

# 港湾技研資料

TECHNICAL NOTE OF  
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH INSTITUTE  
MINISTRY OF TRANSPORT, JAPAN

No. 211 Mar. 1975

## 港湾工事材料としてのシラスの工学的性質

- |                     |                                |
|---------------------|--------------------------------|
| (その1) 物理的性質と圧縮性     | 堀江宏保・小川富美子<br>成田 実             |
| (その2) シラスのせん断特性     | 小林正樹・勝野 克<br>中瀬明男              |
| (その3) 剛性壁に作用する土圧特性  | 善 功企・沢口正俊<br>高橋邦夫・橋本光寿<br>篠原邦彦 |
| (その4) 締固め特性とCBR特性   | 佐藤勝久・浅島豊明<br>渋谷英男・森口 拓         |
| (その5) 振動三軸試験による動的性質 | 梅原靖文・善 功企<br>浜田浩二              |
| (その6) 振動台試験による動的性質  | 土田 肇・倉田栄一                      |

運輸省港湾技術研究所



# 港湾工事材料としてのシラスの工学的性質

## 目 次

|                                                                       |     |
|-----------------------------------------------------------------------|-----|
| (その1) 物理的性質と圧縮性                                                       |     |
| ..... 堀江宏保・小川富美子・成田 実.....                                            | 5   |
| ((Part-1) Physical Properties and Compressibility of Remolded Shirasu |     |
| ..... Hiroyasu HORIE, Fumiko OGAWA and Minoru NARITA)                 |     |
| (その2) シラスのせん断特性                                                       |     |
| ..... 小林正樹・勝野 克・中瀬明男.....                                             | 41  |
| ((Part-2) Shear Strength of Shirasu                                   |     |
| ..... Masaki KOBAYASHI, Masaru KATSUNO and Akio NAKASE)               |     |
| (その3) 剛性壁に作用する土圧特性                                                    |     |
| ..... 善 功企・沢口正俊・高橋邦夫・橋本光寿・篠原邦彦.....                                   | 51  |
| ((Part-3) Properties of Lateral Earth Pressure Acting on a Rigid Wall |     |
| ..... Kouki ZEN, Masatoshi SAWAGUCHI, Kunio TAKAHASHI                 |     |
| Kouji HASHIMOTO and Kunihiko SHINOHARA)                               |     |
| (その4) 締固め特性とCBR特性                                                     |     |
| ..... 佐藤勝久・浅島豊明・渋谷英男・森口 拓.....                                        | 65  |
| ((Part-4) Compaction and CBR Properties                               |     |
| ..... Katsuhisa SATO                                                  |     |
| ..... Toyoaki ASAJIMA, Hideo SHIBUYA and Hiraku MORIGUCHI)            |     |
| (その5) 振動三軸試験による動的性質                                                   |     |
| ..... 梅原靖文・善 功企・浜田浩二.....                                             | 79  |
| ((Part-5) Dynamic Properties Based on Dynamic Triaxial Tests          |     |
| ..... Yasufumi UMEHARA, Kouki ZEN and Kouji HAMADA)                   |     |
| (その6) 振動台試験による動的性質                                                    |     |
| ..... 土田 肇・倉田栄一.....                                                  | 103 |
| ((Part-6) Shaking Table Tests on Liquefaction Potential               |     |
| ..... Hajime TSUCHIDA and Eiichi KURATA)                              |     |

近年、良質な砂質土の入手が困難となり、港湾建設工事を実施する上でも、多大の支障をきたす傾向にあることは明白な事実である。その為、良質な砂質土として利用し得る新材料の開発、研究が極めて重要な課題であり、港湾技術研究所においても早急にこの解決策に取組むべき努力が要望されてきた。

裏込めや埋立てなどの港湾工事材料としては、特に施工後安定した地盤となり、その上、所要の地耐力を有することが重要なことであるが、同時に大量にかつ安価に入手できることも不可欠な条件であろう。

南九州地方に広く大量に分布するシラスは、乱した状態で上記の条件を満足する可能性が期待され、これを科学的に裏付けるために、今回、土質部と構造部とが協力して、各種の土質試験および模型実験を行い、各専門分野からのシラスの工学的特性について調査した。

そして、本報告中にそれぞれ求められた調査結果に基づいて、シラスの港湾工事材料への適用性に対する考察が行われ、実際に使用する際の問題点などが指摘されている。個々の研究の詳細はそれぞれの報告に述べられているが、これらの試験および実験から求められた主要な結論を総括すると下の表のようになる。ここで、通常使用されている砂を代表させる意味で、豊浦の標準砂が比較の材料として使われている。

#### 実験結果のまとめ

|         |                                                                                                                    |
|---------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 比 重     | 試験方法によってかなり値が異なるが、最も細かく破砕した状態で 2.50 である。                                                                           |
| 透 水 係 数 | 乾燥密度に対し $\log k = 4.54 \gamma_d + 1.63$ である。<br>( $k$ : 透水係数 $\text{cm/sec}$ , $\gamma_d$ : 乾燥密度 $\text{g/cm}^3$ ) |
| 圧 縮 性   | ゆる詰めにした状態では砂よりもはるかに大きい。                                                                                            |
| せん断特性   | 排水条件でのせん断強度定数 $C_d$ および $\phi_d$ は砂より大きい、変形係数 $E_{50}$ は小さい。                                                       |
| 土 圧     | 砂より 42 % 程度小さい。                                                                                                    |
| 締固め特性   | 粒子破砕の影響があつて締固め易い。                                                                                                  |
| C B R   | 水浸しても砂よりもはるかに大きい。                                                                                                  |
| 動的せん断   | 動的内部摩擦角は静的のものより $5 \sim 7^\circ$ 小さいが、低下の割合は砂に比べて特別著しくない。                                                          |
| 振 動 特 性 | 乱したシラスは砂（万代砂、豊浦砂）よりも流動化し易い。                                                                                        |

これらの結論を総合的に判断して、シラスの港湾工事材料としての適用性を述べると次のようになる。つまり、乱したシラスは締固めが期待できる状態にして使用すれば、港湾工事材料、特に裏込めや埋立てなどにおいて好適な材料となり得るが、ただ、地震や振動に対して通常の砂質土に比べて流動化しやすいという欠点があるということである。

したがって、今後、港湾工事材料としてシラスを利用するときの効果的な締固め方法や、室内試験や実験で求められた土質諸常数と現場で調査して得られる工学的指数との関連づけなど、実際にシラスが工事材料として用いられるための応用的研究の推進が望まれる。

最後に、このシラスのプロジェクト的な研究結果を報告するにあたり、適切な指導や有益な助言を頂いた前土質部長 中瀬明男博士に深く謝意を表する次第である。

## 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

梅 原 靖 文 \*

善 功 企 \*\*

浜 田 浩 二 \*\*

#### 要 旨

振動三軸試験により、シラスの流動化条件ならびに動的せん断定数を求めた。標準砂の結果ならびに普通の砂に対する既往の成果を参照し、シラスの工事材料としての適用性を検討した結果、次のような結論を得た。

1. 乱したシラスは普通の砂よりも流動化しやすい。
2. シラスの動的内部まざつ角は静的内部まざつ角よりも  $5^{\circ} \sim 7^{\circ}$  小さくなるが、低下の割合は普通の砂にくらべて特別著しいものではない。
3. シラスには工学的材料としての利点はいくつかあり、盛土・裏込め・中詰め材として使用する場合には、ある程度の締固めを行い流動化に対する危険性を減少させることにより、工学材料としての利点が活用される。
4. 埋立材料あるいは締固めが行えない場合には、工事材料としてシラスを積極的に活用する利点はない。

---

\* 土質部 土性研究室長

\*\* 土質部 土性研究室

Engineering Properties of Shirasu for Construction Materials  
(Part-5) Dynamic Properties Based on Dynamic Triaxial Tests

Yasufumi UMEHARA \*

Kouki ZEN \*\*

Kouji HAMADA \*\*

Synopsis

A series of dynamic triaxial tests on remolded Shirasu were conducted to investigate the dynamic properties, i.e., the criterion of liquefaction and the strength parameters under repeated loading. The test results on remolded Shirasu were compared with those on sandy soils including Toyoura sand. From viewpoints of dynamic properties, some discussions were presented on use of Shirasu as construction materials. Finally it was concluded that ;

- (1) Remolded Shirasu is liable to liquefy more easily than the ordinary sands including Toyoura sand.
- (2) The values of  $\phi_D'$  in dynamic tests on Shirasu are smaller by  $5^\circ$  to  $7^\circ$  than those in static tests, but the ratio of decrease in  $\phi$ -values shows no marked difference between Shirasu and ordinary sands.
- (3) Shirasu may be expected to have some advantages as construction materials from other soil tests. By reducing the liquefaction potential with some extent of compaction, Shirasu can be effectively used for embankments, backfills or fills.
- (4) There are no merits in using Shirasu for reclamations, especially when used without compaction.

---

\* Chief of the Soil Mechanics Laboratory, Soils Division.

\*\* Member of the Soil Mechanics Laboratory, Soils Division.

## 目 次

|                             |     |
|-----------------------------|-----|
| 要 旨 .....                   | 79  |
| 1. ま え が き .....            | 83  |
| 2. 振動三軸試験機による流動化試験の概要 ..... | 83  |
| 2.1 地震時応力状態 .....           | 83  |
| 2.2 破壊の定義 .....             | 83  |
| 3. 実 験 .....                | 85  |
| 3.1 実験装置 .....              | 85  |
| 3.2 試 料 .....               | 86  |
| 3.3 実験方法 .....              | 86  |
| 4. 実験結果と考察 .....            | 87  |
| 4.1 間げき水圧とひずみ .....         | 87  |
| 4.2 流動化条件 .....             | 89  |
| 4.3 動的せん断強さ .....           | 94  |
| 5. 港湾工事材料としての適用性 .....      | 97  |
| 6. 結 論 .....                | 99  |
| 7. あ と が き .....            | 99  |
| 参 考 文 献 .....               | 100 |

## 1. ま え が き

主として南九州にみられるシラスは一種の砂質火山灰土であるが、建設工事に多くの問題点を生じやすいというところから、土質分類上は特殊土としての取扱いがなされている。元来、風化を受けない自然シラスは鉱物粒子間を結合させている溶結組織を有しており、静的強さは一般に大きいにもかかわらず、シラス地帯に災害が起りやすいのは、自然シラスが水に弱く、斜面が極端に侵食されやすいこと、風化を受けた場合、溶結組織が破壊されもろくなること、また地震時の衝撃によってもこれらの組織が破壊され、斜面崩壊が起りやすくなることなどによっている。

シラス地帯の地震による被害例としては、1968年 8月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、橋脚の沈下などが生じたことが報告されている<sup>1)</sup>。また、北海道にもシラスに類似した火山灰土が存在するが、これらが十勝沖地震の際に流動化を生じたことが知られている<sup>2)</sup>。

このようなシラス地帯の災害により、建設地盤としてのシラスの弱点がクローズアップされているが、乱さないシラスは侵食されないかぎり強さが大きいこと、土工がしやすいことなど建設工事に有利な点も有している。また、乱したシラスの場合についても工学材料としての利点をいくつか有しており<sup>3)</sup>、港湾工事材料としての活用方を検討してみる価値があろう。たとえば、比重が小さく単位体積重量が小さい反面、静的強さが相当大きいという性質があるが、これらは岸壁の裏込め材とした場合、土圧軽減効果をもたらすと考えられる。また締め固め効果の大きいこと、あるいは添加材による安定処理の効率のよいことなどは、盛土材料として有利な性質であろう。

シラスを港湾工事材料として活用することを想定した場合、地震時のような衝撃にないしはくりかえし荷重に対するシラス材料の特性を把握しておくことが必要となる。乱した地山シラスは普通の砂よりも流動化を起こしやすいと言われており<sup>4), 5)</sup>とわりわけ埋立材料として使用する場合には、流動化に対する抵抗力の評価が大きな問題となってくる。

