

Fig. 30 Three dimensional distribution of vertical oscillating earth pressure acting on the bottom surface

$$\begin{aligned} p_b &= (X - X_0) \{ (E_x y^2 + N_x) \cos \omega t - (E_z y^2 + N_z) \sin \omega t \} \\ &= (X - X_0) \sqrt{(E_x y^2 + N_x)^2 + (E_z y^2 + N_z)^2} \cos \left( \omega t \right. \\ &\quad \left. + \tan^{-1} \frac{E_z y^2 + N_z}{E_x y^2 + N_x} \right) \end{aligned} \quad (40)$$

この式に含まれる係数を中央断面における実測値で表わしてみる。Eq. (40) に  $y=0$ ,  $X=X_0+r'$  で  $p_b = p_T \cos(\omega t + \gamma_T)$  という条件を入れると

$$\begin{cases} N_x = \frac{p_T}{r'} \cos \gamma_T \\ N_z = \frac{p_T}{r'} \sin \gamma_T \end{cases} \quad (41)$$

$$\begin{aligned} p_b &= (X - X_0) \frac{p_T}{r'} \sqrt{1 + \frac{24}{l^2} (\nu \cos \epsilon - 1) y^2 + \left( \frac{12}{l^2} \right)^2 (\nu^2 + 1 - 2\nu \cos \epsilon) y^4} \\ &\quad \times \cos \left\{ \omega t + \gamma_T + \tan^{-1} \frac{\frac{12}{l^2} \nu \sin \epsilon \cdot y^2}{1 + \frac{12}{l^2} (\nu \cos \epsilon - 1) y^2} \right\} \end{aligned} \quad (44)$$

をえる。この式は  $p_T$ ,  $\gamma_T$  がくくり出されているので,  $\epsilon = \text{const.}$ ,  $\nu = \text{const.}$  の場合の計算に適している。この場合は振動数のいかにかわからず同一種類の実験 (実験番号 1, 2, 3, … など) に対しては,  $p_T$  と  $\gamma_T$  が振動数に

底面分布土圧による合モーメント  $M_b$  は

$$\begin{aligned} -M_b &= \int_{-l/2}^{l/2} \int_0^a (X - X_0) p_b dX dy \\ &= \int_{-l/2}^{l/2} \int_0^a (X - X_0)^2 (E_x y^2 + N_x) \cos \omega t dX dy \\ &\quad - \int_{-l/2}^{l/2} \int_0^a (X - X_0)^2 (E_z y^2 + N_z) \sin \omega t dX dy \\ &= J_3 \left\{ \left( \frac{E_x l^2}{12} + N_x \right) \cos \omega t - \left( \frac{E_z l^2}{12} + N_z \right) \sin \omega t \right\} \end{aligned}$$

これが Eq. (39) を満足させるためには次式が成立しなければならない。

$$\begin{aligned} J_3 \left\{ \left( \frac{E_x l^2}{12} + N_x \right) \cos \omega t - \left( \frac{E_z l^2}{12} + N_z \right) \sin \omega t \right\} \\ = \frac{J_3}{r'} p'_T = \frac{J_3}{r'} \nu p_T \cos(\omega t + \gamma_T + \epsilon) \end{aligned}$$

この式から

$$\begin{cases} E_x = \frac{12}{l^2} \frac{p_T}{r'} \{ \nu \cos(\gamma_T + \epsilon) - \cos \gamma_T \} \\ E_z = \frac{12}{l^2} \frac{p_T}{r'} \{ \nu \sin(\gamma_T + \epsilon) - \sin \gamma_T \} \end{cases} \quad (42)$$

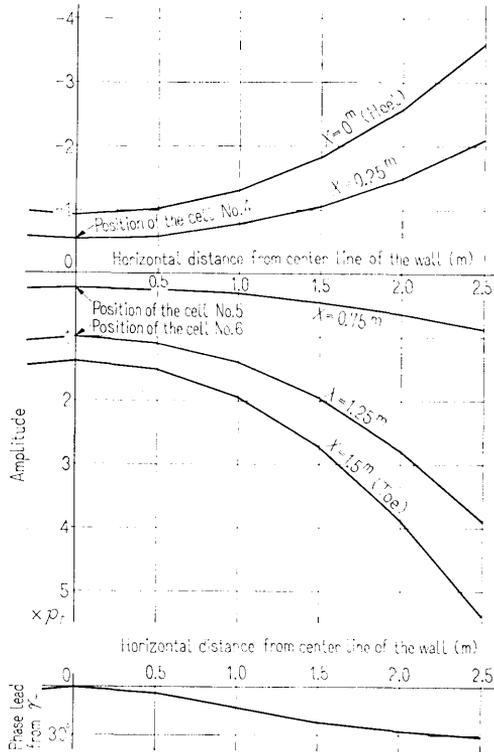
をえる。したがって実測値を満足する運動方程式は Eq. (39) の代りに次式となる。

$$\begin{cases} m \ddot{x} = P + P' + m_0 r_0 \omega^2 \cos \omega t \\ I \ddot{\theta} = M - H P' \\ \quad - \int_{-l/2}^{l/2} \int_0^a (X - X_0) p_b dX dy \\ \quad + H' m_0 r_0 \omega^2 \cos \omega t \\ p_b = (X - X_0) \{ (E_x y^2 + N_x) \cos \omega t \\ \quad - (E_z y^2 + N_z) \sin \omega t \} \end{cases} \quad (43)$$

ここで  $N_x$ ,  $N_z$  は Eq. (41) で,  $E_x$ ,  $E_z$  は Eq. (42) で与えられ, I 群の実験では  $m_0 = 0$  とおく。

次に Eq. (41) と Eq. (42) を Eq. (40) に代入して変形すると

対してかわるだけで同一の分布形状で表わしうる。しかしⅡ群の実験のように  $\epsilon$ ,  $\nu$  とともに振動数に応じてかわるときには各振動数について分布形状そのものが変化することになる。Eq. (44) を用いて計算した 1 例を Fig. 31 に示す。これは実験 I-1 のもので、 $\nu=1.9$ ,



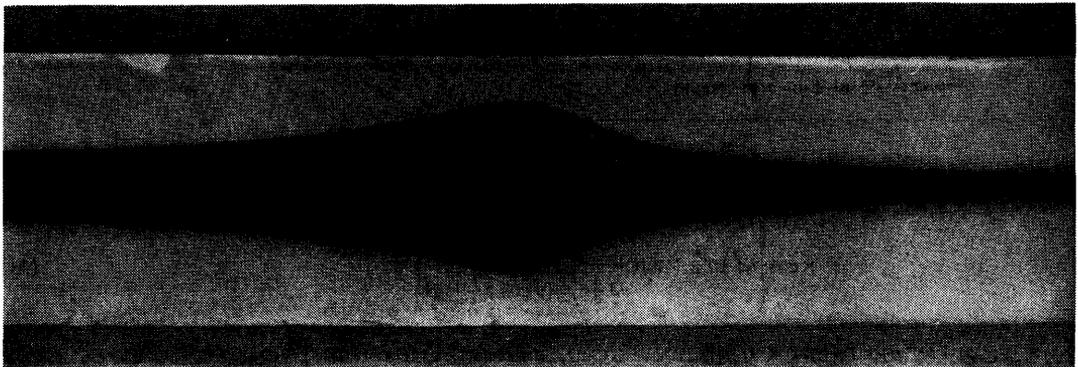
**Fig. 31** Horizontal distributions of oscillating earth pressure acting on several longitudinal sections of the bottom surface, calculated by Eq. (44)

$\epsilon=21^\circ$  であり、図には Heel, 土圧計 No. 4, 5, 6 の取付位置における断面、および Toe における分布形状を示した。位相角分布を見ると、壁体の中央から端部まで直線的に分布していると仮定しても、その差は最大  $4^\circ$  に満たないことがわかる。また  $\epsilon=42^\circ$  の他の例では、 $10^\circ$  以内の差違で直線分布に引きなおしうる。振幅分布はほとんど放物線形で、 $\nu$  が大きくなると Toe 側の端部でかなり大きくなり、Fig. 31 の例では約  $5.5 p_T$  となる。

以上、底面に作用する振動土圧を 3 次元分布と考えることによって、実測によってえられた力と変位は運動方程式 Eq. (43) を満足することを示した。

### 8. 裏込めがない場合の壁体の振動特性

壁体の背後に土圧が作用している場合の力学モデルを考える準備として、裏込めがない場合の底面の力学定数を求めておく必要がある。この場合の底面の力学定数は本来Ⅱ-6の実験から求めるのが本報告の趣旨であるが、これは実験点が三つしかないのでやむをえず壁体の振動の実験結果からこれを求めた。Photo 11 は裏込めのない状態で、壁頂起振機を 720 r.p.m. で定常回転させた後電源を切り、起振機の回転が自然減衰する間に壁頂の変位を連続記録したもので、壁体の共振状態が良くわかる。この場合の共振振動数は 7.4 Hz であり、共振振幅は 1.05 mm である。裏込めのない壁体を壁頂起振機で定常加振し、このとき壁頂 ( $z=0$  m) と他の 1 点 ( $z=2.16$  m) で壁体の変位を測定し、順次加振振動数を変えた一連の実験 A, B, C について調べよう。A はすべての実験を開始する前(Ⅰ-1の実験の前)に行ったもので、B, C はすべての実験のあと(Ⅱ-6の実験のあと)に行ったものである。これら壁



**Photo 11** Resonance of the wall

体の鉛直方向の2点で実測した変位を Eq. (12) を用いて、並進変位  $x$  と回転変位  $\Phi$  に分解した結果を Fig. 32 に示す。共振振動数は A と B, C ではわずかに異なるが、いずれの場合も 7~8 Hz の間にある。この図から  $a$  と  $\varphi$  は常に同じ振動数でピークを持ち、そのときの位相角はいずれも  $-90^\circ$  付近の値を持っている。このことから壁体は  $x$  と  $\Phi$  の連成振動を行っていることがわかる。

壁体が  $x$  と  $\Phi$  の連成振動をしている場合の最も簡単な力学モデルを Fig. 33 に示す。図で  $c_1, k_1$  は底面の水平方向の分布定数,  $c_2, k_2$  は鉛直方向の分布定数を表す。運動方程式は 4.1 で行ったのと同じ手順により次のように求められる。

$$2T = m \dot{x}^2 + I \dot{\Phi}^2$$

$$2V = k_2 \int_0^d ((X - X_0)\Phi)^2 dX + k_1 \int_0^d (x - H\Phi)^2 dX$$

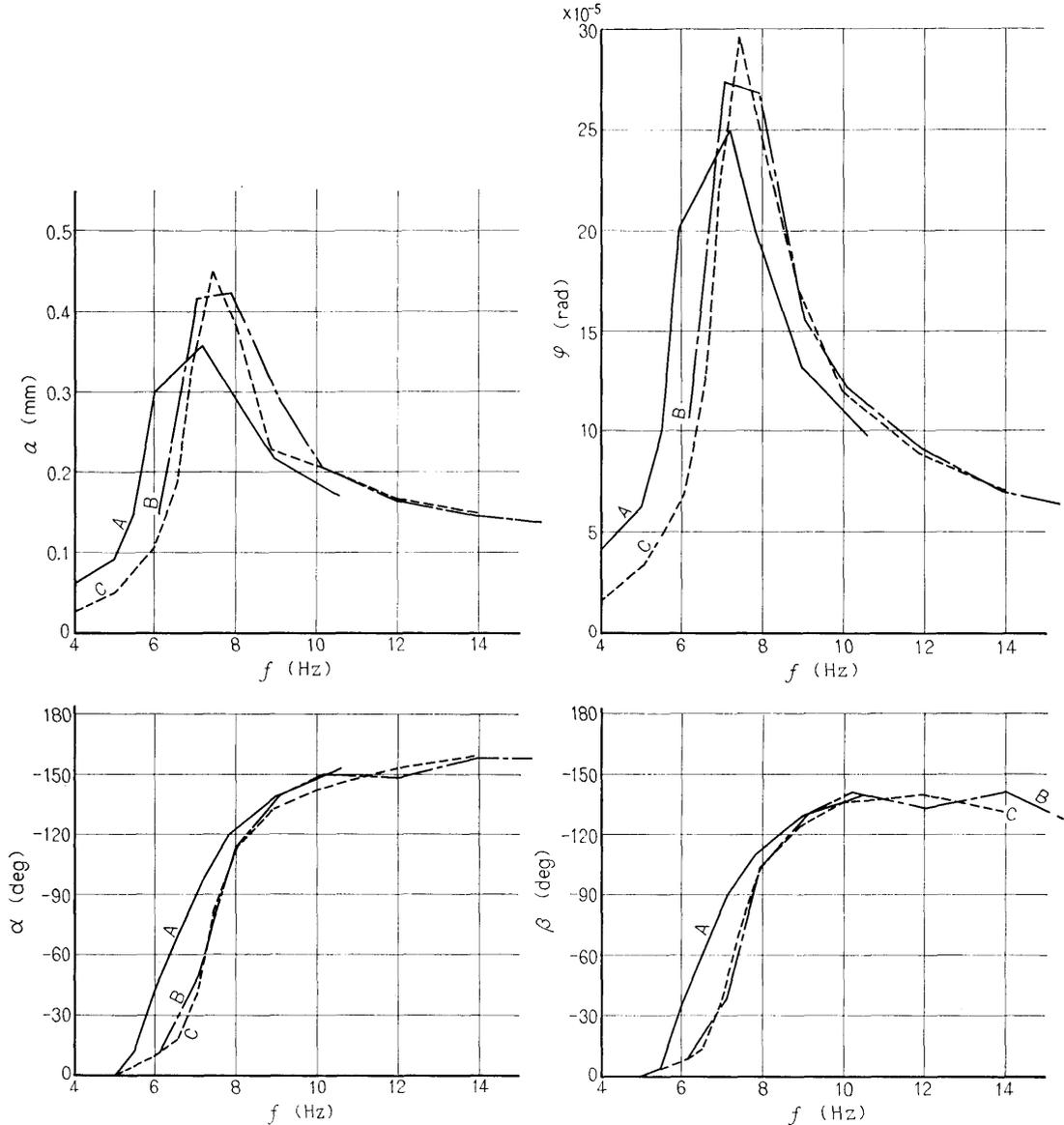


Fig. 32 Frequency responses of translational and rotational displacements of the wall without backfill sand

$$\begin{aligned}
 &= k_2 J_3 \dot{\Phi}^2 + k_1 d l (x - H\dot{\Phi})^2 \\
 2D &= c_2 l \int_0^d \{(X - X_0)\dot{\Phi}\}^2 dX + c_1 l \int_0^d (\dot{x} - H\dot{\Phi})^2 dX \\
 &= c_2 J_3 \dot{\Phi}^2 + c_1 d l (\dot{x} - H\dot{\Phi})^2
 \end{aligned}$$

ここで

$$\left. \begin{aligned} k_2 J_3 &= k_\varphi & k_1 d l &= k_x \\ c_2 J_3 &= c_\varphi & c_1 d l &= c_x \end{aligned} \right\} \quad (45)$$

とにおいてラグランジュの運動方程式に代入すると

$$\left. \begin{aligned} m\ddot{x} + c_x(\dot{x} - H\dot{\Phi}) + k_x(x - H\dot{\Phi}) &= m_0 r_0 \omega^2 \cos \omega t \\ I\ddot{\Phi} + c_\varphi \dot{\Phi} - Hc_x(\dot{x} - H\dot{\Phi}) + k_\varphi \Phi - Hk_x(x - H\dot{\Phi}) & \\ &= H' m_0 r_0 \omega^2 \cos \omega t \end{aligned} \right\} \quad (46)$$

