

しらすの再液状化特性に及ぼす初期相対密度と 初期有効拘束圧の影響

山本哲朗 (社会建設工学科)

鈴木素之 (社会建設工学科)

千田隆行 (社会建設工学専攻)

Influence of initial relative density and initial effective confining pressure on reliquefaction characteristics of Shirasu

Tetsuro YAMAMOTO (Department of civil engineering)

Motoyuki SUZUKI (Department of civil engineering)

Takayuki SENDA (Department of civil engineering)

In order to investigate the influence of the initial relative density and initial effective confining pressure on reliquefaction characteristics of disturbed Shirasu, cyclic triaxial tests were performed on soil samples prepared with different initial relative densities and effective confining pressures. It was found from these tests that the reliquefaction strength was higher than the first liquefaction strength. Furthermore, the reliquefaction strength increased with increases in initial relative density, and was affected by the initial effective confining pressure of above 98 kPa.

Key Words : *Liquefaction, Reliquefaction, Shirasu, Initial relative density, Initial effective confining pressure*

1. はじめに

南九州等に広く分布するしらすは粒子破砕性のある特殊土として知られている。しらす地盤の1997年の鹿児島県北西部地震(M6.5)では、液状化が発生し、同年の同第二北西部地震(M6.3)では再液状化が発生したことが報告されている¹⁾。Finnら²⁾は、再液状化強度は再圧密による密度増加にもかかわらず土粒子構造の固結がはずれるために初回の液状化強度よりも小さくなることを実験的に明らかにしている。一方、大原ら³⁾は、一度液状化が発生した砂でもその後の再圧密に伴う密度増加により再液状化強度は初回の液状化強度よりも増加することを実験によって明らかにしている。液状化のみならず再液状化強度は構造物の耐震設計に大きく関係するので、それに及ぼす影響因子を把握することは非常に重要である。

本研究では、乱したしらすを対象にして繰返し三軸試験結果より、液状化後の再圧密に伴う密度変化に着目して再液状化特性に及ぼす初期相対密度と有効拘束圧の影響について検討した。

2. 試験概要

(1) しらすの物理的性質

土試料には鹿児島県薩摩郡宮之城町平川で採取したしらすを用いた。Table 1 にしらすの物理定数、Fig. 1 に粒径加積曲線を示す。試料は現場で採取したものを4.75mmふるいを通過させ、根茎等を取り除いたものである。また、各試験に用いる試料の粒度にばらつきが生じないように分取器を用いて実験試料を準備した。

(2) 繰返し三軸試験機

応力制御式繰返し三軸試験機を用いて液状化試験を実施した。試験の詳細は文献4)を参照されたい。初期状態における供試体の寸法は直径5cm、高さ10.5cmである。間隙水圧はペダスタルに接続された間隙水圧計で、軸変位量はセル室上部に固定されたダイヤルゲージ式変位計で、体積変化量はビューレットにより測定している。

(3) 試験手順

試験手順の概略を以下に示す。

Table1 Physical properties of soil sample

Density of solid particles	$\rho_s(\text{g/cm}^3)$	2.448
Maximum grain size	$D_{max}(\text{mm})$	4.750
Average grain size	$D_{50}(\text{mm})$	0.134
Uniformity coefficient	U_c	—
Maximum void ratio	e_{max}	1.902
Minimum void ratio	e_{min}	0.981
Fines content	$F_c(\%)$	37.4

- 1) 自然乾燥させたしらすを漏斗によりできるだけ落下高さを低くしてモールド内に3層に分けて投入し、モールドを打撃して所定の相対密度を持つ供試体を作製する。
- 2) 供試体内にCO₂ガスを4.9kPaの圧力差で20分間流して間隙空気をCO₂に置換する。その後、脱気水を通水し、98kPaの背圧を1時間与える。
- 3) B値が0.95以上あることを確認する。
- 4) 所定の等方応力で圧密を開始する。圧密時間は24時間とした。
- 5) 圧密終了後、両面非排水条件下で周期10秒で繰返しせん断を行った。
- 6) 初回の液状化試験で発生した過剰間隙水圧を両面排水条件下で消散させ、30分間再圧密した。その後、再液状化試験を行った。

なお、初回の液状化および再液状化ともに破壊の定義は軸ひずみ両振幅DA=5%と定義した。本研究では初期相対密度60%、90%の2通り、初期有効拘束圧 $\sigma'_{30}=49\text{kPa}$ 、98kPa、147kPaの3通りで実施した。Table2に初期相対密度と有効拘束圧を変化させた試験ケースとその結果を示す。

