

シラスの動的特性

大原 資生*・宮内 彰**・藤井 信夫*・安永 文夫***

Dynamic Properties of Shirasu

Sukeo ŌHARA, Akira MIYAUCHI, Nobuo FUJII and Fumio YASUNAGA

Abstract

The southern Kyushu area is covered by thick volcanics ashes called Shirasu.

Because Shirasu is cohesionless and the density is relative small, it has induced many disasters at the time of heavy rains and earthquakes.

Recently, the constructions of earth dams is being planned in this area using Shirasu.

So, we need to clear the dynamic properties of Shirasu for this plan.

The experiments on the liquefaction of saturated Shirasu and the measurements of rigidity of compacted Shirasu are carried out in our laboratory.

In this paper, these results are described.

1. 緒 言

九州南部一帯に存在するシラス台地は特殊土壌地帯として知られ、毎年、豪雨の際には大きな災害を生じている。

また、宮崎県えびの地区のシラスは1968年のえびの地震の際に崖くずれや液状化(噴砂)を起こしたことが記録されている。

シラスの鉱物組成の主なもののは火山ガラスであって粘土分を全く含まない非塑性の土である。このように粘着力のない土であるので大地震の際には斜面の崩壊、また、飽和したシラスでは液状化を起こすことが予想される。

九州南部は地震の常襲域とまではいわれないが、時折、日向灘に震源をもつマグニチュード7.0~6.5程度の地震が起り、宮崎県下に震度4~5の地震動が生じている。九州では最も地震災害の多いところである。

たまた、農林省において、南九州地域広域農業開発基本調査として、シラス地帯にシラスを主体としたアースダムを築造するための調査が開始され、その耐震性が論議されることとなった。その際にシラスの動的な特性を知ることが必要となったため、われわれの実

験室を攪乱状態で採取されたシラスを再成形して、動的三軸試験、動的単純せん断試験および振動合による試験を行なって飽和シラスの液状化と動的剛性率を求めた。

とくに剛性率は間げき比、鉛直圧、せん断力の繰り返し回数、せん断ひずみ量などによって変化することが予想され、その中でも鉛直圧およびせん断ひずみ量が剛性率に与える影響が大きかったので、それらの関係に注目して実験結果を整理してみた。

本論文はその結果について述べる。

2. 試 料

試料としては宮崎県都城市庄内町で採取されたシラスで網目2mmのフルイでふるったものを用いた。その粒度曲線は Fig. 1 に示す。

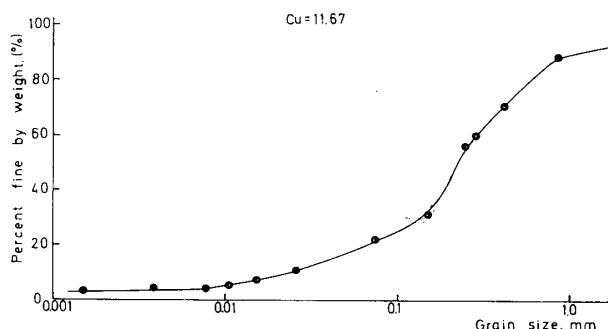


Fig. 1 Grain size distribution curve

* 土木工学科

** 八雲建設コンサルタンツKK

*** 大学院工学研究科土木工学専攻

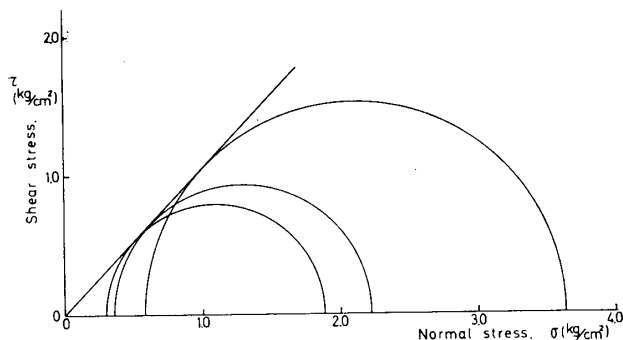


Fig. 2 Mohr-Coulomb envelop determined by triaxial test

また、このシラスの静的三軸試験の結果はFig. 2に示す。粘着力はほとんど認められない。供試体の乾燥見掛密度はそれぞれの実験において、その変化の範囲がいくらか異なるが、ほぼ $1.1 \sim 1.24 \text{g/cm}^3$ の範囲に入るようにして実験を行なった。動的三軸試験や動的単純せん断試験では上記の範囲内で乾燥見掛密度を変化させて実験を行なうことが可能であったが、振動台による実験では乾燥見掛密度 γ_d が、砂箱の深さごとに異なり、平均 1.2g/cm^3 の場合だけしかできなかった。

動的三軸および動的単純せん断試験に用いた飽和供試体を作るには所定の重量の気乾シラスをあらかじめビーカーの中に入れ、脱気水に浸した後、湯煎して間げき中の気泡を除去したのち、約一昼夜放置したものをモールドまたは、せん断箱の中に水と一緒に流しこんだ。

また、振動砂箱の中に飽和シラス層を作るには砂箱の外で、十分にシラスと水とを混合して間げき中の気泡が除去された状態となったシラスを砂箱の中に流しこんで飽和シラス層を作った。

3. 実験装置および実験方法

すべての実験装置の詳細については前論にもあるの
で、ここではそれぞれについて簡単に説明する。

3・1 動的三軸試験機 (Photo. 1 参照)

動的三軸試験機の中で、最も簡単なもので、側圧を一定にし、軸差圧力のみを所定の振幅で増減するもので、その波形は矩形波に近いものである。供試体の大きさは直径が35mm、高さが約80mmである。シラスは最小間げき比と最大間げき比の差があまりない土であるが、この実験では供試体の間げき比を3段階に変えて液状化についての実験を行なった。側圧を、0.5、

