

# シラスの物理的・力学的性質に関する研究 (第3報)

原位置強度試験

阿部雅雄・河原田礼次郎・難波直彦

## Studies on the Physical and Mechanical Properties of the Shirasu

### III. On the *In-situ* Strength Tests

Masao ABE, Reijiro KAWAHARADA and Naohiko NAMBA

(Laboratory of Agricultural Engineering)

## I ま え が き

すでに本研究の第1報でシラスの乱さない試料のせん断試験についてのべたが、その試料の採取そのものに非常な難しさがあるのと、試験の装置・方法等においても現在からみると不十分な点もあり、また第2報にもものべたように、限られた試験機のわくの大きさでは、シラス層中の軽石の影響が十分に表わせないで、今回はいままでと違って原位置におけるシラスの強度試験を行なった。

もとよりある特定の条件の下という限られた範囲での実験であるので、十分なものとはいえないが、実験室では求めることのできない状態での諸強度を知り得たので、今後のシラスがけの安定や、せん断特性の研究の手掛りになるものと思う。

実験を行なった場所は、鹿児島市坂元町上の原団地の東部で、市の宅地造成地の一部を借用したものである。

実験の項目を次に示す。

- (1) せん断試験 (2) 引張り試験 (3) 圧縮試験 (4) 摩擦試験

なお本研究には、鹿児島大学工学部建築学科上田通夫教授、立川正夫助教授の御協力を戴いたほか、鹿児島県住宅課の御援助を得た。ここに感謝の意を表す。

## II 試験地シラスの土性指数

### 1. 試料

土質試験に供した試料は、できるだけ自然に滞積したままのシラス層のものであるように、試験地の表層を約 30 cm はぎ取ってから、スコップで掘り取った。自然状態の指数を求めた供試体は、直径 5.0 cm、長さ 5.1 cm、内容積 100 cm<sup>3</sup> の刃先付きの採土円筒をハンマーで打込んだ後、周囲をコテで掘り、注意深く取り出したものである。

### 2. 土性指数

室内試験で求めた土性指数を Table 1 に、粒度加積曲線、突き固め曲線を Fig. 1, Fig. 2 に示す。Table 1 の自然状態の指数は、前記のようにして採取した 24 個の供試体から得た値の分布範囲並びに平均値を示している。また同表及び Fig. 1 には参考のために、鹿児島市郡元町唐湊、宮崎県高城町四家のシラスの諸指数をもあわせ掲げた。ひとくちにシラスといつてもこのように場所によってその組成にかなりの違いがあることに注目すべきであろう。

Table 1. Index Properties of *Shirasu*

Sample	Test site	Kagoshima-City, Toso	Miyazaki-Pref.* Takajo-machi
Specific gravity	Gs	2.459	2.34
Natural water content	w(%)	19.4 -26.4 (Av. 22.1)	28.0
Natural wet unit weight	(kg/cm <sup>3</sup> )	1.16- 1.47 (Av. 1.36)	1.468
Natural dry unit weight	(kg/cm <sup>3</sup> )	0.96- 1.19 (Av. 1.11)	1.147
Natural void ratio	e	1.06- 1.56 (Av. 1.21)	1.04
Natural saturation degree	Sr (%)	32.8 -54.3 (Av. 44.9)	63.0

\* H. Fujimoto (1965)

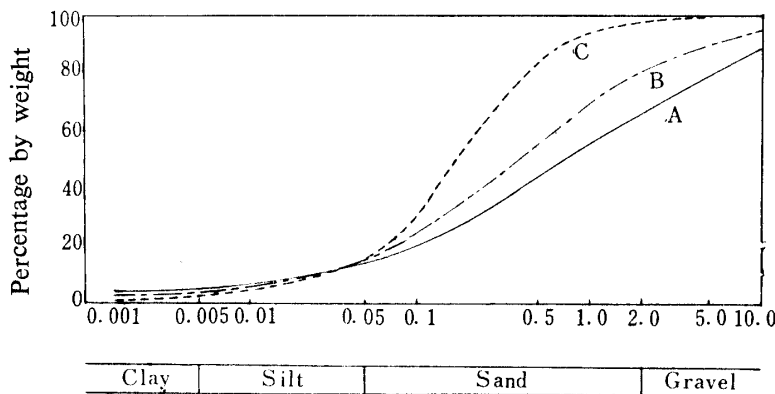


Fig. 1. Grain size distribution curve

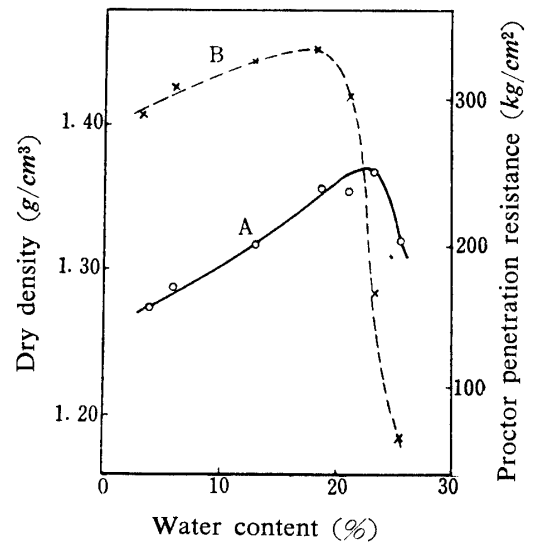
A : Test site B : Kagoshima Toso  
C : Miyazaki Takajo

