

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
成田 実 |
| (その2) シラスのせん断特性 | 小林正樹・勝野 克
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
高橋邦夫・橋本光寿
篠原邦彦 |
| (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 |
| (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 |
| (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)

序 文

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。 (k : 透水係数 cm/sec , γ_d : 乾燥密度 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 ϕ_d は砂より大きいが、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6) 振動台試験による動的性質

土 田 隆 *
倉 田 栄 **

要 旨

九州南部に分布するシラスは、その土質工学的特性から特殊土として取扱われている。これの港湾工事材料としての適用性を検討する試験の一環として、飽和シラス層の振動試験を実施した。この試験は、人工的に堆積された飽和シラス層の流動化に対する安定性を調べるために実施した。試験は内寸法 262 cm (長さ) × 50 cm (巾) × 100 cm (深さ) の振動箱内に作られた厚さ 70 cm の試験層に約 3.2 Hz の正弦振動を与える方法により実施した。試験においては、加速度を約 50 gals から約 500 gals まで数段階に変化させた。試験の結果、ゆるぎめの飽和したシラス層は流動化し、液体と同じ挙動を示した。ほぼ同一方法により実施された新潟地震で流動化した砂についての試験結果と比較して、シラスは流動化し易い材料に属すると判断された。

* 構造部 耐震構造研究室長
** 構造部 耐震構造研究室員

Engineering Properties of Shirasu for Construction Materials
(Part-6) Shaking Table Tests on Liquefaction Potential

Hajime TSUCHIDA*

Eiichi KURATA**

Synopsis

As a part of a test series on engineering properties of Shirasu for construction materials, shaking table tests were carried out to investigate liquefaction potential of saturated Shirasu. Saturated Shirasu layers were prepared in a steel box fixed on a shaking table and subjected to harmonic motions of about 3.2Hz. Acceleration amplitudes were increased stepwies from 50 to 500 gals. During the tests the saturated Shirasu layers liquefied and behaved like liquid. The tests results were compared with the results from similar tests of the sand which liquefied during the Niigata earthquake in 1964 and it was concluded that Shirasu has possibility to liquefy in earthquakes.

* Chief of the Earthquake Resistant Structures Laboratory, Structures Division

** Member of the Earthquake Resistant Structures Laboratory, Structures Division

目 次

要 旨	103
1. はじめに	107
2. シラス地盤の地震による流動化の事例	107
3. 試験装置および試験方法	107
3.1 試 料	107
3.2 振 動 台	108
3.3 試 験 方 法	108
4. 試 験 結 果	110
4.1 試 験 の 概 要	110
4.2 観 察 結 果	112
4.3 間げき比, 相対密度と流動化	115
4.4 間 げ き 水 圧	116
4.5 加 速 度 分 布	116
5. 考 察	117
6. 結 論	118
7. お わ り に	119
参 考 文 献	119

1. はじめに

シラスは主に九州南部に広く分布する灰白色の溶結凝灰岩またはこれの風化した土である。土質工学的には通常の土と著しく異なった性質を有するので、日本における特殊土のひとつとされている。¹⁾

シラスは現在でも岸壁の裏埋土や埋立材料として利用されているが、港湾工事中の不足ともない、将来その使用量が增大することが予想される。また、裏埋土として用いた場合、単位体積重量が小さいので岸壁に作用する土圧が軽減されるわけで、そのような特徴をふまえて積極的な利用も考えられる。しかしながら、特殊土と云われ、通常の土に比較すれば土質工学的研究も遅れているシラスを積極的に活用していくためには、港湾工事中の材料としての工学的特性につき調査しておく必要がある。そのような観点からの調査の一環として、シラス地盤の地震による流動化の可能性について調べた。この調査の目的から明らかのように、ここで着目しているシラス地盤は自然に堆積した地層ではなく、それをくずして岸壁背後あるいは埋立地に運搬投入した乱したシラス地盤である。

シラスの流動化に対する安定性を検討する方法は色々考えられるが、ここでは振動台上に作られた飽和したシラス層に振動を与え、流動化が発生するかどうかを調べる方法によった。この方法は、港湾技術研究所で実施してきた飽和砂層の流動化についての試験と同一方法である。^{2,3)}したがって、この方法による試験を実施することにより、他の砂の流動化に対する安定性と相対的な比較が容易である。このことは、振動台を用いる試験を採用した理由のひとつである。

シラスの港湾工事中の適用性に関する調査の一環として、この試験と並行して、港湾技術研究所において振動三軸圧縮試験装置を用いた検討が実施されている。また、物理的性質、圧縮性、CBR特性、シラスによる土圧等についての試験も実施されている。ここで特に記しておきたいことは、これら一連の試験のために、鹿児島県大崎町の土取場より採取されたシラスが2度にわたり港湾技術研究所に搬入されていることである。いずれも同一地点で採取されたシラスではあるが、採取時間に若干のずれがあるため、その粒径分布等に多少の相違のあることは考えられる。振動試験に用いられたシラスは第1回目に搬入されたものである。またこの振動試験は、先に述べた各種の試験とほぼ並行して実施されたものではあるが、これまでに港湾技術研究所で実施してきた飽和砂層の振動試験と共通性をもたせることに重点を置いたため、この報告における透

水試験方法、最大最小間げき比の測定方法は、先述のシラスについての各種試験で採用したものと異なっているので注意が必要である。

2. シラス地盤の地震による流動化の事例

シラスの振動実験についての説明に先立ち、シラス地盤が地震により流動化した事例を示す。今回の調査の目的は、先に記したように乱したシラス層の流動化に対する安定性の検討である。しかし、著者が文献により調査した範囲では、埋立地および岸壁裏埋土等の乱したシラス地盤の流動化の事例は見当らなかつた。このことは、シラスが埋立や岸壁の裏埋に用いられた例は限られていて、かつその歴史も浅いため、それら乱したシラス地盤が大きな地震に遭遇していないためであろう。したがって、乱したシラス地盤の流動化の事例が報告されていないことをもって、同地盤が流動化に対し安定であると判断することはできない。

