

# 物理強度特性からみた乱さないまさ土の分類

## CLASSIFICATION SYSTEM OF DECOMPOSED GRANITE SOIL IN UNDISTURBED STATE

西田一彦\*・青山千彰\*\*

By Kazuhiko NISHIDA and Chiaki AOYAMA

The studies of decomposed granite soils in undisturbed state have been done by means of new sampling and testing technique. But because of the poor situation with regard to relevant literature, the classification system for engineering purposes have not been established, so that these results of studies on the sample taken from various localities do not have compatibility with each other.

The paper proposes a classification system for engineering practice in the decomposed granite soil on the basis of physical and mechanical properties.

### 1. 序 論

まさ土斜面の安定問題を考える場合、重要な課題である乱さないまさ土の研究は、サンプリング技術の向上に伴いここ数年急激に増加し、興味ある研究成果が報告されるようになった。しかし、一方では、乱さないまさ土の研究歴が浅いため、工学的立場での分類・整理法が確立されておらず、これらの研究は採取地点が異なると、相互に比較検討できない問題が生じている。

まさ土の分類、特に風化区分に関する研究は風化岩と乱した試料も含めると、非常に多く、各研究者の立場に応じた分類法が提唱されている。その数は、まさ土の研究者の数だけあるといっても決して過言ではないのが現状である。

分類法の立場には、露頭あるいはボーリングコアの観察、弾性波速度、基本的性質、鉱物・化学的性質の変化、RQD、変形係数、各種硬度と貫入量、サウンディング、施工性などがある。しかし、いずれの分類法も一長一短があり、岩種、風化度の違いにもかかわらず、すべてのまさ土に適用できる分類法はまだ見当たらない。

このように、分類法が続出した背景には、一口に、まさ土と表現するには、あまりにも花崗岩類の種類が多く、かつ地域的に風化の様式、程度が異なるなど各種要因があるが、風化度を的確に表わすインデックスに欠けたことが最大の原因と考えられる。そして、まさ土の大きな特徴である乱さない状態での試料採取の難しさ、試料の性質のばらつき、地盤の不均質性などの要因が加わるため、岩種、風化度を総合的に考慮した整理が難しく、統一的な分類法が成立しにくかったと思われる。

工学的立場に立脚した乱さないまさ土の整理・分類法を考える場合、風化度を表わすインデックスは、室内試験で熟練を要する分析から得られるものは実用性に乏しいため不相当であり、極力簡単な手法で得られるものが望ましい。また、分類法のあり方としては岩種、風化度の概略をつかむことで各研究結果の互換性をもち得るのであること、工学的性質に直結していることなどが要求される。したがって、従来の分類法は、これらの条件からみると不十分であると考えられる。

本論は、岩種、風化度の異なる試料の基本的性質と工学的性質を、文献による資料と著者らの研究データをもとに整理し、それらの特性から分類法とその適用を検討したものである。

\* 正会員 工博 関西大学教授 工学部土木工学科  
(〒564 吹田市山手町3-3-35)

\*\* 正会員 関西大学助手 工学部土木工学科(同上)

## 2. 風化層断面の物性と土構造特性

乱さないまき土の工学的性質による分類を行う場合、風化層断面の特性を物性面から理解しておくことが望ましい。Fig. 1は著者ら<sup>1)</sup>が領家型花崗閃緑岩 ( $G_s=2.72$ )の強風化断面について調査試験したものである。調査地点は断層などの影響を受けずに、均質、一様に風化した地点で、極端に風化して粘土化したものから硬岩まで連続的に変化する場所を選定した。

図は風化層断面の土質、物性を明らかにするため、構成材料の質的变化を表わすX線回折強度、強熱減量 Ig. loss, ならびに構造状態を表わす自然含水比  $w_n$ , 比表面積  $S_s$ , さらに、マイクロポアの間隙量や引張強度  $\sigma_t$  も同時に示した。

$S_s$ , Ig. loss,  $w_n$ は比較的良好に対応し、いずれも  $e=0.3$ 程度から増加し始め、 $e=1.2$ あたりから変化が極端になる。斜長石のX線回折強度は、 $e$ の増加につれ減少し、 $e$ が約1.2付近で消滅する。0.1  $\mu\text{m}$ 以下のマイクロポアは  $e=0.8$ より増加し始め1.0以上で急増する。マイクロポアの増加はそのまま  $S_s$ の増加となるため、マイクロポアと  $S_s$ は非常に良好に対応する。 $\sigma_t$ は  $e=1.0$ で最小値を示し、それ以上では再び大きくなる。

これらのデータを総合して模式的に示したのが Fig. 2である。なお、図中には顕微鏡観察による風化層のスケッチを併記した。

風化に伴って、空隙の絶対量は一方的に増大するが、 $e$ の小さい範囲では、主として物理的風化が優勢で間隙は結晶粒界の分離による粗大空隙が発達する。そして、質的变化は少ない。

次に、空隙が増大し、間隙が結晶内部まで及び、マイクロポアが発達するようになると、化学的風化が進行し始め粘土化が始まる状態になる。この段階で、結晶粒界面は最も分離するため  $\sigma_t$ は最小となる。

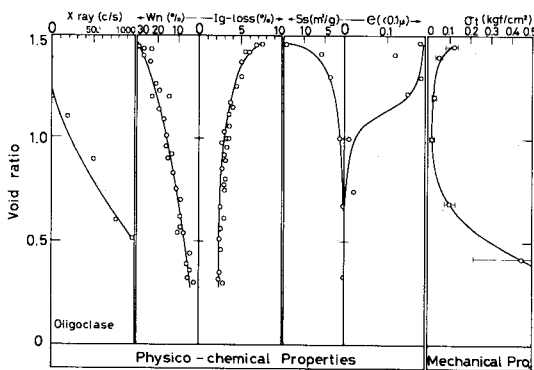


Fig. 1 Physical and mechanical properties from fresh rock to fully weathered.

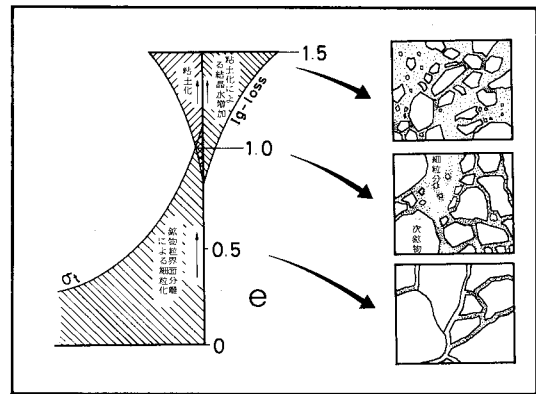


Fig. 2 Schematic diagram in the process of insitu weathering.

