

## しらすの液状化特性について

Liquefaction Property of SHIRASU

岡林 巧\* (Takumi Okabayashi)  
 村田秀一\*\* (Hidekazu Murata)  
 兵動正幸\*\*\* (Masayuki Hyodo)  
 山本陽一\*\*\*\* (Youichi Yamamoto)  
 岸本 洋\*\*\*\* (Hiroshi Kishimoto)

本研究では、緩い状態と密な状態のしらすの静的非排水せん断試験と非排水繰返しせん断試験を種々行い、以下のような結論を得た。(1)静的非排水せん断試験における軸差応力比のピーク値は、密度の増加により顕著な増加が見られ、しかも、伸張側に比べて圧縮側でその傾向が卓越する。(2)緩いしらすの軸差応力比のピーク値は、拘束圧の増加に伴い増大するのに対し、密なしらすのピーク値は拘束圧の増加に伴い減少する。(3)緩い状態のしらすの有効応力径路は、ある程度の拘束圧までは拘束圧が増加するほど膨張性の特性を示す。一方、密な状態のそれは、一般の砂と同様に拘束圧の増加に従いより収縮性の挙動を示す。(4)緩いしらすの場合、拘束圧の増加に伴い液状化強度の増加が見られる。一方、密なしらすの場合、逆に拘束圧の増加に伴い液状化強度は減少する。(5)繰返し時の有効応力径路は静的有効応力径路における伸張側の軟化点での応力比に達すると流動化現象を起こして液状化に至る。(6)静的有効応力径路における伸張側の軟化点での軸差応力を非排水強度と定義して整理した繰返し応力比と繰返し回数の間には、拘束圧によらず一義的な関係が存在する。

キーワード：しらす／液状化／静的せん断試験／繰返しせん断試験／応力径路 IGC:D6/D7

## 1. まえがき

南九州のしらすと同一成因による地層は、阿蘇火山、十和田湖、屈斜路湖、十勝岳、支笏湖および洞爺湖など全国各地の火山周辺に分布しており、世界的にも火山地帯における分布が報告されている<sup>1)</sup>。南九州におけるしらすは、総面積4700km<sup>2</sup>にもおよび、この内72%が鹿児島県、27%が宮崎県、1%が熊本県に分布している<sup>2)</sup>。これらのしらすは、いくつかの誘因によって災害が頻発していることから特殊土に分類されている。特に問題となるしらす災害は、豪雨および地震力による斜面崩壊と、地震時の沖積地盤、埋立地盤に生じる液状化によるものに分けることができる。

しらすの地震による災害例としては、1968年のえびの地震による大規模な斜面崩壊があり、またその際、平地や河原などに噴砂現象がみられ、橋脚の沈下等が生じたことが報告されている<sup>3)</sup>。更に、同年の十勝沖地震の際に北海道におけるしらすと同一成因の地層においても液状化を生じたことが知られている<sup>4)</sup>。近年、ウォーターフロントを始めとする海洋開発が南九州においても盛んに行われるようになり、しらすを埋立用材として利用した施工例も多くみられる。しらす埋立地盤の液状化に関する研究<sup>5)~11)</sup>は、えびの地震以来かなり行われているものの、しらすは物理的にも土質力学的にも普通の土とはかなり異なる性質を有していること<sup>12)</sup>に起因して、しらす地盤の液状化対策を十分に講ずるまでに至っていないとはいえない。

本研究の目的は、しらすの非排水静的せん断挙動と繰返し非排水せん断挙動を側圧一定タイプの三軸試験機を用いて調べることである。本文では、まず、しらすの物理的特性を明らかにした後、非排水状態で行った静的三軸圧縮試験と伸張試験の結果を示した。次に、静的有効応力径路と繰返し有効応力径路には密接な関係があることに<sup>13)14)</sup>着目し、非排水静的せん断挙動と繰返し非排水せん断挙動とを対応させ考察した。更に、豊浦標準砂(以下豊浦砂と称する)についても同様な試験を行い、しらすのせん断特性を豊浦砂の結果と比較することにより、しらすの特異性を明確にすることを試みた。

\*鹿児島高専土木工学科 助教授、\*\*山口大学工学部社会建設工学科 教授

\*\*\*山口大学工学部社会建設工学科 助教授、\*\*\*\*同学科 大学院生

2. 試料と試験方法

2.1 しらすの指数的性質

試験に用いた試料は、鹿児島県始良郡華人町で採取した一次しらすと豊浦砂である。しらすと豊浦砂の各々の粒度曲線を図-1に示す。両者を比較すると、しらすは、豊浦砂より均等係数が大きくかなり粒度分布が良いといえる。また、しらすの細粒分含有率(75 $\mu$ m以下)は、およそ35%でありかなり高い。なお、このしらすの細粒分は、一般に言われる活性(粘性)を持つものではなく、粗粒成分と同一の非活性組成を有している。表-1にしらすと豊浦砂の物理特性を示す。しらすの比重は、豊浦砂に比較してかなり小さい。また最大・最小間隙比は、しらす、豊浦砂ともに団粒構造にならないと判断して便宜的に土質工学会基準の方法を用いて求めたが、しらすの方が豊浦砂に比べて最大間隙比、最小間隙比ともかなり大きい値を示している。これらがしらすの指数的な特徴である。

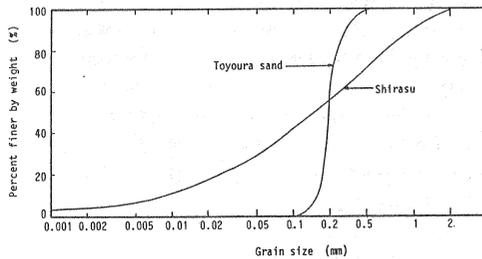


図-1 しらすと豊浦標準砂の粒度分布

表-1 試料の物理特性

	$G_s$	$e_{max}$	$e_{min}$	$U_c$	$D_{50}$
Shirasu	2.489	1.494	0.775	29.5	0.165
Toyouura sand	2.643	0.973	0.635	1.20	0.210