埋立地や岸壁背後地盤以外にも対象を広げて流動化の事例を求めるとすれば、1968年2月のえびの地震にその例をみることができる。^{4,5)}同地震は2月21日10時45分の地震を最高とし、その前後に連続的に発生した一群の地震を指す。2月21日10時45分の地震は震源が宮崎県南西部(北緯32.0°N, 東経130.8°E)にある非常に浅い地震で、えびの町における震度はⅦであった。この地震により鹿児島港工務所に設置してあったSMAC-B2強震計が作動した⁶⁾NS成分の最大加速度は19ガル、DW成分の最大加速度は17ガルであった。強震計設置地点の震央距離は約52kmであった。

この地震により鹿児島県吉松町及び宮崎県えびの町一帯で川内川沿いの4ヶ所において噴砂が認められたことが報告されている。噴砂現象があったということは、その地点の地下水面以下において流動化現象が発生したと考えてよい。これらの噴砂は川内川の川原及び柳水流一弊田の水田で発見されている。水田で発見されたものは、地下水水位1.05mのところまで深さ2.95m以下に堆積しているシラスが噴出し、別のところでは地下水水位1.75mのところまで深さ3.00m以下に堆積しているシラスが噴出したと報告されている。これら地点のシラスのN値は最大で7程度と推定されている。

3. 試験装置および試験の概要

3.1 試料

試験に使用したシラスは鹿児島県大崎町の土取場より採取したものである。この試験以前に港研で実施していた飽和砂層の振動試験では、試験を行う前に試料を砂乾燥機により強制乾燥して使用していた。しかし、シラスの場合微粒分が多く、乾燥機を通過させることによりシラスの土性

に変化を生ずる虞があると判断された。それ故、この試験では採取された試料を10mm目のフルイでふるい、これを通過したものを気乾状態として使用した。

試料の物理的性質を表-1に示す。また、粒径加積曲線を図-1に示す。最大間げき比は乾燥した試料を容器に静かに注入し、容器の内容積と注入した試料の重量から求めた。最小間げき比は振動実験により得られた最小の間げき比を用いた。透水係数は定水位透水試験により求めたものである。図-1に示す粒径加積曲線は5回の試験結果に対する曲線群を観察により平均化して得られたものである。

粒子比重	2.435
D_{60}	0.417
D_{10}	0.018
均等係数	23.2
最大間げき比	1.766
最小間げき比	0.643
透水係数	
相対密度 25%	9.3×10^{-3} cm/sec
" 50%	1.8×10^{-3} "
" 75%	5.0×10^{-4} "

表-1 物理的性質

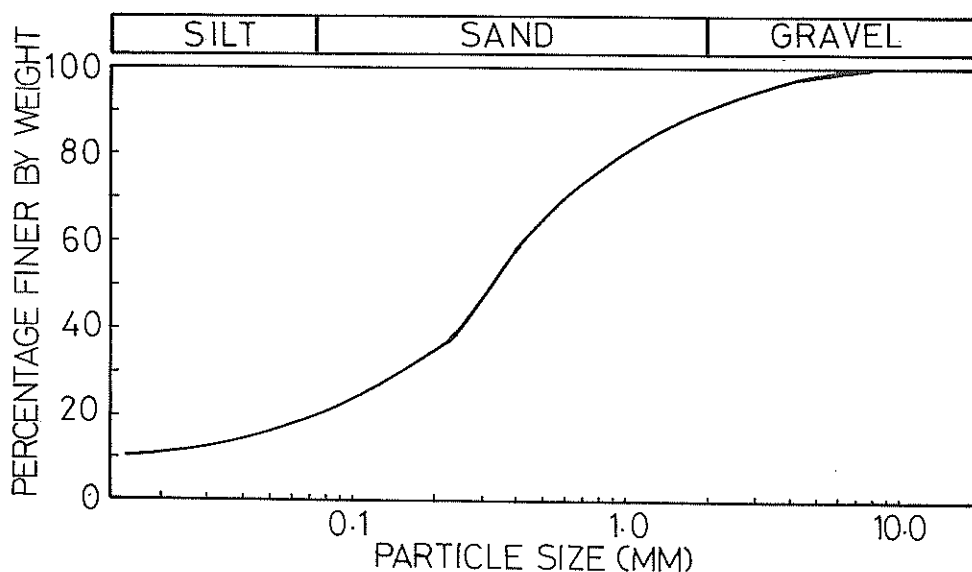


図-1 粒径加積曲線

3.2 振動台

試験に使用した振動台は港研の小型振動台である。この振動台は機械的に駆動されるもので、台上には鋼製の箱が固定されている。以後この箱を振動箱と書く。振動箱の長手方向に台が運動するようになっており、運動方向と平行な一面には強化ガラスが取付けられていて、内部が観察できる。振動箱の主要寸法を図-2に示す。

3.3 試験方法

(1) シラス層の製作

振動試験のための飽和したシラス層の製作は、振動箱内にあらかじめ適当量の水を入れておき、適当な高さからスコップにより試料を除々に落下させる方法によった。振動箱内に入れておいた水の水深および試料の投下高は実験結果の部分で説明する。予定した層厚に達したときに、層表

面よりも水面が高い場合は上部よりサイフォンで静かに排水し、層表面と水面を一致させた。

層厚は原則として70cmとした。ただし、層厚25cmの試験を1度実施している。

ここで採用したシラス層の製作方法は従来港研で行ってきた製作方法と異なっている。従来は、試料を入れたバケツをホイストで振動箱上に吊し、バケツ下端の小孔よりゴムホースを通じて試料を除々に落下させた。振動箱にあらかじめ水を入れておくことは同じである。この試験で従来と同一方法を採用しなかった理由は、予備試験の結果、従来の方法では支障が生じたためである。

