

# 低圧下におけるまさ土の力学特性

村田 秀一\*・安福 規之\*・近藤 保徳\*\*

## Mechanical Properties of Decomposed Granite Soil under Low Pressures

Hidekazu MURATA, Noriyuki YASUFUKU and Yasunori KONDOH

### Abstract

Slopes of sandy soil such as decomposed granite soil are susceptible to be suffered from damages when they are inundated by rainfalls. One of causes of such shallow slips is attributed to the decreasing of shear strength of the soil due to submergence. Another noteworthy characteristic of this soil is that the particles are easily crushed under a relatively low stress.

In order to discuss the shallow slips of decomposed granite soil, it is necessary to investigate the change in shear characteristics owing to the variation of the water content at low normal stresses. The commonest strength parameters in use for the stability analyses of the slope are generally obtained from the test at higher normal stresses than the actual stress which applies to the slope.

This paper shows the effect of water content on the shear strength characteristics of decomposed granite soil at a very low normal stress in detail on the basis of the direct shear test result, and its comparison with the results of triaxial compression test. As the results of this experiment, we found the unique relationship between the shear strength and the degree of saturation at a low normal stress.

### 1. まえがき

砂質土の自然斜面および、盛土斜面は一般に、不飽和の状態安定を保っているが、降雨により浸水を受けると、しばしば表層すべりなどのり面崩壊を起こす。その主な原因としては、土層が不飽和の状態から飽和状態に達する過程で、そのせん断強度が低下することが考えられる。

一般にまさ土斜面の表層崩壊の層厚は、数10cmから数m位までのことが多く、この様な斜面の安定問題を考えるには、数10gf/cm<sup>2</sup>といった低圧下での含水比変動に伴うせん断特性を知ることが必要となる。しかしながら、実際の安定解析に用いられる強度定数は、通常斜面に作用する拘束圧よりも高い拘束圧下での強度特性から得られたものが多い。そこで本研究は、低圧下(0.03~0.1kgf/cm<sup>2</sup>)におけるまさ土の含水比変動に伴う力学特性を改良型の一面せん断試験を用いて調べ、同じく低圧下において実施された三軸圧縮試験結果<sup>1)</sup>とも対比しながら考察すると共に、通常の応力域(0.5~6.0kgf/cm<sup>2</sup>)における特性と比較し、その

違いを粒子破碎に着目しつつ明らかにしようとするものである。

### 2. 試料および実験方法

#### 2.1 実験試料

本実験に使用した試料は、宇部市郊外で採取したまさ土である。実験は、採取したまさ土試料のうち標準フルイ2000 $\mu$ m通過試料を用いて行った。

この試料の指数的性質は、Table 1に示す通りである。またその粒径加積曲線をFig.1に示す。なお、

Table 1 Index properties of decomposed granite soil

	Direct shear test Sample A	Triaxial compression test Sample B
Specific gravity $G_s$	2.619	2.604
Uniformity coefficient $U_c$	6.41	5.84
50% diameter (mm)	0.840	1.139
Maximum diameter (mm)	2.000	4.760
Initial void ratio $e_0$	1.07~1.18	0.67~0.69

