

起振機試験による基礎構造の振動特性

—（その 3）地盤復元力の剛性と減衰性について—

小堀 鐸二・南井良一郎・鈴木 有・日下部 馨

DYNAMIC CHARACTERISTICS OF SOIL-FOUNDATION SYSTEMS DETECTED FROM OSCILLATOR TESTS —PART 3. EQUIVALENT SPRING AND DAMPING CONSTANTS—

By Takuji KOBORI, Ryoichiro MINAI, Tamotsu SUZUKI and Kaoru KUSAKABE

Synopsis

The purpose of this paper is to evaluate experimentally the vertical, horizontal and rotational equivalent spring and damping constants for the restoring force of the ground and then to investigate the validity and the limitation of application for the theoretical results, comparing those with the experimental results.

The experimental equivalent spring and damping constants are obtained from the responses of three type foundations rest on the soft deposit ground due to the vertical and/or horizontal excitations by making use of the rotating mass type oscillator. The theoretical spring and damping constants are derived from “the dynamical ground compliances”. Both theoretical and experimental results are shown in the graphical forms and are compared with each other.

1. ま え が き

本報の目的は、地盤—構造物系の地震応答解析に必要な構造物支持地盤のバネ剛性および減衰性を実験的に検出するとともに、弾性波動論より得られる Dynamical Ground Compliance^{1),2)} から換算された理論解と実験結果を比較することにより、理論値の妥当性および適用限界を明らかにすることである。この実験は大阪地方の典型的な軟弱地盤を対象として行なわれてきた一連の実験的研究の一環をなすもので、前報（その 1）³⁾、（その 2）⁴⁾ と同じ実験敷地内に作られた 3 種類のコンクリート製基礎構造の起振機による振動実験で、実地盤の上下、水平および回転に対するバネ剛性および減衰係数を field 試験で検出している。今回の実験では、起振機にパルス発生器を取り付け、刻々の加振力の位置を感知することにより基礎構造の応答の振幅のみならず加振力と応答の位相も記録し、その両者から地盤復元力の等価剛性および等価減衰係数を算定した。これらの研究に関して、土岐、山本⁵⁾ がピア基礎に対する起振機試験で実験的に地盤のバネ剛性および減衰係数を検出し、それを用いて、地盤—構造物系の地震応答解析を行なっている。しかし、実験結果と理論から得られる地盤の等価剛性および減衰係数との比較には重点をおいておらず、これらの検討は行なわれていない。

前報（その 1）³⁾ では軟弱地盤の非弾性的な性質について論じ、前報（その 2）⁴⁾ では基礎構造の振動特性に与える隣接基礎の影響について述べた。

本報（その 3）には、第 2 節で本目的のために行なわれた実験概要を、第 3 節で基礎構造の振幅特性および位相特性、等価剛性と減衰係数の算定式および上下、水平ならびに回転に対する等価剛性と減衰係数の実験結果を示し、さらに、Dynamical Ground Compliance から得られた理論解との比較を述べる。最後の Appendix では Dynamical Ground Compliance の解析解である積分表示を参考のために記す。

2. 実験概要

2.1. 実験の期間および敷地

本実験は既報（その1）³⁾，（その2）⁴⁾の振動実験に用いた敷地と同一の敷地（大阪市城東区森町の大阪市交通局森の宮営業所跡の一部）において，昭和49年4月から同年6月までの約3ヶ月間に行なわれた。実験敷

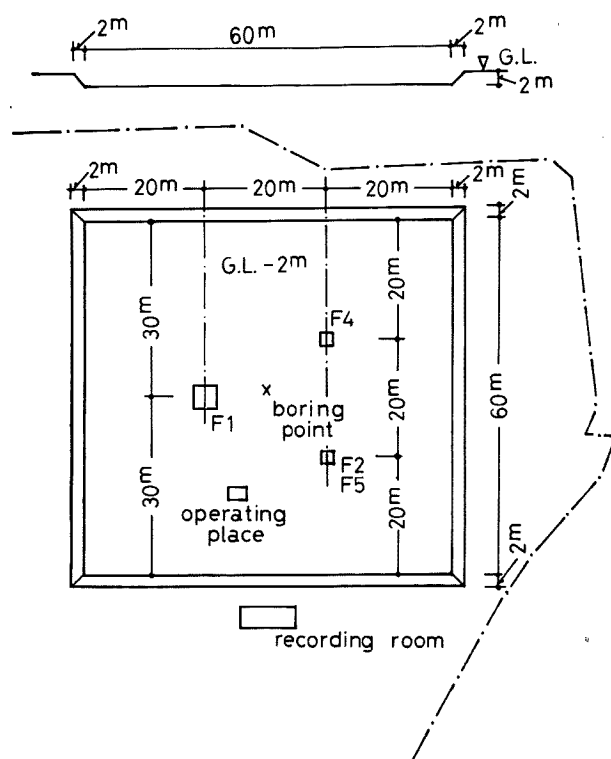


Fig. 1 Site for the experiment.

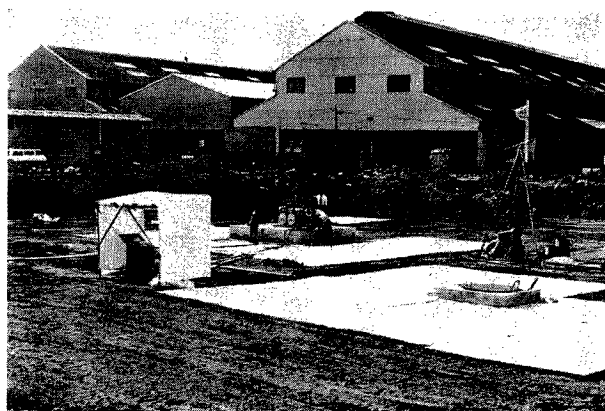


Photo. 1 View of the experimental site.

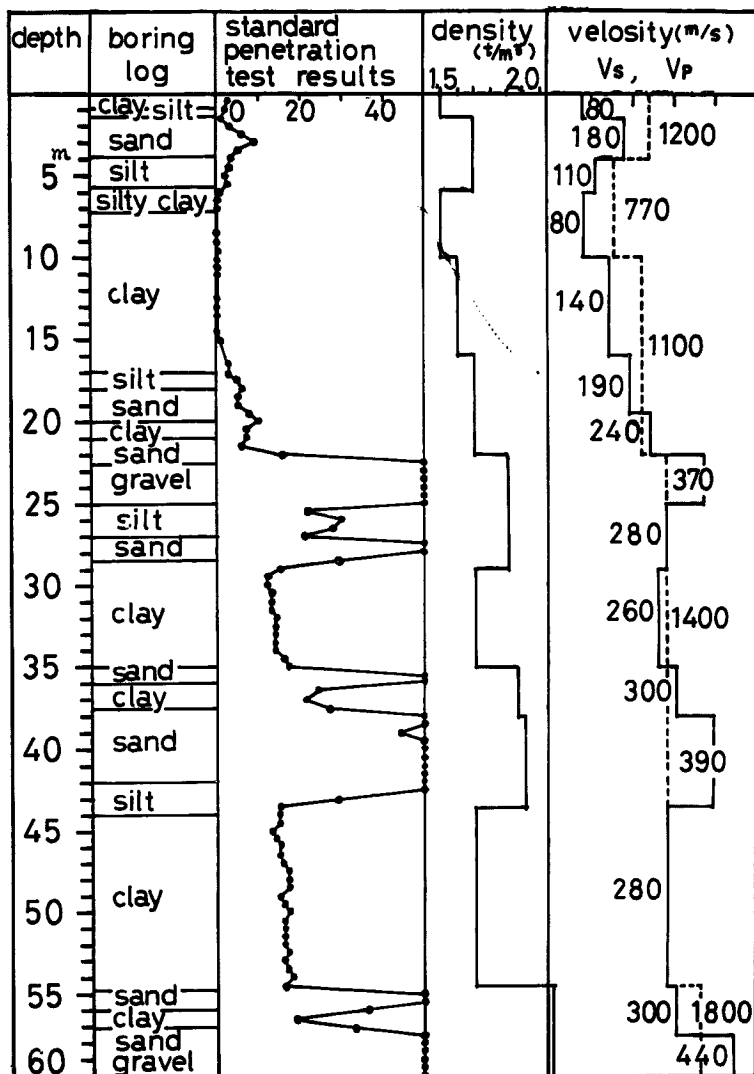


Fig. 2 Soil conditions.

