

まさ土のせん断強度成分に関する実験的考察

三浦 哲彦*・岩根 雅弘**・森野 康範***

Experimental Consideration on the Shear Strength Components of a Decomposed Granite Soil

Norihiko MIURA, Masahiro IWANE and Yasunori MORINO

Abstract

An attempt is made to evaluate the shear strength components of a decomposed granite soil under triaxial compression stresses. It is assumed that the shear strength components can be represented by the following three effects; sliding frictional effect ϕ_s , dilatancy effect ϕ_d , and particle-crushing and rearrangement effect ϕ_{cr} , and that the summation of these three effects gives the measured angle of internal friction ϕ_{max} .

The value of ϕ_s is measured by a block-to-block frictional test on weathered granite contained in original sample of a decomposed granite soil.

Drained triaxial compression tests are made on a decomposed granite soil in two conditions of water content; one is air-dried and another is initially air-dried and water is supplied at a shear stress level. Comparing the shear characteristics of the two kinds of samples, the values of ϕ_d and ϕ_{cr} are estimated respectively, and it is lead to conclusions that the supplying of water to the air-dried sample brings an increase of ϕ_s , and some decrease of ϕ_d and ϕ_{cr} , and totally the value of ϕ_{max} decreases.

1. まえがき

西南日本に広く分布しているまさ土は、次のような工学的特性を有することが知られている¹⁾。a) 水的作用によってせん断強度は著しく低下する、b) 土粒子は破碎されやすい、c) 鉱物組成および風化の程度によって工学的性質が大きく変わる。

これらの工学的特性の中で、a) と b) は実は密接に関係していることが先の研究²⁾³⁾において明らかになった。すなわち、まさ土の土粒子は本来せい弱であるから粒子間接触部にクラックを生じやすいが、水分が存在すると水分子はクラック内に侵入して表面エネルギーを低下せしめる。その結果、土粒子の破碎は促され(粒子破碎効果の低下)、あわせてダイレイタンスー効果も減少してせん断強度は低下するのである。

しかしながら、上述の研究においては、粒子破碎効果およびダイレイタンスー効果を定量的に評価するま

では至っていなかった。また、考慮すべきもう1つの効果、すなわち、すべり摩擦効果については言及していなかった。そこで、本報においては、まさ土のせん断強度に及ぼす3つの効果の寄与量を定量的に評価し、これらの各効果が水的作用によってどのように変化するかを調べる。これを行うために、3つの効果は、測定される内部摩擦角 ϕ_{max} を構成する3成分として表わすことができると仮定する⁴⁾。すなわち、

$$\phi_{max} = \phi_s + \phi_d + \phi_{cr} \quad (1)$$

ここに、 ϕ_s : すべり摩擦効果に関する ϕ 成分、 ϕ_d : ダイレイタンスー効果に関する ϕ 成分、 ϕ_{cr} : 粒子破碎効果+粒子再配列効果に関する ϕ 成分である。 ϕ_{cr} に粒子再配列効果を含めたのは、粒子破碎現象は必ず粒子再配列効果を伴うのであるが、両者を分離するのは困難と思われたので当面は2つの効果を ϕ_{cr} に含めて考察しようとするものである。

2. すべり摩擦角の測定

式(1)右辺の ϕ_s を測定しようとするのであるが、

* 土木工学科
** 佐伯市役所
*** 長門市役所

この量は本来なら Rowe の定義した粒子間摩擦角 ϕ_s を用いるべきところであろう。ところが ϕ_s の値は、粒子径が異なると変わってくることが知られており、本研究のように粒子破碎現象を調べようとする場合には $\phi_s = \text{一定}$ と考えることができなくなる。そこで、本研究においては、すべり摩擦効果に関する ϕ 成分としてまさ土母岩のブロック間すべり摩擦角をあてることにした。

2.1 測定方法

Rowe は、 ϕ_s を測定するために岩石を平らにした面の上に粒状試料を載せて両者を相対的にすべらせるという実験を行っている。この方法に準じて、Fig. 1 に示す装置を用いて ϕ_s の測定を行った。