さらに、風化が進むと粘土化による水分の二次的結合が現われ、二次的な引張強度が現われる状態となる。しかし、最も風化した  $e=1.5$ は土構造的に不安定であり、圧縮されやすい。

以上、強風化した風化層断面の特徴は風化岩の状態から砂質化、そして粘土化した領域まで幅広く質、構造ともに変化した風化層をもっていることである。したがって、これらの特徴が工学的性質に及ぼす影響は大きく、整理、分類のもとになると考えられる。

## 3. 乱さないまき土の物理定数の検討と風化度の尺度

分類・整理の対象とした乱さないまき土の物理・強度定数を以下に示す。物理定数として比重  $G_s$ , 単位体積重量  $\rho_n$ , 間隙比  $e$ , 流動限界  $w_n$ , 粒度分布, 強熱減量 Ig. loss. 強度・変形定数として、一軸圧縮強度  $q_u$ , 引張強度  $\sigma_t$ , 一面せん断強度, 圧縮指数  $C_c$ . 他に、限界動水勾配  $i_c$ , 透水係数などである。

これら各種定数を、乱さない状態のまま土より得ることは難しい。著者ら<sup>2)</sup>は、主に釘打ち込み法によるサンプリングを行った後、密度を測定し、一軸圧縮強度試験と引張り試験は現場で、他は、室内にて既報の方法により実施した。

これらのパラメーターのうち、風化過程を適切に表わし得るものとして  $e$ , Ig. lossが挙げられる。小野寺ら<sup>3)</sup>、著者らは前者を土構造の変化、後者を粘土化、細粒化による質的变化を表わすものと考えている。しかし、Ig. lossは母岩の種類によってデータのばらつきが激しく、風化の全過程を表わせないこと、そして粘土化の少ない岩種には適用が難しいことから、本論では、主に間隙比を風化指標とし、分類・整理のもととした。

一方、物理的性質のうち、 $G_s$ ,  $e$ , Ig. lossはその土

固有の値を示すものであるが、 $\rho_t$ は採取時の自然含水量に応じて変化する。しかし、その自然含水量も風化するとマイクロポアが増大し、保水能大となるので比較的固有の分布を示すことから、おおまかではあるが、その土の特徴を十分表現し得る定数として、実用的な  $\rho_t$  を  $e$  に準じる風化指標として採用した。

4. 試料の岩質と物理的性質について

検討した試料は、Table 1 に示すとおり 18 か所で現場試験ならびに室内試験を実施したものについてまとめたものである。なお、比較のため、沖村<sup>4)</sup>、松倉<sup>5)</sup>、小野寺<sup>3)</sup>、網干<sup>6)</sup>、末岡<sup>7)</sup>、本四公団ら<sup>8)</sup>の研究成果も分類、整理の参考とした。参考試料を含めた全試料は主に領家型花崗岩類のものが多く、他に、白亜紀型花崗岩類、第三紀花崗岩、ナイジェリアのプレカンブリア紀花崗岩がある。

表中の岩石名については、各種地質図を参考としたもので、厳密な岩石学的名称ではない。また、岩石名の中で、粒径(粗粒, 中粒, 細粒)による区分は、地質学上、広域に分布する岩石につけたおおまかな名称で、後述する土質工学での粒径区分とは必ずしも対応しない。

工学的立場から岩質の違いを判定することは難しく、一つのインデックスで表わし得ないものであるが、一応の判定基準になるものとして土粒子比重  $G_s$  がある。一般に、有色鉱物の少ない花崗岩類の  $G_s$  は 2.60~2.65

に分布し、有色鉱物の多い花崗閃緑岩タイプになると 2.70 以上の大きな値を示す。 $G_s$  は風化の進行に伴いやや小さくなる傾向を示すが、風化層全体からみれば、見掛け上変化幅の小さい値であり、風化の影響の少ない岩質区分のインデックスとして有用であると考えられる。なお、表中の  $G_s$  の値は平均値を示す。

5. 乱さないまさ土の基本的性質

(1) 粒度分布とコンシステンシー

粒度分布ならびにコンシステンシー試験は、いずれも乱した状態で実施するため本稿の主旨からはずれが、各試料の基本的性質を理解するうえで重要な要素と考えられる。各試料の粒度分布曲線を Fig. 3 に示す。図より粒度分布特性は数多くの報告同様、粗粒なものから細粒なものまでよい分布を示す。また、まさ土の粒度分布のもう一つの特徴である不連続粒度も強風化した No. 17 の試料にみられる。一方、粘土分含有量は有色鉱物の多い試料に多く、後述の Ig. loss の傾向とも一致する。

Fig. 4 はスランプ試験より得た流動限界  $w_{fl}$  と、攪乱前の密度との関係を描いたものである。風化が進み  $\rho_t$  が減少するにつれ、 $w_{fl}$  が増加し、ある程度まで風化状態を表現できることを示している。全試料の  $w_{fl}$  の変化範囲は 20~40% で、この値は既存の研究結果<sup>9)</sup>も含めほとんど変わらないと考えられる。

(2)  $e$ - $\rho_t$  関係

$e$ - $\rho_t$  の関係を  $\rho_t$  が 2.2 以下の全試料についてプロッ

Table 1 Physical properties and sampling localities in the decomposed granitic soil regions.

