

# シラスと砂のせん断特性の相違\*

春 山 元 寿

(昭和50年8月8日 受理)

## On the Difference in Shearing-Characteristics between "SHIRASU" and Sand

Motohisa HARUYAMA

(Laboratory of Erosion Control)

### まえがき

変形と応力の関係から土の挙動を解明する際に、強さに重点をおいてみるか、あるいは変形に重点をおいてみるかによって異なる方法がとられる。筆者は、これまでダイレイタンスを考慮しつつ、強さに研究の重点を置いてシラスのせん断特性を解明してきた<sup>1,2,3,4)</sup>、ここで、シラスは高い圧縮性を持つ代表的な砂質土とすることができる。一方、普通の砂については、最近変形特性や応力履歴が注目されるようになった。筆者は、高圧縮性の砂質材料としてシラスを選び、その変形特性を検討しつつある。シラスは、個々の粒子の性質、粒度配合、および粒子配列のしかたなどに基因して、その工学的性質は普通の砂に比較して特異である。そこで、シラスの変形特性を解明するにききだつて、シラスと砂のせん断特性を直接比較しておくことが必要である。本報は、排水三軸圧縮試験を行なつて砂とシラスの力学的性質の相違を明らかにしたものである。

### 試料および供試体

#### 1. 試料の性質

試料は山口県豊浦町産の標準砂（以下豊浦砂という）、鹿児島県根占町塩屋海岸産の砂（以下根占浜砂

という）、豊浦砂と同じ粒度を持つように調整したシラス（以下シラスAという）、および根占浜砂と同じ粒度を持つように調整したシラス（以下シラスBという）である。豊浦砂とシラスAは細砂に相当し、根占浜砂とシラスBは粗砂に相当する。調整したシラスの母材は鹿児島市唐湊産で、入戸軽石流の非溶結部のも

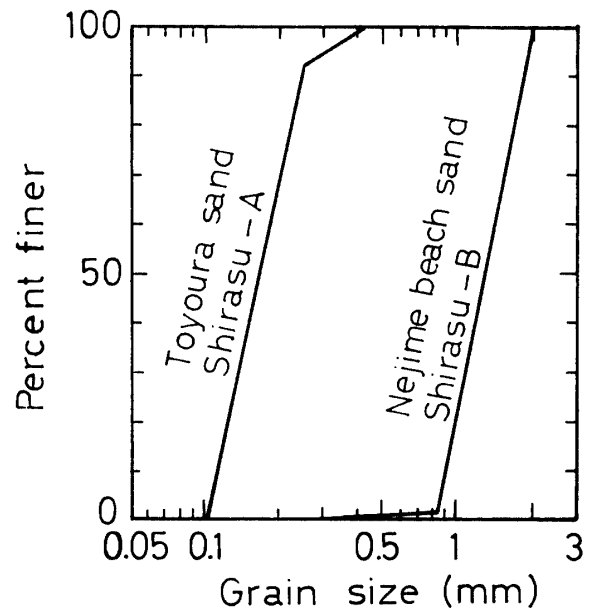


Fig. 1. Grain size distribution curves of samples.

Table 1. Physical properties of samples.

Properties	Toyoura sand	Nejime beach sand	Shirasu-A	Shirasu-B
Specific gravity of grains	2.65	2.63	2.39	2.47
Uniformity coefficient	1.64	1.52	1.64	1.52
Curvature coefficient	0.92	0.94	0.92	0.94
Maximum void ratio	0.974	0.805	2.052	1.570
Minimum void ratio	0.650	0.588	1.250	1.350
Maximum dry density ( $g/cm^3$ )	1.604	1.656	1.062	1.051
Minimum dry density ( $g/cm^3$ )	1.342	1.457	0.783	0.961

\* 本研究の概要は土木学会第27回年次学術講演会（昭和47年10月）、ならびに一部は第41回農業土木学会九州支部シンポジウム（昭和48年5月）において発表した。



Photo 1. Microphotographs of samples, (A) Toyoura sand, (B) Nejime beach sand, (C) Shirasu-A, and (D) Shirasu-B.

のである。

試料の粒度を Fig. 1 に、物理的性質を Table 1 に示す。各試料の最もゆるい状態の間ゲキ比  $e_{max}$  は、空気乾燥試料を内径 10.0 cm、高さ 12.5 cm の円筒モールドにスプーンで静かに入れて求めた。豊浦砂と根占浜砂の最も密な状態の間ゲキ比  $e_{min}$  は、内径 5.0 cm、高さ 10.0 cm の円筒モールドに空気乾燥試料を5層に分けて入れ、各層ごとに直径 4.97 cm、厚さ 0.7 cm の円板付きの突き棒を置き、木づちで40回の打撃を加えて求めた。シラスのそれは、内径10.0 cm の円筒モールドに空気乾燥試料を入れ、落下高さ約 0.1 cm のカムを利用した締固め装置を用いて500回の上下振動を与えて求めた。このときモールド内の試料の上には約 1,850 g のおもりをのせて固定しておいた。

豊浦砂と根占浜砂の鉱物組成はほとんど石英と長石であり、シラスAは主にガラス質粒子からなり、シラスBは軽石が優占し、そのほか若干の安山岩質の外來岩片を含む。

各試料の粒子の扁平率<sup>5)</sup>、細長率<sup>5)</sup>、および Mackey の形状係数<sup>6)</sup> を Table 2 に示す。シラス粒子は砂粒子より細長で、角張っているといえる。各試料の粒子形状を Photo. 1 に示す。

## 2. 供試体

供試体は直径 5.0 cm、高さ 12.5 cm の円柱形である。密度は密な状態からゆるい状態まで数段階に調整した。供試体はベDESTALに多孔アクリル板を敷き、ゴムスリーブをゴムバンドでシールした後、内径 5.0 cm のモールドをセットして、その中に所定量の試料を注ぎ込んで締固めて作成した。密な供試体は試料を4層に分けて注ぎ込み、各層ごとにモールドの外側から打撃による振動を与えて所定の密度まで締固め、ゆるい供試体ではかるく注ぎ込むだけとした。供試体の上面には多孔アクリル板を置き、キャップをセットし、ゴムスリーブをシールして、供試体にその上面から約 10 cm Hg のサクションをかけて、モールドを取除き、供試体を自立させ、その直径と高さを計測し

た。

## 試験方法

供試体は、その上面から約 10 cm Hg のサクションをかけ、下面から給水して飽和させ、完全飽和の後、サクションを解放させた。飽和中およびサクション解放後に供試体に変形しないように、あらかじめ  $0.035 \text{ kg/cm}^2$  の拘束圧を加えておいた。その後所定の拘束圧のもとで圧密を終了させ、拘束圧一定の条件下で圧縮力を加え、排水三軸圧縮試験を行なった。拘束圧は 0.5, 1.0, 1.5 および  $2.0 \text{ kg/cm}^2$  の4段階とした（ただし、根占浜砂のゆるい供試体については  $0.3 \text{ kg/cm}^2$  もとった）。圧縮速さは平均で供試体高さの 0.8 %/分を標準とした。供試体は両端面から排水させており、この圧縮速さでは不完全排水による間ゲキ水圧や Cavitation は発生しないことをあらかじめ確かめた。

拘束圧は水銀マンメーターで測定した。また、圧縮中は、軸圧、軸ヒズミ、および体積変化を測定した。

ここで用いる応力パラメーターは  $\sigma_1$  を最大主応力、 $\sigma_3$  を最小主応力とする偏差応力  $(\sigma_1 - \sigma_3)$ 、変形パラメーターは軸ヒズミ  $\epsilon$  と体積変化  $\Delta V/V$  である。 $\epsilon$  は圧縮を正とし、 $\Delta V/V$  は膨張を正としている。ここに、 $V$  は供試体の圧密終了時の体積、 $\Delta V$  は体積変化量である。

シラスAと豊浦砂、シラスBと根占浜砂の性質をそれぞれ比較することによって、シラスと砂のセン断特性の相違点を明らかにすることができる。

## 結果および考察

### 1. 偏差応力・軸ヒズミ・体積変化曲線

シラスの細砂部分を考えるものとして豊浦砂およびシラスAの  $(\sigma_1 - \sigma_3) \sim \epsilon \sim \Delta V/V$  曲線の代表例をそれぞれ Fig. 2 および 3 に示す。これらの図によって豊浦砂とシラスAの性質を比較すると、 $(\sigma_1 - \sigma_3) \sim \epsilon$  曲線の初期接線コウ配は豊浦砂のほうが急であるが、 $(\sigma_1 - \sigma_3)$  の最大値  $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$  はシラスAのほうが大

Table 2. Shape factors of grains.

