

乱した一次しらすの非排水単調および繰返しせん断挙動

岡林 巧*・兵動正幸**・安福規之***・村田秀一****

本研究では、密度の異なる乱した一次しらすの非排水単調載荷および繰返し三軸圧縮試験を行い、その特性を豊浦砂の結果との比較において明確にした。得られた主要な結論は次のようである。(1) しらすの非排水単調および繰返しせん断挙動は、豊浦砂と異なり顕著な拘束圧依存性を示す。(2) しらすの繰返し強度は、拘束圧の増加に伴いゆる詰め試料の場合増加するが、密詰め試料では逆に低下する。(3) 液状化を引き起こすに必要な繰返しせん断応力を非排水単調せん断試験により規定する非排水せん断強度 q_f で正規化すると拘束圧に依存しないユニークな繰返し強度曲線が得られる。

Key Words: Shirasu, stress path, cyclic triaxial test, liquefaction

1. まえがき

南九州におけるしらすは、総面積 4700 km² にもおよび、この内約 72% が鹿児島県、27% が宮崎県、1% が熊本県に分布している。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、沖積地盤、埋立地盤に生じる地震時の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¹⁾。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²⁾。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は、えびの地震以来かなり行われている^{3)~7)}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非常に異なった性質を有していることに起因して、的確な評価が行われているとは言えない感がある。したがって今後は、しらすの物理的・土質力学的特性を踏まえた情報の蓄積が必要であると考えられる。

本研究は、しらすが破砕性の材料であることに着目して、種々の拘束圧下のしらすの非排水単調および繰返しせん断挙動を調べるものである。本文では、まず、豊浦砂と比較したしらすの物理的特性の違いを述べた後、非

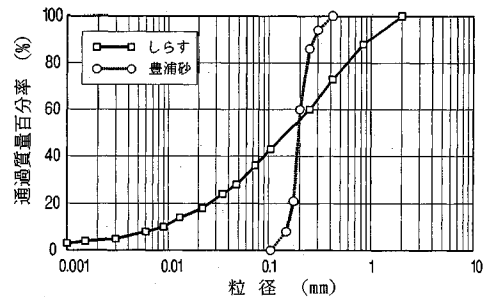


図-1 しらすと豊浦砂の粒度分布

表-1 試料の物理特性

	G_s	e_{max}	e_{min}	U_c	D_{50}
しらす	2.489	1.494	0.775	29.5	0.165
豊浦砂	2.643	0.973	0.635	120	0.210

排水状態で行った単調載荷三軸圧縮試験と伸張試験の結果を示す。次に、単調および繰返し載荷による有効応力径路には密接な関係がある^{8),9)}ことに着目し、両者を対応させ考察する。

2. 試料と試験方法

(1) しらすの物理的性質

試験に用いた試料は、鹿児島県始良郡隼人町で採取した一次しらすと豊浦砂である。また、このしらすは新生代第三紀層の火山成堆積物であり、試料の採取深度は表層の火山灰層下約 5m であった。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言える。また、しらすの細粒分含有率 (75 μ 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

* 正会員 工修 鹿児島工業高等専門学校助教 土木工学科 (〒899-51 鹿児島県始良郡隼人町真孝 1460-1)
 ** 正会員 工博 山口大学助教授 工学部社会建設工学科
 *** 正会員 工博 山口大学 講師 工学部社会建設工学科
 **** 正会員 工博 山口大学 教授 工学部社会建設工学科

はなく、粗粒成分と同一の非活性組成を有している。このようなしらすの細粒分を含む全ての粒度成分が液状化を起こしやすいものであることが以前に兵動ら⁹⁾によって調べられた。表-1にしらすと豊浦砂の物理特性を示す。しらすは粒子内間隙を包含しているため、その比重は2.489と豊浦砂と比較してかなり小さい。また最大・最小間隙比は、しらすの細粒分が非活性であることから、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、しらすは豊浦砂に比べて最大間隙比、最小間隙比ともに大きい値を示しており、特に最大間隙比は非常に大きいものとなっている。これらがしらすの物理的な特徴である。

(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¹⁰⁾。そのために著者らは、予備試験を行い炭酸ガス(CO₂)で供試体内の空気を置換し脱気水を通水した後、背圧100 kPaを12時間以上負荷して飽和度を向上させる方法を採用した。その結果0.96以上のB値を確認した。供試体の初期相対密度は、 $D_r = 50\%$ と90%の2種類とした。また供試体は、初期寸法直径5 cm、高さ11 cmを目指し作成した。

しらすの供試体作成は、以下の方法によった。しらすは細粒分を多く含むため、空中落下法によることは困難であり、また水中落下によると軽石分を含むため粒度成分毎の分離が生じ、通常砂で用いられる方法では均質な供試体を作ることが困難であった。そこで、本研究においては、乾燥し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でまずゆる詰め状態で詰めた後、木づちでモールド側壁をたたいて所定の密度の供試体を作成した。単調載荷三軸せん断試験は、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、繰返し三軸せん断試験の場合は、空圧制御式繰返し載荷システムを用いて周波数0.1 Hzで振幅一定の正弦波軸荷重を非排水状態で圧縮側から載荷した。なお、本論文に用いた平均有効主応力 p 、軸差応力 q の定義は、 $p = (\sigma_1 + 2\sigma_3)/3$ 、 $q = (\sigma_1 - \sigma_3)$ である。また、用いた応力は全て有効応力である。

3. 非排水単調せん断挙動

しらすの非排水単調せん断挙動に与える拘束圧の影響を調べるために初期有効拘束圧 $p_c = 50$ kPa, 100 kPa, 300 kPaで等方圧密後単調載荷三軸圧縮および伸張せん断試験を行った。図-2および図-3はそれぞれ初期相対密度 $D_r = 50\%$ におけるゆるいしらすの有効応力径路、軸差応力と軸ひずみの関係を示したものである。図-2から有効応力径路は初期有効拘束圧の増加に伴い次第に形状を変化し初期有効拘束圧の影響を受けているこ

