

2/15

運輸省港湾技術研究所

# 港湾技術研究所 報告

---

---

REPORT OF  
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH  
INSTITUTE  
MINISTRY OF TRANSPORT

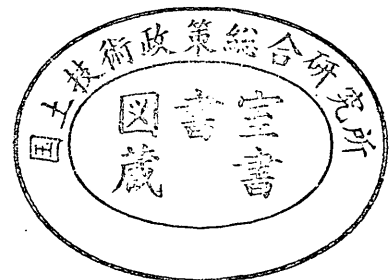
---

VOL. 8

NO. 1

MAR. 1969

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN



港湾技術研究所報告は第7巻第1号より年4回定期的に刊行する。ただし第1巻から第6巻および欧文編第1号から第15号までは下記のとおり不定期に刊行された。  
報告の入手を希望する方は論文番号を明記して港湾技術研究所長に申し込んで下さい。

和文篇 (Japanese Edition)

- Vol. 1. No. 1 (1963)
- Vol. 2. Nos. 1~3 (1963~1964)
- Vol. 3. Nos. 1~7 (1964)
- Vol. 4. Nos. 1~11 (1965)
- Vol. 5. Nos. 1~15 (1966)
- Vol. 6. Nos. 1~8 (1967)

欧文篇 (English Edition)

- Report Nos. 1~15 (1963~1967)

The Report of the Port and Harbour Research Institute is published quarterly, either in Japanese or in occidental languages. The title and synopsis are given both in Japanese and in occidental languages.

The report prior to the seventh volume were published in two series in Japanese and English as listed above.

The copies of the Report are distributed to the agencies interested on the basis of mutual exchange of technical publication.

Inquiries relating to the Report should be addressed to the director of the Institute specifying the numbers of papers in concern.

# 港湾技術研究所報告 (REPORT OF P.H.R.I.)

第8巻 第1号 (Vol. 8, No. 1), 1969年3月 (March 1969)

## 目 次 (CONTENTS)

1. Measurement of Wind Velocity Fluctuations over Waves in a  
Wind-Wave Tunnel .....Hajime KATO and Kikuo SANO..... 3  
(風洞水路における波の上の風速変動の性質について.....加藤 始・佐野喜久雄)
2. 沖積粘土層におけるサウンディング (数種の方法による試験結果について)  
..... 柳瀬重靖..... 37  
(Soundings in the Alluvial Clay Stratum (On the results of several methods)  
..... Shigeyasu YANASE)
3. 粘土試料の攪乱に関する研究 (第1報)  
——繰り返し三軸圧縮試験による攪乱実験—— .....奥村樹郎..... 59  
(Studies on the Disturbance of Clay Samples (1st Report)——Remolding Tests  
by the Repeated Triaxial Compression—— .....Tatsuro OKUMURA)
4. 飽和砂層の振動性状 .....荒井秀夫・梅原靖文..... 85  
(Vibration of Saturated Sand Layers .....Hideo ARAI and Yasuhumi UMEHARA)
5. 音響測深機に関する研究 .....木原純孝.....123  
(Study on Echo-Sounder.....Sumitaka KIHARA)
6. 砂, 砂利混合時の浚渫ポンプの特性  
..... 八木得次・宮崎昭児・奥出 律.....165  
(Characteristic of the Dredging Pump in Case of Mixed with Sand and Gravel  
..... Tokuji YAGI, Shoji MIYAZAKI and Tadasu OKUDE)

## 4. 飽和砂層の振動性状

荒井秀夫\*・梅原靖文\*\*

### 要 旨

港湾構造物模型振動実験に必要な砂層の振動性状を求めるため、先に報告した乾燥砂層に続いて飽和砂層について、動電駆動方式の振動台を用いて、その振動特性を調べた。実験から得られた砂層の加速度応答特性を剛性率の様なセン断振動と仮定して整理し、剛性率、減衰常数などを求め、それらの変形の増大に伴う変化を求めた。変形の小さい領域における飽和砂層の振動性状は、水と砂粒子が一体となって運動すると仮定し、有効圧に対応する剛性率を用いれば乾燥砂層のそれとほぼ同様であることが示された。変形の大きい領域では間ゲキ水の影響によって急激な剛性の低下が起る。また、実験から求められた有効圧と剛性率の関係を剛性率が深さに比例して増加するセン断振動理論と比較して剛性変化率を推定し、実験砂層の横波の速度は従来種々の方法で求められてきた値とほぼ同程度であることを示した。

---

\* 構造部 振動研究室長

\*\* 構造部 主任研究官

## Vibration of Saturated Sand Layers

Hideo ARAI\*  
Yasufumi UMEHARA\*\*

### Synopsis

The stationary acceleration responses of layers were obtained from the vibration tests of saturated sand layers on the electro-dynamic type vibration table. By applying the shear vibration theory with uniform rigidity to them, values of shear wave velocity and damping constant were evaluated and the variation of these values with increasing deformation of the sand layer during vibration was examined.

Values of rigidity are found to be strongly dependent on the effective overburden pressure. In addition, it is found that the vibrational characteristics of saturated sand layers is approximately equivalent to that of dry sand layers in a small deformation range, assuming sand grains to move completely together with water and the rigidity corresponding to the effective overburden pressure to be used.

While in a large deformation range, the rigidity reduces rapidly due to the effect of pore water pressure.

Above-mentioned results are also re-examined using the shear vibration theory with linearly-varying rigidity.

---

\* Chief of Vibration Laboratory, Structure Division

\*\* Senior Research Engineer, Structure Division

## 目 次

要 旨	85
1. ま え が き	89
2. 実 験	89
2-1 実 験 装 置	89
2-2 実 験 砂 層	89
2-3 台 の 振 動	90
3. 実 験 結 果 と そ の 考 察	90
3-1 砂 層 内 の 加 速 度	90
3-2 砂 層 内 の 加 速 度 応 答 特 性	90
3-2-1 加 速 度 応 答 特 性 の 高 さ 方 向 の 分 布	97
3-2-2 加 速 度 応 答 特 性 の 振 動 直 角 方 向 の 分 布	98
3-2-3 加 速 度 応 答 特 性 の 振 動 の 強 さ に よ る 影 響	99
3-3 共 振 時 に お け る 砂 層 内 の 相 対 変 位	102
3-4 砂 層 の 横 波 の 速 度	104
3-5 砂 層 の 剛 性 率	106
3-6 砂 層 の 剛 性 率 が 深 さ に 比 例 し て 増 加 す る 場 合 の 検 討	106
3-6-1 剛 性 変 化 率 が 固 有 振 動 数 に 及 ぼ す 影 響	107
3-6-2 剛 性 変 化 率 が 加 速 度 分 布 に 及 ぼ す 影 響	107
3-7 砂 層 の 非 線 型 挙 動	110
4. あ と が き	111
参 考 文 献	111

### 1. まえがき

港湾構造物の耐震性を模型振動実験によって検討するに際し、その基礎的資料を得るため振動台上の砂層の振動性状を調べている。乾燥砂層の場合はすでに報告し<sup>1)</sup>、振動台が 0.2 c.p.s. ~ 100 c.p.s. の範囲で良好な加速度波形で振動するため、明瞭な加速度応答特性を求めることができ、さらに、加速度応答特性の振動の強さによる変化を調べることができた。すなわち、砂層の振動を剪断振動と仮定して実験結果を整理すれば、振動の強さが大きくなるに伴って、砂層の剪断剛性が低下すると共に減衰常数が増大することが示された。

乾燥砂層に続いて、水で飽和している砂層について、同様に加速度応答特性を求める実験を実施したので報告する。港湾構造物はその大部分が水面下に存在するため、飽和状態の砂層の振動性状を明らかにすることは重要であり、港湾構造物の耐震設計に関連する問題にも、地震時土圧における見掛けの震度、地盤の流動化など、その機構が十分に明らかでない問題がある。

飽和砂層の振動実験は古く Jacobsen<sup>2)</sup> の研究があり、地震時土圧と関連した実験は松尾等<sup>3)</sup>、石井等<sup>4)</sup> によって行われているが、いずれも低振動数のみを与えた場合であり、流動化についても Florin<sup>5)</sup>、Maslov<sup>6)</sup>、Seed<sup>7)</sup>、土田<sup>8)</sup>、……等多数の研究が行われている。また、砂の小試料によって動弾性係数を求める実験も飯田<sup>9)</sup>、Hardin<sup>10)</sup>、……等多数の研究がなされ、地震探査により砂層の弾性波速度が求められ、地表層の地震動に関する研究も行われている。

この報告で述べる実験は限られた範囲の層厚に対する模型振動実験であるけれども、飽和砂層内の加速度応答を求め、振動の強さが大きくなるに伴って砂層の挙動の非線型性が著しくなる過程をも明らかにすることができる点に特色があると考えられる。

### 2. 実験

#### 2-1 実験装置

使用した実験装置は乾燥砂層の振動性状の実験に用いた砂槽を有する動電駆動方式の振動台である。砂層内および台の加速度は、非接着ひずみゲージ型の変換器（固有振動数約 250 cps）を歪計用搬送波増幅器（搬送波周波数 5 kc）に接続して、直記式電磁オシログラフ（ガルバノメーターの固有振動数 170 cps）で記録した。加速度計変換器は、上下面に十字の滑り止めを付けた 10

cm × 8 cm × 2 cm の耐水容器で保護され、この耐水容器を含めた単位容積重量は 2.1 gr/cm<sup>3</sup> である。

#### 2-2 実験砂層

実験した砂は、粗砂（高萩砂）と細砂（小名浜砂）の2種類についてであって、それらの粒径加積曲線を図-1、物理的性質を表-1 に示す。

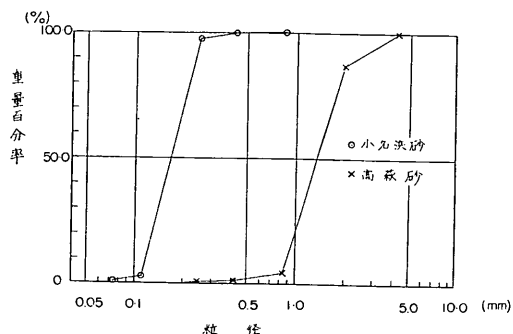


図-1 実験砂の粒径加積曲線

表-1

	高萩砂	小名浜砂
透水係数 (cm/sec)	0.956 ( $e=0.773$ )	0.0284 ( $e=0.86$ )
有効径 (mm)	0.91	0.13
均係等数	1.65	1.31
安息角 (度)	35.0	32.5
$e_{max}$	0.850	1.035
$e_{min}$	0.565	0.670

表-2

Test No.	砂	状態	層厚 (cm)	初期乾燥 単位重量 (g/cm <sup>3</sup> )	相対密度
①	高萩	乾燥	60	1.470	0.175
②	高萩	乾燥	50	1.486	0.281
③	高萩	乾燥	40	1.488	0.246
④	高萩	飽和	60	1.471	0.175
⑤	高萩	飽和	50	1.529	0.411
⑥	高萩	飽和	40	1.482	0.246
⑦	小名浜	飽和	60	1.339	0.123

(註) 図中に T.D., T.S., O.D., O.S. なる記号は、それぞれ高萩乾燥砂、高萩飽和砂、小名浜乾燥砂、小名浜飽和砂を示す。

砂を砂槽に入れる方法を述べると、乾燥状態の場合には、砂の入ったロトから砂を自然落下（落下高約 1m）させ、所定の深さに加速度変換器を置きながらつめた。また、水で飽和した状態には、砂槽に飽和するに十分な水を入れておき、水面とロトの間に金網を張り、砂を落下させた。このようにすれば、砂粒子が分散して、粒子に気泡が付着するのを防ぐことができると考えられる。

今回実験した砂層の状態は表-2、砂層内における加速度変換器の配置は図-2 に示される。図-2 の中で上段に示すものが側面図、下段に示すものが平面図(片側半分)である。

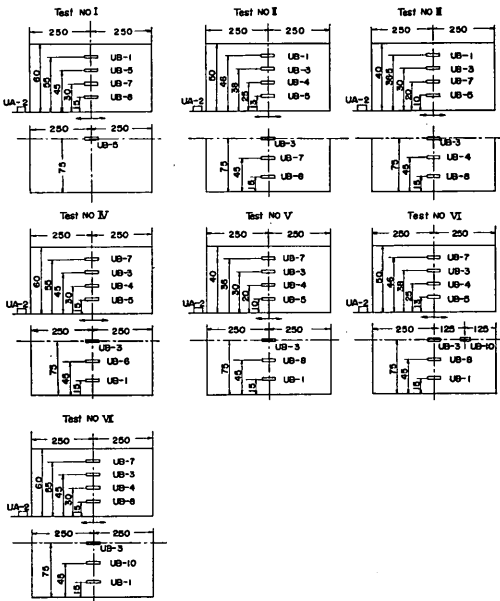


図-2 加速度計の配置

(註) UB-8 の加速度計は特性が不良で波形にひずみが現われ易く、Test No. 1 において UB-7 は故障した

### 2-3 台の振動

台の振動は単弦振動であり、加速度を一定に保って、振動数を 3 cps~60 cps の範囲に変化することにより、砂層の共振特性が求められるようにした。さらに砂層の共振特性が振動の強さによって変化するかどうかを調べるため、加速度を 0.01G~0.3G の範囲に変化させた。振動数の変化は共振点付近では 1 cps 間隔にした。

## 3. 実験結果とその考察

### 3-1 砂層内の加速度

実験はすべて、定常状態を対象としたものである。得

られた加速度記録のうち、代表的なものを写真-1.1~3.7 に示す。この記録はいずれも、共振時における状態であり、写真-1.1~1.7 は高萩飽和砂（層厚 60 cm, 粗砂）、写真-2.1~2.7 は小名浜飽和砂（層厚 60 cm, 細砂）に対するものである。又、写真-3.1~3.7 は高萩乾燥砂（層厚 60 cm, 粗砂）に対するものである。

これらの波形を見ると、次のような特徴が指摘される。

(1) 高加速度になると砂層内の加速度波形がひずんでくる。波形ひずみの程度は低加速度では下部の方が、高加速度では上部の方が著しい。波形ひずみの生ずる台加速度はここに示した例では、粗砂の場合 0.06G, 細砂の場合は 0.01G である。このような波形ひずみの生ずる原因は砂層内の高次の振動が入ったり、砂層の復元力特性が非線型になるためと考えられる。(2) 細砂の場合、0.2G, 0.3G において、砂層内の加速度が記録されない部分が存在する。このことは砂層の剛性が消滅して、砂層が完全に流動化したためと思われる。

加速度記録の peak から砂層内の加速度を求め、その振動数特性の台加速度の大きさによる変化状況を、砂層内の測定位置毎に画いて、図-3.1~5.4 に示す。これらの図を見ると、次に述べるような傾向を指摘できる。(1) 砂層は明瞭な共振特性を示す。(2) 共振曲線は台加速度が 0.06G (細砂の場合) ないし、0.1G (粗砂の場合) 以上に達すると、かなり乱れる。(3) 共振振動数は粗砂よりも細砂の方が高く、台加速度が高くなるに伴って低下する。

### 3-2 砂層の加速度応答特性

砂層の振動数特性を加速度応答特性によって表示するとデータを整理、解析する時便利である。

砂層がひずみ速度に比例する抵抗を有するセン断振動体であると仮定すると、砂層の高さ方向に y 軸をとると運動方程式は次の(1)式で与えられる。

$$\frac{\partial}{\partial y} \left\{ G(y) \frac{\partial X}{\partial y} \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \eta(y) \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\partial X}{\partial y} \right) \right\} = \rho \frac{\partial^2}{\partial t^2} (X + X_0) \dots\dots\dots(1)$$

ここに、X: 砂層の水平方向の相対変位、X<sub>0</sub>: 台の変位、G(y): 砂層の剛性率、η(y): 砂層の内部抵抗係数、ρ: 砂層の密度である。

G(y)、η(y) が高さ方向に変化なく一定の場合には、(1)は(2)になって、円振動数 ω なる強制単弦振動に対する加速度応答の倍率および位相差は(3)、(4)式で表わされる。



飽和砂層の振動性状

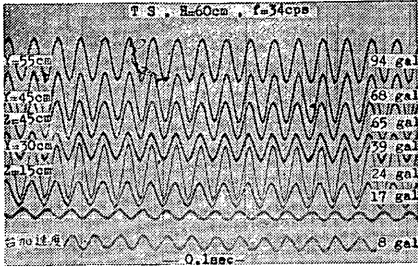


写真-1.1

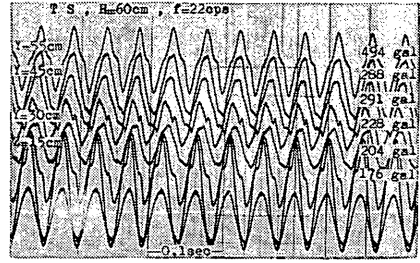


写真-1.5

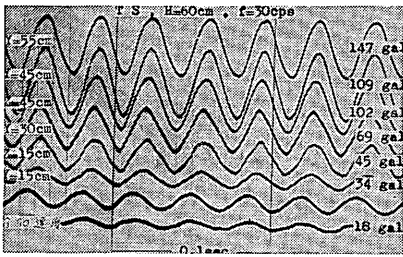


写真-1.2

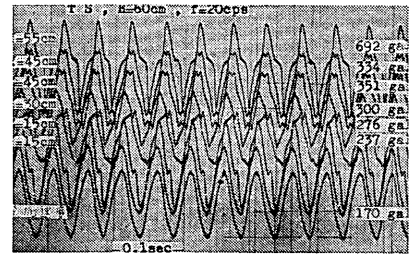


写真-1.6

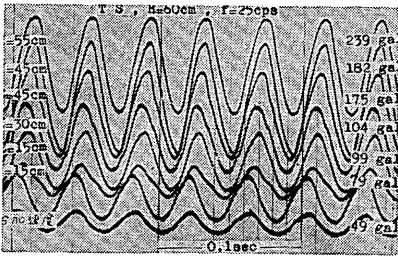


写真-1.3

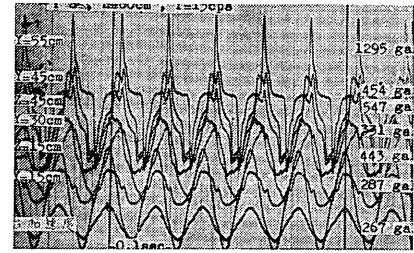


写真-1.7

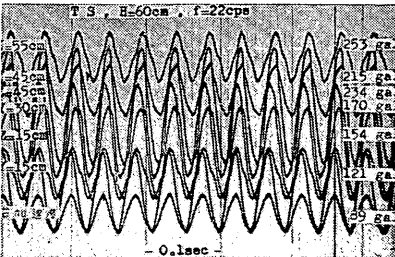


写真-1.4

写真-1 加速度波形 (高萩飽和砂層, 層厚 60 cm)

