

# 風化度に着目したまさ土の圧縮・せん断特性

村田 秀一\*・安福 規之\*・岡藤 博国\*\*

## Compressive and Shear Characteristics of Decomposed Granite Soils with Particular Reference to the Degrees of Weathering

Hidekazu MURATA, Noriyuki YASUFUKU and Hirokuni OKAFUJI

### Abstract

The engineering properties of the decomposed granite soil are not the same as being considerably varied owing to the place of deposit and depth.

This paper describes, after investigating the index properties which estimate the degrees of weathering for various kinds of decomposed granite soils, the compressive and shear strength characteristics of these soils with particular reference to the degrees of weathering. The results obtained were summarized as follows:

- 1) It is desirable to use the ignition loss or absorption for the evaluation of the degrees of weathering.
- 2) Compressive parameters  $\lambda$  and  $\kappa$  correspond to the degrees of weathering, and the yielding stress  $p_y$  almost agrees with the stress at which the particule crushing is stimulated.
- 3) The irreversible increment void ratio due to the isotropic consolidation is equivalent to the increment surface area, regardless of any kinds of samples and the water content.
- 4) There is a unique relationship between the stress ratio at failure  $(q/p)_f$  and compressive parameter  $\kappa/\lambda$ , as can be seen in the case of clay.

### 1. まえがき

西日本に広く分布するまさ土は、鉱物組成や風化の程度が採取場所や深さ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よく知られている。近年、社会情勢を反映し、道路・空港・宅地造成などの建設工事が、まさ土地帯へと広がるにつれ、まさ土を基礎地盤あるいは、建設材料として取扱う場合が増え、まさ土の工学的性質の詳細な解明が重要となってきた。

まさ土に関する研究は、数多くなされ、興味ある研究成果が示されているものの、まさ土の特殊性ゆえに工学的性質の未解明な問題は多く残されている。特に、まさ土の風化度に着目して、工学的性質と風化度との関連性を明らかにすることは、工学的に重要であり、かつ基本的な問題であるにもかかわらず、その研究例は少ないように思われる。

そこで本研究では、各地から採取した風化度の異なるまさ土を用いて、まず風化度を表わす指標について検討した。次に、まさ土の圧縮特性を広範な応力域において調べ、圧縮特性と風化度および破砕特性について論じた。さらに、三軸圧縮試験結果をもとに、まさ土のせん断特性と風化度および圧縮特性との相関性について考察を加えたものである。

### 2. 試料および実験方法

#### 2.1 試料の性質および実験条件

試料は、全国各地より集めた風化度および母岩の性質の異なるまさ土であり、各試料の採取地および基本的性質は、Table 1 に示す通りである。実験はすべて 2.0 mm ふるいでふるった試料を用いて行なった。

今回実施した試験は、(1)比表面積試験、(2)吸水率試験、(3)鉱物組成試験、(4)強熱減量試験、(5)等方圧縮試験、(6)側圧一定の三軸圧縮排水せん断試験である。(1)、(2)は、土木学会規準 JISR 5201 および JIS A 1109 に、(3)、(4)については、土質工学会規準に準じてそれぞれ

\*建設工学科

\*\*大学院建設工学専攻

試験を行なった<sup>1)</sup> (5), (6)については, 次節で述べる.

Table 1 Physical Properties of samples

No.	Sample	Specific gravity	Ignition loss (%)	Absorption (%)	Specific surface (m <sup>2</sup> /g)	Finer than 74 μm (%)	Uniformity coefficient
1	Ube-A	2.64	8.31	6.98	407.4	8.92	10.8
2	Ube-B	2.62	10.13	9.04	424.3	11.58	10.3
3	Ube-C	2.62	11.19	—	456.3	12.34	11.1
4	Ube-D	2.62	5.96	5.91	299.7	6.16	6.4
5	Hiroshima-A	2.67	2.34	2.62	132.9	4.52	5.6
6	Hiroshima-B	2.67	2.78	3.40	206.3	6.08	8.1
7	Hiroshima-C	2.61	7.22	5.56	384.5	9.45	12.4
8	Oshima-A	2.63	3.85	4.67	289.5	6.08	7.7
9	Oshima-B	2.69	6.26	6.59	225.1	4.25	5.1
10	Ryoke-A	2.70	4.62	3.90	101.7	3.94	6.9
11	Takamatsu-A	2.65	6.99	—	380.1	9.01	8.9
12	Tohoku-A	2.70	6.95	4.72	834.9	13.38	13.3