本報告では、乱したシラスおよび豊浦標準砂を用いて振動三軸試験を実施し、これらの流動化に対する抵抗力を従来の成果をも加味して比較検討し、さらにシラスの動的せん断強さと静的せん断強さの関係を調べた。これらの結果を考慮して、シラスの港湾工事材料としての適用性に関する検討を行なった。

## 2. 振動三軸試験機による流動化試験の概要

## 2.1 地震時応力状態

地震時における砂層の流動化現象を調べるため、各種の室内動的試験法が用いられている。これらの室内試験では、地盤中の要素が地震時に受ける応力状態を想定し、再現された応力条件のもとにおける供試体の挙動が調べられる。しかし、地震時における応力条件は非常に複雑であり、完全な再現は実験手法的にも困難であるので、一般には、支配的な要因にのみ着目してそれらの再現をはかることになる。地震時の地盤の振動は各種の波動の影響を受けるのみならず、その方向も一様ではないが、Seed 他<sup>6)</sup>は水平地盤に対し、水平方向のせん断振動のみに着目して図-1aのような応力状態を想定している。すなわち、静止時に一定の有効上載荷重下にある土中の要素が、地震時に鉛直方向に伝播するせん断波により水平交番せん断応力 $\tau_D$ を受けると考えることができる。

室内試験により、このような応力状態を再現する方法には、単純せん断試験<sup>7)</sup>、ねじりせん断試験<sup>8)</sup>、振動三軸試験<sup>9)</sup>があり、そのせん断機構から考えると前2者が適しているが、供試体内の応力状態を均一にすることが難しく、拘束条件などに多くの問題点が指摘されている。振動三軸試験の場合、供試体内の応力状態は前2者に比し均一になり、図-1aのような応力状態の再現は、供試体内の45°面上の応力状態を想定すればよいことになる。すなわち、地盤の拘束圧に相当する圧力により等方圧密した後、一定振巾の軸差応力をくりかえし与えることにより、45°面上に交番せん断応力を生じさせることができるので、このせん断応力を適宜制御することにより、地震時応力状態が理想化された状態で再現される。この場合、せん断応力の与え方として図-1bに示したように、側圧を一定に保ち、軸荷重のみを変動させる方法(軸荷重振巾 $\sigma_D$ )<sup>9)</sup>と、位相差を180°に保ちながら同一の振巾( $\sigma_D/2$ )で軸圧および側圧の両者を変動させる方法<sup>10)</sup>がある。後者の方法が地震時の応力条件をより正確に表わしているが、振動載荷時の応力条件の制御がより複雑になる。飽和土の場合、 $\sigma_a$  = 一定の試験方法によっても、単に間げき水圧成分の補正をすることのみにより、図-1aの応力状態が再現できる<sup>9)</sup>ので、通常の場合、実用的な方法であると考えられる。

## 2.2 破壊の定義

上述のような応力条件を想定してくり返し試験を行った場合、破壊が生ずる場合には、通常、軸荷重、軸変位、間げき水圧の時間的変化が図-2に模式的に示すような型で得られる。すなわち、間げき水圧はくりかえし数とともに

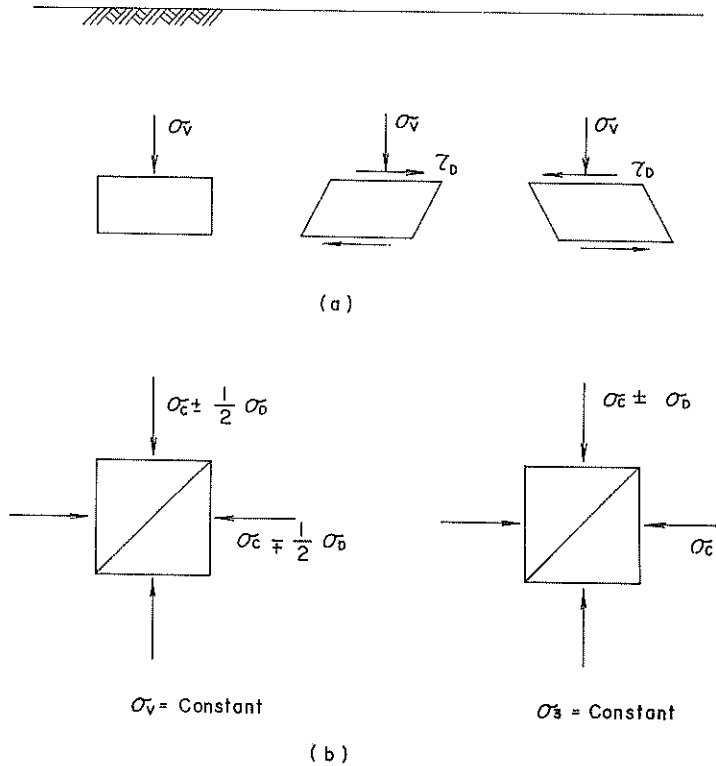


図-1 地震時地中応力状態と試験時応力条件

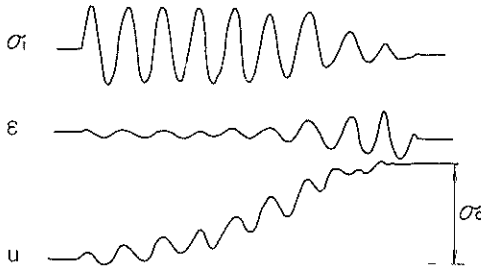


図-2 流動化記録模式図

次第に増大し、急激に増大する時点をへて、終局的には拘束圧に等しくなる。一方、軸ひずみは初期段階では微小な振巾で増減しているが、ある時点に達するとひずみ振巾が急増する。そのような状態に達すると一定レベルのせん断応力が与えられなくなり、次第に減少しはじめる。

H. B. Seed 他<sup>9)</sup>は軸ひずみ振巾が急増しはじめる時点を初期流動化、過剰間げき水圧が上昇し、有効拘束圧が0となる時点を完全流動化と定義している。初期流動化から完全流動化までに要するくり返し数は、締め固めの程度、

応力条件により大巾に変動するが、与えられた砂に対する流動化条件を定める際、流動化の判定規準としては初期流動化に対する波数により整理するのが一般的になっている。しかしながら、初期流動化に対する波数の決定法については、明確な規準があるわけではなく、各種の与え方がある。これらのうち、より一般的であると考えられるものは、次のような現象の生ずる点を初期流動化の判定規準と考えるものであろう。すなわち、

- 1) 軸ひずみ振巾が急激に増大しはじめる時点
- 2) 間げき水圧が急増する時点
- 3) 主応力差 ( $\sigma_3 =$ 一定試験の場合には軸荷重) が減少しはじめる時点

さらには、動的破壊包絡線と関連させて、4) 最大せん断応力が動的破壊線に接する時点<sup>11)</sup> 5) 最大伸張時 圧縮時の修正間げき水圧 ( $\sigma_3 =$ 一定試験の場合) が一致する時点<sup>11)</sup> 6) 間げき水圧にともなう現象 (最大圧縮と最大伸張との途中段階においてみられる間げき水圧の異常上昇現象) が初めてあらわれる時点<sup>11)</sup> などがあるが、現象の一般性、判定の迅速性などの面で多少問題があろう。判定規準 1), 2), 3) はほぼ対応しているというデータもあり<sup>12)</sup>,



### 振動三軸試験による動的性質

図-2のような実験記録よりただちに判断できる点でより簡便な方法と考えられる。

### 3. 実 験

#### 3.1 実 験 装 置

実験に使用した装置は電気油圧サーボ方式の振動三軸試験機であり、装置全景を写真-1に、また装置のブロック図を図-3に示した。本装置は大別すると、入力信号系、制御系、フィードバック検出系からなる制御装置、サーボ弁、油圧シリンダー（側圧および軸荷重用）、三軸セルよ

りなる試験機本体ならびに動力源となる油圧源より構成されている。

本装置は、軸荷重、側圧の両者を任意の位相差で振動させる構造となっており、振動波形は正弦波、矩形波、三角波の型で発生させることができ、また任意波形発生機能をも有している。表-1に装置の一般的性能を示す。

図-4に本装置に採用されている電気油圧サーボ方式による動作原理の模式図を示した。その原理は、電気信号として与えられた入力にサーボ弁の働きにより油圧回路の油量の変動となって油圧シリンダーを作動させるものであり、

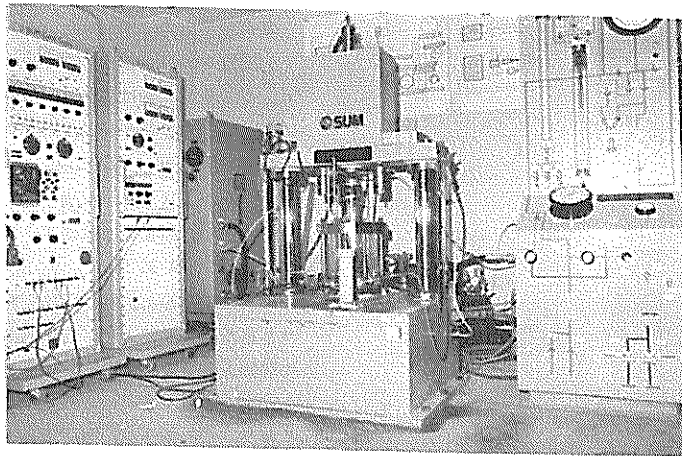


写真-1 振動三軸試験装置全景

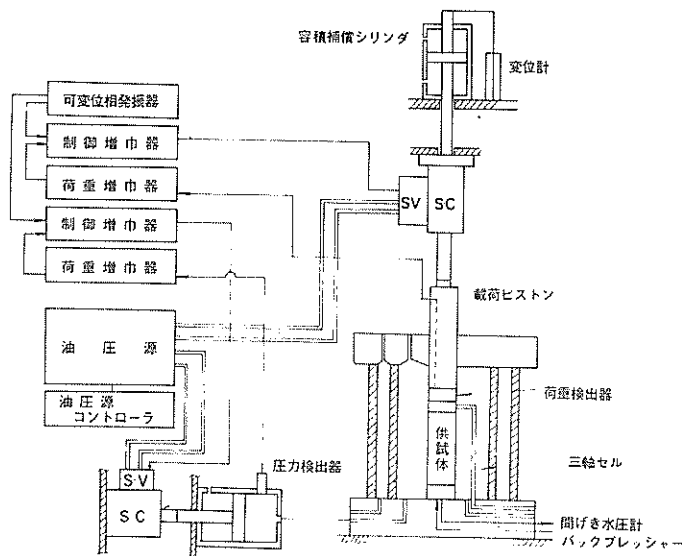


図-3 振動三軸試験装置のブロック図

|               |                       |
|---------------|-----------------------|
| 軸圧（静的軸圧＋振動軸圧） | 10 Kg/cm <sup>2</sup> |
| 側圧（静的側圧＋振動側圧） | 10 Kg/cm <sup>2</sup> |
| 波 形           | 正弦波・矩形波<br>三角波、任意波    |
| 振 動 数         | 0.1Hz～10Hz            |
| 変 位 ス ト ロ ーク  | ± 8 cm                |

表-1 装置の性能

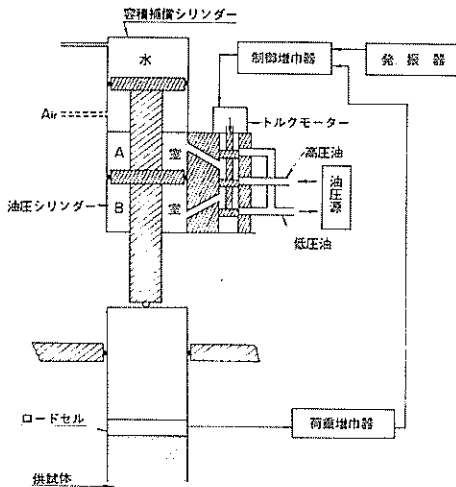


図-4 動作原理模式図

これらの信号が荷重ロッドを通して三軸セル中の供試体（50 mmφ×125 mm h）に与えられる。この場合、荷重ロッド先端の荷重検出器により検出された荷重をフィード・バックして入力信号と電気的に比較、修正することにより、入力信号に比例した荷重ロッドの動作を維持させることができる。荷重ロッドの三軸セル内への貫入にともなう圧力変化は油圧シ

