

不攪乱まさ土のせん断特性と微視的考察

A MICROSCOPIC CONSIDERATION ON SHEARING CHARACTERISTIC
OF DECOMPOSED GRANITE SOIL

八木 則男*・矢田部龍一**

By Norio YAGI and Ryuichi YATABE

A new preparation method of undisturbed specimen of decomposed granite soil by freezing a block sample is developed. Triaxial and simple shear tests were carried out for undisturbed and compacted specimens. The following results are obtained.

- 1) The simple shear test results can give the strength parameters of the unsaturated and the saturated specimens at the low pressure. These parameters are valid for the analysis of a slope stability.
- 2) The relationships between stress, strain and volumetric strain on the undisturbed and compacted specimens are different. This fact, especially concerning the dilatancy characteristics of these samples, is explained by the distribution of pore size and crushing of the particles.
- 3) The suction in unsaturated specimen is important for the strength.

1. ま え が き

中国・近畿地方に広く分布しているまさ土地域では急傾斜指定箇所も多く、豪雨時に斜面崩壊が頻発している。著者らは降雨浸透による斜面崩壊機構を解明するため室内模型実験、飽和・不飽和浸透解析、斜面安定解析それに現地斜面崩壊実験を行ってきているが^{1)~3)}、まさ土斜面を対象にする場合、その安定解析、崩壊予測、対策工には特殊土とよばれるまさ土の力学特性を解明する必要がある。

盛土斜面の安定解析等を対象として、締め固めたまさ土の力学特性に関しては多くの研究がなされている。しかし、まさ土からなる自然斜面の安定解析に必要な不攪乱まさ土の強度・変形特性に関する研究は非常に少ない。それは、下記のような問題点が解決されていないためだと思われる⁴⁾。

- ① まさ土は組織が非常にもろいので、不攪乱状態での供試体の作成が困難である。
- ② 低圧下でのせん断強度を正確に測定する試験法が確立されていない。

不攪乱まさ土の強度・変形特性に関する研究には、一面せん断試験機を用いたものとして小野寺ら⁵⁾、西田ら⁶⁾によるものがある。三軸圧縮試験機を用いたものとしては比較的大型の供試体を使用した庄野ら⁷⁾の研究や小型の供試体による青山ら⁸⁾の研究がある。しかし、三軸試験用の供試体の作成は容易ではなく、その力学特性も未解明な点が多い。

そこで本研究では不攪乱まさ土供試体の作成法の確立と力学特性の解明を目的として、次のような研究を行った。まず、供試体の成形はブロックサンプリングした試料を凍結させ、試作したコアビットで円柱状の供試体を作成する方法により可能であることを示した。次に、斜面安定解析を行う場合、重要となる低圧下でのせん断強度は試作した単純せん断試験機により精度よく求められることを示し、また、節理面などの弱面がせん断特性に与える影響を調べた。さらに、不攪乱まさ土と突き固めたまさ土のせん断挙動の相違を間隙分布や粒子破砕などの観点から調べ考察を加えた。

2. 不攪乱まさ土の供試体作成法

試料はまさ土の露出面から30×30×20 cm程度のブロックをサンプリングし、石膏と型枠で保護し持ち帰った。この型枠で固定した乱さない試料を飽和度が60%

* 正会員 工博 愛媛大学教授 工学部海洋工学科
(〒790 松山市文京町3)

** 正会員 工修 愛媛大学助手 工学部海洋工学科(同上)

～70%程度になるよう含水比を調整した後、低温槽内で凍結させた。この程度の飽和度にしたのは、次のような理由による。凍結させる際、飽和度が高ければ氷の膨張によってまき土の組織が壊されやすいと考えられる。したがって凍結時にはより低い飽和度の方が望ましいが、低すぎれば成形時に供試体周囲の乱れがひどくなる。そこで、種々の飽和度で凍結させ、供試体の成形を試みた。その結果、飽和度が60～70%程度で乱れることなく成形ができることがわかった。また、ブロックサンプリングした試料の飽和度の調整は次のように行った。まず、試料に散水し、含水比を測定しながら数日間放置し、所定の含水比になったときに凍結させた。試料内の含水比分布が均一になるよう数日放置したが、それでも試料内で飽和度にして最大10%近いばらつきがあった。

試料の凍結法として冷凍庫、ドライアイス、液体窒素等の使用が考えられる。しかし、冷凍庫やドライアイスで凍結させた -20°C 程度の試料では、コアビットで供試体を採取するときに摩擦熱等により試料がかなり融解し供試体の周囲が乱されることがわかった。そこで、温度の影響はより大きくなると思われるが、凍結には液体窒素を用いて超低温槽を -80°C 程度に保って行った。なお、試料に与える温度の影響をより少なくするため低温槽の温度は徐々に下げた。また、試料内の温度が極力均一になるよう、 -80°C で2時間程度一定温度に保った。凍結試料からの供試体採取は、市販されている岩石用のコアビットでは採取不可能であるのでPhoto 1に示すような特別なコアビットを試作した。このコアビットは下記の特徴をもつ。

