重力式擁壁に作用する振動土圧について

丹　羽　　新*

An Experimental Study of Oscillating Earth Pressure acting on a Gravity Wall

By

Shin NIWA

Abstract

This report presents many considerations about measured oscillating earth pressures acting on a test wall of gravity type which is shaken by artificial earthquakes caused by a large vibration generator, or which is shaken by a small vibration exciter fixed on the top of the wall. The earth pressures on the back and bottom surfaces of the wall were measured by a number of specially developed pressure cells, and also the vibration of the wall by vibration pick-ups.

The measured oscillating earth pressures acting on the back of the wall, and displacements of it can be represented by rotating vectors which are arranged horizontally around a vertical axis of rotation. A curve generated by connecting the points of pressure vectors is generally a spatial curve. When the spatial curve rotates, the orthogonal projection of it on a vertical plane shows the vertical distribution of oscillating earth pressure acting on the back of the wall. In order to express the spatial curve of pressure mathematically, two projections on xz-and yz-planes are formulated as follow.

$$p_x = A_x(z-z_x)^n + B_x(z-z_x) + \bar{p}_x$$
$$p_y = A_y(z-z_y)^n + B_y(z-z_y) + \bar{p}_y$$

where $n=3, 5, 7$.

By these equations, the vertical distributions of oscillating earth pressure have been fully revealed. Now, we can satisfy the equations of motion of the wall assuming that the vertical oscillating earth pressures acting on the bottom distribute parabolically in the longitudinal direction of the wall.

The fact that the measured pressures and displacements fulfil the equations of motion of the wall makes the investigation of the mechanical model of the wall during vibration possible. Many qualitative considerations between forces and displacements are described, which may be useful in the investigation of the mechanical model of a gravity wall.

目　次

* 海洋開発工学部　原稿受付　昭和46年4月17日

記号の一覧表

a	壁体の並進変位の振幅
a_0	地盤の水平変位の振幅
a_r	壁体の相対並進変位の振幅
A_x, A_y	実験式の係数
A'_x	A_x の概略値
b	他を置換した数
b_x, b_y	直線の切片
B_x, B_y	実験式の係数
B'_x	B_x の概略値
c	他を置換した数
c_0	Voigt 体の分布減衰係数
c_1	壁底面の水平分布減衰係数
c_2	壁底面の鉛直分布減衰係数
c_x	$=c_1dl$
c_φ	$=c_2J_3$
${}_Nc_\varphi$	壁体の回転減衰係数
$c_{\varphi E}$	壁底面の土塊の回転減衰係数
C_x, C_y	実験式の係数
d	壁体の底幅
$2D$	散逸関数
D_1	壁頂の変位振幅
D_2	振動計 H-2 の位置における壁体の変位振幅
e	他を置換した数
E_x, E_z	放物線の係数
f	振動数
f_{I}	第1次連成固有振動数
f_{II}	第2次連成固有振動数
$f_1(z), f_2(z)$	z の関数
$F_1(x, z), F_2(y, z)$	$(x, z), (y, z)$ の関数
g	重力加速度
$g_1(q), g_2(q), g_3(q)$	q の関数
G	壁体の重心の位置
G'	壁体の重心直下の点
G_E	壁底面の土塊の重心の位置
$G_1(x,y,z), G_2(x,y,z)$	(x, y, z) の関数
h	壁体の高さ　$h=z_0+H$
H	壁体の重心と底面の間の鉛直距離
H'	壁体の重心から壁頂起振機の回転軸までの鉛直距離
H_Z	ヘルツ
i	他を置換した数
I	壁体の重心に関する慣性能率
I'_E	壁底面の土塊の重心に関する慣性能率
I_E	壁底面の土塊の慣性能率 $I_E=I'_E+m_E s_3^2$

j　他を置換した数
J_1　鉛直壁面の1次モーメント
J_2　鉛直壁面の2次モーメント
J_3　壁底面の2次モーメント
k　他を置換した数
k_0　Voigt 体の分布バネ定数
k_1　壁底面の水平分布バネ定数
k_2　壁底面の鉛直分布バネ定数
k_x　$=k_1 dl$
k_φ　$=k_2 J_3$
${}_N k_\varphi$　壁体の回転バネ定数
$k_{\varphi E}$　壁底面の土塊の回転バネ定数
K　直線の方向係数
K_h　水平震度
K_v　鉛直震度
l　壁体の長さ
L　直線の切片
L_D　立体表示法において変位ベクトルの先端を結んだ空間直線
L_p　立体表示法において土圧ベクトルの先端を結んでできる空間曲線
${}_x L_p$　L_p の xz 平面への投影曲線
${}_y L_p$　L_p の yz 平面への投影曲線
m　壁体の質量
m_0　壁頂起振機の不平衡質量
m_E　壁底面の土塊の質量
$\mathbf{M}$　側方振動土圧による合モーメント
$\mathbf{M}=M\cos(\omega t+\Theta_M)$
$\mathbf{M}_b$　底面振動土圧による合モーメント
M　側方振動土圧による合モーメントの振幅
M_x　$=M\cos\Theta_M$
M_y　$=M\sin\Theta_M$
n　実験式のベキ数
N_x, N_z　放物線の頂点の縦座標
$\mathbf{p}$　側方の分布振動土圧
$\mathbf{p}=p\cos(\omega t+\gamma)$
$\mathbf{p}_b$　底面の分布振動土圧
$\mathbf{p}_T$　土圧計 No. 6 の位置における振動土圧　$\mathbf{p}_T=p_T\cos(\omega t+\gamma_T)$
$\mathbf{p}'_T$　$\mathbf{p}_T$ の理論値　$\mathbf{p}'_T=p'_T\cos(\omega t+\gamma'_T)$
p　側方の分布振動土圧の振幅
p_T　土圧計 No. 6 の位置における振動土圧の振幅

p'_T　$\mathbf{p}'_T$ の振幅
p_x　$=p\cos\gamma$
p_y　$=p\sin\gamma$
$\bar{p}_x, \bar{p}_y$　実験式が表わす曲線の対称点の横座標
$\bar{p}'_x$　$\bar{p}_x$ の概略値
p_X　特別の時刻における p_x の値
$p_{\min}$　2直線間の最短距離
$\mathbf{P}$　側方振動土圧の合力
$\mathbf{P}=P\cos(\omega t+\Theta_P)$
$\mathbf{P}'$　壁体の底面に作用する水平合力
$\mathbf{P}'=P'\cos(\omega t+\Theta'_P)$
P　側方振動土圧の合力の振幅
P'　壁体の底面に作用する水平合力の振幅
P_x　$=P\cos\Theta_P$
P_y　$=P\sin\Theta_P$
q　媒介変数
q_K　一般座標
q_x, q_y　直線の方向係数
Q　土圧の回転成分の振幅
Q_K　一般力
r　壁体の回転半径　$I=mr^2$
r'　壁体の重心から土圧計 No. 6 までの水平距離
r_0　壁頂起振機の不平衡質量の Arm
R　土圧の並進成分の振幅
s_1　$=\dfrac{a_r}{\varphi_r}$
s_2　$=\dfrac{a_0}{\varphi_0}$
s_3　壁底面の土塊の重心とバネ間の鉛直距離
t　時間
$2T$　運動エネルギー
u　他を置換した数
v　他を置換した数
$2V$　位置エネルギー
x　座標　　壁体の並進変位
$x=a\cos(\omega t+\alpha)$
x_0　地盤の水平変位　$x_0=a_0\cos(\omega t+\alpha_0)$
x_r　壁体の相対並進変位
$x_r=a_r\cos(\omega t+\alpha_r)$
x_E　壁底面の土塊がうける水平強制変位

X　x 方向の座標

X_0　壁体の Heel から重心までの水平距離

y　座標

z　座標　壁頂から測った壁体の深さ

z'　壁体の重心から振動計 H-2 までの鉛直距離

$\bar{z}$　z 座標の移動量

$\bar{z}$　直線と z 軸の交点の座標 $\bar{z}=-\dfrac{L}{K}$

z_0　壁頂から重心までの鉛直距離

z_x, z_y　実験式が表わす曲線の対称点の z 座標

z'_x　z_x の概略値

Z　z の新座標

α　壁体の並進変位の位相角

α_0　地盤の水平変位の位相角

α_r　壁体の相対並進変位の位相角

β　壁体の回転変位の位相角

β_0　地盤の回転変位の位相角

β_r　壁体の相対回転変位の位相角

γ　側方の分布振動土圧の位相角

γ_T　土圧計 No. 6 の位置における振動土圧の位相角

γ'_T　p'_T の位相角

Γ　γ の新座標

δ　土圧の回転成分の位相角

δ'　土圧の並進成分の位相角

ε　$=\gamma'_T-\gamma_T$

ξ, η, ζ　直角座標

$\theta, \theta', \theta_0$　座標の回転角

Θ_M　側方振動土圧による合モーメントの位相角

Θ_P　側方振動土圧の合力の位相角

Θ'_P　壁底面に作用する水平合力の位相角

κ　$=\dfrac{H}{r}$

λ_1　壁頂の変位の位相角

λ_2　振動計 H-2 の位置における壁体の変位の位相角

ν　$=\dfrac{p'_T}{p_T}$

π　円周率

φ　壁体の回転変位の振幅

φ_0　地盤の回転変位の振幅

φ_r　壁体の相対回転変位の振幅

Φ　壁体の回転変位　$\Phi=\varphi\cos(\omega t+\beta)$

Φ_0　地盤の回転変位　$\Phi_0=\varphi_0\cos(\omega t+\beta_0)$

Φ_r　壁体の相対回転変位

$\Phi_r=\varphi_r\cos(\omega t+\beta_r)$

ω　角振動数　$\omega=2\pi f$

ω_{I}　第 1 次連成固有角振動数

ω_{II}　第 2 次連成固有角振動数

ω_x^2　$=\dfrac{k_x}{m}$

ω_φ^2　$=\dfrac{k_\varphi+H^2k_x}{I}$

1. まえがき

重力式擁壁とは，壁体の自重によって背後に作用する土圧に対抗して，常時においても地震時においても，滑り出し，沈下や傾き，転倒を生ぜず，常にその安定を保つ型式の壁体を言う。Fig. 1 にその最も一般的な断面を示すが，目的に応じてさまざまな形が採用されている。この重力式擁壁は土木構造物の基本的な一要素であって，鉄道，道路，建築物などの盛土や切り取り部の土留壁として，また，水路，河川，港湾，埋立地の護岸としても，さらには，橋台，ドライドックの側壁などとして広く用いられている。

重力式擁壁の安定性は，常時および地震時を含めて，大別して次の各項目によって論ぜられる。

1)　壁体の背後（側方）および底面に作用する土圧

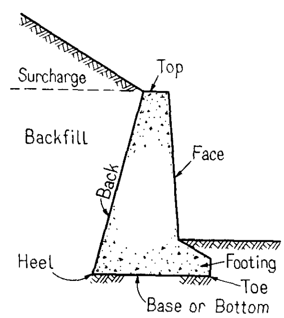


Fig. 1　Gravity wall

2)　擁壁が水ぎわに造られる場合や，地下水の影響が無視できない場合には，それぞれの面に作用する水圧

3)　裏込めを含めた基礎地盤の剪断抵抗

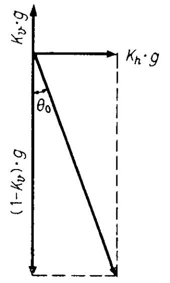


Fig. 2 Resultant acceleration

この中で擁壁に作用する地震時の土圧として，従来から設計に主として用いられてきたのは，一般の構造物に対する震度法と同じ考え方にもとずく方法である（ここに震度とは，地震の最大加速度と重力加速度との比を言う)。Fig. 2 において水平震度を K_h，鉛直震度を K_v とし，水平方向加速度 $K_h \cdot g$ と鉛直方向加速度 $(1-K_v)\cdot g$ とを合成すると，この合成加速度は鉛直線に対して角 θ_0 だけかたむいて作用する。ここで座標を θ_0 だけ回転し，合成加速度の方向を鉛直方向と一致させ，その後はクーロン，またはランキンの式を用いて，常時土圧に準じて地震時土圧を導くのである。このようにこの計算法には振動論的な考察が払われておらず，あくまで直観的な仮定にもとずく静的な取り扱いであって，自然現象を正しく把握した結果ではない。

いっぽう振動台を用いて，実験的に振動土圧の性質を明らかにするための研究も行われてきた。これらの多くは振動砂槽の一面を固定壁または可動壁とするか，あるいは振動台の上に模型壁体をのせるかして，背後をゆるい乾燥砂でみたし，振動中に壁体に作用する土圧を観測するものである。しかしながら Fig. 1 から明らかなように，現実の擁壁は地盤上に弾性的に支持されており，裏込めを掘り取った状態では，壁体は明瞭に固有振動を持っている（Photo 11 参照)。さらに背面に作用する土圧と底面に作用する土圧との間には密接な関係があり，裏込めは密に突き固められた状態で自然に放置され，地震に際しては進行性の波動によって強制振動を受けている。したがって上述の振動台による実験は，壁体の支持の条件，裏込めの状態，および強制振動の受け方などの点で，現実に起こっている現象とかなりへだたったものを対象としているように考えられる。

著者らは地震時に重力式擁壁に作用する土圧と，壁体の運動を正しく理解するために，より一層現実に近く，しかも現象の本質をそこなわないようにこれを単純化した実験方式を確立し，現象そのものを正しく観察することから手をつけることとした。具体的には，i) 自然地震を待たずに実験できるように人工地震発生装置をつくること，ii) 自然の情報を素直に与えてくれる測定法を確立し，これを Routine に駆使できるように具体化すること，の２点から着手した。

昭和 28 年の初め，まず人工地震発生装置の試運転に成功し，その後振動土圧測定装置の試作に専念し，昭和 32 年 9 月頃から振動土圧の測定がたやすく行いうるようになった。このときから振動土圧に関する実験を組織的に行い，昭和 34 年から新しい型の振動の測定器を備えて，ここに力と運動の観測が完全な姿で行いうるようになったのである。引き続く昭和 37 年までが本研究の第１期とも言うべき期間であって，この間にえられた成果についてはすでに報告した。[1)~8)]

人工地震発生装置は自然地盤に定常振動を起こす装置であって，この装置を運転すると半径およそ 600 m 以内は有感地震帯となる。したがって当初からこの実験について付近からの苦情があったが，幸い隣接地帯にはわずかの住居しかなかった。年が経つにつれて付近に建てられる建物の数も次第に増え，第１期の終り頃になると，実験の回数が増えたこともあって，振動障害についての苦情がますます激しくなり，はなはだしいときには 10 分程度運転して数ケ所から苦情が持ち込まれたこともあった。ちょうどこの時期は当研究所の組織替えの時期で，一時は実験の継続が危ぶまれたこともあった。しかし第１期においてえたデータの数が比較的少なかったのと，装置を運転しさえすれば新しいデータが次々と生れる状態にあったので，強く実験の継続を願った。隣接地帯と数回にわたる折衝の結果，昭和 38 年 8 月から同 40 年 9 月まで，毎週 1 回，1 回 10 分以内と言う条件で人工地震発生装置の運転が認められた。このようにして昭和 38 年に始まる第２期の研究に進んだのであるが，本報告中の実験はすべてこの期間（後に述べる II-5 および II-6 の実験は昭和 40 年 12 月）に行われたものである。

振動土圧に関して著者らが確立した実験法は，第１報が発表されてから今日まで，世界のどこにおいても遂に採用されなかったが，その実験法と計測法は 18 年の歳月を経てもいささかも陳腐性を感じさせないばかりか，ここに掲げるデータに比肩するものはこの間に発表されなかったように思う。データがユニークなものであると言うことと，都市近郊で再びこの実験を行

うことは現状では不可能であると言う事実が，データの羅列であると言う非難を顧みず，あえて全データを収録した理由である。

本研究の最終目標は，地震時に重力式擁壁に作用する土圧と壁体の運動との関係を，力学モデルで表現することである。本報告書では，まず測定した運動と分布力を直観的に把握しうる形で表現し，これから力の分布形状を実験式で表わしてこれを積分し，壁体に作用する合力と合モーメントを求めた。次にこのようにして求めた合力と合モーメントがどのようにして運動方程式を満足するかを考察し，満足された運動方程式の形から力学モデルを組み立てようと試みた。すなわち，組み立てた力学モデルの中に含まれる力学定数全部が，実測値を用いて合理的に決定しうるかどうかを検討した。しかし現段階では完全に満足すべき結果はえられず，力学モデル完成にいたる道は遠くてけわしい。

2. 実　験　装　置

2.1 人工地震発生装置

Fig. 3 に人工地震発生装置および試験壁体の配置を示す。人工地震発生装置によって地盤に定常振動を起こし，このとき試験壁体の背後および底面に作用する土圧と，壁体の運動を観測するのである。これらの装置や，振動および振動土圧測定装置についての詳細は，すでに報告したもの[1)~8)]を参照されたい。

人工的に地震を起こすために，従来から種々の方法が採られてきたが，そのいずれの方法も地盤そのものを大きく永続してゆすぶることはできなかった。著者らが完成した人工地震発生装置は，Fig. 3, Photo 1 に

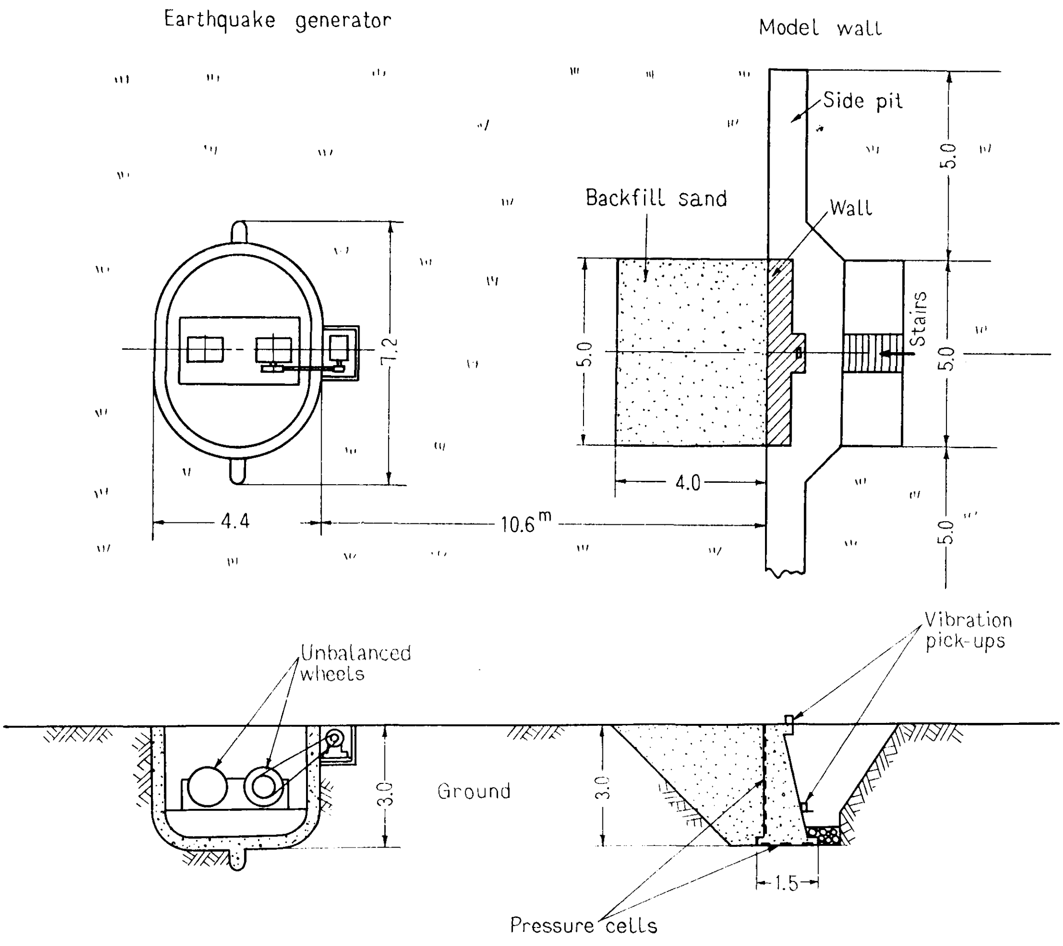


Fig. 3 General arrangement of the experimental equipments

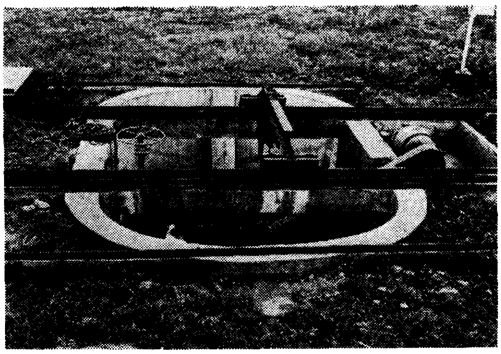


Photo 1 General view of earthquake generator

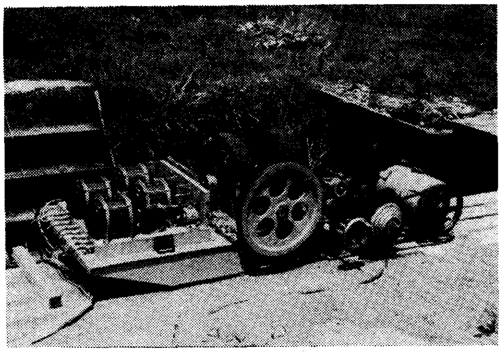


Photo 2 Vibration exciter fixed on the top of the wall

示すように，地表面下に築造した，水平断面が長円形(6 m×4.4 m×深さ 3 m) の鉄筋コンクリート椀形構造物の中で不平衡質量を回転させるものである。この装置の特色は自然地盤そのものに定常地震動を起こしうる点である。言うまでもなく自然地震は典型的な過渡振動であるが，最初からこのような非定常現象と取り組むことは，いたずらに問題を錯綜させるおそれがあると考え，複雑な天然の地震動を簡単な定常振動に置きかえて，現象の理解を容易ならしめようとした。

上述の鉄筋コンクリート椀形構造物の中に固定されている起振機は，不平衡質量を増強した蒸気機関車の動輪 2 個を 1 軸とし，この合成車輪が同一水平面上に 2 軸平行に配置されている。そして 2 軸が同一方向，あるいは反対方向に回転するとき，不平衡質量に基づく遠心力が，椀形構造物を，したがってその周囲の地盤を振動させるのである。その際振動の伝達面積を増加させるために，椀形構造物の長径にそって，つば状の突起が側方および下方をめぐって構造物を一周している。水平振動の方向は短径方向で，不平衡モーメントは 2 軸合計 24.5 kg・sec^2，最大回転数 6 r.p.s.，このときの最大遠心力は約 35 ton である。本文に述べる振動土圧実験では，起振機の 2 軸は常に同一方向へ 3～6 r.p.s. で回転したときのものである。振動数の可変範囲が狭いのが欠点である。

2.2 壁頂起振機

壁体を中心に考えてみたとき，人工地震発生装置によって地盤に振動が起こされ，その地盤から壁体が振動を受ける場合と，壁体が振動源となって振動を地盤に与える場合とが考えられる。これら二つの場合に関する実験を相たずさえて行うことが，地震時土圧の性質を明らかにする上に必要であると考えた。後者に関する実験を行うため壁頂中央に起振機を取り付け，この部分に水平加振力を作用させ，壁体の背後および底面に作用する土圧と，壁体の運動を観測した。

これに用いた起振機は Photo 2 に示すように，水平軸のまわりに互いに逆方向に回転する動輪 2 個をもち，この動輪に鉛の偏心質量が取り付けられている。この動輪は位相可変式になっていて，独立に水平および上下加振を行いうる。偏心質量は 2 軸合計 30 kg, 10 kg, 2 kg にかえられ，その時の不平衡モーメントはそれぞれ 0.563, 0.168, 0.040 kg・sec^2 である。本文に述べる振動土圧実験は，偏心質量 30 kg，回転数 4～14 r.p.s. で水平加振を行ったときのものである。なお Photo 2 の左側台上にあるのは，振動土圧記録装置のドラムを回転するためのシンクロ（セルシン）発信機，位相記録用ロータリースイッチ，オシロスコープ掃引用回転摺動抵抗，回転計ピックアップなどである。

2.3 試験壁体

Fig. 3 に示したように，人工地震発生装置から 10.6 m 離れた地盤中に，長さ 5 m，高さ 3 m，底幅 1.5 m の試験壁体をつくり，この鉛直壁面に Goldbeck 型振動土圧計 9 台 (No. 13, 14, 15, 16, 17, 18, 1, 2, 3)，底面に 3 台 (No. 4, 5, 6) を取り付け，振動前後および振動中の土圧を測定した。Fig. 4 に試験壁体の標準断面と，裏込め側から見た鉛直壁面上の土圧計の位置を示す。また Photo 3 は裏込めを投入する直前の試験壁体を裏込め側から見たもので，壁頂に見えるのは前述の起振機である。なお第 1 期の実験では裏込め側の 2 m より深い部分は，割り栗石および原地盤となっていたが，第 2 期の実験ではこの部分を壁底まで掘り取り，新たに No. 1, 2, 3, の 3 台の土圧計を壁面から突出して取り付けた。壁体に関係して，後述の取り扱いに必要な定数を Table 1 に表示する。

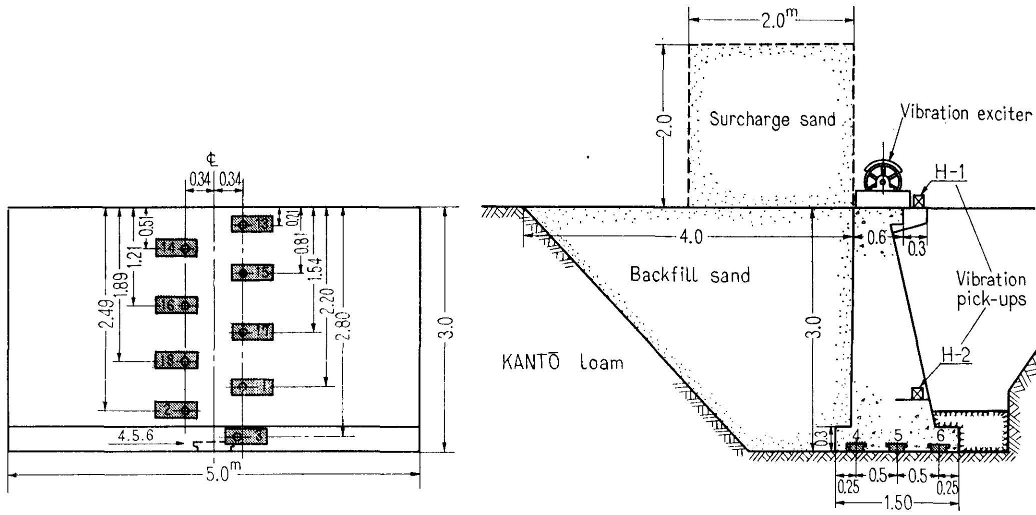


Fig. 4 Details of the model wall and the arrangement of pressure cells

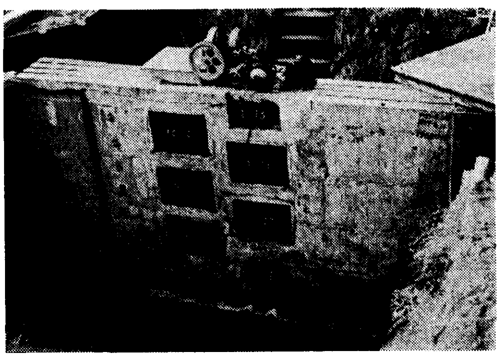


Photo 3 Pressure cells fixed on the vertical surface of the wall, backfill sand being removed

Table 1 Constants in relation to the model wall

Length of the wall	l	5.0 m
Height of the wall	h	3.0 m
Base width of the wall	d	1.5 m
Mass of the wall	m	2500 kg·sec²/m
Moment of inertia of the mass with respect to the axis passing through the center of gravity	I	2245 kg·m·sec²
Vertical distance from the top to the c.g.	z_0	1.78 m
Horizontal distance from the heel to the c.g.	X_0	0.60 m
Horizontal distance from the position of the cell No. 6 to the c.g.	r'	0.65 m
Vertical distance from the position of the pick-up H-2 to the c.g.	z'	0.38 m
Vertical distance from the base to the c.g.	H	1.22 m
Vertical distance from the revolving axis of the exciter to the c.g.	H'	2.09 m

2.4 計測の基本方針

すでに述べたように，人工地震発生装置および壁頂起振機は，地盤あるいは壁体に定常振動を起こすから，ある一連の振動がくり返えしくり返えし続いて起こる。したがって測定の最初から最後まで同じ振動を忠実に記録するのは意味がなく，その単位となる一つの波形だけを時間的にひろげて記録するのが賢明である。われわれはこの観点に立って振動土圧（力）の測定も地震動（振動）の測定も，定常振動に対して特に有効な計測方式を確立した。

振動土圧の測定器として，時間的に変化する土圧を計測するのはもちろんであるが，振動中の平均土圧（振動中に変化しないいわば直流部分に相当する土圧）も，また純粋に static な土圧も同時に計測しうるものでなければならない。さらに土中に数年間埋め込まれたままで，温度，湿気などの苛酷な外部条件のもとでも，その特性が変化しないと言う保障を原理的に持っ

ているものでなければならない。

2.5 振動土圧測定装置

振動土圧測定装置は，静土圧測定用の Goldbeck 型土圧計に，Farnboro の高速指圧器の方式および Dummy weight を導入することによって，振動土圧をも測定できるように発展させたものである。Farnboro の高速指圧器は多サイクル系インジケータに属するものであって，これは受圧板に加わる振動の各瞬時値に対して応答を与えるものではなく，振動圧力のある一つのサイクルのある位相に応ずる圧力が，標準圧力よりも高いか低いかのみを記録し，順次各位相についてこの操作をくりかえし，これを結んで振動圧力の1サイクルをえがくものである。この方式は地震動が定常振動である今の場合，はなはだ適切なものであると考えられる。またこの土圧計は，受圧側の機構と全く同一の機構を中心支点に対して点対称の位置に配置し，振動を受けたとき一方が他方の Dummy weight として働き，いかなる方向の加速度が加わっても，受圧板に作用する慣性力は常に左右で打ち消される。こうすることによってあらゆる受圧器が宿命的に持つ，測定上有害な受圧板の慣性質量の影響から完全にのがれることができた。

振動土圧計の構造，記録装置，記録原理，接点 on-off 判別回路などの詳細は前報にゆずり，Photo 4 に記録の1例を示そう。

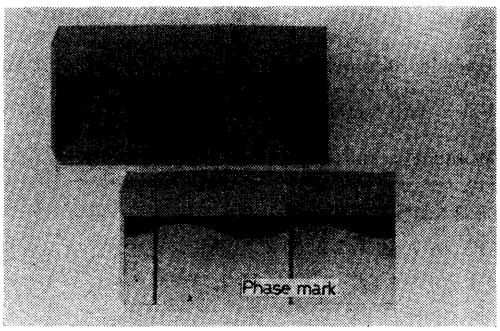


Photo 4 Records of oscillating earth pressure on a facsimile paper

2.6 振動測定器

振動の換振器として可動コイル型のピックアップを用い，この出力を適当に処理して陰極線オシロスコープの Y 軸に加える。いっぽう起振機の動輪軸に，endless の回転摺動抵抗をつないで掃引用の鋸歯状波電圧をつくり，これによって X 軸（時間軸）の全長が振動波形の周期，あるいはその2倍の時間になるように時間掃引を行って，波形をとろうとするものである。すなわちブラウン管のスクリーン全面をつかって，単位波形あるいはそれが二つつながった振動波形をえがかせるので，地震動の細かい点まで非常にはっきりあらわれてくる。なおブラウン管には電子銃2個を持つ2現象用のものを採用したので，異なった二つの波形の位相差もきわめて明瞭になる。換振器からの出力は，そのまま，あるいは積分回路，または微分回路を通して Y 軸に加えられるので，それぞれの場合，振動の速度，変位，加速度の波形がえられる。

なお時間の原点は，人工地震発生装置あるいは壁頂起振機の強制水平力の最大値が，壁体の Face 側（Fig. 3, 4 で右側）に向った瞬間としている。すなわちこの瞬間に，土圧記録では記録紙上に phase mark を記録し，（Photo 4 参照）振動記録では掃引が開始される。

2.7 裏込め砂の性状

試験壁体の裏込めは多摩川砂で，その粒径加積曲線を Fig. 5 に示す。この砂を注水しながら充分踏み固めて埋めもどし，その後約1ケ月間放置してから振動実験を開始した。裏込めのある実験は約21ケ月続き，この間裏込めの入れ替えは行わなかった。最後に裏込めを掘り取った際，裏込めの各部15ケ所からサンプルを採り土質試験を行った。その結果，湿潤単位体積重量 1.69 g/cm³，含水比 6.94%，内部摩擦角 29° であった。なおこの砂の真比重は 2.69 であり，突固め試験の結果，最適含水比 12.5%，最大乾燥密度は 1.89 g/cm³ である。

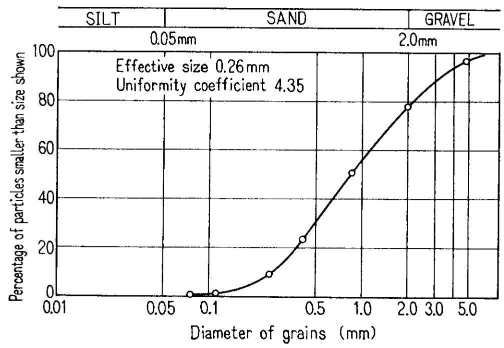


Fig. 5 Grain-size-accumulation curve of the backfill sand

3. 実験とその結果

3.1 実験の方法

人工地震発生装置あるいは壁頂起振機を種々の回転

数で定常回転させ，そのとき壁体の背面に取り付けた土圧計 No. 13, 14, 15, 16, 17, 18, 1, 2, 3, および底面の土圧計 No. 4, 5, 6, によって振動前，振動中，振動後の土圧を測り，同時に壁体の振動を2個の振動計，H-1 と H-2 で測定した(Fig. 4 参照)。底面の土圧計 No. 5 は設置後まもなく（昭和30年頃）故障し，No. 4 も完全な記録を示さない。したがって底面で完全なのは Toe 側の No. 6, 1 点だけである。

また壁体の中央部で，壁面から0.8m 離れた裏込め中に4個の土圧計を鉛直方向に配置して，土中の土圧も上と同様に測ったが，充分な解析を行っていないので本文ではすべて割愛した。さらに必要に応じて，壁体や付近の地盤の振動のみを測定する実験も行った。

ここで人工地震発生装置で加振した実験をⅠ群とし，壁頂起振機を用いた実験をⅡ群の実験と名付けることとする。

裏込め側の状態は次の六つの場合について実験を行った。

1. 載荷重を加える前の裏込めのみの場合

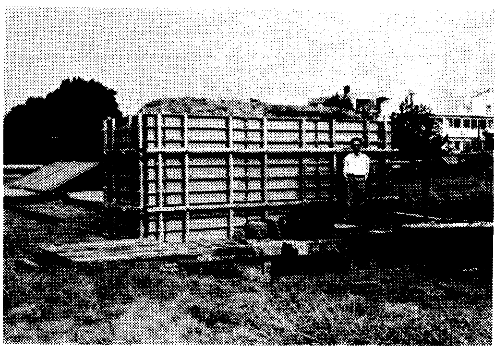


Photo 5 Surcharge, mass of sand 5 m × 2 m × 2 m in a steel frame

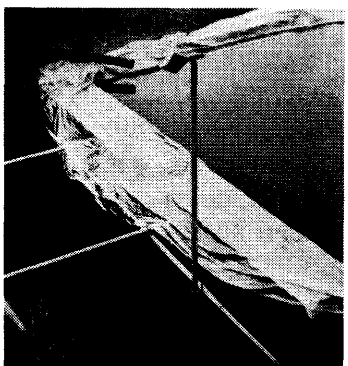


Photo 6 Filled water, instead of backfill sand

2. Fig. 4 の右図のように，壁体に接して全長5m, 高さ2m, 幅2m の鋼製フレームの中に砂をみたして，裏込め上に載荷重を加えた場合。Photo 5 にその状態を示す。
3. 上記の載荷重の高さを1m にした場合。
4. 載荷重を取り除いた場合
5. 裏込めの砂を掘り取って，代りに水を満たした場合。Photo 6 にその時の状態を示す。
6. 裏込めがからの場合

Table 2 にこれらの組み合わせを示す。以下ではこの表に示された分類番号によって実験番号を表わすこととする。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2m 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。

Table 2 Classification of experiments
Numbers in brackets show kinds of frequency

Conditions of backfilling \ No. of classification \ Source of vibration		Earthquake generator I	Exciter on the wall II
Backfill before surcharged	1	I-1 (10)	II-1 (3)
Surcharged by 2 m height	2	I-2 (12)	II-2 (6)
Surcharged by 1 m height	3	I-3 (9)	II-3 (5)
Backfill after surcharged	4	I-4 (3)	II-4 (4)
Filled with water	5	I-5 (6)	II-5 (7)
Without backfill (empty)	6	I-6 (4)	II-6 (3)

3.2 実験結果の一例

Photo 7 に I-2-5.40 の実験記録を示す。上2枚のオシログラムは，振動計 H-1, H-2 の変位および加速度記録で，下の9枚は Facsimile paper に記録された振動中の土圧である。

壁体背後に作用する振動土圧記録，すなわち土圧計 No. 13, 14, 15, 16, 17, 18, 1, 2, 3 の記録で波形の位相を無視し，振動中の土圧の最大値と最小値を，深さ z に対してプロットしたものが Fig. 6 ①中の陰影を施した部分で，振動中の土圧の変化量の絶対値を表わしている。さらにこの図の中には振動前の土圧（実線）および振動後の土圧（破線）も同時にプロットしてある。

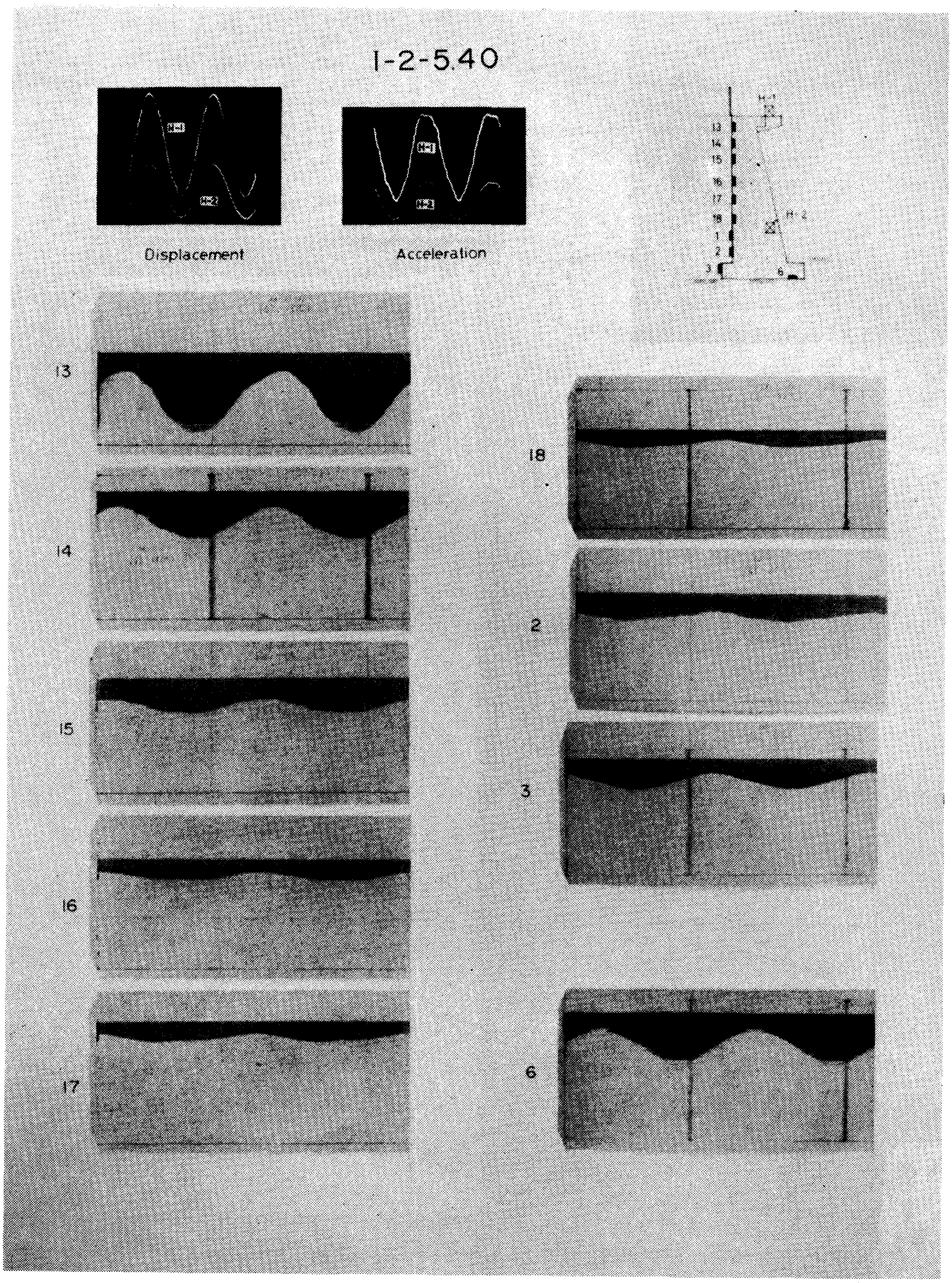
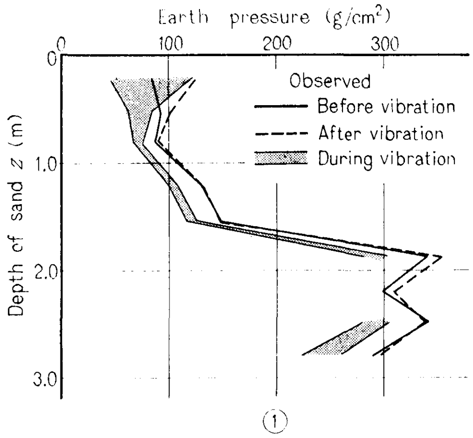


Photo 7 Oscillograms of vibration and records of oscillating earth pressure

I-2-5.40



z m	p g/cm²	γ deg
0.21	36.9	−147
0.51	9.4	−137
0.81	4.4	−122
1.21	4.1	−93
1.54	3.6	−69
1.89	8.4	−65
2.20		—

z m	p g/cm²	γ deg
2.49	12.0	−43
2.80	16.8	−55
Bottom (No.6)	107.9	−151
z m	**D mm**	**λ deg**
0	0.590	−113
2.16	0.323	−111
f = 5.40 Hz		

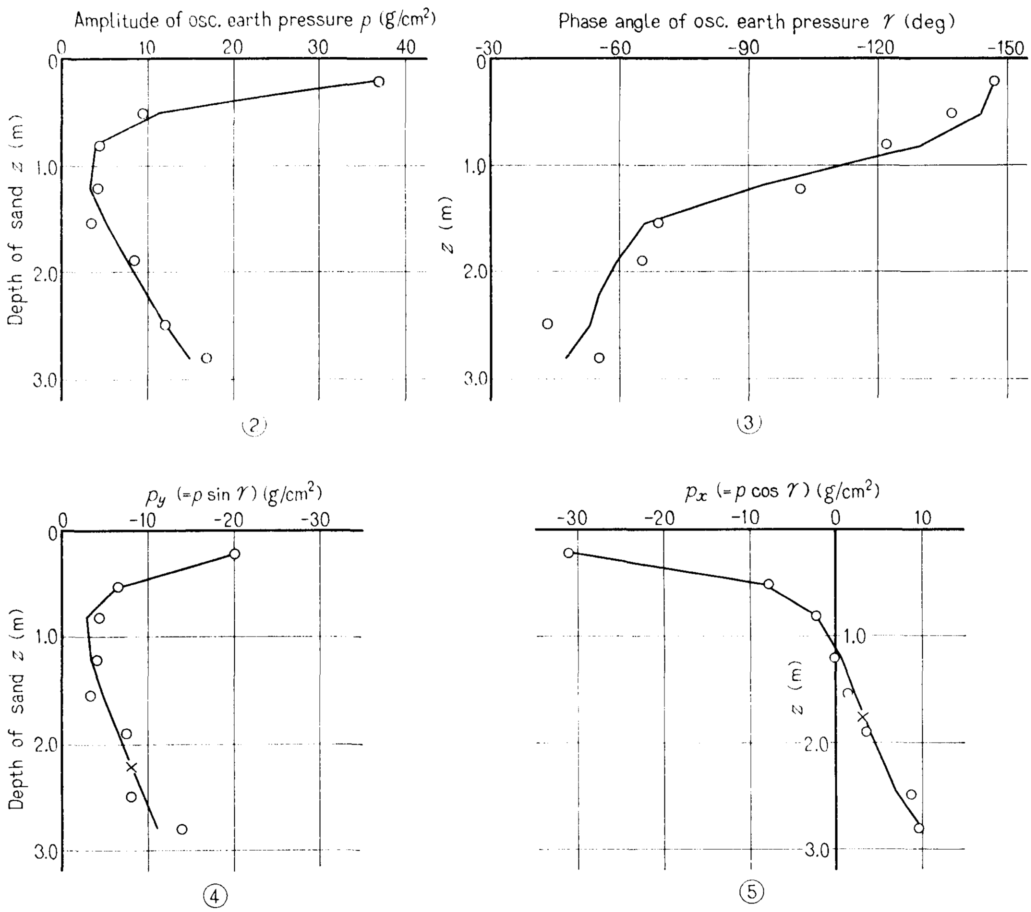


Fig. 6 Vertical distributions of earth pressures
○ : Observed values —: Empirical formula

本報告書では座標は右手系とし，z 軸を鉛直下向きにとることとする。また定常振動現象は変位であろうが力であろうが $a\cos(\omega t+\alpha)$ の形で表現し，位相角は“度”で表わすことに決めておく。位相角の負値は“遅れ”を意味し，位相角—振動数曲線を書くときは，遅れ角を縦軸の上向きにとることにする。

さて次に記録紙上にえがかれた振動土圧波形の1周期を12分割して波形分析を行い，基本波の振幅 p (g/cm²)，位相角 γ (deg) を求めてこれらを深さに対してプロットすればFig. 6 ②および③となる。さらに $p\sin\gamma$ および $p\cos\gamma$ を深さに対してプロットしたものが，④および⑤である。図中○印は実測値であり，実線は5.3で述べるようにこれらの値を実験式化した結果である。④および⑤については改めて次節で述べる。なお Fig. 6 の右肩に側方および底面（土圧計 No. 6）土圧の p と γ，および壁体の上下2ヶ所（$z=0$ と $z=2.16$ m）で測定した変位の基本波振幅 D_1, D_2 (mm)，その位相角 λ_1, λ_2 (deg) を表示した。

Fig. 6 と全く同形式で表現した一連の実験結果を付録Aに Fig. 39-(1)～(65) として示す。これらの実験結果の中で振動数の低い実験に不完全なものが含まれているが，全体の傾向を見る上で有用であると考えたのであえて割愛しなかった。振動数の低い方で記録が不完全になる理由は，振動源の加振力が回転数の2乗に比例して大きくなるため，振動数の低い方では急激に加振力が小さくなる。そのため各部に作用する土圧も一般的に急激に小さくなり，記録が直線に近いカーブになる。したがって特に位相角の読み取りが困難になりそれだけ精度も悪くなるからである。

最後に波形分析の結果についてひとこと触れておこう。Photo 7 から明らかなように変位波形，土圧波形ともに，一見して正弦波形からのずれが余り大きくないことがわかる。事実，波形分析を行っても大半のものは基本波が卓越している。2次または3次調波の振幅が基本波振幅の 20% を超えるものは総数の約 1/5 程度である。特別の例として振動数の高い I-2 の実験において，載荷重の底面の砂の中に，受圧面を下にして置いた土圧計の記録の中には，2次調波成分が卓越しているものがある。すなわち，この部分の底面反力は加振振動数の2倍の振動数で変化していることになる。そのメカニズムは難かしいに違いないがはなはだ興味深い。

3.3 回転ベクトルを用いた実験結果の表示法——立体表示法

記録された一つの振動土圧波形は，i) 振幅，ii) 位相，iii) 時間，iv) 測定された位置，の四つの情報を持っている。この四つを1枚の紙の上に同時にアナログ量で表現するのは不可能であり，波形分析を行って基本波振動のみを問題としている今，いちいち正弦波形を書いて上記の i), ii), iii) を表わすのは大して意味がなく，また直観的に把握しにくい。壁体のどの部分に，どれだけの振幅の力が，どんな位相で，時間的に全体がどんな具合に変化して行くのか，と言うことを直視的に，かつすぐそのイメージが頭に浮かぶような表現法はないであろうか？　著者はひとつひとつの振動を

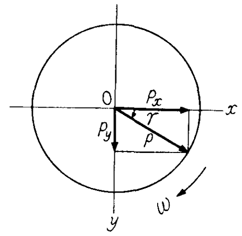


Fig. 7 Rotating vector

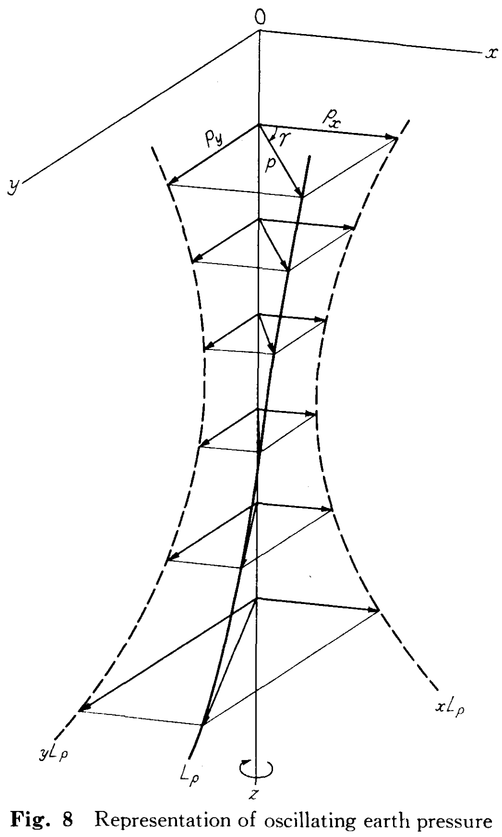
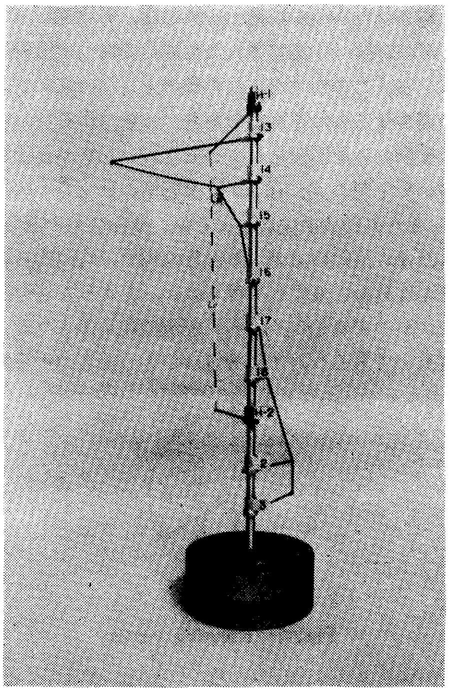
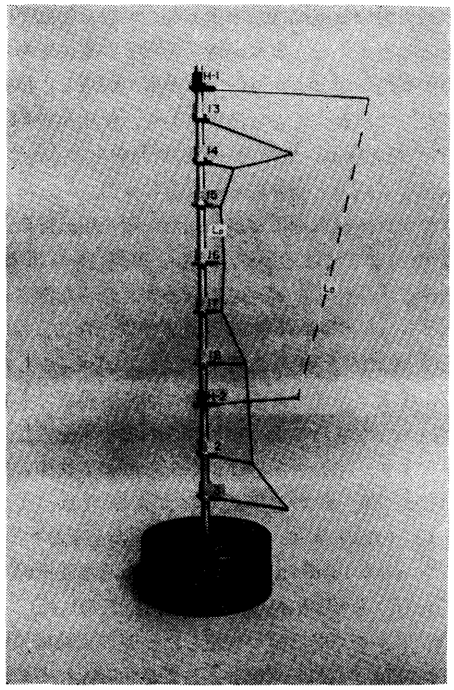


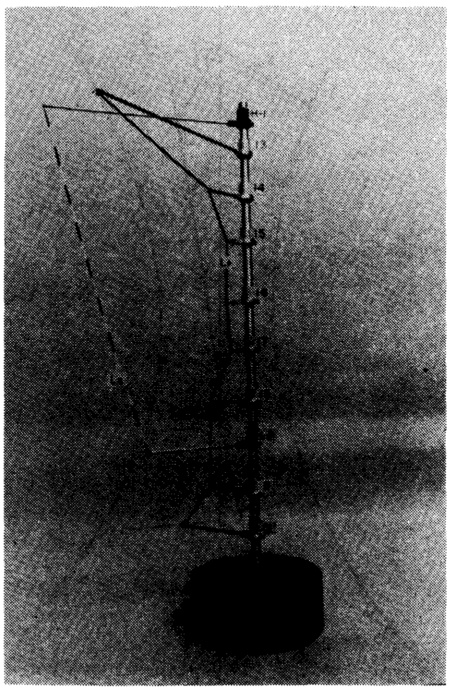
Fig. 8 Representation of oscillating earth pressure employing rotating vectors



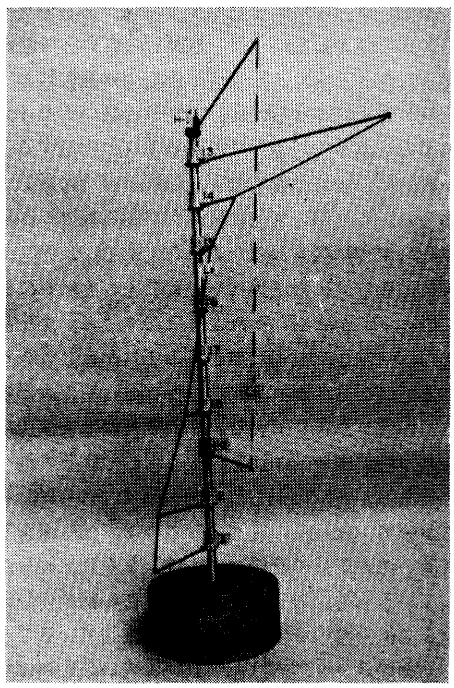
(1) $\omega t=0°$



(2) $\omega t=90°$



(4) $\omega t=270°$



(3) $\omega t=180°$

Photo 8 Representation of oscillating earth pressure employing rotating vectors
Data No. I-2-5.40, shown in Photo 7

