風化度に着目した乱さないまさ土の圧縮・せん断特性

COMPRESSIVE AND SHEAR CHARACTERISTICS OF UNDISTURBED DECOMPOSED GRANITE SOILS PAYING ATTENTION TO THE DEGREES OF WEATHERING

村田 秀一*・兵動 正幸**・安福 規之***

By Hidekazu MURATA, Masayuki HYODO and Noriyuki YASUFUKU

In order to investigate the compressive and shear characteristics of undisturbed Hiroshima type decomposed granite soils, the isotropic compression and triaxial compression tests were carried out using the undisturbed specimens made up by the new core bit. Test results were discussed paying attention to the degrees of weathering of samples.

The results obtained can be summarized as follows.

- 1) The irreversible change of void ratio under isotropic compression is due to the particle breakage and the vanishing of structure effect.
- 2) The stress-strain behavior, stress-dilatancy relation and shear constant ϕ' depend on the degrees of weathering.
- 3) Failure criterion is expressed in terms of coefficient of the exponent.
- 4) The decrease in strength due to submergence is remarkable in a low confining pressure and in moderately weathered sample.

Keywords: particle breakage, stress-strain curve, triaxial compression test, undisturbed decomposed granite soil, weathering

1. ま え が き

代表的な風化残積土であるまさ土は広く西日本に分布し、盛土材料として比較的良好に利用され、その力学的特性についてもかなり研究がなされている。一方、近年まさ土地帯の土工を伴う地域開発や防災対策に関連して、地山のまさ土の工学的な性質を詳細に解明する必要にせまられている。しかしながら、まさ土の乱さない供試体の作成がきわめて困難であること、土粒子がもろく、また風化の程度によって力学的性質が大きく異なることなどのため、乱さないまさ土の工学的性質に関する研究は遅れている。

最近になって、豪雨のたびに斜面崩壊を引き起こすまさ土地帯における乱さないまさ土試料の採取法、供試体の作成方法、工学的なまさ土の分類方法や三軸圧縮試験による力学試験結果が、吉中、小野寺¹⁾、柴田、清水、都司²⁾、西田、青山³⁾、および八木、矢田部⁴⁾らによって報告され、その工学的性質についてしだいに明らかにさ

れつつある。しかし、まさ土の風化の程度に関連づけて、乱さないまさ土の工学的性質の定量的な解釈がなされたことは、基本的問題であるにもかかわらず、ないようである。まさ土は、分布する場所において多種多様の物理および工学的性質を示し、必ずしも同じ方法で乱さない試料の採取および供試体の作成が可能とは限らない。著者らは、三軸試験用の乱さない円筒形供試体の作成方法を確立して以来、西中国地方に分布し、比較的粗粒分を多く含んでいることで知られている広島型花崗岩の風化した乱さないまさ土の工学的性質について検討してきた^{5), 6)}。

本研究は、西中国地方に分布する10数種のインタクトな乱さない広島型まさ土供試体に対し、三軸圧縮試験を30～400 kPaの拘束圧下で実施し、その圧縮・せん断特性を風化度に着目して考察したものである。

2. 乱さないまさ土供試体の作成方法

乱さないまさ土を地山から採取するには、ブロックサンプリングのほか、釘打込み法が西田、青山によって提案され実績を挙げている⁷⁾。また、採取された試料から、三軸試験用円筒形供試体を得るため、西田、青山⁷⁾は、トリマーを用いた供試体作成方法も提案している。この

* 正会員 工博 山口大学教授 工学部建設工学科
(〒755 宇部市常盤台 2557)

** 正会員 工博 山口大学講師 工学部建設工学科 (同上)

*** 正会員 工修 山口大学助手 工学部建設工学科 (同上)

Photo 1 Core bit.

Photo 2 Undisturbed specimen.

方法は近畿地方に主として分布する頷家型花崗岩の風化したまさ土に対して適用可能と思われ、西中国に分布する比較的粗粒な広島型まさ土に対しては適用できなかった。そこで、著者らは、今回供試体の作成過程で試料を凍結する方法を採用した。しかしながら凍結した試料に対して、通常の岩石用のコアビットを用いただけでは、三軸用供試体を作成することは不可能であった。このため、著者らは Photo 1 に示すようなコアビットを新たに考案し、それを三軸供試体の作成に供した。なお、本論文は乱さない供試体の作成方法を述べることを主目的にしていないので、以下凍結した試料から乱さない供試体を作成する方法については簡単に述べる。考案したコアビットの特徴は、回転中試料の削粉を直接周囲に飛ばす目的でコアビット側面にダイヤモンド付きのフランジ部を設けていること、およびコアビット内部に発生する摩擦熱を低減させるためにコアビットの内径をコアビット先端部より 1 mm 大きくしたことにある。さらに、回転中にコアビット上端より窒素ガスを噴出させ、供試体を低温に保つと同時に窒素ガス圧によって削粉を排除するように工夫した。乱さないまさ土供試体（直径 50 mm、高さ 125 mm）の作成手順を以下に示す。