地内の基礎構造の位置，ボーリング位置等を Fig. 1 に示す。Fig. 2 は Fig. 1 の中央部×印で示された boring point での柱状図，標準貫入試験の N 値，地盤の密度および S 波ならびに P 波の速度を示す。この図の深さは実験敷地の表面（地表より - 2 m）を基準として測ったものである。この図から，実験敷地の地盤は約 22m まで N 値がほとんど零の粘土層またはシルト層で途中 1.5m から 5m ぐらいまで N 値が 10 以下の砂またはシルト層を挟んでいることがうかがわれる。Photo. 1 は実験敷地の情景を示す写真で，右の矢倉が敷地の中央部に当たりボーリングを行なっている場所である。また，その手前にある基礎構造が F2 基礎，写真中央にあるのが F1 基礎，そして左にあるテントが起振機の実験機を示す。

2. 2. 基礎構造模型および起振機

Fig. 3 はこの振動実験に用いた 3 個の基礎構造の概略を示すもので，その位置は Fig. 1 に記されている。

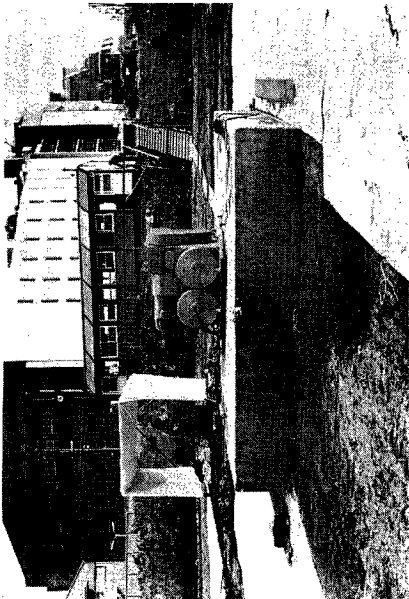


Photo. 2 F1-foundation.

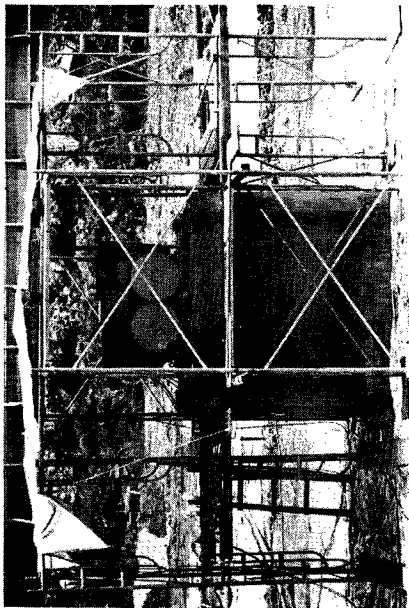


Photo. 4 F5-foundation.

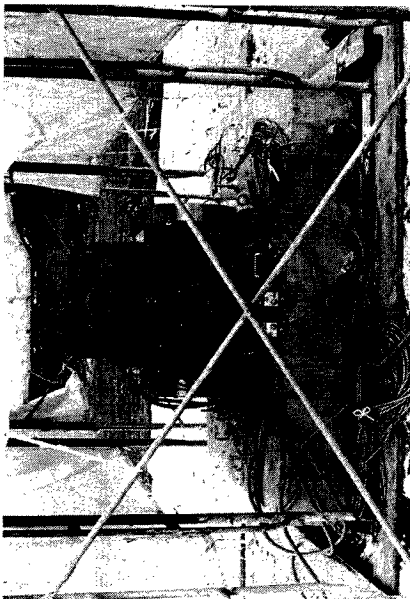


Photo. 3 F2-foundation.

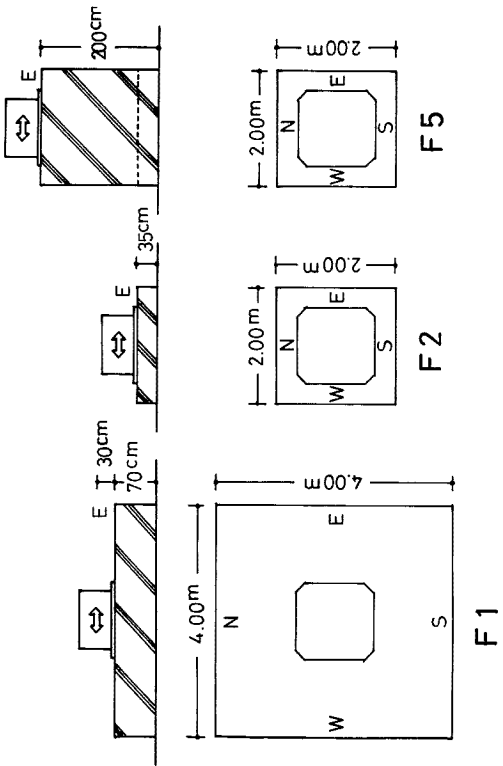


Fig. 3 Model of foundations.

F1基礎は底面 $4\text{ m} \times 4\text{ m}$ 、高さ 70 cm で、F2基礎は底面 $2\text{ m} \times 2\text{ m}$ 、高さ 35 cm であり、F5基礎は底面 $2\text{ m} \times 2\text{ m}$ 、高さ 2 m で F2基礎の上にコンクリートを打継いだものである。それぞれの基礎構造は実験敷地の表面にほぼ接して乗っている。**Photos. 2~4** はそれぞれ F1、F2 および F5 の基礎の写真で、その上に設置されているのが伊藤精機製 EX-1000DC 型の起振機である。この起振機の性能は、垂直および水平（加振力の作用高さ 30 cm ）方向の加振可能な水平4軸不平衡重錘同期反転式で、最大加振力 4000 kg (10 Hz 以上)、偏心モーメント $0 \sim 1000\text{ kg} \cdot \text{cm}$ 、加振振動数範囲 $0.1 \sim 40\text{ Hz}$ 、自重約 1300 kg である。さらに、起振機の偏心質量が1回転する毎に1サイクルの矩形波パルスが発生させる装置が組込まれている。**Photo. 2** の後方にみえるプレハブは本実験の計測小屋であり、ここですべての記録を計測した。

2. 3. 計測装置およびそのキャリブレーション

本実験に用いた計測装置を下に示す。

地震計	東京測振製 {SA 151 (水平用) SA 152 (上下用)}	動コイル式サーボ型加速度計, 固有振動数 3 Hz .
地震計用増幅器	東京測振製 SAG-17	周波数特性 $0.3 \sim 30\text{ Hz}$, 最大測定値 600 gal or 60 kine , 最小分解能 0.0003 gal or 0.00003 kine .
ローパスフィルター	共和電業製 LF-6 C	遮断特性 $-18\text{ dB} \pm 1\text{ dB/0 oct}$
ペンレコ用増幅器	渡辺測器製 WA-231	
ペン書きレコーダ	渡辺測器製 WR-211	
オシロスコープ	ソニーエレクトロニクス製 5103N型	

以上の計測装置が **Photos. 5, 6** に示されている。**Photo. 5** は地震計を、**Photo. 6** はローパスフィルター（左上）、地震計用増幅器（左下）、ペンレコ用増幅器（中央）、ペン書きレコーダ（右）を示す写真である。

Fig. 4 は以上の計測システムに接続したときの代表的な地震計のキャリブレーションを示す図 (**Fig. 4 (a)** は水平用地震計 No. H-1, **Fig. 4 (b)** は上下用地震計 No. V-3) である。本実験では地震計用増幅器に組込まれた積分回路を用い速度波形として基礎構造の応答を検出

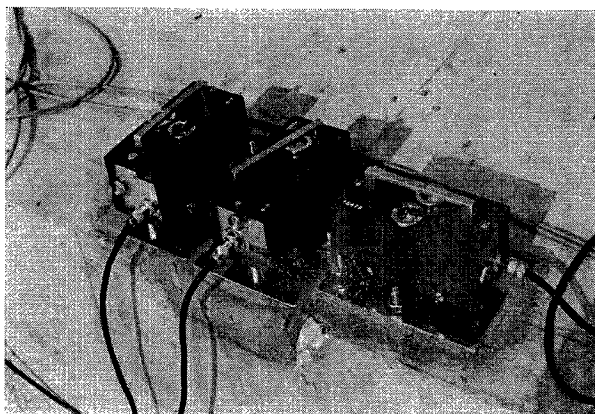


Photo. 5 Seismometers.

