

運輸省港湾技術研究所

港湾技術研究所 報告

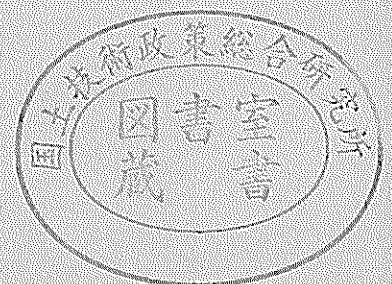
REPORT OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH
INSTITUTE
MINISTRY OF TRANSPORT

VOL. 13

NO. 2

JUNE 1974

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN



港湾技術研究所報告 (REPORT OF P.H.R.I.)

第13巻 第2号 (Vol. 13, No. 2), 1974年6月 (June 1974)

目 次 (CONTENTS)

1. 石灰による深層混合処理工法 (第3報)
… 奥村樹郎・寺師昌明・光 本 司・吉田富雄・渡辺光男…… 3
(Deep-Lime-Mixing Method for Soil Stabilization (3rd Report)
…………… Tatsuro OKUMURA, Masaaki TERASHI, Tsukasa MITSUMOTO,
Tomio YOSHIDA and Mitsuo WATANABE)
2. 軽量ブロックによる土圧低減工法…………… 善 功 企・沢口正俊・
中瀬明男・高橋邦夫・篠原邦彦・橋本光寿…… 45
(A Method to Decrease Active Earth Pressure by Applying the Light-weight Blocks
as Back-filling
…… Kouki ZEN, Masatoshi SAWAGUCHI, Akio NAKASE, Kunio TAKAHASHI,
Kunihiko SHINOHARA and Kouji HASHIMOTO)
3. 砂層の振動性状…………… 荒井秀夫・岩淵守義・中沢定男・北島誠治…… 65
(Vibrational Properties of Sand Layers
…………… Hideo ARAI, Moriyoshi IWABUCHI, Sadao NAKAZAWA and
Seiji KITAJIMA)

3. 砂層の振動性状

荒井秀夫*・岩淵守義**・中沢定男***・北島誠治***

要 旨

岸壁のような土に関係する構造物の耐震性を振動台による模型実験によって検討しようとする時、実験に適する模型材料を求めることがむずかしいので、土を用いて実験する場合がある。このような実験を行う際には、土の振動性状を調べて、実験の相似性を吟味しておくことが必要である。その第1段階として、振動台によって砂層の振動性状を調べ、乾燥砂層および飽和砂層の振動性状を既に報告した。それらの報告の実験において、砂層に与えた振動の波数は任意の数であったが、今回、振動の波数を各振動数 10 波に規制し、また、飽和砂層では動間げき水圧を測定する実験を行った。実験から求めた砂層のせん断弾性係数および減衰常数の拘束圧およびせん断ひずみによる変化を、これまでに発表されている砂の小試料による実験と比較し、振動台による砂層の実験が砂の動的性質を求める実験に占める位置を明らかにした。

* 構造部 振動研究室長
** 前構造部 振動研究室
*** 構造部 振動研究室

Vibrational Properties of Sand Layers

Hideo ARAI*

Moriyoshi IWABUCHI**

Sadao NAKAZAWA***

Seiji KITAJIMA***

Synopsis

When we shall try the model test using the shaking table, to investigate the earthquake resisting features of structure such as quay wall which is remarkably affected by the dynamical properties of soils, we have difficulty that we can not obtain the suitable materials to satisfy the similarity of the model test, and use necessarily the soils in the model test. Therefore, we must investigate the dynamical properties of soils before the investigation.

As the first stage of the investigation, we previously investigated the vibrational properties of dry and saturated sand layers. In that papers, we dealt with the tests in which the number of cycles of vibration loaded on the sand layers was arbitrary.

In the present paper, we shall try the tests in which the number of cycles of vibration loaded on the sand layers is ten cycles for each frequency of vibration and the pore water pressure in the saturated sand layers is measured. The relations between the shear modulus of sand layers and the confining pressure as well as the shear strain, and the relation between the damping constant of sand layers and the shear strain obtained by the tests are compared with the results of other studies obtained by the tests of small sand samples. As the result of comparison, it is clear that the results obtained by our tests do not contradict with the results obtained by other studies.

* Chief of the Vibration Laboratory, Structures Division.

** Ex-Member of the Vibration Laboratory, Structures Division.

*** Member of the Vibration Laboratory, Structures Division.

目 次

要 旨	65
1. はじめに	69
2. 今回実施した実験の概要	69
3. 砂層の加速度応答	71
4. 砂層の変形	73
5. 砂層内の動間げき水圧	75
6. 砂層の変形に伴う振動性状の変化	78
7. 砂層の振動性状に対する拘束圧の影響	80
8. む す び	81
参 考 文 献	82

1. はじめに

岸壁、護岸等の耐震性を振動台を使用する模型実験によって検討する際、地盤や裏込に対する模型材料として土と相似な材料を得ることがむずかしいため、土を模型材料に使用せねばならない。土は土粒子骨格構造、粒径飽和度、拘束圧、間げき比、ひずみ振幅、与える振動の振動数、荷重の増加度などの要素によって、その動的性質が変化することが知られている。それ故、これらの要素による動的性質の変化状況を求めておけば、模型振動実験を有効に実施できるのではないかと考えられる。

土として砂を使用する場合の砂層の動的性質の変化状況について、動電型振動台により細砂および粗砂の乾燥、飽和両状態の実験を行い、「乾燥砂層の振動性状¹⁾」および「飽和砂層の振動性状²⁾」として既に報告した。それらの報告において、砂層の変形の増大に伴って砂層のせん断弾性係数、減衰常数等の動力学の性質が著しく変化することが明らかにされた。

土の動的性質は古くから土の円筒形試料に振動を与えて、共振時における振動数および振幅の測定により求められてきたが³⁾、変形の増大に伴う土の動的性質の変化は確かめられていなかった。第1発表後、土の小試料による実験によって、変形の増大に伴う土の動的性質の変化に関する報告が数多く発表されてきている^{4),5),6),7)}。これら土の小試料による実験においては拘束圧を制御することができるため、拘束圧のかなり大幅な範囲に対して測定が行われている。一方、振動台による砂層の実験では拘束圧は土かぶり圧として推定するほか方法がなく、また、砂層内のひずみ分布が原理的に一様でない等の欠点が存在するため、土の動的性質を精度良く求めるには適していないが、岩盤から横波が地表層に伝わる場合の地表層の振動を砂層の振動に対応させることができる利点がある。したがって、振動台上で砂層を用いる模型実験を行う際には、振動台による砂層の実験から求めた砂の動的性質と砂の小試料による実験から求めたものとを結び付けた上で、原型との相似を検討することが必要になる。

これまでに乾燥砂層の振動性状および飽和砂層の振動性状として報告した実験では、振動台に与えた振動が各振動数毎に任意の波数の正弦波であった。これに対して今回は、各振動数毎に10波と規定した正弦波を与え、さらに飽和状態では砂層内に動間げき水圧計を設置し、砂

層内の動水圧を測定する実験を細砂および粗砂の乾燥および飽和状態について追加し、前報の実験値を含めて、これまで発表されている小試料の実験値と比較検討し、模型振動実験の相似性を考察する際の基礎資料を求めようとした。

2. 今回実施した実験の概要

今回の実験では、前に報告した場合と同様、動電駆動方式の振動台上の実験槽（内法寸法 5 m × 1.5 m × 1.5 m）にゆるづめ状態に小名浜砂とよばれる細砂および高萩砂とよばれる粗砂をつめ、振動を与えた。つめた砂層の厚さはすべて 60 cm であり、細砂、粗砂とも乾燥、飽和の両状態について実験を行った。前に報告した実験と異なる点は (1) 飽和状態の実験では砂層中央の 図-1 に示

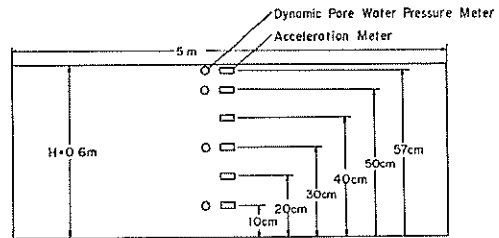


図-1 砂層内の測定器の配置

す位置に動間げき水圧計を設置して砂層内の動間げき水圧を測定したこと、(2) 振動台の振動として磁気テープに入れておいた 5 Hz より 80 Hz までの振動数毎に 10 波の正弦波形の振動を用いたことである。この結果、飽和状態における動間げき水圧の砂粒子に対する効果を把握することができ、砂層が液状化する状況を明らかにすることができ、また、砂層に与えられる振動の波数の動的性質に及ぼす効果を把握することができるようになった。