- (1) 不連続面の介在しない地山を選び、表土を削土しベンチカットする。
- (2) 釘打込み法によって、直径約 100 mm、高さ 220 mm の円筒形試料を採取する (Photo 2 (a))。

(3) 釘とテープで拘束された試料をコンテナに入れ、慎重に運搬する。

(4) 釘とテープで拘束した自然含水状態の試料をビニール袋に包み、 -20°C の冷凍庫内で 24 時間凍結する。

(5) 凍結試料を各種のデバイスを用いて、ボーリングマシン（精研ダイヤモンド工業、SBR-2）に固定し、720 rpm で回転するコアビットで削り、逆 T 型供試体を得る (Photo 2 (b))。試料の削り出しに要する時間は、試料によって若干異なるが約 7~10 分である。この間、試料とコアビットの間に削粉が入り込むのを防ぐために、コアビット上方より約 -60°C の窒素ガスを約 80 kPa の圧力で送り続ける。

(6) 逆 T 型試料の上下面をディスクカッターで切断し、直径 50 mm、高さ 125 mm の供試体を作成する (Photo 2 (c))。

このようにして作成された乱さない供試体を用いて、凍結が供試体の乱れに及ぼす影響を検討したが、その影響はほとんどないことを確かめている^{8),9)}。また、乱さない試料を凍結した後、特殊なコアビットを用いて円筒形供試体を作成する方法は、八木らによっても提案されている^{4),10)}。著者らの試作したコアビットは、八木らの試作したコアビットと、原理的には同じであるが、著者らの方法を用いると、自然含水状態の供試体を作成することが可能である。

3. 風化度の判定指標

まさ土は、鉱物組成や風化の程度が場所によって著しく異なりその工学的性質が複雑な土として知られている。したがって、風化の程度を判定できる指標を定めておくことは、このような材料を取り扱ううえで大変便利である。まさ土の風化過程では、脆弱な長石や雲母は急速に粘土化されるが、石英は風化に対して抵抗性が強いといわれている¹¹⁾。そこで、風化の指標として、(1) 長石比重、(2) 見掛け比重、(3) 比表面積、(4) 強

Table 1 Index properties of undisturbed samples tested.

No	採取地	比重 G_s	修正強熱減量 Li_m (%)	強熱減量 Li (%)	間隙比 e	乾燥密度 ρ_d (g/cm ³)	自然含水比 W_n (%)	吸水率 Ab (%)	飽和含水比 W_{sat} (%)	粒度分布 (%) 50 μ 粘土分	砂分
1	広島県	2.666	0.84	1.66	—	—	—	2.34	—	—	—
2	山口県	2.702	0.97	2.97	—	—	—	3.90	—	7.9	55.4
3	広島県	2.687	1.17	2.25	—	—	—	2.78	—	9.7	85.2
4	山口県	2.617	1.37	3.92	0.426-0.508	1.741-1.833	6.1-11.1	—	16.4-19.2	19.2	81.7
5	山口県	2.611	2.19	4.29	0.443-0.514	1.725-1.809	8.9-10.0	—	17.0-19.7	12.3	56.7
6	山口県	2.619	2.90	5.58	0.603-0.732	1.500-1.620	8.2-13.4	5.91	23.0-28.0	—	—
7	広島県	2.610	3.16	5.98	0.525-0.851	1.440-1.748	12.7-21.1	5.58	20.1-32.6	15.0	80.6
8	山口県	2.616	3.81	8.02	0.752-0.830	1.429-1.493	17.7-19.5	—	28.8-31.7	—	—
9	山口県	2.630	3.91	9.18	0.770-0.792	1.468-1.486	17.6-18.7	—	29.3-30.1	16.5	52.2
10	山口県	2.623	4.04	6.81	0.686-0.892	1.386-1.574	11.4-16.3	6.98	25.4-34.0	19.5	72.9
11	山口県	2.629	4.50	7.67	0.678	1.487	18.1-16.4	—	29.2	18.3	69.1
12	山口県	2.630	4.99	8.80	0.816-1.105	1.280-1.372	20.7-26.8	9.04	34.8-40.1	26.2	63.8

熱減量, (5) 吸水率, (6) pF 値, (7) 間隙比, (8) 有色鉱物含有量などが用いられている^{12), 13)}. また, 風化試料の非晶物質を定量し, それを風化度と関係づけている例もみられる¹⁴⁾.

