動であることは、破壊後の供試体を SEM から取り出してせん断面の様子を肉眼観察し、確認している。この観察部における供試体の剝離は、微視的観察結果を巨視的データと対応させる際に大きな障害である。そこで微視的

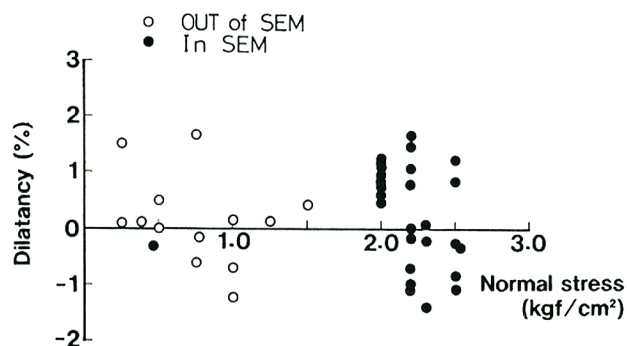


Fig. 9. Dilatancy at 10% strain.

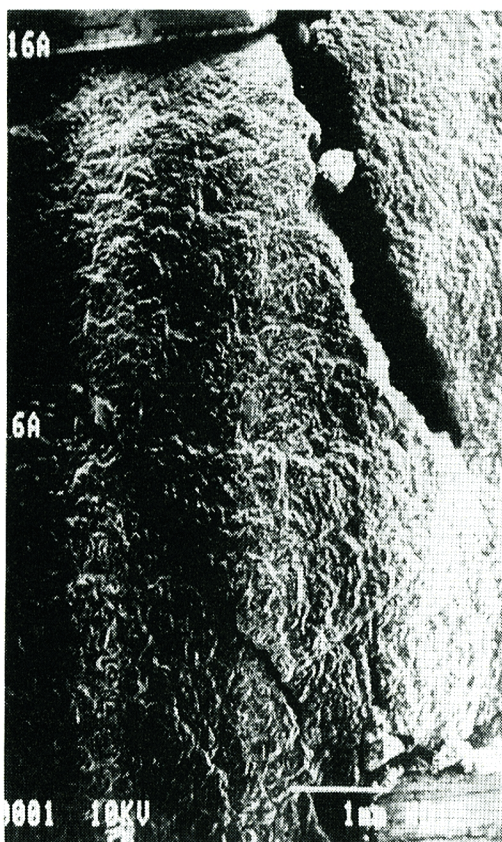


Photo. 1. Specimen after USSBT.

観察面が開放されており、垂直荷重載荷後、一次圧密終了時間と比べて十分な放置時間をおいていることから、過剰間隙圧はある程度消散している。つまり、垂直荷重はある程度、有効応力の増加につながっている。しかしながら、観察面への排水が観察されていないこと、せん断箱が基本的に非排水であること、PEGの粘性が大きいこと、Y方向長さの減少につれて、Z方向の隆起が観察されており体積変化は小さいこと等から、完全には過剰間隙圧は除去されていないと考えられる。なお、両せん断箱側壁、底板間からのPEGの排水は、若干量確認されている。

せん断中は、そのせん断速度とPEGの粘性の大きさを考慮すれば、非排水条件と考えるのが妥当である。しかしながら、微視的観察面に限定すると、排水条件を適用しても差し支えない。何故ならば、滑りによって生じる空隙は通常の飽和土のせん断試験においても生じる。そしてこれを避けるには、非常に大きな間隙水圧を作用させることが必要であるからである。

5. 粘性土の微視的変形挙動

SEMで観察されたPEG置換供試体の微視的変形挙動について検討を行う。続いて、本試験における土の挙動のモデル化を試みる。

まず初めに、以降に示す観察結果の見方について説明しておく。

SEMでの観察写真では、いずれも上下方向がせん断方向(X)であり、水平方向が垂直荷重・ダイレイタンスー測定方向(Y)である。そしてせん断の向きは、写真

中上向きである。またダイレイタンスーは、写真中の供試体の水平方向の長さの変化(増加)が正であり、写真中の水平方向への移動量ではない。

写真撮影時の巨視的データは、ひずみとダイレイタンスー(ここでは微視的挙動との比較のために、Y方向長さの変化)で表示して図に示した。図中にはせん断変位をaから順にアルファベット記号で表し、さらに、微視的挙動については、写真中に▲で示した土粒子の動きを相対変位で表示したが、ここで示した写真に対応する変位は、図のd点または矢印を付した部位でのものである。この微視的挙動を表すFig. 10～14は、縦横が写真と一致(縦がX方向、横がY方向)している。また、巨視的データと同じマークを用いて、各々の変位における巨視的データとの対応を図っている。