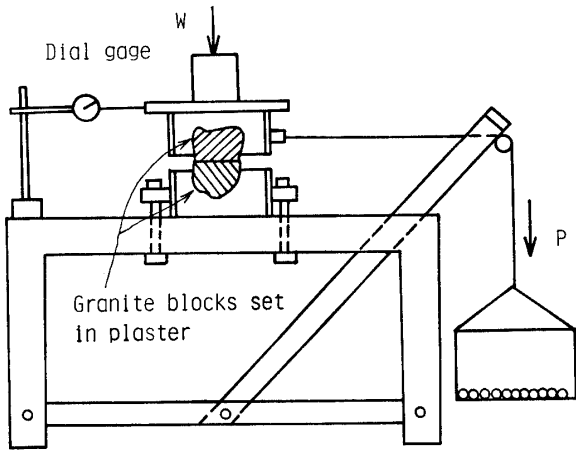


Fig. 1 Device for measuring block-to-block friction angle of granite.

実験に用いた岩片は、宇部市高嶺で採取したまさ土の中に含まれていたものを用いた。1個の岩片をダイヤモンドカッターで切断して1対の試験片にしたもの、ならびに、比較的平たい部分をグラインダーおよびサンドペーパーで平滑にした2片を組合せて1対の試験片にしたものの2種類を用意し、これらを鋼製円筒の中央に石膏で固定した。

すべり摩擦角の測定は、試料の含水状態を炉乾燥、気乾および湿潤の3つの状態にした上で行った。この中で、炉乾燥試料については、105°Cの乾燥器で約24時間乾燥したのを用いたが、実験中にすべり面に付着した水分を取除くためにときどきドライヤーで加熱した。

鉛直荷重 W は、1.25 kg~7.50 kg の間で5段階に変えて、また、水平荷重 P は鋼球 (5.4 g) を1個づつ受皿に落とし込むことによって与えていった。

2.2 実験結果

鉛直荷重 W と水平荷重 P の関係をプロットし、原点を通る直線で近似してその傾きから ϕ_s の値を求めた。実験結果の1例は Fig. 2 に示されている。また、4組の試料についての実験結果をまとめて Table 1 に示す。Table 1 において、No. 1 と 2 はすべり面をグラインダーとサンドペーパーで仕上げたもの、No. 3 と 4 はダイヤモンドカッターで切断して用意した試料である。

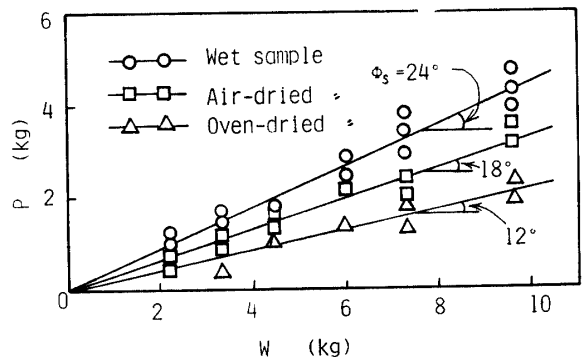


Fig. 2 Typical test results of block-to-block friction angle of granite.

Table 1 Block-to-block friction angle (ϕ_s)

Test No.	1	2	3	4	Average
A: Wet	24	24	33	28	27.3
B: Air-dried	18	18	24	20	20.0
C: Oven-dried	12	14	17	15	14.5
A-B	6	6	9	8	7.3

グラインダー仕上げ試料の ϕ_s 値 (No. 1 と 2 の平均値) に比べて、ダイヤモンドカッター切断試料の ϕ_s 値 (No. 3 と 4 の平均値) は数度高い値となっている。この差は、おそらく、試料表面の粗さの違いによるものであろうが、試料の表面粗さは測定しておらず、またいずれが粒状試料のすべり摩擦角に近いかは不明であるので、4個の実験値の平均をもって ϕ_s 値とする。

