

高速高圧リングせん断試験機による 砂質土・粘性土のせん断特性

福岡 浩・佐々 恭二・島 通保

SHEAR CHARACTERISTICS OF SANDY SOILS AND CLAYEY SOILS SUBJECTED TO THE HIGH-SPEED AND HIGH-STRESS RING SHEAR TESTS

By *Hiroshi FUKUOKA, Kyoji SASSA and Michiyasu SHIMA*

Synopsis

The purpose of this study is to get an experimental basis for the mechanism of mass movements, and to obtain exact knowledge on the influences on friction angle by shearing velocities. High-speed, high-stress ring shear tests on sandy and clayey materials have been carried out to examine whether there is any change in the frictional behavior of these materials at high shearing velocities of 0~150 cm/sec and high normal stresses of 0~3.8 kgf/cm². Sample used for tests were glass beads, sandy soils in the university campus, the Toyoura standard (seashore) sands and bentonite clays. All samples were dry. Although results on glass beads was independent of either velocity or normal stress over the entire range of both shearing velocity and stress, changes in frictional coefficients were observed on the Toyoura sands and bentonite clays. In the Toyoura sand, not only the fracture of sand particles, but the change in grain size distribution during shear seems to be the major reason. As for bentonite clays, fracture and griding of clay peds during shear and may be effective for the variation of friction coefficient.

1. は じ め に

近年地すべり土塊の運動予測のための技術の向上が強く要望されている。より信頼性の高い運動予測を行うためには土の運動時のせん断特性, 特に運動時のマサツ角 ϕ_m の測定を行う事は不可欠である。

従来, 土の内部マサツ角の測定には一面せん断試験や三軸試験が最も多く利用され, 地すべり地の土についても多くの試験が行われてきた。しかし通常の大きさの一面せん断試験や三軸試験では試料のせん断または圧縮の際の変位量が最大数 cm にしかない。

しかし, 現実の地すべりは数 m~数百 m にわたって運動し, 御岳大崩壊などの巨大岩屑流では十数 km にも及んでいる。運動速度も mm/day から 10³ cm/sec のオーダーにわたっている。地すべりの運動の研究のためにはまず, m 以上のオーダーの長いせん断距離, 低速~高速のせん断速度についてせん断試験を行い, 運動時の内部マサツ角を調べる必要がある。

現実の地すべりの条件に対応した試験条件でせん断試験を行い、マサツ角を測定するためには、せん断距離に制限がなく高速でせん断できる高速リングせん断試験が最も望ましい。

この目的を達成するために地すべり部門では1983年に佐々が開発した高速低圧リングせん断試験機⁷⁾と1988年に佐々が開発した高速高圧リングせん断試験機¹⁹⁾を用いて地すべり地の土、及び各種材料についての試験を行っている。

この高速高圧リングせん断試験機を用いた最初の試験として1984年の御岳大崩壊と1985年の地附山地すべりの現場で採集してきた土について試験を行った¹⁹⁾。御岳大崩壊の流下した伝上川の溪床堆積物の乾燥試料については、垂直応力 σ を0から3.5 kgf/cm²、せん断速度0.01 cm/sec から10 cm/sec まででマサツ角 ϕ_m は35.0°の同じ値を示した。しかし、100 cm/sec のせん断速度の場合のみマサツ角が少し大きくなり、約36.5°になった。試験後に試験機をあけて試料を取り出してみると、せん断面では試料が破碎され細粒化していた¹⁹⁾。

また、地附山地すべりの土について行ったリングせん断試験結果では0.01, 0.1, 1 cm/sec で32.8°, 35.0°, 36.5°と速度を上げると共に運動時のマサツ角 ϕ_m が大きくなる傾向が認められた。御岳・地附山どちらもせん断にともなう粒子破碎が起こっており、せん断面には粉末状の試料が見られた¹⁹⁾。

これらの試験結果では、運動時の土の内部マサツ角が速度によって変化したが、低圧高速リングせん断試験機を用いて0~0.4 kgf/cm²の低圧で試験した結果では速度によらず土の内部マサツ角は一定であった^{11), 12)}。この差は、せん断時の圧力、用いた試料の壊れ易さに関係していると思われる。そこで粒径や粒子の壊れ易さの異なる材料を用い、特に土の運動時の内部マサツ角のせん断速度依存性について研究を行った。

試験に用いた試料は粒径の均一、あるいはよく調整されている、ガラスビーズ(直径0.2 mm)、宇治構内のテニスコートの土、豊浦標準砂、ベントナイトというオーダーの異なる粒子サイズの4種類のサンプルについて試験を行い、せん断速度によるマサツ角の変化とせん断時の粒子破碎による粒径分布の変化も調べた。試験はせん断抵抗力に間ゲキ水圧や間ゲキ水の粘性抵抗の影響がないように乾燥状態で行った。

リングせん断試験の試験手順については上記の4種の試料について、せん断速度を0.01, 0.1, 1, 10, 100 cm/sec の順に上げて行き、各せん断速度について垂直応力を0から3.5 kgf/cm²まで連続的に上げた後、再び連続的に下げるという手順で行った。但し、100 cm/sec の高速せん断だけは長時間せん断するとギャップを通して試料が漏れる可能性があったため、0.5 kgf/cm²から1 kgf/cm²ずつ段階的に垂直応力を上げていき、各段階毎に定垂直応力下で短時間せん断をおこないマサツ角を測定した。