3. しらすの液状化特性

Fig. 2は初期相対密度 D_{10} を変化させた場合のしらすの液状化強度曲線を示したものである。縦軸は繰返しせん断応力比 $\sigma_d/2\sigma'_{30}$ (σ_d : 軸差応力, σ'_{30} : 初期有効拘束圧)を、横軸は破壊時の繰返し回数 n_L をとっている。初期有効拘束圧はいずれの試験ケースでも $\sigma'_{30}=98\text{kPa}$ である。図中の記号○は $D_{10}=90\%$ のデータを示し、圧密後の相対密度 D_{r1} は $D_{r1}=92.2\% \sim 97.4\%$ (平均値 $\bar{D}_{r1}=94.9\%$)となっている。また、◇は $D_{10}=60\%$ のデータを示し、 D_{r1} は $D_{r1}=71.3\% \sim 75.3\%$ (平均値 $\bar{D}_{r1}=73.3\%$)となっている。 $D_{10}=90\%$ の液状化強度曲線は $D_{10}=60\%$ のそれよりも上方にあり、 D_{10} が高いほど液状化強度は大きくなる。図中に岡林⁹⁾による鹿児島県隼人町で採取されたしらすに対して実施した繰返し三軸試験のデータ ($D_{10}=50\%$ 、90%)を示している。この

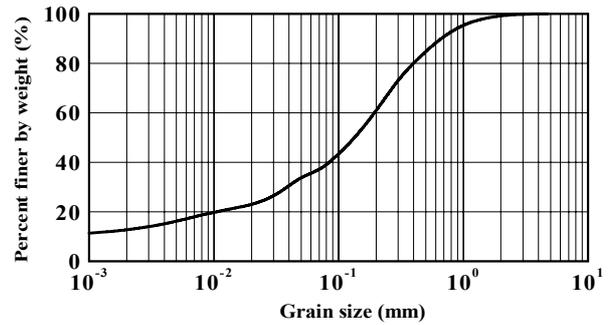


Fig. 1 Grain size distribution curve of soil sample

場合も同様な傾向を示しているが、著者らと岡林⁹⁾の $D_{10}=90\%$ のデータを比較すると、液状化強度曲線の形状が大きく異なる。試料の物理特性、粒子形状および鉱物組成の差異もこのことに影響していると考えられる。

Fig. 3は初期有効拘束圧 σ'_{30} を変化させた場合のしらすの液状化強度曲線を示したものである。初期相対密度はいずれの試験ケースでも $D_{10}=60\%$ である。図中の記号△、◇、▽はそれぞれ $\sigma'_{30}=49\text{kPa}$ 、98kPa、147kPaのデータを示している。 $\sigma'_{30}=49\text{kPa}$ 、98kPaの液状化強度曲線はほぼ同じ位置にある。一方、 $\sigma'_{30}=147\text{kPa}$ の場合の液状化強度曲線はこれらよりも上方に位置しており、有効拘束圧の影響を受けている。図中には岡林⁹⁾のデータ ($D_{10}=50\%$ 、 $\sigma'_{30}=50\text{kPa}$ 、100kPa、300kPa)を示している。この場合も同様に $\sigma'_{30}=300\text{kPa}$ と $\sigma'_{30}=50\text{kPa}$ 、100kPaの液状化強度曲線が大きく異なる。豊浦標準砂の場合には、有効拘束圧の大きさによらず液状化強度曲線は1つの曲線で表すことができるが^{6),7)}、しらすの場合には通常の応力域でも有効拘束圧の大きさにより液状化強度曲線が異なることに注意を要する。

4. しらすの再液状化特性

(1) 記録波形

Fig. 4(a)および(b)にそれぞれしらすの液状化試験および再液状化試験で得られた代表的な記録波形を示す。Fig. 4(a)は $D_{r1}=66.2\%$ の液状化試験時の記録波形であり、図は上から順に軸ひずみ ϵ_1 、繰返しせん断応力比 $\sigma_d/2\sigma'_{30}$ および過剰間隙水圧比 $\Delta u/\sigma'_{30}$ の時刻歴を表している。図中には破壊時の繰返し回数 n_L を示しており、この場合には $n_L=14$ が得られた。過剰間隙水圧比は繰返し回数の増加とともに徐々に増加している。軸ひずみは過剰間隙水圧比が1.0に近づくあたりから伸張側に急増している。Fig. 4(b)は上述の液状化試験に引き続く再液状化試験時の記録波形である。再圧密後の相対密度 D_{r2} は過剰間隙水圧の消散すなわち再圧密に伴って66.2%から74.9%にまで増加している。再液状化試験においても初回の液状化試験と同様な傾向がみられる。初回の液状化試験時と再液状化試験時の繰