番号	地名	岩質	$G_s$	記号
1	生駒山	1 c G	2.72	●
2		2 "	2.75	●
3		3 "	2.66	●
4		4 "	2.60	■
5	六甲山	1 m G b	2.63	⊖
6		2 "	2.61	⊖
7	金剛山	1 D q	2.75	⊖
8		2 "	2.72	⊖
9		3 "	2.70	⊖
10	河内長野	1 G d	2.74	X
11		2 "	2.66	*
12	比叡山	m G b	2.64	▲
13	高倉山	c G b	2.65	○
14	西三河	m G d	2.72	⊙
15	渡路島	c G d	2.62	•
16	磐貴山	n G d	2.69	⊙
17	基田	G d	2.66	□
18	天理	G d	2.65	▣
19	沖村:青谷	G d	2.70	+
20	松倉:阿武隈	f G G b G h h	2.65, 2.61, 2.65	▽▽▽
21	福田	c G b	2.64	▽
22	小野寺:今治	G d	2.64	→
23	末岡:カドナ	G b	2.70	*
24	網干:広島	G b	2.63	⊙
25	庄野:広島	G b	2.63	⊙
26	本四:生口島	G b	2.65	▽

c G : 粗粒角閃石黒雲母花崗岩 m G b : 中粒黒雲母花崗岩  
 D q : 石英閃緑岩 G d : 黒雲母角閃石花崗閃緑岩  
 c G b : 粗粒黒雲母花崗岩 c G d : 粗粒黒雲母角閃石花崗閃緑岩  
 n G d : 片麻状黒雲母角閃石花崗閃緑岩 f G : 細粒花崗岩  
 G h b : 閃雲花崗岩

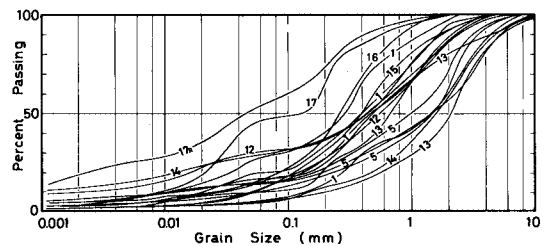


Fig. 3 Grain size distributions of decomposed granite soils.

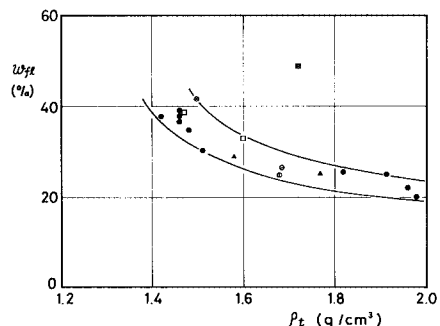


Fig. 4 Changes of consistency with weathering process.

トしたのが Fig. 5 である。密度測定に際し、著者らは釘打ち込み法を実施したが、引用文献<sup>3)-5)</sup>の研究者は水置換法あるいはパラフィン塗布による方法を用いている。しかし、いずれの方法も大差なく、ここでは同一のものとして取り扱った。なお、 $\rho_t$ ; 2.2 付近はまさ土と風化岩とのおおよその境とされている値である。 $e-\rho_t$  の関係は  $e = G_s / \rho_t \cdot (1 + w_n / 100) - 1$  で表わされるとおり、全体としてはほぼ双曲線に近い曲線が得られ、同一密度では  $G_s$  が大きいほど、上側にプロットされる。

主な特徴は、風化による最大間隙比が約 1.6、最小密度は約 1.3、同一密度での間隙比変化幅は 0.5 にも達し、たとえ同一密度でも岩質が異なると岩と土ほどの差が生じる。Fig. 6 は Fig. 5 中、風化度の異なる同岩質試料のプロットを、曲線で結んだものである。図中、矢印は測定を実施した場所での最大に風化した状態の間隙比を示す。その値を  $e_{mw}$  で表わすと、約 0.5 付近まで風化するもの、1.0 付近までのもの、全体としての最大値 1.5 まで風化するもの、さらに風化するとかえって 1.2 程度まで減少するものの、4 つのグループに分かれる。ただし、最後のグループは図の  $e-\rho_t$  関係から判読したもの

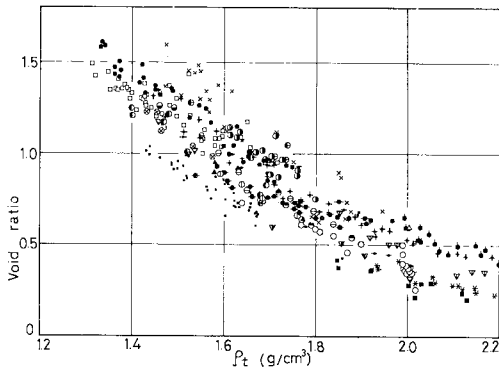


Fig. 5 Correlation between void ratio and  $\rho_t$ .

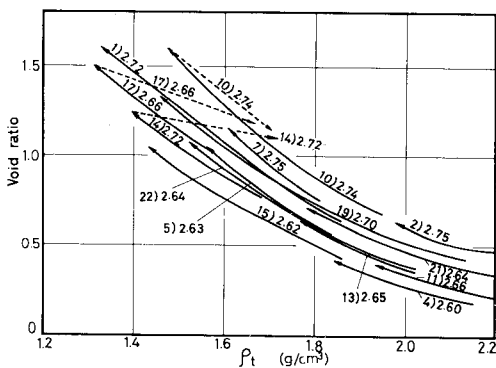


Fig. 6 Variation in void ratio with the progress of weathering.

ではなく、現地で風化層断面沿いに調査した結果、最も風化した地表近くになると、再び密度が大きくなる層があるため、この点を考慮して描いたものである。

### (3) Ig. loss- $\rho_t$ , $e$ 関係

Ig. loss- $\rho_t$  の関係を Fig. 7, 8 に示す。Fig. 8 は、先述の  $e-\rho_t$  曲線同様、同岩質試料について曲線に書き直したものである。

Ig. loss- $\rho_t$  の全体的な傾向は  $\rho_t$  が約 1.7 付近を境に、急激に増加する部分と、ほとんど変化しない部分に二分されることである。Ig. loss の最大値は約 10%、最小値 ( $\rho_t < 2.2$ ) は岩質により異なり 0.5~4.0% 内に分布する。

個々の試料については、風化による  $\rho_t$  の減少につれ、 $G_s$  の大きい花崗閃緑岩が常に大きな Ig. loss を保ち、緩やかな増加を示すのに対し、 $G_s$  の小さい花崗岩では全く増加しないか、増加し始めると急激に増加するものが多い。

Fig. 5~8 よりまとめた  $e$ -Ig. loss 関係を Fig. 9 に示す。図中、No. 22 のカドナのデータは一部  $H_2O^+ + H_2O^-$  を用いたものである。 $e$ -Ig. loss 関係は  $e$  が約 1.0 付近より Ig. loss が増加し始め、1.5 付近まで急激に増加するものと、さらに風化すると、Ig. loss は増加するが、 $e$  は再び減少するものがある。特に、後者は No. 23 の熱帯風化残積土で著しい。なお、ここで問題となる  $e$ -Ig. loss 曲線の曲率変化点の詳細な位置は、データ数が少ないため、検討が難しい。

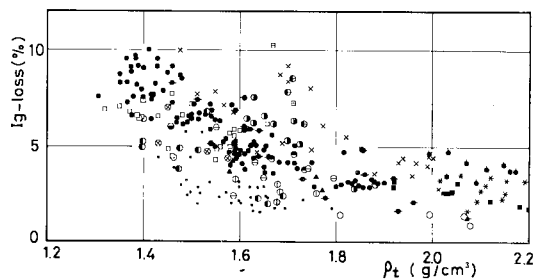


Fig. 7 Correlation between ignition loss and  $\rho_t$ .