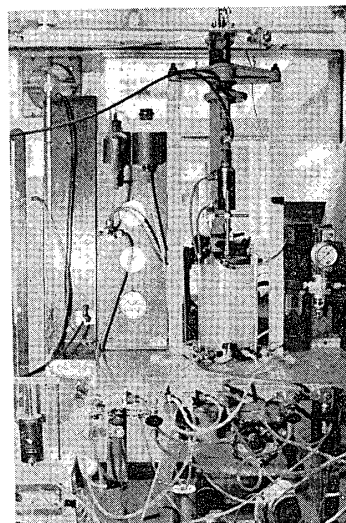


Photo. 1 Dynamic triaxial test apparatus

0.7kg/cm^2 のそれぞれについて所定の振幅の繰り返し回数を求めた。なお、軸差圧力の繰り返し周期は0.5秒である。

記録装置としては、ペン書き方シログラフを用い、軸差圧力、供試体の間げき水圧、軸ひずみの変化をそれぞれ記録した。

3・2 動的単純せん断試験機 (Photo. 2 参照)

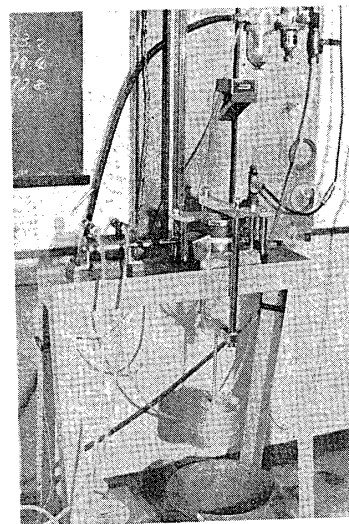


Photo. 2 Dynamic Simple shear apparatus

われわれの実験室で試作したもので、せん断箱は Kjellman 型であり、供試体の直径は75mm、厚さは20mmであり、ゴムスリーブの中に収められている。その外側には厚さ2mm、内径が75.2mm、外径が96mmのアクリルリングが12~14枚積み重ねられた状態ではまっている。

上部加圧板は水平方向に固定され、下部加圧板が試験台に固定されていて、これに押し引きの力が加わる

ために供試体にせん断力が加わる。押し引きの力は複働式のエアシリンダーの左右の圧力室の圧力を交番的に所定の圧力に高めることによって生じる。

この装置では2つのエアシリンダーを用いることによって押し引きの力を正弦波状に変化している。周期はやはり0.5秒である。この実験においても鉛直圧を0.5, 0.7kg/cm²として所定のせん断力を加えて、液化化を生じるまでの繰り返し回数を求めた。

また、動的剛性率についての実験も単純せん断試験機によって行なわれた。すなわち動的単純せん断試験機によって加えた繰り返しせん断力とそれに生じたせん断ひずみとの比によって、せん断弾性率を求めることができるので、これを求める実験も行なった。その実験に用いられた供試体は水締めによって作られた。すなわち飽和したシラスをせん断箱内に流しこみ、タンパーである程度突き固めた。そして乾燥見掛密度1.15, 1.23g/cm³の2種類の供試体を作った。この供試体について鉛直圧を0.3, 0.5, 0.7kg/cm²として実験を行った。その際、繰り返しせん断力の大きさを加減して剛性率に対するせん断ひずみの大きさを加減して剛性率に対するせん断ひずみの大きさ、せん断力の繰り返し回数および鉛直圧の影響についての結果を得るための実験を行なった。

記録装置としては、液化実験ではペン書きオシログラフ、剛性率測定ではX-Yレコーダーを用いた。

3・3 振動砂箱 (Photo. 3 参照)

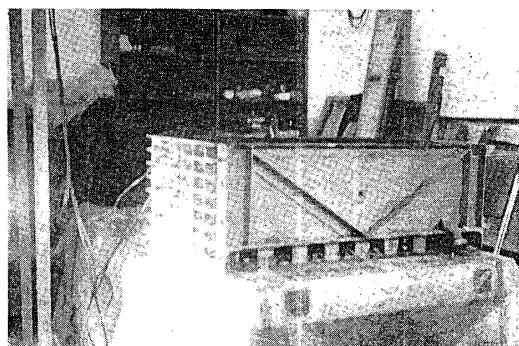


Photo. 3 Shaking sand box

振動台上に深さ30cm, 幅60cm, 長さ100cmの鋼板製の砂箱をおき, この中に飽和したシラスを詰めて水平振動を与えて液化状態を作りだすものである。

その際に, 飽和シラス層の有効圧を変えるために Fig. 3 に示すようにシラス表面に厚さ1mmの生ゴム膜をかぶせ, その上から蓋をしゴム膜と上蓋との間に所定の空気圧をかけてシラス層を圧密する。圧密終了

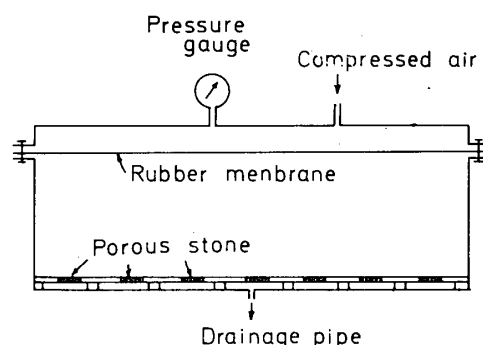


Fig. 3 Outline of shaking box test apparatus

後, 所定の震度の振動を液化が生じるまで与え, 液化に対する有効圧, 震度および振動継続時間の三者の関係を求めた。

シラスは水中で沈殿する場合にかなり締まった状態となり僅か30cmの深さの間でも見掛密度の違いが生じる。

振動数は液化を生じさせるためかなり大きい震度を加えることが必要であったので4 c/s から10 c/s までを適宜に用いた。

圧密の終了は間げき水圧が静水圧にもどった時とし, 初期間げき比は圧密時に排された出水量によって求められた。なお, 間げき水の排出のために, 砂箱の底には直径6cmのポーラストンを計18個はめこんだ厚さ10mmの塩ビ板が透水板として置いてあって底が二重底になっている。(Photo. 4 参照)そして, この透水板を通った間げき水は砂箱の底板の中央にとりつけた排水孔から外部に排出される。

