

まさ土のせん断強度に及ぼすサクシヨンの影響

三浦 哲彦*・村田 秀一*・安福 規之*

Effect of Suction on the Shear Strength of the Decomposed Granite Soil

Norihiko MIURA, Hidekazu MURATA
and Noriyuki YASUFUKU

Abstract

Decomposed granite soil is widely distributed in the western part of Japan. It is well known that many slope failures of the decomposed granite soil often occur during or after rainfalls. One cause of such slope failure is attributable to a decrease in shear strength due to submergence. It is necessary to investigate the strength characteristics of the partly saturated decomposed granite soil for the slope stability analysis in more detail. The increase in strength of such sandy soil due to the decrease of saturation is caused by changes in suction, frictional characteristics and particle-crushing effect.

This paper reports the effect of suction on the shear strength of the partly saturated decomposed granite soil mainly, using the results of the triaxial compression test under the relatively low confining pressure. As the result, a clear agreement was obtained between the increment of the shear strength observed and the incremental shear strength due to the suction with a decrease of saturation.

1. まえがき

わが国の西南部に分布する花崗岩系風化残積土であるまさ土は、通常不飽和状態にあり、飽和土の挙動に立脚している土質力学で説明することができない力学的挙動を示すことも少なくない。すなわち、浸水によってまさ土のせん断強度が低下したり、ユラプス現象を生じたりする現象はよく知られている。このような浸水に伴うせん断強度の変化は、摩擦効果、ダイレタンシー効果および粒子破碎効果の変化の観点から、ある程度説明することができるが十分ではない。その理由の一つとして、不飽和土のひずみや強度は全応力や間隙水圧のみならず間隙空気圧にも支配されていることを挙げることができる。そこで、間隙空気圧と間隙水圧の差、すなわちサクシヨンの強度特性に及ぼす影響を解明することがまず必要である。事実、まさ土斜面は降雨の度に災害を繰返しているが、地表面での拘束圧は小さく、土中のサクシヨンを無視できず、降

雨による土中のサクシヨンの低下が斜面の安定性に重大な影響を及ぼしていることは想像に難くない。

ところで、1960年代不飽和土の力学的特性に関する研究は活発に行われたが、その後いきづまりの状態になった。しかし、今日土質試験機や計測器は著しく発達し、不飽和土の力学試験を以前に比較して容易に、かつ正確に実施できるようになっている。本研究は、まさ土の飽和度の低下に伴うせん断強度の増加を、摩擦効果、粒子破碎効果およびダイレタンシー効果の変化の他、毛管結合力効果の変化と対応させ説明したものである。

2. 不飽和土の有効応力説

飽和土の変形と強度は全応力でなく、有効応力に支配されていることが明らかにされた1950年代から、固体、液体、気体の3相からなる不飽和土に対する有効応力説の適用が検討され始めていた。そして、1960年英国の土質基礎工学会によって主催された国際会議“Pore water and suction in soils”において、Aitchison¹⁾、Jennings²⁾ および Bishop³⁾ がそれぞれ

* 建設工学科

提案したいわゆる不飽和土の有効応力式が総括された。これらの式の違いは、間隙水圧と間隙空気圧をいかに表現するかにあった。これらの式の中で、気相の項を含んでいるが故に最も一般的な表現式とされているのが Bishop による次式である^{3),4)}。

$$\sigma' = (\sigma - u_a) + \chi(u_a - u_w) \quad \dots\dots (1)$$

ここに、 σ' は有効応力、 σ は全応力、 u_a は間隙空気圧、 u_w は間隙水圧、 χ は飽和度、土の種類、応力径路などに関係するパラメーターである。なお、不飽和土の間隙内における水と空気境界のメニスカスを考えれば $u_a > u_w$ の関係が保たれている。

Bishop は、不飽和土の有効応力に関する力学定数が飽和した試料の場合も変化しないという仮定に基づいて、パラメーター χ を求めた⁴⁾。すなわち、飽和土の破壊応力と不飽和土の破壊応力の差がサクシオン ($u_a - u_w$) に起因すると見なして、Fig. 1 に示すよう

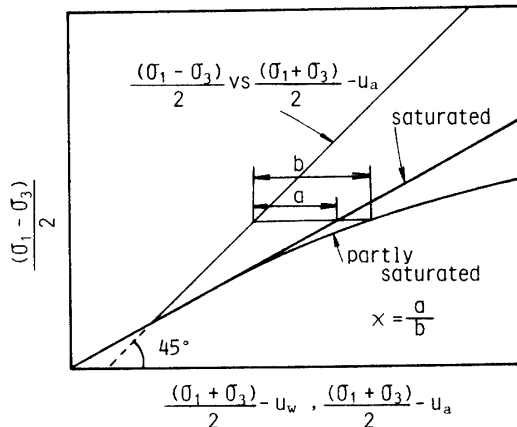


Fig. 1 Determination of parameter χ .