(2) 振動試験

シラス層が完成すると、振動箱天端を基準として層表面の位置を測定する。次に振動台の振巾を除々に増加させ、

振動台試験による動的性質

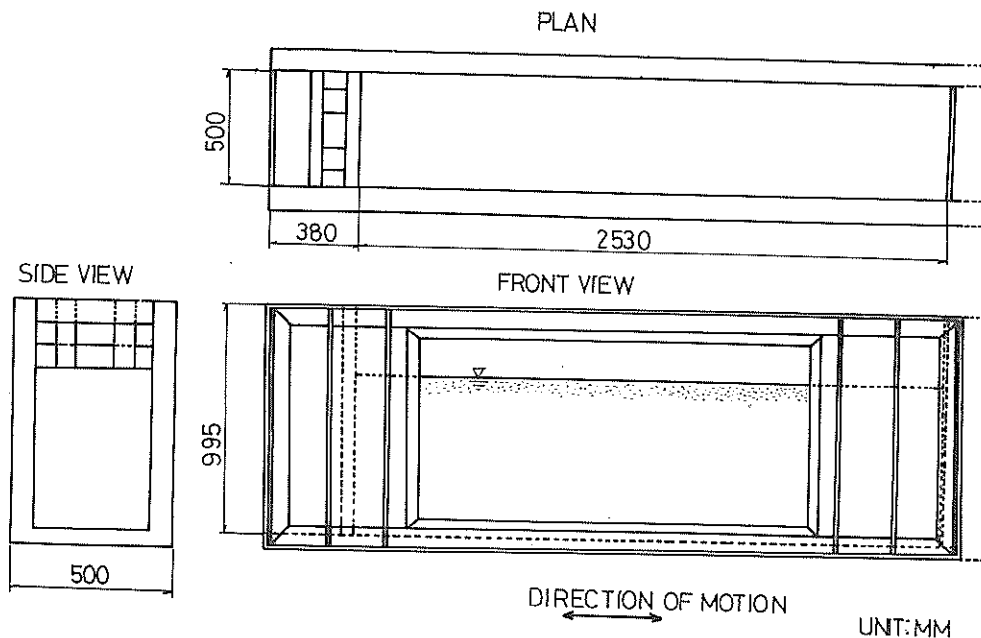


図-2 振 動 箱

所定の振巾に達したならば同一振巾のまま振動を継続し、流動化の発生の有無を観察する。流動化が発生しない場合には振動台の振巾が一定となってから約1分後に振巾を徐々に減少させ、振動台を停止させた。流動化が発生した場合には20分間以上振動を継続してもシラス層が安定な状態にもどらなかったため、適当時間振動を継続した後振動台を停止させた。その後、層表面の位置を測定した。

前述のごとき手順をもって一段階の試験とし、前回と同一手段で次の段階の試験を実施した。この場合、振動台の振巾は前の段階よりも大きく設定した。

このような手順を数回くり返し1回の試験とした。以後この報告では各段階をExp.No.として番号を付し、1回の試験をTest No.として番号を付して説明する。これまでの説明でも明らかなように、飽和シラス層は1度のTestに対し1回製作しており、各TestにおけるExp.No.2以降は前の段階の終了時の飽和シラス層の状態が、その段階の開始時の状態となっている。ただし、前の段階の試験で流動化が発生し、間げき水圧が上昇した状態で振動を停止した場合は、停止している間に間げき水圧の減少が生じた。

(3) 測 定

試験においては、以下の項目につき測定を行った。

振動台変位

振動台加速度

振動台端壁における間げき水圧

振動台端壁における全圧力

(土圧および間げき水圧を一体とした圧力)

層中の加速度

間げき比

各測定項目に対する変換器の設置位置を図-3に示す。間げき比は全Exp.を終了した後、振動箱底面に設けられているフィルター付バルブを開放し排水した後、高さ20および50cmの位置で2ヶ所、合計4ヶ所で砂置換法(JIS A-1214準拠)で乾燥単位体積重量を求めた。この値より間げき比を計算した。途中段階のシラス層の間げき比は、層表面の位置測定結果と最終Exp.後の間げき比とを用いて計算した。この報告における間げき比は層全体に対する平均的な値である。

使用した変換器および記録器の型式および性能を表-2に示す。

振動台の加速度波形は正弦波と比較すると若干のひずみがあった。この報告では、台加速度を変位振巾と周期から正弦波として計算したものをを用いている。これは、従来から実施してきた試験の整理方法に合わせたためである。

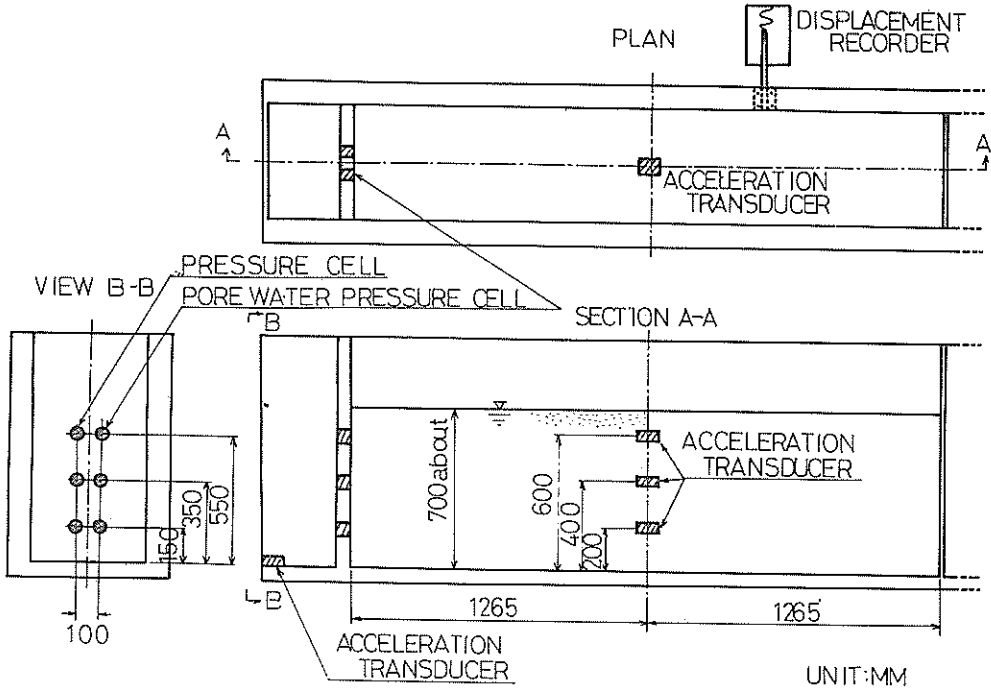


図-3 変換器配置図

計器名	型式・仕様	備考
加速度計 変換器	型式：非接着抵抗線歪計式 固有振動数：125 Hz 容量：±2 G	動歪計と併用
変位計	型式：直描式（スタイラスペンの変位を直接スタイラス紙に記録する）	
圧力計	型式：非接着抵抗線歪計式 受圧面直径：17 mm	動歪計と併用
動歪計	方式：搬送波増巾方式 搬送波周波数：5 KHz	
記録器	型式：直視式電磁オンシログラフ ガルバノメーター固有振動数：170 Hz ガルバノメーター制動方式：電磁制動	

