

港 湾 技 研 資 料

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

No. 299 Sept. 1978

軽量材の振動時挙動に関する実験

荒 井 秀 夫
北 島 昭 一

運輸省港湾技術研究所



目 次

要 旨	3
1. はじめに	3
2. 第 1 次実験	3
2.1 加速度応答	4
2.2 壁に作用する荷重	4
3. 第 2 次実験	6
3.1 実 験	7
3.2 加速度応答	8
3.3 共振振動数の加速度レベルに対する変化	9
4. 第 3 次実験	9
4.1 実験内容	9
4.2 実験結果	10
5. む す び	13
6. お わ り に	13
参 考 文 献	13

Vibration Tests for the Behavior of Light-Weight Materials as Backfilling

Hideo ARAI*
Shoichi KITAJIMA**

Synopsis

It has been recognized by the model tests that a method to decrease active earth-pressure by applying the light-weight materials as backfilling is effective in static state, but the data on the vibration properties of light-weight materials subjected to earthquake motion have not been obtained at all. The vibration behavior of light-weight materials and the pressure acting on the wall due to the materials during vibration were investigated by the tests using a shaking table. Results of the tests are summerized as follows.

1. The stiffness of light-weight materials in water decrease more than that of sand and become more movable.
2. In dry state, the pressure acting on the wall during vibration due to light-weight materials is smaller than that due to sand.
3. In submerged state, there are any cases which the amplitude of pressure due to light-weight materials is larger than that due to sand, but in general the total pressure during vibration due to light-weight materials is smaller than that due to sand.

* Ex Chief of the Vibration Laboratory, Structures Division
** Director of the Structures Division

軽量材の振動時挙動に関する実験

荒井秀夫*
北島昭一**

要 旨

軽量材を裏込め材に使用することによって土圧を低減させる工法は、静的な実験によって常時においては有効であることが確認されているが、地震時においても有効であるかどうかについてのデータは全く得られていない。地震時の問題を解決するため第1段階として、振動台による実験によって、軽量材の振動時挙動と壁体に作用する振動土圧を調べた。実験から求められた結果は次のとおりである。

- (1) 軽量材は振動を受けると、水中では、砂に比べて著しく剛性を減じ、動きやすくなる。
- (2) 壁に作用する振動土圧は、砂によるものに比べて空気中では小さく、土圧低減効果が顕著であり、水中では土圧振幅が大きくなる場合もあるが、全土圧は小さくなり、空気中の場合ほど顕著でないが、土圧低減効果が認められた。

1. はじめに

軟弱地盤に岸壁、護岸などを建設する場合、裏込め材にブロック状または粒状の軽量材を用い、土圧の低減をはかる工法は、静的な実験によって常時においては、土圧低減に有効な工法であることが確認されている^{1), 2)} しながら、地震の影響を受ける地域で用いる場合、軽い材料が地震時にどのような挙動をなし、土圧を低減しうることについて確認されていない。

この地震時における問題を解決する第1段階として、振動台上の実験槽内に軽量材の層をつくり、その振動時挙動を実験的に調べた。

実験は3段階に分かれる。第1の実験では、静的実験に用いた土圧測定用実験槽を振動台に載せ、測定用の壁に作用する荷重と層内の加速度を測定した。第2の実験では、振動台固定の実験槽内に直接試料層を設け、その加速度分布を測定した。さらに、第3の実験では、第1次実験の2倍以上の壁高の大型壁を設置し、壁面に作用する土圧と壁体の応答加速度を測定した。

2. 第1次実験

動電駆動方式の振動台³⁾の実験槽(長さ5m, 幅1.5m, 高さ1.5m)内に、静的実験の際に使用した図-1に示す実験槽を設置し、水を入れ、試料を図-1および図-2に示すように入れ、振動を与えた。図-1に示すような位置で、加速度および測定壁に作用する荷重を測定した。加速度計として非接合ひずみゲージ型変換器(固

有振動数250Hz), 荷重計としてひずみゲージ式変換器を使用し、動ひずみ測定用増幅器を通して、直視式電磁オシログラフ(ガルバノメーターの固有振動数1,000Hz)で振動を記録した。与えた振動は振動数が5Hzより50Hzまで、1Hzの間隔で変わる各振動数10波の正弦振動であって、加速度レベルを5段階に変えられたものである。

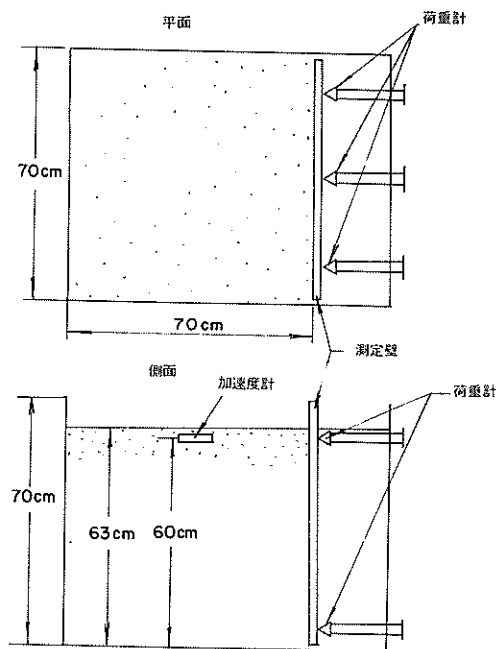


図-1 実験槽

* 前構造部 振動研究室長

** 構造部長

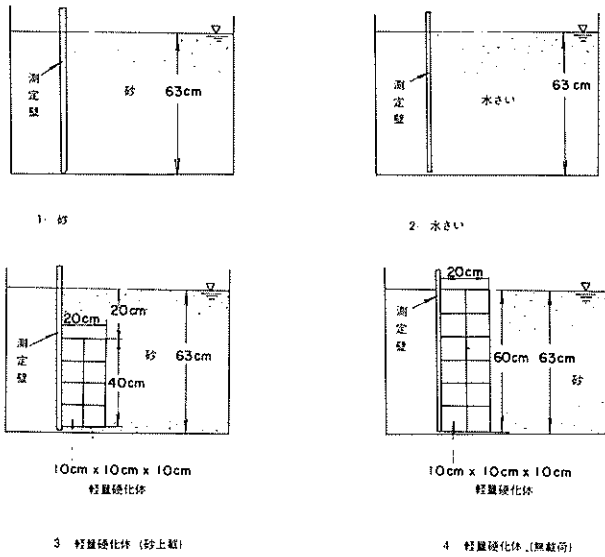


図-2 実験の種類

実験は図-2に示す4種類の裏込め材で、つまり砂、水さい、軽量硬化体および砂が上載している軽量硬化体で実施した。各実験における試料の単位体積重量を表-1に示す。軽量硬化体は高炉水さいをセメントと発泡スチロールで固め一辺が10cmの立方体としたもので、これを図-2に示すように積み重ねた。