をえる。ここで壁体の転倒モーメント  $-mgH\Phi$  は復元モーメント  $k_\varphi \Phi$  に比べてはるかに小さいので無視してある。Fig. 33 で  $H$  は壁体の重心と底面の水平要素  $c_1, k_1$  の間の距離を表わしているが、Eq. (46) から  $H$  は  $x$  と  $\Phi$  の連成の強さを決める量であることがわかる。すなわち  $H=0$  ならば、 $x$  と  $\Phi$  は無関係となり非連成振動を行う。

Eq. (46) に Eq. (10) の第 2, 第 3 式を代入して  $c_\varphi, k_\varphi, c_x, k_x$  について解くと

$$\left. \begin{aligned} c_\varphi &= \frac{\omega}{\varphi} \{ mHa \sin(\alpha - \beta) - (H + H')m_0 r_0 \sin \beta \} \\ k_\varphi &= \frac{\omega^2}{\varphi} \{ I\varphi + mHa \cos(\alpha - \beta) + (H + H')m_0 r_0 \cos \beta \} \\ c_x &= \frac{-\omega \{ maH\varphi \sin(\alpha - \beta) + m_0 r_0 (a \sin \alpha - H\varphi \sin \beta) \}}{(a \sin \alpha - H\varphi \sin \beta)^2 + (a \cos \alpha - H\varphi \cos \beta)^2} \\ k_x &= \frac{\omega^2 \{ ma \{ a - H\varphi \cos(\alpha - \beta) \} + m_0 r_0 (a \cos \alpha - H\varphi \cos \beta) \}}{(a \sin \alpha - H\varphi \sin \beta)^2 + (a \cos \alpha - H\varphi \cos \beta)^2} \end{aligned} \right\} \quad (47)$$

をえる。減衰のない場合の系の連成固有振動数  $f_I, f_{II}$  は Eq. (46) において

$$\left. \begin{aligned} \omega_x^2 &= \frac{k_x}{m} & \omega_\varphi^2 &= \frac{k_\varphi + H^2 k_x}{I} \\ r^2 &= \frac{I}{m} & \kappa &= \frac{H}{r} \end{aligned} \right\}$$

とおくと

$$\left. \begin{aligned} \omega_{I,II}^2 &= \frac{1}{2} \{ (\omega_x^2 + \omega_\varphi^2) \mp \sqrt{(\omega_x^2 - \omega_\varphi^2)^2 + 4\omega_x^4 \kappa^2} \} \\ f_I &= \frac{\omega_I}{2\pi} \\ f_{II} &= \frac{\omega_{II}}{2\pi} \end{aligned} \right\}$$

として求められる。

Fig. 32 に示した  $a, \alpha, \varphi, \beta$  の値、Table 1 の数値および  $m_0 r_0 = 0.168 \text{ kg} \cdot \text{sec}^2$  を用いて、 $c_\varphi, k_\varphi, c_x, k_x$

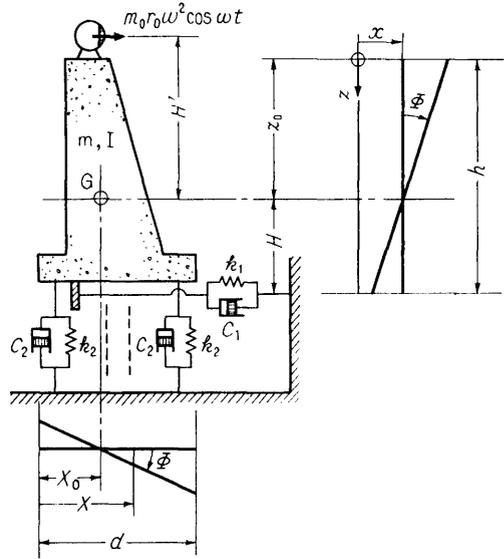


Fig. 33 Mechanical model of the wall without backfill sand

および  $f_I, f_{II}$  を計算することができる。1例として Fig. 32 に示した実験 A の数値を用いた計算結果を Fig. 34 に示す。この場合  $H$  の値も 0.9, 1.0, 1.22, 1.4 とかえて計算を行ってみた。図から  $H=1.0$  とした場合に  $c_x, k_x, k_\varphi$  は振動数  $f$  に無関係に一定値をとるとみなされる。 $H=1.22$  (重心、底面間の距離) とした場合よりも  $H=1.0$  とした場合の方が、これらの値がフラットになる理由は良くわからない。また  $c_\varphi$  は  $H$  の値をかえてもその値はほとんどかわらず、振動数に対して直線的に上昇する。回転変位に関する底面の減衰が、振動数とともに増大するという性質は今まで知られていないことだと思ふ。以上 Fig. 32 の実験 A について述べたが、ここに述べたことは実験 B, C についても同様にあてはまる。実験 A, B, C につ

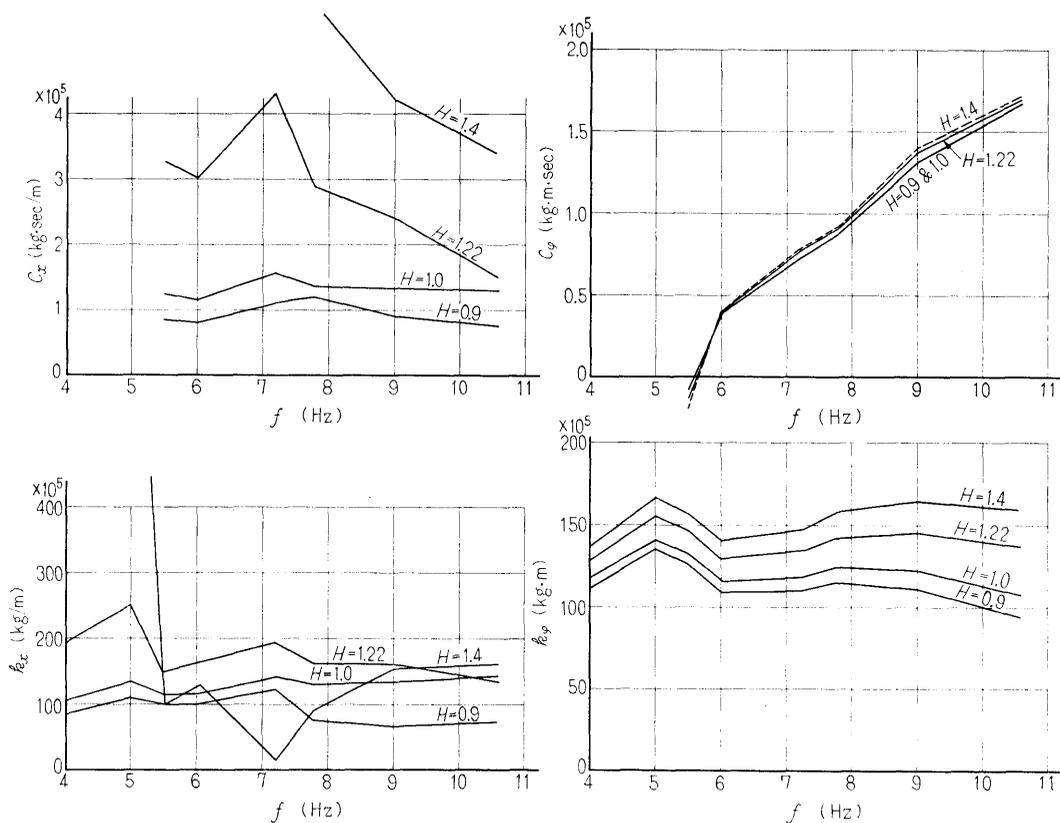


Fig. 34 Frequency responses of four mechanical constants,  $H$  being parameter

いて、四つの力学定数と  $f_I$  および  $f_{II}$  を求めた結果を Table 4 に示す。各数値の間には最大 25% 程度の差違がある。有効数字 2 桁と見て表中におのおのの平均値を示した。ここでえた力学定数から計算される底面反力の値と、すでに満足している運動方程式 Eq. (39) に含まれる  $\mathbf{p}'\tau$  とを、同じ状態の実験 II-6 (裏込めなし) で比較してみよう。Eq. (39) で  $\mathbf{P}=0, \mathbf{M}=0$  と

において Eq. (46) と比較して

$$c_x(\ddot{x} - H\dot{\phi}) + k_x(x - H\phi) = -\mathbf{P}'$$

$$c_\phi\dot{\phi} + k_\phi\phi = \frac{J_3}{r'}\mathbf{p}'\tau$$

をえる。第 2 式の左辺に上で求めた  $c_\phi, k_\phi$  および実験 II-6 の実測値  $\phi$  を代入して、すでに求まっている  $\mathbf{p}'\tau$  と比較すると、振幅で最大 10%, 位相角では最大 7°

Table 4 Values of four mechanical constants and natural frequencies of the wall

		A	B	C	Average
$c_x$	kg·sec/m	$1.34 \times 10^5$	$1.21 \times 10^5$	$1.10 \times 10^5$	$1.2 \times 10^5$
$c_\phi$	kg·m·sec	$0.294 \times 10^5(f-4.7)$	$0.39 \times 10^5(f-6.4)$	$0.31 \times 10^5(f-5.4)$	$0.33 \times 10^5(f-5.5)$
$k_x$	kg/m	$127 \times 10^5$	$152 \times 10^5$	$157 \times 10^5$	$150 \times 10^5$
$k_\phi$	kg·m	$122 \times 10^5$	$144 \times 10^5$	$152 \times 10^5$	$140 \times 10^5$
$f_I$	Hz	7.0	7.6	7.8	7.5
$f_{II}$	Hz	19.0	20.7	21.1	20

以内で左右辺が一致する。すなわち、Table 4 に掲げた定数の値は、少くとも裏込めのない場合には Eq. (39) を満足することが確認された。

## 9. 壁底面のモデル化についての試み

### 9.1 モデル化についての基本方針

以下本章で述べる事柄については、いまだ結論はえられていない。しかし壁体の背後に土圧が作用したときの壁体の力学モデルを完成することが、本研究の最終目標であると考えているので、力学モデルへの一つのアプローチとして、現在までに行った考察について述べるのもあながち無駄ではないであろう。本章では将来の発展に備えて、現在までに行った考察のあらすじについて述べようと思う。

重力式擁壁の振動問題を考えるとき、壁体はふつう剛体として取り扱われる。これは壁体の剛性と裏込めおよび基礎地盤の剛性、壁体に作用する土圧の大きさなどから考えて妥当な仮定である。壁体を剛体と考える以上、その回転変位を考慮しても壁体の各点における水平変位は深さ  $z$  の 1 次式で表わされる。いっぽう、背後に作用する振動土圧の分布形状は最も簡単な場合に  $z$  の 3 次式で表わされる (5.3 参照)。したがって壁体の変位とこれに作用する力との間には、見掛け上  $z$  の次数を変換する要素が必ず存在するはずである。それはバネ、ダッシュポット、摩擦など力を発生する素子によるか、あるいは境界条件のために起こる裏込めの変形によるか、のいずれかであろう。 $z$  の 1 次式で表わされる変位と、 $z$  の高次式で表わされる土圧分布の相互関係を明らかにすることは容易なことではなく、とうてい一朝にして成るものではない。したがってここではモデル化にいたる道を 2 段階に分け、壁体の背後と底面は別々にモデル化しうるものと仮定した。すなわち、背後に作用する土圧は  $P$  または  $M$  のままの形で取り扱ってまず底面をモデル化し、しかる後この結果を用いて背後の力をモデル化する方針をとった。以下はその第 1 段階についての考察である。

### 9.2 底面モデル化の条件式

7.3 で述べたように変位と力の実測値を満足する運動方程式は Eq. (39) である。便宜上ここに再記すると

$$\left. \begin{aligned} m\ddot{x} &= P + P' + m_0 r_0 \omega^2 \cos \omega t \\ \dot{I}\ddot{\Phi} &= M - HP' - \frac{J_3}{r'} P'T + H' m_0 r_0 \omega^2 \cos \omega t \end{aligned} \right\} \quad (39)$$

いっぽう、背後に土圧が作用するときの壁体の運動方

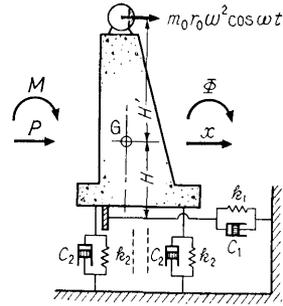


Fig. 35 Mechanical model of the wall with backfill sand

程式は Fig. 35 を参照し、Eq. (46) と全く同様に次のように求められる。

$$\left. \begin{aligned} m\ddot{x} + c_x(\dot{x} - H\dot{\Phi}) + k_x(x - H\Phi) &= P + m_0 r_0 \omega^2 \cos \omega t \\ \dot{I}\ddot{\Phi} + c_\varphi \dot{\Phi} - Hc_x(\dot{x} - H\dot{\Phi}) + k_\varphi \Phi - Hk_x(x - H\Phi) &= M + H' m_0 r_0 \omega^2 \cos \omega t \end{aligned} \right\} \quad (48)$$

Eq. (39), Eq. (48) とともに I 群の実験では  $m_0=0$  とおく。両方程式を比較して次の関係式をえる。

$$\left. \begin{aligned} -P' &= c_x(\dot{x} - H\dot{\Phi}) + k_x(x - H\Phi) \\ \frac{J_3}{r'} P'T &= c_\varphi \dot{\Phi} + k_\varphi \Phi \end{aligned} \right\} \quad (49)$$

Eq. (49) は Fig. 35 に示したモデルが、実測値で成り立つか否かを判定するための条件式である。

Eq. (48) および Eq. (49) においては実測した変位  $x, \Phi$  はそれ自身が全部バネの伸縮と考えてきた。次に変位  $x, \Phi$  が相対変位 (バネの伸縮) とそうでない部分から成り立っていると考えてみよう。 $x_r$  を水平方向の相対変位、 $\Phi_r$  を回転の相対変位とし

$$\left. \begin{aligned} x &= x_r + x_0 \\ \Phi &= \Phi_r + \Phi_0 \end{aligned} \right\} \quad (50)$$

と書くと、 $x_0, \Phi_0$  は地盤の動きを表わし、バネの伸縮には関係のない量となる。この場合の壁体の運動方程式は、Eq. (48) の中で定数  $c, k$  にかかっている  $x$  と  $\Phi$  を、 $x_r$  および  $\Phi_r$  に書き改めたものとなる。すなわち

$$\left. \begin{aligned} m\ddot{x} + c_x(\dot{x}_r - H\dot{\Phi}_r) + k_x(x_r - H\Phi_r) &= P + m_0 r_0 \omega^2 \cos \omega t \\ \dot{I}\ddot{\Phi} + c_\varphi \dot{\Phi}_r - Hc_x(\dot{x}_r - H\dot{\Phi}_r) + k_\varphi \Phi_r &= M + H' m_0 r_0 \omega^2 \cos \omega t \\ -Hk_x(x_r - H\Phi_r) &= M + H' m_0 r_0 \omega^2 \cos \omega t \end{aligned} \right\} \quad (51)$$

