

# 風化花崗岩類地帯における斜面崩壊に関する研究 (1)

——風化度とせん断特性について——

日浦啓全\*<sup>1</sup> 佐々恭二\*<sup>2</sup> 大手桂二\*<sup>1</sup> 武居有恒\*<sup>2</sup>

HIROMASA HIURA\*<sup>1</sup>, KYOJI SASSA\*<sup>2</sup>, KEIJI OHTE\*<sup>1</sup> and ARITSUNE TAKEI\*<sup>2</sup>

Studies on the stability of slopes in the region of granitic rock (1)

——Effect by the degree of weathering on shear strength\*<sup>3</sup>——

## 1 はじめに

花崗岩類の風化生成物である、いわゆるマサよりなる山地や丘陵地の斜面が台風や集中豪雨に際して崩壊し、多くの生命、財産を脅やかす事態が毎年のように発生している。この研究はこれらの風化花崗岩類地帯に特徴的に発生する崩壊現象について、その発生の機構を解明することを主たる目的としているが、その素因ともいべき地山の風化の程度を表現するための指標をも導入し、力学的な特性を中心として考察しながら崩壊を発生し易いような地形、地質条件を見出すことも目的としている。現在、マサに関する研究は構成粒子の破碎性<sup>1)</sup>や成分鉱物である長石の比重と風化度<sup>2)</sup>、あるいはマサが水に対して著しく不安定な性状を示すところから、その吸湿膨潤性との関係について研究しているもの<sup>3)</sup>など、主として一度乱れた状態にあるマサそのもの、あるいは成分鉱物についてミクロな視点に立って研究、考察がなされている。また力学的な試験についても、主として攪乱された状態の試料に対して実施されているものが多く、地山の崩壊しやすさあるいは安定性を議論するためのものというよりは人工的に造成されたマサの盛土斜面等の安定の問題あるいはその上に設けた土木構造物の安全性の問題等の目的で実施されている。一方、地山の強さそのものを

知るために、ベーンせん断試験、貫入試験、現場せん断試験など現位置で行なわれる試験が多くを占めている。これには後述するように非攪乱状態の試料を採取することが困難であることが一因として考えられる。しかし実際にマサの自然斜面で発生している崩壊現象を観察すれば、その規模も小さく深さも1m前後のものが大部分である。しかるに前述の現位試験についても、崩壊の予知のための情報を得るための目的で現行の試験機を地山に導入するに際しても機械の軽量化およびそれに伴う精度の問題など今後の改良に期待すべき点が多く残されている。それと同時にサンプリングの方法等に関して種々の難点が見出されるが、非攪乱試料について実験室内において力学的試験を継続して実施していく事は是非とも必要である。これらの試験結果を積み重ねて行き、それをもとにして自然斜面の崩壊の予知あるいは安全性を考えていくことが重要なことであると思われる。

## 2 マサのせん断特性に関与する因子

マサは乱さない自然状態と乱した状態とではその工学的な性質が非常に異なる。地山におけるマサは風化作用にさらされてはいるが母岩を構成していた成物鉱物はその相対的な位置を変えることなく、したがって肉眼的に見ると構造、組織はほぼそのまま保存されて

\*<sup>1</sup> 京都府立大学農学部林学科砂防工学研究室

Laboratory of Sabo Engineering, Faculty of Agriculture, Kyoto Prefectural Univ. Japan.

\*<sup>2</sup> 京都大学農学部林学科砂防工学研究室

Laboratory of Sabo Engineering, Faculty of Agriculture, Kyoto Univ., Japan,

\*<sup>3</sup> 本研究の一部は昭和51年度砂防学会ならびに1977年度第5回岩の力学国内シンポジウムで講演  
昭和53年7月28日受理

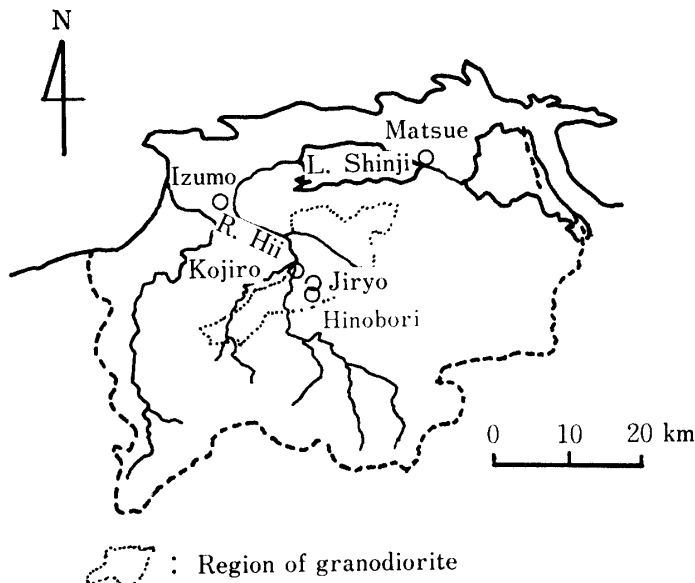


Fig. 1. The location where samples are gathered

いる。風化したマサはルーズな砂状物質に変化してはいるが、いわゆる砂のように一粒一粒が独立なものではなく、粒子間の結合力を残した状態で残存している。したがって地山のセン断特性は地質構造、現位置での深さ、母岩の鉱物組成の変化および風化の程度に左右されると考えられる。さらに、水に対する安定性の小さいことが特徴として挙げられる。どのような土にとってもその中の水の挙動が力学的強度を規定することはよく知られているが、マサにおいても、もちろん例外ではなく、むしろ他の土に比べてより過度に水の影響を受ける。豪雨時に山腹斜面や盛土斜面が処々で崩壊しているのが見られるのはこのためであろう。また風化の程度の強弱にもよるがマサを構成する各粒子の破碎性も重要な因子である。とくに風化作用に対して影響を受け易い長石の粒子は成分鉱物のほぼ3分の1を占めることを考えると当然セン断特性を大きく左右する因子と見なすことができる。また同時に風化の程度を表わすための有力な指標になるとも考えられる。次にマサは同一の産地で一見したところ同一の産状を呈しているようなものであっても風化のされ方が不規則で、おまけに鉱物組成も不規則、不均一であり、その上、節理やクラックが不規則に発達しているため、こわれやすく、乱されない試料の採取は極端に困難である。このことが力学的な試験をさらに困難にしていると考えられる。