回転ベクトルで表現し，これを立体的に配置した表現法を考えた。

いま壁面上のある1点に作用する振動土圧を $p\cos(\omega t+\gamma)$ で表わすと

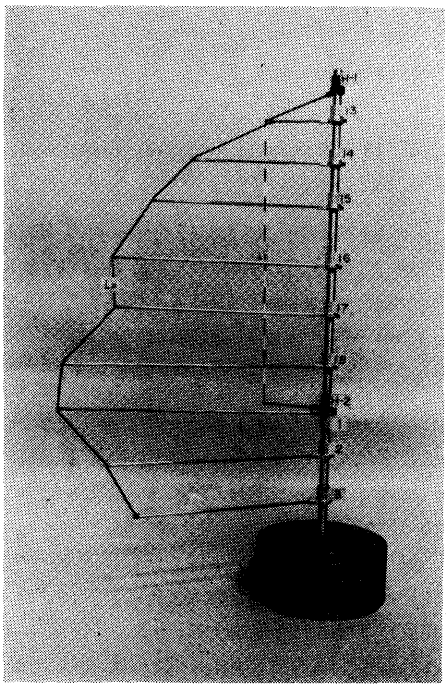
$$\begin{aligned}p\cos(\omega t+\gamma)&=p\cos\gamma\cdot\cos\omega t-p\sin\gamma\cdot\sin\omega t\\&=p_x\cdot\cos\omega t-p_y\cdot\sin\omega t\\&=\sqrt{p_x^2+p_y^2}\cdot\cos\left(\omega t+\tan^{-1}\frac{p_y}{p_x}\right)\end{aligned}$$

ここで

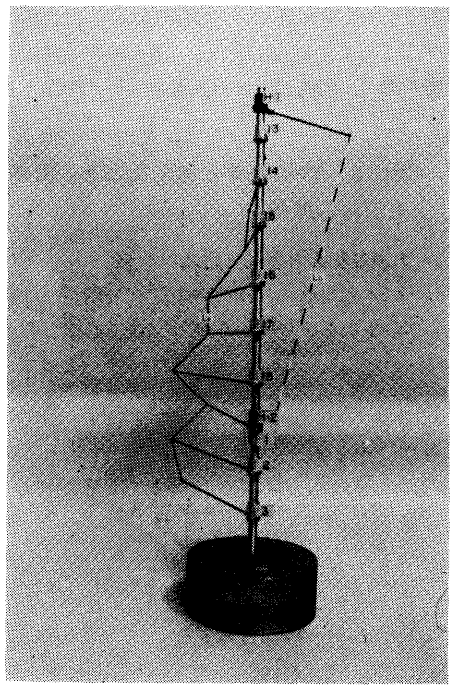
$$\left.\begin{aligned}p_x&=p\cos\gamma\\p_y&=p\sin\gamma\end{aligned}\right\}\qquad(1)$$

であり，これは力のベクトル p が位相角 γ を持って，角速度 ω で回転している回転ベクトルで表わされることは周知のとおりである。ここで $\omega t=0$ の瞬間を考えると Fig. 7 のようになり（ベクトルの回転方向は x 軸の正方向が y 軸の正方向と一致する方向にとる），p_x および p_y はベクトルの絶対値（振幅）p の，x および y 軸上への投影となる。p と γ は深さ（測定点）z の関数であり，Fig. 7 の p と γ を，各実測値に置きかえつつ z 方向へ配置して行くと Fig. 8 のようになる。p の先端を結んでできる曲線を L_p, L_p の xz 平面への投影曲線を ${}_xL_p$, yz 平面への投影曲線を ${}_yL_p$ で表わすことにする。z 軸を回転軸として L_p が角速度 ω で回転するとき，${}_xL_p$ は時々刻々その形を変えて行くが，このときの ${}_xL_p$ の横座標の変化は，まさに Photo 7 にかかげた振動土圧記録そのものである。L_p は一般的に空間曲線であり，これが回転軸（z 軸）に剛結されて回転するとき，その投影曲線が各点に作用する土圧を表わすのである。したがって空間曲線 L_p を定めることができれば，振動土圧の性質をあます所なく知りえたことになる。

さきに例示した I-2-5.40 の実験結果をこの方法で表現したのが Photo 8 (1)～(4) である。(1) は $\omega t=0°$，(2) は $\omega t=90°$，(3) は $\omega t=180°$，(4) は $\omega t=270°$ の位置のものである。(1) と (3)，(2) と (4) が z 軸に対して左右対称の関係にある。また写真中の白黒の線 L_D は，壁体の変位を同様の方法で表わしたものである。いま Fig. 8 において直線 oz に沿って切断し，z 軸を中心にして yz および xz 平面を左右に開くと，z 軸の左側に曲線 ${}_yL_p$，右側に ${}_xL_p$ がえがかれた2枚のデータをえる。これがさきにかかげた Fig. 6 の④および⑤の意味である。すなわち Fig. 6 の④は曲線 L_p の yz 平面への投影曲線 ${}_yL_p$ を，⑤は同じく ${}_xL_p$ を表わしている。



(1)　$\omega t=0°$



(2)　$\omega t=90°$

Photo 9　Representation of oscillating water pressure employing rotating vectors　Data No. II-5-12.1

裏込め砂の代りに水を満たしたときの動水圧の分布形状を示す1例として，Photo 9 に Ⅱ-5-12.1 の実験結果を表示したものを示す。前掲のものとはベクトルの縮尺率は違うが，一見して非常に異なっている様子が良くわかると思う。

前述のように空間曲線 L_p を定めることが当面の目標となるが，数学的に空間曲線を表示するのに次の三つの方法が知られている。

1) xz, yz 平面への投影曲線に沿った筒面の交りとして表わすと

$$\left.\begin{array}{l} F_1(x,z)=0 \\ F_2(y,z)=0 \end{array}\right\} \quad \text{または} \quad \left.\begin{array}{l} x=f_1(z) \\ y=f_2(z) \end{array}\right\} \qquad (2)$$

2) 2曲面の交りとして表わすと

$$\left.\begin{array}{l} G_1(x,y,z)=0 \\ G_2(x,y,z)=0 \end{array}\right\} \qquad (3)$$

3) 解析的表示。媒介変数を q として

$$\left.\begin{array}{l} x=g_1(q) \\ y=g_2(q) \\ z=g_3(q) \end{array}\right\} \qquad (4)$$

次章では，重力式擁壁が地震を受けたときの最も基本的な力学モデルについて考え，その解から背後に作用する振動土圧を求める。これを立体表示して Eq. (2) および Eq. (3) の形式で表現し，L_p の持つ幾何学的な特性を調べ，実測データの表現と解析の準備としよう。

4. 媒体を Voigt 体と考えたときの力学モデルの解析

4.1 力学モデルと運動方程式

Fig. 9 に示すように，固体の力学的挙動がバネとダッシュポットの並列要素から成り立っていると考えるとき，この媒体を Voigt（フォークト）体と名付けている。これは粘弾性体の最も基本的な力学モデルの一つで，Voigt 体が歪を受けたとき生じる力は，歪に比例する力と歪速度に比例する力の和から成ることは明らかである。土の力学的性質ははなはだ複雑で，とうていこのような簡単なモデルで表現することはできないが，これに関する定説がない今，簡単で最も基礎的なモデルを考え，これが現実とどう違うのかと言う点から出発することとした。

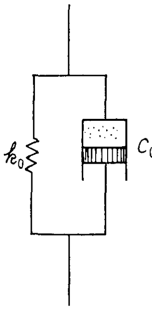


Fig. 9 Voigt solid

Fig. 10 に Voigt 体で囲まれた重力式擁壁の力学モデルを示す。このモデルが図のように水平強制変位 x_0(m) を受けたときの壁体の運動方程式を求めよう。

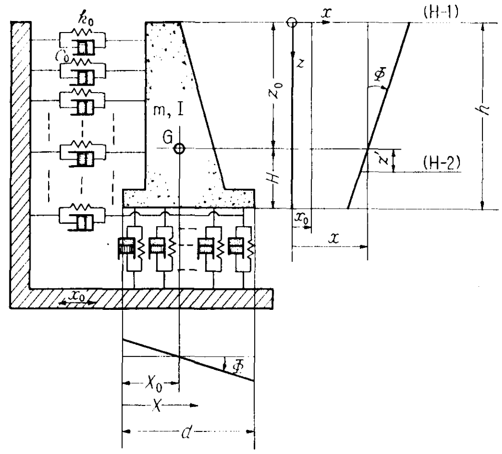


Fig. 10 Mechanical model of gravity wall surrounded by Voigt solid

壁体の x 軸方向の並進変位（Translational displacement）を x(m)，重心まわりの回転変位（Rotational displacement）を Φ(rad)，Heel から測った底面上の距離を X(m)，Voigt 体の分布減衰係数を $c_0\left(\left(\frac{\text{kg}\cdot\text{sec}}{\text{m}}\right)/\text{m}^2\right)$，同じく分布バネ定数を $k_0\left(\left(\frac{\text{kg}}{\text{m}}\right)/\text{m}^2\right)$ とし，他の記号は図および Table 1 に示したとおりである。運動方程式をたてるに当って，次の三つの仮定を設けた。

i) 媒体は鉛直，水平両方向ともに等しい定数を持つ Voigt 体と考える。

ii) 壁体の転倒モーメントは，回転復元モーメントに比べて圧倒的に小さい（後述の計算例では 1% 程度）のでこれを無視する。

iii) 底面の水平拘束力も上と同じ定数を持つ Voigt 体として考える。

運動エネルギー　$2T=m\dot{x}^2+I\dot{\Phi}^2$

位置エネルギー　$2V=k_0 l\int_0^h\{x-x_0+(z_0-z)\Phi\}^2 dz$

$$+k_0 l\int_0^d\{(X-X_0)\Phi\}^2 dX$$

$$+k_0 l\int_0^d(x-x_0-H\Phi)^2 dX$$

散逸関数　$2D=c_0 l\int_0^h\{\dot{x}-\dot{x}_0+(z_0-z)\dot{\Phi}\}^2 dz$

$$+c_0 l\int_0^d\{(X-X_0)\dot{\Phi}\}^2 dX$$

$$+c_0 l\int_0^d(\dot{x}-\dot{x}_0-H\dot{\Phi})^2 dX$$

ここで

$$\left.\begin{array}{l}\text{鉛直壁面の1次モーメント}\\ \quad J_1=hl\left(z_0-\dfrac{h}{2}\right)\\ \text{鉛直壁面の2次モーメント}\\ \quad J_2=hl\left(z_0{}^2-z_0h+\dfrac{h^2}{3}\right)\\ \text{底面の2次モーメント}\\ \quad J_3=dl\left(X_0{}^2-X_0d+\dfrac{d^2}{3}\right)\end{array}\right\}\quad(5)$$

と置いて書きなおすと

$$2V=k_0(hl+dl)(x-x_0)^2+2k_0(J_1-dlH)(x-x_0)\Phi$$
$$+k_0(J_2+J_3+dlH^2)\Phi^2$$

全く同様にして

$$2D=c_0(hl+dl)(\dot{x}-\dot{x}_0)^2+2c_0(J_1-dlH)(\dot{x}-\dot{x}_0)\dot{\Phi}$$
$$+c_0(J_2+J_3+dlH^2)\dot{\Phi}^2$$

これらをラグランヂュの運動方程式（q_K を一般座標，Q_K を一般力とする）

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_K}\right)-\frac{\partial T}{\partial q_K}+\frac{\partial D}{\partial \dot{q}_K}+\frac{\partial V}{\partial q_K}=Q_K$$

に代入すると求める運動方程式がえられる。すなわち，

$$\left.\begin{array}{l}m\ddot{x}+c_0(hl+dl)\dot{x}+c_0(J_1-dlH)\dot{\Phi}\\ \quad+k_0(hl+dl)x+k_0(J_1-dlH)\Phi\\ \quad\quad=c_0(hl+dl)\dot{x}_0+k_0(hl+dl)x_0\\ I\ddot{\Phi}+c_0(J_1-dlH)\dot{x}+c_0(J_2+J_3+dlH^2)\dot{\Phi}\\ \quad+k_0(J_1-dlH)x+k_0(J_2+J_3+dlH^2)\Phi\\ \quad\quad=c_0(J_1-dlH)\dot{x}_0+k_0(J_1-dlH)x_0\end{array}\right\}\quad(6)$$

ここで

$$\left.\begin{array}{ll}\dfrac{c_0(hl+dl)}{m}=e & \dfrac{c_0(J_1-dlH)}{m}=b\\ \dfrac{k_0(hl+dl)}{m}=k & \dfrac{k_0(J_1-dlH)}{m}=i\\ \dfrac{c_0(J_2+J_3+dlH^2)}{m}=c & \dfrac{k_0(J_2+J_3+dlH^2)}{m}=j\\ \dfrac{I}{m}=r^2 & \end{array}\right\}\quad(7)$$

と置くと運動方程式は次のように見易い形となる。

$$\left.\begin{array}{l}\ddot{x}+e\cdot\dot{x}+b\cdot\dot{\Phi}+k\cdot x+i\cdot\Phi=e\cdot\dot{x}_0+k\cdot x_0\\ r^2\ddot{\Phi}+b\cdot\dot{x}+c\cdot\dot{\Phi}+i\cdot x+j\cdot\Phi=b\cdot\dot{x}_0+i\cdot x_0\end{array}\right\}\quad(8)$$

4.2 運動方程式の解

Eq. (8) を用いて，減衰のない場合の系の連成固有振動数 $f_{\mathrm{I}}, f_{\mathrm{II}}$ を求めると

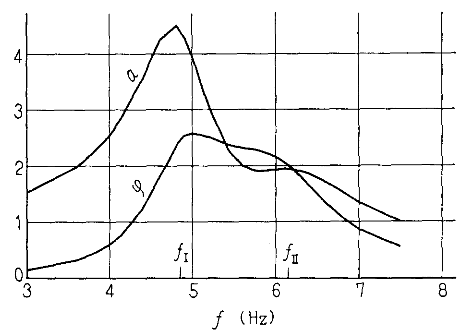
$(k-\omega^2)(j-r^2\omega^2)-i^2=0$　　$(\omega=2\pi f)$　を解いて

$$\left.\begin{array}{l}\omega_{\mathrm{I}\cdot\mathrm{II}}^2=\dfrac{1}{2r^2}\{(kr^2+j)\mp\sqrt{(kr^2-j)^2+4r^2i^2}\}\\ f_{\mathrm{I}}=\dfrac{\omega_{\mathrm{I}}}{2\pi}\\ f_{\mathrm{II}}=\dfrac{\omega_{\mathrm{II}}}{2\pi}\end{array}\right\}\quad(9)$$

ここで $c_0=700$，$k_0=120000$ と定め，Table 1 の数値を用いて Eq. (5), (7) を計算すると，Eq. (8) の係数は次のように定まる。

$e=6.3$　$b=-1.4$　$c=7.0$

$k=1080$　$i=-240$　$j=1200$　$r^2=0.9$



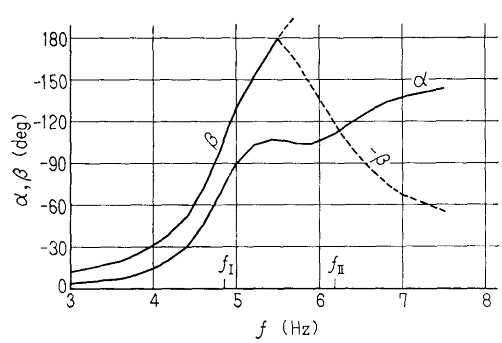


Fig. 11　Frequency responses of the motions of the model shown in Fig. 10

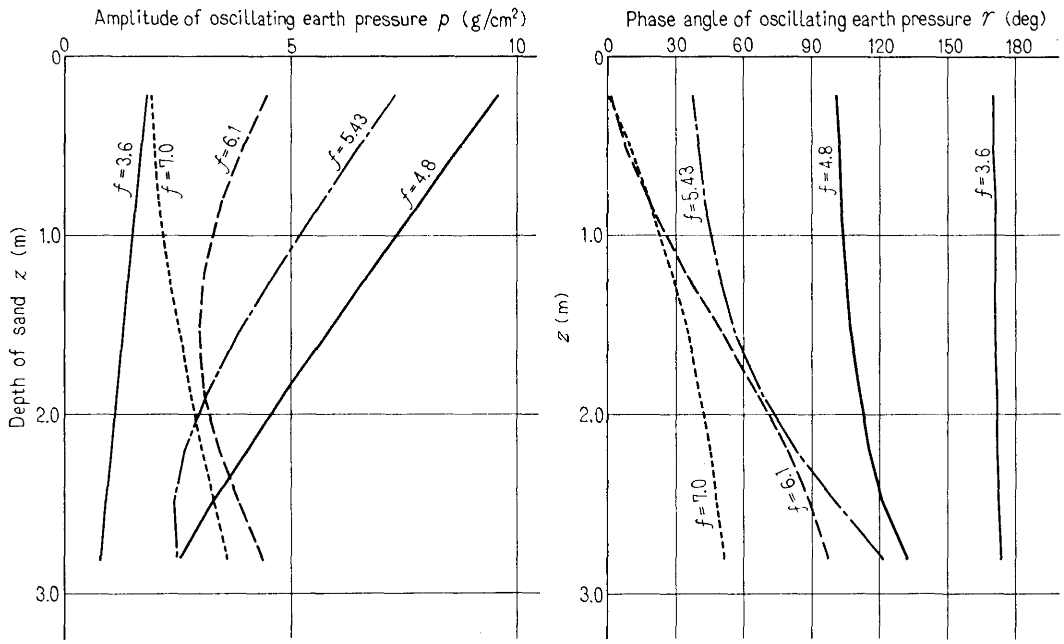


Fig. 12 Vertical distributions of oscillating earth pressure acting on the back surface of the model shown in Fig. 10

Eq. (9) を用いて第 1 次および第 2 次連成固有振動数を計算すると

$$f_{\mathrm{I}}=4.85\ \ \mathrm{Hz}$$
$$f_{\mathrm{II}}=6.15\ \ \mathrm{Hz}$$

となる。

Eq. (8) において

$$\left.\begin{aligned} x_0&=a_0\cos\omega t\\ x&=a\cos(\omega t+\alpha)\\ \Phi&=\varphi\cos(\omega t+\beta)\end{aligned}\right\}\quad(10)$$

と置き，さらに $a_0=1$ としてこれを解いた結果を Fig. 11 に示す。

次にこの解を使って鉛直壁面に作用する振動土圧を求めよう。これを $p\cos(\omega t+\gamma)$ で表わすと

$$\begin{aligned} p\cos(\omega t+\gamma)=&-k_0\{x-x_0+(z_0-z)\Phi\}\\ &-c_0\{\dot{x}-\dot{x}_0+(z_0-z)\dot{\Phi}\}\end{aligned}\quad(11)$$

Eq. (10) で $a_0=0.1$(mm) とし，Eq. (11) の z に各土圧計の取付位置 (Fig. 4 参照) の値を代入し，右辺のベクトルを合成すれば壁体背後の各点に作用する振動土圧をえる。これを Fig. 12 に示す。また壁頂 (H-1 の位置) における水平変位振幅を D_1(mm)，位相角を λ_1(deg) とし，H-2 の位置におけるそれを D_2(mm)，λ_2(deg) とすると

$$\left.\begin{aligned} D_1\cos(\omega t+\lambda_1)&=x+z_0\Phi\\ D_2\cos(\omega t+\lambda_2)&=x-z'\Phi\end{aligned}\right\}\quad(12)$$

から壁体の 2 点における水平変位が求められる。

4.3 解の立体表示とそれによる解析

Eq. (11) および (12) の結果を立体表示したものを Photo 10 に示す。いずれも $\omega t=90°$ における位置で，右は第 1 次連成固有振動数 f_{I} における結果を，左は第 2 次連成固有振動数 f_{II} における結果を示している。

L_p は一見して空間直線と見えるが，これが直線で

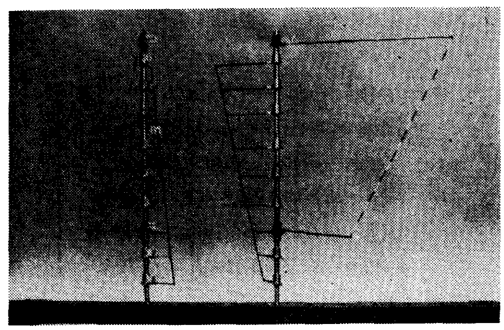


Photo 10 Representation of oscillating earth pressure acting on the back surface of the model shown in Fig. 10
The right is at $f=f_{\mathrm{I}}$, left $f=f_{\mathrm{II}}$

あることは次のようにして簡単に証明できる。いま Eq. (11) を書き改め，土圧の並進 (Translational) 成分と回転 (Rotational) 成分に分け，これをそれぞれ $R\cos(\omega t+\delta')$，および $Q\cos(\omega t+\delta)$ で表わすと

$$\begin{aligned} p\cos(\omega t+\gamma) &= \{-k_0(x-x_0)-c_0(\dot{x}-\dot{x}_0)\}+(z-z_0)(k_0\Phi+c_0\dot{\Phi}) \\ &= R\cos(\omega t+\delta')+(z-z_0)Q\cos(\omega t+\delta) \end{aligned}$$

これと Eq. (1) を比較して次式をえる

$$\begin{aligned} p_x &= Q\cos\delta\cdot z+(R\cos\delta'-z_0Q\cos\delta) \\ p_y &= Q\sin\delta\cdot z+(R\sin\delta'-z_0Q\sin\delta) \end{aligned}$$

ここで

$$\left.\begin{aligned} q_x &= Q\cos\delta \\ q_y &= Q\sin\delta \\ b_x &= R\cos\delta'-z_0Q\cos\delta \\ b_y &= R\sin\delta'-z_0Q\sin\delta \end{aligned}\right\} \qquad (13)$$

と置くと

$$\left.\begin{aligned} p_x &= q_x\cdot z+b_x \\ p_y &= q_y\cdot z+b_y \end{aligned}\right\} \qquad (14)$$

となり，xz および yz 平面への投影が直線で表わされる。すなわち L_p は空間直線である。Fig. 13 に Eq. (14) の各係数の振動数特性を示す。Eq. (14) が Eq. (2) の形式で L_p を表現した結果である。以下 Eq. (14) を用いて考察を進めるが，導かれた結果に Eq. (13) を代入すれば，すべて土圧成分で表現される。

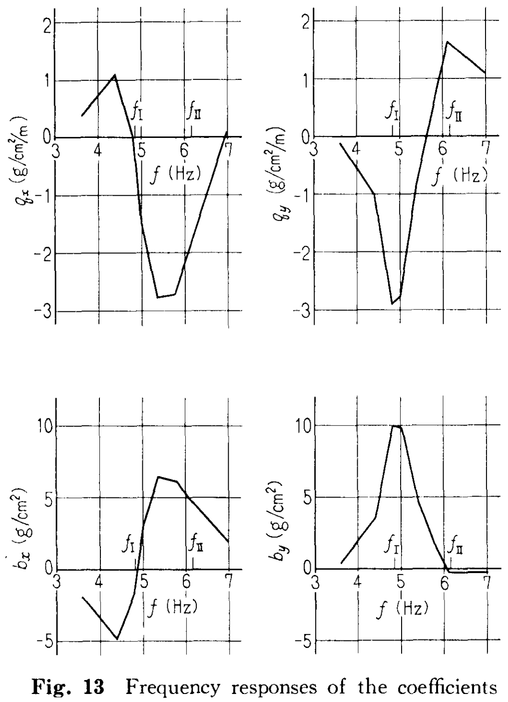


Fig. 13 Frequency responses of the coefficients in Eq. (14)

まず $p-z$ 曲線を求めると

$$p^2=p_x{}^2+p_y{}^2=(q_xz+b_x)^2+(q_yz+b_y)^2 \qquad (15)$$

$$p^2-(q_x{}^2+q_y{}^2)z^2-2(b_xq_x+b_yq_y)z=(b_x{}^2+b_y{}^2)$$

ここで

$$\left.\begin{aligned} \bar{z} &= -\frac{b_xq_x+b_yq_y}{q_x{}^2+q_y{}^2} \\ u &= \frac{b_xq_y-b_yq_x}{\sqrt{q_x{}^2+q_y{}^2}} \\ v &= \frac{b_xq_y-b_yq_x}{q_x{}^2+q_y{}^2} \end{aligned}\right\} \qquad (16)$$

と置き，$z=Z+\bar{z}$ として原点を $(0,\bar{z})$ に移すと

$$\frac{p^2}{u^2}-\frac{Z^2}{v^2}=1 \qquad (17)$$

となる。すなわち，土圧ベクトルの位相角を無視して振幅を深さに対してプロットすれば，$(u,\bar{z})$ に頂点を持つ双曲線となり (Fig. 12 の $p-z$ 曲線)，位相角を考えて空間的にこのベクトルを配置すれば，Photo 10 に例を示したように，その先端を結んだ線は空間直線となるのである。z 軸に垂線をたて，これが L_p と交わる点までのベクトルの長さは Eq. (15) で表わされているから，$\dfrac{d(p^2)}{dz}=0$ から $z=\bar{z}$ が，そのときの極値として $p_{\min}=u$ がえられる。したがって Eq. (16) の u は z 軸と L_p の最短距離を，$\bar{z}$ は最短距離を与える z 軸上の位置（深さ）を表わしていることがわかる。

いま z 軸のまわりに L_p を1回転させると，これによって生じる曲面は Eq. (15) から

$$p_x{}^2+p_y{}^2=(q_xz+b_x)^2+(q_yz+b_y)^2 \qquad (18)$$

原点を $(0,0,\bar{z})$ に移すと

$$\frac{p_x{}^2}{u^2}+\frac{p_y{}^2}{u^2}-\frac{Z^2}{v^2}=1$$

となり，これは Fig. 14 に示す一葉双曲面である。この曲面の xz 平面への投影曲線は Eq. (17) と同じものとなる。またこの曲面は Fig. 14 に示したように2群の母線を持ち，その中の特定の母線が元の空間直線と一致するのは当然である。

次に $\gamma-z$ 曲線について調べてみる。Eq. (1) および Eq. (14) から

$$\gamma=\tan^{-1}\frac{p_y}{p_x}=\tan^{-1}\frac{q_yz+b_y}{q_xz+b_x} \qquad (19)$$

ここで

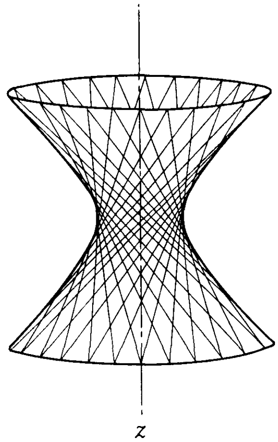


Fig. 14 Hyperboloid of one sheet and its generating lines of two systems

$$\left.\begin{aligned}\gamma&=\Gamma+\theta=\Gamma+\tan^{-1}\left(-\frac{q_x}{q_y}\right)\\ z&=Z+\bar{z}\end{aligned}\right\}\qquad(20)$$

と言う座標変換を施すと

$$\Gamma=\tan^{-1}\frac{Z}{v}\qquad(21)$$

となる。すなわち土圧ベクトルの位相角を深さに対してプロットすれば，$(\theta,\ \bar{z})$ を点対称位置とする $\tan^{-1}$ 曲線に似た曲線となる (Fig. 12 の $\gamma-z$ 曲線)。また Eq. (21) から $Z=0$ において $\left(\dfrac{d\Gamma}{dZ}\right)_{\text{極値}}=\dfrac{1}{v}$ となり，$v>0$ のときに最大，$v<0$ のときに最小値となることが容易にわかる。すなわち，最短距離を与える位置で $\gamma-z$ 曲線が最大勾配となる。z 軸と直線 L_p がつくる面（後述）は，前者の場合は深くなるほど角度が大きくなるから右ネジの方向に，後者の場合は左ネジの方向に捩れている。$v=1$ のときには $\gamma-z$ 曲線は普通の $\tan^{-1}$ 曲線となり，Fig. 15 のように $v<1$ のときには，それより変化が急になり，$v>1$ のときにはゆるやかになる。すなわち，v の正負（とりもなおさず $b_xq_y-b_yq_x$ の正負）によって捩れる向きが定まり，v の絶対値の大小によって捩りの度合が定まる。この捩りの度合については，Eq. (16) から

$$\frac{1}{v}=\frac{q_x^2+q_y^2}{b_xq_y-b_yq_x}=\frac{\sqrt{q_x^2+q_y^2}}{u}$$

となるから，L_p の傾きが大きいほど，最短距離が小さいほど捩りの度合が大きくなることがわかる。次に Eq. (20) の幾何学的な意味を考えてみよう。L_p を表わす Eq. (14) の座標を z 軸のまわりに θ だけ回転すると，L_p の xz 平面への投影が z 軸と平行になり，両者の距離が最短距離 u となる。このときの yz 平面への投影直線は，z 軸と $\bar{z}$ の点で交わるのでこの点へ原点を移せば，Eq. (19) は Eq. (21) のように変形され，点 $(\theta,\ \bar{z})$ に対して点対称になることを意味している。

最後に z 軸と空間直線 L_p がつくる面を考えよう。Fig. 16 のように z 軸と L_p を導線とし，1本の母線が xy 平面に平行に移動すると考えてこの面の方程式をつくると

$$\left.\begin{aligned}&p_y=\frac{q_yz+b_y}{q_xz+b_x}\cdot p_x\\ &\text{または}\\ &q_x\cdot p_yz-q_y\cdot p_xz-b_y\cdot p_x+b_x\cdot p_y=0\end{aligned}\right\}\qquad(22)$$

$$\text{これに}\quad\left.\begin{aligned}p_x&=\frac{1}{\sqrt{2(q_x^2+q_y^2)}}(-\sqrt{2}\,q_x\xi-q_y\eta-q_y\zeta)\\ p_y&=\frac{1}{\sqrt{2(q_x^2+q_y^2)}}(-\sqrt{2}\,q_y\xi+q_x\eta+q_x\zeta)\\ z&=\frac{1}{\sqrt{2}}(\eta-\zeta)+\bar{z}\end{aligned}\right\}$$

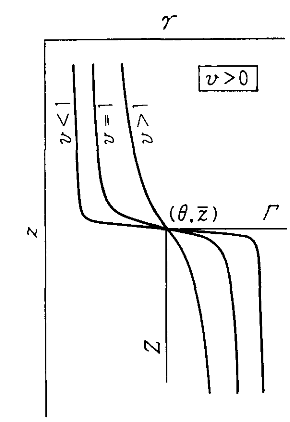


Fig. 15 Influence of the value of v on $\gamma-z$ curve

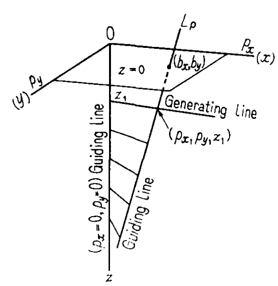


Fig. 16 Analysis of the surface involved z-axis and L_p

と言う座標変換を施すと[9]，次のように双曲放物面の方程式をえる。

$$\frac{\eta^2}{v}-\frac{\zeta^2}{v}=2\xi \tag{23}$$

Fig. 17 に双曲放物面を示す。図示のとおりこの曲面も２群の母線を持ち，一方は土圧のベクトルを表わし，他はベクトルの先端を結ぶ線を表わす。後者の特定の母線が元の空間直線 L_p と一致することは一葉双曲面の場合と同じである。Eq. (18) と Eq. (22) が Eq. (3) の形式によるもので，２曲面の交線として L_p を表わしている。

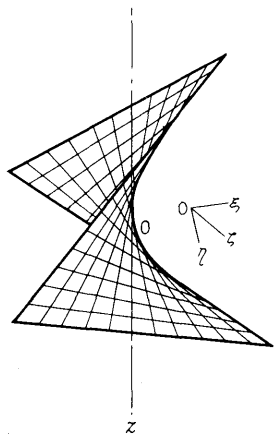


Fig. 17 Hyperbolic paraboloid and its generating lines of two systems

以上 Fig. 10 のように Voigt 体で囲まれた重力式擁壁の背後に作用する振動土圧を空間直線 L_p で表わし，L_p の幾何学的な性質について述べた。ここでえられた結果に Eq. (13) を代入して土圧成分で表わせば，これらの結果の物理的な表現となる。また重力式擁壁の振動問題を扱うとき，壁体は剛体と考えて処理するので，壁体の上下２点における変位の実測値からつくられる直線 L_D についても，以上の結果がそのまま当てはまる。

5. 振動土圧の分布形状の決定―実験式化

5.1 xz, yz 平面への投影曲線を放物線で表わした場合の L_p の特性

前章において L_p が空間直線で表わされる場合，L_p の幾何学的な特性について調べた。しかし付録Aから明らかなように，実測データはこのように簡単な直線形式では表わしえない。さらに進んで，xz および yz 平面への投影曲線の方程式を１次式から２次式，３次式……と次数を高めてゆくことによって，複雑な実測値に近ずきうると想像される。実際，付録 A の Fig. 39-(59)～(65) の④および⑤を見ると，実測値（○印）は放物線分布にきわめて近いことがわかる（ちなみに実線は後述のようにして求めた放物線）。この実験は裏込めの代りに水を満たし，壁頂起振機で加振して動水圧を測定したものである。

この II-5 の実験結果を表現するために，xz および yz 平面への投影曲線を Eq. (24) のように放物線で表わし，そのときの L_p の幾何学的な性質を調べた結果を以下に示す。

$$\left.\begin{aligned} p_x&=C_x(z-z_x)^2+\bar{p}_x \\ p_y&=C_y(z-z_y)^2+\bar{p}_y \end{aligned}\right\} \tag{24}$$

ここで，C_x, C_y は放物線の係数，z_x, z_y および $\bar{p}_x, \bar{p}_y$ は各投影面における放物線の頂点の縦および横座標である。

1) L_p は空間曲線であるか否か

II-5 の実験結果を立体表示し，これを回転しながらその投影を観察すると，ほぼ直線になる位置が存在する。そこで Eq. (24) の座標を z 軸のまわりに $\theta'=\tan^{-1}\left(-\dfrac{C_x}{C_y}\right)$ 回転すれば，xz 平面への投影は直線 $p_X=Kz+L$ となる。ここに $K=\dfrac{\pm 2C_xC_y(z_y-z_x)}{\sqrt{C_x^2+C_y^2}}$

$$L=\frac{\pm\{C_y(C_xz_x^2+\bar{p}_x)-C_x(C_yz_y^2+\bar{p}_y)\}}{\sqrt{C_x^2+C_y^2}}$$

である。この直線の z 軸との交点は $z=-\dfrac{L}{K}=\tilde{z}$ で与えられる。このことは Eq. (24) で示される曲線は xz 平面に垂直で直線 $p_X=Kz+L$ を含む平面内にあるわけで，本質的に平面曲線であることがわかる。この平面の方程式はやはり $p_X=Kz+L$ で表わされ，元の座標で表わすと

$$\begin{aligned} &C_yp_x-C_xp_y-2C_xC_y(z_y-z_x)z \\ &\quad+C_x(C_yz_y^2+\bar{p}_y)-C_y(C_xz_x^2+\bar{p}_x)=0 \end{aligned}$$

となる。もし両放物線の頂点の縦座標が等しいならば $z_x=z_y$，ゆえに $K=0$ となる。したがって L_p の座標を θ' 回転したとき，xz 平面への投影は $p_X=L$，すなわち z 軸に平行となる場合に相当する。

2) $p-z$ 曲線

$$p=\sqrt{\{C_x(z-z_x)^2+\bar{p}_x\}^2+\{C_y(z-z_y)^2+\bar{p}_y\}^2} \tag{25}$$

$z_x=z_y$ のとき，その点を中心として曲線は上下対称の形を持つ。

3) $\gamma-z$ 曲線

$$\gamma=\tan^{-1}\frac{C_y(z-z_y)^2+\bar{p}_y}{C_x(z-z_x)^2+\bar{p}_x} \qquad (26)$$

この曲線を追跡する参考として Eq. (24) において

$$C_x=\frac{1}{4} \qquad z_x=5 \qquad \bar{p}_x=3$$

$$C_y=\frac{1}{2} \qquad z_y=2 \qquad \bar{p}_y=2$$

と仮りに置いて Eq. (25) と Eq. (26) を計算した結果を Fig. 18 に示す。この図を参考にしながら追跡の結果を列挙する。

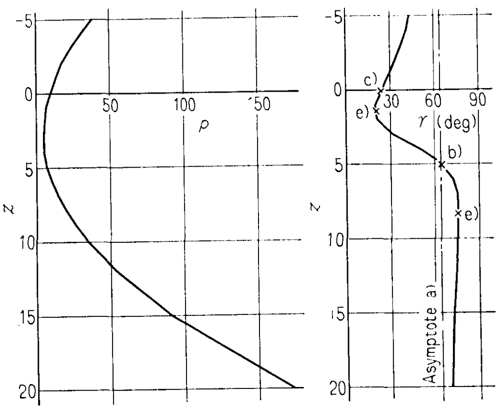


Fig. 18 General example of the curves by Eq. (25) and Eq. (26)

a) 漸近線; $\gamma=\tan^{-1}\frac{C_y}{C_x}$

b) 漸近線との交点; $z=\bar{z}$ となり交点は1点のみで，もし $z_x=z_y$ ならば曲線は漸近線と交わらぬ。

c) γ 軸との交点; $\gamma=\tan^{-1}\frac{C_y z_y^2+\bar{p}_y}{C_x z_x^2+\bar{p}_x}$

d) z 軸との交点; $C_y(z-z_y)^2+\bar{p}_y=0$ から，$C_y\bar{p}_y \gtreqless 0$ に応じて，2交点，1接点，虚点となる。

e) 変曲点; $\frac{d\gamma}{dz}=0$ から極値を与える z の値が求まり，これを原式に代入して γ の極値をえる。$z_x=z_y$ なるときにはその点で極値を持ち，極値は $\tan^{-1}\frac{\bar{p}_y}{\bar{p}_x}$ となる。

f) Eq. (26) を変形すること; 一般の場合にはあまり有用な形に変形できない。ただ $z_x=z_y$ の場合は座標変換 $\gamma=\Gamma+\tan^{-1}\left(-\frac{C_x}{C_y}\right)$, $z=Z+z_x$ を施すと

$$\Gamma=\tan^{-1}\frac{(C_x^2+C_y^2)Z^2+\{C_x(C_x z_x^2+\bar{p}_x)+C_y(C_y z_y^2+\bar{p}_y)-(C_x^2+C_y^2)z_x^2\}}{C_y(C_x z_x^2+\bar{p}_x)-C_x(C_y z_y^2+\bar{p}_y)}$$

となり z_x を中心として，$\gamma-z$ 曲線は上下対称の形となることがわかる。

以上 $\gamma-z$ 曲線について簡単に追跡を行ってみたが，Fig. 18 の中にこの結果を用いて計算した値が×印で，a)~e) の項目名とともに記入されている。

5.2 さらに高次にした場合

付録 A のうち，前節で述べたⅡ-5の実験を除いたものの，④および⑤を詳細に調べると次のことに気付く。

i) 図に表われている分布曲線上か，あるいはその延長上に曲線の対称点を求めることができる。

ii) この対称点を中心にして，程度の差はあるがほとんどすべてのものは奇関数の形をしている。すなわち z の奇数ベキの項を含んでいる。

iii) 曲線の対称点付近における接線が，z 軸と平行でないものがほとんどである。

実測データについての以上の性質をふまえて，実測値を表現する実験式はさらに，A) xz および yz 平面の曲線は同じ形の式で表わす。B) 実験式はなるべく簡単なものとする。C) 部分的に2次放物線に近い形をも含んだ式とする。などのことを考慮して種々検討の結果，次式が最も適したものであると言う結論に達した。すなわち

$$\left.\begin{aligned} p_x&=A_x(z-z_x)^n+B_x(z-z_x)+\bar{p}_x \\ p_y&=A_y(z-z_y)^n+B_y(z-z_y)+\bar{p}_y \end{aligned}\right\} \qquad (27)$$

ここで，A_x, A_y は高次放物線の係数，B_x, B_y は曲線の対称点における接線勾配，z_x, z_y および $\bar{p}_x, \bar{p}_y$ は曲線の対称点の縦および横座標を表わし，$n=3, 5, 7$ とする。第1式の概形を Fig. 19 に示す。図からも明らかなように $B_x>0$ のときは極値を持たず，$B_x<0$ のときは二つの極値を持つ。Eq. (27) で表わされる空間

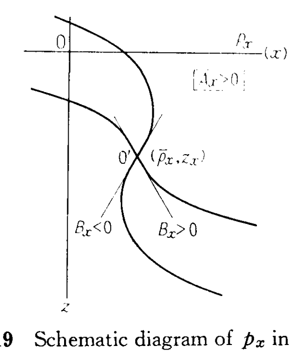


Fig. 19 Schematic diagram of p_x in Eq. (27)

曲線は，もし $z_x=z_y$ と言う条件があれば，平面曲線を表わすことは，前節と同様にして証明することができる。また $p-z$，および $\gamma-z$ 曲線の追跡も前節と同様の考えで行えばよい。

5.3 係数の決定

Eq. (27) に含まれる $A_x, B_x, \bar{p}_x, z_x$ などの値は最小自乗法を用いて決定した。いま Eq. (27) の第1式を観測方程式とすると，未知量は $A_x, B_x, \bar{p}_x, z_x$ で，これらの概略値をそれぞれ $A'_x, B'_x, \bar{p}'_x, z'_x$ とし，それに付加すべき改正量を $dA_x, dB_x, d\bar{p}_x, dz_x$ とすると

$$A_x=A'_x+dA_x \qquad B_x=B'_x+dB_x$$
$$\bar{p}_x=\bar{p}'_x+d\bar{p}_x \qquad z_x=z'_x+dz_x$$

となる。これらを観測方程式に代入し，Taylor 級数に展開して第1項のみをとれば次式をえる。

$$\begin{aligned}&(z-z'_x)^n\cdot dA_x+(z-z'_x)\cdot dB_x+d\bar{p}_x\\&\quad-\{nA'_x(z-z'_x)^{n-1}+B'_x\}\cdot dz_x\\&\quad=p_x-\{A'_x(z-z'_x)^n+B'_x(z-z'_x)+\bar{p}'_x\}\end{aligned}$$

この式に最小自乗法を適用して，$dA_x, dB_x, d\bar{p}_x, dz_x$ を求め第1次最確値 $A_x, B_x, \bar{p}_x, z_x$ を求める。この値を概略値として再び上の計算をくりかえし，dA_x などの値が，A_x などの有効数字4桁以下になるまでこの操作をくりかえす。p_y についても全く同じである。また Eq. (24) を観測方程式としたときも同じ手順で行えばよい。

このようにして最確値 $A_x, B_x, \bar{p}_x, z_x$ などの値を決定する。この値を用いて，z を所定の値（土圧計の位置）にかえて Eq. (27) から p_x と p_y を計算し，さらに

$$\left.\begin{aligned}p&=\sqrt{p_x^2+p_y^2}\\ \gamma&=\tan^{-1}\frac{p_y}{p_x}\end{aligned}\right\}\qquad(28)$$

を求める。p_x, p_y, p, γ を求めるとき，z の各点における残差の自乗和を計算しておく。Eq. (24) を適用するのは II-5 の実験のみで，他は Eq. (27) を用いるのであるが，このときは $n=3, 5, 7$ の3とおりについて計算し，残差の自乗和が最小となる n の値を選ぶ。

実測点の不足している場合や，そのばらつき具合から $A_x, B_x, \bar{p}_x, z_x$ などが一定値に収束しない場合もかなりある。その場合はすでに収束したものの中から，未収束のものの振動数をはさんでこれに最も近い振動数に対する値を二つずつ選び，これから A_x，B_x……などの値を推定し，これをもとにして試行錯誤によって計算を進めた。

Table 3 Values of n

Conditions of backfilling \ Source of vibration	I	II
1	3	7
2	7	7
3	3	7
4	3	7
5	3	2 [Eq. (24)]

以上のようにして求めた n の値を Table 3 に，A_x, $B_x, \bar{p}_x, z_x$ などの振動数特性を付録 B に Fig. 40-(1)～(10) として示す。またこれらの値を用いて計算した p_x, p_y, p, γ の値を，前掲の Fig. 6 および付録 A の Fig. 39-(1)～(65) の中の⑤，④，②，③に実線で示した。⑤および④の中の×印は曲線の対称点の位置である。全体からみて，II群の実験はI群より実測値のばらつきが大きい。I群の中では I-1 は他より実測点のばらつきが大きいが，これは裏込め投入後初めての振動実験であるため，振動によって裏込めが“落ちつく”過程の現象ではないかと考えている。一般的に土圧実験は実測値のばらつきが大きいものであるが，付録Aの実測値（○印）と実験式による値（実線）はなかなか良い一致を示しているといえよう。

付録Aの Fig. 39-(39)，すなわち I-5-5.85 の実験は前日からの漏水が激しく，壁底部も浸水した状態で行った結果である。他のものと実験条件が異なると思われるので，付録Bの Fig. 40-(5) からはこの振動数における値を除いた。付録Bを全般的にながめると，振動数に対する実験式の係数は急激な変化をするものが多く，しかもばらつきが大きい。各係数の決定にあたっては，前述のようにこの振動数特性を参考にしながら計算を進めたにもかかわらず，えられた結果はこの程度のばらつきを示し，土圧実験のむずかしさを如実に物語っているといえよう。

6. 分布土圧の積分

6.1 側方分布土圧の積分

前章で重力式擁壁の背後（側方）に作用する振動土圧の分布を決定した。すなわち，Eq. (24) あるいは Eq. (27) と Eq. (28) によって，背後の各点に作用する振動土圧の振幅と位相角を知ることができる。壁面上の任意の1点に作用する振動土圧は

$$\boldsymbol{p}=p\cos(\omega t+\gamma)=p_x\cos\omega t-p_y\sin\omega t \tag{29}$$

で表わされている。いま側方振動土圧の合力を $\boldsymbol{P}$, 壁体の重心に関する合モーメントを $\boldsymbol{M}$ として，これを次のように置く。

$$\boldsymbol{P}=P\cos(\omega t+\Theta_P)=P_x\cos\omega t-P_y\sin\omega t \tag{30}$$

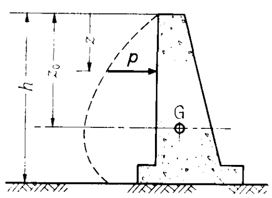
$$\left.\begin{aligned}P_x&=P\cos\Theta_P\\P_y&=P\sin\Theta_P\end{aligned}\right\}\text{ から }\left.\begin{aligned}P&=\sqrt{P_x^2+P_y^2}\ \text{(kg)}\\\Theta_P&=\tan^{-1}\frac{P_y}{P_x}\ \text{(deg)}\end{aligned}\right\} \tag{31}$$

同様にして

$$\boldsymbol{M}=M\cos(\omega t+\Theta_M)=M_x\cos\omega t-M_y\sin\omega t \tag{32}$$

$$\left.\begin{aligned}M_x&=M\cos\Theta_M\\M_y&=M\sin\Theta_M\end{aligned}\right\}\text{ から }\left.\begin{aligned}M&=\sqrt{M_x^2+M_y^2}\ \text{(kg·m)}\\\Theta_M&=\tan^{-1}\frac{M_y}{M_x}\ \text{(deg)}\end{aligned}\right\} \tag{33}$$

いっぽう，土圧分布を2次元分布と仮定すると，$\boldsymbol{P}$ は Eq. (29) を積分して（Fig. 20 参照）



Length of the wall : l, $p=p\cos(\omega t+\gamma)$

Fig. 20 Integration of distributed pressures

$$\begin{aligned}\boldsymbol{P}&=l\int_0^h(p_x\cos\omega t-p_y\sin\omega t)dz\\&=\cos\omega t\cdot l\int_0^h p_x dz-\sin\omega t\cdot l\int_0^h p_y dz\end{aligned} \tag{34}$$

Eq. (34) を Eq. (30) と等置して

$$\left.\begin{aligned}P_x&=l\int_0^h p_x dz\\P_y&=l\int_0^h p_y dz\end{aligned}\right\} \tag{35}$$

をえる。土圧の合モーメントも同様にして

$$\begin{aligned}\boldsymbol{M}&=l\int_0^h(z_0-z)(p_x\cos\omega t-p_y\sin\omega t)dz\\&=\cos\omega t\cdot l\int_0^h(z_0-z)p_x dz-\sin\omega t\cdot l\int_0^h(z_0-z)p_y dz\end{aligned} \tag{36}$$

Eq. (36) を Eq. (32) と等置して

$$\left.\begin{aligned}M_x&=l\int_0^h(z_0-z)p_x dz\\M_y&=l\int_0^h(z_0-z)p_y dz\end{aligned}\right\} \tag{37}$$

をえる。

Eq. (35) と Eq. (37) に，Eq. (24) あるいは Eq. (27) を代入して積分を実行し，この結果を Eq. (31) と Eq. (33) に代入すると合力の振幅と位相角，および合モーメントの振幅と位相角を求めることができる。

I 群の実験について，以上の計算結果を図示すると Fig. 21 のようになる。この図では計算結果を滑らかな曲線に引きなおして示してあり，I-4 の実験は異なった振動数の実験が三つしかないのでここでは省略した。I-1 の実験は5.3で述べた理由によって，やや実測点のばらつきが大きいが，その他のものはこの図の曲線によくのっている。一見して Θ_M の曲線が異常であるが，I-2 および I-3 の曲線の，振動数の小さい方ではやや疑問がある。

6.2 底面に作用する振動土圧

振動中における力の釣合いを考える第1の準備として，振動中の底面反力の実測値を調べよう。Fig. 4 に示したように，底面には3個の土圧計が取り付けてあるが，この内中央の No. 5 はほとんど機能を失っており，Heel 側の No. 4 も完全ではない。壁体の構造上，あまり沢山の土圧計を底面に取り付けることもできず，今の場合，1個の土圧計が故障すると，底面反力の分布形状を正確に決定するのが困難になる。またたとえ土圧計が完全であっても，実測値のばらつきは側方土圧より大きく，実測値から底面反力の分布形状を決定するのは容易なことではない。一般的に言って底面反力の測定は，静的な場合でも側方土圧よりはるかに難かしく，それだけ精度も落ちるものなのである。土圧計 No. 4 の記録は完全なものではないが，Fig. 22 に，I-6（裏込なし）の実測値を示す。図中○印が実測値で，カッコ内の数字は位相角を表わす。直線は Toe 側および Heel 側の実測値と壁体重心直下の点 G' を結んだものである。この図だけについて言えば，

i) 振動数の低い方では，振幅は直線分布になるが位相角は Toe と Heel で必ずしも逆相になっていない。

ii) 振動数の高い方では，振幅は直線分布になっていないが位相角は完全に逆相になっている。

壁体背後に側方土圧が作用している場合の底面反力は，Heel 側の記録で解析に耐えるものが少なく，いきおい，Toe 側の実測値にたよらざるをえない。Fig. 23 に側方土圧が作用したときの土圧計 No. 6 の実測値を示す。Fig. 21 と同様，実測値をスムーズ化し，I-4 のものは除いてある。今後，Toe 側の底面反力の実測値を $\boldsymbol{p}_T=p_T\cos(\omega t+\gamma_T)$ で表わすこととする。

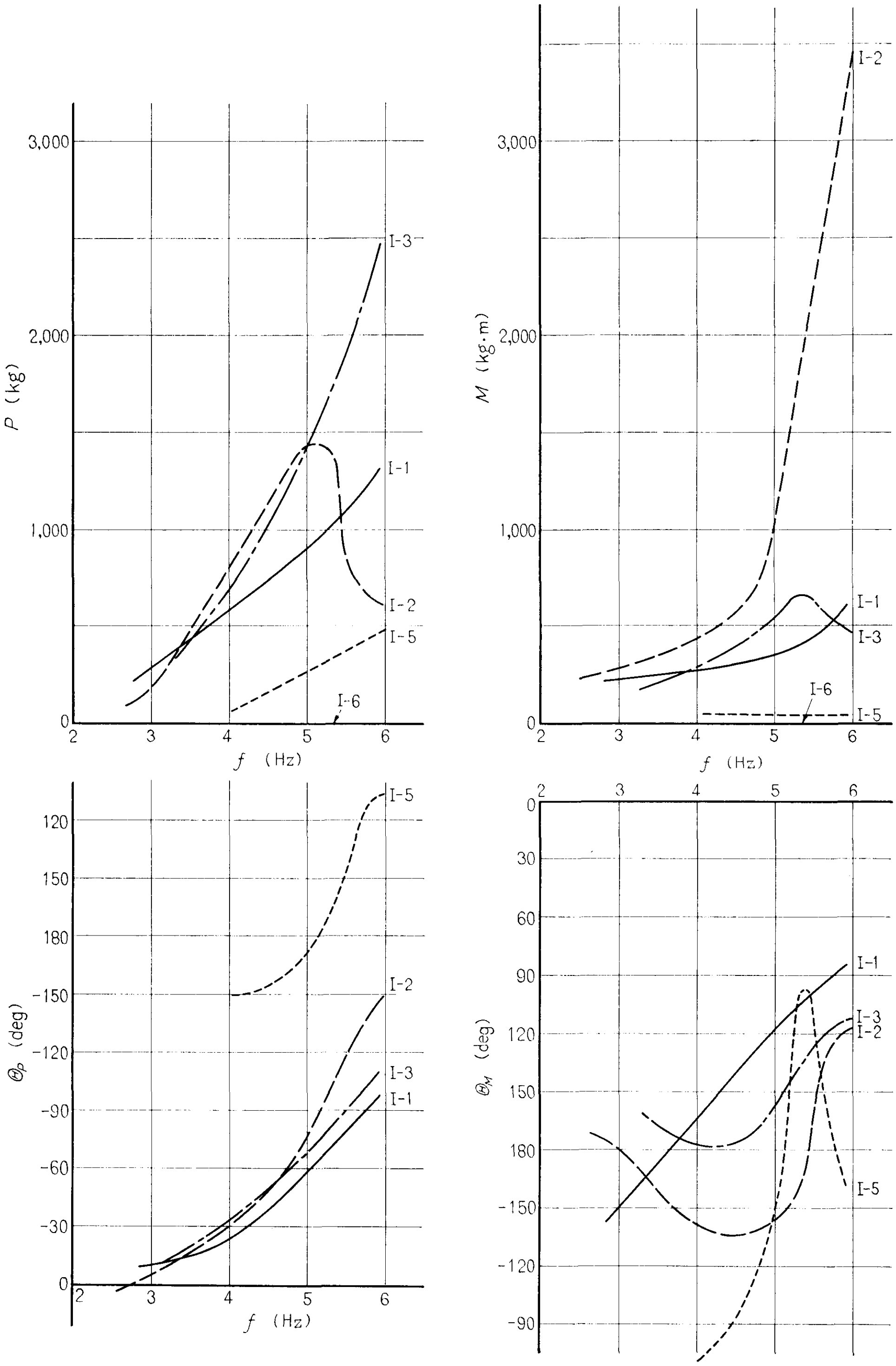


Fig. 21 Frequency responses of resultant forces and resultant moments of lateral oscillating earth pressure