Eq. (39) と Eq. (51) を比較して

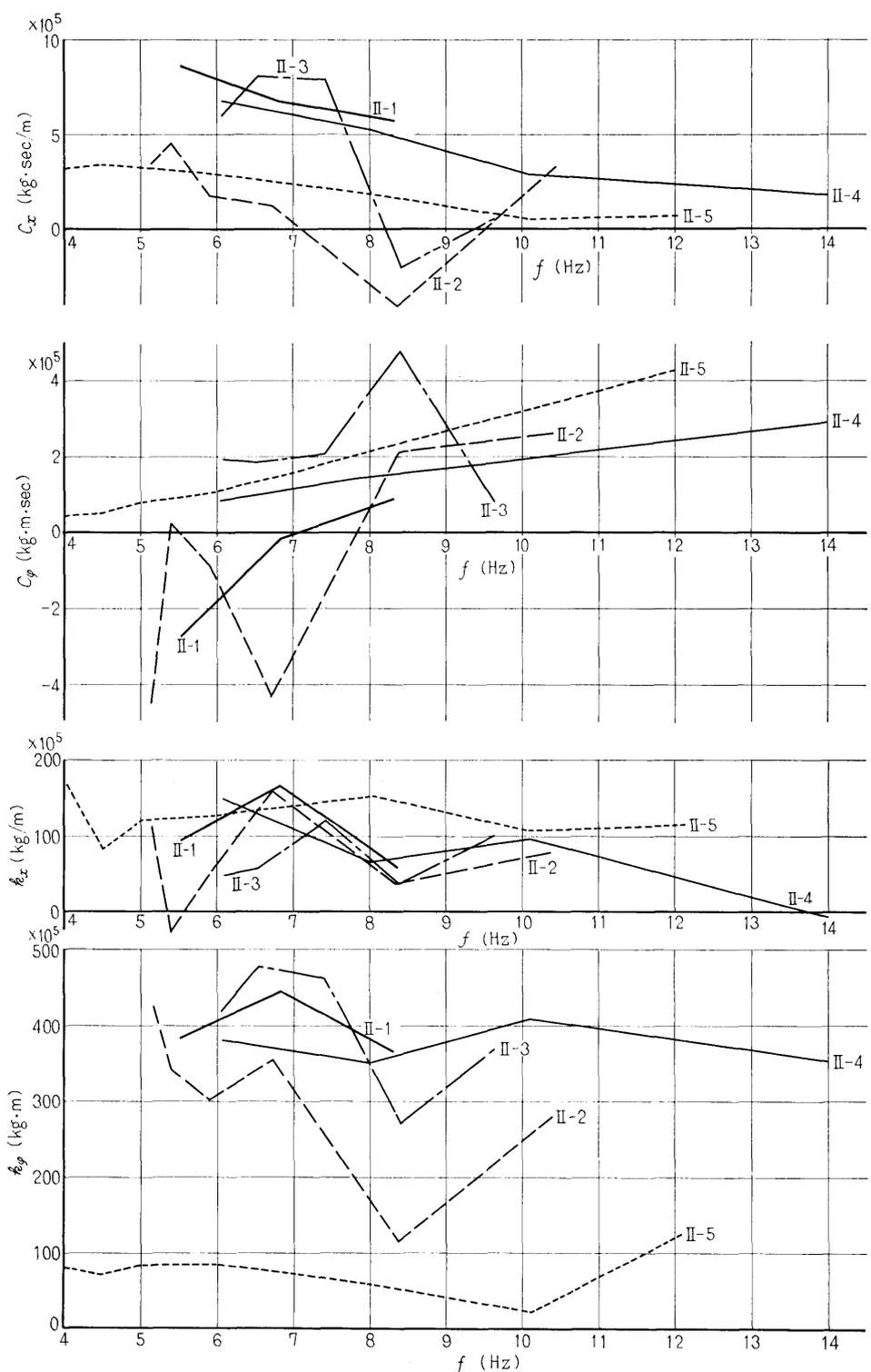


Fig. 36 Frequency responses of four mechanical constants in group II of experiment

$$\left. \begin{aligned} -P' &= c_x(\dot{x}_r - H\dot{\Phi}_r) + k_x(x_r - H\Phi_r) \\ \frac{J_3}{r'} P'T &= c_\varphi \dot{\Phi}_r + k_\varphi \Phi_r \end{aligned} \right\} \quad (52)$$

をえる。この関係式も Eq. (49) と同じように、Fig. 35 のモデルが成立するか否かを判定するための条件式である。

### 9.3 Eq. (49) についての考察

すでに 7.3.3) で述べたように、I 群の実験については I-6 を除いて、他はすべて  $P'T$  の位相角  $\gamma'T$  が  $\Phi$  の位相角  $\beta$  より  $20^\circ \sim 30^\circ$  程度遅れている。したがって Eq. (49) の第 2 式から  $c_\varphi < 0$  となり、これは negative damping の状態でありはなはだ不都合で、I 群の実験は Eq. (49) を満足しえないことが簡単にわかる。この場合は次節で述べるように、系の自由度を増し Eq. (52) を対象とせざるをえない。

II 群の実験についてはほとんどのものは  $P'T$  の位相角が  $\Phi$  より進んでいるので (7.3.5 参照) negative damping になるおそれはない。Eq. (49) を  $c_x, c_\varphi, k_x, k_\varphi$  について解き、これに  $x, \Phi$  の実測値を代入して Fig. 36 をえる。II 群の実験は概して測定点の数が少なく、またばらつきも大きいので、Fig. 36 だけでは以上の考え方が妥当であるか否かの判定は難しい。ただ載荷重のない場合 (II-1, II-4, II-5) は振動数に対する変化が比較的なだらかであるが、載荷重のある場合 (II-2, II-3) は部分的に negative damping になったり、また急激な変化をすることがわかる。ここで考えたように、実測した変位が全部バネの伸縮であるとすれば、Fig. 35 に示したモデルの力学定数は実験の種類によっても、振動数によってもかなり大幅に変化することだけは確かである。

### 9.4 Eq. (52) についての考察

前節で述べたように、I 群の実験結果を Eq. (49) に代入すると negative damping となってこの条件式を満足しない。すなわち、実測した変位を全部バネの伸縮であると考えすることはできない。そこで実測した変位が相対変位 (バネの伸縮) と、地盤の変位との和であると考え、Eq. (50) のように置いて Eq. (52) の条件式をえたのである。Eq. (50) において

$$\left. \begin{aligned} x_r &= a_r \cos(\omega t + \alpha_r) \\ x_0 &= a_0 \cos(\omega t + \alpha_0) \\ \Phi_r &= \varphi_r \cos(\omega t + \beta_r) \\ \Phi_0 &= \varphi_0 \cos(\omega t + \beta_0) \end{aligned} \right\} \quad (53)$$

と置く。Eq. (52) に含まれる  $c_x, k_x, c_\varphi, k_\varphi$  は Table 4 で与えられると仮定すると、 $x_r, \Phi_r$  について簡単に

解け、 $a_r, \alpha_r, \varphi_r, \beta_r$  が求まる。この結果を Eq. (50) に代入すると  $a_0, \alpha_0, \varphi_0, \beta_0$  が求められる。ここで  $H$  の値については  $H=1.0$  とすべきか、 $H=1.22$  とすべきかについての疑問があるので (8. 参照)、両方の数値について計算を行った。いずれにしても  $a_r$  と  $a_0$  の値が少し変わるだけで、位相角はほとんど変わらない。この計算結果を総括的に眺めてみると、I, II 両群の実験を通じて、次に述べるようないちじるしい特徴がある。

- 1) 全実験の内 II-5 を除いて、他はすべて  $\alpha_r \approx \beta_r$  が成り立つ。
- 2) さらに II 群の実験では  $\alpha_0 \approx \beta_0$  が成立し、添字 "r" と添字 "0" の位相角は大体逆相関係にある。したがって II-5 を除いて、 $x_r$  と  $\Phi_r$  は同一のベクトルでその振幅だけが異なり、また II 群の実験 (II-5 を除く) では  $x_0$  と  $\Phi_0$  も振幅だけが異なるベクトルとなる。以下の考察では II-5 の実験 (裏込め部分に水を満たし、壁頂起振機で加振した実験) を除外することとする。以上に述べた所から

$$\left. \begin{aligned} \frac{x_r}{\Phi_r} &= \frac{a_r}{\varphi_r} = s_1 \\ \frac{x_0}{\Phi_0} &= \frac{a_0}{\varphi_0} = s_2 \end{aligned} \right\} \quad (54)$$

と置くことができる。 $s_1$  および  $s_2$  の値を振動数に対してプロットすると、I 群の実験では  $s_1$  は振動数に対して平坦、あるいはごくゆるやかな右下がり、II 群の実験では  $s_1, s_2$  ともに平坦、あるいはごくゆるやかな右上がりの直線となる。簡単のためこれらの値を振動数に対して一定とみなすと、Table 5 に示した値となる ( $H=1.22$ )。この表から II 群の実験では  $s_1 \approx s_2$  であることがわかる。

Table 5 Values of  $s_1$  and  $s_2$

		1	2	3	4	5
I	$s_1$	2.05	1.70	2.00	2.10	1.80
II	$s_1$	1.44	1.38	1.41	1.51	—
II	$s_2$	1.48	1.36	1.41	1.48	—

以上述べた所からすべての実験に対して  $x_r = s_1 \Phi_r$  が成立する。これはとりもなおさず壁体の振動は 1 自由度で表わしうることを意味する。ここにいたって、壁体と基礎地盤を含めた全振動系が 2 自由度で表わしうる可能性が示唆されたわけである。

### 9.5 壁底面のモデル化

Fig. 37 に示すように壁底面の地盤で、壁体の振動に直接関与する部分の土塊を1個の集中質量とみなし、その重心を  $G_E$ 、質量を  $m_E$ 、重心に関する慣性能率を  $I_E$ 、土塊の回転バネ定数を  $k_{\varphi E}$ 、これに並列に入る減衰係数を  $c_{\varphi E}$ 、重心と  $k_{\varphi E}$  の鉛直距離を  $s_3$

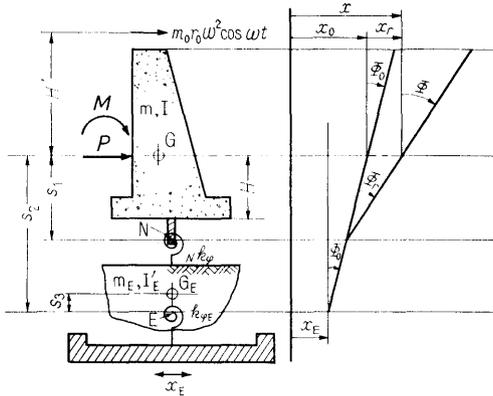


Fig. 37 Mechanical model of the wall and foundation soil

とする。いっぽう、壁体の回転バネ定数を  $Nk_{\varphi}$ 、これと並列に入る減衰係数を  $NC_{\varphi}$ 、壁体の重心と  $Nk_{\varphi}$  および  $k_{\varphi E}$  との鉛直距離は  $s_1$  および  $s_2$  となる。この図の場合  $x_0$  は土塊の回転によって生じる、壁体重心の水平変位と地動との和を表わすことになるから、土塊が受ける強制変位を改めて  $x_E$  で表わすと

$$x_0 = x_E + s_2 \phi_0 \quad (55)$$

ただし II 群の実験では  $x_E = 0$  である。 $x = x_r + x_0 = s_1 \phi_r + s_2 \phi_0 + x_E = s_1 \phi + (s_2 - s_1) \phi_0 + x_E$  となるから

$$\begin{aligned} 2T &= m \{ s_1 \dot{\phi} + (s_2 - s_1) \dot{\phi}_0 + \dot{x}_E \}^2 + I \dot{\phi}^2 \\ &\quad + m_E (\dot{x}_E + s_3 \dot{\phi}_0)^2 + I_E \dot{\phi}_0^2 \\ 2V &= Nk_{\varphi} (\phi - \phi_0)^2 + k_{\varphi E} \phi_0^2 \\ 2D &= NC_{\varphi} (\dot{\phi} - \dot{\phi}_0)^2 + c_{\varphi E} \dot{\phi}_0^2 \end{aligned}$$

$\phi$  と  $\phi_0$  を一般座標とみて、ラグランジュの運動方程式に代入すると

$$\begin{aligned} m s_1 \{ s_1 \ddot{\phi} + (s_2 - s_1) \ddot{\phi}_0 + \ddot{x}_E \} + I \ddot{\phi} + NC_{\varphi} (\dot{\phi} - \dot{\phi}_0) \\ + Nk_{\varphi} (\phi - \phi_0) = M + s_1 P + (H' + s_1) m_0 r_0 \omega^2 \cos \omega t \\ m (s_2 - s_1) \{ s_1 \ddot{\phi} + (s_2 - s_1) \ddot{\phi}_0 + \ddot{x}_E \} + m_E s_3 (\ddot{x}_E + s_3 \ddot{\phi}_0) \\ + I_E \ddot{\phi}_0 - Nk_{\varphi} (\phi - \phi_0) + k_{\varphi E} \phi_0 - NC_{\varphi} (\dot{\phi} - \dot{\phi}_0) \\ + c_{\varphi E} \dot{\phi}_0 = (s_2 - s_1) (P + m_0 r_0 \omega^2 \cos \omega t) \end{aligned}$$

となる。第1式と、両式の和をとった式を採用し、これらを変形すると次の運動方程式をえる。

$$\left. \begin{aligned} m s_1 \ddot{x} + I \ddot{\phi} + NC_{\varphi} \dot{\phi}_r + Nk_{\varphi} \phi_r \\ = M + s_1 P + (H' + s_1) m_0 r_0 \omega^2 \cos \omega t \\ m s_2 \ddot{x} + I \ddot{\phi} + I_E \ddot{\phi}_0 + c_{\varphi E} \dot{\phi}_0 + k_{\varphi E} \phi_0 = -m_E s_3 \ddot{x}_E \\ + M + s_2 P + (H' + s_2) m_0 r_0 \omega^2 \cos \omega t \end{aligned} \right\} (56)$$

この式で I 群の実験に対しては  $m_0 = 0$  であり、II 群の実験に対しては  $x_E = 0$  である。また  $I_E = I_E + m_E s_3^2$  である。Eq. (56) の第1式は、Eq. (51) に  $x_r = s_1 \phi_r$  を代入し、この第1式に  $s_1$  を乗じたものと第2式との和をとることによってえられる。この過程から

$$\begin{aligned} Nc_{\varphi} &= c_{\varphi} + c_{\varphi} (s_1 - H)^2 \\ Nk_{\varphi} &= k_{\varphi} + k_{\varphi} (s_1 - H)^2 \end{aligned}$$

なることが導かれる。このように Eq. (56) の第1式はすでに成立しており、第2式が成立するような妥当な係数の値が定めれば、Fig. 37 が求める底面の力学モデルであると言える。

しかし係数の数が多い上に、振動する土塊に関する情報がなため適当な仮定——例えば土塊の形状などを置いて計算しなければならないわけである。種々試みたが現段階では満足すべき結果はえられていない。

### 9.6 本章のまとめ

以上に述べたことを整理すると、条件式として

- ① Eq. (49) を用いる場合
- ② Eq. (52) を用いる場合

にわかれ、これに対する力学定数として

- Ⓐ Table 4 の値を用いる。すなわち、裏込めのない状態の壁体を、壁頂起振機で加振して求めた力学定数が、他の実験条件 (I 群の実験や裏込めのある II 群の実験) の場合にも変わらないと考えた場合
- Ⓑ 底面の力学定数が実験条件で変わると考えた場合

の二つの場合を考え、①あるいは②と、ⒶあるいはⒷの組み合わせを考えて底面の力学モデルを決定しようとしたのである。

まず、①-Ⓐの組み合わせは①-Ⓑに含まれる。なぜなら、①-Ⓑの組み合わせによって力学定数を計算し、その結果 Table 4 の数値がえられれば、これは①-Ⓐの組み合わせそのものであるからである。①-Ⓑの組み合わせは 9.3 で述べたように、I 群の実験に適用することはできず、また II 群の実験に適用した場合には、一応の結果は Fig. 36 のようにえられるが、なお疑問が残る。②-Ⓐの組み合わせによっていちじるしく特徴のある結果 (9.4 参照) がえられるが、前節で述べ

たように、この結果を満足するように壁底部の土塊の諸定数が今の所求められない。②-⑧の組み合わせを選ぶと、力学定数および相対変位ともに未知数で、これらを分離する手段がない。これらの疑問点については今後の発展にまたねばならない。