\*建設工学科

\*\*大学院建設工学専攻

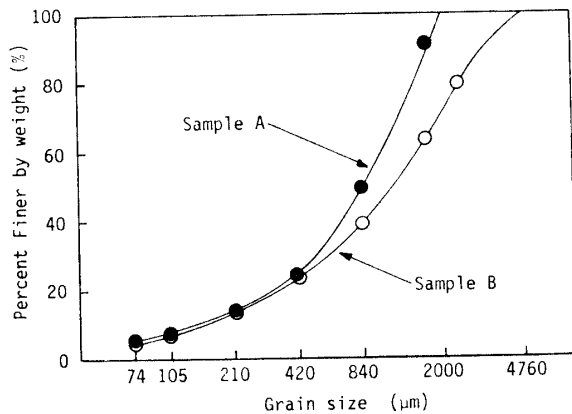


Fig. 1 Gradings of samples

Sample Bは、三浦らの行なった三軸圧縮試験に使用されたまさ土である<sup>1)</sup>。

2.2 実験方法

実験は、改良型一面せん断試験機を用いて、垂直応力0.03~6.00 kgf/cm<sup>2</sup>の範囲でせん断速度0.5 mm/minで行なった。まず、含水状態の異なる試料を間隙比が1.10(相対密度50%)になるように締固めて作成し、その後1時間圧密した後、定圧せん断試験を行なった<sup>2)</sup>。なお、飽和度の高い試料を作成する場合には、含水比12%の試料を詰めた後、上部から給水する方法をとった。しかしながら、この場合得られた飽和度は、75%から88%にとどまった。このような高飽和状態を便宜的に飽和状態と以下本文においては表現することとする。

2.3 粒子破砕量測定方法

垂直応力の変化および含水比の変化によって生じる粒子破砕を数量化する尺度として、表面積の増加量を用いた<sup>3)</sup>。その具体的方法を以下に示す。

- 1) せん断終了後の試料を炉乾燥させる。
- 2) 1680, 840, 420, 210, 105, および74μmの6種類の標準網フルイを用いて、ロータップフルイ振とう器により5分間振とうさせてふるい分ける。
- 3) 各フルイ残留土の試料重量を測定し、残留率F(%)を求める。
- 4) 74μm以上の試料については、各粒径ごとの平均粒径を相乗平均により求め、土粒子を球形とみなしそれぞれの比表面積S<sub>w</sub>(cm<sup>2</sup>/g)を計算する。また、74μm以下の粒子については、空気透過式Blaine法を用いてS<sub>w</sub>を測定した。
- 5) 上記の方法で求めたF, S<sub>w</sub>より次式によって表

面積S(cm<sup>2</sup>/cm<sup>3</sup>)を計算した。

$$S = \Sigma F \cdot S_w \cdot \gamma_d / 100 \quad (1)$$

ただし、 $\gamma_d$ はせん断試験終了時の乾燥密度である。

3. 実験結果と考察

3.1 応力変形特性

Fig. 2は、種々の含水状態における垂直応力0.5 kgf/cm<sup>2</sup>と0.03 kgf/cm<sup>2</sup>の場合の典型的な応力・変位関係を示している。垂直応力 $\sigma_n$ が0.5 kgf/cm<sup>2</sup>の場合、気乾状態(含水比w≒0.3%)の試料が最大のせん断強度を示し、含水比の増加と共に強度は減少する。また、応力・変位曲線は、気乾状態で硬化・軟化の傾向を示すが、自然含水比状態(w≒12%)および飽和状態で

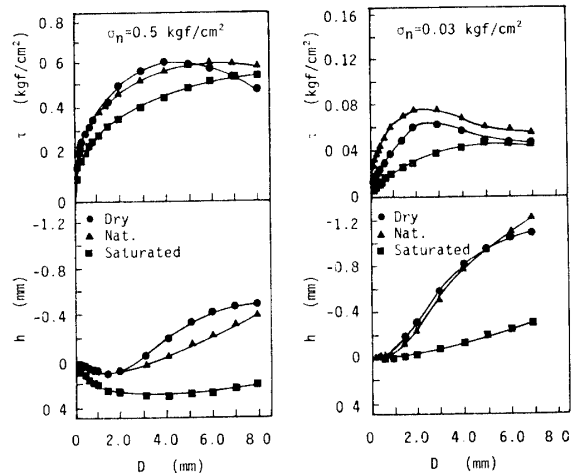


Fig. 2 Test results

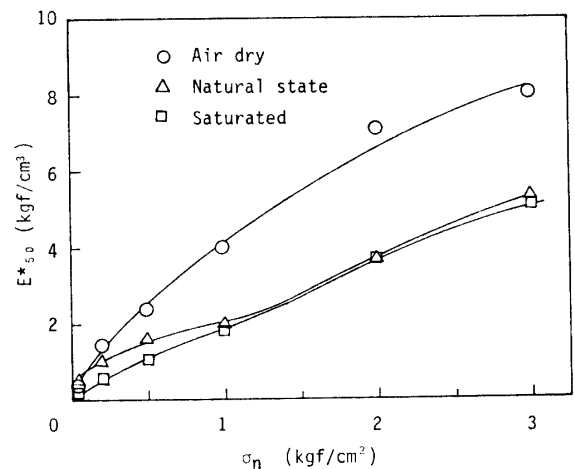


Fig. 3 Relationship between modulus of deformation E<sub>50</sub><sup>\*</sup> and normal stress  $\sigma_n$