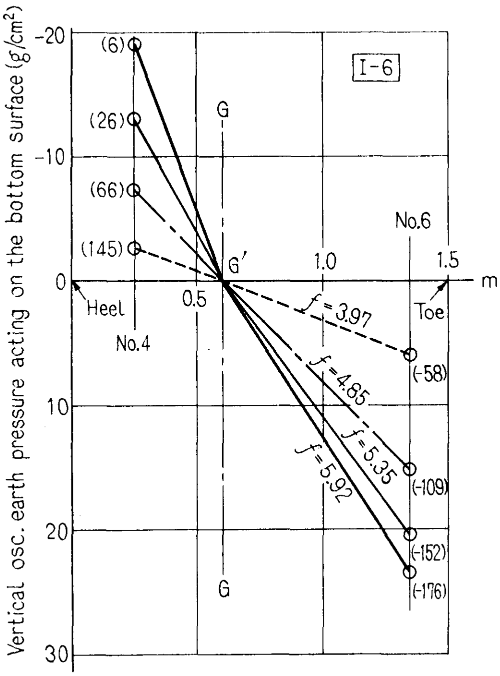


Fig. 22 Distributions of vertical oscillating earth pressure acting on the bottom surface. Numbers in brackets show the phase angle

7. 力の釣合い

7.1 変位の分解

振動中における力の釣合いを考える第2の準備として，実測によってえられた壁体の変位を，並進成分 x と回転成分 Φ に分解しよう。ここで壁体の上下動に関してであるが，この実験に用いた振動測定器の倍率（スポットのふれ／地動=130 倍程度）では，上下動は観測にかからなかったので以後これを無視することとする。

x と Φ を求めるには Fig. 10 を参照して，Eq. (12) に Eq. (10) の x と Φ を代入し，D_1, λ_1, D_2, λ_2, z_0, z' を既知としてこれを解き，$a, \alpha, \varphi, \beta$ を求めればよい。このようにして求めた結果を Fig. 24 に示す。I-2 の実験は a, φ ともに 5.3 Hz でピークを持つが，これは裏込め上に置かれた載荷重の共振を示している。

7.2 力と変位に関する定性的考察

力の釣合いを論ずる前に，ここで Fig. 21, Fig. 23, Fig. 24 を包括的に眺めてえられる，力と変位についての定性的な特性を列記してみる。

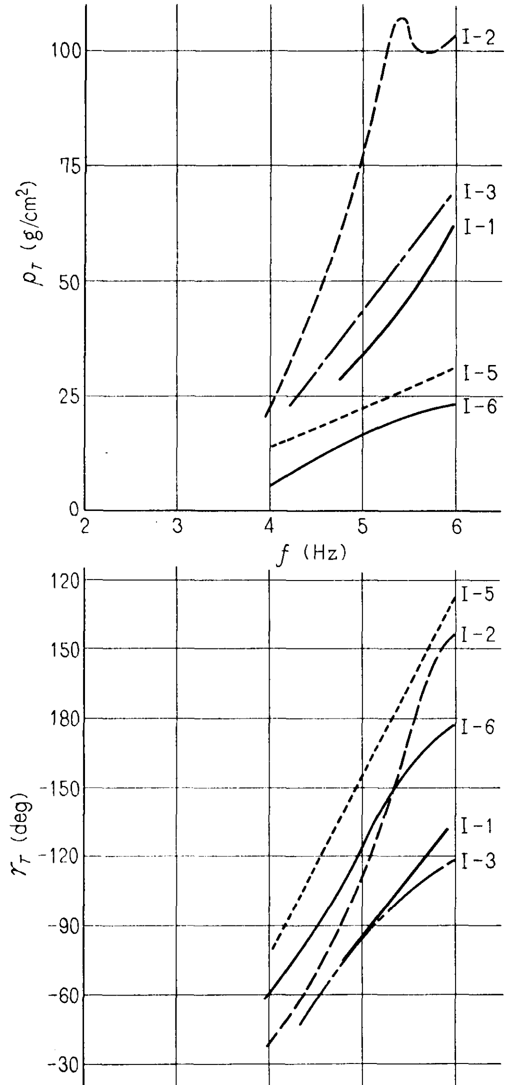


Fig. 23 Frequency responses of vertical oscillating earth pressure observed by the cell No. 6

1) 並進変位の振幅 a は，水平合力 P の有無，大小にかかわらず1本の振動数特性で表わしうるとみなされる。I-5 を除いた位相角も力と変位とでは比較的近い値をとる。

2) 回転変位の振幅 φ は，合モーメント M の有

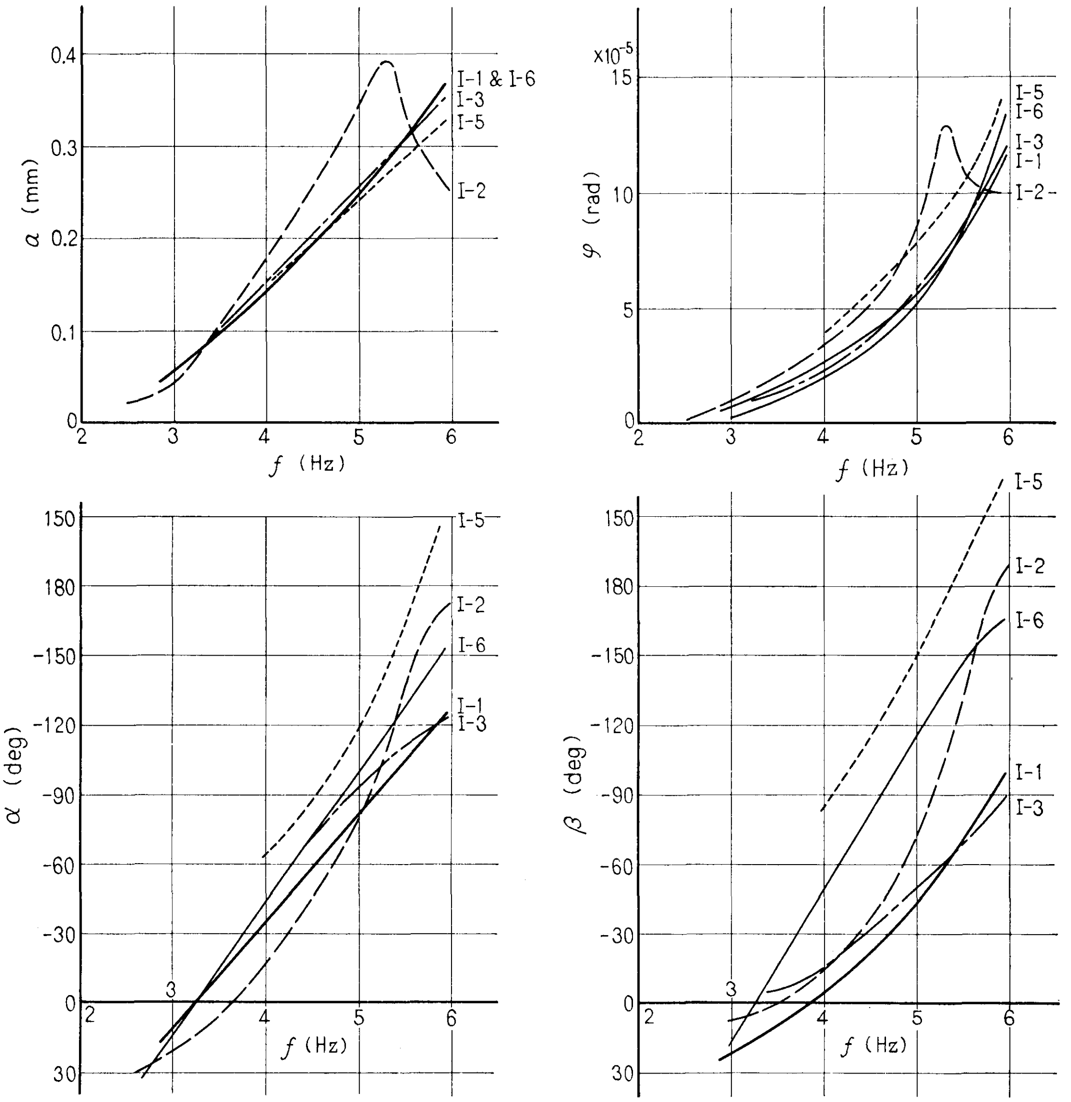


Fig. 24 Frequency responses of translational and rotational displacements of the wall

無，大小，および Toe 側の底面反力 p_T の大小にかかわらず１本の振動数特性で表わしうるとみなされる。しかし I-2 および I-3 のように φ にピークがあっても，それに対応する M の位置にピークがないもの，あるいはその逆の場合などが含まれている。位相角は β と γ_T は似た傾向を示すが，Θ_M のみは他と非常に異なった傾向を示している。

3）以上の２点を要約すると，外力およびそのモーメント P, p_T, M は実験の種類（I-1, I-2, I-3……など）によって極端に異なった値をとるが，それらが原因で起こる変位 a, φ は常に同じ値を示し，１本の振動数特性で表わされ，かつ a, φ ともに裏込めがない場合のもので代表される。すなわち，振幅だけを見ていると，あたかも力と変位の間には直接的な関係が無いかのように見える。

4）並進および回転変位の位相角 α と β は，互に平行移動すれば大体一致する。全体として $\alpha, \beta, \Theta_P, \gamma_T$ が同じ傾向で，Θ_M のみがいちじるしく異なった傾向を示す。ただし I-1 の実験のみは，Θ_P と Θ_M は振動数のいかんにかかわらずほぼ正確に逆相関係であ

る。

5) 裏込め部分に水を満たした実験 (I-5) では，位相遅れが一番大きく，この場合を除くと，α, β, γ_T ともに I-6 の実験が最も遅れが大きい。すなわち，並進および回転変位，Toe 側の底面反力の位相は，裏込めがない場合が一番遅れ，裏込めがある場合の方が遅れが小さい。

6) いま，簡単な底面基礎の力学モデルとして Fig. 25 を考え，Toe 側の底面反力 $\boldsymbol{p_T}$ を求める。$\boldsymbol{p_T}$ は上向きを正とすると

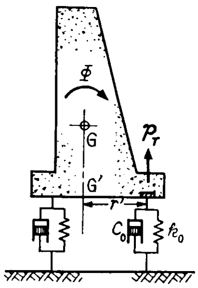


Fig. 25 Simple model of foundation of the wall

$$\boldsymbol{p_T}=p_T\cos(\omega t+\gamma_T)=r'(k_0\Phi+c_0\dot{\Phi})$$

となる。この式から明らかなように，γ_T は Φ の位相角 β よりも必然的に進まねばならない。しかるに実測値では γ_T が β より逆に遅れている。両者の位相角は，この振動数の範囲内では平行移動すれば一致し，その量は実験の種類によって異なるが，0°～40° の範囲である。

以上は I 群の実験結果を定性的にとらえたものである。II 群の実験は振動数の範囲も広く，実測点のばらつきもやや大きく包括的にとらえるのは難かしいが，部分的には以上に述べた事柄が当てはまるものもある。例えば，II-6 は上記 6) があてはまり，II-5 では x, Φ に明瞭な共振特性が表われても，その振動数に相当する $\boldsymbol{P}$, $\boldsymbol{M}$ の位置に何の変化も認められない。すなわち，ここでも力と変位との間の関係が薄い様子が見られる。

7.3 力の釣合い

剛体としての壁体に作用する力とモーメント，および壁体の変位が明らかになったので，振動中にこれらがどのようにして運動方程式を満足するかを調べよう。すでに 6.2 で述べたように底面に作用する力で解析に耐えるのは Toe 側のデータのみであり，Heel 側

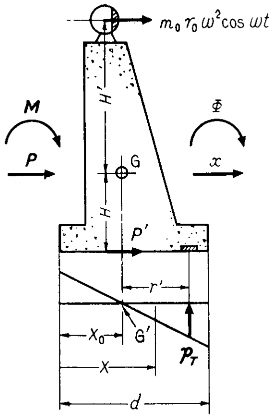


Fig. 26 Equilibrium of forces and moments

の力はこれから推定せざるをえない。振動中に底面反力を生じさせる原因は，壁体の回転変位と上下動であると考えられるが，実験で上下動は観測されなかった。このことを考慮して底面反力の分布を Fig. 26 に示すように，Toe 側の実測値 p_T と，壁重心直下の G' 点を結ぶ直線分布とし，Toe 側と Heel 側とでは逆位相であると仮定する。底面分布土圧によって生じる壁体の重心に関するモーメントを $\boldsymbol{M_b}$ とすると，$\boldsymbol{M_b}$ は Fig. 26 を参照して次のように求められる。

$$\boldsymbol{M_b}=-l\int_0^d \frac{\boldsymbol{p_T}}{r'}(X-X_0)^2 dX=-\frac{J_3}{r'}\boldsymbol{p_T}$$

ここで J_3 は壁底面の 2 次モーメントである。

壁体に作用する力とモーメント，および壁体の変位は Fig. 26 に示したようになり，壁体の運動方程式は次のように表わされる。

$$\left.\begin{aligned} m\ddot{x}&=\boldsymbol{P}+\boldsymbol{P'}+m_0r_0\omega^2\cos\omega t\\ I\ddot{\Phi}&=\boldsymbol{M}-H\boldsymbol{P'}-\frac{J_3}{r'}\boldsymbol{p_T}+H'm_0r_0\omega^2\cos\omega t\end{aligned}\right\}\quad(38)$$

ここで $\boldsymbol{P'}$ は壁体の底面に作用する水平力の合力を表わし，$\boldsymbol{P'}=P'\cos(\omega t+\Theta'_P)$ とする。Eq. (38) で I 群の実験では $m_0=0$ と置く。

壁体の底面に作用する水平方向の分布力は実測することがほとんど不可能である。したがって実験によって直接 $\boldsymbol{P'}$ を求めることができないので，Eq. (38) の第 1 式から逆算せざるをえない。I 群の実験について求めた P' と Θ'_P の値を Fig. 27 に示す。Θ'_P は α, Θ_P, γ_T と逆相に近い関係にある。また実験 I-6 の P' 曲線は，$m_0=0$ でかつ，裏込めのない実験であるから $\boldsymbol{P}=0$ の場合で，Eq. (38) から $m\ddot{x}=\boldsymbol{P'}$ としたときのものである。いっぽう x の振幅 a は 7.2, 1) で述

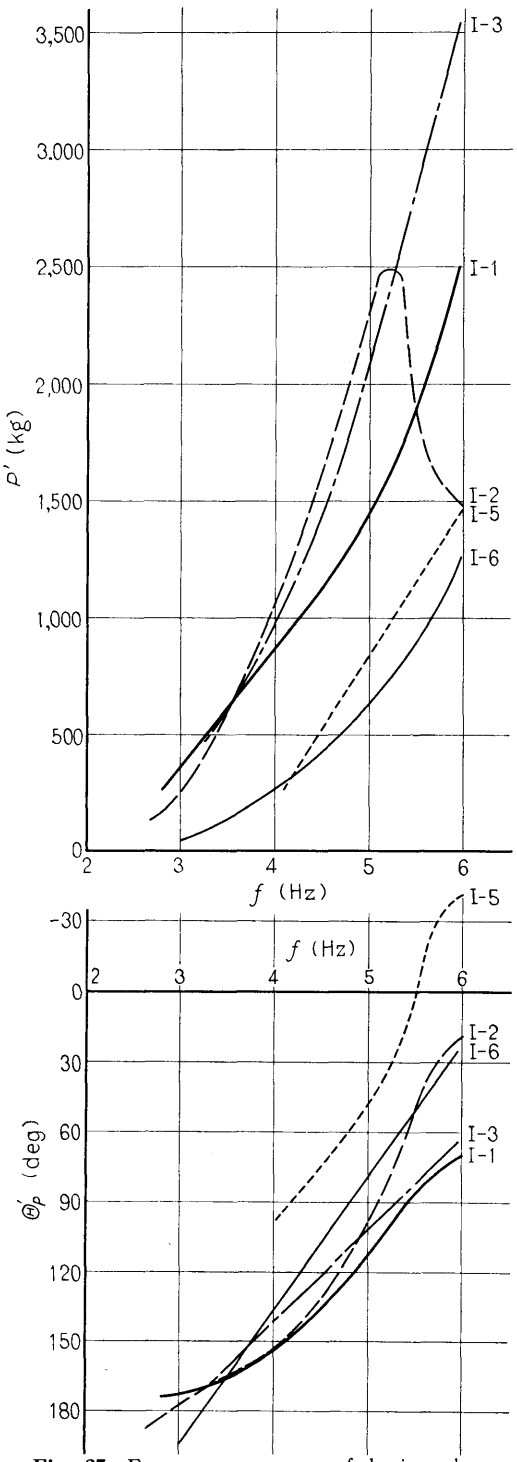


Fig. 27 Frequency responses of horizontal resultant forces acting on the bottom surface

べたようにすべての実験に共通と考えられるので，この曲線はすべての実験を通じて壁体に作用する慣性力を表わしていることになる。

$\boldsymbol{P}'$ が求まるとこの値を Eq. (38) の第2式に代入して左右辺がベクトルとして一致すれば，すべての実測値が運動方程式を満足したことになる。しかしこれは成功しなかった。そこで $\boldsymbol{p}_T$ の代りに $\boldsymbol{p}'_T\{=p'_T\cos(\omega t+\gamma'_T)\}$ とおきかえて，運動方程式を満足する $\boldsymbol{p}'_T$ を逆算し $\boldsymbol{p}_T$ と $\boldsymbol{p}'_T$ を比較して見ることとした。すなわち，運動方程式は

$$\left.\begin{aligned} m\ddot{x}&=\boldsymbol{P}+\boldsymbol{P}'+m_0r_0\omega^2\cos\omega t\\ I\ddot{\Phi}&=\boldsymbol{M}-H\boldsymbol{P}'-\frac{J_3}{r'}\boldsymbol{p}'_T+H'm_0r_0\omega^2\cos\omega t \end{aligned}\right\}\quad(39)$$

と書き改められる。Eq. (39) から求めた p'_T と γ'_T を Fig. 28 に示す。Fig. 28 と Fig. 23 を比較してみると次に列記する事柄に気付く。ここで Fig. 28 の縦軸は Fig. 23 の半分に縮めてあることに注意されたい。

1) 振動数の低い所では実測値がないので両者を比較することはできないが，振幅においても，位相角においても両者の間に強い近親性のあることが認められる。$\boldsymbol{p}'_T$ の計算には，$x, \Phi, \boldsymbol{p}$ の実測値に伴う誤差とばらつきが含まれていることを考えると，この計算結果のばらつきは非常に小さく，良好な結果であると言える。

2) まず振幅についてであるが，p_T と p'_T の傾向は良く一致し，振動数に対する分布形状も両者で大体一致する。$p'_T/p_T=\nu$ は大半のものは 1.6～2.7 の範囲内にあり，全部の平均は 2.1 である。

3) 両位相角の差 $\gamma'_T-\gamma_T=\varepsilon$ は，I-1 および I-6 では振動数のいかんにかかわらず約20°であり，他は10°以下であって誤差の範囲内で両者は一致するとみなされる。ただ I-1 と I-2 で 4 Hz 以下の γ'_T の値が急激に変化する。この点に対応する実測値がないので比べられないが，$\boldsymbol{M}$ の位相角 (Fig. 21 参照) がきいているようで，前述のようにやや疑問が残る。γ_T と γ'_T を全般的に比べると，γ'_T の方が進んでいる場合がほとんどである。また壁体の回転変位 Φ の位相角 β (Fig. 24 参照) とここでえた力の位相角 γ'_T を比べると，I-6 の場合だけ γ'_T が β より進んでいて，他は一致するか，あるいは 20°～30° 程度 γ'_T が遅れている。ここでも 7.2, 6) で述べた疑問がなお残っている。

以上はⅠ群の実験についてであるが，Ⅱ群の実験については

4) Ⅰ群の場合と比べて点のばらつきがやや大き

く，ν, ε ともに振動数に対して平坦になる場合は少なく，一般的にゆるやかな直線変化をする。その絶対値もＩ群の場合より大きく，$\nu=2\sim4$, $\varepsilon=\pm40°$ の範囲内に分布している。

5) Ⅱ-5 は γ'_T が γ_T より遅れるが，他はすべて γ'_T が進んでいる。γ'_T と β を比べるとほとんどのものは力の位相角の方が進んでいて，この場合は常識的に理解しやすい形となっている。

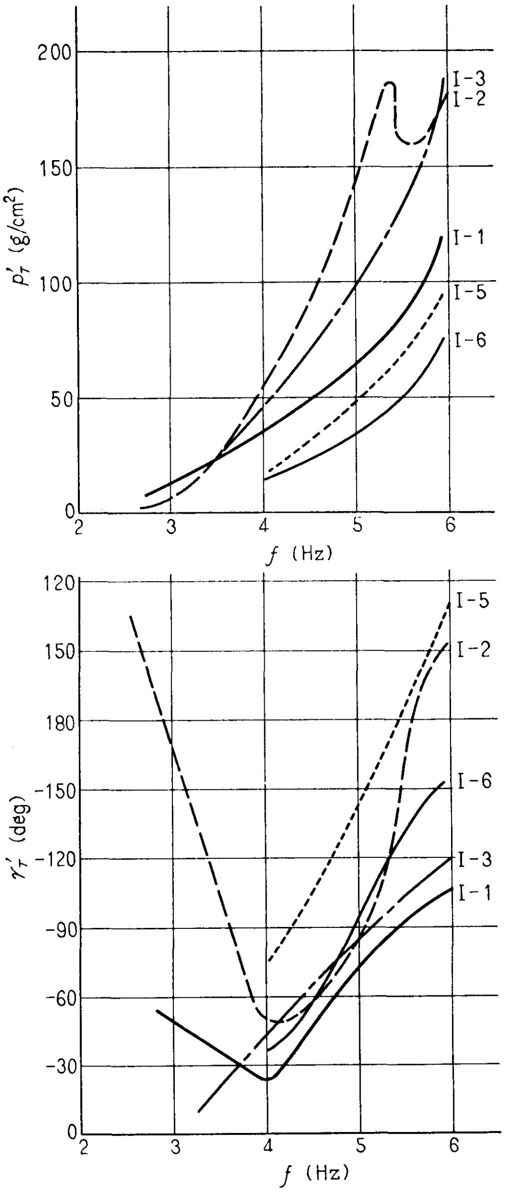


Fig. 28 Frequency responses of vertical oscillating earth pressure at the position of the cell No. 6, calculated by Eq. (39)

本節では運動方程式 Eq. (38) を満足させるためには，実測値 p_T の代りに p'_T を用いねばならず，p'_T は p_T と強い近親関係にあることがわかった。しからば p'_T と p_T は力学的にどのような関係にあるのであろうか？ 次節で両者の相互関係について考えてみよう。

7.4 底面に作用する振動土圧分布の決定

前節で底面の鉛直分布土圧を積分してそれによるモーメントを求めるとき，暗黙のうちに底面の２次元分布（壁体の長さ l の方向に）を仮定していた。いま土圧計 No. 6 の位置を通り壁体の l 方向の断面を考えると，Fig. 29 に示すように $p'_T>p_T$ と言う関係はすべての実験結果について成立するから，図示のように l の方向に上に凸の分布曲線を考えれば，実測値 p_T は分布力の最小値を測っていたことになり，p_T と p'_T との関係が無理なく理解される。すなわち，壁体の長さ方向に３次元分布を考え，この分布曲線によって囲まれる面積が，$p'_T\times l$（p'_T は長さ方向の各断面で異なっている）になるように曲線を定めれば，各断面における分布曲線の集まりが運動方程式を満足することになる。実際には振幅と同時に位相角の分布も考慮に入れなければならない。

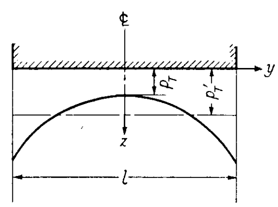


Fig. 29 Horizontal distribution of vertical oscillating earth pressure at the longitudinal section passing through the cell No. 6

Fig. 30 に示すように座標を定め，壁体の幅方向の断面における底面振動土圧の分布を前節と同様に直線分布とし，その中央断面における分布を $(X-X_0)\dfrac{p_T}{\gamma'}$ とする。また y 軸方向の分布形状については，すでに 5.1 で論じた方法の応用として二つの放物筒面の交線として表わすこととする。この場合ベクトルの回転軸は y 軸であり，任意の点における底面振動土圧を p_b とすると p_b は次式で表わされる。

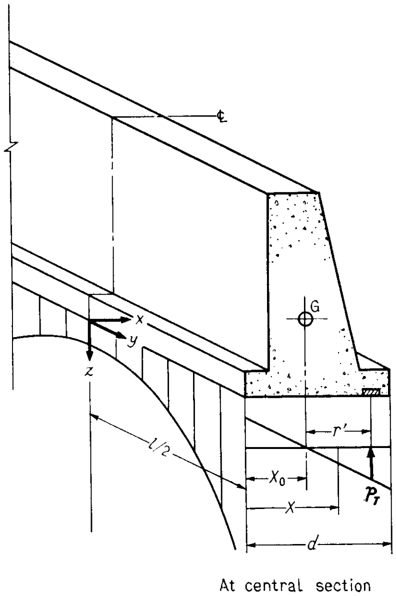


Fig. 30 Three dimentional distribution of vertical oscillating earth pressure acting on the bottom surface

$$\boldsymbol{p}_b=(X-X_0)\{(E_xy^2+N_x)\cos\omega t-(E_zy^2+N_z)\sin\omega t\}$$
$$=(X-X_0)\sqrt{(E_xy^2+N_x)^2+(E_zy^2+N_z)^2}\cos\left(\omega t\right.$$
$$\left.+\tan^{-1}\frac{E_zy^2+N_z}{E_xy^2+N_x}\right) \tag{40}$$

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 $\boldsymbol{p}_b=p_T\cos(\omega t+\gamma_T)$ と言う条件を入れると

$$\left.\begin{aligned} N_x&=\frac{p_T}{r'}\cos\gamma_T\\ N_z&=\frac{p_T}{r'}\sin\gamma_T \end{aligned}\right\} \tag{41}$$

底面分布土圧による合モーメント $\boldsymbol{M}_b$ は

$$-\boldsymbol{M}_b=\int_{-l/2}^{l/2}\int_0^d(X-X_0)\boldsymbol{p}_b dXdy$$
$$=\int_{-l/2}^{l/2}\int_0^d(X-X_0)^2(E_xy^2+N_x)\cos\omega t dXdy$$
$$-\int_{-l/2}^{l/2}\int_0^d(X-X_0)^2(E_zy^2+N_z)\sin\omega t dXdy$$
$$=J_3\left\{\left(\frac{E_xl^2}{12}+N_x\right)\cos\omega t-\left(\frac{E_zl^2}{12}+N_z\right)\sin\omega t\right\}$$

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。

$$J_3\left\{\left(\frac{E_xl^2}{12}+N_x\right)\cos\omega t-\left(\frac{E_zl^2}{12}+N_z\right)\sin\omega t\right\}$$
$$=\frac{J_3}{r'}\boldsymbol{p}'_T=\frac{J_3}{r'}\nu p_T\cos(\omega t+\gamma_T+\varepsilon)$$

この式から

$$\left.\begin{aligned} E_x&=\frac{12}{l^2}\frac{p_T}{r'}\{\nu\cos(\gamma_T+\varepsilon)-\cos\gamma_T\}\\ E_z&=\frac{12}{l^2}\frac{p_T}{r'}\{\nu\sin(\gamma_T+\varepsilon)-\sin\gamma_T\} \end{aligned}\right\} \tag{42}$$

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。

$$\left.\begin{aligned} &m\ddot{x}=\boldsymbol{P}+\boldsymbol{P}'+m_0r_0\omega^2\cos\omega t\\ &I\ddot{\Phi}=\boldsymbol{M}-H\boldsymbol{P}'\\ &\quad-\int_{-l/2}^{l/2}\int_0^d(X-X_0)\boldsymbol{p}_b dXdy\\ &\quad+H'm_0r_0\omega^2\cos\omega t\\ &\boldsymbol{p}_b=(X-X_0)\{(E_xy^2+N_x)\cos\omega t\\ &\quad-(E_zy^2+N_z)\sin\omega t\} \end{aligned}\right\} \tag{43}$$

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

$$\boldsymbol{p}_b=(X-X_0)\frac{p_T}{r'}\sqrt{1+\frac{24}{l^2}(\nu\cos\varepsilon-1)y^2+\left(\frac{12}{l^2}\right)^2(\nu^2+1-2\nu\cos\varepsilon)y^4}$$
$$\times\cos\left\{\omega t+\gamma_T+\tan^{-1}\frac{\frac{12}{l^2}\nu\sin\varepsilon\cdot y^2}{1+\frac{12}{l^2}(\nu\cos\varepsilon-1)y^2}\right\} \tag{44}$$

をえる。この式は p_T, γ_T がくくり出されているので，ε=const., ν=const. の場合の計算に適している。この場合は振動数のいかんにかかわ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 γ_T が振動数に

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 ε, ν 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，$\nu=1.9$,

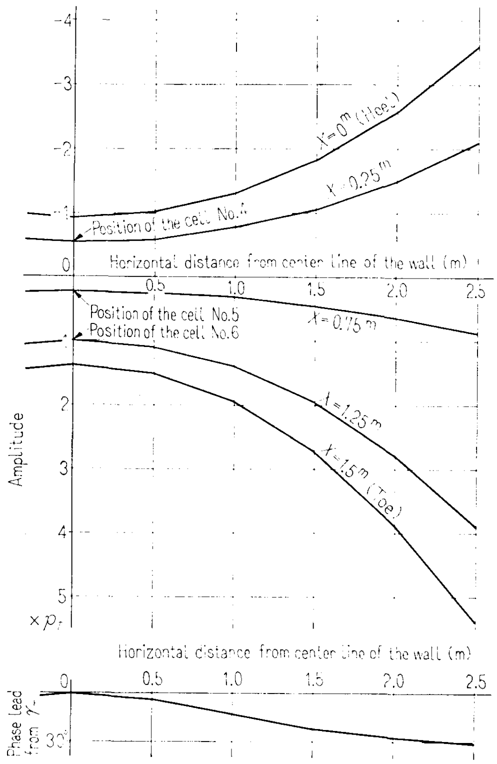


Fig. 31 Horizontal distributions of oscillating earth pressure acting on several longitudinal sections of the bottom surface, calculated by Eq. (44)

$\varepsilon=21°$ 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° に満たないことがわかる。また $\varepsilon=42°$ の他の例では，10° 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，ν 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み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 Φ 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 φ 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 $-90°$ 付近の値を持っている。このことから壁体は x と Φ の連成振動を行っていることがわかる。

壁体が x と Φ 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わす。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。

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

$$2V = k_2 l\int_0^a \{(X - X_0)\Phi\}^2 dX + k_1 l\int_0^a (x - H\Phi)^2 dX$$

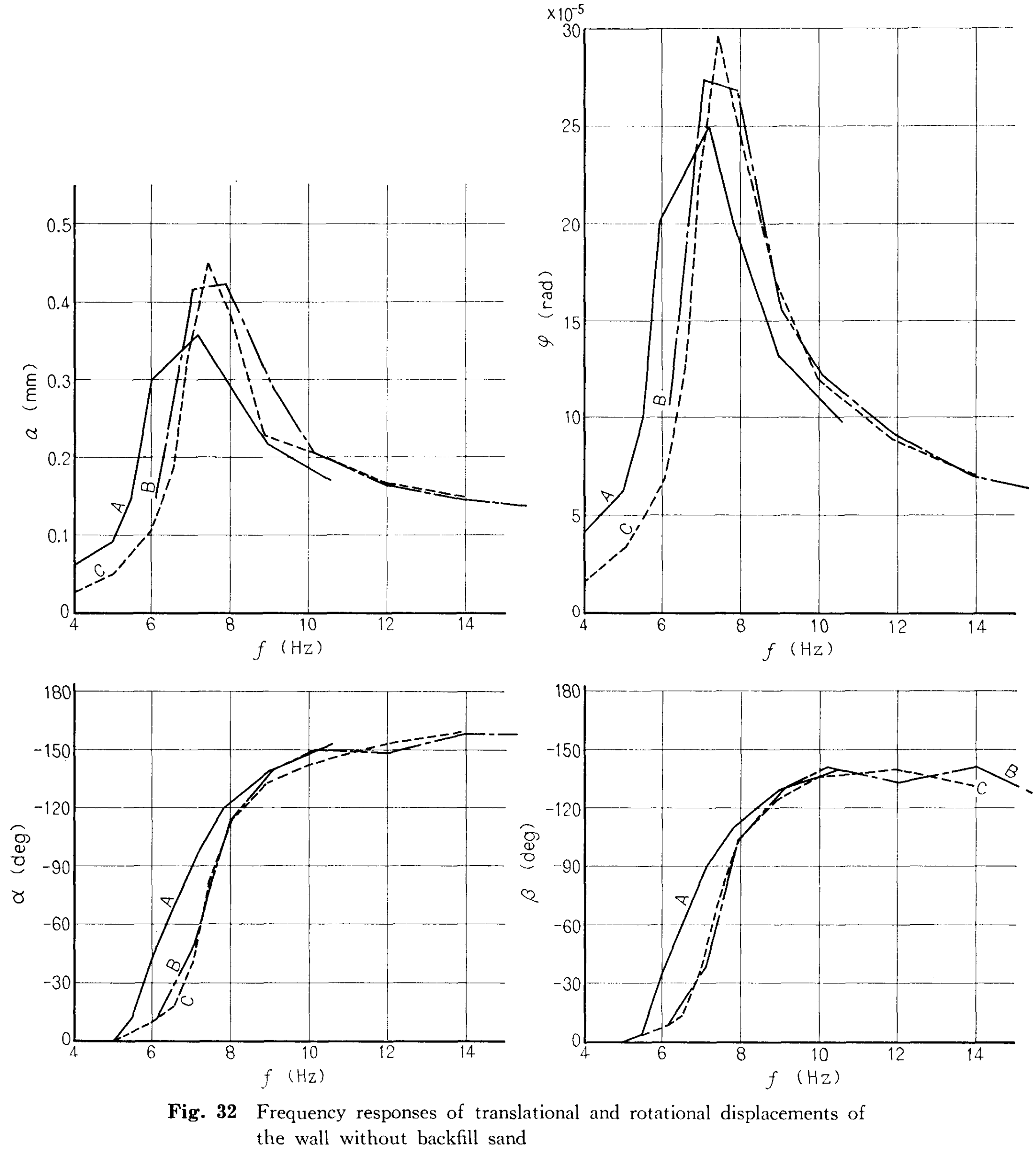


Fig. 32 Frequency responses of translational and rotational displacements of the wall without backfill sand

$$=k_2J_3\Phi^2+k_1dl(x-H\Phi)^2$$

$$2D=c_2l\int_0^d\{(X-X_0)\dot{\Phi}\}^2dX+c_1l\int_0^d(\dot{x}-H\dot{\Phi})^2dX$$

$$=c_2J_3\dot{\Phi}^2+c_1dl(\dot{x}-H\dot{\Phi})^2$$

ここで

$$\left.\begin{array}{ll} k_2J_3=k_\varphi & k_1dl=k_x \\ c_2J_3=c_\varphi & c_1dl=c_x \end{array}\right\} \quad (45)$$

とおいてラグランジュの運動方程式に代入すると

$$\left.\begin{array}{l} m\ddot{x}+c_x(\dot{x}-H\dot{\Phi})+k_x(x-H\Phi)=m_0r_0\omega^2\cos\omega t \\ I\ddot{\Phi}+c_\varphi\dot{\Phi}-Hc_x(\dot{x}-H\dot{\Phi})+k_\varphi\Phi-Hk_x(x-H\Phi) \\ \quad =H'm_0r_0\omega^2\cos\omega t \end{array}\right\} \quad (46)$$

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 Φ 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 Φ 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

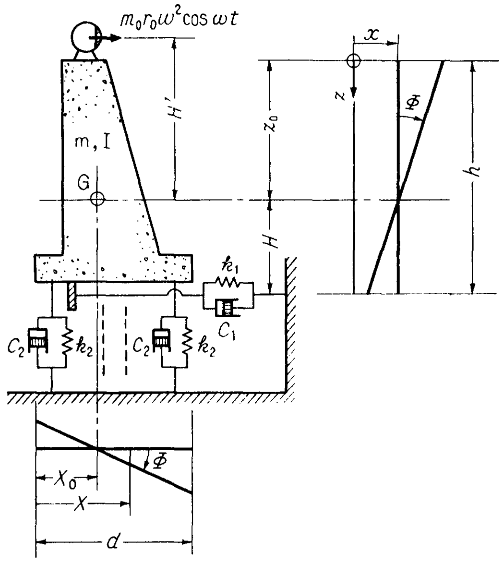


Fig. 33 Mechanical model of the wall without backfill sand

$$\left.\begin{array}{l} c_\varphi=\dfrac{\omega}{\varphi}\{mHa\sin(\alpha-\beta)-(H+H')m_0r_0\sin\beta\} \\ k_\varphi=\dfrac{\omega^2}{\varphi}\{I\varphi+mHa\cos(\alpha-\beta)+(H+H')m_0r_0\cos\beta\} \\ c_x=\dfrac{-\omega\{maH\varphi\sin(\alpha-\beta)+m_0r_0(a\sin\alpha-H\varphi\sin\beta)\}}{(a\sin\alpha-H\varphi\sin\beta)^2+(a\cos\alpha-H\varphi\cos\beta)^2} \\ k_x=\dfrac{\omega^2[ma\{a-H\varphi\cos(\alpha-\beta)\}+m_0r_0(a\cos\alpha-H\varphi\cos\beta)]}{(a\sin\alpha-H\varphi\sin\beta)^2+(a\cos\alpha-H\varphi\cos\beta)^2} \end{array}\right\} \quad (47)$$

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

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

とおくと

$$\left.\begin{array}{l} \omega_{\mathrm{I}\cdot\mathrm{II}}^2=\dfrac{1}{2}\{(\omega_x^2+\omega_\varphi^2)\mp\sqrt{(\omega_x^2-\omega_\varphi^2)^2+4\omega_x^4\kappa^2}\} \\ f_{\mathrm{I}}=\dfrac{\omega_{\mathrm{I}}}{2\pi} \\ f_{\mathrm{II}}=\dfrac{\omega_{\mathrm{II}}}{2\pi} \end{array}\right\}$$

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 $m_0r_0=0.168\,\mathrm{kg\cdot sec^2}$ を用いて，$c_\varphi, k_\varphi, c_x, k_x$ および $f_{\mathrm{I}}, f_{\mathrm{II}}$ 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_φ 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_φ 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言う性質は今まで知られていないことだと思う。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

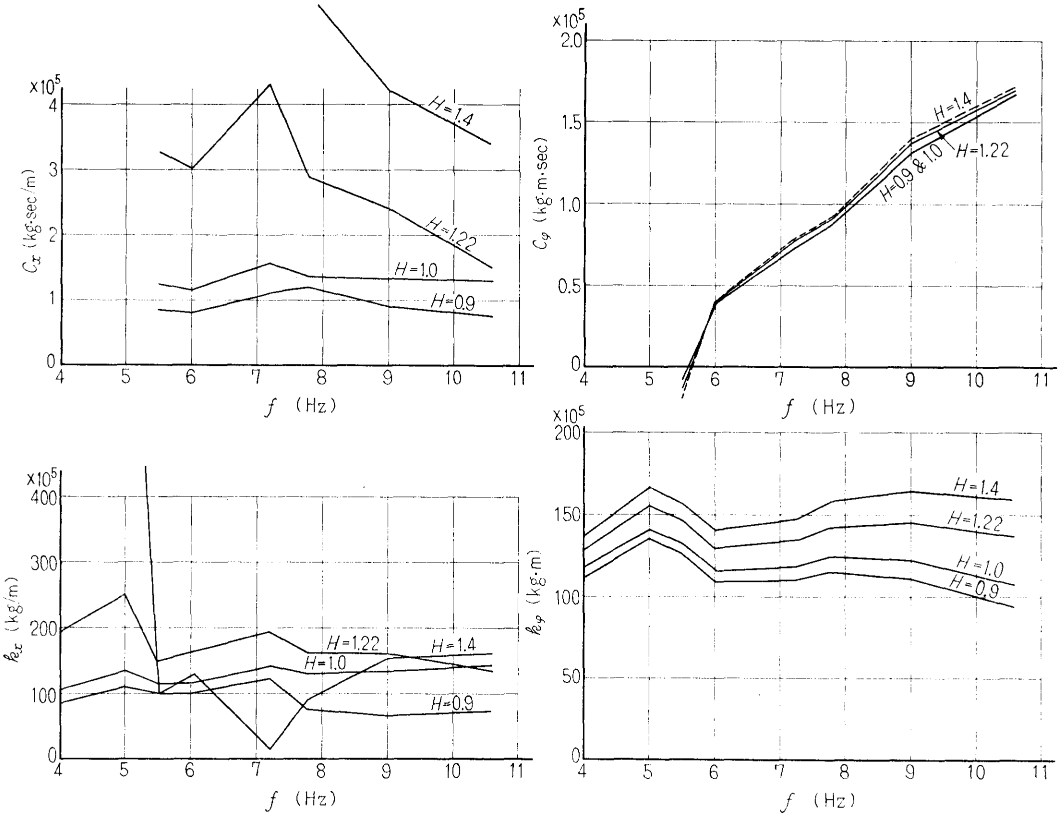


Fig. 34 Frequency responses of four mechanical constants, H being parameter

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 p'_T 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 $P=0, M=0$ とおいて Eq. (46) と比較して

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

$$c_\varphi\dot{\Phi}+k_\varphi\Phi=\frac{J_3}{r'}p'_T$$

をえる。第 2 式の左辺に上で求めた c_φ, k_φ および実験 II-6 の実測値 Φ を代入して，すでに求まっている p'_T 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	1.34×10^5	1.21×10^5	1.10×10^5	1.2×10^5
c_φ	kg·m·sec	$0.294\times10^5(f-4.7)$	$0.39\times10^5(f-6.4)$	$0.31\times10^5(f-5.4)$	$0.33\times10^5(f-5.5)$
k_x	kg/m	127×10^5	152×10^5	157×10^5	150×10^5
k_φ	kg·m	122×10^5	144×10^5	152×10^5	140×10^5
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，その回転変位を考え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 $\boldsymbol{P}$ または $\boldsymbol{M}$ 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

$$\left.\begin{aligned} &m\ddot{x}=\boldsymbol{P}+\boldsymbol{P}'+m_0r_0\omega^2\cos\omega t \\ &I\ddot{\Phi}=\boldsymbol{M}-H\boldsymbol{P}'-\frac{J_3}{r'}\boldsymbol{p}'_T+H'm_0r_0\omega^2\cos\omega t \end{aligned}\right\} \quad (39)$$

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。

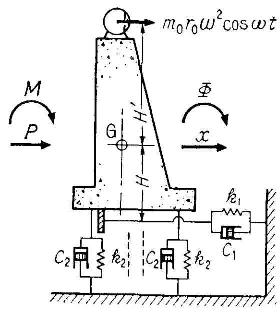


Fig. 35 Mechanical model of the wall with backfill sand

$$\left.\begin{aligned} &m\ddot{x}+c_x(\dot{x}-H\dot{\Phi})+k_x(x-H\Phi) \\ &\quad=\boldsymbol{P}+m_0r_0\omega^2\cos\omega t \\ &I\ddot{\Phi}+c_\varphi\dot{\Phi}-Hc_x(\dot{x}-H\dot{\Phi})+k_\varphi\Phi-Hk_x(x-H\Phi) \\ &\quad=\boldsymbol{M}+H'm_0r_0\omega^2\cos\omega t \end{aligned}\right\} \quad (48)$$

Eq. (39)，Eq. (48) 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。

$$\left.\begin{aligned} &-\boldsymbol{P}'=c_x(\dot{x}-H\dot{\Phi})+k_x(x-H\Phi) \\ &\frac{J_3}{r'}\boldsymbol{p}'_T=c_\varphi\dot{\Phi}+k_\varphi\Phi \end{aligned}\right\} \quad (49)$$

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, Φ はそれ自身が全部バネの伸縮と考えてきた。次に変位 x, Φ 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，Φ_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, Φ_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 Φ を，x_r および Φ_r に書き改めたものとなる。すなわち

$$\left.\begin{aligned} &m\ddot{x}+c_x(\dot{x}_r-H\dot{\Phi}_r)+k_x(x_r-H\Phi_r) \\ &\quad=\boldsymbol{P}+m_0r_0\omega^2\cos\omega t \\ &I\ddot{\Phi}+c_\varphi\dot{\Phi}_r-Hc_x(\dot{x}_r-H\dot{\Phi}_r)+k_\varphi\Phi_r \\ &\quad-Hk_x(x_r-H\Phi_r)=\boldsymbol{M}+H'm_0r_0\omega^2\cos\omega t \end{aligned}\right\} \quad (51)$$

Eq. (39) と Eq. (51) を比較して

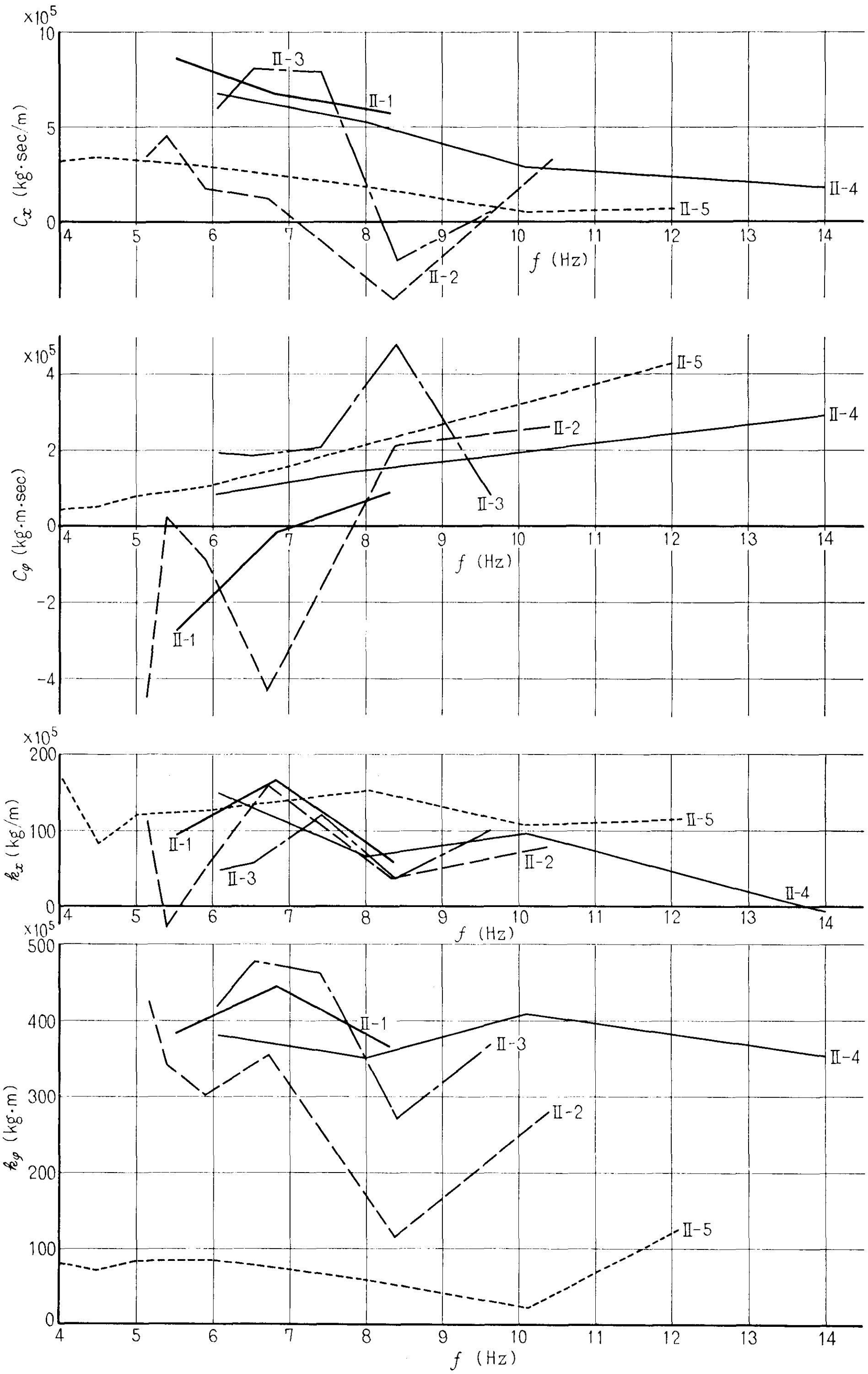


Fig. 36 Frequency responses of four mechanical constants in group II of experiment

$$\left.\begin{aligned} -\boldsymbol{P}' &= c_x(\dot{x}_r - H\dot{\Phi}_r) + k_x(x_r - H\Phi_r) \\ \frac{J_3}{r'}\boldsymbol{p}'_T &= c_\varphi\dot{\Phi}_r + k_\varphi\Phi_r \end{aligned}\right\} \qquad (52)$$

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 $\boldsymbol{p}'_T$ の位相角 γ'_T が Φ の位相角 β より 20°～30° 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 $\boldsymbol{p}'_T$ の位相角が Φ 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_φ, k_x, k_φ について解き，これに x, Φ 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かしい。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

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

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, Φ_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 $\alpha_r \fallingdotseq \beta_r$ が成り立つ。

2) さらにII群の実験では $\alpha_0 \fallingdotseq \beta_0$ 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 Φ_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 Φ_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

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

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 $s_1 \fallingdotseq s_2$ 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

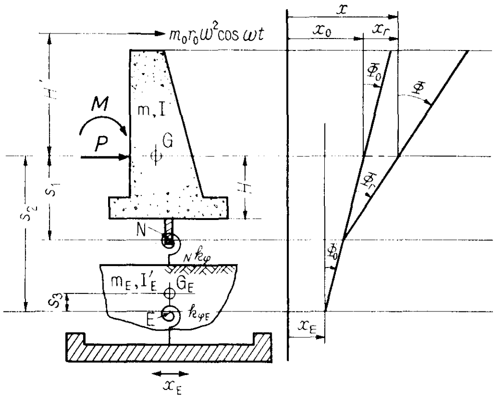


Fig. 37 Mechanical model of the wall and foundation soil

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

$$x_0 = x_E + s_2\Phi_0 \tag{55}$$

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

$$\begin{aligned}2T&=m\{s_1\dot{\Phi}+(s_2-s_1)\dot{\Phi}_0+\dot{x}_E\}^2+I\dot{\Phi}^2\\&\quad+m_E(\dot{x}_E+s_3\dot{\Phi}_0)^2+I'_E\dot{\Phi}_0{}^2\\2V&={}_Nk_\varphi(\Phi-\Phi_0)^2+k_{\varphi E}\Phi_0{}^2\\2D&={}_Nc_\varphi(\dot{\Phi}-\dot{\Phi}_0)^2+c_{\varphi E}\dot{\Phi}_0{}^2\end{aligned}$$

Φ と Φ_0 を一般座標とみて，ラグランヂュの運動方程式に代入すると

$$\begin{aligned}&ms_1\{s_1\ddot{\Phi}+(s_2-s_1)\ddot{\Phi}_0+\ddot{x}_E\}+I\ddot{\Phi}+{}_Nc_\varphi(\dot{\Phi}-\dot{\Phi}_0)\\&\quad+{}_Nk_\varphi(\Phi-\Phi_0)=\boldsymbol{M}+s_1\boldsymbol{P}+(H'+s_1)m_0r_0\omega^2\cos\omega t\\&m(s_2-s_1)\{s_1\ddot{\Phi}+(s_2-s_1)\ddot{\Phi}_0+\ddot{x}_E\}+m_Es_3(\ddot{x}_E+s_3\ddot{\Phi}_0)\\&\quad+I'_E\ddot{\Phi}_0-{}_Nk_\varphi(\Phi-\Phi_0)+k_{\varphi E}\Phi_0-{}_Nc_\varphi(\dot{\Phi}-\dot{\Phi}_0)\\&\quad+c_{\varphi E}\dot{\Phi}_0=(s_2-s_1)(\boldsymbol{P}+m_0r_0\omega^2\cos\omega t)\end{aligned}$$

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。

$$\left.\begin{aligned}&ms_1\ddot{x}+I\ddot{\Phi}+{}_Nc_\varphi\dot{\Phi}_r+{}_Nk_\varphi\Phi_r\\&\quad=\boldsymbol{M}+s_1\boldsymbol{P}+(H'+s_1)m_0r_0\omega^2\cos\omega t\\&ms_2\ddot{x}+I\ddot{\Phi}+I_E\ddot{\Phi}_0+c_{\varphi E}\dot{\Phi}_0+k_{\varphi E}\Phi_0=-m_Es_3\ddot{x}_E\\&\quad+\boldsymbol{M}+s_2\boldsymbol{P}+(H'+s_2)m_0r_0\omega^2\cos\omega t\end{aligned}\right\}\tag{56}$$

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 $I_E=I'_E+m_Es_3{}^2$ 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

$$_Nc_\varphi=c_\varphi+c_x(s_1-H)^2$$
$$_Nk_\varphi=k_\varphi+k_x(s_1-H)^2$$

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まれば，Fig. 37 が求める底面の力学モデルであると言いうる。

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いため適当な仮定——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-Ⓑ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，などの欠点をもっている。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。

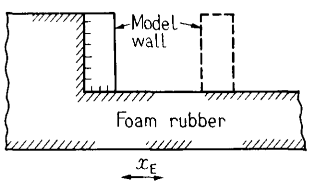


Fig. 38 Interaction between elastic medium and rigid wall

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ふり返えってみても，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，まさに今日言うディ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る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えることになった。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充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，はるかに遠くて

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わ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るなら，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登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 2nd 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 γ を z に対してプロットしたものである。

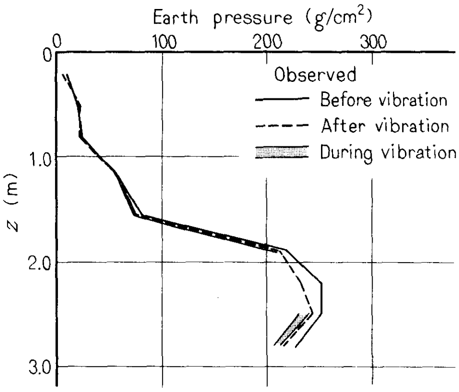
④：p_y $(=p\sin\gamma)$ を z に対してプロットしたもので，振動土圧の分布を表わす空間曲線 L_p の，yz 平面への投影曲線を表わしている。