2. 試験機と試験方法

Fig. 1 に試験機の模式図を示す。この試験機は粗粒の試料も試験できるよう、従来のリングせん断試験機と比較して²³⁾大型のリング状のサンプルボックスを備えている。サンプルボックスは内輪と外輪とからなり、それぞれ上下の部分からなる。上下の部分の間のギャップには試料漏れ防止のためゴムを上輪側に接着している。サンプルボックスの外径は33 cm、内径は21 cmでせん断面の面積は509 cm²、高さ最大8.2 cm(標準で6 cm)で、サンプルボックスの容積は最大4173 cm³である。

試料は内輪・外輪により側方の変位は拘束されており、垂直荷重の載荷板のみが鉛直方向に可動である。すなわち試料は鉛直方向の圧密・膨張のみが可能である。試料にかかる垂直応力はエアーコンプレッサーからの圧搾空気をエアーサーボ装置で制御し、上下に可動な載荷板を通して与える。最大垂直応力は3.8 kgf/cm²である。

試料のせん断はサーボモータに4段のギアを介してサンプルボックスの内外輪の下半分及びそれらを固定している底面を回転させて行う。最低速度は0.001 cm/secで最高速度は150 cm/secである。サンプルボックスの底面と載荷板には土のすべりどめがついており、また試料に垂直荷重をかけた状態で下輪側だけ

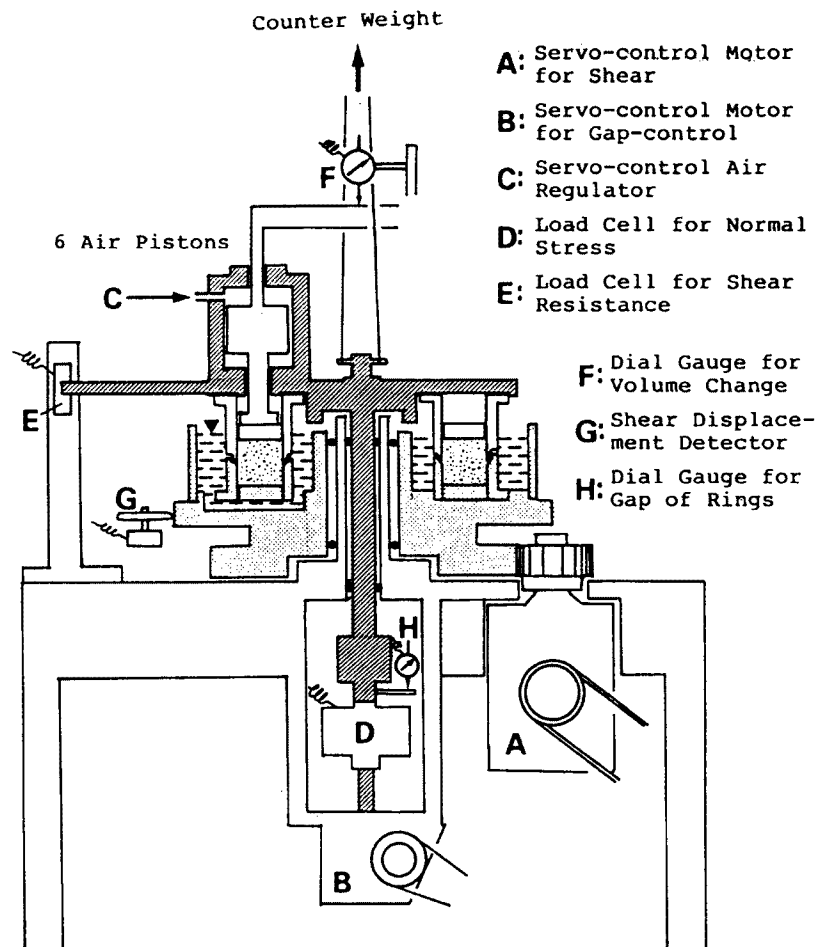


Fig. 1. Schematic diagram of the structure of the High-speed High-stress Ring Shear Apparatus.

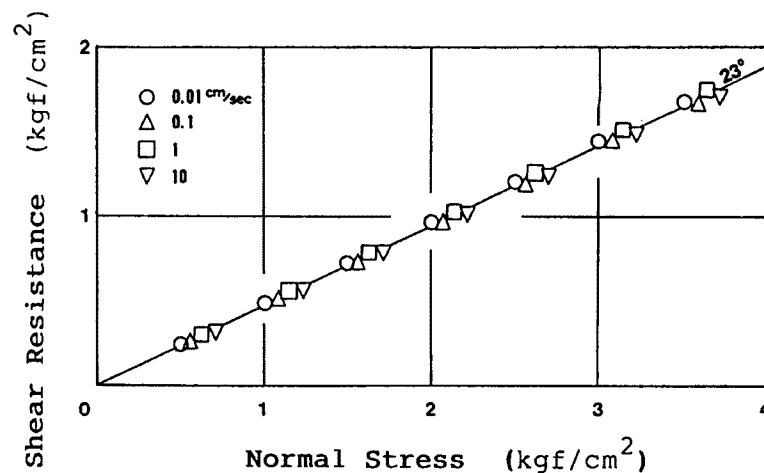


Fig. 2. Strength envelopes of the 0.2 mm glass beads. Void ratio during shear test: $e=0.87\sim0.88$