表-2 使用計測器の型式、仕様

4. 試験結果

4.1 試験の概要

試験は全体で4回実施した。それぞれの試験のシルス層の厚さと状態、層を製作する際の条件は表-3に示す通り

であった。

Test No.	試験層の状態	試験層の厚さ (cm)	試料投入前の振動箱内水深 (cm)	試料の投下高 (水面より) (cm)
1	飽和	70	70	10
2	飽和	70	25	30
3	気乾	70	—	50*
4	飽和	25	25	30

* シルス層表面よりの高さ

表-3 試験層の製作条件

Test No.1の試験はほぼ従来から実施してきた飽和砂層の振動試験に対応させる目的のものであった。ただし、すでに説明したように、シルスの場合粒径が小さいのでバケットが用いられないこと、および試料の投入に先立って振動箱に入れておく水の量が多いことが従来の試験に比し異なっている。Test No.2の試験はTest No.1の場合と異なった間げき比の層を作ることを目図し、試料投入に先立って入れておく水の量と試料の投下高を変更した。Test No.3の試験は比較の目的で気乾状態の試料をそのまま用いたものである。後に説明するが、この試験では、一匹流動化した砂層が完全に安定化するためには非常に長い時間を必

振動台試験による動的性質

要とした。そのため、途中でその段階の振動をうち切ったものがある。その場合、非常によく締まった部分とゆるぶめ状態の部分が混在しているわけで、全体としての平均的な間げき比では層の状態を適切に表現していない。それ故、層厚を小さくし、排水距離を小さくすることにより、

比較的短時間で流動化した層全体が安定化することを期待し、Test No.4の試験では層厚を小さくした。

前記の通りの目的と条件で製作したシラス層について行った振動試験の台加速度、シラス層の締固まりの状態、流動化の有無等をまとめたものを表4～7に示す。

Test No.1

Exp. No.	1	2	3	4	5	終了後
振動台振巾 (cm)	0.20	0.47	0.80	1.00	2.01	
振動数 (Hz)	3.23	3.24	3.23	3.25	3.23	
加速度* (gal)	41	97	165	208	415	
加速度** (gal)	49	103	171	214	420	
水面高 (cm)	70.5	65.2	62.6	61.7	59.8	59.8
層厚 (cm)	69.6	64.3	59.5	59.1	57.6	57.6
飽和单位体積重量 (g/cm ³)	1.621	1.672	1.725	1.731	1.751	1.755
乾燥単位体積重量 (g/cm ³)	1.054	1.141	1.231	1.240	1.274	1.281
間げき比	1.31	1.13	0.98	0.96	0.91	0.90
相対密度 (%)	41	56	70	72	76	77
振動継続時間 (分,秒)	18'30"	40'00"	1'00"	26'00"	1'05"	
流動化の有無	有	有	無	有	無	
その他	振動停止後に表面より排水	排水		排水		

*台振巾と周期から求めた加速度, **加速度計による測定値

表-4 振動試験結果 (Test No.1)

Test No.2

Exp. No.	1	2	3	4	終了後
振動台振巾 (cm)	0.24	0.52	0.96	1.96	
振動数 (Hz)	3.24	3.23	3.25	3.24	
加速度* (gal)	50	107	200	406	
加速度** (gal)	54	108	204	408	
水面高 (cm)	69.9	69.7	68.4	68.4	68.2
層厚 (cm)	69.1	68.1	67.6	67.3	67.1
飽和单位体積重量 (g/cm ³)	1.782	1.794	1.800	1.803	1.806
乾燥単位体積重量 (g/cm ³)	1.327	1.347	1.357	1.363	1.368
間げき比	0.84	0.81	0.79	0.79	0.78
相対密度 (%)	88	85	87	87	88
振動継続時間 (分,秒)	3'00"	3'00"	15'00"	3'00"	
流動化の有無	有	有	有	有	
その他					

*台振巾と周期から求めた加速度, **加速度計による測定値

表-5 振動試験結果 (Test No.2)

Test No 3

Exp. No.	1	2	3	4	5	6	7	終了後
振動台 振巾 (cm)	0.23	0.52	0.74	0.95	1.50	2.02	2.54	
振動数 (Hz)	3.24	3.24	3.25	3.24	3.23	3.24	3.23	
加速度* (gal)	4.8	10.8	15.5	20.8	30.9	41.8	52.2	
加速度** (gal)	4.9	11.6	15.8	21.3	32.1	41.7	53.4	
水面高 (cm)								
層厚 (cm)	69.8	69.8	69.7	69.7	69.7	69.4	68.8	66.6
飽和単位体積重量 (gr/cm ³)	1.024	1.026	1.027	1.027	1.027	1.032	1.040	1.075
乾燥単位体積重量 (gr/cm ³)	0.909	0.909	0.910	0.910	0.910	0.914	0.921	0.952
間げき比	1.68	1.68	1.68	1.68	1.68	1.66	1.64	1.59
相対密度 (%)	8	8	8	8	8	9	11	19
振動継続時間 (分秒)	3'00"	3'00"	3'00"	3'00"	3'00"	3'00"	3'00"	3'00"
流動化の有無								
その他								

*台振巾と周期から求めた加速度, **加速度計による測定値

表-6 振動試験結果 (Test No. 3)

Test No. 4

Exp. No.	1	2	3	4	5	終了後
振動台 振巾 (cm)	0.25	0.49	0.75	0.97	1.50	
振動数 (Hz)	3.27	3.27	3.27	3.27	3.27	
加速度* (gal)	5.3	10.3	15.9	20.5	31.6	
加速度** (gal)	5.3	10.1	15.2	20.2	32.8	
水面高 (cm)	2.68	2.68	2.66	2.66	2.66	2.59
層厚 (cm)	2.5.9	2.6.0	2.4.2	2.3.7	2.3.5	2.4.1
飽和単位体積重量 (gr/cm ³)	1.793	1.791	1.850	1.868	1.873	1.853
乾燥単位体積重量 (gr/cm ³)	1.348	1.343	1.443	1.473	1.482	1.448
間げき比	0.81	0.81	0.69	0.65	0.64	0.68
相対密度 (%)	86	85	96	99	100	97
振動継続時間 (分秒)	1'00"	40'00"	1'00"	1'00"	15'00"	
流動化の有無	無	有	無	無	有	
その他						