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 γ，底面土圧計 No. 6 の実測値 p_T と γ_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，λ（基本波の値）が，振動数 f とともに示されている。

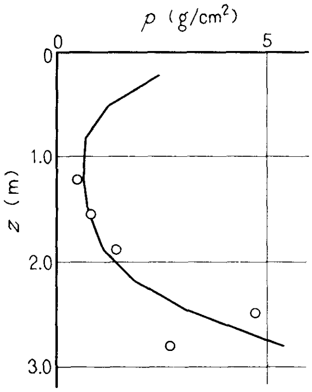
I-1-2.81



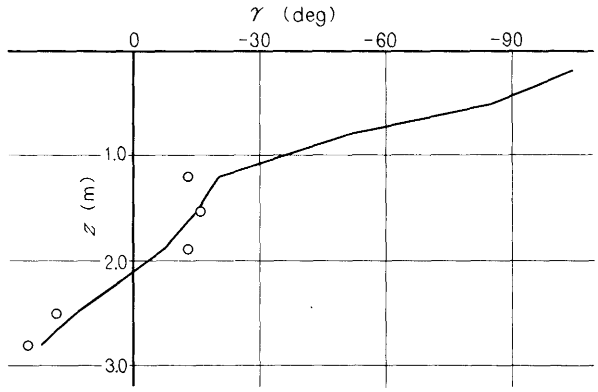
①

z m	p g/cm²	γ deg
0.21	—	—
0.51	—	—
0.81	—	—
1.21	0.5	−13
1.54	0.8	−16
1.89	1.4	−13
2.20	—	—

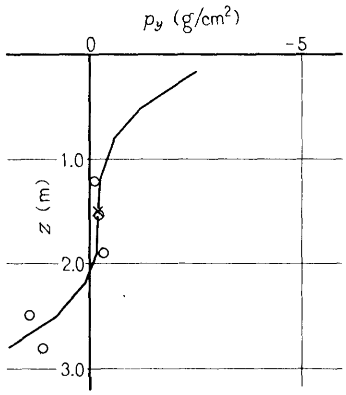
z m	p g/cm²	γ deg
2.49	4.7	18
2.80	2.7	25
Bottom (No.6)	—	—
z m	**D mm**	**λ deg**
0	0.0412	15
2.16	0.0309	16
f =	2.81	Hz



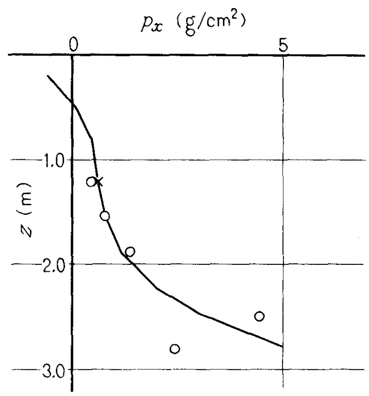
②



③



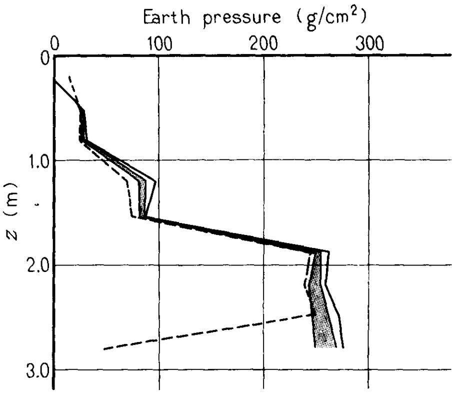
④



⑤

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

I-1-3.98

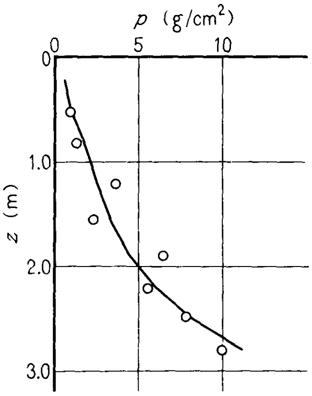


①

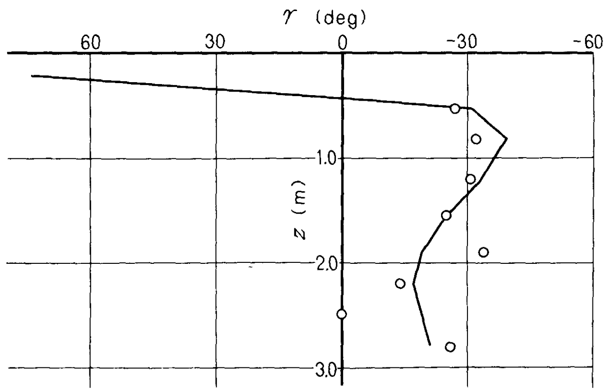
z m	p g/cm²	γ deg
0.21	—	—
0.51	0.9	−27
0.81	1.3	−32
1.21	3.6	−31
1.54	2.3	−25
1.89	6.4	−34
2.20	5.6	−14

z m	p g/cm²	γ deg
2.49	7.8	+0
2.80	10.0	−26
Bottom (No.6)	—	—

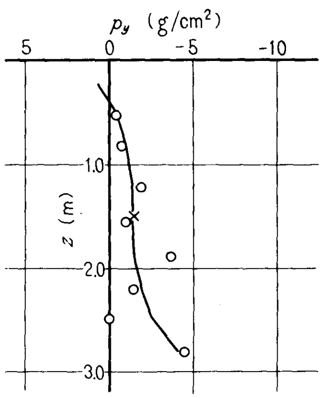
z m	D mm	λ deg
0	0.223	−25
2.16	0.162	−30
f =	3.98	Hz



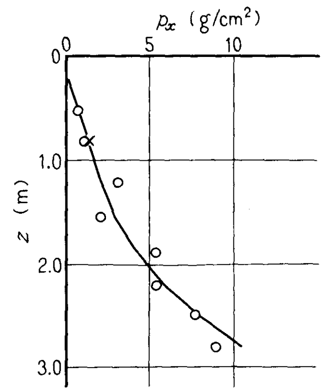
②



③



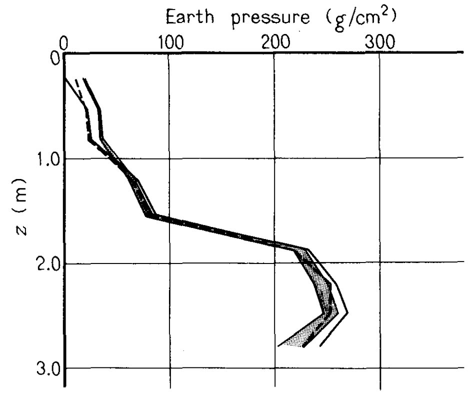
④



⑤

Fig. 39-(2)

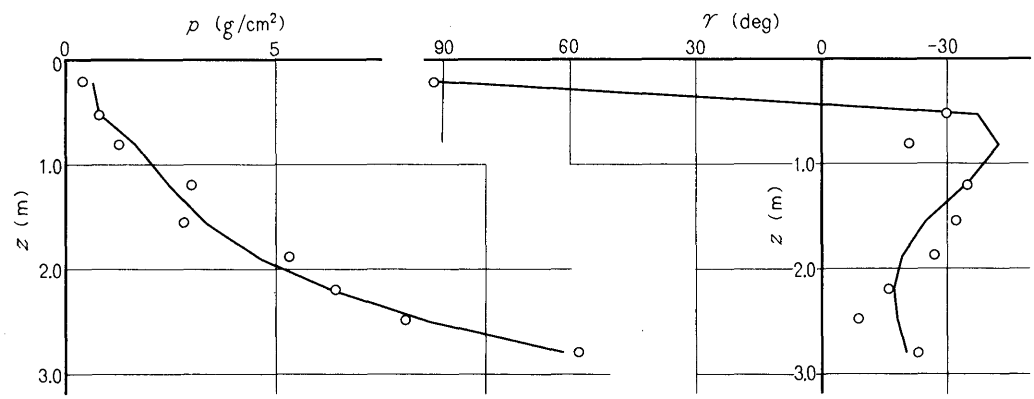
I-1-4.06



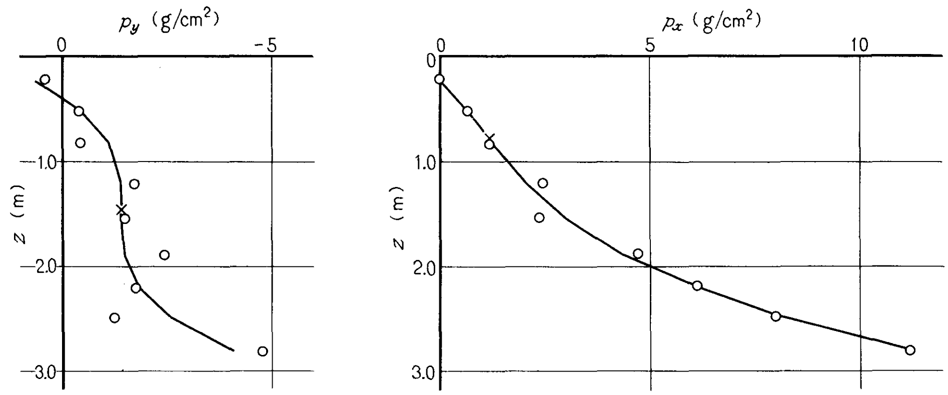
①

z m \	p g/cm²	γ 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/cm²	γ deg
2.49	8.1	−9
2.80	12.2	−23
Bottom (No.6)	——	——
z m \	D mm	λ deg
0	0.263	−24
2.16	0.192	−29
f =	4.06	Hz



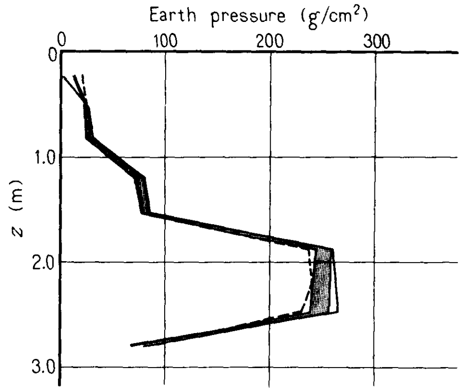
② ③



④ ⑤

Fig. 39-(3)

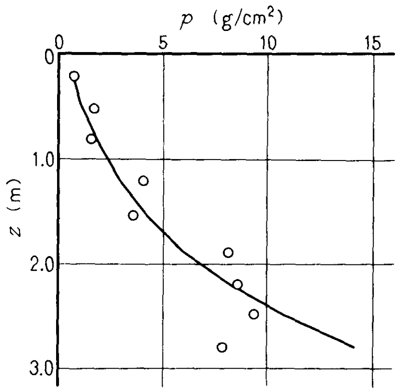
I-1-4.78



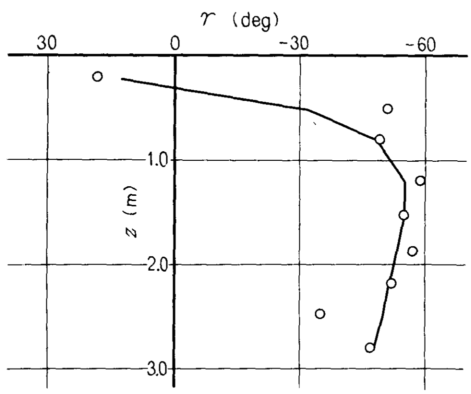
①

z m	p g/cm²	γ deg
0.21	0.7	18
0.51	1.6	−51
0.81	1.6	−49
1.21	4.0	−59
1.54	3.6	−55
1.89	8.1	−57
2.20	8.5	−52

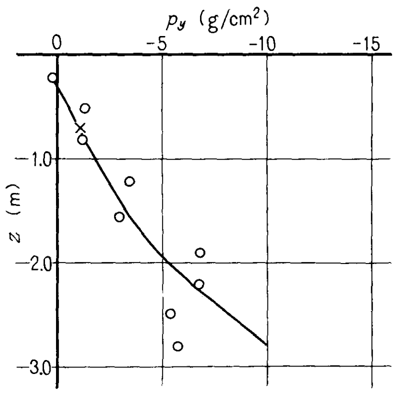
z m	p g/cm²	γ deg
2.49	9.3	−35
2.80	7.8	−47
Bottom (No.6)	33.8	−77
z m	**D mm**	**λ deg**
0	0.295	−75
2.16	0.209	−84
$f=$ 4.78 Hz		



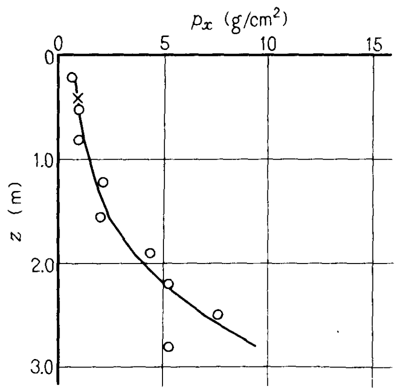
②



③



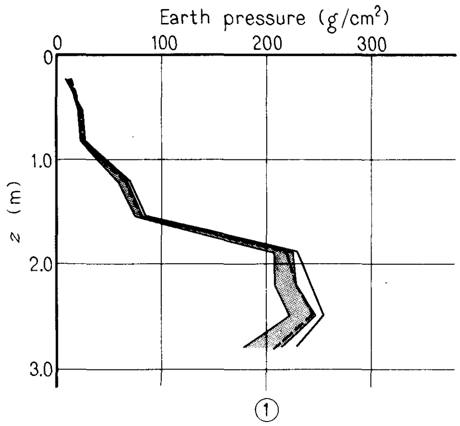
④



⑤

Fig. 39-(4)

I-1-4.93



z m	p g/cm²	γ 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/cm²	γ deg
2.49	11.1	−44
2.80	17.8	−44
Bottom (No.6)	33.4	−78
z m	**D mm**	**λ deg**
0	0.320	−60
2.16	0.225	−71
f =	4.93	Hz

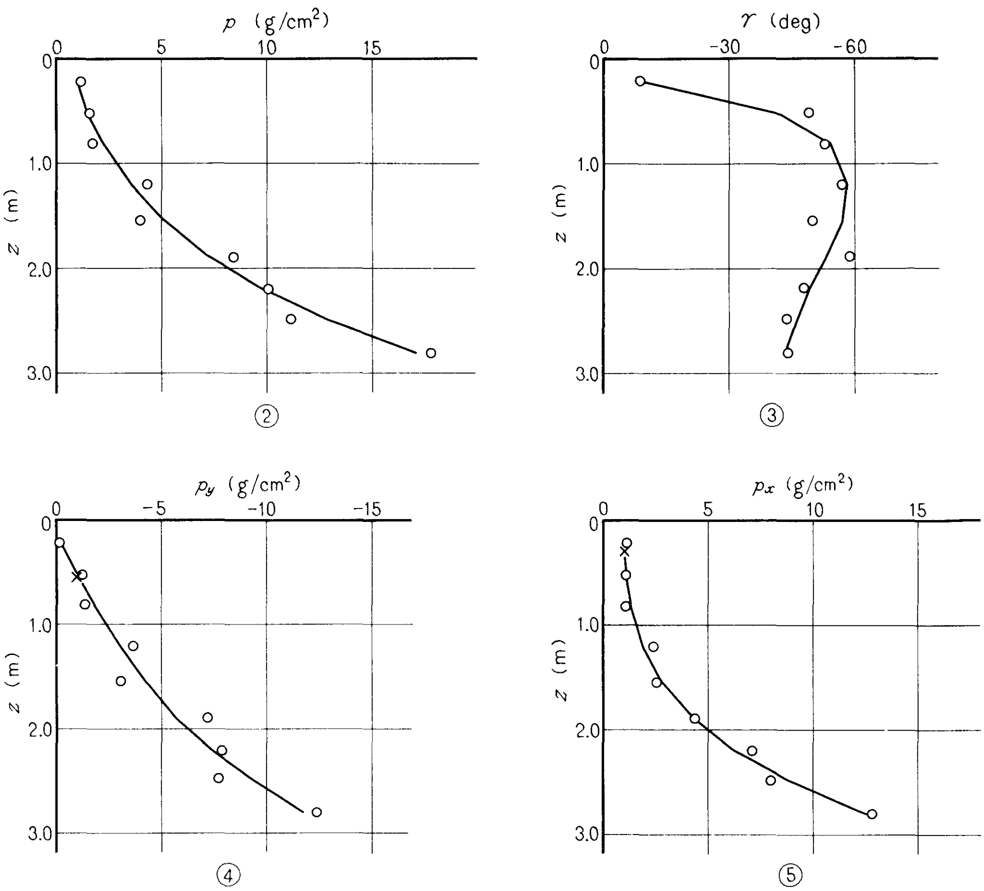
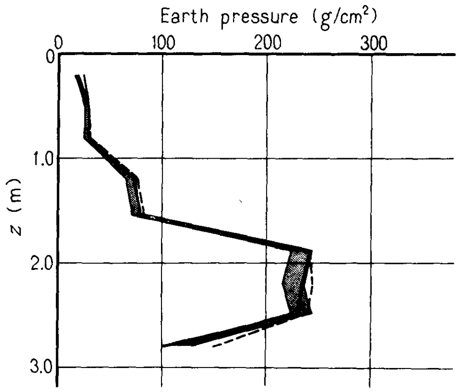


Fig. 39-(5)

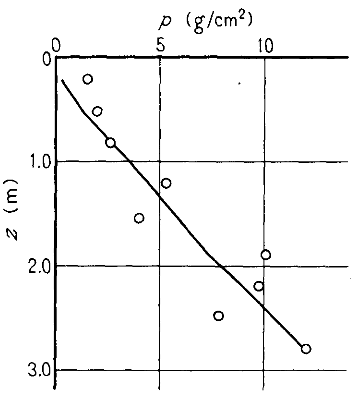
I-1-5.39



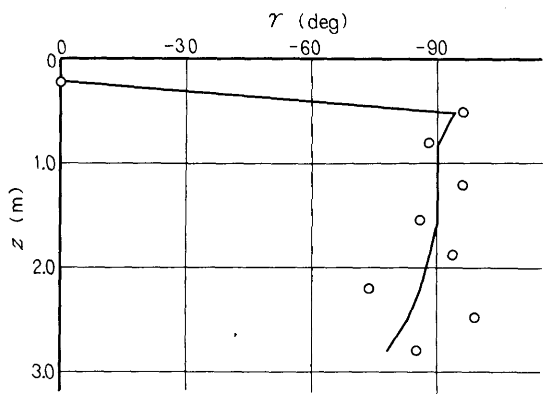
①

z m	p g/cm²	γ 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

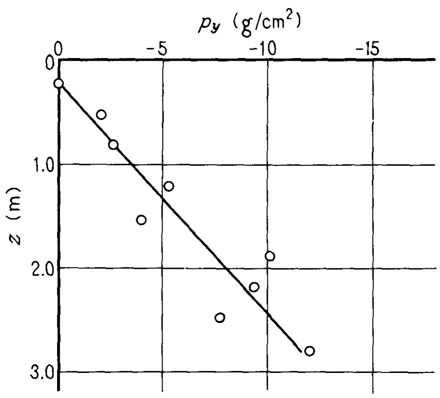
z m	p g/cm²	γ deg
2.49	7.8	−99
2.80	12.0	−85
Bottom (No.6)	37.1	−116
z m	D mm	λ deg
0	0.376	− 96
2.16	0.246	−109
f =	5.39	Hz



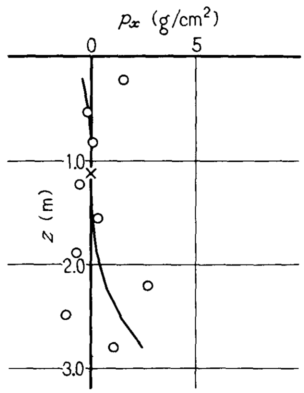
②



③



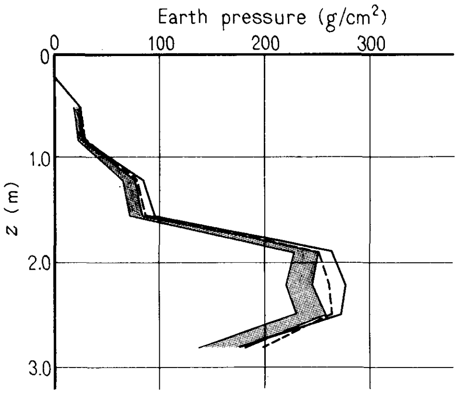
④



⑤

Fig. 39-(6)

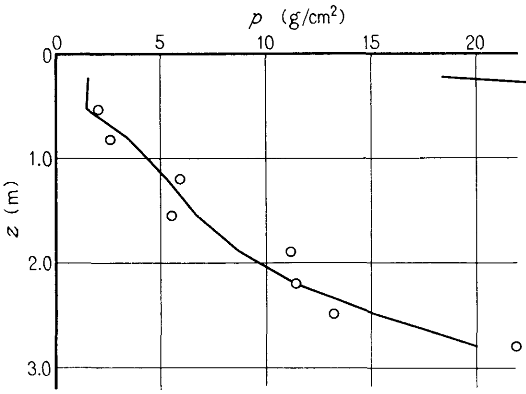
I-1-5.68



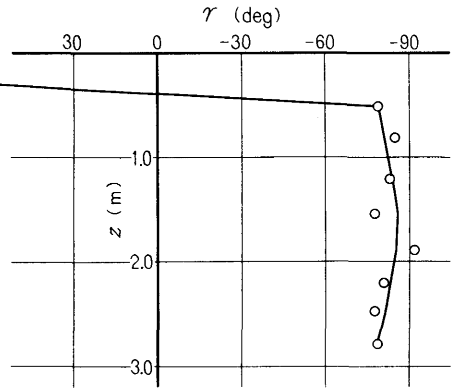
①

z m	p g/cm²	γ 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

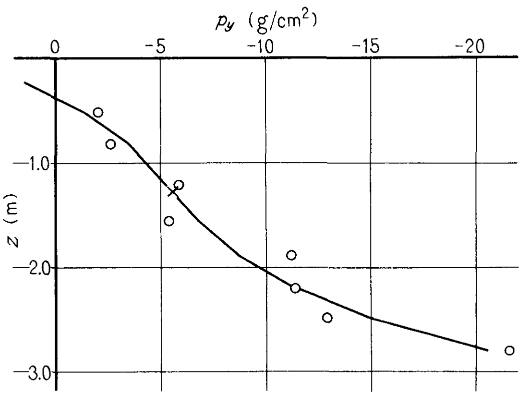
z m	p g/cm²	γ deg
2.49	13.2	−78
2.80	21.9	−79
Bottom (No.6)	61.8	−120
z m	D mm	λ deg
0	0.542	−100
2.16	0.321	−116
f =	5.68	Hz



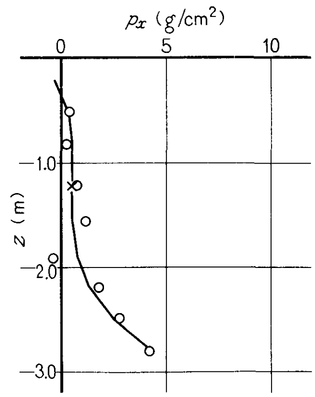
②



③



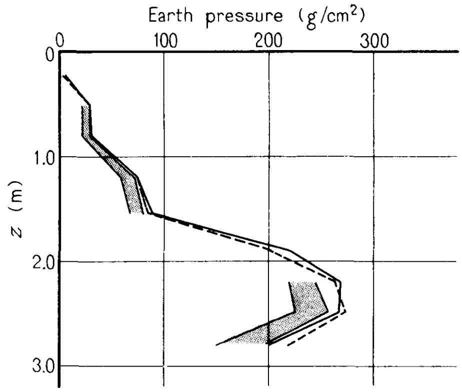
④



⑤

Fig. 39-(7)

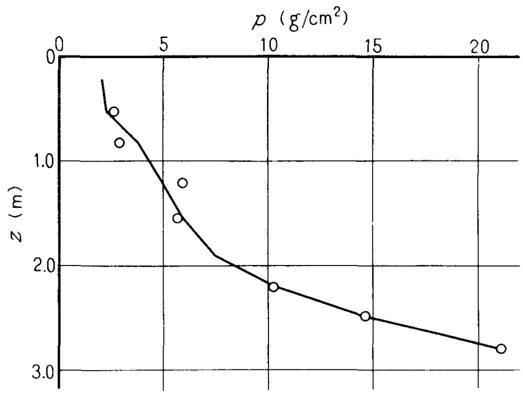
I-1-5.86



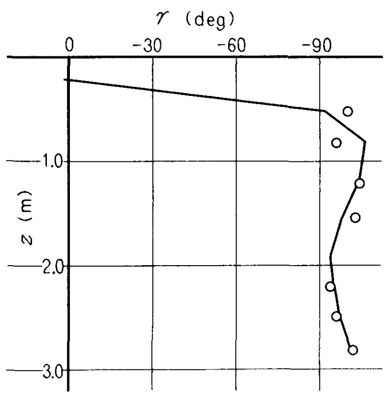
①

z m	p g/cm²	γ deg
0.21	—	—
0.51	2.6	−100
0.81	2.9	−96
1.21	5.9	−104
1.54	5.6	−103
1.89	—	—
2.20	10.2	−94

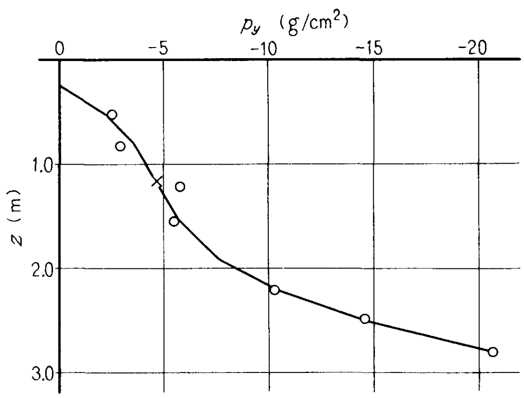
z m	p g/cm²	γ deg
2.49	14.6	−96
2.80	21.1	−102
Bottom (No.6)	63.2	−131
z m	**D mm**	**λ deg**
0	0.500	−114
2.16	0.313	−127
f =	5.86	Hz



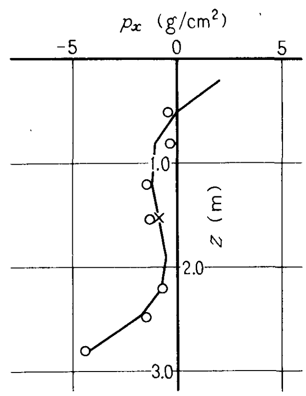
②



③



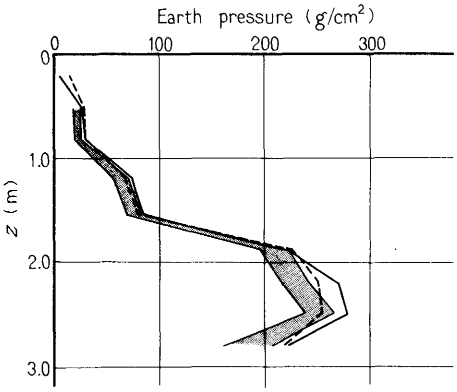
④



⑤

Fig. 39-(8)

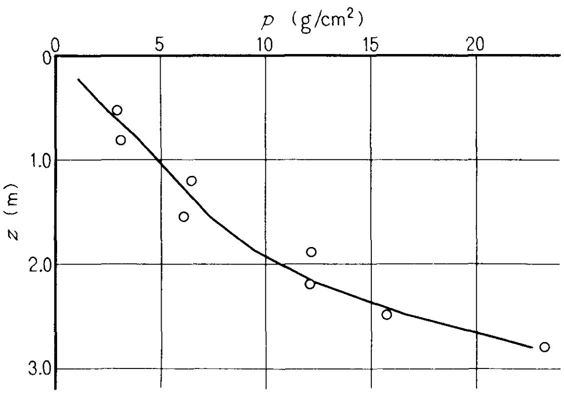
I-1-5.93



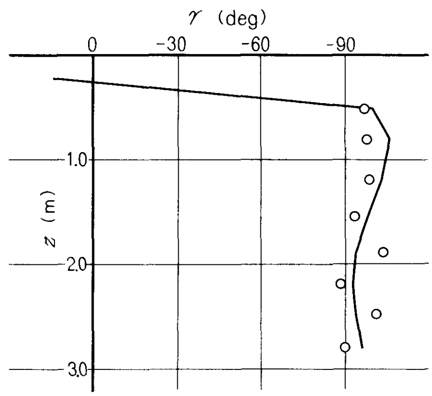
①

z m	p g/cm²	γ 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

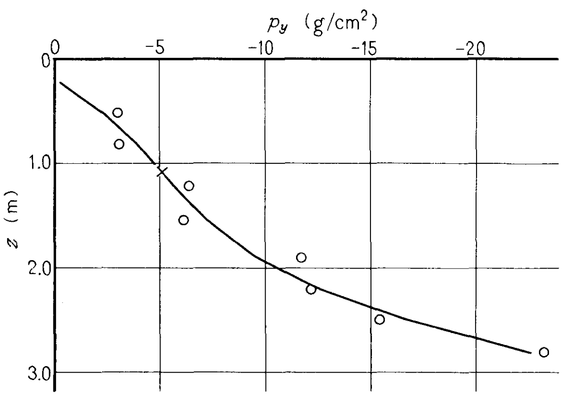
z m	p g/cm²	γ deg
2.49	15.7	−101
2.80	23.2	−90
Bottom (No.6)	60.2	−129
z m	**D mm**	**λ deg**
0	0.550	−112
2.16	0.316	−127
f =	5.93	Hz



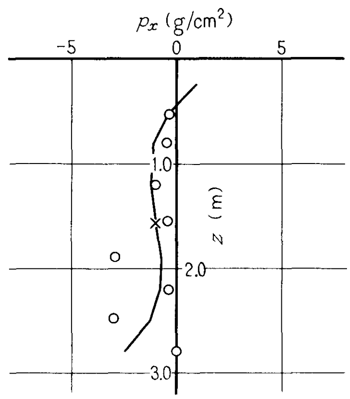
②



③



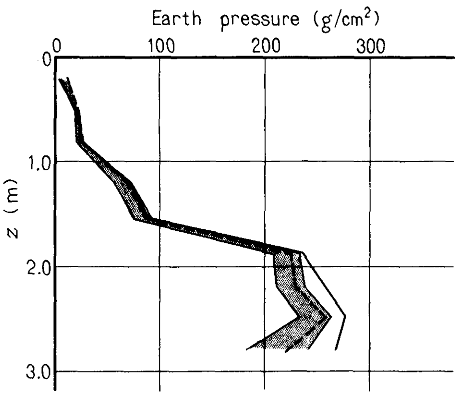
④



⑤

Fig. 39-(9)

I-1-5.93



①

z m	p g/cm²	γ deg
0.21	1.4	−29
0.51	1.4	−94
0.81	2.5	−87
1.21	6.8	−100
1.54	6.6	−94
1.89	12.1	−99
2.20	12.4	−88

z m	p g/cm²	γ deg
2.49	13.8	−89
2.80	26.5	−96
Bottom (No.6)	57.0	−122
z m	**D mm**	**λ deg**
0	0.502	−98
2.16	0.291	−108
f =	5.93	Hz

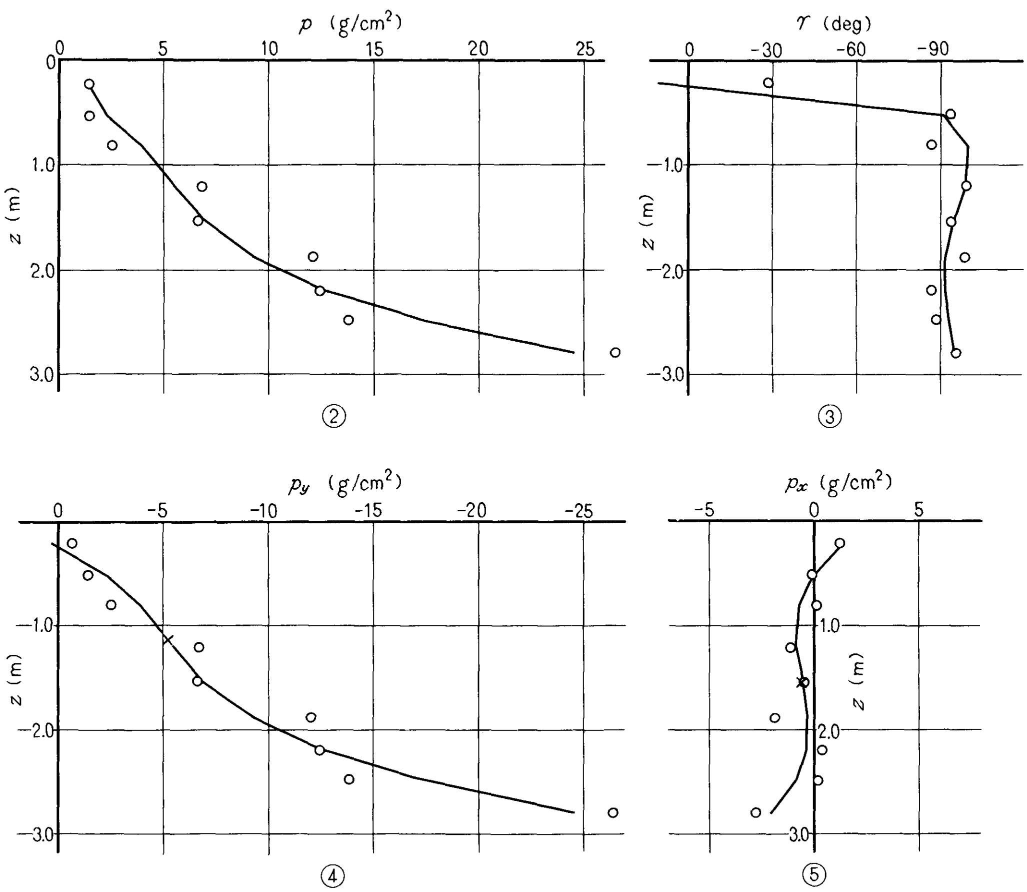
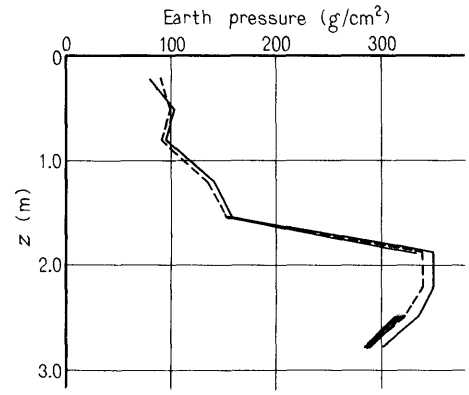


Fig. 39-(10)

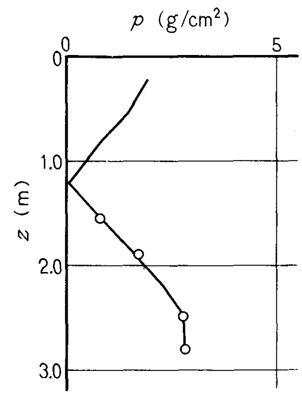
I-2-2.59



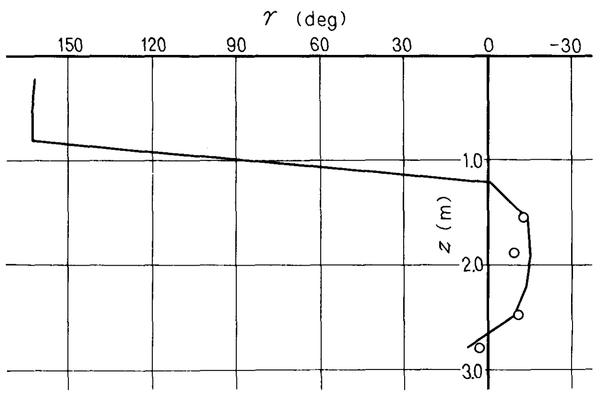
①

z m	p g/cm²	γ deg
0.21	—	—
0.51	—	—
0.81	—	—
1.21	—	—
1.54	0.8	−13
1.89	1.7	−10
2.20	—	—

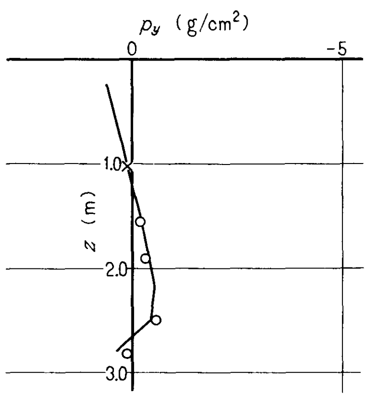
z m	p g/cm²	γ deg
2.49	2.8	−11
2.80	2.8	3
Bottom (No.6)	—	—
z m	**D mm**	**λ deg**
0	0.0239	32
2.16	0.0244	31
f =	2.59	Hz



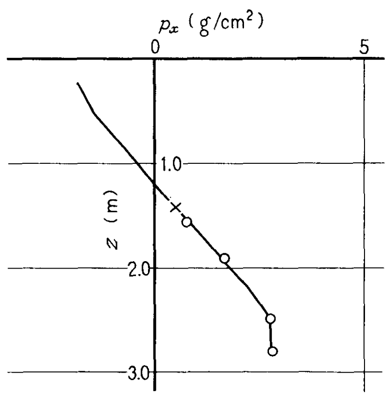
②



③



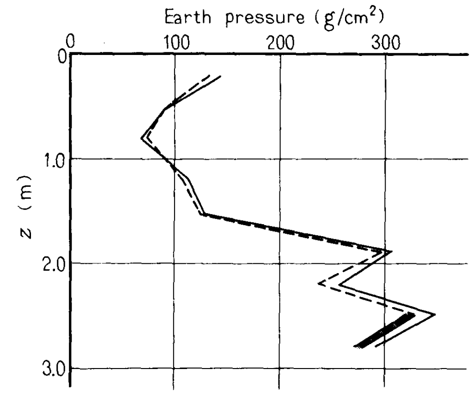
④



⑤

Fig. 39-(11)

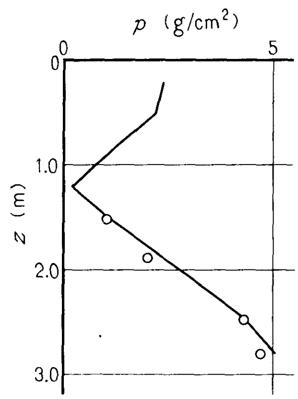
I-2-3.01



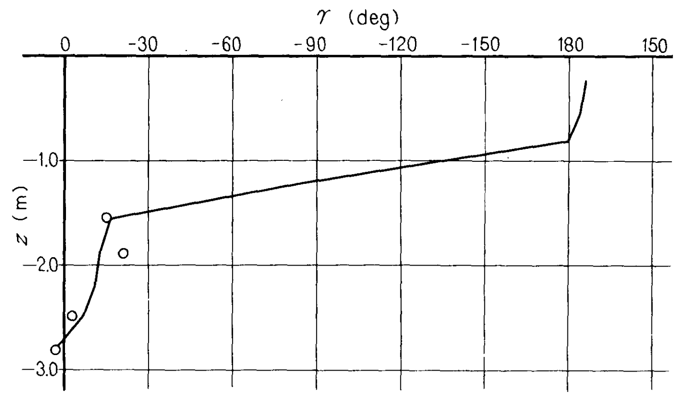
①

z m	p g/cm²	γ deg
0.21	—	—
0.51	—	—
0.81	—	—
1.21	—	—
1.54	1.0	−15
1.89	2.0	−21
2.20	—	—

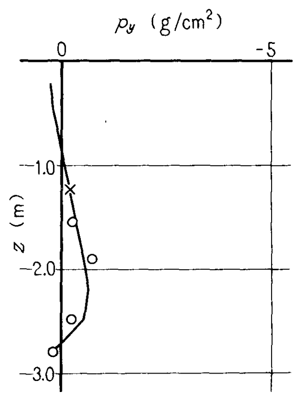
z m	p g/cm²	γ deg
2.49	4.3	−3
2.80	4.7	3
Bottom (No.6)	—	—
z m	**D mm**	**λ deg**
0	0.058	15
2.16	0.0381	18
f = 3.01 Hz		



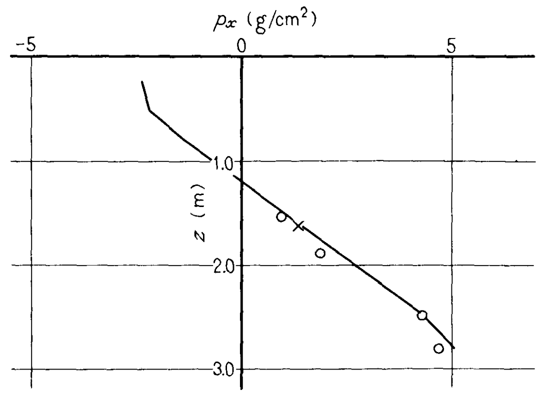
②



③



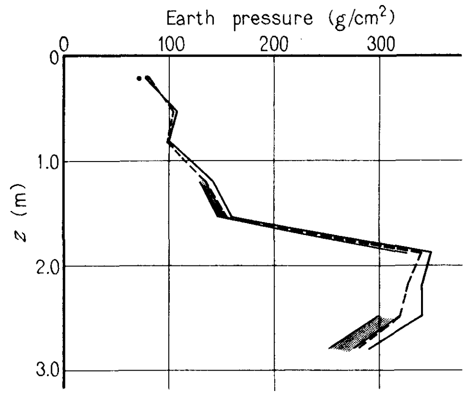
④



⑤

Fig. 39-(12)

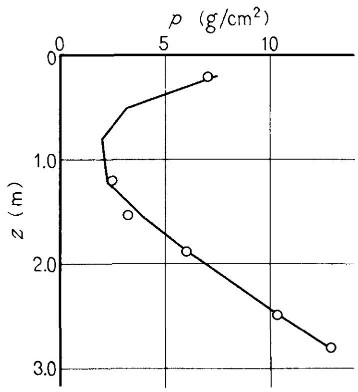
I-2-3.95



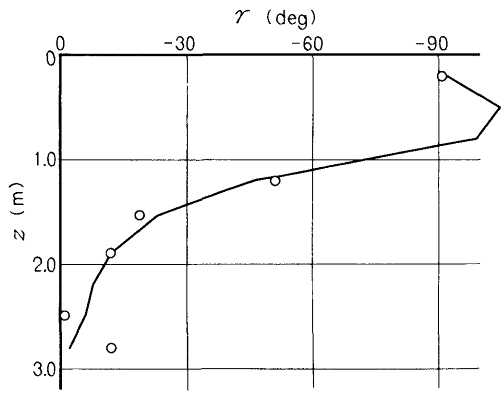
①

z m	p g/cm²	γ 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	—	—

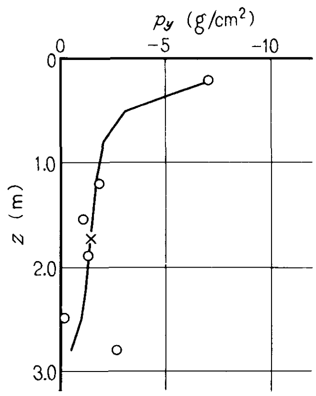
z m	p g/cm²	γ deg
2.49	10.3	−1
2.80	12.8	−12
Bottom (No.6)	24.8	−41
z m	**D mm**	**λ deg**
0	0.241	−10
2.16	0.171	−11
f =	3.95	Hz



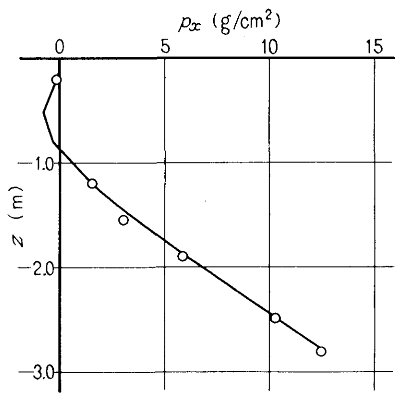
②



③



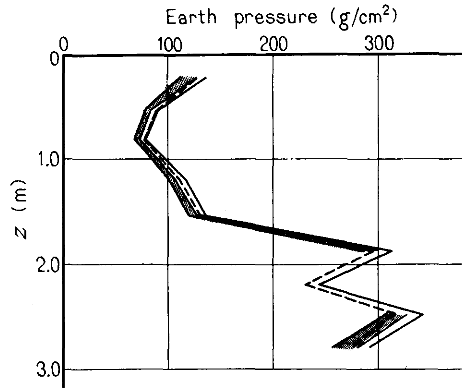
④



⑤

Fig. 39-(13)

I-2-4.20



①

z m	p g/cm²	γ 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/cm²	γ deg
2.49	10.2	−22
2.80	12.9	−20
Bottom (No.6)	26.9	−60

z m	D mm	λ deg
0	0.324	−29
2.16	0.222	−28
f = 4.20 Hz		

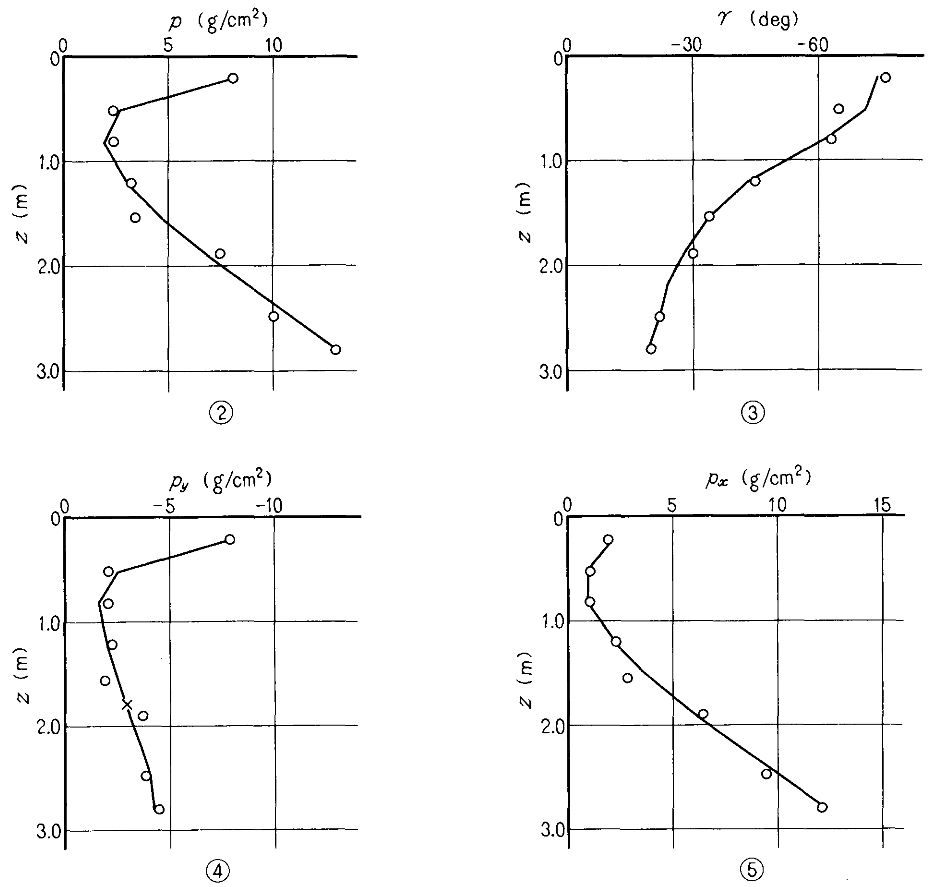
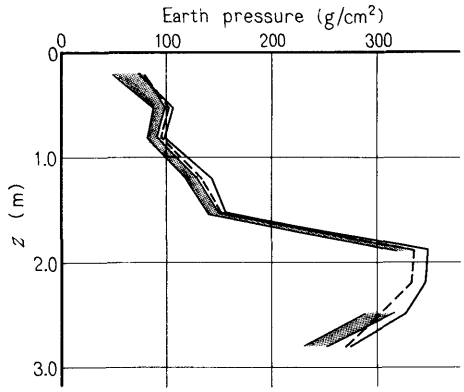


Fig. 39-(14)

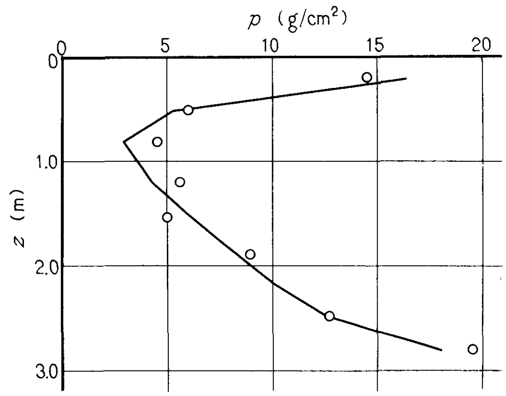
I-2-4.88



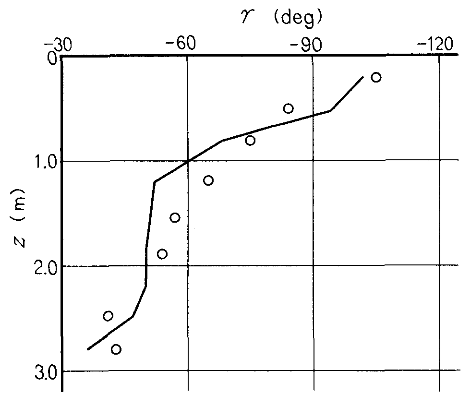
①

z m	p g/cm²	γ 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	—	—

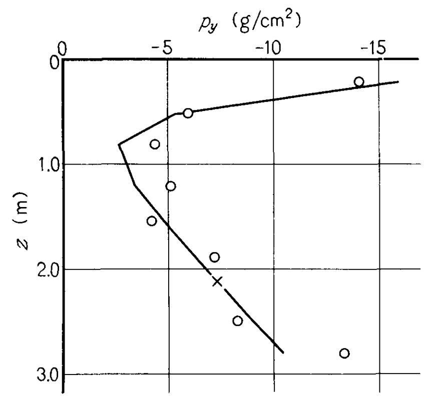
z m	p g/cm²	γ deg
2.49	12.7	−41
2.80	19.5	−43
Bottom (No.6)	62.9	−83
z m	**D mm**	**λ deg**
0	0.394	−60
2.16	0.255	−66
f =	4.88	Hz



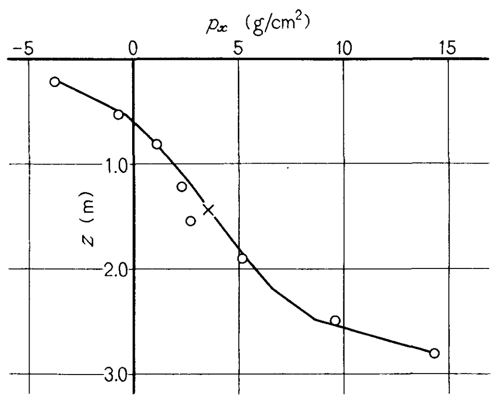
②



③



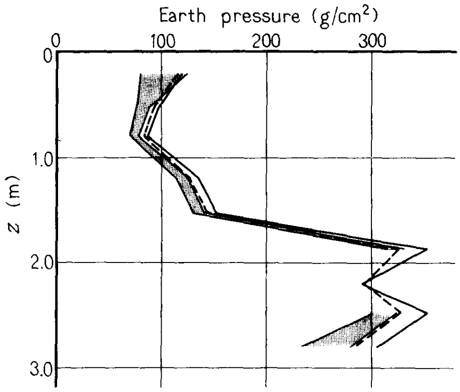
④



⑤

Fig. 39-(15)

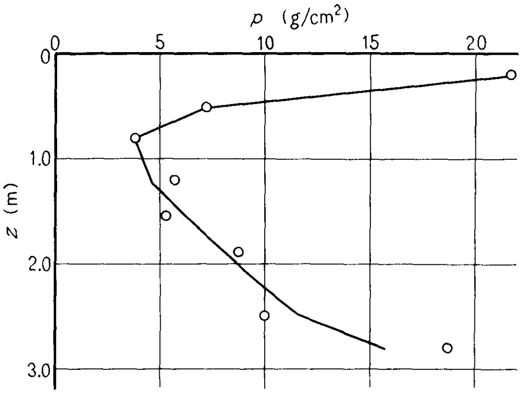
I-2-4.93



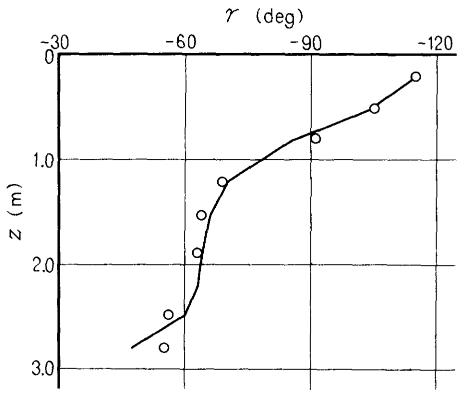
①

z m	p g/cm²	γ 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	—	—

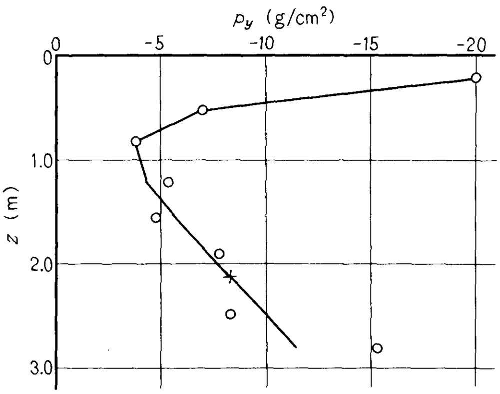
z m	p g/cm²	γ deg
2.49	10.0	−56
2.80	18.7	−55
Bottom (No.6)	72.1	−97
z m	**D mm**	**λ deg**
0	0.454	−74
2.16	0.300	−82
f =	4.93	Hz



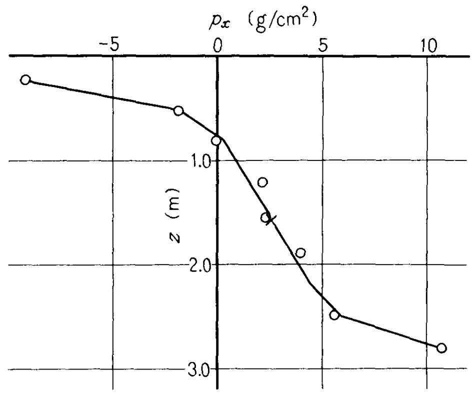
②



③



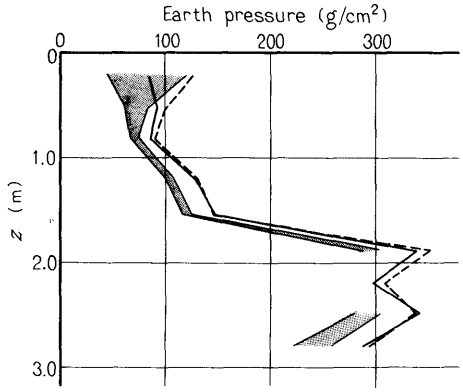
④



⑤

Fig. 39-(16)