① 削粉の除去のため外周面にらせん溝を有しており水を使用しなくてすむので、供試体周囲をほとんど乱さずに成形できる。

② ビットの刃先の部分はビット内面に比べて内径をわずかに小さくしてあるので、採取供試体周囲とビット

の内面との摩擦を除去できる。

③ ビットの刃先は超合金を銀ろう付けしてあるので耐久性を有する。100本程度の供試体採取ではほとんど変化はみられなかった。

このコアビットを供試体周囲の乱れを防ぐために低回転(400 rpm)で使用し、凍結させた試料から円柱形供試体を採取した。端面はディスクカッターで切断し直径5 cm、高さ10 cmの三軸供試体を作成した。成形した供試体をPhoto 2に示す。成形面の乱れはほとんどなく、不攪乱試料として十分三軸圧縮試験に使用できるものである。成形した供試体は含水比が変化しないようラップに包んで冷凍庫に保管し使用した。

以上で述べた方法によれば、まき土の乱さない供試体を作成できることがわかった。また、30 cm角の試料から16本程度の供試体の採取が可能であり、供試体のばらつきをおさえることができる。

凍結が採取した不攪乱試料に与える影響に関しては赤井ら⁹⁾による研究がある。それによれば、飽和状態で凍結させた試料と凍結の影響を受けていない試料の三軸試験結果を比較してみると、ピーク強度には差がみられないが変形係数は凍結させた試料の方がさせないものに比べてかなり低下しているという結果になっている。この結果は試料を飽和状態で凍結させているので凍結の影響が顕著にでたと考えられる。そこで、不飽和の状態を試料を凍結させてその影響を調べてみた。実験は突き固め試料と不攪乱試料で行った。その結果、突き固め試料では力学特性にほとんど差は認められなかった。不攪乱試料では両者で若干の違いもあるが、試料自体のばらつきもあるので結論的なことは見出せなかった。凍結の影響に関しては今後さらなる検討が必要であろう。

3. 不攪乱まき土の強度特性

不攪乱まき土の含水比変動に伴うせん断強度変化、低圧下での強度特性、サクシオンがせん断強度に与える影響それと節理面等の弱面がせん断強度に及ぼす影響を三軸圧縮試験、単純せん断試験により調べた。それらの強度特性のうち強度定数を主に考察を加える。

使用した試料のうちA、Dは愛媛県松山市で、B、Cは越智郡大島町で採取した領家型花崗岩の風化したまき土である。粒径加積曲線をFig. 1に示す。乾燥密度 γ_d は試料Aから順に1.40, 1.64, 1.73, 1.94であり、比重 G_s はAから順に2.66, 2.65, 2.66, 2.68である。

(1) 三軸試験による強度定数

三軸試験による破壊時の $(\sigma_1 - \sigma_3)_r/2$ と $(\sigma_1 + \sigma_3)_r/2$ の関係をFig. 2, 3に示す。Fig. 2は飽和状態でFig. 3は不飽和状態での結果である。実験は側圧一定の圧密排水条件で、変位速度は 3.2×10^{-2} mm/minである。側圧は



Photo 1 Core bit.



Photo 2 Undisturbed specimen.

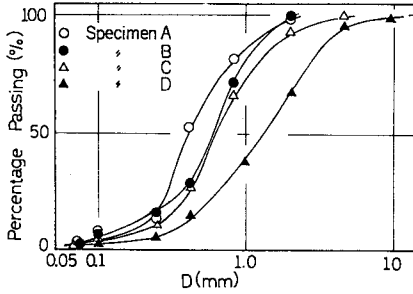


Fig. 1 Grain size distribution curve.

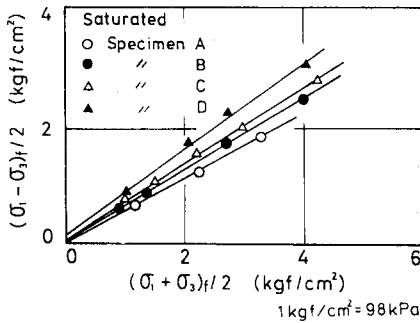


Fig. 2 Failure line by triaxial test on saturated specimen.

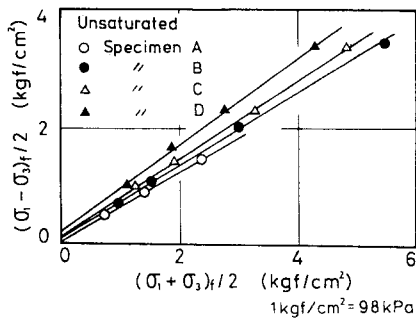


Fig. 3 Failure line by triaxial test on unsaturated specimen.

0.15, 0.3, 0.5, 0.7, 1.0, 1.5, 2.0 kgf/cm²(×98 kPa)のいずれかで行った。Fig. 3に示した試料の初期飽和度は試料Aで63~69%, Bで66~73%, Cで65~70%, Dで68~77%程度である。

ばらつきはあるが破壊線は今回実験した応力の範囲では、従来いわれているような曲線ではなく直線で示しても問題はないと思われる。飽和させたことによる強度定数の変化をみると、試料A~Dとも内部摩擦角 ϕ_d はあまり変化していない。粘着力 c_d に関しては試料A, Dではあまり変化はみられないが, B, Cでは若干の低下が認められる。