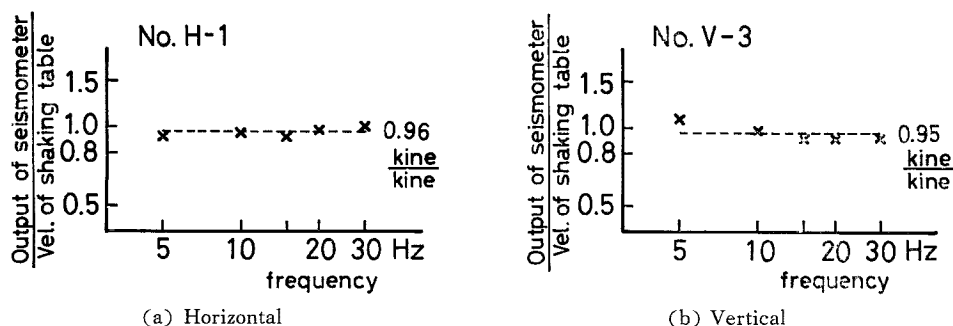


Fig. 4 Calibrations of recording system.

したため、速度応答に対するキャリブレーションが示されている。**Fig. 4** は横軸に地震計の加振振動数を取り、縦軸に検定用振動台の速度振幅に対する地震計システムの速度応答の比を表わしており、点線は実験データの解析に用いた平均感度を表わす。

2. 4. 実験方法および計測位置

ここで用いた実験方法はある加振振動数で基礎構造の応答が定常になるのを待って、応答波形をペンレコーダに記録し、また同時に、オシロスコープの応答波形を写真に撮る。次に、加振振動数を次のステップに変更して前と同じ操作を繰返し、種々の振動数に対する記録を逐次とっていく方法である。ここでは、振動数を徐々に増加していく方法を“UP”，減少させる場合を“DOWN”と呼ぶ。ペンレコーダの記録は振幅特性を検出するため、ローパスフィルターを通し、高周波数成分の雑音を遮断した。ローパスフィルターの遮断振動数と加振振動数との関係は前報^{3),4)}と同様である。また、記録の読取りが容易にできるように地震計用増幅器に組込まれた積分器により加速度波形を速度波形に変換して記録させている。オシロスコープの記録は加振力に対する基礎構造の速度応答の位相遅れを検出する目的でとられている。ここでは、起振機の偏心質量の1回転毎に1サイクル発生する矩形波と地震計用増幅器から出る速度波形（ローパスフィルターは通っていない）を同時にオシロスコープに描き、それらが写真に撮られている。**Photo. 7** はその記録の一例で、中央にある矩形波が起振機から出されるパルスである。

基礎構造の応答を検出した計測位置は、**Fig. 3** に示される N, S, E および W の所で、上下加振に対しては、上下用地震計を N, S, E, W に、水平用地震計を E, W に設置し、水平 EW 加振に対しては、水平用地震計を N, S, E, W に、上下用地震計を E, W に設置した。本報で解析の対象とした地震計は E の場所に設置されたもので、水平用地震計は No. H-1 が、上下用地震計は No. V-3 が使われている。

3. 実験結果および考察

3. 1. 振幅特性および位相特性

上下加振および水平 EW 加振による3種類の基礎構造 (**Fig. 3**) の速度応答の (a) 振幅特性ならびに (b) 位相特性が **Figs. 5~10** に示されている。起振機は振動数の2乗に比例して加振力が増加するので、ここでの振幅特性は速度応答を加振力で除して1 ton 当りの速度振幅特性を表わしている。また位相特性は加振力に対する基礎構造の速度応答の位相遅れを表わしている。それらのグラフに対するパラメータを **Table 1** にまとめて示す。

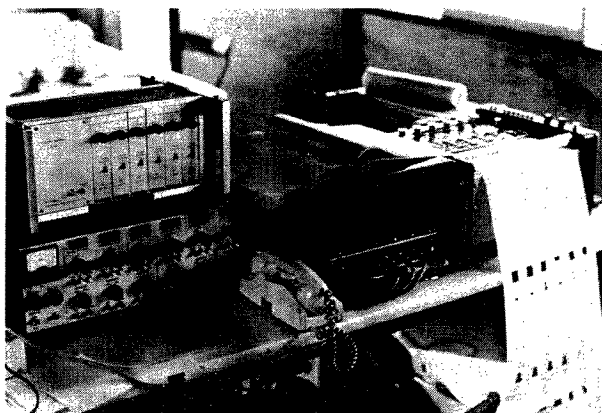


Photo. 6 Recording system.

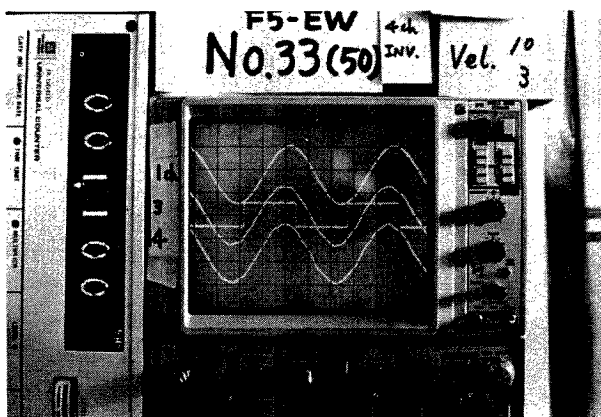
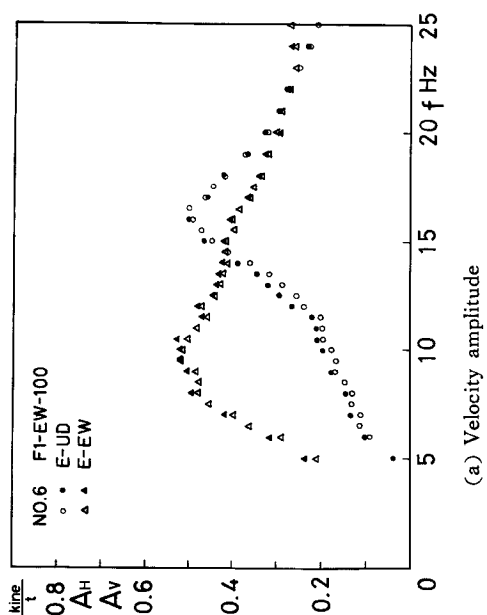
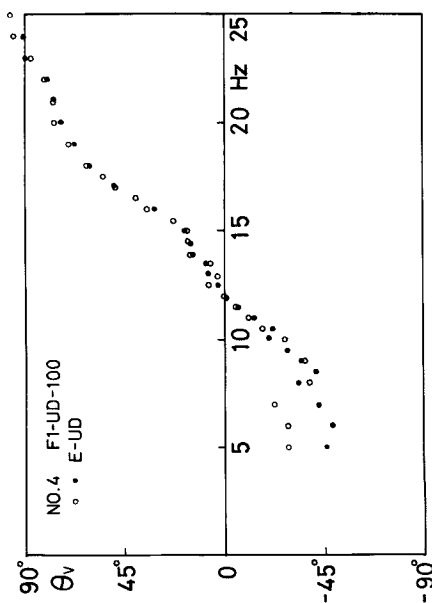


Photo. 7 Responses displayed in the oscilloscope.

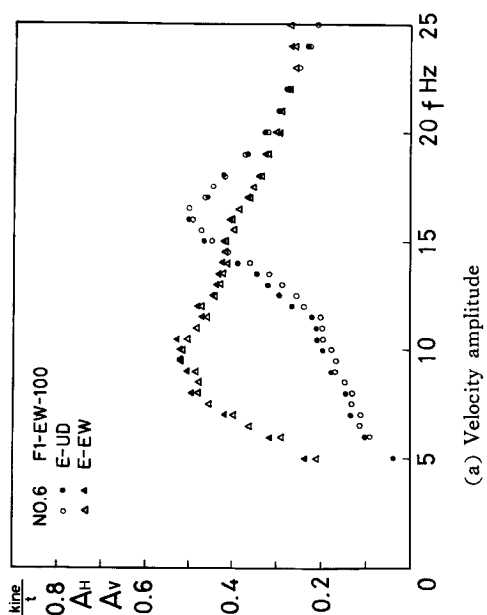


(a) Velocity amplitude

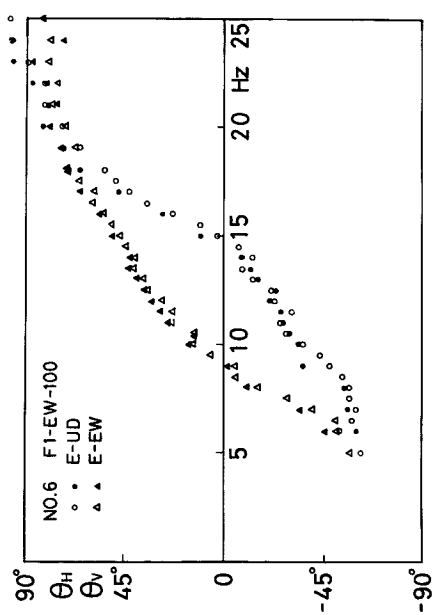


(b) Phase

Fig. 5 Vibrational characteristics of F1-foundation to the vertical excitation.