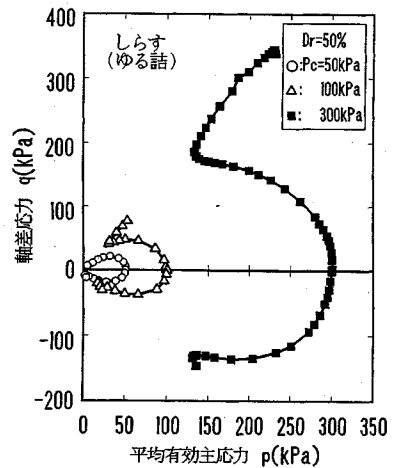


図-2 ゆるいしらすの単調載荷有効応力径路

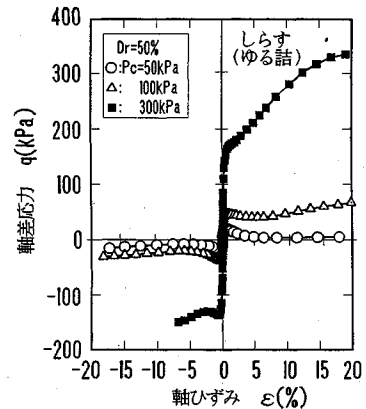
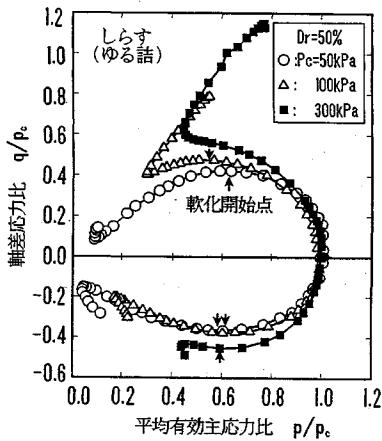
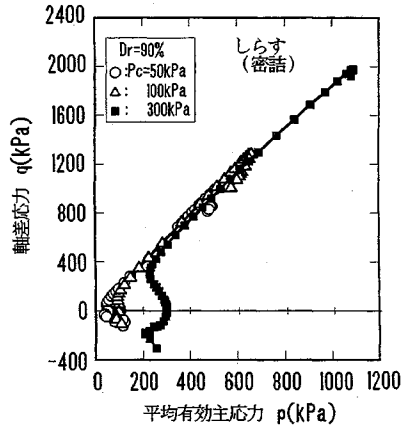


図-3 ゆるいしらすの軸差応力と軸ひずみの関係

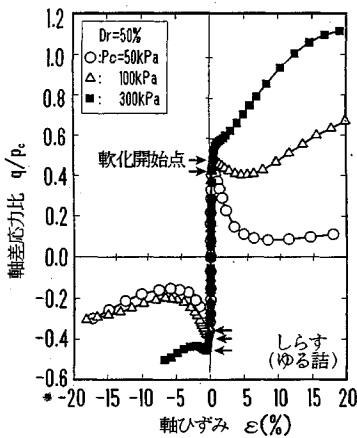
とが分かる。 $p_c = 100$ kPa および 300 kPa においては明確な変相点(平均有効主応力が減少から増加に転ずる点)が現れているが、 $p_c = 50$ kPa では明らかではない。また図-3からこの変相点の応力に達するまでは軸ひずみは0.2%以下とほとんど生じていないが、この応力を越えると急激に軸ひずみの増大が見られる。また初期有効拘束圧の増加に伴い変相点応力は増加している。更に初期有効拘束圧の影響をより明確にするために図-2および図-3を初期有効拘束圧 p_c で正規化したものが図-4および図-5である。図-4の圧縮側についてみると $p_c = 50$ kPaではいったん軸差応力比 q/p_c が矢印で示すピーク値に達した後減少一方の軟化挙動を示し変相点が現れているものの、ほとんど硬化することなく定常状態¹⁵⁾(Steady State)に至っている。一方、 $p_c = 100$ kPaではせん断初期に軟化挙動を示した後に変相点を迎え硬化傾向へと転じている。さらに、 $p_c = 300$ kPaに至っては軟化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、 $p_c = 50$ kPa および 100 kPa の場合の有効応力