Fig. 2. Compaction curve

A : Compaction curve  
B : Penetration curve

### III 試験の装置と方法

試験地は宅地造成工事が行なわれているところであつたので、土層が人工的に乱された部分为了避免のために、表層約 30 cm 厚さの土を削り取つて試験に取り掛かつた。

#### 1. せん断試験

できるだけ平らに削つた地表面上に、20×20 cm 角、厚さ約 10 cm のモルタル製載荷板を現場打ちで打設し、3～4 昼夜放置してモルタルが硬化した後、Photo. 1 に示す載荷装置で垂直荷重を加えた。せん断力は容量 1 トンの環状力計を介して 3 トンジャッキで水平に加え、この力計でせん断抵抗を測定すると共に、水平方向のせん断変位及び載荷板の上下方向の変位を 1/100 mm ダイアルゲージで読み取つた (Photo. 2)。せん断方式はひずみ制御であり、せん断の速さは平均約 0.8 mm/min である。

また平面的に試験場所が拡がつて土層の均質性が失われるのを避けると共に、深さ方向のせん断強度の変化を調べることも考えて、Fig. 3 に示すように、深さを 3 段階に変えて、計 9 回の試験を行な

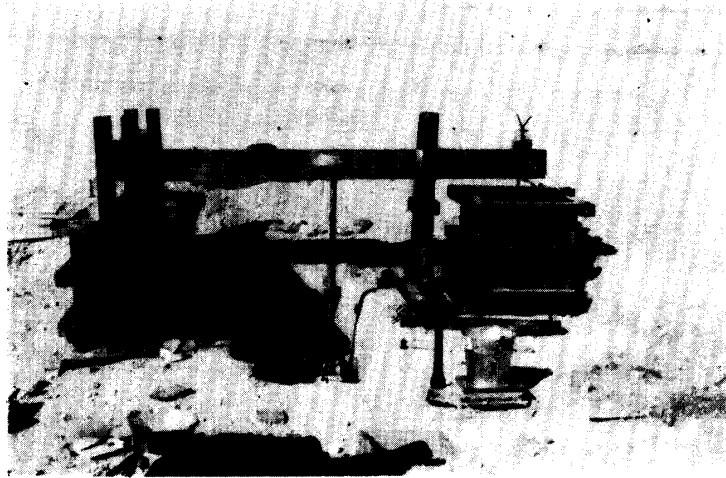


Photo. 1. Loading apparatus for shear test

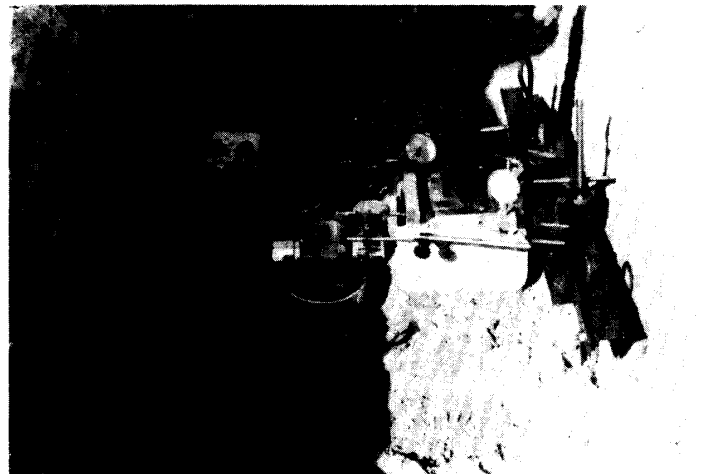


Photo. 2. Shearing apparatus

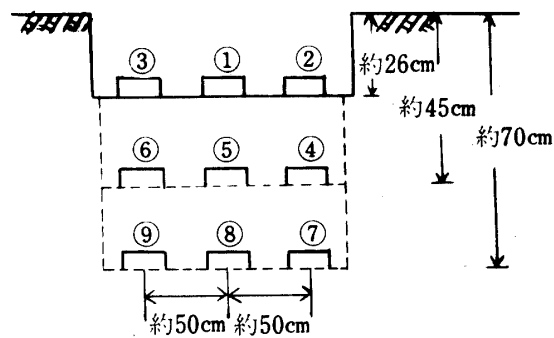


Fig. 3. Sectional diagram of shear tests

つた。

## 2. 引張り試験

地表面に底面の直径約 15 cm, 高さ約 5 cm の, おわんをふせたような形の小さい土まんじゅうを削り出し, これに径 15 cm, 高さ約 10 cm の石膏製載荷板を現場打ちで作った。この載荷板の中央には, 引き上げ用の掛け金具を埋め込んでおいた。