Table2 Test cases and test results of Shirasu

Test No.	Initial condition			Liquefaction				Reliquefaction			
	$D_{r0}(\%)$	$\sigma'_{30}(\text{kPa})$	B 値	$D_{r1}(\%)$	$\sigma_d/2 \sigma'_{30}$	$\Delta u/\sigma'_{30}$	n_L	$D_{r2}(\%)$	$\sigma_d/2 \sigma'_{30}$	$\Delta u/\sigma'_{30}$	n_L
1	88.7	98	0.95	92.2	0.081	0.99	331	96.2	0.092	0.99	149
2	88.3	98	0.99	92.5	0.092	0.98	122	95.8	0.105	0.97	77
3	92.8	98	0.95	97.4	0.193	0.93	11	—	—	—	—
4	90.4	98	0.95	94.7	0.210	0.96	8	95.8	0.207	0.97	8
5	92.0	98	0.96	96.2	0.256	0.96	4	97.8	0.315	0.96	3
6	91.3	98	0.94	97.8	0.361	0.97	3	99.4	0.438	0.91	2
7	91.4	98	0.98	99.4	0.315	0.96	2	—	—	—	—
8	67.7	98	0.99	74.5	0.075	0.98	123	79.6	0.086	0.97	42
9	63.1	98	1.00	71.3	0.061	1.00	52	75.0	0.066	0.99	46
10	65.9	98	1.00	73.7	0.070	0.97	20	77.0	0.074	0.98	122
11	65.5	98	1.00	75.3	0.095	1.00	12	76.8	0.096	0.99	20
12	64.2	98	1.00	71.8	0.103	1.00	10	74.4	0.099	1.00	16
13	64.5	98	0.98	72.1	0.102	1.00	8	74.6	0.119	0.98	8
14	62.2	98	1.00	69.8	0.120	0.97	4	70.9	0.142	0.96	3
15	58.3	147	0.96	68.2	0.123	0.99	193	69.3	0.119	0.99	112
16	62.0	147	0.95	72.2	0.125	0.98	92	—	—	—	—
17	55.8	147	0.97	60.7	0.151	0.99	41	62.1	0.135	0.99	20
18	63.0	147	0.97	70.0	0.144	0.97	18	70.7	0.132	0.96	52
19	59.5	147	0.95	69.5	0.156	0.99	9	—	—	—	—
20	60.4	147	0.95	70.7	0.184	0.98	8	71.3	0.183	0.99	8
21	58.4	147	0.95	69.0	0.207	0.97	4	70.2	0.193	0.98	6
22	57.5	49	0.99	62.3	0.078	1.00	113	72.1	0.095	1.00	94
23	62.0	49	0.95	66.3	0.083	0.98	27	75.0	0.103	0.99	30
24	59.1	49	0.99	62.7	0.090	0.99	18	70.8	0.110	1.00	16
25	62.8	49	0.98	66.2	0.101	0.98	14	74.9	0.118	1.00	16
26	57.2	49	0.97	62.6	0.091	0.97	7	69.5	0.123	0.98	6
27	58.8	49	0.97	63.1	0.127	0.96	6	66.2	0.148	0.97	4