人工地震発生装置を用いた野外実験では、現場に用いられている最小程度の壁体を用い、現実に近い現象を観察しうる利点はあるが、他方、実験の振動数範囲が狭い、土圧実験特有の実測点のばらつきがある、実験のパラメータを変えるのに非常に骨が折れる、Eq. (55) の  $x_E$  を直接観測できない、などの欠点もっている。筆者らはかねてから小型の模型を用いた室内実験を行い、この実験によってえられたデータを前者の実験結果と比較検討する立場をとってきた。この実験は Fig. 38 に示すように、土の代りに Foam rubber を弾性媒体として用い、これを振動台上で水平に加振し、その上に載せられた模型壁体に作用する力と壁体の運動を観測するものである。もちろん、この実験は野外の振動土圧実験を室内で再現させるためのものではなく、階段状の弾性媒体とその部分にある剛体壁との間の相互作用を調べるためのものである。模型壁体が弾性媒体と接している境界面で起こる現象が正しく把握されたならば、これは本章で述べた多くの疑問を解く鍵となると同時に、モデル化についての基本的な仮定(9.1 参照)に解答を与え、側方振動土圧のモデル化に有力な示唆を与えるであろう。

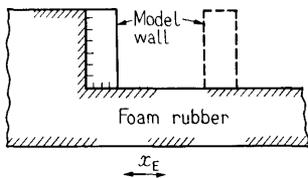


Fig. 38 Interaction between elastic medium and rigid wall

## 10. 結びとあとがき

人工地震発生装置を加振源とした実験は、自然地震によって起こる現象の本質をそこなわないようにこれを単純化したものであり、実験に用いられた試験壁体は、現場で用いられている最小程度の規模のものであるから、実験の相似則に気を使うことなく、ここにえられた実験データは現実のありのままの姿を示していると言えよう。またこの実験は現在の社会情勢のもとでは、もはや再現することがほとんど不可能であるこ

とを考え合わせると、付録Aに示した実験結果はまことに貴重なものであると思う。用いられた測定装置は、その後の急速な技術革新を経た今日から振り返ってみても、いささかも陳腐性を感じさせないばかりか、振動土圧計にいたっては、まさに今日言うデジタル計測の原理そのものであり、この on-off 判別の結果を重ね合わせてアナログ表示したものと考えることができる。ここで用いた振動土圧測定装置に、現在の新しい技術の光をあてて検討すれば、そこに新しい発展への芽がかくされていることが発見できるであろう。

実験によってえられた壁体背後に作用する振動土圧を立体表示法によって表現すれば、ベクトルの振幅と位相、その作用点と時間的変化を同時に表わすことができる。このように実験結果を直視的な形で表現することは、複雑な現象を理解する上で大いに役立つ。またこの立体表示法は土圧に限らず、実測値が正弦変化をする場合に広く応用されるものである。

実測によってえられた壁体背後に作用する振動土圧は、Eq. (27) によってあます所なく表現され、この式は簡単に積分されて合力と合モーメントが求められる。このようにして求めた壁体に作用する力とその変位は、7.3 および 7.4 で述べたように考えることによって運動方程式を満足させることができ、この運動方程式を基礎にして、振動中における壁体の力学モデルへの道が開かれたのである。また 7.2 に示した力と変位の間にある定性的な関係は、力学モデルを考える上での大切な指標となる。これらの定性的な特性を満たしうような力学モデルを完成するにいたらなかったが、一つの考え方として 9. で若干の考察を行った。これについては弾性媒体を用いた実験の結果から、媒体と剛体壁の間の相互作用を把握することによって、土圧の力学モデルへの道が開かれるのではないかと期待される。

多くの疑問を残しながらこの報告を終ることになった。この報告書の最初に述べたように、“振動土圧に関する研究”は2期に区分され、その第1期の研究を総括して文献8)にかかげたものにまとめた。しかしその内容については不満が多く、当初から書き改めたいと願っていた。幸い、実験を最初から組織的に行う機会にめぐまれ、その実験結果を解析するためにも十分な時間が与えられたので、前報を改訂するつもりで個々の問題に取り組んだ。しかし結果は、最終目標である力学モデルの完成までの道のりが、はるかに速くて

けわしいことを痛感させられたにとどまり、まことに残念であるとともに著者の力の無さを恥じるばかりとなってしまった。今後本報告を一つ踏のみ台として、同学の士が大いにこの分野を発展させられることを切望するものである。

本報告書をとじるに当って、次の方々に御礼申し上げねばならない。第1には、昭和28年に著者がこの研究にたずさわってから延々18年の長い歳月にわたって、常に行きとどいた御指導と、暖かい御はげましを賜った学習院大学々長近藤正夫先生に心から御礼申し上げる。本報告書の中に、少しでもこの分野に寄与する部分があるとすれば、それはいつにかかって近藤先生の御指導の賜である。第2には、第2期にあたる研究の機会を与えられ、実験結果の解析に充分な時間を与えて頂いた当研究所、奥田、大江前所長、および木堂所長、山内研究企画官、ならびに若桑、岩柳元関連施設部長、伊藤海洋開発工学部長に深く感謝の意を捧げる。これら上司の方々の御理解と御はげましがなければ、とうていここまで続けることはできなかったであろう。第3には、第2期の実験をともに行い、実験資料の整理、および本報告書の図面の作成などに協力して頂いた当研究室山川賢次技官に感謝する。同技官の協力がなければこの研究はなお一層困難なものになっていたであろう。

最後に数値計算についてであるが、本報告書で取り扱われている計算の内、8.までのものは卓上電子計算機による手計算、および富士通ファコム株式会社東京計算センタへの外注によって行った。また9.で行っ

た試算は当研究所共用電子計算機 FACOM 270-20 を用いて行ったことを付記しておく。

なお、本報告書の一部は土木学会論文報告集に連載される予定である。

#### 参 考 文 献

- 1) M. Kondo, G. Hasegawa, M. Ichihara, S. Niwa, Researches on Earth Pressures, Part I, Report of Transportation Technical Research Institute, No. 15, May, 1955, pp. 1~11
- 2) 市原松平, 丹羽 新, 人工地震発生装置および地震時土圧測定装置について, 土木学会論文集, 第38号, 昭・31・10, pp. 43~48
- 3) 丹羽 新, 壁体自身の振動による裏込土圧の実測, 土木学会論文集, 第39号, 昭・31・12, pp. 58~61
- 4) 丹羽 新, 振動土圧に関する研究, 運輸技術研究所報告, 8巻3号, 1958年9月, pp. 1~30
- 5) 丹羽 新, 人工地震発生装置による振動土圧の実測, 土木学会論文集, 第60号, 昭・34・1, pp. 54~59.
- 6) 丹羽 新, 陰極線オシロスコープによる定常地震動(変位・速度・加速度)の観測装置, 土木学会誌, 45巻6号, 昭・35・6, pp. 29~34
- 7) S. Niwa, An Experimental Study Of Oscillating Earth Pressures Acting On A Quay Wall, Proc. of the 2<sup>nd</sup> WCEE, Vol. I, July, 1960, pp. 281~296
- 8) 丹羽 新, 地震時土圧による擁壁の振動機構について, 私費出版, 昭・36・7, pp. 1~215
- 9) 山崎栄作, 立体解析幾何学講義, 第4版, 内田老鶴圃, 昭・16・12, pp. 242~252

## 付 録 A

すでに Fig. 6 で示したのと全く同じ形式で、土圧の鉛直分布を Fig. 39-(1)~(65) にかかげる。実験番号は

I: 人工地震発生装置を加振源とした実験

II: 壁頂起振機を加振源とした実験

- 1: 載荷重を加える前の裏込めのみの場合
- 2: 裏込め上に高さ 2 m の載荷重を加えた場合
- 3: 裏込め上に高さ 1 m の載荷重を加えた場合
- 4: 載荷重を取り除いて裏込めのみにした場合
- 5: 裏込め砂の代りに水を満たした場合

の内容を示し、最後の小数点を持つ数は実験の加振振動数を表わしている。例えば I-2-5.44 は、人工地震発生装置によって加振し、裏込め上に高さ 2 m の載荷重を加えた場合の実験で、そのときの加振振動数が 5.44 Hz であることを示す。同じ状態の実験を一組とし、振動数の小さい方から順にならべてある。また 1 枚の図の中では

①: 振動前の静土圧を実線で、振動後の静土圧を破線で、振動中の土圧の変化部分を陰影をつけた部分で表わしてある。振動中の土圧は位相角を無視し、いずれも実測値をそのまま深さ  $z$  に対してプロットしたものである。

②: 振動土圧波形を波形分析し、その基本波振動の振幅  $p$  を  $z$  に対してプロットしたものである。

③: 振動土圧波形の基本波振動の位相角  $\gamma$  を  $z$  に対してプロットしたものである。

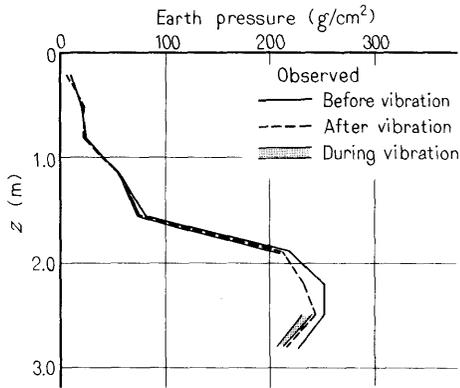
④:  $p_y (=p \sin \gamma)$  を  $z$  に対してプロットしたもので、振動土圧の分布を表わす空間曲線  $L_p$  の、 $yz$  平面への投影曲線を表わしている。

⑤:  $p_x (=p \cos \gamma)$  を  $z$  に対してプロットしたもので、空間曲線  $L_p$  の  $xz$  平面への投影曲線を表わしている。

②, ③, ④, ⑤の中の○印は実測値で、実線は実験式を計算して求めたものである。すなわち Fig. 39-(1)~(58) は Eq. (27) から、Fig. 39-(59)~(65) は Eq. (24) から計算したものである。そのときの次数  $n$  の値は Table 3 に示されている。また、④, ⑤中の×印は曲線の対称点を示している。

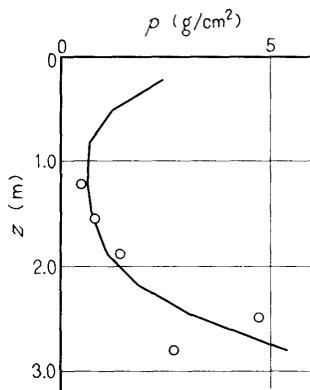
おのおのの図の右肩にある表に壁体背後の振動土圧の実測値  $p$  と  $\gamma$ 、底面土圧計 No. 6 の実測値  $p_T$  と  $\gamma_T$ 、および 2 点 ( $z=0$  m および  $z=2.16$  m) で実測した壁体の変位  $D$ 、 $\lambda$  (基本波の値) が、振動数  $f$  とともに示されている。

# I-1-2.81

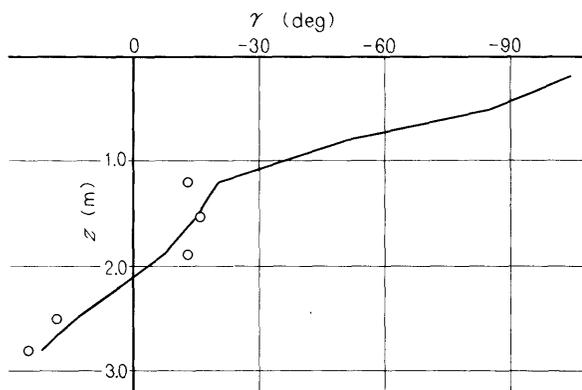


①

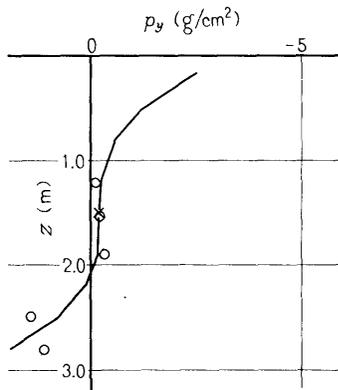
$z$ m	$p$ g/cm <sup>2</sup>	$\gamma$ deg	$z$ m	$p$ g/cm <sup>2</sup>	$\gamma$ deg
0.21	—	—	2.49	4.7	18
0.51	—	—	2.80	2.7	25
0.81	—	—	Bottom (No.6)	—	—
1.21	0.5	-13	$z$ m	$D$ mm	$\lambda$ deg
1.54	0.8	-16	0	0.0412	15
1.89	1.4	-13	2.16	0.0309	16
2.20	—	—	$f = 2.81$ Hz		



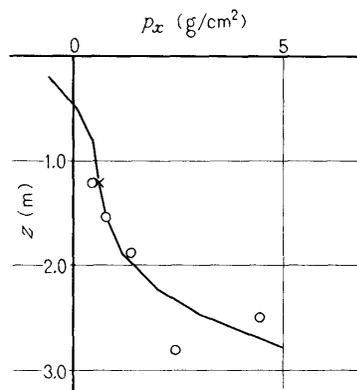
②



③



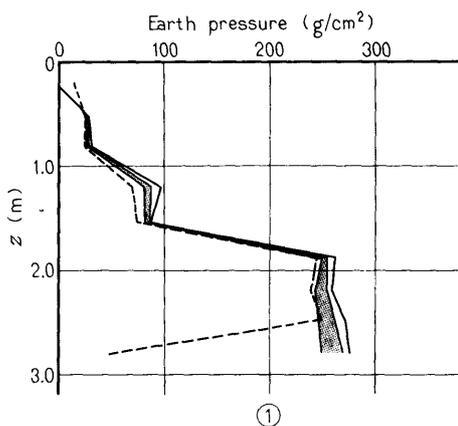
④



⑤

Fig.39-(1) Vertical distributions of earth pressures  
 ○: Observed values —: Empirical formula

# I-1-3.98



$z$ m	$p$ g/cm <sup>2</sup>	$\gamma$ deg	$z$ m	$p$ g/cm <sup>2</sup>	$\gamma$ deg
0.21	—	—	2.49	7.8	+0
0.51	0.9	-27	2.80	10.0	-26
0.81	1.3	-32	Bottom (No. 6)	—	—
1.21	3.6	-31	$z$ m	$D$ mm	$\lambda$ deg
1.54	2.3	-25	0	0.223	-25
1.89	6.4	-34	2.16	0.162	-30
2.20	5.6	-14	$f = 3.98$ Hz		

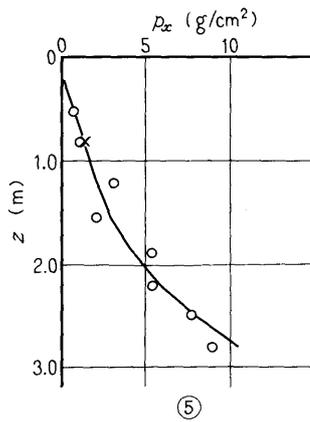
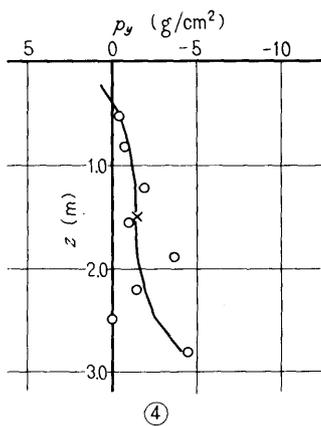
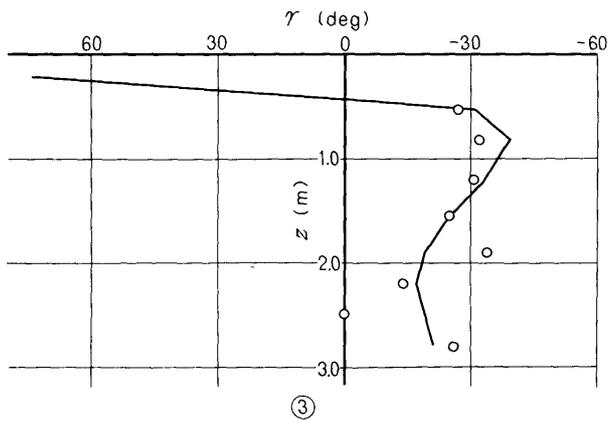
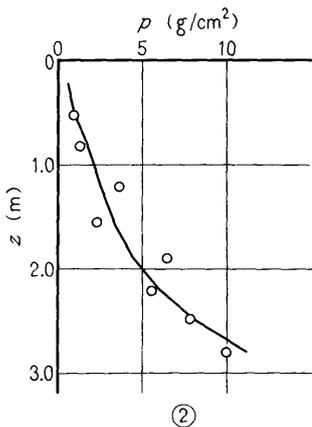
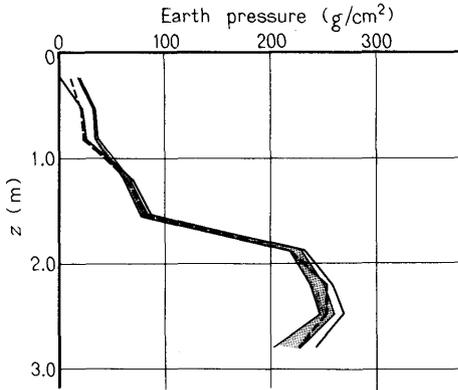