Table 1 の平均値で比較すると、試料表面の含水状態によって ϕ_s の値はかなり大きく変化することがわかる。すべり摩擦角に及ぼす水分の影響については、Horn ら⁹⁾ が詳しく調べており、鉱物の種類、表面粗さおよび表面の汚れの程度などによって影響の現われ方も変わってくる。本実験試料のように、石英、長石、雲母といった異種の鉱物からなる試料の場合には、 ϕ_s に及ぼす水分の影響について簡単には論じられな

い。しかしながら、湿潤状態での ϕ_s 値が気乾状態でのそれより7.3度も高いのは、潤滑作用をもたらしていた試料表面の汚れ (contaminant) が水分のためにある程度除去された結果である、ということは云えよう。

さて、上述の結果を式 (1) にあてはめて考えると、すべり摩擦効果だけに限っては、水分はせん断抵抗を増加させるように作用するといえる。しかし、実際には1.でも述べたように、水分の作用によってせん断抵抗は減少するのであるから、 ϕ_a または ϕ_{cr} が水の作用によって著しく低下すると考えねばならない。

3. 三軸圧縮試験

式 (1) の ϕ_{max} , ϕ_a および ϕ_{cr} の値を定量するために、Fig. 3 に示す粒度組成のまさ土試料を用いて排水三軸圧縮試験を行った。実験は、2つの含水比状態の供試体について行った。1つは気乾試料を締固めた供試体 (気乾供試体と呼ぶ)、他の1つは気乾供試体に一定のせん断応力を与えた状態で水を供給して飽和させた供試体 (飽和供試体と呼ぶ) である。

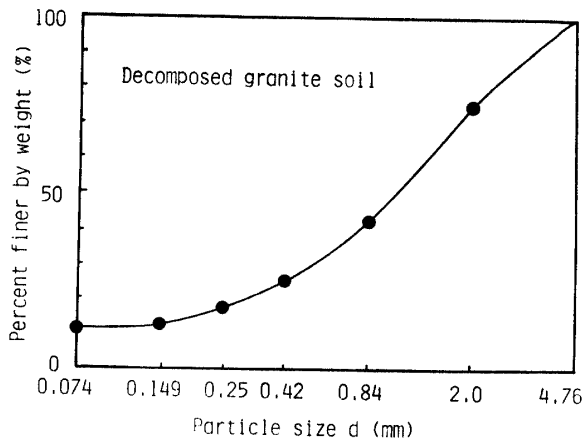


Fig. 3 Grading of sample tested.

3.1 実験方法

(a) 気乾供試体 試料は宇部市高嶺で採取したまさ土の中の 4760 μm ふるい通過分を用いた。空気乾燥したあと、分取してビニール袋に入れて保管したが、それらの含水比はおよそ4%であった。

直径約 50 mm, 高さ約 125 mm の供試体を作製するにあたって、試料の締固めは、試料をモールドに詰めした後ドライバーの柄でモールド側面を打ち、次いで35 mm のタンパーで押固めるようにして行った。供試体の初期間隙比を変えるためには、モールドの打撃回数およびタンパーの押固め回数を変えた。

供試体を自立させるのに 0.1 kg/cm^2 の負圧をかけ、寸法を測った後 1.0 kg/cm^2 の等方圧力を加えて圧密させた。その後、側圧一定の排水三軸圧縮試験をひずみ制御方式で行った。

(b) 飽和供試体 供試体の作製方法は気乾供試体と同じである。等方圧密後、応力制御方式で1段階に 10 kg の軸荷重を4回、合計 40 kg の荷重を載荷した。こうして一定応力を負荷した状態で、上部ペDESTAL に 0.05 kg/cm^2 の負圧を作用させると同時に下部ペDESTAL から水を供給した。供試体がほぼ飽和されるまでに約3時間を要した。

供試体が飽和した後、24時間放置したが、給水開始からこの時までの軸ひずみ変化を調べるために、一定時間毎にダイヤルゲージを読みとった。体積変化については、給水中は測定せず、飽和したあとからは供試体に接続したビューレットの水位変化を読みとることで測定した。

供試体飽和後24時間経過してから、ひずみ制御方式で破壊に至らしめた。なお、気乾供試体については、ひずみ制御方式と応力制御方式による破壊応力はあまり変わらないことを確かめている。