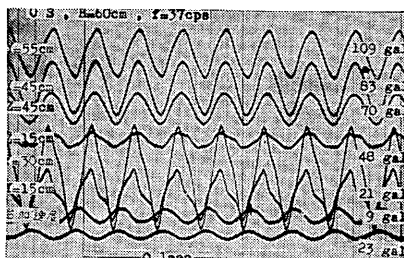


写真-2.1

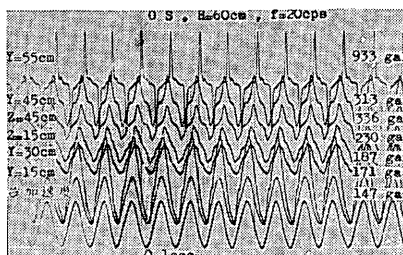


写真-2.5

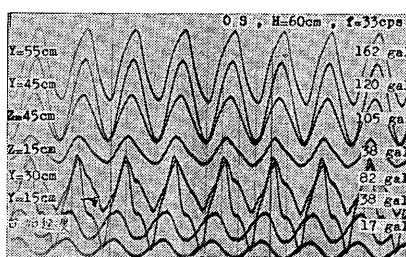


写真-2.2

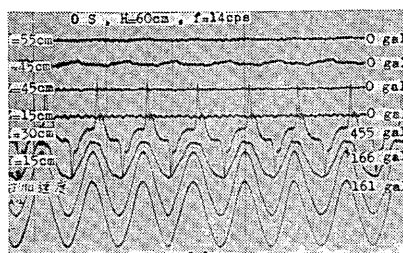


写真-2.6

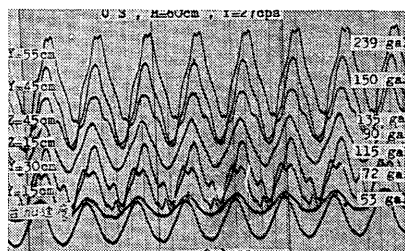


写真-2.3

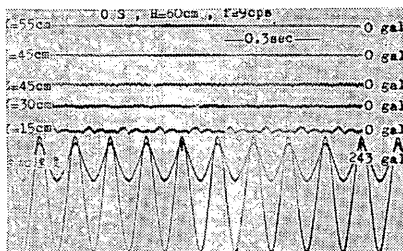


写真-2.7

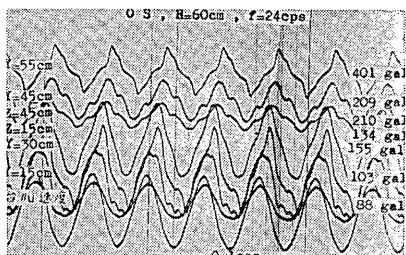


写真-2.4

写真-2 加速度波形 (小名浜飽和砂層, 層厚 60 cm)

飽和砂層の振動性状

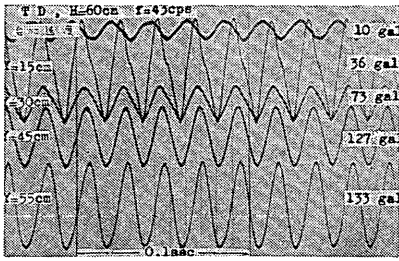


写真-3.1

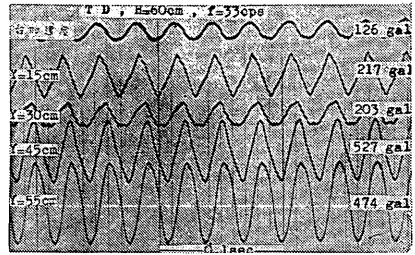


写真-3.5

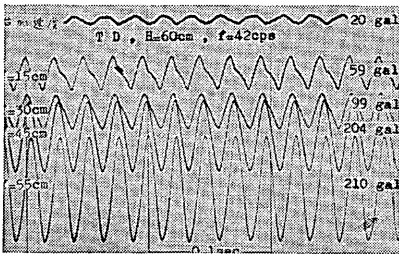


写真-3.2

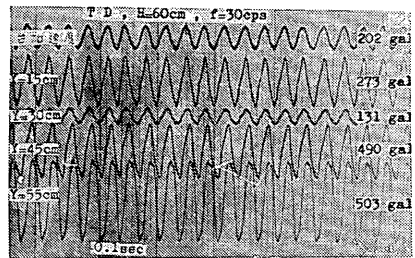


写真-3.6

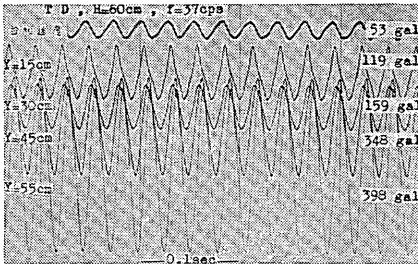


写真-3.3

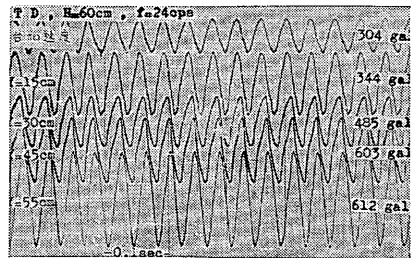


写真-3.7

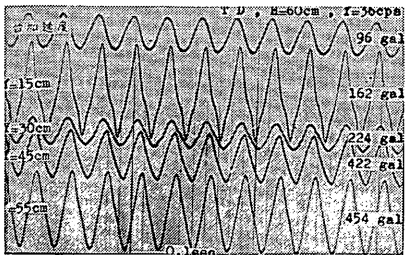


写真-3.4

写真-3 加速度波形 (高萩乾燥砂層, 層厚 60cm)

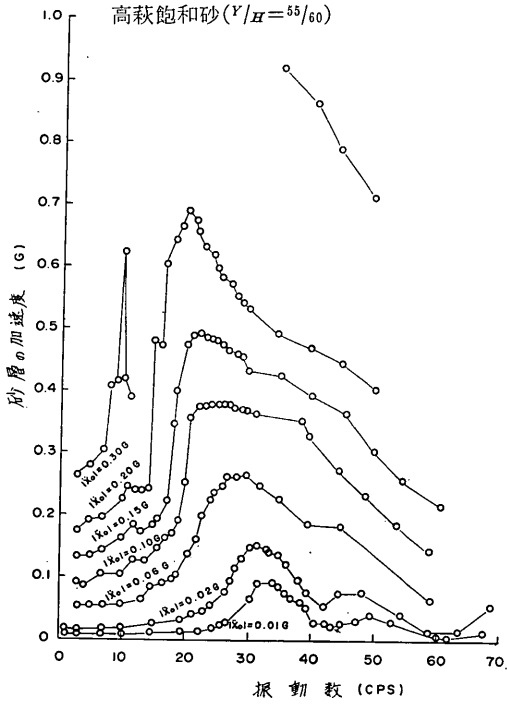


図-3-1 砂層の振動数特性

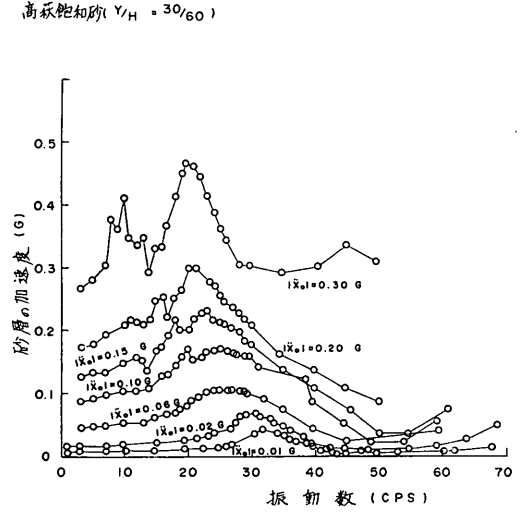


図-3-3 砂層の振動数特性

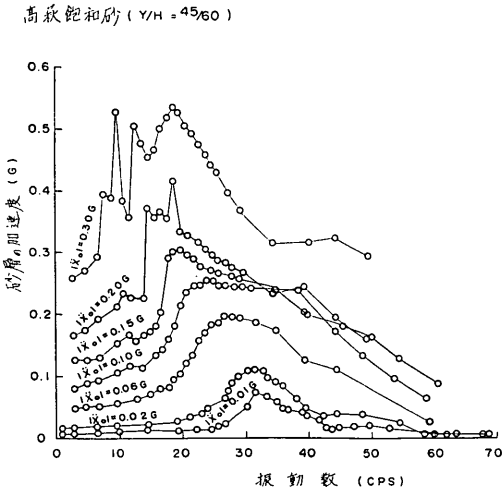


図-3-2 砂層の振動数特性

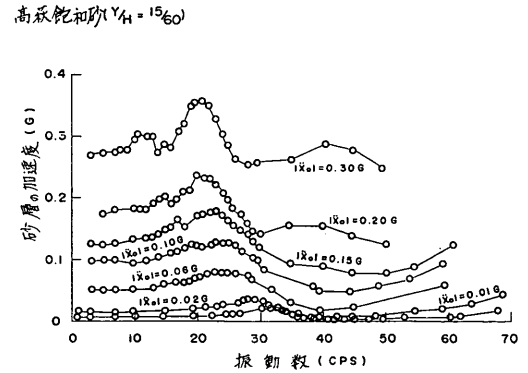


図-3-4 砂層の振動数特性

飽和砂層の振動性状

小名浜飽和砂 ( $\gamma_H = 55\%$ )

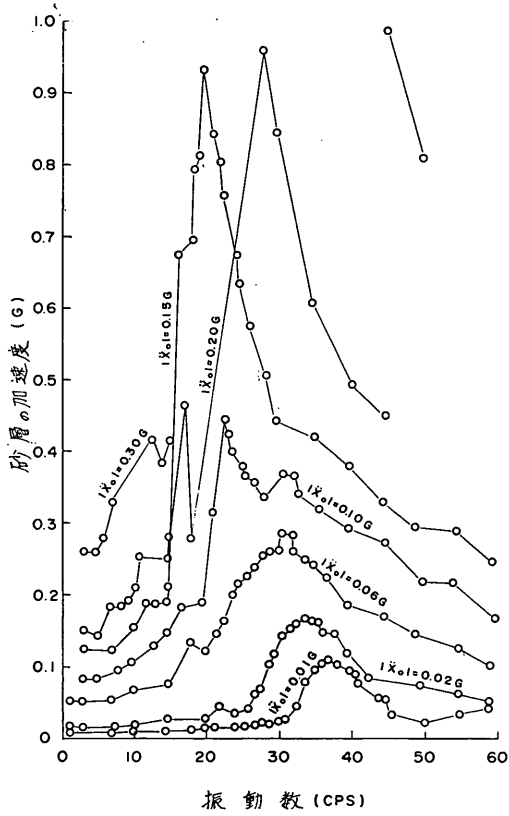


図-4.1 砂層の振動数特性

小名浜飽和砂 ( $\gamma_H = 30\%$ )

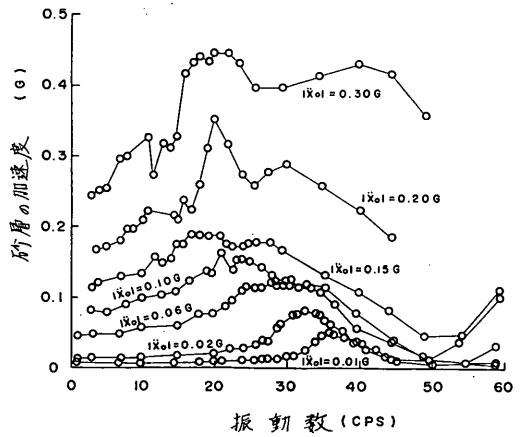


図-4.3 砂層の振動数特性

小名浜飽和砂 ( $\gamma_H = 45\%$ )

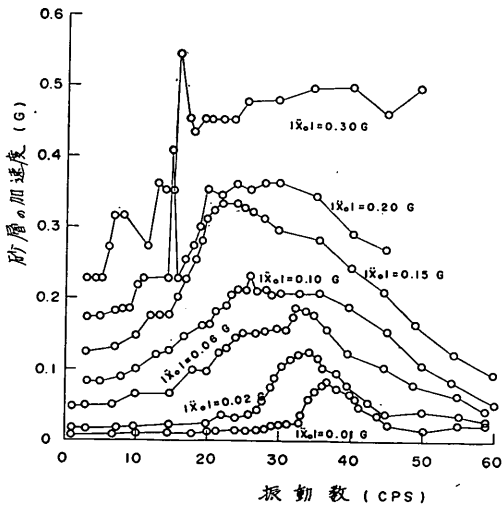


図-4.2 砂層の振動数特性

小名浜飽和砂 ( $\gamma_H = 15\%$ )

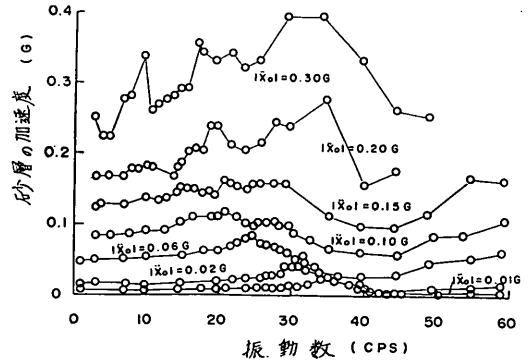


図-4.4 砂層の振動数特性

高萩乾燥砂 ( $\gamma_H = 59/60$ )

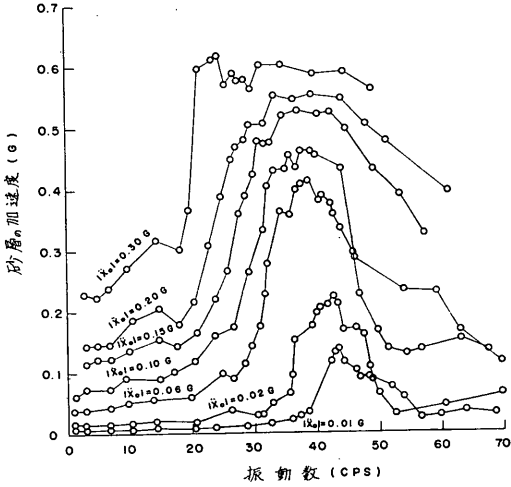


図-5.1 砂層の振動数特性

高萩乾燥砂 ( $\gamma_H = 30/60$ )

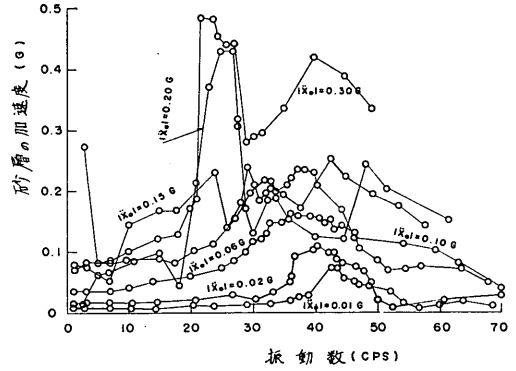


図-5.3 砂層の振動数特性

高萩乾燥砂 ( $\gamma_H = 45/60$ )

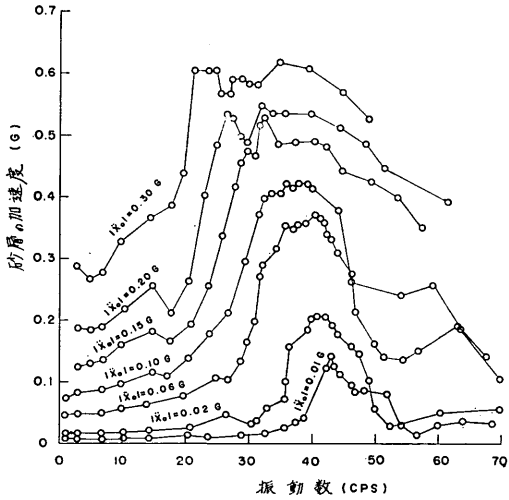


図-5.2 砂層の振動数特性

高萩乾燥砂 ( $\gamma_H = 15/60$ )

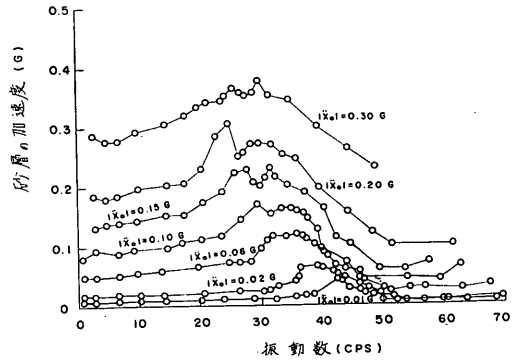


図-5.4 砂層の振動数特性

飽和砂層の振動性状

$$G \frac{\partial^2 X}{\partial y^2} + \eta \frac{\partial^3 X}{\partial y^2 \partial t} = \rho \frac{\partial^2}{\partial t^2} (X + X_0) \dots\dots(2)$$

$$\left| \frac{\ddot{X}_0 + \ddot{X}}{\ddot{X}_0} \right| = \sqrt{\xi_1^2 + \xi_2^2} \dots\dots(3)$$

$$\tan \varphi = \xi_2 / \xi_1 \dots\dots(4)$$

$$\xi_1, \xi_2 = f(y, H, h, \omega / \omega_1)$$

$$\omega_1 = \frac{\pi}{2H} \sqrt{G/\rho} \dots\dots(5)$$

$$h = \frac{\pi \eta}{4H \sqrt{\rho G}} \dots\dots(6)$$

ここに、 $\varphi$  : 位相差,  $\ddot{X}_0$  : 台の加速度,  $\ddot{X}$  : 砂層の相対加速度,  $H$  : 砂層の厚さ,  $\omega_1$  : 一次の固有円振動数,  $h$  : 砂層の減衰常数を表わす。

この単純化した理論と、実験から求められた加速度応答特性を比較してみる。

3-2-1 加速度応答特性の高さ方向の分布

図-6-1~6-4 に加速度応答特性の高さ方向の分布を表わす代表例として、台加速度の低い 0.01G に対する場合を示す。他の場合は乾燥砂の場合も含めて付図に示してある。図中の曲線は砂層内各測定点における測定加速度応答特性に最も適するように、一次の固有振動数と減衰常数を選んで、(3), (4)式から計算した曲線を合せたものである。したがって、砂層内の各点では計算曲線の固有振動数、減衰常数とも一定にならないが、実験値は加速度応答、位相差とも計算値に似た傾向を示している。特