Fig. 39-(2)

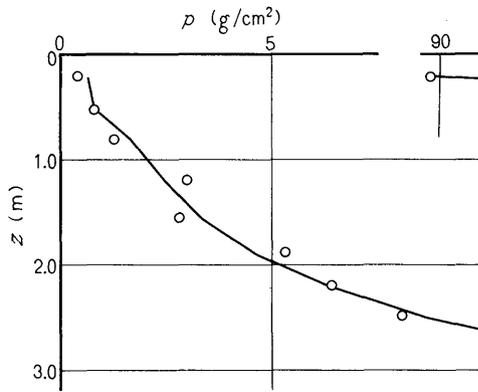
# I-1-4.06



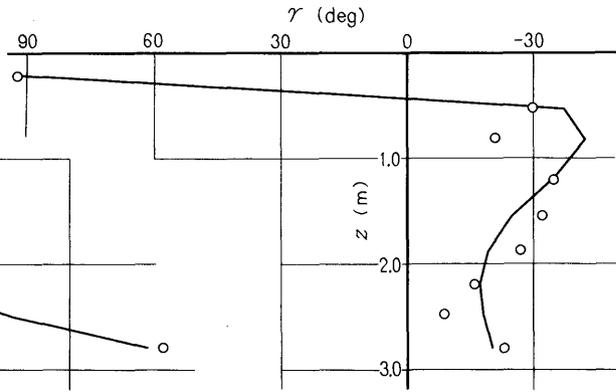
①

$z$ m	$p$ g/cm <sup>2</sup>	$\gamma$ deg
0.21	0.4	92
0.51	0.8	-30
0.81	1.3	-21
1.21	3.0	-35
1.54	2.8	-32
1.89	5.3	-27
2.20	6.4	-16

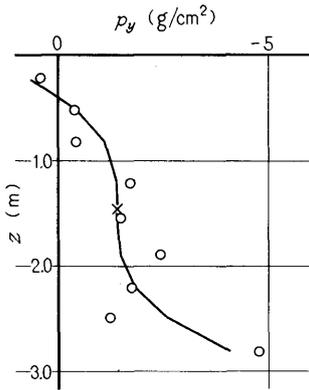
$z$ m	$p$ g/cm <sup>2</sup>	$\gamma$ deg
2.49	8.1	-9
2.80	12.2	-23
Bottom (No. 6)	—	—
$z$ m	$D$ mm	$\lambda$ deg
0	0.263	-24
2.16	0.192	-29
$f = 4.06$ Hz		



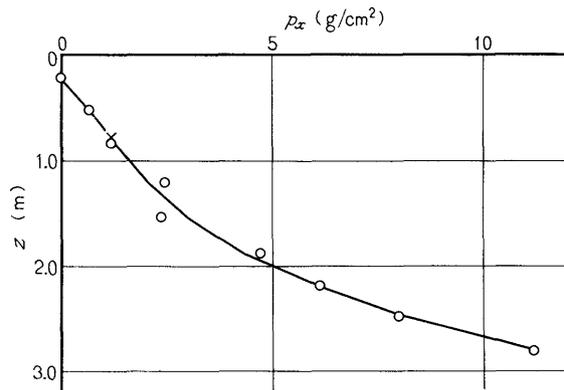
②



③



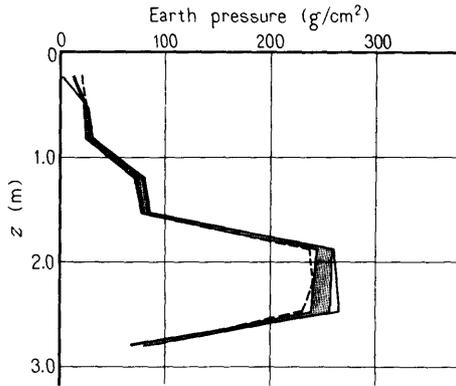
④



⑤

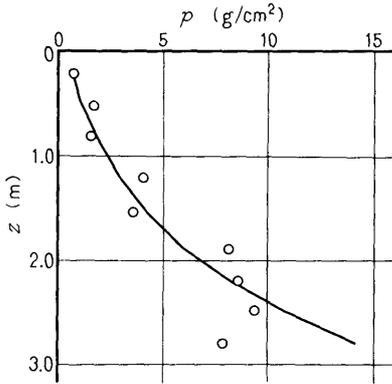
Fig. 39-(3)

# I-1-4.78

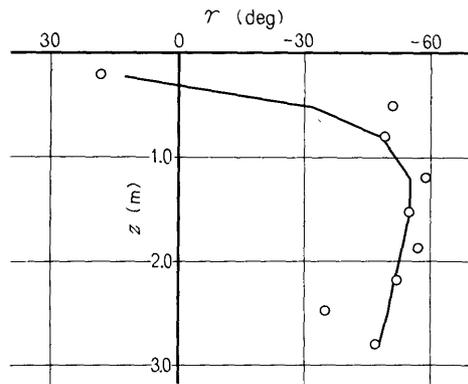


①

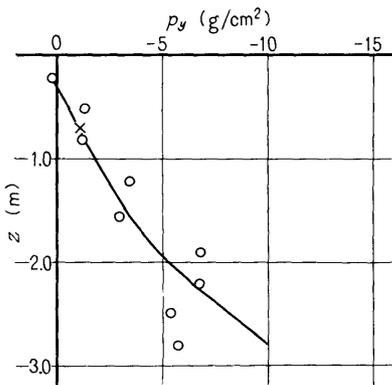
$z$ m	$p$ g/cm <sup>2</sup>	$\gamma$ deg	$z$ m	$p$ g/cm <sup>2</sup>	$\gamma$ deg
0.21	0.7	18	2.49	9.3	-35
0.51	1.6	-51	2.80	7.8	-47
0.81	1.6	-49	Bottom (No.6)	33.8	-77
1.21	4.0	-59	$z$ m	$D$ mm	$\lambda$ deg
1.54	3.6	-55	0	0.295	-75
1.89	8.1	-57	2.16	0.209	-84
2.20	8.5	-52	$f = 4.78$ Hz		



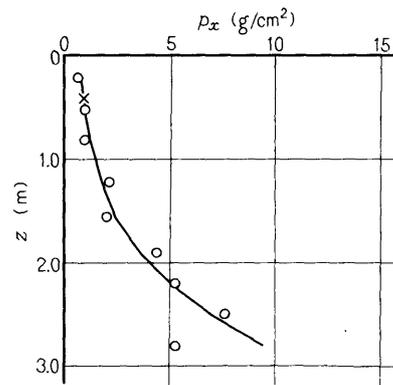
②



③



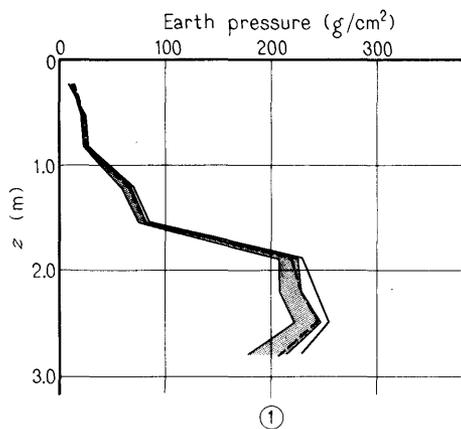
④



⑤

Fig. 39-(4)

# I-1-4.93



$z$ m	$p$ $g/cm^2$	$\gamma$ deg
0.21	1.1	-9
0.51	1.6	-49
0.81	1.7	-53
1.21	4.3	-57
1.54	4.0	-50
1.89	8.4	-59
2.20	10.6	-48

$z$ m	$p$ $g/cm^2$	$\gamma$ deg
2.49	11.1	-44
2.80	17.8	-44
Bottom (No. 6)	33.4	-78
$z$ m	$D$ mm	$\lambda$ deg
0	0.320	-60
2.16	0.225	-71
$f = 4.93$ Hz		

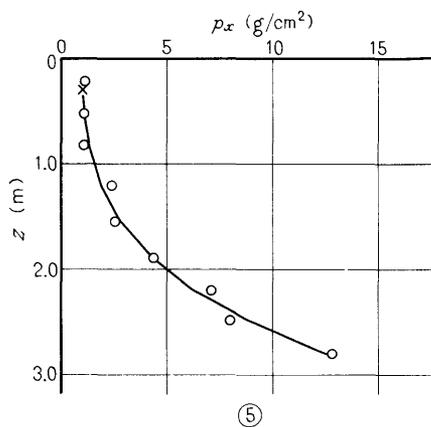
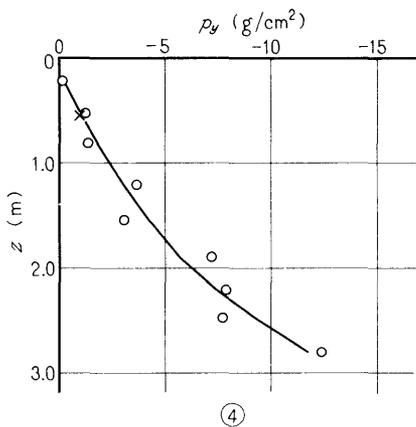
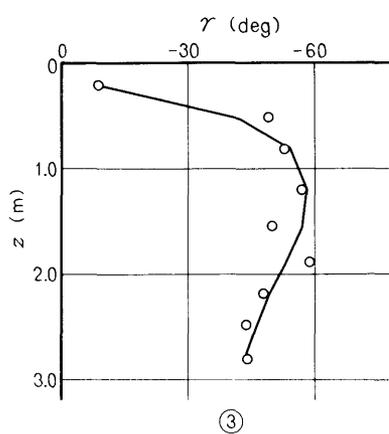
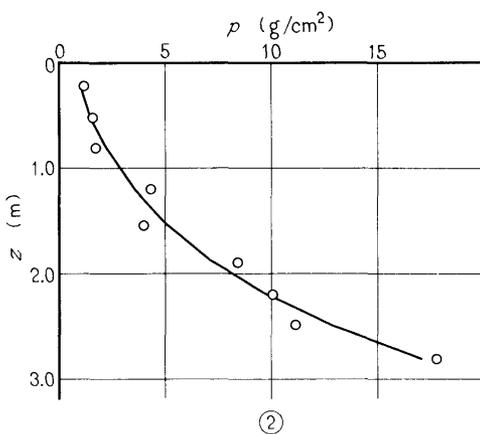
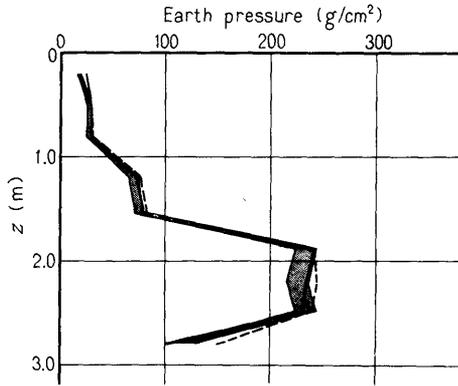


Fig. 39-(5)

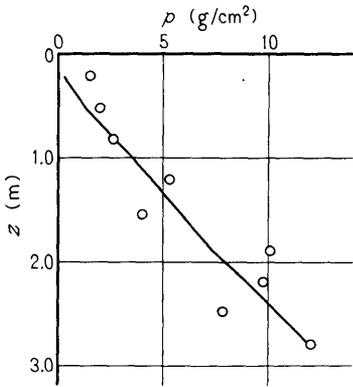
# I-1-5.39



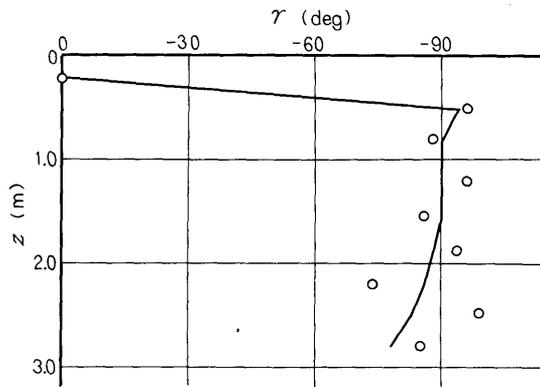
①

$z$ m	$p$ g/cm <sup>2</sup>	$\gamma$ deg
0.21	1.5	0
0.51	2.0	-96
0.81	2.6	-88
1.21	5.3	-96
1.54	4.0	-86
1.89	10.5	-94
2.20	9.7	-74

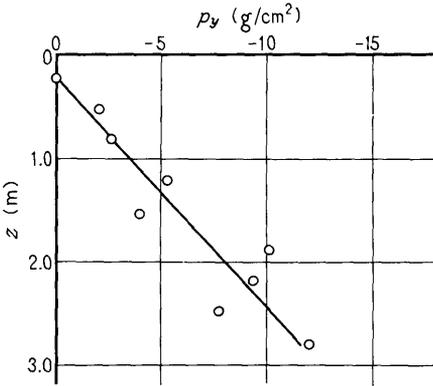
$z$ m	$p$ g/cm <sup>2</sup>	$\gamma$ deg
2.49	7.8	-99
2.80	12.0	-85
Bottom (No. 6)	37.1	-116
$z$ m	$D$ mm	$\lambda$ deg
0	0.376	-96
2.16	0.246	-109
$f = 5.39$ Hz		



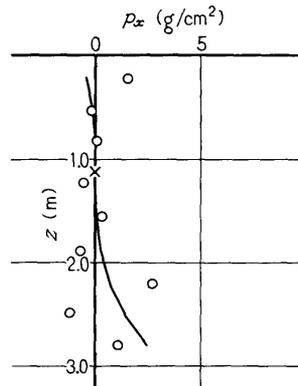
②



③



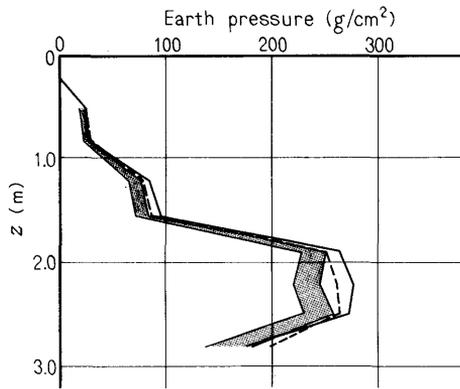
④



⑤

Fig. 39-(6)