3.2 実験結果

気乾供試体および飽和供試体おのおのについて、初期間隙比を変え、側圧 $\sigma_3 = 1.0 \text{ kg}/\text{cm}^2$ の条件で排水三軸圧縮試験を行った。気乾・飽和各供試体の代表的な応力ひずみ曲線は Fig. 4 (a), (b) に示すとおりである。

同図 (b) において、 $(\sigma_1 - \sigma_3) = 2.1 \text{ kg}/\text{cm}^2$ で給水した結果、軸ひずみは約5%も進行したことが注目される。水的作用による軸ひずみの進行 $\Delta \epsilon_1$ は、その大部分は飽和されるまでの間に生じるのであって、飽和後24時間の間に生じる $\Delta \epsilon_1$ の量は比較的小さい。

先の研究³⁾において明らかにしたように、水供給による軸ひずみの進行は、試料の粒子破碎現象と密接に関係している。すなわち、試料の粒子破碎量を表面積増加 $\Delta S (\text{cm}^2/\text{cm}^3)$ で表わすと、 $\Delta \epsilon_1$ と ΔS の間には直線的な関係のあることが知られる。水供給による軸ひずみの進行と粒子破碎の促進の現象は、粒子破碎量 ΔS と供試体になされた塑性仕事 W との関係を調べることによって一層明瞭に説明できるのであるが、これらについては文献3)において詳しく論じているのでここでは述べない。

さて、Fig. 4 (b) に戻って、飽和して24時間経過した後、ひずみ制御方式で破壊に至らしめたら $(\sigma_1 - \sigma_3)_f = 3.8 \text{ kg}/\text{cm}^2$ という結果が得られた。この値は、

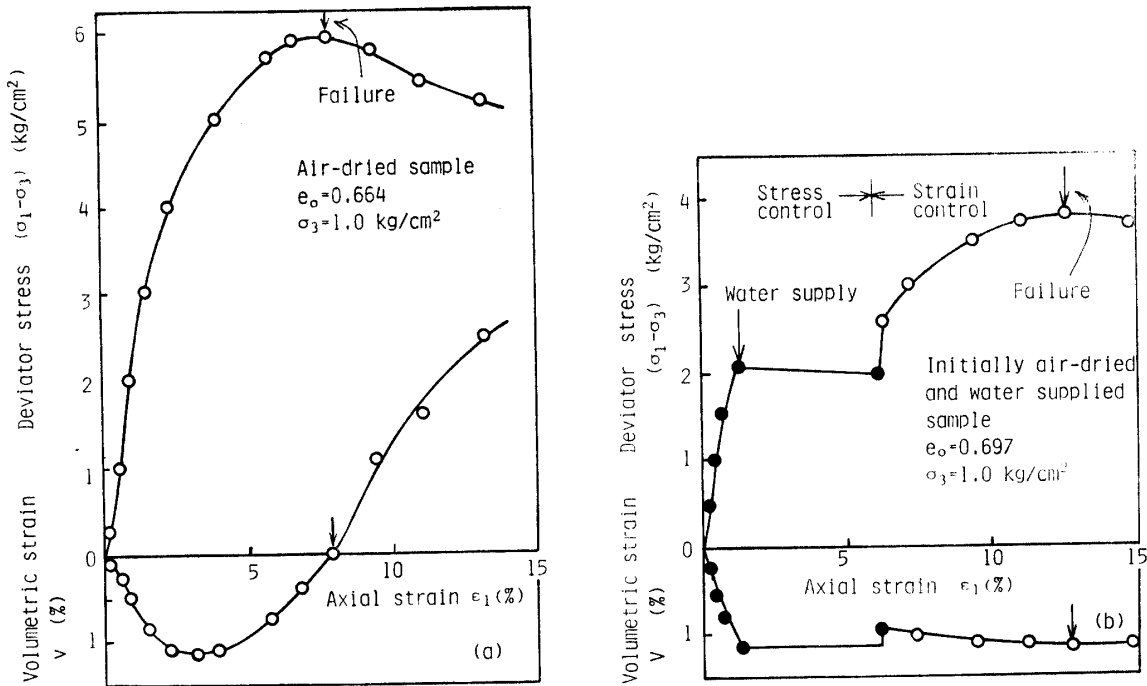


Fig. 4 Typical stress-strain curves in drained triaxial compression tests:
 (a) Air-dried sample, (b) Initially air-dried and water supplied sample.