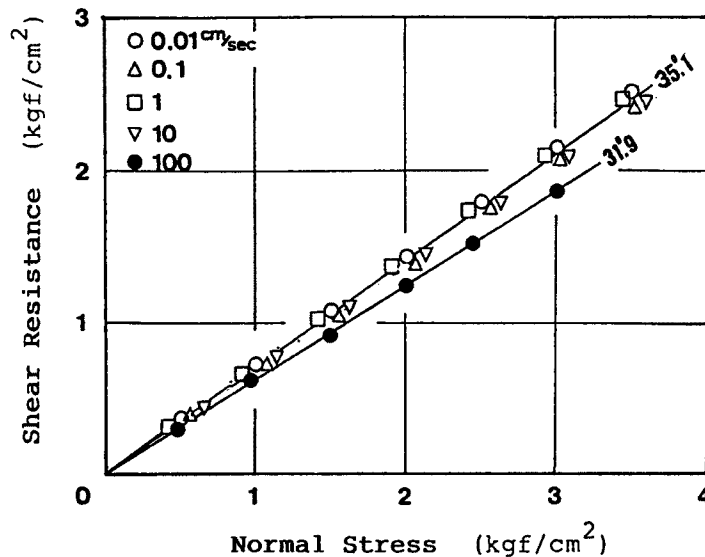


Fig. 3. Strength envelopes of the dry soil in the university campus. Void ratio during shear test: $e=0.51\sim0.68$

を回転させることにより、試料は上輪一下輪の間でせん断が起こり、水平なせん断面が形成され、せん断抵抗が測定できるよう設計されている。

リングせん断試験機の設計においてギャップを一定に保つことが最も重要であるが、電氣的サーボ機構によりギャップを自動的に一定に保つ機能を付加したことで試験を容易に行えるようになった。

3. 実験結果

3.1 ガラスビーズ

直径 0.2 mm の乾燥状態のガラスビーズの試験結果を **Fig. 2** に示す。せん断速度 0.01 cm/sec $\sim$ 10 cm/sec, 垂直応力 0 $\sim$ 3.5 kgf/cm² でマサツ角はほぼ 23.0° で一定している。(せん断速度 100 cm/sec では試料が漏れたので試験を中断した。) 試験後のサンプルを調べると粒子破碎及び粒子の変形等は起こっていなかった。

3.2 大学構内のテニスコートの土

大学構内のテニスコートで使用している山砂を乾燥させた試料について試験した結果を **Fig. 3** に示す。0.01 cm/sec から 10 cm/sec までせん断速度を上げていってもほぼ同じ 35.1° のマサツ角を示すが、100 cm/sec でマサツ角が小さくなっている。試験後、試験機の上盤(載荷ユニットと内外輪の上側の部分)を取り外し、試料を観察した。サンプルの真中に水平にせん断が起こっているのがわかり、粉末状になり、灰色に変色している部分が出ていた (**Photo. 1(a), (b)**)。

せん断後のサンプルとせん断前の土の粒径分布を **Fig. 4** に示す。(せん断面の土だけを取れば細粒の土のみである) 明らかに試験後に粒径が小さくなっている。また、粒径分布曲線の形も試験前と後では 0.3 mm 以下では粒径方向に 0.36 倍移動するとほとんど同型になる。すなわち個々の粒子は細かくなったが、相対的な粒径分布は変わらず、せん断に効く粒子の噛み合い状況はあまり変わっていないと考えられる。

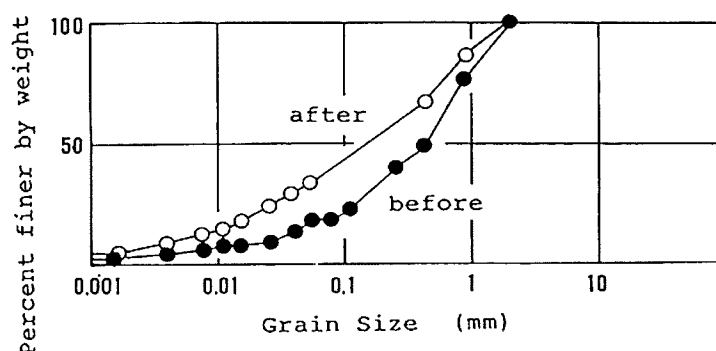
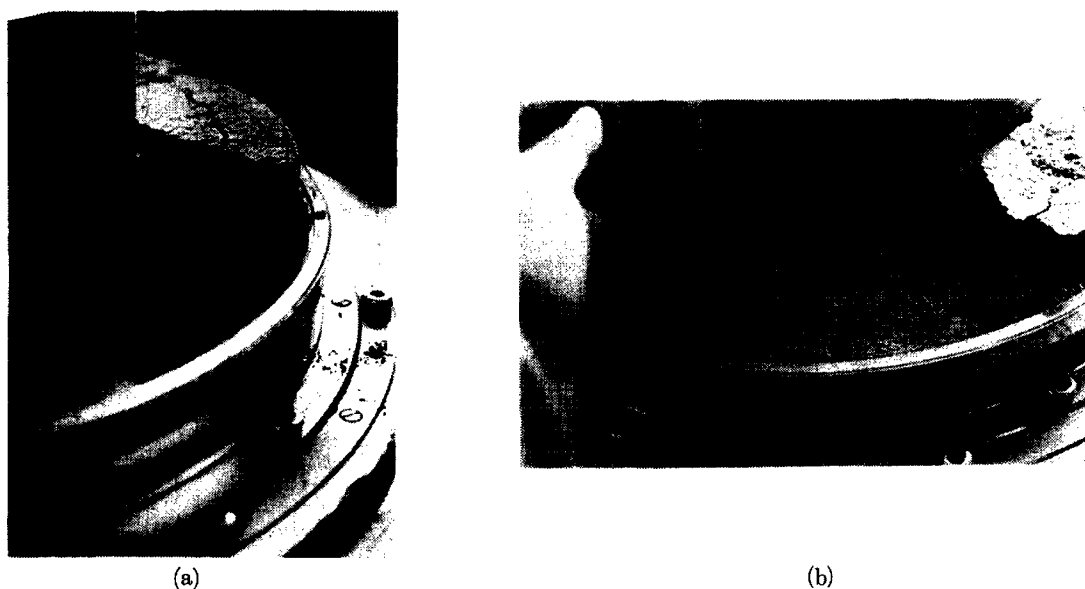