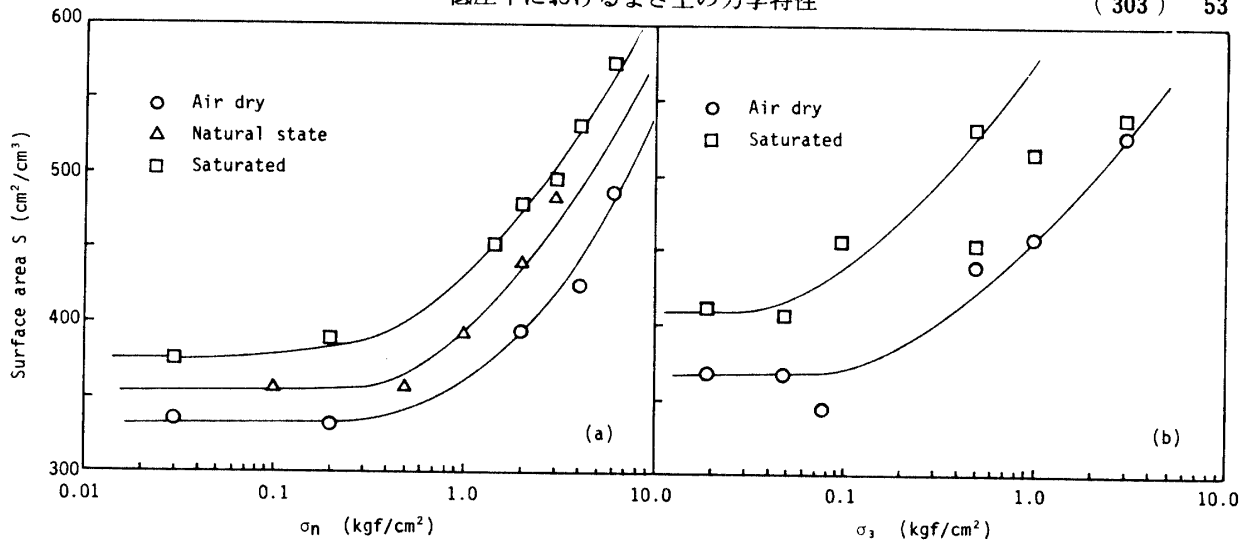


Fig. 4 Relationship between surface area S and normal stress  $\sigma_n$  or confining pressure  $\sigma_3$

は、硬化型となっている。このような傾向は、垂直応力が0.2~6.0kgf/cm<sup>2</sup>の範囲内では、ほぼ同様に認められた。一方、 $\sigma_n=0.03\text{kgf/cm}^2$ の場合、自然含水比状態のせん断強度が最大値を示し、前述の垂直応力が比較的高い場合とは特性が異なっている。これらの実験結果から以下のことが言えよう。1) 通常の応力域(0.2~6.0kgf/cm<sup>2</sup>)では、垂直応力あるいは、飽和度が高くなるにつれてピーク強度が明瞭に出現せず、垂直変位も収縮の傾向を示すようになる。この様な傾向は、高圧下における豊浦砂の強度特性についても明らかにされている<sup>4)5)</sup>。これは、後述するように粒子破碎に起因するものと考えられる。2) 低圧域(0.1kgf/cm<sup>2</sup>以下)では、自然含水比状態の強度が最も高く、1)の場合とは異なった傾向を示す。これは、主にサクシオンに起因しているものと考えられる<sup>6)</sup>。なお、ここで使用した自然含水比状態という言葉は、地山まさ土の含水比がほぼ12%であったことから便宜上用いたものである。