### 3 調査地の概要

実験に用いた試料を採取した地域は Fig. 1 に示すように宍道湖の南方で斐伊川上流部の大原郡木次町にあ

る。島根県の地質図によれば、この地域の西端部に上部白亜系の流紋岩、石英安山岩質溶結凝灰岩類が分布し、これを貫く花崗閃緑岩体が地域の大部分を占めている。この岩体は図に示すように木次町付近を中心として東北の玉造方面にまで帯状に延長し、ほぼ NE-SW の方向を取っている。この岩体をはさんで南北には、これに貫入する黒雲母花崗岩が分布する。地域周辺部の火山岩類よりなる地帯は標高 300 m 以上のややけわしい地形をなしているのに比べて、花崗閃緑岩の地帯は標高 100~200 m の起伏のゆるやかな丘陵底の地形を示している。このように花崗閃緑岩が周囲の花崗岩やその他の岩石の地帯より標高が低く起伏の小さい地形をしていることは、これらの地方では花崗閃緑岩が周囲の岩石より

も侵食されやすい特徴をもつことを暗示している。この地域では昭和39年7月、日本海岸沿いに停滞した梅雨前線による、いわゆる山陰・北陸豪雨のため記録的な集中豪雨に見舞われ、島根県東部地域の木次町、加茂町、大東町を中心とする地域で谷頭侵食あるいは側方侵食の形で崩壊が多発した。この災害については国立防災センターや林業試験場の手で総合的な調査が実施され、大八木<sup>3)</sup>、黒田<sup>4)</sup>あるいは安藤<sup>5)</sup>によってその成果が発表されている。それらをもとに調査地域内の崩壊についてその概要をのべる。調査地域内には以下に示す3つの崩壊の型が多い。

- (1) 節理型崩壊
- (2) 表層滑落型崩壊
- (3) 複合型崩壊

一般に花崗岩類には節理の発達著しいが風化の進行につれてこの節理面にはモンモリロナイトの薄層が生成される。風化が進行して完全にマサ化してしまっても、この面は薄層として残り崩壊の発生に寄与している。この節理面と密接な関係をもって生ずるのが(1)の節理型崩壊である。(2)の表層滑落型崩壊は直下の基岩に由来するよりはむしろ斜面の上部から移動してきた表層のごく薄い、ほとんどのものが30~60 cm、厚くても1 m 程度の厚みしかもたない板状体の滑落により生ずる崩壊である。第3番目の複合型崩壊は表層滑落型崩壊が原因で、その運動過程において節理型崩壊を伴うものである。調査地域中、花崗閃緑岩地帯では節理型崩壊や複合型崩壊が多く、黒雲母花崗岩地帯あるいは風化のおくれている花崗閃緑岩地帯は表層滑落型の崩壊が多い。

#### 4 試料および実験方法

試験に際しては、試料の風化の程度の違い、あるいは節理の存在の有無が強度定数にどのような影響をもつかという点について議論できるように留意して実施した。上記の目的に沿って採土を行なうためには、実際にはひとつの露頭で新鮮な岩から風化が進行し赤色化したものまで観察される場所を選定し試料を採取することが望ましいが、現実にはそのような露頭は得がたいので、今回の試験に際しては Fig. 1 に示す、木次町内の3地点を選定した。これらの地域は視覚的にも明らかに風化度の違う寺領、古城そして日登の3地区である。これらの3地区内で三軸圧縮試験および単純せん断試験に用いる試料を採取した訳であるが、先にも述べたように自然状態の非攪乱試料のサンプリングの方法が確立されておらず、筆者らは手掘りより採土した。試料の寸法は三軸圧縮試験のために  $\phi = 5 \text{ cm}$ ,  $h = 12.5 \text{ cm}$ 。単純せん断試験のために、 $\phi = 10 \text{ cm}$ ,  $h = 4 \text{ cm}$  のいずれも円筒形に成形した。なお目的の項でも述べたように風化の程度の差異あるいは節理の有無が強度定数にどのように影響を与えているかという点を考察する必要があるため以下の事柄に留意して成形した。

(1) 風化の程度の影響を見るために試料中に節理の含まれていない均一な部位を選び、三軸圧縮試験と単純せん断試験を行なった。

(2) 節理の影響を見るために節理面がせん断の方向に平行になるように成形し、単純せん断試験のみを実施した。試験に供した試料は古城（下）と日登の2地区のものだけである。

試験方法はあらかじめ試料を飽和状態にしておき試験時に排水を許しながらひずみ制御方法でせん断を行なった。

結果の整理は三軸圧縮試験については通常、破壊応力円の包絡線を引いて強度定数を求めるが、包絡線の引き方がかなり個人の主観に左右され、得られた値にばらつきを生ずる。そこで単純せん断の結果との比較にも都合の良いように土質試験法に準じて<sup>6)</sup> 破壊時の  $\sigma_1$  と  $\sigma_3$  を用いて縦軸に  $(\sigma_1 - \sigma_3)/2$  を取り、横軸に  $(\sigma_1 + \sigma_3)/2$  を取って得られる直線の勾配  $\beta$  と切片  $f$  とから以下の式を用いて強度定数を決定した。

$$\sin\phi = \tan\beta, \quad c = f/\sqrt{1 - \sin^2\phi}$$

つぎに単純せん断試験については、ほとんどの試料がピーク強度を示さないで、せん断ひずみに伴って強度の増加を見るので、15%ひずみの時点での強度を所定の強度として考察に供した。

#### 5 風化度の指標について

マサ土の特性は土粒子の風化による変質の程度に依存しているため、他の土とは異なり風化の程度を定量的に判定することが重要となってくる。従来より、地質学あるいは土壌学等の方面から風化度に関する多くの研究がある。しかし工学的な立場からすれば、現実の問題、例えば自然斜面あるいは盛土斜面の安定解析に用いる強度定数に直接結びついているとか、あるいは判定の方法が簡単で適用範囲も広く、しかもマサの特性をうまく表現できるといった点が要求される。西田<sup>2)</sup> は工学的な観点から風化度を判定するための種々の指標を提出している。それらの方法は別すれば物理的方法と化学的方法とに分けられる。化学的方法は装置や技巧を必要とするため、なかなか手がけ難く、上に述べた意味も考え合わせると以下に挙げる主として物理的方法が有効と考えられる。

- (1)  $r_d$  (乾燥密度) または  $n$  (空隙率)
- (2)  $V_p$  (弾性波速度) の対数と  $n$  (空隙率)
- (3) 長石の比重の変化
- (4) X線回折の解析
- (5) かさ (みかけ) 比重