2.2 試験方法

しらすは、多孔質粒子により構成されているので、飽和が非常に困難である<sup>15)</sup>。そのために著者らは、予備試験を行い炭酸ガス(CO<sub>2</sub>)で供試体内の空気を置換し脱気水を通水した後、背圧を長時間負荷して飽和度を向上させる方法を採用した。供試体の相対密度は、Dr=50%と90%の2種類とした。また静的試験及び繰返し試験における供試体作成方法は同じであり、以下の手順で行った。

- (1) 最少密度試験方法(土質学会基準)に準拠した方法で供試体を作成するが、その際、所定の相対密度になるようにモールドを木づちで打撃する。本方法を用いた理由は、空中落下法や水中落下法による供試体準備法に比べて、本方法で得られる相対密度の幅が最も広かった(Dr=35~95%)ことと、比較的均一に粒度分布を保持した供試体の作成が可能であったことによっている。
- (2) 供試体を20kPaの負圧で自立させ、供試体の寸法を計測する。
- (3) 三軸室をセットした後、供試体内の負圧を側圧に置き換える。
- (4) 一分間に約2ccの炭酸ガスを1~2時間程度供試体下部から通気する。
- (5) 脱気水を供試体下部から通水する。
- (6) 背圧100kPaを負荷する。
- (7) B値を検定する。
- (8) B値が0.96以上の供試体に対して所定の拘束圧 $p_c$ まで等方的に圧密を行う。
- (9) 圧密終了後、静的あるいは繰返しせん断を行う。

なお、本論文に用いた平均有効主応力 $p_c$ 、軸差応力 $q$ の定義は、 $p_c = (\sigma_1 + 2\sigma_3) / 3$ 、 $q = (\sigma_1 - \sigma_3)$  である。

静的三軸試験は、非排水状態で側圧一定下においてひずみ制御方式によって行った。軸ひずみ速度は0.1%/minとし、計測項目は、軸荷重、軸変位、間隙水圧である。一方、繰返しせん断試験の場合は、非排水状態で空圧制御式繰返し載荷システムを用いて周波数0.1Hzで振幅一定の正弦波軸荷重を圧縮側から載荷した。

3. 静的非排水せん断挙動

じらすの非排水せん断挙動に与える拘束圧の影響を調べるために、等方応力状態で有効拘束圧  $p_c = 50\text{kPa}$ ,  $100\text{kPa}$ ,  $300\text{kPa}$  として静的な三軸圧縮及び伸張せん断試験を行った。図-2および図-3はそれぞれ相対密度  $Dr = 50\%$  における有効応力経路、軸差応力と軸ひずみの関係を示したものである。図-2から拘束圧の増加に伴い平均有効主応力  $p$  の値が最も減少したときの軸差応力  $q$  の値（以下せん断強さと称する）は増加していることが分かる。また図-3からある軸差応力に達するまでは軸ひずみはほとんど生じないが、その軸差応力を越えると急激に軸ひずみの増大が見られる。また拘束圧の増加に伴いひずみが急増する状態での軸差応力は増加している。更に拘束圧の影響をより明確にするために図-2および図-3を初期平均有効主応力  $p_c$  で正規化したものが図-4および図-5である。図-4の圧縮側についてみると、 $p_c = 50\text{kPa}$  ではいったん軸差応力比  $q/p_c$  が矢印で示すピーク値に達した後減少する一方の完全な軟化挙動を示し、ついに定常状態（Steady State<sup>17)</sup>）に至っている。 $p_c = 100\text{kPa}$  ではせん断初期に軟化挙動を示した後に膨張傾向へと転じている。また、 $p_c = 300\text{kPa}$  では軟化は見られず軸差応力比は単調に増加している。一方、伸張側では、 $p_c = 50\text{kPa}$  及び  $100\text{kPa}$  の場合の有効応力経路はいずれも完全な収縮挙動を示し、拘束圧によるせん断強さの差はあまり認められない。 $p_c = 300\text{kPa}$  については、 $50\text{kPa}$ ,  $100\text{kPa}$  ほどの収縮性は認められない。また、有効応力比 ( $q/p$ ) の最大値を破壊時の有効応力比  $\eta$  と定義し、圧縮、伸張での応力比 ( $\eta_{tc}$ ,  $\eta_{ts}$ ) を拘束圧ごとに求めた結果大きな差はなく、 $Dr = 50\%$  では  $\eta_{tc} = 1.50$ ,  $\eta_{ts} = -1.19$ 、 $Dr = 90\%$  では  $\eta_{tc} = 1.93$ ,  $\eta_{ts} = -1.10$  が得られた。更に  $\eta_{tc}$ ,  $\eta_{ts}$  が大きく異なることから、乱したじらすは強度異方性の卓越した砂であると言えよう。