(2) 低圧下での強度定数

まさ土斜面の崩壊はほとんどが表層崩壊であるので、斜面安定解析を行う場合、低圧下での強度定数を精度よ

く求めることが必要である。最近、低圧下での三軸試験法について研究が進展してきている。しかし、側圧一定の三軸圧縮試験の場合、低側圧で試験を行っても平均垂直応力は増大するので低圧での強度定数、特に粘着力 c_d を求める試験としては適切でない。また、平均主応力一定試験を三軸試験機で行うと非常に繁雑であり、精度的にも問題がある。そこで、すべり面の変形状態に近く、また、平均垂直応力が一定であるという利点をもつ単純せん断試験機により不攪乱まさ土の強度特性を調べた。実験に用いた単純せん断試験機は従来のものと異なって供試体周囲はゴム膜であり、すべり面上の任意の応力状態を再現することが可能であるが、供試体内の応力分布の不均一性などの問題点がある。しかし、正規圧密状態での強度定数は三軸試験の結果とよく一致し、十分に実用に耐えることをすでに報告してある。単純せん断試験機の詳細は参考文献に示す¹⁰⁾。供試体は直径5 cm, 高さ3 cmのものを使用した。実験は圧密排水条件で、圧密は等方圧密、変位速度は 2.08×10^{-2} mm/minである。

破壊時の水平面上の垂直応力 σ_v とせん断応力 τ_{hf} の関係をFig. 4に示す。これは試料Bに対しての結果である。不飽和状態での初期飽和度は66~75%程度である。ばらつきはあるが、破壊線を直線で近似すれば同図に示すようになる。このばらつきの原因は試験を低圧で行っているので平均主応力が小さく、そのため試料自体のばらつきが大きく反映されているからであろう。若干問題はあがるが、図に示す応力の領域では破壊線は直線で近似されるとして議論を進める。単純せん断状態では平均主応力の増減はないので、中間主応力が一定であると仮定すれば、内部摩擦角 ϕ_d は次式で示される。

$$\phi_d = \sin^{-1} \left(\frac{\tau_{hf} - c_d}{\sigma_{vf}} \right)$$

ここに、 τ_{hf} : 破壊時の水平面上のせん断応力

σ_{vf} : 破壊時の水平面上の鉛直応力

これから、単純せん断試験より求めた内部摩擦角 ϕ_d は

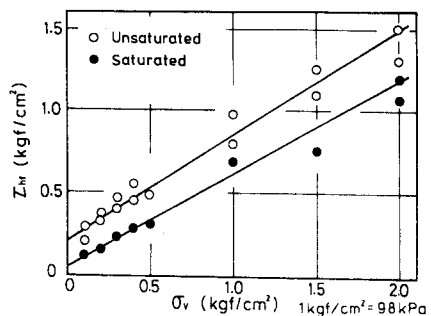


Fig. 4 Failure line by simple shear test on saturated and unsaturated specimens.

37°程度である。Fig. 2, 3に示す試料Bに対する三軸試験結果より求めた ϕ_d は39°程度である。したがって、内部摩擦角に関しては単純せん断試験機と三軸試験機であまり大差なく、どちらで求めても問題はないようである。しかし、粘着力に関してはFig. 2, 3とFig. 4を比べてわかるように精度に大きな違いがある。斜面崩壊の大半を占める表層崩壊を対象にして安定解析を行う場合、粘着力の値は安全率に大きな影響を与える。したがって、斜面安定解析に用いる低圧下での強度定数は三軸試験機を用いた平均主応力一定試験や、平均主応力一定の単純せん断試験機等によって精度よく求めるべきであろう。

(3) 含水比変動に伴うせん断強度変化の要因

Fig. 4をみてわかるように、飽和させることによりせん断強度は低下するが、このような含水比変動に伴うまき土のせん断特性の変化を三浦ら¹¹⁾は毛管結合力、摩擦、セメンテーション、粒子破碎の諸効果の変化にあるとして、個々の効果に検討を加えている。そして、含水比増加によってまき土のせん断強度が変化するのは、湿潤されると粒子が破碎されやすくなって粒子破碎率は大きくなり、したがってダイレイタンシー効果は減少してせん断強度が低下すると結論している。含水比変動に伴うまき土のせん断特性の変化は上記4つの効果の変化に伴って生じるので、現象が複雑であり、その機構の解明は非常に難しい。今回は、それらの要因のうち、サクシジョンのみを極力分離して、サクシジョンの効果について実験を行い、若干の考察を加えた。

用いた試料はA~Dの試料とは別の松山市で採取した乱したまき土で比重 $G_s=2.64$ 、最大粒径4.7 mm、50%粒径0.78 mm、均等係数11.89である。実験は含水比を数種類変化させて、側圧一定の圧密排水三軸圧縮試験を行った。側圧はすべて1.0 kgf/cm² (98 kPa)で行った。変位速度は 5.0×10^{-2} mm/minである。

所定の含水比の供試体を作成するのに、Fig. 5に示す2通りの方法を用いた。1つは所定の含水比に調整した試料を突き固めて直径5 cm、高さ10 cmの供試体を作成し、それをそのまま試験する方法(供試体I)であり、もう1つは前記のようにして作成した供試体を飽和させた後、所定の含水比まで乾燥させるか、あるいは所定の含水比より高含水比で供試体を作成した後、乾燥させることにより所定の含水比の供試体を作成する方法(供試体II)である。このような2通りの方法で供試体を作成したのは、同一含水比であっても供試体の作成法により有するサクシジョンが異なると考えられるからである。供試体の乾燥は100°Cでの炉乾燥と常温での気乾燥とで行った。供試体はすべて突き固めたものを使用した。それは不攪乱試料では供試体Iのような状態を再現でき

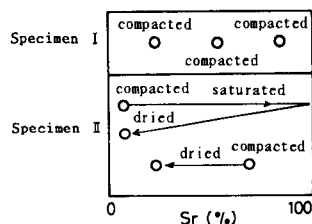


Fig. 5 Schematic diagram of preparation method of specimen.