Fig. 3は、応力変位関係において次式で求めた  $E_{50}^*$  と垂直応力の関係を飽和度をパラメータにして描いたものである。

$$E_{50}^* = (\tau_f/2)/(\tau_f \frac{1}{2} \text{に相当する変位 (cm)}) \quad (2)$$

ここで  $\tau_f$  は破壊時のせん断強度 (kgf/cm<sup>2</sup>)

この図より、 $E_{50}^*$  は、垂直応力の増加と共に増へ、その値は、垂直応力が0.03kgf/cm<sup>2</sup>の場合には、湿润状態でもっとも大きく、それ以外の応力域では、気乾状態がもっとも大きくなっている。このことは、先に述べたせん断強度特性とうまく対応し、 $E_{50}^*$  とせん断強度  $\tau_f$  の高い相関性を示すものと思われる<sup>6)</sup>。

### 3.2 応力ダイレイタンス特性

せん断に伴う粒子破碎量を検討するため、せん断試験後の表面積S(粒子破碎を数量化する尺度)と垂直応力の関係を調べ、その結果をFig. 4に示した。この図には、三浦らが行なったまさ土に対する三軸圧縮試験の結果<sup>1)</sup>も拘束圧を横軸にとり示している。試料の含水状態による表面積と垂直応力、または拘束圧の関係は、表面積の値そのものは違っているが、含水量の増大および垂直応力、または拘束圧の増加に伴いせん断による粒子破碎量が増加することは明らかである。

さらに、一面せん断試験の結果から、飽和状態では、他の2つの状態に比べ、低い垂直応力下で粒子破碎が生じていることがわかる。これは、粒子破碎が、垂直応力のみ依存するのではなく、含水状態にも依存することを示すものである。

Fig. 5, Fig. 6は、一面せん断試験と三軸圧縮試験の結果をそれぞれ、破壊時の応力比およびダイレイタンス指数と垂直応力、または拘束圧の関係として整理したものであるが、両試験結果におけるこれらの関係は定性的に同じであることがわかる。すなわち、垂直応力、または拘束圧が増加すると気乾・自然・飽和の順にダイレイタンス指数は、膨張から収縮の傾向を示し、それと共に応力比も減少している。またFig. 5より、垂直応力0.07kgf/cm<sup>2</sup>あたりで、気乾と自然含水比状態のダイレイタンス指数および応力比曲線が共に逆転し、それよりも低い応力域では、自然含水比状態の試料の方が、応力比が大きくなっていることがわかる。これは、垂直応力が0.07kgf/cm<sup>2</sup>以下といった極めて低い垂直応力になると、粒子破碎効果よりも、サ

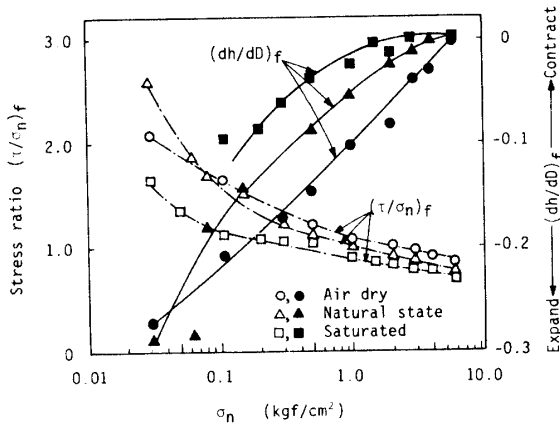


Fig. 5 Changes in stress ratio  $(\tau/\sigma_n)_f$  and dilatancy rate  $(dh/dD)_f$  at failure with an increase in normal stress  $\sigma_n$

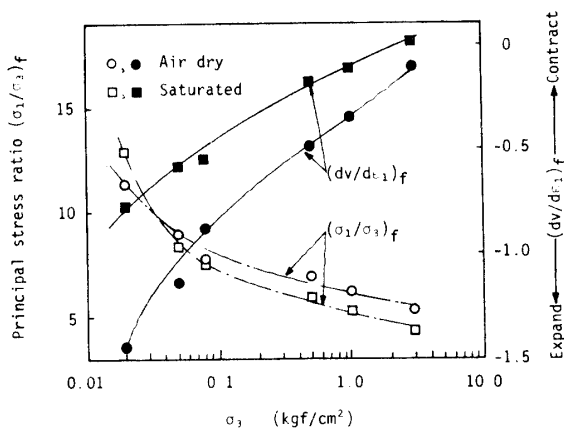


Fig. 6 Changes in principal stress ratio  $(\sigma_1/\sigma_3)_f$  and dilatancy rate  $(dv/d\epsilon_1)_f$  at failure with an increase in confining pressure  $\sigma_3$