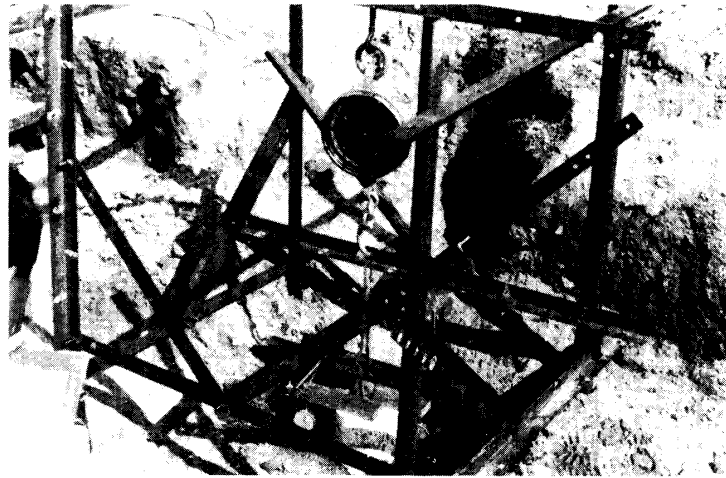


Photo. 3. Tension test

引張り力は、容量 100 kg (最小目盛 500 g) のバネ秤を用いて、ネジ機構によつて加えると共に、1/100 mm のダイヤルゲージによつて、載荷板の上下方向の変位を測定した (Photo. 3).

### 3. 圧縮試験

地表面に直径 20 cm、高さ 5 cm の石膏載荷板を現場打ちで打設しておいてから、この載荷板に合わせて、高さ 40 cm の円柱形の土柱を削り出していた。粘着性の乏しいシラス層から円柱を削り出すのは極めて慎重さを要する作業で、コテ、細い鉄棒、小刀を用いてたんねんに削つていったが、4 個の供試体を作るのに、7 人掛りで約 4 時間を要した。

载荷にはせん断試験の垂直荷重装置を利用し、木製のはりの中央にジャッキを下向きに取付けた。このジャッキにより、1 トンの環状力計を通して土円柱に上から圧縮力を加えると共に、1/100 mm ダイヤルゲージで圧縮変位を測定した (Photo. 4)。

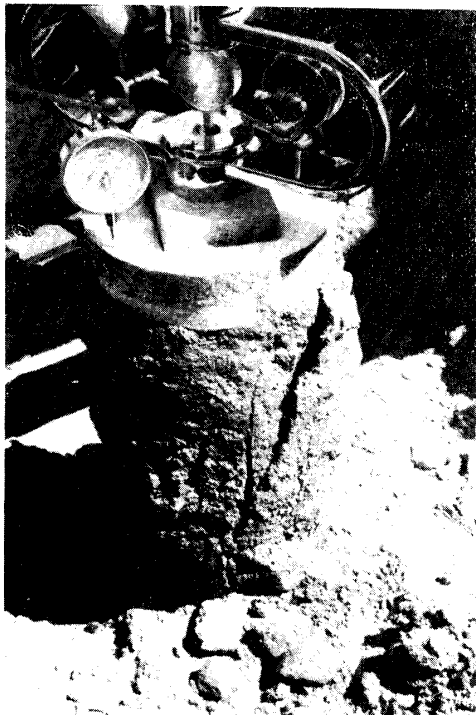


Photo. 4. Compression test

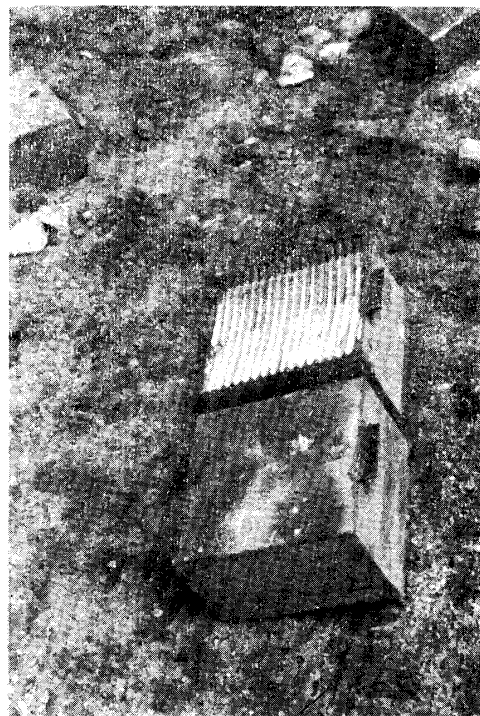


Photo. 5. Base of loading plates for friction test

#### 4. 摩擦試験

あらかじめ  $20 \times 20 \text{ cm}$  角, 厚さ約  $10 \text{ cm}$  のモルタル製載荷板を2個作製しておいた。その1つは底面を滑面に仕上げ, 他の1つはピッチ  $11.5 \text{ mm}$ , 高さ  $3.5 \text{ mm}$  の波状の歯形をついた粗面にしておいた (Photo. 5)。載荷板を置く地表面は軽石の突起もていねいに削つて, できるだけ平らに仕上げしておいた。その他はせん断試験と全く同じ手順で垂直荷重を加えておき, モルタル面とシラス面との間の摩擦係数を求める試験を行なつた。

### IV 試験の結果と考察

#### 1. せん断試験

せん断試験の結果を Fig. 4, Fig. 5 及び Table 2 に示す。Fig. 4 のせん断変位—せん断応力曲線図は, 代表的なものとして垂直荷重  $\sigma = 0.70 \text{ kg/cm}^2$  のものだけを示すに留めている。