ないからである。突き固めは供試体が均一になるよう10層に分けて行った。突き固め時の間隙比は約0.69である。なお、乾燥過程でわずかの体積収縮が起こるので、乾燥させるものはその点を考慮して極力初期間隙比をそろえた。また、突き固め供試体は多数作成し、そのうち間隙比の等しいものだけを使用した。

今回は含水比変動に伴うせん断強度変化の要因のうちサクシジョンがせん断強度に与える影響を調べることを目的としたので、他の要因は極力そろえるようにした。理想的には初期の間隙比、含水比、粒度が等しくてサクシジョンのみが異なる供試体を作成することが望ましい。そういう観点で前記のような2種類の供試体を作成した。これらの供試体はサクシジョンが異なっていて、初期間隙比は等しい。また、初期含水比は供試体IIの作成法の問題により、完全にはそろえることが無理であるのでパラメーター整理した。粒度も極力そろえるために、供試体IIの作成に当たって乾燥過程における含水比の変化を2~4%程度にした。また、一度飽和させた後、乾燥させて突き固め時含水比にした供試体も作成した。

ここで、同一含水比における供試体I, IIの粒度を考えてみる。まず、ある含水比で突き固め、それから乾燥させる場合について考える。突き固め時含水比が2~4%程度の違いであっても、同一間隙比にそろえるには突き固めエネルギーを変えねばならないので、突き固め時の粒子破碎量は異なり、せん断時の粒度は同じではない。同一含水比において、最適含水比より湿潤側では供試体IIの方が突き固めエネルギーは小さく、乾燥側では逆にIの方が小さいので、突き固め時に供試体Iの方が、より破碎されている場合も、また、逆の場合もあり得る。したがって、粒子破碎の影響だけからせん断強度を考えると、供試体Iのせん断強度の方が大きい場合も小さい場合もあり得る。次に、一度飽和させて乾燥させる場合について考える。ある応力の作用下では、飽和過程で粒子が若干破碎することが三浦ら¹¹⁾により報告されている。しかし、今回は応力が作用していない状態で飽和させたので、もし粒子破碎が生じたとしてもわずかであろう。したがって、一度飽和させてから乾燥させた場合は

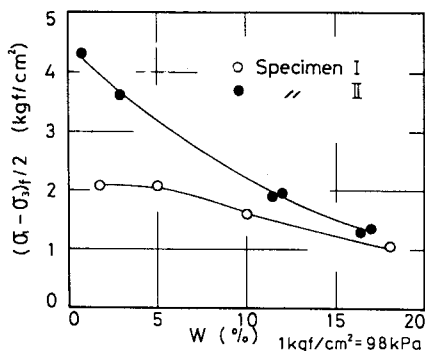


Fig. 6 Relationship between shear strength and water content.

同一含水比において供試体 I, II の粒度はほぼ等しいと考えられる。

Fig. 6 に破壊時の軸差応力 $(\sigma_1 - \sigma_3)_r$ とせん断初期の含水比 w の関係を示す。供試体 I, II とも含水比が小さくなるにつれ、せん断強度は大きくなる傾向があるが、両者のせん断強度には大きな違いがみられる。この強度差が何によるものか考えてみよう。前述したように、含水比変動に伴うまき土の強度変化にはサクシオンや粒子破碎等が関与している。

粒子の破碎量は拘束圧の影響以外に水分の影響等を受けるであろうが、含水比が同一であれば供試体の作成法にかかわらず、その供試体の粒子破碎に与える水の影響は同じであると思われる。もちろん、含水比が同じであっても作用しているサクシオンに差があれば粒子破碎量に若干の違いはみられるであろう。したがって、供試体 I, II では同一含水比で粒子破碎量にそれほど差異があるとは考えられない。ただ、今回は粒子破碎量を調べていないが、せん断強度に与える影響は大きく、わずかの粒度の違いでも強度が異なるであろうから、今後、粒子破碎の観点からも詳細に調べる必要がある。

次に、サクシオンの影響を考える。含水比 2~3% 程度の供試体 I では、気乾状態の試料を突き固めて作成するため供試体は自立できないほどであり、サクシオンはほとんど作用していないと考えてよい。それに対して、飽和状態から乾燥させた含水比 2~3% 程度の供試体 II では 1.7 kgf/cm² (166.6 kPa) の一軸強度を有し、作用しているサクシオンも大きいと考えられる。したがって、含水比変動に伴うまき土の強度変化は、もちろん粒子破碎によるところが大きいかもしいないが、サクシオンの影響も無視できない要因である。供試体 I, II のサクシオンと含水比の関係を示していないが、それは供試体 I のサクシオンを正しく測定することができないからである。

(4) 節理面等が強度特性に与える影響

不攪乱まき土中には節理面や粘土層のような弱面を含んでいることが多いので、斜面安定解析を行う場合弱面を含んだ試料のせん断強度を把握しておくことが必要であろう。節理面の影響を調べるため、Fig. 7 に示す人工的に切断面を入れた供試体に対して三軸圧縮試験を行った。用いた試料は D である。試料は不飽和で飽和度 S_r は 66~73% 程度である。切断面を入れるに当たっては凍結した供試体を塩ビパイプで保護して、ディスクカッターで所定の角度に切断した。実験には切断面の欠落等のない試料を用いた。実験は拘束圧一定の圧密排水条件で、変位速度は 3.2×10^{-2} mm/min である。拘束圧は 0.5 および 1.0 kgf/cm² ($\times 98$ kPa) である。