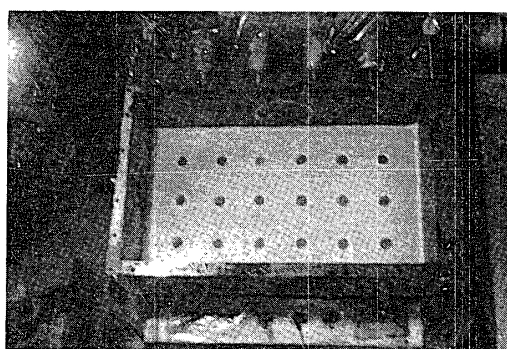


Photo. 4 Porous plate in shaking sand box

有効圧は0.1, 0.2, 0.3 kg/cm²の3段階に変化した。振動波形はほぼ正弦波である。

間げき水圧計は深さ5, 15, 25cmの3ヶ所にとりつけてあり, 振動中の間げき水圧の変化と台の震度は電磁オシログラフに記録された。

4. 液化についての実験結果および考察

液化についての実験は前記の三種類の試験機を用いて行なったので、その結果をそれぞれについて述べる。

4.1 動的三軸試験による結果と考察

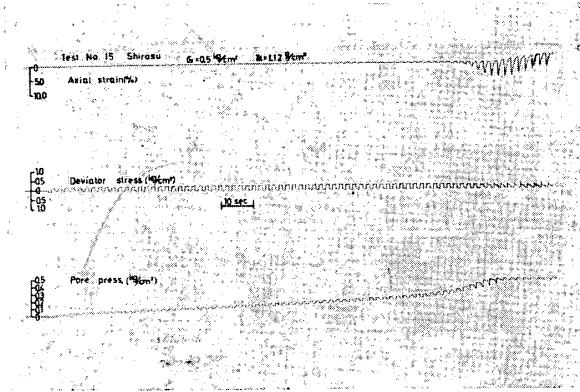


Photo. 5 (a) Record of dynamic triaxial test (Loose packing)

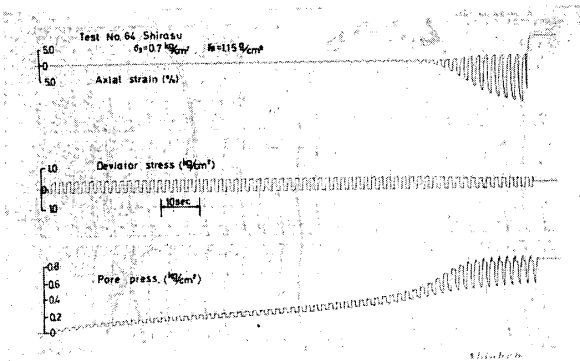


Photo. 5 (b) Record of dynamic triaxial test (Medium packing)

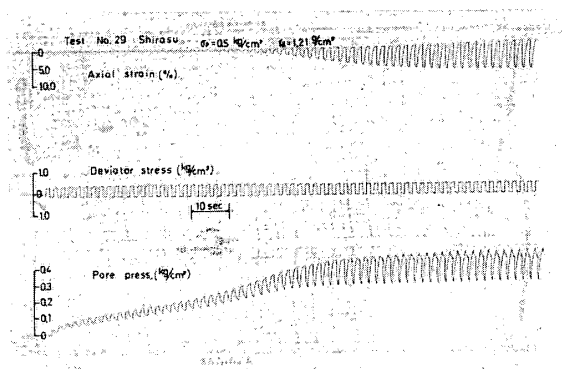


Photo. 5 (c) Record of dynamic triaxial test (Dense packing)

Phot. 5 は、実験記録の例を示したもので、(a), (b), (c)の順に乾燥見掛密度が大きくなっている。これ

らの記録からわかるように、Loose Packing の供試体では液化の起こり方が急激であり、Dense Packing の供試体ではその発生が徐々である。

これらの記録を整理して得た結果がFig. 4である。これから、乾燥見掛密度が同一である場合の結果は側圧 σ_3 が異なっても液化に要する軸差応力繰り返し回数 n_L は一義的に応力比 $\sigma_d/2\sigma_3$ によってきまることがと、乾燥見掛密度 γ_d が小さいほど応力比 $\sigma_d/2\sigma_3$ の値が小さくて液化を生じることがわかる。応力比 $\sigma_d/2\sigma_3$ はせん断応力 $\sigma_d/2$ と初期圧密圧 σ_3 との比である。

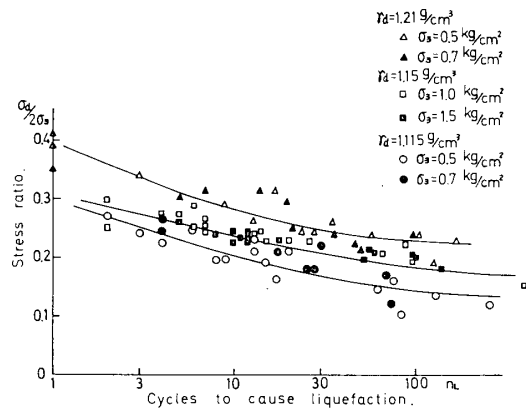


Fig. 4 Stress ratio $\sigma_d/2\sigma_3$ required to cause liquefaction

また、Fig. 4 から液化を生じるに必要な繰り返し回数 n_L は応力比 $\sigma_d/2\sigma_3$ が大きいほど少ないことがわかる。これは地震動の継続時間に関係することであり、継続時間が長いほど液化が生じやすいことを示している。

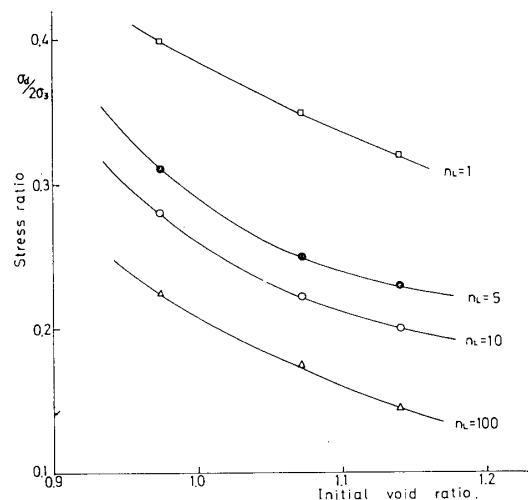


Fig. 5 Relationships between stress ratio $\sigma_d/2\sigma_3$ required to cause liquefaction and initial void ratio