表-1

実験項目	試料の単位体積重量 (gr/cm^3)
(1) 砂	1.48
(2) 水さい	1.01
(3) 軽量硬化体 (砂上載)	0.76 (上載砂を含めると1.17)
(4) 軽量硬化体 (上載なし)	1.27

2.1 加速度応答

図-3, 4に試料内における加速度応答特性を示す。実験の種類に関係なく、低加速度レベルにおいて振動数17Hz付近にピークがあって、共振していることを示している。砂を用いた実験(1)の場合、規定の振動実験のほかに実験槽に衝撃を与えて自由振動をさせたが、測定壁および砂層における自由振動の振動数は、それぞれ16.7Hz、および17.5Hzであった。このことから、17Hz付近の共振は、荷重計という1種のバネで支えられた測定壁と試料の層が1種の振動系を形成するために生ずる共振であると推定される。したがって、この共振は特殊な実験

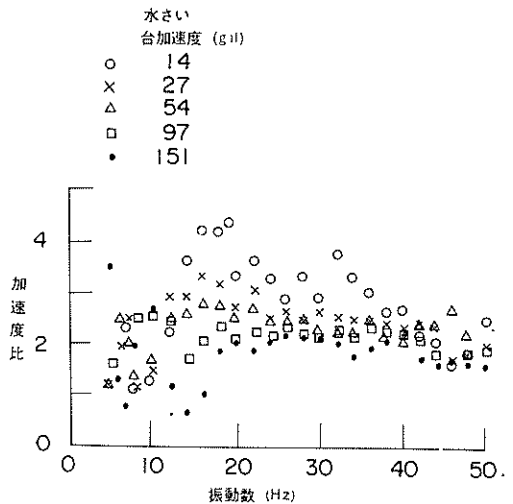
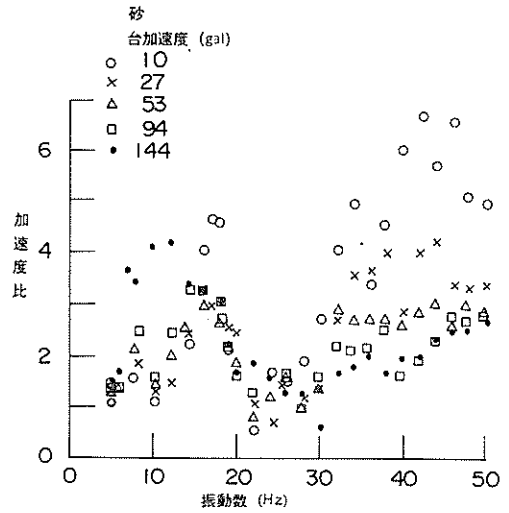


図-3 加速度応答特性

条件で生じたもので、この実験特有のものである。

そのほかにも、高い振動数にピークがみられるが、後述する荷重の振動数特性では、顕著でない。試料の差異による相違は、水さいの場合に共振時のピークが明瞭でないことである。

2.2 壁に作用する荷重

測定壁は、図-1に示すように、上部で1個、下部で2個の荷重計によって支えられているが、この荷重計によって壁に作用する荷重の水平成分のみを測定した。荷重の垂直成分を測定してなく、また、振動実験前後における静的な荷重も測定してなく振動時における荷重振幅のみを測定したものであり、土圧測定としては不備な点の多い測定であるといわざるをえない。測定した荷重のうち、上部の荷重計による荷重振幅 P_1 についてのみ、参

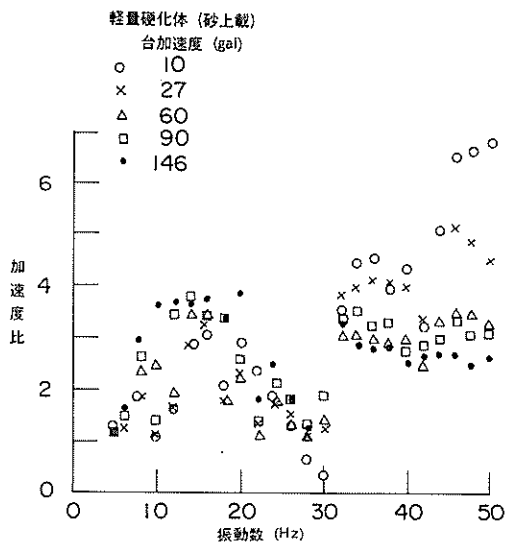


図-4 加速度応答特性

考資料として次に調べてみる。

図-5, 6, 7, 8 に荷重振幅 P_1 の振動数特性を示す。実験の種類に関わらず、低加速度の10 Gal の加速度レベルにおいて、16 Hz または 17 Hz の振動数で顕著な共振がみられる。これは、前述した加速度応答で指摘したものと同一振動数であり、測定壁が荷重で支えられているために生ずる振動であることを表わしている。加速度レベルが高くなると荷重振幅は増大するが、共振振動数は低下する傾向がみられる。

荷重振幅の大きさは実験の種類によって相違するようにはみえる。図-9 に荷重振幅の加速度レベルによる変化を示す。図には低振動数である 5 Hz と共振振動数にお

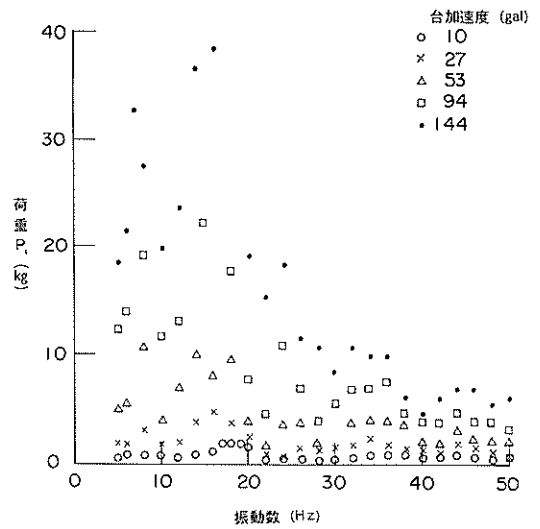


図-5 荷重の振動数特性 (砂)