いては原理は同様であるが、供試体への圧力伝達方式が相違しており、油圧シリンダーの動作は一担水圧シリンダーを介して水圧変動として供試体に与えられる。

三軸セルは2重円筒式（内筒200 mmφ×220 mm h、外筒250 mmφ×220 mm h）になっており、内筒および外筒に等圧力を与えることにより、振動時の内壁の変形をさせ、セル内圧の高精度制御をはかるとともに、体積変化測定精度を高めることを目指している。荷重ロッドの直径は供試体のそれと等しくなっており、これにより、軸圧ならびに側圧を独立に与え、かつ任意の位相差で振動させることが可能となっている。

荷重重検出器はストレインゲージタイプのものであり（100 Kgおよび200 Kg）、マサツの影響をさけるため荷重ロッドの先端に取付けられ、三軸セル内で検出できるようになっている。側圧および間げき水圧は半導体方式の小型圧力変換器（5 Kg/cm<sup>2</sup>用）により計測され、軸変位は差動変位計（ストローク±4 cm）により計測される。これらの記録は各増巾器を経て電磁グラフに記録される。

### 3.2 実験試料

実験に使用した試料は、鹿児島県大崎町で採取したシラスと豊浦標準砂であり、各試料の粒径加積曲線を図-5に、物理的性質を表-2に示した。大崎町シラスについては、2000μフルイを通過した試料について動的試験を実施しており、この場合の粒径加積曲線および物理的性質も図-5および表-2にあらわして示した。シラスの比重は、通常の砂にくらべて試験条件による変動が大きい<sup>12)</sup>が、ここでは、各種の方法によるバラツキのうち、上限の値を採用した。

### 3.3 実験方法

地震時の土要素の応力状態を近似させるためには、位相

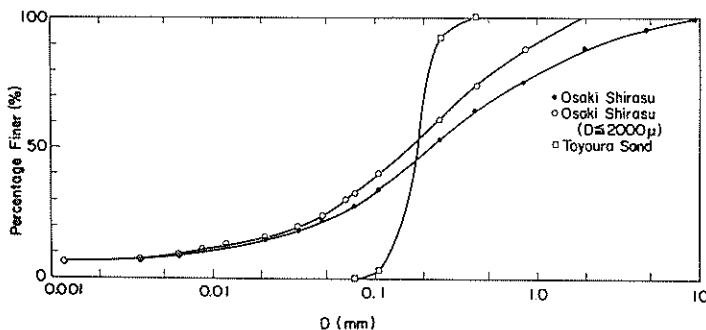


図-5 粒径加積曲線

| 試料<br>項目                         | 大崎町シラス |         | 豊浦<br>標準砂 |
|----------------------------------|--------|---------|-----------|
|                                  | 自然     | 2000μ以下 |           |
| 土粒子比重                            | 2.495  | 2.495   | 2.644     |
| D <sub>10</sub>                  | 0.009  | 0.0065  | 0.12      |
| D <sub>60</sub>                  | 0.345  | 0.245   | 0.19      |
| D <sub>60</sub> /D <sub>10</sub> | 39.7   | 37.7    | 1.6       |
| e <sub>max</sub>                 | —      | 1.748   | 0.971     |
| e <sub>min</sub>                 | —      | 0.800   | 0.557     |

表-2 試料の物理的性質

ンダー上端にある容積補償シリンダーにより防止される。図-4の動作原理は軸荷重の場合であり、側圧の場合につ

差を180°に保ちながら、同一の振巾で側圧および軸圧の両者を変動させる方法が望ましい<sup>10)</sup>が、飽和土の場合、側

### 振動三軸試験による動的性質

圧一定試験結果から、単に間げき水圧を補正することのみにより、側圧と軸圧の兩者を變動させた場合の結果を推定することができるので、ここでは、とりあえず、側圧一定の動的試験方法を採用することとした。

3.2で述べた試料を用いて、次の手順で供試体が作製された。まず、2000  $\mu$ フルイを通過した試料を炉乾燥させ、乾燥重量既知の適量をピーカーに入れ、浸水させた後、デシケーター内で約15時間バキュームをかけ、気泡を排除することにより飽和させた。つぎに、この飽和試料を空気にふれないよう細心の注意をはらいながら、三軸セル内にセットされた供試体成形用モールドに移し、適当な密度に締め固めて、直径50 mm、高さ125 mmの供試体に成形した。さらに頭部キャップを被せ、ゴムスリーブで密閉した供試体を約60 cmの水頭差のバキュームにより自立させた後、バキューム用ロックを閉じ、吸水量および供試体の正確な寸法を測定した。供試体の重量は、もとの重量より、ピーカー内に残留した試料の乾燥重量を差し引くことにより求めた。

供試体は最初に等方圧で圧密され、圧密完了後側圧を一定に保ち、非排水条件で軸圧(振巾 $\sigma_D$ )がくりかえし載荷

された。

実験の条件をかえたものについて、同様の実験が上述の手順により実施された。表-3にシラスならびに標準砂に対する実験条件を示した。

|             | 大崎町シラス                         | 豊浦標準砂                |
|-------------|--------------------------------|----------------------|
| 制 御 条 件     | 荷 重 制 御                        | 荷 重 制 御              |
| 波 形 , 振 動 数 | 正弦波, 3 Hz                      | 正弦波, 3 Hz            |
| 拘 束 圧       | 1.0, 2.0, 3.0 $\text{kg/cm}^2$ | 3.0 $\text{kg/cm}^2$ |
| 最大軸荷重振巾     | 0.5~1.8 $\text{kg/cm}^2$       | 1.8 $\text{kg/cm}^2$ |
| 初 期 間 げ き 比 | 1.024~1.184                    | 0.614~0.798          |

表-3 実験条件

振動载荷中の計測は、軸荷重、軸変位(絶対変位および振巾)、間げき水圧および側圧について行った。これらの結果は、電磁オシログラフに記録させた。

### 4. 実験結果と考察

#### 4.1 間げき水圧とひずみ

図-6はシラスに対する非排水振動三軸試験の測定記録例であり、試験条件は、初期間げき比 $e_0=1.098$ 、圧密圧力

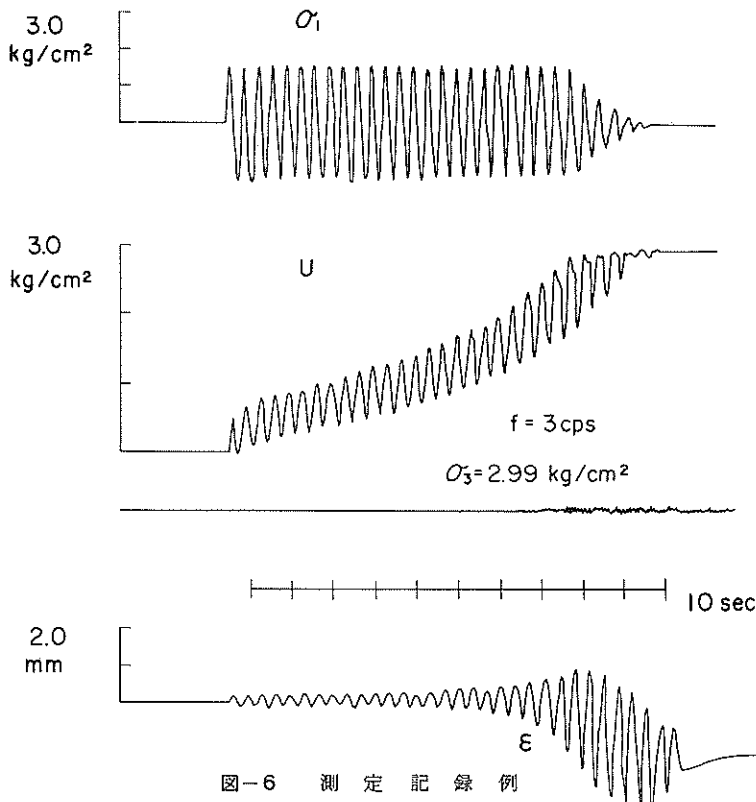


図-6 測定記録例

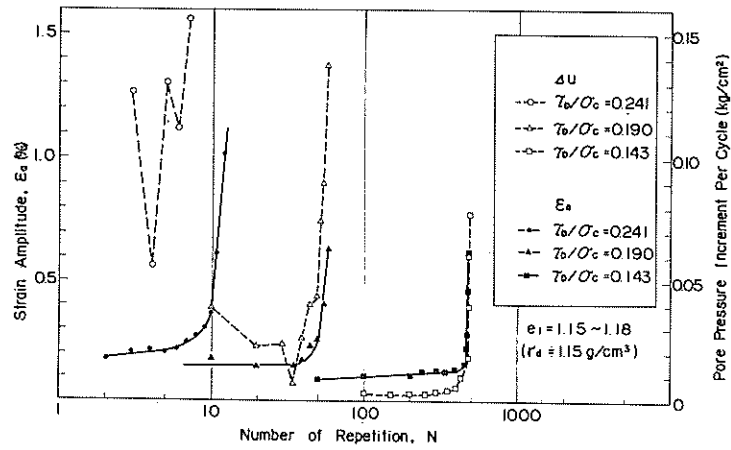


図-7a 間げき水圧増分とひずみ振巾のくりかえし波数による変化

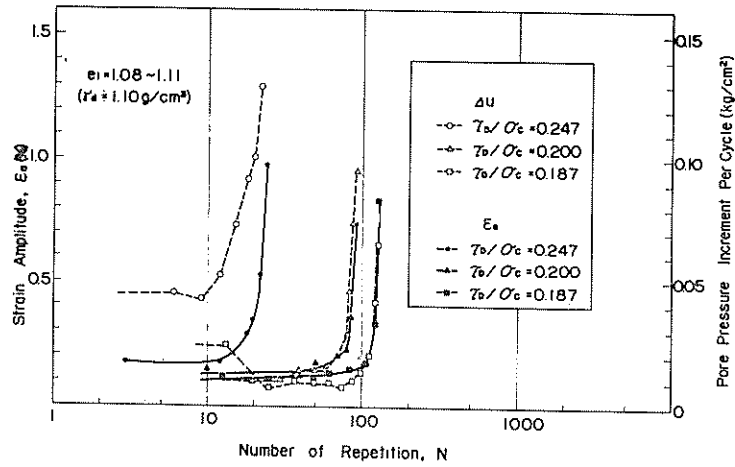


図-7b 間げき水圧増分とひずみ振巾のくりかえし波数による変化

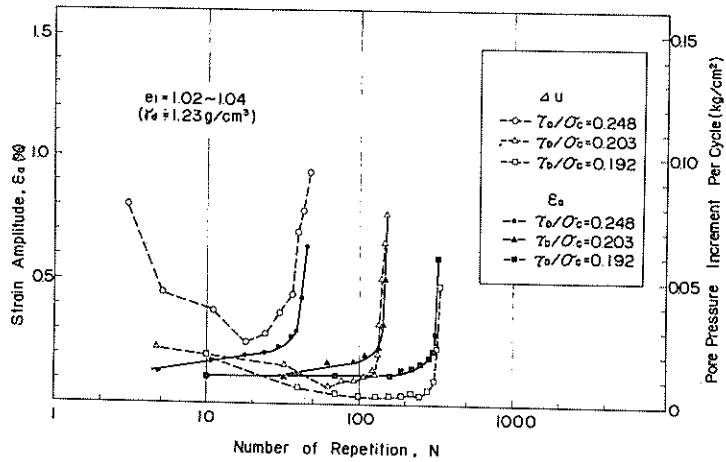


図-7c 間げき水圧増分とひずみ振巾のくりかえし波数による変化

$\sigma_c = 3.0 \text{ Kg/cm}^2$ , くりかえしせん断応力振巾  $\tau_D = 1.5 \text{ Kg/cm}^2$ , 振動数  $f = 3 \text{ cps}$  の場合である。