に、同じ応力差に対する飽和時の $(\sigma - u_w)$ と不飽和時の $(\sigma - u_a)$ との差を求め、次式によって定めた⁴⁾。

$$\chi = \frac{(\sigma - u_w)_F - (\sigma - u_a)_P}{(u_a - u_w)_P} = \frac{a}{b} \quad \dots\dots (2)$$

添字 F は飽和時、 P は不飽和時を意味している。

(1)式の検証として、Bishop は三軸圧縮試験において $(\sigma_3 - u_a)$ と $(u_a - u_w)$ の差が一定となるように応力を変化させても、応力ひずみ関係には影響を及ぼさないが、 $(\sigma_3 - u_a)$ または $(u_a - u_w)$ のいずれか一方を変化させると応力ひずみ関係に影響を及ぼすという実験結果とサクシオン圧縮試験による実験結果を示した⁴⁾。

しかしながら、(1)式のパラメーター χ を媒介とする Bishop の有効応力式には種々の問題点があることも事実である。たとえば Jennings & Burland は、(1)式の検証には、 σ' が一定となるように $(\sigma - u_a)$ と

$\chi(u_a - u_w)$ を変化させても 応力ひずみ関係に影響を与えないことを示す必要があるが、この種の試験は、 χ の値が(1)式を認めて始めて決定されるので不可能であると批判された。また、(1)式は不飽和土を水浸させた場合のユラプス現象 (この場合、 $\chi < 0$ となる) を説明できないとした⁵⁾。

ただ、軽部らも指摘しているように⁶⁾、 χ の物理的意味はさておき、不飽和土の応力ひずみ式を得たいという立場に立てば、パラメーター χ の大きさや符号、あるいは実用上の価値などは本質的には問題にならないように思われる。いずれにせよ、現在において不飽和土の力学的挙動を説明できる有効応力式は、まだ確立されていない。

3. 試料と実験方法

実験に用いた試料は、宇部市郊外で採取し、4.76 mm ふるいを通したまき土で、土粒子の比重 $G_s = 2.63$ 、 $D_{50} = 1.0$ mm である。供試体 ($\phi = 50$ mm, $H = 125$ mm) は、セラミックディスクを持つペDESTAL 上で気乾試料を用いて $e = 0.65 \sim 0.70$ となるようにタンパーで締固めて作成し、その後約4時間給水飽和させる。次に、 $\sigma_3 = 0.3$ kgf/cm² で等方圧密後、所定の飽和度にするため乾燥剤を通った空気を通してながら 0.2 kgf/cm² の真空で脱水する。真空吸引の際は、拘束圧を負圧分だけ下げると共に、脱水量を読み取り供試体の飽和度を求める。このようにして準備された不飽和供試体を、ひずみ速度 0.1 mm/min、上部排水条件下でせん断し、体積変化量とサクシオンを測定した。なお、本研究の目的がサクシオンのせん断強度に及ぼす影響を明らかにすることにあつたので、拘束圧は 0.3 kgf/cm² と定めた。

サクシオンは、Fig. 2 に示すような下部ペDESTAL 部のセラミックディスクと通じた半導体圧力変換器 (TOYODA, PMS-5) を用いて、負の間隙水圧として読み取り、体積変化量は二重ビュレット管を用いて側液の増減量から求めた。また、用いたセラミックディ

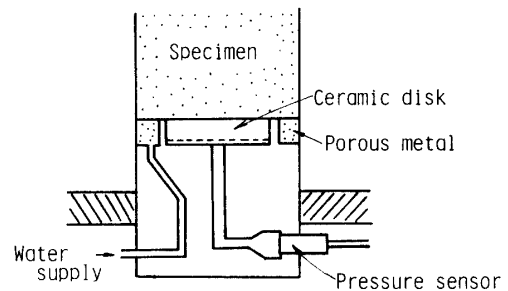


Fig. 2 Equipment for measuring suction.