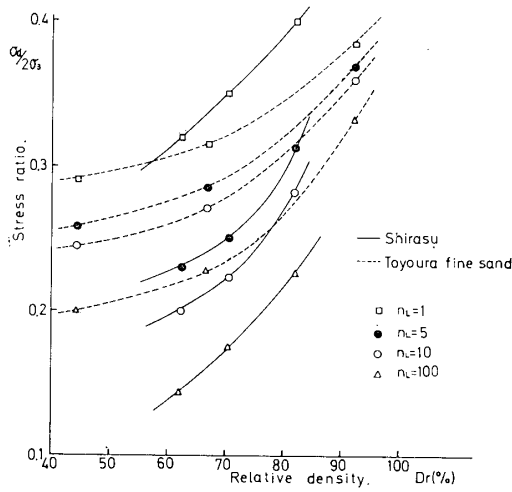


Fig. 6 Relationships between stress ratio $\sigma_d/2\sigma_v$ required to cause liquefaction and relative density

そこで $n_L = 1, 5, 10, 100$ のそれぞれの場合について液化を生じるに必要な $\sigma_d/2\sigma_v$ の値を求めたのが Fig. 5 である。これによれば、初期間ぎ比 e がわかれば液化を生じるに必要なパルス数と応力比との関係を知ることができる。Fig. 6 は同じような結果を横軸に相対密度をとって示したものである。

シラスの液化の発生の難易を他の砂と比較するために Fig. 6 に豊浦標準砂の同様な結果を記入した。両者を比較してみてもシラスは必ずしも豊浦砂より液化しにくいとは認めがたい。すなわち、 $n_L = 1$ では液化をおこすに必要な応力比 $\sigma_d/2\sigma_v$ はシラスの方が大きく、液化しにくい結果が得られているが、 $n_L = 5, 10, 100$ の場合ではむしろシラスの方が液化しやすいとの結果が得られており、この傾向は相対密度が小さい場合に著しい。

このことは、シラスの液化を考える上でかなり注目しなければならない結果であろう。

4・2 動的単純せん断による結果と考察

Photo. 6 は動的単純せん断試験の記録の例を示したもので、一定のせん断応力が加えられている間に間げき水圧が徐々に上昇し、この記録例では 8 パルス付近からせん断ひずみの増加がはじまり、同時にせん断力も小さくなって供試体のせん断抵抗力がなくなりはじめたことがわかる。この点を初期液化と考えて三軸試験と同様な整理を行なったのが Fig. 7 である。

Fig. 7 と Fig. 4 とを比較してわかるように、単純せん断試験の結果の方が動的三軸試験結果よりやや液化しやすい状態となっていることがわかる。しかし、両者の間には砂質土ほどの大きな差はない。この原因

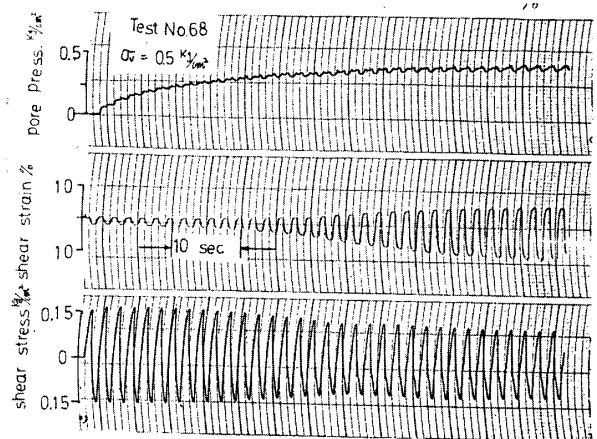


Photo. 6 Record of dynamic simple shear test

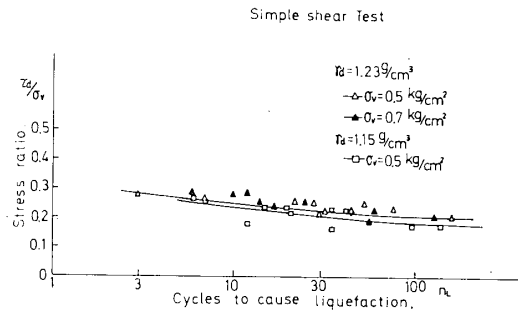


Fig. 7 Stress ratio τ_d/σ_v required to cause liquefaction

は明らかではないが、一つにはシラスが多くの微粒子を含んでいることによるものかもしれない。

4・3 振動砂箱試験による結果と考察

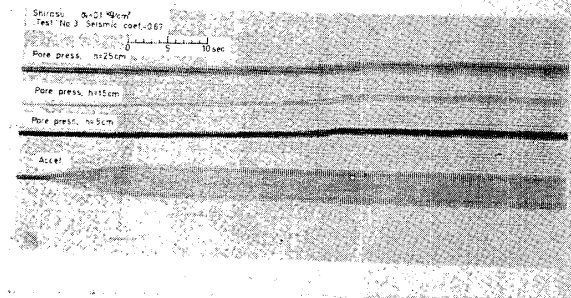


Photo. 7 Record of shaking table test

Photo. 7 はこの試験結果の例である。これで見てもわかるように、一定加速度の振動を継続している間に砂層中の間げき水圧が徐々に上昇し、ある振動継続時間を経たのちに間げき水圧値が急に上昇し、その振幅も急に大きくなる。その時に液化が生じたと判断される。

これらの記録から液化直前の間げき水圧 u_f を求め、液化直前の有効圧 ($\sigma_v - u_f$) と震度との関係を示したのが Fig. 8 である。ただし σ_v は初期有効圧である。