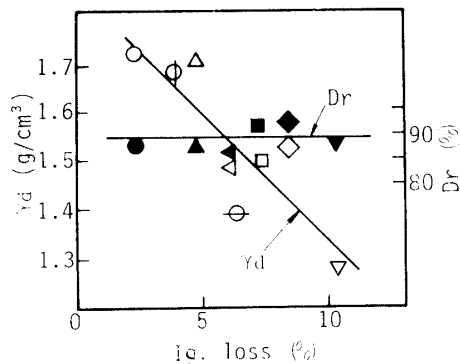


Fig. 1 Relation between dry density  $\gamma_d$ , relative density  $D_r$ , and ignition loss.

## 2.2 実験方法

種々の締固めまき土の圧縮・せん断特性を風化度に着目して比較検討する場合, 供試体作成方法を統一する必要がある. そこで本研究では, 気乾燥試料を同一の締固めエネルギーで締固めることによって作成した供試体を実験に供することにした. Fig. 1 は, 同一の締固めエネルギーで Table 1 に示した各々のまき土を締固めた時の相対密度  $D_r$ , および乾燥密度  $\gamma_d$  と強熱減量  $I_g$  の関係を示したものである. この図より, 締固めエネルギーを統一して供試体を作成する場合,  $\gamma_d$  の値は強熱減量の大きい試料ほど小さくなる傾向にあるが, 相対密度は, 試料に関係なくほぼ等しい値を示していることがわかる.

等方圧縮試験は, 拘束圧 0.1~170 kgf/cm<sup>2</sup> の範囲で, 気乾・飽和供試体について行なった. 供試体寸法は, 直径 5 cm, 高さ 12.5 cm であり, Fig. 1 からわかるように相対密度は, すべての供試体で約 90% であっ

た. 圧縮方法としては, 各圧力段階で体積変化が 0.1 cc/hr 以下になったら次の段階に進むという方法を取っている. また, 飽和供試体の作成は炭酸ガスを供試体下部より注入させた後, 脱気水を浸透させ所定の背圧を負荷することによって行なった. せん断試験は, 風化度の異なる代表的な試料に対して, 飽和供試体を用いて行なった. せん断時の拘束圧は, 主に 0.5 kgf/cm<sup>2</sup> と 4.0 kgf/cm<sup>2</sup> であり, 等方圧縮した後軸ひずみ速度 0.2%/min で排水せん断した.

## 3. 実験結果および考察

### 3.1 風化度を表わす指標について

まき土の風化過程においては, ぜい弱な長石, 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言われている<sup>2)</sup>. このような特性を示すまき土の風化の程度を評価するための指標として, ①長石比重, ②みかけ比重, ③比表面積, ④強熱減量, ⑤吸水率および, ⑥  $pF$  値による方法が提案されている<sup>3)</sup>. また風化試料の非晶質物質を定量し, それを風化度と関係づけている例も最近見られる<sup>4)</sup>. いずれにしても使用する立場で考えるなら, 風化度を表わす指標としては, 安価な試験装置で極力簡単な手法で求まるものが望ましいと思われる. そこで本研究では, 上述した風化度を表わす指標の中から比表面積, 結晶水や吸着水の存在量を表わす強熱減量, および土粒子空隙の大小を示すと思われる吸水率を風化度を判定する指標として選び, 以後各指標相互の相関性, 各指標と力学特性との関連性等について検討を加えた.