スクの air entry value は 2.7 kgf/cm² である。

4. 実験結果と考察

4.1 ダイレイタンスー効果および粒子破碎効果

Fig. 3 は、飽和度の異なる供試体の軸差応力・体積歪・サクシヨンの関係を示したものである。いずれの場合においても、体積変化は収縮後膨張の傾向を示し、せん断中における飽和度の変化は、せん断開始時の飽和度より数%減少する程度であった。また、Fig. 3 から、サクシヨンの値は飽和度の低い試料程大きく、せん断中における変化は小さいことが分る。

Fig. 4 に破壊時の軸差応力 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ 、ダイレイタンスー指数 $(dv/d\varepsilon_1)_f$ と飽和度 S_r の関係を示した。Fig. 3 あるいは Fig. 4 から明らかなように、 $(dv/d\varepsilon_1)_f$ は S_r の低下と共に増大し、 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ も同様に増大する。この S_r の低下に伴う $(dv/d\varepsilon_1)_f$ の増加は、一般の土の場合にも見られる傾向であるが、まさ土の場合粒子破碎現象とも密接に関連している。せん断による粒子破碎量を試料の表面積の増加として表わしたのが Fig. 5 である。すなわち、 $\sigma_3 = 0.3 \text{ kgf/cm}^2$ という比較的低い拘束圧下においても、まさ土は $S_r > 60\%$ の領域では粒子破碎を生じている。結果として、粒子破碎量の低下と共に $(dv/d\varepsilon_1)_f$ が増加する。

なお、前の研究において、せん断強度に及ぼす粒子破碎の影響は、粒子破碎量 ΔS が塑性仕事 W とユニークな関係にある粒子破碎率 $(dS/dW)_f$ を用いて説明できることを明らかにした⁷⁾。その結果、 $(dv/d\varepsilon_1)_f$ と $(dS/dW)_f$ の関係は、ほぼ直線となることが認められた⁷⁾。したがって、せん断強度に及ぼす粒子破碎の影響は、 $(dv/d\varepsilon_1)_f$ を用いた次式で補正することができよう。

$$(\sigma_1 - \sigma_3)_R = \frac{\sigma'_1}{\{1 + ((dv/d\varepsilon_1)_f)\}} - \sigma'_3 \quad \dots\dots (3)$$

(3)式は、一般に Rowe のダイレイタンスー補正式⁸⁾といわれるものを修正して表現したものであるが、 $(\sigma_1 - \sigma_3)_R$ は粒子破碎の影響も含めて補正したものと考えると差支えがない。Fig. 4 に(3)式によって補正された軸差応力 $(\sigma_1 - \sigma_3)_R$ と S_r の関係も示しているが、 $(\sigma_1 - \sigma_3)_R$ は $S_r \approx 75\%$ で最大値を示していることが分る。

ここで、まさ土の摩擦効果は含水比の変化によって変化するかが問題となる。しかし、試料の摩擦効果の変化だけを単独に測定することは非常に難しいので、次のような方法で摩擦効果に及ぼす水分の影響の程度を推定した。まさ土の場合、主要鉱物である石

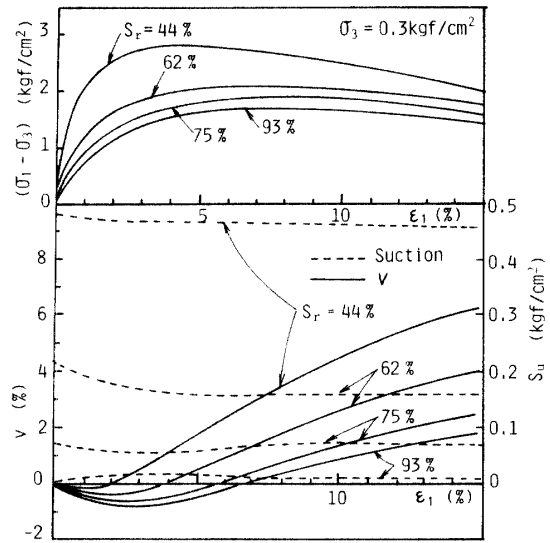


Fig. 3 Test results.