そこで, 本研究で用いた Table 1 の試料を対象に, 上記した各指標およびその相互の関連性について調べてみた. Fig. 1 は, 比較的簡単に得られる各指標とまさ土の結晶水や吸着水の含有量を表す修正強熱減量との関係を示したものである. なお, 土質工学会基準による強熱減量 L_i は, 原試料の中から 0.42 mm 以下の試料 2 g を取り出して測定されるため (強熱時間 2~3 時間), この量 L_i は結果的に粒径が 420 μm 以下の試料の風化度を判定していることになる. しかし, ここで扱っているまさ土試料には 420 μm ふるいを通らない粗粒な土粒子が多く含まれており, 従来の強熱減量 L_i では, これらのまさ土の風化度を判定することは難しい. したがって本研究では, 現場から採取した原試料の中から 5 g を取り出して強熱減量を測定し (強熱時間 5~6 時間), これを修正強熱減量 L_{im} と称し, この量をもって原試料の風化度の判定を行っている. ここで 5 g を取り出す明確な理由はないが, 5 g 程度とれば L_{im} に測定の際のばらつきは少なくなると考えた. Table 1 に示した修正強熱減量の値は, 各試料 6 個の値の平均値であるが, 各測定値にばらつきはほとんどなかった. Fig. 1 より土粒子の比重や粘土含有量は主として母岩の性質に支配されているため, 修正強熱減量との相関性がさほどみられないが, 吸水率, 間隙比, 乾燥密度および飽和時含水比はいずれも修正強熱減量と相関性がよいことがわかる. ところで, 間隙比, 乾燥密度および飽和時含水比は, 乱さない試料を採取するかあるいは原位置での密度の測定をしなければ得られない. しかし, これらの作業は容易なことではなく, ばらつきも大きい. そこで, 本論文ではまさ土の風化度を表わす指標として, 簡単に求められ, かつ測定誤差も少なく, また後述するように力学的性質との対応

性も優れている修正強熱減量を用いることにした. なお, Table 1 の試料番号は新鮮な試料から風化の進んでいる試料順に付してある.

4. 試験方法

風化度に着目して, 自然含水状態の乱さないまさ土の圧縮・せん断特性を調べるため, セル内に満たした側液の増減で供試体の体積変化が測定可能な不飽和土用三軸圧縮試験機を用いて実験を行った. 凍結している供試体は, 脱気水で満たされたセル内で 12 時間放置され, 十分融解した後試験に供される.

等方圧縮試験では, 各荷重段階の圧縮終了の基準を体積圧縮変化量が 0.1 cm^3/h となったときとした. また, 三軸圧縮試験は, 圧密排水 (気) 条件下でひずみ制御方式とし, 拘束圧一定のもとでひずみ速度 0.15 %/min で行われた. なお, このひずみ速度でせん断した結果は, ひずみ速度 0.02 %/min でせん断した場合の結果と同じであることを確かめている.

また, 乱さない供試体と乱した供試体の応力・変形特性を比較するため, 乱した試料についても同様の試験を実施した. この場合, 乱した供試体は, 自然含水状態で乱さない試料の間隙比と同一になるように締固めて作成されたものである. さらに, 乱さない供試体の浸水による強度・変形特性の変化を調べるために, おのおのの試料の飽和供試体を用いて三軸圧縮試験を行った. 一般に, 乱さないまさ土の飽和は, 試料の風化の程度によっては困難と考えられているが, 今回炭酸ガスと背圧を併用して飽和度を高める工夫をした. 炭酸ガスの通気時間 15 分 (通気圧 5 kPa), および背圧 100 kPa を供試体に負荷することによってすべての供試体の B 値は 0.96 以上であった.

5. 乱さないまさ土の等方圧縮特性

Fig. 2 は, 風化度の異なる自然含水状態の乱さないま

Fig. 1 Correlations among physical and chemical properties of undisturbed samples.

さ土 (No.5, 8) の $e-\log p_i$ 関係を示したものである。この図より、乱さないまさ土の初期荷重曲線には、除荷曲線に似た勾配をもつ直線部分と（ここでは初期荷重圧縮曲線とよぶ）、正規圧縮曲線に対応するような直線部分（正規圧縮曲線とよぶ）が存在していることがわかる。しかし、初期荷重圧縮線から正規圧縮線に移行する応力点（圧縮降伏応力）は明瞭には現われていない。そこで、この応力を Fig. 2 に示すように、 p_{y1} 、 p_{y2} の2つの応力で代表させ、以下若干の考察を行った。

Fig. 3 に、圧縮指数 C_c 、膨張指数 C_s および p_{y1} 、 p_{y2} と風化度 L_{im} の関係を示した。乱さないまさ土の C_c の値は 0.1~0.5 となり、 C_c は L_{im} の増大に伴って増加し、 p_{y2} は L_{im} の増大に伴って低下するが、 C_s と p_{y1} は風化度依存性がそれほどみられない。このことは、乱さないまさ土の等方圧縮応力の増加に伴う間隙比変化に占める塑性変形の割合が風化の進んだ試料ほど大きくなることを示している。さらに、圧縮特性の風化度依存性は、塑性変形成分に対してであり、この図を見みるかぎり弾性成分にはほとんど反映されないことがわかる。等方圧縮応力下でのまさ土の粒子破碎特性を検討するため、2 種性変形成分に対してであり、この図をみるかぎり弾性成分にはほとんど反映されないことがわかる。等方圧縮応力下でのまさ土の粒子破碎特性を検討するため、2 種類の乱したまさ土 (No.2, 7) を用い、気乾状態と飽和状態において 20 MPa までの等方圧縮試験を行った¹⁵⁾。本研究では、粒子破碎を数量化する尺度として次式で示される表面積増加量 ΔS ^{(16),(17)} を用いた。

Fig.2 $e-\log p_i$ curves of undisturbed specimen.

Fig.3 Relation between C_c , C_s , p_{y1} , p_{y2} and L_{im} .