Table 2 Results of drained triaxial compression tests ($\sigma_3 = 1.0 \text{ kg/cm}^2$)

State of sample	Test No.	Initial void ratio	Maximum deviator stress $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ (kg/cm ²)	Maximum stress ratio $(\sigma_1/\sigma_3)_f$	Dilatancy rate at failure $(dv/d\epsilon_1)_f$	Value of ϕ_{max}	Value of $\bar{\phi}$
Air-dried	1	0.664	5.96	6.96	-0.43	48.5	41.2
	2	0.675	5.47	6.47	-0.27	47.1	42.2
	3	0.719	5.29	6.29	-0.29	46.5	41.3
	4	0.814	4.68	5.68	-0.15	44.5	41.5
	5	0.865	4.05	5.05	-0.12	42.0	39.6
	6	0.920	3.73	4.73	-0.03	40.6	40.0
	7	0.948	3.73	4.73	0.00	40.6	40.6
Initially air-dried and water supplied	8	0.582	4.31	5.31	-0.07	43.1	41.6
	9	0.644	3.98	4.98	0.00	41.7	41.7
	10	0.697	3.84	4.84	0.01	41.1	41.2
	11	0.777	3.55	4.55	0.02	39.8	40.2
	12	0.843	3.05	4.05	0.04	37.2	38.1

(a) 図の $(\sigma_1 - \sigma_3)_f = 5.9 \text{ kg/cm}^2$ に比べて64%に過ぎない。両供試体の初期間隙比の違いを考慮に入れても、水の作用によって30%近いせん断強度低下が生じたことになる。この強度低下の主な原因が粒子破碎にあることは先の研究で示したとおりであるが、その定量的議論は次節で述べる。

Table 2 は、実験結果をまとめたものである。また、

この結果をもとに、初期間隙比の変化に伴う最大主応力比 $(\sigma_1/\sigma_3)_f$ およびダイレイタンスーレート $(dv/d\epsilon_1)_f$ の変化を図示したのが Fig. 5 である。図中、矢印は、破壊時のダイレイタンスーレートがちょうどゼロとなるような供試体の初期間隙比 e_0 およびそのときの $(\sigma_1/\sigma_3)_f$ 値を示したものである。