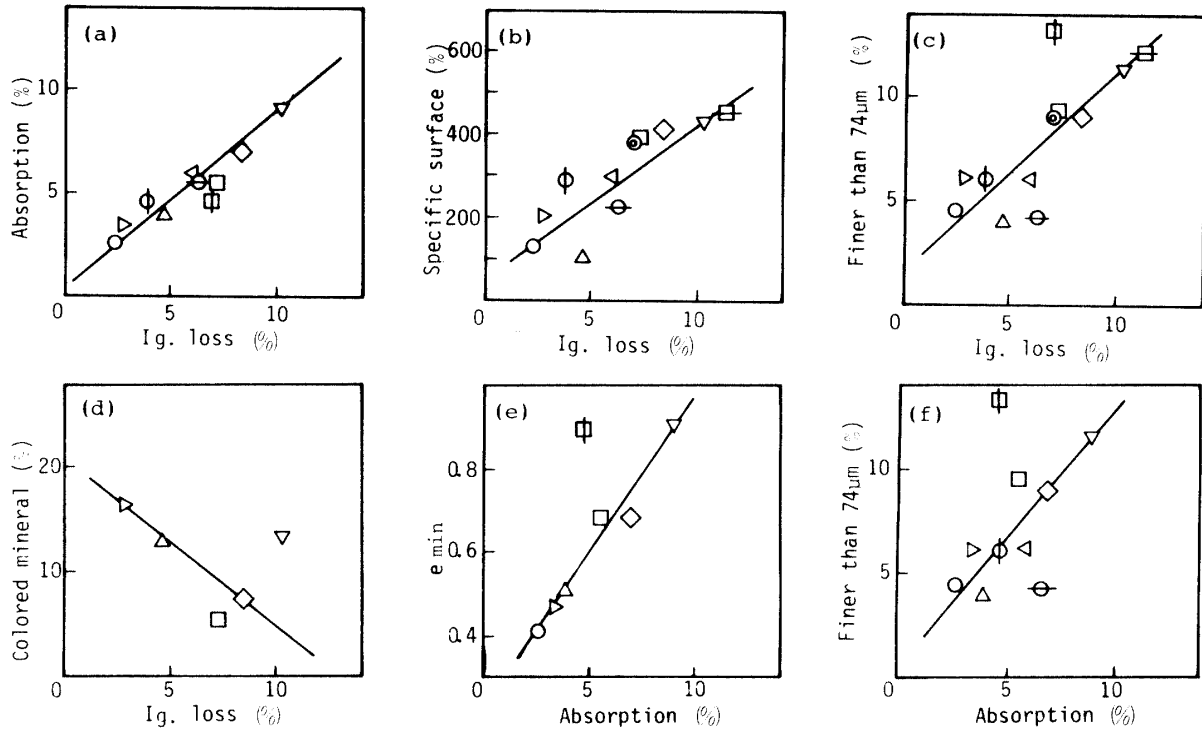


Fig. 2 Relation between absorption, ignition loss and other parameters.

Fig. 2(a)(b)(c)には、強熱減量と吸水率、強熱減量と比表面積、強熱減量と74 $\mu$ m以下の細粒分含有率の関係をそれぞれ示した。これらの図より、多少データのばらつきはあるものの、強熱減量の増加と共に、他の指標も増加するといったユニークな関係が存在することがわかる。特に、強熱減量と吸水率の間には、よい相関が見られ、風化の進行（強熱減量の増大）につれて、まさ土の保水性の増大を証明している。また(c)図から風化の進行と土粒子の微細化の関係が一義的であることもわかる。Fig. 2(d)は、有色鉱物含有量と強熱減量の関係を示しているが、強熱減量の増加に伴い有色鉱物含有量が減少する傾向にある。これは、長石・雲母といったまさ土中の主要な有色鉱物が、風化の進行に伴い粘土化（2次鉱物に変化する）するためだと考えれば、うまく説明がつく。Fig. 2(e)(f)には、吸水率と最小間隙比、吸水率と74 $\mu$ m以下の細粒分含有率の関係をそれぞれ示したが、Fig. 2(a)(b)(c)同様、各指標相互間には、吸水率が増加すれば、他の指標も増加するといったよい相関が見られる。