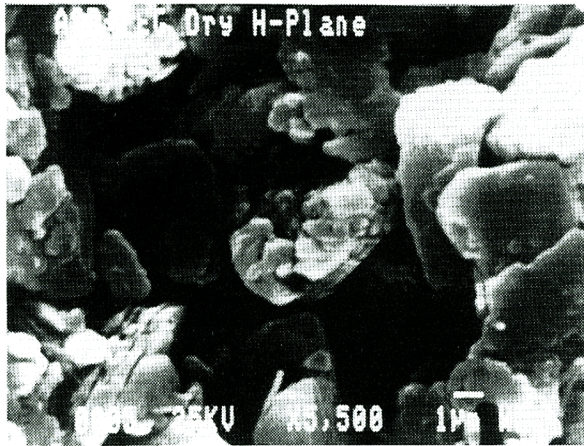


Photo. 2. Specimen before shear test.

5.1 せん断前の供試体の状態

せん断試験前にせん断箱内部の供試体を取りだして観察した像を Photo. 2 に示す。この供試体には、高倍率での観察を行うために乾燥し、金属被覆するという帯電対策を施してある。Photo. 2 に示すようにカオリン粘土は、厚さ $0.1\mu\text{m}$ 程度、大きさ $1\sim 10\mu\text{m}$ 程度の板状粒子であり、数 $\mu\text{m}\sim 20\mu\text{m}$ のベッドを形成し、これを基本単位としている。また、観察面に粒子面を向けた配向を示している。このことは、供試体の配向構造が垂直荷重による変形を受けても、保存されていることを表している。ここでは、特に断わらない

限りこの基本単位を“土粒子”，これによってできている構造を“土粒子構造”と呼ぶ。また、観察像において線で現れるせん断破壊面を“滑り面”と呼んでいる。

5.2 せん断初期における供試体の挙動

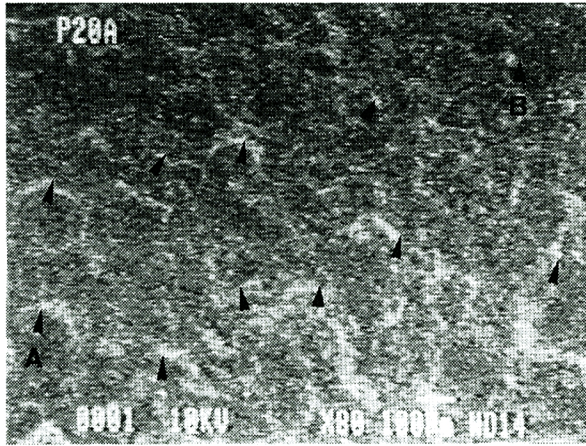
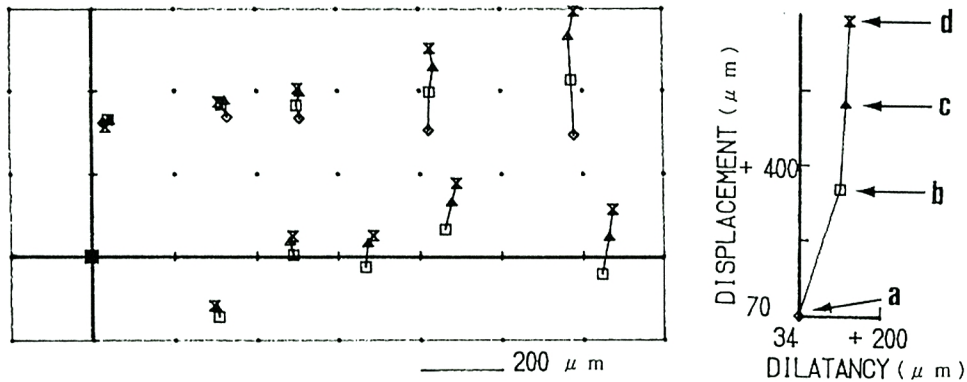


Photo. 3. Initial shear state.