(1)は地山より得られる乱されていない試料より求めるのであるが、土粒子の真比重はほとんど変化しないのに比べ、 $r_d$  や  $n$  は深度の変化による風化度の差異をよく表わしている点を利用するものである。(2)は弾性波速度の対数が地山内部に向かって急激に増大し、これが空隙率の減少傾向とリニアになるという事実を踏まえているが、野外の種々の現場での資料を積み重ねていけば有効な手段となるものと思われる。(3)はマサの主要構成物質である長石の比重が風化に伴ない大きく変化する点を利用しているが、長石のより分けや比重測定結果の精度の問題が残るように思われる。(4)は風化の進行につれて長石や黒雲母等が2次鉱物になって行き、結晶構造が不規則になっていく点をX線回折により判定しようとするが、試料作製のために技巧が必要となる点や試料の作成に当たってのサンプルの取り出し方のわずかの違いが回折図の微妙な差として表われるため、定量化が困難であるという点が指摘される。風化が進むにつれて長石や有色鉱物に変質し内部に不規則な空隙の発達する様子が顕微鏡による観察でも知られている<sup>2)</sup>。いま図2に模式図で示すように土の中に含まれる空隙を土粒子内の空隙と土粒子間の空隙の2つに分け、土粒子の外部に開口し、水の出入の容易と考えられる土粒子内の空隙を測定することが風化度の判定に有効であるとして西田はこの空隙の測定

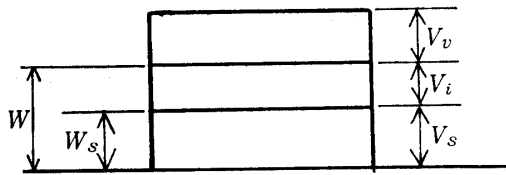


Fig. 2. Model of soil

- $G_a$ : Apparent specific weight  
 $W_s$ : Weight of soil  
 $W$ : Weight of soil of air dried  
 $V_v$ : Volume of void in soil  
 $V_s$ : Volume of soil  
 $V_i$ : Volume of void in soil particle  
 $G_s$ : Specific weight of soil  
 $r_w$ : Specific weight of water

を JIS A 1201 に細骨材の吸水量試験に準じて測定している。(5)は以上の考えに沿って次式で求める。

$$G_a = \frac{W_s}{\left(\frac{W - W_s + W_s}{r_w} + \frac{W_s}{G_s}\right) r_w}$$

次に化学的な方法であるが三浦<sup>7)</sup>が風化度の指標として A. D. F. (Degree of the absolute chemical freshness: 絶対的化学的新鮮度)。これはある岩石に対して比較的敏感に風化作用を反映するものの中で増加するものと減少するものの比を取り次式によって新鮮度なる因子を計算する。

化学的新鮮度

$$= \frac{\text{FeO} + \text{MnO} + \text{MgO} + \text{CaO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}}{\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{H}_2\text{O}(+)}$$

強く風化されているものほど新鮮度は小さくなるが、異なった岩石間で値を比較することはできない。そこで新鮮な岩石の化学的新鮮度に対して風化した岩石の新鮮度の比を取り 100 倍したものを絶対的化学的新鮮度とすれば比較は可能となる。したがって A. D. F. = 100 倍の場合が最も新鮮であるということが出来る。この方法では先に述べたように装置や技巧を必要とするが、本研究で用いた試料についての A. D. F. の測定結果が与えているため試験結果の考察に用いた。

なお参考のために測定結果を表 1 に示す<sup>8)</sup>。

## 6 実験結果および考察

### (1) 節理の影響について

単純セン断試験の結果, Fig. 3 に示すように節理の影響が見られたのは古城(下)と日登の試料のみである。すなわち節理の影響は, それが存在する場合には内部摩擦角は  $\phi = 26.0^\circ$  と変化しない粘着力の減少という形で表われる。ただし粘着力の差はたかだか  $0.2 \text{ kg/cm}^2$  程度であり試験結果のばらつきを考察するとこれだけの資料から節理の有無を議論することは意味がなくなってくる。また試料のセン断変位の様子をみても, 明らかに節理面を弱点としてすべっているものもあるが, 全般的にみてそれほど顕著な特徴はみられない。節理面ですべっているものについても節理面に生成された粘土層の中でセン断破壊が行なわれたというよりは粘土層と節理面の境界が剥離したような状態ですべっているものが大部分であった。以上のように節理面の存在の効果は Fig. 3 の結果だけで評価することはあまり意味がないように思われる。しかし, 少くとも節理面が存在すると, その周辺部の強度低下にかなり影響を及ぼすことは考えられる。また斜面に節理面が開口しているような場合や切り取りなどにより開口している場合には間隙水の循環を促進し, 節理面付近からの強度の低下を進行させることにもなり, このような過程については十分に考察する必要があると思われる。

### (2) 風化度の影響について

Fig. 4 には古城の中, 上について節理のあるものと無いものを同時に示してある。また Fig. 5 には古城の上, 中, 下各部位と寺領の均一の試料についての試験結果を示す。Fig. 4 はむしろ節理の影響の見られない試験結果であり, Fig. 5 の古城の均一試料の結果を付き合わせて見ると, 露頭における外観上の差がありそうに見えても, 力学的試験の結果からみると, 上, 中, 下の部位の差から認められる差に比べてプロットされ

Table 1. Values of A.D.F. for Granodiorite at Shimane Pref.

場所	地質	土色調	密度	A.D.F.
日登	新鮮な花崗閃緑岩		2.75	100.00
"	新鮮岩上 約 4 m			88.89
"	" 13 m			76.54
寺領	崖錐土基底部下 3.7m	7.5YR8/6		18.52
"	" 2.5m	10R7/8	1.27	12.35
"	" 1.3m	10R6/8	1.24	14.81
"	崖錐土基底部分(崖錐土)	10R5/8	1.29	11.11

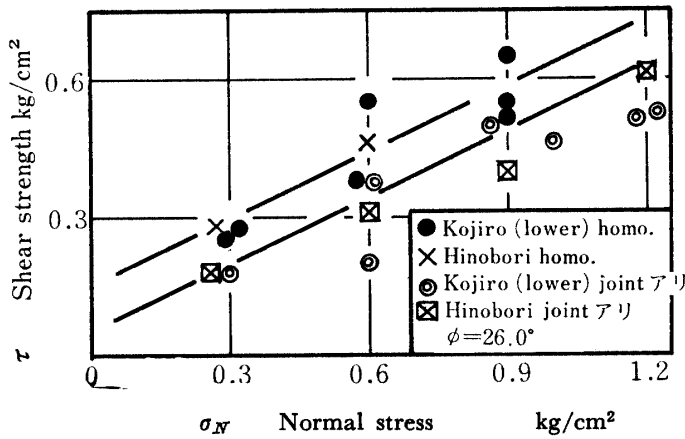


Fig. 3. Relation between shear strength and normal stress under the effect of joint (Kojiro (lower), Hinobori)