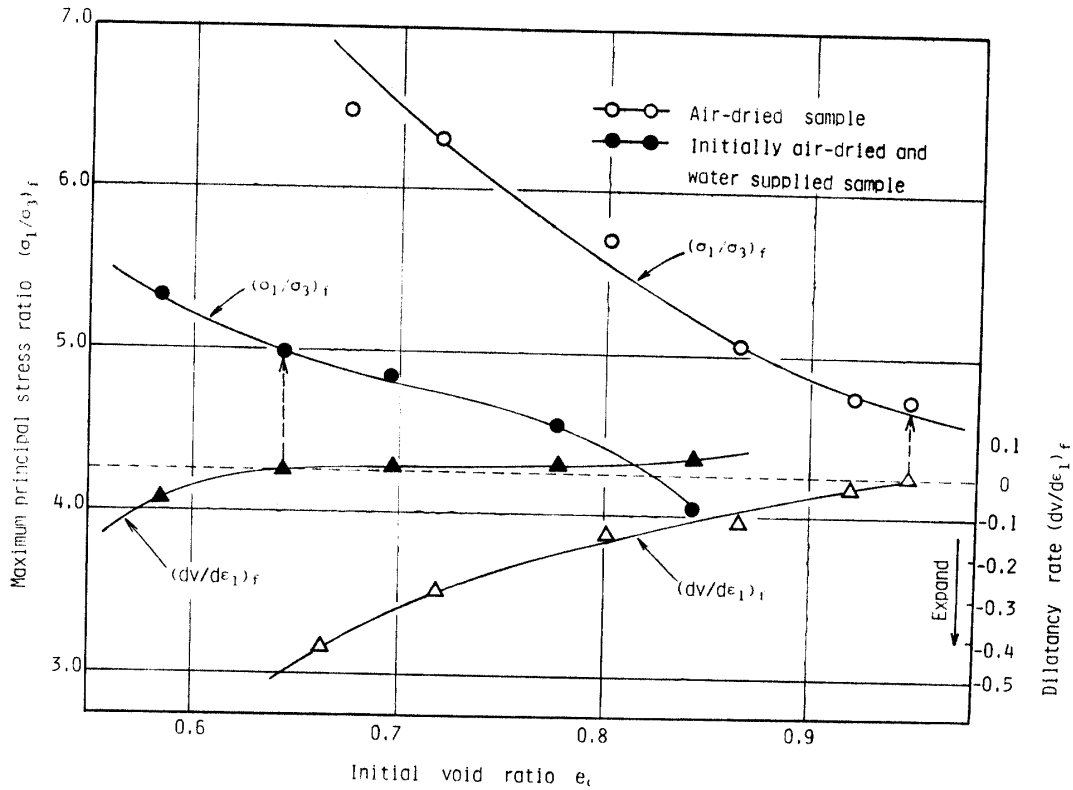


Fig. 5 Changes of maximum principal stress ratio and dilatancy rate with increasing initial void ratio.

4. 考 察

以上の実験結果に基づき、本実験試料のせん断強度に及ぼす摩擦効果、ダイレイタンスー効果、および粒子破碎効果（ただし再配列効果を含む）の寄与量について検討してみる。

今、試料のモール破壊包絡線は、原点を通り $\sigma_3 = 1 \text{ kg/cm}^2$ のモール円に接する直線で表わせると仮定する。この破壊包絡線の傾きを ϕ_{\max} とすると、

$$\sin \phi_{\max} = \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 + \sigma_3} \right)_f \quad (2)$$

これより、

$$\left(\frac{\sigma_1}{\sigma_3} \right)_f = \frac{1 + \sin \phi_{\max}}{1 - \sin \phi_{\max}} = \tan^2 \left(45 + \frac{\phi_{\max}}{2} \right) \quad (3)$$

Rowe のストレスダイレイタンスー理論⁵⁾ に準じて式 (3) に破壊時のダイレイタンスーファクター $(1 - dv/d\epsilon_1)_f$ が導入できると仮定すると、

$$\left(\frac{\sigma_1}{\sigma_3} \right)_f = \left(1 - \frac{dv}{d\epsilon_1} \right)_f \tan^2 \left(45 + \frac{\bar{\phi}}{2} \right) \quad (4)$$

上式右辺の第1項は、Rowe 理論からの類推によって、破壊点におけるダイレイタンスー効果を表わしていると解釈できる。そうすると、右辺第2項の $\bar{\phi}$ は、式

(1) の ϕ_{\max} から ϕ_a を除いたものに相当することになり、

$$\bar{\phi} = \phi_s + \phi_{cr} \quad (5)$$

さて、先に Table 1 に示したように、 ϕ_s の値は、気乾試料では、 $\phi_s = \phi_{sa} = 20.0^\circ$

飽和試料では、 $\phi_s = \phi_{sw} = 27.3^\circ$

ϕ_{\max} および ϕ_s の値がわかったので、式 (1) において $\phi_a = 0$ の場合には ϕ_{cr} を求めることができる。このときは $(dv/d\epsilon_1)_f = 0$ であるから、式 (4) は

$$\left(\frac{\sigma_1}{\sigma_3} \right)_f = \tan^2 \left(45 + \frac{\bar{\phi}}{2} \right) \quad (6)$$

Fig. 5 において、 $(dv/d\epsilon_1)_f = 0$ に相当する $(\sigma_1/\sigma_3)_f$ の値を求め、式 (6) によって $\bar{\phi}$ を計算すると次のようになる。