はじめに、ひずみ $6\% \sim 8\%$ (変位 $600\sim 800\mu\text{m}$) 程度までの、滑り面発生前の供試体の挙動についてまとめる。巨視的データは、急激にせん断強度とダイレイタンスが現れ、そしてひずみが 2% を過ぎると、せん断強度増加は次第に小さくなる。また、ダイレイタンスはひずみが 5% を過ぎてから、漸増に移行する。この時期の代表的な観察像が Photo. 3 であり、写真中の微視的な土粒子の挙動を Fig. 10 に示す。

この時期における供試体は、観察像においては目立った構造変化等は見られていない。しかし、図に示されるように、基準点 A か



(a) Relative deformation from the basic point A (b) Macro-deformation

Fig. 10. Micro-deformation of the initial shear state.

らの微視的せん断変位が生じている。そして、この時間の挙動を次のようにまとめることができる。

- 1) 変位速度(同じ時間間隔における変位)は一様ではなく、ある時点で変位速度が急激に大きくなる。
- 2) 変位の方向が変化している。
- 3) 変位の不連続が生じている。

まず3)について、図の中央部の点で、変位の不連続が生じている。また1)については、上述3)とも関連しているが、およそ変位 $100\mu\text{m}$ から変位速度が大きくなっている部分が現れている。これは、巨視的せん断強度-ひずみ曲線における傾きの変化に対応している。したがってせん断部においては、せん断開始当初のせん断強度が急増している間の微視的変形は小さい。せん断が進みせん断強度増加が停滞し始めると、せん断部における微視的変形は大きくなるということが出来る。このことは見方を変えると、変位の生じる領域が減少していることになる。

2)については、微視的ダイレイタンスー発現状況について局所的に違いがあることを示している。

変形領域の幅については、SEMの視界の狭さから正確な把握はできない。変位 $100\sim 600\mu\text{m}$ 時において、Y方向に 1mm の間隔で、全体の変位の $30\sim 40\%$ が生じている。したがって変形領域はY方向に 2mm 以上の幅であると予想できる。

5.3 滑り層形成過程

次に滑り面(層)形成過程の検討を行う。ひずみが $5\sim 15\%$ 程度(変位 $500\sim 1500\mu\text{m}$) における土粒子

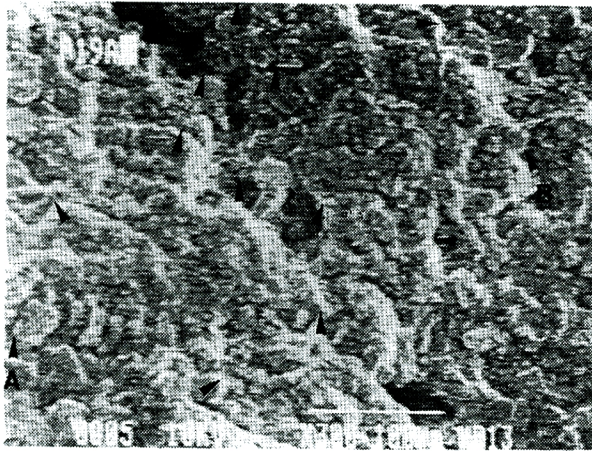
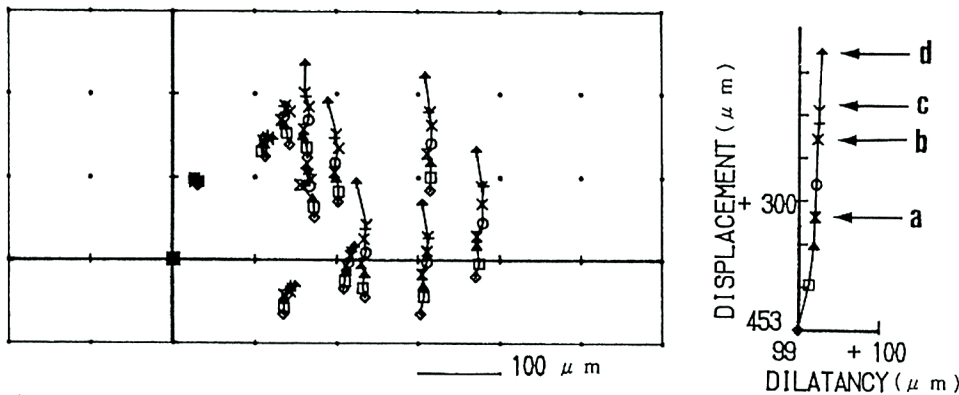