クシオン効果が卓越するため、その結果として大きなせん断強度を示すものと思われる<sup>6)</sup>。

### 3.3 粒子破碎とダイレンタンシー指数

Fig. 7, Fig. 8 に一面せん断試験および三軸圧縮試験によって得られた、粒子破碎量とダイレンタンシー指数の関係をそれぞれ示した。これらの図より、試験方法には関係なく粒子破碎量とダイレンタンシー指数の間には、含水状態によらないユニークな関係が存在し、結果として、ダイレンタンシー指数低下の粒子破碎依存性がうかがえる。すなわちせん断による粒子破碎が比較的少ない応力域では、体積変化特性を表わすダイレンタンシー指数は、今回実験に供した密度において体積膨張の傾向を示す。そして、粒子破碎量が増加するにつれてダイレンタンシー指数は、膨張から収縮に転じ始め、ついにはある値に収束する傾向にある。

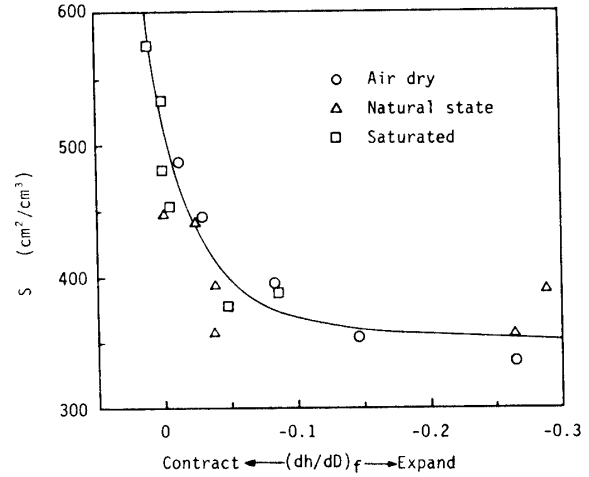


Fig. 7 Relationship between surface area  $S$  and dilatancy rate  $(dh/dD)_f$  at failure

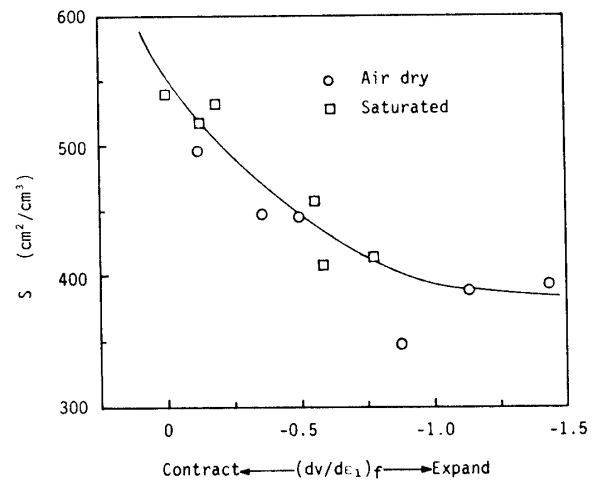


Fig. 8 Relationship between surface area  $S$  and dilatancy rate  $(dv/d\epsilon_1)_f$  at failure

この様な議論は、高圧下の砂に対してもあてはまることから、少なくとも破碎性土と呼ばれる材料に対しては応力レベルを考慮すれば、上述した議論が成り立つと考えられる。

### 3.4 せん断強度に及ぼす水分および垂直応力の影響

Fig. 9 は、破壊時の応力比と飽和度の関係を、垂直応力をパラメーターにして描いたものである。応力比は、垂直応力が  $0.1 \text{ kgf/cm}^2$  を越える応力域では、飽和度が高くなるにつれて低下し、ある一定の応力比に収束する傾向にある。また垂直応力が、 $0.05 \text{ kgf/cm}^2$  以下のように極めて低い垂直応力下においては、飽和度30~40%で最大値を取るようなユニークな曲線を呈するようになる。これは、気乾状態では、粒子間接点にほとんど水分が存在せず、表面張力が働かないが、含水