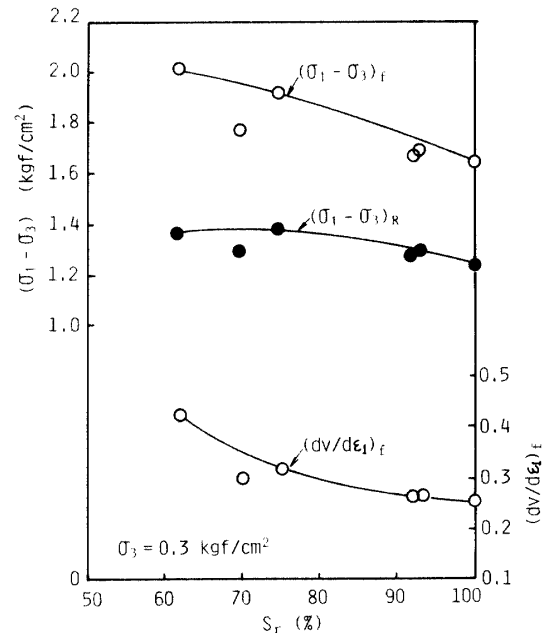


Fig. 4 Relation between $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$, $(\sigma_1 - \sigma_3)_R$, $(dv/d\varepsilon_1)_f$ and S_r .

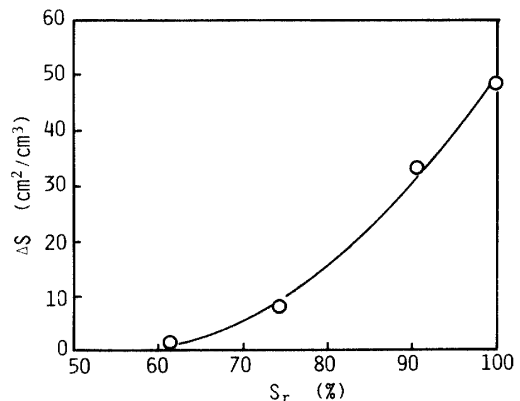


Fig. 5 Relation between ΔS and S_r .

英, 長石と雲母とでは摩擦効果が著しく異なる⁹⁾ ので, 試料全体としての摩擦効果を検討した. 一つは, 5 cm 立方のまさ土母岩の岩片を用いて, 面対面の摩擦角 ϕ_b を, 炉乾燥 (110°C) 直後, 気乾, 湿潤の3状態で調べた. Fig. 6 が実験結果であるが, 湿潤状態での ϕ_b が気乾状態のそれより約 6°, 炉乾燥状態のそれより 12° 高いことが分った.

また, 粒子間摩擦角を求めるための Rowe の方法⁸⁾ に準じたまさ土母岩片とまさ土試料を用いた実験においても, Fig. 7 から明らかなように湿潤状態の ϕ_u が気乾状態のそれより 6.5° 高いという結果を得た. 以上の実験結果を, 含水比の変動に伴うまさ土のせん断強度の変化に直接結びつけることはできないにしても, 含水比の低下によってまさ土の摩擦効果が増加することはありえないであろう. このことは, Fig. 4 に示した $(\sigma_1 - \sigma_3)_R$ が飽和度の低下に伴って増加することを説明できない.

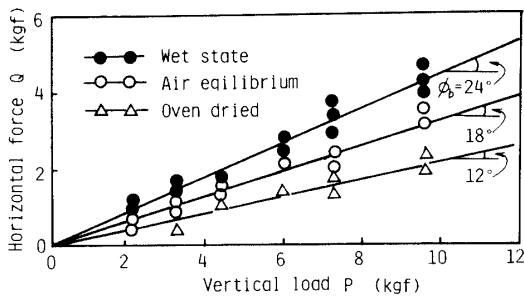


Fig. 6 Effect of water on the block-to-block friction angle $\phi_b = \tan^{-1}(Q/P)$ of weathered granite.

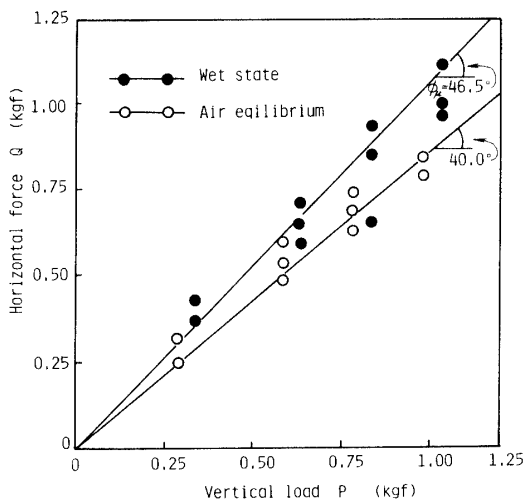


Fig. 7 Effect of water on the particle-to-particle friction angle $\phi_u = \tan^{-1}(Q/P)$ between the parent rock and decomposed granite soil.