気乾供試体では $e_0 = 0.95$ において、 $(\sigma_1/\sigma_3)_f = 4.67$,

$$\therefore \bar{\phi} = \bar{\phi}_a = 40.4^\circ$$

飽和供試体では $e_0 = 0.65$ において、 $(\sigma_1/\sigma_3)_f = 4.98$,

$$\therefore \bar{\phi} = \bar{\phi}_w = 41.7^\circ$$

式 (5) に $\bar{\phi}$ および ϕ_s を代入すると、

気乾供試体では、

$$\phi_{cr} = \phi_{cra} = \bar{\phi}_a - \phi_{sa} = 40.4^\circ - 20.0^\circ = 20.4^\circ$$

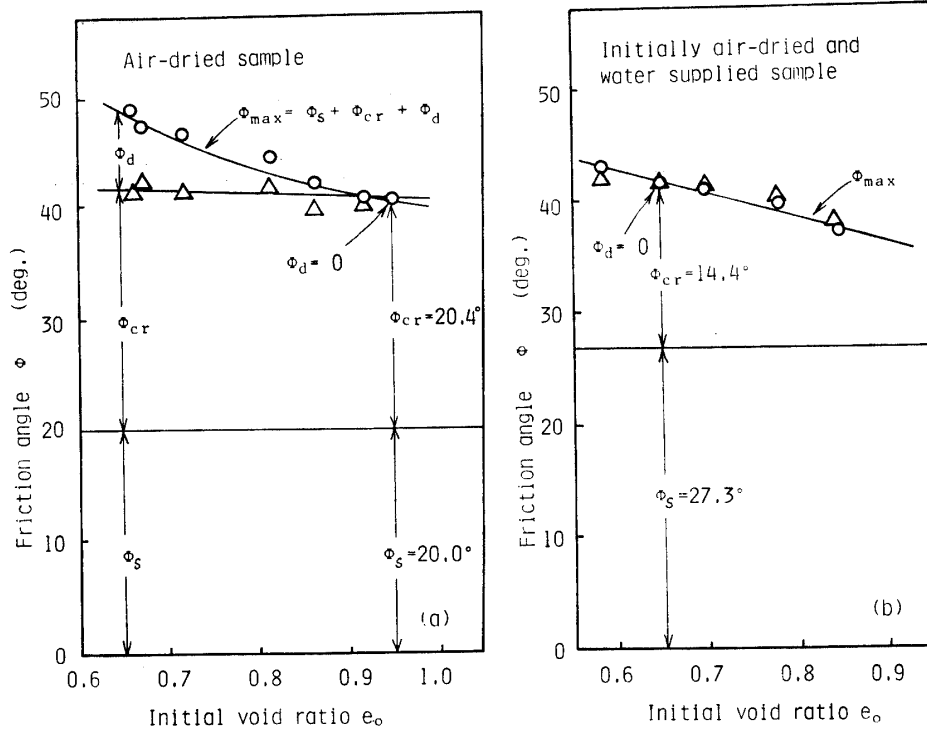


Fig. 6 Effect of dilatancy, particle-crushing and rearrangement on the measured angle of internal friction.

飽和供試体では、

$$\phi_{cr} = \phi_{crw} - \bar{\phi}_w - \phi_{sw} = 41.7^\circ - 27.3^\circ = 14.4^\circ$$

上の計算から、水の作用によって土粒子は破碎されやすくなり、 ϕ_{cr} の値は 20.4° から 14.4° に低下したと見ることが出来る。

上述の議論は初期間隙比が異なる場合について行ったのであるが、同一間隙比の気乾供試体と飽和供試体について比較検討するために、気乾供試体の $e_0 = 0.65$ の場合の ϕ_{cr} 値を求めてみる。この場合には、Fig. 5より、 $(\sigma_1/\sigma_3)_f = 7.1$ 、 $(dv/d\varepsilon_1)_f = -0.47$ 。これらの値を式(4)に代入すると、

$$\tan^2 \left(45 + \frac{\bar{\phi}}{2} \right) = \left(\frac{\sigma_1}{\sigma_3} \right)_f \left(1 - \frac{dv}{d\varepsilon_1} \right)_f = 4.83$$

$$\therefore \bar{\phi} = \bar{\phi}_a = 41.1^\circ$$

$$\therefore \phi_{cr} = \phi_{cra} = \bar{\phi}_a - \phi_{sa} = 21.1^\circ$$

この ϕ_{cra} 値は、先に求めた $e_0 = 0.95$ における ϕ_{cra} 値(= 20.4°)と大差ないのが注目される。同様な方法で種々の初期間隙比の供試体について $\bar{\phi}$ 、 ϕ_{cr} を計算して図示したのがFig. 6である。