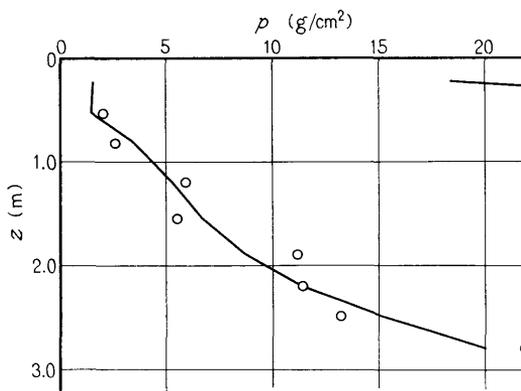
# I-1-5.68



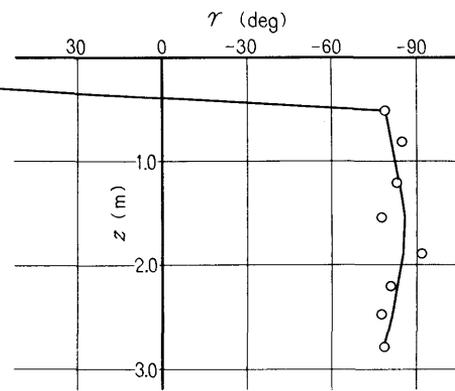
$z$ m	$p$ g/cm <sup>2</sup>	$\gamma$ deg
0.21	—	—
0.51	2.0	-79
0.81	2.6	-85
1.21	5.9	-83
1.54	5.5	-78
1.89	11.1	-92
2.20	11.4	-81

$z$ m	$p$ g/cm <sup>2</sup>	$\gamma$ deg
2.49	13.2	-78
2.80	21.9	-79
Bottom (No. 6)	61.8	-120
$z$ m	$D$ mm	$\lambda$ deg
0	0.542	-100
2.16	0.321	-116
$f = 5.68$ Hz		

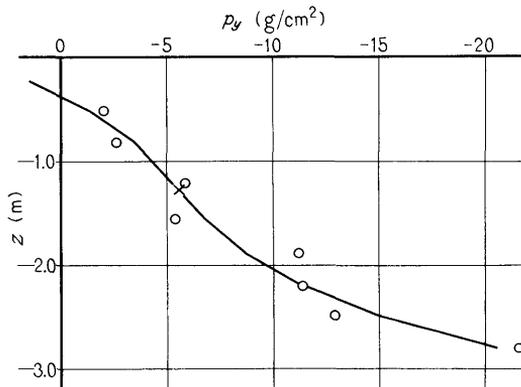
①



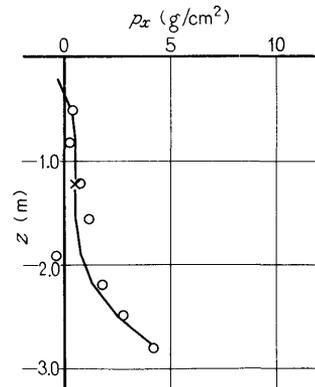
②



③



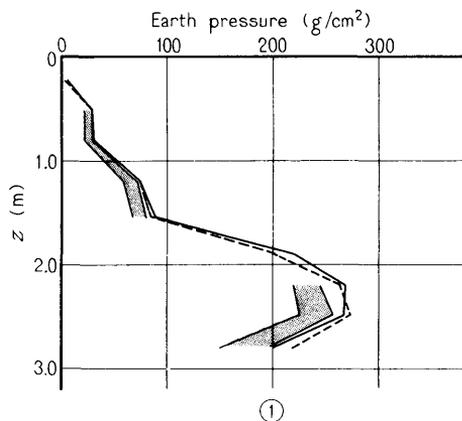
④



⑤

Fig. 39-(7)

# I-1-5.86



$z$ m	$p$ $\text{g/cm}^2$	$\gamma$ deg	$z$ m	$p$ $\text{g/cm}^2$	$\gamma$ deg
0.21	—	—	2.49	14.6	-96
0.51	2.6	-100	2.80	21.1	-102
0.81	2.9	-96	Bottom (No. 6)	63.2	-131
1.21	5.9	-104	$z$ m	$D$ mm	$\lambda$ deg
1.54	5.6	-103	0	0.500	-114
1.89	—	—	2.16	0.313	-127
2.20	10.2	-94	$f = 5.86$ Hz		

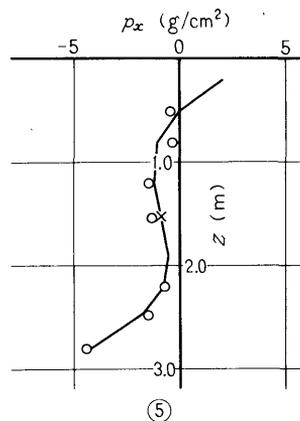
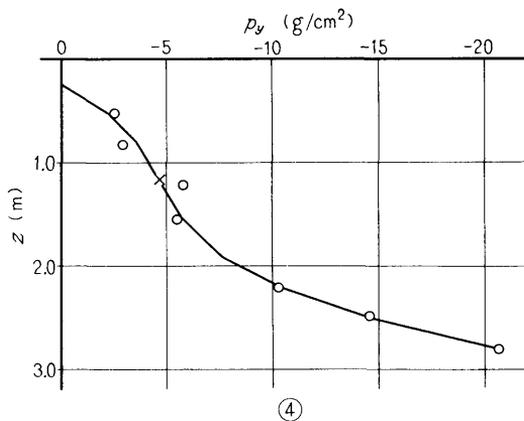
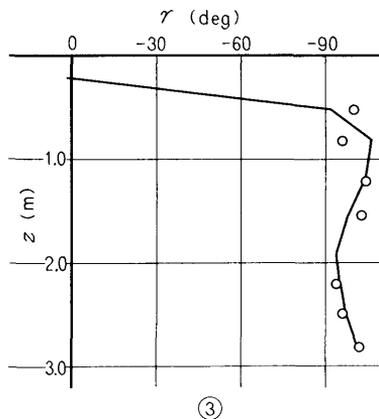
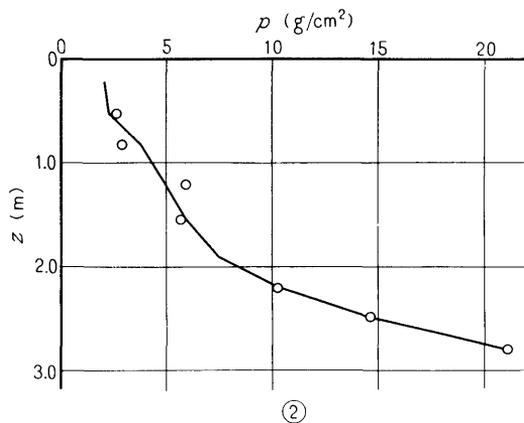
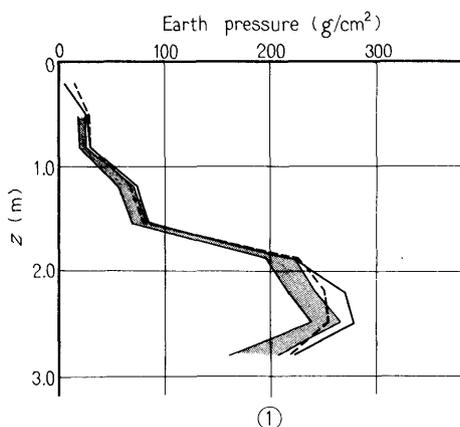


Fig. 39-(8)

# I-1-5.93



$z$ m	$p$ $g/cm^2$	$\gamma$ deg
0.21	—	—
0.51	2.9	-97
0.81	3.1	-98
1.21	6.4	-99
1.54	6.1	-94
1.89	12.1	-104
2.20	12.1	-89

$z$ m	$p$ $g/cm^2$	$\gamma$ deg
2.49	15.7	-101
2.80	23.2	-90
Bottom (No. 6)	60.2	-129
$z$ m	$D$ mm	$\lambda$ deg
0	0.550	-112
2.16	0.316	-127
$f = 5.93$ Hz		

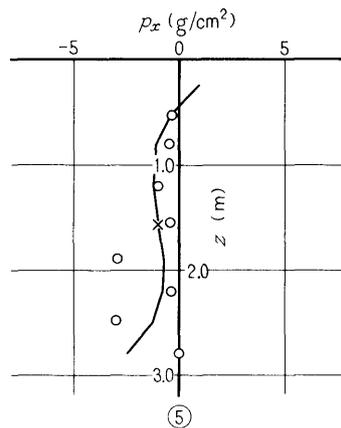
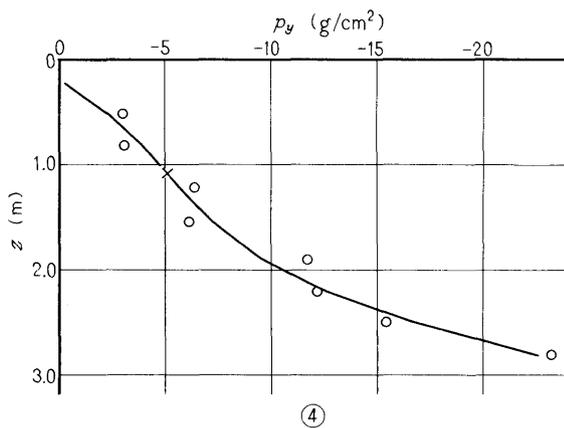
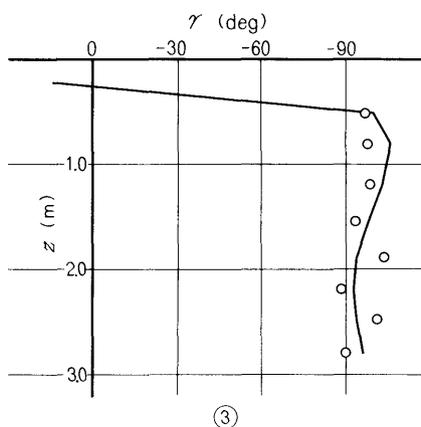
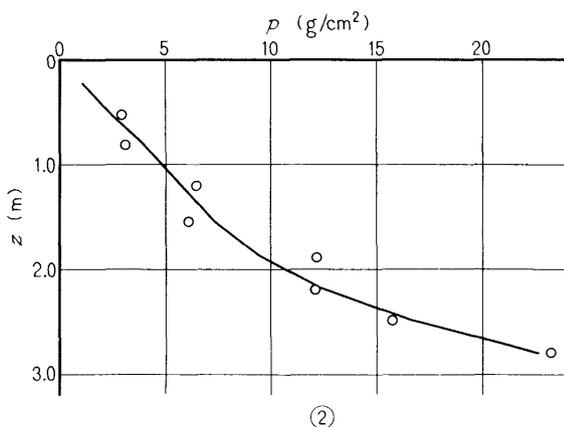
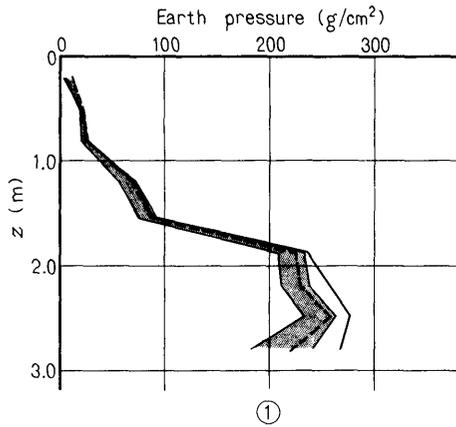


Fig. 39-(9)

# I-1-5.93



$z$ m	$p$ g/cm <sup>2</sup>	$\gamma$ deg	$z$ m	$p$ g/cm <sup>2</sup>	$\gamma$ deg
0.21	1.4	-29	2.49	13.8	-89
0.51	1.4	-94	2.80	26.5	-96
0.81	2.5	-87	Bottom (No. 6)	57.0	-122
1.21	6.8	-100	$z$ m	$D$ mm	$\lambda$ deg
1.54	6.6	-94	0	0.502	-98
1.89	12.1	-99	2.16	0.291	-108
2.20	12.4	-88	$f = 5.93$ Hz		

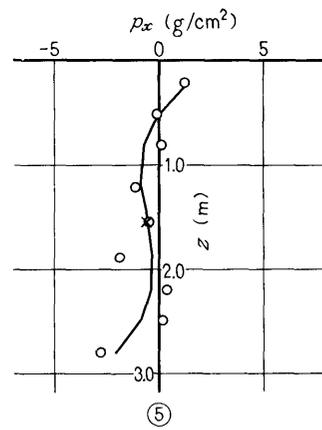
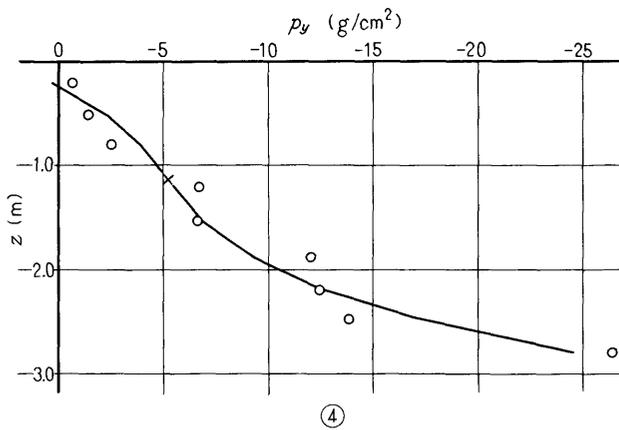
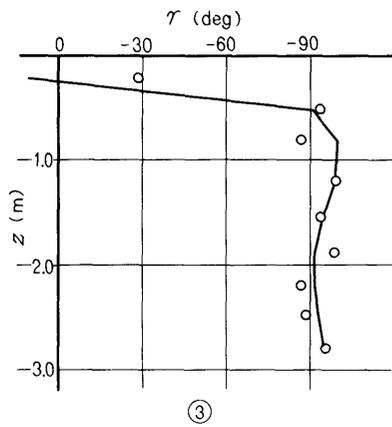
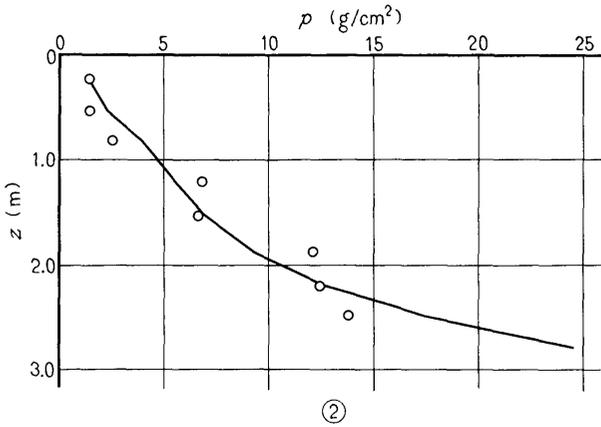
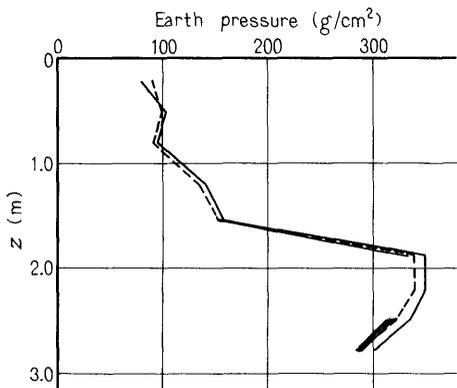


Fig. 39-(10)