せん断試験終了後載荷板を静かに取り上げたところ, 載荷板底面とシラスとの付着が良好なものは Photo. 6 のように載荷板に厚くシラスが付着し, せん断面が完全にシラス内に生じている事が明らかである。一方 No. 4, No. 5, No. 6 及び No. 9 の4個はシラスの付着が不十分で, せん断面が完全にシラス層内に生じているとはいえない状態であつた。これは Fig. 4, Fig. 5 にも現われて

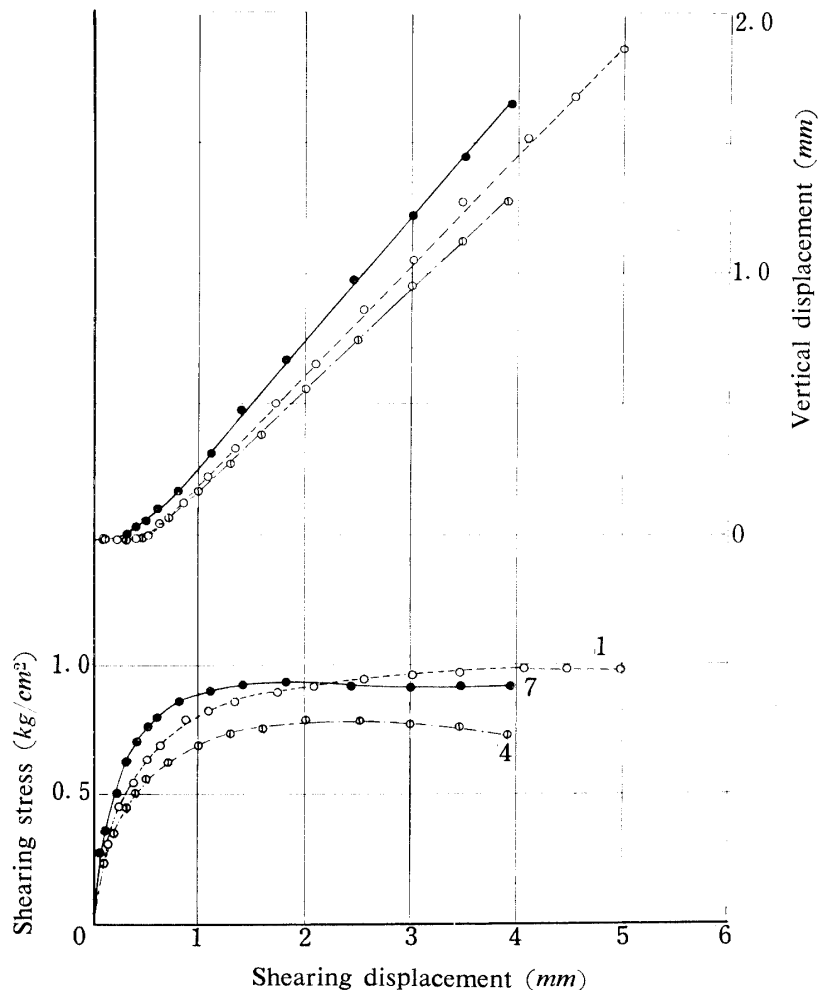


Fig. 4. Plots of typical shear tests ( $\sigma = 0.70 \text{ kg/cm}^2$ )

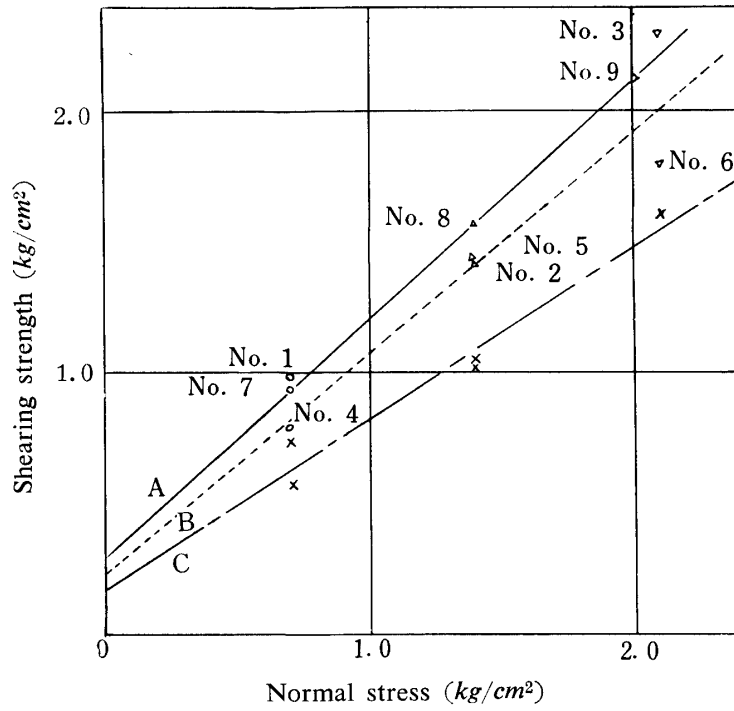


Fig. 5. Results of shear tests

A :  $S=0.29+\sigma \tan 42^\circ$     B :  $S=0.23+\sigma \tan 40^\circ$     C :  $S=0.17+\sigma \tan 33^\circ 20'$