に砂層の下部程減衰常数が大きい傾向が見られる。これらのことは付図-5-1~7-7 に示される乾燥砂層の場合とほとんど同様である。

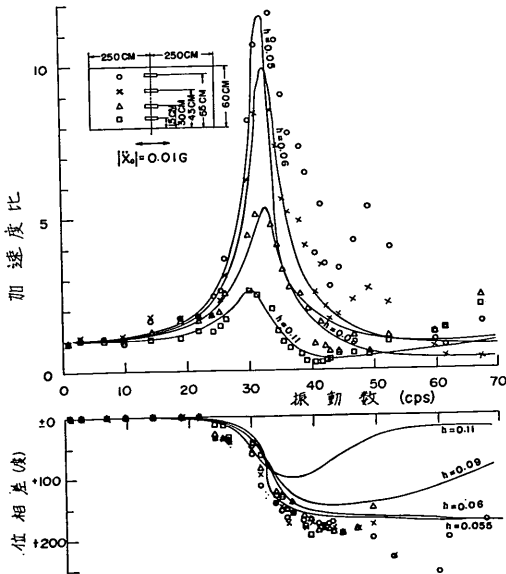


図-6-1 加速度応答特性 ( $H=60$  cm, 高萩飽和砂, 台加速度=0.01G)

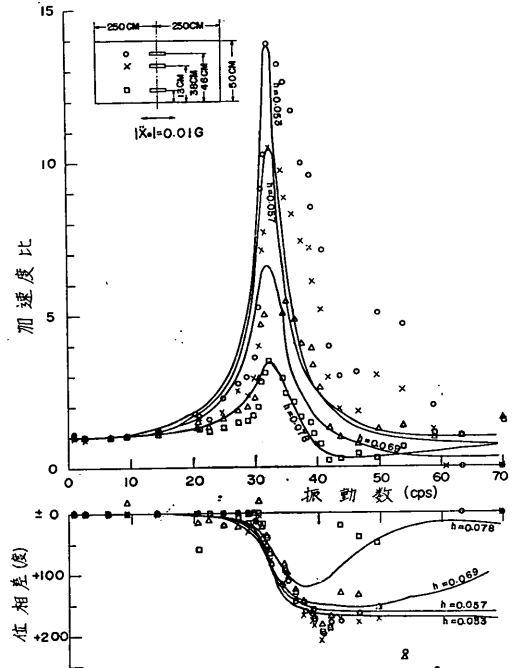


図-6-2 加速度応答特性 ( $H=50$  cm, 高萩飽和砂, 台加速度=0.01G)

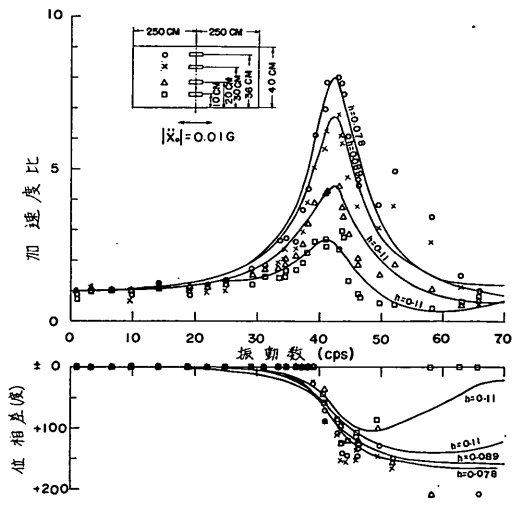


図-6-3 加速度応答特性 ( $H=40$  cm, 高萩飽和砂, 台加速度=0.01G)





飽和砂層の振動性状

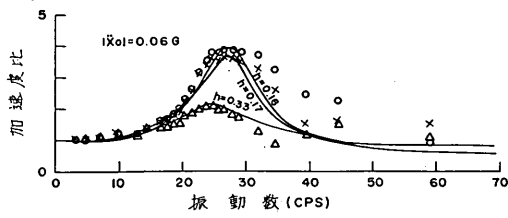


図-7.3 振動直角方向の分布 (高萩飽和砂層,  $H=60$  cm, 台加速度=0.06G)

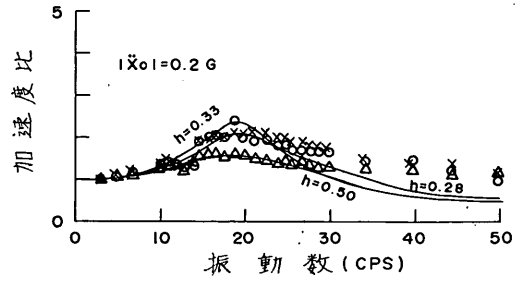


図-7.6 振動直角方向の分布 (高萩飽和砂層,  $H=60$  cm, 台加速度=0.2G)

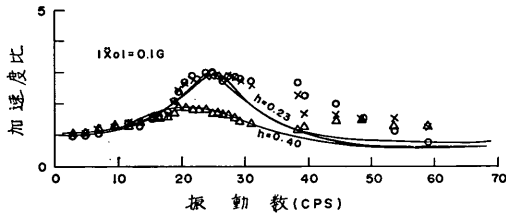


図-7.4 振動直角方向の分布 (高萩飽和砂層,  $H=60$  cm, 台加速度=0.1G)

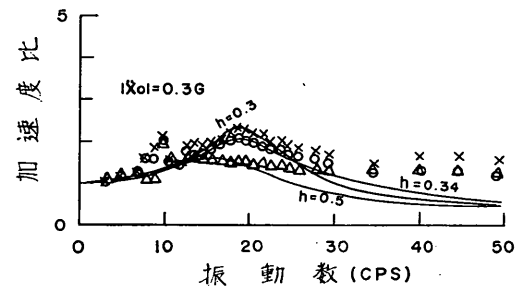


図-7.7 振動直角方向の分布 (高萩飽和砂層,  $H=60$  cm, 台加速度=0.3G)

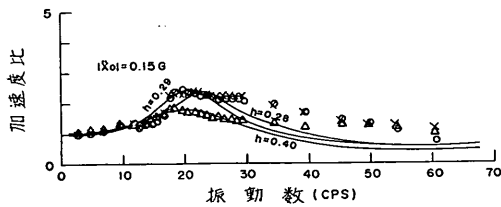


図-7.5 振動直角方向の分布 (高萩飽和砂層,  $H=60$  cm, 台加速度=0.15G)

図-7.7 振動直角方向の分布 (高萩飽和砂層,  $H=60$  cm, 台加速度=0.3G)

3-2.3 加速度応答特性の振動の強さによる影響

すでに述べたように、砂層内の共振振動数は与える振動が強くなるにつれて低下する傾向がある。このことは砂層内の一点における加速度応答特性が与えた台の加速度の大きさによって変化する状況を表わす図-9.1, 9.2を見ることにより明瞭になるであろう。乾燥状態(図-9.3)においても同様である。これらの図に示されるように与える振動が強くなるにつれて、砂層の共振振動数が低下するのみでなく、減衰常数も増大する。この傾向をもつと見易くするため、(3)式を共振振動数  $f_r$  と砂層の横波

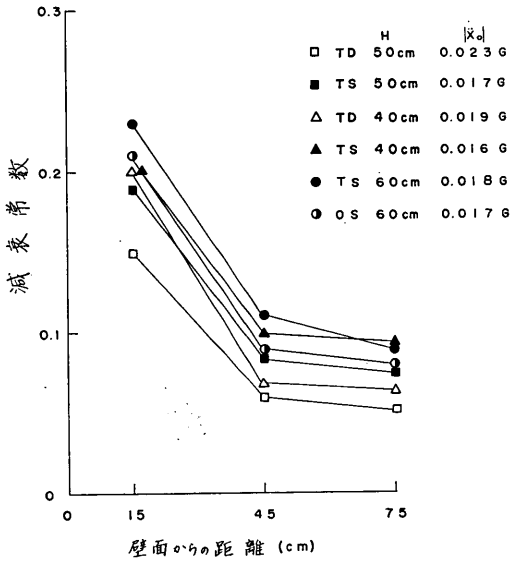


図-8.1 砂層の振動への側壁の影響

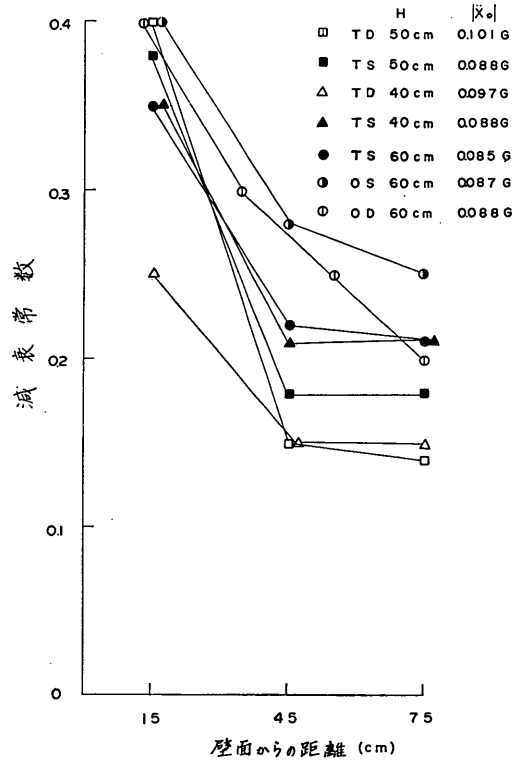


図-8.3 砂層の振動への側壁の影響

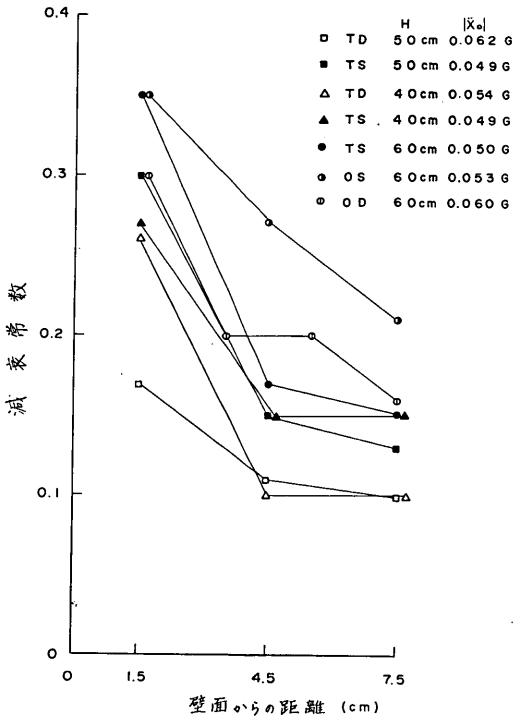


図-8.2 砂層の振動への側壁の影響

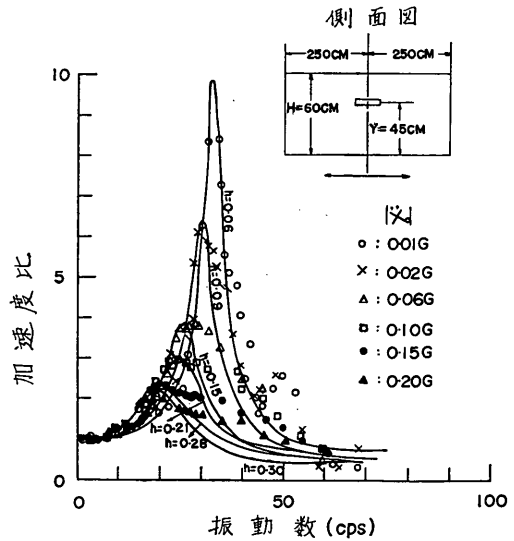


図-9.1 加速度応答特性の台加速度による影響 (高萩飽和砂,  $Y/H=45/60$ )

飽和砂層の振動性状

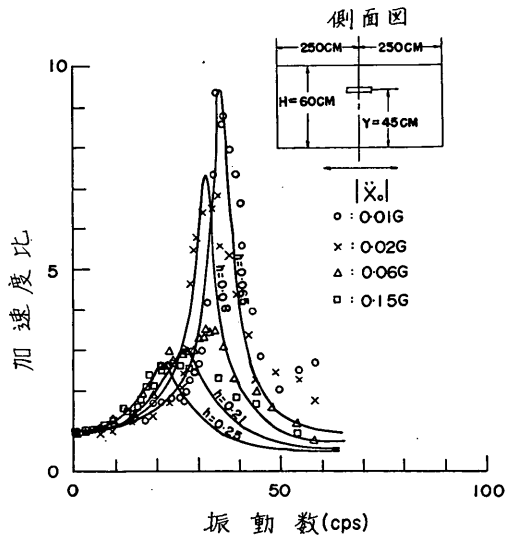


図-9.2 加速度応答特性の台加速度による影響 (小名浜飽和砂, Y/H=45/60)

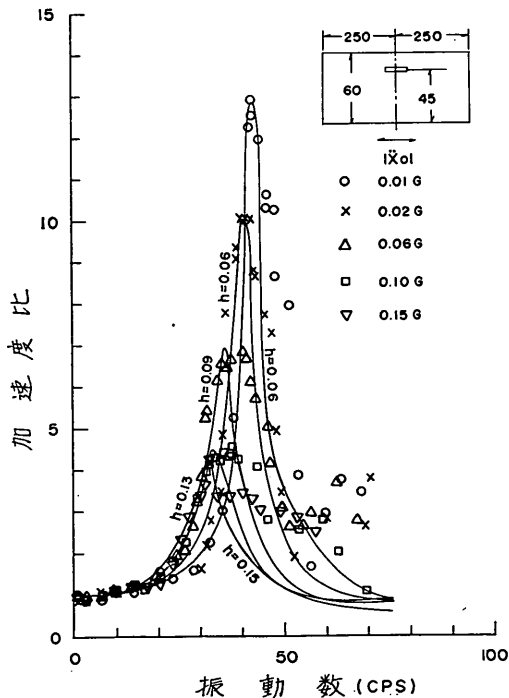


図-9.3 加速度応答特性の台加速度による影響 (高萩乾燥砂, Y/H=45/60)

の速度  $V_s$  とで書き変えると

$$f_r = \frac{\omega_1}{2\pi} = \frac{V_s}{4H} \dots\dots\dots(7)$$

となって、共振振動数の代わりに横波の速度  $V_s$  を用いれば、砂層の厚さを補正した量で表示することができる。台の加速度によって、横波の速度  $V_s$  および減衰常数  $h$  が変化する状況を図-10 に示す。図には砂層上部の測定点から求められた値が示されており、また、乾燥状態の場合も含めて示されている。この図を見ると、(1)飽和状態の横波速度は乾燥状態に比してかなり小さい。(2)台加速度が大きい場合は砂層内の加速度波形が乱れるのでこの場合に減衰常数の意味が薄い、変形の小さい範囲では、砂の種類、水の有無の状態などによって減衰常数はほぼ一定の値である。

今回実験した砂層の共振振動、減衰常数の一覧表を表-3.1~表-3.4 に掲げる。ここに求めた量は砂層をセン断振動体として取り扱うことによって得られた量であるが、すでに砂層内の加速度波形やその振動数特性に見られたように与えた振動が強い場合には砂層の非線型挙動が顕著に現われ、線型振動理論を用いることは不適当

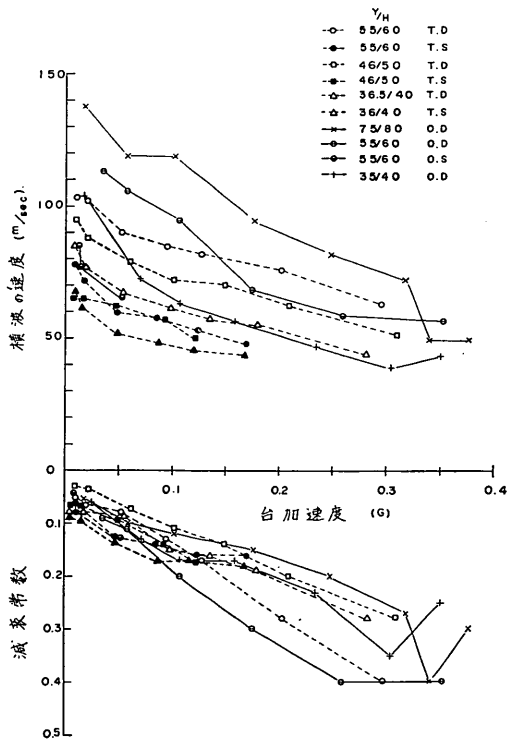


図-10 横波の速度 減衰常数と台加速度

	台加速度 (G)	y			h			fr					
		(cm)	h	fr	(cm)	h	fr	(cm)	h	fr			
Test No1 H=60cm 高萩乾燥砂	0.01	55	0.05	43.0	45	0.06	43.0	30	0.06	42.0	15	0.06	42.0
	0.02	55	0.06	42.5	45	0.06	40.5	30	0.085	40.5	15	0.08	39.5
	0.06	55	0.08	37.5	45	0.09	36.0	30	0.16	36.0	15	0.12	35.0
	0.10	55	0.03	36.5	45	0.13	33.5	30	0.25	31.5	15	0.20	32.5
	0.15	55	0.17	32.5	45	0.15	32.0	30			15	0.24	27.5
	0.20	55	0.25	27.0	45	0.25	29.5	30	0.25	26.5	15	0.27	25.0
Test No4 H=60cm 高萩飽和砂	0.01	55	0.055	32.5	45	0.06	33.0	30	0.09	32.5	15	0.11	30.5
	0.02	55	0.09	30.5	45	0.09	30.0	30	0.12	29.5	15	0.11	28.0
	0.06	55	0.13	25.0	45	0.15	25.5	30	0.25	25.0	15	0.24	24.5
	0.10	55	0.14	24.5	45	0.21	24.0	30	0.28	23.5	15	0.27	23.5
	0.15	55	0.16	22.0	45	0.28	21.5	30	0.30	20.5	15	0.28	22.0
	0.25	55	0.16	20.0	45	0.30	19.5	30	0.33	20.5	15	0.33	20.5

表-3-1 減衰常数, 共振振動数

	台加速度 (G)	y			h			fr					
		(cm)	h	fr	(cm)	h	fr	(cm)	h	fr			
Test No2 H=50 高萩乾燥砂	0.01 G	46	0.03	47.5	38	0.042	47.5				13	0.062	47.5
	0.02	46	0.035	44.0	38	0.052	44.5				13	0.085	44.5
	0.06	46	0.075	39.5	38	0.10	39.0				13	0.17	38.5
	0.10	46	0.11	35.5	38	0.14	35.5				13	0.20	34.5
	0.15	46	0.14	35.0	38	0.17	35.0				13	0.25	32.0
	0.20	46	0.20	31.0	38	0.23	31.0				13	0.28	30.0
Test No6 H=50 高萩飽和砂	0.01 G	46	0.053	32.5	38	0.057	32.5	25	0.069	32.0	13	0.078	32.5
	0.02	46	0.06	32.5	38	0.075	33.0	25	0.096	32.0	13	0.12	31.5
	0.06	46	0.095	31.0	38	0.13	31.0	25	0.18	31.0	13	0.22	31.0
	0.10	46	0.14	28.0	38	0.18	27.0	25	0.25	26.0	13	0.28	23.0
	0.15	46	0.17	25.0	38	0.25	24.0	25	0.29	22.5	13	0.33	23.5