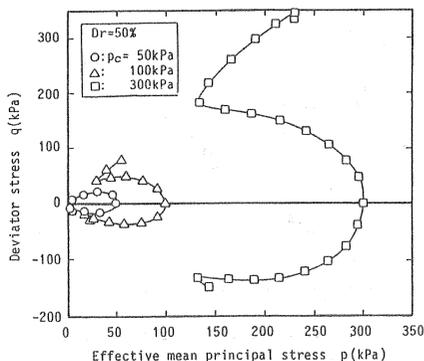


図-2 相対密度  $Dr = 50\%$  における有効応力経路

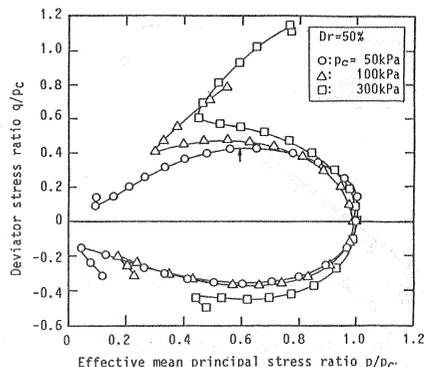


図-4 相対密度  $Dr = 50\%$  における正規化した有効応力経路

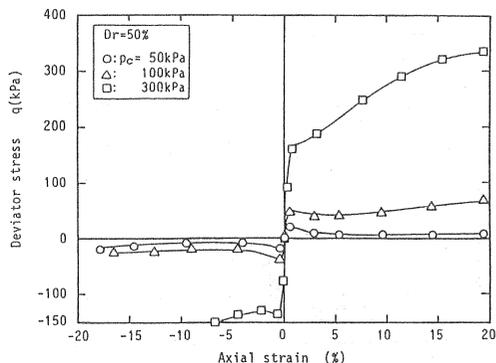


図-3 相対密度  $Dr = 50\%$  における軸差応力と軸ひずみの関係

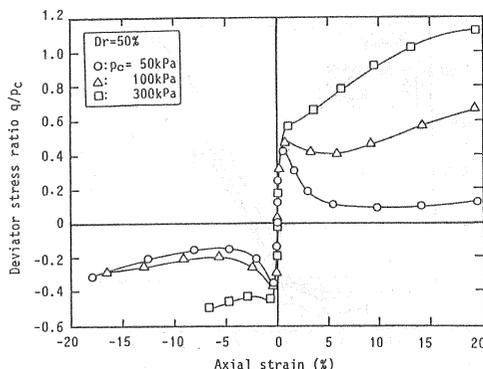


図-5 相対密度  $Dr = 50\%$  における正規化した軸差応力比と軸ひずみの関係

図-5の軸差応力比と軸ひずみの関係より、 $p_c=50\text{kPa}$ の場合は圧縮、伸張いずれもピーク値に達した後軟化に転じ、ついには定常状態に至り残留強度を有することが分かる。 $p_c=100\text{kPa}$ では軸差応力比はせん断初期に軟化の傾向を示すがその後は、軸ひずみの増大に伴い軸差応力比が増加している。 $p_c=300\text{kPa}$ では、ピーク値は見られず、軸差応力比は単調に増加している。伸張側では若干軟化するが、ただちに、強度は回復に向かっている。

図-6および図-7は、相対密度  $Dr=90\%$ における有効応力径路、軸差応力と軸ひずみの関係をそれぞれ示したものである。まず、図-6から拘束圧の増加に伴いせん断強さが増加していることが分かる。図-7から拘束圧の増加に伴い矢印で示すせん断応力のピーク値は増加していることが分かる。 $Dr=50\%$ の場合と同様の理由によって図-6および図-7を初期有効拘束圧  $p_c$ で正規化したものが図-8および図-9である。図-8からこの範囲の拘束圧レベルでは有効応力径路に差はみられず、従って有効応力径路に及ぼす拘束圧の影響は有意なものではないと考えられる。また図-9において圧縮側の  $p_c=50\text{kPa}$  及び  $100\text{kPa}$ では軸差応力比  $q/p_c$ にピークが現われた後、軸差応力比は減少し最終的に定常状態に至る傾向にあることが読み取れる。 $p_c=300\text{kPa}$ では軸ひずみの増加にともない単調に強度が増加している。一方、伸張側では、 $p_c=50\text{kPa}, 100\text{kPa}, 300\text{kPa}$ のいずれの場合でも強度にピークが認められ、その後わずかに減少している。また、図-5と図-9に示した緩い状態( $Dr=50\%$ )と密な状態( $Dr=90\%$ )のしらすの軸差応力比と軸ひずみの関係のしらすを比較すると、同じ拘束圧であれば、密なしらすの方が緩いしらすよりも軸差応力比のピーク値は高い。更に、軸差応力比と軸ひずみの関係において、 $Dr=50\%$ の場合の軸差応力比のピーク値は拘束圧の増加に伴い増大しているのに対し、 $Dr=90\%$ の軸差応力比のピーク値は拘束圧の増加に伴い減少するという全く逆の傾向を示すことが分かる。