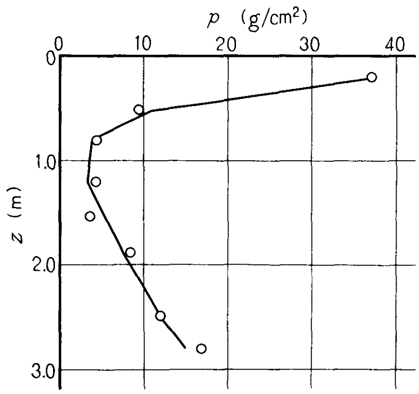
I-2-5.40



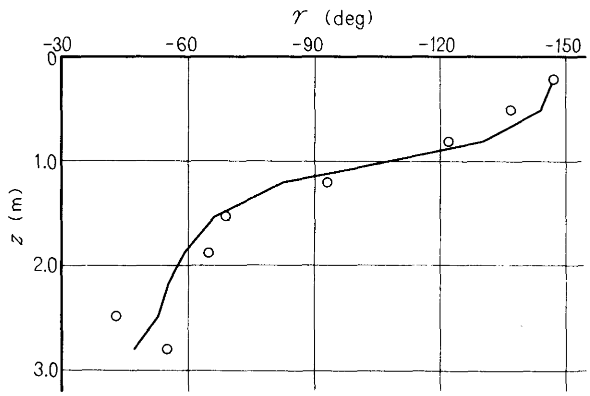
①

z m	p g/cm²	γ deg
0.21	36.9	−147
0.51	9.4	−137
0.81	4.4	−122
1.21	4.1	−93
1.54	3.6	−69
1.89	8.4	−65
2.20	——	——

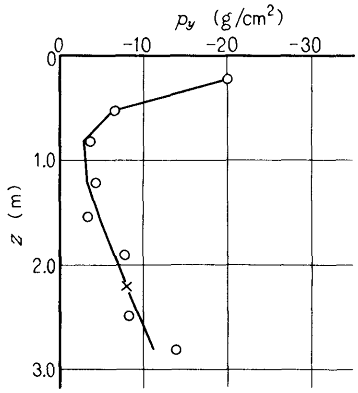
z m	p g/cm²	γ deg
2.49	12.0	−43
2.80	16.8	−55
Bottom (No.6)	107.9	−151
z m	**D mm**	**λ deg**
0	0.590	−113
2.16	0.323	−111
f =	5.40	Hz



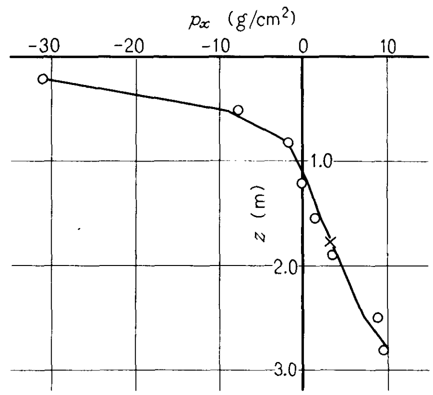
②



③



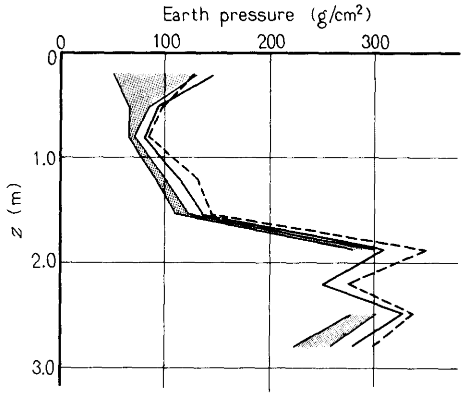
④



⑤

Fig. 39-(17)

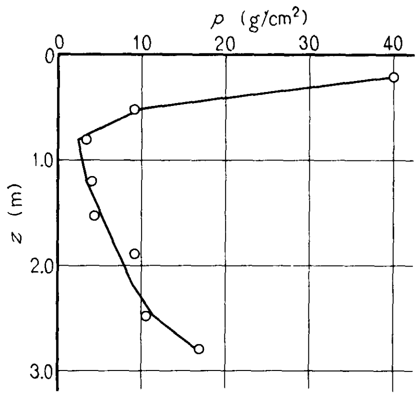
I-2-5.44



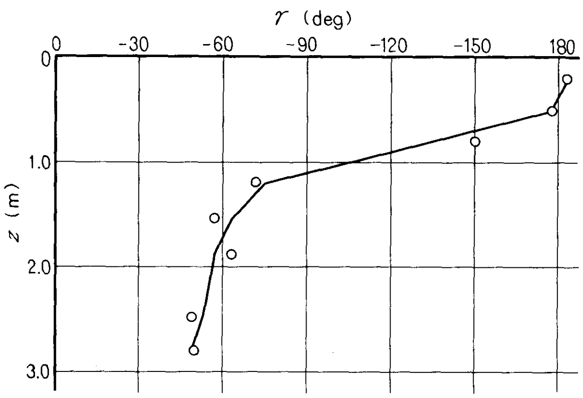
①

z m	p g/cm²	γ deg
0.21	40.0	177
0.51	9.2	−178
0.81	3.3	−150
1.21	4.0	−72
1.54	4.4	−59
1.89	9.2	−63
2.20	——	——

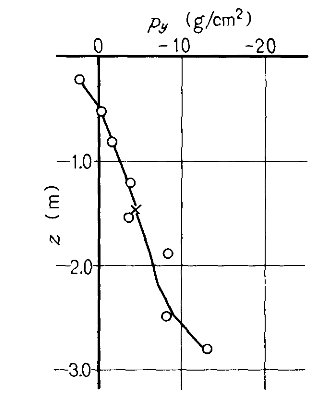
z m	p g/cm²	γ deg
2.49	10.7	−49
2.80	16.8	−50
Bottom (No.6)	93.1	−167
z m	**D mm**	**λ deg**
0	0.500	−126
2.16	0.272	−129
f =	5.44	Hz



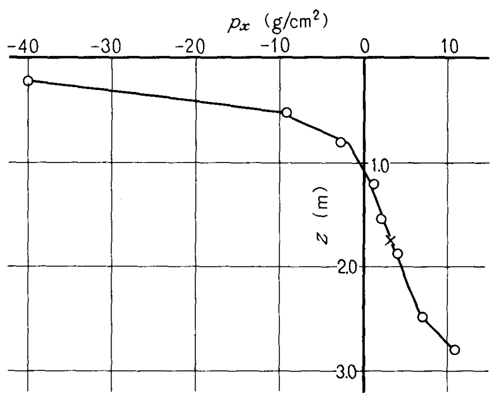
②



③



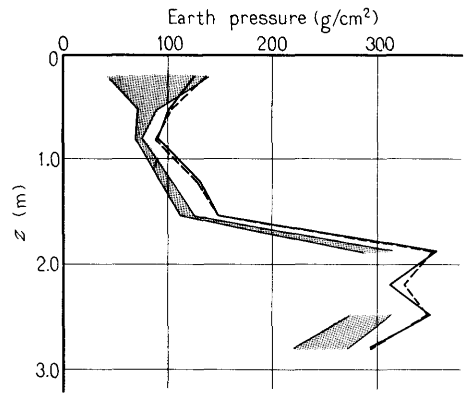
④



⑤

Fig. 39-(18)

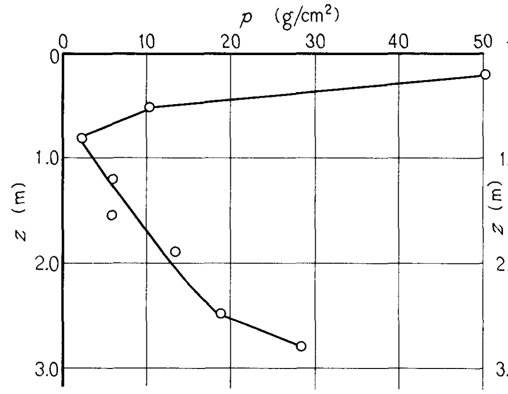
I-2-5.71



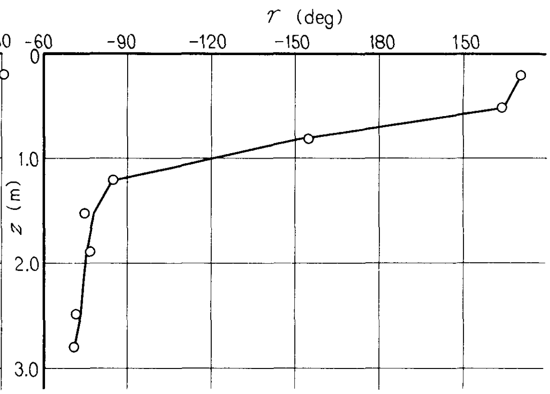
①

z m	p g/cm²	γ 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	——	——

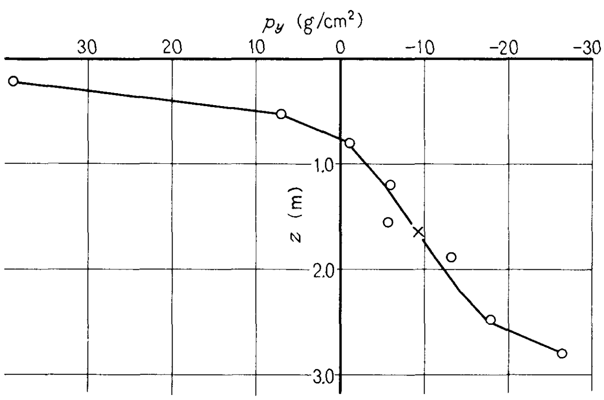
z m	p g/cm²	γ deg
2.49	18.7	−72
2.80	28.3	−71
Bottom (No.6)	99.1	149
z m	**D mm**	**λ deg**
0	0.477	−165
2.16	0.263	−157
f =	5.71	Hz



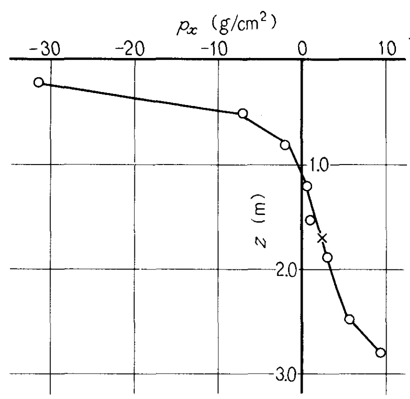
②



③



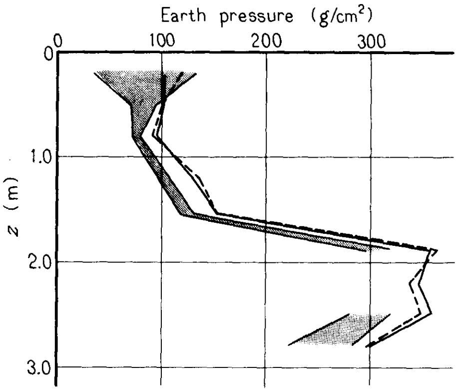
④



⑤

Fig. 39-(19)

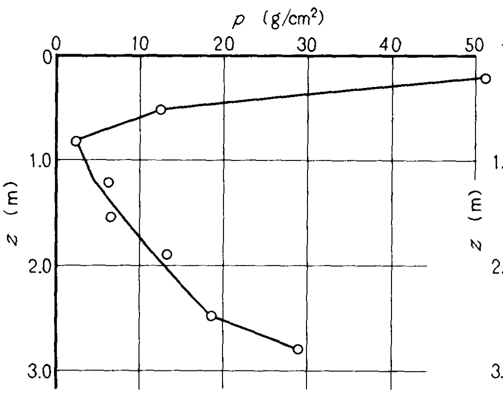
I-2-5.87



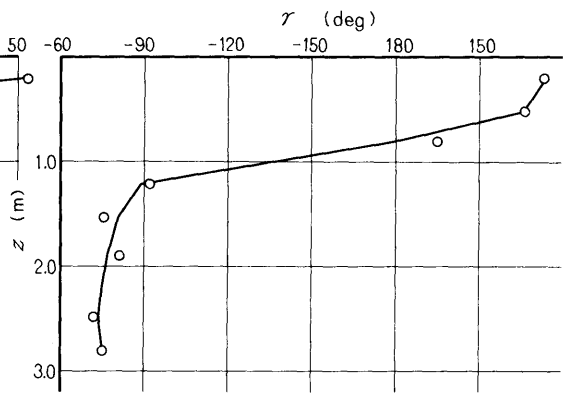
①

z m	p g/cm²	γ deg
0.21	51.2	127
0.51	12.3	134
0.81	2.5	165
1.21	6.0	−92
1.54	6.5	−76
1.89	13.1	−81
2.20	—	—

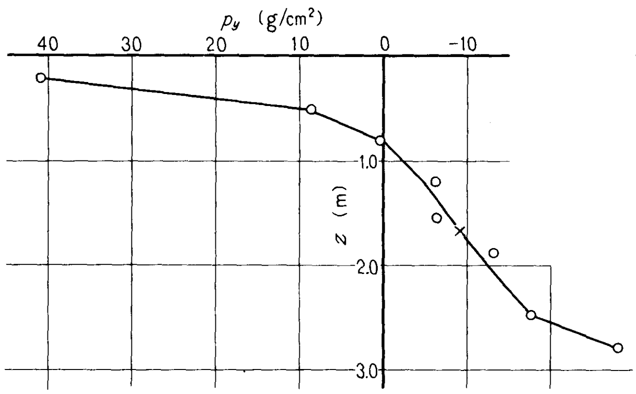
z m	p g/cm²	γ deg
2.49	18.5	−72
2.80	28.9	−75
Bottom (No.6)	99.0	148
z m	**D mm**	**λ deg**
0	0.442	−177
2.16	0.232	−167
f =	5.87	Hz



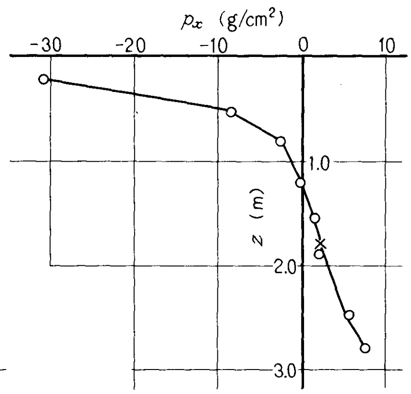
②



③



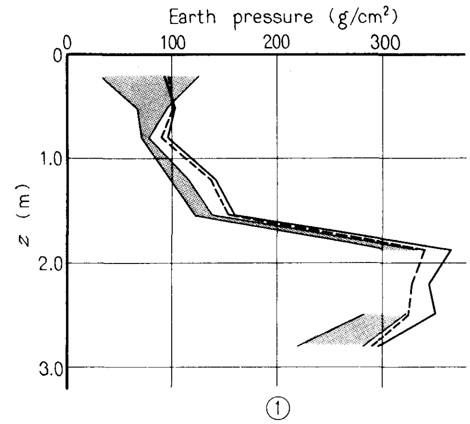
④



⑤

Fig. 39-(20)

I-2-5.93



z m	p g/cm²	γ deg
0.21	50.6	125
0.51	15.6	135
0.81	3.5	172
1.21	6.6	−93
1.54	6.9	−82
1.89	14.6	−82
2.20	—	—

z m	p g/cm²	γ deg
2.49	19.8	−77
2.80	30.0	−75
Bottom (No.6)	97.2	145
z m	**D mm**	**λ deg**
0	0.433	−174
2.16	0.221	−168
f =	5.93	Hz

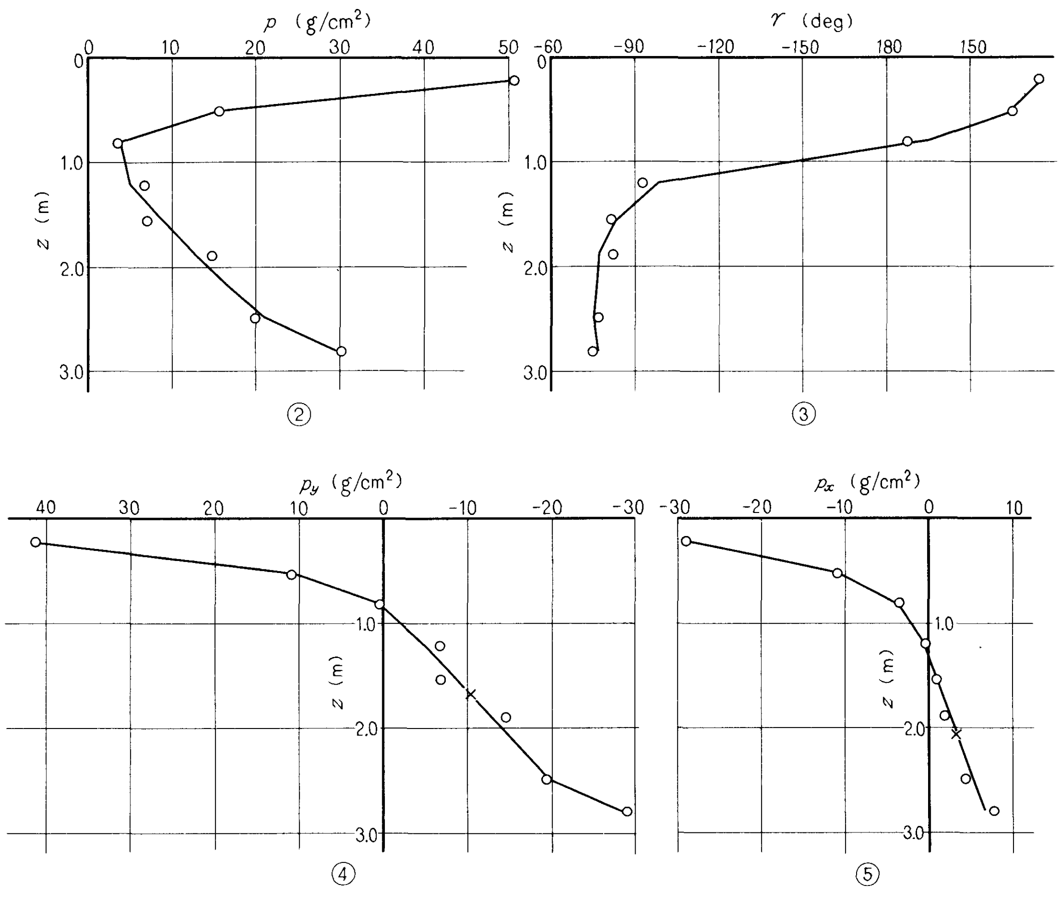
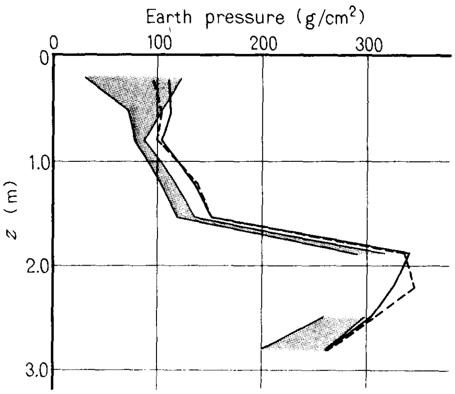


Fig. 39-(21)

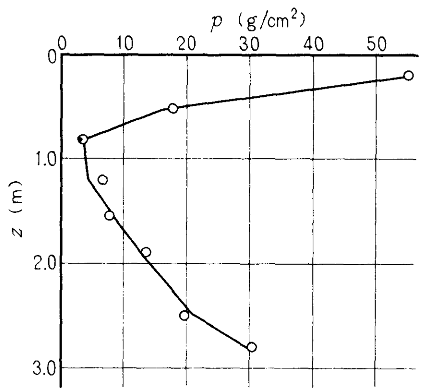
I-2-5.94



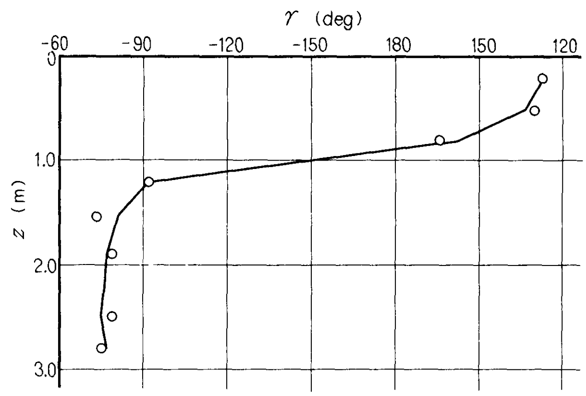
①

z m	p g/cm²	γ deg
0.21	55.2	127
0.51	17.7	130
0.81	3.4	164
1.21	6.7	−92
1.54	7.7	−74
1.89	13.5	−79
2.20	—	—

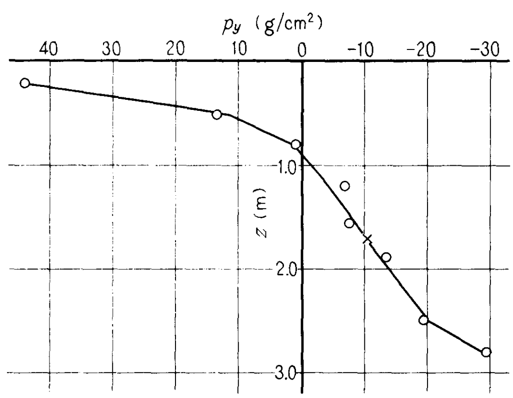
z m	p g/cm²	γ deg
2.49	19.6	−79
2.80	30.3	−75
Bottom (No.6)	105.8	144
z m	**D mm**	**λ deg**
0	0.441	−176
2.16	0.220	−168
f =	5.94	Hz



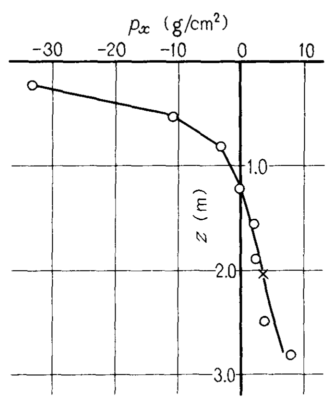
②



③



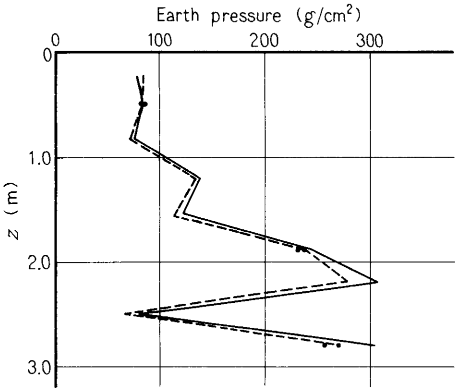
④



⑤

Fig. 39-(22)

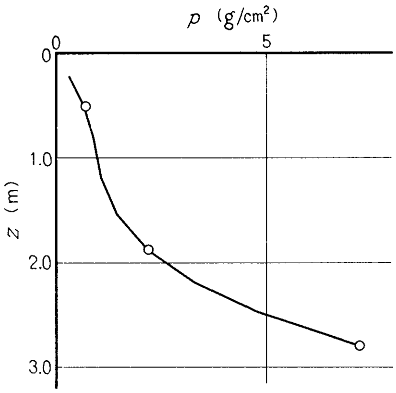
I-3-3.29



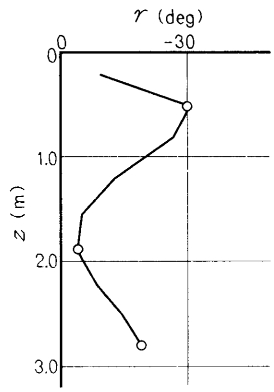
①

z m	p g/cm²	γ deg
0.21	—	—
0.51	0.7	−30
0.81	—	—
1.21	—	—
1.54	—	—
1.89	2.2	− 4
2.20	—	—

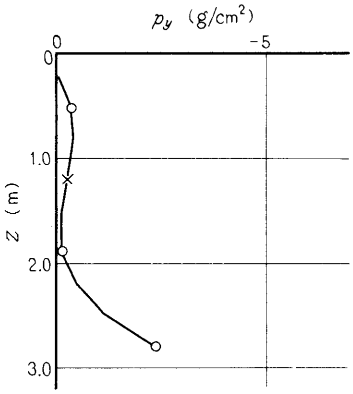
z m	p g/cm²	γ deg
2.49	—	—
2.80	7.2	−19
Bottom (No.6)	—	—
z m	**D mm**	**λ deg**
0	0.0911	− 3
2.16	0.0650	− 2
f = 3.29 Hz		



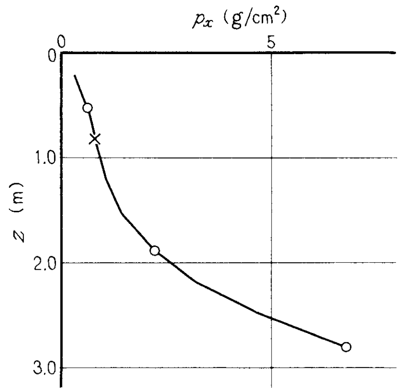
②



③



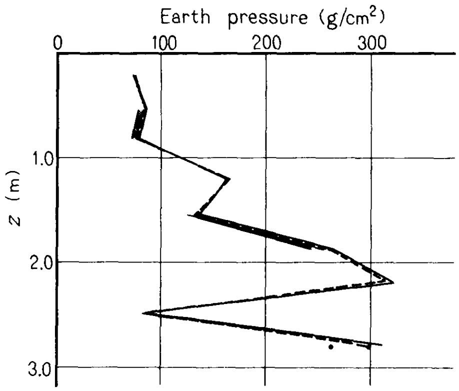
④



⑤

Fig. 39-(23)

I-3-4.30



①

z m	p g/cm²	γ deg
0.21	—	—
0.51	2.6	−73
0.81	1.7	−64
1.21	—	—
1.54	3.1	−50
1.89	6.0	−48
2.20	—	—

z m	p g/cm²	γ deg
2.49	—	—
2.80	15.4	−28
Bottom (No.6)	24.6	−47
z m	**D mm**	**λ deg**
0	0.229	−51
2.16	0.178	−63
f = 4.30 Hz		

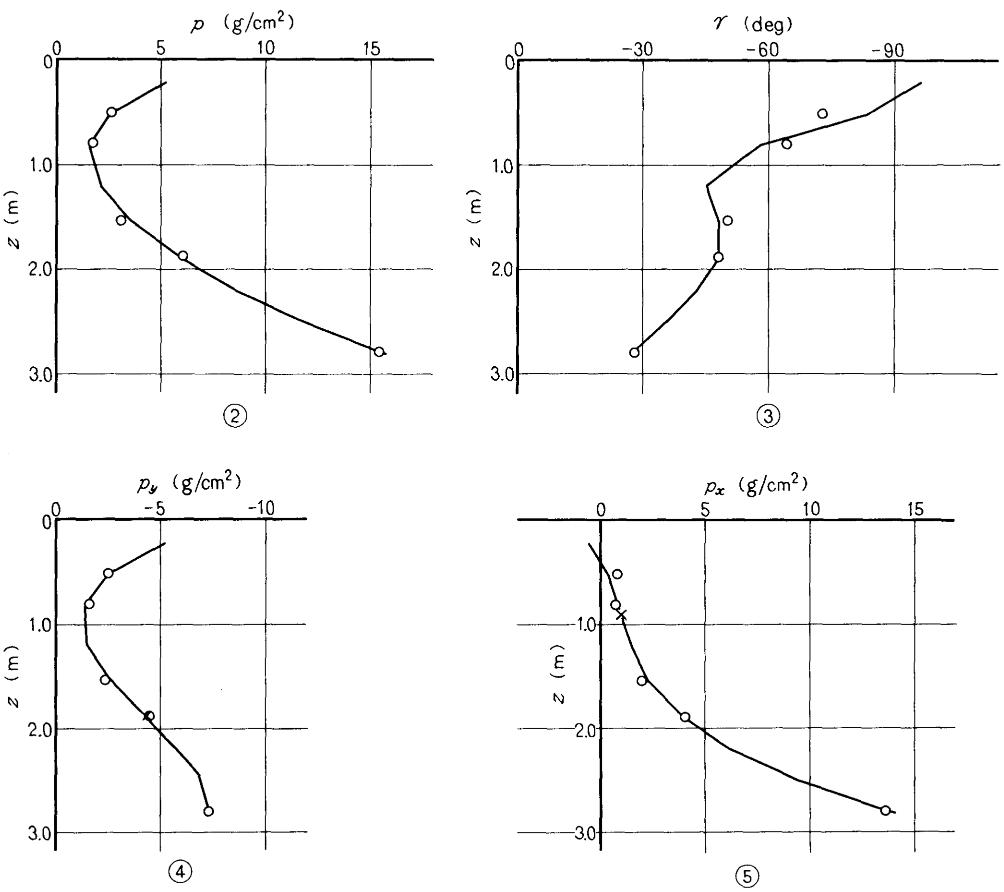
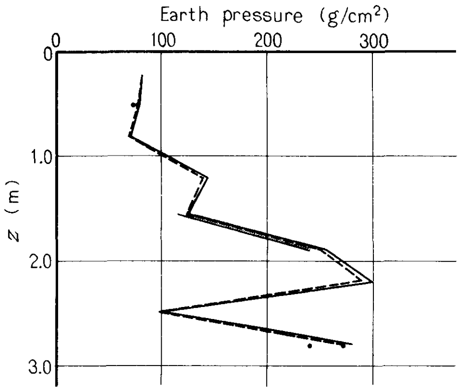


Fig. 39-(24)

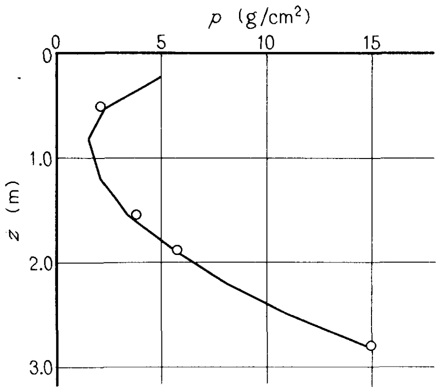
I-3-4.35



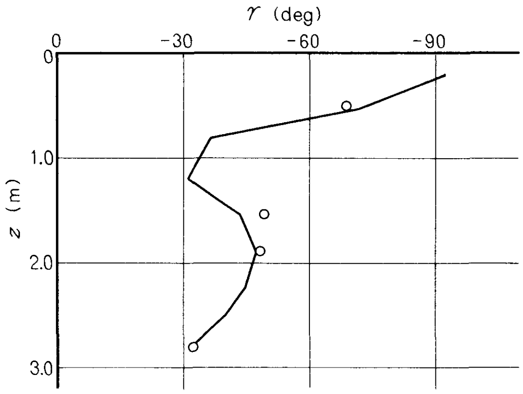
①

z m	p g/cm²	γ deg
0.21	—	—
0.51	2.1	−69
0.81	—	—
1.21	—	—
1.54	3.8	−49
1.89	5.7	−48
2.20	—	—

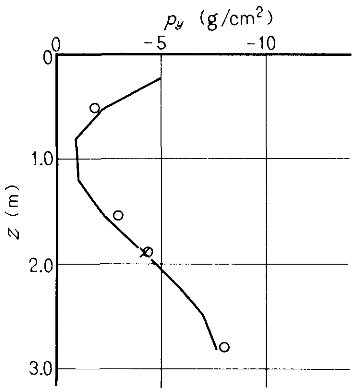
z m	p g/cm²	γ deg
2.49	—	—
2.80	14.9	−32
Bottom (No.6)	28.2	−46
z m	**D mm**	**λ deg**
0	0.231	−55
2.16	0.170	−60
f =	4.35	Hz



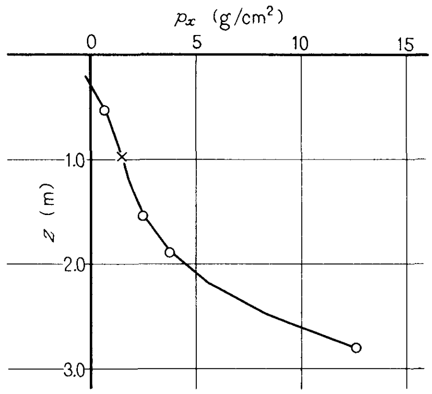
②



③



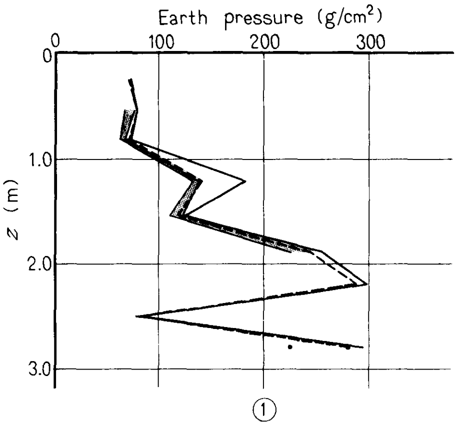
④



⑤

Fig. 39-(25)

I-3-5.07



z m	p g/cm²	γ deg
0.21	—	—
0.51	6.0	−92
0.81	2.3	−99
1.21	2.6	−99
1.54	5.7	−77
1.89	10.3	−75
2.20	—	—

z m	p g/cm²	γ deg
2.49	—	—
2.80	26.9	−61
Bottom (No.6)	46.5	−95
z m	**D mm**	**λ deg**
0	0.397	−87
2.16	0.286	−104
f =	5.07	Hz

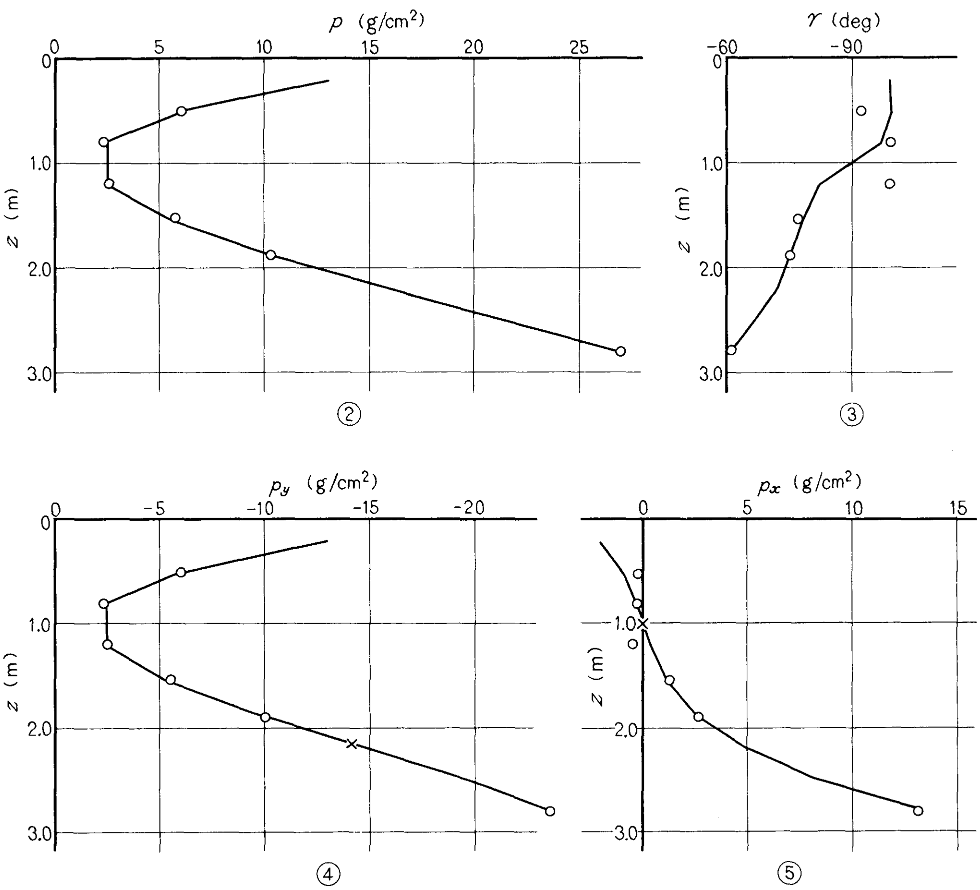
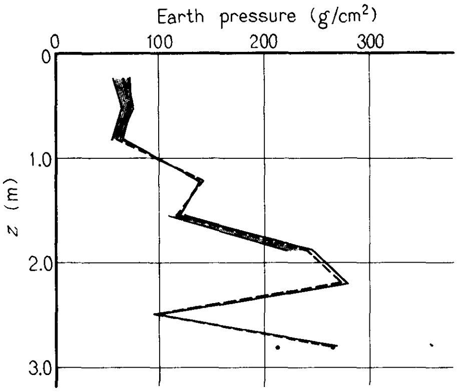


Fig. 39-(26)

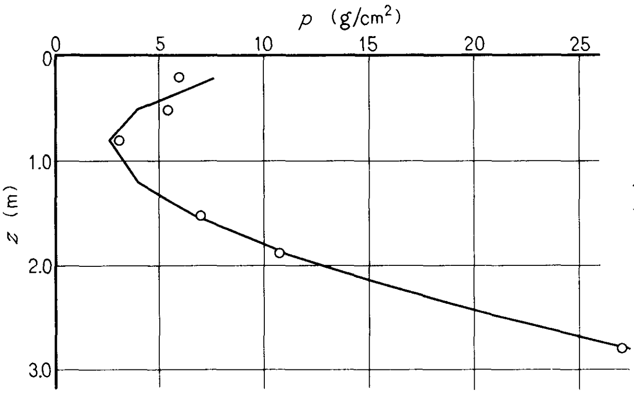
I-3-5.10



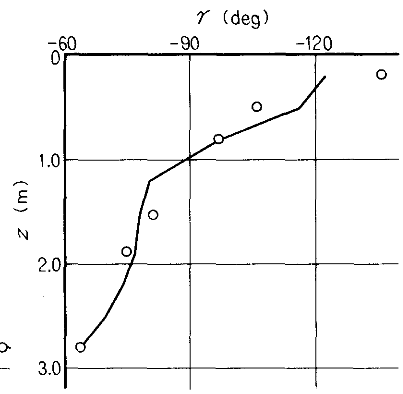
①

z m	p g/cm²	γ deg
0.21	5.9	−136
0.51	5.3	−106
0.81	3.0	−97
1.21	—	—
1.54	6.9	−81
1.89	10.7	−75
2.20	—	—

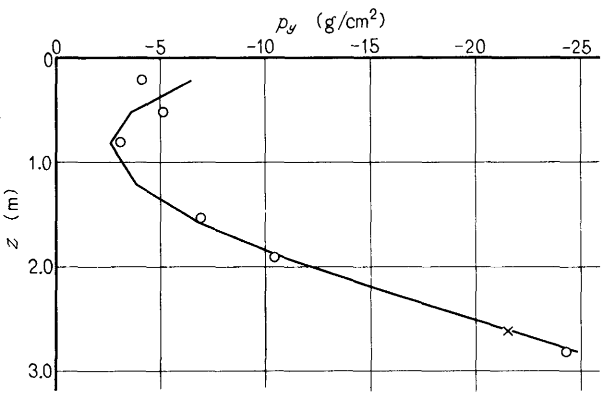
z m	p g/cm²	γ deg
2.49	—	—
2.80	27.0	−64
Bottom (No.6)	47.7	−87
z m	**D mm**	**λ deg**
0	0.419	−83
2.16	0.298	−98
f =	5.10	Hz



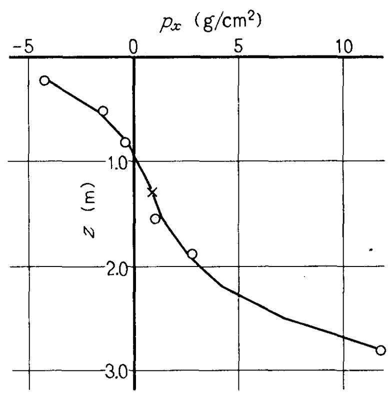
②



③



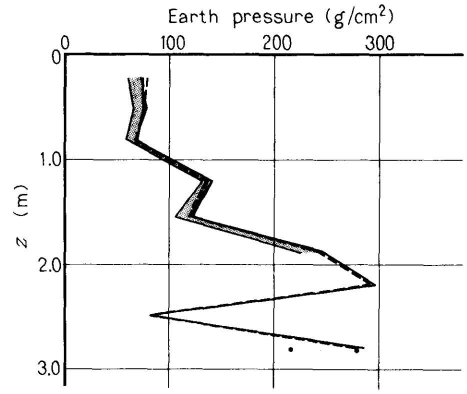
④



⑤

Fig. 39-(27)

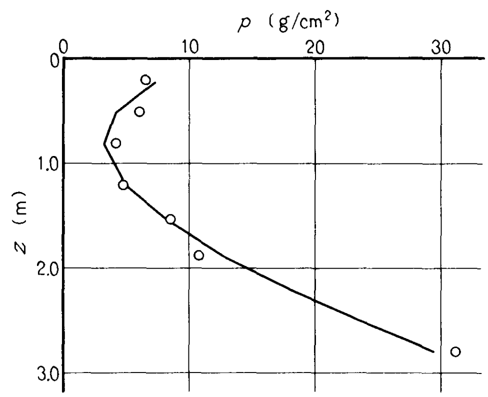
I-3-5.50



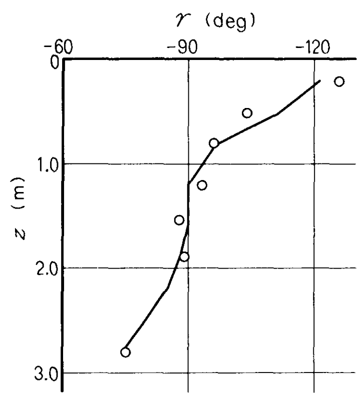
①

z m	p g/cm²	γ deg
0.21	6.5	−126
0.51	6.0	−104
0.81	4.1	−96
1.21	4.7	−93
1.54	8.5	−88
1.89	10.7	−89
2.20	—	—

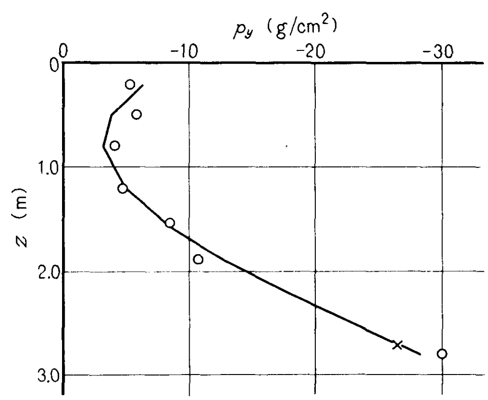
z m	p g/cm²	γ deg
2.49	—	—
2.80	31.1	−75
Bottom (No.6)	60.2	−100
z m	**D mm**	**λ deg**
0	0.429	−90
2.16	0.277	−111
f =	5.50	Hz



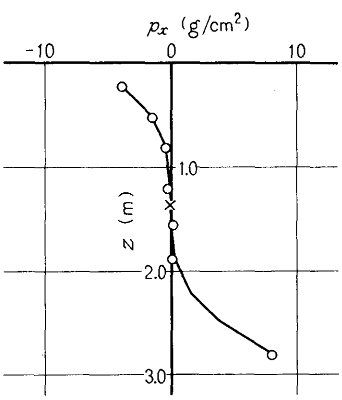
②



③



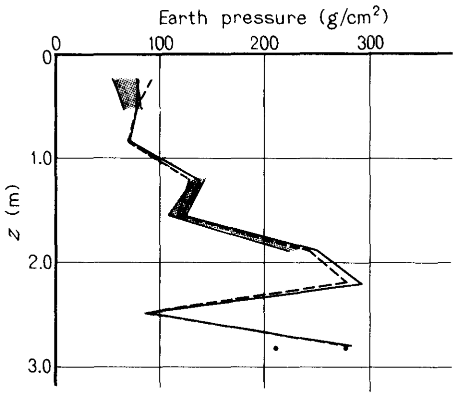
④



⑤

Fig. 39-(28)

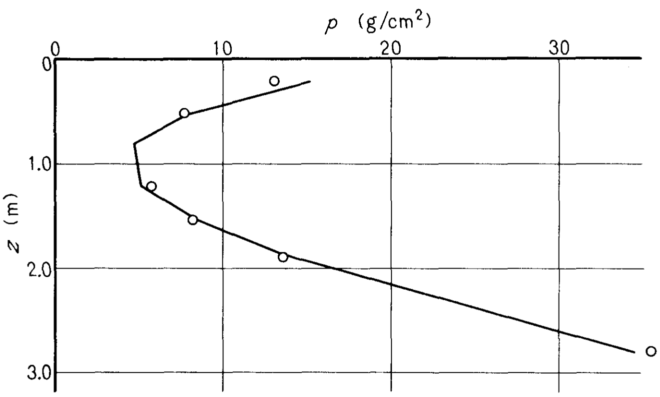
I-3-5.77



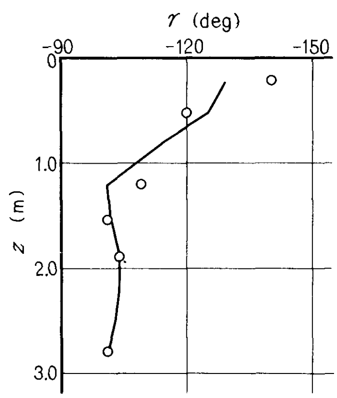
①

z m	p g/cm²	γ deg
0.21	13.0	−140
0.51	7.6	−120
0.81	—	—
1.21	5.7	−109
1.54	8.2	−101
1.89	13.6	−104
2.20	—	—

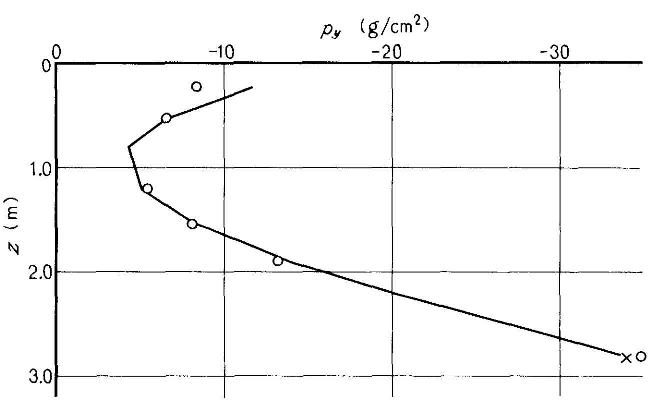
z m	p g/cm²	γ deg
2.49	—	—
2.80	35.5	−101
Bottom (No.6)	61.5	−114
z m	D mm	λ deg
0	0.462	−108
2.16	0.288	−127
f =	5.77	Hz



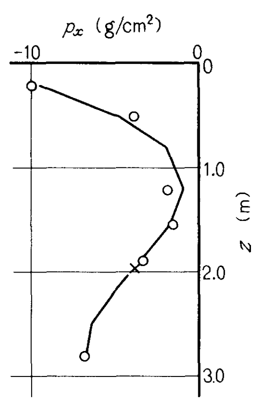
②



③



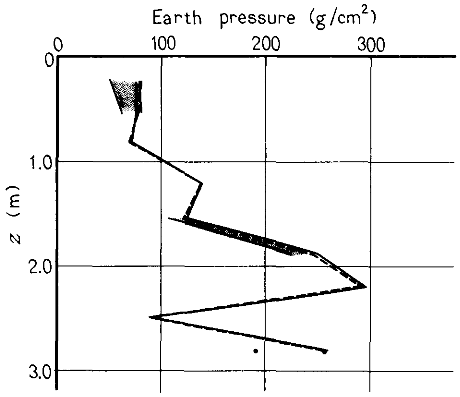
④



⑤

Fig. 39-(29)

I-3-5.90



①

z m	p g/cm²	γ deg
0.21	13.2	−140
0.51	8.2	−128
0.81	—	—
1.21	—	—
1.54	8.6	−109
1.89	13.7	−109
2.20	—	—

z m	p g/cm²	γ deg
2.49	—	—
2.80	33.8	−103
Bottom (No.6)	67.1	−118
z m	**D mm**	**λ deg**
0	0.497	−107
2.16	0.296	−128
f =	5.90	Hz

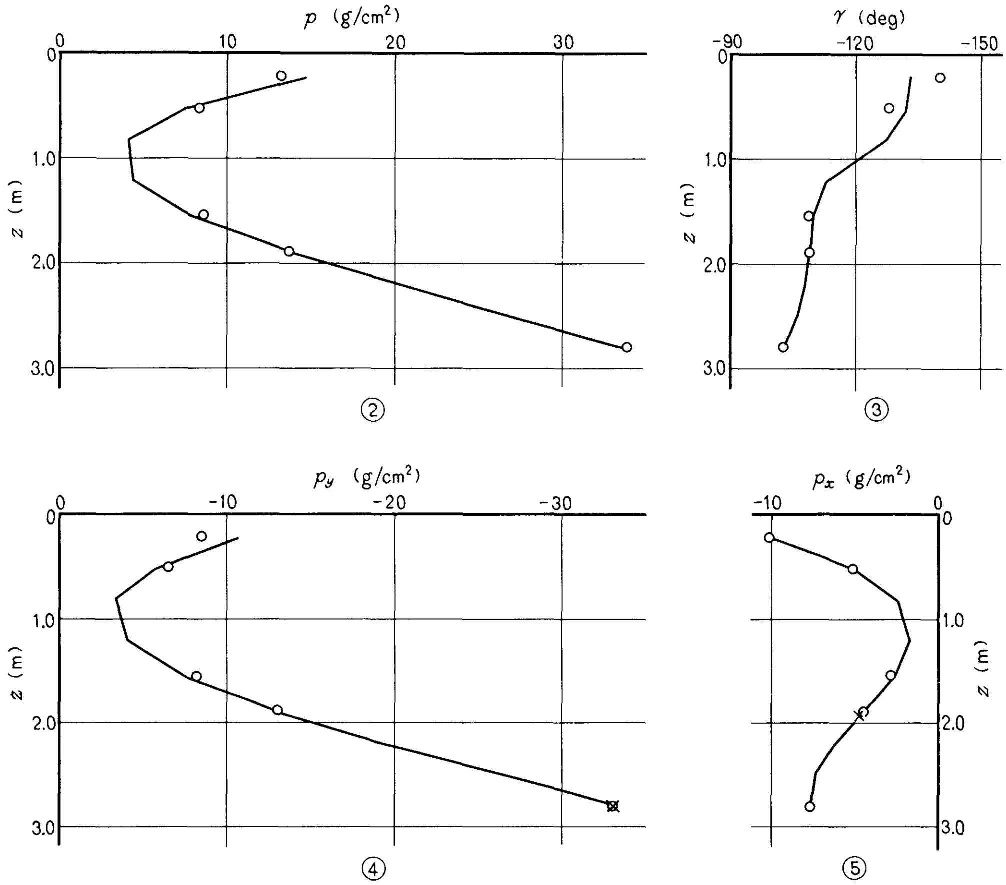
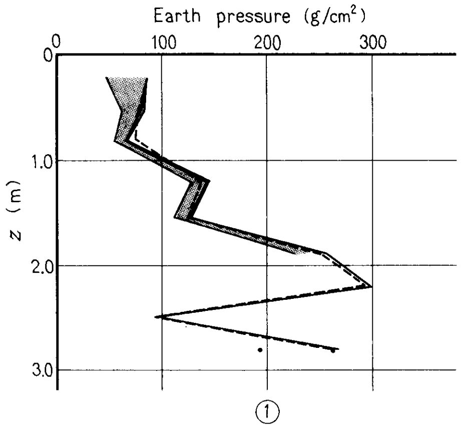


Fig. 39-(30)

I-3-5.95



①

z m	p g/cm²	γ deg
0.21	18.5	−140
0.51	9.5	−130
0.81	6.4	−122
1.21	8.2	−114
1.54	8.6	−112
1.89	12.8	−108
2.20	—	—

z m	p g/cm²	γ deg
2.49	—	—
2.80	35.3	−106
Bottom (No.6)	71.7	−118

z m	D mm	λ deg
0	0.522	−109
2.16	0.304	−126
f =	5.95	Hz

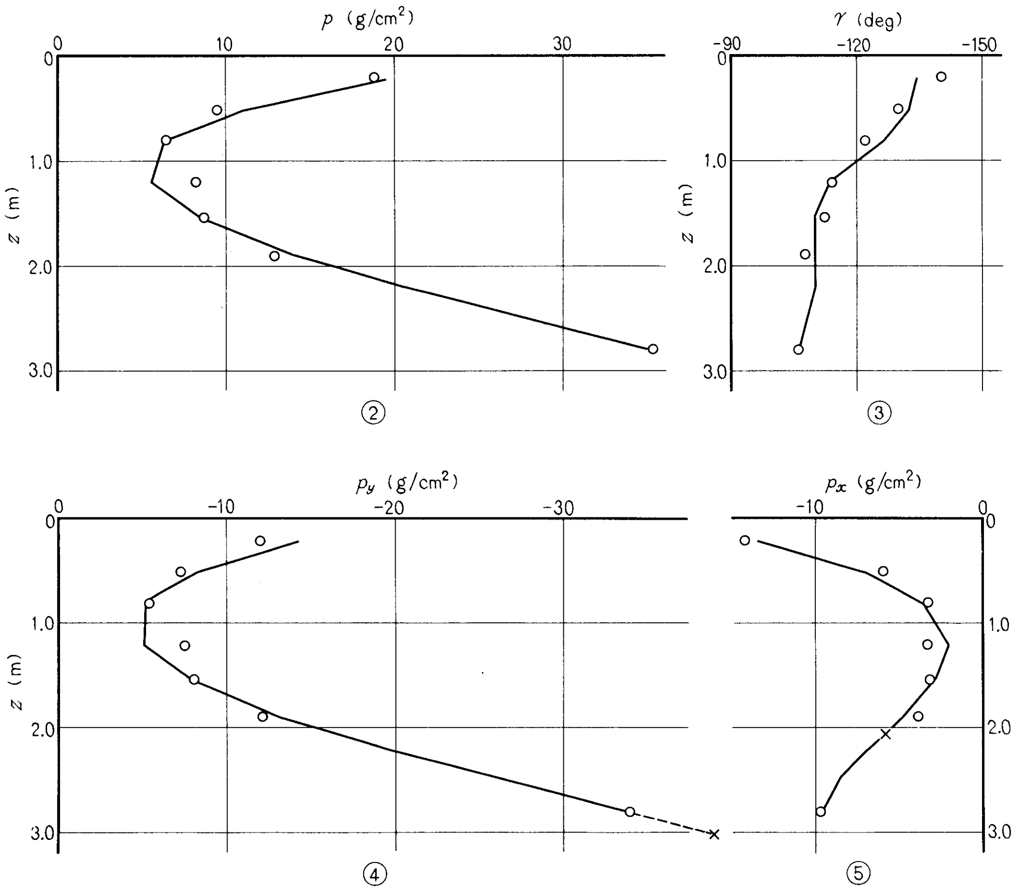
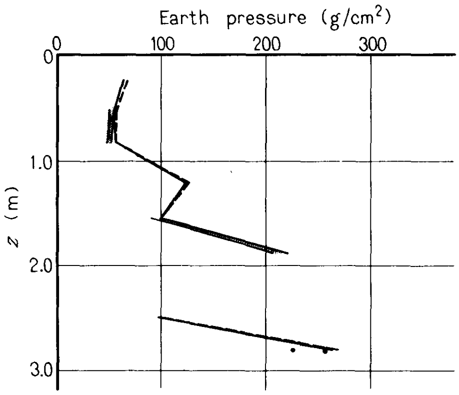