(a) Velocity amplitude



(b) Phase

Fig. 6 Vibrational characteristics of F1-foundation to the horizontal excitation.

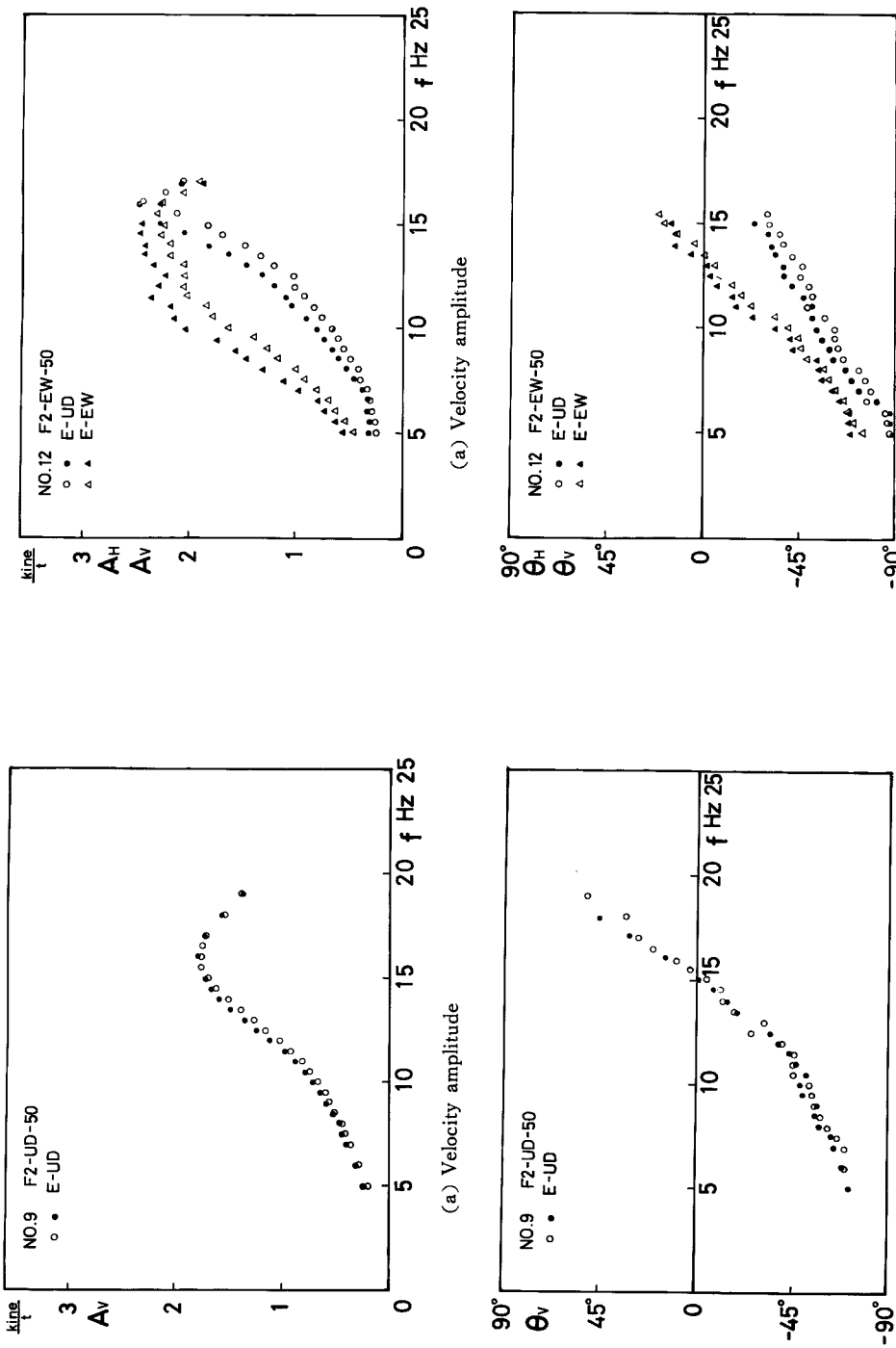
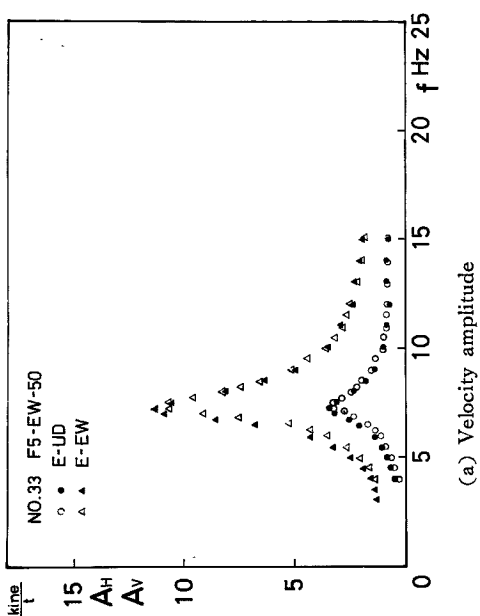
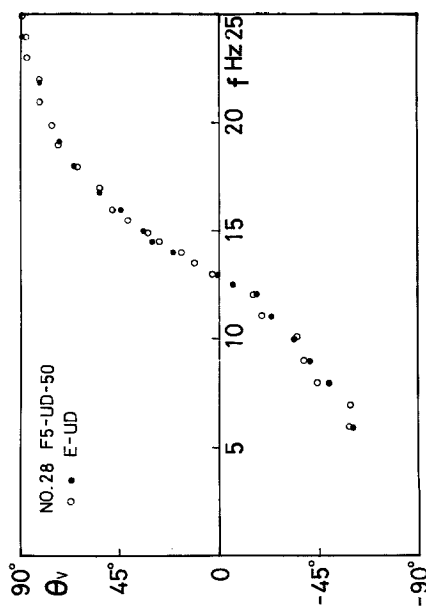


Fig. 7 Vibrational characteristics of F2-foundation to the vertical excitation.

Fig. 8 Vibrational characteristics of F2-foundation to the horizontal excitation.

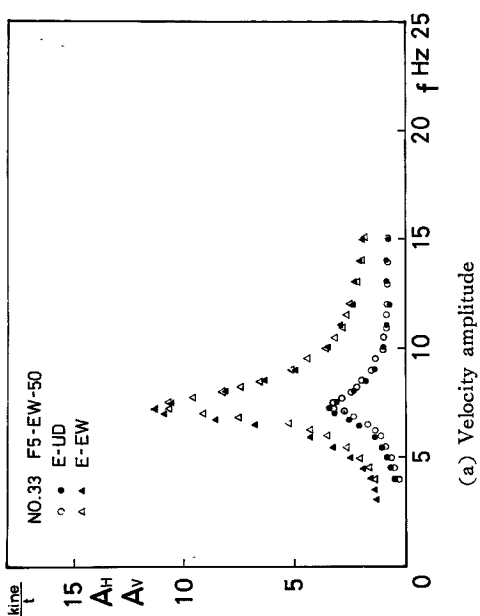


(a) Velocity amplitude

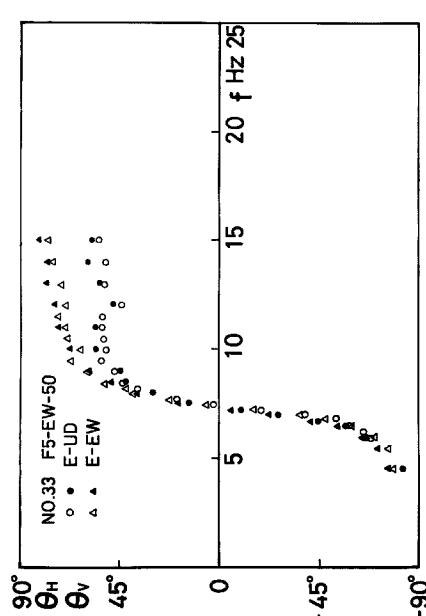


(b) Phase

Fig. 9 Vibrational characteristics of F5-foundation to the vertical excitation.



(a) Velocity amplitude



(b) Phase

Fig. 10 Vibrational characteristics of F5-foundation to the horizontal excitation.