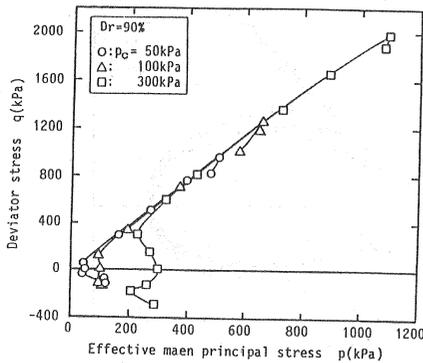


図-6 相対密度 $Dr=90\%$ における有効応力径路

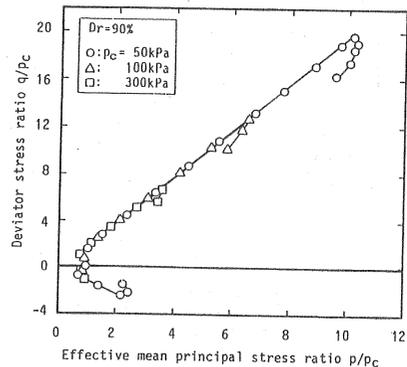


図-8 相対密度 $Dr=90\%$ における正規化した有効応力径路

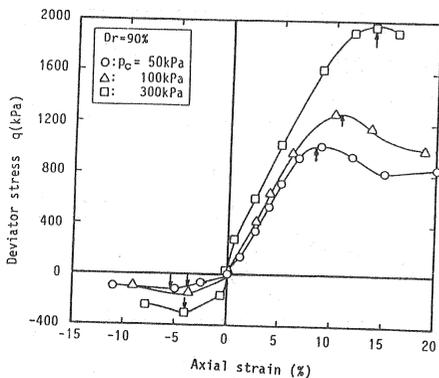


図-7 相対密度 $Dr=90\%$ における軸差応力と軸ひずみの関係

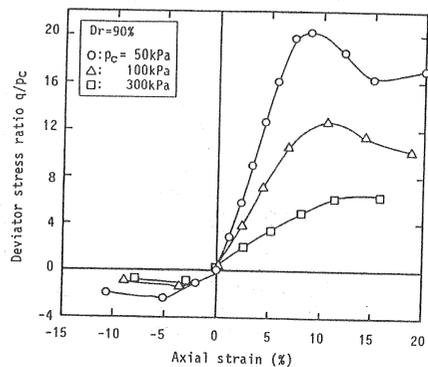


図-9 相対密度 $Dr=90\%$ における正規化した軸差応力比と軸ひずみの関係

以上のことから、拘束圧 50kPa~300kPaの範囲における静的非排水三軸試験から得られたしらすの特異性は、密な状態の有効応力径路が一般の砂と同様拘束圧の増加と共に収縮性の強い挙動を示すのに対し、緩い状態ではそれとは逆に拘束圧の増加にともない有効応力径路が膨張性の卓越した挙動を呈するところにあると言える。この緩い状態のしらすの挙動は、1)拘束圧が小さな場合粒子表面のすべりに起因した粒子構造の再配列によりせん断強さは低下すること、しかし、2)せん断強さは拘束圧の増加にしたがって粒子間のインターロッキング効果が増加し、その結果としてせん断強さを増すことを考えれば説明できる。一方、密な状態のしらすの挙動は、1)拘束圧が小さい状態からすでに粒子間のインターロッキング効果が発揮され大きなせん断強さを有していることと、2)拘束圧の増加に伴って粒子破碎が卓越しせん断強さが低減することを考えると理解できる。これらのことは、工学的には緩いしらす地盤は拘束圧が小さいほど密なしらす地盤に比べて相対的に非排水せん断強さが大きく低下してゆき、特に表層付近の設計施工に注意を要することを示唆するものである。

4. 繰返し非排水せん断挙動

相対密度  $Dr=50\%$  及び  $90\%$  のしらすの繰返し非排水三軸試験より得られた軸変位、軸荷重、間隙水圧の時刻歴を図-10(a),(b)にそれぞれ示す。図(a)の緩い状態の場合は、繰返し応力比  $q_{cyc}/p_c=0.232$ 、図(b)の密な状態の場合は、 $q_{cyc}/p_c=0.521$ の結果を示している。両者の  $q_{cyc}/p_c$  の値は異なるが、これらの図から言えることは次のようである。まず、図(a)の緩い状態( $Dr=50\%$ )のしらすでは間隙水圧が初めて初期有効拘束圧に等しくなった時点(初期液状化)で変形は急激に増大し破壊に至っている。これに対し、図(b)の密な状態( $Dr=90\%$ )のしらすでは初期液状化に達したときに変形が生じているが急激に増大するのではなく、その後の繰返しせん断荷重の継続とともに変形は徐々に増加する傾向にある。なお、間隙水圧の波形は、間隙水圧上昇中はせん断荷重の波形と対