Table 2. Index Properties on Shear Tests

Specimen No.	Wet density $\gamma$ (g/cm <sup>3</sup> )	Dry density $\gamma_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	Water content w (%)	Void ratio e	Satu. degree Sr (%)	Note
1	1.31	1.08	21.2	1.27	41.0	GL-26 cm
2	1.31	1.08	21.4	1.27	41.4	"
3	1.38	1.14	21.3	1.16	45.0	"
4	1.34	1.11	21.2	1.22	42.7	GL-45 cm
5	1.31	1.10	19.4	1.23	38.6	"
6	1.41	1.18	19.6	1.09	44.1	"
7	1.42	1.18	21.2	1.08	46.1	GL-70 cm
8	1.35	1.13	19.0	1.18	40.7	"
9	1.31	1.10	18.9	1.24	38.0	"



Photo. 6. Shear plane at shear test

おり、シラスの付着が不十分なものは、せん断強度がいく分小さい。よつて以上の4個を除いたシラスの付着良好な、No. 1, No. 2, No. 3, No. 7, No. 8 の5個だけについて計算した破壊線を、Fig. 5 に実線で示している。なお参考のために、付着不良の4個の結果についても破壊線を求め、同図中に破線で示している。以上の結果を COULOMB の式で表わすと、せん断強度  $S$  は、

$$\text{付着良好の場合} \quad S(\text{kg/cm}^2) = 0.29 + \sigma \tan 42^\circ$$

$$\text{付着不良の場合} \quad S(\text{kg/cm}^2) = 0.23 + \sigma \tan 40^\circ$$

となる。

また深さ方向のせん断強度の変化は、Fig. 5 でみるように明らかではなく、付着の影響の方がはるかに顕著である。僅か 50 cm 程度の深さの違いでは、もし強度に変化があつたとしても実験の精度や土層の不均一性のために打ち消されてしまうものと考えられる。

## 2. 引張り試験

引張り試験の結果を Fig. 6, Table 3 に示す。引張り強度の平均値は  $0.067 \text{ kg/cm}^2$  となる。

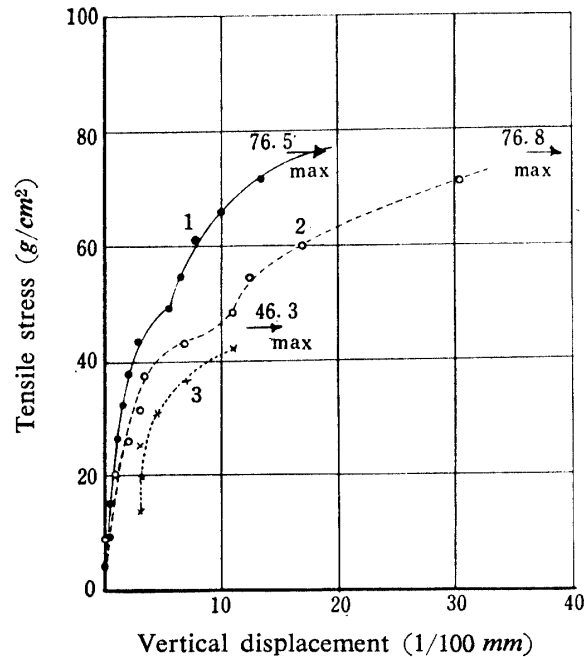


Fig. 6. Results of Tension Tests

Table 3. Index Properties on Tension Tests

Specimen No.	Wet density $r(\text{g/cm}^3)$	Dry density $r_d(\text{g/cm}^3)$	Water content $w(\%)$	Void ratio $e$	Satu. degree $S_r(\%)$
1	1.16	0.96	21.2	1.56	32.8
2	1.45	1.18	23.0	1.08	51.9
3	1.47	1.19	23.5	1.07	54.3

## 3. 圧縮試験

圧縮試験の結果を Fig. 7, Table 4 に示す。破壊亀裂の状態は Photo. 4 のようであつた。

4個の供試体のうち No. 4 は圧縮試験を失敗した。また No. 2 は他の3個に比べて軽石の含有量が少なく、含まれている軽石は比較的小さなものであつた他、全体に粗砂が縦方向に塊状に含まれていた。