Table 1. Specifications of Figures 5~10.

		基礎の種類	加振方向	偏心モーメント	応答の成分
Fig. 5	(a) 振幅特性 (b) 位相特性	F 1	UD	100kg・cm	○印; UD
Fig. 6	(a) 振幅特性 (b) 位相特性	F 1	EW	100kg・cm	○印; UD △印; EW
Fig. 7	(a) 振幅特性 (b) 位相特性	F 2	UD	50kg・cm	○印; UD
Fig. 8	(a) 振幅特性 (b) 位相特性	F 2	EW	50kg・cm	○印; UD △印; EW
Fig. 9	(a) 振幅特性 (b) 位相特性	F 5	UD	50kg・cm	○印; UD
Fig. 10	(a) 振幅特性 (b) 位相特性	F 5	EW	50kg・cm	○印; UD △印; EW

ここで、○印および△印は 2.4 節で定義した“UP”の状態を、●印および▲印は“DOWN”の状態を表わしている。

水平 EW 加振 (Figs. 6, 8, 10) による上下成分は基礎の回転 (ロッキング) により生ずるものである。

ここで示した位相特性は加振力に対する速度応答の位相遅れであるから、振動数が零のときには位相が -90° となり、共振振動数近傍で位相が零、それよりも高い振動数になると 90° に近づいていく。

3. 2. 等価剛性および等価減衰常数の算定式

実験で得られた振幅特性および位相特性を用いて、地盤復元力の等価剛性および等価減衰常数の評価を試みる。ここでは、基礎構造 (起振機を含む) を質点、地盤を等価剛性および等価粘性減衰とみなし、Voigt type の減衰機構をもつ質点系の運動方程式に振幅特性ならびに位相特性を代入して、地盤の等価剛性、等価減衰常数を定める。上下加振に対しては剛体の運動成分は理論的には上下振動のみであるから、粘性減衰をもつ 1 自由度系に置き換えることができる。しかし、水平加振では、水平振動と回転振動 (ロッキング) が起こり、2 自由度系の振動となるため、水平成分と回転に対する振幅特性および位相特性を用いることにより、水平および回転に対する等価剛性ならびに等価減衰常数を定めることができる。以下において、上下加振および水平加振に対して、それらの関係式を導く。

(i) 上下加振

基礎構造 (起振機を含む) の質量を m 、地盤の上下等価剛性を K_V 、上下等価減衰常数を C_V 、基礎の変位を W 、加振力を $F_V e^{i\omega t}$ とすると、Fig. 11 に示される基礎構造の運動方程式は次式となる。

$$m\ddot{W} + C_V \dot{W} + K_V W = F_V e^{i\omega t} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 ω は角振動数、 t は時間、 $i = \sqrt{-1}$ は虚数単位を表わし、さらに、記号 $\dot{}$ は時間 t に関する微分を意味する。

一方、基礎構造の単位加振力当りの速度振幅 A_V と位相

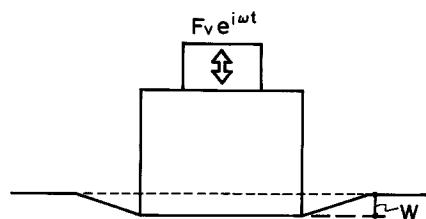


Fig. 11 Foundation model for vertical vibration.

θ_V とにより(1)式の数値応答 $\dot{W}$ は下ようになる。

$$\dot{W} = F_V A_V e^{i(\omega t - \theta_V)} \dots\dots\dots(2)$$

(2)式を(1)式に代入し、実数部と虚数部を分離して連立方程式を解くと、 K_V 、 C_V は次のようになる。

$$K_V = 2\pi f \left\{ 2\pi f m - \frac{1}{A_V} \sin \theta_V \right\} \dots\dots\dots(3)$$

$$C_V = \frac{1}{A_V} \cos \theta_V$$

ここに、 $f = \omega/2\pi$ は加振振動数である。

(ii) 水平加振

基礎構造が水平加振を受けると、その挙動は水平方向のみならず回転振動も起こす。地盤の水平等価剛性を K_H 、水平等価減衰定数を C_H 、回転等価剛性を K_R 、回転等価減衰定数を C_R とし、基礎構造の寸法を Fig. 12 に示されるように高さを h 、幅を $2b$ 、重心高さ（起振機も含む）を a とし、高さ l のところに加振力 $F_H e^{i\omega t}$ が作用するものとする、基礎構造の運動方程式は次式となる。

$$\begin{cases} m\ddot{U}_0 + m\ddot{\phi} + C_H\dot{U}_0 + K_H U_0 = F_H e^{i\omega t} \\ I\ddot{\phi} + C_R\dot{\phi} + K_R\phi - aC_H\dot{U}_0 - aK_H U_0 \\ \quad = (l-a)F_H e^{i\omega t} \end{cases} \dots\dots\dots(4)$$

ここに、 U_0 、 ϕ は基礎構造底面の水平変位および回転角、

m は基礎構造と起振機全体の質量、 I は合体の重心まわりの慣性モーメントである。

Fig. 12 で⊗印の付された位置（基礎底面中心からの水平距離 b 、鉛直距離 h ）での水平成分の単位加振力当りの速度振幅を A_H 、位相遅れを θ_H 、上下成分の単位加振力当りの速度振幅を A_V 、位相遅れを θ_V とすると、基礎底面の水平変位 U_0 および回転角 ϕ は下のように表わされる。

$$\begin{cases} \dot{\phi} = \frac{1}{b} F_H A_V e^{i(\omega t - \theta_V)} \\ \dot{U}_0 = F_H A_H e^{i(\omega t - \theta_H)} - \frac{h}{b} F_H A_V e^{i(\omega t - \theta_V)} \end{cases} \dots\dots\dots(5)$$

(5)式を(4)式に代入して ϕ 、 U_0 を消去し、実数部と虚数部とに分離すると、4 個の方程式が得られる。これらを K_H 、 K_R 、 C_H および C_R に関して解くと下式が得られる。

$$\begin{cases} K_H = \frac{2\pi f}{A} \left[\left(\frac{h}{b} A_V \sin \theta_V - A_H \sin \theta_H \right) \right. \\ \quad \left. + 2\pi f m \left\{ A_H^2 + \frac{h}{b} \cdot \frac{h-a}{b} A_V^2 - \frac{2h-a}{b} A_H A_V \cos (\theta_H - \theta_V) \right\} \right] \\ C_H = \frac{1}{A} \left\{ \left(A_H \cos \theta_H - \frac{h}{b} A_V \cos \theta_V \right) + 2\pi f m \frac{a}{b} A_H A_V \sin (\theta_H - \theta_V) \right\} \\ K_R = 2\pi f \frac{b}{A_V} \left[-l \sin \theta_V + 2\pi f \left\{ m a A_H \cos (\theta_H - \theta_V) \right. \right. \\ \quad \left. \left. + \frac{I}{b} A_V + m a \frac{a-h}{b} A_V \right\} \right] \\ C_R = \frac{b}{A_V} \{ l \cos \theta_V - 2\pi f m a A_H \sin (\theta_H - \theta_V) \} \end{cases} \dots\dots\dots(6)$$

ここに

$$A = A_H^2 + \left(\frac{h}{b} A_V \right)^2 - 2 \frac{h}{b} A_H A_V \cos (\theta_H - \theta_V) \dots\dots\dots(7)$$

Figs. 13～19は Figs. 5～10 に示された振幅特性および位相特性を(3)式あるいは(6)式に代入して得られた各成

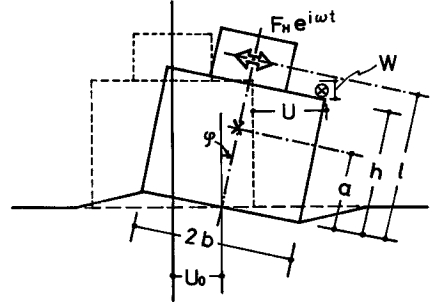


Fig. 12 Foundation model for horizontal vibration.

分に対する(a)等価剛性 (K_V, K_H, K_R) および(b)等価減衰常数 (C_V, C_H, C_R) を示すグラフで、その横軸は振動数である。また、これらのグラフ中にある実線および破線は波動理論より求められる **Dynamical Ground Compliance** を換算して得られた等価剛性および等価減衰常数で、実線は基礎下の応力分布を一樣分布、点線では放物分布とした場合で、それらの応力分布が **Table 2** に示されている。

Table 2. Stress functions for uniform and parabolic distributions.