使用した砂の物理的性質は表-1 に示すものである。

砂層内の加速度の測定には、前報と同じく、上下面に十字の滑り止めを付けた耐水容器に入れた非接着ひずみゲージ型の加速度計を用いた。砂層内の動間げき水圧の測定には、半導体のピエゾ抵抗効果を利用した圧力計を用いた。これは直径、4 mm、厚さ 0.1 mm の受圧板に半導体ゲージを貼り付け、受圧板前面に設けた 0.05 mm の網目を通して受圧板に作用する水圧を半導体ゲージの抵抗変化によって測定する機構である。抵抗変化はブリッジ回路に組んだゲージに直流を流し、直流増幅器を通

表-1

	粗 砂	細 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
均等係数	1.65	1.31
安息角 (度)	35.0	32.5
e_{max}	0.850	1.035
e_{min}	0.565	0.670

して直記式電磁オツシログラフ (ガルバノメーターの固有振動数 1,000 Hz) に記録させた。このようにした場合の動間げき水圧計の感度は 1 mm/gr/cm^2 の程度である。この動間げき水圧計を空気中で 5 Hz ~ 80 Hz の振動数範囲の振動を与えても記録の振れは認められなかったので動特性に問題は無いが、零点の変動 (主として温度の変動によって生ずる) が激しいので長時間の測定はむずかしく、間げき水圧の長時間にわたる変化を測定することができなかった。飽和砂層内における動間げき水圧および加速度の代表的記録波形として飽和粗砂の液状化状態の波形を 図-2 に示す。砂層内の間げき水圧が静的に上昇し、砂層内の加速度波形が乱れ、最後には加速度の

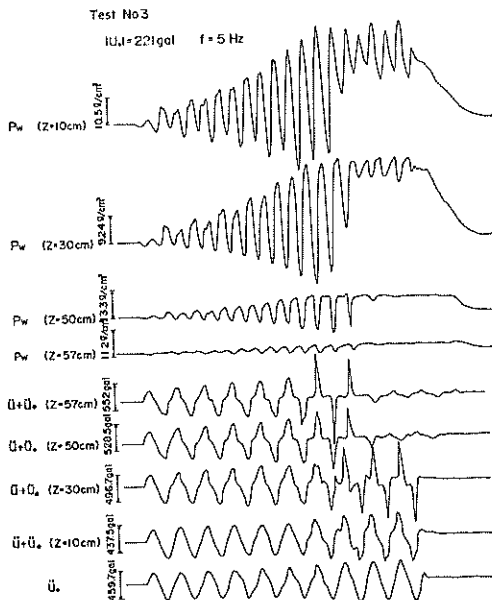


図-2 記録波形の例 (飽和粗砂の液状化状態)

波形が消滅するのがみられる。この状態を砂層の液状化状態と定めてよいであろう。また、間げき水圧の振動する部分の振動数は与えた振動台の振動数の 2 倍であることがみられる。次に乾燥細砂内における加速度の代表的記録波形として、乾燥細砂に低加速度を与えた場合の共振時における波形を 図-3 に示す。振動台の振動として一定振動数、一定加速度の振動を 10 波与えたのであるが、砂層内の加速度は与えられる波数の増加に伴って増大し、10波目までの間に加速度一定の定常状態に達しているのがみられる。また、砂層内の加速度の増大によって振動台の加速度もわずかであるが増大するのがみられ、砂層の運動が振動台の運動にわずかであるが影響を及ぼしていることを示している。この報告では、既報と同様に過渡状態を除外して、定常状態における値のみを取扱った。

Test No.1

$IU_a=9gal$ $f=49 \text{ Hz}$

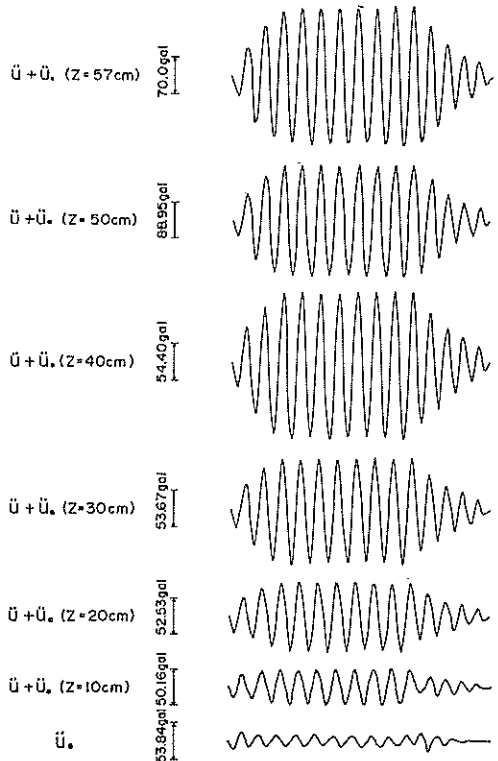


図-3 記録波形の例 (乾燥細砂の共振状態)

砂層の振動性状

3. 砂層の加速度応答

図-3 に示したような砂層内の振動の定常状態における加速度を求め、振動台の加速度との比を振動数に対してプロットすれば、砂層内の測定点における加速度応答特性を求めることができる。このようにして求めた代表的砂層の加速度応答特性を 図-4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11 に示す。Test No. と実験の種類との対応は表-2 に示されているが、Test No. 1 は乾燥細砂、Test No. 2 は乾燥粗砂、Test No. 3 は飽和粗砂、Test No. 4 は飽和細砂の実験である。図-4～図-11 にみられるように、砂層に与えられる加速度の小さい範囲では加速度比は大きく、共振曲線に鋭いピークが認められ、砂層の挙動はか

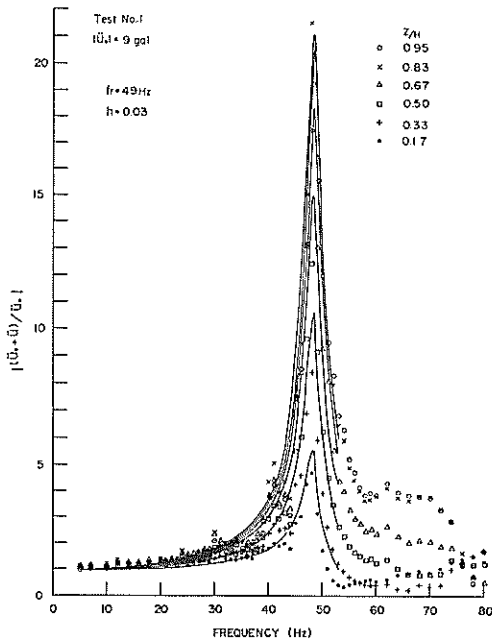


図-4 砂層の加速度応答特性 (乾燥細砂)

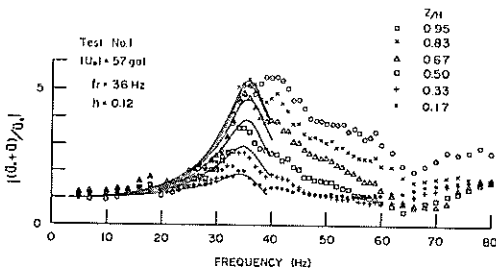


図-5 砂層の加速度応答特性 (乾燥細砂)

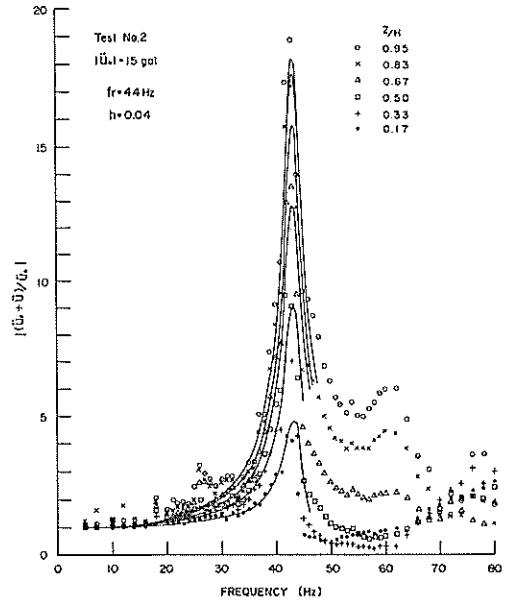


図-6 砂層の加速度応答特性 (乾燥粗砂)