表-3-2 減衰常数, 共振振動数

	台加速度 (G)	y			h			fr					
		(cm)	h	fr	(cm)	h	fr	(cm)	h	fr			
Test No3 H=40cm 高萩乾燥砂	0.01	36.5	0.058	53.0	30	0.063	53.5	20	0.071	53.5	10	0.08	53.5
	0.02	36.5	0.056	48.0	30	0.063	48.0	20	0.073	48.0	10	0.085	48.0
	0.06	36.5	0.082	41.5	30	0.10	43.0	20	0.14	43.0	10	0.13	41.5
	0.10	36.5	0.15	38.5	30	0.15	38.0	20	0.15	36.0	10	0.17	36.5
	0.15	36.5	0.16	36.0	30	0.17	36.0	20	0.18	35.5	10	0.19	34.5
	0.20	36.5	0.19	34.5	30	0.23	34.0	20	0.21	33.5	10	0.20	32.5
Test No5 H=40cm 高萩飽和砂	0.01	36.0	0.078	42.5	30	0.089	42.5	20	0.11	42.5	10	0.11	41.0
	0.01	36.0	0.082	38.0	30	0.092	38.5	20	0.112	38.5	10	0.13	37.5
	0.06	36.0	0.113	33.0	30	0.15	33.0	20	0.19	31.5	10	0.20	31.5
	0.10	36.0	0.17	30.5	30	0.21	31.0	20	0.21	26.5	10	0.32	26.0
	0.15	36.0	0.17	28.5	30	0.25	26.0	20	0.31	23.5	10	0.36	22.0
	0.20	36.0	0.18	27.5	30	0.30	22.0	20	0.37	21.5	10	0.46	20.0

表-3-3 減衰常数, 共振振動数

	台加速度 (G)	y			h			fr					
		(cm)	h	fr	(cm)	h	fr	(cm)	h	fr			
Test No7 H=60cm 小呂沢乾燥砂	0.01	55	0.05	35.5	45	0.065	35.5	30	0.077	35.5	15	0.09	35.0
	0.02	55	0.065	32.0	45	0.08	32.0	30	0.09	32.5	15	0.12	31.5
	0.06	55	0.13	27.5	45	0.21	27.0	30	0.25	26.0	15	0.24	23.5
	0.10	55			45	0.25	24.0	30	0.30	21.5	15	0.33	21.0
	0.15	55			45	0.25	21.5	30	0.40	19.0	15	0.40	19.0

表-3-4 減衰常数, 共振振動数

である。したがって、大きな台加速度に対応する横波速度、減衰常数は一つの目安を与える量と考えるべきであって、厳密には横波速度、減衰常数を意味しないが、砂層の非線型挙動を表示するに便利な指数と考えてよいであろう。

与える振動が強くなるに従って、砂層内の相対変形が大きくなると、砂層の剛性が低下し、減衰常数に対応する履歴曲線の面積が増大することを実験結果は示していると考えられる。

### 3-3 共振時における砂層内の相対変位

砂層の挙動は層内の相対変位の大きさによって違ったものになるであろうと推定された。砂層内で測定した量は絶対加速度であるので相対変位を求めることは困難であるが、大略の値であっても、一つの目安となる量を求めておくことが必要である。

砂層内の相対変位は共振時に最大になる故、砂層表面が共振した時刻におけるそれぞれの位置の相対変位を次の方法によって求めた。単弦振動を仮定し、台、砂層表面、 $i$  番目の位置における加速度振幅  $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_i$  が求められており、さらに砂層表面、 $i$  番目の位置における台との位相差  $\varphi_1, \varphi_i$  が求められているとすれば、砂層表面が共振した時刻における  $i$  番目の位置の台に対する相対変位は次式で求められる。

$$X_i = \frac{\alpha_i}{4\pi^2 f^2} \cos(\varphi_i - \varphi_1) - \frac{\alpha_0}{4\pi^2 f^2} \cos \varphi_1 \dots(8)$$

この方法によって求めた相対変位は、加速度波形が乱れている場合には極めて誤差の大きいものになる。図-11-

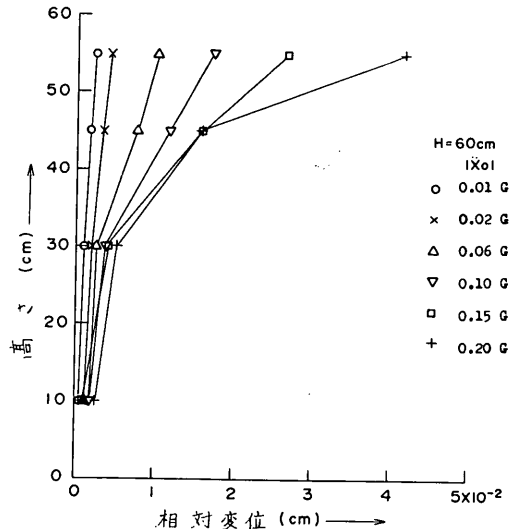


図-11-1 共振時の振動形 (高萩飽和砂, 層厚 60 cm)

飽和砂層の振動性状

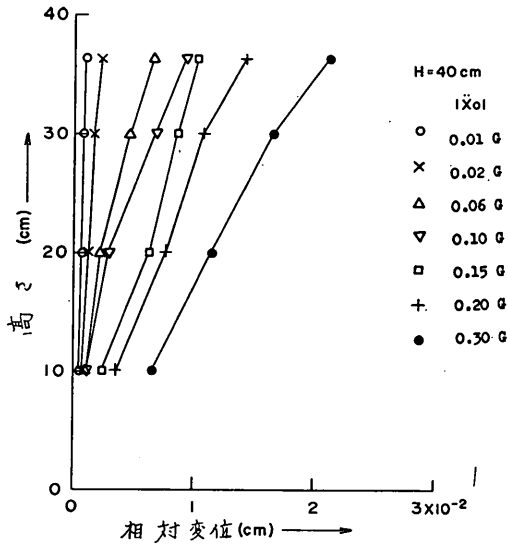


図-11.2 共振時の振動形 (高萩乾燥, 砂層厚 40 cm)

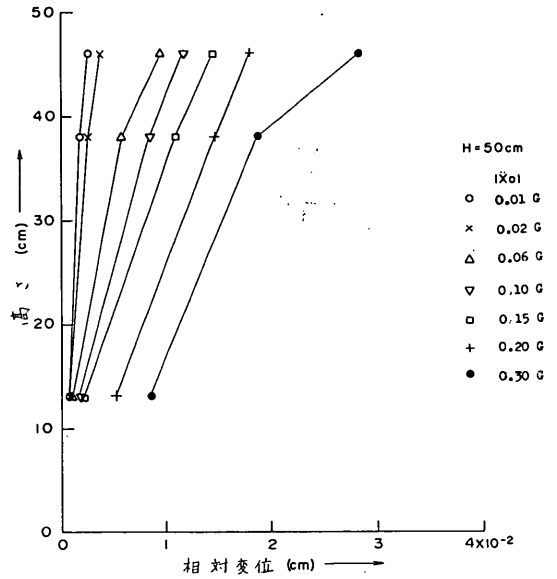


図-11.4 共振時の振動形 (高萩乾燥砂, 層厚 50 cm)

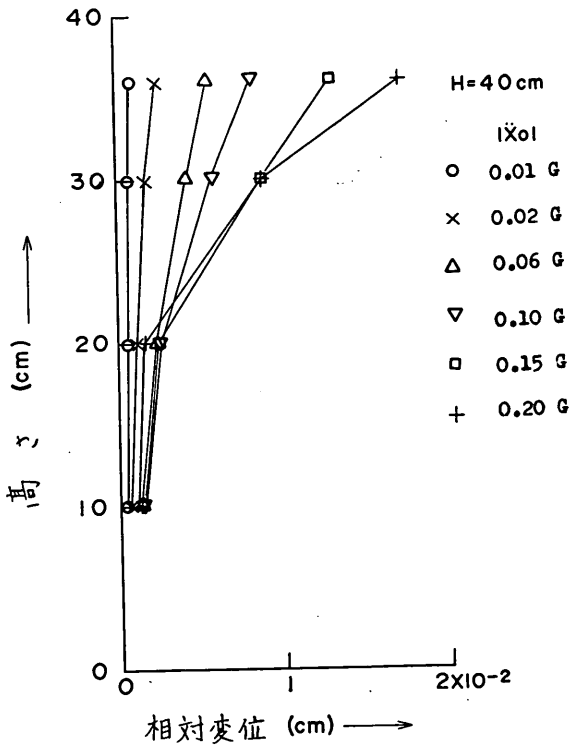


図-11.3 共振時の振動形 (高萩飽和砂, 層厚 40 cm)

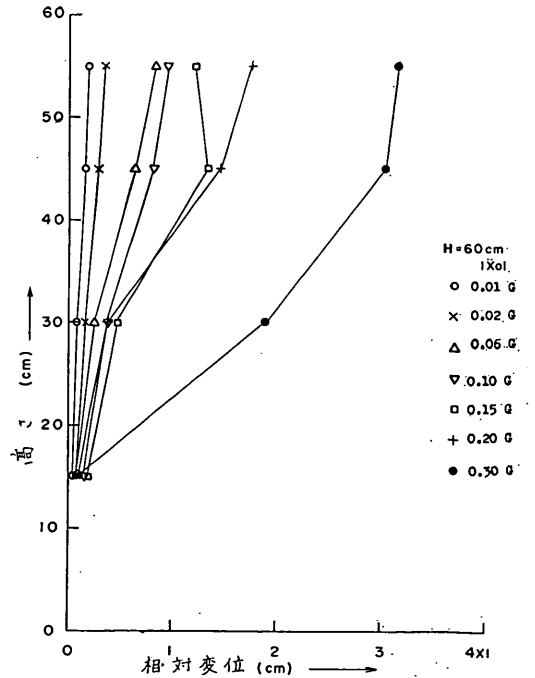


図-11.5 共振時の振動形 (高萩乾燥砂, 層厚 60 cm)

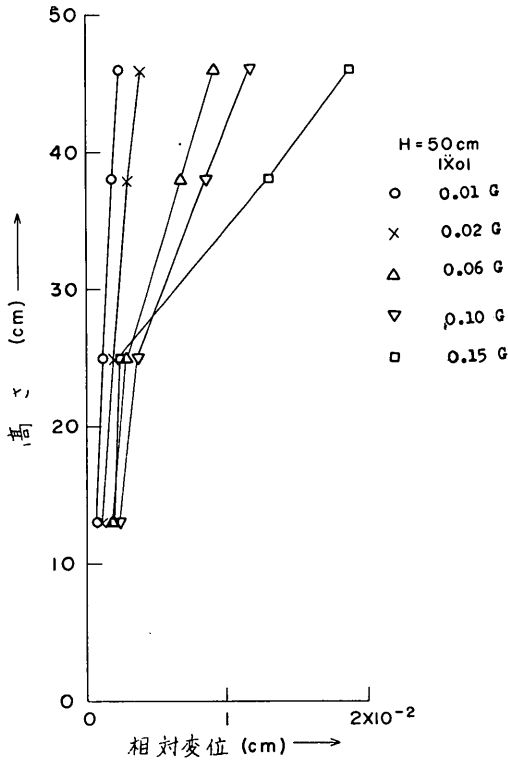


図-11.6 共振時の振動形 (高萩飽和砂, 層厚 50 cm)

1~11.6 はこのようにして求めた相対変位の高さ方向の分布である。台の加速度の低い場合にはかなり正しい相対変位を求めていると考えられるが、高さにはほぼ比例して変位が増大しており、剛性率の様なセン断振動体の振動形と違っている。

砂層の変形を表わす目安として、このようにして求めた砂層上部の一点における相対変位  $X$  をその点の高さ  $Y$  で割った量は砂層のセン断ひずみに近い値を与える。この量  $X/Y$  に対して横波の速度、減衰常数をプロットすると図-12 に示すようになる。この図から、砂層がその振動波形に乱れがなく、弾性的に挙動している領域は、砂層内のセン断ひずみが  $1 \times 10^{-4}$  程度以下ではないかと推定される。

### 3-4 砂層の横波の速度

砂層は振動によって密度が増大する。ある程度の振動を与えた後に測定した砂層の乾燥単位重量と台加速度との関係を図-13 に示す。実験の範囲内では粗砂(高萩砂)の場合に飽和状態の方が密になる傾向が見られる。

砂層の密度変化は先に求めた横波の速度に影響を及ぼすはずであるが、著しい密度変化は高加速度において生

じており、弾性波として意味を有する変形の小さい領域における密度変化は小さい故、この領域についてのみ考えれば密度変化の影響を無視できる。図-14 は変形の小さい(台加速度  $0.01G \sim 0.03G$ ) の範囲で得られた砂層

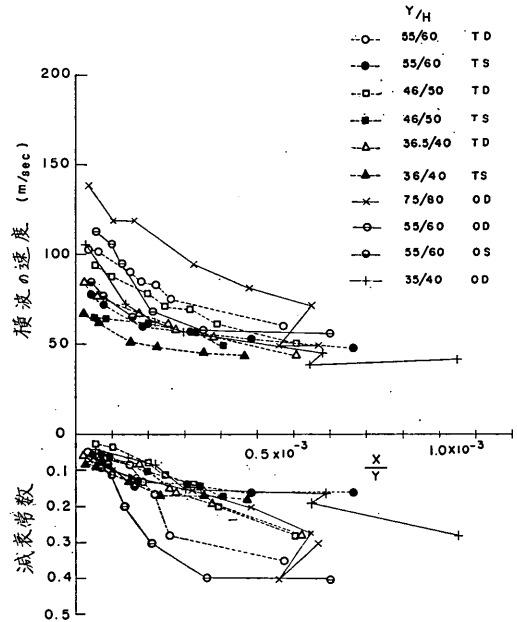


図-12 横波の速度と減衰常数

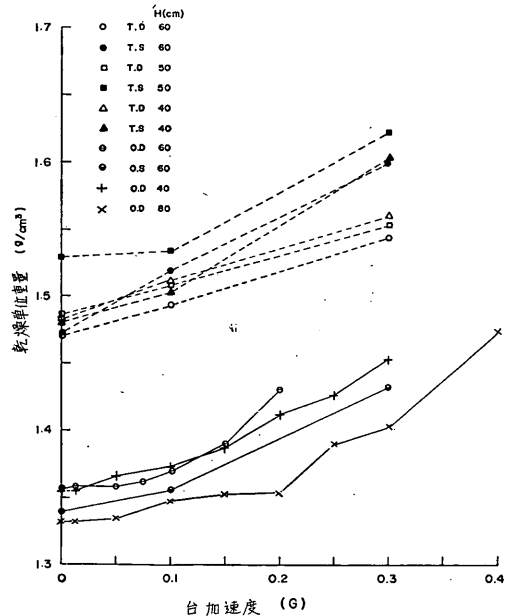


図-13 振動による砂層の乾燥単位重量の変化

飽和砂層の振動性状

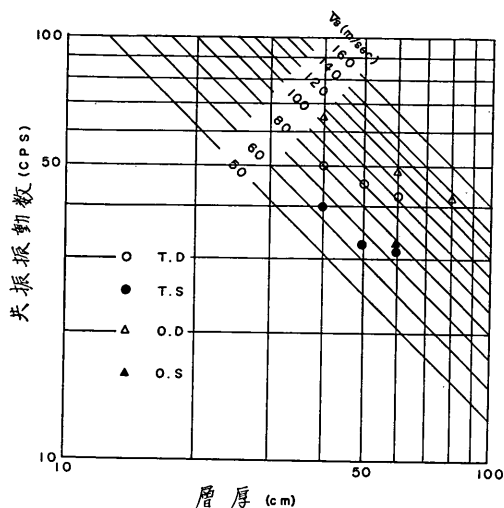


図-14 共振振動数と層厚

の共振振動数を層厚に対してプロットしたもので、図中の直線は  $f_r = V_s / 4H$  の関係を示している。砂層の横波速度が一定ならば、実験値は同一直線上にのるはずである。しかしながら、図-14に見られるように層厚および水の有無の影響が残っているように思われる。それ故、共振振動数の代わりに横波速度をとり、 $\gamma H / 2$  ( $\gamma$  は乾燥状態では乾燥重量、飽和状態では浮力を考慮した水中単位重量を用いた) なる量に対してプロットすると図-15 のようになり、同一種類、同一台加速度ならば、砂層の横波速度は土かぶり圧に支配される量であることが示され

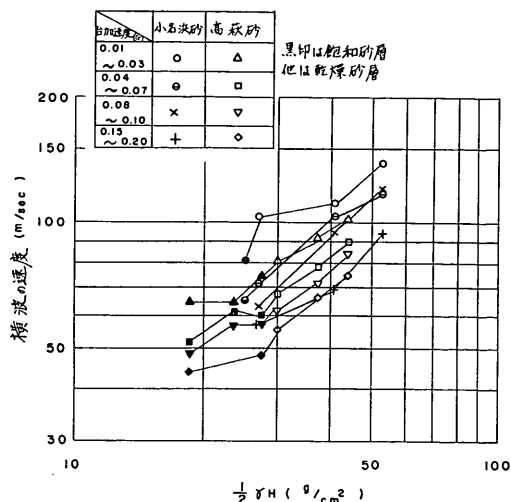


図-15 横波の速度と有効圧力

る。図中の  $V_s$  は図に示した台加速度範囲の平均値であり、 $V_s$  はほぼ  $(\gamma H / 2)^{0.6}$  に比例する。また、 $V_s$  は振動の強さが大きくなると減少する傾向が見られ、本実験では粒径の小さい砂層の方が幾らか  $V_s$  が大きくなっている。

砂の小試料による動弾性係数に関して Hardin 等<sup>10)</sup>の詳細な研究があり、横波の速度と拘束圧 (confining pressure) との関係の1例として図-16が示されている。図-15の台加速度 0.01G ~ 0.03G の値のみを取り出し、 $\gamma H / 2$  を拘束圧に相当すると仮定して同図中に記入した。