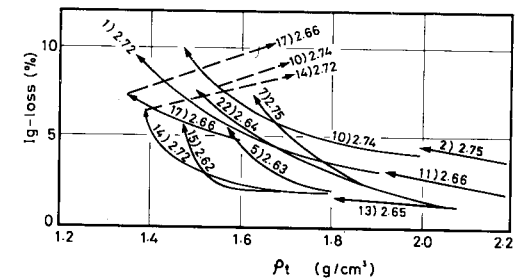


Fig. 8 Variation in ignition loss during weathering.

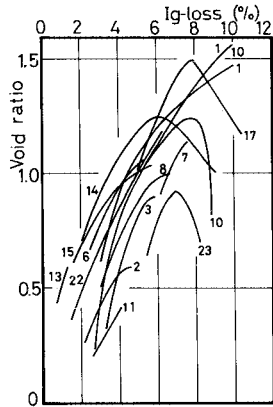


Fig. 9 Variation in void ratio vs. ignition loss.

6. 乱さないまさ土の工学的性質

本論では、乱さないまさ土の工学的性質として、一般的な透水、変形、強度特性と斜面問題を考慮して特殊ではあるが、限界動水勾配を取り上げた。

そして、岩種の異なる試料が、それぞれの風化段階でどのような工学的特性を示すのか、風化指標  $e$  をもとに検討したものである。

(1) 透水特性

乱さないまさ土の透水試験では、自然地盤のもつクラック、木の根、みず道、目詰まり、その他数多くの因子の影響を受けるため、その土固有の値を得ることが難しい。たとえ、これらの要因を除いて透水係数  $k$  (cm/s) を測定することができても、透水試験容器の形状効果の問題があり、その値が地盤の透水性を代表するかどうか断定できない。一方、透水試験時においても、風化のため細粒・粘土化した土構造は通水により目詰まりが起りやすく、動水勾配を大きくすると、極端な  $k$  の低下を引き起こすなど数多くの特徴をもっている。

乱さないまさ土の透水試験に関する研究は非常に少な

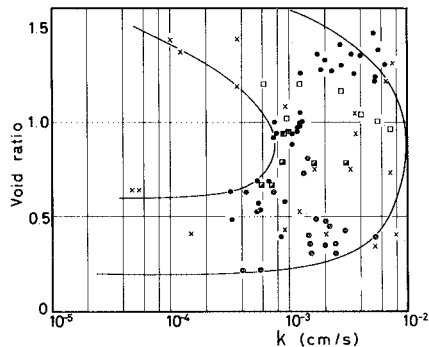


Fig. 10 Permeability and weathering degree.

く網干<sup>10)</sup>、西田ら<sup>11)</sup>の研究のほかは現場透水試験で浸透能を測定するものが多い。

乱さないまさ土の間隙比と透水係数との関係を Fig. 10 に示す。  $k$  は約  $5 \times 10^{-5} \sim 10^{-2}$  (cm/s) に分布し、  $e$  が約 1.0 前後で最大となる馬蹄状の曲線を描く。  $e$  と  $k$  との関係は締固め土のように、  $e$  の増加に対応して  $k$  が増加するようなものではなく、  $e > 1.0$  の場合には、むしろ減少する傾向が強い。この原因は締固め土の場合、同質材料で間隙が変化するのに対し、乱さないまさ土では Fig. 2 の風化断面スケッチからわかるとおり間隙の変化に加え、粘土化などにより材質そのものが変化するためである。

(2) 引張、一軸圧縮強度特性

引張強度  $\sigma_t$  は、木宮<sup>12)</sup>の風化引張強度指数にみられるように、花崗岩の風化指標の1つとして考えられている。

引張強度試験方法は数多くあるが、直接引張強度試験と、間接引張強度試験に二分される。乱さないまさ土への適用例として、前者は、沢<sup>13)</sup>、西田ら<sup>14)</sup>の接着剤を用いたもの、後者は、木宮の非整形一点載荷によるものがある。なお、非整形一点載荷試験は、硬岩から軟岩まで広範囲に実施することができるが、風化の激しい ( $e > 1.0$ ) 試料に使用するには精度上問題が多すぎる。したがって、乱さないまさ土を対象とする本論では接着剤を用いた引張強度試験のみ採用した。

間隙比の異なる試料の  $\sigma_t$  分布を Fig. 11 に示す。  $\sigma_t$  は  $e$  が約 0.3 付近より急激に低下し、  $e$  が約 1.0 付近で最小値 ( $\sigma_t$  はほぼ 0) を示す。さらに、  $e$  が増加するとわずかであるが再び大きくなる。

岩種による違いはばらつきが激しいため判定しがたいが、同一間隙比では  $G_s$  の大きい花崗閃緑岩タイプの  $\sigma_t$  が大きな値を示す。

次に、乱さないまさ土の一軸圧縮強度試験は、成形法が難しいため、成形の可能なごく一部の試料に限り二、

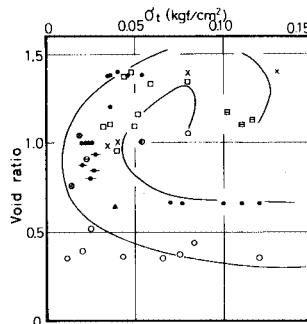


Fig. 11 Tensile strength with weathering degree.

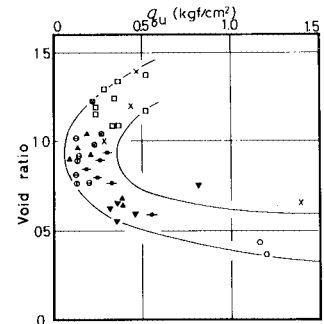


Fig. 12  $q_u$  and weathering degree.