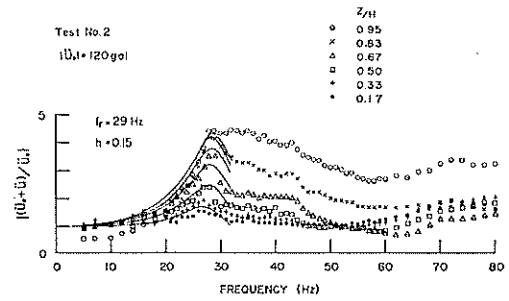


図-7 砂層の加速度応答特性 (乾燥粗砂)

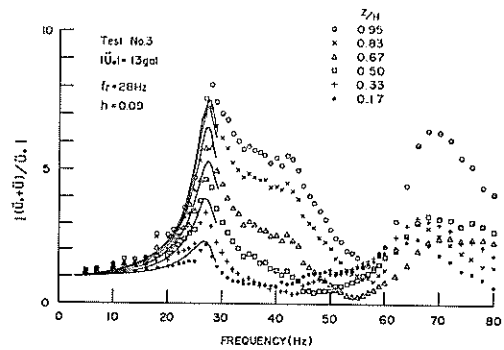


図-8 砂層の加速度応答特性 (飽和粗砂)

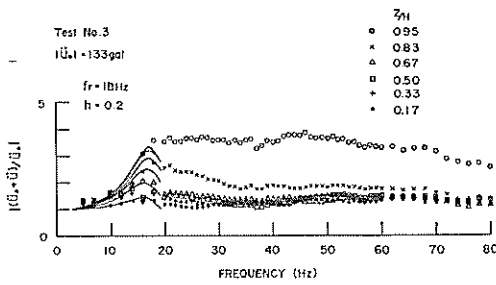


図-9 砂層の加速度応答特性 (飽和粗砂)

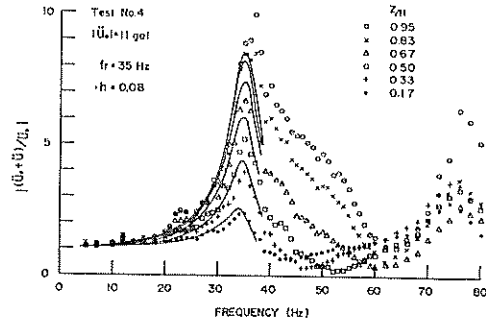


図-10 砂層の加速度応答特性 (飽和細砂)

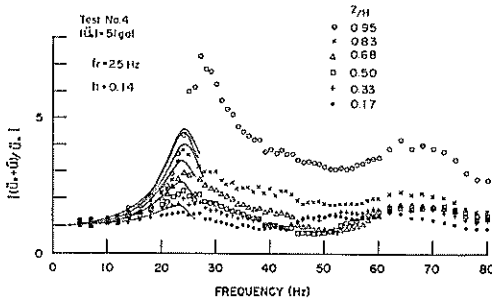


図-11 砂層の加速度応答特性 (飽和細砂)

なり弾性的であることがわかる。砂層に与えられる加速度が大きくなると、加速度比は小さくなり、また、共振振動数も低下するのがみられ、砂層の振動に対する減衰が著しくなり、砂層のせん断弾性係数が小さくなることを示している。乾燥状態と飽和状態とを比較してみると、飽和状態では乾燥状態よりも明らかに共振振動数が低下する傾向が認められる。したがって、一次共振振動数の約3倍の振動数である二次共振振動数が実験した振動数の範囲に現われている。

実験によって求められた加速度応答特性を理論と比較

すれば、砂層の動的性質を一般的な数値として表わすことができるので、理論と比較してみることにする。実験槽に入れた砂の振動時挙動は複雑であると考えられるが、実験より求めた加速度応答特性を見ると砂層を弾性体と仮定しても、概略の傾向を示すことができるように思われる。そこで、砂層を振動方向のみに運動するせん断弾性体とみなして取扱ってみることにする。第1段階として、砂層を図-12に示すような均一のせん断弾性係数を有して、せん断ひずみ速度に比例する抵抗を有するものと仮定すると、運動方程式を(1)式で表わすことができる。

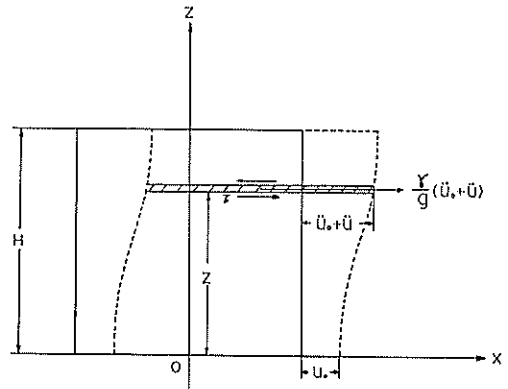


図-12 仮定した砂層の均一せん断弾性係数モデル説明図

$$\frac{\gamma}{g} \frac{\partial^2(u_0 + u)}{\partial t^2} = G \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + \eta \frac{\partial^3 u}{\partial t \cdot \partial z^2} \quad (1)$$

- ここに γ : 砂の単位体積重量
- g : 重力の加速度
- u_0 : 台の変位
- u : 砂層の台に対する相対変位
- G : 砂層のせん断弾性係数
- η : 砂層の内部せん断抵抗係数

台が ω なる角振動数で運動し、その変位が $u_0 = a \cos \omega t$ である場合、砂層内の任意の高さ z における(1)式の定常解は一次の振動のみをとると次のように表わすことができる。

砂層の台に対する相対変位は(2)式で表わされる。

$$u = a \sqrt{(\xi_1 - 1)^2 + \xi_2^2} \cdot \cos(\omega t + \varphi) \quad (2)$$

ここに

$$\varphi = \tan^{-1} \frac{\xi_2}{\xi_1 - 1} \quad (3)$$

$$\xi_1 = \cos n_1 \frac{z}{H} \cdot \cosh n_2 \frac{z}{H} + \frac{1}{\cos^2 n_1 + \sinh^2 n_2} \times \left(\sin n_1 \cdot \cos n_1 \cdot \sin n_1 \frac{z}{H} \cdot \cosh n_2 \frac{z}{H} - \cos n_1 \frac{z}{H} \cdot \sinh n_2 \frac{z}{H} \cdot \sinh n_2 \cdot \cosh n_2 \right) \quad (4)$$

$$\xi_2 = \sin n_1 \frac{z}{H} \cdot \sinh n_2 \frac{z}{H} - \frac{1}{\cos^2 n_1 + \sinh^2 n_2} \times \left(\sin n_1 \cdot \cos n_1 \cdot \cos n_1 \frac{z}{H} \cdot \sinh n_2 \frac{z}{H} + \sin n_1 \frac{z}{H} \cdot \cosh n_2 \frac{z}{H} \cdot \sinh n_2 \cdot \cosh n_2 \right) \quad (5)$$

$$\left. \begin{matrix} n_1 \\ n_2 \end{matrix} \right\} = \frac{\pi/2(\omega/\omega_r)}{\{1+4(\omega/\omega_r)h^2\}^{1/4}} \times \sqrt{\frac{1}{2} \left\{ 1 \pm \frac{1}{\sqrt{1+4h^2(\omega/\omega_r)^2}} \right\}} \quad (6)$$

$$\omega_r = \frac{\pi \sqrt{G\gamma}}{2H} = \frac{\pi V_s}{2H} = \text{砂層の共振角振動数}$$

V_s = 砂層を伝わる横波速度

$$h = \frac{\pi\eta}{4H\sqrt{G\gamma}} = \text{減衰常数}$$

H = 砂層厚

砂層内のせん断ひずみは (7) 式で表わされる。

$$\frac{\partial u}{\partial z} = \frac{a}{H} \sqrt{\left(\frac{\partial \xi_1}{\partial z}\right)^2 + \left(\frac{\partial \xi_2}{\partial z}\right)^2} \cdot \cos(\omega t + \varphi') \quad (7)$$