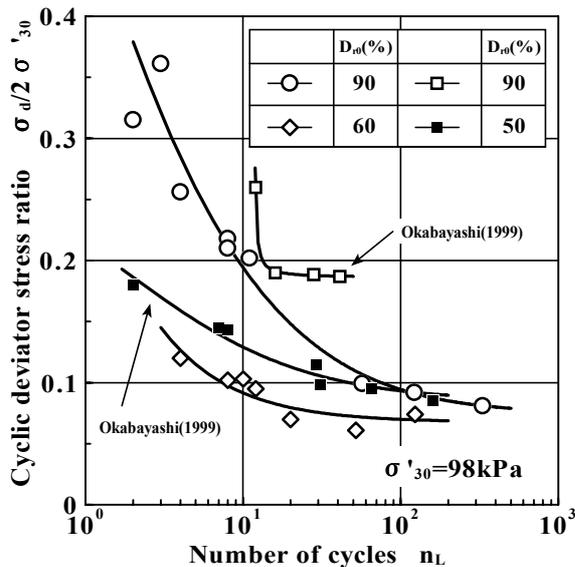


Fig.2 Relationships between n_L and $\sigma_d/2 \sigma'_{30}$

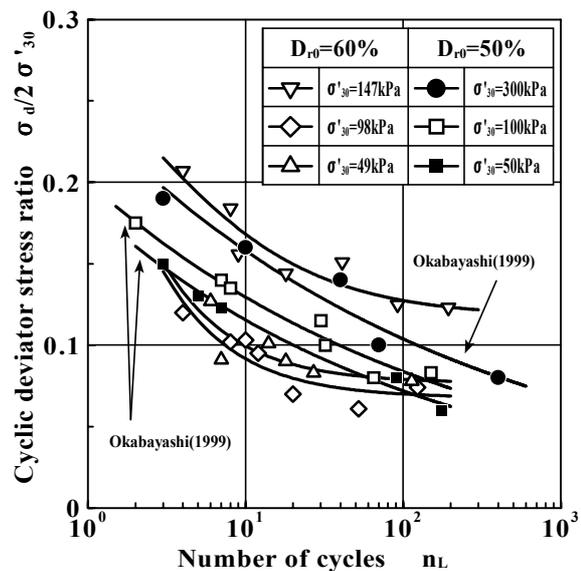


Fig.3 Relationships between n_L and $\sigma_d/2 \sigma'_{30}$

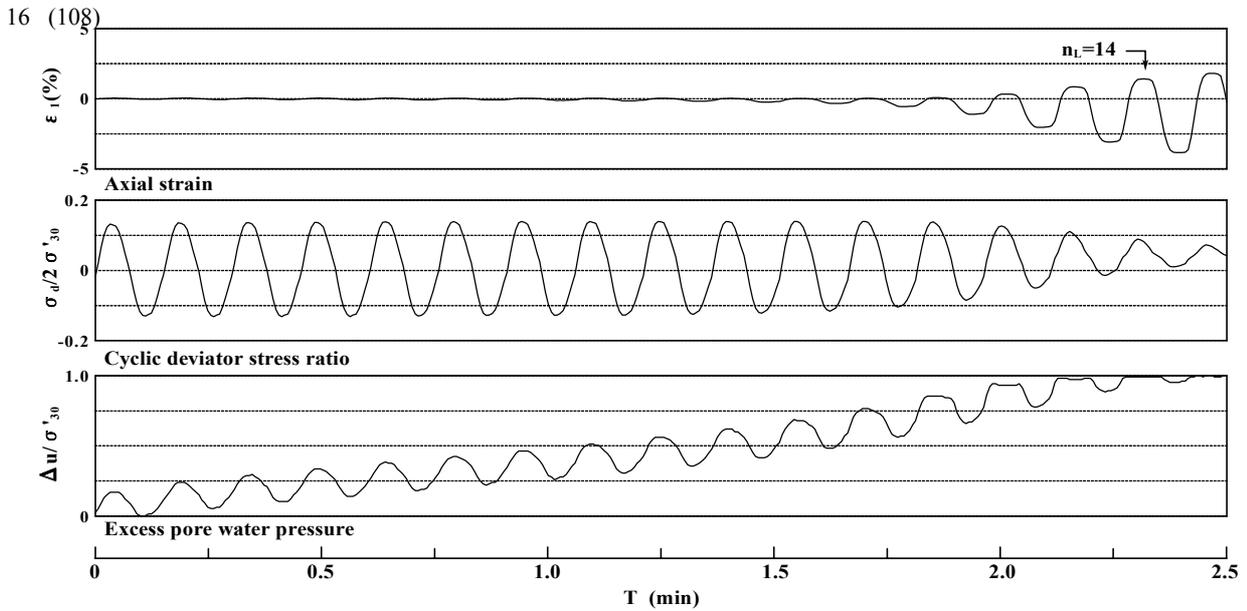


Fig. 4(a) Typical test result of liquefaction ($D_{r1}=66.2\%$, $\sigma_d/2\sigma'_{30}=0.101$, $n_L=14$)