*台振巾と周期から求めた加速度, **加速度計による測定値

表-7 振動試験結果 (Test No. 4)

4.2 観察結果

(1) 流動化の判定

流動化現象の発生の有無を対象として試験を行う場合、どのようにして流動化現象の発生を調べるかが問題となる。そこで観察結果を述べる前に流動化現象の発生の判定方法

について説明しておく。

この試験では、流動化現象の発生は振動時には振動箱側面のガラス板を通した観察により判定し、振動停止後に間げき水圧の測定記録から流動化現象に対応する間げき水圧の上昇があったか否かを調べ、観察結果の適正であることを

を確認することとした。

文章をもって、ガラス板を通して観察したときに流動化している部分と安定な部分とがどのように区別できるかを記述することは容易ではない。しかし、実際には両状態の差は明確で、観察により的確に流動化している部分と安定な部分を見分けることが可能である。安定な部分では粒子間の相対的な移動がほとんどないのに対し、流動化している部分では粒子間の相対移動が著しく、両者の視覚的差違は明瞭である。従来試験でも同じであったが、今回の試験において、観察による流動化の判定を間げき水圧計の記録の結果によって訂正したことは無かった。

(2) 全体的観察結果

飽和状態のシラスについての試験 (Test No. 1, 2 および 4) の結果から、ゆるぎめ状態の飽和シラス層は流動化することが認められた。流動化の発生は、今回の試験における拘束条件のもとでは表面から発生し、流動化した部分が下方に拡がった。また、流動化した状態のシラスに対し振動を継続すると、振動箱最下方から上方に向かって徐々に安定化した部分が拡がっていくことが観察された。この点、飽和砂の振動試験と定性的には一致した現象である。

しかしながら、流動化した層が安定な状態にもどるには相当の時間を必要とした。たとえば、Test No. 1 の Exp. No. 4 では 26 分間振動を継続しても表層部は流動化した状態のままであった。流動化した状態では、振動箱が正弦波状に運動をしても箱の端壁振動方向に垂直な面附近のシラスのみが動き、中央部はほとんど静止状態にあった。この場合、振動箱の運動方向に平行な壁面とシラス層との間には、台中央部付近ではすべりが生じている。中央部の流動化したシラス層が静止状態にあることは、後に示すように加速度計の記録にも現われている。このように振動箱の運動が端壁の近くのシラス層にのみ伝えられ、中央部は静止状態であったことと、透水係数が小さいことが、一度流動化したシラス層が再び安定な状態にもどるのに長い時間を必要とした原因と考えられる。ちなみに、小名浜砂など従来実施された飽和砂層の実験では、いずれの場合も約 3 分間以内に安定な状態にもどっている。

流動化した状態が表層部に残っている状態で振動箱を停止した場合、停止後時間と共に上下方向にクラックが発生し、そのクラックを通じて間げき水が上方へ排出される現象が観察された。

気乾状態のシラスについての試験 (Test-No. 3) では、振動にともなって間げき比が減少し、表面が沈下するのが観察されたが、特に従来行われた乾燥砂の振動試験結果と変わった現象は見られなかった。Exp. No. 5 (台加速度 309

gals) において層表面にクラックが発生した。これが変わっていると認められた唯一の現象である。クラックが入ったということは、シラスが見かけ上は完全な非粘着性の材料ではないことを示していると云えよう。

(3) Test 別観察結果

気乾状態のシラスについては先に説明した事項以上に補足すべき説明はないが、飽和シラスについては、各振動段階毎 (Exp. No 別ということ) に観察結果を記しておくこととする。

Test No. 1 (層厚 70 cm)

Exp. No. 1 (台加速度: 41 gals)

振動箱の振巾が一定になってから (以後この章で断りなく時間を用いるときは同一の内容を指すものとする) 15 秒で表面から約 20 cm まで、25 秒で約 40 cm まで流動化し、最終的にはほぼ全層流動化した。下方より徐々に安定性を回復した部分が拡がり、18 分 30 秒でほぼ全層が安定な状態となったので振動を停止した。

図-4 に時間の経過と共に安定な状態が下方から上方へ拡がって行った様子を示す。図中の線がそれぞれの線に対して示してある時間における安定な領域と流動化している領域の境界である。これは、振動中に振動箱のガラス板にチョークで記入しておき、振動停止後にスケッチしたものである。試験層の最下部 10 cm は図に記入されていないが、振動箱のこの部分は鋼材で出来ており、内部が観察できなかったため、図より省いてある。

Exp. No. 2 (台加速度: 97 gals)

3 秒で表層 10 cm が流動化し、以後流動化している部分が急速に下方へ拡がり、10 秒で全層が流動化した。流動化した部分と安定化した部分との境界の時間的経過は図-4 に示すとおりである。

Exp. No. 3 (台加速度: 165 gals)

流動化は発生せず、記述すべき現象は観察されなかった。

Exp. No. 4 (台加速度: 208 gals)

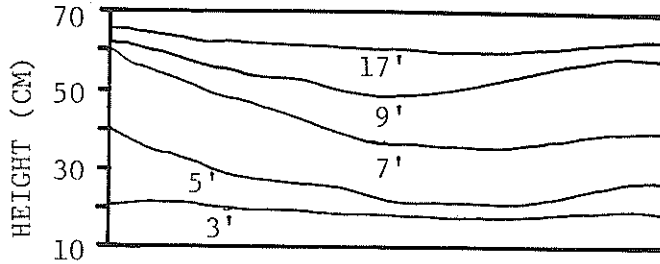
50 秒ころ急激に流動化が発生し、全層一時に流動化したという印象であった。20 分間以上の振動に対しても下方 20 cm をのぞき安定な状態とはならず、26 分で振動を停止した。振動停止後上方に巾 1 ~ 3 mm のクラックが発生した。流動化した部分と安定な部分の境界の位置およびクラックの発生状況のスケッチを図-4 に示す。

Exp. No. 5 (台加速度: 415 gals)