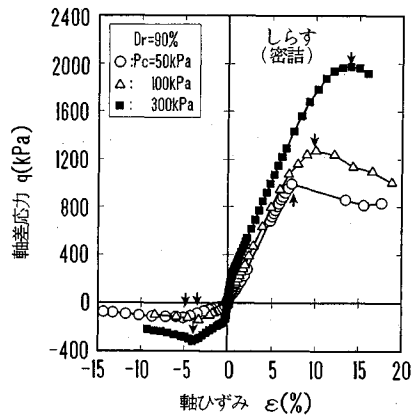
図—4 ゆるいしらすの正規化した単調載荷有効応力径路



図—6 密なしらすの単調載荷有効応力径路



図—5 ゆるいしらすの軸差応力比と軸ひずみの関係

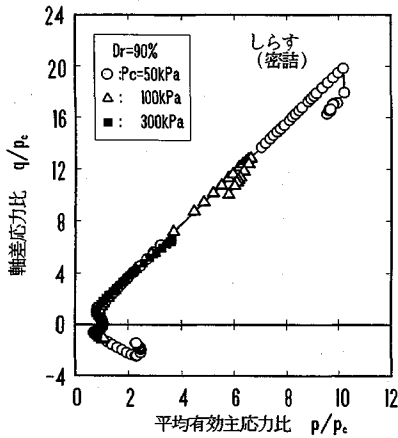


図—7 密なしらすの軸差応力と軸ひずみの関係

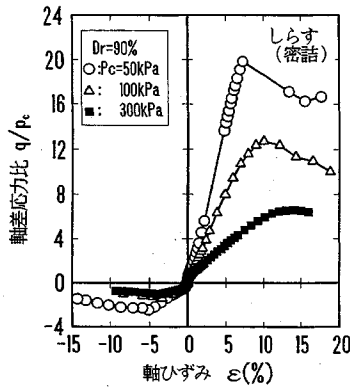
径路にはいずれも軟化開始点 (矢印) が存在し軟化挙動の後、若干硬化に転じた後定常状態に至った。また初期有効拘束圧 $p_c=300$ kPa の場合、 $p_c=50$ kPa, 100 kPa ほどの軟化の挙動は認められないが、軟化開始点に至るまでの有効応力径路は $p_c=50$ kPa, 100 kPa の場合に比較的近い。また、図—5 の正規化された軸差応力比と軸ひずみの関係における軟化開始点 (矢印) 以降の挙動に注目すると、 $p_c=50$ kPa の場合は圧縮、伸張いずれもピーク値に達した後軟化に転じ、ついにはほぼ定常状態に至り残留強度を有することが分かる。 $p_c=100$ 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。 $p_c=300$ kPa の場合、圧縮側ではピーク点は見られず、軸差応力比は単調に増加し硬化一方の挙動を示し、伸張側では若干軟化するもののすぐに硬化に転じている。このような非排水せん断におけるひずみ軟化挙動は、ゆるい砂において見られるもの^{15), 16)}であるが、初期有効拘束圧が大きくなる程その傾向が弱まる現象は一般の砂の挙

動¹⁵⁾とは全く逆の傾向であり、しらすの特異性と言える。

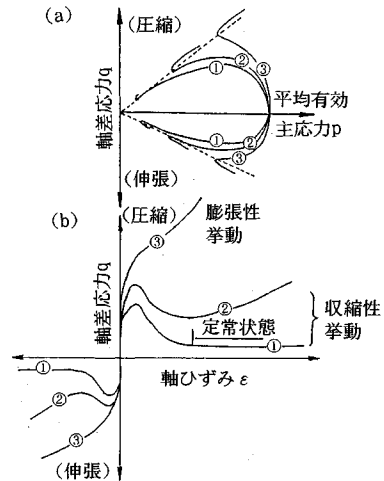
図—6 および図—7 は、初期相対密度 $D_r=90\%$ の密詰めにおける有効応力径路、軸差応力と軸ひずみの関係をそれぞれ示したものである。まず、図—6 から初期有効拘束圧の増加に伴い軸差応力の顕著な増加が認められる。ここで図—2 および図—6 において有効応力比 (q/p) の最大値 η_f を圧縮、伸張で求めた結果、 $D_r=50\%$ では圧縮側で $\eta_{fc}=1.50$ 、伸張側で $\eta_{fe}=-1.19$ となり、 $D_r=90\%$ では $\eta_{fc}=1.93$ 、 $\eta_{fe}=-1.10$ である。この結果から、初期相対密度の増加により破壊時の有効応力比は、圧縮側では顕著に増加するが伸張側ではほぼ同程度もしくは若干減少気味となっていることが分かる。なお、 η_f は3つの初期有効拘束圧による結果の包絡線から求めたものである。図—7 から初期有効拘束圧の増加に伴い矢印で示す軸差応力のピーク値は増加していることが分かる。 $D_r=50\%$ において行ったと同様の方法で図—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 からこの範囲の初期有効拘束圧レベルでは有効応力径路に差はみられず正規化した有効応力径路におよぼす初期有効拘束圧の影響は有



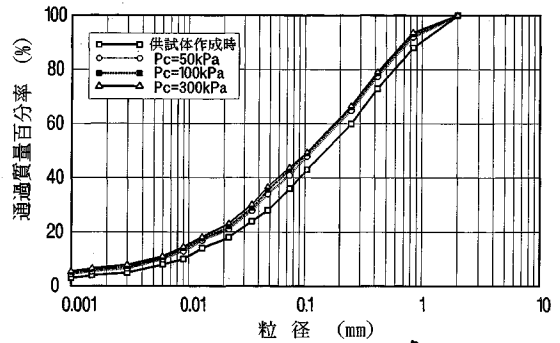
図—8 密なしらすの正規化した単調載荷有効応力径路



図—9 密なしらすの軸差応力比と軸ひずみの関係



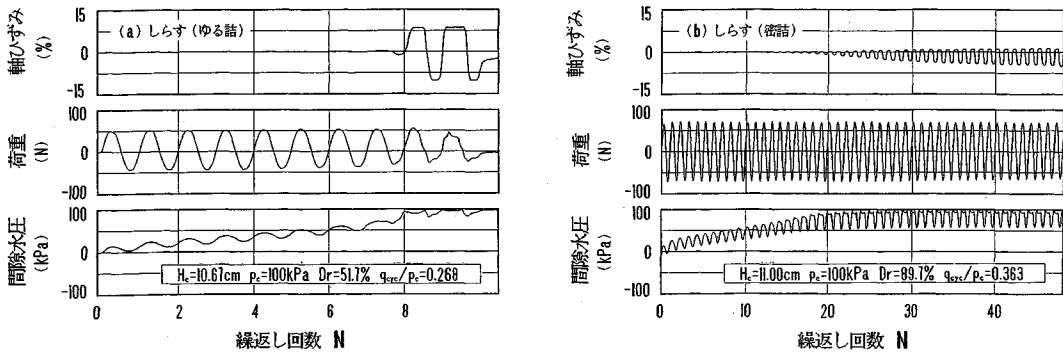
図—10 収縮性および膨張性の挙動の概念図 (Void ら¹⁵⁾の概念を三軸圧縮・伸張領域まで拡張)