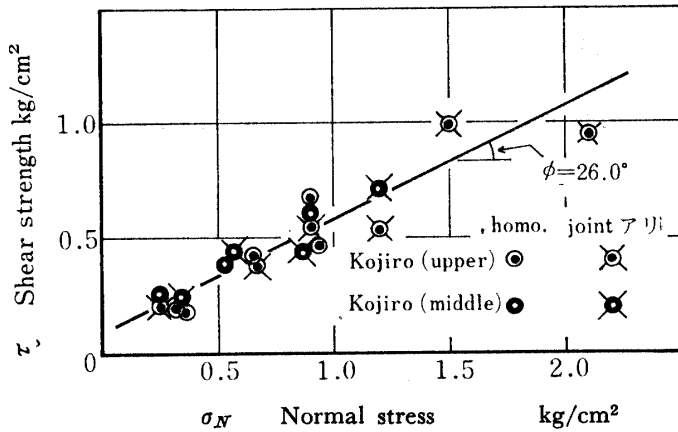


Fig. 4. Relation between shear strength and normal stress (Kojiro (upper), Kojiro (middle))

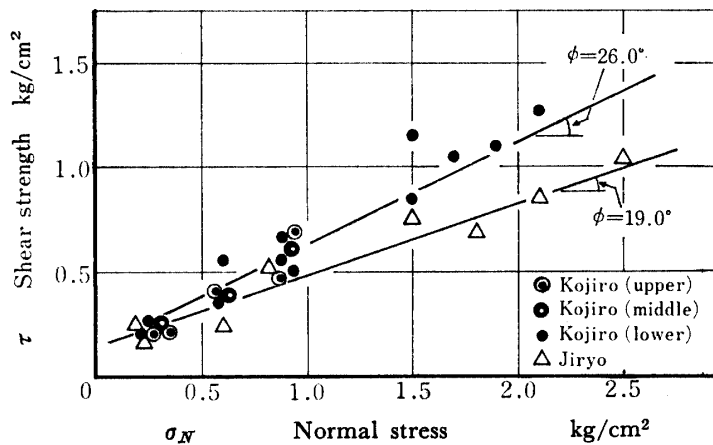


Fig. 5. Relation between shear strength and normal stress for uniform samples (Kojiro, Jiryō)

た点の全体としてのばらつきの方が卓越しており、三つの部位に別けてみる方が不自然に思える。一方粘着力の値をみると  $C=0.1 \text{ kg/cm}^2$  程度で差はないが内部摩擦角が古城では  $\phi=26.0^\circ$ 、寺領では  $\phi=19.0^\circ$  と明らかに違いがある。Table. 1 に与えられた A. D. F. の測定結果には日登と寺領についての値しか与えられていない。しかるに5節では風化度を定量的に表現する必要とそのための指標を紹介したが Table. 2 には各試料のせん断強  $\tau$  と垂直応力  $\sigma_N$  を風化の程度の指標としての試料の乾燥密度  $r_d$  と間隙比  $e$  と対比させて示してある。Table. 2 によって考察してみると乾燥密度  $r_d$  については寺領を除くすべての試料においてほとんど差がみられない。すなわち外観的には差のありそうに思える日登や古城の各部位についてはサンプリング時の採土位置のわずかな違い等によっても測定値にバラツキを生じ、強度と関連づけようとしても定量的に判断することは困難である。ただし寺領について強風化されていることが Table. 1 から明らかであり、また Table. 2 によってみても他のグループに比べて著しく乾燥密度  $r_d$  は小さい値を示している。Fig. 6 には古城（下）と寺領の比較をするためにせん断強度と間隙比の関係を示す。この図からも寺領だけが極端に間隙比が大きく、垂直応力が大きくなるにつれて強度の差が顕著に表われてくることが認められる。このように風化が進行、すなわち A. D. F. が減少する過程と乾燥密度の減少する過程がより良く対応していることは5節で論じたように工学的な観点からも乾燥密度  $r_d$  が風化度の指標として大いに用いられるべき点を示すものと思われる。

(3) 三軸圧縮試験と単純せん断試験の結果と比較

Fig. 7 には均一な試料のみについて行なった三軸圧縮試験の結果を3で述べた方法に従ってプロットしてある。図中に示す回帰曲線から計算された  $\phi$  は寺領以

Table 2. Results of simple shear test for uniform samples.

location	$\sigma_N$	$\tau$	$e$	$r_d$
Kojiro (lower)	0.3 kg/cm <sup>2</sup>	0.270 kg/cm <sup>2</sup>	0.397	1.890 g/cm <sup>3</sup>
	0.6	0.366	0.376	1.918
	0.6	0.550	0.492	1.770
	0.9	0.654	0.662	1.588
	0.9	0.500	0.320	2.000
	0.9	0.550	0.320	2.000
	1.5	0.160	0.640	1.609
	1.5	0.837	0.547	1.706
	1.7	1.053	0.660	1.590
	1.9	1.096	0.527	1.729
	2.1	1.267	0.561	1.609
	2.4	1.740	0.173	2.250
	2.8	1.910	0.176	2.244
	3.2	2.580	0.168	2.250
	3.8	2.910	0.320	2.000
Kojiro (middle)	5.2	3.110	0.285	2.055
	4.6	3.250	0.179	2.240
Kojiro (upper)	0.3	0.260	0.266	2.006
	0.6	0.400	0.338	1.899
	0.9	0.610	0.363	1.864
	0.3	0.212	0.554	1.634
	0.3	0.200	0.366	1.859
	0.6	0.410	0.363	1.864
	0.9	0.680	0.457	1.743
Onimasa (Hinobori)	0.9	0.474	0.524	1.667
	1.5	0.990	0.450	1.752
	2.1	0.956	0.473	1.724
	0.3	0.280	0.345	1.956
Jiryō	0.6	0.460	0.346	1.954
	0.9	0.550	0.391	1.891
	0.3	0.254	0.776	1.515
	0.3	0.169	1.284	1.178
	0.3	0.180	1.079	1.294
	0.6	0.242	1.178	1.235
	0.9	0.523	1.183	1.232
	1.5	0.753	1.143	1.255
	1.8	0.699	1.323	1.158
	2.1	0.871	1.223	1.210
	2.5	1.052	1.132	1.262
	3.0	1.110	1.115	1.272
	4.0	1.512	1.113	1.273

$\sigma_N$ : normal stress  $\tau$ : shear strength  $e$ : void ratio  $r_d$ : specific weight