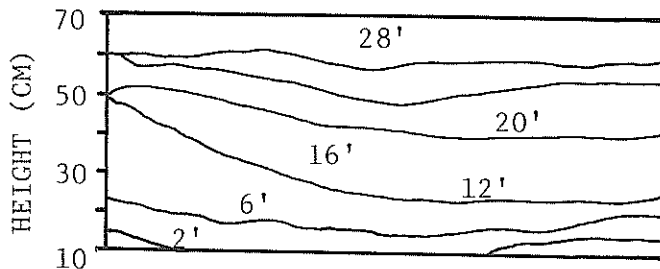
変化なし。

TEST NO.1

EXP. NO.1



EXP. NO.2



EXP. NO.4

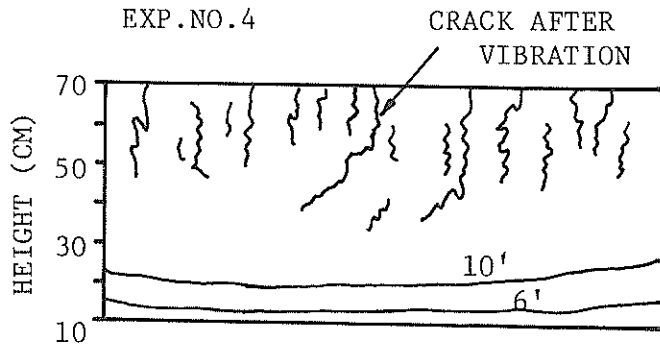


図-4 シラス層観察図 (Test No.1)

Test No.2 (層厚 70 cm)

Exp.No.1 (台加速度: 50gals)

2秒で表面から10 cmまで、5秒で20 cmまで、25秒で30 cmまで流動化した。3分で約50 cmまで流動化した。それより下方はその後においても流動化しなかった。流動化した部分と安定な部分の境界は図-5の通りである。

Exp.No.2 (台加速度: 107gals)

1秒で表面から10 cmまで、2秒で20 cmまで、5秒で30 cmまで、7秒で35 cmまで、30秒で45 cmまで、1分25秒で50 cmまで流動化した。3分間の振動継続中には流動化した部分が再び安定化する様子は認められなかった。振動停止後クラックが発生し、割れ目を通して間けき水が上方へ排出されるのが認められた。間けき水が移動していることは微細な粒子の移動により観察された。発生したクラック

振動台試験による動的性質

のスケッチを図-5に示す。

Exp. No. 3 (台加速度: 200 gals)

2秒で最下部まで流動化した。3分間で振動を停止したが、停止後前回と同じく全体にクラックが発生した。

Exp. No. 4 (台加速度: 406 gals)

振動箱の振巾が所定の値に達するのとほぼ同時に、最下部まで一度に流動化した。3分間で振動を停止したが、振動停止後、全体にクラックが発生した。

Test No. 4 (層厚 25 cm)

Exp. No. 1 (台加速度: 53 gals)

流動化は発生せず、振動は1分間で停止した。

Exp. No. 2 (台加速度: 101 gals)

3秒で表層から流動化が始まり、約1分半経過した頃より粒子の相対的な移動が激しくなった。14分で下方から約15cmまで安定化し、37分で下方より約20cmまで安定化した。

Exp. No. 3 (台加速度: 159 gals)

変化なし。

Exp. No. 4 (台加速度: 205 gals)

変化なし。

Exp. No. 5 (台加速度: 316 gals)

流動化が発生した。

TEST NO. 2

EXP. NO. 1

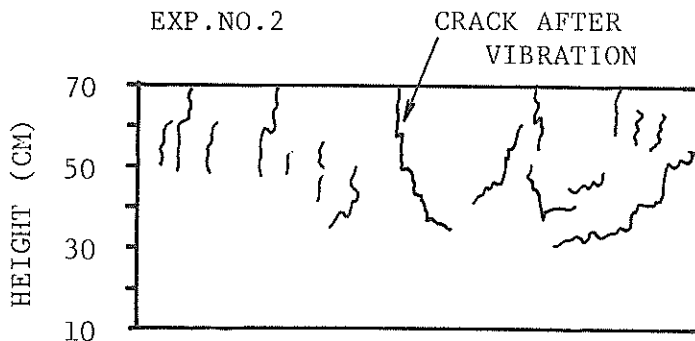
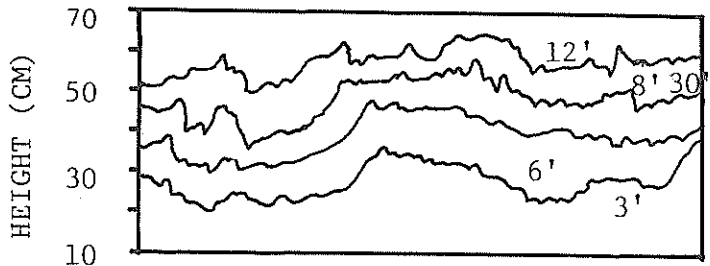


図-5 シラス層観察図 (Test No. 2)

4.3 間げき比, 相対密度と流動化

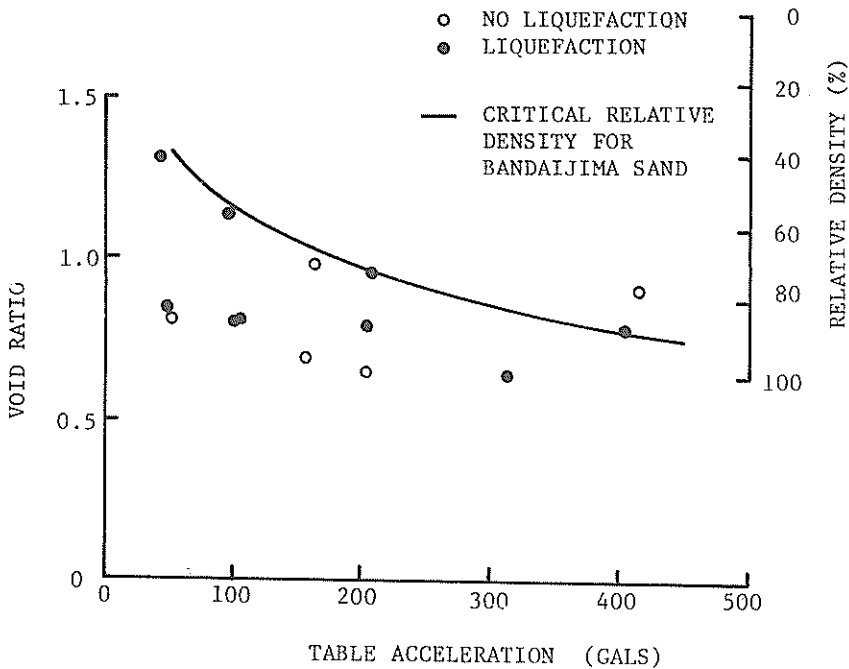
これまでの飽和砂の流動化に着目した振動試験では、それぞれの砂について流動化現象の発生の有無を、間げき比あるいは相対密度および台加速度との関係で調べてきた。台加速度は原理的には砂層に生じたせん断ひずみで置き換えられるべきであるが、それが直接測定し得る量ではないので、振動実験では台加速度を用いてきた。