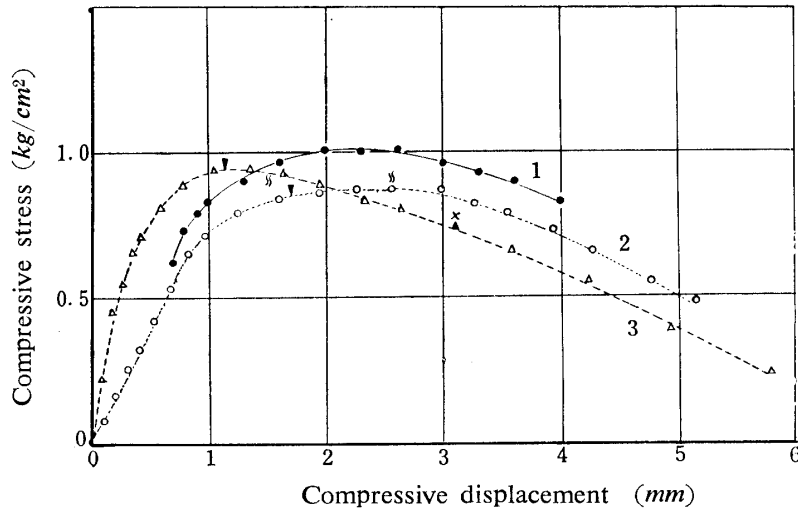


Fig. 7. Results of compression tests

Table 4. Index Properties on Compression Tests

Specimen No.	Wet density $r(g/cm^3)$	Dry density $r_d(g/cm^3)$	Water content $w(\%)$	Void ratio $e$	Satu. degree $S_r(\%)$	Angle of failure $\alpha(^{\circ})$	Cohesion* $c(kg/cm^2)$
1	1.38	1.11	24.5	1.22	49.2	62	0.37
2	1.37	1.09	26.4	1.26	50.3	60	0.25
3	1.38	1.10	25.5	1.22	49.2	62	0.25
4	1.47	1.19	23.3	1.06	54.2	—	—

\* determined by angle of failure ( $\alpha$ )

No. 1~No. 3 の3個について、圧縮強度  $q_u$  の平均値は  $0.94 kg/cm^2$  である。また主応力面（水平面）に対する破壊面の傾き角  $\alpha$  の平均値を  $62^{\circ}$  とすると、内部摩擦角  $\phi_f$  は

$$\phi_f = 2(\alpha - 45^{\circ}) = 34^{\circ}$$

となる。一方一軸圧縮強度  $q_u$  は、

$$q_u = 2c \tan\left(45^{\circ} + \frac{\phi_f}{2}\right)$$

で表わされるから、これから粘着力  $c$  は、

$$c = \frac{q_u}{2 \tan(45^{\circ} + \phi_f/2)}$$

であり、これによつて求めた  $c$  を Table 4 の右端の欄に示している。この  $c$  の平均値は、 $0.29 kg/cm^2$  である。

#### 4. 摩擦試験

摩擦試験の結果は Fig. 8, Fig. 9, Table 5 に示す。Fig. 8 のせん断変位—せん断応力曲線図には、せん断試験の場合と同様  $\sigma = 2.12 kg/cm^2$  の結果だけを示した。

Fig. 9 で得られた摩擦係数は、粗面で  $0.84$  ( $\phi = 40^{\circ}$ )、滑面で  $0.71$  ( $\phi = 35^{\circ}30'$ ) である。

なお試験載荷板の底面に付着したシラスは、載荷板を現場打ちしたせん断試験の場合よりもはるかに少なかったのは当然としても、かなりのシラスが付着していた。



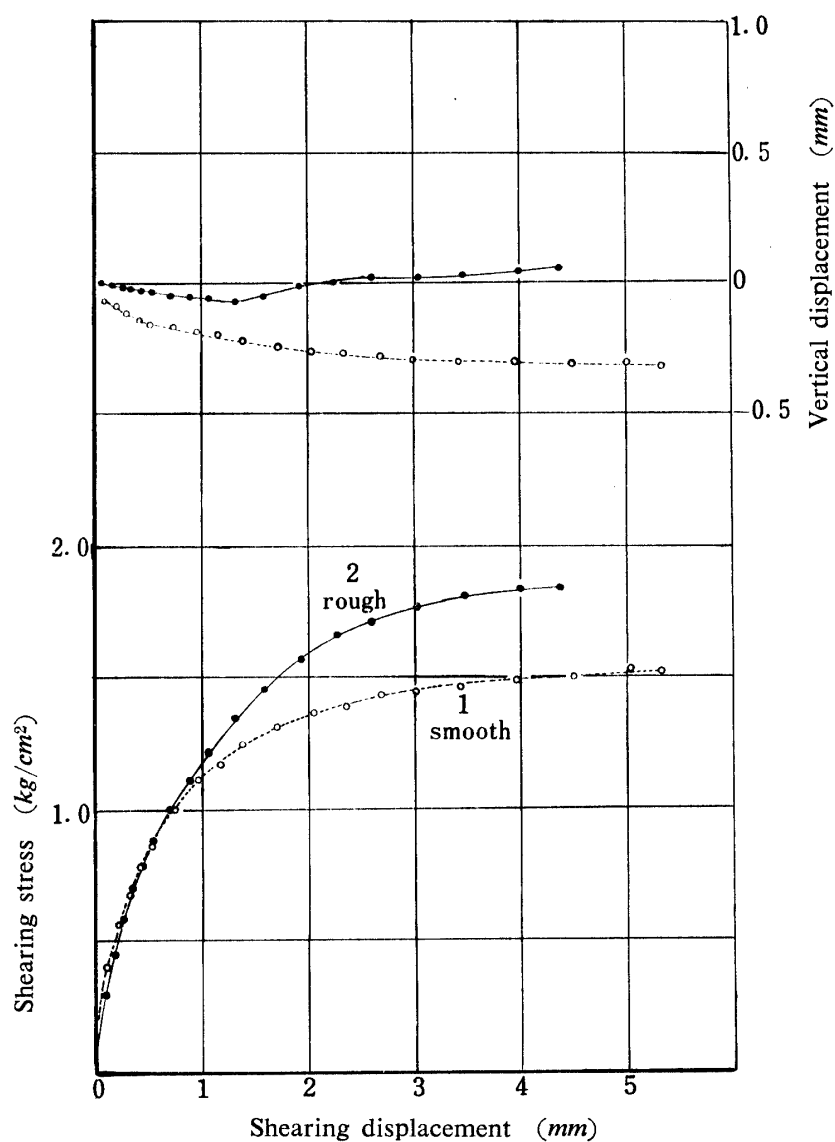
Fig. 8. Plots of typical friction tests ( $\sigma=2.12 \text{ kg/cm}^2$ )