Fig.4 $\Delta S-\log p_i$ curves of disturbed specimens.

Fig.5 Relation between ΔS and Δe of disturbed specimens.

の単位体積当たりの表面積である。なお、測定方法は三浦、山内が提案した方法を用いている¹⁷⁾。

乱した試料における $e-\log p_i$ 曲線の形状は、乱さない試料の結果と定性的には同じである。そこで、等方圧縮過程における ΔS と p_i との関係を整理すると、Fig. 4 のようになった。図中には圧縮降伏応力に相当する p_{y1} の値も示しているが、この値と ΔS が顕著に増加し始める応力とが比較的よい対応を示している。また、 $\Delta S-\log p_i$ 曲線の形状は $e-\log p_i$ 曲線の形状と類似しており、まさ土の正規圧縮に対応する領域では破碎が急速に進行することを裏付けるものである。したがって、この結果に基づけば、まさ土の正規圧縮領域に対応する領域は粒子破碎が顕著に生じる応力域すなわち粒子破碎領域と考えてよさそうである。このような特性は、砂や礫においてもみられることを実験的に調べているが¹⁸⁾、風化がある程度進んだまさ土の場合は、この現象が特に顕著であるといえる。また、粒子破碎量は水が加わることによって多少ではあるが、促進されることも Fig. 4 からわかる。

Fig. 5 は、No.2, 7 試料の $e-\log p_i$ 曲線と Fig. 4 で示した $\Delta S-\log p_i$ 曲線を用いて描いた等方圧縮過程における間隙比変化 Δe と表面積増加量 ΔS (粒子破碎量と考えてよい) の関係を示している。この図は、風化度や含水状態にかかわらず ΔS と Δe の間には一義的な関

係が存在することを示している。これは、ここで調べたさほど風化の進んでいない新鮮なまき土においては、その間隙比変化が、主に粒子破碎によって規定されていることを示唆するものであり大変興味深い。もっとも、乱さないまき土では、間隙比変化の要因として、このほかに粒子破碎に起因しない乱さないまき土特有の構造効果の消失が存在すると考えることは、想像に難くない。

6. 乱さないまき土の応力変形特性

(1) 応力・ひずみ挙動と風化度の関係

Fig. 6(a)~(d)は、おのおの風化度の異なる乱さないまき土の三軸圧縮試験における応力・ひずみ関係である。風化の進んでいない比較的新鮮な試料 (No. 4, 5) は、 $\sigma_3 \leq 400$ kPa においては典型的なひずみ硬化軟化型挙動を示し、体積ひずみも著しい膨張が生じている。これに対し、比較的风化の進んだ試料 (No. 8, 12) は、ひずみ硬化型挙動を示し、体積ひずみは低い拘束圧下では膨張を示すものの、拘束圧の増大とともに収縮の傾向が強まっている。

応力・ひずみ挙動の風化度依存性をより明確にするため、同一拘束圧下 ($\sigma_3 = 30$ kPa) における風化度の異なる乱さない試料の応力・ひずみ曲線を比較したのが、Fig. 7(a) である。また、Fig. 7(b) に、乱した試料の試験結果も比較のために示した。乱さない試料に関しては、応力レベルの低い部分で軸差応力 q 、体積ひずみ v ともに風化度の違いによる差はほとんどみられない。しか

Fig. 7 Comparison of stress-strain curves on undisturbed and undisturbed specimens.

し、軸ひずみの進行に伴い、それらに相違が明瞭に現われてくる。 q に関しては、全試料ともピーク値が存在し、その値は同じ拘束圧下で比較した場合には、風化度の低いものほど高い。また、ピーク強度後の軸ひずみ ϵ_1 の進行に伴う軟化現象は、風化度の低いものほど著しい。 v に関しては、軸ひずみの小さい所で全試料とも体積収縮を示すが、 $\epsilon_1 = 3\%$ 付近から体積膨張に転じ、風化度の低いものほど ϵ_1 の進行に伴う体積膨張は著しい。また、乱さないまき土の場合、せん断初期の体積収縮量が必ずしも風化の進んだ試料のほうが大きくなるというわけでもなく、30 kPa の拘束圧下では、比較的新鮮な No. 4, 5 の試料の方が、No. 10, 12 といった風化の進んだ試料に比べて最大の体積収縮量は大きいという結果になっている。

一方、同一試料に着目して、乱さないまき土と乱したまき土の応力・ひずみ関係を比較すると、次のようなことがいえる。乱さないまき土の q - ϵ_1 関係の初期の立上がりは、乱したまき土のそれに比べてかなり緩やかであるにもかかわらず、最大軸差応力 q は、大きな値を示す。また、そのときの軸ひずみ量も大きい。さらに、 v - ϵ_1 関係において、 ϵ_1 の増大に伴う体積膨張の割合が、乱さないまき土の場合、かなり大きい。同様の結果は、八木ら⁴⁾によっても報告されている。このような特性の違いは、風化度の低い試料ほど明瞭に現われており、かつせん断時の拘束圧が低いほど顕著である。これは、乱さないまき土と乱したまき土の組織構造や粒子破碎特性の相違に起因しているところと大きいと考える。すなわち、乱さないまき土の場合、風化過程で母岩が有していた固結力は失われていくものの、間隙の大きさが、締固めたまき土に比べて相対的に大きく⁴⁾、またそれらが均質に存在しないといった乱さないまき土特有の不安定な組織構造が残存しているのに対し、乱したまき土では、たとえ同一の密度で締固めたとしても、上述のような構造を再現することができない。さらに、乱したまき土では、締固めの際、すでに脆弱な粒子はかなり破碎しており、特に低い応力域を考えた場合には次節で述べるように圧縮・せん断過程における粒子破碎特性が、乱さないまき

Fig. 6 Triaxial compression test results of undisturbed specimens.