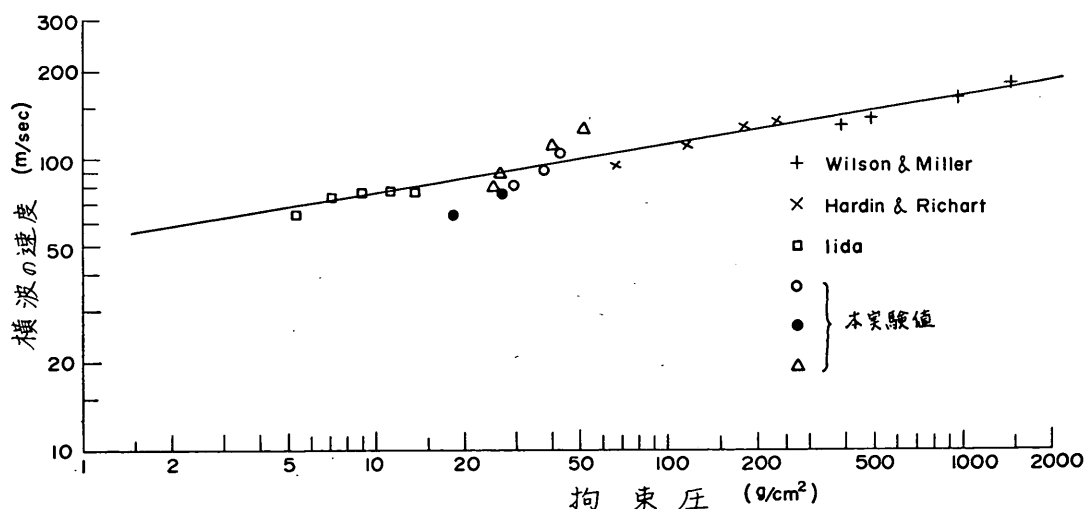


図-16 横波の速度と拘束圧

Hardin 等の研究によれば、 $V_s$  は拘束圧の  $1/2 \sim 1/4$  乗に比例するといわれているが、本実験の値は他の実験値に比して拘束圧の影響が著しい。このことは本実験において  $\gamma H/2$  なる量が拘束圧を表わしていないことにもよると考えられる。図中の点線は拘束圧の  $1/6$  乗に比例する関係を表わすが、各実験値の平均値がこの直線で表わされる傾向のあることは興味深い。なお、弾性球の集合した物質の弾性波速度は Hertz の接触理論を用いて拘束圧の  $1/6$  乗に比例することが求められている<sup>11)</sup>。

このようなことから、本実験における砂層の挙動は複雑であるけれども、剪断振動と仮定して求めた横波速度は、ほぼ砂層の横波速度を表わしていると考えてよい。

### 3-5 砂層の剛性率

前節では砂層の剛性を表わす量として横波の速度を用いたが、砂層の剛性率がどの程度の値であるかを見るために剛性率を求める。この場合、飽和砂層の密度として用いる量をどのように扱ったらよいかが問題になる。

飽和砂層の実験結果を整理する際にも、乾燥砂層と同様に(1)式を用いたが、飽和砂層では間ゲキ水と砂粒子は振動中異った運動をする故、適用する場合次のような注意が必要である。砂粒子の変位を  $X$ 、間ゲキ水の変位を  $X'$  とし、砂粒子の密度を  $\rho_s$ 、水の密度を  $\rho_w$ 、間ゲキ率を  $n$  とすれば、飽和砂層の慣性力は次のようになる。

$$\rho_s(1-n) \frac{\partial^2}{\partial t^2} (X_0 + X) + \rho_w n \frac{\partial^2}{\partial t^2} (X_0 + X')$$

それ故、厳密には砂粒子と水の運動をそれぞれ求めることが必要である。実験ではこのような測定を行っていないので、水と砂粒子とは一体となって運動すると仮定して、飽和砂層の慣性力を

$$[\rho_s(1-n) + \rho_w n] \frac{\partial^2}{\partial t^2} (X_0 + X)$$

として取扱ってきたことになる。したがって、砂層の剛性率を求める場合にその密度として飽和単位重量を重力の加速度で割った値を用いざるを得ない。このようにして求めた剛性率を図-17 に示す。

### 3-6 砂層の剛性率が深さに比例して増加する場合の検討

これまで砂層の剛性率は一様であるとして取扱ってきたけれども、図-17 に示されるように剛性率は有効圧が大きいく程大きくなる結果になった。このことは砂層内では剛性率が一様でなく深さ方向に増加していることを意味している。深さに比例して剛性率が增加する場合のせん断振動理論は古くから多くの研究がなされている。それらの研究<sup>12)</sup>を参考にして実験結果を検討してみる。

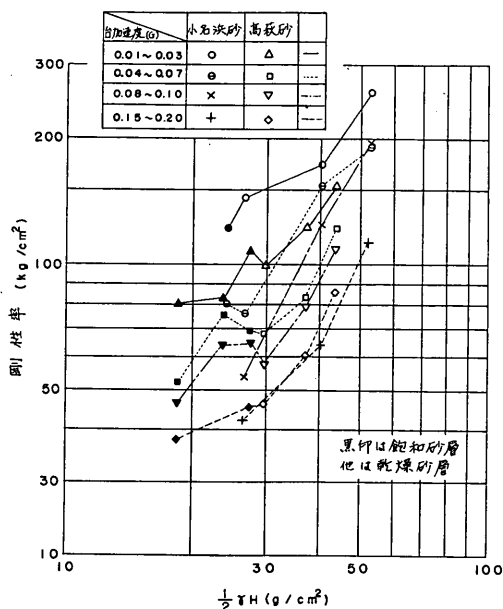


図-17 剛性率と有効圧力

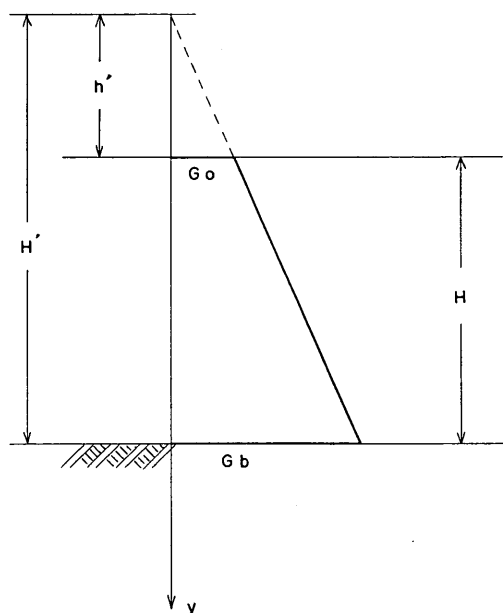


図-18 剛性率の変化と座標軸

(1)式において、

$$G(y) = \left(\frac{y}{h'}\right) G_0, \quad \eta(y) = \left(\frac{y}{h'}\right) \eta_0$$

で与えられる場合を取扱う。ここに  $G_0$ ,  $\eta_0$  はそれぞれ砂層表面における値であって、 $h'$  は図に示すようにと



飽和砂層の振動性状

る。砂層の運動方程式は  $2\varepsilon_s = \eta_0/G_0$ ,  $S_0^2 = \rho h'/G_0$  において

$$\frac{\partial}{\partial y} \left( y \frac{\partial X}{\partial y} \right) + 2\varepsilon_s \frac{\partial}{\partial y} \left\{ y \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\partial X}{\partial y} \right) \right\} = S_0^2 \frac{\partial^2}{\partial t^2} (X + X_0) \dots\dots\dots(9)$$

であって、強制振動が円振動数  $\omega$  の単弦振動である場合に、砂層の加速度応答の倍率および位相差は次式のように求められる。

$$\left| \frac{\dot{X}_0 + \dot{X}}{\dot{X}_0} \right| = \frac{\sqrt{(1 + \sum \alpha_n A_n \Phi_n B_n \cos \varphi_n)^2 + (\sum \alpha_n A_n \Phi_n B_n \sin \varphi_n)^2}}{\dots\dots\dots(10)}$$

$$\tan \psi_n = \frac{\sum \alpha_n A_n \Phi_n B_n \sin \varphi_n}{1 + \sum \alpha_n A_n \Phi_n B_n \cos \varphi_n} \dots\dots\dots(11)$$

ここに

$$\alpha_n = \frac{2\sqrt{H'}}{a_n} \left\{ 1 - \frac{J_0^2(a_n)}{J_1^2(ka_n)} \right\}^{-1/2}$$

$$A_n = \frac{\pi a_n}{2\sqrt{H'}} \left\{ 1 - \frac{J_0^2(a_n)}{J_1^2(ka_n)} \right\}^{-1/2}$$

$$\Phi_n = J_0(a_n \sqrt{y/H'}) Y_0(a_n) - J_0(a_n) Y_0(a_n \sqrt{y/H'})$$

$$B_n = \frac{(\omega/\omega_n)^2}{\sqrt{\{1 - (\omega/\omega_n)^2\}^2 + 4h_n^2(\omega/\omega_n)^2}}$$

$$\tan \varphi_n = \frac{2h_n(\omega/\omega_n)}{1 - (\omega/\omega_n)^2}$$

$$\omega_n = \frac{1}{S_0} \cdot \frac{a_n}{2\sqrt{H'}} = \frac{a_n}{2\sqrt{H'h'}} \cdot \sqrt{\frac{G_0}{\rho}} \dots\dots\dots(12)$$

$$h_n = \frac{\varepsilon_n}{\omega_n} = \frac{a_n}{2\sqrt{H'h'}} \cdot \frac{\eta_0}{2G_0} \cdot \sqrt{\frac{G_0}{\rho}} \dots\dots\dots(13)$$

$$k = \sqrt{\frac{h'}{H'}} = \sqrt{\frac{G_0}{G_b}} \dots\dots\dots(14)$$

$J(y)$ ,  $Y(y)$  はそれぞれ第1種、第2種の Bessel 函数である。また  $a_n$  は次の方程式によって決定される  $n$  番目の根である。

$$J_0(a_n) Y_1(ka_n) - J_1(ka_n) Y_0(a_n) = 0 \dots\dots\dots(15)$$

3-6-1 剛性変化率が固有振動数に及ぼす影響

砂層の固有振動数  $f_n$  は(14)式の剛性変化率  $k$  を用いると次の(16)式で表わされる。

$$f_n = \frac{\omega_n}{2\pi} = \frac{a_n}{4\pi H'} \cdot \frac{1-k^2}{k} \cdot \sqrt{\frac{G_0}{\rho}} \dots\dots\dots(16)$$

また、剛性率が砂層中一様な場合の固有振動数  $f_{nc}$  は  $G = (G_0 + G_b)/2$  と仮定すれば(5)式を参考にして次の(17)式で表わされる。

$$f_{nc} = \frac{(2n-1)}{4H'} \sqrt{\frac{G_0 + G_b}{2\rho}} = \frac{(2n-1)}{4\sqrt{2}H'} \cdot \frac{\sqrt{1+k^2}}{k} \cdot \sqrt{\frac{G_0}{\rho}} \dots\dots\dots(17)$$

(16)式と(17)式で表わされる固有振動数の差は Ambra-

表-4 固有振動数に対する推定誤差 (%)

$G_b/G_0$	K	n=1	n=2	n=3
1.00	1.0000	0.00	0.00	0.00
1.10	0.9535	0.85	0.00	-0.01
1.16	0.9261	1.44	0.08	-0.03
1.21	0.9091	1.78	0.10	-0.04
1.32	0.8687	2.58	0.11	-0.09
1.56	0.8001	3.78	-0.07	-0.41
1.96	0.7143	4.94	-0.55	-1.08
2.25	0.6667	5.84	-0.96	-1.62
4.00	0.5000	7.70	-3.45	-4.68
9.00	0.3333	8.52	-8.05	-10.33
16.00	0.2500	8.45	-11.36	-14.50
25.00	0.2000	8.28	-13.58	-17.43

seys<sup>12)</sup> によって求められているが、同様の方法で検討してみる。

固有振動数の相異を次の量の百分率で表わす。

$$\Delta f(k) = \frac{f_n - f_{nc}}{f_n} \times 100 = \left( 1 - \frac{(2n-1)\pi}{\sqrt{2} a_n} \cdot \frac{\sqrt{1+k^2}}{1-k^2} \right) \times 100 \dots\dots\dots(18)$$

(18)式を3次の固有振動数まで計算した結果を表-4に示す。この表から剛性変化率がかなり大幅に変化しても固有振動数は10%程度変化するに過ぎないことがわかる。

なお  $\Delta f(k)$  を計算する際、 $k \equiv 1$  の時には

$$a_n = \frac{1}{1-k} \cdot \frac{(2n-1)\pi}{2}$$

と表わされるので

$$\Delta f(k) = \left( 1 - \frac{2}{\sqrt{2}} \cdot \frac{\sqrt{1+k^2}}{1+k} \right) \times 100$$

によって計算した。

3-6-2 剛性変化率が加速度分布に及ぼす影響

加速度応答倍率(10)式より求めた砂層高さ方向の分布の例として減衰常数が0.05, 0.1, 0.3について示すと図-19.1~19.3のようである。計算は3次までをとったものであって、 $k$ が0.5位を境として分布形が異なる。実験による加速度応答倍率の高さ方向の分布にこの計算値をあてはめて最も良く適合する場合の減衰常数  $h$  と剛性変化率  $k$  を求めると図-20.1~20.9に示すようである。図中の曲線は求めた計算値であって、 $k$ の値は0.2~0.4である。

一方、先に剛性率が一様として砂層の剛性率  $G$  を求めたが、前項の理論と同様に剛性率が深さに比例して増加する場合の平均剛性率を  $G = (G_0 + G_b)/2$  として、実験

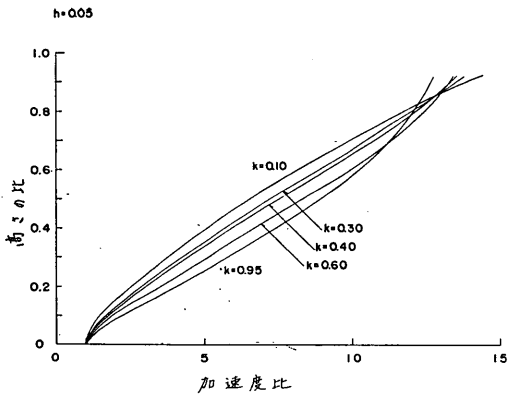


図-19.1 加速度比の深さ方向の分布 (理論曲線)

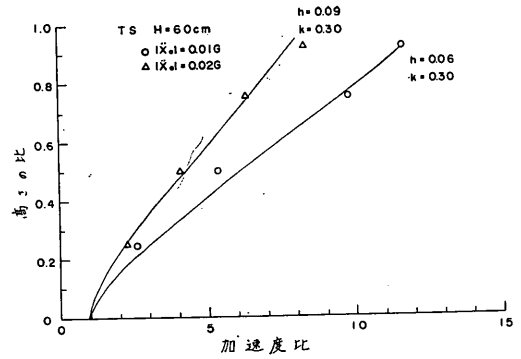


図-20.1 加速度比の深さ方向の分布 (実験値と理論曲線の比較)

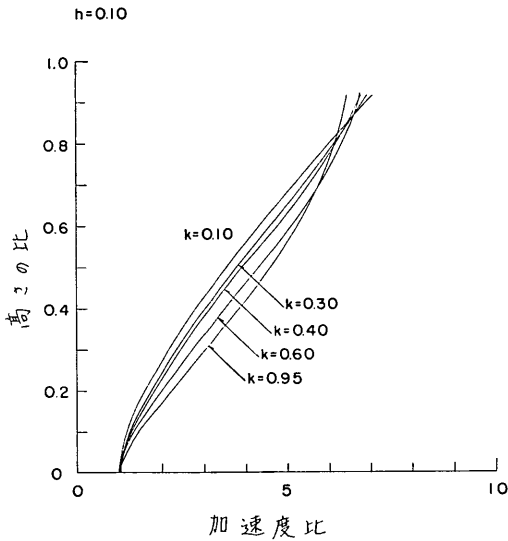


図-19.2 加速度比の深さ方向の分布 (理論曲線)

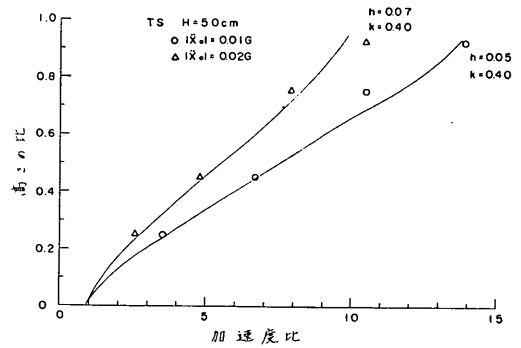


図-20.2 加速度比の深さ方向の分布 (実験値と理論曲線の比較)

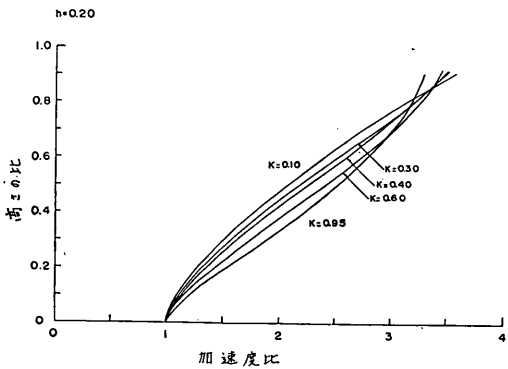


図-19.3 加速度比の深さ方向の分布 (理論曲線)

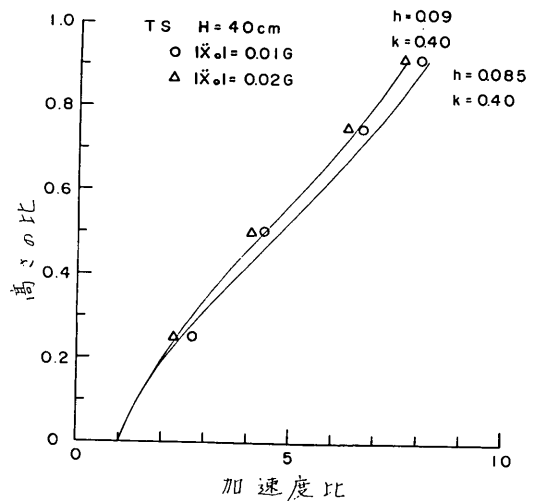


図-20.3 加速度比の深さ方向の分布 (実験値と理論曲線の比較)

飽和砂層の振動性状

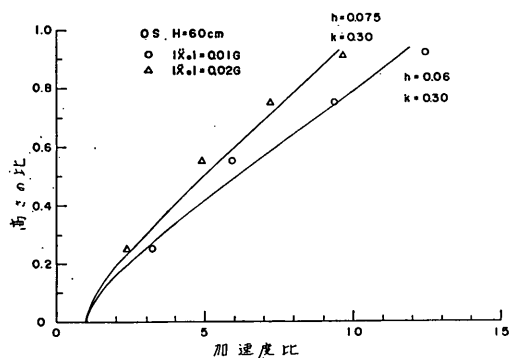


図-20.4 加速度比の深さ方向の分布 (実験値と理論曲線の比較)

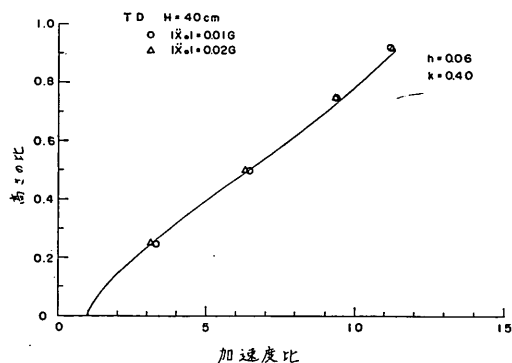


図-20.7 加速度比の深さ方向の分布 (実験値と理論曲線の比較)