外の全試料では  $\phi=47.3^\circ$ , そして寺領は  $\phi=26.6^\circ$  である。単純せん断試験と比べると, 両試験は試験方法も結果の整理方法も異なる。すでに述べたように三軸圧縮試験の場合にはピーク強度を基に強度定数を決定

できるが単純せん断試験では15%のせん断ひずみを時の強度で整理しているため, 当然強度定数の値が全く同じ値になることは考えられない。Fig. 3 には Fig. 5 および Fig. 7 をもとにして両試験から得られる内部摩

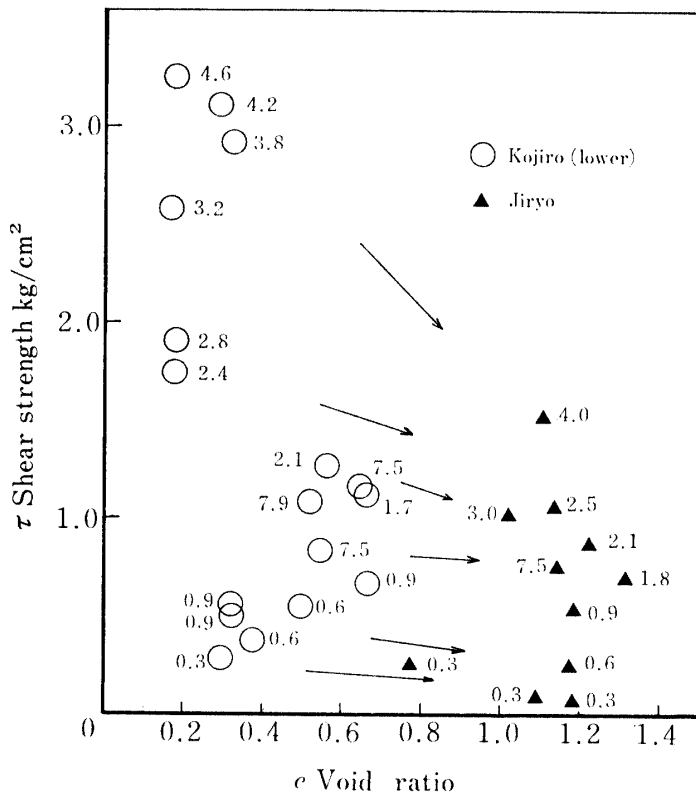


Fig. 6. Relation between shear strength and void ratio (numbers in the figure mean the value of normal stress)

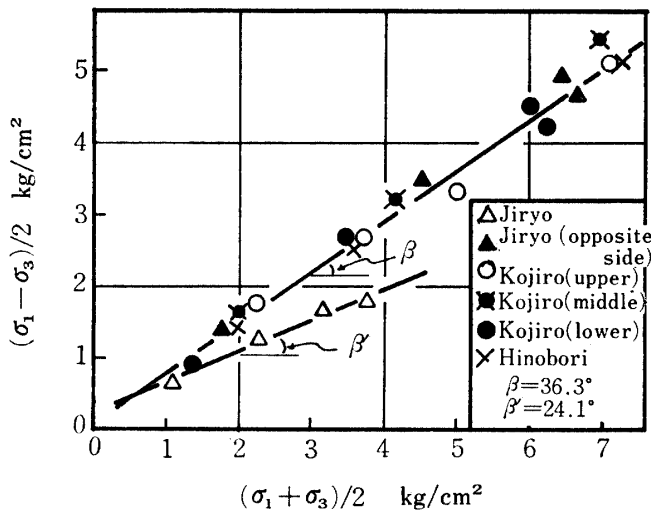


Fig. 7. Results of tri-axial compression test for uniform samples

Table 3. Values of angle of internal friction.

	tri-axial compression test	simple shaer test
samples except Jiryo	47.3°	26.6°
Jiryo	26.0°	19.3°

擦角を示す。ただし Fig. 7 中の寺領の試験結果は 4 点しかない。さらにプロットを増やしていけば  $\phi$  の値がいく分変化し、定性的にみると三軸圧縮試験で得られる  $\phi$  の方が相対的に過大な値を示しつつも同一の  $\phi$  の値を範囲内に落ちつく可能性があると考えられる。しかし、古城、日登については  $\phi$  の差は約 2 倍もあり、これを試験方法の差だけによるものとするには異論がありそうに思われる。そこで今回、三軸圧縮試験で実験条件として与えた側圧  $\sigma_3$  の最小値をみると、 $\sigma_3 = 0.5 \text{ kg/cm}^2$  である。すなわち Fig. 7 の  $(\sigma_1 + \sigma_3)/2$  軸の値がほぼ 1 となる付近である。単純せん断試験はせん断機構が三軸圧縮試験と違うため、両者の応力レベルを直接比較することはできない。しかし、Fig. 3, 4 に示すように単純せん断試験の垂直応力は  $7.5 \text{ kg/cm}^2$  以下であるため、おそらくは両試験の応力レベルが食い違ったのが原因で  $\phi$  の値に差がみられるのであろうと考えた。以上の考察にしたがい、三軸圧縮試験の結果との対応をみる目的で単純せん断試験で垂直応力が  $1.5 \text{ kg/cm}^2$  以上の範囲について強度試験を実施した。Fig. 8 には古城（下）について  $\sigma_N = 1.5 \sim 4.6 \text{ kg/cm}^2$  の範囲にわたって試験を行なった結果と Fig. 3, 5 に得られた結果を同時に示す。図から明らかなようにクーロンの破壊規準の直線が  $\sigma_N = 1.5 \text{ kg/cm}^2$  付近を境として屈折し、その後、 $\phi = 42.3^\circ$  と増加する。この値は三軸圧縮試験の結果得られた  $\phi = 47.3^\circ$  に比較すると小さな値を示すが、試験方法の差を加味すれば、ほぼ同一の測定結果のレベル内にあると考えてよいと思われる。しかもこの傾向は寺領などの風化された試料には見られない。したがって古城（下）のように風化の程度からみて相対的に新鮮な試料についてみられるせん断特性と思われる。

(4) セン断特性と風化過程のモデル

前項で明らかとなったクーロンの破壊規準の直線の屈折について考察するに先立って、まず、せん断強度一ひずみ一体積変化の関係について考察する必要がある。Fig. 9 および Fig. 10 はそれぞれ古城（下）の非攪乱試料および攪乱試料についての、強度一ひずみ一体積変化を表わした曲線である。