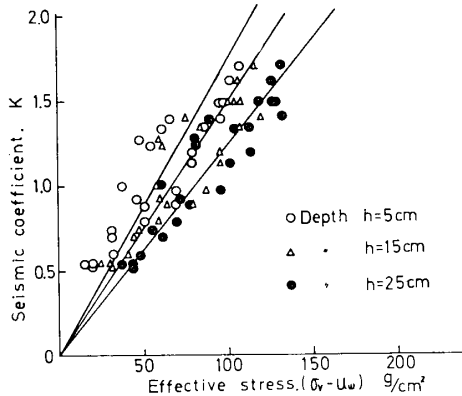


Fig. 8 Relationships between effective stress and seismic coefficient

両者の関係にかなりのバラツキが見られるが、これは砂箱に飽和シラスを詰めるとき、その見掛密度が均一にならないことが原因であると考えられる。しかし、両者の間にはほぼ直線的な比例関係が見られることがわかり、この比例常数、すなわち直線の勾配は深さごとに異なるという傾向がみられる。Fig. 8の結果からは深さの浅いほど、その直線の勾配は急になっている。

このように、液化直前における有効圧と震度とが一次比例の関係にあるということからシラスの液化条件を次のように考えることができる。

$$\tau_d = (\sigma_v - u_f) \tan \phi \quad (1)$$

ここに τ_d は振動によって砂箱内シラス層中に発生するせん断応力であり、一応、震度に比例すると考えられる。 σ_v は初期有効圧、 u_f は液化直前の間げき水圧、 ϕ は内部まさつ角である。

すなわち、(1)式の右辺は液化直前のシラスのせん断強度で、これと τ_d とが一致したときに液化が生じはじめるのである。動的三軸試験によって得られた液化直前のシラスの内部まさつ角は約 30° と求められているので、(1)式において $\phi = 30^\circ$ とおき、Photo. 7 に示したような記録からよみとった変化直前の有効圧の値を入れれば、そのときにシラス層に発生していたと思われる τ_d を求めることができる。

そこで、応力比 τ_d/σ_v と液化を生じるまでの振動継続時間 T_L との関係求めたのが Fig. 9 である。これで見えてわかるように、 T_L は応力比 τ_d/σ_v によって一義的にきまるのであるが Fig. 9 では両者の関係は深さによって、それぞれ別々の曲線となる。すなわち、深さ

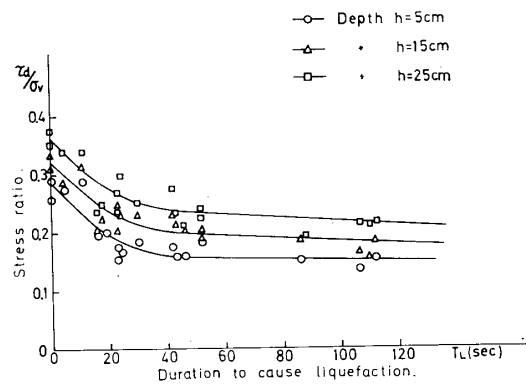


Fig. 9 Relationships between seismic coefficient and duration to cause liquefaction

の深い場合の曲線ほど応力比の大きいところに位置している。

この結果は Fig. 8 で示された震度と液化直前の有効圧の関係直線の勾配が深さごとに違っていることと、その原因を同一にするものと考えられる。その理由は次のとおりである。すなわち Fig. 8 で示される直線の勾配と、(1)式とからこの砂箱内のシラス層に生じた τ_d と震度 k との関係式を求めると、

$$\left. \begin{aligned} \tau_d [\text{kg/cm}^2] &= 0.034k \quad (\text{深さ } h = 5 \text{ cm}) \\ \tau_d [\text{ }] &= 0.039k \quad (\text{ } h = 15 \text{ cm}) \\ \tau_d [\text{ }] &= 0.047k \quad (\text{ } h = 25 \text{ cm}) \end{aligned} \right\} (2)$$

となり、同一の震度での振動中に生じるシラス層のせん断応力は深さ 25cm のところを 1 とすると深さ 15cm のところは 0.83、深さ 5 cm のところは 0.72 といった比率となる。そしてこの比率が Fig. 9 の各深さの τ_d/σ_v の値の間の比率にほぼ一致するというのである。

そこで、その原因についてしらべた結果、砂箱内に飽和シラスを詰めた場合には見掛密度が表面では 1.18 g/cm^3 程度となるのに対し、深さ 25cm では 1.23 g/cm^3 程度となることが原因であるとの結論を得た。結局、Fig. 9 の $h = 25 \text{ cm}$, 15 cm , 5 cm の実験曲線は見掛密度がほぼ 1.18 g/cm^3 , 1.20 g/cm^3 , 1.23 g/cm^3 の場合の実験曲線であると考えてよい。

なお、実験では振動周波数は 4 c/s から 10 c/s の間を適宜に用いて実験を行なっているので、実験結果の整理においては振動継続時間を 5 c/s の場合に換算して整理を行なった。これはパルス数によって整理したことと共通する。

5. 動的剛性率についての実験結果および考察

水縮のシラスについて繰り返し応力によって、ひずみとせん断応力の関係を求めた。記録例を Photo. 8 に示した。

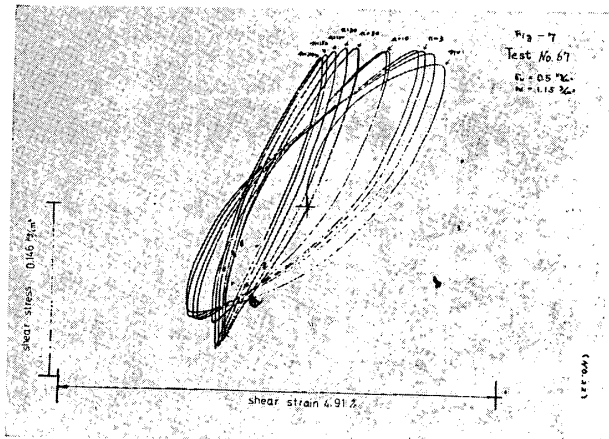


Photo. 8 Hysteresis curve.