Fig. 8 Increase of surface area ΔS in triaxial compression tests.

土のそれに比べて著しく異なったものである。このような、構造および粒子破碎特性の違いが、特に低応力下での強度特性やストレス・ダイレイタンス特性の違いとして現われているものと考えられる。

(2) 粒子破碎特性

乱さないまき土のせん断中の粒子破碎特性を表面積増加量により調べるには、その原試料となるものの規定が非常に困難であるため、定量的に破碎特性を把握することは難しい。ここでは、圧縮・せん断過程における表面積増加量を式(1)を用いて求めた。なお、式(1)における S_0 を求めるにあたり基準となる原試料を土質試験法によって規定されているまき土の粒度調整方法¹⁹⁾に従ってほぐした試料とした。

Fig. 9 Relation between η and $(dv/d\varepsilon)$ of undisturbed specimens.

Fig. 8はその結果である。この図より、まず前節で述べたようにまき土は比較的低応力域において粒子破碎が生じること、また乱さない試料が締固めた試料より粒子破碎量が多いこと、特に乱した試料では $\sigma_3 < 100$ kPa では粒子破碎が生じていないことがわかる。さらに、自然含水状態の試料より飽和試料のほうが粒子破碎が生じやすいことも示している。なお、このような粒子破碎特性は、他のまき土にも定性的にはいえることであると考えられる。

(3) ストレス・ダイレイタンス関係

Fig. 9(a)~(d)は、風化度のかなり異なる試料(No. 5, 12)の自然含水状態および飽和状態の三軸圧縮試験結果を、応力比 η とひずみ増分比 $(dv/d\varepsilon)$ の関係で整理したものである。ここで、せん断ひずみ ε は $\varepsilon_2 = \varepsilon_3$ を仮定して、 $\varepsilon = 2(\varepsilon_1 - \varepsilon_3)/3$ として求めている。これらの図より、含水状態および風化度によらず、また η の低い所を除けば拘束圧に関係なく、おおむね η と $(dv/d\varepsilon)$ の間には、次式で示すような直線関係が認められる。

$$dv/d\varepsilon = \alpha(M - \eta) \dots \dots \dots (2)$$

ここで、 M は $dv/d\varepsilon = 0$ 、すなわちせん断過程において体積ひずみが、収縮から膨張に転ずる応力比であり、 α は、 η - $(dv/d\varepsilon)$ 直線関係の勾配の逆数である。この

Fig. 10 Relation between constants α , M and L_{im} .

Fig. 11 Relation between M and C_s/C_e .

Fig. 12 Relation between $(dv/de)_f$ and L_{im} .

Fig. 13 Relation between $(dv/de)_f$ and σ_3 .

ような関係は、乱さないしらすにおいてもみられることが春山、北村によって報告されている²⁰⁾。

ところで、 η の低い所で η -(dv/de)関係が式(2)からはずれ、過圧密砂や過圧密粘土で一般によくみられるように、若干右方向に移動しているが、この理由の1つとして次のことが考えられる。すなわち、Fig. 2の e - $\log p_t$ 関係から判断されるように、せん断時の拘束圧が p_{vi} 値より低い場合には、乱さないまさ土の応力状態は少なくとも圧縮過程においては、いわゆる過圧密的であり、その影響がFig. 9に示すようにせん断初期のストレス・ダイレイタンス特性に現われているものと考えられる。Fig. 10は、式(2)の実験定数 α と M の風化度依存性、および含水比変動がそれらの定数に及ぼす影響を調べたものである。ここで示した α と M 値は、4種類の拘束圧下で行った少なくとも4本以上の試験結果から個々に求まる α 、 M 値をそれぞれ平均したものである。まず、 α と M の風化度依存性についてみると、 α の値は、風化の進んだ試料ほど大きくなり、 M の値は逆に小さくなる傾向を示している。また、これらの定数に及ぼす含水比変動の影響は、 α の値にはみられず、 M の値に現われている。飽和試料の M の値は、自然含水状態のそれに比べて10%程度小さくなっている。Fig. 11は、 M と圧縮定数の比 C_s/C_c の関係を、自然含水比試料について示したものである。この図をみる限りでは、 M と C_s/C_c の間には、 C_s/C_c の増加に伴って