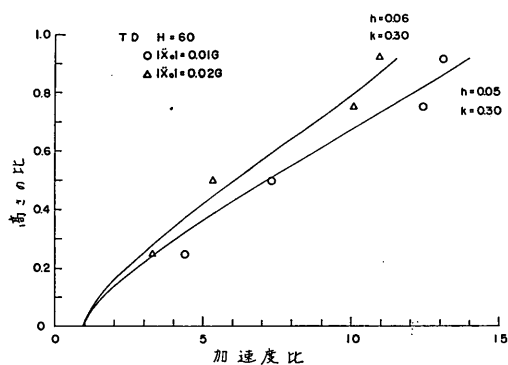


図-20.5 加速度比の深さ方向の分布 (実験値と理論曲線の比較)

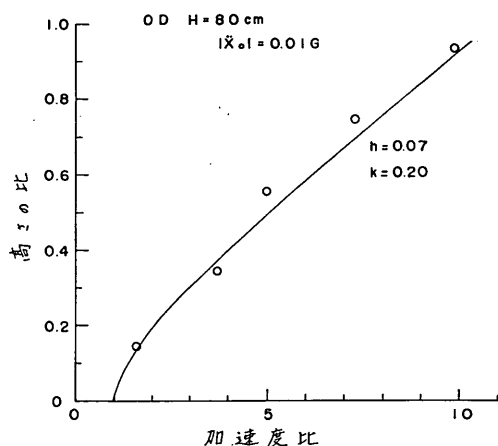


図-20.8 加速度比の深さ方向の分布 (実験値と理論曲線の比較)

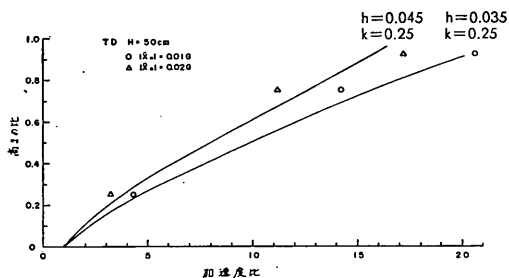


図-20.6 加速度比の深さ方向の分布 (実験値と理論曲線の比較)

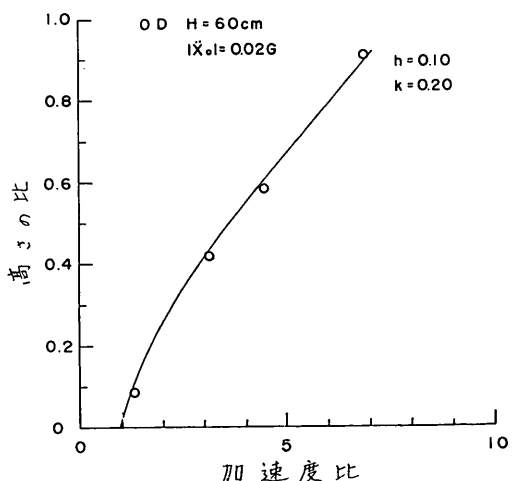


図-20.9 加速度比の深さ方向の分布 (実験値と理論曲線の比較)

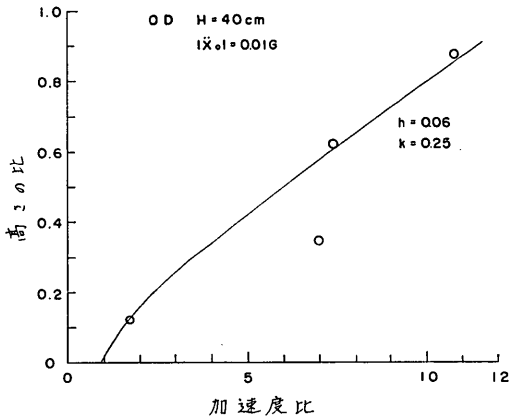


図-20-10 加速度比の深さ方向の分布 (実験値と理論曲線の比較)

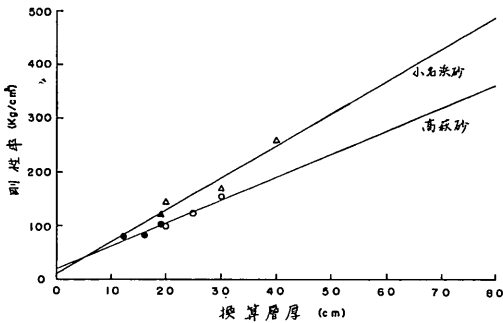


図-21 剛性率と換算層厚

から求めた剛性率と  $\gamma H/2$  の関係を用いて  $k$  の値を推定することができるであろう。そこで、図-17 の横軸を乾燥砂層の場合に換算し砂層厚の半分とすれば、図-21 が得られる。厳密ではないけれども、この図は同一砂層内の剛性率が深さに対して変化する状況を示すものと考えることができるであろう。図から細砂、粗砂の砂層それぞれの剛性率が深さに比例して増大すると仮定して、最小自乗法によって関係式を求めると次式が得られる。

細砂： $G=5.90y+14.1$

粗砂： $G=4.26y+21.1$

この式の常数項を  $G_0$  として、実験した層厚の剛性変化率  $k$  を求めると表-5 のような値が得られる。

このようにして求めた  $k$  は先に加速度応答倍率の深さ方向の分布から求めた値とほぼ同程度になる。それ故、実験した砂層の剛性変化率は 0.2~0.4 程度であって、砂層厚が厚い程、乾燥状態より飽和状態の方が、粗砂より細砂の方が小さくなる傾向があると見なしてよいであろう。

表-5 剛性変化率

層厚 (cm)	$k$			
	細砂		粗砂	
	乾燥	飽和	乾燥	飽和
80	0.170 (0.20)	—	—	—
60	0.205 (0.20)	0.315 (0.30)	0.275 (0.30)	0.329 (0.30)
50	—	—	0.298 (0.25)	0.369 (0.40)
40	0.237 (0.25)	—	0.331 (0.40)	0.413 (0.40)

(註) 表-5 中の括弧内は加速度応答倍率の深さ方向の分布より求めた値。

3-7 砂層の非線型挙動

砂槽内の砂の層の振動時挙動は複雑であるが、変形の小さい低加速度段階においてはかなり弾性的な挙動を示し、その挙動をセン断振動として取り扱ってきた。しかしながら、このような取扱いによって得られた砂層の剛性率は加速度段階が高くなるに伴って低下する傾向があり、また砂層の加速度波形(写真-1.1~3.7)の乱れや振動数特性(図-3.1~5.4)に見られるように、加速度段階が高くなる程非線型挙動が著しく現われている。特に飽和細砂の層の場合に層内の加速度が消滅した状態が現われた。この時に与えた振動は台加速度 0.2G、振動数 14c/s および 0.3G、9c/s 程度である。この現象は砂層との摩擦によって水平方向に運動した加速度変換器が砂層との摩擦を消失したために生じたものと考えられる。したがって、砂層もまたセン断抵抗を失って流体化した状態になったのではないかと推察される。なお、この時ガラス面からの観測によると砂層内を気泡の上昇するのが見られ、砂層内の気泡の影響もあるのではないと思われる。

加速度波形の乱れは加速度段階が飽和砂層で 0.06G、乾燥砂層で 0.1G 位から著しくなるのが見られ、これにほぼ対応して振動数特性にも異状が認められる。振動数特性には主な peak より低い振動数においても peak が現われており、この現われ方が前記の加速度段階以上ではより明瞭になる。この peak について検討することも重要であると考えられるが、今回は明らかにすることができなかった。

本実験ではゆる詰め砂層に次から次へと振動数を変え

## 飽和砂層の振動性状

た加速度を与えたので、各加速度段階、各振動数毎にそれまでに受けた履歴が違っており、力とか変形の大きさに関係する砂層の非線型挙動を定量的に扱うことはむづかしい問題である。

砂層の振動は変形が小さい場合には、粒径、層厚、間隙比、拘束圧などによって決まる弾性に近い振動であるが、変形が増大するにつれて、変形、変形速度、変形加速度によって砂層の性質が変化し、不安定な振動状態が現われものと考えられる。特に飽和砂層の場合には間隙水圧の上昇によって異常な剛性の低下が生じる。このような実験結果は単純化された砂層の模型に関して得られたもので、地震時における砂地盤の挙動を示すものでないが、横波の速度と拘束圧との関係、剛性率が深さに比例して増加する場合の考察などから、その挙動を推定する手掛りが得られるかも知れない。砂層の非線型挙動の解明とともにこれらの問題を明らかにする研究を続けることが必要である。

### 4. あとがき

水で飽和している砂層の振動性状を加速度応答特性を求める実験によって調べた。実験結果は乾層砂層の場合と同様に剛性率の一樣なセン断振動体と仮定して整理し、砂層の剛性率、減衰常数などの値とそれらが加速度段階（変形の大きさ）によって変わる状況を求めた。その結果をまとめると次のようになる。

(1) 水と砂粒子との相互作用を明確にすることができなかったけれども、次に述べる点を考慮すれば、変形の小さい領域における飽和砂層の振動性状も乾燥砂層の場合とほぼ同様である。(a) 水と砂粒子とは一体になって運動するものとする。(b) 剛性率は土かぶり圧によって変化するが、飽和砂層の土かぶり圧には浮力を考慮した有効圧を用いる。

(2) 変形の大きい領域においては、間ゲキ水の影響によって剛性の急激な低下が生ずる。(流動化現象)

(3) 剛性率が深さに比例して増加するセン断振動理論によって実験結果を検討し、実験砂層の剛性変化率を推定した。

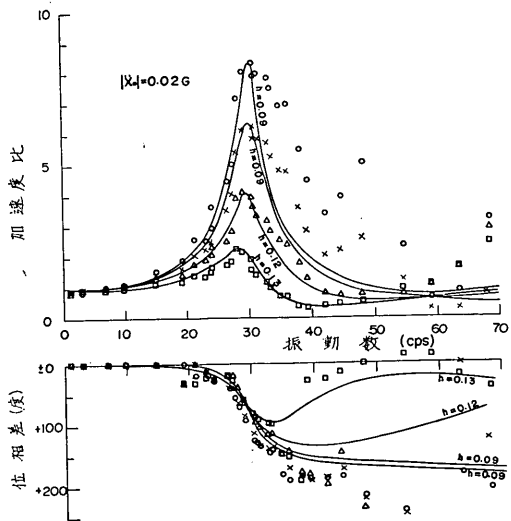
(4) 実験砂層の横波速度は従来種々の方法で求められ

てきている値とほぼ同程度であることが示された。

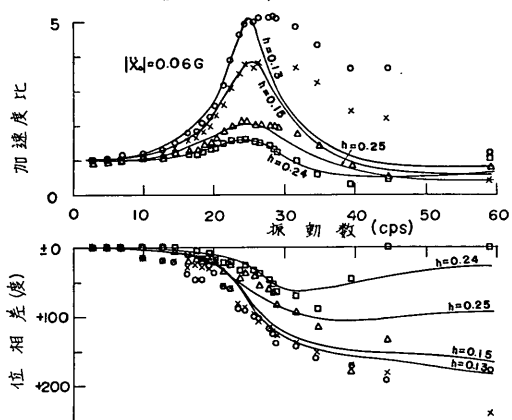
水と砂粒子との相互作用、流動化現象を含めた砂層の非線型挙動、実験結果の自然地盤への適用などの重要な問題を解明することはできなかったが、砂層の剛性率、減衰常数の値が求められ、それらの値に影響を及ぼす量との関係を示すことができ、港湾構造物模型振動実験を実施する際に必要な資料になり、(3)、(4)項で述べたことは自然地盤の地震時挙動を実験結果から推定する際の手掛りを与えるものと考えられる。

### 参考文献

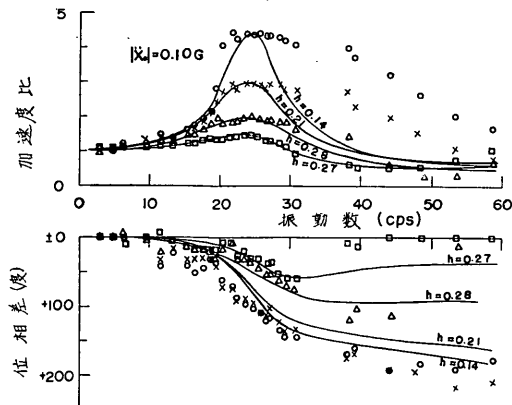
- 1) 荒井秀夫, 梅原靖文 1967, 乾燥砂層の振動性状, 港研報告, Vol. 6, No. 5
- 2) Jacobsen, L.S. 1930, Motion of a Soil Subjected to a Simple Harmonic Ground Vibration, Bull. Seism. Soc. America., Vol. 20, No. 3
- 3) 松尾春雄, 大原資生 1955, 水に飽和された土の振動圧力, 土木学会誌, 40巻6号
- 4) 石井靖丸, 土田肇, 古部哲兵 1963, 振動時の飽和砂の土圧と間げき動水圧に関する研究, 港研報告, Vol. 2, No. 2
- 5) Florin, V.A. and Ivanov, P.L. 1961, Liquefaction of Saturated Sandy Soils, Proc. 5th. Int. Conf. S.M.F.E.
- 6) Maslov, N.N. 1957, Questions of Seismic Stability of Submerged Sandy Foundations and Structures, Proc. 4th. Int. Conf. S.M.F.E.
- 7) Seed, H.B. 1966, Liquefaction of Saturated Sands During Cyclic Loading, Proc. A.S.C.E., SM6
- 8) 土田肇 1968, 振動により流動化した砂層が壁体に及ぼす圧力, 土と基礎, Vol. 16, No. 5
- 9) Iida, K., 1938, The Velocity of Elastic Waves in Sand, Bull. Earthq. Res. Inst., Vol. 16, pp. 131-144
- 10) Hardin, B.O. and Richart, F.E., 1963, Elastic Wave Velocity in Granular Soils. Proc. A.S.C.E., SM1
- 11) Deresiewicz, H., 1958, Mechanics of Granular Matter, Advance in Applied Mechanics, Vol. 5, pp. 233-306
- 12) Ambraseys, N.N., 1959, A Note on the Response of an Elastic Overburden of Varying Rigidity to an Arbitrary Ground Motion, Bull. Seism. Soc. America, Vol. 49, No. 3 (1969.1.8 受付)



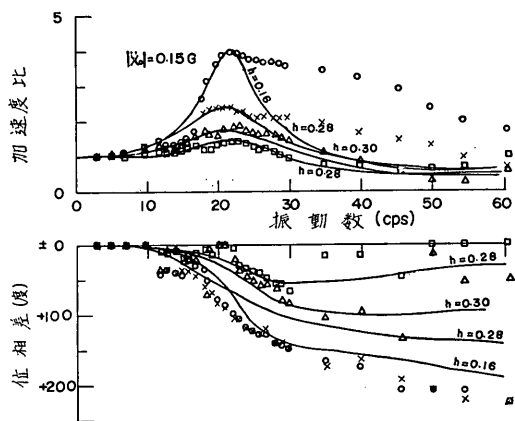
付図-1.1 加速度応答特性 ( $H=60$  cm, 高萩飽和砂, 台加速度=0.02 G)



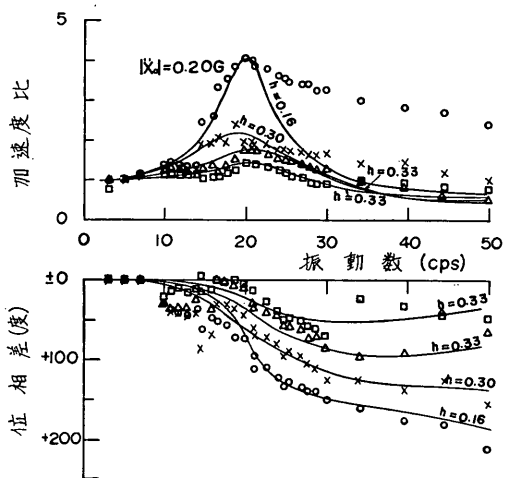
付図-1.2 加速度応答特性 ( $H=60$  cm, 高萩飽和砂, 台加速度=0.06 G)



付図-1.3 加速度応答特性 ( $H=60$  cm, 高萩飽和砂, 台加速度=0.1 G)

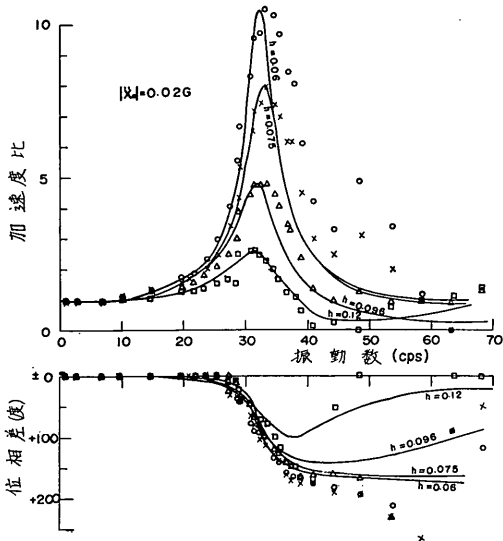


付図-1.4 加速度応答特性 ( $H=60$  cm, 高萩飽和砂, 台加速度=0.15 G)

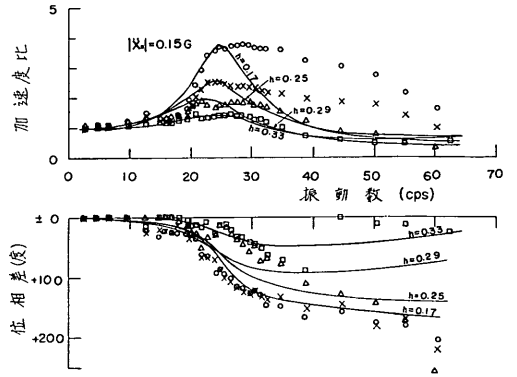


付図-1.5 加速度応答特性 ( $H=60$  cm, 高萩飽和砂, 台加速度=0.2 G)