ここに

$$\varphi' = \tan^{-1} \frac{\partial \xi_2 / \partial z}{\partial \xi_1 / \partial z} \quad (8)$$

砂層内の絶対加速度は (9) 式で表わされる。

$$\ddot{u}_0 + \ddot{u} = -a\omega^2 \sqrt{\xi_1^2 + \xi_2^2} \cdot \cos(\omega t + \varphi'') \quad (9)$$

ここに

$$\varphi'' = \tan^{-1} \xi_2 / \xi_1 \quad (10)$$

砂層の台に対する加速度比は (11) 式で表わされる。

$$\frac{\ddot{u}_0 + \ddot{u}}{\ddot{u}_0} = \sqrt{\xi_1^2 + \xi_2^2} \quad (11)$$

(11) 式から求まる加速度応答特性の理論曲線を共振振動数と減衰常数をパラメーターとして、実験値に合う

ように 図-4~11 に画いた。このようにすれば、実験値を理論によってかなりよく近似させることができ、その結果、砂層のせん断弾性係数および減衰常数を求めることができる。

4. 砂層の変形

加速度応答特性に見られるように低振動数では砂層は台と同じ運動するが、共振時には砂層内に大きな相対変位が生じている。したがって、砂層内の変形を調べるには、共振時におけるものを選ぶと好都合である。この時の変形は (2)~(7) 式からわかるように減衰常数によって決まるものである。

共振時における砂層の台に対する相対変位を測定した砂層の絶対加速度から計算して求め、その高さ方向の分布を 図-13~16 に示す。図に (2) 式から求めた砂層の台に対する相対変位の分布を実曲線で示した。この理論を求める場合に必要である砂層の共振振動数および減衰常数は、加速度応答特性を求めた場合と同じ値を用い

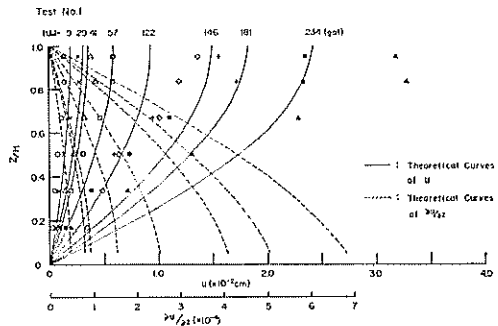


図-13 共振時砂層相対変位の分布 (乾燥細砂)

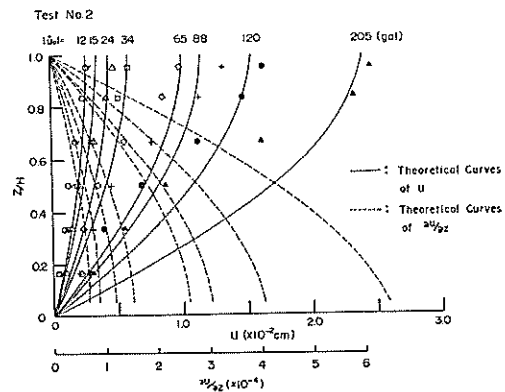


図-14 共振時砂層相対変位の分布 (乾燥粗砂)

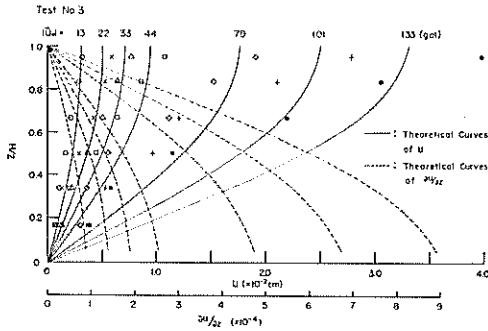


図-15 共振時砂層相対変位の分布 (飽和粗砂)

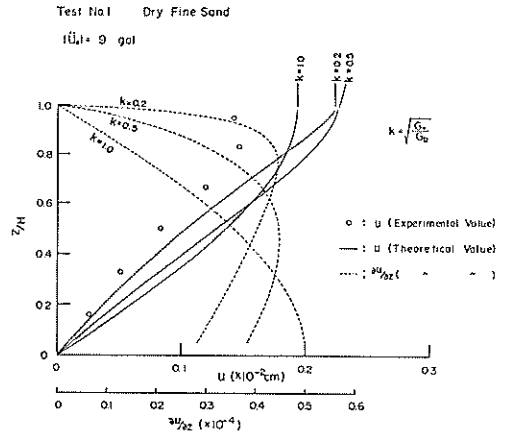


図-17 砂層のせん断弾性係数が深さに比例して増加する場合の共振時砂層相対変位の分布 (乾燥細砂)

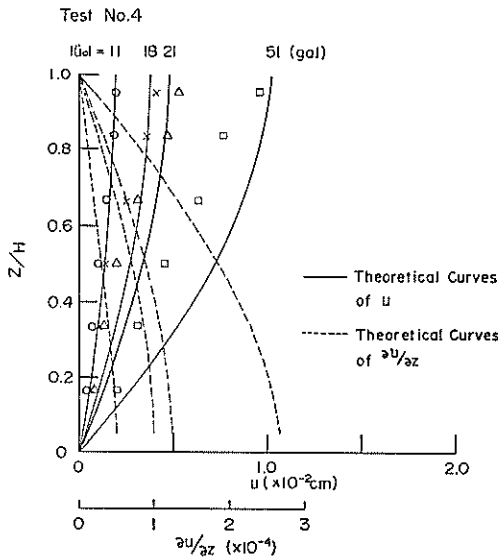


図-16 共振時砂層相対変位の分布 (飽和細砂)

た。砂層内の相対変位の分布形は与えられる加速度が小さい場合にかなり理論から求めた分布形に似ているが、加速度が大きくなると理論と違った分布形になる。図-17 は次に述べる砂層のせん断弾性係数が深さに比例して増加する場合の理論から求めた砂層の台に対する相対変位である。(図中実曲線で示す) 図は代表的な例として乾燥細砂の実験の低加速度における場合を示したものであり、図中の円印はその実測値である。図-17 に見られるように砂層内のせん断弾性係数の増加率を変えれば、加速度の大きい場合にも、分布形の実験値をかなりの程度理論に近似させることができる。なお、図-13~16 および 図-17 に点線で示した曲線は、(7)式および次

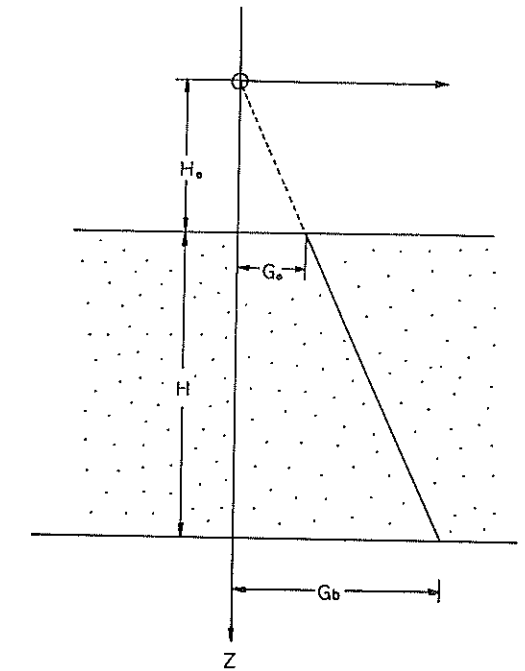


図-18 仮定した砂層のせん断弾性係数が深さに比例して増加する場合のモデル説明図

砂層の振動性状

図-18 に示すように座標軸をとり、砂層表面および底面におけるせん断弾性係数をそれぞれ G_0 および G_b とすれば、運動方程式として (12) が得られる。

$$\frac{\gamma}{g} \frac{\partial^2(u_0+u)}{\partial t^2} = \frac{G_0}{H_0} \frac{\partial}{\partial z} \left(z \frac{\partial u}{\partial z} \right) + \frac{\eta_0}{H_0} \frac{\partial}{\partial z} \left(z \frac{\partial^2 u}{\partial t \partial z} \right) \quad (12)$$