Sample	Grain size (mm)	Flatness ratio		Elongation ratio		Mackey's shape factor	
		$\bar{p}$	$\sigma_p$	$\bar{q}$	$\sigma_q$	$\bar{m}$	$\sigma_m$
Toyoura sand	0.105-0.42	—	—	0.75	0.12	0.66	0.12
Nejime beach sand	0.25 -2.00	0.67	0.14	0.77	0.12	0.67	0.10
Shirasu-A	0.105-0.42	—	—	0.70	0.20	0.46	0.12
Shirasu-B	0.25 -2.00	0.72	0.14	0.71	0.14	0.54	0.11

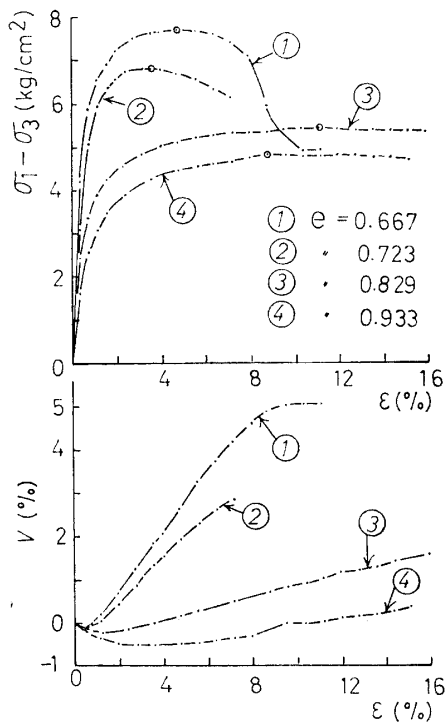


Fig. 2. Deviator stress-axial strain-volume change curves for drained triaxial compression-tests on Toyoura sand under confining-pressure of  $2.0 \text{ kg/cm}^2$ .

きい。  $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$  のとき供試体は破壊強さに達したと考える。破壊時の軸ヒズミ  $\epsilon_f$  はシラスAのほうが大きい。  $(\sigma_1 - \sigma_3) \sim \epsilon$  曲線は密な供試体ではピークを示し、ゆるいものではピークのはっきりしないなだらかな曲線となることは両者とも同様である。  $\Delta V/V$  と  $\epsilon$  の関係を見るとシラスと豊浦砂の間に重要な相違がみられる。すなわち、シラスAは豊浦砂に比べてセン断中の体積収縮量が非常に大きいということである。この両者の相違は球粒子と扁平粒子の体積変化特性の相違に一致する。扁平粒子の集まりは球粒子の集合体に比べてセン断の初期にかなり大きい収縮を起こすことが確認されている<sup>7)</sup>。したがって、砂とシラスの間の体積変化特性の違いは、粒子形状に依存するところが大きいと考えてよいであろう。さらに後述する粒子破碎の影響もある。

つぎにシラスの粗粒砂部分を考えるものとして、根占浜砂とシラスBの  $(\sigma_1 - \sigma_3) \sim \epsilon \sim \Delta V/V$  曲線の代表例をそれぞれ Fig. 4 および 5 に示す。これらの図において  $(\sigma_1 - \sigma_3) \sim \epsilon$  曲線を見ると、その初期接線コウ配および  $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$  はシラスBより根占浜砂のほうが、  $\epsilon_f$  はシラスBのほうが大きい。また、  $\Delta V/V \sim \epsilon$  曲線を見ると、根占浜砂は膨張を示しているのに反し

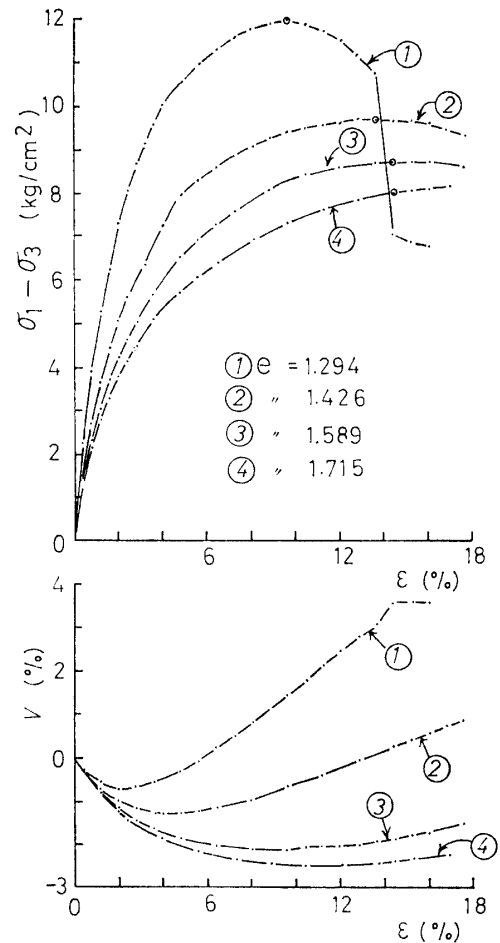


Fig. 3. Deviator stress-axial strain-volume change curves for drained triaxial compression-tests on Shirasu-A under confining-pressure of  $2.0 \text{ kg/cm}^2$ .

でシラスBは収縮のみを示している。他の拘束圧のもとでの試験結果も同じである。シラスの粗粒部分のこの収縮性のおもな原因は後述するように粒子破碎にある。

結局、シラスはその粒子形状の特異性と破碎性によって普通の砂に比べて圧縮性の高い土質材料といえることができる。したがって、シラスが非排水状態でセン断を受けると普通の砂よりも多くの間ゲキ水圧を発生し、流動化を起こしやすいといえることができる。

各試料の  $(\sigma_1 - \sigma_3) \sim \epsilon \sim \Delta V/V$  曲線から求めた諸性質を Table 3~6 に示す。

## 2. ダイレイタンシー

粒子の集まりが排水セン断を受けるとき、形の変化は必ず体積変化をともなう。この体積変化はダイレイタンシーとよばれており、粒子の骨組構造の変化や間ゲキの変化によって生じるもので、砂の強さに影響を

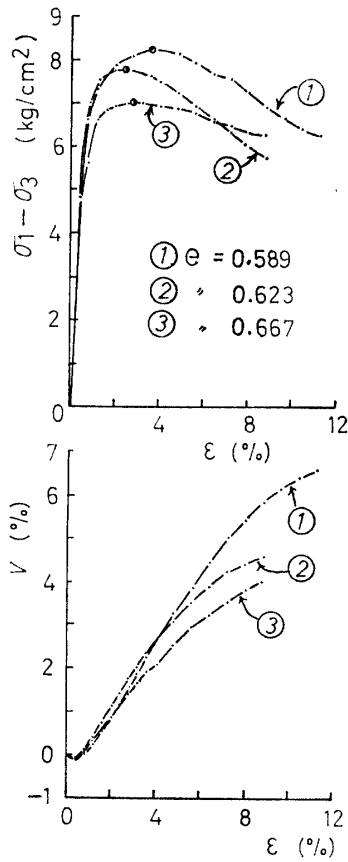


Fig. 4. Deviator stress-axial strain-volume change curves for drained triaxial compression-tests on Nejime beach sand under confining-pressure of  $2.0 \text{ kg/cm}^2$ .