図—11 供試体作成時と各試験後の粒度分布

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 $p_c = 50 \text{ kPa}$ および 100 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向う傾向にあることが読み取れる。一方、 $p_c = 300 \text{ kPa}$ では挙動は異なり軸ひずみの増加にともない単調に応力が増加し、明瞭なピークを見ないままほぼ定常状態に至っている。また伸張側においては、 $p_c = 50 \text{ kPa}$ 、 100 kPa 、 300 kPa のいずれの場合も類似の挙動となり応力にピークが認められた後わずかに減少している様子が認められる。図—5と図—9に示したゆるい状態 ($D_r = 50\%$)と密な状態 ($D_r = 90\%$)のしらすの軸差応力比・軸ひずみ関係を比較すると、 $D_r = 50\%$ の場合の軸差応力比は初期有効拘束圧の増加に伴い増大しているのに対し、 $D_r = 90\%$ の軸差応力比は初期有効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。ここで、非排水せん断を受ける飽和砂の収縮性および膨張性の挙動の概念を示したものが図—10 (a), (b)である。収縮性、膨張性の表記は本来砂の排水せん断時のダイレイタンスに相当するものであるが非排水せん断時の間隙水圧発生に対する有効応力径路の挙動に対して

も用いられる。特に、非常にゆるい砂で大きな間隙水圧の発生と共にひずみ軟化を伴う図—10 (a), (b)に示す①②のような挙動を収縮性と呼び、逆に密な砂で間隙水圧の発生に伴い大きくひずみ硬化していく③に示すような挙動を膨張性という¹⁵⁾。これらのことを踏まえると、初期有効拘束圧 $50 \text{ kPa} \sim 300 \text{ kPa}$ の範囲における非排水単調載荷三軸試験から得られたしらすの特異性は、密なしらすの有効応力径路が一般のゆるい砂と同様拘束圧の増加と共に収縮性の強い挙動を示す傾向にあるのに対し、ゆるいしらす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。このゆるいしらすの挙動は、1) 初期有効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) 初期有効拘束圧の増加に伴う密度増により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が増すことを考えれば説明できる。加えて、しらすの場合、粒子組成および粒子形状の複雑さ¹⁷⁾ (破碎性の大きな軽石の含有と角張り性の卓越したしらす粒子が混在している)のために、強度特性に及ぼすインター



図—12 軸ひずみ，軸荷重，間隙水圧の時刻歴

ロッキング効果が普通の砂に比べて相対的に大きく、初期有効拘束圧の増加にともない、インターロッキングを生じる粒子間の結合力が増加し、ゆるいしらすの非排水せん断強度が初期有効拘束圧の増加とともに増大したものと考えられる。一方、密なしらすの挙動は、1) 初期有効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非排水せん断強さを有していること、2) 初期有効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などを考えると理解できる。図—11は、密なしらすに関する供試体作成時と各試験後の粒度分布を示したものである。この図から分かるように、各試験後の粒度分布は、供試体作成時に比べて全体的に左方に移動している。また、初期有効拘束圧の増加に伴いわずかであるが同じく左方に移動している。このことは、初期有効拘束圧の増加に伴って粒子破碎量が增大することを意味している。このわずかの粒度分布の差は、粒子の接触部分の欠損によるものであり、せん断特性に大きな差を与えるものと考えられる。これらのことは、前述の密なしらすの挙動の考察を裏付けるものである。以上のことは、工学的にはゆるいしらす地盤は密なしらす地盤に比べて初期有効拘束圧が小さくなるほど非排水せん断強さの低下の度合いが激しく、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. 非排水繰返しせん断挙動

図—12 (a), (b) は、初期有効拘束圧 $p_c=100$ kPa でのゆる詰めおよび密詰め試料の典型的な軸ひずみ・軸荷重・間隙水圧の時刻歴を示したものである。図—12 (a) に示すように、繰返し応力比はゆる詰め試料の方が小さいにもかかわらずゆる詰め試料では繰返し初期より間隙水圧が発生し、その後の載荷により徐々に蓄積し、繰返し回数8回目付近で急上昇して初期液状化に至っていることが認められる。また、軸ひずみ両振幅は、間隙水圧が初期有効拘束圧に等しくなるまではほとんど発生しないが、初期有効拘束圧に近づいた時点から急増している。

一方、密詰め試料では、図—12 (b) に示すように、繰返し回数の増加に伴う間隙水圧の蓄積の傾向は終始ゆるやかであり、間隙水圧が初期有効拘束圧にはじめて達した後は間隙水圧の増減を伴うサイクリックモビリティ的な挙動が継続的に表れている。同様な挙動が他の初期有効拘束圧の場合においても観察された。

図—13 (a)~(f) は、初期有効拘束圧 $p_c=50$ kPa, 100 kPa, 300 kPa に関するゆる詰めおよび密詰め試料の代表的な軸差応力・軸ひずみ関係を示したものである。図—13 (a), (b), (c) のゆる詰め試料は、いずれの初期有効拘束圧の場合にもある繰返し回数まではほとんど軸ひずみの増加は見られないが、特定の繰返し回数を越えた時点で急増し、その結果せん断剛性が極端に低下する挙動を認めることができる。一方、図—13 (d), (e), (f) に示す密詰め試料では、どの初期有効拘束圧においても繰返し初期から徐々に軸ひずみが蓄積し、繰返し回数が増加するにしたがい、伸張側の軸ひずみが卓越する傾向にあり、相対的に強い強度異方性を示している。この強度異方性の程度は、先述した単調載荷試験結果(図—2 および図—6)との対比によっても現れており、密な状態のものほど大きくなっている。