加 振 方 向	一 様 分 布	放 物 分 布
上 下 加 振	$\sigma_Z = -q_{0V} Q(t)$	$\sigma_Z = -\left\{1 - \left(\frac{x}{b}\right)^2\right\} \left\{1 - \left(\frac{y}{c}\right)^2\right\} q_{0V} Q(t)$
水平加振 x 方向	$\tau_{ZX} = -q_{0H} Q(t)$	$\tau_{ZX} = -\left\{1 - \left(\frac{x}{b}\right)^2\right\} \left\{1 - \left(\frac{y}{c}\right)^2\right\} q_{0H} Q(t)$
回 転 加 振 回 転 軸 y 軸	$\sigma_Z = -\frac{x}{b} q_{0R} Q(t)$	$\sigma_Z = \frac{x}{b} \left\{1 - \left(\frac{x}{b}\right)^2\right\} \left\{1 - \left(\frac{y}{c}\right)^2\right\} q_{0R} Q(t)$

Table 2 には加振方向の基礎下の応力分布を示してあり、他の成分の応力および基礎下以外の地表のすべての応力は零と仮定している。ここに、 q_{0V} , q_{0H} , q_{0R} は正の定数で、 b , c は基礎底面の半幅、 x , y は基礎底面中心からの距離、 $Q(t)$ は **time factor** を示す。

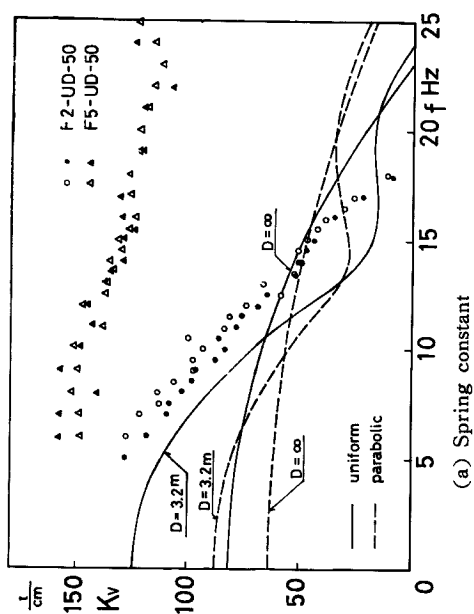
実験結果の算定式および理論計算に用いた地盤および基礎構造の常数は **Table 3** に示すとおりである。

Table 3. Constants of ground and foundation.

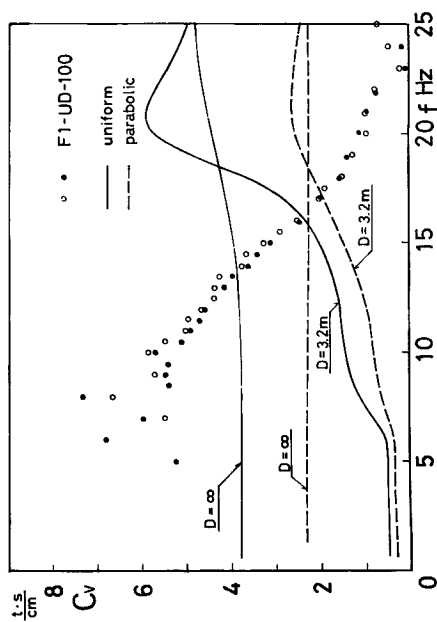
		F 1 基 礎	F 2 基 礎	F 5 基 礎
地盤のポアソン比	ν		0.49375	
S 波の速度	v_S		80m/sec	
地盤の密度	ρ		1.5t/m ³	
S 波に対する粘性係数	$\eta_S = \frac{v_S}{b} \cdot \frac{\mu'}{\mu}$	0.05		0.1
P 波に対する粘性係数	$\eta_P = \frac{v_S}{b} \cdot \frac{\lambda' + 2\mu'}{\lambda + 2\mu}$	0.05		0.1
基礎底面半幅	$b=c$	2 m	1 m	1 m
基礎高さ	h	70cm	35cm	200cm
基礎重心高さ	a	37.9cm	30.4cm	108.2cm
加振力作用高さ	l	100cm	65cm	230cm
基礎・起振機質量	m	28.16t	4.66t	20.50t
基礎・起振機慣性モーメント	I	37.71t・m ²	1.59t・m ²	15.05t・m ²

ここに、 λ , μ は Lamé の常数、 λ' , μ' は Lamé の常数に対する粘性常数を表わし、上の地盤の媒質がもつ dissipative な粘性係数 η_S , η_P は仮定である。

層厚 D は $D=\infty$ (半無限地盤) と $D=3.2m$ (前報⁴⁾ において実験による振幅特性と **Dynamical Ground Compliance** を用いた理論による振幅特性がよく一致した層厚に対応) を採用した。ここで、 $D=3.2m$ とは

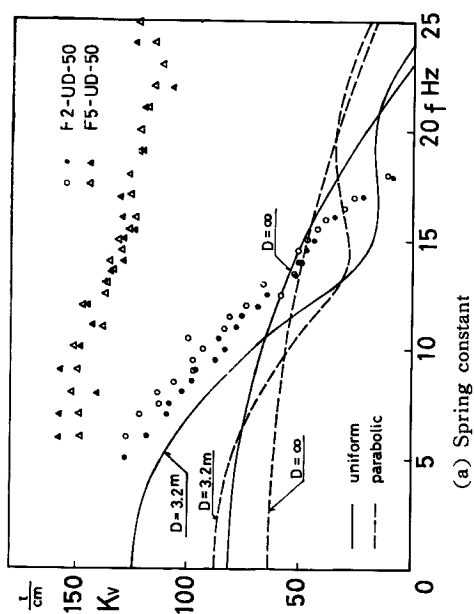


(a) Spring constant

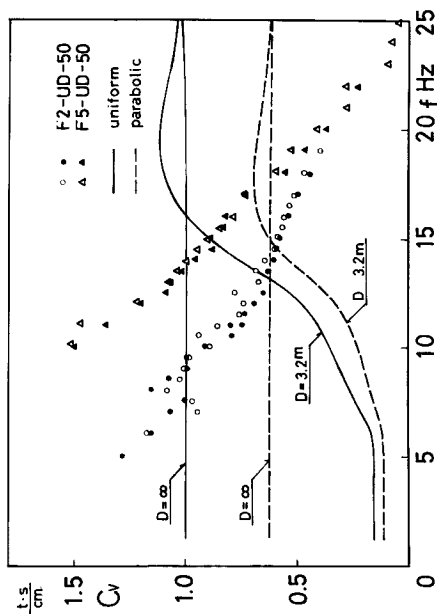


(b) Damping constant

Fig. 13 Equivalent spring and damping constants for vertical component (F1-foundation).



(a) Spring constant



(b) Damping constant

Fig. 14 Equivalent spring and damping constants for vertical component (F2 and F5-foundations).

3.2 m の厚さをもつ粘弾性地盤が剛基盤上に覆っているものと仮定した地盤である。Dynamical Ground Compliance は文献²⁾で扱ったように基礎下の変位に応力分布の重みを掛けた平均値を採用した。

3. 3. 上下に対する等価剛性および等価減衰常数

Figs. 13 (a), (b) はそれぞれ F1 基礎の上下等価剛性 K_V および上下等価減衰常数 C_V である。F1 基礎の K_V は振動数が高くなるにつれ小さくなっており、**Table 3** に示した基礎—地盤モデルに対する Dynamical Ground Compliance から求めた理論値の傾向とよく一致している。 C_V は振動数が高くなるにつれ小さくなっているが、理論による C_V は半無限地盤 ($D=\infty$) においてはほぼ振動数に対して一定である。また、粘弾性層と剛基盤から成る成層地盤 ($D=3.2\text{m}$) における理論による C_V は低振動数域では地盤の逸散減衰がなく小さく、振動数が高くなるにつれ、 C_V も大きくなり $D=\infty$ の値に近づいていく。図中の実線は基礎下の応力分布を一様分布、破線は放物分布としたときの理論値であり、応力分布が基礎中央に集中すると C_V の値が小さくなることを示している。一方、前報³⁾ Fig. 8 に示されるように、低振動数では基礎下の動土圧は一様に近い分布をしているが、高振動数に成るにつれ応力が基礎中央に集中する傾向があるので、**Fig. 13 (b)** の C_V は低振動数では実線に近く、高振動数に成ると破線に移行していくものと考えられるので、理論による C_V も基礎下の応力分布を考慮すると高振動数に成るにつれ小さくなる傾向にある。