Fig. 39-(31)

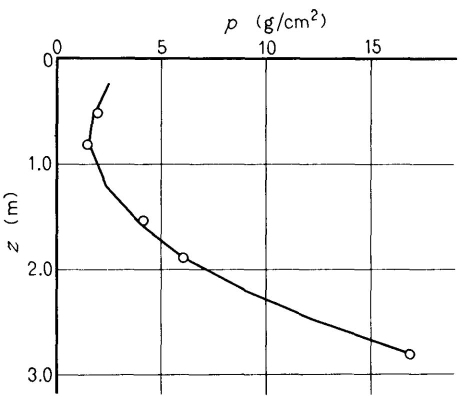
I-4-4.43



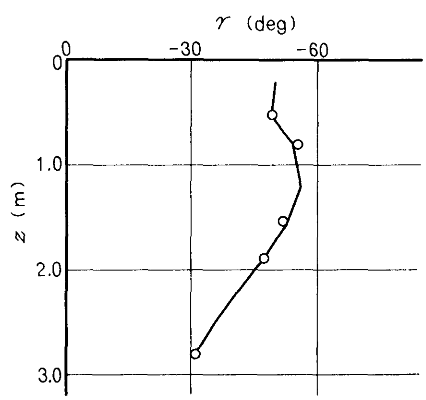
①

z m	p g/cm²	γ deg
0.21	—	—
0.51	1.9	−49
0.81	1.5	−55
1.21	—	—
1.54	4.1	−52
1.89	6.0	−47
2.20	—	—

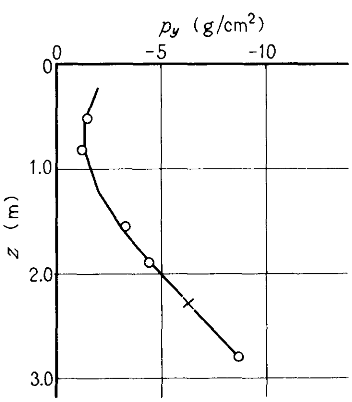
z m	p g/cm²	γ deg
2.49	—	—
2.80	16.8	−31
Bottom (No.6)	21.4	−47
z m	**D mm**	**λ deg**
0	0.276	−44
2.16	0.195	−56
f =	4.43	Hz



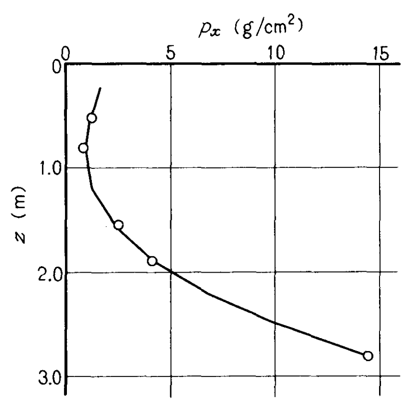
②



③



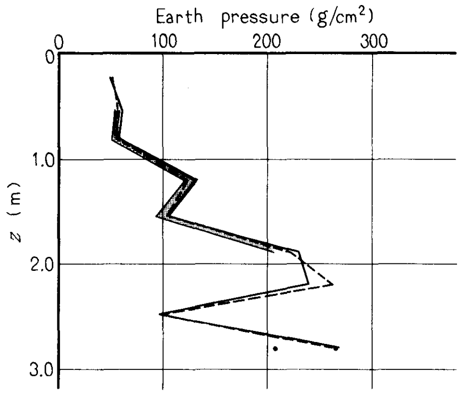
④



⑤

Fig. 39-(32)

I-4-5.08



①

z m	p g/cm²	γ deg
0.21	—	—
0.51	2.2	−73
0.81	2.2	−99
1.21	6.1	−92
1.54	5.9	−79
1.89	11.2	−72
2.20	—	—

z m	p g/cm²	γ deg
2.49	—	—
2.80	30.1	−56
Bottom (No.6)	47.1	−83
z m	D mm	λ deg
0	0.435	−79
2.16	0.189	−96
f =	5.08	Hz

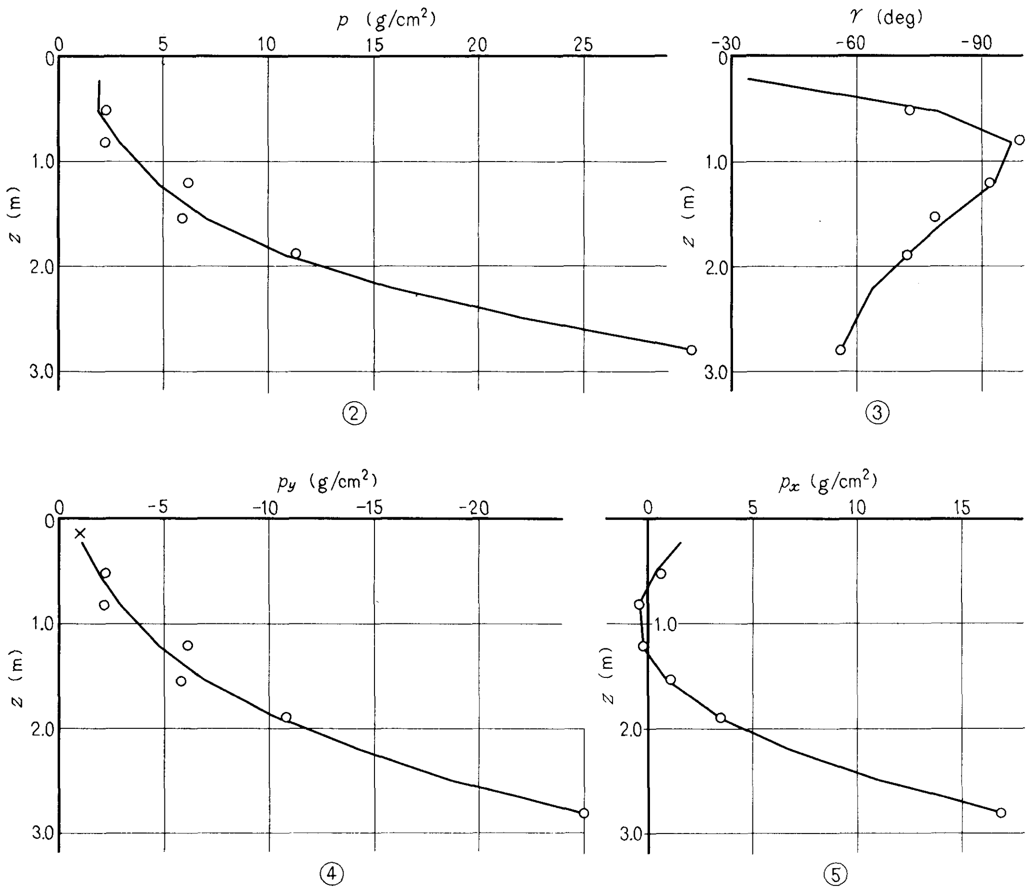
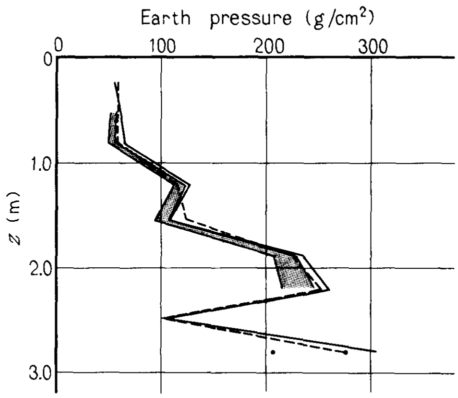


Fig. 39-(33)

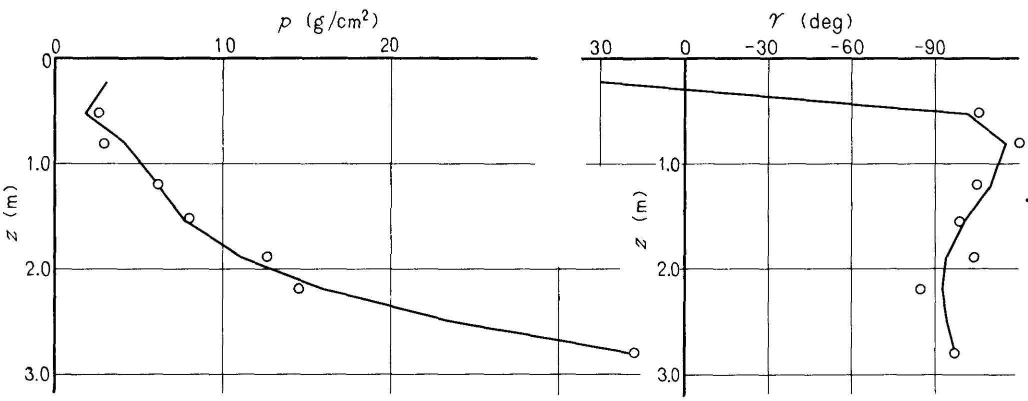
I-4-5.98



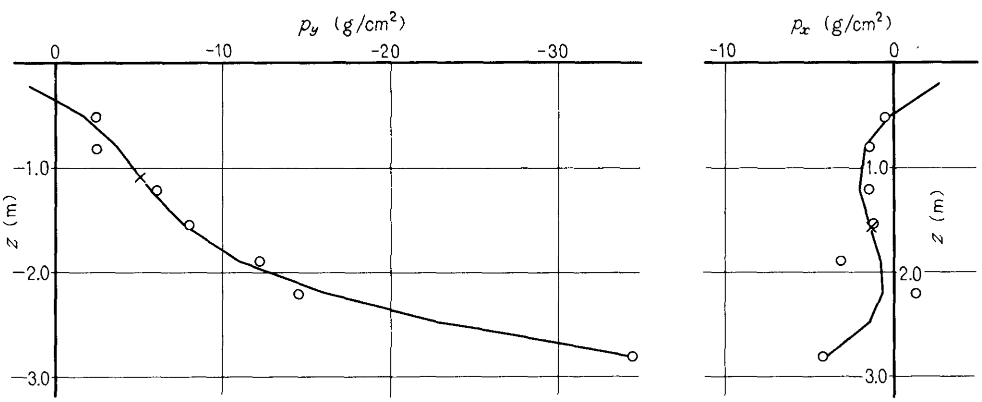
①

z m	p g/cm²	γ deg
0.21	—	—
0.51	2.5	−105
0.81	2.9	−120
1.21	6.2	−105
1.54	8.0	−99
1.89	12.6	−104
2.20	14.6	−85

z m	p g/cm²	γ deg
2.49	—	—
2.80	34.6	−97
Bottom (No.6)	61.1	−122
z m	**D mm**	**λ deg**
0	0.487	−116
2.16	0.287	−127
f =	5.98	Hz



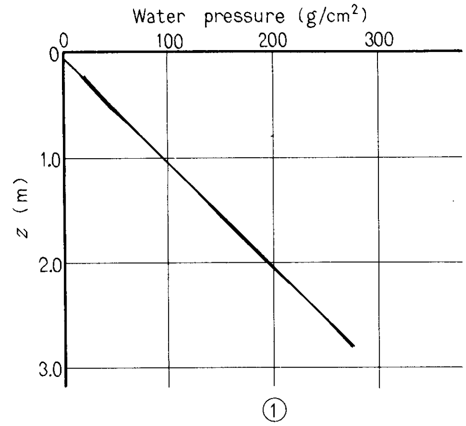
② ③



④ ⑤

Fig. 39-(34)

I-5-4.03



z m	p g/cm²	γ deg
0.21	0.4	−132
0.51	0.5	−120
0.81	—	—
1.21	—	—
1.54	0.6	−105
1.89	0.5	−120
2.20	—	—

z m	p g/cm²	γ deg
2.49	—	—
2.80	—	—
Bottom (No.6)	14.4	−80

z m	D mm	λ deg
0	0.213	−73
2.16	0.129	−65
f =	4.03	Hz

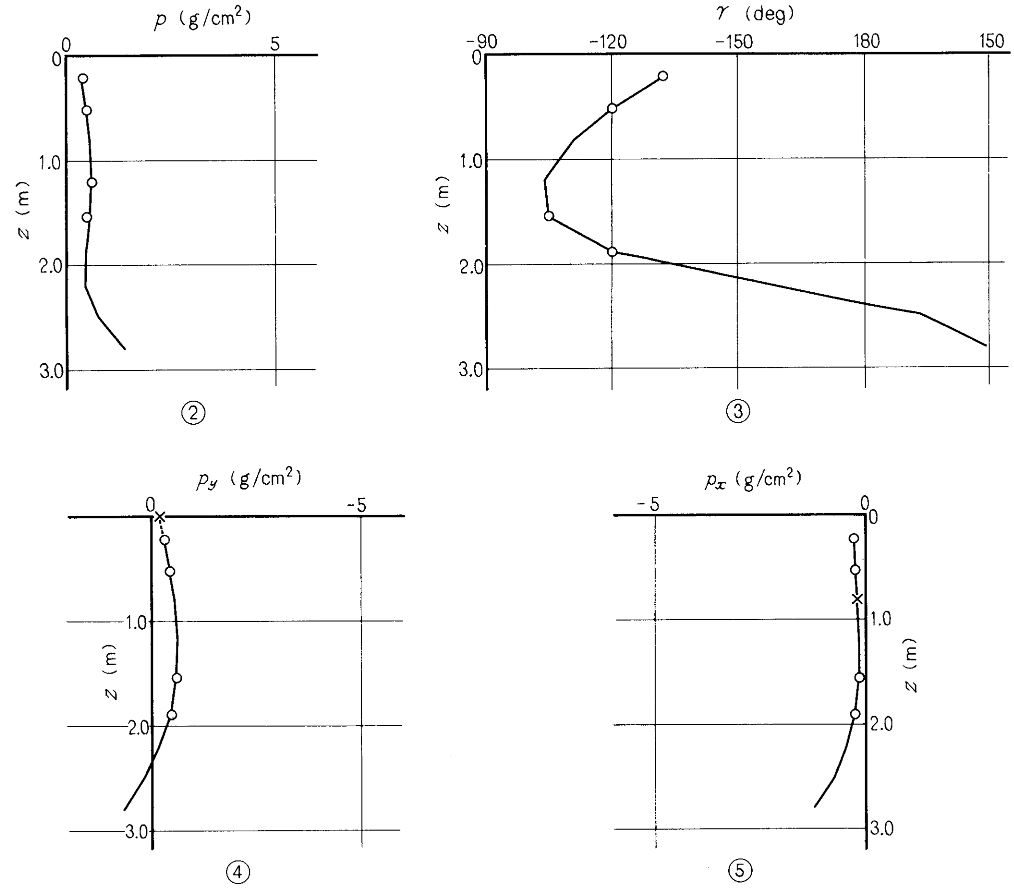
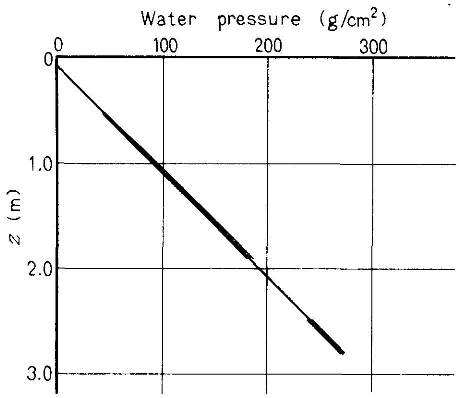


Fig. 39-(35) Vertical distributions of water pressures
○ : Observed values —— : Empirical formula

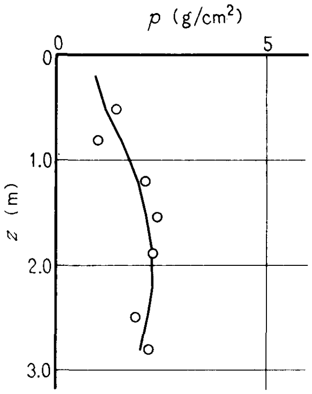
I-5-4.88



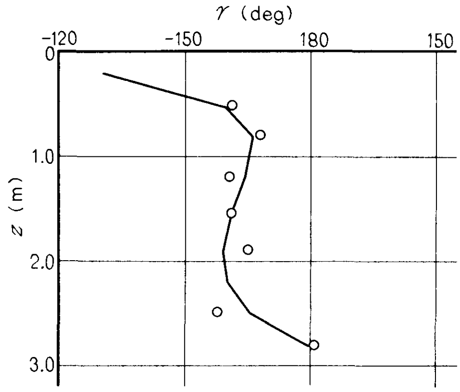
①

z m	p g/cm²	γ deg
0.21	—	—
0.51	1.4	−161
0.81	1.0	−168
1.21	2.1	−161
1.54	2.4	−161
1.89	2.3	−165
2.20	—	—

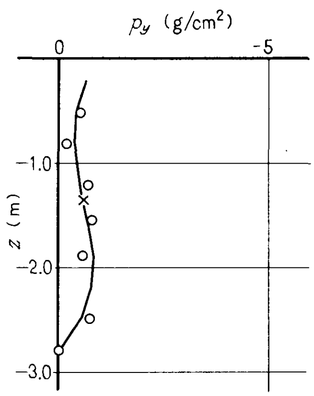
z m	p g/cm²	γ deg
2.49	1.9	−158
2.80	2.2	179
Bottom (No.6)	21.4	−137
z m	**D mm**	**λ deg**
0	0.384	−117
2.16	0.246	−103
$f=$ 4.88 Hz		



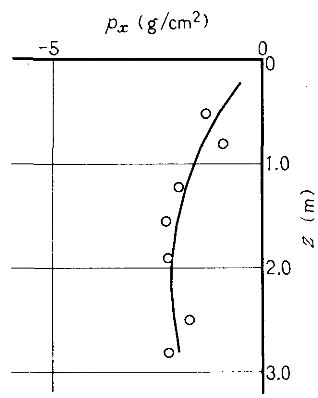
②



③



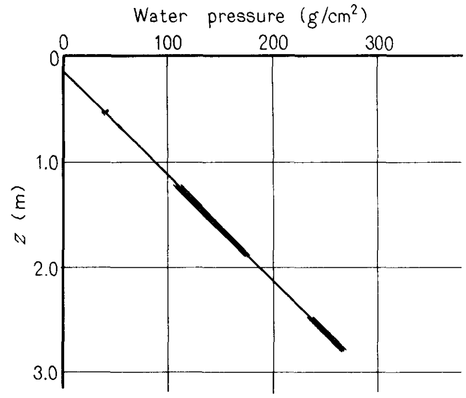
④



⑤

Fig. 39-(36)

I-5-5.40



①

z m	p g/cm²	γ deg
0.21	—	—
0.51	1.3	159
0.81	—	—
1.21	3.0	162
1.54	2.6	155
1.89	2.7	153
2.20	—	—

z m	p g/cm²	γ deg
2.49	2.4	153
2.80	2.1	174
Bottom (No.6)	25.8	175
z m	**D mm**	**λ deg**
0	0.421	−164
2.16	0.236	−147
f =	5.40	Hz

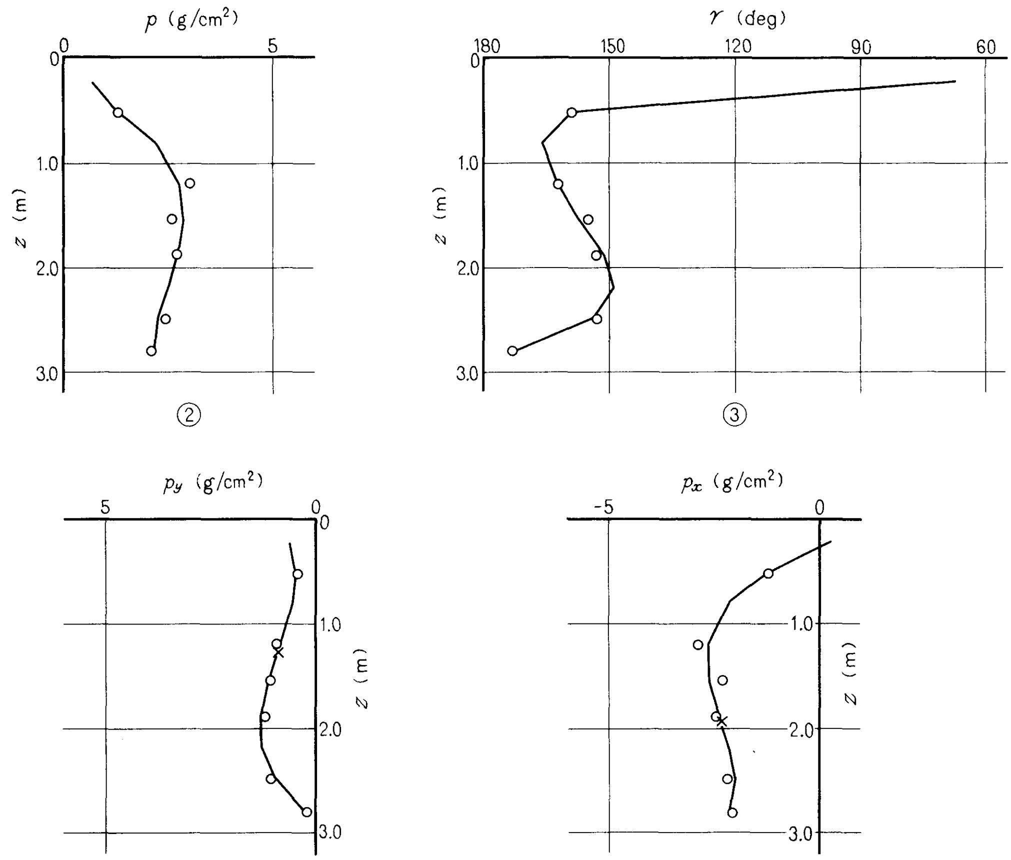
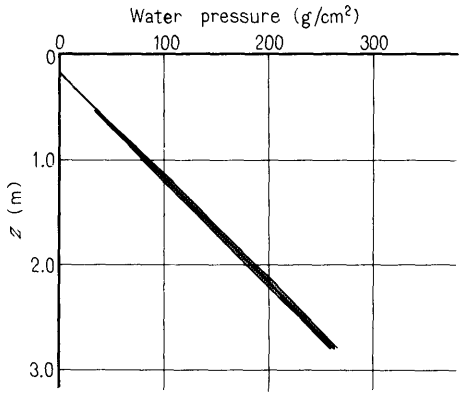


Fig. 39-(37)

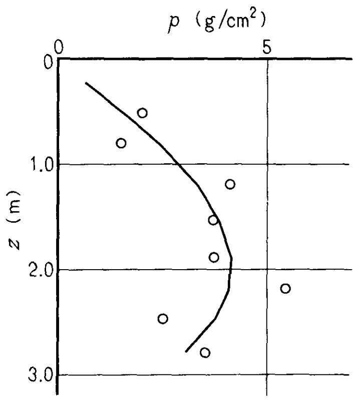
I-5-5.72



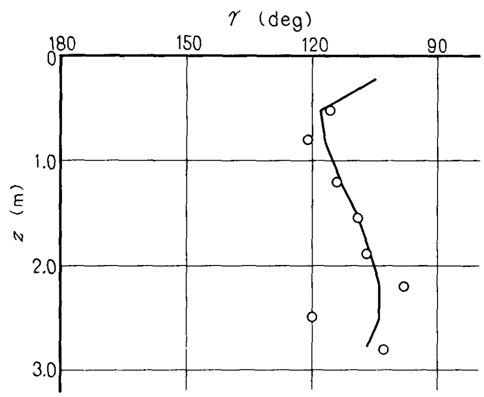
①

z m	p g/cm²	γ deg
0.21	—	—
0.51	2.0	116
0.81	1.5	121
1.21	4.1	114
1.54	3.7	109
1.89	3.7	107
2.20	5.4	98

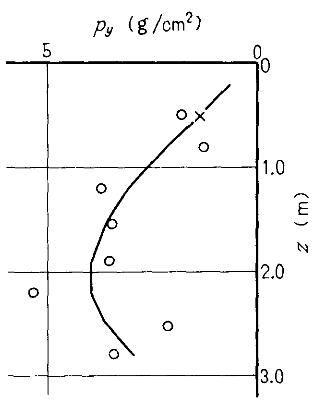
z m	p g/cm²	γ deg
2.49	2.5	120
2.80	3.5	103
Bottom (No.6)	28.9	142
z m	D mm	λ deg
0	0.513	148
2.16	0.257	159
f =	5.72	Hz



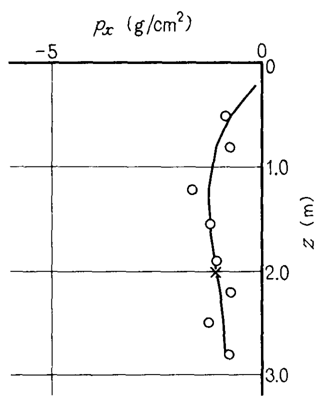
②



③



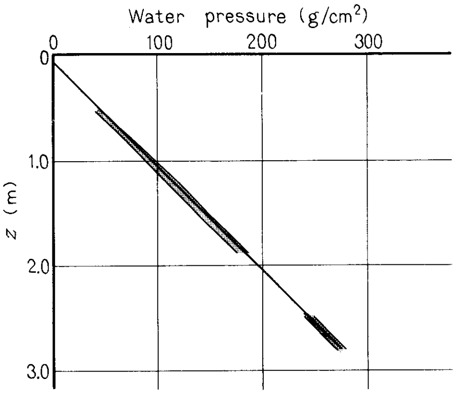
④



⑤

Fig. 39-(38)

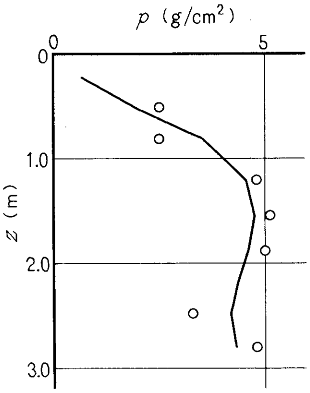
I-5-5.85



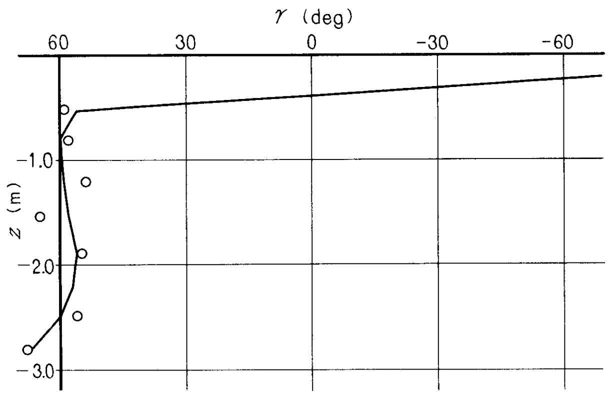
①

z m	p g/cm²	γ deg
0.21	—	—
0.51	2.5	59
0.81	2.5	58
1.21	4.8	54
1.54	5.1	65
1.89	5.0	55
2.20	—	—

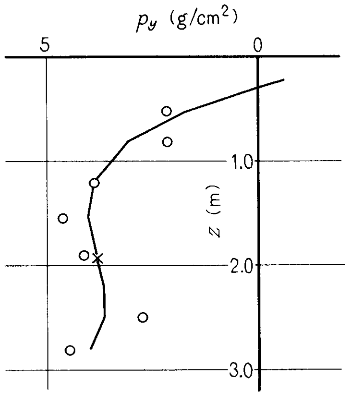
z m	p g/cm²	γ deg
2.49	3.3	56
2.80	4.8	68
Bottom (No.6)	—	—
z m	**D mm**	**λ deg**
0	0.553	91
2.16	0.173	111
f = 5.85 Hz		



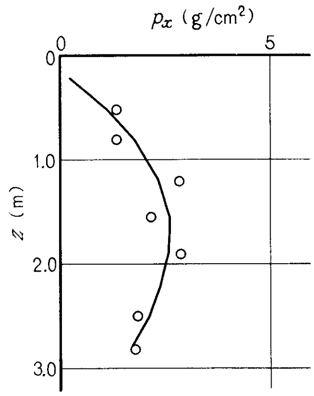
②



③



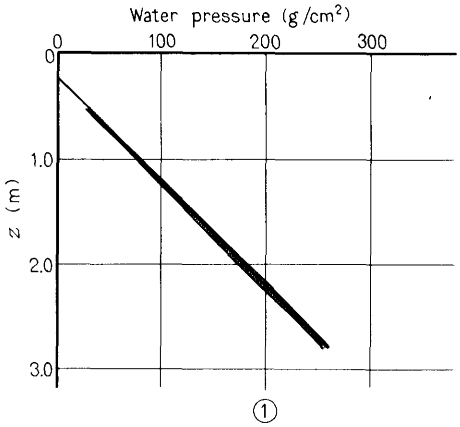
④



⑤

Fig. 39-(39)

I-5-5.93



z m	p g/cm²	γ deg
0.21	—	—
0.51	1.9	121
0.81	1.9	107
1.21	3.6	113
1.54	3.4	117
1.89	3.7	109
2.20	5.2	111

z m	p g/cm²	γ deg
2.49	3.8	109
2.80	4.2	99
Bottom (No.6)	31.2	138
z m	**D mm**	**λ deg**
0	0.565	150
2.16	0.270	163
f =	5.93	Hz

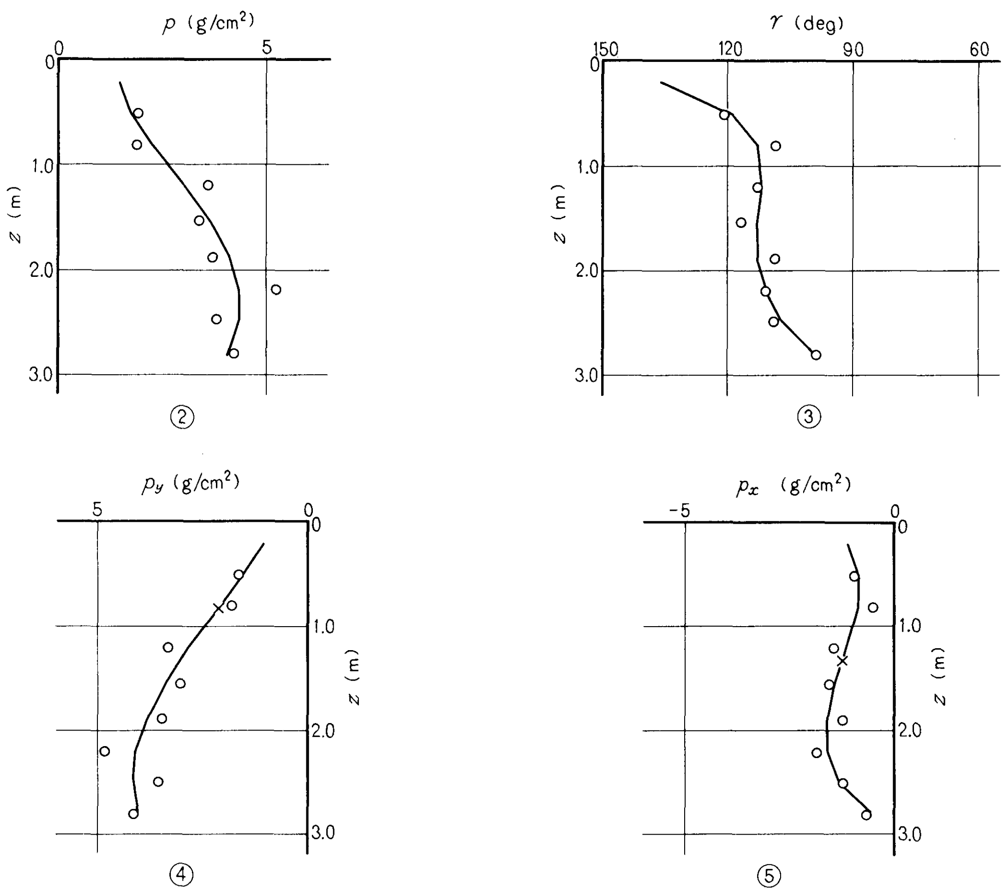
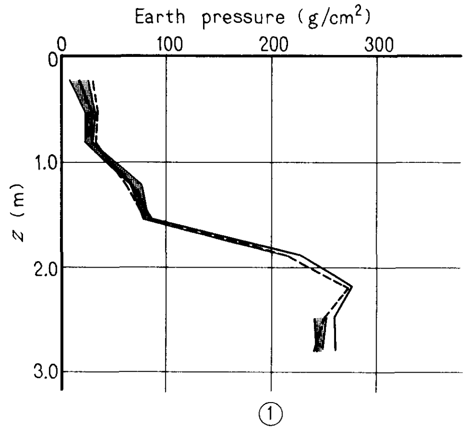


Fig. 39-(40)

II-1-5.53



z m	p g/cm²	γ deg
0.21	8.5	−176
0.51	4.7	175
0.81	3.0	174
1.21	4.5	177
1.54	3.0	−177
1.89	4.2	−179
2.20	—	—

z m	p g/cm²	γ deg
2.49	5.7	−173
2.80	3.0	12
Bottom (No.6)	23.4	4
z m	**D mm**	**λ deg**
0	0.0946	10
2.16	0.0276	0
f =	5.53	Hz

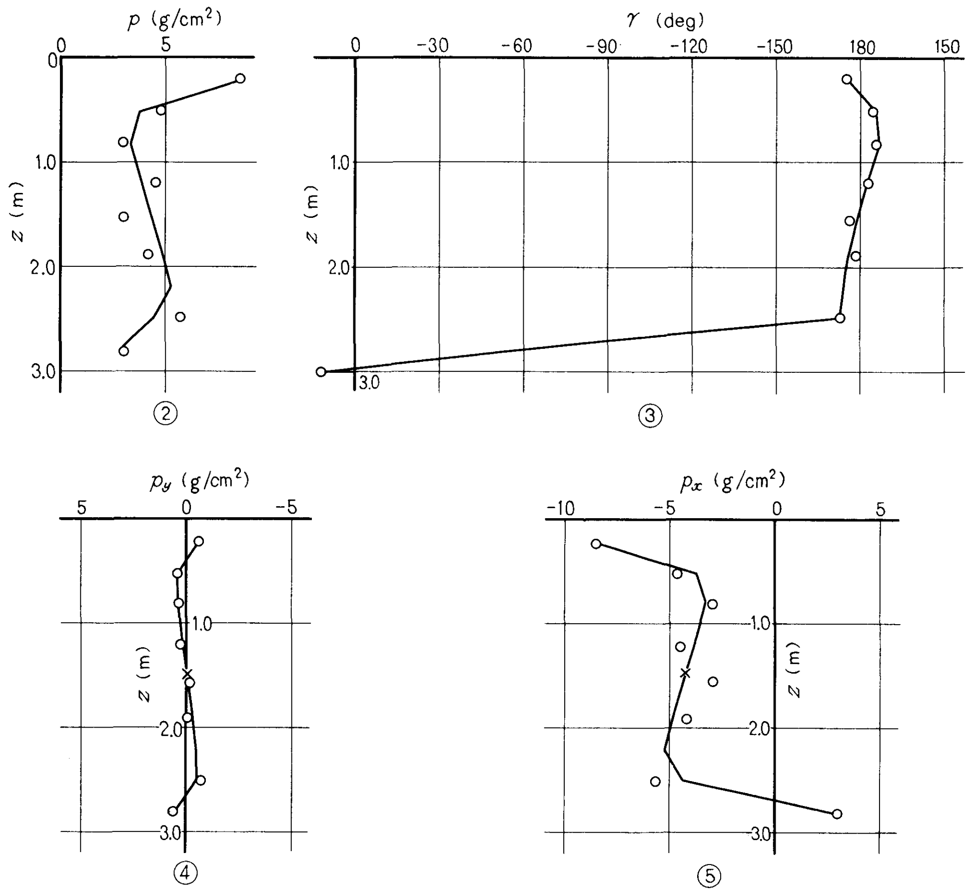
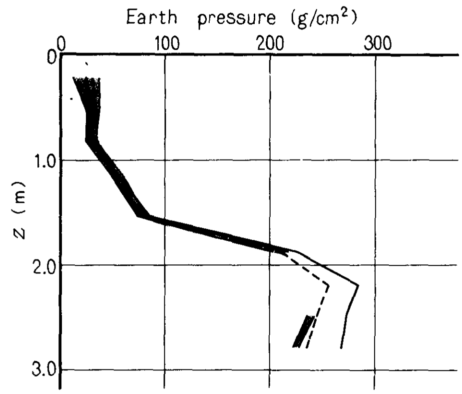


Fig. 39-(41) Vertical distributions of earth pressures
○ : Observed values —— : Empirical formula

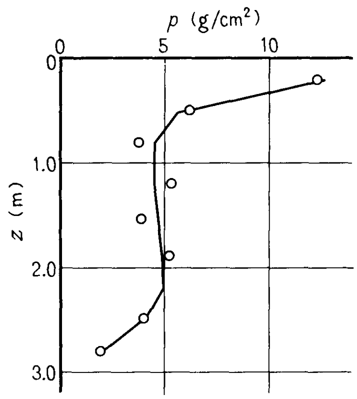
II-1-6.83



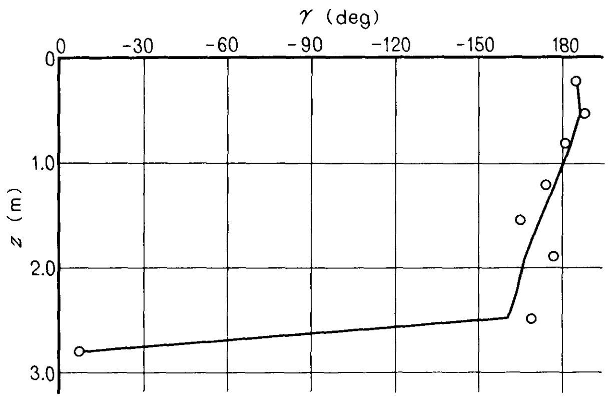
①

z m	p g/cm²	γ deg
0.21	12.5	175
0.51	6.1	172
0.81	3.8	179
1.21	5.3	−174
1.54	3.9	−165
1.89	5.2	−177
2.20	—	—

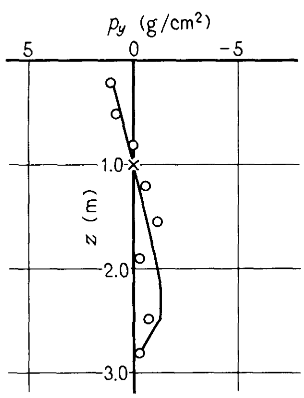
z m	p g/cm²	γ deg
2.49	4.0	−169
2.80	2.0	−7
Bottom (No.6)	—	—
z m	**D mm**	**λ deg**
0	0.173	−4
2.16	0.0557	−20
f = 6.83 Hz		



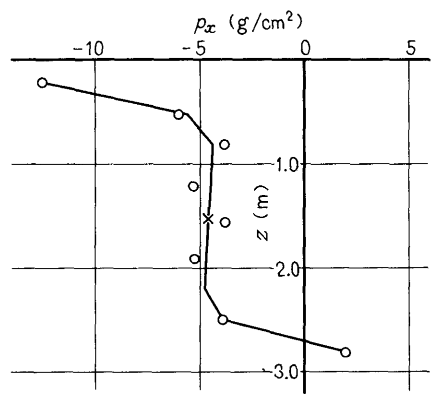
②



③



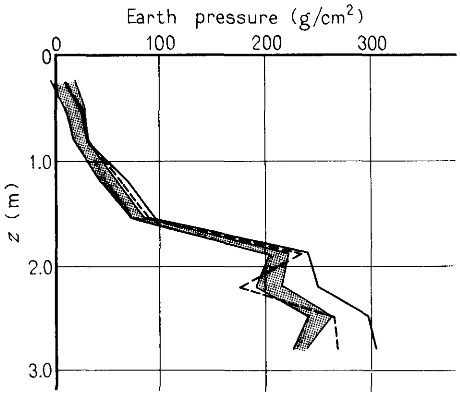
④



⑤

Fig. 39-(42)

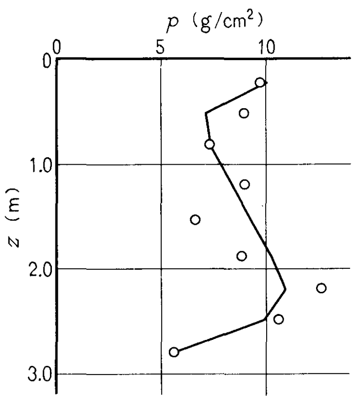
II-1-8.32



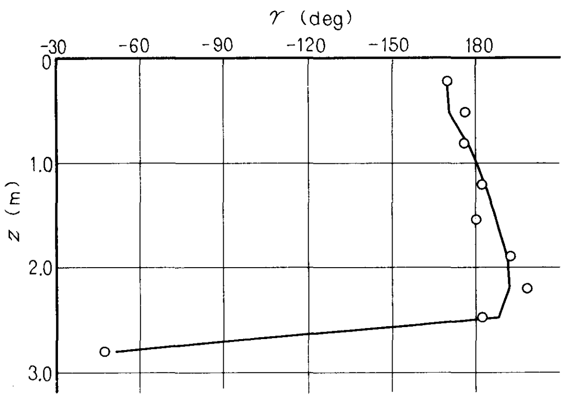
①

z m	p g/cm²	γ deg
0.21	9.7	−170
0.51	8.9	−176
0.81	7.3	−176
1.21	8.9	178
1.54	6.6	180
1.89	8.8	168
2.20	12.6	162

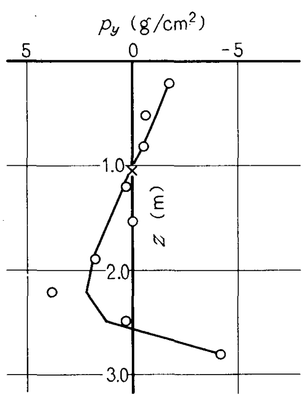
z m	p g/cm²	γ deg
2.49	10.5	178
2.80	5.6	−47
Bottom (No.6)	65.6	−25
z m	**D mm**	**λ deg**
0	0.439	−29
2.16	0.134	−45
$f=$	8.32	Hz



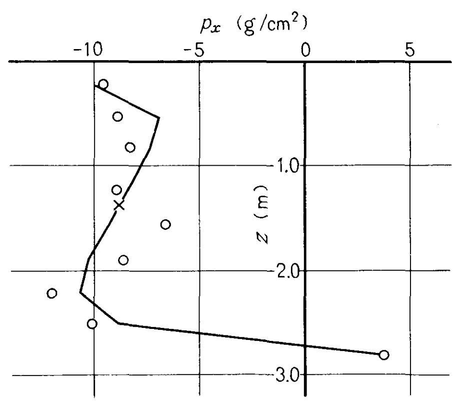
②



③



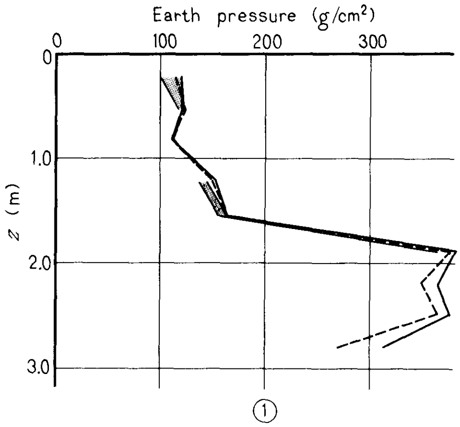
④



⑤

Fig. 39-(43)

II-2-5.15



z m	p g/cm²	γ deg
0.21	9.4	175
0.51	3.2	−176
0.81	—	—
1.21	2.8	167
1.54	2.6	−169
1.89	2.6	171
2.20	—	—

z m	p g/cm²	γ deg
2.49	—	—
2.80	—	—
Bottom (No.6)	28.9	−13
z m	D mm	λ deg
0	0.0784	11
2.16	0.0289	− 6
f =	5.15	Hz

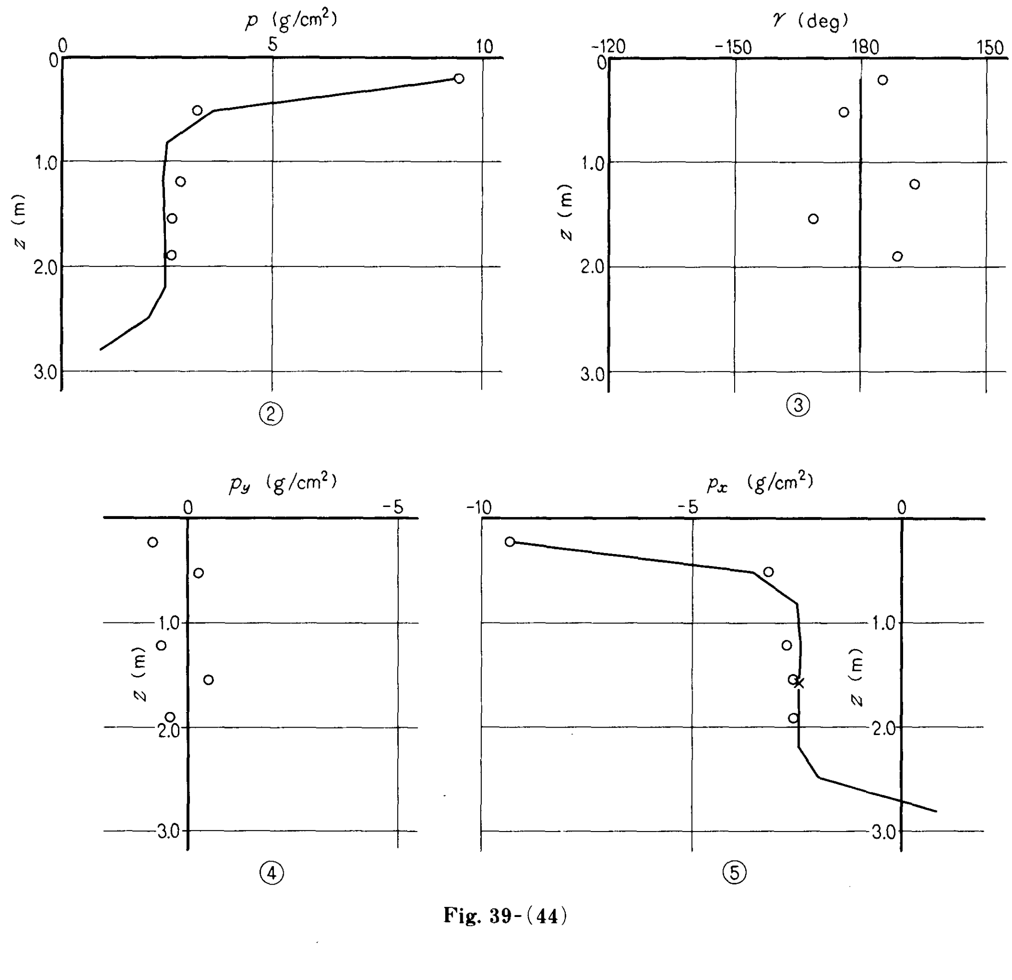
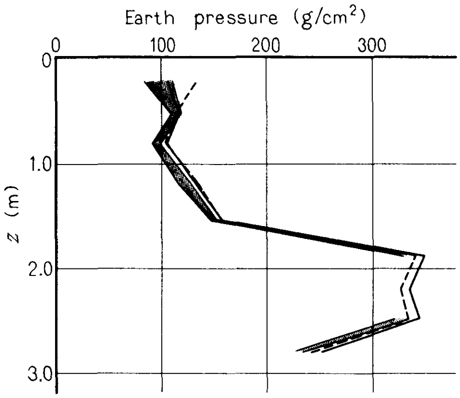


Fig. 39-(44)

II-2-5.40

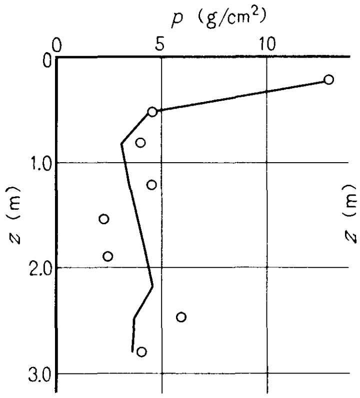


①

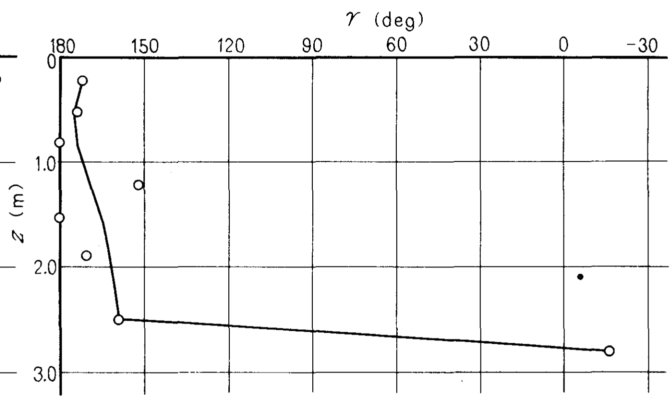
z m	p g/cm²	γ deg
0.21	12.9	172
0.51	4.5	174
0.81	4.0	−180
1.21	4.5	152
1.54	2.2	180
1.89	2.4	170
2.20	—	—

z m	p g/cm²	γ deg
2.49	5.9	159
2.80	4.0	−16
Bottom (No.6)	17.4	−24

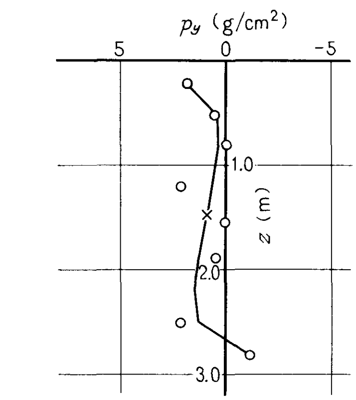
z m	D mm	λ deg
0	0.0815	− 7
2.16	0.0275	−22
f =	5.40	Hz



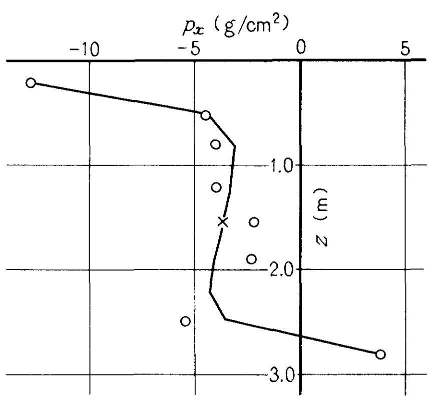
②



③



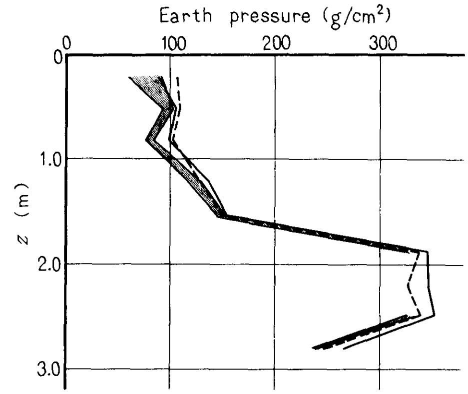
④



⑤

Fig. 39-(45)

II-2-5.91

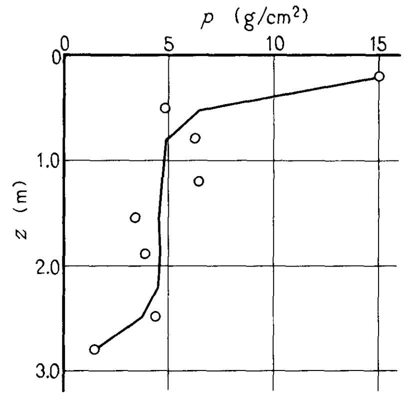


①

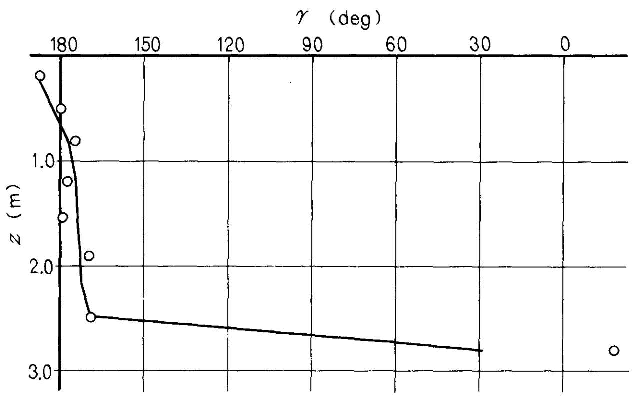
z m	p g/cm²	γ deg
0.21	15.1	−173
0.51	4.8	−180
0.81	6.2	175
1.21	6.4	177
1.54	3.4	−179
1.89	3.9	170
2.20	—	—

z m	p g/cm²	γ deg
2.49	4.3	169
2.80	1.5	−18
Bottom (No.6)	43.6	−19

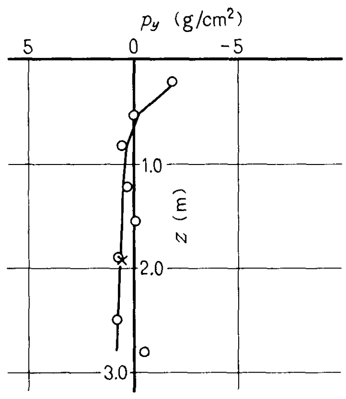
z m	D mm	λ deg
0	0.119	−11
2.16	0.0414	−27
f = 5.91 Hz		