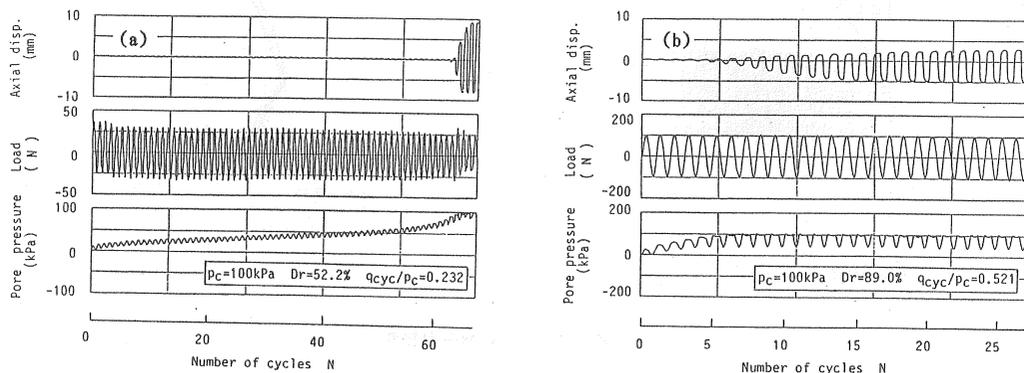


図-10 軸変位 軸荷重 間隙水圧の時刻歴

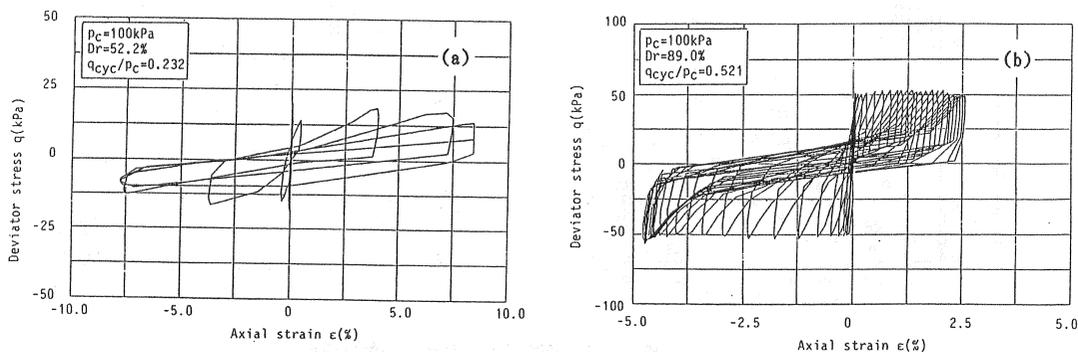


図-11 軸差応力と軸ひずみの関係

応した挙動をしているが間隙水圧が拘束圧とほぼ等しくなった時点から山と谷の数が増加している。これは間隙水圧が拘束圧とほぼ等しくなった時点で平均主応力がわずかに変化するために間隙水圧が変動したこと起因している。図-11(a),(b)はそれぞれ相対密度 $Dr=50\%$ ,  $90\%$ のしらすの典型的な軸差応力と軸ひずみの関係を示している。図(a)の緩い状態のしらすでは急激なひずみ両振幅の増大がみられ、その結果、せん断剛性が極端に低くなっている。一方、図(b)の密な状態のしらすでは、ひずみ両振幅は徐々に増大していき供試体の劣化が連続的に進行している。また、変形は伸張側に卓越する傾向にあり、強い異方性を示している。またこの異方性の程度は、先述した静的試験結果(図-2および図-6)の対比によっても現われており、密な状態のものほど大きくなっている。図-12(a),(b)は、両供試体の有効応力径路を示したものである。図(a)から緩い状態のしらすでは、ある時点から破壊線に沿うような有効応力径路を示し、有効応力が0になった時点で液状化に至る挙動を認めることができる。また、図(b)から密な状態のしらすでは、せん断応力を繰返し載荷することにより、有効応力径路が次第に破壊線に沿った形を呈し、一時的に有効応力は0になるがその後のせん断応力の負荷によるダイレイタンス効果により負の過剰間隙水圧が発生して有効応力が回復し、有限の小さなひずみ振幅しか発生しなすなわちCyclic Mobility<sup>19)</sup>の状態に至っていることが分かる。また、図-12(a)および図-12(b)には静的非排水せん断試験で得られた破壊線も併せて示している。繰返し試験で得られた破壊線と静的試験で得られた破壊線には若干差が見られるが繰返し試験では断面補正を行っておらず、このことを考え合わせると繰返し試験結果と静的試験結果は良い対応関係にあると考えられる。

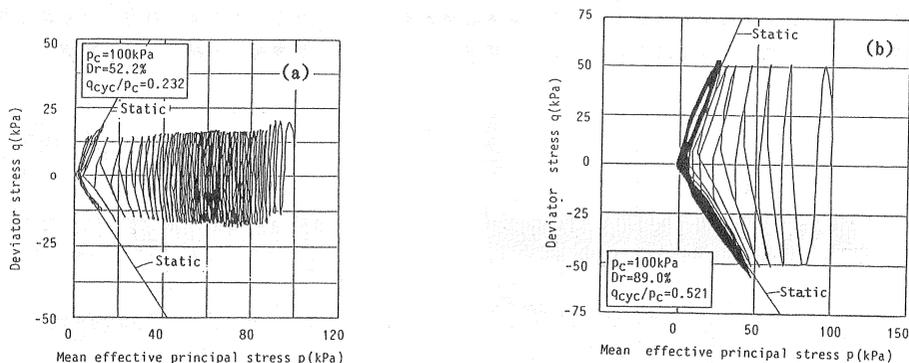


図-12 有効応力径路

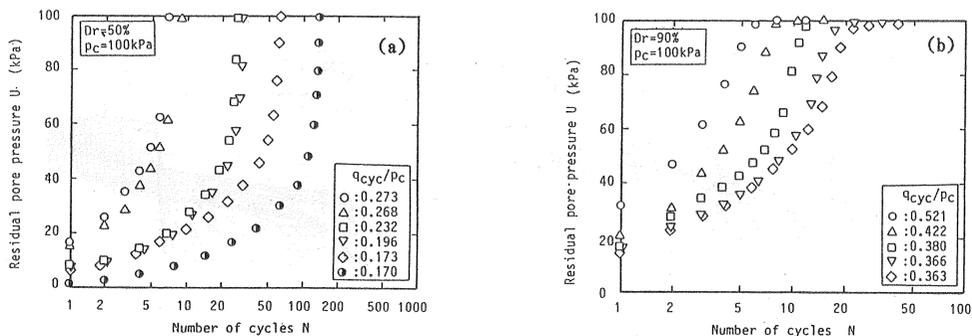


図-13 間隙水圧と繰返し回数の関係

飽和砂は非排水状態で繰返しせん断応力を受け続けると、間隙水圧の変化と共に有効応力の変化を生じる。図-13(a),(b)は、等方圧密後のしらすの非排水繰返しせん断応力負荷時の 間隙水圧  $U$  を数種類の載荷応力比について示している。この間隙水圧は、各繰返しサイクル終了時点の間隙水圧を意味するものである。図(a)から明らかなように、比較的相対密度の小さい条件における間隙水圧の挙動は、ある繰返し回数で急激に上昇する傾向を呈している。これは、まず伸張側においてせん断破壊を生じ、その後間隙水圧の急上昇に伴う有効応力の減少により液状化挙動を示すことによるものである。一方、図(b)に見られるように  $Dr=90\%$  での間隙水圧と繰返し回数の関係は、 $Dr=50\%$  の場合と比較して間隙水圧の上昇の仕方は緩やかであり、特に液状化近傍( $U=100kPa$ )で $U$ の上昇はより減速する。

等方応力状態で対称両振りの繰返しせん断を受ける砂質土の液状化強度は、一般にあるひずみ両振幅 $DA$ を生じるのに必要な繰返し応力 $q_{c0}$ と繰返し回数 $N$ の関係によって規定される。図-14にひずみ両振幅 $DA$ の概念を示す。図-15(a),(b)は、それぞれ相対密度 $Dr=50\%$ 及び $90\%$ において、ひずみ両振幅がそれぞれ2, 5, 10%に至るのに必要な繰返し応力比と繰返し回数の関係を示したものである。また図(a)には繰返し載荷によって間隙水圧が初めて有効拘束圧 $p_c$ に等しくなったとき(初期液状化)の繰返し応力と繰返し回数の関係も合わせて示した。図(a)において2, 5, 10%のひずみ両振幅は初期液状化とほぼ同時に生じており、それぞれのひずみ両振幅に至るまでの繰返し回数に、大差ないことが示されている。これより、相対密度 $Dr=50\%$ の繰返し試験においては、規定したひずみ両振幅がいずれの場合もその強度は変わらないため初期液状化に達した時を破壊と規定することが妥当であると言えよう。図(b)は密な砂によく見られる様に  $N=10$  回付近において強度線の急激な立ち上がりが認められる。また、比較的少ない回数において、 $DA=2, 5, 10\%$  に対する強度曲線が異なることから、破壊の定義は規定するひずみ両振幅に大きく作用され $Dr=50\%$ の時のように、破壊を初期液状化で規定すると、著しく液状化強度を過小評価してしまうことになる。なお、本文では相対密度 $Dr=90\%$ のしらすに対しては、通常砂質土の破壊時のひずみ両振幅として用いられる $DA=5\%$  に達した時を破壊と規定<sup>18) 19)</sup>して以下の考察を行うこととする。