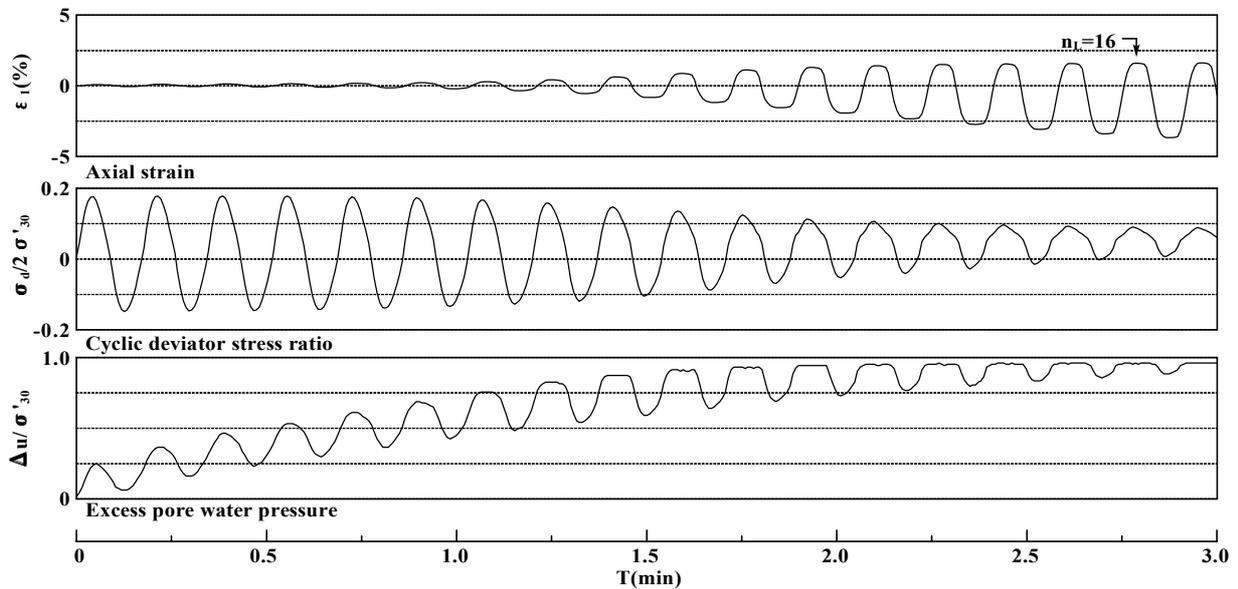


Fig. 4(b) Typical test result of reliquefaction ($D_{r2}=74.9\%$, $\sigma_d/2\sigma'_{30}=0.118$, $n_L=16$)

返しせん断応力比は同じではないが、破壊に至るまでの繰返し回数は14から16へと増加している。

(2) 液状化強度と再液状化強度の大小関係

Fig. 5は $D_{r0}=60\%$ 、 $\sigma'_{30}=98\text{kPa}$ の液状化強度曲線および再液状化強度曲線を示したものである。図中の記号◇はFig. 2で用いたデータと同じであり、◆は再液状化試験から得られたデータである。この場合に限れば、再液状化強度曲線は初回の液状化強度曲線よりも上方に位置しており、再液状化強度は初回の液状化強度よりも増加している。なお、これまで再液状強度は初回の液状化強度よりも減少する試験結果が Finn ら²⁾により報告されている。

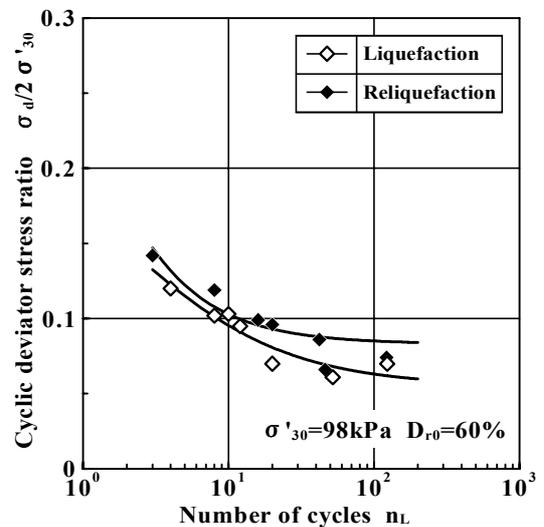


Fig. 5 Relationships between n_L and $\sigma_d/2\sigma'_{30}$

(3) 液状化後の再圧密に伴う間隙比の変化

Fig. 6 は初回の液状化試験時の繰返しせん断応力比 $\sigma_d/2\sigma'_{30}$ と再圧密に伴う間隙比変化量 Δe の関係を示している。試験条件は $D_{r0}=60\%$ 、 $\sigma'_{30}=98\text{kPa}$ である。 $\Delta e=0.01$ は相対密度の変化量 $\Delta D_r=1\%$ に相当する。 $\sigma_d/2\sigma'_{30}$ の増加に伴って Δe が減少している。すなわち、繰返しせん断応力比が大きいほど、再圧密時の体積変化量は小さい。**Fig. 7** に初回の液状化時に発生した過剰間隙水圧比 $\Delta u/\sigma'_{30}$ と Δe との関係を示す。 $\Delta u/\sigma'_{30}$ が大きいほど、 Δe は大きくなる。ただし、過剰間隙水圧比のわずかな差で液状化時の土粒子の浮遊状態が大きく変わるとは考えにくいので、液状化後の間隙比変化は供試体の排水条件のみならず土粒子の比重、形状、大きさなどが支配的な因子として挙げられる。

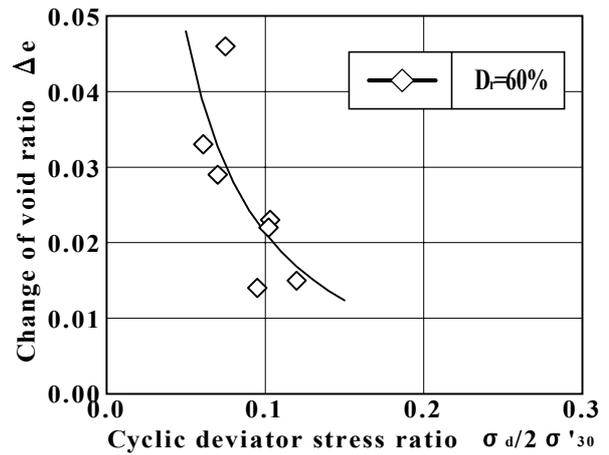


Fig. 6 Relationships between $\sigma_d/2\sigma'_{30}$ and Δe

(4) 初期相対密度と初期有効拘束圧の影響

Fig. 8 は D_{r0} を変化させた場合のしらすの再液状化強度曲線である。図中の記号●は再圧密後の相対密度 D_{r2} が $D_{r2}=95.8\% \sim 99.4\%$ (平均値 $\bar{D}_{r2}=97.0\%$)、◆は $D_{r2}=74.4\% \sim 79.6\%$ (平均値 $\bar{D}_{r2}=76.6\%$) のデータを示している。 $D_{r0}=90\%$ の再液状化強度曲線が $D_{r0}=60\%$ のそれよりも上方に位置しているため、再液状化強度は相対密度が高いほど大きい。このことは初回の液状化強度と相対密度の関係でみられた傾向とほぼ同様である。