Fig. 4. Grain size distribution of the soil in the campus.
 ●—●: before the test, ○—○: after the test

3.3 豊浦標準砂

乾燥状態の豊浦標準砂について行った試験の結果を Fig. 5 に示す。せん断速度を 0.01 cm/sec から 100 cm/sec まで上げるとマサツ角は 31.7° から 33.8° まで上昇した。運動時の内部マサツ角 ϕ_m が速度の関数ならば速度を下げれば運動時の内部マサツ角 ϕ_m は下がるはずである。そこで 1 m/sec の後、0.01, 0.1, 1 cm/sec のせん断速度で試験したが、マサツ角はほとんど下がらず 33.5° で一定の値を示し、速度による変化を示さなかった。せん断速度とマサツ角とは 1 対 1 の関係になっていると予想したが、実際にはマサツ角は速度だけにはよっていないことがわかった。Fig. 6 にせん断速度とマサツ係数 ($\tan \phi_m$)、サンプルの高さの関係を示す。プロットした各点の横の数字は試験の順番を示す。マサツ係数は 0.01 → 0.1 → 1 → 10 cm/sec まで上がり続け、その後 5, 6, 7, 8 の試験ではほぼ一定値になった。試料の体積は 3 番目の 1.0 cm/sec でピークに達し、その後徐々に下がり続けている。マサツ角が 5 番目以降ほぼ一定値を示すことから、3 番目の体積のピークはダイラタンシーであると考えられる。

せん断試験前と後のサンプルの粒径分布を Fig. 7 に示す。試験前の豊浦標準砂は約 0.05 ~ 0.5 mm の間

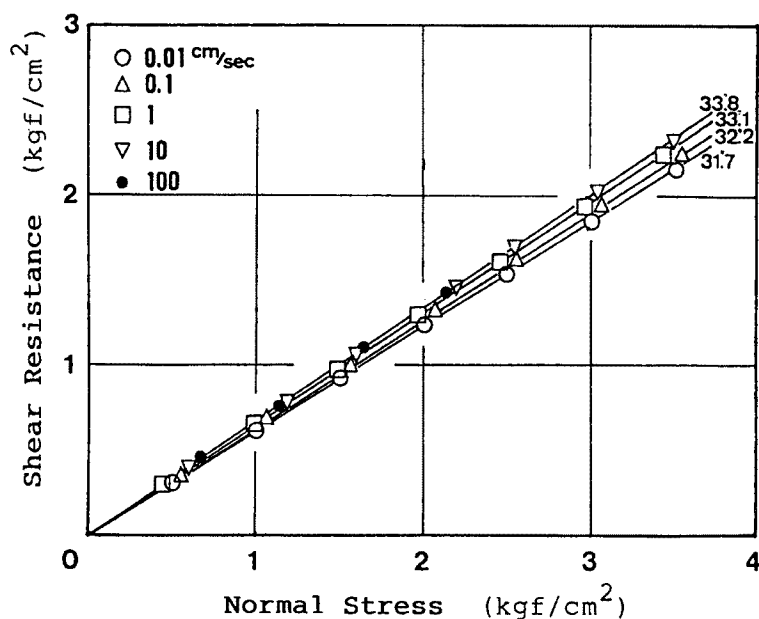


Fig. 5. Strength envelopes of the dry Toyoura standard sand. Void ratio during shear test: $e=0.65\sim0.83$