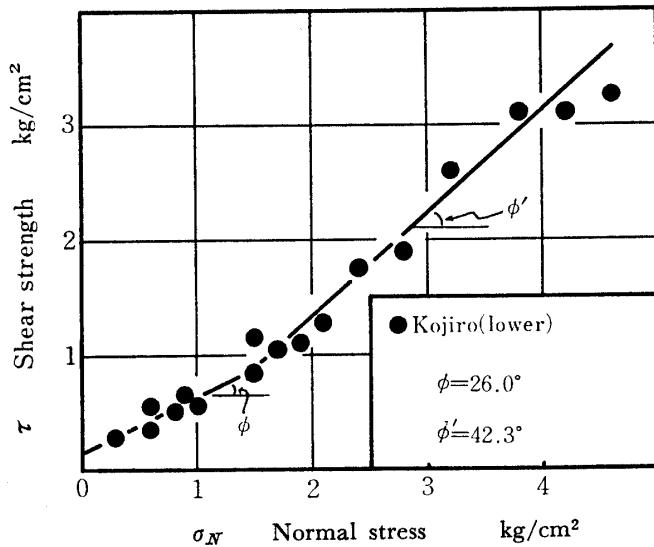


Fig. 8. Relation between shear strength and normal stress for Kojiro (lower) of uniform samples

土のせん断破壊は土粒子そのものの破壊ではなく、むしろ土粒子の接触点でのすべりによる粒子の配列状態の変化によるものである。このために生ずる体積変化、すなわちダイレイタンスの大きさはその土のつまり方や応力履歴によって異なる。したがってこのダイレイタンスの大小を考察することは特に砂質土の場合重要な事である。体積変化が最も顕著に現われるのは締まった砂の排水せん断の場合であって、比較的小さなせん断ひずみで最大強度を示し、その時のせん断ひずみの増分に対する体積変化の増分は最大となる。また砂が緩い状態にあるときはひずみに対する応力の増加はゆるやかであり、体積変化は圧縮方向にだけ進む。砂の場合の体積変化の特性としては一般に以上のことが知られているが、マサの場合にどのような特性を示しているかを以下に述べる。Fig. 9 について体積変化の様子を考察すると、垂直応力のレベルに対応して3つのグループに分けられるようである。すなわち垂直応力が  $\sigma_N = 0.9 \text{ kg/cm}^2$  以下の低応力の範囲では体積変化は圧縮の方向に進むのみである。せん断ひずみが15%になった時点でも圧縮は完全に終了してしまっていないようである。第2のグループは  $\sigma_N = 1.5 \sim 2.4 \text{ kg/cm}^2$  で、せん断ひずみが11%付近で体積変化は終了し、その後は一定の体積ひずみのまま保たれている。さらに垂直応力が増加すると、体積膨張を生じている試料も見られる。せん断強度についてはいずれの垂直応力に対してもピークを示さず、せん断ひずみの増加に伴って強度も増加する。先に述べた砂のせん断特性に照らして考えると、この様な体積変化を示すのはゆるい砂の場合であるが、今回用いた試料の

乾燥密度は  $r_d = 1.588 \sim 2.250 \text{ g/cm}^3$  の値を取り、いわゆるゆるい砂とは考えられない値である。網干ら<sup>9)</sup>はマサの自然試料の三軸排水試験を行なった結果、せん断力はせん断ひずみの増加によっても明確なピークを示さずに増加するという点を指摘している。このように試験方法が異なってもせん断ひずみの増加につれて強度が増加していくのが花崗岩類のせん断特性のひとつであると考えても良いのではないと思われる。

次に Fig. 10 であるが、せん断強度については Fig. 9 同様、ひずみの増加につれて一様に増加する傾向を示す。体積変化については図8と全く逆の傾向をもつ3つのグループに別けて考えられる。すなわち第1番目は垂直応力が  $\sigma_N = 1.0 \text{ kg/cm}^2$  以下の低応力の範囲で体積膨張を示すものが大部分である。第2番目も Fig. 9 同様、せん断ひずみが7~8%付近で体積変化を終了しその後一定ひずみを保っているグループ。第3に垂直応力  $\sigma_N = 2.0 \text{ kg/cm}^2$  以上の高応力の範囲でせん断ひずみに応じて体積の圧縮が進行し続ける。これを砂のせん断特性と対比させても逆の現象である。なお Fig. 10 においてせん断ひずみが15%の強度の時と垂直応力の関係を示したのが Fig. 11 であるが、Fig. 8 と比較しても高い垂直応力のところでの屈折はみられない。以上述べた Fig. 8~11 の見られる特徴を統一的に説明するために風化過程にある花崗岩類のモデルを Fig. 12 に示すように考えた。ここでは風化の過程でも長期に亘って安定な状態にある石英の粒子の核と、その囲りを取りまいてる長石類や雲母の速かに粘土鉱物に変化する相対的に柔らかな物質よりなる単位を考え、これらが三次元的に接している状態を任意の風化のステージにあるマサとする。この単位の大きさは5~10mmであり、実際にマサを手の中で軽く力を加えて構造を乱すとこのような単位に分離するところからヒントを得ている。

せん断試験中の体積変化の絶対値についてはサンプルリングや視覚的に同じように見えても構造や風化度も違う試料について比較することはできないが、Fig. 9 によるとせん断開始後の体積ひずみの量はほぼ垂直応力の大きさに比例しているようである。しかしながら体積ひずみの量そのものの差はほんのわずかであるため、ここではほぼ同レベルにあるとして先にのべたモデルを対比させながら定性的に議論をすすめる。Fig. 9 では垂直応力の低い範囲で先にも述べたように体積