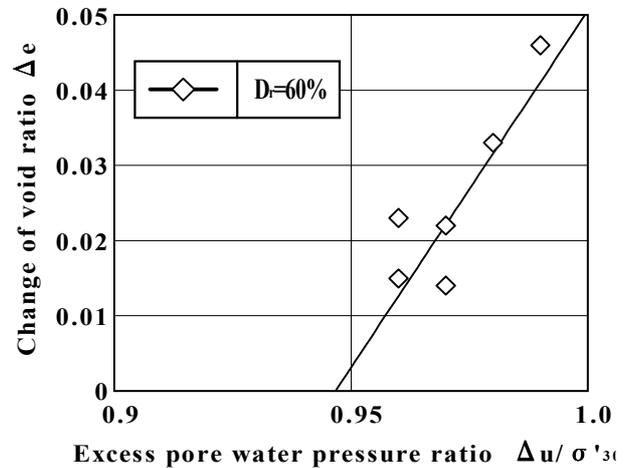


Fig. 7 Relationships between $\Delta u/\sigma'_{30}$ and Δe

Fig. 9 は σ'_{30} を変化させた場合のしらすの再液状化強度曲線である。図中の記号▲、◆、▼はそれぞれ $\sigma'_{30}=49\text{kPa}$ 、 98kPa 、 147kPa のデータを示している。 $\sigma'_{30}=49\text{kPa}$ および 98kPa の場合の液状化強度曲線は拘束圧依存性はみられないが、 $\sigma'_{30}=147\text{kPa}$ の場合の再