4.2 サクション効果

拘束圧が比較的低い場合, 不飽和土において土中の

毛管結合力効果が土のせん断強度に寄与していることは十分に予想される. そこで, 飽和度の低下に伴ってサクションがせん断強度をどの程度増加せしめているかを検討してみる.

Fig. 8 は, 本実験で得られた破壊時におけるサクション S_{uf} と S_r の関係である. なお, Fig. 8 に, 同じ間隙比を持つまさ土の二方法による毛管上昇高さ (試験期間 2 週間) も示したが, 得られたサクションとほぼ同じ傾向を示していることから, 測定されたサクションが妥当な値であることが分る. そこで, サクションを間隙水圧的に取り扱い Fig. 9 の方法にしたがって, サクションにより増加する有効側圧を求めてみる. まず, 飽和供試体の試験結果を用いて, (3)式によりダイレンタンシー補正し, 飽和時での破壊包絡線を求める. 次に, 不飽和状態での試験結果を同じくダイレンタンシー補正し, Fig. 9 に示すように Mohr の応力円 (実線) を描き, 先に求めた破壊包絡線に接するように移動する (一点破線の応力円). この円の最小主応力と先の応力円の最小主応力との差 $\Delta\sigma'_{3m}$ を, サクションにより増加した有効側圧として求めることができる¹⁰⁾. なお, 以上の手順の中で, まさ土の摩擦角は, 先の4.1の考察により 飽和度に無関係に一定で

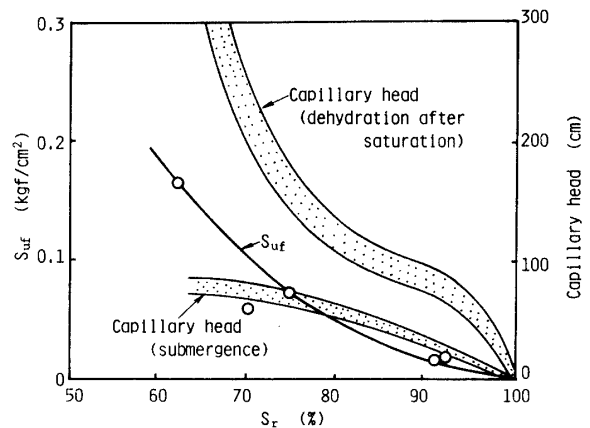


Fig. 8 Relation between S_{uf} and S_r .

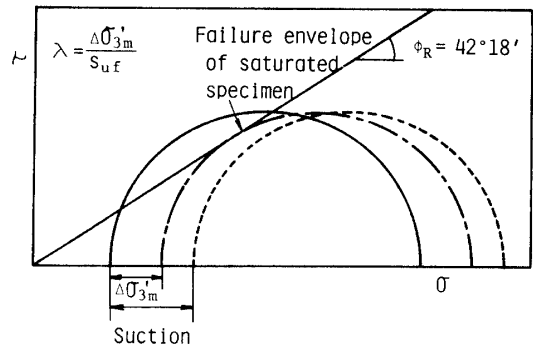


Fig. 9 Determination of the increment of confining pressure $\Delta\sigma'_{3m}$ due to suction and parameter λ .

あるものとした。次に、Fig. 9 に示すように、サクシヨンの値だけ先の Mohr の応力円を右方に移動すると（破線の応力円）、破壊包絡線と交わらない。したがって、サクシヨンの内いかけ程が増加有効側圧として作用しているかをみる尺度として、次式で示す λ を用いて検討することができる。

$$\lambda = \frac{\Delta\sigma'_{3m}}{S_{uf}} \quad \dots\dots(4)$$

なお、本実験は圧密排水条件下で実施したので、せん断中の間隙空気圧は 0 である。よって、 λ の値は、(2)式において $u_a=0$ とした χ と同値のものである。