図-6によれば, くりかえし回数  $N$  の増加とともに間げき水圧は次第に上昇し, 20 サイクル以降においてやや急激な上昇を示している。一方, 軸ひずみ振巾は 20 サイクルまでは微小であるが, 21 サイクル以降において急増している。

このような測定記録から, 軸ひずみ振巾ならびに残留間げき水圧の一サイクル当りの増分を, くりかえし数  $N$  に対しプロットすると図-7a~図-7c のようになる。各図の初期間げき比はほぼ同程度のものが選ばれており, 応力比  $\tau_D/\sigma_c$  が変化している。ここに,  $\tau_D$  はせん断応力振巾, すなわち, 軸荷重振巾  $\sigma_D$  の  $1/2$  であり,  $\sigma_c$  は等方圧密圧力である。いずれの場合も  $\sigma_c \approx 3.0 \text{ Kg/cm}^2$  である。

間げき水圧の中立軸は一般に図-6 に示したように, くりかえし数とともに増大する。一サイクル当りの増分は, 変動の激しいものもみられるが, 多くの場合, 初期のサイクルを除いて, ほぼ一定の値を示した後, くりかえし数とともに急増する傾向が認められる。一方, ひずみ振巾のくりかえし数に対する変動傾向については, 与えられたせん断応力  $\tau_D$  の大きさに応じて生じた振巾が, くりかえし初期には顕著な変化を示さず, くりかえしの増加とともにやや緩やかな増加傾向を示した後, ある波数に達すると急増する傾向が認められる。

ひずみ振巾の急増する時のくりかえし数ないしは間げき水圧の増分の急増する時のくりかえし数は初期流動化に対応する波数として定義されるものであるが, 図-7a~7c の場合には, 間げき水圧の増分の急増する波数は明確に定め難く, ひずみ振巾の急増する波数として初期流動化を定義した方が好都合と思われる。

## 4.2 流動化条件

### (1) シラスの流動化条件

初期流動化の定義としては, 2.2 でふれたように各種の考え方があがあるが, ひずみ振巾の急増する時点に対応する波数として規定するものが, シラスの場合にも妥当であると考えられ, 以下ではその規準を用いた。また, 比較のため実施した豊浦標準砂の場合についても同様の規準を用いた。

初期間げき比  $e_i$  ならびにせん断応力振巾  $\tau_D$ , すなわち軸荷重振巾  $\sigma_D$  の  $1/2$  を色々変えたものについて実施した試験の結果から, 各々の場合について流動化が生ずる時の波数  $N_L$  を求めた。この場合, 初期間げき比  $e_i$  は, 試験前に適当な値を想定しても, 各試験について予定通りの初期間げき比  $e_i$  を得ることは非常に難しいのに対し, せん断応力振巾  $\tau_D$  は各試験について, 相当高精度に制御できる量である。また, 通常の流動化試験の結果によれば,  $N_L$  に支配的要因としては初期間げき比  $e_i$ , 拘束圧  $\sigma_c$ , せん断応力振巾  $\tau_D$  とみられ,

$$N_L = f(e_i, \sigma_c, \tau_D)$$

の関係があり, この中でも, 初期間げき比  $e_i$  が同じであれば, 流動化時のくりかえし回数  $N_L$  は  $\tau_D, \sigma_c$  の個々の値よりは  $\tau_D/\sigma_c$  により一義的に定められる<sup>8), 9)</sup>といわれている。このようなことから, 各試験の  $N_L$  を応力比  $\tau_D/\sigma_c$  をパラメーターとして初期間げき比  $e_i$  に対してプロットすると図-8 が得られる。図中各プロットに示した数値は  $\tau_D/\sigma_c$  の値である。この図から,  $\tau_D/\sigma_c$  が同じであれば, 流動化に要するくりかえし数  $N_L$  は初期間げき比  $e_i$  の小さいほど大きく, しかも,  $e_i \sim \log N_L$  関係は, 実験範囲内で直線とみなしても支障はないようである。このようにして引いた  $\tau_D/\sigma_c = 0.25, 0.20, 0.14$  の各等値線が3本の直線で示されている。

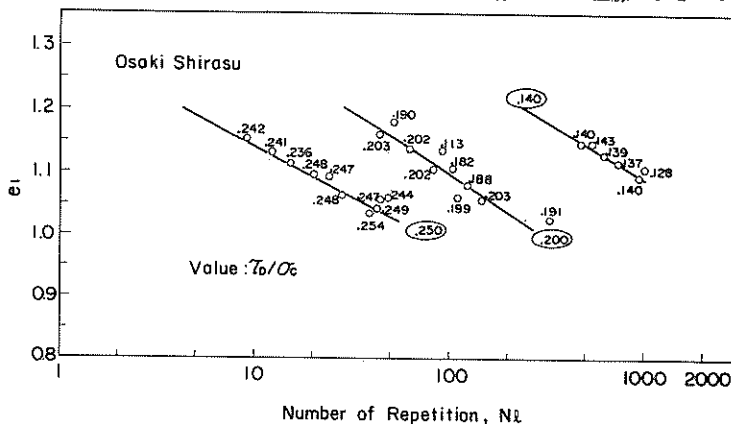


図-8 初期間げき比と流動化時のくりかえし波数の関係  
(大崎町シラス, 応力比  $\tau_D/\sigma_c$  : パラメーター)

このような直線近似ができるのは特殊な場合であり、初期間げき比、せん断応力の条件によっては、物理的にみてもむしろ曲線となるべきであろうが、シラスの場合、採用したせん断応力  $\tau_D$ 、間げき比の使用範囲内で直線とみなしたものである。豊浦標準砂については、使用条件の範囲で曲線近似により  $N_L \sim e_i$  関係を定める必要があった。(図-9)

図-8より初期間げき比  $e_i$  の等しい場合における  $\tau_D/\sigma_c$  の等値線から対応するくりかえし数  $N_L$  を求め、 $e_i = 1.05, 1.10, 1.15, 1.20$  について  $\tau_D/\sigma_c$  と  $N_L$  の

関係を図-10に4種類の記号で示した。図-10から初期間げき比  $e_i$  が与えられた場合、応力比  $\tau_D/\sigma_c$  により初期流動化を起こすために要するくりかえし数  $N_L$  の大きさが与えられ、 $\tau_D/\sigma_c$  の増加とともに  $N_L$  は小さくなることがわかる。また、逆に特定の  $e_i$  に対してくりかえし数  $N_L$  が与えられた場合、初期流動化を起こすために要する応力比  $\tau_D/\sigma_c$  が求められ、 $N_L$  が小さいほど  $\tau_D/\sigma_c$  は大きい。  $\tau_D/\sigma_c \sim N_L$  曲線はいわゆる流動化条件と呼ばれるものであり、初期間げき比  $e_i$  の増加とともにこの曲線は下方に移動する。

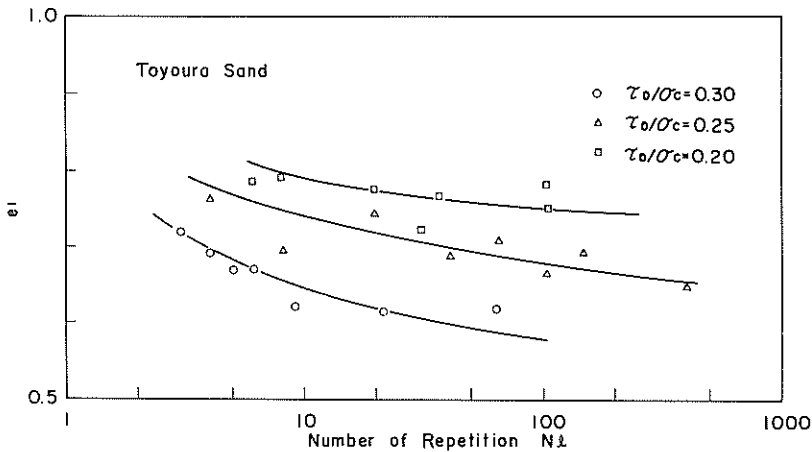


図-9 初期間げき比と流動化時のくりかえし波数の関係  
 (豊浦標準砂、応力比  $\tau_D/\sigma_c$  : パラメーター)

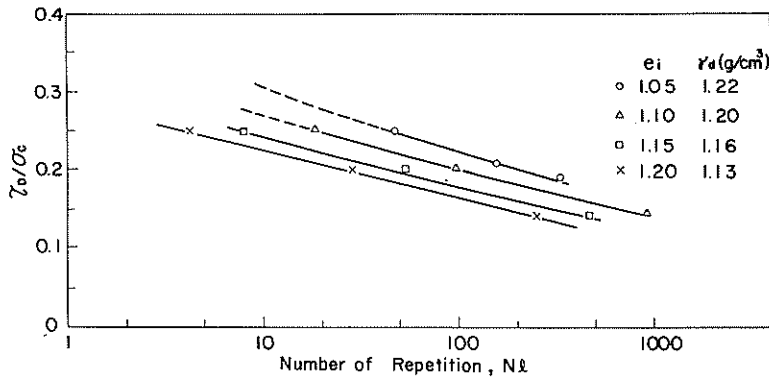


図-10 応力比  $\tau_D/\sigma_c$  と流動化時のくりかえし波数の関係  
 (大崎町シラス、 $e_i$  : パラメーター)

図-10の流動化条件は、圧密圧力  $\sigma_c = 3.0 \text{ Kg/cm}^2$  に対して得られたものであるが、拘束圧の影響の有無を確認するため、 $\sigma_c = 1.0 \text{ Kg/cm}^2$ 、 $\sigma_c = 2.0 \text{ Kg/cm}^2$  について、限られた個数ではあるが、同様の実験を行った。図-11に

$\sigma_c = 1.0 \text{ Kg/cm}^2$ 、および  $\sigma_c = 2.0 \text{ Kg/cm}^2$  に対する、初期間げき比  $e_i$  とくりかえし波数の関係を、それぞれの場合における応力比  $\tau_D/\sigma_c$  をパラメーターとして示した。図中の3本の直線は図-8に示した圧密圧力  $\sigma_c = 3.0 \text{ Kg/cm}^2$

# 振動三軸試験による動的性質

に対する  $e_i \sim N_L$  関係である。図-11 より内挿して  $e_i = 1.10$  に対する流動化条件を求めたものを図-12 にプロットし、 $\sigma_c = 3.0 \text{ kg/cm}^2$  の試験から得られた曲線を示した。図より  $\sigma_c = 1.0 \text{ kg/cm}^2$  および  $\sigma_c = 2.0 \text{ kg/cm}^2$  に対しても

$\tau_D / \sigma_c \sim N_L$  関係は  $\sigma_c = 3.0 \text{ kg/cm}^2$  に対するものと大差はないと考えられる。従って、乱したシラスの場合には、通常の砂と同様に応力比  $\tau_D / \sigma_c$  を採用することにより拘束圧の影響は考慮しなくてもよいとみられる。