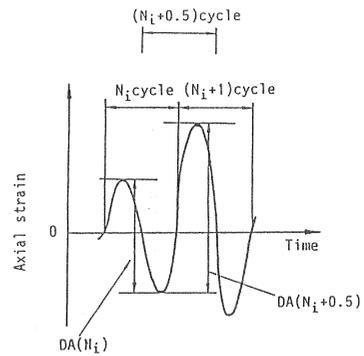


図-14 ひずみ両振幅 $DA$ の概念

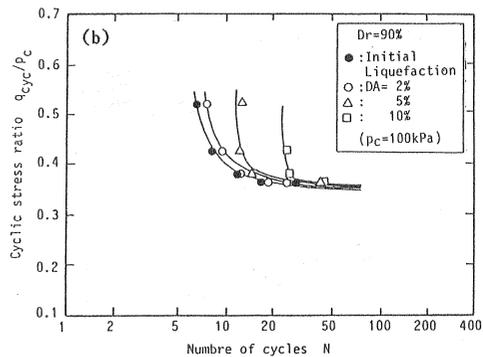
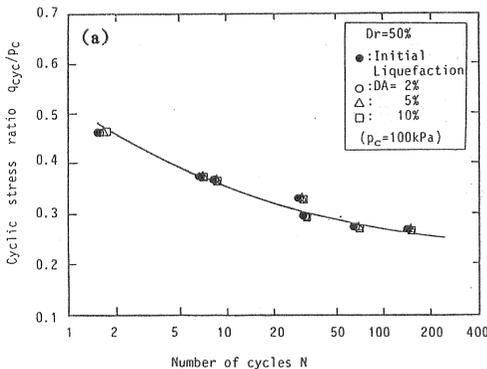


図-15 異なったひずみ両振幅で破壊を規定した場合の繰返し応力比と繰返し回数の関係

図-16 にそのようにして破壊を定義した時の繰返し応力比と繰返し回数の関係を示す。また、同図には豊浦砂( $p_c=100\text{kPa}$ )の試験結果も合わせて示してある。図より、しらすの液状化強度は $Dr=90\%$ の方が $Dr=50\%$ のものより高く、一般的な砂と同様に相対密度に依存することが分かる。また、豊浦砂と比較してみると、 $Dr=50\%$ の場合、繰返し回数が50回以下ではしらすの方が豊浦砂よりも若干液状化強度が高いが50回以上では大きな差は見られない。それに対し、 $Dr=90\%$ の場合、繰返し回数15回以上では豊浦砂の方が液状化強度は高い。また、ある特定の繰返し回数で急激に強度線が立ち上がる傾向はどちらの試料においても共通に見られた。繰返し回数10回以上に限って言えば相対密度の増加に伴う液状化強度の増加割合は、豊浦砂よりしらすの方が小さい。次に、しらすの液状化強度に及ぼす拘束圧の影響を調べるために、50,100,300kPaの3種類の拘束圧下で行った試験結果を、縦軸に繰返し応力比 $q_{cyc}/p_c$ 、横軸に繰返し回数 $N$ をとり、両者の関係をプロットしたものが図-17(a),(b)である。 $Dr=50\%$ の場合では、拘束圧 $p_c$ の増加に伴い、液状化強度の増加が見られる。 $Dr=90\%$ の場合では、逆に拘束圧の増加に伴い液状化強度は減少する非常に特異な傾向が見られる。砂の液状化強度は、 $p_c=50\sim 300\text{kPa}$ 程度の応力範囲では一般に拘束圧に依存しないと言われていたことを考えると、この図で認められる特性はしらすの一つの特異性をよく表わしているものと考えられる。