Fig. 10 に、本実験で得られたまさ土の λ と S_r の関係と Bishop & Blight が種々の試料に対して求めた χ と S_r の関係を示した¹¹⁾。Fig. 10 は、まさ土の λ は S_r の低下に伴って急激に減少し、 $S_r < 50\%$ ではほぼ 0 になることを示唆している。いずれにしても、 λ と S_r の関係は非線形である。

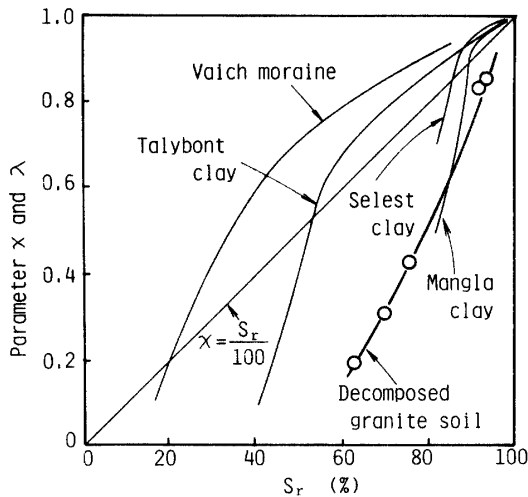


Fig. 10 Relation between parameter χ , λ and S_r .

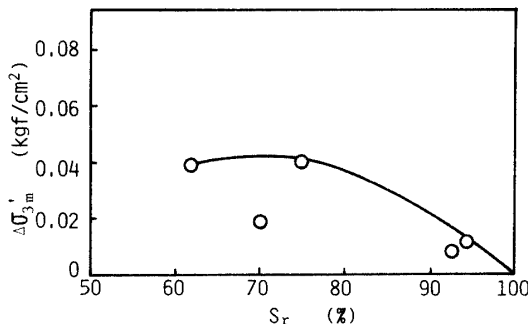


Fig. 11 Relation between $\Delta\sigma'_{3m}$ and S_r .

Fig. 11 は、増加有効側圧 $\Delta\sigma'_{3m}$ と S_r の関係である。 $\Delta\sigma'_{3m}$ は飽和度の低下と共に $S_r=75\%$ までは増加するが、75%以下になると若干減少する傾向が認められる。ところで、 $\Delta\sigma'_{3m}$ による主応力 σ'_1 の増分

$\Delta\sigma'_{1m}$ は、

$$\Delta\sigma'_{1m} = \Delta\sigma'_{3m} \frac{1 + \sin \phi'_R}{1 - \sin \phi'_R} \quad \dots\dots(5)$$

ここで、 ϕ'_R は飽和供試体を用い、ダイレイタンシー補正後の内部摩擦角であり $42^\circ 18'$ である。(5)式から得られる $\Delta\sigma'_{1m}$ と S_r の関係は、Fig. 12 に示すよう

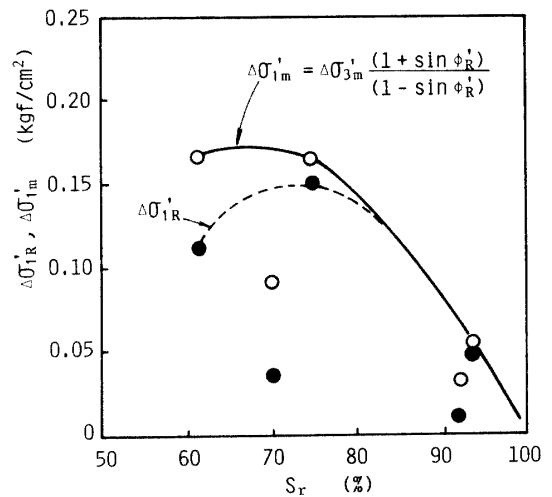


Fig. 12 Relation between $\Delta\sigma'_{1m}$, $\Delta\sigma'_{1R}$ and S_r .