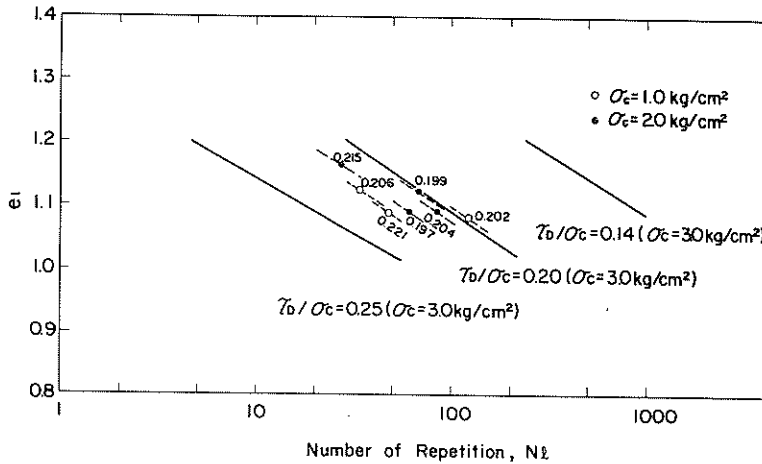


図-11  $e_i \sim N_L \sim \tau_D / \sigma_c$  関係におよぼす拘束圧  $\sigma_c$  の影響

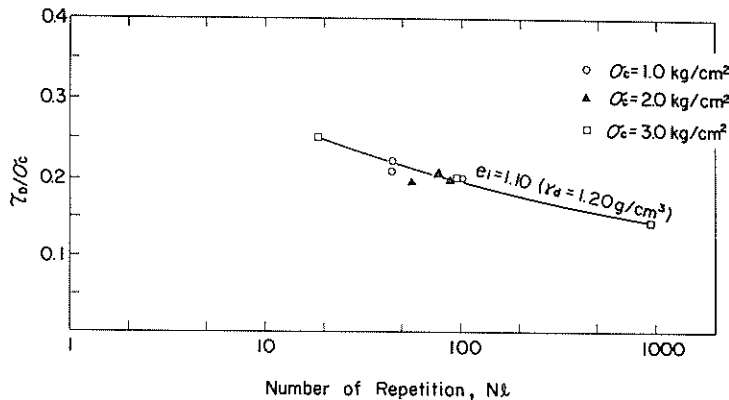


図-12 流動化条件におよぼす拘束圧の影響

## (2) 他の砂質土との比較

飽和した砂質土がくりかえし荷重を受けた場合、過剰間げき水圧が残留し、有効拘束圧が減少して流動化を生ずる。通常の飽和砂に共通してみられるこのような破壊形態が、乱したシラスの場合にも同様に観察され、この場合の流動化に対する条件が前述のように求められた。流動化に対する抵抗力はシラスと他の砂、あるいは種類の異なる砂の間でも相違しており、ここではシラスの流動化条件と他の砂のそれを比較してみる。2種類の砂の特性を比較する場合、その条件をそろえる目的で、相対密度  $D_r$  を用いるのが普通であるが、 $e_{max}$ 、 $e_{min}$  の求め方が難しく、相対密度自体誤差の大きいものであるといわれており<sup>(14), (15)</sup> 間げ

き比  $e$  または乾燥密度  $\gamma_d$  で各砂の締めり方を表わす方がよいともいわれている<sup>(15)</sup>。しかし、シラスとたとえば豊浦標準砂とでは、得られる初期間げき比  $e_i$  または乾燥密度  $\gamma_d$  の範囲が全く異なっており、両者の特性を比較できないので、相対密度に相当の誤差が入る可能性があるということを考慮した上で、締めり程度を評価する量として相対密度を用いることとした。

図-13 に前述の如く求められた3種類の間げき比  $e_i$  または乾燥密度  $\gamma_d$  についてのシラスの流動化条件が相対密度を用いて表示されており、また、ほぼ同程度の相対密度をもつ豊浦標準砂に対する結果もあわせて示されている。豊浦標準砂については、小川他<sup>(16)</sup>により報告された比較的

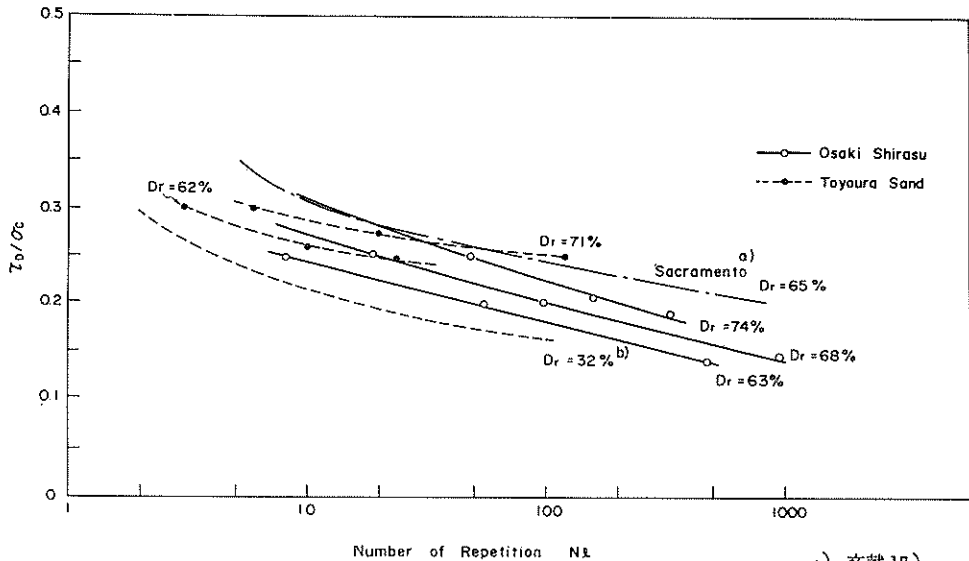


図-13 大崎町シラスと豊浦標準砂の流動化条件

a) 文献17)  
b) 文献16)

緩詰めの場合の結果をも示し、またSeed他<sup>17)</sup>のサクラメント川砂の  $D_r = 65\%$  の場合の流動化条件を示した。シラスと豊浦標準砂についてほぼ同程度の相対密度に対する流動化条件を比較すると、相対密度の比較的小さい場合には、同一のくりかえし波数で流動化を起こすために必要な応力比は標準砂の方が高い。すなわち、流動化がおこりにくい、相対密度が相当大きい場合には、かならずしもシラスの方が流動化しやすいとはいえない。シラスと標準砂では、流動化を起こすために必要な応力比  $\tau_D/\sigma_c$  のくりかえし波数に対する変化傾向がやや相違しており、シラスの場合、くりかえし波数が増加すると流動化をおこすために必要な応力比  $\tau_D/\sigma_c$  がより急激に低下するが、くりかえし波数の少ない場合には、応力比  $\tau_D/\sigma_c$  はかなり高い。従って、相対密度が相当大きく、かつくりかえし波数が少ない場合には、シラスの方がむしろ流動化に対する抵抗力は強いという傾向が認められる。シラスと標準砂の応力比のくりかえし波数に対する変化傾向のこのような相違は、粒度分布、すなわち粒子配列の相違に起因するものであると思われる。シラスの場合、粒度分布が良い(すなわち均等係数が大きい)ため、くりかえし波数の増加にともない、粒子配列が変動しやすくなり、従って、波数の影響を受けやすいと考えられる。また、シラスの  $D_r = 65\%$  の流動化条件は内挿により容易に求められるが、これはサクラメント川砂の  $D_r = 65\%$  に対するものよりもやや厳しいといえよう。

図-13は広範囲なくりかえし波数に対して、シラスと標

準砂またはサクラメント川砂の流動化傾向を対比したものであり、また、くりかえし波数も規則波として与えた場合のものである。実際の地震波は不規則波であるので、規則波による室内試験結果との対応が問題となるが、Seed他<sup>18)</sup>は電気工学における実効値的な手法により不規則地震波を等価な規則波に置きかえることを試みており、マグニチュード  $M = 7 \sim 8$  程度の地震に対しては10~30波程度を想定すればよいとしている。

図-14は図-3から  $N_L = 10$  のくりかえし波数により初期流動化を起こすに要する応力比  $\tau_D/\sigma_c$  を読みとり、相対密度  $D_r$  に対してプロットしたものである。シラスについては、大原他<sup>5)</sup>による鹿児島県都城産のシラスの場合の結果をあわせて示した。図中点線で示した2本の直線は、谷本他<sup>19)</sup>が、各種の砂に対して  $N_L = 10$  に対応する  $\tau_D/\sigma_c$  と  $D_r$  の関係を取りまとめた結果の上限および下限である。本実験で用いた大崎町シラスは、従来の普通砂に対する研究成果の下限にプロットされ、 $N_L = 10$  についての大崎町シラスの流動化に対する抵抗力は、豊浦標準砂に対する結果をも含めて、通常の砂にくらべてやや弱いと考えられる。本実験で比較のため使用した豊浦標準砂自体も、従来の報告からみて流動化しやすい部類に属しているようである。大原他の都城シラスは、大崎町シラスの結果よりもさらに下方に位置している。山内他<sup>20)</sup>が、乱さないシラスは流動化に対してかなり抵抗が強いが、乱したシラスの場合には、流動化に対する抵抗力が著しく落ちることを報告している。この原因として、乱さないシラスは地質的效果に起因



振動三軸試験による動的性質

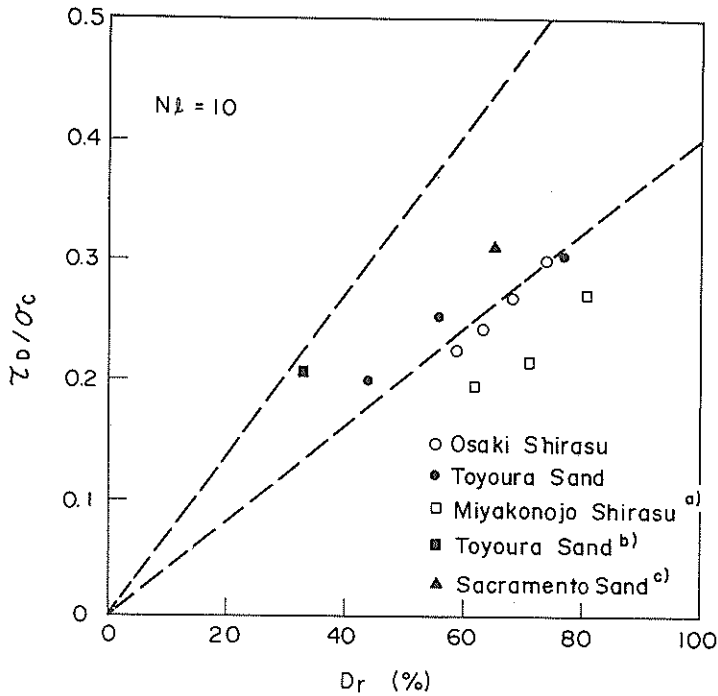


図-14 10波のくりかえしにより流動化を生ずる  
応力比  $\tau_D/\sigma_c$  と相対密度の関係

a) 文献 5)  
b) 文献 16)  
c) 文献 17)

する固結力を有しており、この固結力がある程度のくりかえし波数までは破壊を抑制する働きをすると説明されている。

乱したシラスの場合にはこのような結合力の大部分が失われ、通常の砂の挙動に近い特性を示すようになる。その場合、乱したシラスが通常の砂にくらべて流動化に対する

抵抗力が弱くなる一つの原因を粒度分布、平均粒径、あるいは均等係数などに求められよう。例えば、図-15はLee他<sup>21)</sup>によるくりかえし破壊強度の平均粒径による影響を示したものであり、くりかえし波数  $N=30$  により5%ひずみを生ずるに必要なせん断応力振巾  $\tau_D$  と圧密圧力  $\sigma_c$  の比  $\tau_D/\sigma_c$  の平均粒径  $D_{50}$  に対する変化傾向が、それぞ

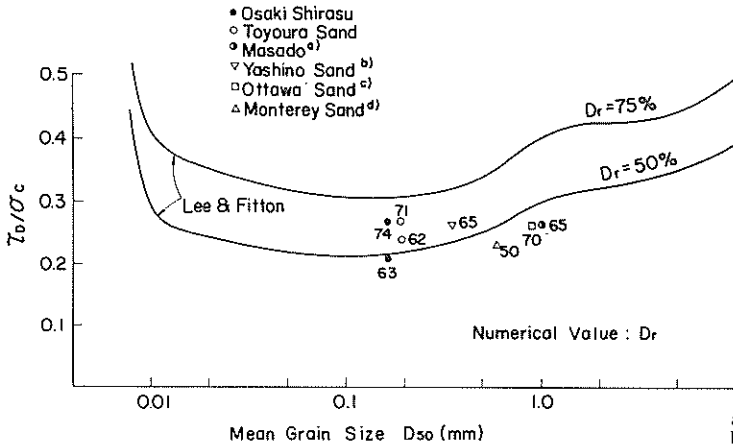


図-15  $N_L=30$ における破壊時の応力比  $\tau_D/\sigma_c$  と平均粒径  $D_{50}$

a) 文献 19)  
b) 文献 19)  
c) 文献 17)  
d) 文献 6)