$u_0 = a \cos \omega t$ なる台の運動に対する定常解は次のように求められる。

砂層の台に対する相対変位の振幅は (13) 式で表わされる。

$$u = a\pi \sum_n B_n \cdot \frac{J_1^2(kb_n)}{J_1^2(kb_n) - J_0^2(b_n)} \times \{ J_0(b_n \sqrt{z/H_0+H}) Y_0(b_n) - J_0(b_n) Y_0(b_n \sqrt{z/H_0+H}) \} \quad (13)$$

ここに

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

$$\omega_n = \frac{b_n}{2\sqrt{H_0(H_0+H)}} \sqrt{\frac{gG_0}{\gamma}}$$

$$h_n = \frac{b_n}{4\sqrt{H_0(H_0+H)}} \sqrt{\frac{g}{\gamma G_0}}$$

$$k = \sqrt{\frac{G_0}{G_b}} = \text{せん断弾性係数増加率}$$

b_n は次式の根である。

$$J_0(b_n) Y_1(kb_n) - J_1(kb_n) Y_0(b_n) = 0$$

$J(z)$, $Y(z)$ はそれぞれ第1種、第2種の Bessel 関数である。

砂層のせん断ひずみの振幅は (14) 式で表わされる。

$$\frac{\partial u}{\partial z} = \frac{a}{2\sqrt{(H_0+H)z}} \sum_n b_n \cdot B_n \frac{J_1(kb_n)}{J_1^2(kb_n) - J_0^2(b_n)} \times \{ J_0(b_n \sqrt{z/H_0+H}) Y_1(b_n) - J_1(b_n \sqrt{z/H_0+H}) Y_0(b_n) \} \quad (14)$$

(14) 式で表わされる砂層のせん断ひずみ振幅の共振時における分布は図-17の点線で示されるように、せん断弾性係数の増加率が変化しても、砂層の中央 ($z/H=0.5$) ではその値があまり変化しない。そこで、砂層内ではせん断ひずみの分布は大幅に変化するるのであるが、 $z/H=0.5$ におけるせん断弾性係数が均一である場合のせん断ひずみの値で、砂層のせん断ひずみを代表させると都合になる。

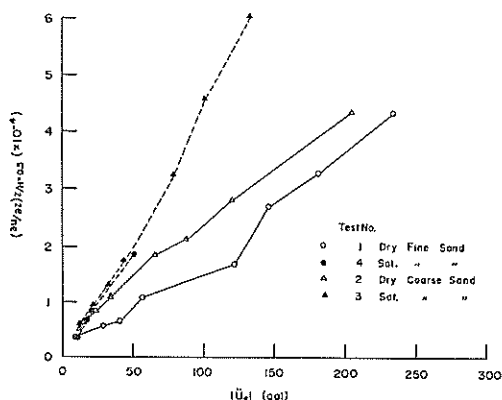


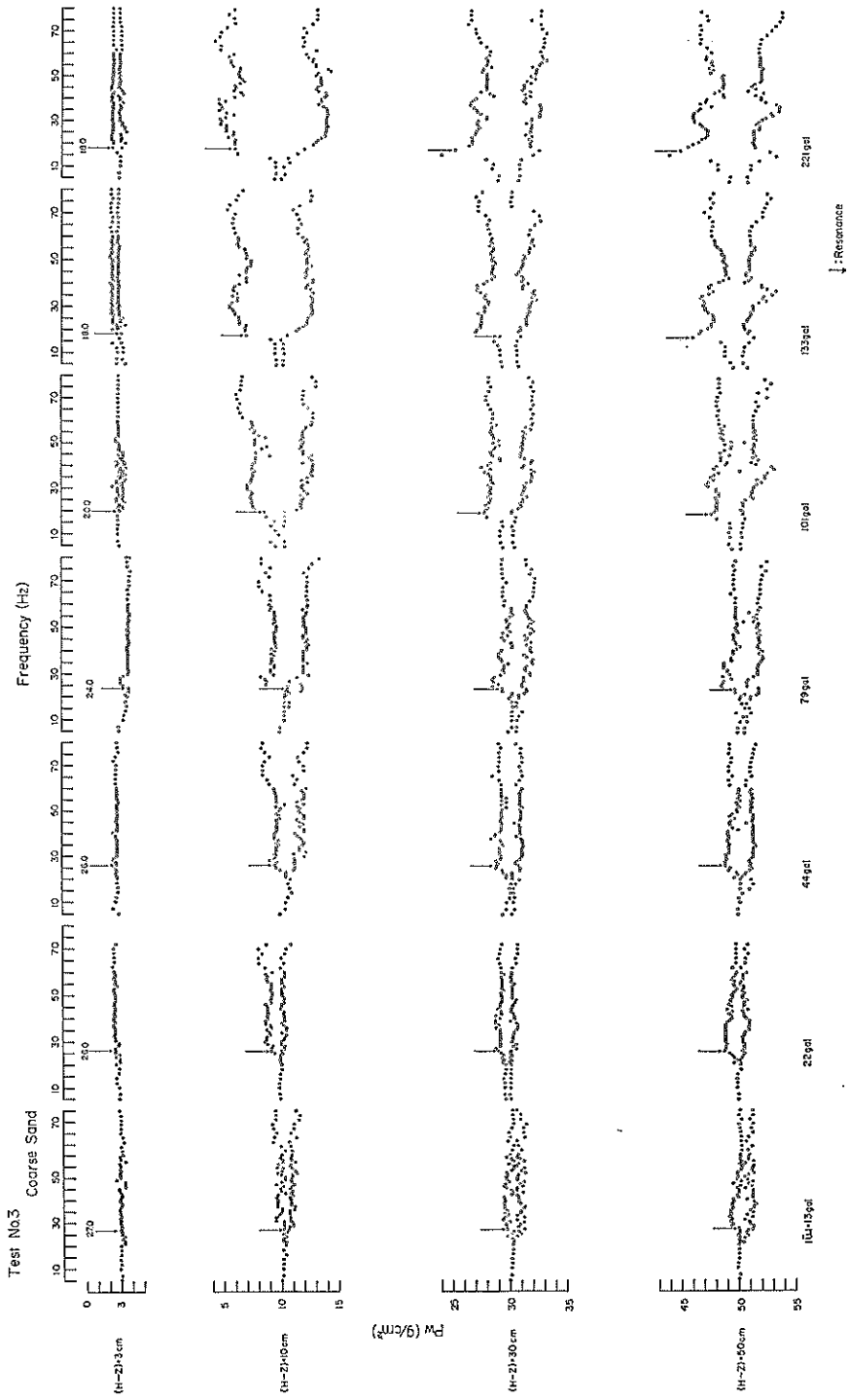
図-19 台加速度と砂層のせん断ひずみとの関係

この $(\partial u/\partial z)_{z=H/2}=0.5$ の値を台の加速度に対してプロットして図-19に示す。図に見られるように、粗砂の方が細砂よりも変形し易く、また、飽和状態の方が乾燥状態よりも変形し易い傾向をもっていることがわかる。