初期有効拘束圧 $p_c=50$ kPa, 100 kPa, 300 kPa でのゆる詰めおよび密詰め試料の代表的な有効応力径路を示したものが図—14 (a)~(f) である。これらの結果は図—13 (a)~(f) の結果にそれぞれ対応している。図—14 (a), (b), (c) に示すゆる詰め試料の場合、いずれの初期有効拘束圧とも繰返し回数の増加に伴い徐々に平均有効主応力が減少し、密詰め試料に比べて相対的に少ない繰返し回数で単調載荷試験により定められた破壊線に沿った挙動を示し、液状化に至っている。特に、初期有効拘束圧が低い $p_c=50$ kPa での有効応力径路は、繰返し伸張載荷側のある時点で急激に移動し液状化に至っている。一方、図—14 (d), (e), (f) に示す密詰め試料の場合、繰返し回数の増加と共に平均有効主応力が減少する挙動はゆる詰め試料と同じであるが、破壊線付近での平均有効主応力の減少の程度はゆる詰め試料に比べ

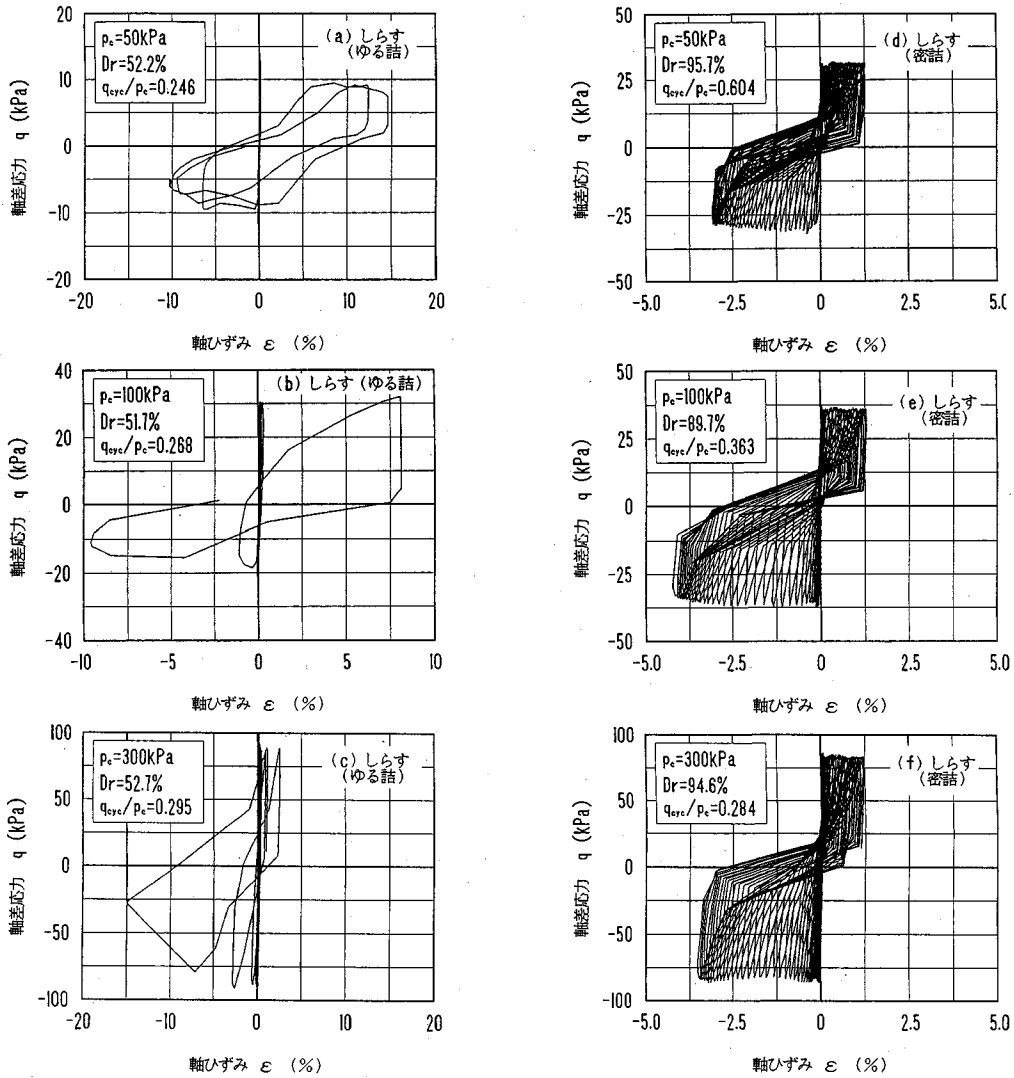
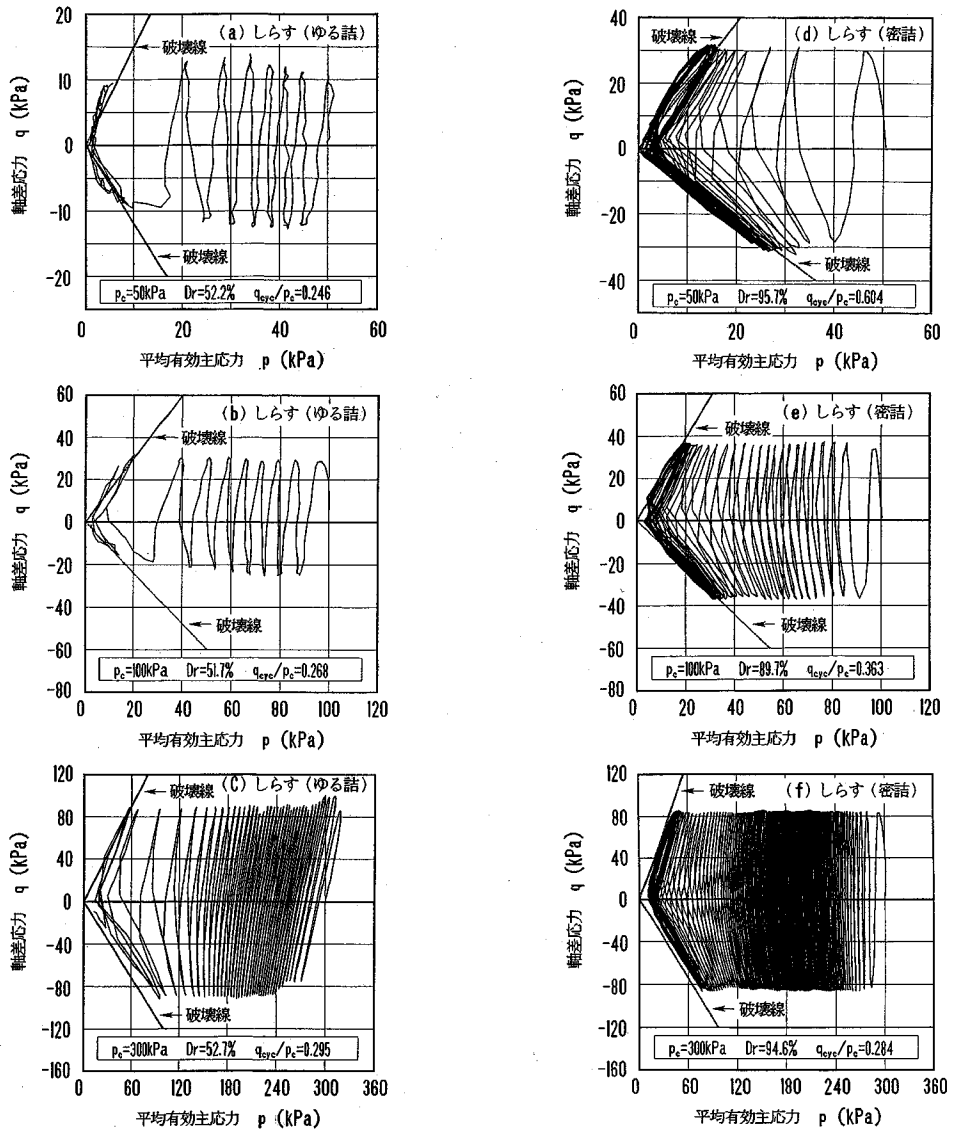