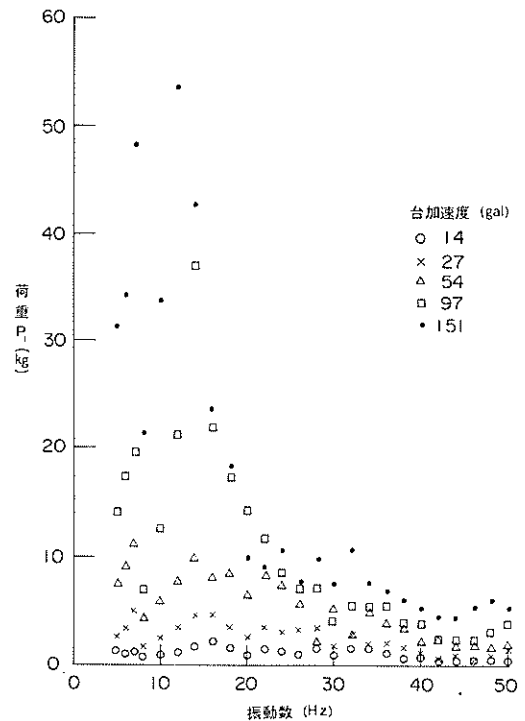


図-6 荷重の振動数特性(水さい)

ける荷重振幅を実験の種類に対して比較した。5 Hz の振動数においては実験の種類に関わらず、ほぼ同じ値であるが、共振時には実験の種類による差異が認められる。すなわち、荷重振幅は砂の場合に比べて、水さいおよび上載の無い軽量硬化体の場合に大きく、砂を上載した軽量硬化体の場合に小さい。この差異はそれ程大きなものでなく、静的実験では軽量硬化体による荷重の方が小さいという結果を考慮すれば、静荷重の荷重振幅を加えた

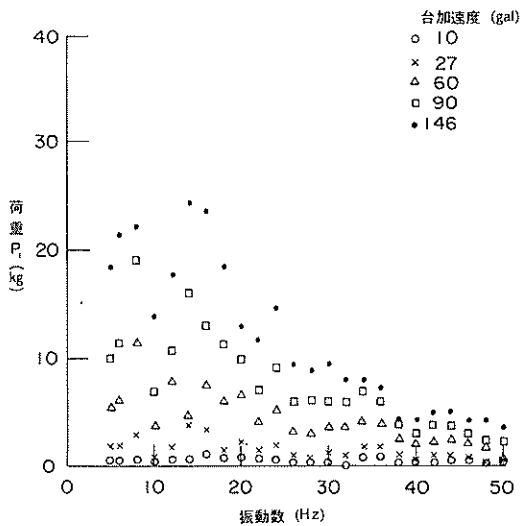


図-7 荷重の振動数特性(軽量材, 砂上載)

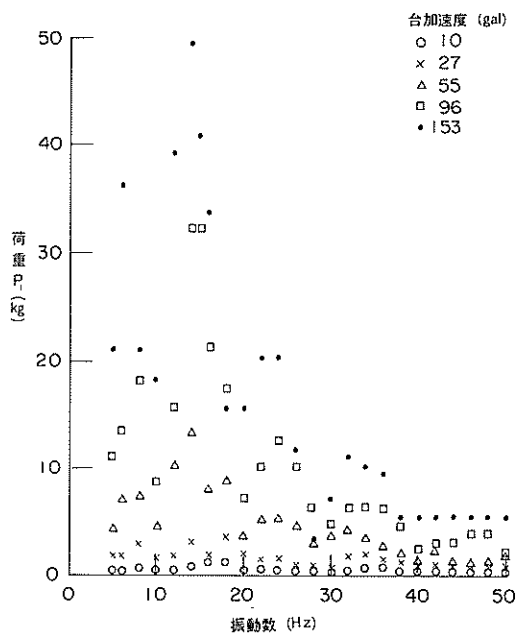


図-8 荷重の振動数特性(軽量材, 無載荷)

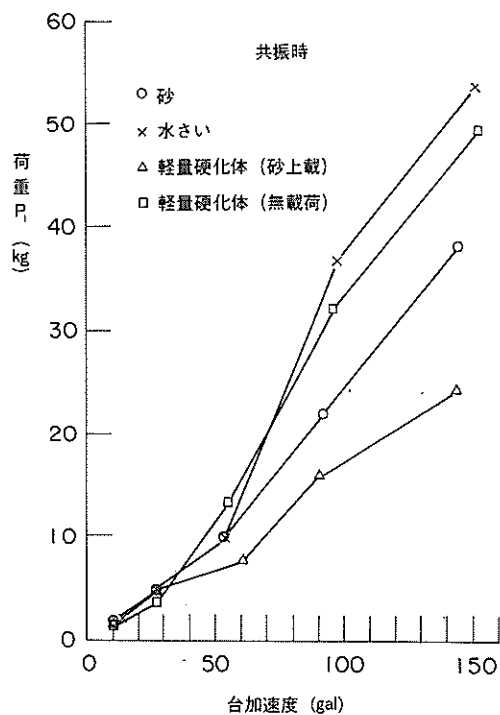
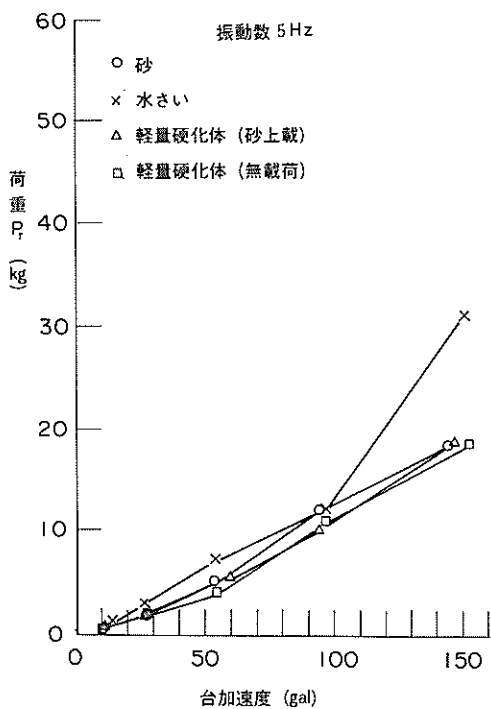


図-9 荷重変化の比較

全荷重は、実験の種類による差異が無くなるのではない
かとも考えられる。

3. 第2次実験

第1次実験は静的土圧実験に使用した装置をそのまま
振動台に載せて実験したため、実験槽が小さいこと、荷
重測定が完全でないことなど、不備な点を多く含むもの

であった。広範囲の振動数に対する土圧測定は、高度の技術を要するので、土圧測定は次の問題として残し、軽量材の振動時挙動をより詳細に調べてみることにし、振動台付属の実験槽（長さ5m、幅1.5m、高さ1.5m）内に試料を詰め、試料の応答加速度を求める実験を行なった。

3.1 実験

実験槽内には軽量材を詰めるのに都合のよいように、両端に発泡スチロールの壁を設け（図-10）長さ2.8m、幅1.5m、高さ0.6mに試料を詰めた。実験槽中央の高さ20cm、40cm、60cmの各位置に加速度計を埋め、試料内の加速度を測定した。加速度の測定は第1次実験と同じである。また、与えた振動も第1次実験と同じである。