5. 砂層内の動間げき水圧

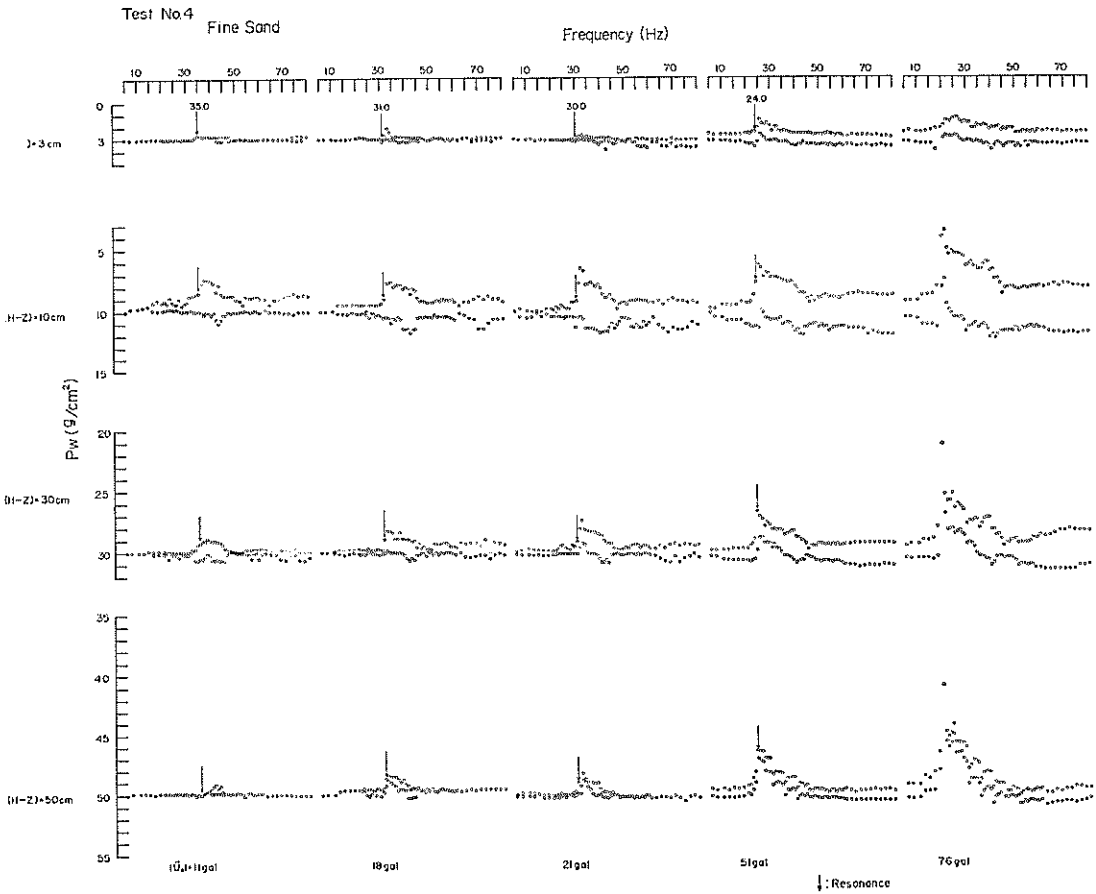
砂層内に設置した動間げき水圧計は砂層と一体になって運動するので、測定される値は砂層に作用する間げき水圧であるとみてよいであろう。図-2に示したような動間げき水圧の9波目の山と谷をとって、各振動数毎にプロットしたものを付図-1, 2に示す。図中の矢印は加速度応答特性から求めた共振振動数を示すものであって、動間げき水圧も共振時付近において最も大きくなることがわかる。砂の種類によって動間げき水圧の変化状況に相違が認められ、粗砂の場合には動間げき水圧の振幅が卓越しているが、細砂の場合には振動しながらも静的に上昇する間げき水圧が卓越している。

付図-1, 2の各加速度段階における動間げき水圧の最大値の高さ方向の分布を図-20, 21に示す。動間げき水圧はある加速度段階まではそれ程大きくないが、ある加速度段階では急激に上昇している。この加速度段階における動間げき水圧および加速度の記録波形を粗砂の場合について既に図-2に示したが、細砂の場合を図-22に示す。静的に上昇する動間げき水圧が大きくなり、砂層内の加速度波形が乱れ、遂には消滅するのがみられる。この段階では静的に上昇する動間げき水圧によって砂層は水のような挙動を示すことを表わしている。また、図-20, 21のこの段階の動間げき水圧の分布に対しては(15)式で表わされる Westergaard の簡易動水圧公式か



付図-1 動間げき水圧の振動数に対する変化状況

砂層の振動性状



付図-2 動間げき水圧の振動数に対する変化状況

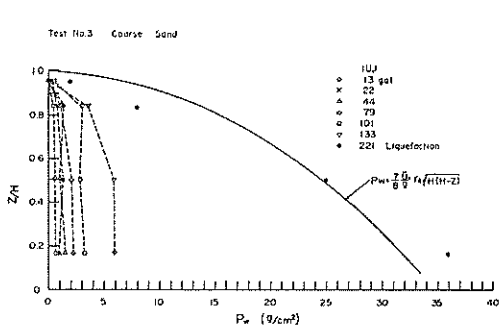


図-20 動間げき水圧の分布 (飽和粗砂)

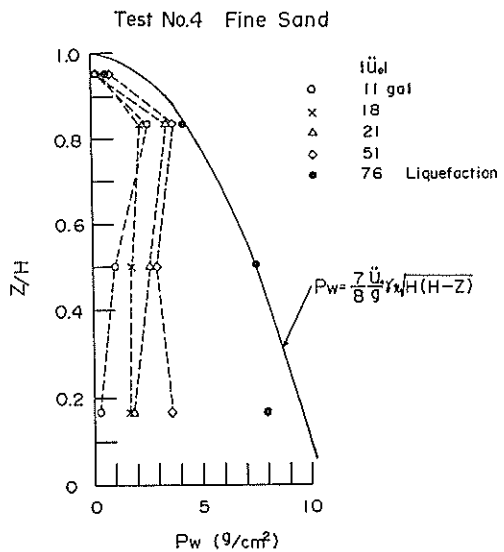


図-21 動間げき水圧の分布 (飽和細砂) →

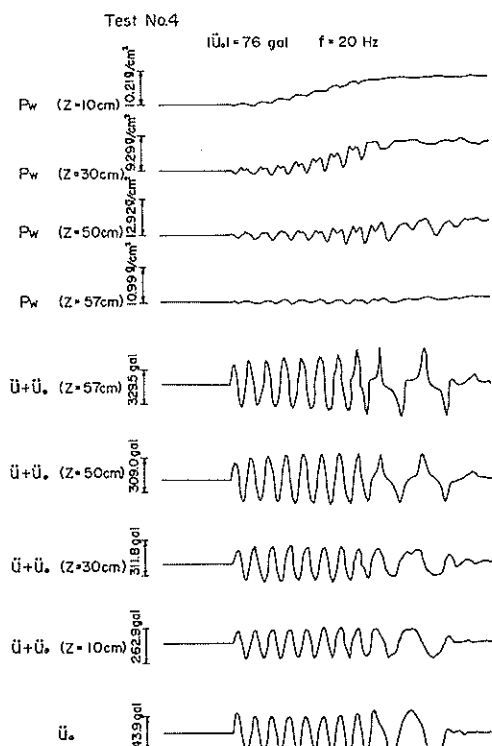


図-22 記録波形の例 (飽和細砂の液状化状態)

ら求めた分布曲線は実験値の分布をかなり良く表わしている。このことも、この段階で砂層が液状化状態になっていることを裏付けている。

$$p_w = \frac{7}{8} \frac{\ddot{u}_0}{g} \cdot \gamma_t \sqrt{H(H-z)} \quad (15)$$

砂層が液状化に達する前の段階における $(\partial u / \partial z)_{z=H} = 0.5$ の値は、細砂の場合で約 2×10^{-4} 、粗砂の場合で約 6×10^{-4} であり、粗砂の場合にはかなり大きな変形に達するまで液状化しない。

図-2 および 図-22 の動間げき水圧波形は与えた台の振動数の2倍の振動数で振動している。このことについては既に大原³⁾によって指摘され、ダイラタンシーによって生じたものであると説明している。筆者等もその原因について検討したが、まだ結論を出すに至っていない。ただ砂層と間げき水との相互作用が関係するのではないかと考えられる。

6. 砂層の変形に伴う振動性状の変化

今回行った実験について、砂層の加速度応答特性から

求めたせん断弾性係数 G 、減衰常数 h および間げき比 e などの各加速度段階における値を砂層のひずみとともにまとめると表-2 に示すようになる。砂層のせん断弾性係数 G を求める際、砂の単位体積重量として乾燥状態では乾燥単位体積重量 γ_d を、飽和状態では飽和単位体積重量 γ_t を用いた。

砂層の振動性状は各加速度段階で (1) 式に従うものとして、実験値を整理したので、砂層の振動性状は γ 、 G 、 h がせん断ひずみ $\partial u / \partial z$ によってどのように変化するかということになる。表-2 にみられるように γ の変化はそれ程大きなものでない。 G および h がせん断ひずみの増大に伴ってどのように変化するかを、細砂、粗砂の場合、別々に図-23、図-24 に示す。图中的 Test No. に肩符を付したものは、既報「乾燥砂層の振動性状」, 「飽和砂層の振動性状」で述べた実験のうち、砂層厚が今回と同じ 60 cm のものである。その実験と今回の実験とは、振動台に与えた振動の波数が各振動数 10 波で