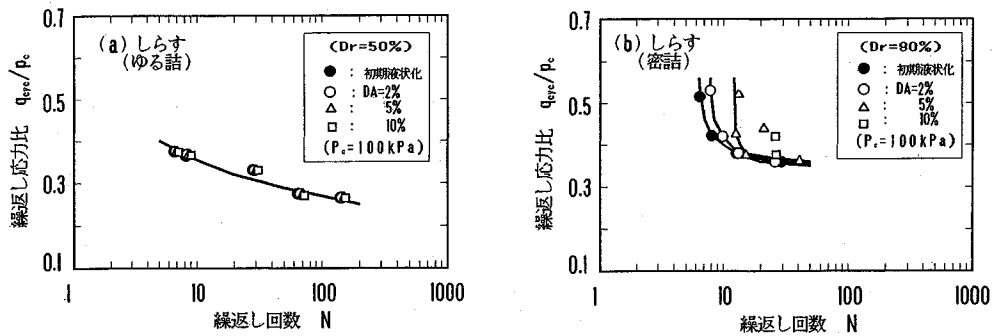
図-13 繰返し軸差応力と軸ひずみの関係

てかなり小さく、最終的にはいずれの初期有効拘束圧の場合にも破壊線に沿った一様なループを描く傾向にある。等方圧密状態で対称両振りの繰返しせん断を受ける砂質土の繰返し強度は、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比 q_{cyc}/p_c と繰返し回数 N の関係によって規定される。ただし、この応力比は一般に繰返し強度として用いられている応力比の2倍に相当するものである。図-15 (a), (b) は、それぞれ初期相対密度 $D_r = 50\%$ および 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-15 (a) には繰返し载荷によって間隙水圧が初めて初期有効拘束圧 p_c に等しくなった時 (初期液状化) の繰返し応力比と繰返し回数の関係も併せて示した。図-15 (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はないことが示されている。これより、初期相対密度 $D_r = 50\%$ の繰返し試験においては、どの基準で液状化を判定しても同じであると言える。図-15 (b) においては密な砂によく見られる様に繰返し回数 10 回以下において強度線の急激な上昇が認められる。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 $D_r = 50\%$ の時のように、破壊を初期液状化で規定すると、かなり強度を過小評価してしまうことになる。なお本文では初期相対密度 $D_r = 90\%$ のしらすに対しては、砂質土の破壊を規定するひずみ両振幅としてよく用いられる $DA = 5\%$ に達した時²⁾を破壊と定義して以下の考察を行うこととする。図-16 にそのようにして破壊を定義した時