まさ土の風化の進行は、土粒子の微細化および保水性の増大を促進すると考えるのが一般的であるから、Fig. 2の結果に基づけば、風化度の判定方法として、比表面積、吸水率、強熱減量を用いるのは妥当であると思われる。以下、実験的簡便さからまさ土の風化度

を表わす指標として強熱減量および吸水率を考え、それらと圧縮特性およびせん断特性との関連性について実験的検討を行なった。

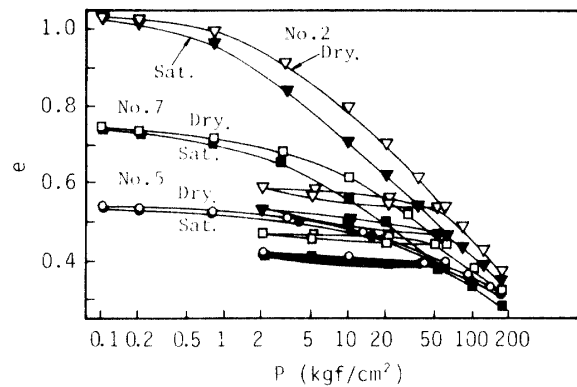


Fig. 3  $e \sim \ln p$  curves of three typical samples.

### 3.2 圧縮特性と風化度および破碎特性

Fig. 3は、風化度の異なる代表的な3試料の飽和および気乾供試体の $e \sim \ln p$ 曲線を示している。ここで図中の試料番号は、Table 1の試料番号と対応しており、No. 5は新鮮なもの（吸水率 $A_w = 2.62\%$ 、強熱減量 $I_g = 2.32\%$ ）、No. 7は風化がある程度進んだもの（ $A_w = 5.56\%$ 、 $I_g = 7.22\%$ ）、および、No. 2はか

なり風化が進んだもの ( $A_w = 9.04\%$ ,  $I_g = 10.13\%$ ), である. この図より, 風化の進んだ試料ほど, 相対的に圧縮性は, 大きいことがわかる. また, 新鮮な試料では, 飽和および気乾試料で  $e \sim \ln p$  曲線に違いは見られないが, No. 2 のような風化の進んだ試料では, 飽和試料の方が乾燥試料に比べ, 特に低い応力域においてかなり圧縮性が高く, 水分の影響が顕著に表わることがわかる. この理由のひとつとして, 風化の進行に伴う土粒子のぜい弱化が上げられる. また3試料の  $e \sim \ln p$  曲線は, 応力レベルを広げれば, 粘性土と同様<sup>9)</sup> ある一定の間隙比に集まっていく傾向にあり, 加えて次式の関係が成り立つと考えられる. まず正規圧密領域においては,

$$e - e_o = -\lambda \ln(p/p_o) \quad \dots\dots(1)$$

過圧密領域では,

$$e - e_o = -\kappa \ln(p/p_o) \quad \dots\dots(2)$$

ここで,  $\lambda, \kappa$  は, それぞれ, 正規圧密曲線, 膨張曲線の勾配であり, 圧縮指数  $C_c$ , 膨張指数  $C_s$  の 0.435 倍に対応する. ( $e_o, p_o$ ) は正規圧密曲線上の与えられた点である. なお, 図中で処女圧縮曲線上にありかつ圧密降伏応力  $p_y$  までの応力域は, 粘性土で言う過圧密の状態に対応すると現段階では考えている. 後述するように正規圧密曲線上の応力域は, 粒子破碎領域であり, 膨張曲線上のそれは, 非粒子破碎領域と考えられる.