Fig. 8 に応力-ひずみ-体積変化関係を示す。これから切断面を入れたものは切断面のないものに比べてピーク強度が低下していることがわかる。供試体のすべり面はある面上の応力状態がその面上の破壊線に達したとき生じる。今回の試験では、いずれの供試体もすべり面は切断面に沿ってではなく新たな面上に生じた。したがって、せん断強度は節理面のない供試体と同程度の値を示してもよいと思われる。ところで、節理面を有する供試体の強度低下は Fig. 8 の $\Delta v/v - \epsilon_1$ 関係をみると切断面のない供試体に比べてダイレイタンス指数が小さくなっていることに起因していることがわかる。ピーク強度に達するまでは、せん断変形は供試体全体で発生している。ピーク強度に達するまでの切断面を入れた供試体と切断

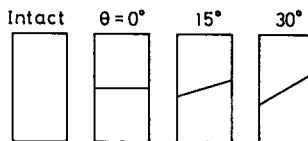


Fig. 7 Saw cut plane.

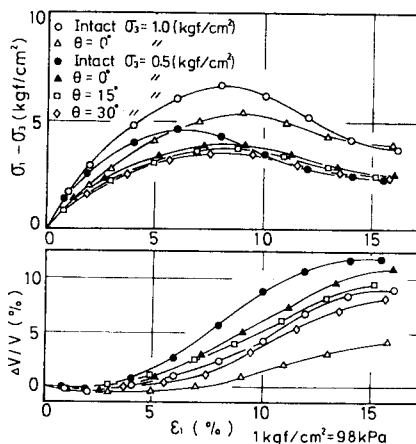


Fig. 8 Relationship between deviator stress, axial strain and volumetric strain.

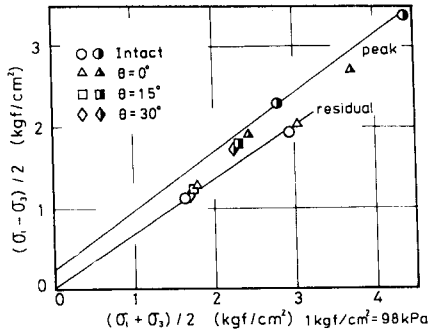


Fig. 9 Peak and residual strengths.

面のない供試体のダイレイタシー量を考えてみると、切断面を入れた供試体は切断面が滑らかであるので、切断面付近のダイレイタシー量が小さくなるであろう。この影響がピーク強度に現われていると考えられる。したがって、切断面の粗さの程度もせん断強度に影響するので、節理面を有するまさ土の強度特性は切断面の角度のみならず、切断面の粗さ等を十分考える必要がある。Fig. 9 にピーク時、残留時の $(\sigma_1 - \sigma_3)/2$ と $(\sigma_1 + \sigma_3)/2$ の関係を示す。残留強度は切断面のあるなしや角度にかかわらず、ほぼ同一の値を示す。また、切断面を入れた供試体のピーク強度は、切断面のない供試体のピーク強度と残留強度の中間の値を示す。なお、切断面の角度によって破壊線は異なってくると思われるが¹²⁾、これは今後の検討課題である。

次に、まさ土中に介在する粘土化したまさ土の単純せん断強度について述べる。この試料は試料 B の近くで採取したものである。薄層の粘土化したまさ土のせん断強度は、それを挟み込む不攪乱まさ土のせん断強度より小さく、その粘土を練り返し再圧密した練り返し正規圧密粘土のせん断強度より大きいと思われる。

そこで、まず粘土化したまさ土のせん断強度の下限值を求めるため、その粘土を練り返し再圧密した正規圧密供試体を作成し、側圧一定の圧密非排水三軸圧縮試験を行った。側圧は 2.0, 3.0, 4.0 kgf/cm² (×98 kPa) で、変位速度は 4.4×10^{-3} mm/min である。

次に、粘土化した不攪乱まさ土の単純せん断試験を行った。供試体は Fig. 10 に示すように、粘土化した不攪乱まさ土の片面を石こうで固めて作成した。試験は試料を飽和させて圧密排水条件で行った。変位速度は 0.1 mm/min とかなり急激な速度で行った。

試験結果を Fig. 11 に示す。破線で示したものは、粘土化したまさ土の正規圧密供試体の試験結果を有効応力で表わした破壊強度線であり、白丸は排水試験による不攪乱まさ土のピーク強度である。また、黒丸で示したものは粘土化したまさ土のピーク強度を全応力で示したも

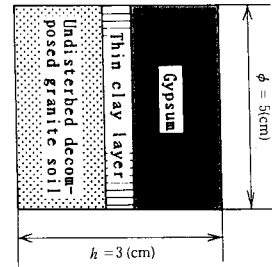


Fig. 10 Schematic diagram of specimen.

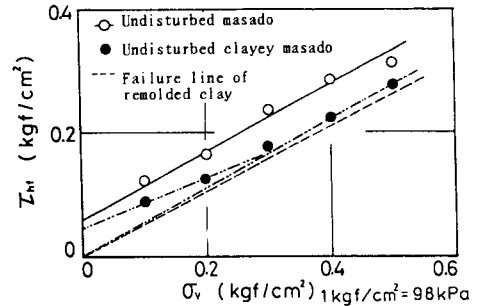


Fig. 11 Failure line of clayey decomposed granite soil.