三の報告がみられる。そこで、著者らは釘打ち込み法を応用した一軸圧縮強度試験装置を作製し、現場試験に適用した。

Fig. 12 に  $e-q_u$  の関係を示す。上述の  $e-\sigma_c$  関係同様、間隙比が約 1.0 付近で最小値となる曲線を描く。

全体的にみた  $e-q_u$  と  $e-\sigma_c$  の傾向が類似していることは、岩質のいかんにかかわらず、各風化段階の強度発揮特性が類似していることを物語っている。このことは、まさ土の風化過程や機構を研究する場合、強風化しやすい岩種（たとえば、花崗閃緑岩）について詳細な測定、試験による検討を加えれば、ほぼ全岩質の風化機構を理解することができることを示唆している。

なお、一部の試料には  $e-q_u$  と  $e-\sigma_c$  の傾向が一致しないものがある。これは  $q_u$  が非常に大きな値を示すのに対し、 $\sigma_c$  が小さくなる試料で、いわゆるぜい性度  $q_u/\sigma_c$  が通常 10 前後であるのに対し、約 30 もの値を示すものである。このまさ土は鬼まさ No.13 とよばれるもので、一般的なまさ土のイメージを最も備えた試料である。

(3) 圧縮・強度特性

乱さないまさ土の圧縮特性は即時沈下量が非常に大きい反面、二次圧縮量もかなりあり、砂質土と粘性土の両面の性質を合わせてもつことである。そして、風化度と圧縮性との関係は Fig. 13 の圧縮指数  $C_c$  と  $e$  との関係より明らかのようによい直線性を示す。しかし、前述の  $q_u$ ,  $\sigma_c$ ,  $k$  のように間隙比が約 1.0 での折り返しはみられない。このことは、風化による質的变化以上に間隙量の影響に支配されることを物語っている。

乱さないまさ土のせん断試験は乱さない試料の採取、成形が難しく、試料の不均質性によるばらつきが激しいため再現性が悪い。したがって、既報の研究は採取・成形法に特徴のみられるものが多く、主な手法として、ピットより採取する方法と、ボーリングより採取する方法がある。前者は、手による成形法、釘打ち込み法、凍結法<sup>15)</sup>、

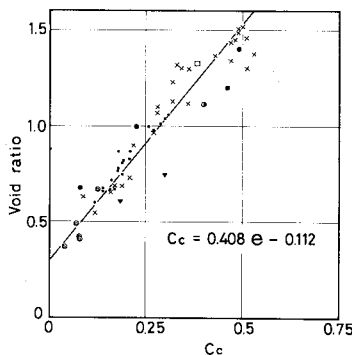


Fig. 13 Increase of compression index with the progress of weathering.

シンウォールサンプラー、後者は、改良型デニソンサンプラー<sup>16)</sup>、トリプルコアチューブ<sup>17)</sup>などを用いた採取法である。しかし、これらの方法は、採取、成形による乱れの評価法が確立していないため優劣付け難いのが現状である。

また、乱さないまさ土のせん断試験は、三軸圧縮試験と一面せん断試験が一般に用いられ、他に単純せん断試験、リングせん断試験、現場一面せん断試験などがみられる。三軸圧縮試験の場合、飽和状態で圧密排水、圧密非排水、不飽和状態で圧密排水試験が実施されている。なお、試料のばらつきが激しいため、多段階式三軸圧縮試験<sup>18)</sup>なども併用されている。一面せん断試験では不飽和状態で定圧せん断、定体積せん断が行われ、さらに、浸水による強度低下に関する実験が行われている。

試料のばらつき、採取時の乱れ、せん断試験法の違い、飽和供試体が得にくいなど数多くの問題があるが、本論では、風化度と強度定数との関係にのみ焦点をあて、 $e$  と  $c$ ,  $\phi$  との関係を図. 14 に求めた。ここに採用した試料の試験方法は、三軸圧縮試験の場合は不飽和圧密排水試験、一面せん断試験の場合は定体積せん断と定圧排水せん断を実施したものである。ただし、乱さないまさ

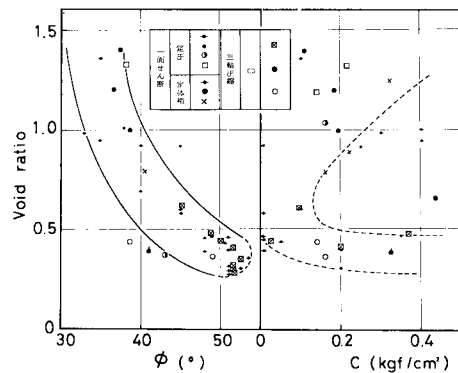


Fig. 14 Distribution of shear strength parameters with weathering process.

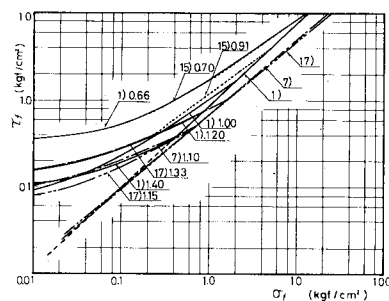


Fig. 15 Failure lines obtained from direct shear test in the decomposed granite soils.

土の場合、通常  $k$  が大きいため定圧、定体積ともに差が少なく、その結果は  $c'$ 、 $\phi'$  に相当すると解釈した。

図より間隙比との関係は、 $\phi$  の場合、分布範囲  $30^\circ \sim 50^\circ$  で、かなりよい相関性を見出すことができるが、 $c$  の場合にはランダムとなる。これは、乱さないまさ土の破壊包絡線が直線ではなく曲線となるため、真の粘着力が得られた場合には  $\sigma_e$ - $e$  曲線と同じ傾向を示すものと考えられる。

そこで、両対数グラフに破壊包絡線を描いたのが Fig. 15 である。主な特徴を以下に記す。破壊包絡線は過圧密領域と正規圧密領域でそれぞれ  $\tau_f = a(\sigma + \sigma_0)^b$ 、 $\tau_f = a\sigma^b$  のべき関数で表わされる曲線を描く。ここに、 $\tau_f$  はせん断強さ、 $\sigma$  は直応力、 $a$ 、 $b$  は定数。岩質が同じ試料では、風化による変質にもかかわらず、正規圧密で、ほぼ同一の包絡線が得られる。また、図中には書き入っていないが、浸水強度低下試験を実施した結果、浸水の影響を強く受けるのは、 $e$  が約 0.8 以上の風化度に達したまさ土である。