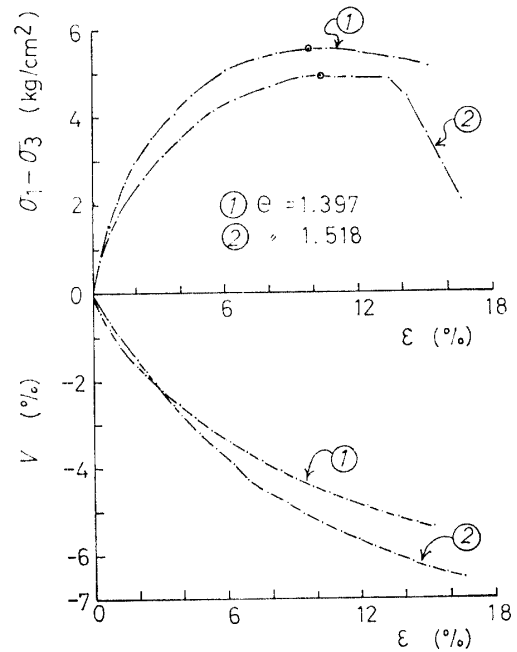


Fig. 5. Deviator stress-axial strain-volume change curves for drained triaxial compression-tests on Shirasu-B under confining-pressure of  $2.0 \text{ kg/cm}^2$ .

およぼす重要な因子の一つである。排水三軸圧縮試験における体積変化は、平均主応力の変化による部分とせん断応力の変化による部分とからなる。

Fig. 2~5 の  $\Delta V/V \sim \epsilon$  曲線からわかるように、密度の高いものほど膨張を示し、密度の低いものとか粒子破碎を起こすものは収縮する。工学的立場からは収縮を示す土質材料は好ましくない。

$\Delta V/V \sim \epsilon$  曲線において、軸ヒズミの増分  $d\epsilon$  に対する体積変化の増分  $d(\Delta V/V)$  の比  $d(\Delta V/V)/d\epsilon$  はダイレイタンスー指数と呼ばれている。いま、 $v = \Delta V/V$  とおいて、 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$  のときのダイレイタンスー指数を  $(dv/de)_f$  で表わす。 $(dv/de)_f$  によって供試体が破壊する状態での体積変化状況を知ることができ、またせん断強さの成分を知ることができる。

各試料の  $(dv/de)_f$  と相対密度の関係を Fig. 6 および 7 に示す。 $(dv/de)_f$  は、シラスAおよびBについては拘束圧  $\sigma_3$  の増加にしたがって小さくなっているが、豊浦砂については拘束圧の影響を受けていな

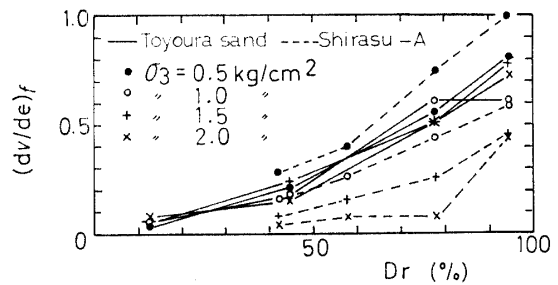


Fig. 6. Relation between dilatancy-rate at failure and relative density for Toyoura sand and Shirasu-A.

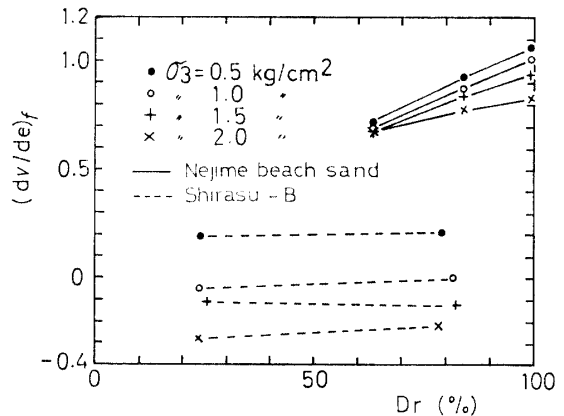


Fig. 7. Relation between dilatancy-rate at failure and relative density for Nejime beach sand and Shirasu-B.

Table 3. Summary of test results for Toyoura sand.

$e$	$D_r$ (%)	$\sigma_3$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$\varepsilon_f$ (%)	$\left(\frac{dv}{d\varepsilon}\right)_f$	$\sigma_3\left(\frac{dv}{d\varepsilon}\right)_f$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$(\sigma_1-\sigma_3)_f$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$(\sigma_1-\sigma_3)_{rf}$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$c(\sigma_1-\sigma_3)_R$ (kg/cm <sup>2</sup> )
0.667	94.7	0.5	4.8	0.81	0.40	2.00	1.60	0.88
		1.0	4.8	0.58	0.58	3.82	3.24	2.05
		1.5	4.8	0.77	1.15	5.75	4.60	2.60
		2.0	4.8	0.72	1.44	7.69	6.25	3.63
		$C$ (kg/cm <sup>2</sup> )					0.015	0.021
$\phi$					40°56'	37°13'	28°00'	
0.723	77.5	0.5	3.2	0.56	0.28	1.74	1.46	0.94
		1.0	3.2	0.61	0.61	3.62	3.01	1.87
		1.5	4.8	0.51	0.76	5.05	4.29	2.84
		2.0	3.6	0.51	1.02	6.81	5.79	3.83
		$C$ (kg/cm <sup>2</sup> )					0.035	0.018
$\phi$					38°39'	36°01'	29°24'	
0.829	44.7	0.5	6.4	0.21	0.10	1.38	1.28	1.05
		1.0	7.2	0.18	0.18	2.76	2.58	2.19
		1.5	7.2	0.24	0.36	4.20	3.84	3.10
		2.0	11.2	0.15	0.30	5.41	5.11	4.44
		$C$ (kg/cm <sup>2</sup> )					0.014	0.004
$\phi$					35°16'	34°04'	31°42'	
0.933	12.6	0.5	14.4	0.026	0.013	1.16	1.15	1.12
		1.0	14.4	0.052	0.052	2.35	2.30	2.18
		1.5	14.4	0.052	0.078	3.56	3.48	3.31
		2.0	8.8	0.078	0.156	4.83	4.67	4.33
		$C$ (kg/cm <sup>2</sup> )					-0.022	-0.009
$\phi$					33°22'	33°05'	30°26'	

い。根占浜砂は高い相対密度のもとでは拘束圧によって異なる  $(dv/d\varepsilon)_f$  を示しているが、相対密度が約 60% 程度で拘束圧の影響がなくなるようである。また、シラス A の試験結果によれば、低い拘束圧のもとにおけるせん断では粒子のかみ合いは体積膨張によってゆるめられ、拘束圧の増加とともにかみ合いは粒子破壊によって乱されることが考えられる。粒子破壊が生じなければ、豊浦砂にみられるように  $(dv/d\varepsilon)_f$  は拘束圧によってそれほど変化しないはずである。シラス B の  $(dv/d\varepsilon)_f$  は相対密度によっては変化していない。

### 3. セン断強さ

筆者は、 $(\sigma_1-\sigma_3)_f$  は式 (1) のように表わされると考えている<sup>8)</sup>。

$$(\sigma_1-\sigma_3)_f = (\sigma_1-\sigma_3)_R + (\sigma_1-\sigma_3)_R \left(\frac{dv}{d\varepsilon}\right)_f + \sigma_3 \left(\frac{dv}{d\varepsilon}\right)_f \quad (1)$$

ここに、 $(\sigma_1-\sigma_3)_R$  は Rowe の応力・ダイレイタンシー論<sup>9)</sup> によって補正した偏差応力で、式 (2) で求められる。

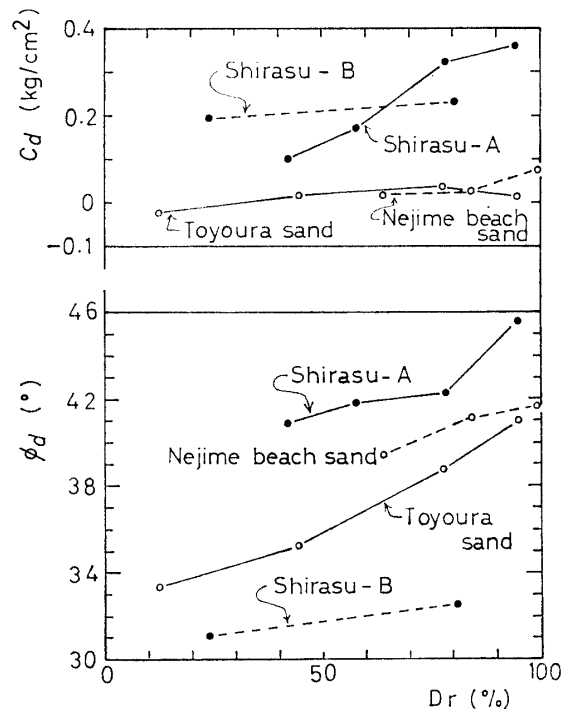


Fig. 8. Relation among angle of shearing-resistance, apparent cohesion, and relative density from drained triaxial compression-tests.