Photo. 4. Around the peak stress.

の微視的挙動である。観察像における滑り面の発生は、局所的にばらついており、必ずしも連続してはいない。しかしながら、微視的相対変位の測定から滑り面の連続性が確認されている。そして滑り層の発生は、概ね 9% ひずみ時から観察像上でも次第に明らかとなるが、低倍率観察像において明らかになるのは、平均するとひずみが 12% 程度に達してからである。この時間における巨視的データは、せん断強度・ダイレイタンスーともに、緩やかな増加傾向または停滞傾向を示している。

この過程における代表的な観察像を



(a) Relative deformation from the basic point A (b) Macro-deformation

Fig. 11. Micro-deformation around the peak stress.

Photo. 4 に、対応する写真中の供試体の微視的挙動を Fig. 11 に示す。滑り層が観察像上で明らかになる前から、変形に不連続が生じており、弱面が発達してできたと見られる、幅 $20\mu\text{m}$ 程度の間隙が増大した層（滑り層）が確認できる。そしてこの層の形成以外には、土粒子構造の変化は確認できない。しかし、相対変位データからは、この滑り層において変形が集中していることが明らかである。図では、写真中の左側半分の観察点で変位速度の急減が生じて、滑り層が発生していることが解る。滑り層発生後、滑り層から $300\mu\text{m}$ も離れた観察位置からも微小ながら変形が生じ、滑り層発生と前後して微視的ダイレイタンスが減少していることがわかる。この時期は弱面が発達して滑り層が形成される過程であり、弱面が滑り層に発展するには、弱面形成時と同じく、土粒子のわずか数 μm の動きで充分であること、滑り層の幅は一様ではないが、概ね $100\sim 200\mu\text{m}$ であることが判明した。

巨視的ダイレイタンス特性を裏付けるような、供試体の Y 方向挙動は明らかでない。滑り層を挟んだ観察点での挙動は、せん断面における凸部乗り越えによるものと考えられる。この場合、一般的に滑り面内の凸部乗り越えに伴うダイレイタンスは、およそ $10\mu\text{m}$ 以内である。

5.4 供試体の滑り層内における挙動

滑り面内の供試体の典型的挙動を Photo. 5 と Fig. 12 に示す。ここでは、滑り面が生じることにより分離した供試体が、変位につれて再接触している様子が観察され、再接触の影響範囲はきわめて小さい。

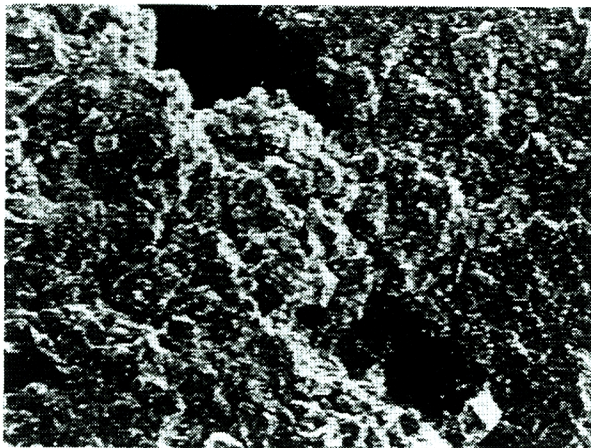
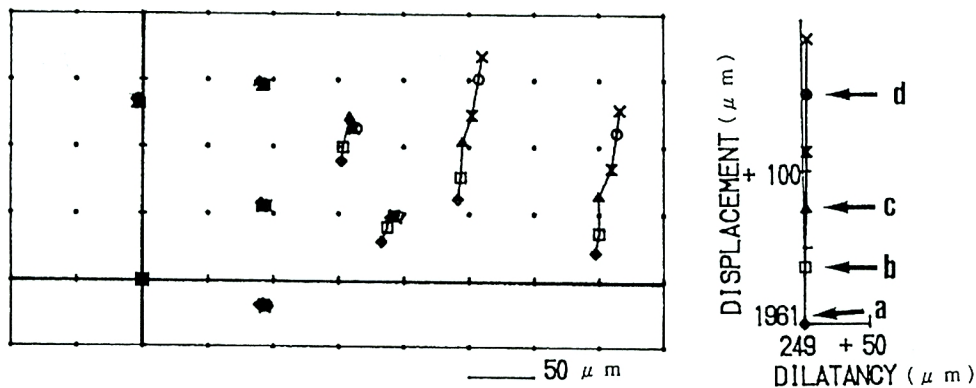