実験は表-2に示す4種類について実施した。試料は高炉水さいおよび、高炉水さいをセメントと発泡スチロールで固め一辺が10cmの立方体とした軽量硬化体であり、それぞれを空気中および、水中で実験した。軽量硬化体は2,268個用いた。高炉水さいの粒度分布を図-11に示す。その有効径は0.38mm、均等係数は3.26である。試料の単位体積重量は表-2に示されるように

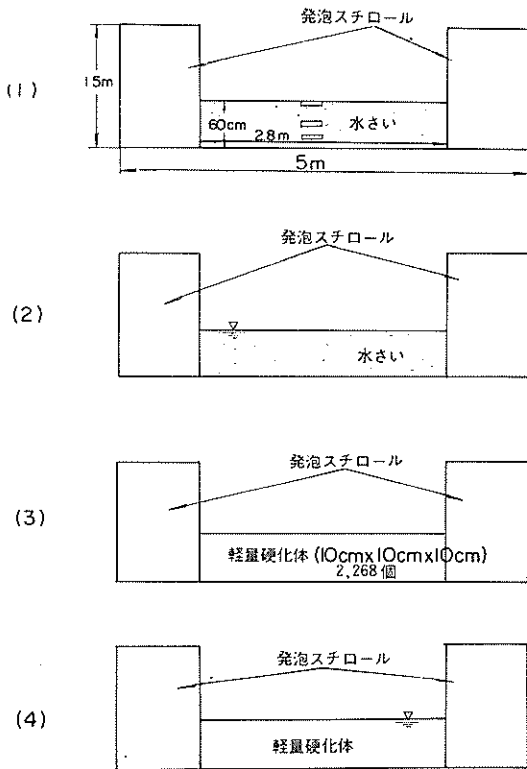


図-10 実験の種類

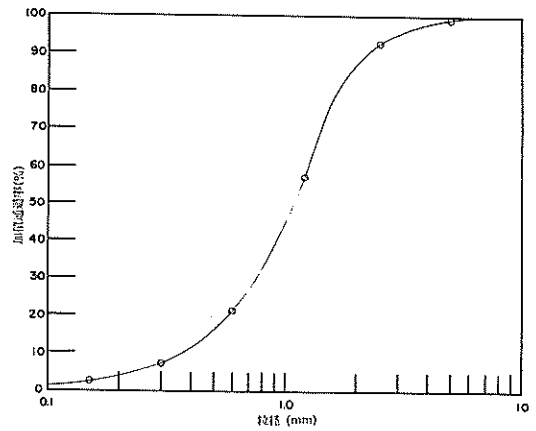


図-11 水さいの粒径加積曲線

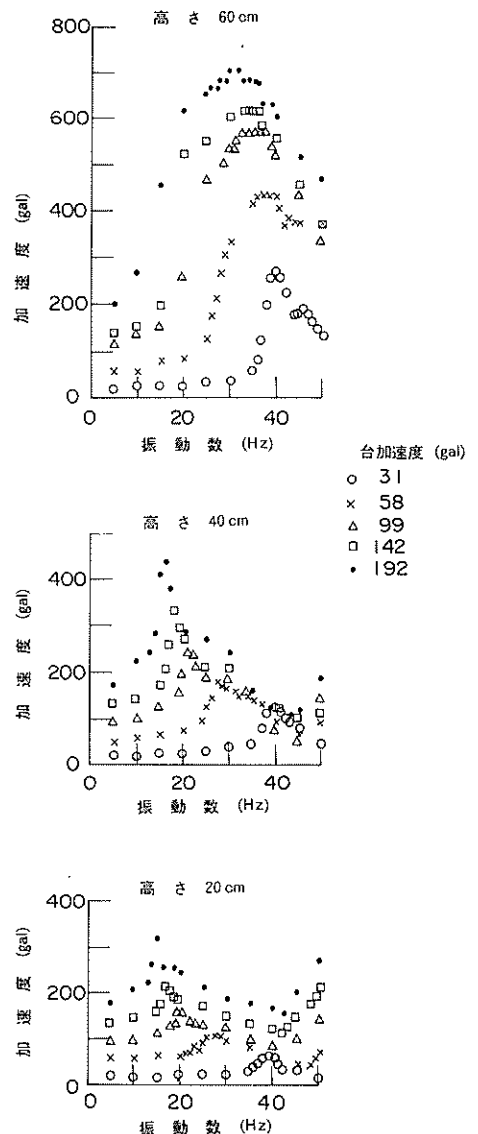


図-12 加速度応答特性(水さい, 空中)

表 - 2

実験項目	単位体積重量 (gf/cm ³)
(1) 水さい(空中)	0.82
(2) 水さい(水中)	0.82
(3) 軽量硬化体(空中)	0.88
(4) 軽量硬化体(水中)	0.94

いずれも水より軽く、水中では不自然な状態になるものである。

3.2 加速度応答

図-12, 13, 14, 15 に試料の加速度応答を示す。今回の実験は第1次実験と異なって測定壁の影響を受けない

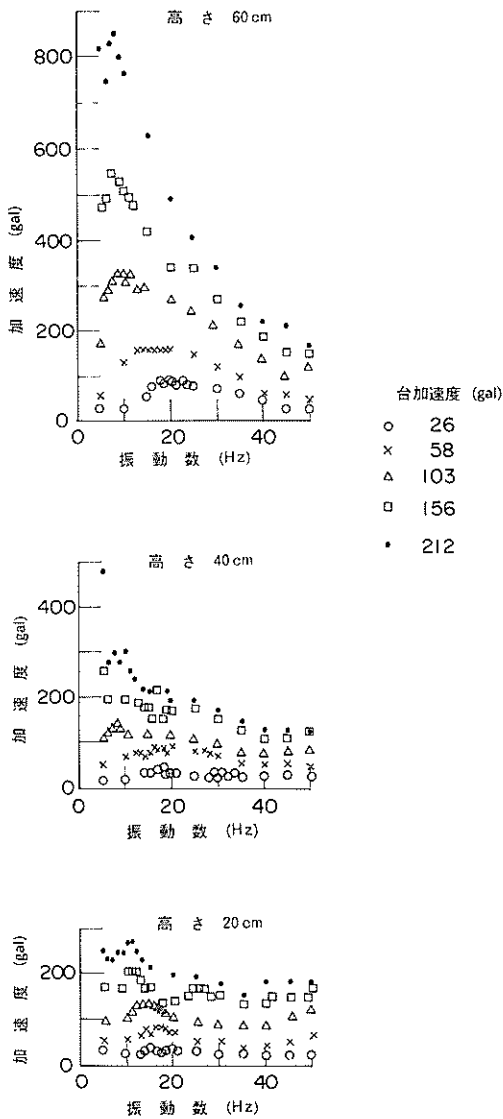


図-13 加速度応答特性(水さい, 水中)