土は完全弾性体でないで、Photo. 8 に示すように履歴曲線は一つの楕円状のループとなる。このループの面積が大きいほど振動時には減衰が大きくなるのであるが、われわれはこのループを楕円形とみなし、その長軸の勾配を求め、これを見掛上の動的剛性率とした。Photo. 8 でもわかるように、この動的剛性率は繰り返し数が増すにしたって次第に大きくなっていく。

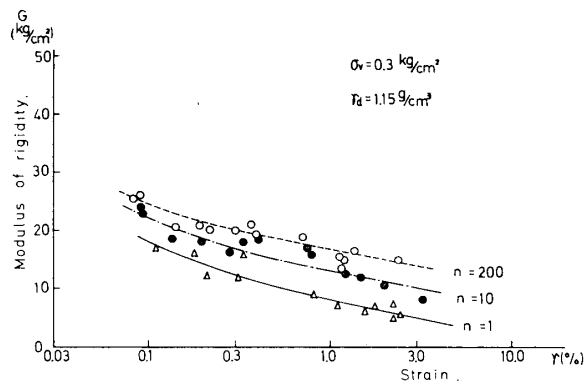


Fig. 10 (a) Relationship between rigidity and strain.

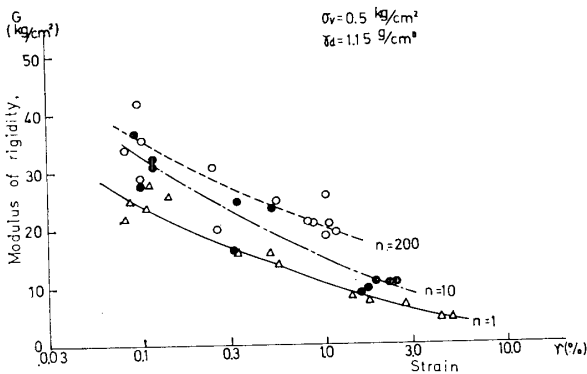


Fig. 10 (b) Relationships between rigidity and strain.

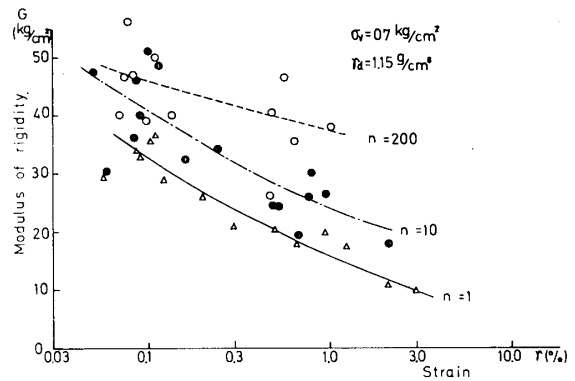


Fig. 10 (c) Relationships between rigidity and strain.

これらの結果から剛性率とせん断ひずみ $r(\%)$ および繰り返し回数 n の関係を示したのが Fig. 10 および Fig. 11 である。Fig. 10 が $\tau_d = 1.23 \text{ g/cm}^3$ の場合である。これらは鉛直圧が $0.3, 0.5, 0.7 \text{ kg/cm}^2$ の場合についての実験値をそれぞれ示している。

Fig. 10 の結果の方が n の違いによる剛性率の変化が大きくなっており、Loose Packing の場合は、繰り返しせん断力の作用によって供試体が次第に締まっていく度合いが大きいことがあらわれていると考えられる。

Fig. 11 は Dense Packing の状態であるので、その影響は非常に少なくなっている、そのかわりに、Fig. 11 では、せん断ひずみ量の違いによる剛性率の変化が著しくなっている。

Fig. 12 は剛性率に対する鉛直圧の影響をみるために Fig. 10, Fig. 11 の結果を $n = 1, 10, 200$ のそれぞれの値だけを取りまとめて示したものである。

さらにこの影響を明らかにするために Fig. 12 の結

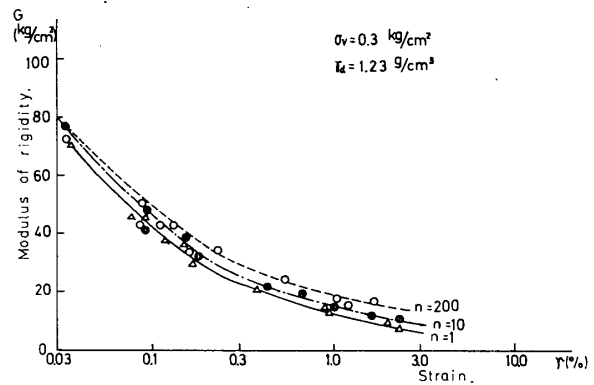


Fig. 11 (a) Relationships between rigidity and strain.