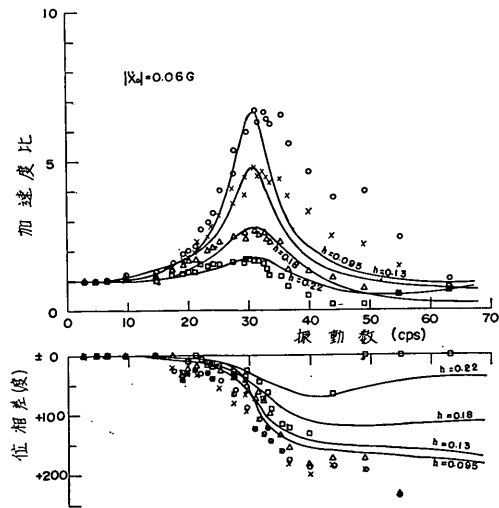
飽和砂層の振動性状



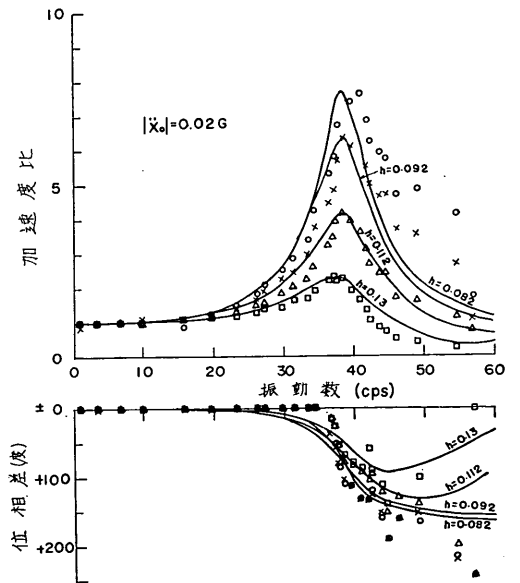
付図-2.1 加速度応答特性 ( $H=50$  cm, 高萩飽和砂, 台加速度=0.02 G)



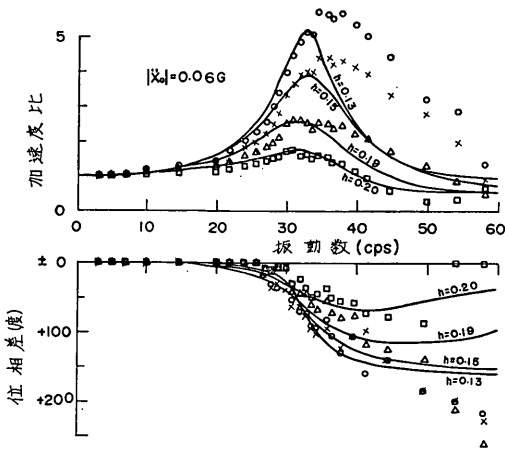
付図-2.3 加速度応答特性 ( $H=50$  cm, 高萩飽和砂, 台加速度=0.15 G)



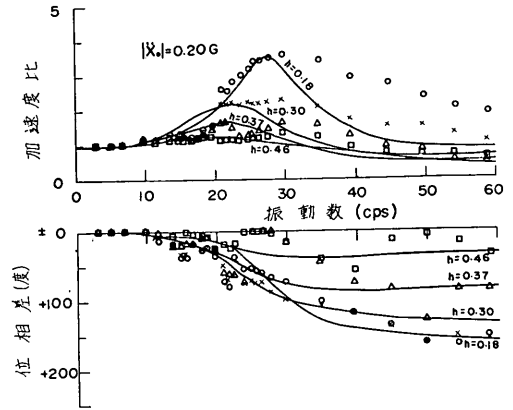
付図-2.2 加速度応答特性 ( $H=50$  cm, 高萩飽和砂, 台加速度=0.06 G)



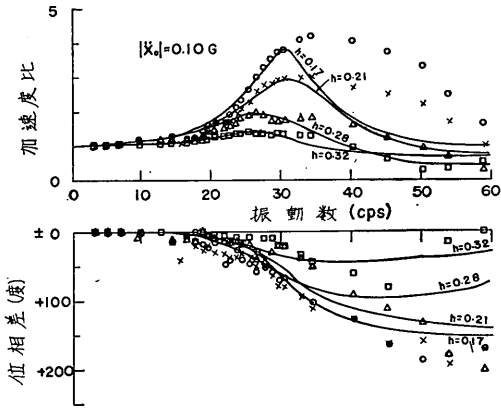
付図-3.1 加速度応答特性 ( $H=40$  cm, 高萩飽和砂, 台加速度=0.02 G)



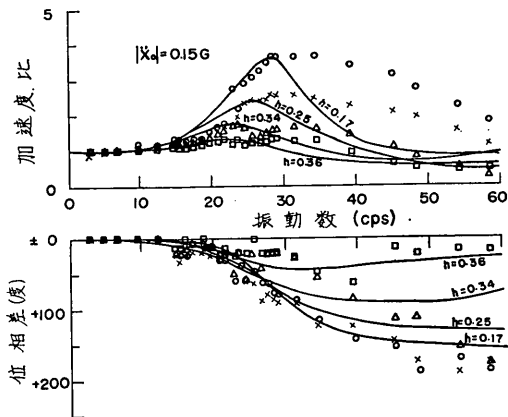
付図-3.2 加速度応答特性 ( $H=40$  cm, 高萩飽和砂, 台加速度=0.06 G)



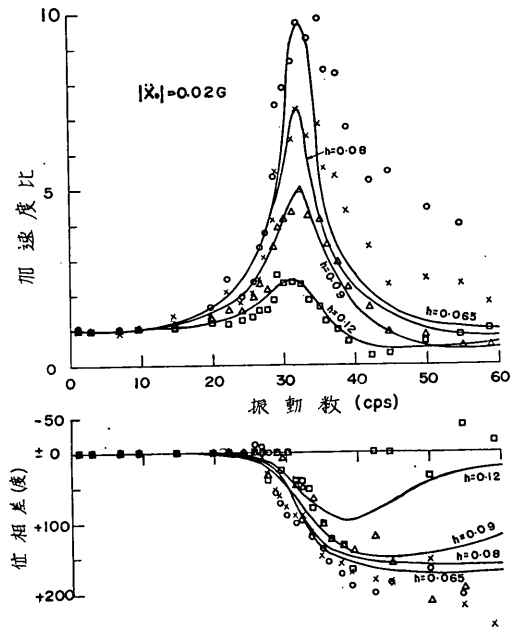
付図-3.5 加速度応答特性 ( $H=40$  cm, 高萩飽和砂, 台加速度=0.2 G)



付図-3.3 加速度応答特性 ( $H=40$  cm, 高萩飽和砂, 台加速度=0.1 G)



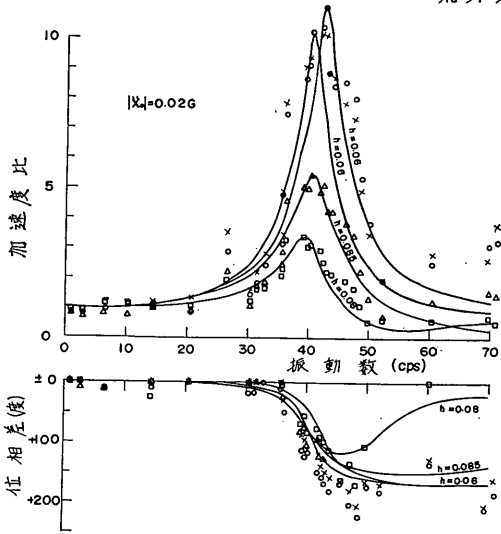
付図-3.4 加速度応答特性 ( $H=40$  cm, 高萩飽和砂, 台加速度=0.15 G)



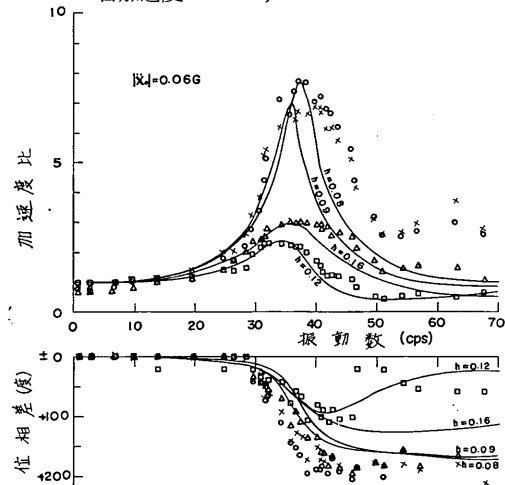
付図-4.1 加速度応答特性 ( $H=60$  cm, 小名浜飽和砂, 台加速度=0.02 G)



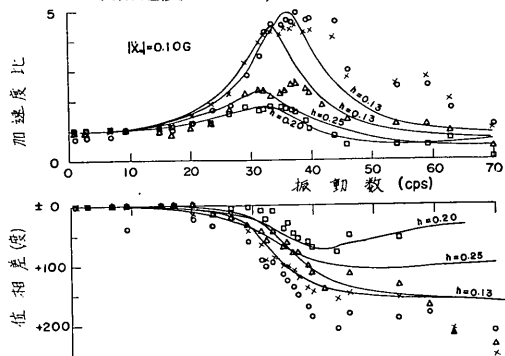




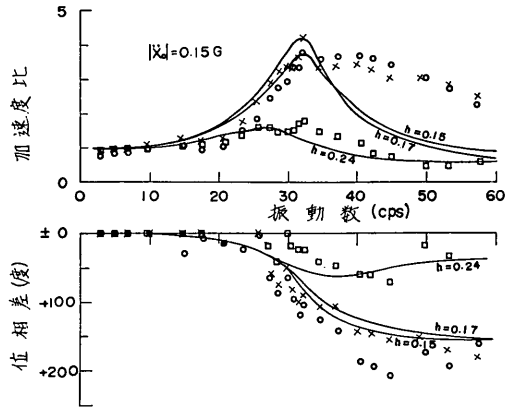
付図-5.2 加速度応答特性 ( $H=60$  cm, 高萩乾燥砂, 台加速度=0.02 G)



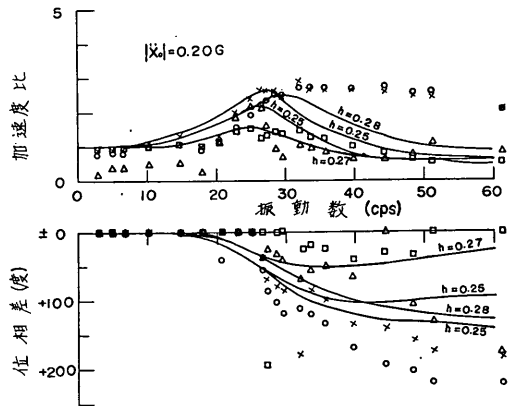
付図-5.3 加速度応答特性 ( $H=60$  cm, 高萩乾燥砂, 台加速度=0.06 G)



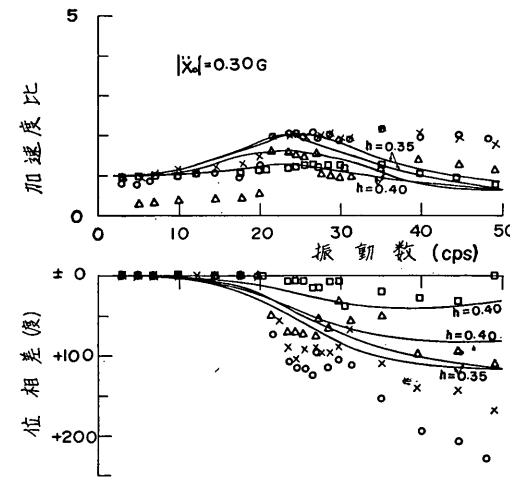
付図-5.4 加速度応答特性 ( $H=60$  cm, 高萩乾燥砂, 台加速度=0.10 G)



付図-5.5 加速度応答特性 ( $H=60$  cm, 高萩乾燥砂, 台加速度=0.15 G)

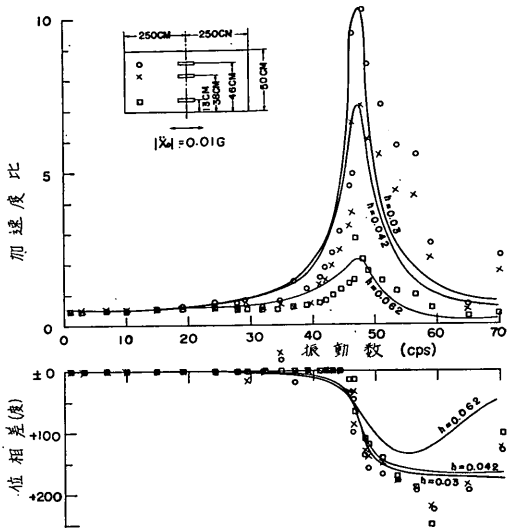


付図-5.6 加速度応答特性 ( $H=60$  cm, 高萩乾燥砂, 台加速度=0.2 G)

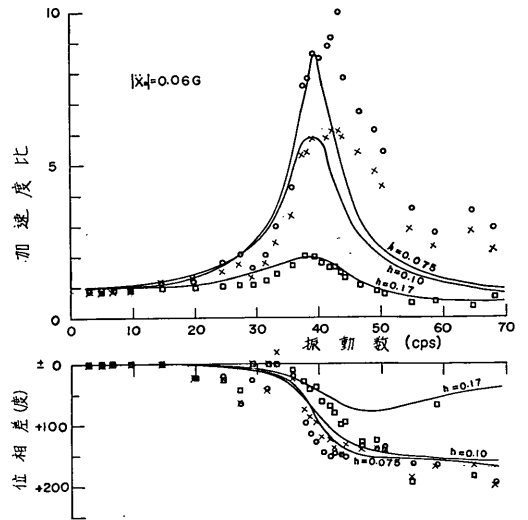


付図-5.7 加速度応答特性 ( $H=60$  cm, 高萩乾燥砂, 台加速度=0.3 G)

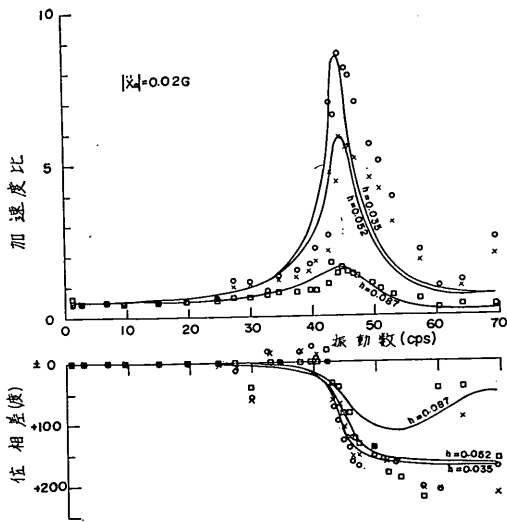
飽和砂層の振動性状



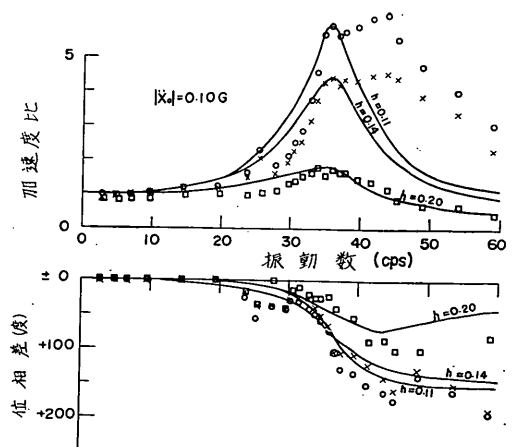
付図-6.1 加速度応答特性 ( $H=50$  cm, 高萩乾燥砂, 台加速度=0.01 G)



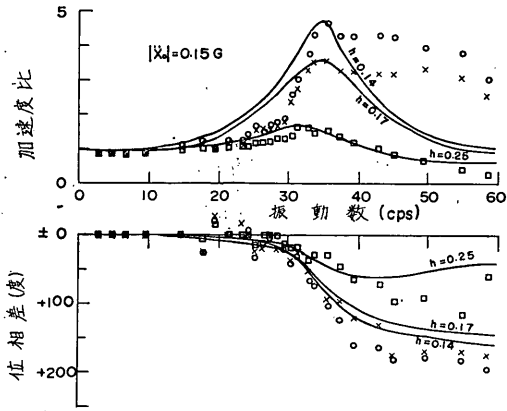
付図-6.3 加速度応答特性 ( $H=50$  cm, 高萩乾燥砂, 台加速度=0.06 G)



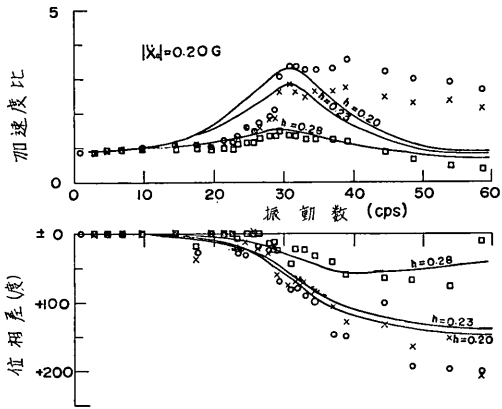
付図-6.2 加速度応答特性 ( $H=50$  cm, 高萩乾燥砂, 台加速度=0.02 G)



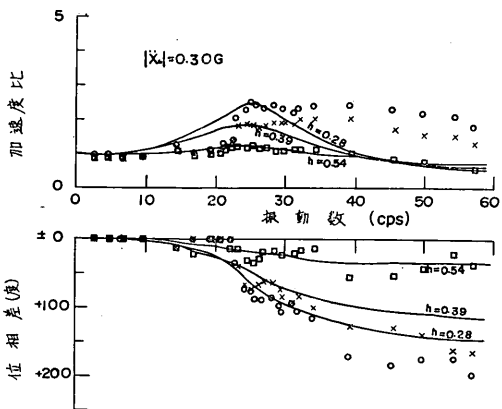
付図-6.4 加速度応答特性 ( $H=50$  cm, 高萩乾燥砂, 台加速度=0.1 G)



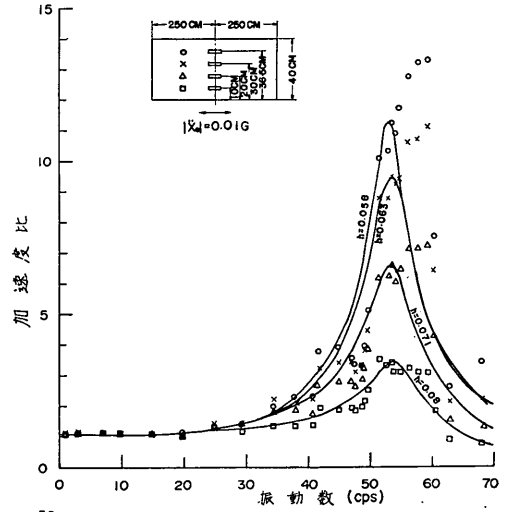
付図-6.5 加速度応答特性 ( $H=50$  cm, 高萩乾燥砂, 台加速度=0.15 G)