Fig. 4 (a), (b) は, それぞれ, 圧密降伏応力  $p_y$  と強熱減量, 圧密降伏応力  $p_y$  と吸水率の関係を示している. 強熱減量または, 吸水率が大きくなるにつれて,  $p_y$  値が低下する様子がよくわかる. また飽和試料の圧密降伏応力が気乾時のそれに比べて, 低いのは, 浸水により, 土粒子, 特に長石, 雲母といった鉱物がぜい

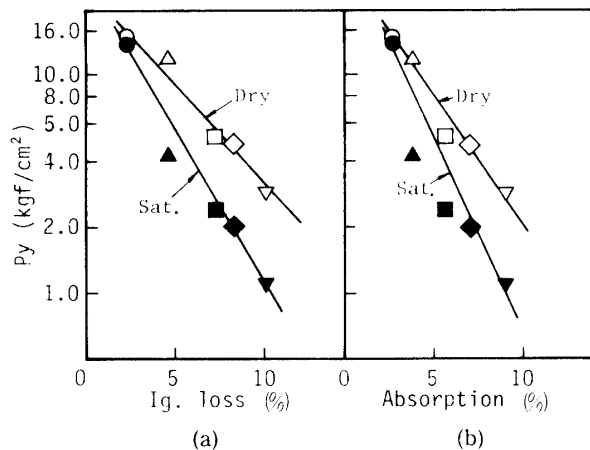


Fig. 4 Relation between yielding stress  $p_y$  and (a) ignition loss or (b) absorption.

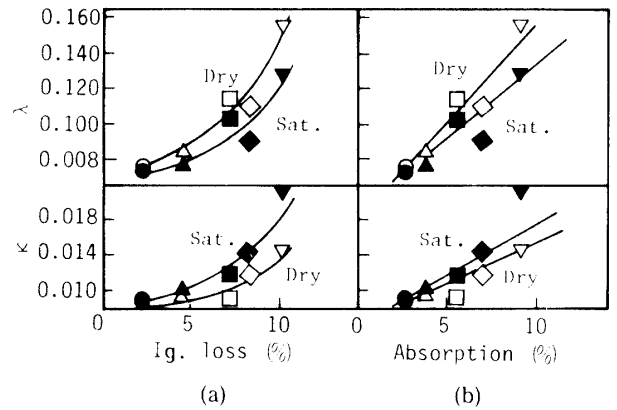


Fig. 5 Relation between parameters  $\lambda, \kappa$  and (a) ignition loss or (b) absorption.

弱化するためだと考えられる.

Fig. 5 (a), (b) は, 正規圧密曲線の勾配  $\lambda$  および膨張曲線の勾配  $\kappa$  と, 強熱減量の関係, ならびに吸水率との関係をそれぞれ示している.  $\lambda, \kappa$  の値は, 強熱減量, 吸水率が増加するに伴って, 大きくなる傾向を示す. また試料状態に着目して,  $\lambda, \kappa$  の値を比較すると,  $\lambda$  の値は, 気乾試料の方が大きく,  $\kappa$  の値は, 逆に飽和試料の方が大きいということがわかる. このひとつの理由として, 粒子破碎が密接に関係していると思われる. このような特性に関して今後さらに検討が必要である. (3), (4)式は, 図 4 (b) の吸水率  $A_w$  と  $\lambda$  および  $\kappa$  の関係を直線近似することによって求めたものである.

$$\left. \begin{array}{l} \text{気乾} \quad \lambda = 0.011 A_w + 0.046 \\ \text{飽和} \quad \lambda = 0.008 A_w + 0.050 \end{array} \right\} \quad (3)$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{気乾} \quad \kappa = 0.0009 A_w + 0.0061 \\ \text{飽和} \quad \kappa = 0.0012 A_w + 0.0059 \end{array} \right\} \quad (4)$$

このように, 実験結果に基づいて式化をしておけば, 吸水率がわかれば, およその  $\lambda, \kappa$  の値を知ることが

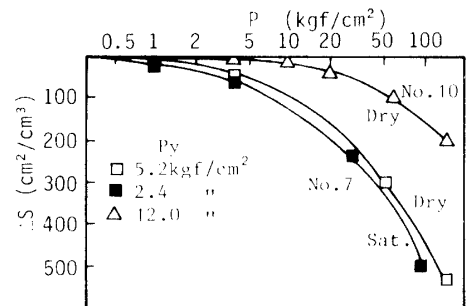


Fig. 6 Increment of surface  $\Delta S$  during isotropic consolidation.