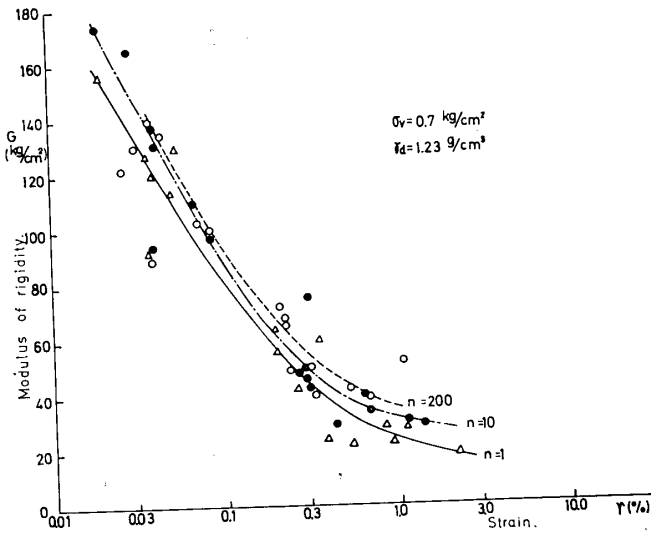


Fig. 11 (b) Relationships between rigidity and strain

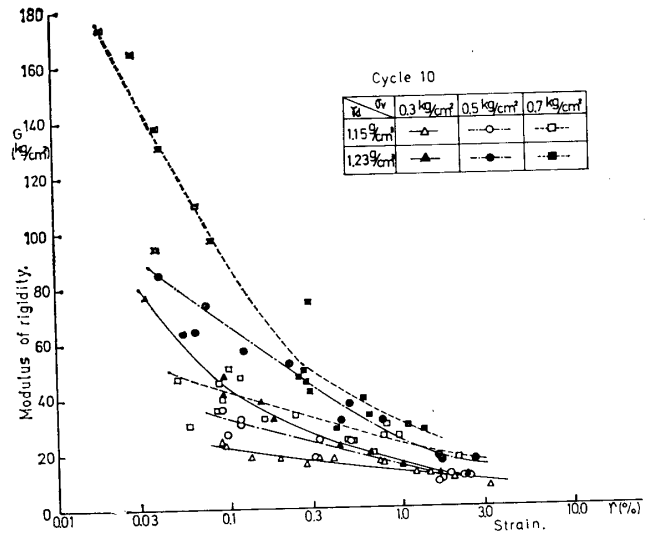


Fig. 12 (b) Relationships between rigidity and strain

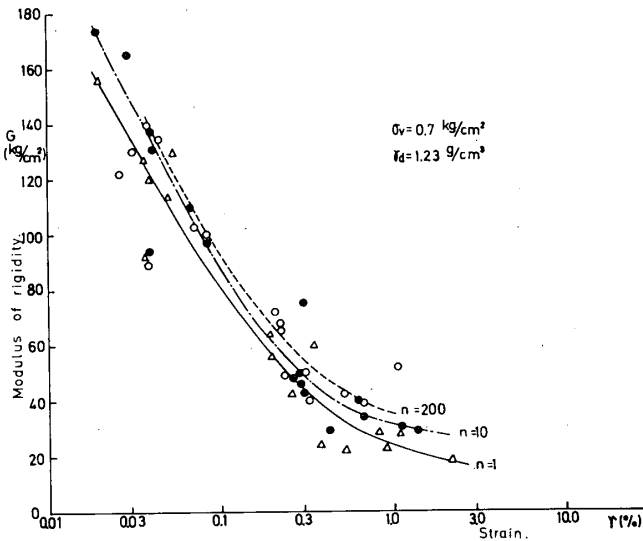


Fig. 11 (c) Relationships between rigidity and strain

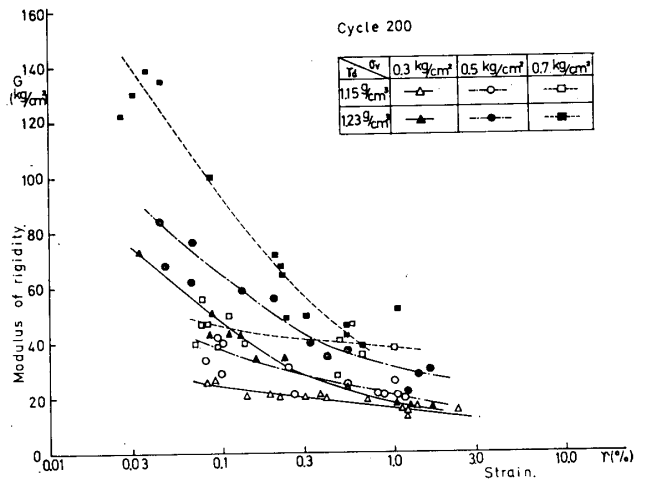


Fig. 12 (c) Relationship between rigidity and strain

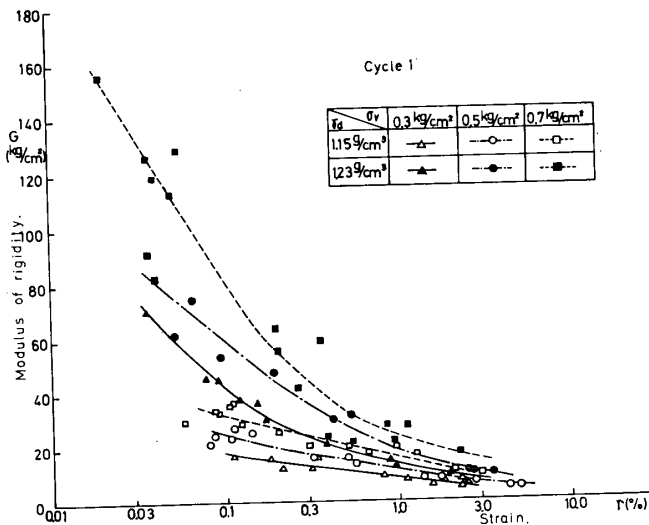


Fig. 12 (a) Relationships between rigidity and strain

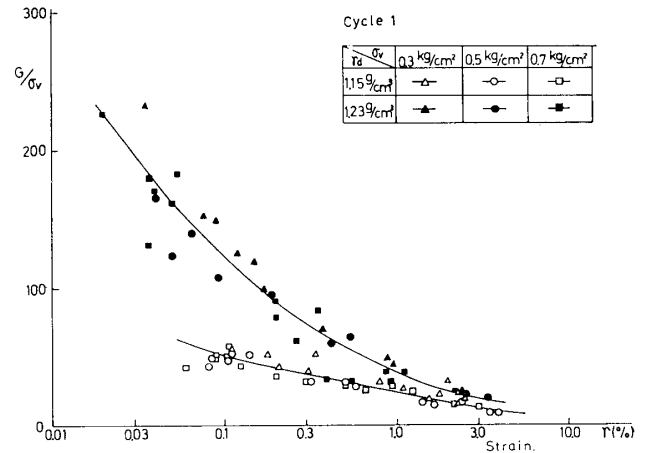


Fig. 13 (a) Relationships between ratio G/σ_v and strain

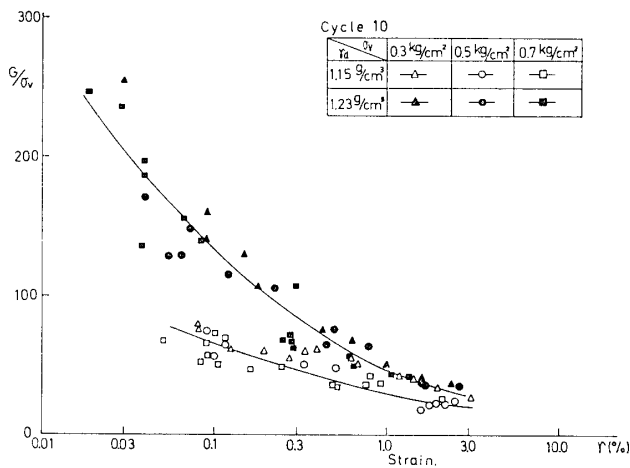


Fig. 13 (b) Relationships between ratio G/σ_v and strain

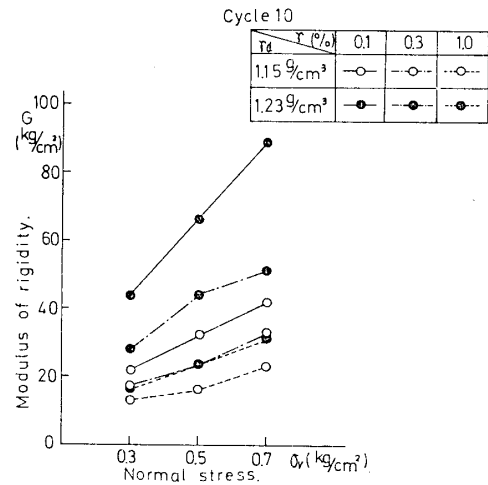


Fig. 14 (a) Relationships between rigidity and normal stress

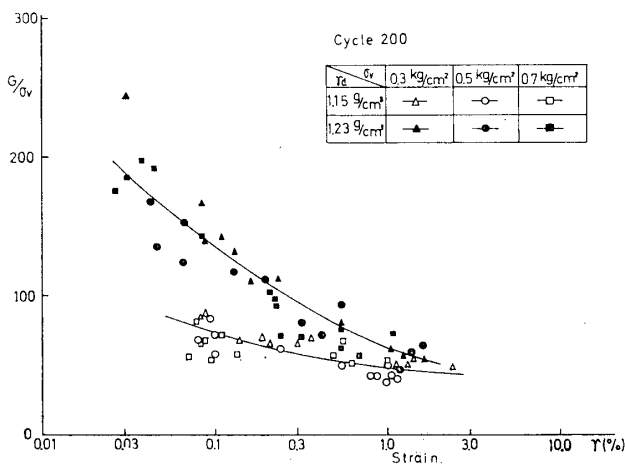


Fig. 13 (c) Relationships between ratio G/σ_v and strain