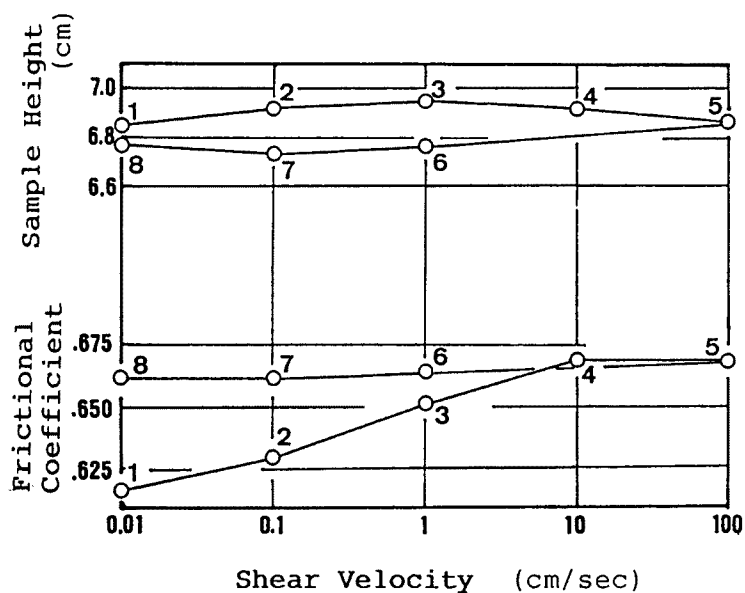


Fig. 6. Shear velocity v.s. frictional coefficient and sample height relationship for the dry Toyoura standard sand.

に分布しているが、せん断試験後のサンプルの粒径分布では 0.002 mm まで分布していることがわかり、せん断によって土粒子が破碎されたことがわかる。

3.4 ベントナイト

市販されている乾燥した粉末状のベントナイト試料 (Photo. 2) について試験を行った。試料は2分間 3.8 kgf/cm^2 で予圧密を行い、続いて残留状態にするために 0.1 kgf/cm^2 の低い応力の下で 10 cm/sec の速

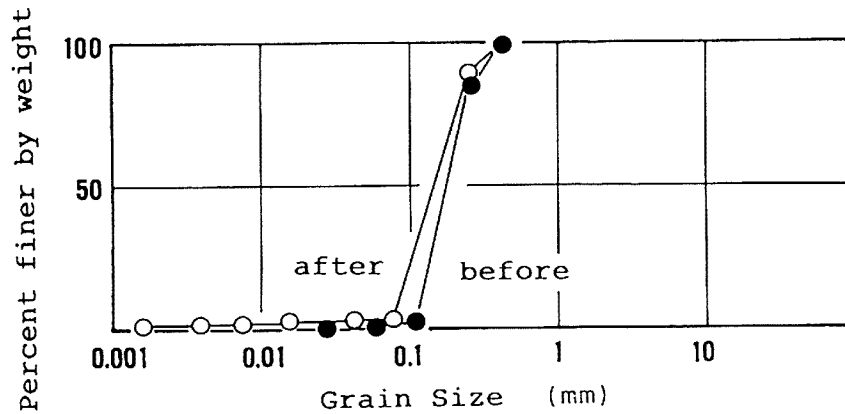


Fig. 7. Grain size distribution of the Toyoura standard sand.

●—●: before the test, ○—○: after the test



Photo. 2. Dry bentonite before ring shear test.

度で2分間せん断を行った後、本試験を始めた。試験は一定速度でせん断しつつ垂直応力を連続的に上下させて行った。Fig. 8 は σ - τ 図であるが、垂直応力を下げる過程での値をプロットしている。まずせん断速度 0.01 cm/sec で 28.5° だったが、0.1 cm/sec から 10 cm/sec までせん断速度を上げるにつれて、 $34.0^\circ \sim 34.5^\circ$ と大きく変化した。試験後サンプルを取り出した所 (Photo. 3)、せん断面より上のベントナイトには水平から約 30° の方向に傾いた節理状のせん断面があり、この面で容易にサンプルは壊れた。Bishop²³⁾ による粘土の試験でも同様のものが報告されているが、これは垂直応力下で主せん断面が形成される過程で生じるリーデルせん断面が発達したものだと考えられる²¹⁾。サンプルの中程の高さには水平に堅い面が出来ており、サンプルはこの面で容易に上下に分離し、上下面共に堅くなっていた。せん断がこの面で行なわれたこ

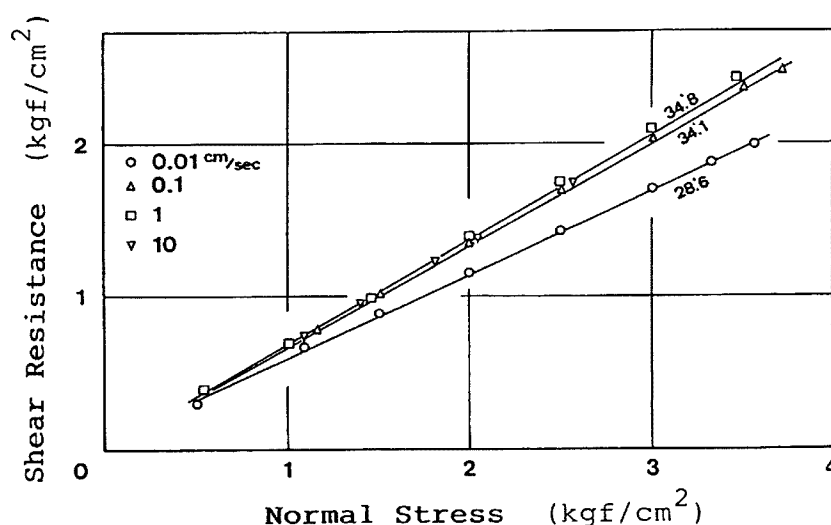


Fig. 8. Strength envelopes of the dry bentonite. Void ratio during shear test: $e=1.74\sim 2.04$



Photo. 3. During removing the upper portion of bentonite sample after ring shear test, showing Riedel shears inclined to the principal shear plane.