M の値が減少するといった粘性土に対していわれているような特性はみられない。

軸差応力最大時におけるひずみ増分比 $(dv/de)_f$ と風化度の関係、および試料No. 8の $(dv/de)_f$ と σ_3 の関係を含水状態をパラメーターにとりそれぞれFig. 12, 13に示した。まず、Fig. 12をみれば、 $(dv/de)_f$ の値は、拘束圧が大きくなるほど、また風化度が進んだものほど小さくなる傾向が伺える。なお、広範な応力域における乱さないまさ土の研究結果²¹⁾に基づく、拘束圧増加および風化度増加に伴い、 $(dv/de)_f$ の値はほぼ0に収束するようである。

次に、Fig. 13に示した試料No. 8について、低圧力下では飽和試料の $(dv/de)_f$ 値は自然含水比試料のものより低いが、拘束圧の増大に伴って両者の値に明瞭な差が現われなくなる。このような特性を粒子破碎とサクシジョンの観点から考えると以下のようなになる。まさ土は、飽和されることにより粒子破碎が促進され、またサクシジョン効果が消失すると考えるのが一般的である。したがって、せん断中体積膨張を生じるような低い応力域では、水の存在によって生じる粒子破碎の体積変化特性に与える影響が、サクシジョン消失に伴うそれよりもはるかに大きいため、結果的に飽和試料の方が低い $(dv/de)_f$ を示したと考える。しかし、拘束圧が増加するのに伴い、1) 水の存在による粒子破碎よりも、拘束圧の増大に伴う粒子破碎の方が卓越し、その結果自然含水比試料においてもかなりの粒子破碎が生じ、2) 自然含水比試料の飽和度が高くなり、自然含水比試料のもっていたサクシジョン効果が消失していくということで、両者の $(dv/de)_f$ の差がなくなるものと考えられる。

7. 乱さないまさ土の破壊時の強度特性

(1) せん断強度定数

Fig. 14は、自然含水比試料における乱さないまさ土の破壊時(軸差応力最大時)の応力比 η_r と風化度の関係を拘束圧をパラメーターにして示したものである。 η_r 値は、風化度の高い試料ほど、また拘束圧が大きいくほど小さくなっている。しかし、拘束圧を約15 MPaの応力域まで拡張すると、拘束圧増加に伴う η_r 値の低下率はしだいに減少し一定値に収束する傾向にある²¹⁾。

Fig. 15は、自然含水比試料の乱さないまさ土の破壊包絡線を示したものである。すべての包絡線は明瞭な凸型の曲線を呈している。このような傾向は、密詰め砂においてもみられるが²²⁾、乱さないまさ土は、きわめて破碎性に富むため、砂に比べて低い応力域から包絡線は非線形性を呈する。なお、吉中らは乱さないまさ土において応力約20 MPaまでは ϕ' の減少がみられるが、この応力以上になると ϕ' は再び増加を始めるという結果を

Fig. 14 Relation between η_f and L_{im} .

Fig. 15 Failure envelope curves of undisturbed specimens.

Fig. 16 Relation between shear constants c' , ϕ' at low stress region and L_{im} .

与えている¹⁾。ところで、砂において測定される強度は、純粋なすべり摩擦成分、粒子破碎や粒子の再配列に起因するダイレイタンス成分および粒子破碎や粒子再配列そのものによる成分の重ね合わせた結果として得られるという考えを Lee and Seed²³⁾ が示しており、このような考えが乱さないまき土においても適用できると考えるならば、上述したような現象は起こり得る。

なお、飽和した試料の破壊包絡線は、見掛けの粘着力が自然含水比試料のそれに比べて低下するものの、包絡

線そのものは、ほぼ自然含水比試料の包絡線に平行であった。Fig. 16 は、自然含水比および飽和試料の破壊包絡線をもとに、 $\sigma < 200$ kPa の応力域で決定した見掛けの粘着力 c' および内部摩擦角 ϕ' と風化度の関係を表わしたものである。この図から明かなように、自然含水比状態の試料においては、見掛けの粘着力が風化度に関係なくほぼ同じであるのに対し、 ϕ' は風化度に依存して、約 35 度から 50 数度まで変化している。また、試料を飽和した場合、浸水により比較的風化の進んだ試料で若干の ϕ' の低下がみられるものの、 ϕ' には浸水の影響があまり現われないようである。しかしながら、 c' については風化度に関係なく約 50 % の低下がみられる。このような特性は、まさ土の地山斜面の安定性を検討する際重要な知見であると考えられる。

(2) 破壊規準

前述したように、乱さないまき土の破壊包絡線は非線形性を示すため、モール・クーロンの破壊規準の適用は難しい。そこで、ここでは今回実験を行った応力域を対象に、破壊時の軸差応力 q_f と平均主応力 p_f および残留時の軸差応力 q_r と平均主応力 p_r の関係を簡単に表示することを試みた。

代表的な乱さない試料 (No. 4, 10) の q_f - p_f および q_r - p_r の関係を両対数座標上で示したのが、Fig. 17 (a), (b) である。一般に、 p の増加に伴って q_f と q_r の差は消失していき、最終的には q_f 値は q_r 値線上にのってくることがわかる。そこで、まずすべての試料の q_r と p_r の関係を整理してみると、Fig. 18 に示したように、風化度に関係なくほぼ一本の直線で示されるという興味深い結果が得られた。しかし、 q_f と p_f の関係は応力ひずみ曲線がひずみ硬化軟化型挙動を示す応力域でこの直線から逸脱していることが、Fig. 17 (a), (b) からわかる。また、全試料の q_r と p_r 関係も両対数上で直線関係にあり、かつこれらの勾配はほぼ等しいこともわかった。すなわち、Fig. 17, 18 から、破壊時には、

$$\frac{q_f}{p_0} = a \left(\frac{p_f}{p_0} \right)^{0.89} \dots \dots \dots (3)$$

残留時には、

Fig. 17 Relation between q and p at failure and residual state.