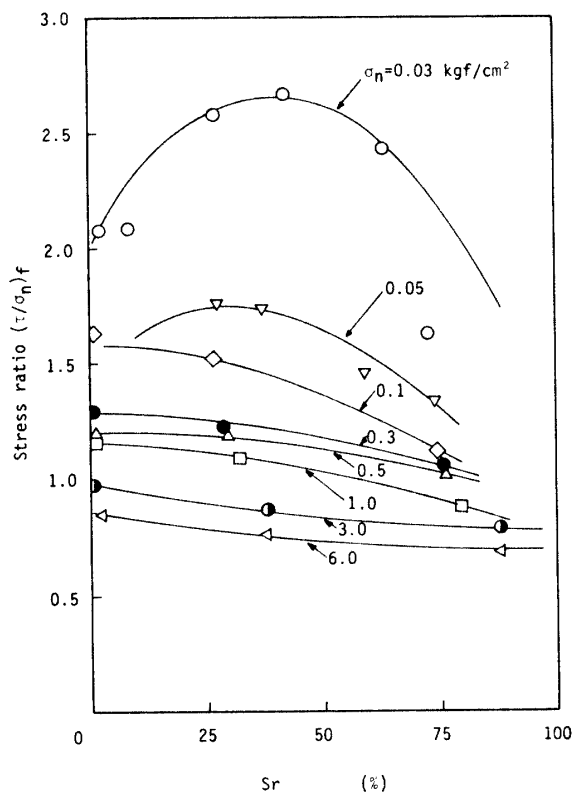


Fig. 9 Relationship between stress ratio  $(\tau/\sigma_n)_f$  and degree of saturation  $S_r$  at failure

量が増大するにつれて粒子接点に毛管水が付着し、その表面張力に起因する凝集力が土粒子を相互に引き付ける働きをするために、有効応力が増大し、応力比（せん断強度）は大きくなると考えられる。しかしさらに含水量が増加すれば、表面張力が減少し、また粒子破碎の影響も加わって応力比は低下すると推察できる。したがってその結果として飽和度30~40%において最大の応力比を示すものと思われる。この結果は、丸井らが、標準砂を用いて、超低圧下で一面せん断試験を行ない、飽和度40%付近において最大のせん断強度が発現するとした結果<sup>7)</sup>と同じである。また、乱さないまさ土の三軸圧縮試験においても、拘束圧を0.3kgf/cm<sup>2</sup>以下にすれば、同じく飽和度30~40%において最大せん断強度を示す傾向があることを確認している<sup>8)</sup>。