Photo. 5. Inside of sliding layer.

再接触による局所的破壊は、一般にせん断面内の小突起に限定されて、凸部乗り越えによるダイレイタンスの発現はみられないか、もしくは、非常に小さく数 μm 程度である。また、滑り面の外側では変形は非常に小さく、変形は滑り面内で集中的に起こっていることが解る。

ただし例外的に、いわゆるリーデルせん断面に挟まれたとみなされる部位では、乾燥供試体の場合と類似した挙動を見せている。つまり、リーデルせん断面に挟まれた部分が $100\mu\text{m}$ 程の大きさのベッドとなり、剥離、回転する。しかしながらこのベッドの回転等



(a) Relative deformation from the basic point A (b) Macro-deformation

Fig. 12. Micro-deformation inside of sliding layer.

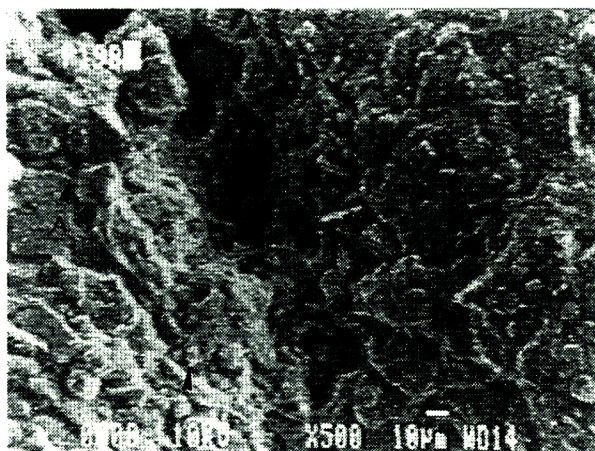
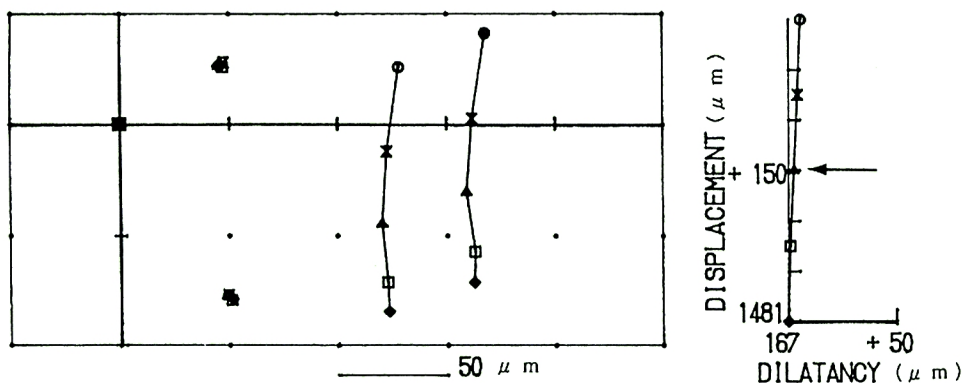


Photo. 6. After the shear failure.