(4) 限界動水勾配について

まさ土斜面の安定問題では崩壊の原因を浸透破壊による進行性破壊と判定するケースが非常に多い。

まさ土の浸透破壊に関する研究は模型斜面実験など、乱した試料の人工の盛土に関するものが多く、乱さないまさ土については田中<sup>19)</sup>の水ジェットを用いた現場試験と、西田<sup>20)</sup>のパイピング試験があるだけである。しかし、前者の方法は高圧水による洗掘を行うため侵食と浸透破壊、両方の因子が絡み浸透破壊問題への適用が難しい。本節ではパイピング試験を採用し、破壊時の動水勾配である限界動水勾配  $i_c$  を求めた。

間隙比と  $i_c$  との関係を示す Fig. 16 に示す。図より明らかなように、 $i_c$  の値は約 5 程度のものから 300 近いものまで幅広く分布する。そして、前述の  $e$ - $q_u$ 、 $\sigma_t$  曲線同様、 $e$  が約 1.0 付近で最小となる曲線を描く。

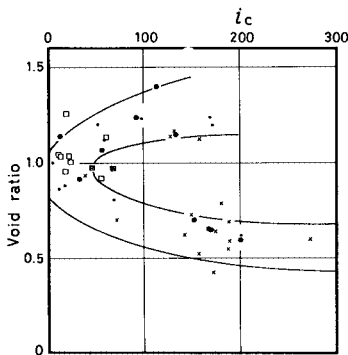


Fig. 16 Variation of critical hydraulic gradient with weathering process.

$i_c$  を斜面問題に適用する場合、均質、一様な斜面内を定常状態で流れる地下水の動水勾配 ( $i < 1$ ) に比較して、図中に示す  $i_c$  の値はあまりにも大きい。動水勾配がこのように大きな値を示すのは、斜面内部に目詰まり層がある場合、地盤下部より地表に向かって水圧が作用する場合などが考えられる。しかし、このような条件下で動水勾配が増大しても、50 以上の値になることは考えにくく、図中  $e$  が 1.0 前後の風化土層以外は浸透圧に対し安定であると考えられる。

7. 乱さないまさ土の分類

乱さないまさ土の工学的分類法には使用目的に応じた 2 つの分類法が考えられる。

1 つは、せん断試験などの供試体の材質を規定する場合で、岩種と風化度の二要素による材料別分類法である。他方、斜面問題などに適用する場合には、調査区域の固有の風化タイプも重要な分類項目となる。これらの点を考慮した 2 つの分類法を以下に記す。

(1) 材料別分類

乱さないまさ土の基本的性質と工学的性質について、風化指標  $e$  をもとに整理した結果上述のとおり、 $e$  と各パラメーターとの間に共通の特徴を見出すことができ

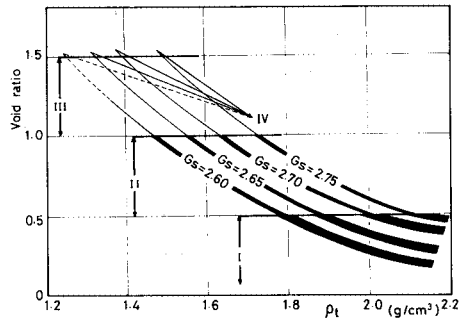


Fig. 17 Classification system for engineering purposes.

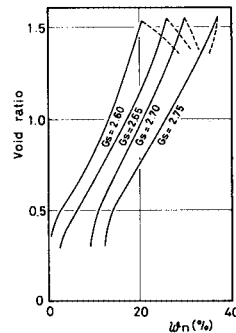


Fig. 18 Distribution of natural water content with weathering process.

る。

その最も共通した特徴は  $e$  が約 1.0 付近を境に、各パラメーターが変化する傾向を示すことである。 $w_n$ , Ig. loss はこの点を境に急激に増加し始め、 $\sigma_t$ ,  $q_u$ ,  $k$ ,  $i_c$  はこの点で最小値 ( $k$  の場合は最大値) を示す馬蹄形の曲線を描く。前者の物性値はこの点より粘土化が進むことを意味し、後者、特に  $\sigma_t$  は  $e < 1$  で鉱物粒界面での分離による細粒化と、 $e > 1$  の粘土化による粘着力の増加を意味している。

ただし、岩種によれば、 $e_{mw}$  が 0.5 程度のももあるため、 $e = 1.0$  での変化は全岩種に共通したのではない。

一方、 $e_{mw}$  が最大となるのは約 1.5 で、どの岩種のもこの値以上になると土構造を保ち得なくなり約 1.2 程度まで圧縮される。

このように、乱さないまさ土は  $e$  が 3 つの地点で変化点をもつため、 $e-\rho_t$  曲線で述べたように  $e_{mw}$  に注目すると大きく 4 つのグループに分類される。

$e$  が 0.5 以下の風化段階のものを I,  $0.5 < e \leq 1.0$  を II,  $1.0 < e \leq 1.5$  を III, 再圧縮して  $1.5 > e$  になったものを IV と分類する。しかし、このままでは、岩質によって同一間隙比での大きな密度差があり、工学的性質の違いを無視せざるを得ない。そこで、岩質の要素を  $G_s$  で表わし、 $e$ ,  $\rho_t$  を用いた分類法を Fig. 17 に示す。図は、Fig. 6 をもとにして、4 つの風化段階と  $G_s$  を組み合わせた材料別風化分類図に書き改めたものである。なお、 $\rho_t$  は含水状態に応じて多少変化するため、図中、 $G_s$  の異なる曲線ごとに含水比分布を求めたのが Fig. 18 である。 $e$  の増加につれ  $w_n$  が増加し、 $G_s$  の大きなまさ土ほど、 $w_n$  が大きくなる特徴を示している。この  $w_n$  の値は雨の日を除く通常での平衡自然含水比と考えられる。

以上、材料別分類は間隙比 0.7  $G_s$  2.65 の試料では、Fig. 17 より、II-2.65 と表示すれば、岩石学的分類なしに簡単な手法で乱さないまさ土を判定することができる。

## (2) 風化タイプの分類

各種まさ土は岩種、地形 (特に傾斜角)、地史、地質条件のほかに、人為的な要素の組合せでいくつかのタイプの風化断面を形成する。これらの風化断面をタイプ別に分類する場合、材料別分類で示した 4 つの風化段階のうち  $e_{mw}$  がどの段階にまで達しているのかにより分類することができる。

Fig. 19 は  $e$  を軸にして質的变化を表わす Ig. loss と鉱物粒界面の強さを表わす  $\sigma_t$  のグラフを 4 つのタイプ ( $T_I$ ,  $T_{II}$ ,  $T_{III}$ ,  $T_{IV}$  と名付ける) について模式的に表わしたものである。各グループごとに特徴、存在場所、成因などを最も特徴の現われる  $e_{mw}$  付近について記す

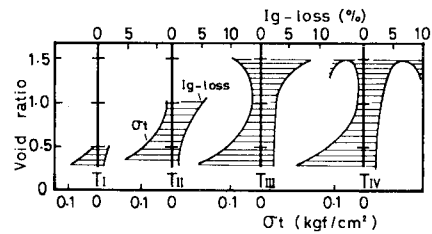


Fig. 19 Classification system for weathering pattern revealed in profiles.