のである。これから、粘土化したまさ土のせん断強度はそれを練り返し再圧密した正規圧密試料の有効応力による破壊線と不攪乱まさ土の飽和状態での破壊線との中間の値を示す。また、粘土化したまさ土の破壊線を 2 点鎖線で示しているが、 $\sigma_v = 0.3$ kgf/cm² (29.4 kPa) 程度以下では過圧密状態を示し、それ以上では正規圧密試料の有効応力による破壊線とほぼ同じ破壊線を示している。これからみると、試験を比較的急激な速度で行ったのであるが、排水強度を示しているように見える。したがって、粘土化したまさ土の薄層は実際の崩壊でも非排水状態ではなく排水状態でせん断されることも多いと思われる。

以上、切断面を含む不攪乱まさ土と粘土化したまさ土の強度特性を調べたが、弱面を含まない不攪乱まさ土のせん断強度に比べて、いずれも小さいせん断強度を示すので斜面安定解析に用いる強度定数には注意が必要である。

4. 不攪乱まさ土のせん断特性の微視的機構

(1) 実験方法

用いた試料は Fig. 1 に示す試料 B である。実験は、まず不攪乱供試体と突き固め供試体に対して側圧一定の圧密排水三軸圧縮試験を行った。変位速度は 3.2×10^{-2} mm/min であり、圧密は等方圧密である。不攪乱供試体は前記の方法で作成した。突き固め供試体は試料の含水比を不攪乱のそれと同じ 16 % 程度に調整した後、均

一になるよう10層に分けて突き固め、直径5cm、高さ10cmの供試体を作成した。なお、突き固め供試体は多数作成し、所定の間隙比に近いものを用いた。

せん断試験の結果、Fig. 12, 13に示すように同一初期間隙比 ($e_0=0.62$) を有していても不攪乱まさ土と突き固めまさ土では、応力-ひずみ-体積変化関係に大きな相違がみられた。この相違の理由として下記のようなことが考えられる。

- ① 間隙分布の相違
- ② 圧縮応力，せん断応力による粒子破砕量の相違
- ③ 粒度分布の相違

これ以外にも応力履歴の相違や粒子形状の相違等が考えられるが、応力履歴に関しては不攪乱まさ土、突き固めまさ土とも正確に推定することが困難であるので実験していない。また、粒子の形状の相違も大きな要因の1つであろうが、その影響も調べていない。①～③に対して以下のような実験を行った。

間隙分布の測定は吸引圧-水分曲線から間隙を毛管の束と仮定して間接的に求める方法と、顕微鏡観察から直接に判読する方法によった。吸引圧-水分曲線は吸引法により水頭で120cmまで20cm間隔で求めた。各段階は平衡に要する時間を考えて半日とし、試験は脱水過程で行った。顕微鏡観察は薄片の試料を50倍で写真撮影し、間隙の測定は写真から直接行った。

粒子破砕量の測定はふるい分けで粒度分布の変化を求める方法や、比表面積の変化を求める方法があるが、今回はふるい分けでせん断前後の粒度分布の変化を求めてみた。ふるい分け試験は従来の方法では、ふるい分け試験中にかなりの粒子破砕が起きると考えられるので、ふるいに水を満たし水中で極力外力を与えずにふるい分けを行った。

粒度分布の影響に関しては、せん断特性に与える粒子破砕の影響を除いて粒度分布の影響のみを調べるため、粒子破砕を生じない砂やシルト、粘土で不攪乱および突き固め試料と同一の粒度の試料を作成しせん断試験を行い比較した。

以上、行った試験で突き固め試料の初期間隙比はすべて不攪乱試料のそれにそろえた。

(2) 実験結果と考察

不攪乱供試体と突き固め供試体の飽和状態での軸差応力 ($\sigma_1 - \sigma_3$) と軸ひずみ (ϵ_1) それに体積変化量 ($\Delta v/v$) の関係をそれぞれ Fig. 12, 13に示す。不攪乱供試体と突き固め供試体の試験結果を比べてみるとピーク強度にそれほど違いはないが、ピーク強度での軸ひずみや体積変化量等には大きな違いがみられる。図示はしていないが、不飽和状態でも不攪乱供試体と突き固め供試体に同様な傾向がみられた。不攪乱供試体と突き固め供試体の

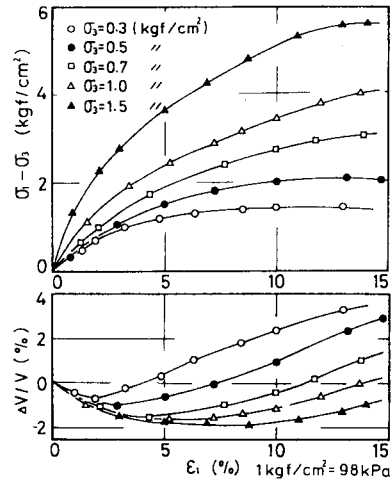


Fig. 12 Relationship of deviator stress, axial strain to volumetric strain on the undisturbed specimen.

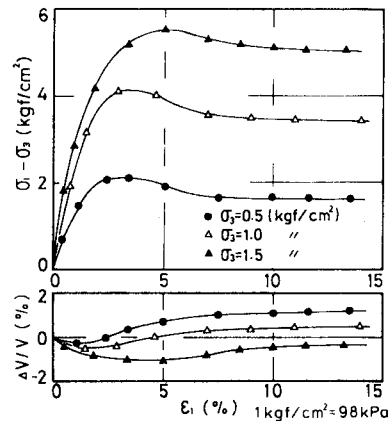


Fig. 13 Relationship of deviator stress, axial strain to volumetric strain on the disturbed specimen.