図—14 繰返し有効応力経路



図—15 異なった軸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 N の関係

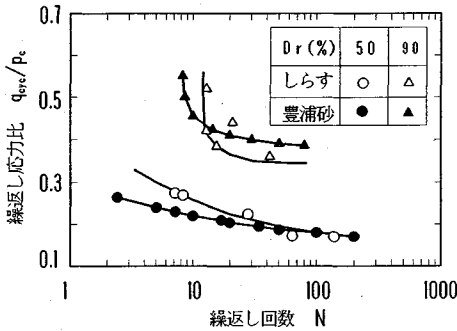


図-16 しらすと豊浦砂の繰返し強度曲線の比較

の繰返し応力比と繰返し回数との関係を示す。また、同図には $D_r=50\%$ と 90% の豊浦砂 ($p_c=100\text{ kPa}$) の試験結果も併せて示している。図中、豊浦砂と比較してみると、 $D_r=50\%$ 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繰返し強度が高いが50回以上では大きな差は見られない。それに対し、 $D_r=90\%$ の場合、繰返し回数15回以上では豊浦砂の方が繰返し強度は高い。また、繰返し回数の低下に伴い急激に強度線が立ち上がる傾向はどちらの密度においても共通に見られる。図-17 (a)~(d) は、しらすと豊浦砂の繰返し強度に与える拘束圧の影響を調べたものである。なお、図-17 (a), (b) は石原らの豊浦砂に対する試験結果^{(3), (4)} を引用したものである。これらの図の比較から、豊浦砂においてはゆる詰め、密詰めいずれの試料においても繰返し強度にさほど拘束圧の影響が現れていない。これに対し図-17 (c), (d) に示されるようにしらすの場合には、初期有効拘束圧 p_c の変化に伴う繰返し強度の変化が豊浦砂に比べて顕著に見られる。まず、図-17 (c) に示すゆる詰めしらすの場合には初期有効拘束圧の増加に伴い繰返し強度は、繰返し回数に関係なく増加の傾向にあること、また図-17 (d) に示す密詰めしらすの場合には、ゆる詰めしらすとは傾向が逆で初期有効拘束圧の増加に伴い繰返し強度は、著しく減少する傾向にあることが分かる。これらの図で認められるしらすの繰返し強度の拘束圧依存性の現れ方が初期相対密度によって異なるという特性はしらすの一つの特異性をよく表しており、前述した非排水単調載荷せん断挙動の特性とよく対応している。これは、豊浦砂の粒子が堅固であるのに対し、しらすは粒子がぜい弱で $p_c=50\sim 300\text{ kPa}$ という応力域においても粒子破碎を伴う粒子配列の再構成が生じ得ることが一因であると考えられる。

5. 単調および繰返しせん断挙動の対応

先に述べたようにしらすの単調および繰返し挙動は、初期相対密度と初期有効拘束圧に大きく依存している。特に、初期相対密度 $D_r=50\%$ のしらすの単調載荷せん断挙動は初期有効拘束圧の増加により収縮性の特性から

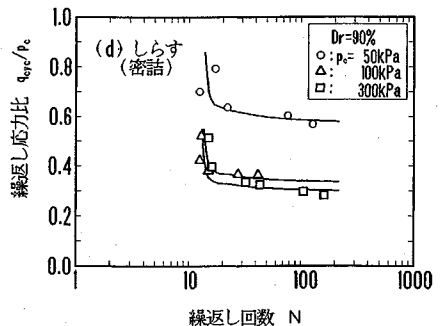
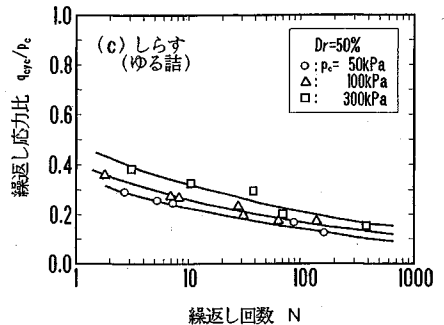
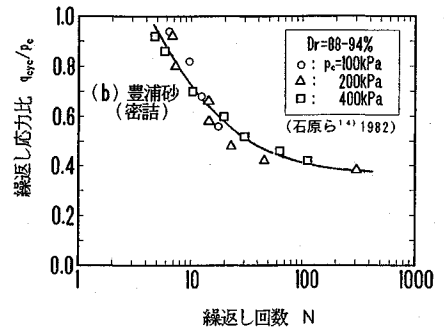
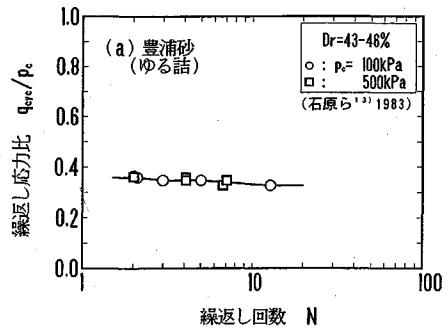
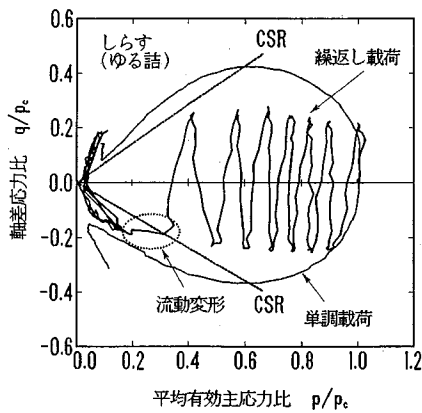
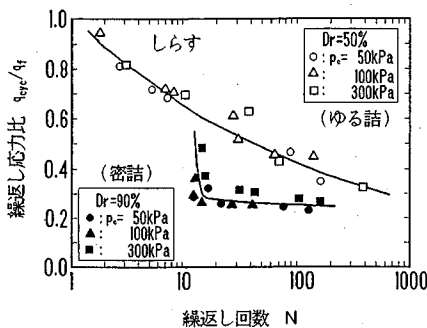


図-17 しらすと豊浦砂の繰返し強度に与える拘束圧の影響

膨張性の卓越した特性へと変化することから、繰返しせん断挙動においてもその影響が表れることが考えられる。前記した図-10 (a), (b) は Vaid ら⁽⁵⁾ が示した砂の非排水単調載荷せん断に関する概念を三軸圧縮・伸張領域まで拡張して示した模式図である。Vaid らは、Castro⁽¹¹⁾ が定常状態に達し流動変形を生じる破壊を液状化と名付けた定義をさらに拡張して以下のようにまとめている。図-10 (a), (b) に示す①のように収縮一方



図一18 繰返し試験結果および単調試験結果の対応例 (しらす: $D_r=50\%$, $p_c=50$ kPa)