Table 5. Index Properties on Friction Tests

Specimen No.	Wet density $r(\text{g/cm}^3)$	Dry density $r_d(\text{g/cm}^3)$	Water content $w(\%)$	Void ratio $e$	Satu. degree $S_r(\%)$	Note
1 2	1.34	1.13	19.5	1.18	38.8	smooth base rough base
3 4	1.40	1.14	22.8	1.16	48.4	smooth base rough base
5 6	1.29	1.04	24.2	1.36	43.3	smooth base rough base

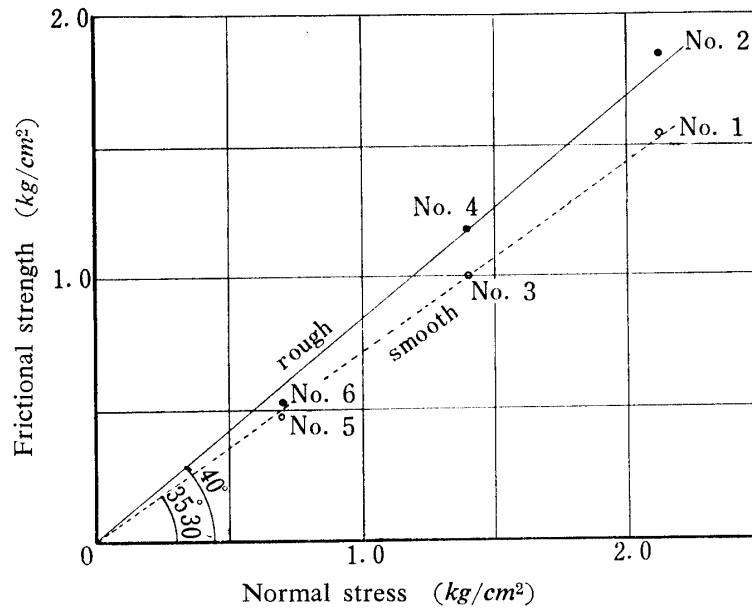


Fig. 9. Results of friction tests

## 5. 考 察

砂質土のせん断抵抗は、一般に粒子間の摩擦抵抗（滑り摩擦及びころがり摩擦）と、粒子のかみ合わせによる **Interlocking** とから成ると考えられている。砂質土がせん断破壊を起こすときにはこのかみ合わせがゆるめられ、それに伴って体積が増加する。この現象は土の密度が大きい程顕著で、ゆるい土ではむしろ体積の減少を伴う。

本実験の結果を Fig. 4 でみると、せん断変位—せん断応力の曲線はなだらかで、体積の変化もあまり大きくないところから、試験地のシラスは密な状態ではないようである。しかしながら、室内試験で求めた最大密度（突き固め試験による）は  $1.37 \text{ g/cm}^3$  でこのときの間ゲキ比  $e_{\min} = 0.80$ 、最小密度（乾燥試料を静かに注入）は  $0.63 \text{ g/cm}^3$  で  $e_{\max} = 2.89$  であつた。これから現場せん断試験において間ゲキ比  $1.08 \sim 1.27$  を示したシラスの相対密度は  $86.5 \sim 77.5 \%$  であり、密な状態に属することになる。

Fig. 4 のせん断変位—せん断応力曲線にピークがなく、なだらかな上昇曲線が主になつているのは、Photo. 6 に見るようにせん断破壊面が平面でなく、破壊後に **Interlocking** による体積増加が終つてからも、このせん断面のおうとつによつてあたかも体積の膨張と同じような持上り現象を呈したためと考えてよいであろう。

このせん断面がおうとつであるために載荷板を持上げる仕事は、シラスをせん断するための仕事とは別に考えるべきであるが、これを除いた実際のシラスのせん断抵抗がどれだけであつたかは、今回の観測データからは把握しえない。そこで TAYLOR<sup>1)</sup> の定義に従つて、Fig. 4 の最大せん断応力 ( $\tau_f$ ) の点について体積増加（持上りも含めて）に費されたせん断力  $\tau'$  を計算すると、両者の差  $\tau_f' = \tau_f - \tau'$  は土の粒子間の摩擦抵抗に相当するせん断力強度と考えることができる。これを前記の付着良好とした5個の試験の結果について求めたものを Fig. 5 に × 印で示している。せん断強度線は次式で表わされる (Fig. 5 の鎖線)。

$$S = 0.17 + \sigma \tan 33^\circ 20'$$

この式の右辺第2項の角度は土粒子間に現われる内部摩擦角<sup>2)</sup>であり、圧縮試験供試体の破壊面の傾

き角から求めた内部摩擦角  $\phi_f$  とほとんど等しい。

実用問題の設計に当つて必要なのは内部摩擦角  $\phi_f$  ではなくて、せん断抵抗角  $\phi$  である。この試験でえられたものは、排水試験によるせん断抵抗角  $\phi_d$  と考えてよいであろう。しかしながら前述のように、このせん断試験においてはせん断面が平面でないために生じた持上り現象を含んでいるので、ここでえられた  $\phi_d=42^\circ$  という値は、そのまま利用するには過大な数値と考えるべきである。とはいえこの試験では、妥当なせん断抵抗角の大きさを推定する手掛りはない。藤本<sup>5)</sup>が乱した試料(宮崎シラス)に対する排水三軸試験で得た  $\phi_d=39^\circ$  は、一応参考になるものと思われる。