になり、 S_r の低下と共に増加し $S_r=60\sim 80\%$ の領域では $\Delta\sigma'_{1m} \approx 0.16 \text{ kgf/cm}^2$ になる。そこで、実際の試験結果を用いて、ダイレイタンシー補正後の S_r の低下に伴う、飽和時の最大主応力からの増加主応力 $\Delta\sigma'_{1R}$ (=不飽和時の破壊時軸差応力-飽和時の破壊時軸差応力) を計算し、Fig. 12 中に示し、 $\Delta\sigma'_{1m}$ と比較してみる。Fig. 12 から明らかなように、飽和度の低下に伴う $\Delta\sigma'_{1R}$ と $\Delta\sigma'_{3m}$ による主応力の増分 $\Delta\sigma'_{1m}$ は極めて良く一致する。したがって、飽和度の低下に伴うまさ土のせん断強度の変化は、ダイレイタンシー効果と粒子破碎効果およびサクシヨン効果の変化をもって説明することができた。なお、サクシヨンによるせん断強度の増分の破壊時の最大軸差応力に対する割合は、 $\sigma_3=0.3 \text{ kgf/cm}^2$, $S_r=60\sim 80\%$ において約15%となる。

5. 結 論

乱した不飽和まさ土のせん断強度特性を、比較的低拘束圧下における三軸圧縮試験結果を用いて、主としてサクシヨンと強度の関係に着目して検討した。得られた結論を要約すると、次のようである。

(1) 飽和度の低下に伴って、破壊時の最大軸差応力は増加するが、ダイレイタンシーおよび粒子破碎効果

を補正すると $S_r \doteq 75\%$ でピークを生じる。

(2) 不飽和まさ土におけるサクシオンは、飽和度の低下と共に増加する。その値は、 $S_r \doteq 60\%$ で 0.16 kgf/cm^2 にもなる。

(3) まさ土の摩擦成分 ϕ_b , ϕ_u は、湿潤状態の方が乾燥状態の場合より大きくなり、したがってまさ土の内部摩擦角は、含水状態に無関係に一定であると推定することができる。

(4) サクシオンによる増加有効側圧は $S_r \doteq 75\%$ で最大となり、約 0.04 kgf/cm^2 である。

(5) 本実験で得られたまさ土の有効応力係数 λ は、飽和度の低下と共に非線形的に減少し、 $S_r < 50\%$ においてはほとんど 0 となる。

(6) 増加有効側圧を用いて計算から求められる増加主応力 $\Delta\sigma'_{1m}$ と実験から直接求められた主応力 $\Delta\sigma'_{1R}$ は、ほとんど一致した。したがって、飽和度の低下に伴うまさ土のせん断強度の増加は、ダイレイタンス効果、粒子破碎効果およびサクシオン効果で説明できた。

参 考 文 献

- 1) G. D. Aitchison: Relationships of Moisture Stress and Effective Stress Functions in Unsaturated Soils, Proc. Int. Conf. Pore Pressure and Suction in Soils, pp. 47-52 (1960).
- 2) J. E. Jennings: A Revised Effective Stress Law for Use in the Prediction of the Behaviour of Unsaturated Soils, Proc. Int. Conf. Pore Pressure and Suction in Soils, pp. 26-30 (1960).
- 3) A.W. Bishop: The Measurement of Pore Pressure in the Triaxial Test, Proc. Int. Conf. Pore Pressure and Suction in Soils, pp. 38-46 (1960).
- 4) A. W. Bishop and I. B. Donald: The Experimental Study of Partly Saturated Soil in the Triaxial Apparatus, Proc. 5th Int. Conf. SM & FE, **1**, 13-21 (1961).
- 5) J. E. Jennings and J. B. Burland: Limitation to the Use of Effective Stress in the Partly Saturated Soils, Géotechnique, **12**, No. 2, 125-144 (1962).
- 6) 軽部大蔵, 苗村康造, 森田登, 岩崎哲雄: 不飽和土の力学的性質に関する基礎的研究, 土木学会論文報告集, 第269号, pp. 105-119 (1978).
- 7) 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, 第336号, 105-112 (1983).
- 8) P.W. Rowe: The Stress-Dilatancy Relation for Static Equilibrium of an Assembly of Particles in Contact, Proc. Royal Soc., London, Ser. A, **269**, pp. 500-527 (1962).
- 9) H. M. Horn and D. U. Deere: Frictional Characteristics of Minerals, Géotechnique, **12**, No. 4, 319-335 (1962).
- 10) 村田秀一, 三浦哲彦, 安福規之: 含水比変動に伴うまさ土のせん断強度変化におよぼす要因について, 土木学会第38回年次学術講演会概要集, 第3部, pp. 45-46 (1983).
- 11) A. W. Bishop and G. E. Blight: Some Aspect of Effective Stress in Saturated and Partly Saturated Soils, Géotechnique, **13**, No. 3, 177-179 (1963).

(昭和 58 年 10 月 13 日 受理)