できるという利点がある.

次に, 面積増加量  $\Delta S$  ( $\text{cm}^2/\text{cm}^3$ ) と圧密圧力  $p$  との関係を生度度の異なる 2 試料に対して調べたのが

Fig. 6 である. ここで, 表面積増加量  $\Delta S$  は, 粒子破碎を数量化する尺度であり, その測定方法については, 三浦らが提案した方法を用いた<sup>7)</sup> 図中には, Fig. 3, Fig. 4 で求めた  $p_v$  値を示しているが, この値と表面積が顕著に増加し始める応力とがよい対応を示している. またこの曲線の形状は,  $e \sim \ln p$  曲線の形状にうまく対応し,  $e \sim \ln p$  曲線の過圧密領域では, 破碎はそれほど進行しないが, 正規圧密領域では破碎が急速に進行することを示すものである. このような特性は, 豊浦砂, 秋穂砂, 花崗岩礫においても存在することを実験的に調べている<sup>8)</sup> さらに, 風化の進んだ試料ほど同じ拘束圧で比較した場合, 表面積増加量が大いということも明らかである.

Fig. 7 は, Fig. 3 および Fig. 6 を用いて描いたもので, 間隙比変化  $\Delta e$  と表面積増加量  $\Delta S$  (粒子破碎量と考えてよい) の関係を示したものである. この図は, 試料や含水状態にかかわらず, 表面積増分  $\Delta S$  間隙比変化  $\Delta e$  の間には一義的な関係が存在することを示しており大変興味深い. Fig. 6 と Fig. 7 から, 特に不可逆的な間隙比変化  $\Delta e$  は, 表面積増分すなわち粒子破

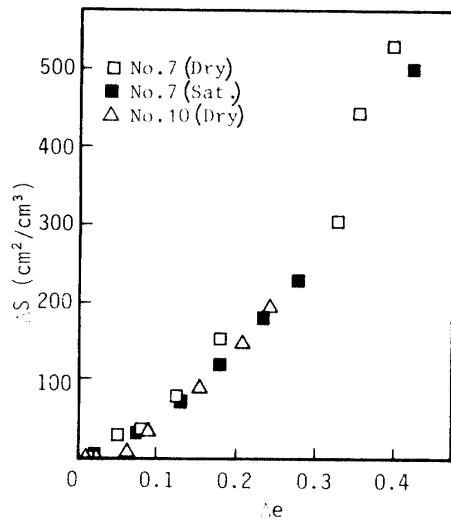


Fig. 7 Plots of increment in surface area  $\Delta S$  for increment of void ratio  $\Delta e$ .

碎によって規定されると考えてよさそうである.

### 3.3 せん断特性と風化度および圧縮特性との相関性

Fig. 8 (a), (b) は, 拘束圧 0.5 および 4.0 kgf/cm<sup>2</sup> の下での圧密排水試験結果を, 破壊時 (軸差応力最大時) の応力比  $(q/p)_f$  と強熱減量,  $(q/p)_f$  と吸水率の関係でそれぞれ整理し示したものである. なお, 図中には, 飽和供試体の結果のみを示している. また, Fig. 9 (a), (b) は, それぞれ破壊時のダイレイタンス指数  $(dv/d\varepsilon_1)_f$