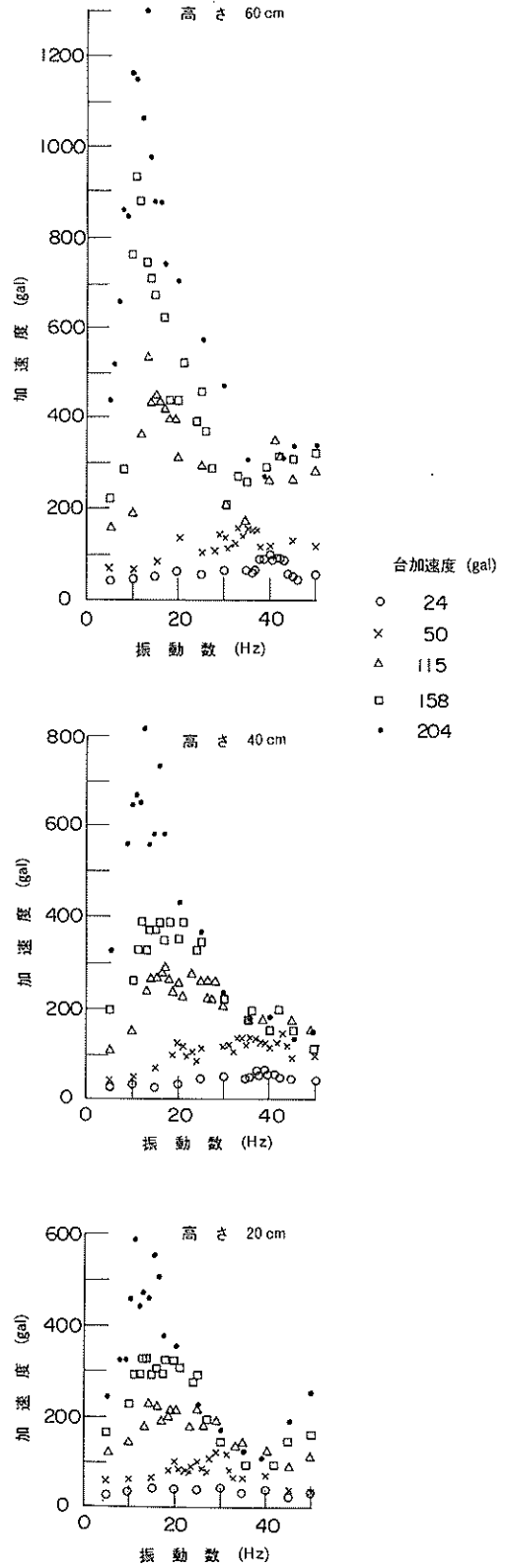


図-14 加速度応答特性(軽量材, 空中)

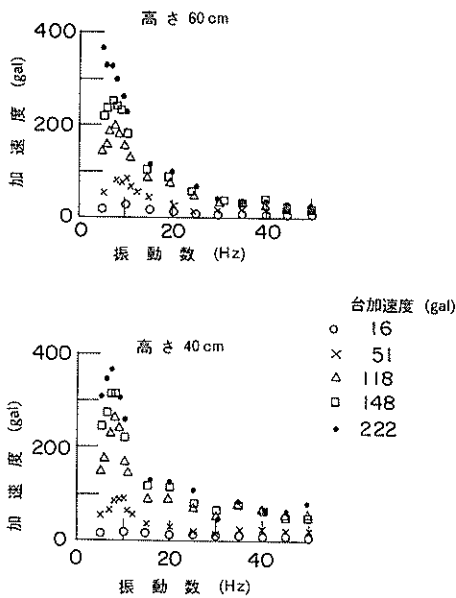


図-15 加速度応答特性(軽量材, 水中)

ので、実験槽側壁の影響を受けるにしても、この振動数特性はほぼ試料の特性を表わしているとみることができ

る。図をみると、かなり顕著な共振がみられ、次に述べる

ことが認められる。
(1) 空気中と水中とではかなり顕著な差異があり、水中では空気中に比べて共振振動数の低下が著しい。

(2) 加速度レベルの増大とともに、共振振動数は低下する。すなわち、振動の強さが増すと、試料内のヒズミが増大し、試料の剛性が低下することを表わしている。

(3) 水中における軽量硬化体の場合、試料の底部の方が上部より加速度が大きい。実験中の観察によれば、軽量硬化体は振動時に浮上するが、両端を発泡スチロールで押えられているため、浮上量は中央部が大きくなり、アーチ状になることがみられた。したがって、水中における軽量硬化体は振動を受けると、ブロック相互間の拘

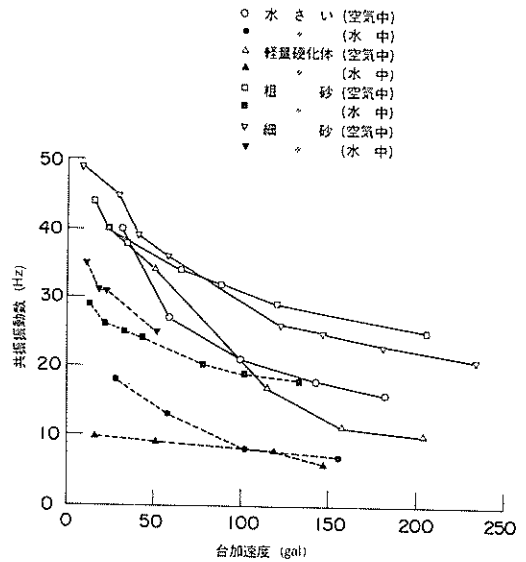


図-16 共振振動数の変化の比較

束がゆるみ、水と一緒に運動するようになるのではないかと考えられる。

3.3 共振振動数の加速度レベルに対する変化

共振振動数の加速度レベルに対する変化を図-16に示す。図には同じ実験槽で実施した粗砂および細砂の実験結果⁴⁾も併記した。すべての実験は試料層厚60cmのものである。図は次に述べることを表わしている。

(1) 空気中の場合、共振振動数の加速度レベルに対する低下の割合は、水さいおよび軽量硬化体の場合とも、砂の場合に比べて大きい。

(2) 水中の場合、共振振動数は、水さいおよび軽量硬化体の場合とも、砂の場合に比べて小さい。すなわち、軽い材料は、水中では剛性が著しく低下し、動きやすくなる。

4. 第3次実験

壁体に作用する振動土圧を広範囲の振動数の振動に対して精度良く測定することは困難であるが、軽量裏込め材の地震時土圧を定量的に求めるためのアプローチとして、第1次実験に使用した壁体よりも大型の剛体壁を振動台上に設置し、これに作用する振動土圧を土圧計によって測定することとした。