Figs. 14 (a), (b) は F2 基礎 (○印) および F5 基礎 (△印) における上下等価剛性 K_V ならびに等価減衰常数 C_V である。F2 基礎における K_V は振動数の増加とともに減少し、**Table 3** に示された地盤—基礎モデルによる理論値とよく一致しているが、F5 基礎における K_V は F2 基礎より大きな値を示している。実験によるこの 2 個の K_V は基礎底面寸法が同じであるため、地盤が弾性でその地盤条件が変らなければ一致すべきものである。しかし、グラフのように相違が生じているのは基礎の高さが異なると基礎底面の接地圧が変わり、そのため地盤の条件 (たとえば、歪レベルによる剛性の硬化や非線型性等) が異なったものと推定される。F2 基礎 (○印) および F5 基礎 (△印) における C_V も F1 基礎の C_V と同じく振動数が高くなるにつれ減少している。また、F2 基礎よりも接地圧の大きい F5 基礎の C_V の方が大きな値となっている。この場合も基礎下の応力分布が振動数とともに異なるため理論値の C_V は高振動数になるにつれ実線 (一様分布) から破線 (放物分布) に移行しているものと考えられる。

Fig. 15 は縦軸に単位面積当りの上下等価剛性 K_V 、横軸に振動数 f と基礎半幅 b との積 $f \cdot b$ (これは b の異なる F1 基礎と F2 基礎とが比較できるように) をとり、S 波の速度 V_S を $V_S=80\text{m/sec}$, 100m/sec , 120m/sec としたときの理論値を実線で示した。このときの地盤常数は $D=\infty$ とし、 V_S 以外は **Table 3** と同じ値を用いている。また、**Fig. 15** には F1 基礎 (□印)、F2 基礎 (○印) および F5 基礎 (△印) における実験結果が同時に示されている。ここに、基礎構造の高さ h は F1 基礎が 70cm, F2 基礎が 35cm, F5 基礎が 200cm であるため、接地圧は F2, F1, F5 基礎の順に大きくなっており、 K_V の値もその順に大きく現われている。したがって、地盤の等価剛性は接地圧が増すにつれ堅くなる傾向を示し、 $V_S=80\text{m/sec}$, 100m/sec , 120m/sec の曲線にほぼ対応している。

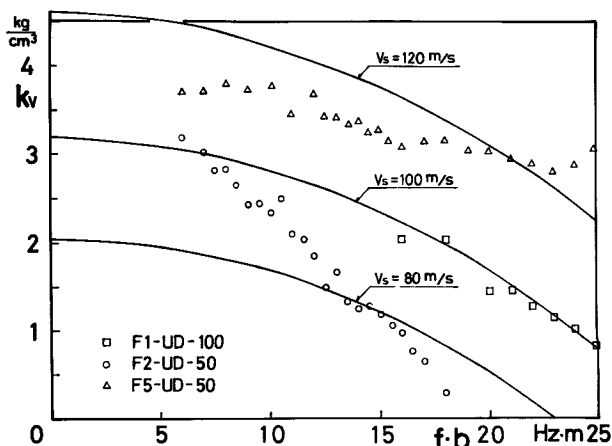
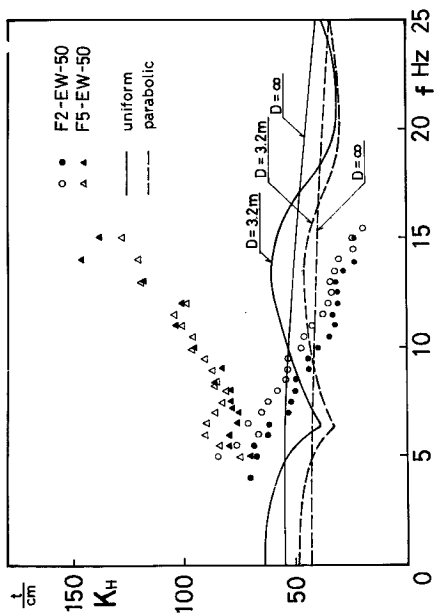
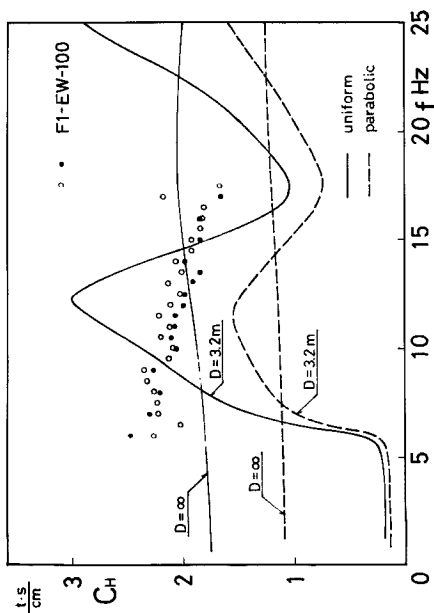


Fig. 15 Equivalent spring constant for vertical component.



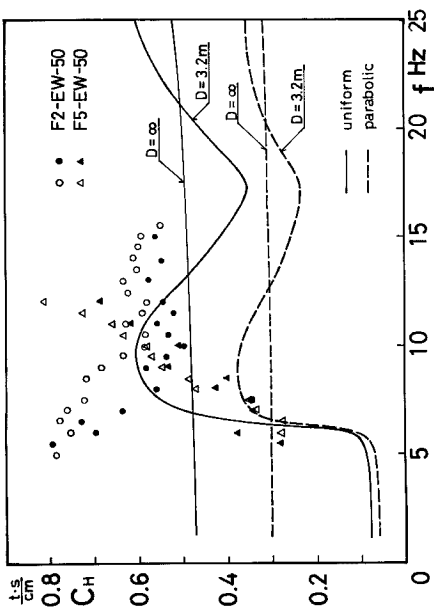
(a) Spring constant



(b) Damping constant

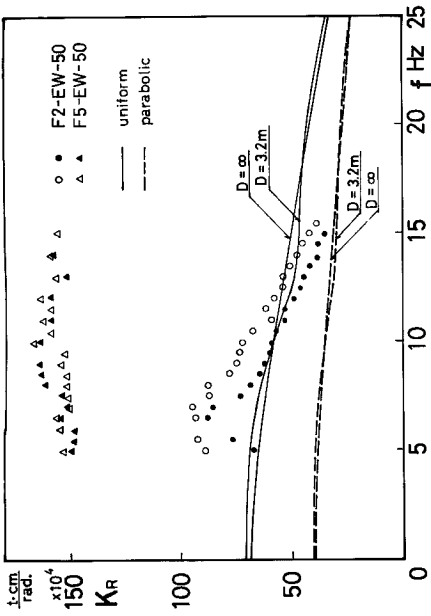
Fig. 16 Equivalent spring and damping constant for horizontal component (F1-foundation).

(a) Spring constant

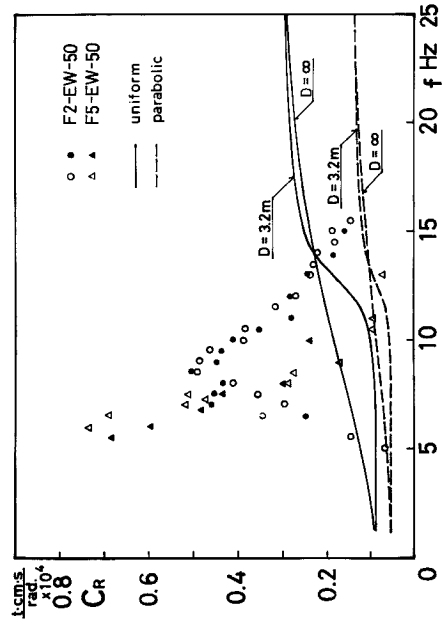
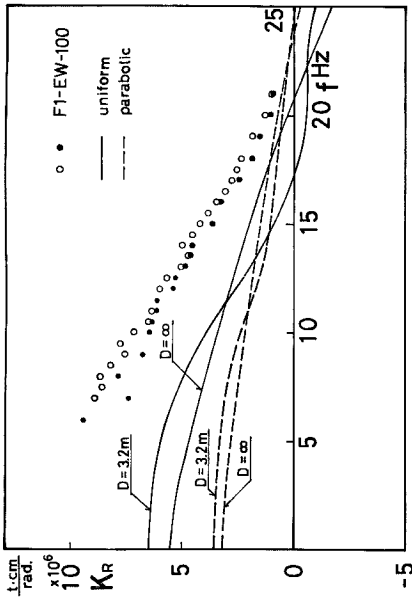


(b) Damping constant

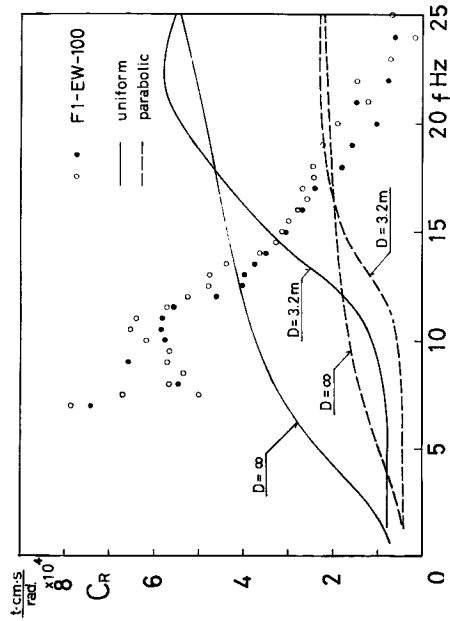
Fig. 17 Equivalent spring and damping constant for horizontal component (F2 and F5-foundations).