れ、相対密度  $D_r=50\%$ ,  $D_r=75\%$  に対して示されている。破壊の定義の方法は多少相違するが、一応初期流動化に対する応力比  $\tau_D/\sigma_c$  とみなし、大崎町シラスおよび豊浦標準砂の  $N_L=30$  に対する応力比  $\tau_D/\sigma_c$  をそれぞれの試料の平均粒径  $D_{50}$  に対して図-15 中にプロットした。また、他の研究成果についても同様のプロットを行った。なお、各点に示した数値は相対密度  $D_r$  の大きさを示すものである。大崎町シラスは Lee & Fitton の  $N_L=30$  に対する応力比  $\tau_D/\sigma_c$  が最も小さくなる平均粒径の位置にプロットされることになり、少なくとも、大崎町シラスは流動化を起こしやすい平均粒径をもつと言えそうである。もつとも、他の研究成果のいくつかは、Lee & Fitton の示した相対密度に対応しておらず、そのような場合、平均粒径が支配的要因とはかぎらないことを示している。このことに関して、山内<sup>22)</sup>は、粒子の表面形状と粗滑の程度の相違が、一つの重要な要因となる場合があることを指摘している。たとえば、シラスの場合、粒子形状が角ばっており、かつ粒子表面は比較的滑らかであるという特徴があるが、このような場合、静荷重のもとでは強度は大きくなるが、動荷重のもとでは粒子表面の滑らかさに起因して、容易に体積が収縮して密な状態になろうとする傾向があり、したがっ

て、過剰間げき水圧が発生し、より流動化しやすくなるといわれている。このような粒子形状とか表面の粗滑の程度の影響を定量的に評価するのは困難であるが、定性的には、シラスが普通の砂より流動化しやすい原因と考えられる。

#### 4.3 動的せん断強さ

##### (1) 有効応力経路と動的破壊面

くりかえし荷重を受けた飽和砂が流動化を生ずる過程は有効応力経路の動的破壊面への接近過程としてとらえることができる<sup>10)</sup>  $\sigma_c$  で等方圧密を受けた供試体に、側圧一定のまま軸荷重（応力振巾  $\sigma_D$ ）のみを振動させた場合のくりかえし載荷一サイクルは圧縮過程（ $\sigma_1 = \sigma_c + \sigma_D > \sigma_3 = \sigma_c$ ）と伸張過程（ $\sigma_1 = \sigma_c - \sigma_D < \sigma_3 = \sigma_c$ ）をとまう。圧縮過程における最大せん断応力  $\tau_D$  の作用時点において生じた過剰間げき水圧  $\Delta u_c$  はせん断応力の除去に伴ない減少し、最大伸張状態（ $-\tau_D$ ）において極小値  $\Delta u_e$  を示した後増加する。等方応力状態に戻っても、発生した過剰間げき水圧は完全には除去されず、一サイクルのくりかえし過程中に幾分残留する。くりかえし数の増加につれ残留間げき水圧の量が増加していくため、有効拘束圧

$$\sigma'_3 = \sigma_c - \sum \frac{1}{2} (\Delta u_c + \Delta u_e) \text{ が減少し、破壊に至る。}$$

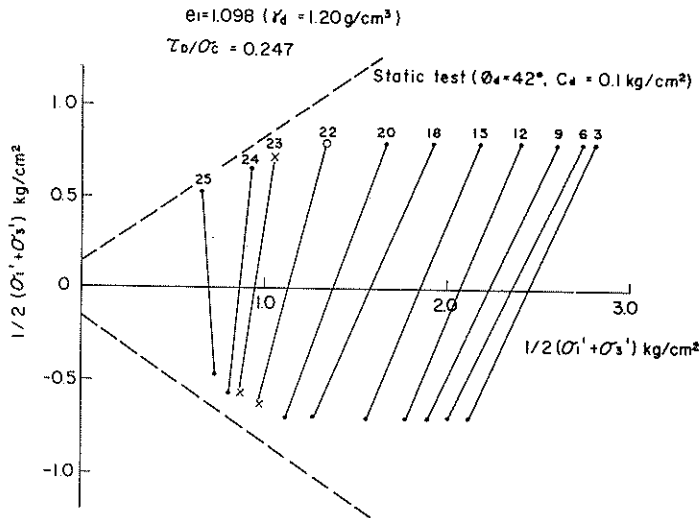


図-16 くりかえしせん断時の有効応力経路

図-16 は乱したシラスについての側圧一定で軸荷重（応力振巾  $\sigma_D$ ）を変動させた場合の  $45^\circ$  面上における応力変化を示したものであり、 $\sigma_c = 3.0 \text{ kg/cm}^2$ ,  $\sigma_D = 1.48 \text{ kg/cm}^2$ , 初期間げき比  $e_i = 1.098$  の例である。図中の数値は等方圧密状態からのくりかえし載荷の回数であり、同一サイクル内における最大圧縮状態と最大伸張状態における  $45^\circ$  面

上の応力条件同志が直線で結ばれている。図-16の点線は静的三軸排水試験<sup>23)</sup>より求めた破壊時のモール応力円のピークを結ぶ直線であり、幾何学的な関係から容易に破壊包絡線に結びつけられるものである<sup>24)</sup>。伸張側の点線は圧縮側と等しいと仮定して引いた同様の直線である。

圧密終了時に  $\sigma_c = 3.0 \text{ kg/cm}^2$  の等方応力状態にあつた

振動三軸試験による動的性質

45°面上の応力状態は、くりかえし数の増加につれて、残留間けき水圧の増分だけ、図-16において左にシフトするが、静的破壊線に到達する以前のある波数において、一定のせん断応力が維持できなくなる状態が現われ、それ以上の波数においては、ピークの値が減少する。これらの点を図中×印で示した。通常、圧縮側と伸張側で、最初にこれらの状態が現われる波数は異なっており、伸張側において早く現われる。せん断応力が維持できなくなる最初の点は、前述の初期流動化状態にほぼ対応するものであるが、破壊が急激に起こる場合以外は、対応するくりかえし波数は多少相違し、図-16より求めた方がやや大きい波数を与えるようである。

初期間けき比  $e_i$  の等しい他の試料についてせん断応力  $\tau_D$  を変えた場合、それぞれ図-16のような結果が得られる。これらの結果から、伸張ならびに圧縮の各過程において最初に現われるものをピックアップして  $\sigma \sim \tau$  図上にプロットすると図-17a～図-17cが得られる。各点は多少のばらつきがあるが、圧縮ならびに伸張の両過程とも各プロットを結ぶ直線を描くことができる。これらの2直線は、それぞれ圧縮ならびに伸張状態における動的破壊包絡線に関係づけられるものである<sup>1)</sup> 図-17a～17cは、それぞれ8種類の平均間けき比  $e_i$  に対応するものであるが、最も締った場合については、みかけの粘着力が若干あるため、2直線は原点を通らない。

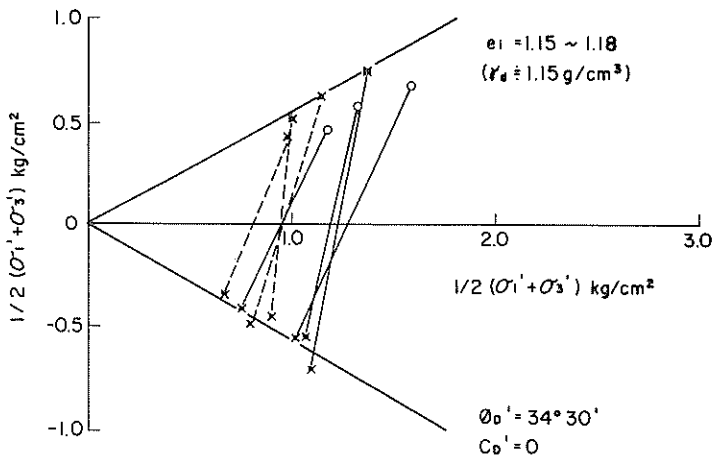


図-17a 動的破壊線

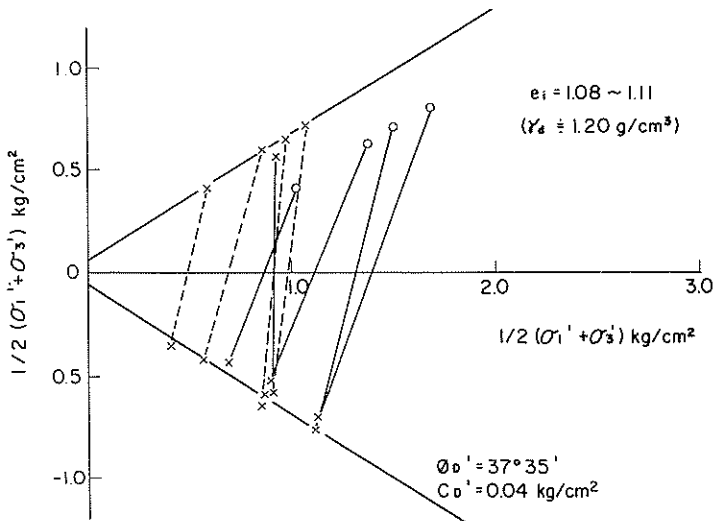


図-17b 動的破壊線

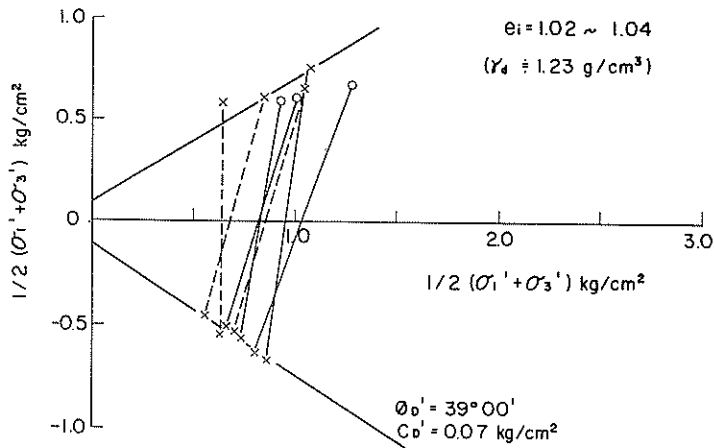


図-17c 動的破壊線

## (2) 強度定数

前述のように初期流動化時のせん断応力のピークが一本の直線上にくるとみなすことは、動的な破壊規準が静的せん断試験の場合のモール・クーロンの破壊規準

$$\tau_f = \sigma' \tan \phi_d + C_d \quad (1)$$

と同様の型で表わされていると仮定したことにほかならない。すなわち、

$$\tau_D = (\sigma - u) \tan \phi_D' + C_D' \quad (2)$$

ここに、 $\tau_f, \phi_d, C_d$ は静的試験のせん断強度、排水せん断抵抗角及びみかけの粘着力であり、 $\tau_D, \phi_D', C_D'$ はそれぞれ動的試験のせん断強度、せん断抵抗角、及びみかけの粘着力である。

(2)式の妥当性には問題点もあるが、実用的な見地から一応成立するものとし、図-17a~17cにおける直線の勾配を  $m$ 、 $\tau$  軸との切片を  $f$  とすると  $\phi_D', C_D'$  は以下のように与えられる。

$$\phi_D' = \sin^{-1} m \quad (3)$$

$$C_D' = f / (2\sqrt{1-m^2}) \quad (4)$$

このようにして求めたシラスならびに豊浦標準砂の  $\phi_D', C_D'$  が表-4に示されている。また、表-4には、静的排水三軸圧縮試験 ( $D$ -試験) の  $e_i \sim \phi_d, e_i \sim C_d$  関係<sup>23)</sup>より内挿した同一の間げき比に対応する  $C_d, \phi_d$  の値も示されている。