4.1 実験内容

振動台上の実験槽(長さ2.5m、幅1.5m、高さ1.5m)内に、下端ヒンジ、上端可動自由としたコンクリート剛体壁(壁高1.5m)を設置し、背後に所定の裏込め材を投入した。まず、裏込め終了時における静的土圧を測定し、そ

の後、所定の加速度レベル（10～200 Gal）で、振動数2～50Hzの正弦振動（各々10波）にて加振する定常強制振動実験を実施した。振動中の主な測定項目は、前述の土圧のほかに、壁体および裏込め材の応答加速度、天端変位であり、加えて、各加速度レベルで加振した後の残留土圧も測定した。壁体の設置およびピックアップの配置状況を図-17に示す。

また、ピックアップの主な仕様は下記の通りである。

加速度計：ヒズミゲージタイプ単軸小型加速度計、

最大容量 5 G

土圧計：ヒズミゲージ型小型土圧計、最大容量

300 gf/cm²、および 100 gf/cm²

変位計：可変インダクタンス型変換器、最大±

50 mm

また、実験のパラメーターとして、つぎの3種類を選

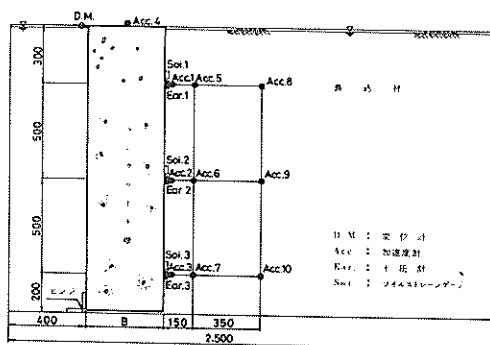


図-17 実験槽およびピックアップの配置

表-3

実験番号	裏込め材	壁幅 (mm)
1	山 砂 (空中)	400
2		500
3		600
4	水 滓 (空中)	400
5		500
6		600
7	水 滓 (水中)	600
8		500
9		400
10	山 砂 (水中)	600
11		400
12	軽量骨材 (空中)	400
13		600
14	軽量骨材 (水中)	600
15		400

定した。(括弧内の値は単位体積重量を示す。)

裏込め材：山砂（1.8 gf/cm³）、水さいスラグ（1.11 gf/cm³）、軽量骨材メサライト（1.03 gf/cm³）

裏込め条件：空中、水中

壁 体 幅：400mm、500mm、600mm

なお、裏込め材の有効径および均等係数はそれぞれ、山砂が0.30mm、2.33、軽量骨材メサライトが0.15mm、7.60、水さいスラグが0.40mm、3.00である。

実験の種類を表-3にまとめて示す。

4.2 実験結果

土圧計によって測定した振動土圧の精度を把握するため、同一土圧計を本実験に使用した実験槽端壁にセットして水を満し、定常強制振動を与えたときの動水圧を測定した。この実測値をHousnerによる動水圧の理論値⁵⁾と比較した結果、両者の差異は最大でも15%以内であった。したがって、以下に紹介する実験結果は、必ずしも高精度とは云えないにしても、裏込め材や裏込め条件の差異を大略把握することができるものと考えられる。

4.2.1 共振振動数の変化

各種裏込め材について、土圧の振動数特性と加速度の振

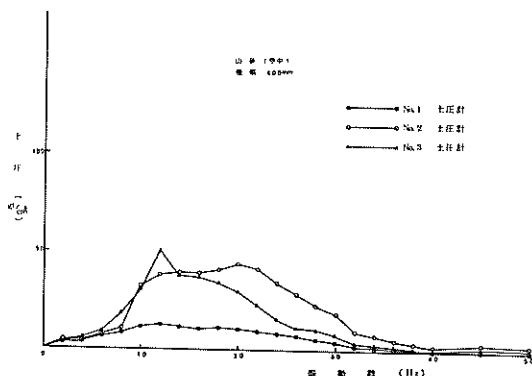


図-18.1(a) 土圧の振動数特性（山砂，空中）

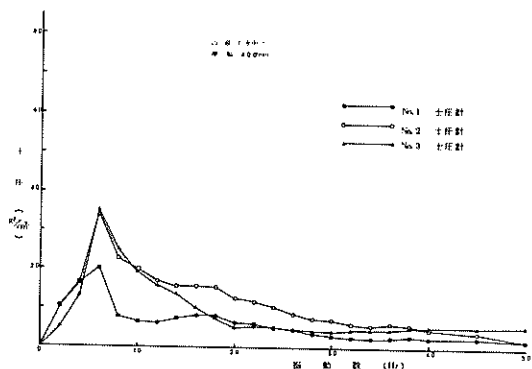


図-18.1(b) 土圧の振動数特性（山砂，水中）

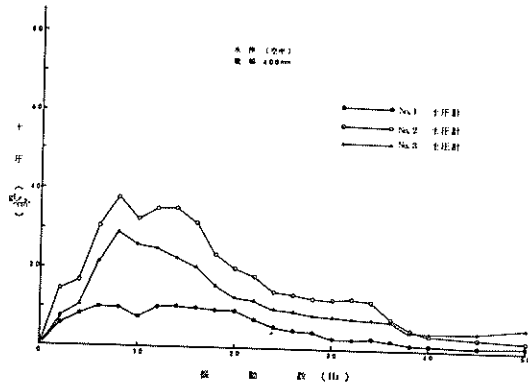


図-18.2(a) 土圧の振動数特性(水さい, 空中)

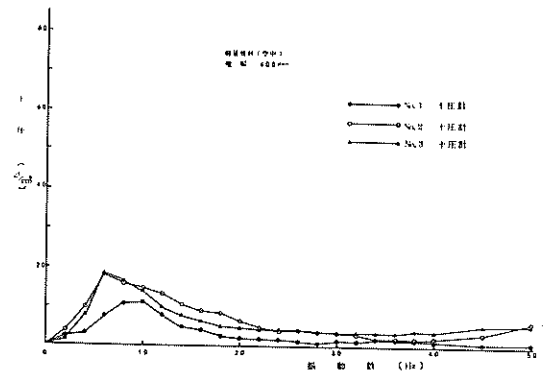


図-18.3(a) 土圧の振動数特性(メサライト, 空中)