以上のことから、初期間隙比が 0.65 の気乾・飽和供試体の ϕ_{max} 値の内容は次のように表わせる。

気乾供試体 ($e_0 = 0.65$):

$$\phi_{max} = \phi_s + \phi_d + \phi_{cr} = 20.0^\circ + 7.8^\circ + 21.1^\circ = 48.9^\circ$$

飽和供試体 ($e_0 = 0.65$):

$$\phi_{max} = \phi_s + \phi_d + \phi_{cr} = 27.3^\circ + 0^\circ + 14.4^\circ = 41.7^\circ$$

つまり、水分の作用によって、すべり摩擦効果は 7.3° 増加するが、ダイレイタンスー効果は 7.8° 減少し、また、粒子破碎効果+再配列効果は 6.7° 減少する。このようにして、飽和供試体の内部摩擦角 ϕ_{max} は気乾供試体のそれより 7.2° 低くなったものと解釈できる。

水の作用によるせん断強度低下率を δ とすると、 $e_0 = 0.65$ の場合には次のようになる。

$$\begin{aligned} \delta &= \frac{(\sigma_1/\sigma_3)_{fa} - (\sigma_1/\sigma_3)_{fw}}{(\sigma_1/\sigma_3)_{fa}} \times 100 \\ &= \frac{7.12 - 4.97}{7.12} \times 100 = 30.2 (\%) \end{aligned}$$

5. まとめ

まさ土のせん断強度成分は式(1)のように3つの効果に分けることができるとして、各効果の定量ならびにそれらの水分の作用による変化を調べたような知見を得た。

(1) まさ土に含まれていた風化花崗岩の岩片を用いてすべり摩擦効果 ϕ_s を測定した結果、 105°C 炉乾燥試料では 14.5° 、気乾試料では 20.0° 、湿潤試料では 27.3° という結果を得た。

(2) まさ土の気乾試体および飽和供試体について初期間隙比を変えて排水三軸圧縮試験を行った。おのおのの供試体において、 $(dv/d\varepsilon_1)_f=0$ に対応する $(\sigma_1/\sigma_3)_f$ 値を求め、これを式(6)に適用し、さらに式(5)が成立つと仮定して、粒子破碎効果+粒子再配列効果 ϕ_{cr} を求めた。

(3) (2) はダイレイタンシー効果 $\phi_d=0$ の場合を考えているが、式(4)が成立つと仮定すると、 $(dv/d\varepsilon_1)_f \neq 0$ の場合の $\bar{\phi}=\phi_s+\phi_{cr}$ を計算できる。この方法で $e_0=0.65$ の条件での気乾・飽和両供試体の3つの効果を比較検討した。その結果、

(4) 水分の作用によって、 ϕ_s は 7.3° 増加するものの、 ϕ_d は 7.8° 減少し、 ϕ_{cr} も 6.7° 減少して、結局

測定される内部摩擦角 ϕ_{max} は 48.9° から 41.7° に減少したと解釈できる。

参 考 文 献

- 1) 福田・西田・澤：土と基礎，**207**, 77 (1975)
- 2) O-hara, S. and Miura, N.: 6th ARC, **1**, 55 (1979)
- 3) Miura, N.: Natural Disaster Science, 1979 (1980)
- 4) Lee, K. L. and Seed, H. B.: ASCE, **93**, SM 6, 117 (1967)
- 5) Rowe, P. W.: Proc. Roy. Soc., **A. 269**, 500 (1962)
- 6) Horn, H. M. and Deere, D. U.: Geotechnique, **12**, 319 (1962)

(昭和55年4月9日 受理)