3.5 浸水による強度低下率

浸水による強度低下の割合 $\eta$ を次式で定義し、その計算値をFig. 10にプロットした。

$$\eta = (1 - \tau_{sat}/\tau_{nat}) \times 100 \quad (3)$$

ここに、 $\tau_{sat}$  : 浸水飽和時の最大せん断強度

$\tau_{nat}$  : 自然含水状態での最大せん断強度

この図より、垂直応力2.0~6.0kgf/cm<sup>2</sup>の範囲では、

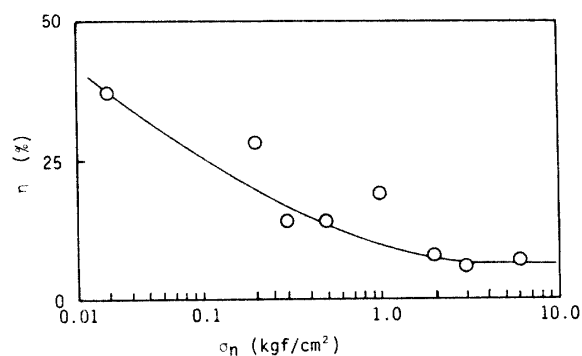


Fig. 10 Rate of strength decrease due to submergence

強度低下率が6~7%と比較的低いのに対し、垂直応力が2.0kgf/cm<sup>2</sup>以下になると、その低下の割合は除々に増し、垂直応力が0.03kgf/cm<sup>2</sup>では、約40%とかなり高い値となっている。このことは、垂直応力が小さいほど浸水の影響を受けやすくなることと対応する。さらに、Fig. 9から明らかなように、(3)式に用いた $\tau_{sat}$ の飽和度の値は、75~88%であり、完全飽和状態では、 $\tau_{sat}$ がさらに低下することが予測されるので、実際には、強度低下の割合 $\eta$ は、もっと大きくなるはずである。したがって、不飽和まさ土斜面の表層すべりの安定問題等を考えていく場合には、拘束圧、数10~数100gf/cm<sup>2</sup>を考える必要があり、上述した結果を十分考慮しなければならない。すなわち、表層すべりを検討する場合、超低圧下における飽和状態での強度定数を用いるのが妥当であると考えられる。

4. まとめ

低圧下におけるまさ土の力学的特性を、主に一面せん断試験結果を用いて検討した。得られた結論を要約すると次のようである。

- 1) 粒子破碎の影響を受けない極めて低い垂直応力下(0.1kgf/cm<sup>2</sup>以下)では、土粒子間に水分が吸着することによって生じるサクシヨンの強度増加に寄与する割合が顕著になる。
- 2) まさ土の粒子破碎は、垂直応力のみならず、含水比にも依存する。
- 3) 粒子破碎量とダイレイタンスー指数の間には、含水状態によらないユニークな関係が存在し、ダイレイタンスー指数低下の粒子破碎依存性を示す。
- 4) 垂直応力の変化に伴う応力比およびダイレイタンスー指数の変化の間には、対応関係が存在する。
- 5) まさ土は、垂直応力2.0kgf/cm<sup>2</sup>以下で徐々に浸水による強度低下率 $\eta$ が増加し始めるが、とくに

垂直応力 $0.03\text{kgf/cm}^2$ といった超低圧下では、約40%とかなり高い値となることがわかった。

本研究で得られた結果は、応力レベルさえ考慮すれば、種々の破碎性土に対してもあてはまると考える。また、本実験においては、まさ土試料の飽和方法に問題があったが、その後、飽和技術をほぼ確立したので、今後はさらに詳細な研究を進めるつもりである。

#### 謝 辞

筆者らの研究に対して日頃から批判と励しを賜り、今回貴重な実験データの一部使用を快くお許しいただいた佐賀大学三浦哲彦教授に深く感謝の意を表します。

#### 参 考 文 献

- 1) 三浦哲彦, 山添和己: 低圧下, 砂質土のせん断強度に及ぼす2, 3の要因について, 土木学会第39回年次学術講演会概要集, 第3部, 25~26 (1984)
- 2) 土質工学会: 土質試験法—第2回改訂版—, 437~461 (1982)
- 3) 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, 第260号, 109~118 (1977)
- 4) 三浦哲彦, 山内豊聡: 高拘束圧下における標準砂の排水せん断特性について, 土木学会論文報告集, 第193号, 69~79 (1971)
- 5) N. Miura, and T. Yamanouchi: Effect of Water on the Behavior of a quarts-Rich Sand under High Stress, Soil and Foundation, Vol. 15, No. 4, 23~34, (1975)
- 6) 三浦哲彦, 村田秀一, 安福規之: まさ土のせん断強度に及ぼすサクシヨンの影響, 山口大学工学部研究報告, Vol. 34, No. 2, 55~60 (1984)
- 7) 丸井英明, 小橋澄治: 砂質土における含水状態の変化に伴う剪断強度の変化について, 京都大学農学部演習林報告, 第50号, 128~138 (1978)
- 8) 村田秀一, 安福規之, 神垣直哉: 乱さないまさ土のせん断強度に及ぼすサクシヨンの影響, 土木学会第39回年次学術講演会概要集, 第3部, 743~744 (1984)

(昭和59年10月15日受理)