も、滑り面外部に与える影響は小さく、わずかに $10\mu\text{m}$ 程度のダイレイタンスが生じているのみである。

滑り面形成後は、二つの滑り面に挟まれたせん断部の剥離が生じることが多い。発達した滑り面により、観察面において供試体の分離が生じて土粒子の挙動が観察されない。この時期には、また、剥離したせん断部が Z 方向に変位する。

Photo. 6 に見られるとおり、ここでは、明確な滑りが生じている。しかしながら土粒子の挙動が必ずしも平面的であるとは見せないため、間隙の増加している領域、あるいは



(a) Relative deformation from the basic point A (b) Macro-deformation

Fig. 13. Micro-deformation after the shear failure.

は滑り面によって供試体に生じている分裂等は必ずしも観察されてはいない。つまり観察像上では、供試体が連続的であることも多い。

変位方向は概ね X 方向であり、滑り面における凸部乗り越え等のダイレイタンスに対する影響は小さい。Fig. 13 のせん断部における微視的ダイレイタンスは、増加(正)が生じている。しかしこれらは、いずれも数 μm 程度である。

またここで観察される滑り面は、場合によっては複数の滑り面が交差することもあり、この場合には非常に複雑な挙動が観察される。

5.6 粘性土の変形挙動モデル

以上に観察された結果をもとに、粘性土の変形挙動をモデル化する。

(1) 乾燥粉末カオリン粘土と PEG 混合状態では、土にはいわゆる構造ができておらず、その状態は液状である。この状態では、土粒子間の接触状態も不特定・不安定である。また配向は生じていない。

(2) K_0 圧密によって、間隙が減少し、板状粒子に配向構造が形成される (Fig. 14(a))。この間隙の減少によって、土粒子は互いに接触し構造を形成する。配向は、変形方向によって生じ、変形方向に面を向ける。

(3) 垂直荷重載荷によっても、供試体の配向構造は余り乱されない (Fig. 14(b))。また先行圧縮圧力に比べて小さな垂直荷重でも大きな変形を生じるのは、配向構造による異方性のためである (Fig. 14

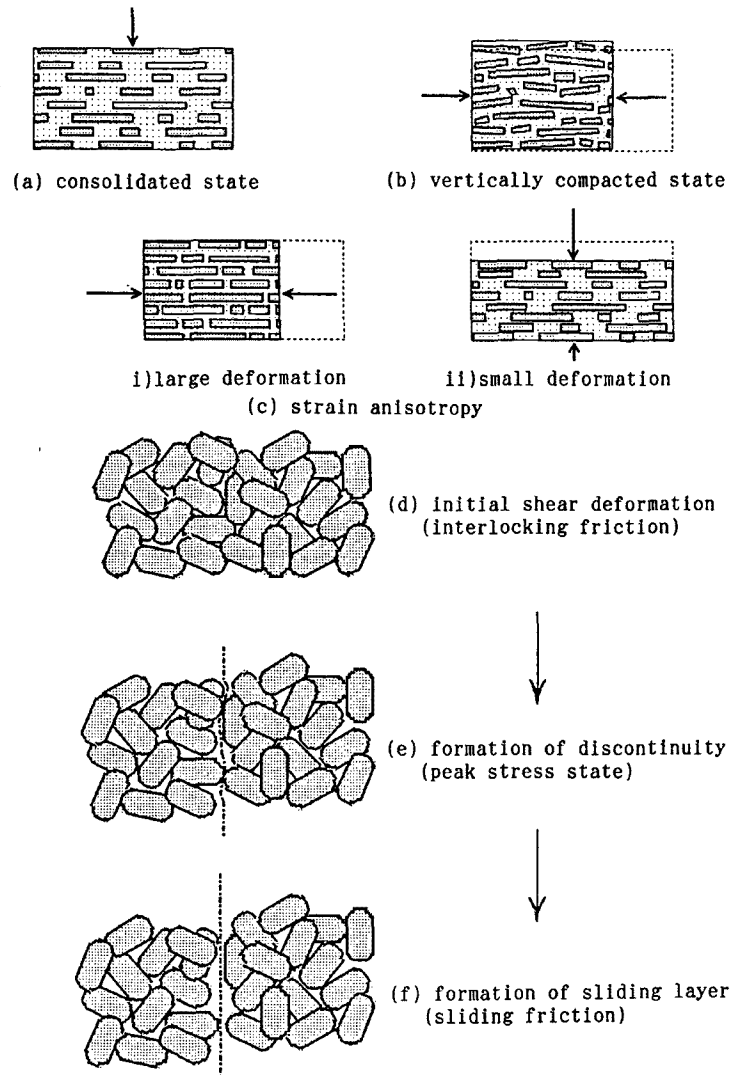


Fig. 14. Particle deformation model.