と強熱減量および  $(dv/d\varepsilon_1)_f$  と吸水率の関係を示している. Fig. 8 より,  $(q/p)_f$  値は, 同じ拘束圧下でせん断した場合を考えれば, 強熱減量または吸水率が増加するにつれて低下する傾向にあり, 圧縮特性同様せん断特性, すなわち  $(q/p)_f$  値にも, 強熱減量依存性, 吸水率依存性が存在するものと考えられる. このような結果は, Fig. 9 から得られており,  $(dv/d\varepsilon_1)_f$  の値は, 風化の進行とともに, ある値に収束する傾向にあるが, 全体的に見れば, 風化の進んだ試料ほど収縮の傾向が大きく, 強熱減量および吸水率とよ

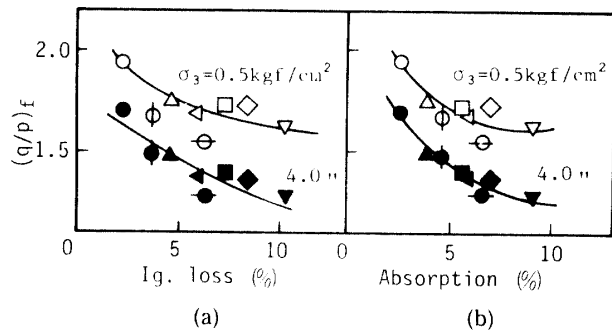


Fig. 8 Relation between stress ratio  $(q/p)_f$  at failure and (a) ignition loss or (b) absorption.

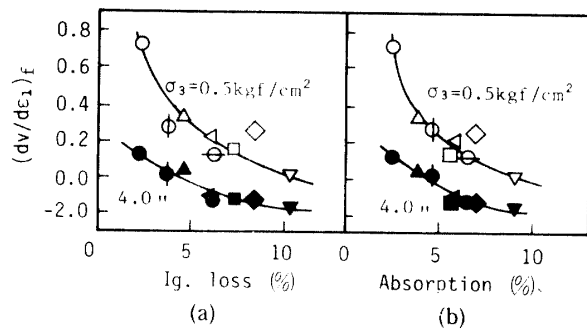


Fig. 9 Relation between dilatancy rate at failure and (a) ignition loss or (b) absorption.

い相関を示していることがわかる.

Fig. 10 は, 拘束圧 4.0 kgf/cm<sup>2</sup> でせん断を行なって得られた,  $(q/p)_f$  値と圧縮定数の比  $(\kappa/\lambda)$  の関係を示したものである. この図は, まさ土の圧縮特性とせん断特性との関連性を調べたものであるが,  $(q/p)_f$  値と  $\kappa/\lambda$  との間にはデータのばらつきはあるものの  $(\kappa/\lambda)$  値が大きくなると  $(q/p)_f$  値が低下するといった相関性が見られる. 軽部は粘性土における限界状態での応力比  $(q/p)_{cs}$  と  $(\kappa/\lambda)$  の値を関係づける式として次式を提案している<sup>9)</sup>

$$M = 1.75(1 - \kappa/\lambda) \quad (5)$$

ここに  $M$  は, 限界状態での応力比  $(q/p)_{cs}$  である. 図中には, 比較のため(5)式の関係も示した. このデー

タから判断する限り、(5)式は  $\kappa/\lambda$  に対する応力比  $(q/p)_{cs}$  の上限値を示しているように思われる。なお、ここで示した  $(q/p)_f$  値は、すべて拘束圧  $4.0 \text{ kgf/cm}^2$  でせん断した時の結果であるため、必ずしも限界状態における応力比でないことに注意をする必要がある。特に No.5 の試料は、圧密降伏応力が約  $15 \text{ kgf/cm}^2$  であるため、実際の  $(q/p)_{cs}$  値より大きな値をプロットしているものと思われる。いずれにしても粒状土の場合、破壊時の応力比  $(q/p)_f$  が拘束圧依存性を示すことから  $(q/p)_{cs}$  をどのようにして決定するかは大きな問題であり、今後の検討課題である。