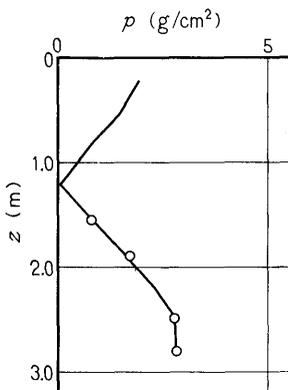
# I-2-2.59



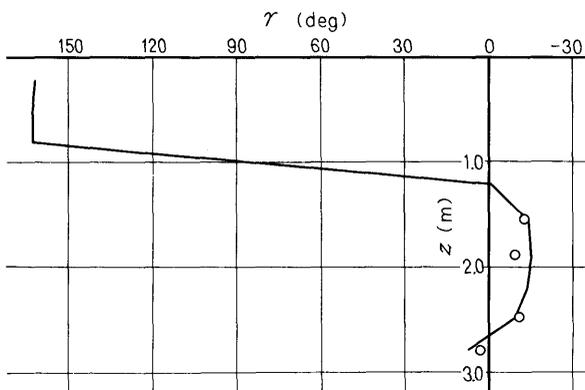
①

$z$ m	$p$ g/cm <sup>2</sup>	$\gamma$ deg
0.21	—	—
0.51	—	—
0.81	—	—
1.21	—	—
1.54	0.8	-13
1.89	1.7	-10
2.20	—	—

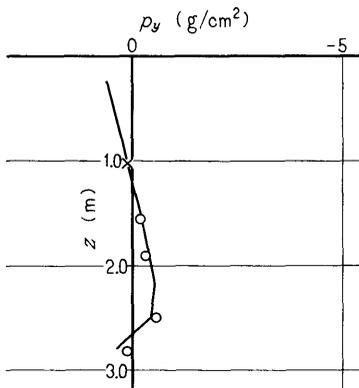
$z$ m	$p$ g/cm <sup>2</sup>	$\gamma$ deg
2.49	2.8	-11
2.80	2.8	3
Bottom (No. 6)	—	—
$z$ m	$D$ mm	$\lambda$ deg
0	0.0239	32
2.16	0.0244	31
$f = 2.59$ Hz		



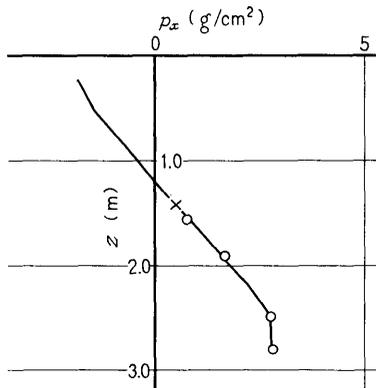
②



③



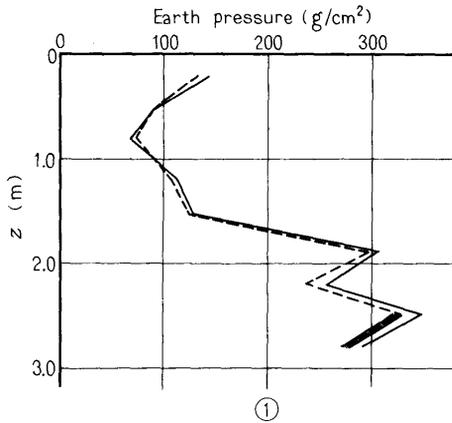
④



⑤

Fig. 39 - (11)

# I-2-3.01



$z$ m	$p$ g/cm <sup>2</sup>	$\gamma$ deg	$z$ m	$p$ g/cm <sup>2</sup>	$\gamma$ deg
0.21	—	—	2.49	4.3	-3
0.51	—	—	2.80	4.7	3
0.81	—	—	Bottom (No.6)	—	—
1.21	—	—	$z$ m	$D$ mm	$\lambda$ deg
1.54	1.0	-15	0	0.058	15
1.89	2.0	-21	2.16	0.0381	18
2.20	—	—	$f = 3.01$ Hz		

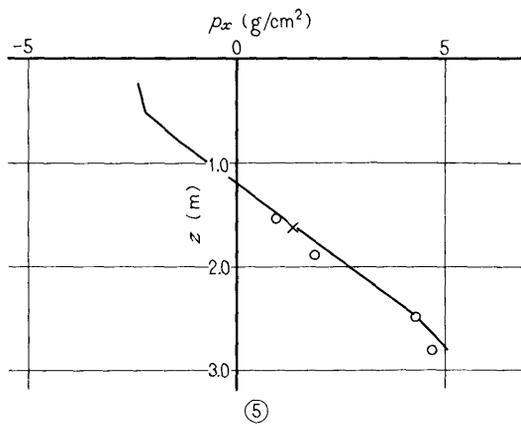
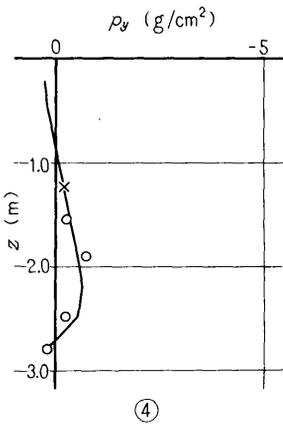
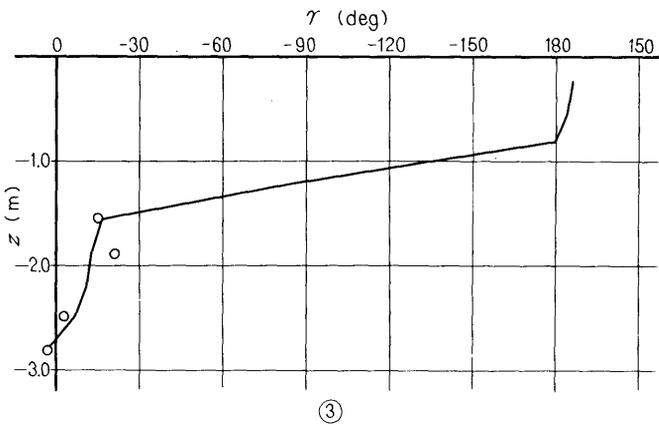
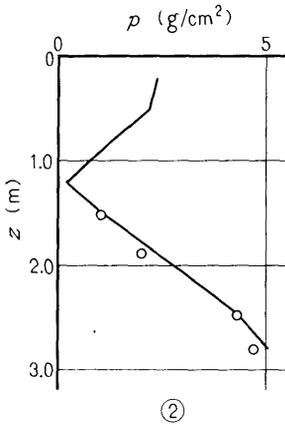
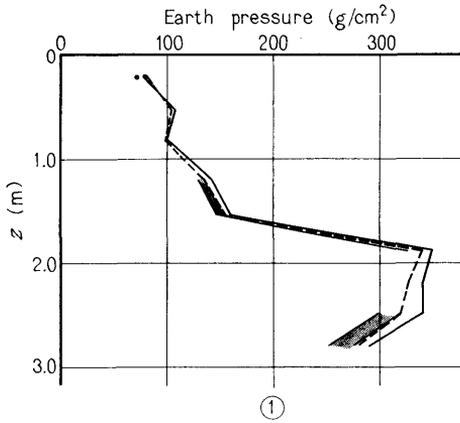


Fig. 39-(12)

# I-2-3.95



$z$ m	$p$ g/cm <sup>2</sup>	$\gamma$ deg
0.21	7.0	-91
0.51	—	—
0.81	—	—
1.21	2.4	-51
1.54	3.2	-19
1.89	6.0	-12
2.20	—	—

$z$ m	$p$ g/cm <sup>2</sup>	$\gamma$ deg
2.49	10.3	-1
2.80	12.8	-12
Bottom (No. 6)	24.8	-41
$z$ m	$D$ mm	$\lambda$ deg
0	0.241	-10
2.16	0.171	-11
$f = 3.95$ Hz		

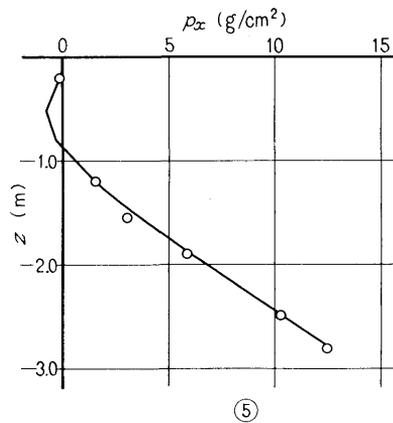
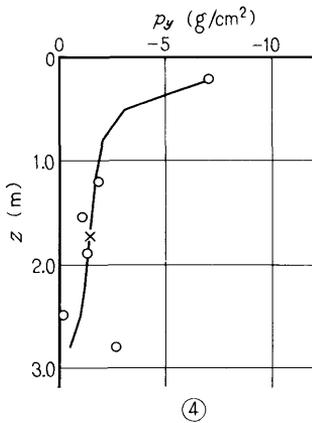
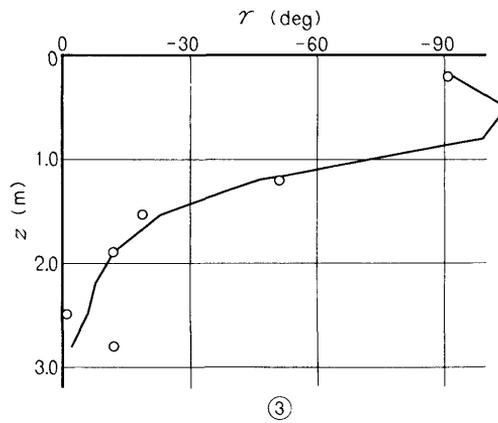
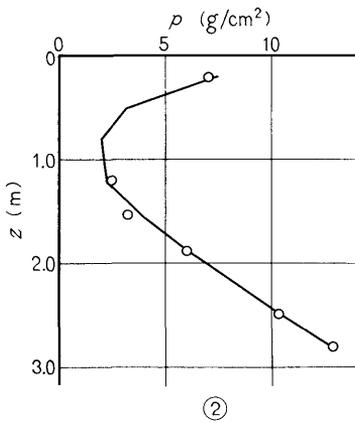
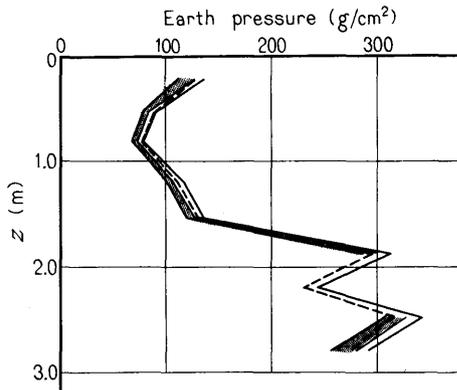


Fig. 39-(13)

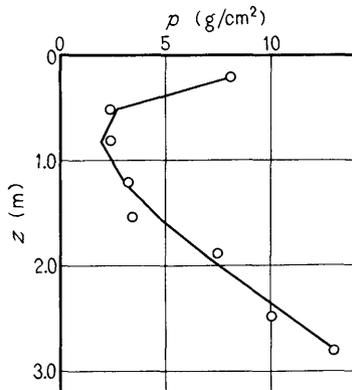
# I-2-4.20



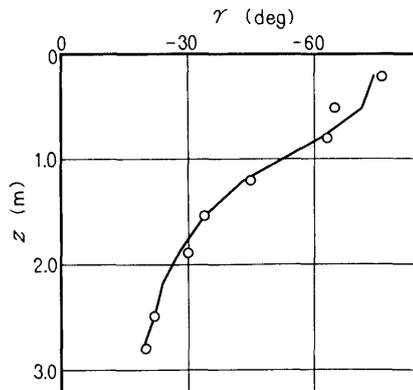
①

$z$ m	$p$ g/cm <sup>2</sup>	$\gamma$ deg
0.21	8.1	-76
0.51	2.4	-65
0.81	2.3	-63
1.21	3.2	-45
1.54	3.4	-34
1.89	7.4	-30
2.20	—	—

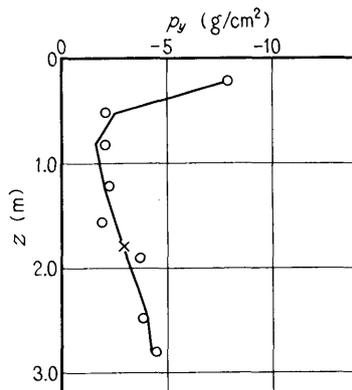
$z$ m	$p$ g/cm <sup>2</sup>	$\gamma$ deg
2.49	10.2	-22
2.80	12.9	-20
Bottom (No. 6)	26.9	-60
$z$ m	$D$ mm	$\lambda$ deg
0	0.324	-29
2.16	0.222	-28
$f = 4.20$ Hz		



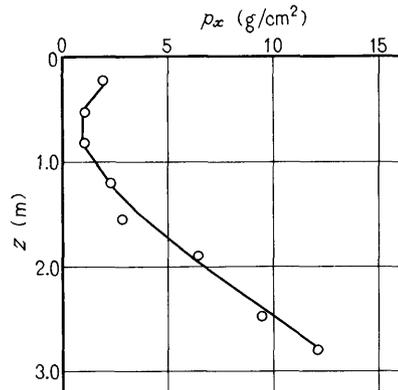
②



③



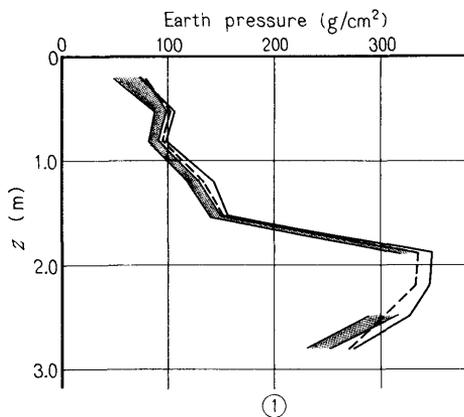
④



⑤

Fig. 39-(14)

# I-2-4.88



$z$ m	$p$ g/cm <sup>2</sup>	$\gamma$ deg
0.21	14.5	-105
0.51	6.0	-84
0.81	4.5	-75
1.21	5.6	-65
1.54	5.0	-57
1.89	8.9	-54
2.20	—	—

$z$ m	$p$ g/cm <sup>2</sup>	$\gamma$ deg
2.49	12.7	-41
2.80	19.5	-43
Bottom (No. 6)	62.9	-83
$z$ m	$D$ mm	$\lambda$ deg
0	0.394	-60
2.16	0.255	-66
$f = 4.88$ Hz		

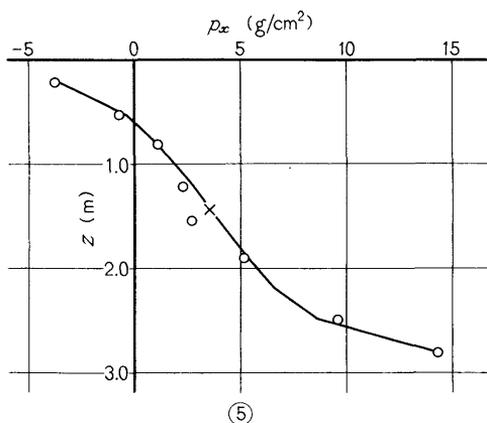
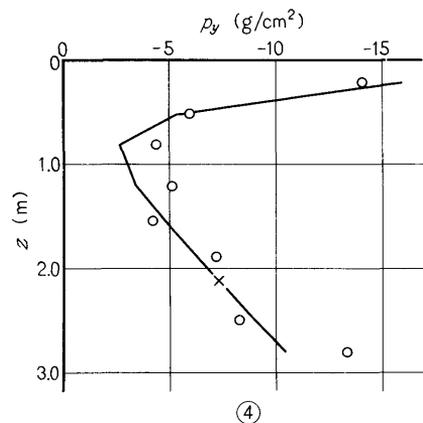
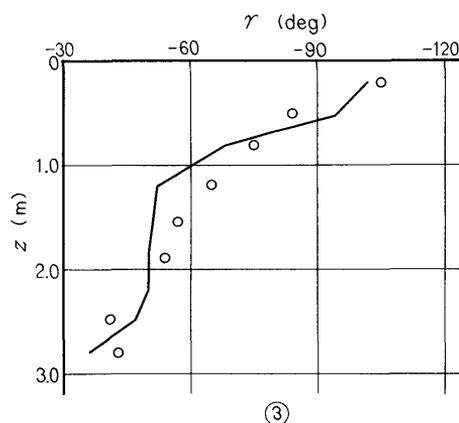
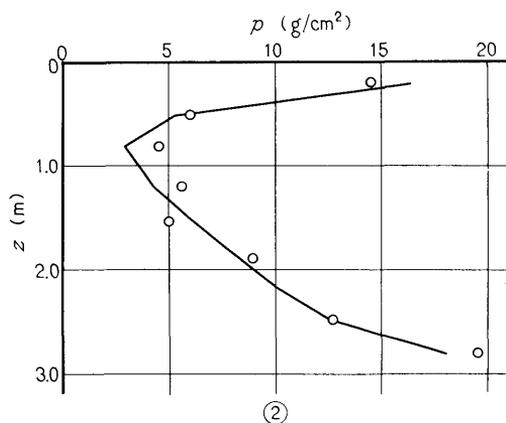
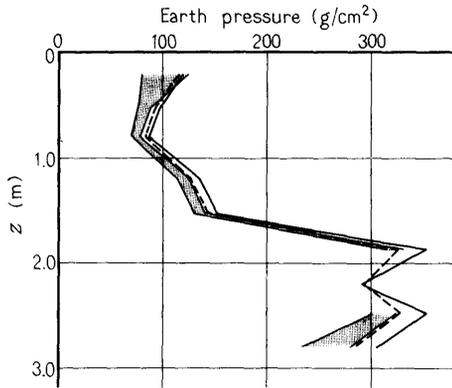