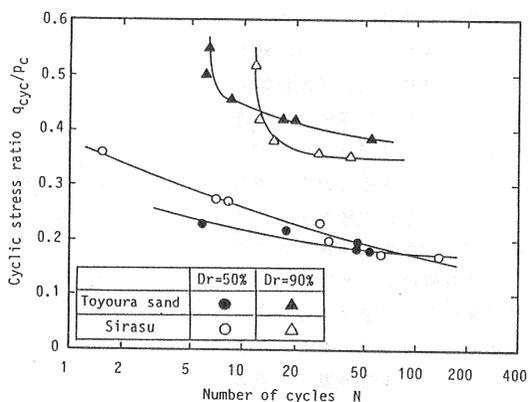


図-16 しらすと豊浦砂の液状化強度曲線の比較

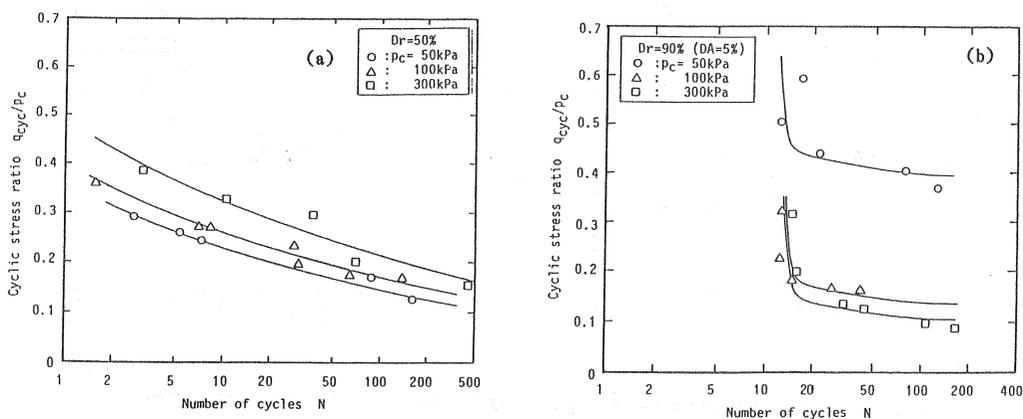


図-17 液状化強度に与える拘束圧の影響

5. 静的及び繰返しせん断挙動の対応

先に述べた様に しらすの静的及び繰返し挙動は、密度と拘束圧に大きく影響されている。また、相対密度 $Dr=50\%$ のしらすの静的せん断挙動は 拘束圧の違いにより圧縮性の卓越した特性から膨張性の卓越した特性へと大きく変化することから、繰返しせん断挙動においてもその影響が生じていることが考えられる。Vaidら<sup>17)</sup>は、液状化と呼ばれる現象について、図-18(a),(b)に示す①のように収縮一方の挙動を示す砂に対するものをLiquefaction、②のように部分的に軟化挙動を示し収縮から膨張へ転じる砂に対するものをLimited Liquefaction、③のように軟化挙動を示さず、膨張挙動を示す砂に対するものをCyclic Mobilityと呼んで区別している。そこで、繰返し試験結果に静的結果を併記しそれらの関連性について考察を行った。図-19は相対密度 $Dr=50\%$ のしらすについて有効拘束圧 $p_c=50kPa$ の静的及び繰返し試験から得られた有効応力径路を重ねて描いた図である。図から、繰返し時の有効応力径路は静的有効応力径路における伸張側の軟化点での応力比(CSR)に達すると同時に流動化現象(Flow)を起こして瞬時に有効応力を失い液状化に至っていることが分かる。このように、繰返しせん断挙動と静的せん断挙動の間には良好な対応関係が認められる。また、図-19に示した完全な軟化挙動を示すものについてはCSRがその強度または挙動を支配していることが予想される。一般に、等方圧密後の液状化破壊は伸張破壊であり、伸張側の静的有効応力径路にかなり依存していると考えられるため、静的有効応力径路においてその挙動が大きく変わる点に着目することは意味のあることであろう。そこで、静的有効応力径路における伸張側の軟化点での軸差応力を非排水強度 $q_r$ と定義し、繰返し応力比 $q_{cyc}/q_r$ と繰返し回数 $N$ の関係を初期有効拘束圧ごとにプロットしたものが図-20である。図から拘束圧が異なるにも関わらず、それぞれの相対密度に対して、この関係は一義的であることが明らかになった。このことより、繰返し強度は伸張側の静的有効応力径路の軟化点での非排水強度 $q_r$ と密接な関係にあることが示唆され、さらにこのことは、ある拘束圧における静的有効径路が求められれば、図-20からその拘束圧における繰返し強度を求めることが可能であることを意味している。以上のことより、相対密度の影響までは表わせないものの、この非排水強度 $q_r$ を用いて整理することにより、拘束圧の影響を評価することができ、しらすのような特殊土の非排水せん断試験の結果の整理には $q_r$ の利用は有用であることが明らかとなった。

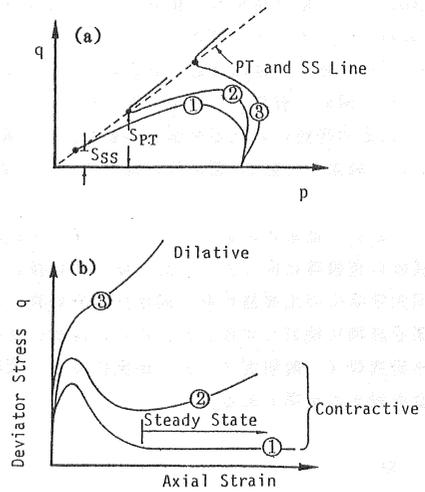


図-18 収縮性の挙動の概念図 (Vaidら<sup>17)</sup>による)

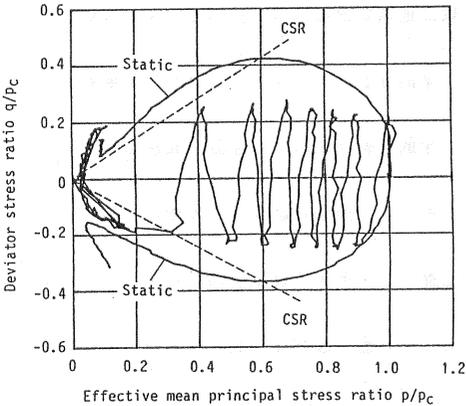


図-19 繰返し試験結果及び静的試験結果の対応例 (しらす  $Dr=50\%$ ,  $p_c=50kPa$ )

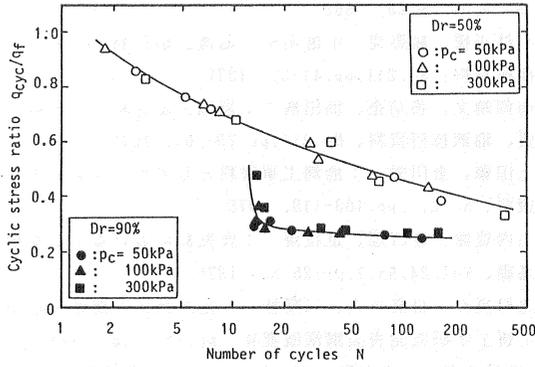


図-20 静的非排水せん断強度 $q_r$ を用いた繰返し応力比と繰返し回数の関係

## 6. まとめ

本研究では、緩い状態 ( $Dr=50\%$ ) と密な状態 ( $Dr=90\%$ ) のしらすの静的非排水三軸せん断試験と非排水三軸繰返しせん断試験を種々行い、以下のような結論を得た。