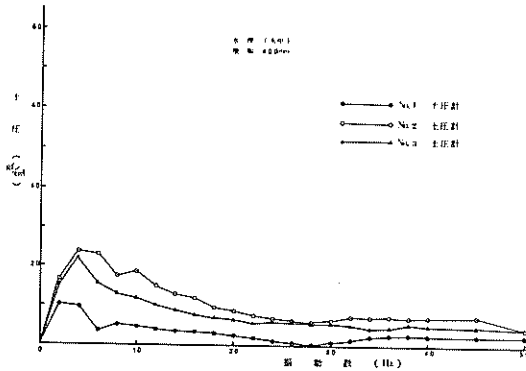


図-18.2(b) 土圧の振動数特性(水さい, 水中)

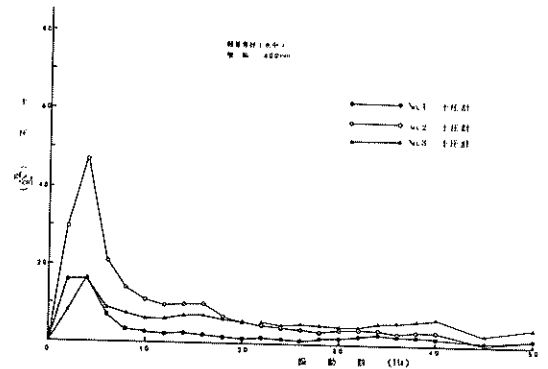


図-18.3(b) 土圧の振動数特性(メサライト, 水中)

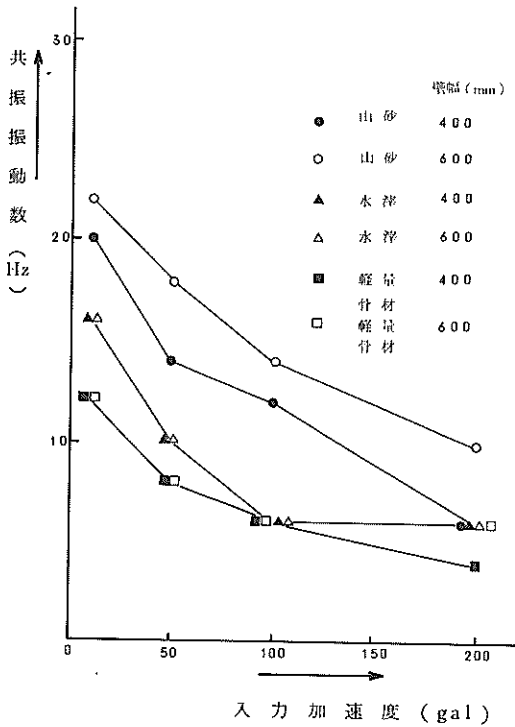


図-19.1 共振振動数変化の比較(空中)

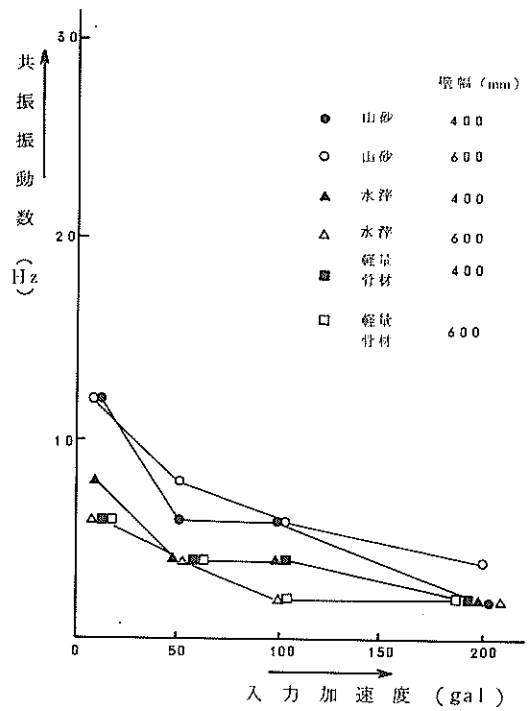


図-19.2 共振振動数変化の比較(水中)

動数特性とはほぼ類似している。土圧の特性を例示すれば、図-18.1~18.3 のようである。これら振動数特性から求めた1次の共振振動数と加速度レベルとの関係を求めると、図-19.1~19.2 のように表わされる。

同図と、各種裏込め材に対する加速度共振曲線を求めた第2次実験の図-16 を比較すると、層厚が異なるため、定量的な比較はできないが、定性的には類似していることがわかる。すなわち

- (1) 裏込め材の軽量化に伴って共振振動数が低下する。
 - (2) 裏込め材が水中にある場合の共振振動数は、空中の場合よりも低下する。
 - (3) 加速度の増大に伴う共振振動数の低下は顕著である。
 - (4) 壁幅の相違による差異はあまり認められない。
- など、第2次実験結果とほぼ同じことが云える。

4.2.2 土圧分布および土圧合力

裏込め終了時の土圧分布（水中の場合は水圧も含む）、および、裏込め終了時の土圧に各加速度レベルで加振したときの第1次共振振動数に対応する土圧を加えた土圧分布を示すと図-20 のようになる。これら土圧分布を積分して土圧合力を求め、裏込め材、裏込め条件および加速度レベルによる変化を整理すると図-21 のように表わされる（水中の場合は静水圧を差し引いている）。