今回の試験では、流動化が発生する場合には常に全層が流動化するとは限らず、表層部分のみが流動化する事例があった。また、全層が流動化した場合でも、下方のみが安定な状態となり、上方はまた流動化した状態、すなわち、下方が良く締った状態で振動を停止した事例もある。したがって、層の上方と下方では間げき比が相当に異なった状態となっていたと思われる。他方、今回の試験ではすでに

説明したように、全層についての平均的な間げき比が求まっており、層の部分ごとの間げき比は求められていない。このような平均的な間げき比を用いることは、間げき比、台加速度と流動化についての関係を正しく表現することにはならないが、一応の目安を得るため、それらの量の関係を調べてみる。

図一六は各 Exp. の開始時の試験層の平均的な間げき比をそれぞれの Exp. の台加速度に対してプロットしたものである。流動化が発生した Exp. は黒丸印で、流動化が発生しなかった Exp. は白丸印でプロットしてある。また、図中の右端には相対密度の目盛が記入されている。図中の実曲線は新潟地震で流動化した万代島砂について同様の試験を行って得た流動化に対する限界相対密度である。流動化

に対する限界相対密度は、ある加速度の振動を与えたときに、対象とする砂層がその加速度に対する限界相対密度よりも大きな相対密度を有するとき、その砂層が流動化する可能性が小さいことを示すものである。この限界間げき比には、緻密には、今回の試験と同じ拘束条件（振動箱の内寸法、層厚）および同じ振動条件（振動数）であることが前提となっている。ここで注意すべき点は、間げき比と相対密度の数値間の対応は、今回の試験に用いたシラスと万代島砂では異なっている。したがって、万代島の流動化に対する限界相対密度の曲線は図一六の相対密度の目盛に対してプロットされたものであり、この曲線から図中の間げき比の目盛を用いて間げき比を読み取っても、それは万代島砂の流動化に対する限界間げき比とはならない。



図一六 間げき比、台加速度と流動化の発生

4.4 間げき水圧

間げき水圧の挙動は定性的には、これまでに実施された飽和砂の振動試験において見られたものと同じであった。すなわち、流動化現象が発生していない場合には、間げき水圧は静水圧を中心にして周期的変動をくり返す。流動化が発生している場合には、シラスと同じ飽和単位体積重量の液体の場合と同じ静水圧を中心にして周期的変動をくり返す。

シラス層が流動化していない場合および流動化している場合について、各深さにおける振動1周期中の間げき水圧

の変動範囲を示したものが図一七である。

4.5 加速度分布

シラス層が流動化していない場合には、層中の加速度は台加速度と大差ない。流動化している場合には、層中の加速度はほとんどゼロとなる。これを実測値にもとづいて示したものが図一八の加速度鉛直分布である。図中の高さゼロに対する加速度は台加速度である。

流動化したシラス層内では、埋込んだ加速度計が傾斜または回転して、その受感方向が振動箱の振動方向とずれる

振動台試験による動的性質

生じ、計測値に誤差を生ずることが考えられる。したがって、今回の試験結果から微細な加速度の相違を検討することはできない。しかし、一度流動化した後安定化した状態

での加速度の指示値が台加速度と大差ないことから、加速度計の受感方向の振動箱の振動方向に対するずれは小さかったと思われる。

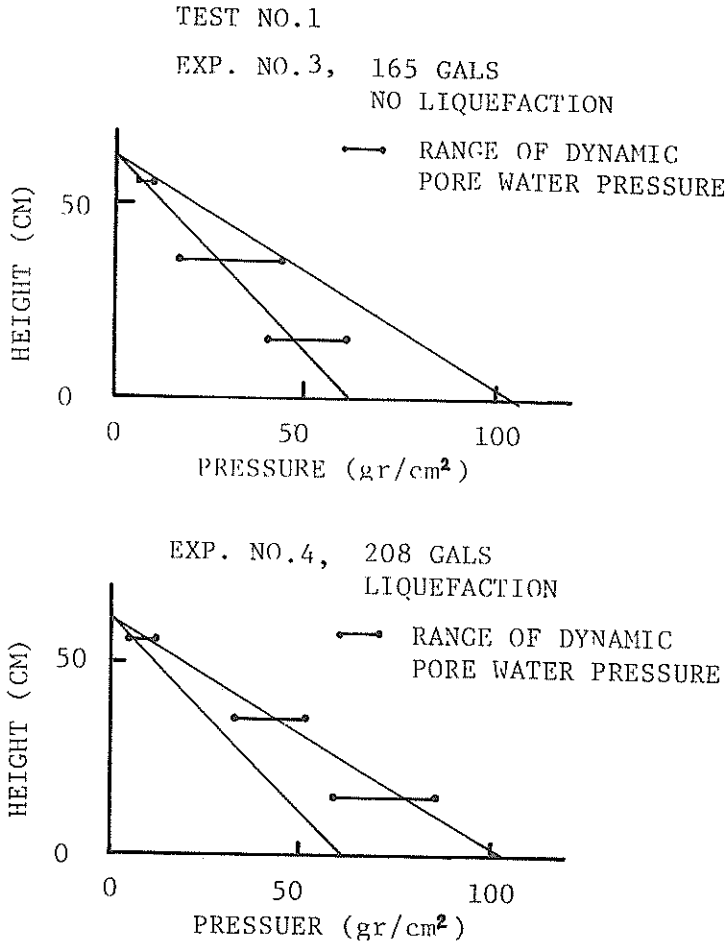


図-7 間げき水圧の変動範囲(振動時1サイクル)

5. 考 察

えびの地震の経験あるいはシラスについての室内試験などから当然予想されていたことではあるが、今回の試験によっても、人工的に堆積させた飽和シラス層が振動を受けた場合、条件によっては流動化することが認められた。

どのような条件のもとで流動化の危険性が大きいかわくについては、従来飽和砂について論じてきたように、流動化に対する限界間げき比、あるいはそれをN値に換算したものを加速度の関数として示すことが考えられた。しかし、本文中で説明したように、シラス層では一度流動化した後の