Fig. 39-(15)

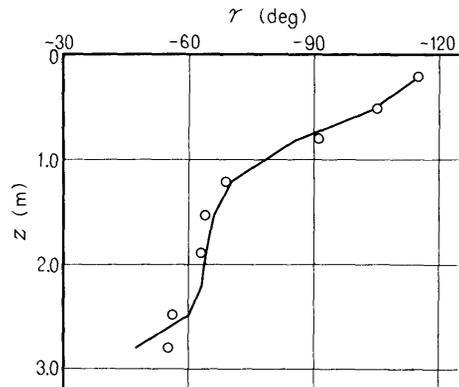
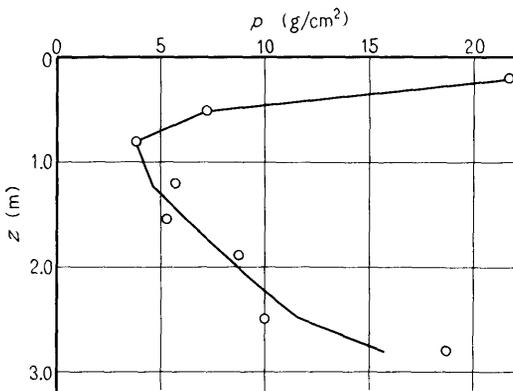
# I-2-4.93



$z$ m	$p$ g/cm <sup>2</sup>	$\gamma$ deg
0.21	21.7	-115
0.51	7.2	-105
0.81	3.8	-91
1.21	5.7	-69
1.54	5.3	-64
1.89	8.7	-63
2.20	—	—

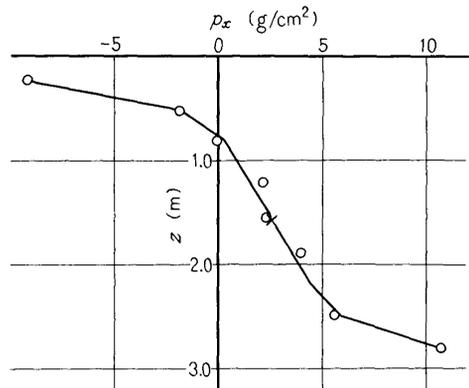
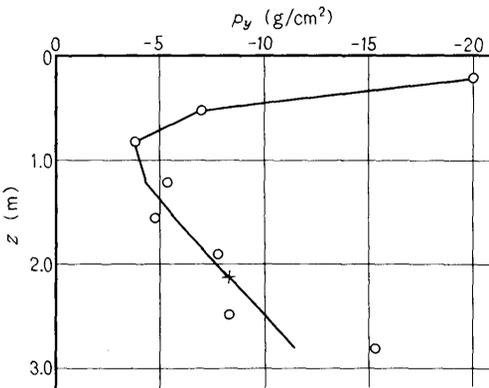
$z$ m	$p$ g/cm <sup>2</sup>	$\gamma$ deg
2.49	10.0	-56
2.80	18.7	-55
Bottom (No. 6)	72.1	-97
$z$ m	$D$ mm	$\lambda$ deg
0	0.454	-74
2.16	0.300	-82
$f = 4.93$ Hz		

①



②

③

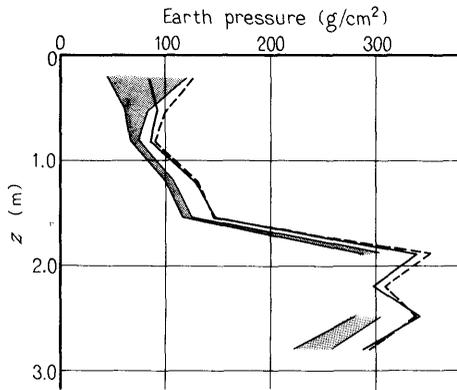


④

⑤

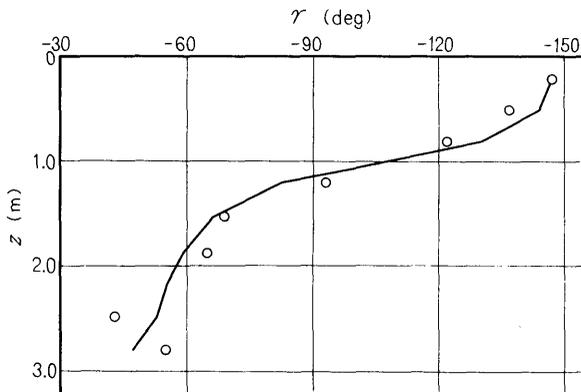
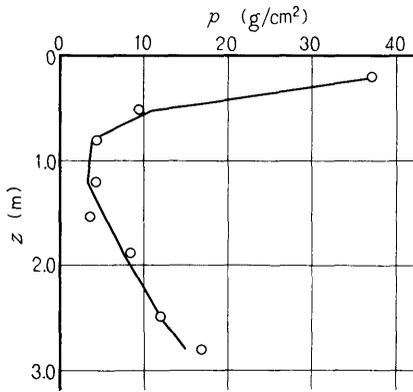
Fig. 39-(16)

# I-2-5.40



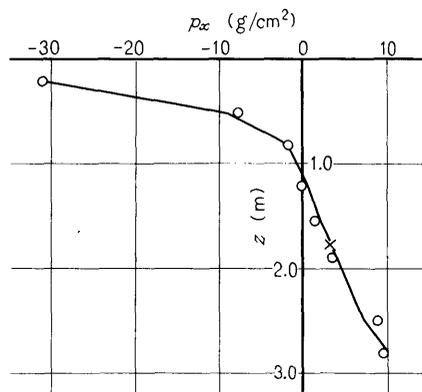
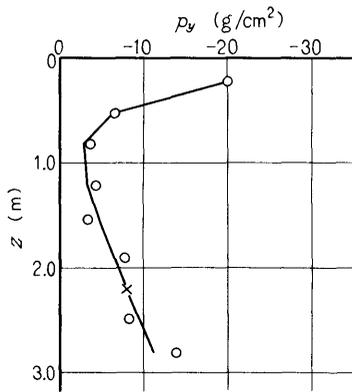
$z$ m	$p$ g/cm <sup>2</sup>	$\gamma$ deg	$z$ m	$p$ g/cm <sup>2</sup>	$\gamma$ deg
0.21	36.9	-147	2.49	12.0	-43
0.51	9.4	-137	2.80	16.8	-55
0.81	4.4	-122	Bottom (No. 6)	107.9	-151
1.21	4.1	-93	$z$ m	$D$ mm	$\lambda$ deg
1.54	3.6	-69	0	0.590	-113
1.89	8.4	-65	2.16	0.323	-111
2.20	—	—	$f = 5.40$ Hz		

①



②

③

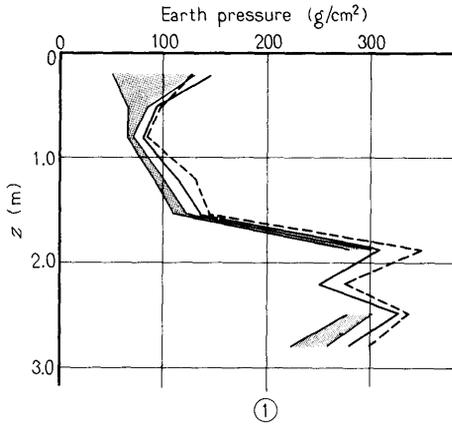


④

⑤

Fig. 39-(17)

# I-2-5.44



$z$ m	$p$ $g/cm^2$	$\gamma$ deg	$z$ m	$p$ $g/cm^2$	$\gamma$ deg
0.21	40.0	177	2.49	10.7	-49
0.51	9.2	-178	2.80	16.8	-50
0.81	3.3	-150	Bottom (No.6)	93.1	-167
1.21	4.0	-72	$z$ m	$D$ mm	$\lambda$ deg
1.54	4.4	-59	0	0.500	-126
1.89	9.2	-63	2.16	0.272	-129
2.20	—	—	$f = 5.44$ Hz		

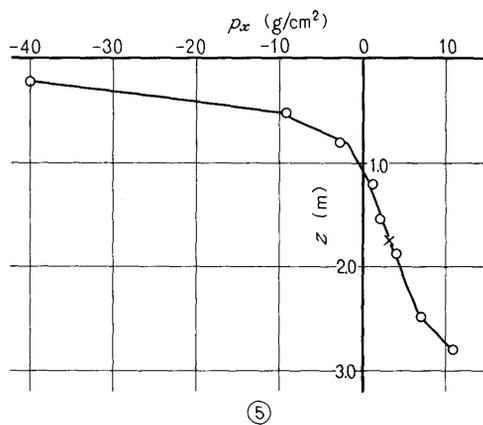
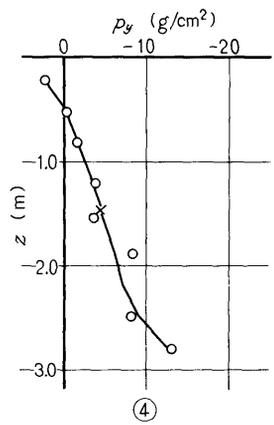
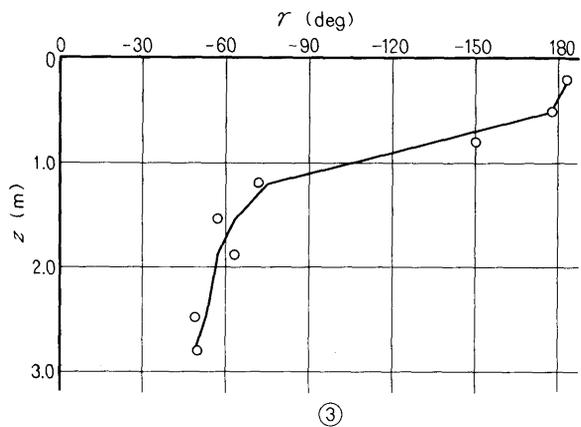
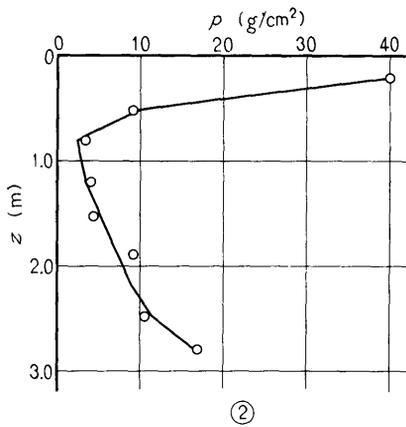
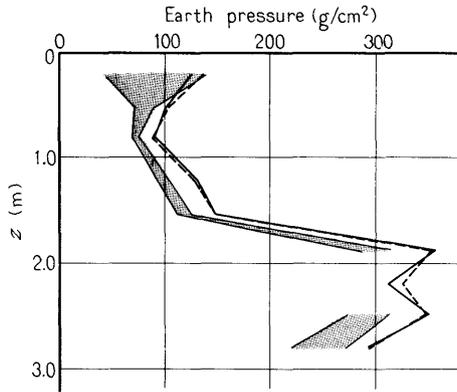


Fig. 39-(18)

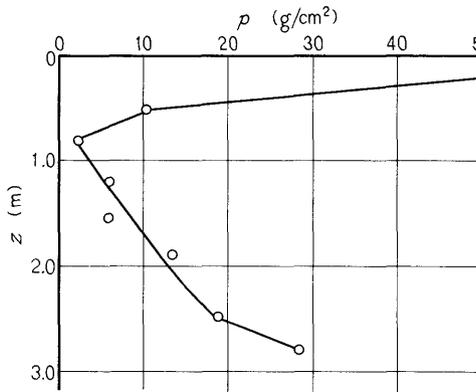
# I-2-5.71



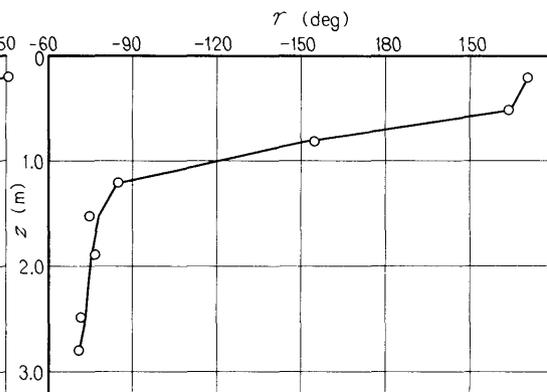
①

$z$ m	$p$ g/cm <sup>2</sup>	$\gamma$ deg
0.21	50.1	129
0.51	10.3	136
0.81	2.2	-155
1.21	5.9	-85
1.54	5.8	-75
1.89	13.3	-77
2.20	—	—

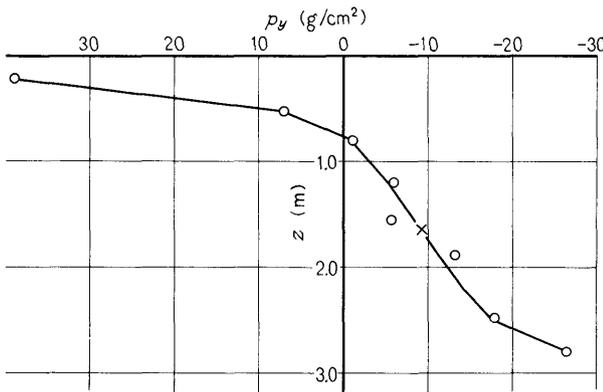
$z$ m	$p$ g/cm <sup>2</sup>	$\gamma$ deg
2.49	18.7	-72
2.80	28.3	-71
Bottom (No.6)	99.1	149
$z$ m	$D$ mm	$\lambda$ deg
0	0.477	-165
2.16	0.263	-157
$f = 5.71$ Hz		



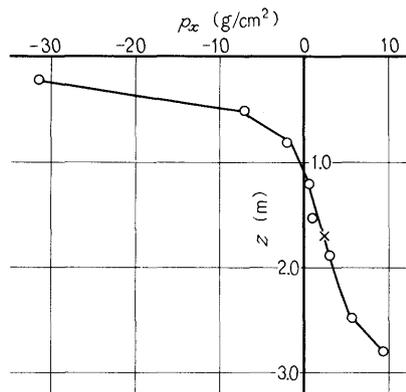
②



③



④



⑤

Fig. 39-(19)