Table 4. Summary of test results for Shirasu-A.

$e$	$D_r$ (%)	$\sigma_3$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$\varepsilon_f$ (%)	$\left(\frac{dv}{d\varepsilon}\right)_f$	$\sigma_3\left(\frac{dv}{d\varepsilon}\right)_f$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$(\sigma_1-\sigma_3)_f$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$(\sigma_1-\sigma_3)_{rf}$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$(\sigma_1-\sigma_3)_R$ (kg/cm <sup>2</sup> )
1.294	94.5	0.5	6.4	1.00	0.50	4.31	3.81	1.90
		1.0	7.2	0.59	0.59	6.82	6.23	3.92
		1.5	9.6	0.46	0.69	9.00	8.31	5.69
		2.0	9.6	0.44	0.88	11.93	11.05	7.67
		$C$ (kg/cm <sup>2</sup> ) $\phi$					0.358 45°37'	* 0.344 40°49'
1.426	78.1	0.5	7.2	0.75	0.37	3.52	3.15	1.80
		1.0	8.8	0.44	0.44	5.60	5.16	3.58
		1.5	12.0	0.26	0.39	7.57	7.18	5.70
		2.0	13.6	0.078	0.16	9.70	9.54	8.85
		$C$ (kg/cm <sup>2</sup> ) $\phi$					0.325 42°14'	* 0.253 41°56'
1.589	57.7	0.5	8.0	0.40	0.20	2.71	2.51	1.79
		1.0	14.4	0.26	0.26	4.82	4.56	3.62
		1.5	10.4	0.16	0.24	6.83	6.59	5.68
		2.0	14.4	0.078	0.16	8.70	8.54	7.92
		$C$ (kg/cm <sup>2</sup> ) $\phi$					0.172 41°47'	* 0.105 42°09'
1.715	42.0	0.5	12.1	0.28	0.14	2.35	2.21	1.73
		1.0	14.5	0.16	0.16	4.21	4.05	3.49
		1.5	13.7	0.081	0.12	6.11	5.99	5.54
		2.0	14.5	0.040	0.08	8.01	7.93	7.62
		$C$ (kg/cm <sup>2</sup> ) $\phi$					0.103 40°50'	* 0.069 40°51'

\* Values in the range of confining pressure from 0.5 to 1.5 kg/cm<sup>2</sup>

Table 5. Summary of test results for Nejime beach-sand.

$e$	$D_r$ (%)	$\sigma_3$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$\varepsilon_f$ (%)	$\left(\frac{dv}{d\varepsilon}\right)_f$	$\sigma_3\left(\frac{dv}{d\varepsilon}\right)_f$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$(\sigma_1-\sigma_3)_f$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$(\sigma_1-\sigma_3)_{rf}$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$(\sigma_1-\sigma_3)_R$ (kg/cm <sup>2</sup> )
0.589	99.5	0.5	2.38	1.06	0.53	2.26	1.73	0.84
		1.0	2.78	1.01	1.01	4.40	3.03	1.69
		1.5	3.17	0.94	1.41	6.25	4.84	2.49
		2.0	3.57	0.83	1.66	8.24	6.58	3.60
		$C$ (kg/cm <sup>2</sup> ) $\phi$					0.076 41°38'	-0.011 38°22'
0.623	83.9	0.5	2.82	0.93	0.46	1.98	1.52	0.78
		1.0	2.82	0.88	0.88	4.05	3.17	1.69
		1.5	2.82	0.84	1.26	5.86	4.60	2.50
		2.0	2.42	0.78	1.56	7.78	6.22	3.49
		$C$ (kg/cm <sup>2</sup> ) $\phi$					0.026 41°07'	-0.001 37°28'
0.667	63.4	0.5	2.02	0.72	0.36	1.81	1.45	0.84
		1.0	2.82	0.69	0.69	3.53	2.84	1.68
		1.5	2.42	0.68	1.02	5.29	4.27	2.54
		2.0	2.82	0.68	1.36	7.01	5.65	3.36
		$C$ (kg/cm <sup>2</sup> ) $\phi$					0.016 39°23'	0.011 35°43'

Table 6. Summary of test results for Shirasu-B.

$e$	$D_r$ (%)	$\sigma_3$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$\varepsilon_f$ (%)	$\left(\frac{dv}{d\varepsilon}\right)_f$	$\sigma_3\left(\frac{dv}{d\varepsilon}\right)_f$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$(\sigma_1-\sigma_3)_f$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$(\sigma_1-\sigma_3)_{rf}$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$(\sigma_1-\sigma_3)_R$ (kg/cm <sup>2</sup> )	
1.396	79.1	0.5	7.69	0.21	0.11	1.98	1.87	1.55	
1.391	81.4	1.0	7.03	0	0	3.28	3.28	3.28	
1.389	82.3	1.5	8.49	-0.12	-0.18	4.21	4.39	4.99	
1.397	78.6	2.0	9.81	-0.22	-0.44	5.55	5.99	7.68	
平均 1.393	80.4	$C$ (kg/cm <sup>2</sup> ) $\phi$					0.230 32°33'	0.134 35°01'	-0.145 41°35'
1.522	21.8	0.3	7.78	0.45	0.14	1.30	1.16	0.80	
1.518	23.6	0.5	10.94	0.19	0.09	1.79	1.70	1.42	
1.518	23.6	1.0	14.84	-0.05	-0.05	2.82	2.87	3.02	
1.514	25.4	1.5	10.08	-0.11	-0.16	3.89	4.05	4.55	
1.518	23.6	2.0	10.16	-0.28	-0.56	4.95	5.51	7.65	
平均 1.518	23.6	$C$ (kg/cm <sup>2</sup> ) $\phi$					0.195 31°04'	0.105 33°50'	-0.136 41°12'

$$\frac{\sigma_1}{1 + \left(\frac{dv}{d\varepsilon}\right)_f} - \sigma_3 = (\sigma_1 - \sigma_3)_R \quad (2)$$

また

$$(\sigma_1 - \sigma_3)_R + (\sigma_1 - \sigma_3)_R \left(\frac{dv}{d\varepsilon}\right)_f = (\sigma_1 - \sigma_3)_{rf} \quad (3)$$

とおけば、式(1)は Bishop の式<sup>10)</sup>と同じ形になる。

各試料の  $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ ,  $(\sigma_1 - \sigma_3)_{rf}$ ,  $(\sigma_1 - \sigma_3)_R$  および  $\sigma_3(dv/d\varepsilon)_f$  の値は Table 3~6 に示されている。

土のせん断強さは Mohr-Coulomb の破壊規程で表わされる。 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ ,  $(\sigma_1 - \sigma_3)_{rf}$  および  $(\sigma_1 - \sigma_3)_R$  に関して最小自乗法によりせん断強さ定数(見かけの粘着力  $c$ , せん断抵抗角  $\phi$ )を求めた値も Table 3~6 に示しておいた。 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$  から求めた  $c$  および  $\phi$  はそれぞれ  $c_a$  および  $\phi_a$  と表示される。各試料の  $c_a$ ,  $\phi_a$  と相対密度の関係を Fig. 8 に示す。シラスAの  $c_a$ ,  $\phi_a$  は豊浦砂のそれより大きく、シラスBの  $c_a$  は根占浜砂のそれより大きい、 $\phi_a$  は小さいことが Fig. 8 からわかる。

$(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ ,  $c_a$ ,  $\phi_a$  などを総合的に考えると、シラスの細粒砂部分は一般の砂より強度が大きく、粗粒砂部分は一般の砂より低い強度を持つといえる。その原因は後述する粒子形状および粒子破碎にある。