表-4の結果を図-18に示した。図-18には、比較のため、マサ土の結果ならびに谷本他<sup>11)</sup>により報告された結果もあわせて示した。動的試験は圧密した後非排水状態で行われたものであるため、静的試験の内部まさつ角は圧密非排水せん断試験 ( $CU$ 試験) で得られるもの ( $\phi'$ ) を用いるのが望ましいが、ダイラタンシーの大きくなる非常に密

| 項目<br>試料 | $e_i$ | $\tau_d$<br>g/cm <sup>3</sup> | $\phi_D'$<br>度 | $C_D'$<br>Kg/cm <sup>2</sup> | $\phi_d$<br>度 | $C_d$<br>Kg/cm <sup>2</sup> |
|----------|-------|-------------------------------|----------------|------------------------------|---------------|-----------------------------|
| シ        | 1.17  | 1.15                          | 34°30'         | 0                            | 41°30'        | 0.15                        |
| ラ        | 1.10  | 1.20                          | 37°35'         | 0.04                         | 41°50'        | 0.16                        |
| ス        | 1.03  | 1.23                          | 39°00'         | 0.07                         | 42°20'        | 0.22                        |
| 豊        | 0.759 | 1.50                          | 29°06'         | 0                            | 37°25'        | 0.07                        |
| 浦        | 0.691 | 1.56                          | 36°19'         | 0                            | 39°25'        | 0.09                        |
| 砂        | 0.669 | 1.59                          | 33°50'         | 0                            | 40°10'        | 0.09                        |

表-4 シラスの静的、動的せん断定数

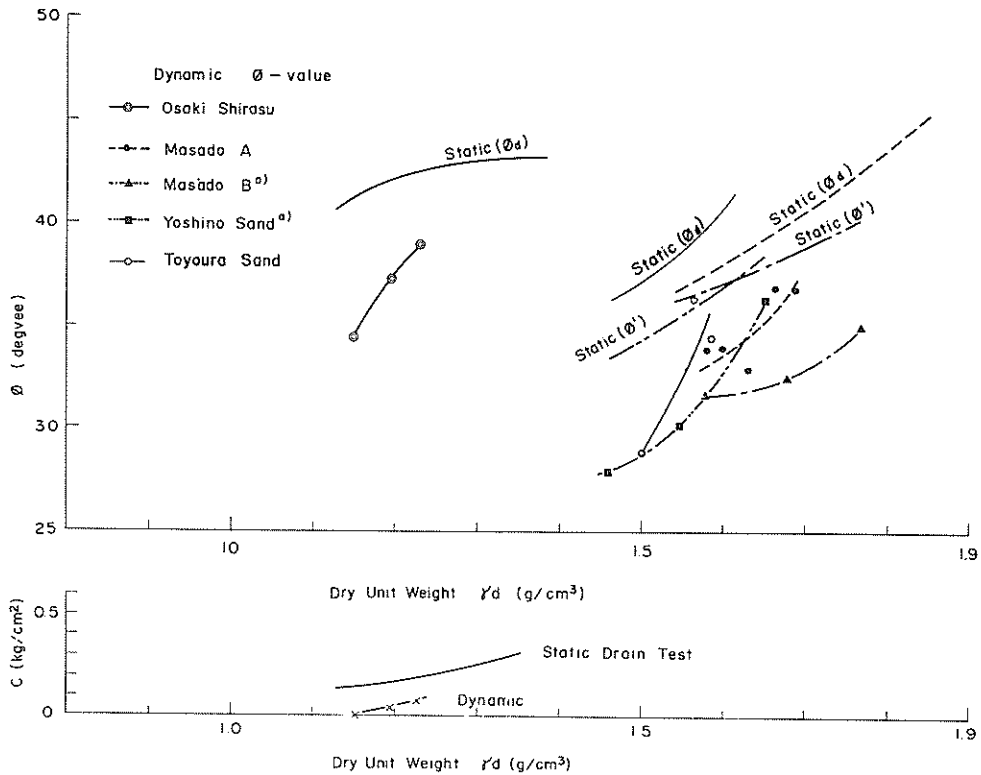
な場合を対象としないかぎり、実用上  $\phi' \div \phi_d$  とみなしてよい<sup>23)</sup>と言われており、上記のように  $\phi_d$  を静的試験の内部まさつ角として採用した。

図-18から明らかなように、動的試験の内部まさつ角は、一般的に5度前後小さくなり、締まったものほど動的の内部まさつ角と静的の内部まさつ角の相違は小さくなるようである。

シラスの場合、普通の砂にくらべて粒子比重はかなり小さく、非常に締まった場合でも単位体積重量はかなり小さいが、静的強さは相当大きい。このような特徴は、今回の実験に使用した大崎シラスのみならず、他の種類のシラスについても一般的に認められているようである。この原因としては、前述したように山内他<sup>23)</sup>が、シラスの粒子形状が非常に角ばつたものであるため、強度成分の中のインターロッキング成分がかなり大きくなることによると述べている。

締め固めの程度により相違するが、シラスはくりかえし載荷により強度を減少する。シラス粒子は表面の滑らかさ

振動三軸試験による動的性質



図一18 静的、動的せん断定数と乾燥密度

a) 文献 11)

のため、高速荷重により粒子構造が崩壊しやすいとみられており、くりかえし荷重による構造変化の累積により、動的強度の低下がおこる。強度低下の度合は緩詰めの場合に著るしいが、ある程度締め固めた場合には、強度低下の度合はさほど大きくならない。しかし、低下の割合を他の砂に比べてみると、シラスの場合に特別大きいとは言えないようである。このことは、シラスが他の砂にくらべて流動化しやすいという、前述の実験事実と一見矛盾しているように思われるが、破壊時に動員される内部まきつ角の大きさと流動化の難易度とは、かならずしも一致しないということである。すなわち、流動化の難易度は、くりかえし載荷—サイクル中に発生する過剰間げき水圧の大小に直接支配されるのであって、内部まきつ角は間接的な影響を与えるものとみられる。

シラスの場合、他の砂に比べ比較的大きいみかけの粘着力が存在し、この値は締めつたものほど大きく、緩詰めになるに従い減少する。乱さないシラスの場合、微粒子による固結力により、大きな粘着力成分を示す場合があることが明らかにされているが、乱したシラスについては、このような固結力は破壊されているため、みかけの粘着力は主

としてダイラタンシーにもとづくものである。動的試験の場合にも、静的試験の結果より若干小さいようであるが、相対密度 60 % 以上の場合にみかけの粘着力が存在するようである。

## 5 港湾工事材料としての適用性

3～4において振動三軸試験装置を用いた場合の乱したシラスの動的性質を調べ、シラスの流動化条件ならびに動的せん断定数の大きさ、間げき比または乾燥単位重量に対する変化傾向、これらの諸特性の他の種類の砂との相対関係が明らかにされた。これらの結果を要約すると次のようになる。

乱したシラスの場合、くりかえし載荷中の粒子再配列の影響を受けやすく、流動化条件は波数に対して比較的敏感である。また、同一応力条件ならびに締め固めの度合(相対密度  $D_r$  を使用)に対しては、乱したシラスは流動化に対する抵抗力が弱い部類に属しており、この原因として、流動化しやすい平均粒径をもつことのほか、粒子構造に関する微視的要因が考えられる。したがって、乱したシラスは、与えられた応力条件に対して流動化に抵抗するため

には、普通の砂よりやや締め固めておく必要がある。

一方、シラスのせん断定数については、乱した場合でも静的強さは相当大きく、通常の砂よりも比較的緩詰め状態においてもダイラタンシーに起因するみかけの粘着力をもつことが知られており、大崎町シラスの場合についても同様の傾向が得られている<sup>26)</sup>。動的内部まき角  $\phi_D'$  は5~7度程度(密詰め~中詰め)静的内部まき角 ( $\phi_d$  または  $\phi'$ ) より小さくなるが、内部まき角の低下の度合は他の砂にくらべて特別大きなものではなく、 $\phi_D'$  の初期間げき比  $e_i$  または初期乾燥単位重量  $\gamma_d$  に対する変化傾向は他の砂とほぼ同様である。

以下では、シラスのこのような特性を考慮して、シラスの港湾工事材料としての適用性を検討する。シラスを港湾

工事に使用する場合、予想される使用の方法として、盛土材料、裏込め材料、中詰め材料、敷砂、あるいは埋立材料などが考えられよう。この場合、シラスを港湾工事に積極的に使用し得る利点があるのか否か、またやむを得ず使用しなければならないとすれば、どのように処理すればよいのかが問題となる。

上述したような使用方法のうち、盛土材料、裏込め材料、中詰め材料、敷砂などについては、シラスのもつ工学的材料としての長所、すなわち、単位体積重量の小さいこと、静的内部まき角が大きく、動的内部まき角も他の砂にくらべて特別小さくないこと、締め固め効果の大きいことなどが有効に活用されよう。この場合、使用する地域、あるいは地点によって、流動化に対する考慮を払う必要があ

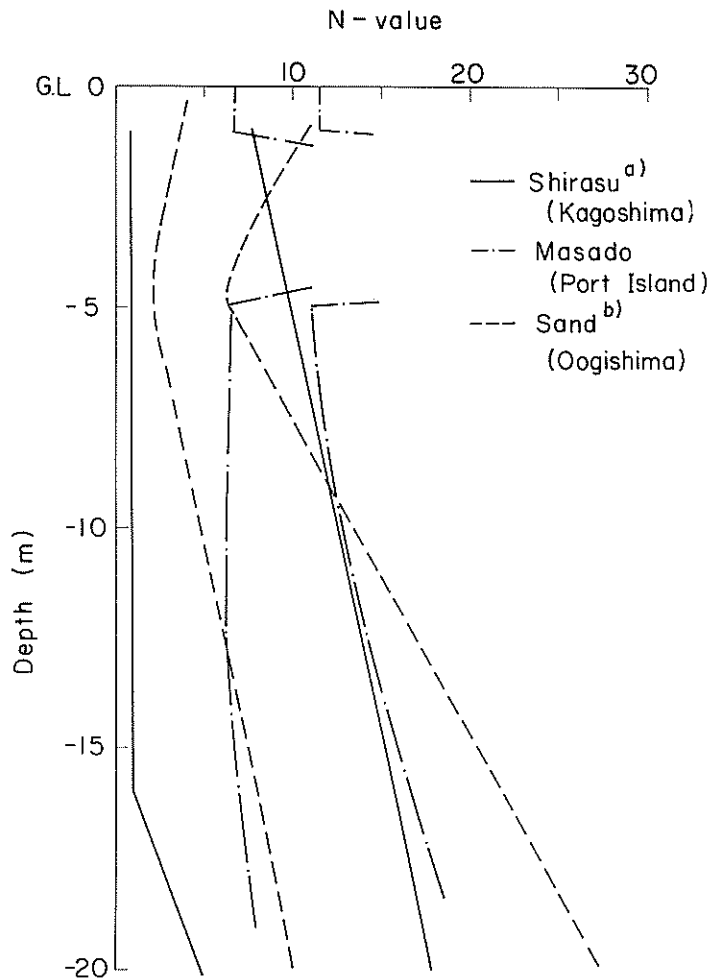


図-19 埋立地盤のN値

a) 文献26)  
b) 文献27)

る場合には、ある程度の締め固めを行うなどの対策もたてやすいと考えられる。また、必要によってはシラスの添加材による安定処理効率のよいことなどが有利に働こう。なお、シラスのみならず、通常の砂も動的内部まさつ角は、静的内部まさつ角にくらべて幾分低下する。このことは、地震時の内部まさつ角は常時にくらべて割引いた値を用いねばならないことを意味している。しかし、実際の設計の場合には、現地盤の間げき比が正確に把握できないこともあって、実験室において得られる値よりもかなり小さい値を使用しているともみられ、これらが地震時条件に対して大略相殺し合っているということも十分考えられる。このようなことの確認のためには、現地の間げき比の正確な調査方法の確立が望まれる。