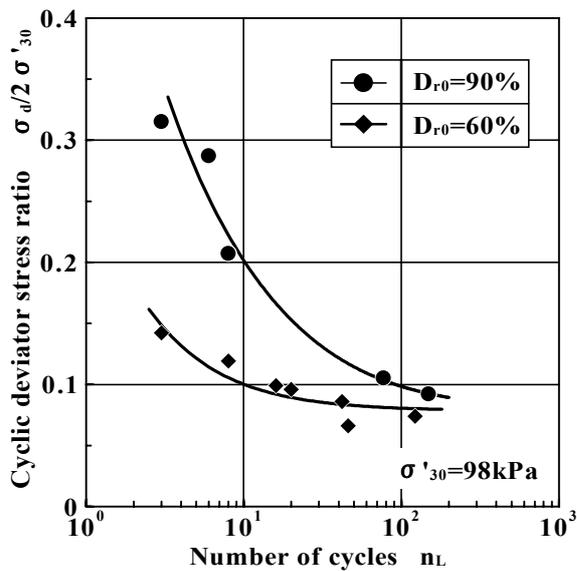


Fig. 8 Relationships between n_L and $\sigma_d/2\sigma'_{30}$

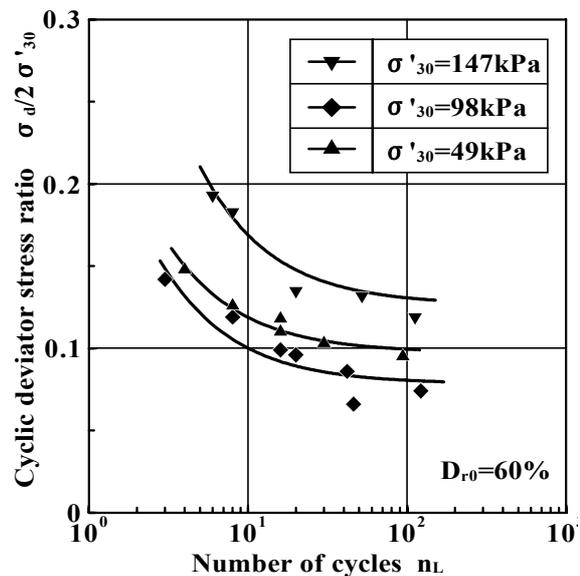


Fig. 9 Relationships between n_L and $\sigma_d/2\sigma'_{30}$

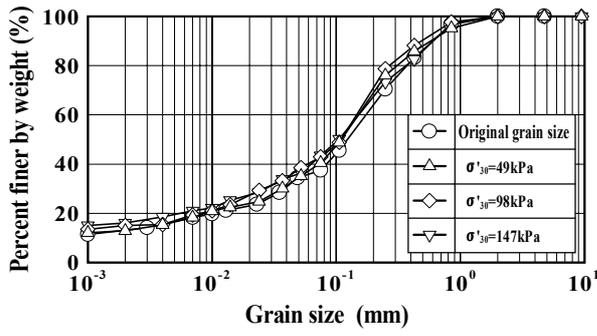


Fig. 10(a) Grain size distribution curve of soil sample before liquefaction

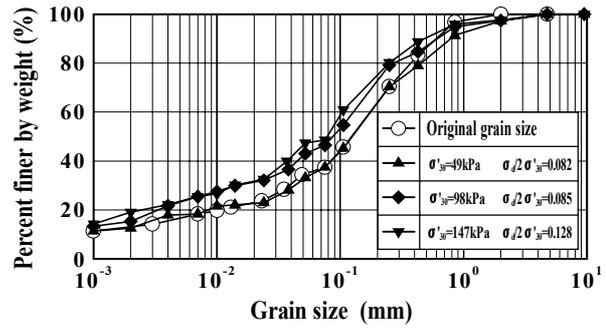


Fig. 10(b) Grain size distribution curve of soil sample after liquefaction

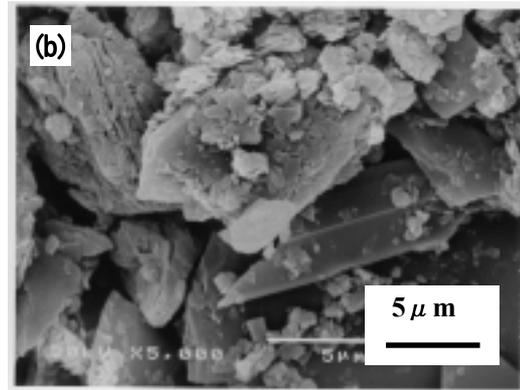
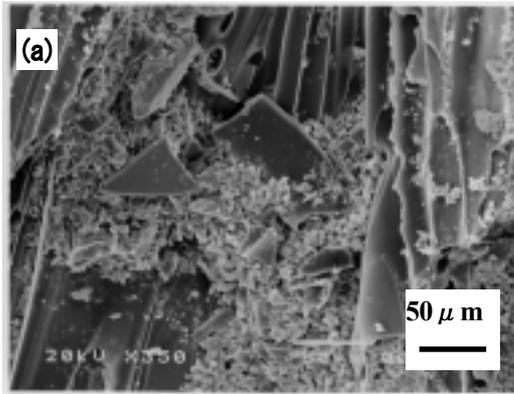


Photo.1 Microstructure of Shirasu ($\sigma'_{30}=49\text{kPa}$)

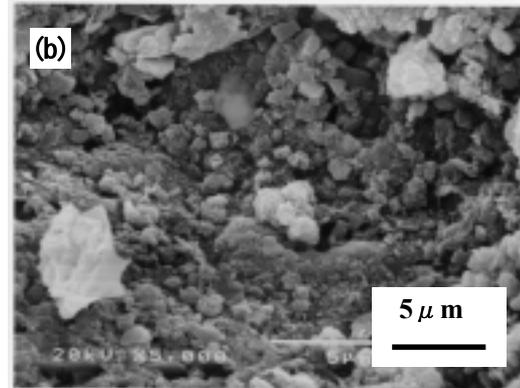
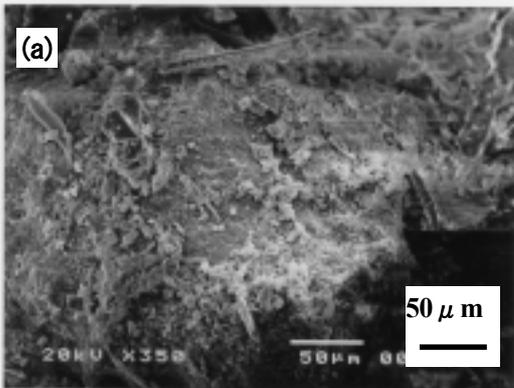


Photo.2 Microstructure of Shirasu ($\sigma'_{30}=98\text{kPa}$)

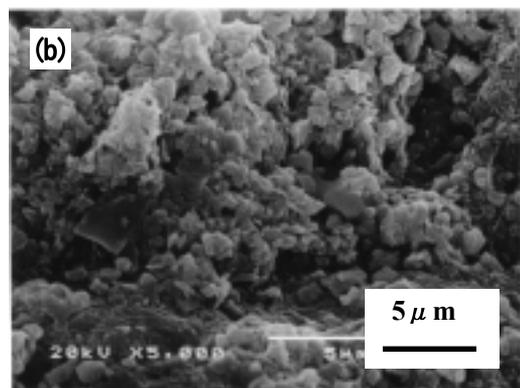
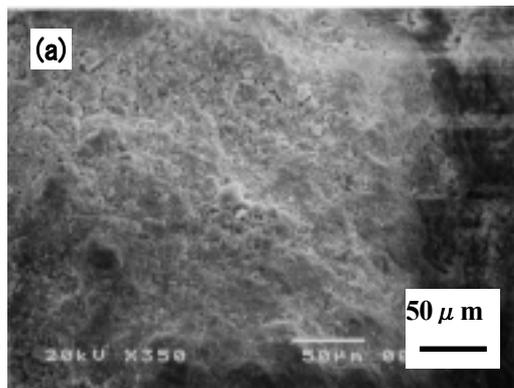