#### 4. 粒子形状とせん断強さの関係

砂および砂質土のせん断強さは、一般に  $\phi_a$  だけを問題とする場合が多い。いま、粒子形状と  $\phi_a$  の関係をみるために、Mackey の形状係数  $\bar{m}$  および粒子の細長率  $\bar{q}$  と  $\phi_a$  の関係を Fig. 9 に示す。粒子は、

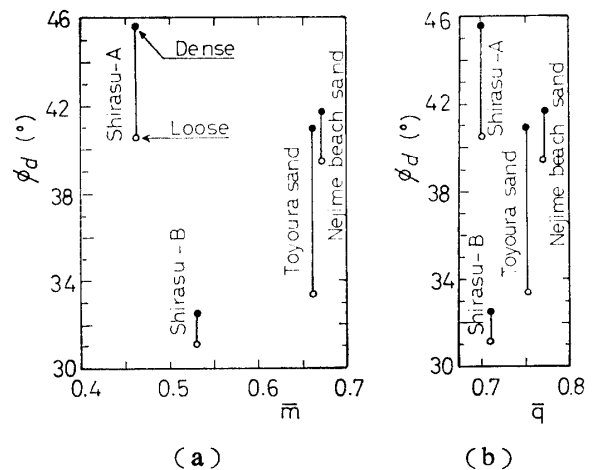


Fig. 9. Relations between angle of shearing-resistance and shape factor of grains, solid symbols show  $\phi_d$  values of dense packing and open symbols show  $\phi_d$  values of loose packing.

- (a) Mackey's shape factor versus  $\phi_d$
- (b) Elongation ratio versus  $\phi_d$

$\bar{m}$  が小さいほど角張っており、 $\bar{q}$  が小さいほど細長くなる。シラスAの  $\phi_a$  が豊浦砂のそれより大きい値を示すことは、粒子形状の寄与によるものであることが Fig. 9 から考えられる。一方、シラスBの  $\phi_a$  は根占浜砂のそれより小さい。シラスBの粒子も根占浜砂に比べて角張って、細長であるが、粒子形状の寄与がないのは粒子破碎の影響を受けていることによると考えられる。自然粒度のシラスの強さは、シラスAおよびそれ以下の粒子に相当する細粒分の寄与によるところが大きいであろう。



5. 粒子破碎

高い拘束圧のもとで行なわれる豊浦砂の三軸圧縮試験では圧密およびせん断中に粒子破碎が起こることが知られている<sup>11)</sup>。ここで行なった三軸試験は低い拘束圧のもとにおけるものであるが、シラスはその粒子の性質から破碎を生ずるものではないかと考えられたので、三軸試験後の試料の粒度試験を行なった。

豊浦砂および根占浜砂の三軸試験前後の粒度組成を Table 7 に示す。Table 7 における粒度組成の値のバラツキは、実験誤差の範囲内にあると考えてよい。したがって豊浦砂と根占浜砂は試験の拘束圧の範囲内では破碎を起こしていないと考えられる。

Table 7. Grain size distributions of samples before and after test.

(a) Toyoura sand, specimens with a void ratio of 0.723

Grading (mm)	per cent by weight				
	Before test	After test			
		$\sigma_3=0.5$ kg/cm <sup>2</sup>	1.0	1.5	2.0
0.42-0.25	7.9	8.0	7.8	8.4	7.6
0.25-0.105	91.7	91.5	91.8	91.1	92.1
Finer than 0.105	0.4	0.5	0.4	0.5	0.3

(b) Nejime beach sand, specimens with a void ratio of 0.623

Grading (mm)	per cent by weight				
	Before test	After test			
		$\sigma_3=0.5$ kg/cm <sup>2</sup>	1.0	1.5	2.0
2.00-0.84	98.8	98.7	99.0	98.5	98.9
0.84-0.42	0.9	1.1	0.8	1.1	0.7
0.42-0.25	0.3	0.2	0.2	0.4	0.3

シラスAおよびBは、Fig. 10 に示されるように試験前後の試料の粒度曲線をみると、かなりの量の破碎を起こしていることがわかる。破碎のしかたは、粒子のかどや突出部が割れるとか、削られるとか、粒子表面の弱い部分がはがれるとか、粒子が粉碎されるとか、あるいは割れるとかいろいろ考えられ、この破碎のしかたそのものがシラスの強さに影響するかも知れない。また、シラス粒子はやわらかいガラス粒子・軽石、およびかたい安山岩粒子からなる。このように硬度のことなる材料からなるものは、やわらかい部分が破碎を受けることになる<sup>12)</sup>。

破碎がせん断強さに及ぼす影響を定量的に論ずるには、破碎量をいかなる数値で定義するかということが

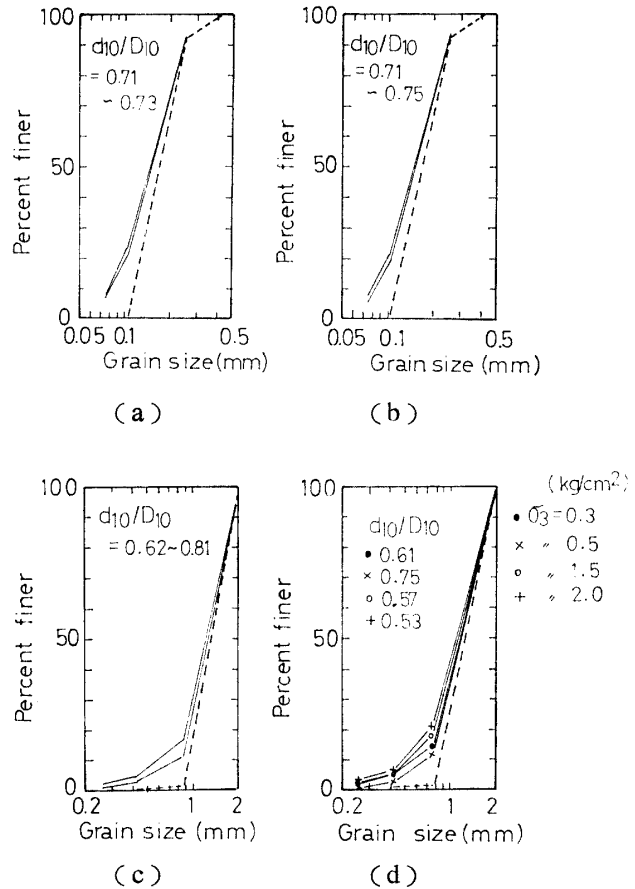


Fig. 10. Degradations of shirasu, solid and broken lines show gradation after and before test, respectively.

- (a) Shirasu-A,  $e=1.294$ ,  $D_r=94.5\%$
- (b) Shirasu-A,  $e=1.589$ ,  $D_r=57.7\%$
- (c) Shirasu-B,  $e=1.393$ ,  $D_r=80.4\%$
- (d) Shirasu-B,  $e=1.518$ ,  $D_r=23.6\%$

重要な課題となる。現在のところいくつかの試みがなされているが、せん断特性と結びつくような適切な定義は見出されていないようである。

ここでは、破碎指数として試験前の試料の有効粒径  $D_{10}$  に対する試験後の試料の有効粒径  $d_{10}$  の比 ( $d_{10}/D_{10}$ ) を定義する。 $(d_{10}/D_{10})$  の値が小さいほど破碎量は多い。Fig. 10 によれば、シラスAの  $(d_{10}/D_{10})$  は密度による差は明らかでないが、シラスBの  $(d_{10}/D_{10})$  は密詰め (初期間ゲキ比  $e_0=1.393$ ) よりゆる詰め ( $e_0=1.518$ ) のほうが小さい値を示している。密詰めよりゆる詰めのほうが破碎しやすい理由は、圧密およびせん断中における粒子移動の自由度にあると考えられ、同様な結果は高圧三軸試験<sup>11)</sup>でも得られている。また、 $(d_{10}/D_{10})$  の値から、細砂より粗砂のほうが、さらに拘束圧が高いほど多くの破碎を生じる傾向がみられる。

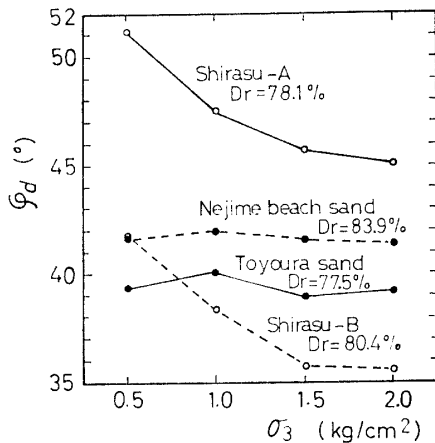


Fig. 11. Relation between  $\varphi_d$  and confining-pressure.