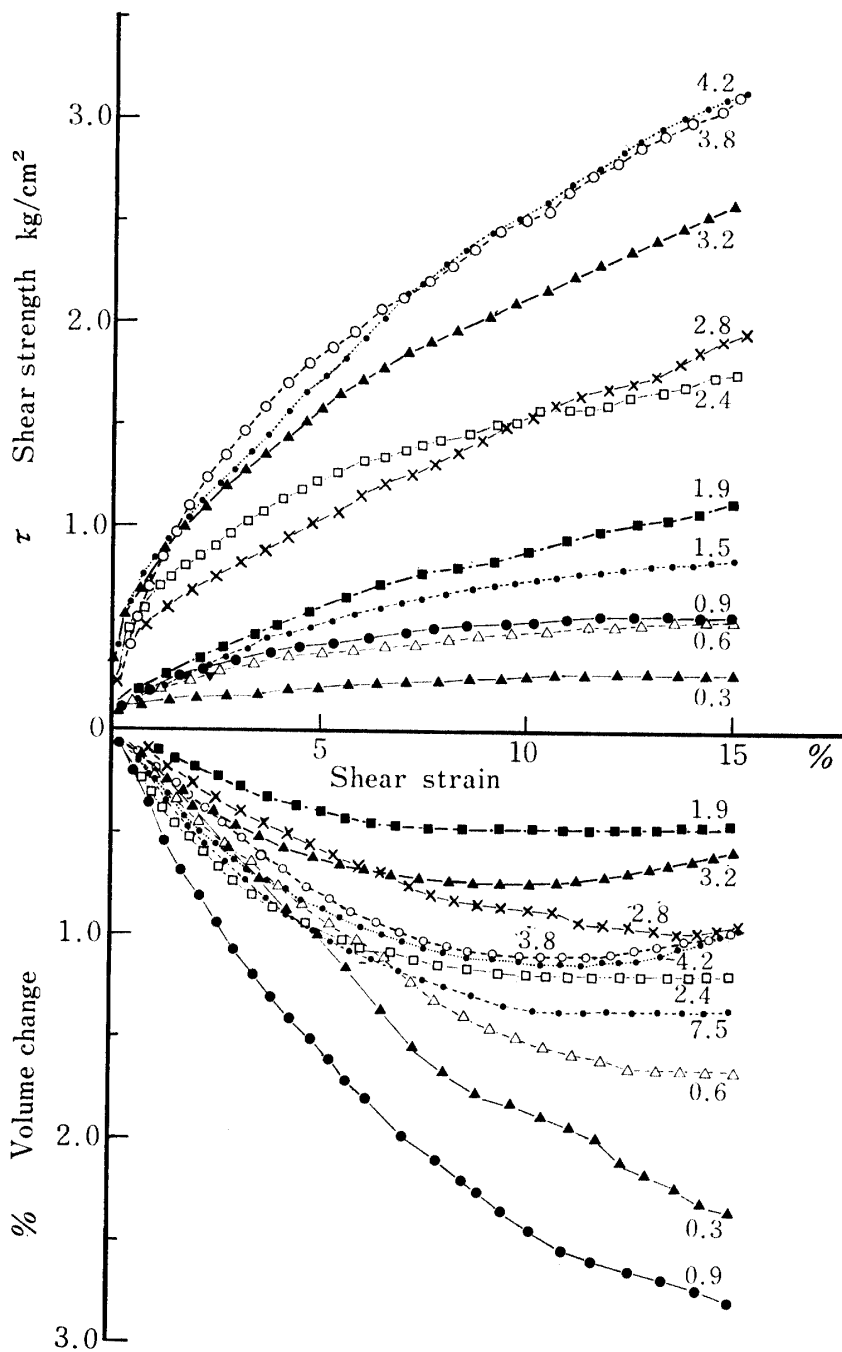


Fig. 9. Relation between shear strength, shear strain and volume change of non-disturbed samples (numbers in the figure mean the value of normal stress)

変化がその途中かあるいはほぼ完了しかかっている。この状態は垂直応力があまり大きくなくて、Fig. 12 (a) のように垂直応力が核だけでなく、まわりの柔らかい部分でも受け持たれていると考える。しかるに核の部分の強度は周りの部分よりずっと強いのであるからせん断に伴って生じる体積変化はこの周りのクッション的な構造部分に吸収される形でせん断が行なわれると考える。この体積ひずみを吸収するための仕事とし

強度を発揮するのであろう。攪乱された状態のマサでは各粒径が良好に配合されていると考えられるので垂直応力が粒子破碎につながる程大きくない場合にはむしろ密な砂に似たダイレイタンスー挙動をするであろうが、逆に垂直応力が大きくなって行くと、その大きいかんではより弱い粒子は破碎作用を受け、間隙を充填しながら体積変化は絶えず圧縮方向へ進み続けるといった定性的な考察ができよう。以上のように非攪乱

てせん断力が使われるためにせん断強度の上昇はごくゆるい曲線を描くにすぎない。次に第2の垂直応力のレベルに達すると大部分の試料がせん断ひずみが8%付近で体積変化を終了してしまう試料が多くなる。ちょうど Fig. 12 (b) のような粒子配列に達したところであって、強度の発現もそれほど見られない遷移的な領域のようである。その後垂直応力が十分大きくなると体積膨張を開始する試料も見られ、核同志が Fig. 12 (b) の状態のように直接噛み合い、核同志の摩擦による強度の発現が大きくなり内部摩擦角の急激な増加という結果になると思われる。こうしたクッション構造の働きは試料を完全に攪乱してしまった段階では Fig. 11 にみるように垂直応力の増加によってもひずみ-強度曲線の直線は屈折しない。

次に図9について考察するが、すでに垂直応力の小さい範囲で体積膨張を示す。そして垂直応力が増加すると先に示したようにゆるい砂と同様の体積変化を示す。すなわちマサの構造をこわしてしまうと当然種々の粒径の粒子に分かれるが、同じような粒径をもっている成分鉱物の違いがあるため、互いに強度の違う粒子が含まれ、それらが微妙に影響しあってせん断

試料ならびに攪乱試料の体積変化の様子からマサの粒子の噛み合いと強度という点について考察を行なったが、今後さらに厳密な、物性的な立場から種々の測定を実施し、マサのせん断特性を定量的にも議論することができるように資料を積み重ねていく必要があると思われる。さて上のようにモデルを提案し考えるこ

とは間隙水圧を発生させた場合、全応力が有効応力と間隙水圧とで受け待たれるとする有効応力の概念と対比して考えることができる。すなわち Fig. 12 (b) のような状態に対しては全応力=有効応力の状態であると考えることができる。ここで今、この概念を「有効核間応力」と呼んでおくことにする。

7 ま と め

風化花崗岩類のせん断特性に影響を及ぼすと考えられる因子を取り出し、力学的試験を実施し以下の結果が認められた。

1. 節理の存在が強度定数に影響を及ぼすかどうかは本研究の範囲では認められなかった。
2. 均一な資料では風化の進んでいるものほど内部摩擦角は小さな値を示す。
3. 古城(下)の試料では垂直応力が  $\sigma_N = 1.5 \text{ kg/cm}^2$  より大なる範囲で内部摩擦角は急増する。これを説明するために風化過程のモデルを提案し「有効核間応力」という概念を導いた。
4. 工学的な観点からみて比較的良く風化の程度を判定することのできる指標が乾燥密度あるいは空隙比であることが確かめられた。