Photo.3 Microstructure of Shirasu ($\sigma'_{30}=147\text{kPa}$)

液状化強度曲線はこれらよりも上方に位置しており、有効拘束圧の影響を受けている。

(5) 液状化前後における粒度特性の変化

Fig. 10(a) および **(b)** にそれぞれ圧密後および液状化試験後の粒径加積曲線を示す。**Fig. 10(a)** では図中の記号○は原粒度, △, ◇, ▽は $\sigma'_{30}=49\text{kPa}$, 98kPa , 147kPa で等方圧密後の粒度を示している。圧密後の粒径加積曲線は等方圧密応力の大きさによらず原粒度のそれとほとんど変わらない。**Fig. 10(b)** では図中の記号○は原粒度, ▲, ◆, ▼は $\sigma'_{30}=49\text{kPa}$, 98kPa , 147kPa で液状化試験後の粒度を示している。 $\sigma'_{30}=98\text{kPa}$ および 147kPa の場合の粒径加積曲線は原粒度のそれよりも細粒分が増加している。 $\sigma'_{30}=49\text{kPa}$ は原粒度のそれと比べて粒子破碎を示す粒径加積曲線の変化は認められない。**Photos. 1~3** にそれぞれ $\sigma'_{30}=49\text{kPa}$, 98kPa , 147kPa の下での液状化試験後の試料の走査型電子顕微鏡写真を示している。写真の倍率は2種類とし、**(a)** は350倍、**(b)** は5000倍のものである。本試料は表面が角張った火山ガラスと多孔質で粗い軽石で構成されていることがわかる。**Photos. 1~3** から、初期有効拘束圧が大きいかほど、しらすの粒子破碎が顕著にみられる。

5. 結論

乱したしらすに対して初期相対密度と初期有効拘束圧を変化させた繰返し三軸試験を実施した。試験結果に基づく考察の結果、得られた結論は以下のとおりである。

- 1) 今回の試験結果において、再液状化強度は初回の液状化強度よりも増加しており、その理由は液状化後の再圧密に伴って間隙比が減少したためである。
- 2) 再液状化強度は、初回の液状化強度と同様に、初期相対密度の増加に対して増加する。
- 3) 再液状化強度は、初回の液状化強度と同様に、初期有効拘束圧の影響を受ける。
- 4) 初期有効拘束圧 98kPa 以上の領域での液状化試験では粒子破碎を示す粒度特性の変化が認められた。

謝辞

鹿児島工業高等専門学校岡林 巧先生には本論文を作成する上で有益なご助言をいただいた。山口大学大学院生松下英次氏および川島洋史氏（現在、㈱ウエスコ）には実験でご助力をいただいた。これらの方々に厚く感謝の意を表す次第である。

参考文献

- 1) 山本哲朗, 岡林 巧, 松本 直, 郷 健一: 1997年鹿児島県北西部地震, 同第二北西部地震における地

震災害, 地震工学振興会ニュース, No.157, pp.31-41, 1997.

- 2) Finn, W.D.L., P.L.Bransby and D.J.Pickering : Effect of Strain History on Liquefaction of Sand, J.SMFD, ASCE, Vol.96, No.SM6, pp.1917-1934. 1970.
- 3) 大原資生, 山本哲朗: 振動台による飽和砂の再液状化特性に関する実験的研究, 土質工学会論文報告集, Vol.22, No.2, pp.123-132, 1982.
- 4) 川島洋史: 安定処理土の強度・変形特性に及ぼす影響因子, 山口大学大学院理工学研究科修士論文, 2000.
- 5) 岡林 巧: しらす地盤の不飽和浸透特性と非排水せん断挙動に関する研究, 山口大学学位請求論文, pp.66-70, 1999.
- 6) 柚木祐二, 石原研而, 関 元治, 米田吉博: 密な砂の繰返し三軸せん断挙動に与える初期有効拘束圧の影響, 第17回土質工学研究発表会講演概要集, pp.1649-1652, 1982.
- 7) 石原研而, 菊池喜昭, 堤 康一: 低拘束圧下における砂の繰返し変形挙動, 第18回土質工学会研究発表会講演概要集, pp.353-354, 1983.

(平成12年12月27日受理)