いま、せん断強さはせん断抵抗角だけで構成されると考えると、 $c_d=0$  となり、そのときのせん断抵抗角  $\varphi_d$  はつぎの式で決定される。

$$\sin \varphi_d = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_f}{(\sigma_1 + \sigma_3)_f} \quad (4)$$

式(4)で求めた  $\varphi_d$  と拘束圧  $\sigma_3$  の関係の一例を Fig. 11 に示す。シラスの  $\varphi_d$  は  $\sigma_3$  の増加に従って減少しているが、豊浦砂および根占浜砂の  $\varphi_d$  は  $\sigma_3$  にかかわらずほぼ一定値を示している。さらに、シラスのダイレイタンスは  $\sigma_3$  の大きさによって変化し、さらにシラス粒子は破砕を起こすが、砂ではそのような現象がみられないことを明らかにした。粒子破砕が起こるとダイレイタンスが減少し、そのためせん断強さが低下するものと考えられる。破砕を生じるシラスAが豊浦砂より大きい  $\varphi_d$  を持っている理由は、前述のように粒子形状の寄与によるものである。シラスBは破砕による強度低下を直接的に受けている。破砕が少ない  $\sigma_3=0.5 \text{ kg/cm}^2$  のときのシラスBの  $\varphi_d$  は根占浜砂のそれにほぼ等しいが、 $\sigma_3$  が増加すると破砕が多くなるので  $\varphi_d$  は著しく減少する。

なお、せん断強さの成分に cohesion intercept を元来持っている材料の場合、破砕を生じていなくても、式(4)で  $\varphi_d$  を求めると、それは  $\sigma_3$  の増加とともに減少することは、Mohr 円の関係から明らかである。

6. ダイレイタンスとせん断強さの関係

Table 3~6 に示す各試験結果についてそれぞれの  $\varphi_d$  ごとに、式(4)によって  $\varphi_d$  を求め、 $(dv/d\varepsilon)_f$  との関係をもとめると Fig. 12 のようになる。これによると  $\varphi_d$  の増分  $d\varphi_d$  と  $(dv/d\varepsilon)_f$  の増分  $d(dv/d\varepsilon)_f$  の比を  $k$  で表わすと

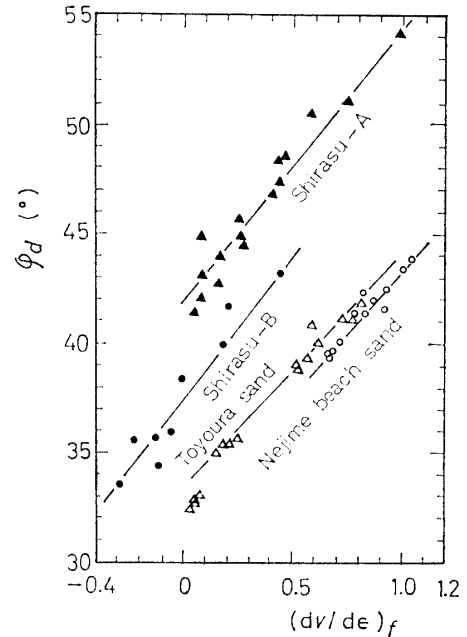


Fig. 12. Dependence of  $\varphi_d$  on dilatancy.

Table 8.  $\alpha$  and  $k$  values for equation (6).

Sample	$\alpha(^{\circ})$	$k$
Toyouura sand	33.3	11.0
Nejime beach sand	32.0	11.3
Shirasu-A	42.0	12.2
Shirasu-B	37.3	13.5
Smooth spheres of steel	17.8	24.8
Rough spheres of steel	23.5	10.8
Crushed silica	36.3	14.8
Hakozaki sand	36.5	12.1
Shirasu-1*	41.2	17.6
Shirasu-2**	41.0	17.6

\* (Fraction finer than 4.76 mm in diameter)  
 \*\* (Fraction finer than 9.52 mm in diameter)

$$\frac{d\varphi_d}{d(dv/d\varepsilon)_f} = k \quad (5)$$

したがって

$$\varphi_d = \alpha + k \left( \frac{dv}{d\varepsilon} \right)_f \quad (6)$$

ここに、 $\alpha$ ,  $k$ =土質によって決まる定数。

式(6)は  $\varphi_d$  とダイレイタンスの関係を与える。 $\alpha$  は土質によって大きく変化し、 $(dv/d\varepsilon)_f=0$  するときの  $\alpha$  の値は  $\varphi_{cv}$  と表示される。 $k$  は  $\varphi_d$  がダイレイタンスに依存する程度を表わし、土質の違いによる差は少ない。 $\alpha$ ,  $k$  の概略値を Fig. 12 から求めると Table 8 のようになる。なお、Table 8 には筆者による既往の試験結果から求めた  $\alpha$ ,  $k$  の値を加筆しておいた。

7. セン断抵抗角の成分

Table 3~6 において  $(\sigma_1 - \sigma_3)_{rf}$  に対応するせん断抵抗角を  $\phi_{rf}$ ,  $(\sigma_1 - \sigma_3)_R$  に対応するものを  $\phi_R$  とする.  $\phi_{rf}$  は  $\phi_d$  から表面エネルギーの効果をも補正したもの,  $\phi_R$  は  $\phi_d$  から表面エネルギーとかみ合いの効果をも補正したものである<sup>9)</sup>. Rowe<sup>9)</sup> によれば最密状態における  $\phi_R$  の値は粒子間の物理的摩擦角  $\phi_\mu$  の近似値を与える. 豊浦砂およびシラスAの  $\phi_d$ ,  $\phi_{rf}$ ,  $\phi_R$  と相対密度  $D_r$  の関係を, それぞれ Fig. 13 および 14 に示す. 豊浦砂の  $\phi_{cv}$  は約  $33^\circ$ ,  $\phi_\mu$  は約  $27.5^\circ$  である. シラスAの  $\phi_{cv}$  は約  $41.6^\circ$ ,  $\phi_\mu$  は約  $40.6^\circ$  である. 豊浦砂の  $\phi_\mu$  の値は粒子間の物理的摩擦角として妥当なものと考えられるが, シラスAの  $\phi_\mu$  は過大な値である.

つぎに, 豊浦砂およびシラスの各供試体について, 式(7)で  $\phi_{rf}$ , 式(8)で  $\phi_R$  を求め, 前述の  $\phi_d$  とともに  $(dv/de)_f$  に対してプロットすると Fig. 15 お

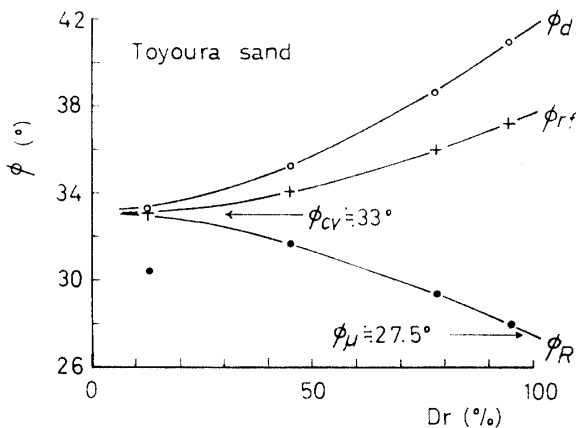


Fig. 13. Relation between frictional parameters in range of confining-pressure from 0.5 to 2.0 kg/cm<sup>2</sup> and relative density for Toyoura sand.