とは、地附山の試験の時と同様に上下面とも細かい slickenside 様の筋模様がついていたことから明白である（以後この面を主せん断面と呼ぶ）。さらに細かく観察するとこの主せん断面の上下に細かい粒子の薄い層がはさまっていた（Photo. 4）。また、主せん断面の下に、主せん断面ほど容易にはがれることはないが同様の筋模様を含んだ面が幾つもあった。これは地附山の土の試験¹⁹⁾と同様、せん断面付近で試料の沈下が生じるため、高速高圧リングせん断試験機ではせん断面は常に試料の真ん中の高さで起きようになっているが、せん断面の上だった部分に新しいせん断面が形成されてゆくためであると考えられる。

Fig. 9 にせん断速度 0.01 cm/sec と 0.1 cm/sec での垂直応力を上げる過程を含めた全応力経路を示す。せん断の進行とともにマサツ係数が大きくなる過程がわかる。特に垂直応力を上げる過程と垂直応力の最大値付近でマサツ係数はより大きく変化していることがわかる。

Fig. 10 にベントナイトの 0.1 cm/sec での試験のせん断変位に伴うマサツ係数 ($\tan \phi_m$)、サンプルの高さの変化を示す。垂直応力を上げると徐々に体積も収縮し、マサツ係数が上昇している。ところが垂直応力を 3.5 kgf/cm² で一定の状態でもせん断を続けると体積は減少し続け、マサツ係数は上昇し続けている。垂直

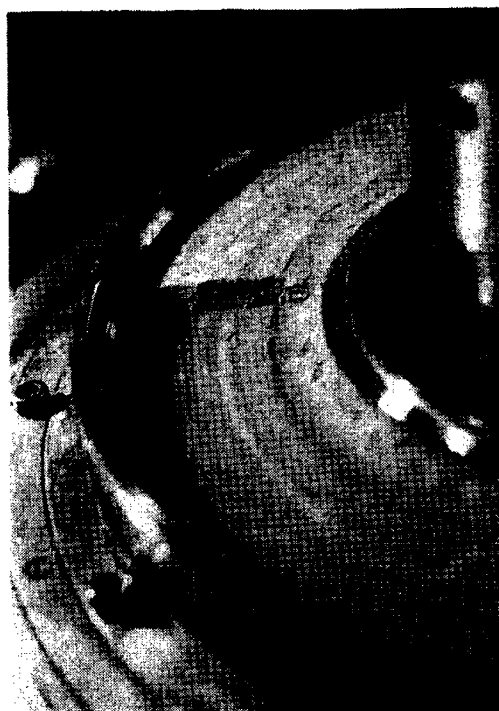


Photo. 4. Lower portion of bentonite sample after ring shear test, showing polished, striated, slip surface in plane of relative rotary motion.

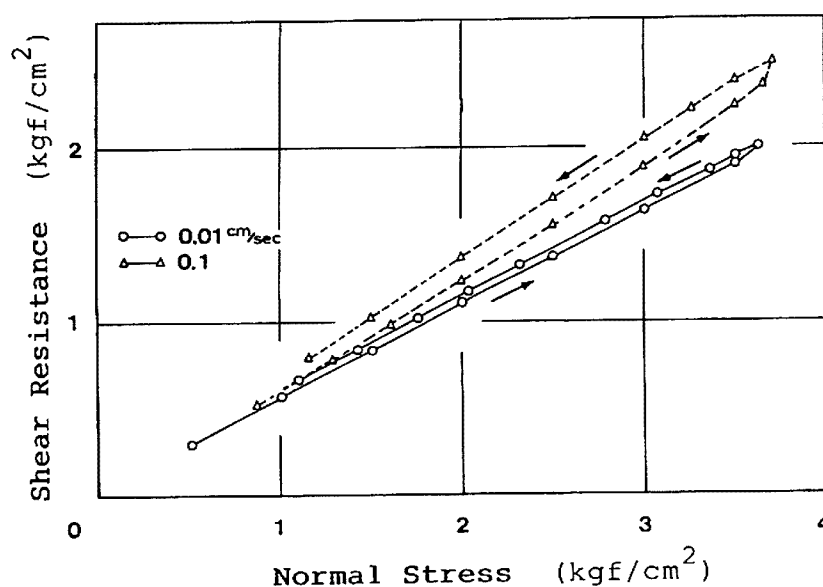


Fig. 9. Stress path of the dry bentonite at the shear velocity of 0.01~0.1 cm/sec

応力を 3.5 kgf/cm^2 から下げると体積は回復し始め、マサツ係数はほぼ一定値を示した。垂直応力を上げるとサンプルの弾性により体積が減少するが、垂直応力一定でも体積が減少したこと、また、垂直応力を下げた場合に垂直応力を载荷前の状態に戻しても体積は元の体積には戻っていないことからせん断による粒子破砕が起きていると考えられる。Fig. 11 に試験前後の粒径分布の比較を示す。ベントナイトは粒径が 0.01 mm 以下と小さく、沈降試験では通過質量で約50%までしか捉えることはできない。沈降試験では Fig. 4,