(c)。

(4) せん断初期には、垂直荷重による構造内にインターロッキングが働き、急激に大きなせん断抵抗を示す (Fig. 14(d))。

(5) 変形が進むと、垂直荷重載荷時にできた構造の安定状態が乱される。これにより相対的に微小変位が生じ、局所的にわずかながら間隙の増加する部分ができ、ダイレイタンスーが発現する。

(6) この間隙の増加部分では、せん断（摩擦）がインターロッキングから滑りに移行し、強度が低下する。このためこれ以降の変形はこの部分（弱面）に集中し、弱面の近傍以外では変形がほとんど生じない。

(7) 変形の進行とともに、弱面（複数）は発達する。また、供試体全体のせん断形態も、インターロッキングから滑りに移行する。この過程において、弱面間の位置関係、局所的応力状態等から、各々の弱面で、その発達状態に差が生じる (Fig. 14(e))。

(8) 発達した弱面のうちのいくつかが滑り面（層）を形成し、変形が滑り面に集中する (Fig. 14

(f)。この状態までに、供試体のせん断形態は完全に滑りに移行する。

(9) 滑り層内で起こる局所的な破壊は、滑り面表層に限られる。これは、構造間におけるインターロッキングが個々の土粒子表面に働く滑り摩擦と比べて大きいためである。また、滑り面における凸部乗り越えによるダイレイタンスーは、凸部の破壊が起こるため小さいものである。

6. ま と め

本研究は、粘性土の変形挙動を微視的構造の立場から検討したものであり、その内容は大きく二つに分けられる。一つは、粘性を付与した状態の土の変形機構を微視的に直接観察する手法の確立を試み、間隙水をPEGで置換した供試体を用いている。そして、新しく開発したUSSBTが、変形挙動の微視的 direct 観察に有効であることを示している。そしてもう一つの内容は、この試験法を用いて実際に粘性を付与されたカオリン粘土の変形挙動を観察し、微視的構造からこれをモデル化したものである。

ここに得られた成果をまとめると次のとおりである。

(1) 試験法について巨視的データから検証を行い、間隙水のPEG置換法の妥当性を明らかにしている。また粘性供試体を用いる場合には、間隙圧条件の制御が必要であることを確認した。

(2) 微視的観察結果をまとめて、粘性供試体の変形挙動を以下のようにモデル化した。

1) せん断初期、土粒子構造の微小変形により弱面が形成され、せん断形態がインターロッキングから滑りへと移行する。

2) 弱面が発達して滑り面が形成される。滑り面は、視覚的に明らかになる前から、変形の集中している面として明らかに存在する。

3) ダイレイタンスー発現は、インターロッキングから滑りへのせん断形態の移行時における、構造変化による。これは非常に小さな変化であり、電子顕微鏡でも直接的には観察できない。

4) 滑り面形成によりせん断形態は、完全に滑りに移行する。

5) 滑り面上における凸部乗り越えは、ダイレイタンスーにはほとんど影響しない。

なお、末尾ながら常日頃ご指導を賜っている京都大学名誉教授赤井浩一先生に深く感謝すると共に、実験を担当した元京都大学大学院生内田康彦君に深謝の意を表するものである。

参 考 文 献

- 1) 龍岡文夫：土のせん断変形・強度およびその試験法，わかりやすい土質力学原論，土質工学会，1987，pp. 1-4.
- 2) 嘉門雅史・浅川美利：土の力学1—新体系土木工学16，技報堂出版，1988，271 p.
- 3) 内田康彦：粘性土の微視的変形機構に関する実験的考察，京都大学修士論文，1989，145 p.