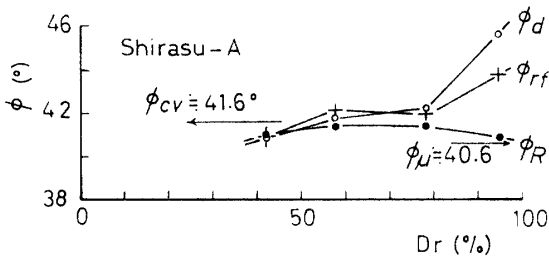


Fig. 14. Relation between frictional parameters in range of confining-pressure from 0.5 to 2.0 kg/cm<sup>2</sup> and relative density for Shirasu-A.

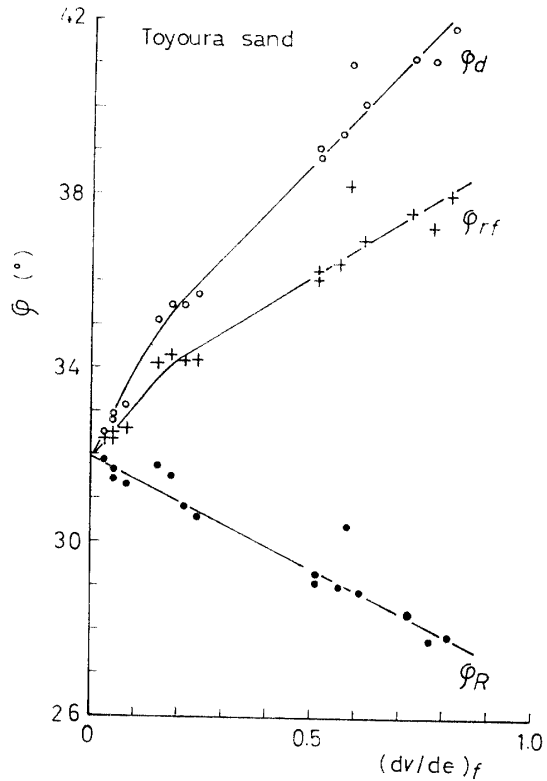


Fig. 15. Relation between frictional parameters and dilatancy-rate for Toyoura sand.

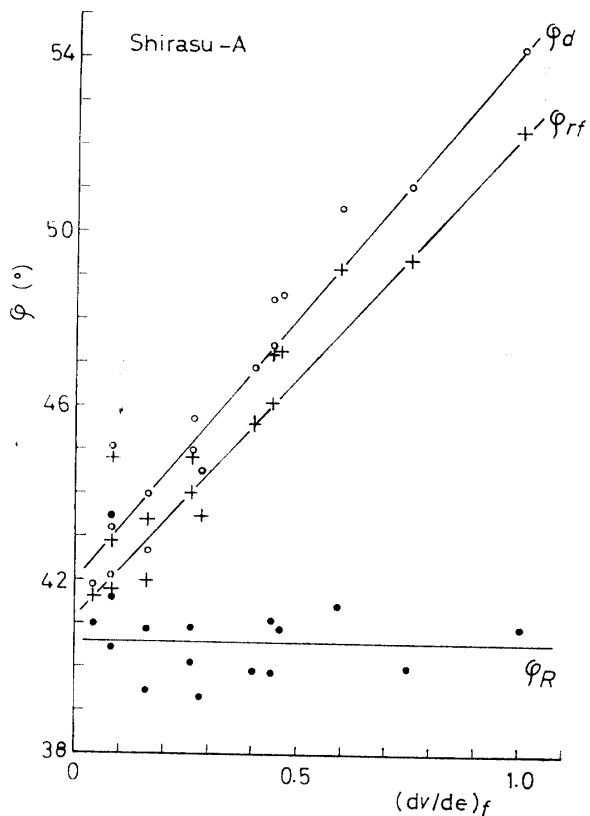


Fig. 16. Relation between frictional parameters and dilatancy rate for Shirasu-A.

よび16が得られる。 $\phi_R$ は、豊浦砂においては $(dv/d\varepsilon)_f$ が大きいほど減少の傾向があるが、シラスAでは $(dv/d\varepsilon)_f$ にかかわらず一定である。シラスの $\phi_R$ は $\phi_{cv}$ に近い性質を持っているものと考えられる。

$$\sin \phi_{rf} = (\sigma_1 - \sigma_3)_{rf} / (\sigma_1 + \sigma_3)_{rf} \quad (7)$$

$$\sin \phi_R = (\sigma_1 - \sigma_3)_R / (\sigma_1 + \sigma_3)_R \quad (8)$$

8. セン断強さ定数の発揮

Mohr-Coulomb 破壊規準は最大セン断抵抗を与えるものであり、変形開始から破壊にいたるまでのすべての応力・変形段階においてこの規準を適用できるかどうかについては多くの議論がある。実用的立場からセン断抵抗が問題とされるのである。ここでは変形の各段階における応力状態を Mohr 円で表示し、Mohr 円に接する包絡線のコウ配  $\phi$  を摩擦力成分によるもの、cohesion intercept  $c$  を粘着力成分によるものとする。

いま、偏差応力・軸ヒズミ曲線から所定の軸ヒズミにおける偏差応力を各拘束圧ごとに求め、Mohr 円を描いて得られた包絡線を Fig. 17 および 18 に示す。Fig. 17 に示す豊浦砂の包絡線は各軸ヒズミ段階とも直線とみなせるが、Fig. 18 に示すシラスのそれは軸

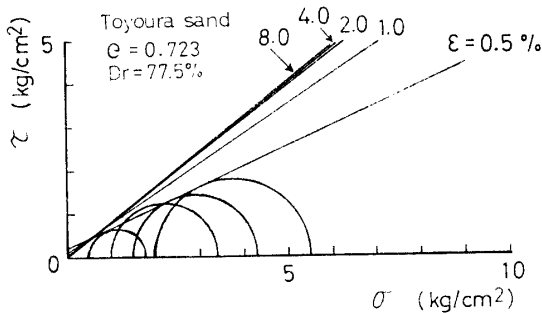


Fig. 17. Envelopes for Mohr's circles at given axial strains for Toyoura sand.

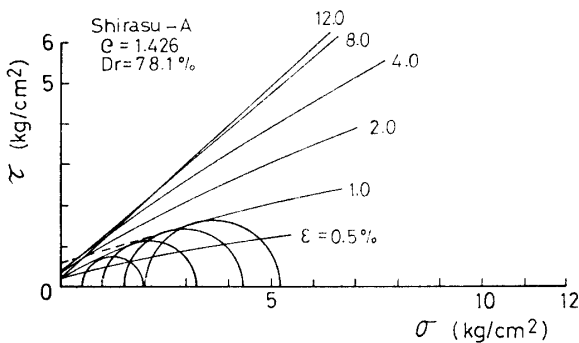


Fig. 18. Envelopes for Mohr's circles at given axial strains for Shirasu-A.

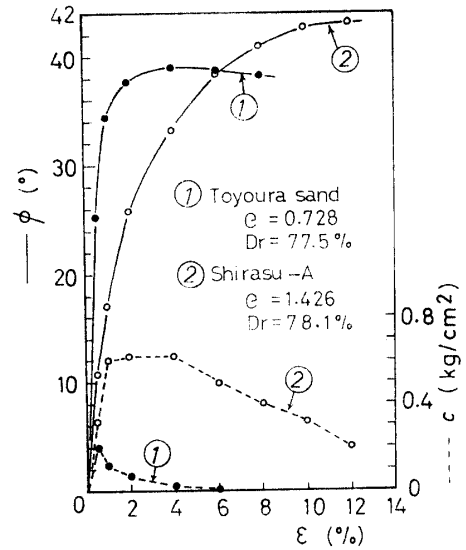


Fig. 19. Mobilizations of cohesion and frictional components of the shear-strength.