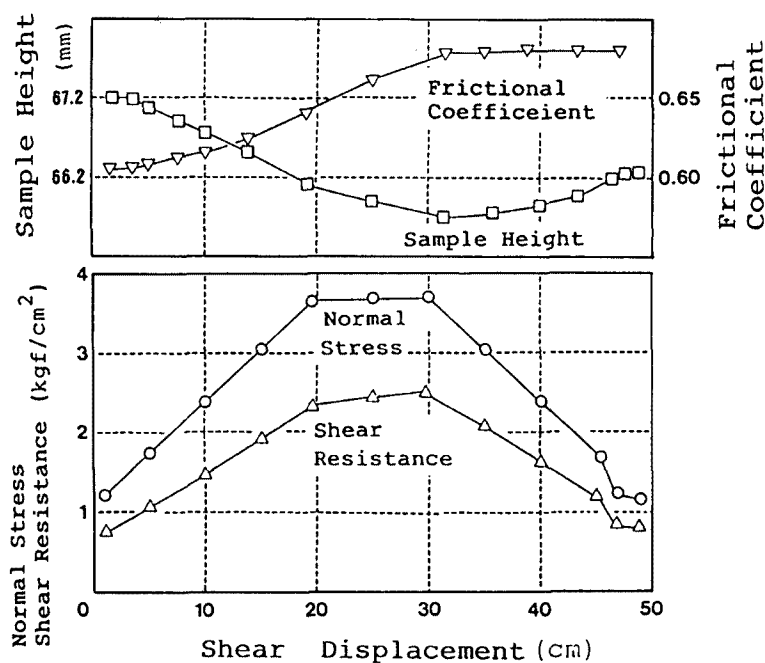


Fig. 10. Variation of frictional coefficient, sample height, shear resistance during a cycle of test. (shear velocity: 0.1 cm/sec)

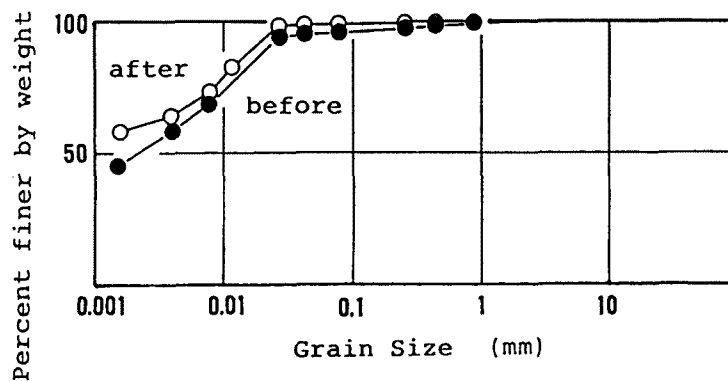


Fig. 11. Grain size distribution of the dry bentonite.
●—●: before the test, ○—○: after the test

Fig. 7 と共に分散剤を使っておこなっており、粘土鉱物粒子の粒度分布を表わしている。この図よりベントナイトの粒子が破碎され、より細粒の部分が増加していることがわかる。

4. 考 察

ガラスビーズと標準砂は共に 0.2 mm 程度のほぼ均一な粒径であるが、せん断速度を増大させると、標準砂ではマサツ角が上昇し、一方ガラスビーズは不変であった。これは、標準砂では粒子破碎が生じ、ガラスビーズでは粒子破碎が生じなかったためと思われる。粒子破碎が生じると均等粒径だった土は粒径に広い分布が生じ、粒子間の接触点も多くなり、土のせん断時におけるマサツも多くなる。粒子形状の観点からも、標準砂は海砂でありほとんど角のとれている粒子で、破碎によって粒子は角ばり、マサツ角の増加に寄与し

ているものと思われる。そのためせん断マサツが大きくなりマサツ係数が大きくなると考えられる。

標準砂と構内の土を比べるとどちらも粒子破碎が起こっているにもかかわらず、せん断速度を上げると標準砂の方はマサツ角が増加し、構内の土は逆に 100 cm/sec のせん断速度ではマサツ係数が減少した。標準砂は試験前は均一な粒径の粒子からなるが、せん断により細かい粒径の粒子が生成され、それが粒子の間を埋めることにより、粒子間の接触が増大すると思われる。一方、構内の土の試験では Fig. 4 において試験前の粒径分布曲線の粒径 0.5 mm 以下の部分を 0.36 倍ずつ平行移動するとほぼ試験後の粒径分布曲線と一致することから、試験前後で相対的な粒径分布は変わっていないと考えられる。また、大学構内の土は粒子形状も山砂であるため角がとれていないが、せん断による破碎によって角がとれ丸みを帯びるためマサツ角の低下に寄与するが、標準砂は海岸のため、最初は丸い形状であるが、粒子破碎により角ばった粒子になると思われる。これが、速度を増加させたときに標準砂ではマサツ角が増大し、構内の土では 1 m/sec でマサツ角が小さくなった理由と思われる。