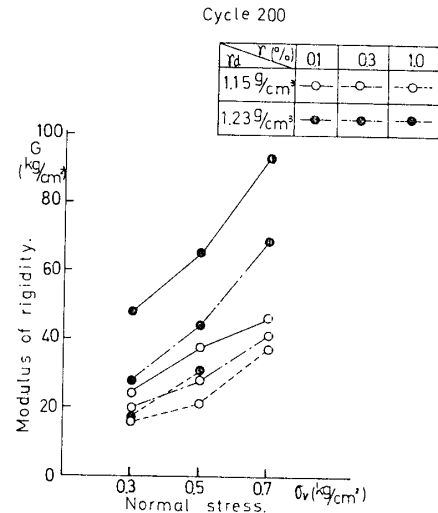


Fig. 14 (b) Relationships between rigidity and normal stress

果を G/σ_v によって整理したのが Fig. 13 である。
 σ_v がそれぞれ異なる実験値がほぼ一つの曲線におさまっている。これより、シラスの剛性率は σ_v に一次的に比例して大きくなるということがわかる。その増大率は、せん断ひずみが小さい場合の方が大きいということが Fig. 14 からわかる。

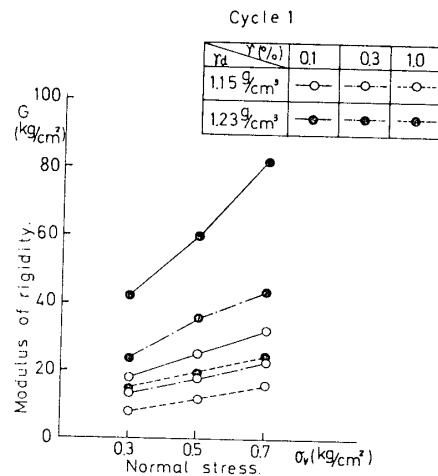


Fig. 14 (c) Relationships between rigidity and normal stress

6. 結 語

以上、シラスの動的性質のうち、液化と動的剛性率について行なった実験および結果を述べたが、それらを要約すれば、およそ次のとおりである。液化については、

- 1) 締め固めた飽和シラスの液化は発生し、その発生は、応力比 τ_a/σ_v とパルス数 n_L (振動継続時間 T_L) によって規定される。
- 2) シラスの液化の発生の難易は一概にはいえないが、少なくとも豊浦砂と同等かもしくはそれよりも発生し易いといえる。その状況は Fig. 6 に示されている。

動的剛性率については

- 1) 水締めシラスの剛性は鉛直圧や乾燥密度が大き

いほど大きく、また、繰り返し回数の増加にもなって大きくなる。これに反し、せん断ひずみ量が大きくなると急激に低下する。

- 2) 乾燥密度、せん断ひずみ量、繰り返し回数が同一であれば、剛性率は鉛直圧に一次比例的に増大する。

本実験を行なうに当って試料を提供してくれた九州農政局南九州調査事務所の方々に謝意を表す。

参 考 文 献

- 1) 大原, 鈴岡: 討, 土質工学会論文報告集, 12, 4, 85 (1972)

(昭和48年4月13日受理)