ヒズミの初期の段階で曲線を示し、軸ヒズミが約6%を越えると直線となっている。

Fig. 17 および 18 の各包絡線から  $c$  と  $\phi$  を求め軸ヒズミに対してプロットすると Fig. 19 のようになる。これから  $c$  と  $\phi$  とでは軸ヒズミに対応する変化状況が異なることがわかる。すなわち、 $c$  と  $\phi$  はそれぞれ別々に発揮され、 $c$  がピークに達する軸ヒズミは、 $\phi$  がピークに達する軸ヒズミより小さい。この性質は砂、シラスともに同じである。また、砂、シラスともに、ここで求めた  $c$  は  $c_a$  より著しく大きく、 $\phi$  と  $\phi_a$  の間には大差がない。

結 論

同じ粒度を持つ砂とシラスに関して排水三軸圧縮試験を行ない、それらのセン断特性の相違を検討したところ、次の点が明らかとなった。

- (1) 偏差応力・軸ヒズミ曲線の初期接線コウ配はシラスより砂のほうが大きい。
- (2) 破壊時の軸ヒズミは砂よりシラスのほうが大きい。
- (3) シラスは砂に比べてセン断中に大きな体積収縮を起し、正のダイレイタンスを示す場合でもセン断の初期にかなりの収縮を起す。この性質は粒子形状やセン断中の粒子破碎に関係している。
- (4) 破壊時のダイレイタンス指数 $(dv/d\varepsilon)_f$ は、砂においては拘束圧の影響をあまり受けていないが、シラスにおいてはその影響をかなり受ける。
- (5) シラスのセン断強さは、細粒部分では砂より

大きい。粗粒部分では砂より小さい。細粒部分は粒子形状、粗粒部分は粒子破碎の寄与を受けている。試験の範囲の拘束圧のもとでは砂の破碎は認められなかったが、シラスは破碎を生じている。

(6) 砂, シラスともに  $\phi_d$  と  $(dv/d\varepsilon)_f$  の間には直線関係が認められる。また, 砂の  $\phi_R$  は  $(dv/d\varepsilon)_f$  が小さいほど増加しているが, シラスの  $\phi_R$  は  $(dv/d\varepsilon)_f$  に関係せず一定である。

(7) 砂, シラスともに粘着力成分と摩擦力成分はそれぞれ独立に発揮され, 粘着力が最大に発揮される軸ヒズミは摩擦力が最大に発揮される軸ヒズミより小さい。

### 参 考 文 献

- 1) 春山元寿・山内豊聰: 土と基礎, **18** (8), 27-33 (1966)
- 2) Haruyama, M.: *Soils and Foundations*, **9** (3), 35-57 (1969)

- 3) Yamanouch, T. and Haruyama, M.: *Mem. Fac. Engrg. Kyushu Univ.*, **29** (1), 53-64 (1969)
- 4) 春山元寿: 土と基礎, **20** (2), 41-47 (1972)
- 5) 最上武雄編著: 土質力学, 技報堂, 896-904 (1969)
- 6) Mackey, R. D.: *Civil Engrg. and Public Works Review*, 211-214 (1965)
- 7) 春山元寿: 土木学会第24回年次学術講演会講演集, **3**, 21-24 (1969)
- 8) Haruyama, M.: *Soils and Foundations*, **9** (4), 48-67 (1969)
- 9) Rowe, P. W.: *Proc. Royal Soc., London, Ser. A*, **269**, 500-527 (1962)
- 10) Bishop, A. W.: *Geotechnique*, **4** (1), 43-45 (1954)
- 11) 三浦哲彦・山内豊聰: 土木学会論文報告集, **193**, 69-79 (1974)
- 12) Bowden, F. P. and Tabor, D.: *The Friction and Lubrication of Solids*, Oxford Univ. Press, 90-121 (1954)

### Summary

The aim of this study is to clarify the difference in shearing-characteristics between Shirasu and sand by means of triaxial shear tests. Shirasu, a sort of vast volcanic product from Aira and Ata volcanoes, is widely distributed in southern Kyushu, Japan. It becomes granular soil and has high compressibility when disturbed. Toyoura sand, Nejime beach sand, and Shirasu were used in the test and their physical properties are shown in Table 1. The shape and surface-texture of the grains are shown in Table 2 and Photo 1. Shirasu was obtained at Tose in Kagoshima City, and was geologically in the category of the unwelded part of pumice flow. Only the part of Shirasu having the same gradation as sand was used in this study. The grain-size-distribution-curves are shown in Fig. 1. Toyoura sand and Shirasu-A are in the class of fine sand, and Nejime beach sand and Shirasu-B, coarse sand. Toyoura sand and Nejime beach sand consist mainly of quartz and feldspar. Almost all the fine grains of Shirasu are made of the glass fragments, the coarse grains consist mainly of pumice and of a small amount of derived rock fragments, such as andesite.

Drained triaxial compression-tests were performed on compacted specimens varying their void-ratios from loose to dense packing. The size of specimen is initially 5.0 cm in diameter and 12.5 cm in height. Loose specimens were prepared by pouring the material slowly into a cylindrical mold. A dense state of packing was achieved by vibrating and tamping the mold. The specimens were consolidated fully in triaxial cell under the confining-pressure ranging from 0.3 to 2.0 kg/cm<sup>2</sup>, and then they were subjected to deviator stress at a constant rate of strain of 0.8 per cent per minute. The axial load, the axial strain, and the volume-change during the shearing were measured. Test results are shown in Figures 2 through 19 and Tables 3 through 8. Basing on the tests the following conclusions might reasonably be made:

(1) Both the initial tangent-modulus equaling the slope of the deviator stress versus axial strain plot, at the start of the test, and the secant-modulus at failure equaling the slope of the line between the origin and the point of failure, on the plot of deviator stress versus axial strain, are larger in sand than in Shirasu.

(2) Under shearing-process Shirasu has a high compressibility, compared with sand. This property is due to the singularities of the shape and the surface of Shirasu grains and to the effect of grain-crushings during the shearing. Shirasu grains are angular, flat, or elongate, but sand grains subangular or round. In the range of confining-pressure used in the tests, for Shirasu the degradation occurs, for sand, however, any degradation is not clearly observed.

(3) The dilatancy-rate at failure for sand is independent of the confining-pressure, that for Shirasu is, however, dependent of the confining-pressure, and shows a tendency to decrease with the increase in it.

(4) Shearing-strength of the fine grain-fraction of Shirasu is larger than in case of sand, which occurs owing to the peculiar shape of grains, but that of the coarse grain-fraction of Shirasu is smaller than in sand, which happens owing to the grain-crushings during the shearing.

(5) Both sand and Shirasu have the linear relationship between frictional parameter of shearing-strength,  $\varphi_d$ , and dilatancy-rate.

(6) The cohesive and frictional contributions to the shearing-resistance are mobilized to be mechanically independent. The cohesion component of strength reaches the peak value at early stage of the strain, while the frictional component requires several times the strain before its full mobilization to have been realized.

The following notations are used in the study:

$c$ : general expression of cohesion

$c_d$ : apparent cohesion for drained test

$d_{10}$  and  $D_{10}$ : effective grain size after and before test, respectively

$D_r$ : relative density

$e$ : initial void-ratio

$\bar{m}$ : Mackey's mean shape factor of grains

$\bar{p}$ : mean flatness ratio of grains

$\bar{q}$ : mean elongation ratio of grains

$v$ : rate of volume change given by  $(\Delta V/V) \times 100$

$V$ : volume of specimen

$\Delta V$ : volume change defined as positive for expansion

$(dv/d\varepsilon)_f$ : dilatancy-rate at failure

$\varepsilon$ : axial strain defined as positive when a specimen is shortened in length

$\varepsilon_f$ : axial strain at failure

$\sigma_1$ : maximum principal stress (axial stress)

$\sigma_3$ : minimum principal stress (confining pressure)

$(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ : measured maximum deviator stress

$(\sigma_1 - \sigma_3)_R$  and  $(\sigma_1 - \sigma_3)_{rf}$ : deviator-stress corrected by applying equation (2) and (3), respectively

$\sigma_p$ ,  $\sigma_q$ , and  $\sigma_m$ : standard-deviation of  $p$ ,  $q$ , and  $m$ , respectively

$\phi$ : general expression of angle of shearing-resistance

$\phi_d$ : angle of shearing-resistance for drained test

$\phi_R$  and  $\phi_{rf}$ : angle of shearing-resistance corrected for structural effect and for surface energy-effect, respectively

$\varphi_d$ ,  $\varphi_{rf}$ , and  $\varphi_R$ : friction parameter calculated by equation (4), (7), and (8), respectively