と以下のとおりである。 $T_I$ 型は、 $e_{mw}$  が約 0.5 付近までのもの、粘土分がほとんどなく、鬼まきに代表される。他の岩種では傾斜の急な斜面か、侵食の激しい地点に多い。 $T_{II}$ 型は、 $e_{mw}$  が約 1.0 付近のもの。砂質化し、粒界面での強度を失うため  $\sigma_t$  はなくなるが、粘土化が始まっている。傾斜の緩やかな尾根筋に多いタイプで、まさ土の特徴を最も兼ね備えている。 $T_{III}$ 型は、 $e_{mw}$  が 1.5 にまで達するもの、有色鉱物や斜長石などの粘土化が進み、粘着力が増加する。緩やかな丘陵地形を形成する。 $T_{IV}$ 型は、極端に風化が進み、母岩の組織構造を保ち得なくなり圧縮されたもので、P. Lumb<sup>21)</sup>の指摘する再圧縮層に該当する。粘土化が著しく鉄の酸化物が多くなるため、ラテライトに分類することもできる。

風化タイプによる分類は試料採取地点全体の風化状態を知るうえで重要であり、先述の材料別分類法と重ねて使用すれば、どのような風化層のどの風化段階の試料を用いたのか平易に伝えることができる。

したがって、 $T_{III}$ 型の I-2.70 と表現すれば、 $T_{III}$ タイプの風化層断面でかなり下部の風化層から採取したと理解でき、III-2.70 とすれば表層近くから採取したことを意味している。

次に、分類法と斜面安定問題との関連性を既報の研究と著者らの研究より検討すると、風化タイプに応じた崩壊タイプをみることができる。

$T_I$ 型タイプの斜面は風化度が低いいため強度が強く、断層・弱粘土からなるシーム層などが存在しない限り、風化層内にすべり面が発生することは考えられない。崩壊は本層上部に堆積する表土、崩積土などが接触面を境に滑落する表層崩壊が大部分を占める。したがって、主な研究はサウンディングによりこの境界面の形状、規模について報告したものが多く、特に、愛知県西三河地区の粗粒黒雲母花崗岩 I-2.65 は表層崩壊が多発することで注目を集め、数多くの研究成果<sup>22), 23)</sup>が報告されている。

$T_{II}$ 型タイプ斜面の崩壊は II 風化層の間隙比が 0.8~1.0 で  $q_u$ ,  $\sigma_t$ ,  $i_c$  が最小となり、透水係数が最も大きくなるため、II の風化層上部に堆積土層がのっていると、この位置にすべり面が発生しやすい。なお、II 段階の風



化層から供給された崩積土はやや粘土化しているため、Iよりコンシステンシーが大きくなり、透水性も悪くなる。このような表土が堆積すると上述の地点はみず道、弱面となりすべり面発生位置は確定される。しかし、上部に堆積土層がのっていない場合は単にガリー状の侵食にとどまる。

$T_{II}$  タイプの斜面崩壊の研究結果<sup>4)</sup>は  $T_I$  同様滑動土塊の大部分を表層土が占めるため、 $T_I$  タイプの研究結果と明瞭な差異がみられない。しかし、 $T_I$  と異なり密度が低いためサウンディングでは表層との境界面がみつげにくくなる。

$T_{III}$  型、 $T_{IV}$  型タイプの崩壊はともに上述の  $T_{II}$  型を堆積土層が覆う場合に類似し、II、IIIの境界である  $e=1.0$  前後の弱層にすべり面が発生する。この種の崩壊は発生頻度が少ないが、すべり面が深い崩壊規模の大きいものが多い。III、IV段階の風化層から供給された崩積土層は粘土化が著しく、透水性が低いため、雨水の浸透を妨げる役目をなす。このような表層で覆われた斜面では、雨水が木の根、土中のクラック等から浸透し、II、IIIの境界層が通常の降雨ではみず道として、豪雨時には被圧帯水層として役割を果たすものと考えられる。

$T_{III}$ 、 $T_{IV}$  タイプの斜面崩壊に関する研究は、上述の西三河地区で岩質の違いにより  $T_I$  と比較して崩壊発生件数が少ないケースとして報告されている<sup>23)</sup>。しかし、同じ  $T_{III}$  タイプでも島根県三隅町では崩壊が多発しており、一概に発生件数が少ないとは断定できない<sup>24), 25)</sup>。なお、 $T_{III}$  型、 $T_{IV}$  型タイプ（特に  $T_{IV}$  型）がある程度の勾配をもった一般斜面にあまりみられないのはII、IIIの境界層の強度・透水特性から考え、III、IV風化層が不安定となり滑落した結果と考えられる。

## 8. 結 論

乱さないまさ土の基本的性質と工学的性質について、風化指標  $e$  をもとに整理した結果、各パラメーターは以下の特徴をもつことが明らかとなった。

(1)  $e-\rho_c$  曲線を描き、各試料ごとに測定を実施した場所での最大風化間隙比  $e_{mv}$  に注目すると、大きく4つのグループに分類される。また、おおまかな岩質の違いは土粒子比重より把握することができる。

(2) 強熱減量、流動限界は間隙比が1.0以上で急増するため風化による細粒、粘土化の程度を知るうえで有効なパラメーターであるが、全風化過程を表現できない欠点をもっている。

(3) まさ土は風化につれ土粒子の材質が変化する。したがって、透水係数は締固め土のように間隙比の増加に比例して増加するのではなく、砂質土の状態に風化した約1.0前後で最大となる曲線を描く。

(4) 引張強度特性は間隙比が約1.0付近で最小となる曲線を描き、1.0以下で粒界面分離、1.0以上で粘土化の影響を反映した結果が得られる。一方、一軸圧縮強度も間隙比-引張強度曲線と同じ傾向を示す。