間げき比を正確に測定することができず、限界間げき比を求めることはできなかった。

本文中図-6として示した台加速度、相対密度と流動化の関係では、図上で流動化の生ずる領域(黒丸の分布領域)と流動化の生じない領域(白丸の分布範囲)とを明瞭に分離できない。このことは、間げき比の測定精度の問題も関係していると思われる。しかしながら、台加速度165gals、間げき比0.98で流動化が発生していない例は、間げき比測定上の問題以外にも流動化の生ずる領域と生じない領域を分離できない原因のあることを示していると思われる。

TEST NO.1

EXP. NO.2

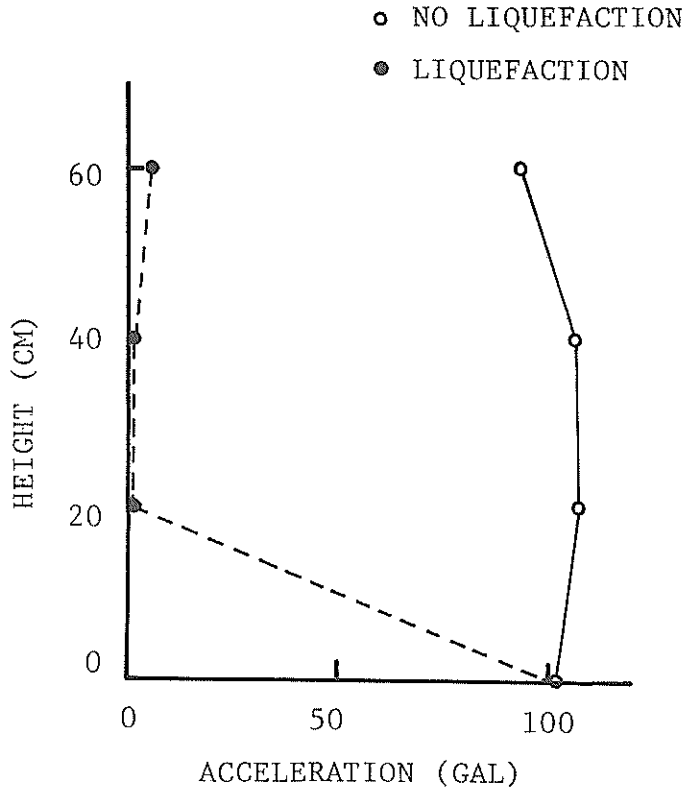


図-8 シラス層中の加速度分布

このような不確定な要素や間げき比が層全体に対する平均であることを念頭に図-6を眺めても、万代島砂の流動化に対する限界間げき比と比較して、対象としたシラスは相当に流動化し易い材料と判定される。

流動化したシラス層はほぼ液体と同じ挙動を示すことが、流動化時に層中央部で加速度がゼロとなることや、間げき水圧の挙動から確認された。このことは従来飽和砂について知られていたことと一致する。

これまでの検討から明らかなように、シラスの流動化の可能性を定量的に調べるには振動試験は適切ではない。このことは、シラスに限らず、これと同程度の透水性あるいは粒径の土についても云えるであろう。なお、このような判断を受けて、今回の一連の試験においても振動三軸圧縮試験装置を用いた試験が実施されたことを付記しておく。

6. 結 論

今回の試験により明らかにされた点を整理すると以下の通りである。

- i) 人工的に堆積させたシラスの飽和層は、その締固めの程度および振動（あるいはせん断ひずみ）等の条件により流動化することがある。
- ii) 新潟地震で流動化した万代島砂の振動試験結果と比較して、対象としたシラスは流動化し易い材料と判断される。
- iii) 流動化したシラスは、シラスと同じ飽和単位体積重量の液体とほぼ同じ挙動を示す。
- iv) 流動化の可能性をより詳しく定量的に検討するためには、振動試験よりは振動三軸圧縮試験装置等を用いる試験が適当である。

7. おわりに

今回実施した試験は、本文中でも説明したように、シラスの流動化の可能性を定性的に検討するには十分なものではなかった。それ故、この経験をふまえ、振動三軸圧縮試験装置を用いた試験が実施された。その意味においては、結果的にこの試験は予備試験的性格を帯びることとなった。しかしながら、流動化現象については、まだまだ多くの試験例と実際の地震により生じたものの事例を横上げていく必要がある、そのような観点から、この試験についてのやや詳しい報告を行うこととした。

この試験の実施に当り、問題を提起し試験実施に種々援助下さった運輸省第四港湾建設局、鹿児島県土木部港湾課および企画部建設計画課の関係者の方々に謝意を表します。この試験は、港湾技術研究所の発注により、同所の振動台を用いて東亜港湾工業株式会社京浜支店調査研究室が実施しました。同研究室関係者の熱意ある仕事に対し謝意を表します。

(1974年12月12日受付)

参 考 文 献

- 1) 土質工学会編：シラス，日本の特殊土，土質基礎工学ライブラリー10，土質工学会，1964年8月，pp.203～261.
- 2) 石井靖丸・土田肇・古部哲兵：振動時の飽和砂の土圧と間隙動水圧に関する研究，港湾技術研究所報告，Vol. 2，№2，1963年9月，pp. 25～71.
- 3) 土田肇：砂質地盤の流動化の予測と対策，昭和45年度港湾技術研究所講演会講演概要，1970年12月，pp. (3) 1～33.
- 4) 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，№9，1968年9月，pp. 47～59.
- 5) Toyotoshi Yamanouchi, Sadakatsu Taneda and Taizo Kimura : Damage Features in 1968 Ebino Earthquakes from the Viewpoint of Soil Engineering, Soils and Foundations, Vol.10, №2, June 1970, pp. 129～144.
- 6) 土田肇・倉田栄一・須藤克子：港湾地域強震観測年報(1968)，港湾技研資料，№98，1970年3月，p.20.
- 7) 大原賢生・宮内彰・藤井信夫・安永文夫：シラスの動的性質，山口大学工学部研究報告，Vol.24，№1，1973年7月，pp. 77～86.

港湾技研資料 No. 211

1975・3

編集兼発行人 運輸省港湾技術研究所

発行所 運輸省港湾技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号

印刷所 (有) 葵印刷工業

Published by the Port and Harbour Research Institute
Nagase, Yokosuka, Japan.