Fig. 18 Relation between q_r and p_r .

Fig. 19 Relation between constant α and L_{lim} .

Fig. 20 Relation between the rate of strength decrease due to submergence and L_{lim} .

$$\frac{q_r}{p_0} = 1.65 \left(\frac{p_r}{p_0} \right)^{0.95} \dots\dots\dots (4)$$

で示される関係が得られる。ここで、 α は風化度に依存する実験定数であり p_0 に対応する q の値である。ここでは簡単のために、 p_0 として単位応力 (1 MPa) を選んだ。このように、破壊時の q_r と p_r の関係がべき関数型で表示されることは、花崗岩や堆積軟岩においても報告^{24), 25)}されており、乱さないまさ土も岩石力学的な強度特性も持ち合わせた材料であることを示唆するもので

ある。

次に、式 (3) の定数 a は、試料によって異なるので a と風化度の関係を調べたものが、Fig. 19 である。この図から、 a は風化度によく対応していることがわかる。

(3) 浸水による強度低下

Fig. 20 は、浸水による強度低下の割合と風化度の関係を拘束圧をパラメーターにとり、軸差応力に着目して示したものである。浸水による強度低下率 R_s は次式で定義した。

$$R_s = \frac{(q_{f.nat} - q_{f.sat})}{q_{f.sat}} \times 100 \dots\dots\dots (5)$$

ここで、 $q_{f.nat}$ は自然含水比試料における最大軸差応力、 $q_{f.sat}$ は飽和試料における最大軸差応力である。

図より、各試料の式 (5) で定義した強度低下率は、拘束圧が低いほど著しく、また各拘束圧下における強度低下率は、 L_{lim} が約 4 % すなわち適度に風化した試料において最も顕著で、強度低下率と風化度の関係は凸型の曲線を示すことがわかった。この結果は、実際適度に風化したまさ土の自然斜面が豪雨時に頻繁に表層すべり崩壊を引き起こすという著者らの調査結果²⁶⁾とも一致している。

まさ土のような破碎性土の浸水による強度低下は、主として摩擦効果、セメンテーション効果、粒子破碎およびサクション効果の変化に起因していると著者の一人が、前に報告した¹⁶⁾。おそらく、このような種々の要因の兼ね合せの結果として Fig. 20 に示した強度低下率と風化度の関係が得られるものと考えられるが、これらの要因が強度低下にそれぞれどのように寄与するのかを明らかにしていくには、さらなる実験的な検討が必要である。

8. 結 論

乱さないまさ土の風化の程度を表わす指標として修正強熱減量を採用し、新たに考案したコアビットを用いて作成した乱さないまさ土供試体に対して、実施した等方圧縮および三軸圧縮試験結果に基づき主として自然含水状態における圧縮・せん断特性を風化度に着目して考察した。得られた結果を要約して以下に示す。

- (1) 等方圧縮下での間隙比変化は、粒子破碎と乱さないまさ土のもつ構造効果の消失によって規定される不可逆的な塑性変形が大部分を占め、弾性成分はごくわずかである。
- (2) 乱さないまさ土の応力・ひずみ挙動は、風化度と拘束圧に依存し、ひずみ硬化軟化型からひずみ硬化型の特性を示す。
- (3) 乱さないまさ土と乱したまさ土の力学的特性の

相違は、低応力域において顕著にみられるが、拘束圧の増加とともにその相違は消失していく。また、乱さないまさ土は、せん断中にかなりの粒子破碎を生じ、力学的性質に大きな影響を及ぼしている。

(4) ストレス・ダイレイタンス関係は、風化度や含水状態によらず、式(2)で表示できるが、式中の定数 α は風化度に、 M は風化度と含水状態に依存する。

(5) 破壊および残留強度と平均主応力の関係は、風化度を考慮したべき関数で表示できる。

(6) 低圧域におけるせん断強度定数 ϕ' は、風化度の増大とともに低下するが、見掛けの粘着力 c' には、風化度依存性はさほどみられない。また、かなり風化した試料を除き、浸水による ϕ' の低下はみられないが、 c' は風化度に関係なく約50%低下する。

(7) 乱さないまさ土の浸水による強度低下率は、拘束圧が低いほど著しい。また、それは、風化度にも依存しており、適度に風化したまさ土($L_{im}=4\%$)において最も著しい低下を生じる。