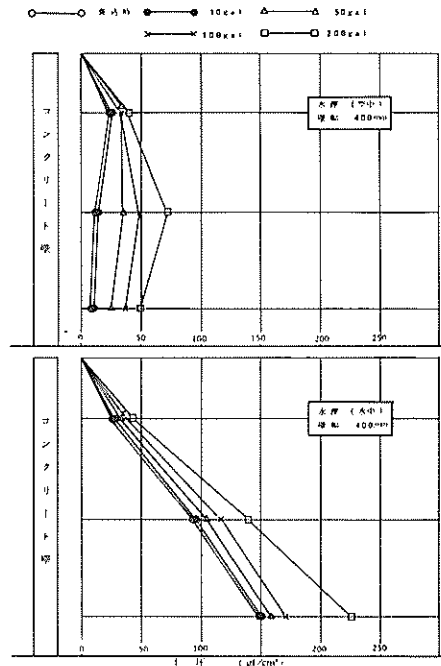


図-20(b) 土圧分布

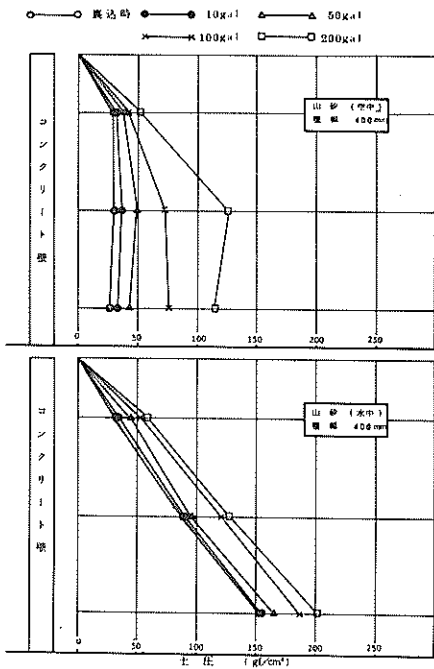


図-20(a) 土圧分布

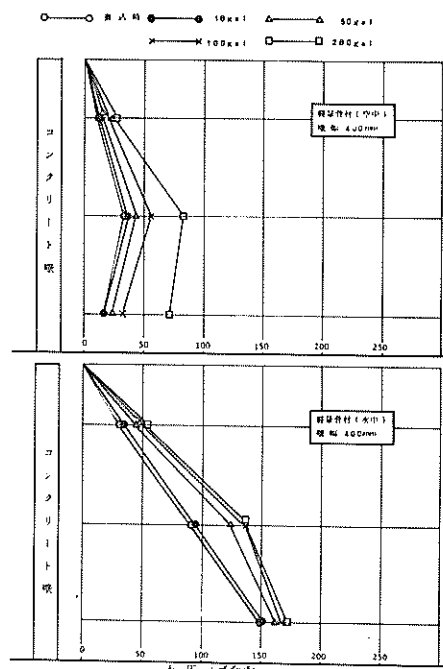


図-20(c) 土圧分布

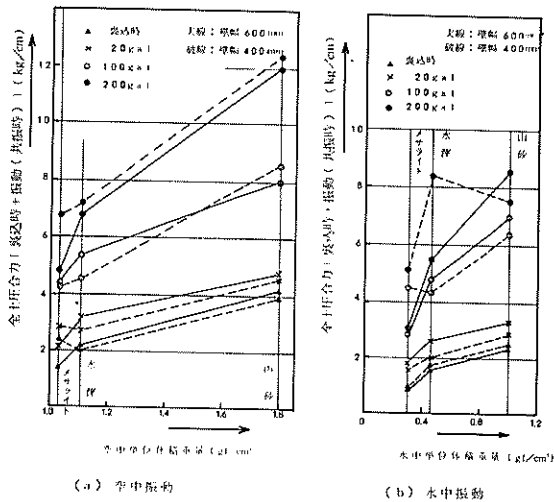


図-21 土圧合力

同図より、つぎのことが云える。

(1) 裏込め材が空中にある場合、軽量材程土圧が低下し、土圧低減効果が顕著に現われる。本実験に関する限り、山砂に比べて水さいでは60~70%、軽量骨材メサライトでは50~60%低減している。

(2) 裏込め材が水中にある場合、一部のデータにおいて、水さいと山砂がほぼ同一の値を示す場合や、メサライトが水さいよりも上回る場合もみられるが、全体的にはメサライトや水さいが山砂よりも小さな値を示す傾向にある。

しかしながら、水中における軽量裏込め材の振動土圧に明確な結論を与えるためには、同種実測データの蓄積や理論的な裏付けが必要と考えられる。

5. むすび

第1次より第3次までの実験結果をまとめると次の通りである。

(1) 裏込め材が乾燥状態または水飽和状態であっても、また、裏込め材の比重が重くても軽くても、いずれにしても振動時の加速度が大きくなるにつれて、裏込め材の共振振動数は小さくなる。同じ傾向にあるとはいえ、比重の小さい方が、そして、水飽和状態の方がともに低い共振振動数を与えている。

(2) 材料の共振振動数の低下は、その材料の剛性が弱まること、別のいい方をすれば流動性が現れてくることを意味する。つまり、砂と比較すると軽量材は地震時において安定性をかく傾向にあり、水飽和状態ではこの傾向が特に顕著となることを、この実験は明らかにしている。

(3) 裏込め材が乾燥状態である実験では明らかに、水飽和状態の実験では多少の乱れはあるけれども、いずれにしても裏込め材の比重が小さくなるにつれて、壁体に作用

する振動時主働土圧は小さくなる。

一見、(2)と(3)の記述は相反する表現のように見えるが、矛盾はなく後者は単に次のことを意味しているだけである。壁体が十分安定している場合には、振動によって裏込め材の安定性が多少低くなっても、軽量化の効果が十分これを補って、結果としては裏込め材の比重が小さいほど振動時主働土圧は小さくなる。

しかし、壁体が安定しておらず周辺の軽量材で構成される地盤にもたれかかっている場合には事情が変わってくる。たとえば、矢板壁の控え板の前面が軽量裏込め材の場合、水平荷重が作用している杭の周辺地盤が軽量材で構成されている場合などでは、地震動による軽量材の剛性低下はそのまま軽量材地盤の側方支持力の減少となって現われるので、地震時には軽量材で構成されている地盤は砂地盤に比べると相対的に危険となる。

振動模型実験によって直接確認しなかったことではあるが、軽量材地盤の振動による剛性低下は鉛直方向の地盤支持力の低下にも関係してくることは容易に理解できる。

ここで推論してきたことを要約すると下記の通り。

(4) 軽量裏込め材は、残留水位上あるいは水面下に関係なく、地震時においても十分な土圧低減効果をもたらす。

(5) しかし、軽量材で構成する地盤は、特に水飽和状態においては、砂地盤に比べて地震時安定性に欠ける傾向にある。したがって、地震時においても地盤支持力を必要とする地盤に軽量材を使用する場合には、慎重に調査を行って安全性を確認することが必要である。

6. おわりに

本実験は、川崎製鉄株式会社および株式会社開発機構との共同研究の一部であり、実験は主として両社によって実施され、その結果をとりまとめたものである。なお、本報告は荒井が主となって取りまとめており、北島はむすびのみ書いている。

(1978年6月23日受付)

参考文献

- 1) 善 功企, 沢口正俊, 中瀬明男, 高橋邦夫, 篠原邦彦, 橋本光寿, 軽量ブロックによる土圧低減工法, 港研報告, Vol. 13, No. 2, (1974) pp.45~64
- 2) 沢口正俊, 富永真生, 二町宜洋, 篠原正明, 波木守, 高炉水さいの人工砂としての利用, 土と基礎, Vol. 23, No. 8, (1975) pp.19~26
- 3) 林 聰, 荒井秀夫, 地震波形振動試験装置について, 港研資料, No.28, (1967) pp.1~19
- 4) 荒井秀夫, 岩淵守義, 中沢定男, 北島誠治, 砂層の

振動性状, 港研報告, Vol.13, No.2, (1974)
pp.65~82

5) Housner, G. W., Dynamic Pressures on

Accelerated Fluid Containers, Bull. of the
Seismological Society of America, 47,
(1957) pp.15~35

港 湾 技 研 資 料 No.299

1978. 9

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 株式会社 東京プリント

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