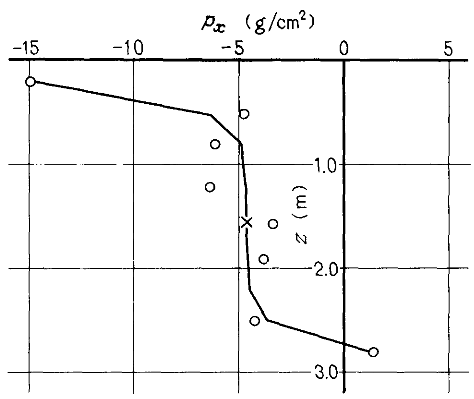
②



③



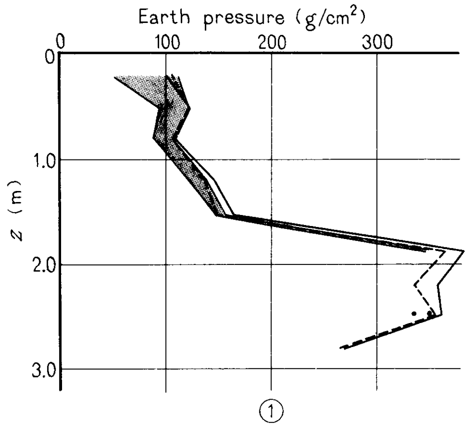
④



⑤

Fig. 39-(46)

II-2-6.73



z m	p g/cm²	γ deg
0.21	32.3	−146
0.51	14.5	−142
0.81	9.0	−156
1.21	7.2	164
1.54	4.8	172
1.89	6.0	156
2.20	——	——

z m	p g/cm²	γ deg
2.49	6.8	130
2.80	——	——
Bottom (No.6)	53.5	−76
z m	**D mm**	**λ deg**
0	0.140	−57
2.16	0.0502	−86
f =	6.73	Hz

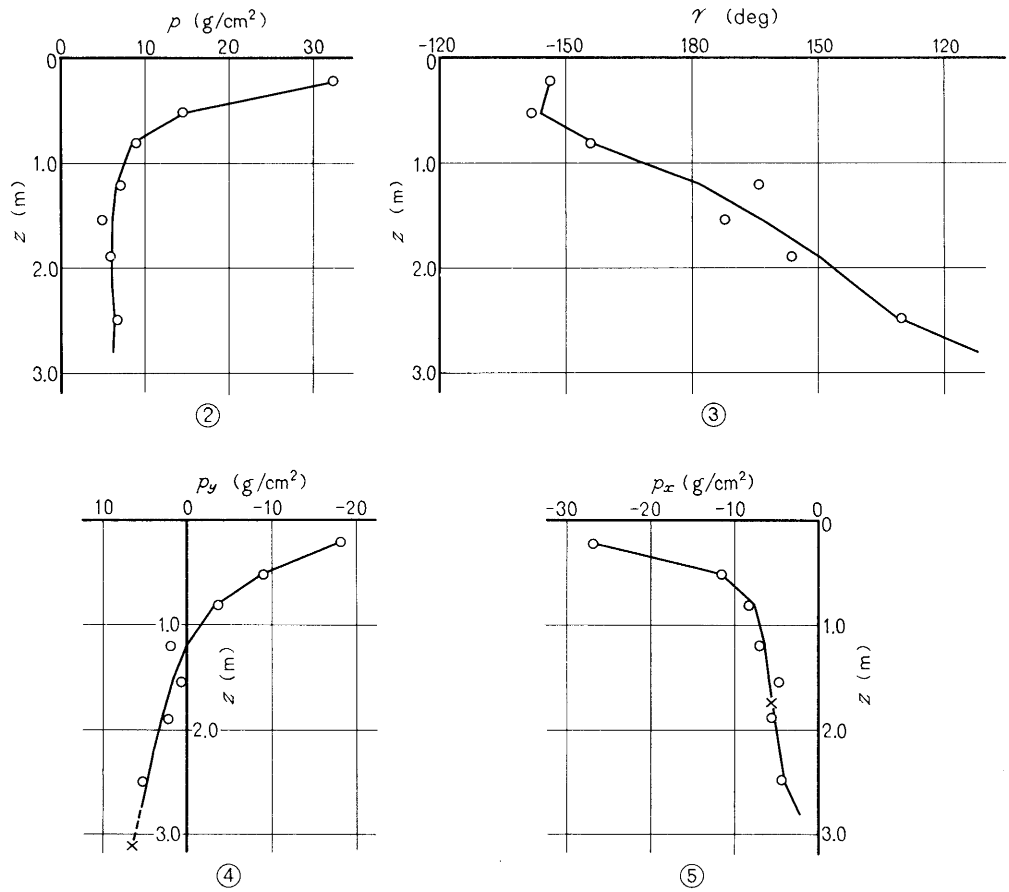
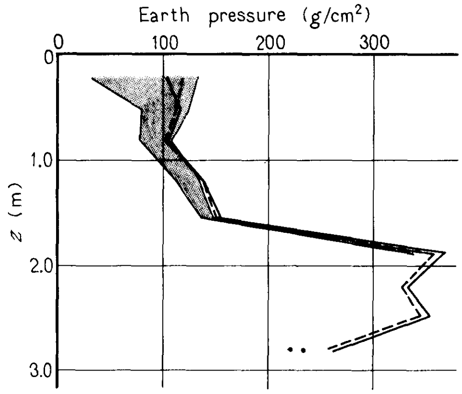


Fig. 39-(47)

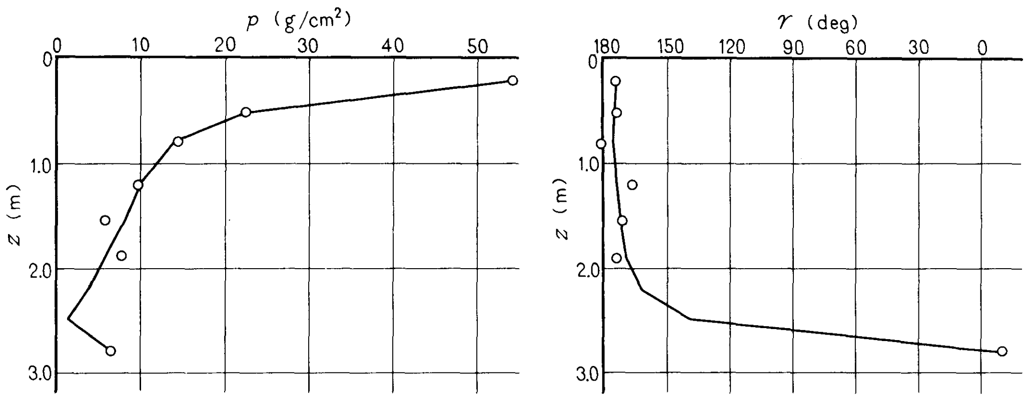
II-2-8.38



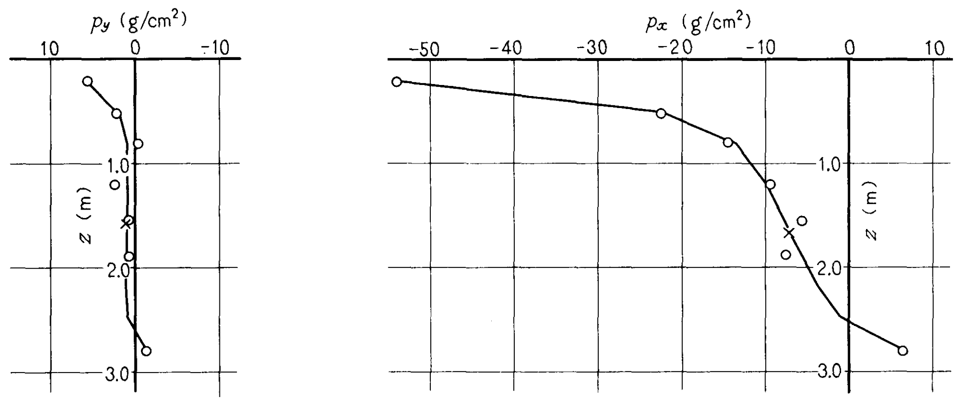
①

z m	p g/cm²	γ deg
0.21	54.1	174
0.51	22.5	174
0.81	14.4	−179
1.21	9.7	166
1.54	5.7	171
1.89	7.6	173
2.20	—	—

z m	p g/cm²	γ deg
2.49	—	—
2.80	6.5	−10
Bottom (No.6)	9.7	−29
z m	**D mm**	**λ deg**
0	0.135	− 3
2.16	0.0312	−10
f =	8.38	Hz



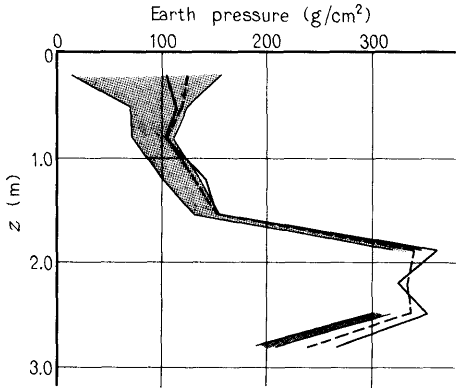
② ③



④ ⑤

Fig. 39-(48)

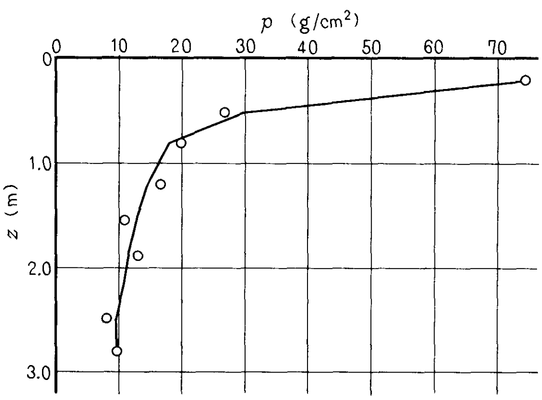
II-2-10.4



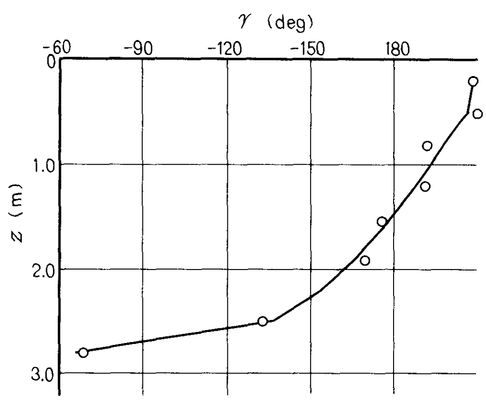
①

z m	p g/cm²	γ deg
0.21	74.5	152
0.51	26.8	150
0.81	19.8	168
1.21	16.7	169
1.54	11.0	−176
1.89	12.9	−169
2.20	—	—

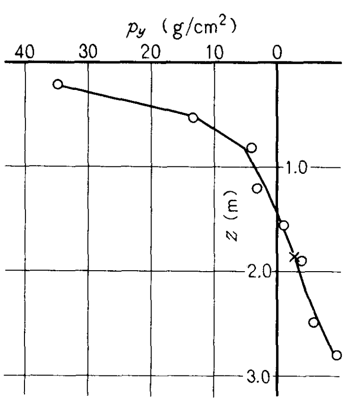
z m	p g/cm²	γ deg
2.49	8.0	−133
2.80	9.8	−69
Bottom (No.6)	69.6	−11
z m	**D mm**	**λ deg**
0	0.407	−25
2.16	0.134	−39
f = 10.4 Hz		



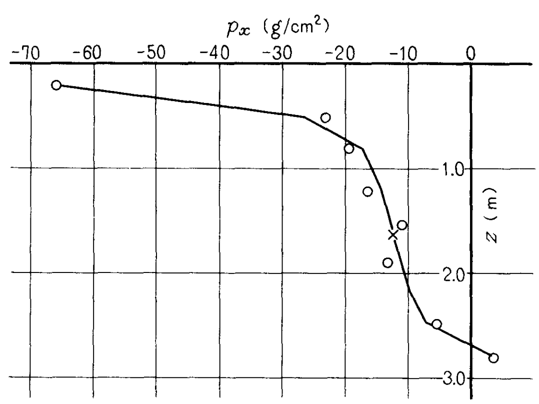
②



③



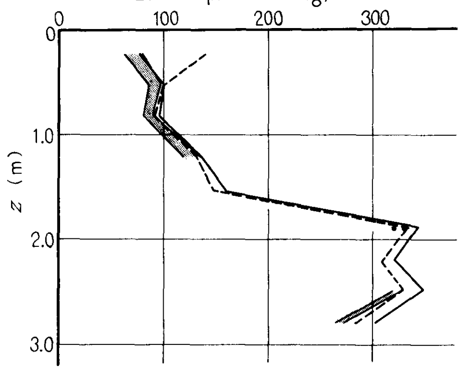
④



⑤

Fig. 39-(49)

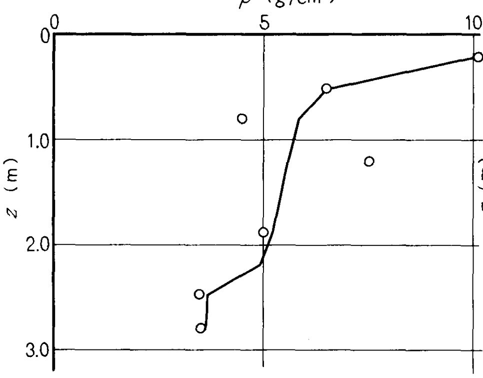
II-3-6.07



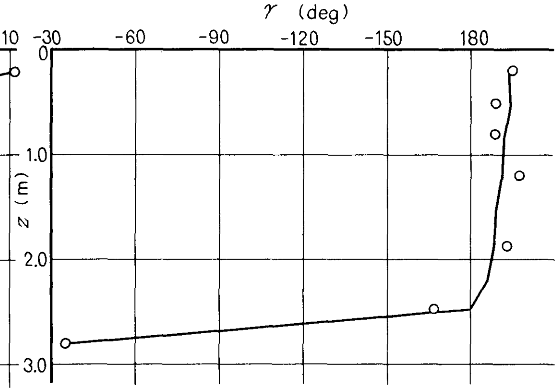
①

z m	p g/cm²	γ deg
0.21	10.1	165
0.51	6.5	171
0.81	4.5	171
1.21	7.5	163
1.54	—	—
1.89	5.0	167
2.20	—	—

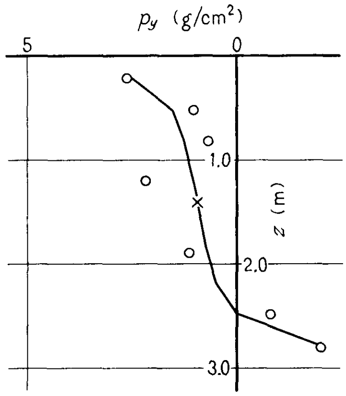
z m	p g/cm²	γ deg
2.49	3.5	−167
2.80	3.5	−35
Bottom (No.6)	29.1	−18
z m	D mm	λ deg
0	0.115	− 6
2.16	0.0376	−18
f =	6.07	Hz



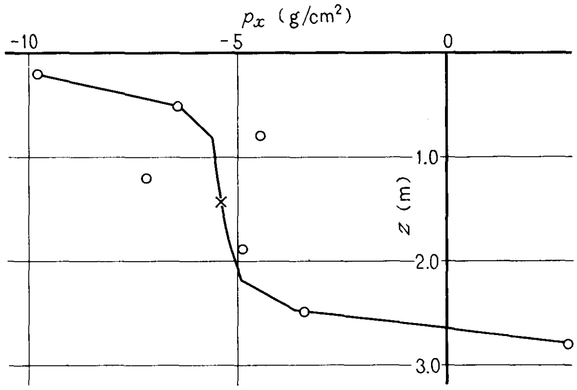
②



③



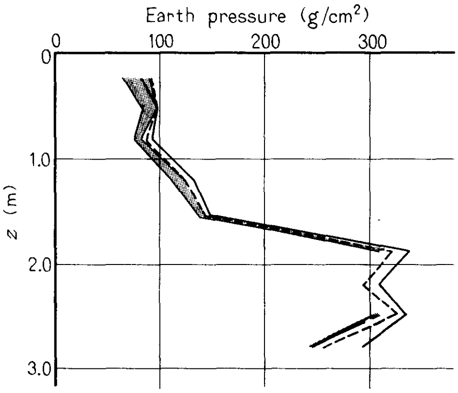
④



⑤

Fig. 39-(50)

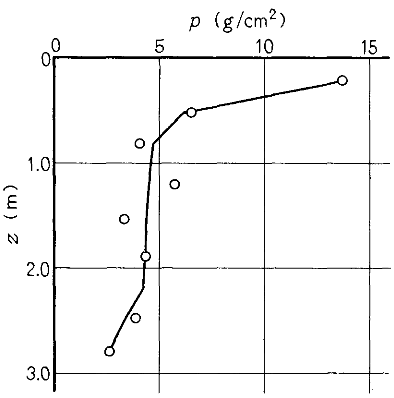
II-3-6.54



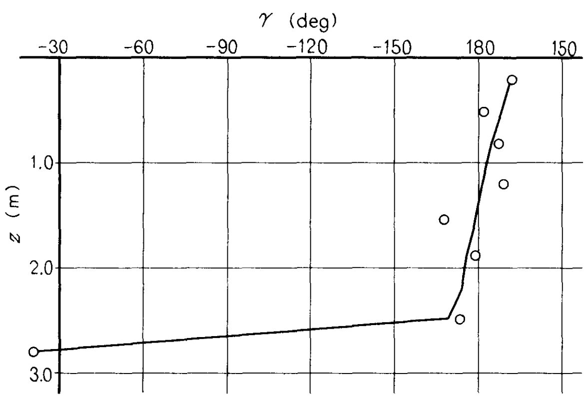
①

z m	p g/cm²	γ deg
0.21	13.7	168
0.51	6.5	178
0.81	4.1	173
1.21	5.7	171
1.54	3.3	−168
1.89	4.3	−179
2.20	—	—

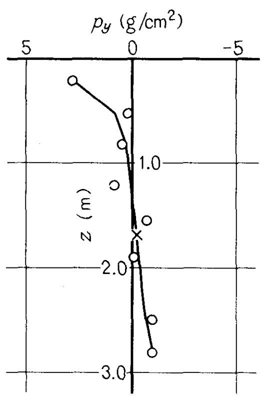
z m	p g/cm²	γ deg
2.49	3.8	−166
2.80	2.6	−21
Bottom (No.6)	—	—
z m	**D mm**	**λ deg**
0	0.121	−12
2.16	0.0375	−25
f =	6.54	Hz



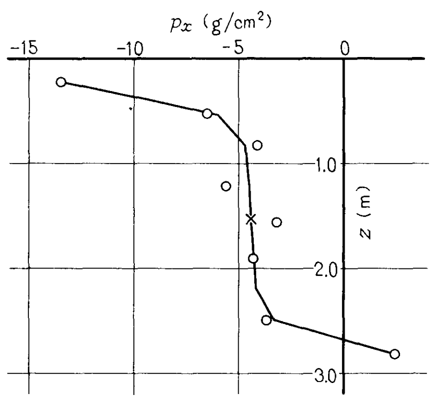
②



③



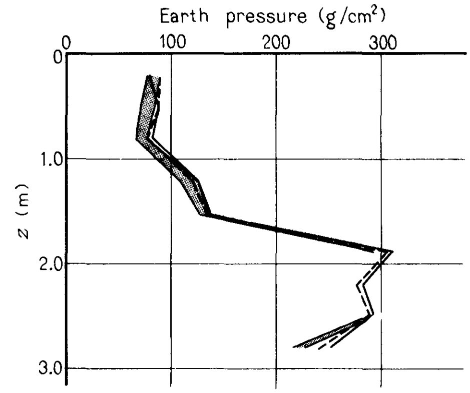
④



⑤

Fig. 39-(51)

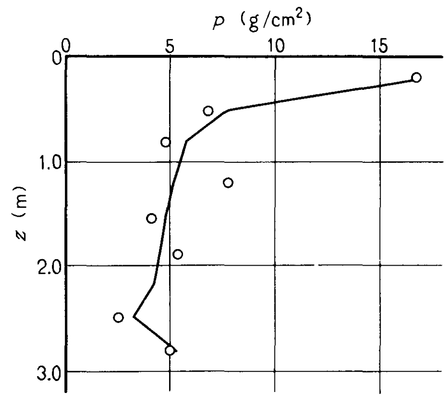
II-3-7.41



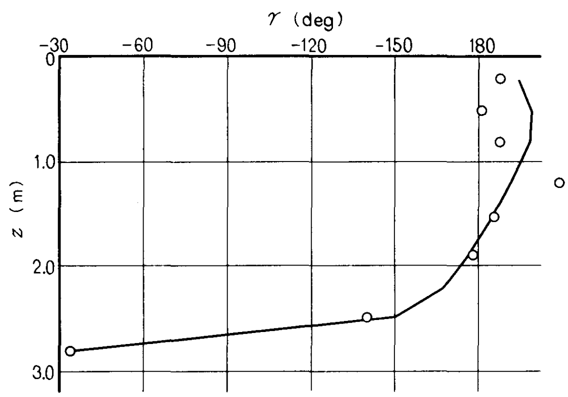
①

z m	p g/cm²	γ deg
0.21	16.7	172
0.51	6.8	179
0.81	4.8	172
1.21	7.7	151
1.54	4.1	174
1.89	5.3	−178
2.20	—	—

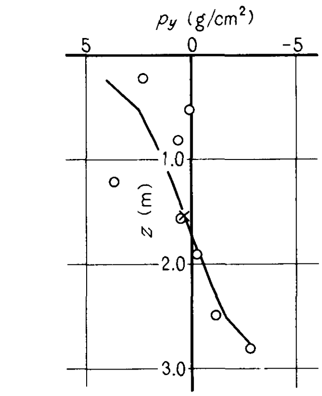
z m	p g/cm²	γ deg
2.49	2.5	−140
2.80	5.0	−34
Bottom (No.6)	46.8	−21
z m	D mm	λ deg
0	0.195	−15
2.16	0.0633	−28
f =	7.41	Hz



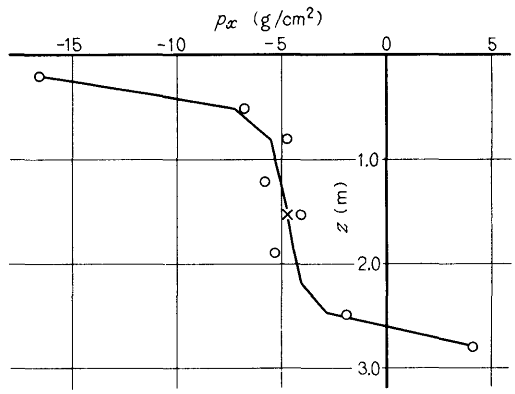
②



③



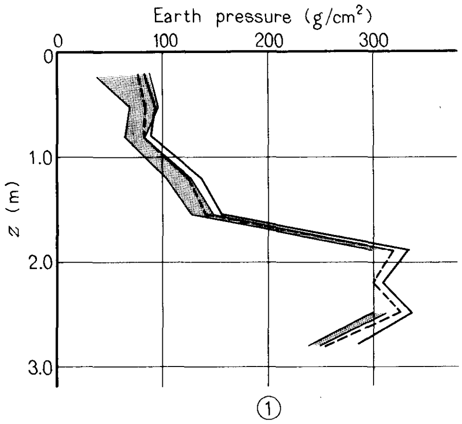
④



⑤

Fig. 39-(52)

II-3-8.40



z m	p g/cm²	γ deg
0.21	25.5	−164
0.51	13.3	−162
0.81	8.7	−171
1.21	11.7	169
1.54	8.8	175
1.89	9.5	175
2.20	—	—

z m	p g/cm²	γ deg
2.49	6.2	−179
2.80	4.9	−78
Bottom (No.6)	59.0	−52
z m	D mm	λ deg
0	0.287	−47
2.16	0.115	− 7
f =	8.40	Hz

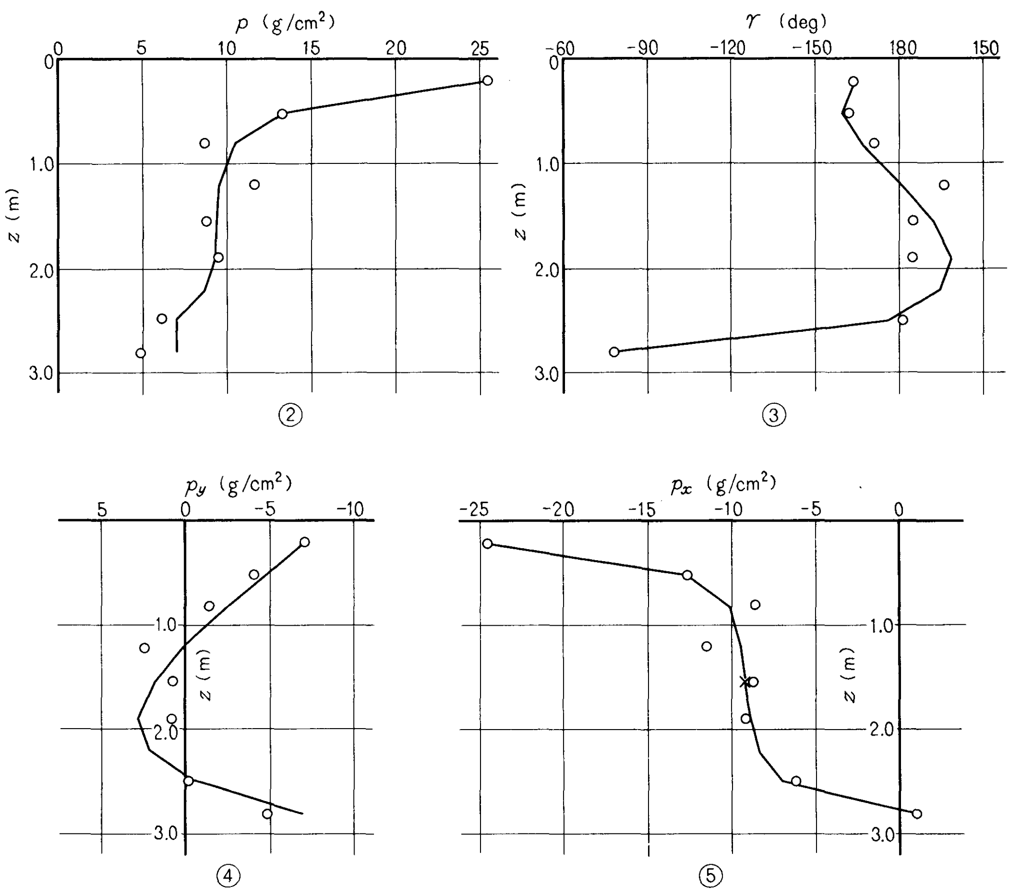
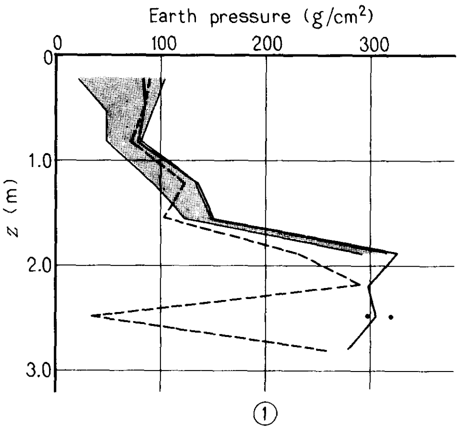


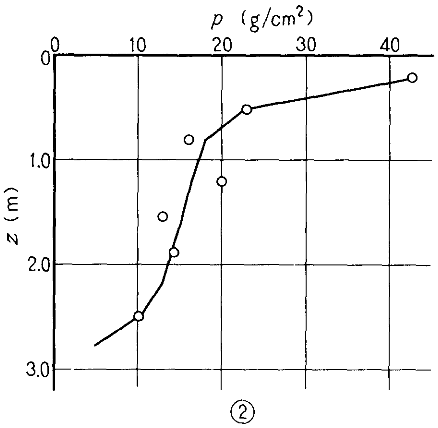
Fig. 39-(53)

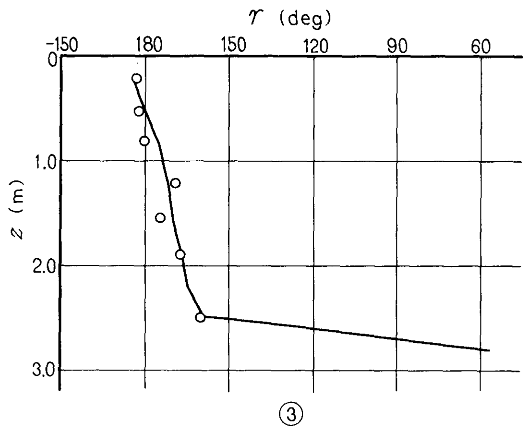
II-3-9.63

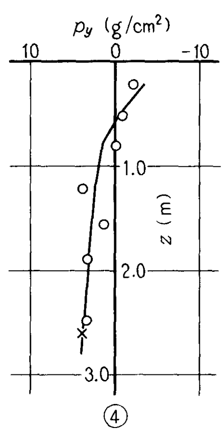


z m	p g/cm²	γ deg
0.21	42.3	−177
0.51	22.9	−178
0.81	16.0	180
1.21	19.9	169
1.54	13.0	174
1.89	14.2	167
2.20	—	—

z m	p g/cm²	γ deg
2.49	10.4	160
2.80	—	—
Bottom (No.6)	39.8	−77
z m	D mm	λ deg
0	0.193	−50
2.16	0.069	−80
f =	9.63	Hz







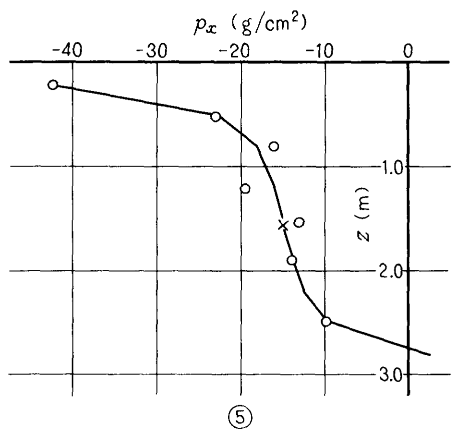
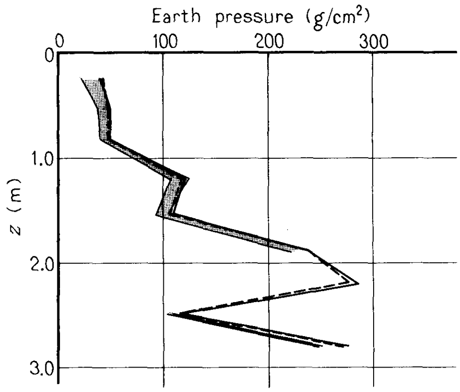


Fig. 39-(54)

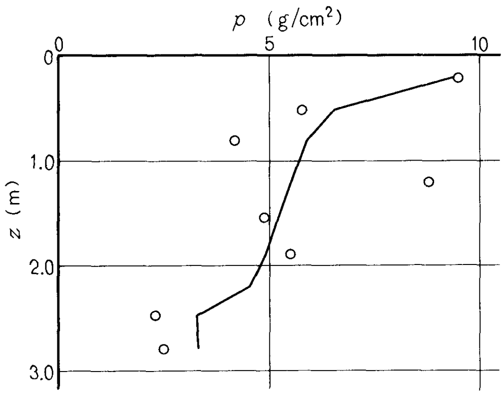
II-4-6.07



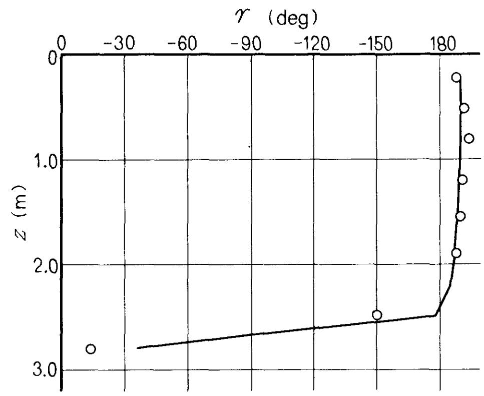
①

z m	p g/cm²	γ deg
0.21	9.5	171
0.51	5.8	168
0.81	4.2	166
1.21	8.8	169
1.54	4.9	170
1.89	5.5	172
2.20	—	—

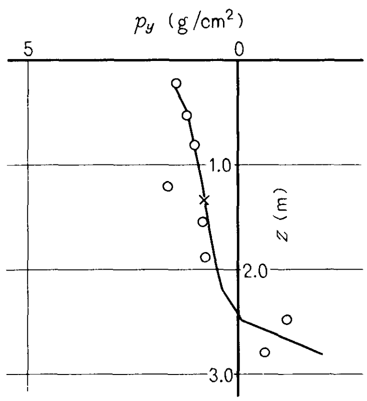
z m	p g/cm²	γ deg
2.49	2.3	−150
2.80	2.5	−14
Bottom (No.6)	21.8	− 2
z m	**D mm**	**λ deg**
0	0.138	− 2
2.16	0.0443	−11
f =	6.07	Hz



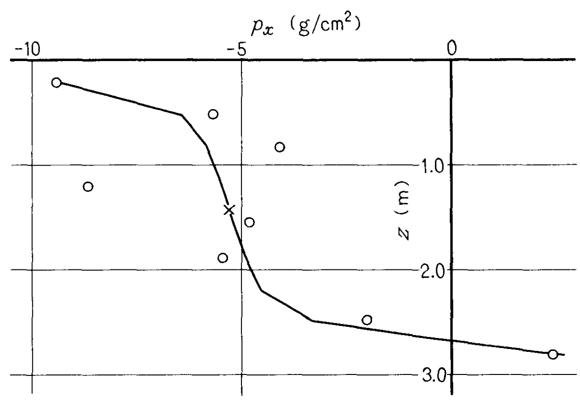
②



③



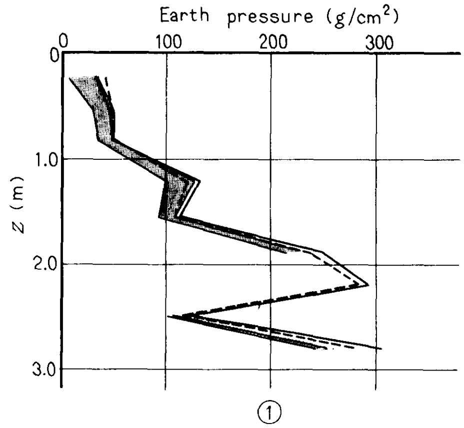
④



⑤

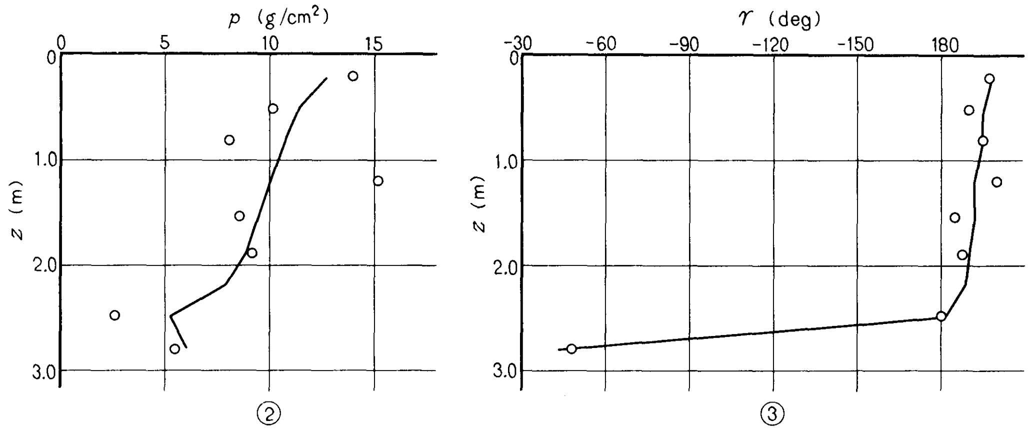
Fig. 39-(55)

II-4-8.0



z m	p g/cm²	γ deg
0.21	13.9	163
0.51	10.1	170
0.81	8.0	165
1.21	15.1	160
1.54	8.6	175
1.89	9.1	172
2.20	—	—

z m	p g/cm²	γ deg
2.49	2.6	180
2.80	5.5	−48
Bottom (No.6)	55.1	−21
z m	**D mm**	**λ deg**
0	0.354	−22
2.16	0.114	−37
f =	8.0	Hz



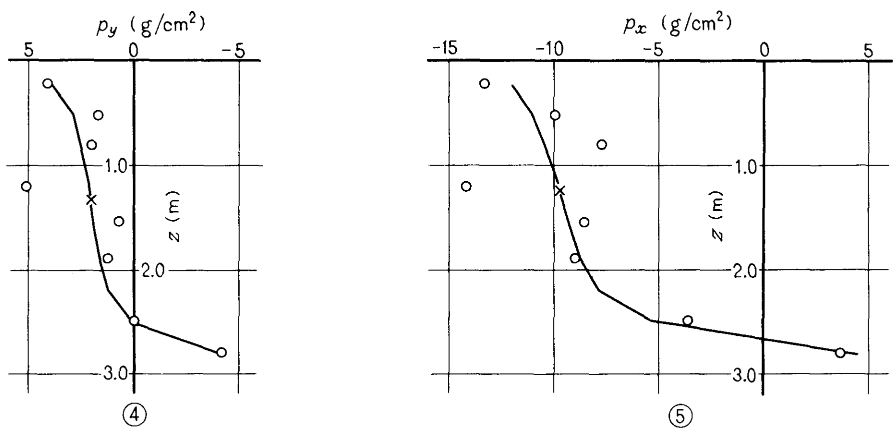
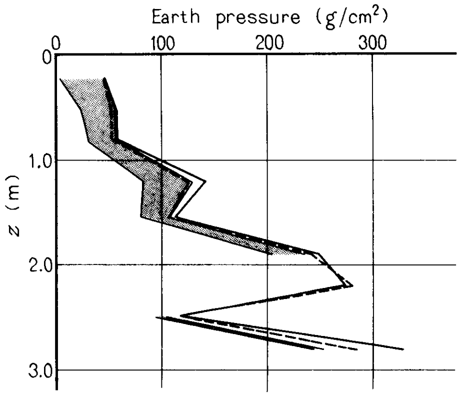


Fig. 39-(56)

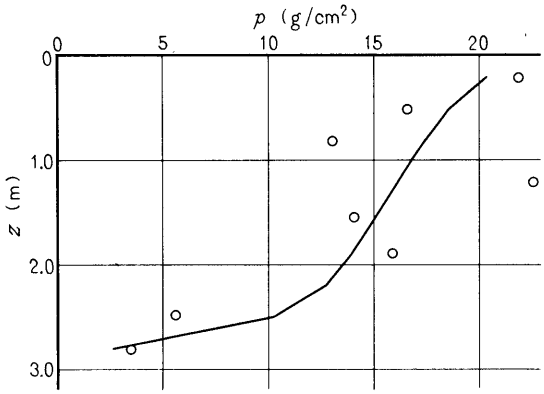
II-4-10.1



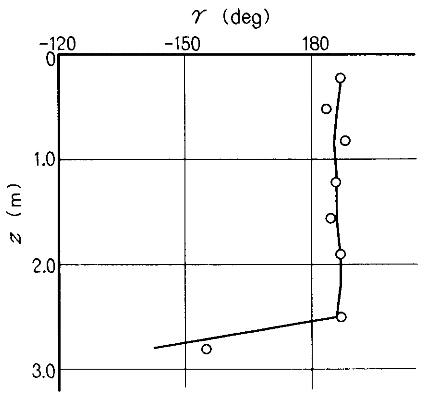
①

z m	p g/cm²	γ deg
0.21	21.9	173
0.51	16.6	176
0.81	13.0	172
1.21	22.6	174
1.54	14.1	175
1.89	15.9	173
2.20	—	—

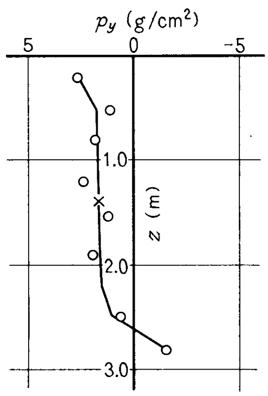
z m	p g/cm²	γ deg
2.49	5.6	173
2.80	3.5	−155
Bottom (No.6)	63.6	−59
z m	**D mm**	**λ deg**
0	0.459	−58
2.16	0.166	−81
f =	10.1	Hz



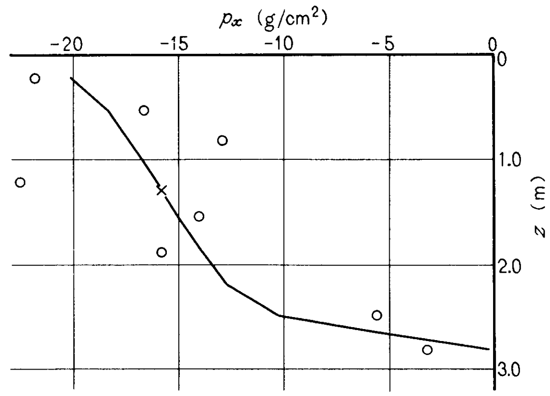
②



③



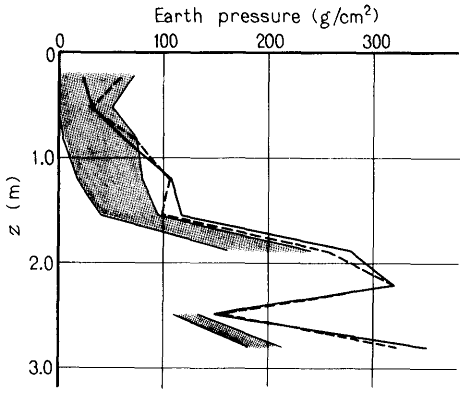
④



⑤

Fig. 39-(57)

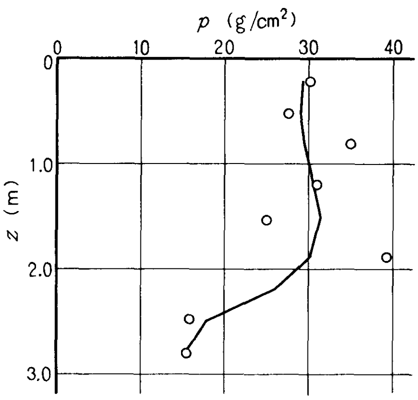
II-4-14.0



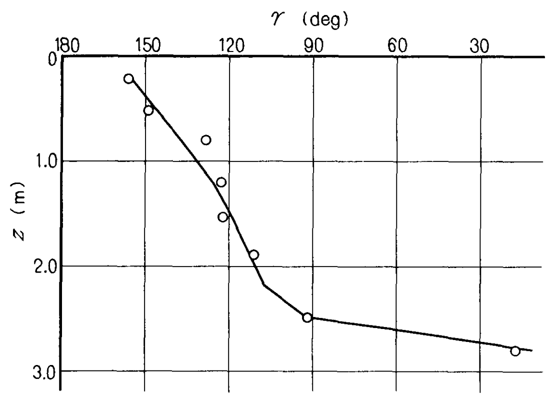
①

z m	p g/cm²	γ deg
0.21	30.0	156
0.51	27.5	149
0.81	35.0	128
1.21	30.9	123
1.54	25.0	122
1.89	39.3	111
2.20	—	—

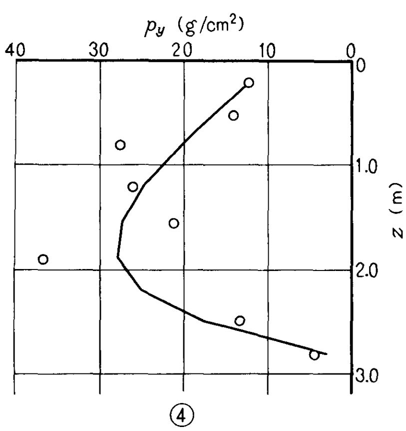
z m	p g/cm²	γ deg
2.49	13.3	92
2.80	15.3	17
Bottom (No.6)	98.0	−81
z m	**D mm**	**λ deg**
0	0.734	−90
2.16	0.257	−124
f =	14.0	Hz



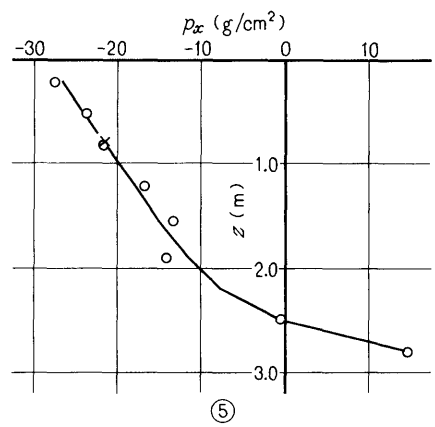
②



③



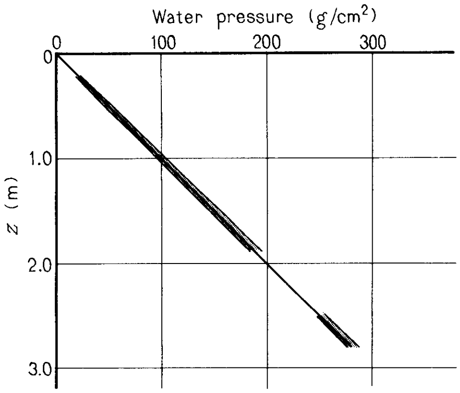
④



⑤

Fig. 39-(58)

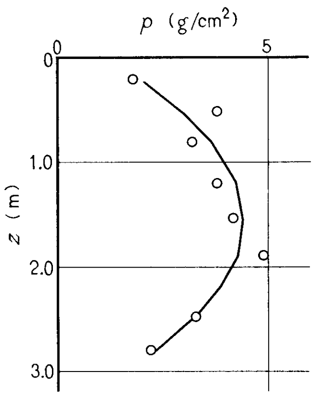
II-5-4.03



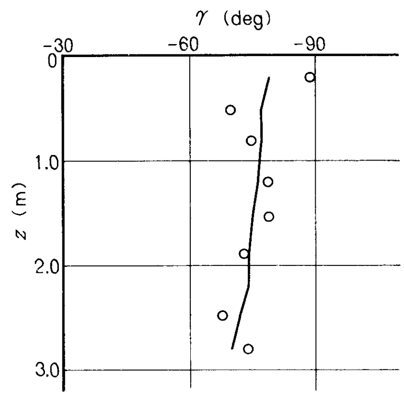
①

z m	p g/cm²	γ deg
0.21	1.8	−89
0.51	3.8	−70
0.81	3.2	−75
1.21	3.8	−79
1.54	4.2	−79
1.89	4.9	−73
2.20	—	—

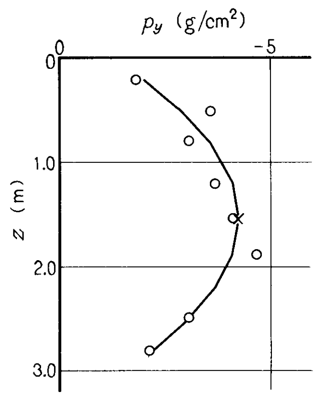
z m	p g/cm²	γ deg
2.49	3.3	−68
2.80	2.2	−74
Bottom (No.6)	31.9	0
z m	D mm	λ deg
0	1.19	−49
2.16	0.388	−53
f =	4.03	Hz



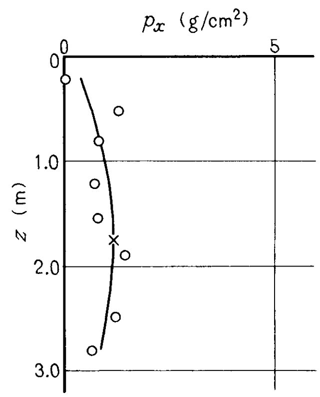
②



③



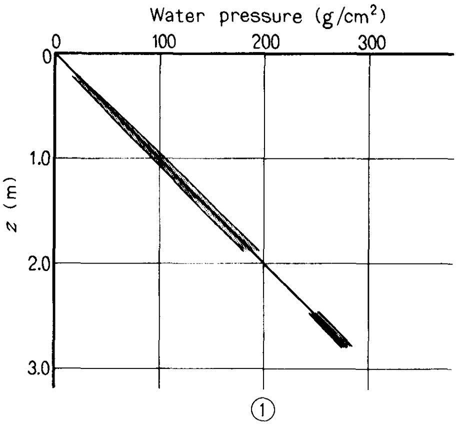
④



⑤

Fig. 39-(59) Vertical distributions of water pressures
○: Observed values —: Empirical formula

II-5-4.50



z m	p g/cm²	γ deg
0.21	2.6	−135
0.51	3.9	−126
0.81	5.4	−128
1.21	5.8	−125
1.54	6.7	−125
1.89	6.9	−126
2.20	—	—

z m	p g/cm²	γ deg
2.49	4.0	−136
2.80	4.8	−121
Bottom (No.6)	36.2	−41
z m	**D mm**	**λ deg**
0	1.35	−99
2.16	0.450	−109
f =	4.50	Hz

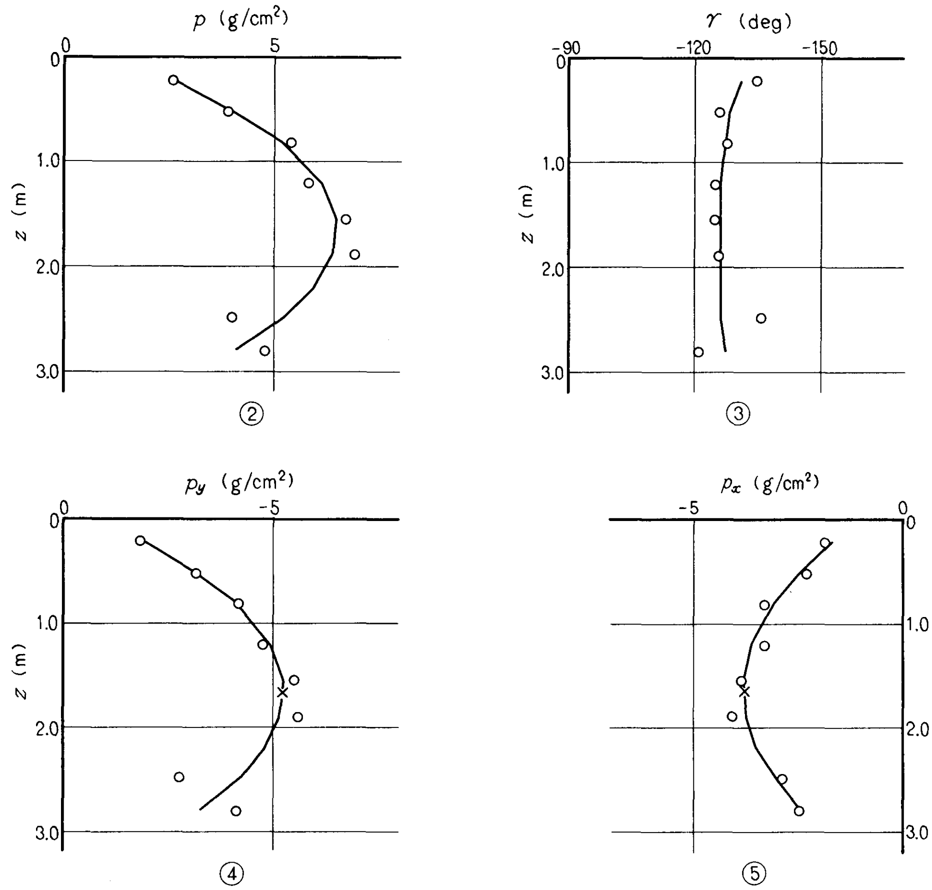
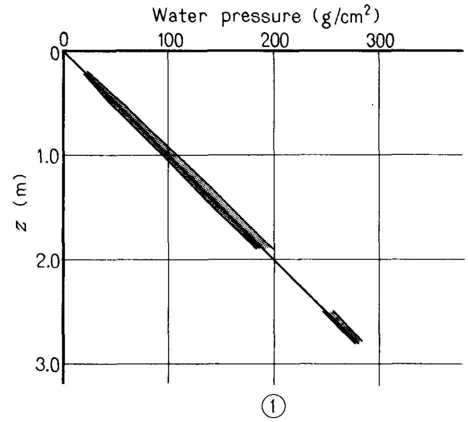


Fig. 39-(60)

II-5-5.02



z m	p g/cm²	γ deg
0.21	3.0	−141
0.51	5.3	−136
0.81	6.3	−128
1.21	7.2	−131
1.54	7.1	−128
1.89	7.7	−134
2.20	—	—

z m	p g/cm²	γ deg
2.49	4.7	−139
2.80	4.2	−148
Bottom (No.6)	36.5	−67
z m	**D mm**	**λ deg**
0	1.16	−109
2.16	0.394	−117
f =	5.02	Hz

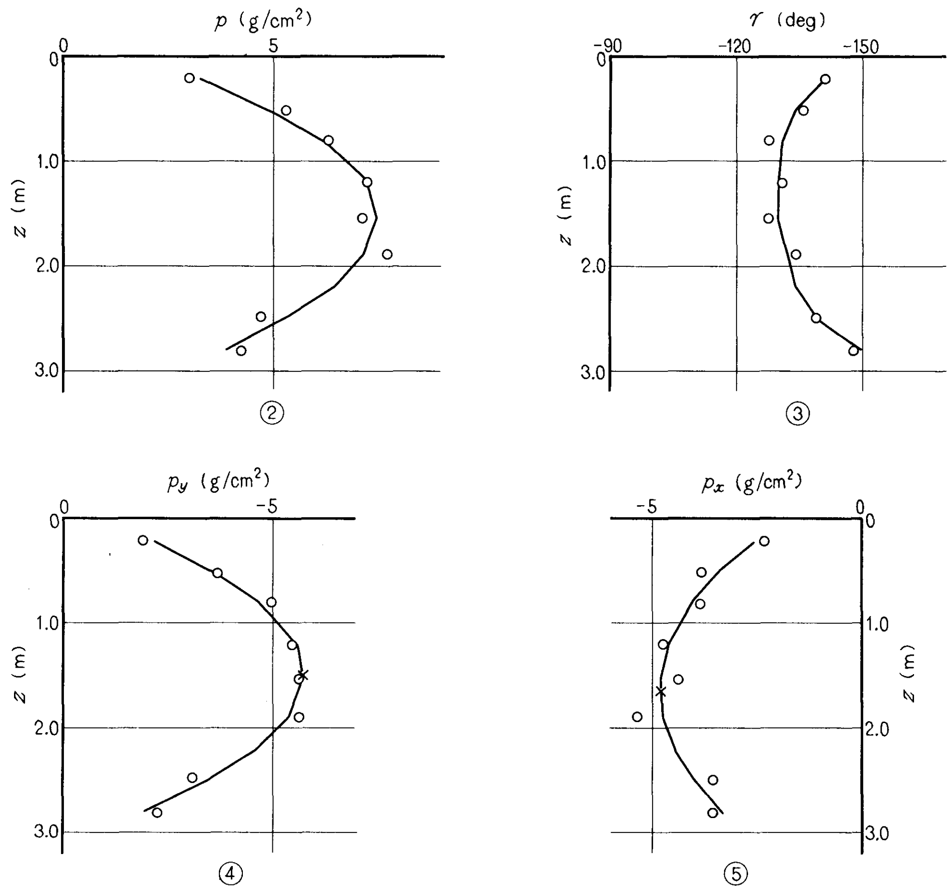
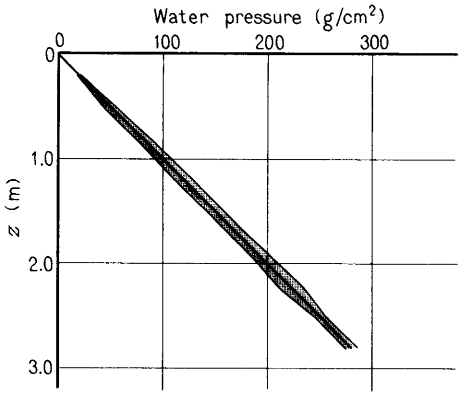