粘土であるベントナイトについては、試験に用いたベントナイトはモンモリロナイトを主成分とする数 μm ~100 μm のベッド粒子からなり²²⁾、その他の鉱物粒子はほとんど含まれていない。Fig. 11 より粘土粒子は破碎され細かい粒径の粒子が増していることと、主にせん断面の密度が（計測は行っていないが手で触れた感触より）高くなっていること、Fig. 10 より粒子破碎が進むと共にマサツ係数が大きくなっていることから、ベントナイトにおいても粒子破碎によって細かい粒径の粒子が増え、せん断面の密度が増大したことによりマサツ角が増加したと考えられる。

参 考 文 献

- 1) 佐々恭二：御岳土石流など不飽和土石流の運動機構について，京大防災研年報，第29号 B-1，1986，pp. 315-329.
- 2) 佐々恭二：地すべり・斜面崩壊の運動予測，京大防災研年報，第30号 B-1，1987，pp. 341-357.
- 3) 佐々恭二：改良そりモデルによる地すべり・斜面崩壊の運動予測，砂防学会概要集，1987，pp. 68-71.
- 4) 佐々恭二：地すべり・斜面崩壊の面的予測法，地すべり学会概要集，1987，pp. 16-19.
- 5) 佐々恭二：地すべり・斜面崩壊の災害危険地図の作成方法について，砂防学会概要集，1988，pp. 69-72.
- 6) 佐々恭二：御岳大崩壊の運動シミュレーション，地すべり学会概要集，1988，pp. 136-139.
- 7) 佐々恭二：リングせん断型土石流発生・流動・停止現象再現試験機の試作研究，科学研究費試験研究成果報告書 57860028，1984，pp. 19-31.
- 8) 佐々恭二・福岡 浩・島 通保：高速高圧リングせん断試験機の開発と地すべりにおける急速載荷時のせん断強度変化，京大防災研年報，第32号 B-1，pp. 165-182，1989. pp. 165-182.
- 9) 佐々恭二：地すべり運動時のマサツ角と運動予測，地すべり学会関西支部シンポジウム「地すべりの c , ϕ と発生・運動予測」資料集，1989，pp. 41-56.
- 10) 佐々恭二：速い地すべりの運動機構について，地すべり学会関西支部シンポジウム「突発地すべりの予知・予測」資料集，1986，pp. 15-41.
- 11) Sassa, K.: The Jizukiyama Landslide and the Interpretation of its Long Scraping Motion, Proc. 5th International Conference and Field Workshop on Landslides, 1987, pp. 215-223.
- 12) Sassa, K.: (Special Lecture) Geotechnical Model for the Motion of Landslides, Proc. 5th International Symposium on Landslides, Vol. 1, 1988, pp. 37-56.
- 13) Hungr, O. and N.R. Morgenstern: High Velocity Ring Shear Tests on Sand, Géotechnique,

- Vol. 34, No. 3, 1984, pp. 415-421.
- 14) Scheidegger, A.: On the Prediction of the Reach and Velocity of Catastrophic Landslides, *Rock Mechanics*, Vol. 5, 1973, pp. 231-236.
 - 15) Vibert, C.・佐々恭二・島 通保: 粒状体の高速リングせん断特性, 地すべり学会概要集, 1988, pp. 154-157.
 - 16) Vibert, C.・佐々恭二・福岡 浩: 粒状体の高压高速リングせん断特性, 砂防学会概要集, 1989, pp. 93-96.
 - 17) 福岡 浩・佐々恭二・島 通保: 長野市地附山地すべりの土質特性と運動, 京大防災研年報, 第30号 B-1, 1987, pp. 359-371.
 - 18) 福岡 浩・佐々恭二・島 通保: 地附山地すべりの土質特性と運動, 地すべり学会概要集, 1987, pp. 282-285.
 - 19) 福岡 浩・佐々恭二・C. Vibert・島 通保: 高速高压リングせん断試験機による地附山地すべり・御岳大崩壊の土質特性, 京都大学防災研究所年報, 第32号 B-1, 1989, pp. 183-195.
 - 20) Vibert, C., K. Sassa and H. Fukuoka: Friction Characteristics of Granular Soils Subjected to High Speed Shearing, *Proc. Japan-China Symposium on Landslides and Debris Flows*, Niigata and Tokyo, 1989, pp. 295-299.
 - 21) Morgenstern, N.R. and J.S. Tchalenko: Microscopic Structures in Kaolin subjected to Direct Shear, *Géotechnique*, Vol. 17, 1967, pp. 309-328.
 - 22) 嘉門雅史・内田康彦: 粘土の微視的せん断変形と巨視的応力-ひずみ挙動との相関, 第22回土質工学研究発表会概要集2の1, 1987, pp. 389-390.
 - 23) Bishop, A.W., G.E. Green, V.K. Garga, A. Andresen, and J.D. Browns: A New Ring Shear Apparatus and its Application to the Measurement of Residual Strength, *Géotechnique*, Vol. 21, 1961, pp. 273-328.
 - 24) 福岡 浩・佐々恭二: 高速リングせん断試験機による砂質土・粘性土のマサツ角の測定, 平成2年度砂防学会概要集, 1990, pp. 358-361.
 - 25) 小橋澄治・佐々恭二: 地すべり・斜面崩壊を防ぐために, 山海堂, 1990, pp. 37-44.