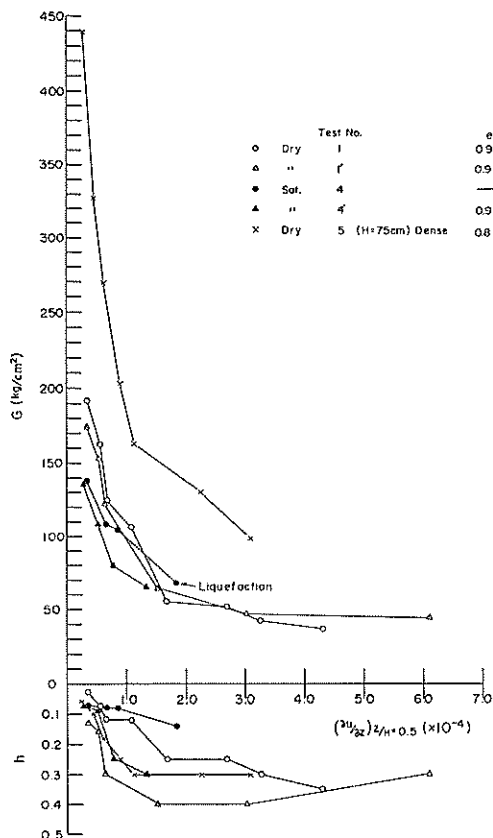


図-23 せん断ひずみと G 、 h の関係 (細砂)

砂層の振動性状

表-2

	$ \ddot{u}_0 $ (gal)	$\frac{(\partial u/\partial z)}{z/H=0.5}$ ($\times 10^{-4}$)	fr. (Hz)	h	V_s (m/sec)	G (kg/cm ²)	e	γ_a (gr/cm ³)	γ_t (gr/cm ³)	γ_b (gr/cm ³)
Test No. 1 乾燥細砂 (小名浜)	9	0.36	49	0.03	116	190	0.94	1.37	—	—
	29	0.57	45	0.08	107	160	0.94	1.38	—	—
	41	0.66	39	0.12	92	120	0.95	1.38	—	—
	57	1.09	36	0.12	86	105	0.94	1.38	—	—
	122	1.69	26	0.25	62	55	0.92	1.39	—	—
	146	2.70	25	0.25	60	51	0.92	1.40	—	—
	181	3.27	23	0.30	54	42	0.91	1.40	—	—
234	4.32	21	0.35	50	36	0.90	1.41	—	—	
Test No. 2 乾燥粗砂 (高萩)	15	0.64	44	0.04	104	165	0.79	1.48	—	—
	12	0.50	42	0.04	100	150	0.79	1.48	—	—
	24	0.85	40	0.06	95	136	0.79	1.48	—	—
	34	1.09	38	0.07	91	126	0.78	1.49	—	—
	65	1.85	34	0.09	82	101	0.80	1.49	—	—
	88	2.13	32	0.12	77	90	0.77	1.49	—	—
	120	2.81	29	0.15	70	74	0.77	1.50	—	—
205	4.33	25	0.22	60	56	0.75	1.51	—	—	
Test No. 3 飽和粗砂 (高萩)	13	0.61	28	0.09	66	83	0.81	1.46	1.91	0.91
	22	0.96	26	0.10	62	74	0.81	1.46	1.91	0.91
	33	1.31	25	0.11	60	69	0.81	1.46	1.91	0.91
	44	1.75	24	0.13	56	61	0.81	1.47	1.91	0.91
	79	3.22	20	0.18	48	44	0.80	1.47	1.92	0.92
	101	4.56	19	0.20	44	38	0.79	1.48	1.92	0.92
133	6.02	18	0.20	42	34	0.78	1.49	1.93	0.93	
Test No. 4 飽和細砂 (小名浜)	11	0.35	35	0.08	84	139	0.79	1.49	1.93	0.93
	18	0.70	31	0.08	74	109	0.79	1.49	1.93	0.93
	21	0.87	31	0.08	73	106	0.79	1.49	1.94	0.94
	51	1.86	25	0.14	59	68	0.79	1.50	1.94	0.94

(註) 表中 Test No. 4 の単位体積重量に測定ミスがあったので信頼できない値であるが参考として掲げた。

あるのに対して、数多くの波数であった点で相違する。砂層に数多くの波数の振動が与えられる結果、砂層はよりしめ固められることになる。この振動の与え方の相違によって、砂層のせん断弾性係数はほとんど変化しないが、減衰常数は明らかに大きくなることを図-23、図-24は示している。図には既報の細砂を密につめた実験結果も入れておいたが、この場合のせん断弾性係数はゆるづめの場合に比べて極めて大きいことから、砂層のせん断弾性係数は初期のつめ方の影響を著しく受けるものと考えられる。その他の点について既報の実験結果と今回の実験結果に相違することは認められない。したがって、

既報で述べた実験結果は今回の実験によって確認されたのであるが、今回の実験では砂層内の間げき水圧を測定した結果、砂層が液状化する段階が明確になり、また、砂層内のせん断ひずみ分布についても検討したので、砂の種類、乾燥、飽和の状態などによる砂層の振動性状の相違点を次に述べる。

- (1) 細砂のせん断弾性係数は粗砂のそれよりも大きい。
- (2) 細砂、粗砂ともせん断弾性係数は $1 \sim 2 \times 10^{-4}$ 程度のせん断ひずみに達するまでの間に著しく減少している。この傾向は密づめの場合にも同様に認められる。減

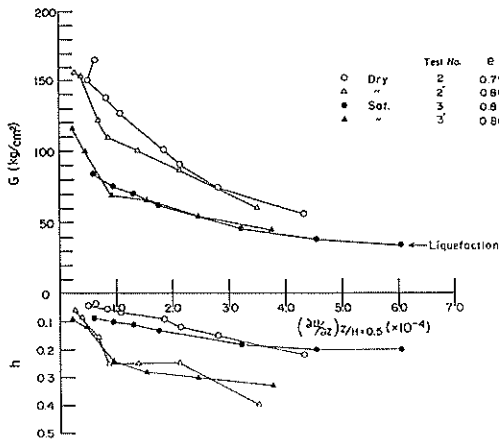


図-24 せん断ひずみとG, hの関係 (粗砂)

少する割合は細砂の場合が粗砂に比べて大きい。

(3) 飽和状態のせん断弾性係数は乾燥状態のそれに比べて小さい。このことは、水の浮力および動間げき水圧によって拘束圧が減少するためである。

(4) 飽和砂層の液状化は、細砂の場合にせん断弾性係数が急激に減少して、せん断弾性係数が極めて小さな値

になる $1 \sim 2 \times 10^{-4}$ のせん断ひずみで起り、粗砂の場合には明瞭な傾向が認められないが、細砂の場合よりも著しくせん断ひずみの大きな段階で、やはりせん断弾性係数が極めて小さな値になる時に起っている。

(5) 減衰常数は粗砂よりも細砂の場合が、小さなせん断ひずみにおいて増大する傾向がみられる。

7. 砂層の振動性状に対する拘束圧の影響

砂層の振動性状は拘束圧によって著しい影響を受けることは古くから知られている。例えば、Drenovich and Richart⁶⁾ によれば、砂の円柱形試料の共振法によるせん断試験で求めた微小ひずみにおけるせん断弾性係数は、拘束圧が 0.98 kg/cm^2 以上では拘束圧 $\bar{\sigma}_0$ の 0.5 乗に比例し、 0.98 kg/cm^2 以下の拘束圧では $\bar{\sigma}_0$ の 0.6 乗に比例する。図 25 は Drenovich and Richart⁶⁾ の求めた図を kg/cm^2 に換算したものであり、今回行った実験および密づめの実験の最も低加速度段階の G の値を拘束圧を砂層の土かぶり圧の平均値 $\gamma H/2$ にとった場合をも記入した。 G の値は拘束圧のみでなく初期の間げき比にも関係し、図 25 の直線は Hardin and Black⁹⁾ の求めた式を kg/cm^2 に換算したものである。筆者等の