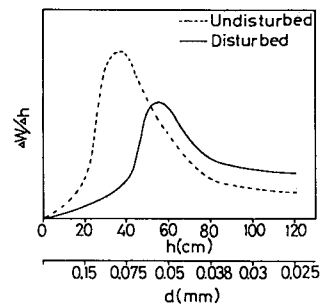


Fig. 14 Relationship between $\Delta w/\Delta h$ and suction h , diameter d .

初期間隙比は同じであるので、この応力-ひずみ-体積変化関係の相違の原因として前記したいくつかの理由が考えられる。①～③の影響を調べるために行った実験結果を

次に示す。

① 間隙分布

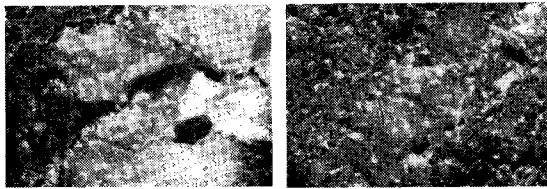
まず、不攪乱試料と突き固め試料の吸引圧-水分分布曲線を Fig. 14 に示す。同図は水頭で 120 cm まで吸引法により求めた吸引圧-水分分布曲線に微分操作を施して得たものである。ところで、吸引圧は間隙系を仮に多数の毛細管の束であると想定すれば、毛管上昇高は次式で求められる¹³⁾。

$$h = \frac{2T}{\rho g r \cos \alpha}$$

ここで、 h ：上昇高、 T ：水の表面張力、 ρ ：水の密度、

g ：重力加速度、 r ：毛細管半径、 α ：接触角

これから、間隙の当量直径 $d(=2r)$ が求められる。その当量直径を Fig. 14 に併記してある。間隙分布のピークは当量直径で表わせれば不攪乱試料で 0.08 mm、突き固め試料で 0.054 mm 程度のところにみられる。これから、不攪乱試料は突き固め試料に比べて間隙の径がかな



(a) Undisturbed specimen (b) Disturbed specimen
Photo 3 Micrograph.

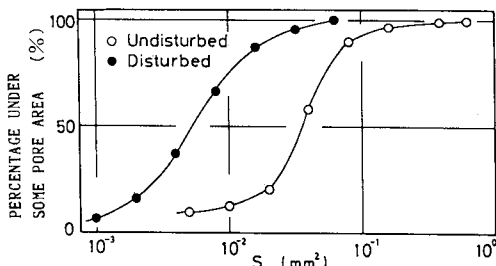


Fig. 15 Pore area distribution curve.

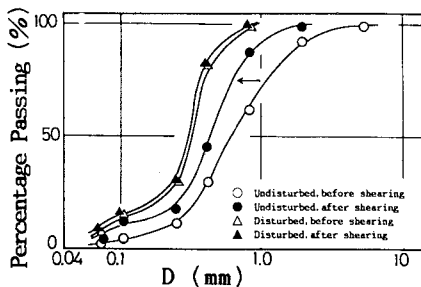


Fig. 16 Grain size distribution curve before and after shearing.

り大きいことがわかる。

顕微鏡写真の一例として Photo 3 (a) に不攪乱試料の、Photo 3 (b) に突き固め試料のものを示す。

Fig. 15 に不攪乱試料と突き固め試料の顕微鏡写真より求めた間隙の個々の面積と度数の関係を示す。これらは両試料とも約 400 個の間隙から求めた関係である。横軸を間隙の径ではなく面積で示したのは間隙が円形ではなく複雑な形状をしているからである。なお、50 倍の顕微鏡撮影でクラックのようにはかみえないものは省いてある。水銀圧入法¹⁴⁾等を用いれば微小な間隙まで測定できるので間隙分布は図に示したものと異なってくるであろうが、今回はせん断初期の体積圧縮に影響すると考えられる大きい間隙の分布を調べた。これから、不攪乱試料は突き固め試料に比べて間隙の全面積が同じであっても間隙個々の面積の大きいものが多いことがわかる。

② せん断応力による粒子破砕

せん断前後の粒度分布の一例を Fig. 16 に示す。白抜きで示したものがせん断前であり、黒印で示したものがせん断後の粒度分布である。不攪乱試料ではせん断前後に顕著な粒子破砕がみられるのに対し、突き固め試料では粒度分布にあまり変化がない。

以上の①、②から、不攪乱試料は突き固め試料に比べて間隙の全面積は同じであっても個々の間隙の面積の大きいものの割合が多いこと、また、不攪乱試料ではせん断時に粒子破砕が顕著にみられることがわかった。より大きい間隙はせん断初期につぶれやすく、したがって、せん断初期に大きな体積圧縮を生じるであろう。また、せん断時の粒子破砕量が大きいほどせん断初期の体積圧縮量は大きくなると思われる。そして、体積圧縮量が大きければ、それだけ試料は密になり、膨張時にダイレイタンスー指数は大きくなると思われる。

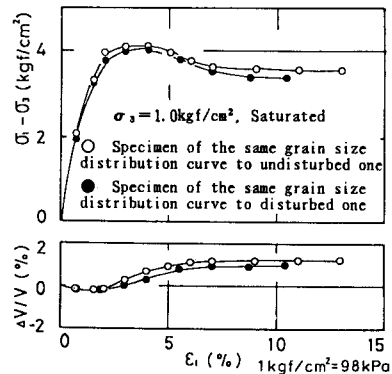


Fig. 17 Relationship between deviator stress, axial strain and volumetric strain for the specimen consisting of hard particles.