(5) せん断強度特性は乱さないまさ土の高精度な採取、成形法が確立されていないうえ、試料のばらつき、飽和・不飽和状態、排水条件などの試験法が確立されていないなど、数多くの問題点を抱えている。間隙比と  $c$ 、 $\phi$  との関係は  $\phi$  の場合かなりよい相関性がみられるが、 $c$  の場合にはランダムとなる。

(6) 限界動水勾配は引張、一軸圧縮強度などの傾向と同様  $e$  が約1.0前後で最小となる曲線を描く。斜面内の流れで動水勾配が50以上になることは考えにくく、 $e$  が1.0前後の風化層以外は浸透圧に対して安定である。

これらパラメーターの特徴を整理すると、乱さないまさ土の工学的分類法には使用目的に応じた2つの分類法が考えられる。1つは供試体の材質を規定する場合で、岩種と風化度の二要素による材料別分類法。他の1つは斜面問題などに適用する場合で、調査区域固有の風化タイプ別分類法である。

材料別分類法は上述の  $e-\rho_c$  関係での4つの風化段階と岩質の要素  $G_0$  を組み合わせたものである。この分類法を用いることで、岩石学的分類や複雑な風化度判定なしに簡単な手法で乱さないまさ土を判定することができる。

風化タイプの分類法は材料別分類で示した4つの風化段階で  $e_{mv}$  がどの程度にまで達しているのかにより分類するものである。この分類法はまた斜面の崩壊タイプとも関連している可能性があることを示した。

謝 辞：本研究を行うにあたり、日頃風化土の問題の重要性を指摘しておられ、数々のご教示をいただいた故京都大学名誉教授 松尾新一郎先生に感謝するとともに、有益な文献ならびに資料の便宜をはかっていただいた神戸大学名誉教授 田中 茂先生、神戸大学 沖村孝先生、筑波大学 松倉公憲先生に厚く感謝する。また、本研究は文部省自然災害特別研究 57020009（代表：芥川真知）の補助を得たものである。

## 参 考 文 献

- 1) 西田一彦・青山千彰：花コウ岩風化層の間ゲキ径分布と水分吸着特性について、応用地質、20、pp.3~12、1979。
- 2) 西田一彦・青山千彰：乱さない不飽和まさ土のせん断強度特性、土と基礎、29-6 (281)、pp.35~40、1981。
- 3) Onodera, T., Oda M. and Minami, K. : Shear strength of undisturbed sample of decomposed granite soil, Soils

- and Foundations, Vol.16, No.1, 1976.
- 4) 沖村 孝・田中 茂：一試験における風化花こう岩斜面の土層構造と崩壊発生深さに関する研究, 新砂防, 116, pp.7~16, 1980.
  - 5) 松倉公憲・前門 晃・八田珠郎・谷津栄寿：稲田型花こう岩の風化による諸性質の変化, 地形, 第4巻, 1号, pp.65~80, 1983.
  - 6) 網干寿夫・門田博知・吉国 洋：昭和42年7月豪雨による呉市災害の調査速報—土砂災害の実態研究, 文部省災害科学研究報告, pp.75~158, 1967.
  - 7) 金子誠二・末岡 徹・安 伸二：熱帯及び温帯地方における花こう岩質風化残積土の土質科学的検討, 第17回土質工学会講演集, pp.77~80, 1982.
  - 8) 本州四国連絡橋公団：尾道—今治地区海峡部地質調査報告書(その11), 1970.
  - 9) Matsuo, S., Nishida, K. and Fukuda, M. : Consistency of decomposed granite soils and its relation to engineering properties, Soils and Foundations, Vol.10, No.4, pp.1~9, 1970.
  - 10) 網干寿夫・内田博知・吉国 洋・中ノ堂祐文：マサ土斜面崩壊の予測と危険ヶ所の類型化に関する研究, 研究代表者 松浦 誠, 文部省科学研究費 自然災害特別成果, (昭和51年中間報告) pp.37~55, 1976.
  - 11) 青山千彰・遠山茂行・荒木繁幸・西田一彦：乱さないマサ土の透水特性, 第13回土質工学会講演集, pp.157~160, 1978.
  - 12) 木宮一邦：花こう岩類の物理風化指標としての引張強度, 地質学雑誌, 第81巻, 11号, pp.683~696, 1975.
  - 13) 松尾新一郎・沢 孝平：マサ土の破壊機構について, 第23回土木学会年次学術講演概要, pp.169~170, 1968.
  - 14) 西田一彦・青山千彰・川井隆司：まさ土の引張試験について, 土木学会関西支部講演概要集, III 91-III 92, 1980.
  - 15) 紫田 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回土質工学会講演集, pp.465~468, 1982.
  - 16) 復建調査設計(株)：早瀬大橋, 地質調査報告書, pp.5~7, 1977.
  - 17) Phillipson, H. B. and Chipp, P. N. : Air foam sampling of residual soils in Hong Kong, Proc. of the Specialty Conference on Engineering and Construction in Tropical and Residual Soils, Honolulu, pp.339~356, 1982.
  - 18) David, Y. F. and Fredlund, D. G. : Increase in strength due to suction for two Hong Kong Soils, Proc. of the Specialty Conference on Engineering and Construction in Tropical and Residual Soils, Honolulu, pp.263~295, 1982.
  - 19) 田中 茂：斜面の安定, 土質工学会マサ土研究委員会編, マサ土の工学的性質とその取扱い指針, pp.106~112, 1970.
  - 20) 西田一彦・青山千彰：かくく乱まさ土のバイピング現象, 土質工学会論文報告集, Vol.21, No.2, 1981.
  - 21) Lumb, P. : The Properties of decomposed granite, Geotechnique, Vol.12, No.2, pp.226~243, 1962.
  - 22) 植下 協・桑山 忠：47.7豪雨による西三河地方の山地崩壊の実態調査, 昭和47年7月豪雨災害の調査と防災研究, 文部省科学研究費, 自然災害特別研究成果, pp.104~107, 1973.
  - 23) 自然災害科学総合研究班(代表：田中 茂)：山くずれと地質地形構造の関連性に関する研究, 文部省科学研究費, 自然災害特別研究成果, No. A-51-4, pp.102~118, 1977.
  - 24) 三浦 清：島根県加茂町付近の花こう岩類とその崩壊についてII, 岩礦, 57巻, 1号, pp.11~24, 1967.
  - 25) 西田一彦・青山千彰・松谷泰生：島根県三隅町付近のまさ土斜面崩壊について, 第19回土質工学会講演集, pp.1265~1266, 1984.

(1984.5.31・受付)