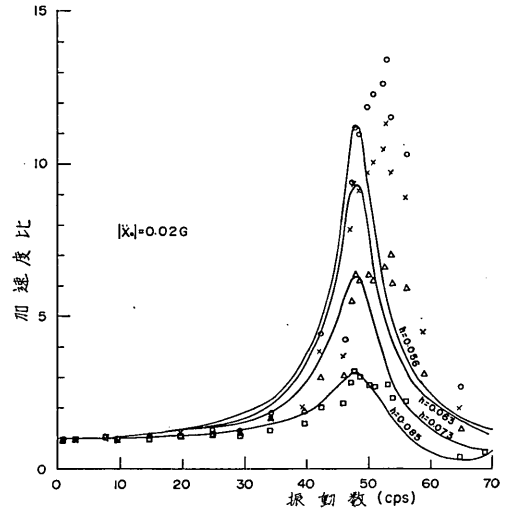
付図-6.6 加速度応答特性 ( $H=50$  cm, 高萩乾燥砂, 台加速度=0.2 G)



付図-6.7 加速度応答特性 ( $H=50$  cm, 高萩乾燥砂, 台加速度=0.3 G)

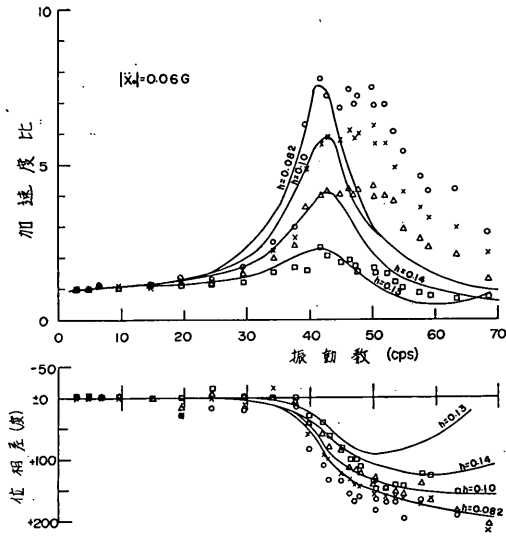


付図-7.1 加速度応答特性 ( $H=40$  cm, 高萩乾燥砂, 台加速度=0.01 G)

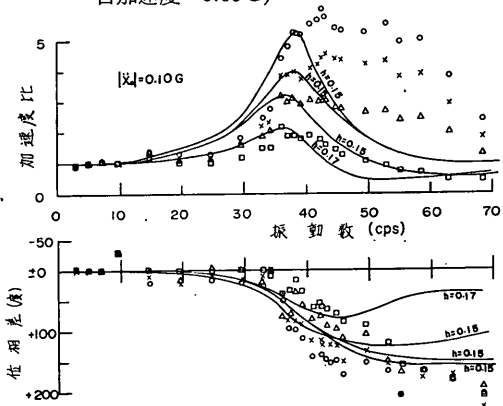


付図-7.2 加速度応答特性 ( $H=40$  cm, 高萩乾燥砂, 台加速度=0.02 G)

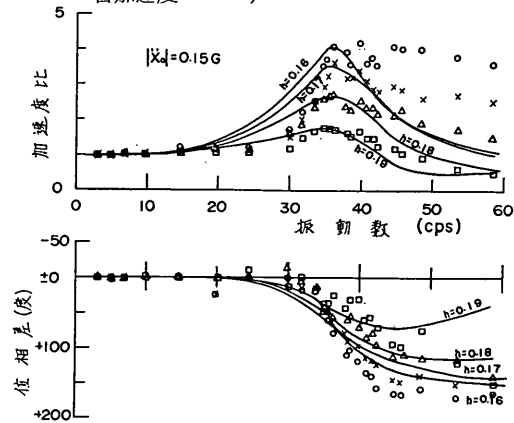
飽和砂層の振動性状



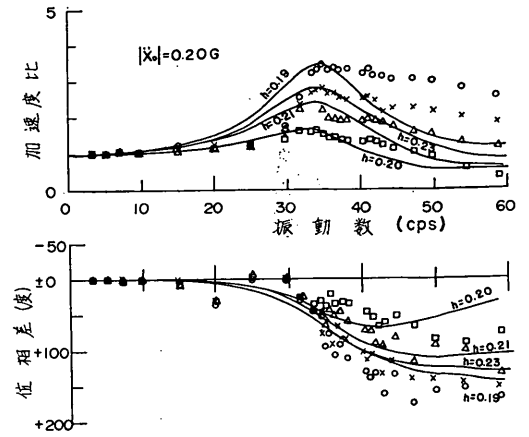
付図-7.3 加速度応答特性 ( $H=40$  cm, 高萩乾燥砂, 台加速度=0.06 G)



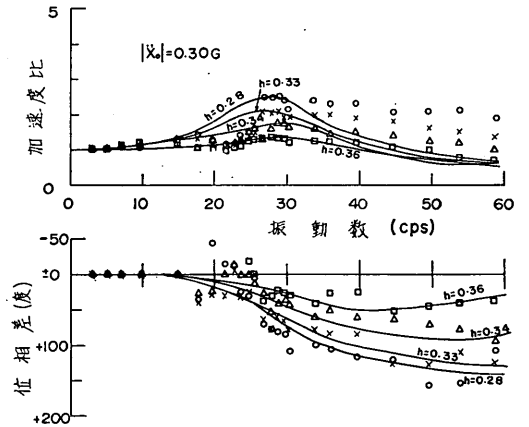
付図-7.4 加速度応答特性 ( $H=40$  cm, 高萩乾燥砂, 台加速度=0.1 G)



付図-7.5 加速度応答特性 ( $H=40$  cm, 高萩乾燥砂, 台加速度=0.15 G)

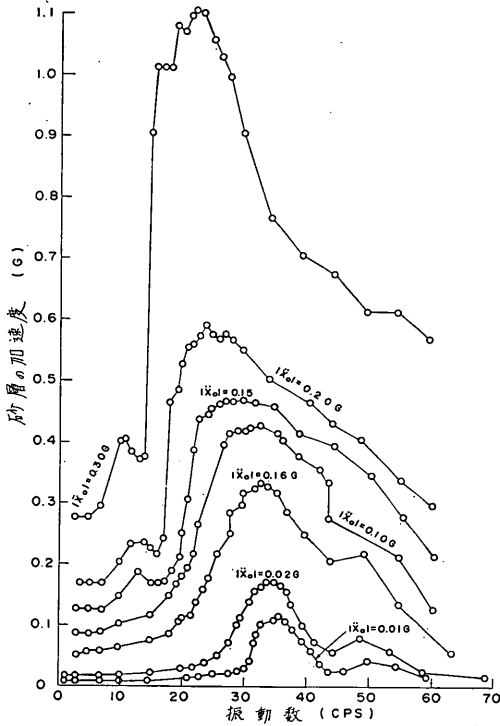


付図-7.6 加速度応答特性 ( $H=40$  cm, 高萩乾燥砂, 台加速度=0.2 G)



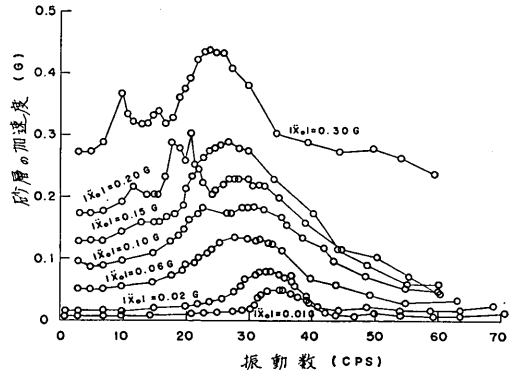
付図-7.7 加速度応答特性 ( $H=40$  cm, 高萩乾燥砂, 台加速度=0.3 G)

高萩飽和砂 ( $\gamma_H = 46/50$ )



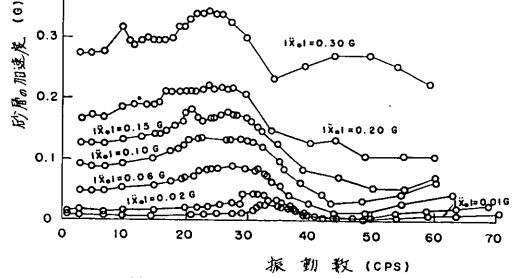
付図-8.1 砂層の振動数特性

高萩飽和砂 ( $\gamma_H = 25/50$ )



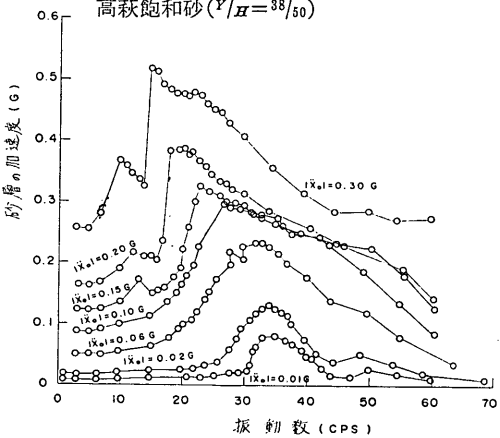
付図-8.3 砂層の振動数特性

高萩飽和砂 ( $\gamma_H = 18/50$ )



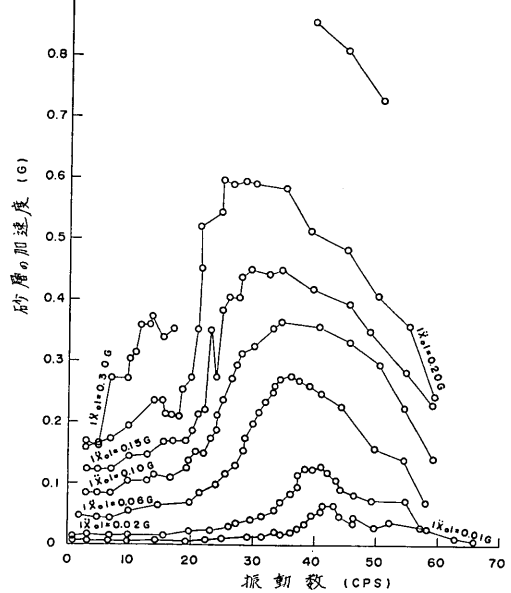
付図-8.4 砂層の振動数特性

高萩飽和砂 ( $\gamma_H = 38/50$ )



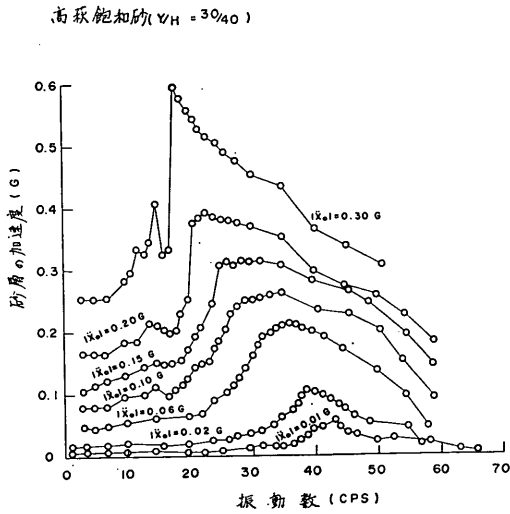
付図-8.2 砂層の振動数特性

高萩飽和砂 ( $\gamma_H = 36/50$ )



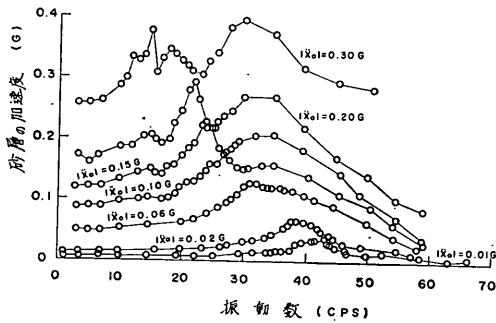
付図-9.1 砂層の振動数特性

飽和砂層の振動性状



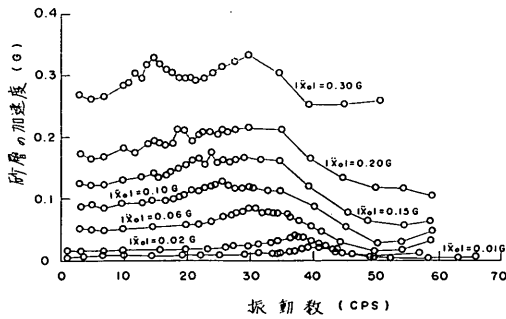
付図-9.2 砂層の振動数特性

高萩飽和砂 ( $Y/H = 20/40$ )



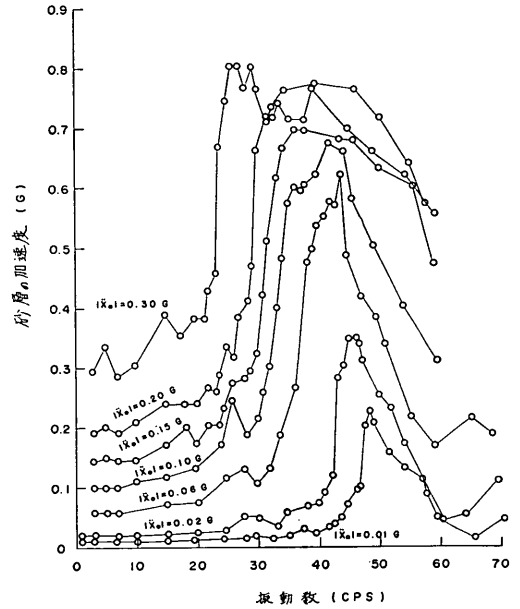
付図-9.3 砂層の振動数特性

高萩飽和砂 ( $\psi_H = 10/40$ )



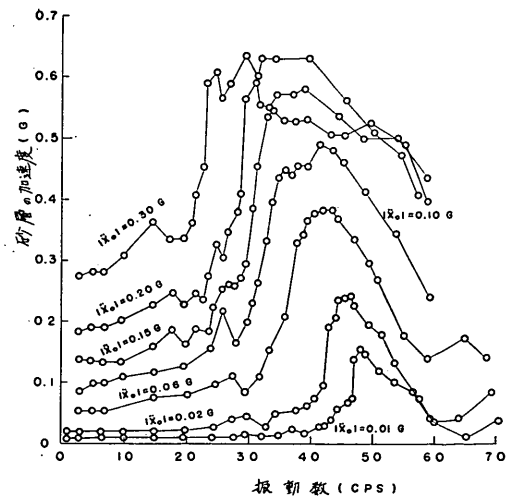
付図-9.4 砂層の振動数特性

高萩乾燥砂 ( $\psi_H = 46/50$ )



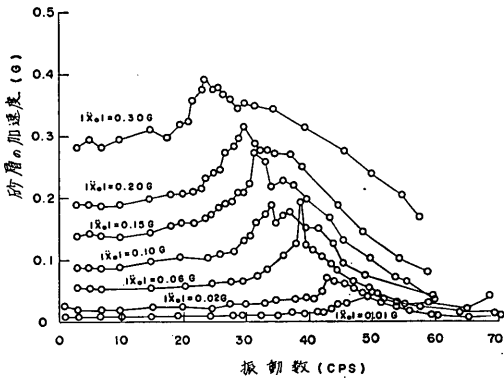
付図-10.1 砂層の振動数特性

高萩乾燥砂 ( $Y/H = 38/50$ )



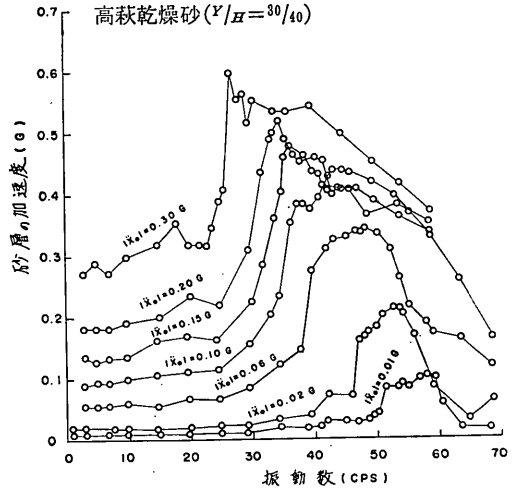
付図-10.2 砂層の振動数特性

高萩乾燥砂 ( $\gamma_H = 13/50$ )



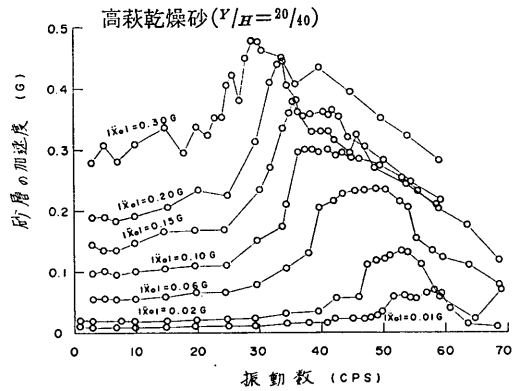
付図-10.3 砂層の振動数特性

高萩乾燥砂 ( $\gamma_H = 30/40$ )



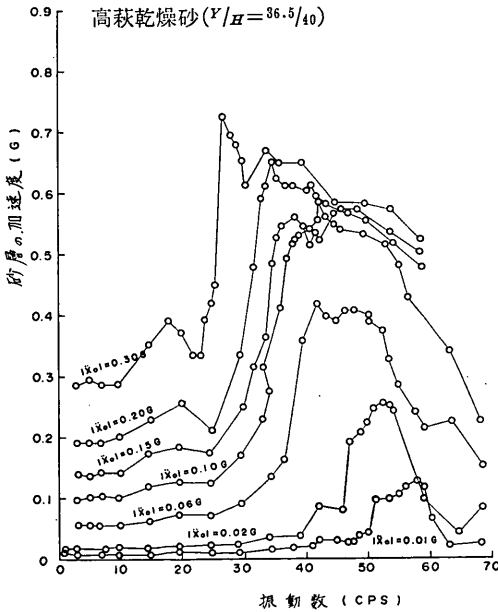
付図-11.2 砂層の振動数特性

高萩乾燥砂 ( $\gamma_H = 20/40$ )



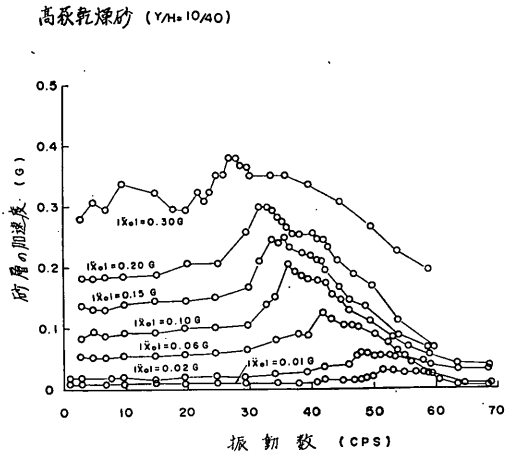
付図-11.3 砂層の振動数特性

高萩乾燥砂 ( $\gamma_H = 36.5/40$ )



付図-11.1 砂層の振動数特性

高萩乾燥砂 ( $\gamma_H = 10/40$ )



付図-11.4 砂層の振動数特性