図一19 非排水せん断強さ q_r で正規化した液状化に至るに必要な繰返し軸差応力と繰返し回数 N の関係

の挙動により破壊に至るものを Liquefaction, ②のように部分的に軟化挙動を示し収縮性から膨張性へ転じ、破壊に至るものを Limited Liquefaction, ③のように軟化挙動を示さず、膨張挙動のみを示し破壊に至るものを Cyclic Mobility と呼んで区別している。本研究においても、繰返し試験結果に単調載荷試験結果を併記しそれらの関連性について考察を行った。図一18は初期相対密度 $D_r=50\%$ のしらすについて初期有効拘束圧 $p_c=50$ kPa の単調およ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代表的な図である。この図から、繰返し時の有効応力径路は単調載荷有効応力径路における伸張側の軟化点での応力比、すなわち有効限界応力比 (CSR) に達すると同時に流動変形を起こして瞬時に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単調載荷せん断挙動の間には良好な対応関係が認められる。また、図一18に示した大きく軟化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、砂は圧縮側に比べ伸張側の強度が極めて低く、その結果として等方圧密下の繰返し破壊は通常伸張側で生じ、伸張側の単調載荷有効応力径路にかなり依存している¹⁰⁾と考えられることか

ら、単調載荷有効応力径路の特性に着目して等方圧密下の繰返し特性を検討することは意味のあることであろう。そこでここでは、単調載荷有効応力径路における伸張側の軟化開始点での軸差応力を非排水せん断強さ q_r と定義し、これを用いてしらすの繰返し強度特性の評価を試みる。図一19はゆる詰めおよび密詰めしらすに対して初期有効拘束圧ごとにプロットしたものを示している。図一17(c), (d) と対比してこの結果を見ると p_c で正規化した場合には拘束圧依存性を有していたものが q_r で整理すると初期有効拘束圧が異なるにも関わらず、それぞれの初期相対密度に対して、この関係はユニークに表されることが分かる。このことより、繰返し強度は伸張側の単調載荷有効応力径路の軟化開始点での非排水せん断強さ q_r と密接な関係にあることが示唆され、さらにこの結果は、初期相対密度とある初期有効拘束圧における単調載荷有効応力径路が求められると図一19からその初期有効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示唆している。以上のことより、初期相対密度と単調載荷有効応力径路の軟化開始点での非排水せん断強さ q_r を用いて整理することにより、初期有効拘束圧の影響を考慮した非排水繰返し強度の一義的な評価ができると言える。

6. まとめ

本研究では、等方応力状態にあるゆるい状態 ($D_r=50\%$) と密な状態 ($D_r=90\%$) のしらすの非排水単調載荷三軸せん断試験と非排水繰返し三軸せん断試験を種々行い、以下のような結論を得た。

(1) しらすの非排水単調および繰返しせん断挙動は、豊浦砂と異なり顕著な拘束圧依存性を示す。その拘束圧依存性の現れ方は、初期相対密度の違いにより大きく異なる。

(2) 軸差応力比と軸ひずみ関係においてゆるいしらすの軸差応力比は、初期有効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は初期有効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) ゆるいしらすのせん断挙動は、初期有効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、一般の砂と同様に初期有効拘束圧の増加に従いより収縮性の挙動を示す。

(4) ゆるいしらすの場合、初期有効拘束圧 p_c の増加に伴い繰返し強度は増加する。一方、密なしらすの場合には初期有効拘束圧の増加に伴い繰返し強度は減少する。このようにしらすの繰返し強度特性には通常の砂で見られない拘束圧依存性が現れることが判明した。

(5) 繰返し載荷時の有効応力径路と単調載荷による有効応力径路において流動変形を示す位置には良い対応関係が存在する。

(6) 単調載荷による有効応力径路における伸張側の軟化開始点での非排水せん断強さ q_f により正規化した液状化を起こすのに必要な繰返し軸差応力 q_{cyc}/q_f と繰返し回数の間には、初期有効拘束圧によらずユニークな関係が存在する。

最後に、本研究を進めるにあたり、山口大学工学部山本修三技官に試験装置の改良等で協力を頂いた。また、試験や結果の整理で同大岸本洋氏(現山口県庁)の協力を得た。ここに感謝の意を表す。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)02650350: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する。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) 山内豊聡・阪口理・是枝慶一:鹿児島におけるチュウ積シラス地盤-特にその地盤工学的特性について-, 土と基礎, Vol.24, No.7, pp.25~32, 1976.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) 古閑功一・安田進・永瀬英生・宮本孝行:種々の埋込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.
- 8) 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.
- 9) 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.
- 10) 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.
- 11) Castro, G.: Liquefaction and cyclic mobility of saturated sands, Proc. ASCE, Vol.101, No.GT 6, pp.551~569, 1975.
- 12) 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.
- 13) 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回土質工学研究発表会講演概要集, pp.353~354, 1983.
- 14) 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.
- 15) Vaid, Y.P., Chung, E.K.F. and Kuerbis, R.H.: "Preshearing and Undrained Response of Sand", Soils and Foundations, Vol.29, No.4, Dec., pp.49~61, 1989.
- 16) Hyodo, M., Tanimizu, H., Yasufuku, N. and Murata, H.: Undrained Monotonic and Cyclic Triaxial Behaviour of Loose Sand, Soils and Foundations, Vol.34, No.1, Mar., pp.19~32, 1994.
- 17) 山内豊聡:九州・沖繩の特殊土, 九州大学出版会, pp.145~169, 1983.

(1993.9.6 受付)

MONOTONIC AND CYCLIC UNDRAINED SHEAR BEHAVIOUR OF VOLCANIC SOIL "SHIRASU"

Takumi OKABAYASHI, Masayuki HYODO, Noriyuki YASUFUKU and Hidekazu MURATA

A series of undrained cyclic and monotonic triaxial tests has been performed on a volcanic soil "Shirasu" which has crushable particles. Testing was performed on loose and dense specimens and the results were compared with those of Toyoura sand. As a result, the undrained cyclic and monotonic shear behaviour of "Shirasu" is found to be greatly dependent on the confining pressure and its density. The undrained cyclic shear stress ratio to cause failure increases in loose specimen while it decreases in dense specimen with increasing confining pressure.