- (1) 静的非排水三軸せん断試験における軸差応力比と軸ひずみ関係のピーク値は、密度の増加により顕著な増加が見られ、しかも、伸張側に比べて圧縮側の方でその傾向が卓越する。
- (2) 軸差応力比と軸ひずみ関係における緩いしらすの軸差応力比のピーク値は、拘束圧の増加に伴い増大するのに対し、密なしらすの軸差応力比のピーク値は拘束圧の増加に伴い減少するという全く逆の傾向を示す。
- (3) 緩い状態のしらすの有効応力径路は、ある程度の拘束圧 (50~300kPa) までは拘束圧が増加するほど膨張性の特性を示す。一方、密な状態のそれは、一般の砂と同様に拘束圧の増加にしたがいより収縮性の挙動を示す。
- (4) 緩いしらすの繰返し試験において、規定したひずみ両振幅 ( $DA=2, 5, 10\%$ ) から求めた強度線は、いずれの場合も初期液状化強度線と良い対応にあった。また、密なしらすの場合、強度線は比較的少ない繰返し回数において急激に立ち上がる傾向が認められた。
- (5) 緩いしらすの場合、拘束圧  $p_c$  の増加に伴い液状化強度の増加が見られた。一方、密なしらすの場合、逆に拘束圧の増加に伴い液状化強度は減少する非常に特異な傾向が見られた。砂の液状化強度は、本試験で用いた拘束圧の範囲では一般に拘束圧に依存しないと言われていることを考えると、この特性はしらすの一つの特異性をよく表わしているものと考えられる。
- (6) 繰返し時の有効応力径路は静的有効応力径路における伸張側の軟化点での応力比に達すると同時に流動化現象を起こして瞬時に有効応力を失い液状化に至っていることが確認された。
- (7) 静的有効応力径路における伸張側の軟化点での軸差応力を 非排水強度  $q_r$  を用いて整理した 繰返し応力比  $q_{e,v} / q_r$  と繰返し回数  $N$  の間には、拘束圧によらず一義的な関係が存在することが明らかになった。

謝辞：本研究を進めるにあたり、山口大学工学部助手 安福規之氏に貴重な助言を頂いた。本試験の実施につき試験装置の整備等に関しては、同大学工学部技官 山本修三氏に協力を頂いた。また、試験や結果の解析及び整理で同大学学生の山腰勝也君、同学生の岩崎真二君の協力を得た。更に、四宮圭三氏（日本国土開発院）には、解析結果を詳細に検討して頂いた。ここに深謝の意を表したい。なお、本研究の一部は、平成2年度、3年度文部省科学研究費（一般研究（C）：研究代表者 岡林巧）の補助を受けたものであることを付記し、関係各位に感謝の意を表する次第である。

## 【参考文献】

- 1) 片山信夫他編：新版地学辞典Ⅱ、古今書院、p. 80、1970。
- 2) 山内豊聡監修：九州・沖縄の特殊土、九州大学出版会、pp. 145-149、1983。
- 3) 土質工学会シラス研究委員会：えびの地震と地盤災害、土と基礎、Vol. 16, No. 9, pp. 47-59、1968。
- 4) 斉藤由孝、三島史郎、木村秀雄、土屋浩、清水久雄：1968年十勝沖地震災害の土質上の特徴、土と基礎、Vol. 16, No. 9, pp. 19-29、1968。
- 5) 小林正樹、勝野克、中瀬明男：港湾工事材料としてのシラスの工学的性質（その2）シラスのせん断特性、港湾技研資料、No. 211, pp. 41-50、1975。
- 6) 梅原靖文、善功企、浜田浩二：港湾工事材料としてのシラスの工学的性質（その5）振動三軸試験による動的性質、港湾技研資料、No. 211, pp. 79-101、1975。
- 7) 土田肇、倉田栄一：港湾工事材料としてのシラスの工学的性質（その6）振動台試験による動的性質、港湾技研資料、No. 211, pp. 103-119、1975。
- 8) 山内豊聡、坂口理、是枝慶一：鹿児島におけるチュウ積シラス地盤一特にその地盤工学的特性について一、土と基礎、Vol. 24, No. 7, pp. 25-32、1976。
- 9) 北村良介、日高正人、三隅浩二、福永修三：海底沖積しらす埋め立て地盤の液状化予測に関する一考察、第23回土質工学研究発表会講演概要集、pp. 717-718、1988。
- 10) 兵動正幸、山内豊聡、坂井晃：しらすの液状化におよぼす粒度分布の影響、第15回土質工学研究発表会講演概

要集、pp.581-584、1980.

11)古関功一、安田進、永瀬英生、宮本孝行：種々の埋立材の液状化強度特性、第25回土質工学研究発表会講演概要集、pp.795-796、1990.

12) Yamanouchi, T., Mochinaga, R., Gotoh, K., and Murata, H. :Studies of Cut-Off Slopes in a Pumice - Flow Soil Deposit and Their Applications to the Design Standards for an Expressway, Proceedings of the 9th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Tokyo, pp.370-430, 1977.

13)谷水秀行、兵動正幸、村田秀一、安福規之、小浪岳治、加藤剛：初期せん断を受けるゆるい飽和砂の非排水繰返しせん断挙動、第25回土質工学研究発表会講演概要集、pp.743-746、1990.

14)小浪岳治、兵動正幸、村田秀一、安福規之：ゆるい飽和砂の非排水繰返しせん断強度に及ぼす初期せん断の影響、土木学会第45回年次学術講演会講演集、pp.766-767、1990.

15)春山元寿：しらすの非排水三軸試験における試料調整法及びバックプレッシャー、土質工学会論文報告集、Vol.19, No.1, pp.109-115, 1979.

16)Castro, G.: Liquefaction and cyclic mobility of saturated sands, Proc. ASCE, Vol.101, No.GT6, pp.551-569, 1975.

17)Y.P.Vaid and E.K.F.Chung,R.H.Kuerbis: "Preshearing and Undrained Response of Sand", Soils and Foundations, Vol.29, No.4, Dec.1989, pp.49-61

18)土質試験法(第3回改訂版)編集委員会：土質試験の方法と解説、土質工学会、pp.421-450、1990.

19)安田進：液状化の調査から対策工まで、鹿島出版会、pp.31-72、1988.