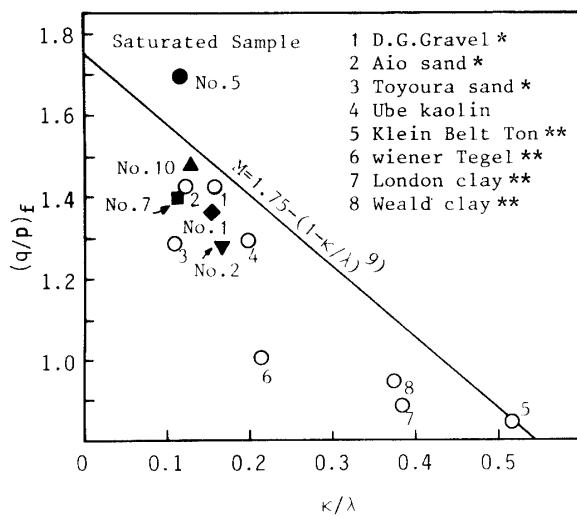


Fig. 10 Plots of parameter  $(q/p)_f$  versus parameter  $\kappa/\lambda$ . (\*: after reference 8), \*\*: after reference 6)

#### 4. まとめ

まさ土の物理的・化学的性質および圧縮・せん断特性を、風化度に着目して検討し、得られた結果を要約すると以下のものである。

- 1) 今回、まさ土の風化度を表わす指標として検討した比表面積、強熱減量、吸水率は互いにより相関関係があることが分った。
- 2) まさ土の風化が保水性の増大、土粒子の微細化と対応すると考えれば、まさ土の風化度を表わす指標として、比表面積、強熱減量、吸水率を用いることは妥当であり、実験方法の容易さを考慮すると、強熱減量と吸水率が最適である。
- 3) 圧縮定数  $\lambda$ ,  $\kappa$  の値は、風化の進んだものほど高い値を示し、また水の影響を受け易くなることが分った。
- 4) まさ土の圧密降伏応力は、粒子破碎が顕著になる

応力とよい対応を示し、圧縮特性と粒子破碎特性とは密接に関係していることが明らかになった。

5) 圧縮による試料の不可逆的な間隙比変化量と表面積増加量(粒子破碎)との間には、試料の種類や含水状態に関係なく、ユニークな関係が存在することが示された。

6) 風化の進行に伴い、破壊時の応力比は減少し、体積変化は収縮の傾向を示す。また、破壊時の応力比と圧縮定数の間にユニークな関係が存在することが明らかになった。

#### 謝辞

本研究の試料の採取で協力を受けた復建調査設計(株) 福田直三博士、および実験に協力を受けた当時卒論生 岡村政治君に深謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) 土質工学会編：土質試験法，第7編，第3章，669
- 2) 松尾新一郎：まさ土の特性と問題点，土と基礎，**23**，[2]，1～8 (1975)
- 3) 土質工学会：風化花崗岩とまさ土の工学的性質とその応用，土質基礎工学ライブラリー**16**，175～183 (1980)
- 4) 高橋悟，田中弥寿男：まさ土の風化とその判定法について，地盤と設計，**1**，[1]，1～8 (1983)
- 5) 西田一彦，佐々木清一，久保井利達：まさ土の非晶質とその特性について，土質工学会論文報告集，**24**[2]，180～190 (1984)
- 6) Schofield, A & Wroth, P: Critical State Soil Mechanics. McGraw-Hill (1968).
- 7) 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.260，109～118 (1977)
- 8) 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～，土質工学研究発表会，341～342 (1985)
- 9) 軽部大蔵：規格以外の三軸圧縮試験法とその問題点，第20回土質工学シンポジウム，昭和50年度発表論文集，45～60 (1975)。
- 10) 三浦哲彦，村田秀一，安福規之，赤司六哉：粗粒材の材料定数と応力ひずみ特性，土と基礎，**33**，[6]，13～18 (1985)

(昭和60年4月15日受理)