粘着力については前報<sup>3)</sup>に述べたように、高さ数 10 m に及ぶシラスの垂直がけの安定を究明することに目標がある。本来粘性に乏しい砂質のシラスが、ほとんど垂直に近い高いがけを形成している事には、粘着力の効果をもついろんな力が考えられる。今回の試験結果からは、せん断試験での粘着力  $0.29 \text{ kg/cm}^2$  と補正計算による  $0.17 \text{ kg/cm}^2$  との差  $0.12 \text{ kg/cm}^2$  が Interlocking による見掛けの粘着力、また引張り強度  $0.067 \text{ kg/cm}^2$  を粒子間の凝結力と考えると、 $0.17 - 0.067 = 0.103 \text{ kg/cm}^2$  は間ゲキ内の負圧効果による見掛けの粘着力と考えることができる。しかしこのせん断試験の結果には、持上り現象が含まれていることや、一方圧縮試験における粘着力が  $0.29 \text{ kg/cm}^2$  であることは、この程度の簡単な野外試験のみでは解決できない複雑なものであることを示しているといえよう。

摩擦試験はコンクリート擁壁の安定を考えるための指針を得る目的で、補足的に行なつたものであるが、シラスに対して粗なコンクリート面の摩擦係数 0.84、滑らかな面の 0.71 は、一応計算の目安になるものと考えられる。

## V 摘 要

1. 鹿児島市内のシラスの自然土層に対して、原位置でせん断試験 (20×20 cm)、圧縮試験 (直径 20 cm, 高さ 40 cm)、引張り試験 (直径 20 cm)、摩擦試験 (20×20 cm) を行なつた。
2. 試験地のシラスは含水比 19.4~26.4% で飽和度 32.8~54.3%、間ゲキ比は 1.06~1.56 でかなり大きい、相対密度は比較的大きくて、シラスとしては密な状態のようである。
3. せん断試験の破壊面は、室内せん断試験機によるものと異なつて平面ではなく、おうとつがある。そのため体積膨張以外に載荷板の持上り現象が現われて、結果の解析を困難にしている。
4. せん断抵抗角は排水試験による  $\phi_d$  と考えられ、その値は  $42^\circ$  を示しているが、この中には持上り現象に対する仕事も含まれているので、このまま利用するには過大と思われる。 $40^\circ$  ないしはそれをやや下まわる程度と推察される。
5. 内部摩擦角は、せん断試験結果の補正計算及び圧縮試験供試体の破壊面の傾き角  $\alpha$  による計算から、 $33\sim 34^\circ$  程度と思われる。
6. 粘着力について、せん断試験、引張り試験の結果から、Interlocking と負圧効果とによる見掛けの粘着力及び凝結力によるものと分けて考察したが、せん断試験の持上り現象や、圧縮試験から得た粘着力との関係から、定量的に論ずることはできない。シラスがけの安定とからんで、より以上の研究が必要である。
7. 摩擦試験によるコンクリート面とシラスとの摩擦係数 0.84 (粗面)、0.71 (滑面) は、擁壁の計算に目安を与えるものとする。(昭和40年6月30日受理)

## 参 考 文 献

- 1) TAYLOR, D. W. : Fundamentals of Soil Mechanics, John Wiley & Sons, N. Y. (1948)
- 2) BISHOP, A. W. : Géotechnique, **2**, 113-116 (1950)
- 3) 河原田礼次郎 : 鹿児島大学農学部学術報告, **6**, 222 (1957)
- 4) 阿部雅雄・河原田礼次郎 : 鹿児島大学農学部学術報告, **9**, 101~110 (1960)
- 5) 藤本 広 : 土と基礎 **13**(2), 56~63 (1965)

## Résumé

This paper presents the results of the *in-situ* strength tests on *Shirasu*. In the test site, *Shirasu* layer is ascertained to have a relative density belonging to "dense" range.

The angle of shearing resistance (drained) has been fixed to be 42 degrees, but this value is reasonably assumed to be over-estimated to use for the practical purposes, owing to the fact that the failure planes on shear tests are not even, and that there are the up-growth of the loading plates besides volume change.

The test results obtained both from the obliquity of failure plane of the compression specimen and from modifying calculation of the result of the shear test show equally that the angle of internal friction is to be about 34 degrees.

Consideration was paid on the effects which the interlocking, negative pressure and congelation exert upon the cohesion, but more investigation is necessary to solve the problem finally.

The friction coefficients between the concrete base and *Shirasu* is fixed (in smooth base 0.71, in rough base 0.84), which will be of some use as a clue for the solution of practical problems.