Fig. 39-(61)

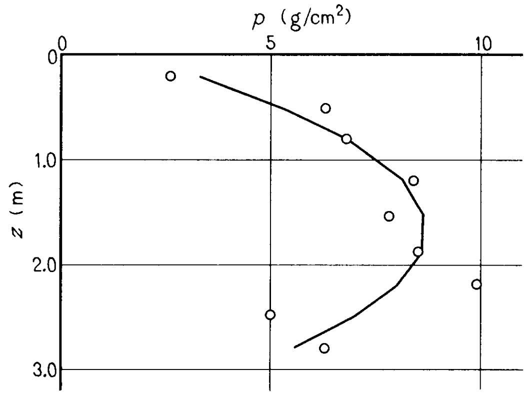
II-5-6.0



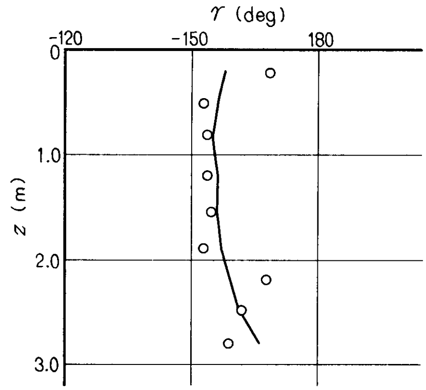
①

z m	p g/cm²	γ deg
0.21	2.6	−169
0.51	6.3	−153
0.81	6.8	−154
1.21	8.4	−154
1.54	7.8	−155
1.89	8.5	−153
2.20	9.9	−168

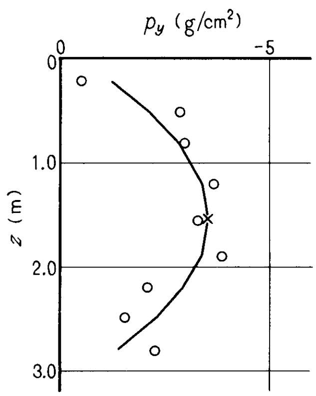
z m	p g/cm²	γ deg
2.49	5.0	−162
2.80	6.3	−159
Bottom (No.6)	27.4	−58
z m	**D mm**	**λ deg**
0	0.855	−130
2.16	0.302	−140
f =	6.0	Hz



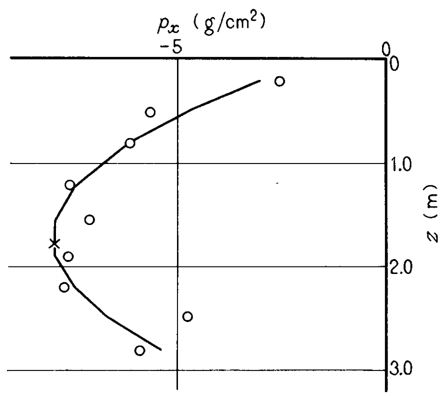
②



③



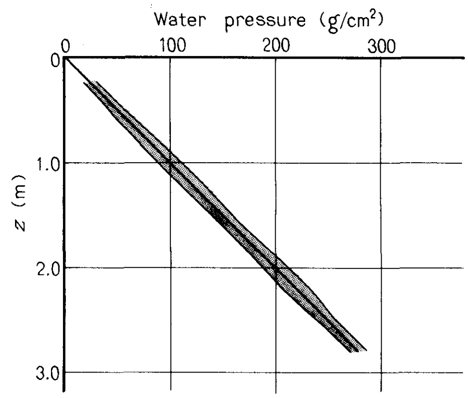
④



⑤

Fig. 39-(62)

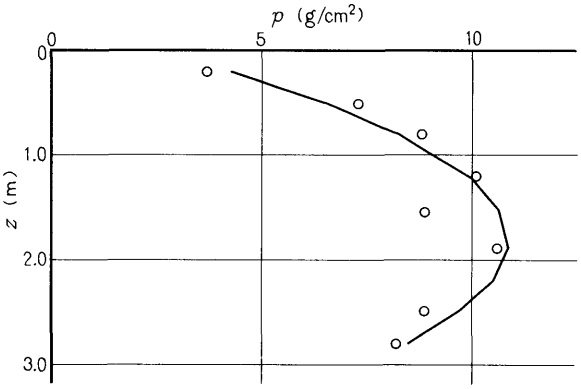
II-5-8.04



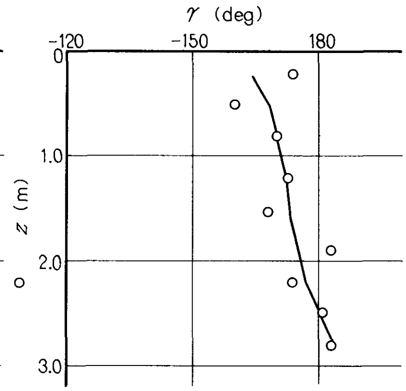
①

z m	p g/cm²	γ deg
0.21	3.7	−174
0.51	7.3	−160
0.81	8.8	−170
1.21	10.1	−173
1.54	8.9	−168
1.89	10.6	177
2.20	12.9	−174

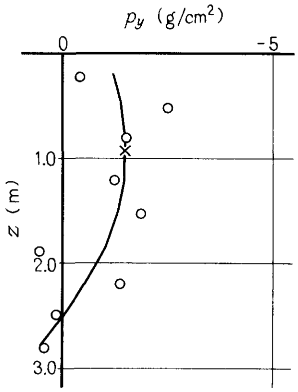
z m	p g/cm²	γ deg
2.49	8.9	179
2.80	8.2	177
Bottom (No.6)	27.2	−42
z m	D mm	λ deg
0	0.557	−144
2.16	0.217	−153
f =	8.04	Hz



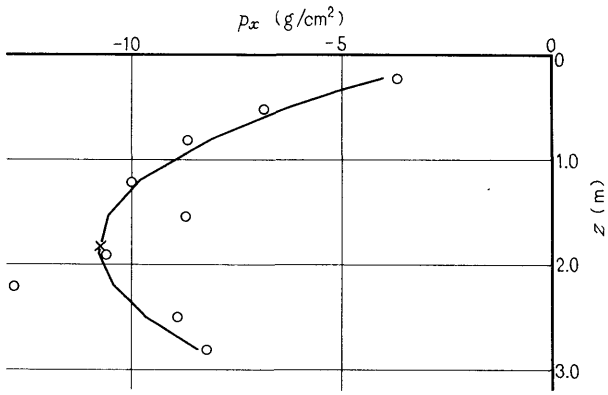
②



③



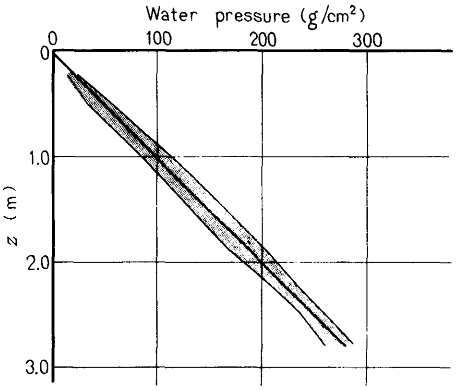
④



⑤

Fig. 39-(63)

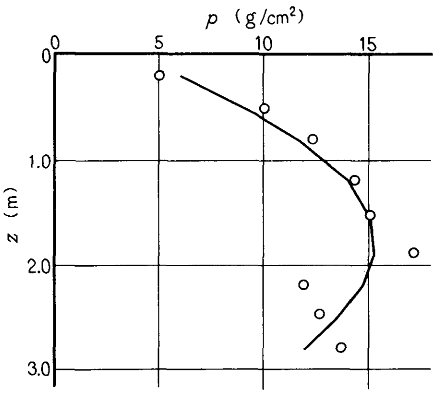
II-5-10.1



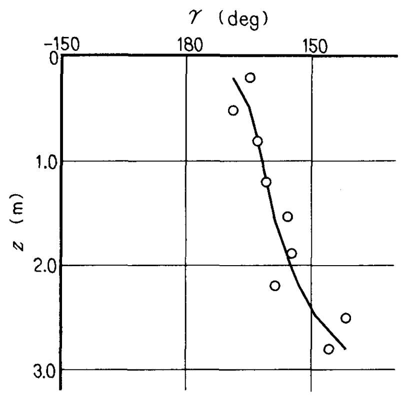
①

z m	p g/cm²	γ deg
0.21	5.0	165
0.51	10.0	169
0.81	12.3	163
1.21	14.3	161
1.54	15.0	156
1.89	17.1	155
2.20	11.9	159

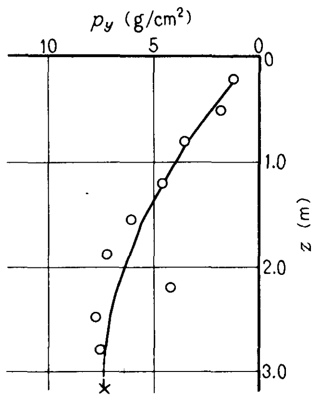
z m	p g/cm²	γ deg
2.49	12.6	142
2.80	13.6	146
Bottom (No.6)	31.2	−44
z m	**D mm**	**λ deg**
0	0.434	−138
2.16	0.208	−158
$f =$	10.1	Hz



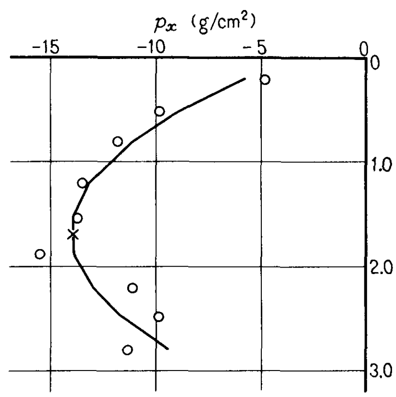
②



③



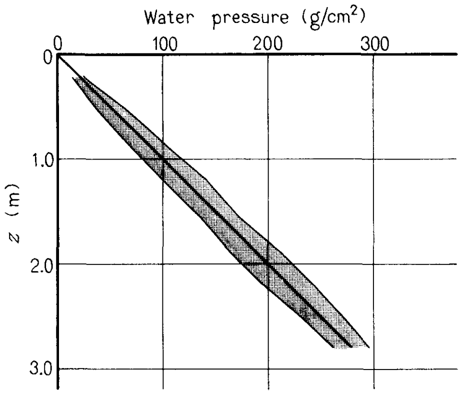
④



⑤

Fig. 39-(64)

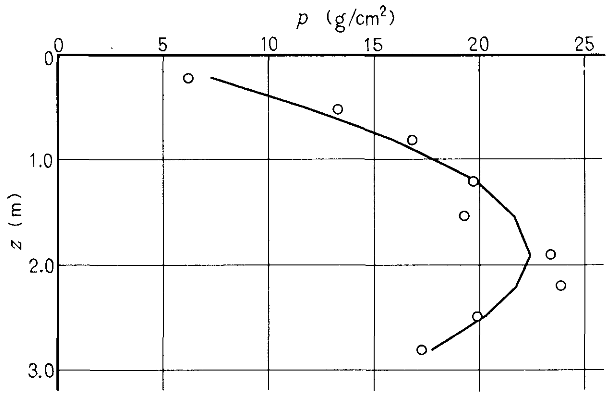
II-5-12.1



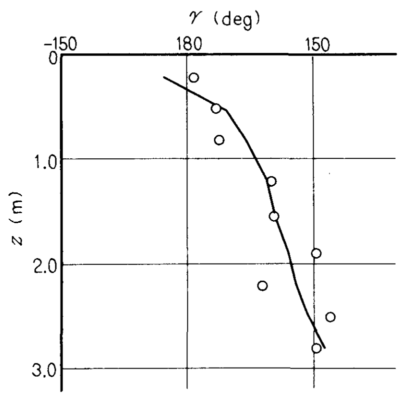
①

z m	p g/cm²	γ deg
0.21	6.2	178
0.51	13.3	173
0.81	16.8	172
1.21	19.7	160
1.54	19.3	159
1.89	23.4	149
2.20	23.9	162

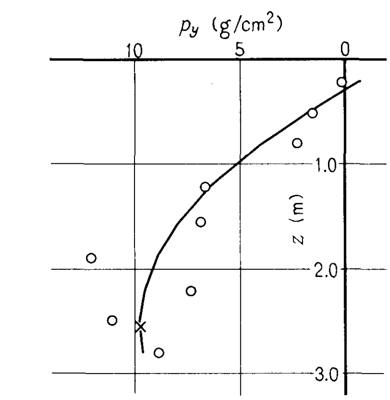
z m	p g/cm²	γ deg
2.49	19.9	146
2.80	17.3	149
Bottom (No.6)	56.1	−20
z m	**D mm**	**λ deg**
0	0.402	−131
2.16	0.213	−163
f =	12.1	Hz



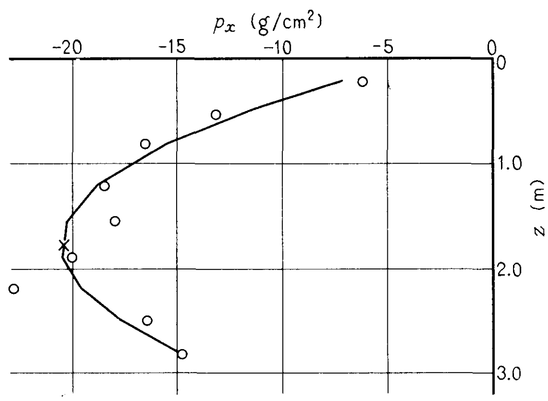
②



③



④



⑤

Fig. 39-(65)

付　　録　B

Fig. 40-(1)～(9) は Eq. (27) の八つの係数を，Fig. 40-(10) は Eq. (24) の六つの係数を振動数 f に対してプロットしたものである。そのときの次数 n の値は Table 3 に示されている。

I-1

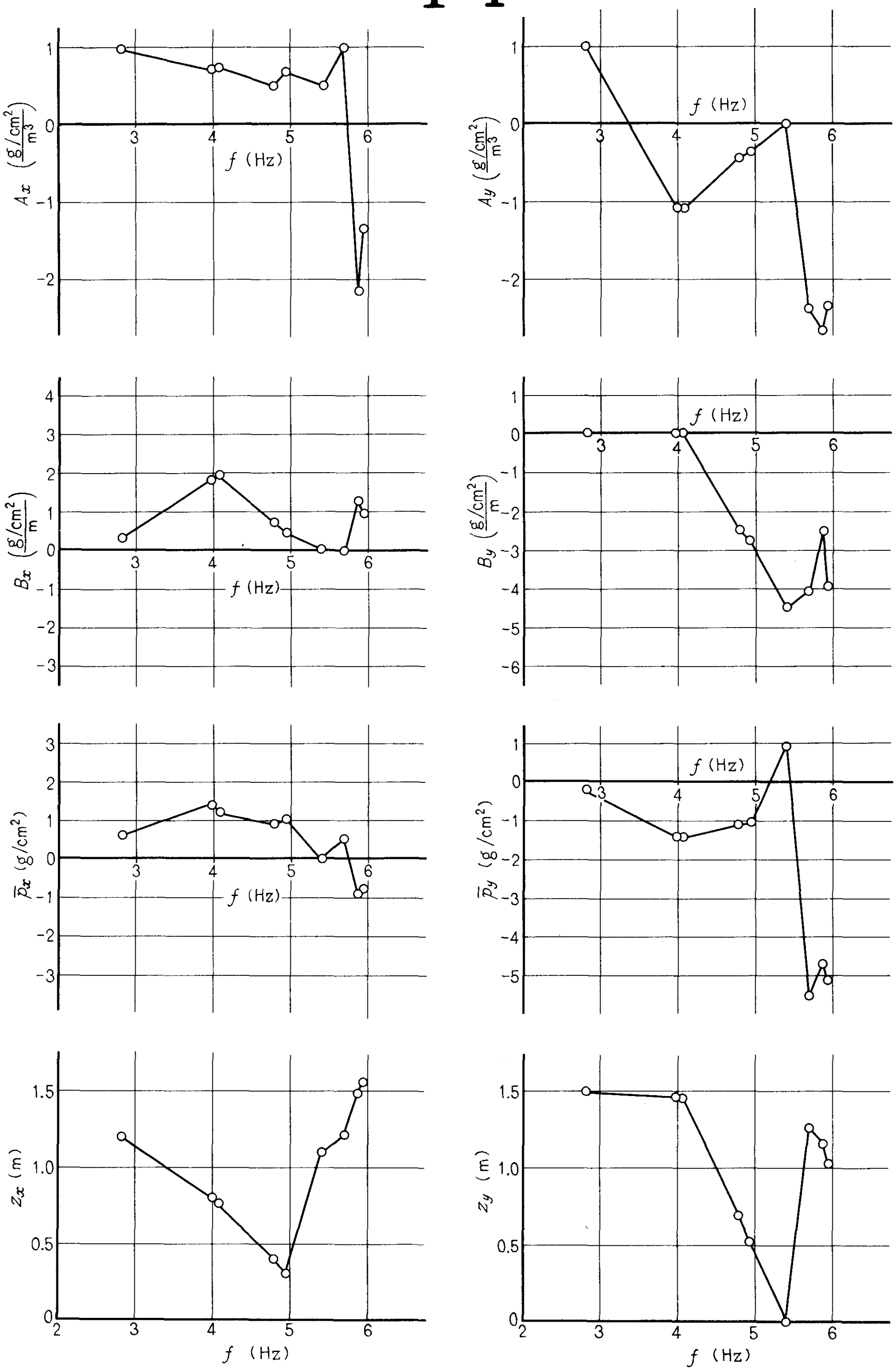
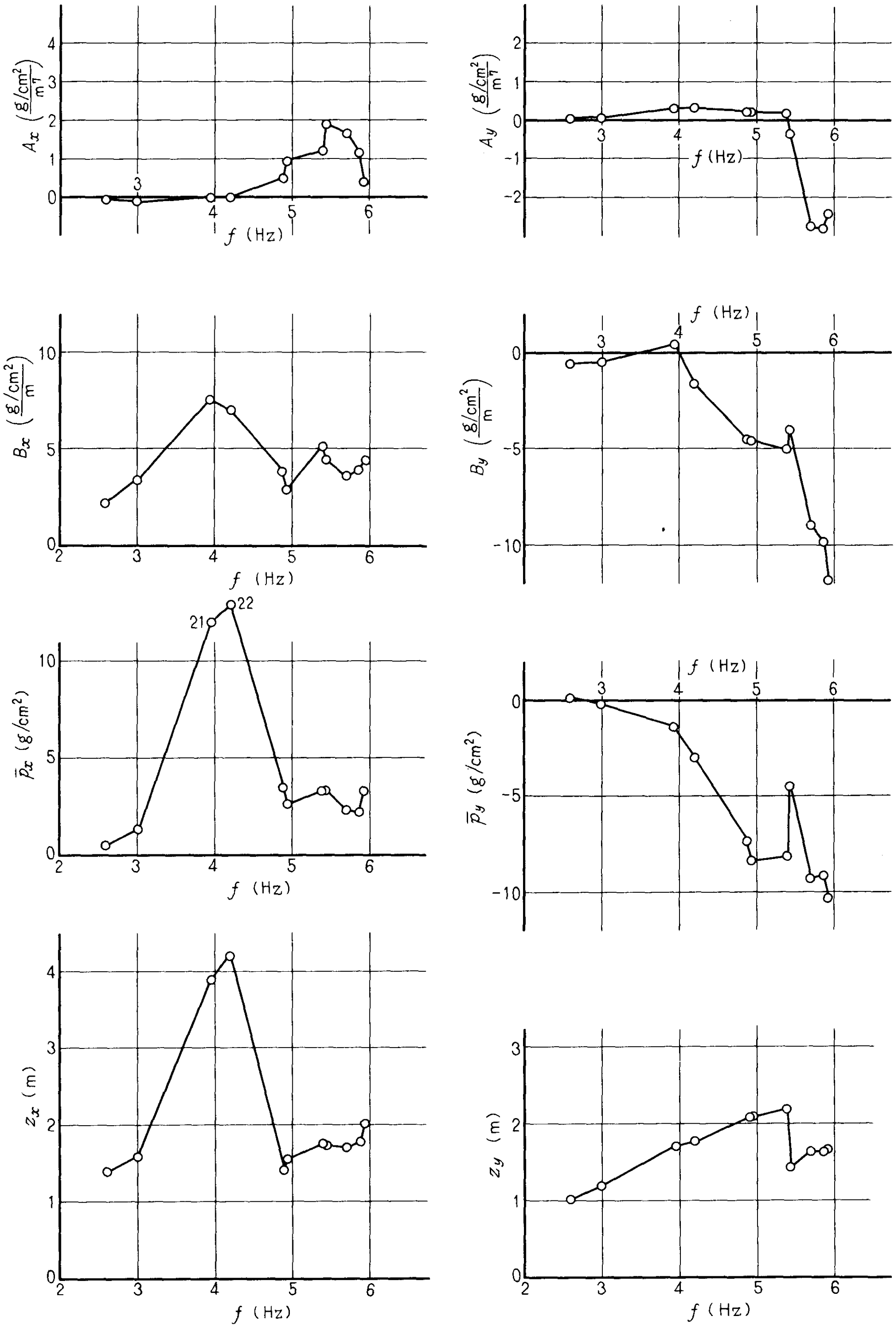


Fig. 40-(1) Frequency responses of the coefficients in Eq.(27)

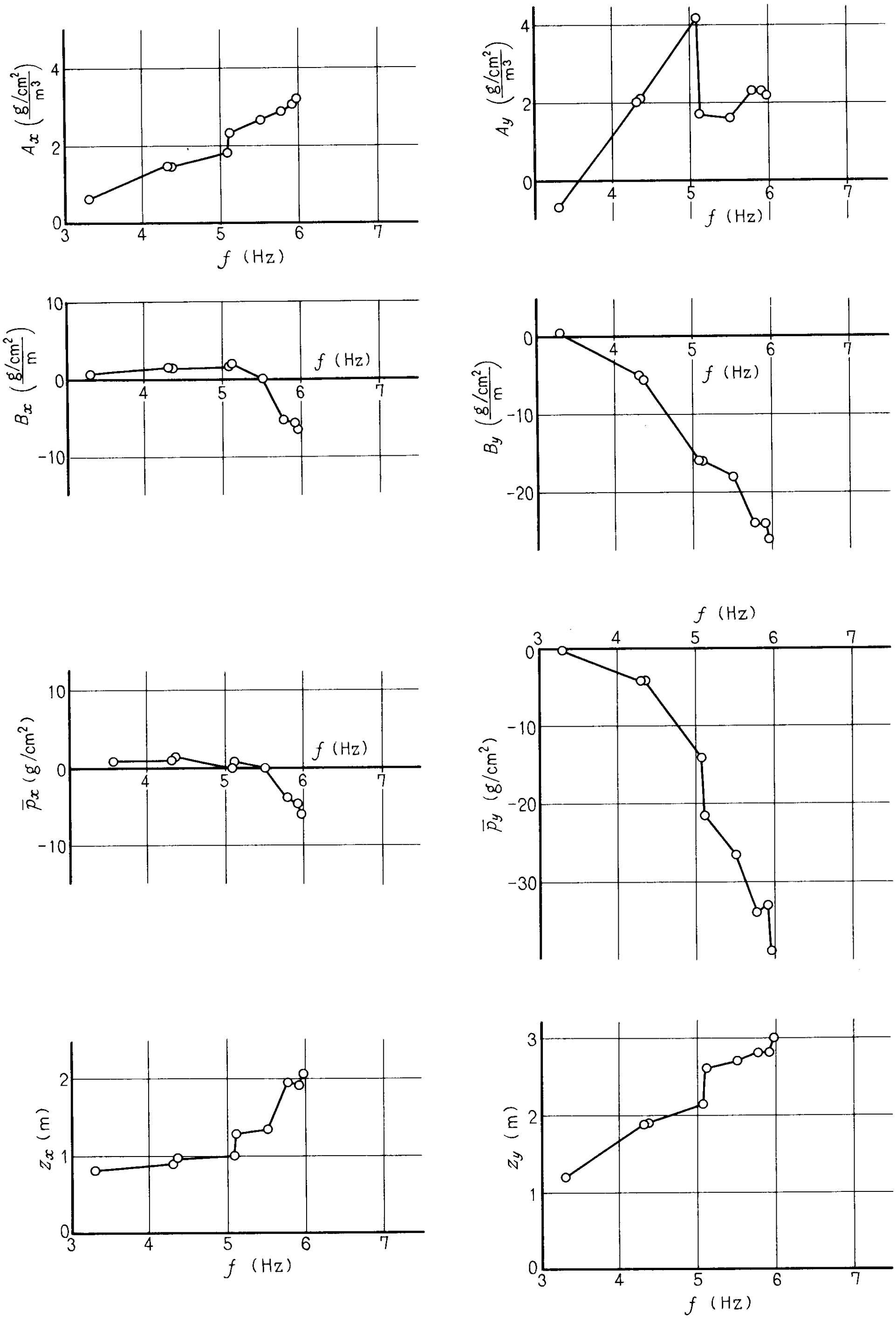
I-2



A_x $\left(\frac{g/cm^2}{m^T}\right)$
A_y $\left(\frac{g/cm^2}{m^T}\right)$
B_x $\left(\frac{g/cm^2}{m}\right)$
B_y $\left(\frac{g/cm^2}{m}\right)$
$\bar{p}_x$ (g/cm^2)
$\bar{p}_y$ (g/cm^2)
z_x (m)
z_y (m)
f (Hz)
21
22

Fig. 40-(2)

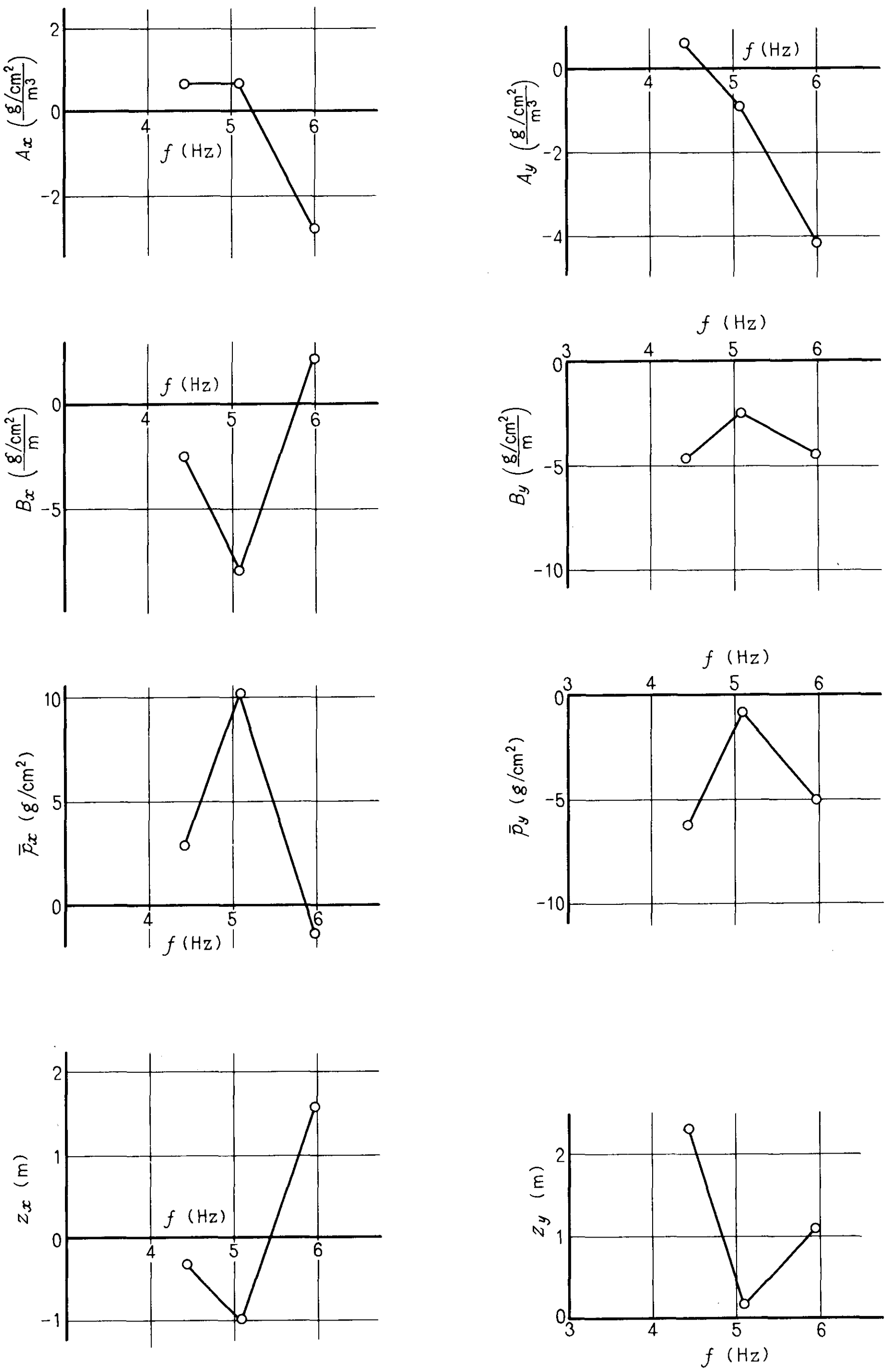
I-3



Ax (g/cm²/m³)
Ay (g/cm²/m³)
Bx (g/cm²/m)
By (g/cm²/m)
p̄x (g/cm²)
p̄y (g/cm²)
zx (m)
zy (m)
f (Hz)

Fig. 40-(3)

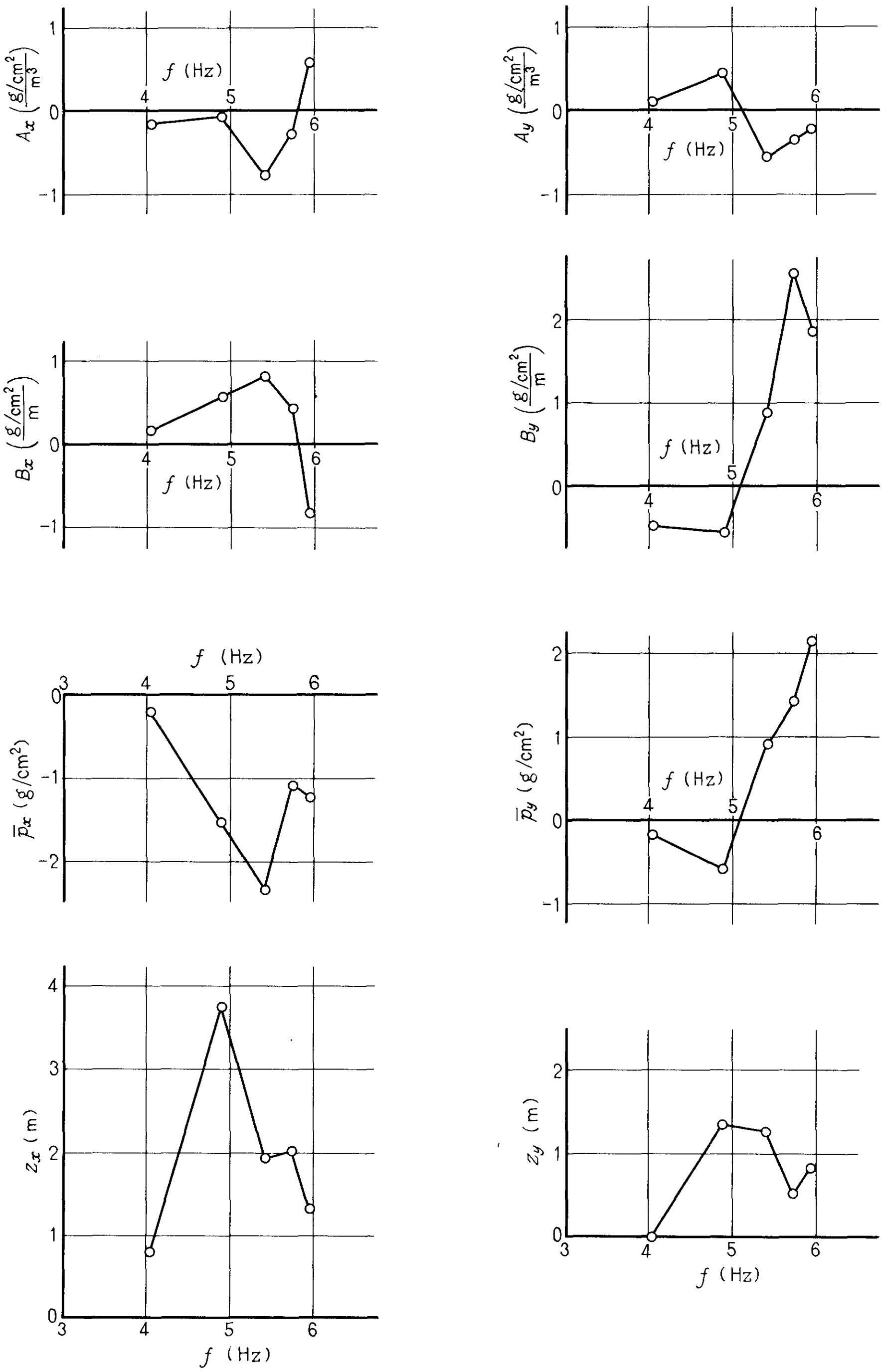
I-4



$A_x\ \left(\frac{g/cm^2}{m^3}\right)$
$A_y\ \left(\frac{g/cm^2}{m^3}\right)$
$B_x\ \left(\frac{g/cm^2}{m}\right)$
$B_y\ \left(\frac{g/cm^2}{m}\right)$
$\bar{p}_x\ (g/cm^2)$
$\bar{p}_y\ (g/cm^2)$
z_x (m)
z_y (m)
f (Hz)

Fig. 40-(4)

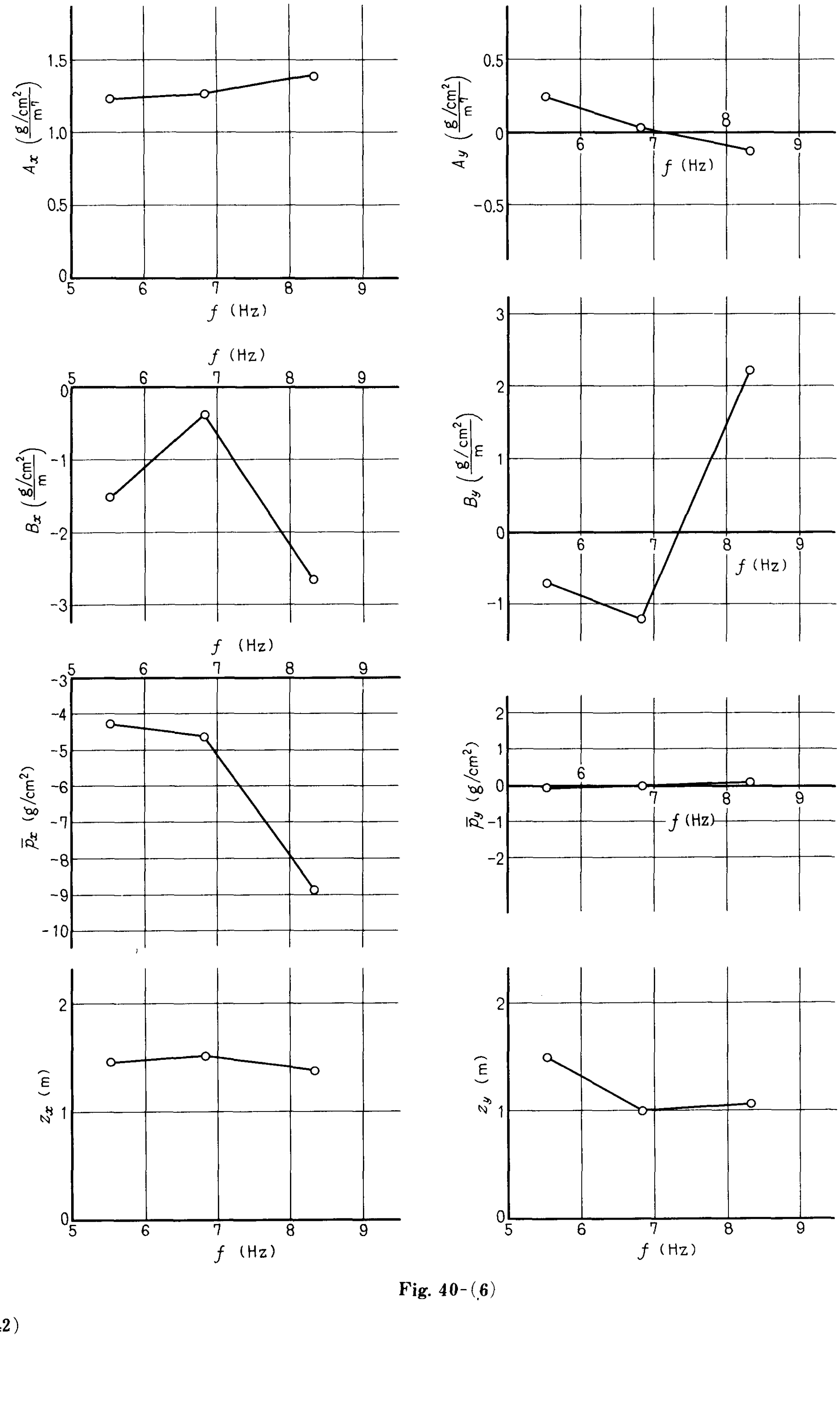
I-5



$A_x\left(\frac{g/cm^2}{m^3}\right)$
$A_y\left(\frac{g/cm^2}{m^3}\right)$
$B_x\left(\frac{g/cm^2}{m}\right)$
$B_y\left(\frac{g/cm^2}{m}\right)$
$\overline{p}_x$ (g/cm^2)
$\overline{p}_y$ (g/cm^2)
z_x (m)
z_y (m)
f (Hz)

Fig. 40-(5)

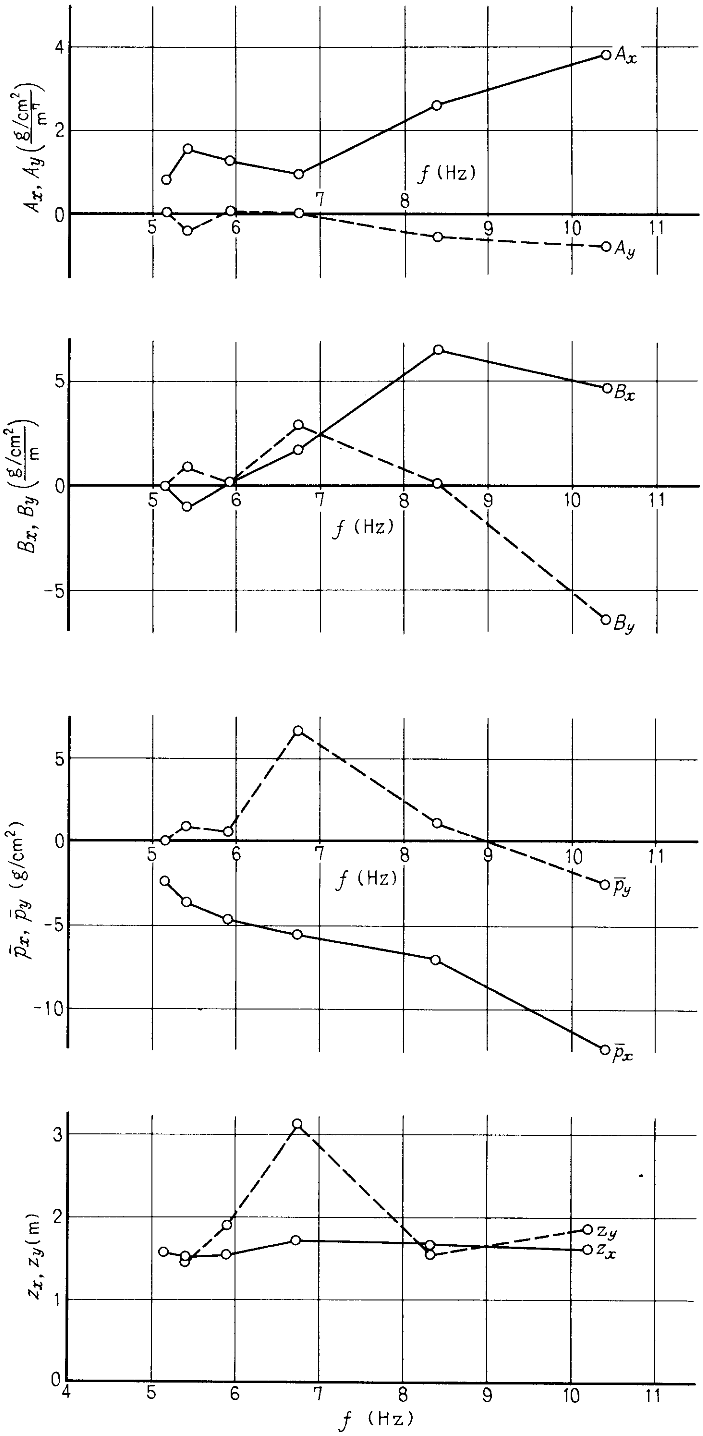
II-1



A_x $\left(\frac{g/cm^2}{m^7}\right)$
A_y $\left(\frac{g/cm^2}{m^7}\right)$
B_x $\left(\frac{g/cm^2}{m}\right)$
B_y $\left(\frac{g/cm^2}{m}\right)$
$\bar{p}_x$ (g/cm^2)
$\bar{p}_y$ (g/cm^2)
z_x (m)
z_y (m)
f (Hz)

Fig. 40-(6)

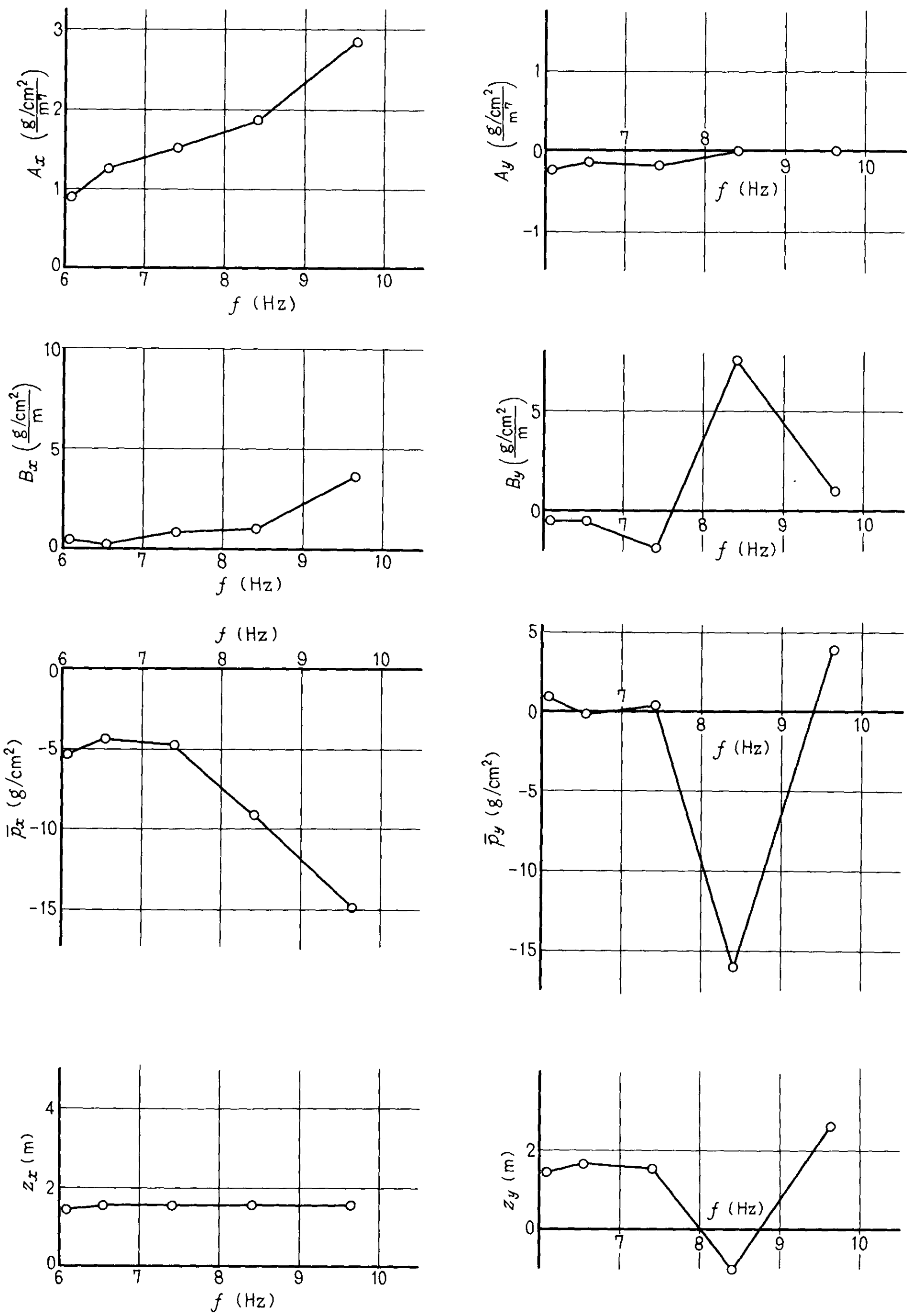
II-2



Ax, Ay (g/cm²/m⁴)
4
2
0
5
6
7
8
9
10
11
f (Hz)
Ax
Ay
Bx, By (g/cm²/m)
5
0
-5
Bx
By
p̄x, p̄y (g/cm²)
-10
p̄y
p̄x
zx, zy (m)
3
1
zy
zx

Fig. 40-(7)

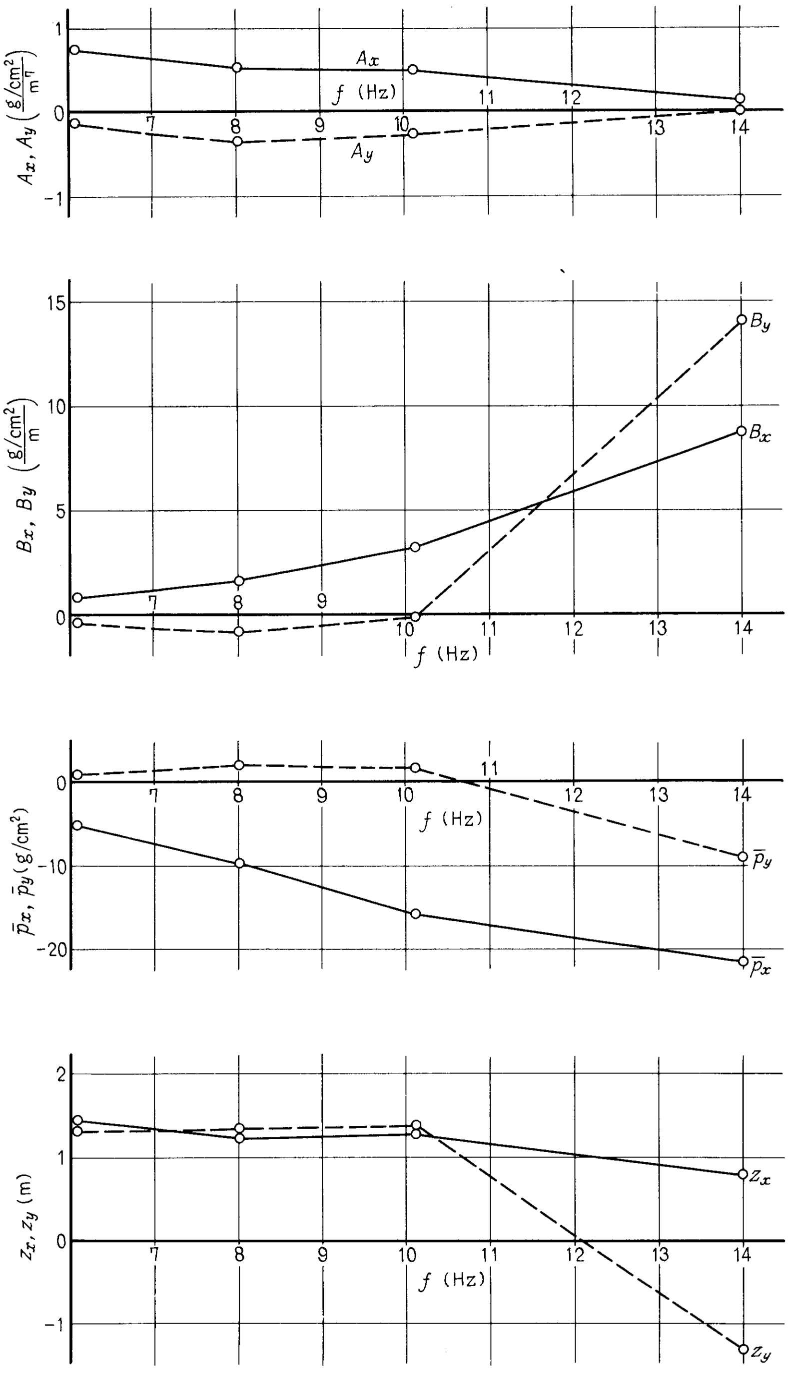
II-3



Ax $\left(\frac{g/cm^2}{m}\right)$
f (Hz)
Ay $\left(\frac{g/cm^2}{m}\right)$
f (Hz)
B_x $\left(\frac{g/cm^2}{m}\right)$
f (Hz)
By $\left(\frac{g/cm^2}{m}\right)$
f (Hz)
f (Hz)
$\bar{p}_x$ (g/cm²)
$\bar{p}_y$ (g/cm²)
f (Hz)
z_x (m)
f (Hz)
z_y (m)
f (Hz)

Fig. 40-(8)

II-4



$A_x, A_y \left(\frac{g/cm^2}{m^\eta}\right)$
1
0
-1
7
8
9
10
11
12
13
14
f (Hz)
A_x
A_y
$Bx, By \left(\frac{g/cm^2}{m}\right)$
15
10
5
0
B_y
B_x
$\bar{p}x, \bar{p}y$ (g/cm^2)
-10
-20
$\bar{p}_y$
$\bar{p}_x$
z_x, z_y (m)
2
z_x
z_y

Fig. 40-(9)

II-5

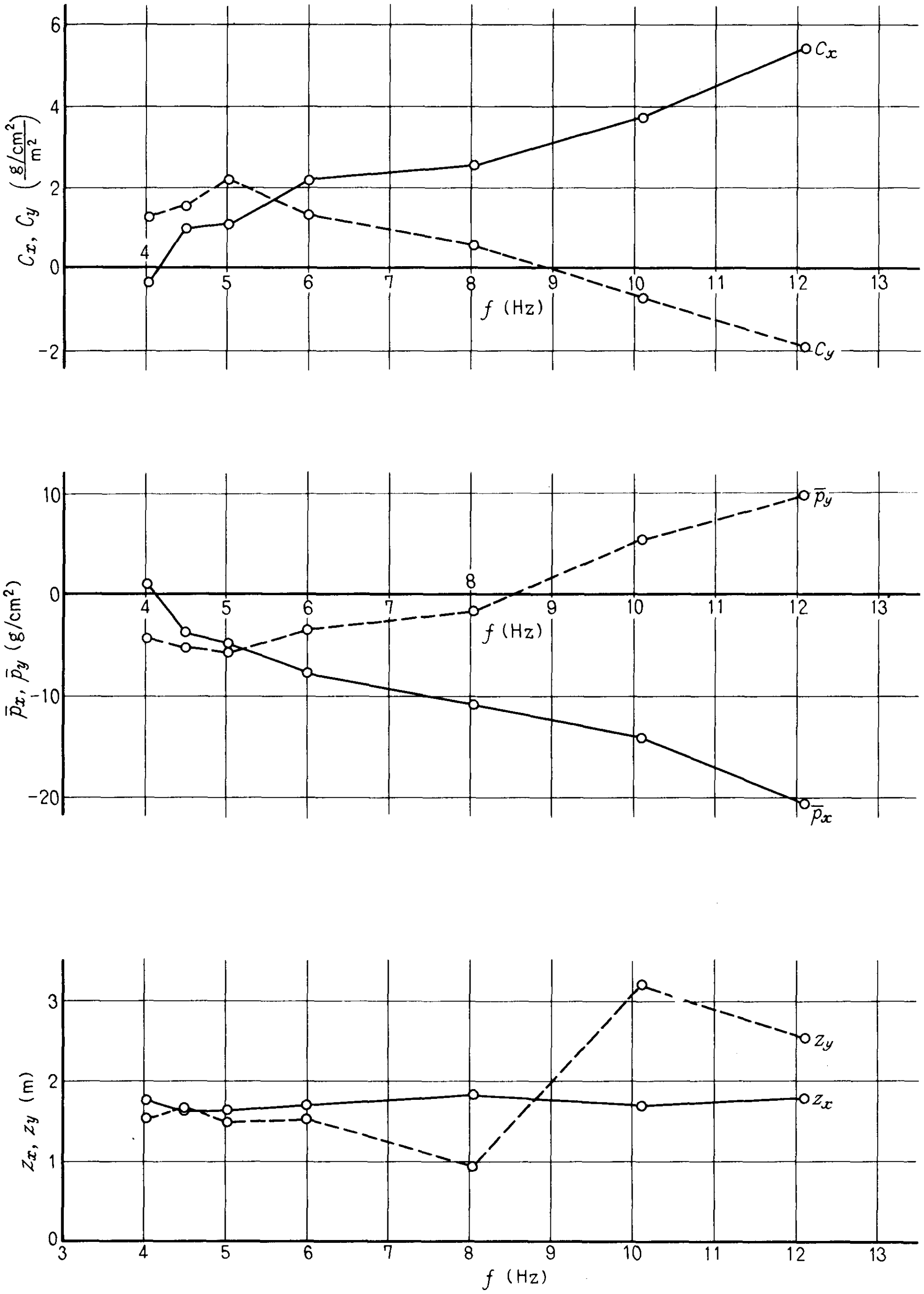


Fig. 40-(10) Frequency responses of the coefficients in Eq.(24)