最後に、本研究を行うにあたり、試料の一部採取で協力していただいた復建調査設計(株)の福田直三博士、実験で協力を受けた浅上洋一氏(現、宇部興産)、佐藤研一氏(現、九州大学大学院)、松本清治郎氏(現、名古屋大学大学院)および、試験機の改良と試料の採取で多大の労力をわずらわせた山口大学技官 山本修三氏に感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) Yoshinaka, R. and Onodera, T. F. : Undisturbed sampling of decomposed granite soil and its mechanical properties, Proc. 9th ICSMFE, Special Session 2, pp. 97~102, 1977.
- 2) 柴田 徹・清水正喜・都司 尚 : 不攪乱マサ土の三軸強度・変形特性, 第17回土質工学研究発表会講演集, pp. 465~468, 1982.
- 3) 西田一彦・青山千彰 : 物理強度特性からみた乱さないまさ土の分類, 土木学会論文集, No. 352, pp. 159~168, 1984.
- 4) 八木則男・矢田部龍一 : 不攪乱まさ土のせん断特性と微視的考察, 土木学会論文集, No. 364, pp. 133~141, 1985.
- 5) 村田秀一・安福規之・浅上洋一・大西禎行 : 不攪乱まさ土の供試体作成方法の確立およびそのせん断特性, 第20回土質工学研究発表会講演集, pp. 489~490, 1985.
- 6) 村田秀一・安福規之・浅上洋一 : 風化度の異なる乱さないまさ土の圧縮・せん断特性, 第21回土質工学研究発表会講演集, pp. 479~490, 1986.
- 7) 西田一彦・青山千彰 : 乱さないまさ土のせん断強度特性, 土と基礎, Vol. 29, No. 6, pp. 35~40, 1981.
- 8) 村田秀一・安福規之・山本修三・浅上洋一 : 不攪乱まさ土供試体の作成方法とその力学特性, 土質工学会昭和60

年度サンプリングシンポジウム発表論文集, pp. 81~88, 1985.

- 9) 村田秀一・安福規之・浅上洋一・松本清治郎 : 凍結法により成形された乱さないまさ土供試体の乱れの判定, 第38回土木学会中国四国支部研究発表会概要集, pp. 217~218, 1986.
- 10) 八木則男・矢田部龍一 : 室内試験のあれこれ, 乱さないまさ土供試体の作成法, 土と基礎, Vol. 31, pp. 62~63, 1983.
- 11) 松尾新一郎 : まさ土の特性と問題点, 土と基礎, Vol. 23, No. 2, pp. 1~8, 1975.
- 12) 土質工学会編 : 風化花崗岩とまさ土の工学的特性とその応用, pp. 175~183, 1979.
- 13) 高橋 悟・田中弥寿男 : まさ土の風化とその判定法について, 地盤と建設, Vol. 1, No. 1, pp. 1~8, 1983.
- 14) 西田一彦・佐々木清一・久保利雄 : まさ土の非晶質物質とその特性について, 土質工学会論文報告集, Vol. 24, No. 2, pp. 180~190, 1984.
- 15) 村田秀一・安福規之・山本修三 : まさ土の圧縮・せん断特性と風化度の関係, 地盤と建設, Vol. 3, No. 1, pp. 11~19, 1985.
- 16) 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変化, 土木学会論文報告集, No. 336, pp. 105~118, 1977.
- 17) 三浦哲彦・山内豊聡 : 砂のせん断特性に及ぼす粒子破碎の影響, 土木学会論文報告集, No. 260, pp. 109~118, 1977.
- 18) 三浦哲彦・村田秀一・安福規之 : 粒状土の応力・ひずみ特性(その1), 材料定数の粒子破碎依存性, 第20回土質工学研究発表会講演集, pp. 341~342, 1985.
- 19) 土質工学会編 : 土質試験法, pp. 668~693, 1979.
- 20) Haruyama, M. and Kitamura, R. : Anisotropic deformation-strength properties of soft sedimentary rock "Shirasu" originated from pyroclastic flows, Soils and Foundations, Vol. 24, No. 4, pp. 84~94, 1984.
- 21) 大西禎行 : 不攪乱まさ土の供試体作成方法とその強度特性, 山口大学卒業論文, 1985.
- 22) Vesic, A. S. and Clough, G. W. : Behavior of granular materials under high stress, Proc. ASCE, Vol. 94, SM 3, pp. 661~688, 1968.
- 23) Lee, K. L. and Seed, H. B. : Drained strength characteristics of sand, Proc. ASCE, Vol. 93, SM 6, pp. 117~139, 1967.
- 24) Yoshinaka, R. and Yamabe, T. : Strength criterion of rocks, Soils and Foundations, Vol. 20, No. 4, pp. 113~126, 1980.
- 25) 足立紀尚・小川豊和 : 堆積軟岩の力学特性と破壊規準, 土木学会論文報告集, No. 295, pp. 51~63, 1980.
- 26) 大原資生・村田秀一・松田 博・安福規之 : 昭和60年度6月山口県西部地区の豪雨災害の調査研究, 地盤災害特性の調査, 文部省科学研究費自然災害研究突発災害研究成果, No. B-60-2, pp. 47~61, 1986.

(1986.8.1・受付)