以上、この研究では風化の指標と強度とを対応させながら崩壊現象を見ていき、究極的には斜面崩壊の機構解明のための鍵を見出そうとするものである。

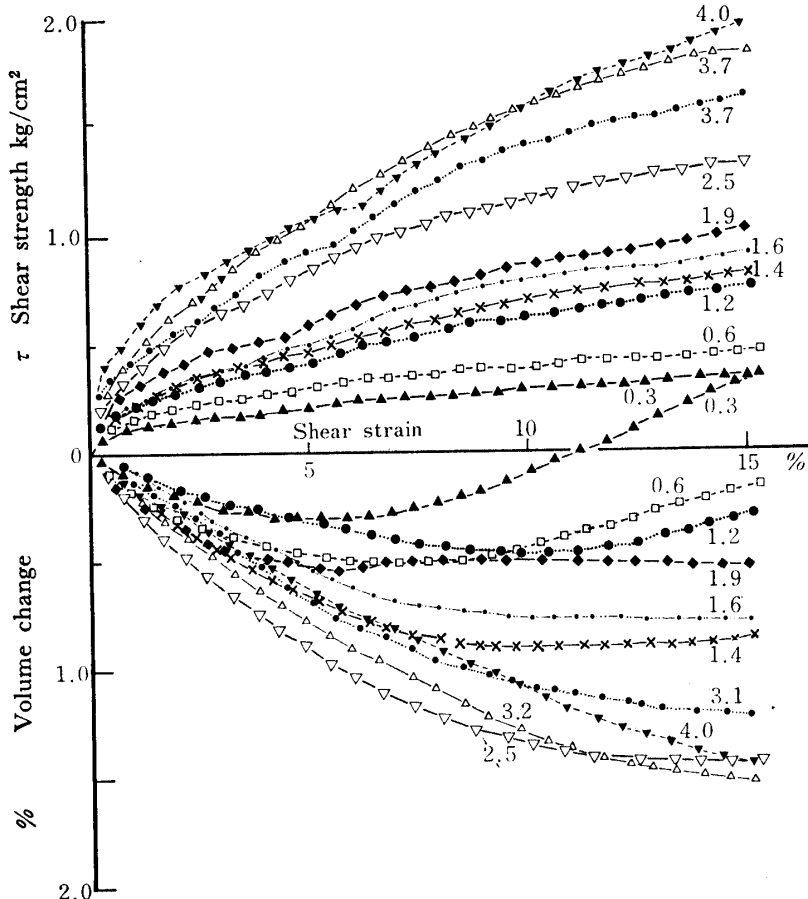


Fig. 10. Relation between shear strength, shear strain and volume change of disturbed samples (numbers in the figure mean the value of normal stress)

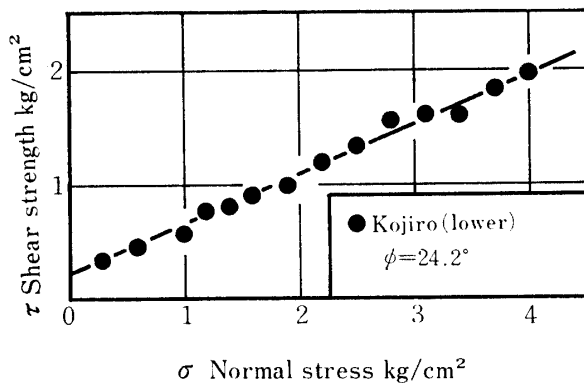


Fig. 11. Relation between shear strength and normal stress for Kojiro (lower) of disturbed sample

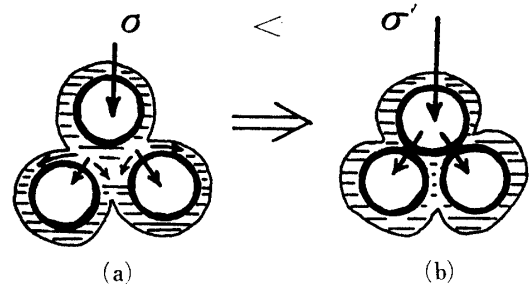


Fig. 12. Model of granitic rocks under weathered condition

本報文ではわずかな資料で大胆な仮定を提示した部分も多くあると思われるが、今後さらに多くの実験的研究を積み重ねて内容を充実したものにしていくとするものである。

本研究の実施にあたって資料の提供ならびに適切な助言をいただきました島根大学教育学部の三浦清教授に深甚なる感謝の意を表します。

#### 引用文献および参考文献

- 1) 福本武明：締固めたマサ土の破碎特性—巨視的立場からの考察— 第18回土質工学会シンポジウム 昭和48年度発表論文集 p. 31~36
- 2) 西田一彦：マサ土の風化度判定 第18回土質工学会シンポジウム 昭和48年度発表論文集 p. 13~20
- 3) 大八木規夫：島根県加茂・大東花崗岩類地帯における風化帯の構造と崩壊 防災科学技術総合研究所報告 第14号 1968年
- 4) 黒田和男・窪木時雨郎：島根県大原郡下の風化

花崗岩地帯における山くずれの地質学的研究  
防災科学技術総合研究報告 第30号 1973年

- 5) 安藤 武・黒田和男・柴藤喜平・三浦 清：島根県大原郡地方における崩壊とそれに関連する花崗岩の風化機構について 防災科学技術総合研究報告 第14号 1968年
- 6) 土質工学編：三軸圧縮試験 土質試験法 p. 419~420
- 7) 三浦 清：深成岩類の風化に関する研究第1報 新第三紀末の赤色風化作用による江津深成岩体の風化応用地質 第14巻 第3号 1973年
- 8) 三浦 清：大東花崗岩閃緑岩の赤色風化—深成岩類の風化に関する研究（第3報）— 応用地質 第10巻 第2号 1975年
- 9) 網干寿夫・中田雅博：マサ土自然斜面の崩壊と自然試料のせん断強度について 第12回土質工学研究発表会昭和52年度発表講演会講演集 p. 885~888

#### Summary

Authors made strength tests on six samples' ores of weathered Granodiorite gathered at Ohara-gun, Shimane prefecture.

The tests are tri-axial compression test and simple shear test. The samples are gathered at Hinobori, Kojiro (lower), Kojiro (middle), Kojiro (upper), Jiryo (the opposite bank) and Jiryo.

By these tests, authors found the results below;

1. Joints inside have little effect on shear strength.
2. Four samples, Kojiro (upper), Kojiro (middle), Kojiro (lower) and Jiryo (the opposite bank) show close value of internal friction angle of internal friction,  $\phi=26.0^\circ$

3. The sample from Jiryo shows the least value of angle of internal friction,  $\phi=19.3^\circ$

4. By the results of simple shear test, when normal stress exceeds  $1.5 \text{ kg/cm}^2$ , the value of angle of internal friction increases rapidly.

5. To expound the rapid increase of angle of internal friction, we devise the conception of 'effective inter-granular stress' through the inquiry on the model of the samples in weathering process.

6. The dynamic attributes well coincide with  $r_d$  and  $e$  and A.D.F. (degree of the absolute chemical freshness) presented by Prof. Miura (Shimane Univ.).