つぎにシラスを埋立材料として使用する場合には、上述したような利点よりも流動化に対する抵抗力が通常の砂の場合よりも弱いということが大きな障害になるように思われる。山砂などを用いて埋立により海上に用地造成を行う場合には、全域にわたって特別な締め固めを行うことはないで、造成された砂層は一般的には比較的緩い状態にならざるを得ない。勿論、砂のまき出し工法、埋立砂の種類により完成後の用地の締め固まりの程度は相違しよう。同一応力条件（拘束圧および地震時のくりかえせん断応力の大きさ）および同程度の締め固めに対して、乱したシラスは普通の砂よりも比較的流動化しやすいという傾向があるが、シラスを用いた場合の埋立地盤に、地盤改良なしにどの程度の締め固めが期待されるのか、シラスの埋立材料としての適用性を判断する一つの資料となる。このような意味で、3つの既成埋立地における標準貫入抵抗 $N$ 値の深さ方向分布のばらつき範囲を図-19に示した。これらの埋立地および埋立砂は、鹿児島県与次郎ヶ浜<sup>26)</sup>地山シラス、神戸市ポートアイランドーマサ土、および川崎市扇島<sup>27)</sup>普通の山砂である。

図-19によれば、シラス埋立地の $N$ 値は、他の2者にくらべて、ばらつき範囲の下限側が相当小さく、また平均的にみても、やや小さいようである。埋立工法の相違もあると思われるが、シラス埋立地は、他の埋立材料による場合にくらべて、地盤改良なしには高い $N$ 値は期待できないように思われる。

また、シラスの単位体積重量が他の砂にくらべてかなり小さいということは、同一厚さの埋立地を想定した場合、同一深さの点の拘束圧を小さくすることを意味する。このことは、同一の波数で流動化を引き起こすに必要な応力比 $\tau_D/\sigma_c$ が同じであっても、小さいせん断応力 $\tau_D$ で流動化を起こすということである。乱したシラスの場合、

$N_L=10$ に対する $\tau_D/\sigma_c$ は普通の砂よりも小さいので、同一深さの点で流動化を起こすせん断応力 $\tau_D$ はさらに一層小さいということになる。

このようなことから、シラスは埋立材料としては積極的に用いるべき材料ではないということができよう。何らかの都合により、シラスを埋立材料として用いねばならない場合には、他の砂により代用する場合にくらべ、締め固めにより相対密度を上げるなどの対策に、より十分な配慮が必要となる。

## 6 結 論

乱したシラスの振動三軸試験によりシラスの流動化傾向を調べ、さらに非排水条件における動的せん断定数を求めた。これらの結果と同様の手法で実施した豊浦標準砂に対する結果ならびに、他機関で実施された結果などと比較することにより、シラスの港湾工事材料としての適用性を検討した。得られた結論は次のようである。

1. 乱したシラスは、応力条件、締め固め条件が同一であれば、標準砂も含めて普通の砂よりも一般的には流動化しやすい傾向がある。
2. シラスの非排水条件における動的内部まさつ角 $\phi_D'$ は、静的内部まさつ角( $\phi_d$ または $\phi'$ )に対して5~7度（密詰め~中詰め）小さい。しかし、内部まさつ角の低下の程度は他の種類の砂にくらべ、特別大きなものではない。
3. シラスには流動化しやすいという傾向はあるが、使用目的によっては、シラスの他の面の工学的利点が活用される。例えば、盛土、裏込め、中詰め、敷砂材料などには、ある程度の締め固めを行うことにより、流動化しやすいという欠かんが補えよう。
4. 埋立材料あるいは締め固めが行えない場合には、シラスを港湾工事材料として積極的に使用し得る利点はない。やむを得ず使用する場合には、他の砂に対するよりも流動化に対する配慮がより必要になろう。

## 7 あ と が き

本文において、流動化に対するシラスの相対的な抵抗力の評価は、層厚、拘束条件、締め固め程度が同一である地盤に、同一の地震時せん断応力が生じた場合を想定したものである。厳密な意味での比較を行うためには、層厚、締め固め条件が等しい地盤に同一地震が入力として与えられた場合の評価を行うことが必要である。原地盤の拘束条件は層厚および締め固め条件により規定されるものであり、地震時せん断応力はそれらのほかに入力地震波により決まる性質のものであるからである。このうち、拘束条件につ

いては、シラスの場合、普通の砂より単位体積重量が小さいことにより拘束圧が小さくなり、流動化に対する抵抗という観点からはマイナスの要因となっている。一方、同一地震波による地盤内せん断応力の大きさの相違は、地盤の剛性の相違にもとづいて評価し得るが、今回の実験においては、このような相違を考慮していない。

なお、本文中に採用したシラスの流動化試験は、東亜建設 KK 研修生滝上優夫氏の助力による所が大きいことを記して謝意を表したい。また、構造部耐震構造研究室土田肇室長、ならびに土質部基礎工研究室沢口正俊室長をはじめ、土質部のシラス一斉試験に関与された諸氏により有益な示唆をいただいた。あわせて記し、謝意を表する。

(1974年12月13日受付)

### 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.9，1968，PP.47-59.
- 2) 斉藤迪孝，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.9，1968，PP.19-29.
- 3) 春山元寿，“シラスの土質試験結果の応用による設計の考え方に関する研究”，鹿児島県林務部治山課，1972年3月.
- 4) 山内豊聰，豊田泰節，落合英俊，村田秀一，“繰返し荷重を受けるシラスのような砂の間げき水圧について”，土木学会第22回年次学術講演会講演概要，1967，PP.43-1-43-2.
- 5) 大原資生，“シラスの液化について”，第10回災害科学総合シンポジウム，1973年3月，PP.263-266.
- 6) Peacock, W. H., and Seed, H. B., "Sand Liquefaction under Cyclic Loading Simple Shear Conditions", ASCE, Vol. 94, No. SM3, May, 1968, PP. 689-708.
- 7) Finn, W. D. L., Pickering, D. J. and Bransby, P. L., "Sand Liquefaction in Triaxial and Simple Shear Tests", ASCE, Vol. 97, No. SM4, Apr., 1971, PP. 639-659.
- 8) 吉見吉昭，大岡 弘，“リングねじりせん断試験機による飽和砂の液化化実験”，第16回土質工学シンポジウム，1971，PP.27-32.
- 9) Seed, H. B., and Lee, K. L., "Liquefaction of Saturated Sands during Cyclic Loading", ASCE, Vol. 92, No. SM6, Nov., 1966, PP. 105-134.
- 10) 柴田徹，行友 浩，“飽和砂の繰返し載荷による液化化現象の研究”，土木学会論文報告集 No. 180，1970年8月，PP. 83-96.
- 11) 谷本喜一，植村隆晴，“周期載荷を受ける飽和砂の破壊”，土木学会論文集 No. 183，1970年11月，PP. 63-72.
- 12) 小川正二，“飽和砂の液化化に関する室内実験”，第16回土質工学シンポジウム，1971年，PP. 9-14.
- 13) 堀江宏保，小川富美子，成田 実，“港湾工事材料としてのシラスの工学的性質，—物理的性質と圧縮性—”，港湾技術研究所資料 No. 211，1975年3月
- 14) 吉見吉昭，陶野郁雄，“砂の相対密度の信頼性”，第7回土質工学研究発表会，土質工学会，1972年，PP. 89-92.
- 15) Hutchinson, B. and Townsend, D. "Some Grading - density Relationship for Sands", Proc. 5th JCSMFE, Vol. 1, 1961, PP. 159-163.
- 16) 小川正二，柳沢栄司，長池政彦，“振動応力を受ける飽和砂の液化化機構について”，第4回土質工学研究発表会，土質工学会，1969年6月，PP. 79-82.
- 17) Lee, K. L. and Seed, H. B. "Cyclic Stress Conditions Causing Liquefaction of Sand", ASCE, Vol. 93, No. SM 1, Jan., 1967, PP. 47-70.
- 18) Seed, H. B. and Idriss, I. M., "Simplified Procedure for Evaluating Soil Liquefaction Potential", ASCE, Vol. 97, No. SM9, Sept., 1971, PP. 1249-1273.
- 19) 谷本喜一，“液化化に関する実際上の諸問題”，第26回土木学会年次学術講演会講演集第3部，1971年10月，PP. III-9-III-12.
- 20) 山内豊聰，村田秀一，“乱さないシラスの静的および疲労破壊について”，第24回土木学会年次学術講演会講演集第3部，1969年9月，PP. 145-148.
- 21) Lee, K. L. and Fitton, J. A., "Factors Affecting the Cyclic Loading Strength of Soil", Vibration Effects of Earthquakes on Soil and Foundations, ASTM STP 450, 1968, P. 3.
- 22) 山内豊聰，“砂の静的および動的性質の関係について”，第24回土木学会年次学術講演会講演集，第3部，1969年9月，PP. 129-132.
- 23) 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，—シラスのせん断特性—”，港湾技術研究所資料 No. 211，1975年3月
- 24) 土質工学会，“土質試験法”
- 25) 土質力学” 技報堂
- 26) 山内豊聰，“粘土を含む砂の液化化について”，第26回土木学会年次学術講演会 No. 3，1971年，PP. 177-180.



振動三軸試験による動的性質

- 27) 齊藤 彰, 松田栄一, 石神公一, 萩野弘雄, 米山利治,  
 “埋立造成地盤の液状化予測について”, 土と基礎, Vol.  
 22, No.3, 1974年3月, PP.25~32.

記 号 表

|                 |                                           |
|-----------------|-------------------------------------------|
| $C$             | : 粘着力 ( $Kg/cm^2$ )                       |
| $C_d$           | : 排水せん断試験における粘着力 ( $Kg/cm^2$ )            |
| $C_D'$          | : 有効応力表示による動的試験における粘着力<br>( $Kg/cm^2$ )   |
| $D$             | : 粒径 (mm)                                 |
| $D_{10}$        | : 10%通過粒径 (mm)                            |
| $D_{30}$        | : 30%通過粒径 (mm)                            |
| $D_{60}$        | : 60%通過粒径 (mm)                            |
| $D_r$           | : 相対密度 (%)                                |
| $e_i$           | : 初期間げき比                                  |
| $f$             | : $\tau$ 軸との接片                            |
| $f$             | : 振動数 (Hz)                                |
| $m$             | : こう配                                     |
| $N$             | : 標準貫入試験の $N$ 値                           |
| $N$             | : くりかえし波数                                 |
| $N_e$           | : 流動化時のくりかえし波数                            |
| $u$             | : 間げき水圧 ( $Kg/cm^2$ )                     |
| $\Delta u_1$    | : 一サイクル当りの間げき水圧の増分<br>( $Kg/cm^2/cycle$ ) |
| $\Delta u_c$    | : 圧縮時間間げき水圧増分 ( $Kg/cm^2$ )               |
| $\Delta u_e$    | : 伸張時間間げき水圧増分 ( $Kg/cm^2$ )               |
| $\gamma$        | : 単位体積重量 ( $g/cm^3$ )                     |
| $\gamma_d$      | : 乾燥単位体積重量                                |
| $\varepsilon$   | : ひずみ                                     |
| $\varepsilon_a$ | : ひずみ振幅                                   |
| $\sigma$        | : 垂直応力                                    |
| $\sigma'$       | : 有効垂直応力 ( $Kg/cm^2$ )                    |
| $\sigma_1$      | : 最大主応力 (全応力表示) ( $Kg/cm^2$ )             |
| $\sigma_1'$     | : 最大有効主応力 ( $Kg/cm^2$ )                   |
| $\sigma_3$      | : 最小主応力 (全応力表示) ( $Kg/cm^2$ )             |
| $\sigma_3'$     | : 最小有効主応力 ( $Kg/cm^2$ )                   |
| $\sigma_c$      | : 圧密圧力 ( $Kg/cm^2$ )                      |
| $\sigma_D$      | : 軸荷重振幅 ( $Kg/cm^2$ )                     |
| $\tau_D$        | : くりかえしせん断応力 ( $Kg/cm^2$ )                |
| $\tau_f$        | : せん断強度 (静的試験) ( $Kg/cm^2$ )              |
| $\phi$          | : 内部まさつ角 (度)                              |
| $\phi'$         | : 有効応力表示によるせん断抵抗角 (度)                     |
| $\phi_d$        | : 排水試験によるせん断抵抗角 (度)                       |
| $\phi_D'$       | : 有効応力表示による動的せん断抵抗角 (度)                   |