③ 粒度分布の影響

破碎しない材料を用いて作成した供試体の応力-ひずみ-体積変化関係を Fig. 17 に示す。この硬い粒子で構成された試料の粒度は Fig. 16 に示す不攪乱および突き固めまさ土試料のせん断前の粒度と同一に調整しており、初期間隙比も約 0.62 で同じである。供試体の突き固め方法は前述の突き固めまさ土供試体のそれと同じである。また、試験は側圧一定の圧密排水三軸圧縮試験で、試験方法は前記のとおりである。側圧は 1.0 kgf/cm^2 ($\times 98 \text{ kPa}$) で行った。

これを見ると、せん断特性に粒度分布の違いによる影響はそれほど現われていない。Fig. 12 に示す不攪乱まさ土のせん断特性と Fig. 17 に白丸で示した硬い粒子を突き固めた供試体のせん断特性を比較してみると、破碎しない粒子を用いて突き固めたものの方が若干膨張量が大きい。これは粒子破碎の影響であろう。

5. 結 論

従来、困難とされてきた三軸試験用の小型の不攪乱まさ土供試体の作成を試みた。また、三軸圧縮試験、単純せん断試験を行い、低下下での強度特性や含水比変動に伴うせん断特性の変化それと弱面がせん断特性に与える影響等について考察を加えた。さらに、不攪乱供試体と突き固め供試体の応力-ひずみ-体積変化関係の差異を間隙分布や粒子破碎それに粒度分布の観点より考察を加えた。得られた結論を以下に示す。

(1) 不攪乱まさ土供試体の作成は、試料をブロックサンプリングし、それを低温槽で凍結させ、試作したコアビットで円柱状供試体に成形する方法により可能である。

(2) 不攪乱まさ土の低応力下でのせん断強度は、平均主応力の増加しない単純せん断試験機によりかなり精度よく求められる。

(3) 含水比変動に伴うまさ土のせん断強度の変化に及ぼすサクシヨンの影響は大きく、無視できない主要因の 1 つである。

(4) 切断面や粘土層という弱面を有する試料のせん断強度は弱面のない試料のそれに比べて小さく、安定解析に用いる強度定数には注意が必要である。

(5) 不攪乱試料と突き固め試料では、初期間隙比は同一であっても、せん断応力-軸ひずみ-体積変化関係に顕著な違いがみられる。その原因として粒子破碎、間隙分布や粒度分布の相違が考えられる。

本研究の一部は、文部省科学研究費（自然災害特別研

究、代表者：網干教授）を使用した。

実験は愛媛大学卒業生 中岡計雄氏（現・堺市役所）、加藤正道氏（現・山崎建設）、神田正人氏（現・川鉄工事）の協力を得た。試料採取に当たっては本四公団今治工事事務所にお世話になった。また、コアビットは愛媛大学工学部機械実習工場で作製した。関係諸氏ならびに海洋工学科技官 二神 治氏に感謝します。

参 考 文 献

- 1) 八木則男・矢田部龍一・山本浩司：雨水浸透による斜面崩壊，土木学会論文報告集，No. 330，pp. 107～114，1983。
- 2) Yagi, N., Yatabe, R. and Yamamoto, K. : Slope Failure Mechanism due to Seepage of Rain Water, Proc. 7th ARCSMF, Vol. 1, pp. 382～386, 1983.
- 3) 矢田部龍一・八木則男・榎 明潔：不かく乱まさ土の強度特性と斜面安定解析，土質工学会，切土のり面および斜面の風化と安定に関するシンポジウム発表論文集，pp. 43～50，1985。
- 4) 土質工学会編：風化花崗岩とまさ土の工学的性質とその応用，土質工学会，pp. 272～283，1976。
- 5) Onodera, T., Oda, M. and Minami, K. : Shear Strength of Undisturbed Sample of Decomposed Granite Soil, Soil and Foundations, Vol. 16, No. 1, pp. 17～26, 1976.
- 6) 西田一彦・青山千彰：不かく乱まさ土のせん断強度に及ぼす浸水の影響について，第 15 回土質工学研究発表会講演集，pp. 501～504，1980。
- 7) 庄野久人・佐々木清・藤原茂範：乱さない風化花崗岩試料の特性について，土と基礎，Vol. 23, No. 2, pp. 19～24，1975。
- 8) 青山千彰・西田一彦・中山義久：乱さないまさ土のサンプリングならびに三軸試験法，第 18 回土質工学研究発表会講演集，pp. 479～480，1983。
- 9) 赤井浩一・嘉門雅史・大矢通弘・北本幸義：飽和不攪乱まさ土の強度特性について，第 21 回自然災害科学総合シンポジウム発表論文集，pp. 399～400，1985。
- 10) 八木則男・矢田部龍一：応力の制御が可能な単純せん断試験機の試作，土と基礎，Vol. 31, No. 7, pp. 23～27，1983。
- 11) 三浦哲彦・村田秀一・原田 敦：含水比変動に伴う破碎性土のせん断特性の変化，土木学会論文報告集，No. 336，pp. 105～112，1983。
- 12) 足立紀尚・森田栄治：不連続面を有する軟岩の力学挙動と破壊規準，土木学会論文報告集，No. 320，pp. 99～112，1982。
- 13) 土壌物理性測定法委員会編：土壌物理性測定法，養賢堂，p. 87，1972。
- 14) Diamond, S. : Pore size distributions in clays, Clay and Clay Minerals, Vol. 18, pp. 7～23, 1970。

(1984. 12. 22・受付)