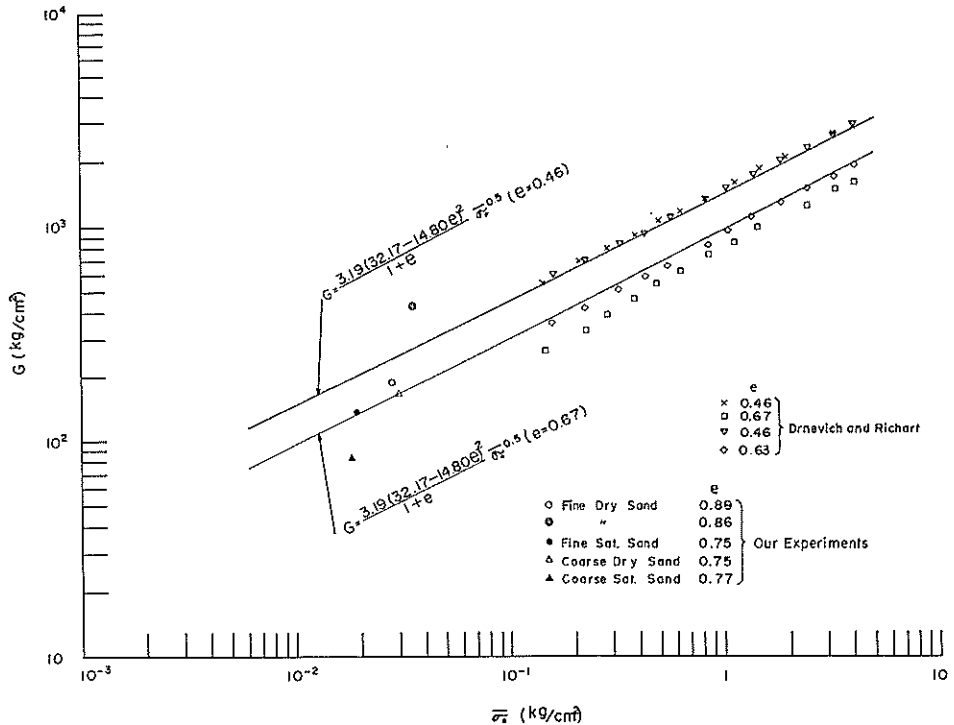


図-25 拘束圧とGの関係

砂層の振動性状

実験では拘束圧を制御してなく、極めて小さな拘束圧および大きな間げき比で実験を行ったのであるが、砂層のせん断弾性係数は、砂層の実験の相互の間では拘束圧によって著しい影響を受けることを示している。しかしながら、砂層のせん断弾性係数の値は、拘束圧の影響を考慮すれば、円柱形試料の共振法によって求められた値と矛盾するものでない。

Hardin and Drnevich⁷⁾ が土の円筒形試料の振動せん断試験によってせん断弾性係数を求めた結果によれば、せん断弾性係数がせん断ひずみの増大によって減少する割合は土の種類および拘束圧によって変化する。実験によって求められた変化を微小ひずみにおけるせん断弾性係数に対する百分率で表わしたものを図-26 に示す。図には Seed and Idriss⁵⁾ の提案した曲線と、今回行った砂層の実験値を記入した。Seed 等の提案した曲線では

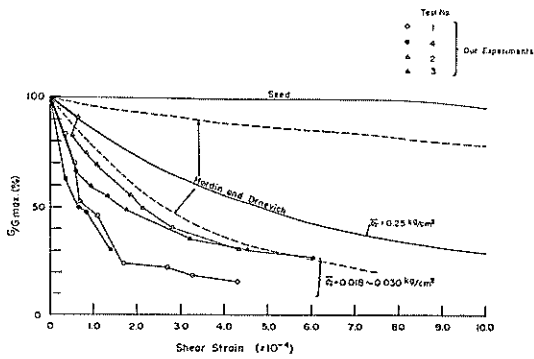


図-26 せん断ひずみの増加に伴う G の変化と拘束圧の関係

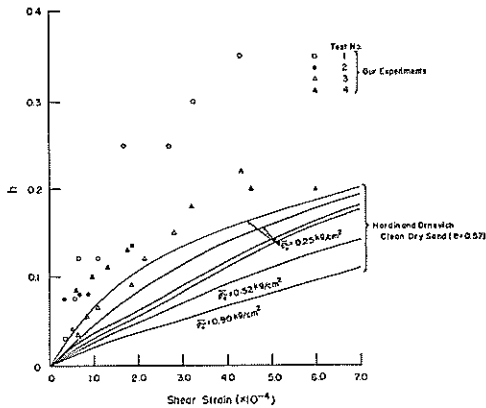


図-27 せん断ひずみの増加に伴う h の変化と拘束圧の関係

大きなせん断ひずみではせん断弾性係数が減少するが、図中に示したせん断ひずみの範囲ではほとんど変化しない。筆者等の実験値は Hardin 等の実験値よりも著しく小さい拘束圧における実験であるが、せん断弾性係数のせん断ひずみの増大に伴う減少の割合も、一般的傾向としては Hardin 等の実験と矛盾しない。

Hardin⁷⁾ 等は減衰常数のせん断ひずみの増大に伴う増加の割合が図-27 に示すように、拘束圧によって変化することを示した。図には今回行った実験値をも記入したが、今回の実験が極めて小さな拘束圧で行われた点を考慮すれば、減衰常数の増加する割合も Hardin 等の実験の一般的傾向と矛盾しない。

以上に述べたことから、振動台によって求めた砂層のせん断弾性係数および減衰常数の値は、拘束圧が極めて小さい場合の値に相当することになる。

8. むすび

振動台上の砂層に与える振動の波数を規制し、飽和砂層内の動間げき水圧を測定する実験を追加した結果、次のことが判明した。(1) 振動の波数を規制した場合、規制しない場合に比べて、砂層のせん断弾性係数はほとんど変わらないが、減衰常数は小さくなる。(2) 飽和砂層が液状化する段階までは動間げき水圧はそれ程大きな量でないが、砂層の変形を増加させる。(3) 動間げき水圧が静的に著しく上昇する飽和砂層の液状化段階が明らかになり、その段階はせん断ひずみの増大に伴って減少した乾燥砂層のせん断弾性係数が小さな値に達した段階に対応する。

また、砂層内のせん断ひずみ分布および拘束圧による振動性状の影響を検討した結果、振動台による砂層の実験は砂層内のせん断ひずみが均一でなく拘束圧を正確に規制できない欠点があるけれども、せん断弾性係数が拘束圧、せん断ひずみによって変化する傾向および減衰常数がせん断ひずみによって変化する傾向は、砂の小試料の正確な実験から求められた変化の傾向と矛盾しないことが判明した。

これらの結果は、基礎地盤および裏込め材を対象とした振動台による模型実験において、原型と同じ材料を用いる場合の相似性を検討する資料として役立つものと考えられる。

(1974 年 4 月 1 日受付)

参 考 文 献

- 1) 荒井秀夫, 梅原靖文, 乾燥砂層の振動性状, 港研報告, Vol. 6, No. 5 (1967)
- 2) 荒井秀夫, 梅原靖文, 飽和砂層の振動性状, 港研報告, Vol. 8, No. 1 (1969)
- 3) Hardin, B.O. and Richart, F.E. Jr., Elastic Wave Velocity in Granular Soils., Proc. A. S. C. E., Vol. 89, SM 1, (1963)
- 4) Drenevich, V.P., Hall, J.R. Jr. and Richart, F. E. Jr., Effects of Amplitude of Vibration on the Shear Modulus of Sand. Proc. International Symposium on Wave Propagation and Dynamic Properties of Earth Materials. New Mexico, (1967)
- 5) Seed, H. B. and Idriss, I. M., Discussion of Analysis of Soil Liquefaction: Niigata Earthquake, Proc. A.S.C.E., Vol. 93, SM 6, (1968)
- 6) Drenevich, V.P. and Richart, F.E. Jr., Dynamic Prestraining of Dry Sand, Proc. A.S.C.E., Vol. 96, SM 2, (1970)
- 7) Hardin, B. O. and Drenevich, V. P., Shear Modulus and Damping in Soils: Measurement and Parameter Effects, Proc. A.S.C.E., Vol. 98, SM 6, (1972)
- 8) 大原資生, 飽和砂の振動圧力について, 土木学会論文集, No. 99, (1963)
- 9) Hardin, B. O., and Black, W. L., Sand Stiffness Under Various Triaxial Stresses, Proc. A.S.C.E., Vol. 92, SM 2, (1966)