(a) Spring constant

(b) Damping constant
Fig. 19 Equivalent spring and damping constant for rotational component (F2 and F5-foundations).

(a) Spring constant

(b) Damping constant
Fig. 18 Equivalent spring and damping constant for rotational component (F1-foundation).

3. 4. 水平に対する等価剛性および等価減衰常数

Figs. 16 (a), (b) は F1 基礎の水平等価剛性 K_H および水平等価減衰常数 C_H である。実験による K_H は振動数が高くなるにしたがい小さくなっているが、理論による $D=\infty$ の K_V は振動数に対して平坦である。しかし、地盤に層の存在を考慮すると振動数により K_H の値は大きく変わる。したがって、層厚の影響を考慮する必要がある。実験による C_H は振動数が高くなるにつれ小さくなるが、**Fig. 13 (b)** にみられるような上下の C_V よりは振動数に対する変化はゆるやかで、振動数による影響は水平の C_H よりも上下の C_V の方がよく受けている。実験による C_H は成層地盤 ($D=3.2\text{m}$) よりも半無限地盤 ($D=\infty$) とした理論値に近いが、ここで扱った成層地盤は剛基盤と粘弾性層と仮定しているため、低振動数域で成層地盤の C_H の値は極端に小さくなったので、基盤の剛性を考慮すると成層地盤の C_H の値は実験値に近づくと思われる。

Figs. 17 (a), (b) は F2 基礎 (○印) ならびに F5 基礎 (△印) の水平等価剛性 K_H および水平等価減衰常数 C_H である。F2 基礎構造 ($2\text{m} \times 2\text{m} \times 35\text{cm}$) の K_H (○印) は高振動数になるにつれ小さくなっているが、F5 基礎 ($2\text{m} \times 2\text{m} \times 2\text{m}$) の K_H (△印) は逆に大きくなっている。F2 基礎 (○印) の C_H は振動数が高くなるにつれ減少しているが、F5 基礎 (△印) では逆に増加している。水平の場合、層の影響が大きく現われ、理論による K_H , C_H は振動数に対して変動が急であり、また、S 波の速度が増加すると K_H , C_H の曲線は振動数の高い方に引伸ばされる。したがって、同じ振動数範囲であっても、S 波の速度により、 K_H , C_H の曲線が振動数に対し右上りになったり、右下りになったりすることがあり得る。

3. 5. 回転に対する等価剛性および等価減衰常数

Figs. 18 (a), (b) は F1 基礎の回転等価剛性 K_R および回転等価減衰常数 C_R を示すグラフである。 K_R の傾向は、上下等価剛性 K_V と同じく、振動数が高くなるにつれ減少し、理論値とよく似た傾向を示す。 C_R の傾向はある振動数 (10Hz 近傍) で最大となり、それより振動数が高くなると C_R は減少している。また、低振動数域では起振機の力が弱く SN 比が悪くなり実験結果はあまり得られていないが、10Hz よりも低い振動数域では、それが減少するにつれ C_R も減少する傾向を心もち示している。

Figs. 19 (a), (b) は F2 基礎 (○印) および F5 基礎 (△印) の回転等価剛性 K_R および回転等価減衰常数 C_R を示している。F5 基礎 (△印) の K_R は F2 基礎 (○印) の K_R よりも大きく、そして、F2 基礎の K_R は振動数の増加に対し減少しているのに対し、F5 基礎のそれは振動数にあまり関係せず一定値を保っている。F2 基礎による C_R は、F1 基礎のそれと同じく、ある振動数 (8 Hz 近傍) で最大となり、それより低い振動数では振動数の増加とともに、 C_R が増加していることがうかがえる。しかし、F5 基礎による C_R はそれが最大となる振動数がこの実験ではとらえることができていない。回転の場合、 K_R , C_R も理論による層の影響は小さく、層厚が大きくなると半無限地盤 ($D=\infty$) の値に近づいている。

4. む す び

本報では起振機による振動実験より基礎構造の振幅特性および位相特性を直接検出し、その結果を用いて地盤復元力の上下、水平および回転に対する等価剛性および等価減衰常数をグラフに示した。さらに、Dynamical Ground Compliance の理論値から求めた等価剛性および等価減衰常数を実験結果と同時に示し、実験値と理論値との比較を行なった。結果のまとめを以下に示す。

(1) 振動型による相違について

上下、水平および回転の振動型に対する等価剛性は、上下と回転に対しては同じような傾向を示している。しかし、水平等価剛性は高さの低い基礎構造では上下や回転のそれと同様な特性を示すが、高い基礎構造の水平等価剛性は上下や回転のそれとは異なっている。

等価減衰常数は上下、水平、回転の各振動型により異なった特性を示す。上下等価減衰常数は基礎構造の形にかかわらず振動数の増加にしたがい減少しているが、水平等価減衰常数では基礎構造の種類によりまちまちである。回転等価減衰常数は低振動数域では振動数の増加にともない増加し、高振動数域では逆に減少する。

(2) 基礎寸法による影響について

基礎構造が高くなり基礎底面の接地圧が大きくなると各振動型の等価剛性は大きくなる。特に高い振動数でその影響が顕著に現われ、地盤復元力は強く作用している。

等価減衰常数は、上下に対しては基礎構造が高くなるほど、すなわち、基礎底面の接地圧が大きくなるほど大きくなるが、水平および回転では明確な傾向は示しておらず、特に、水平では地盤の層の影響をよく受けるようである。

基礎幅による影響はあまり現われていないので、地盤復元力の等価剛性および等価減衰常数は土の応力レベルに関係すると考えられる。

(3) 実験値と理論値との比較について

ここで得られた実験結果と波動理論に基づく **Dynamical Ground Compliance** から解析した等価剛性および等価減衰常数はオーダー的には共に近い値を示している。

それらの実験値は低振動数域では基礎下の応力を一様分布と仮定した理論値に近く、高振動数域では放物分布と仮定した理論値に近い。これは、理論による等価剛性および等価減衰常数は基礎下の応力分布の仮定（一様分布と放物分布）により異なった値をとり、一方、基礎下の応力分布は振動数が高くなるほど中央に集中するという実験結果が得られている。

理論による等価剛性および等価減衰常数に及ぼす層厚の影響は、各振動型に対し少なからずあるが、水平に対しては重要な要素となり得る。

以上、実験および理論による地盤復元力の各振動型に対する等価剛性ならびに等価減衰常数を検討したが、ここで実験値を理論で説明するには、①「土の非線形性を考慮した応力レベルによる土の動的な性質」、②「振動数に対する基礎下の応力分布」および③「地表面近くの層構造」を詳しく知る必要がある。特に、①、②に関する資料を蓄積するため、これらの実験的研究が望まれる。

謝 辞

本実験の機会を与えられた日本建築総合試験所、日本住宅公団および新日本製鉄（株）、実験現場の設営と基礎構造模型の製作をお願いした竹中工務店・熊谷組共同企業体、終始実験の実施に御協力頂いた熊谷組設計部の各関係諸氏ならびに実験の実施とデータ整理に労をわずらわせた防災研究所技官市川信夫氏に深く感謝の意を表します。最後に、理論による数値計算には京都大学大型計算機センターの“FACOM 230—60”を使用したことを附記する。

APPENDIX

ここでは、理論として用いた **Dynamical Ground Compliance** の最終的な解析解である積分表示²⁾を示す。

(1) 上下の場合

$$\begin{aligned} J_z^z &= \frac{\tilde{W}_{ave}}{P_z \tilde{Q}(a_0)} b\mu \\ &= \frac{a_0 g_s}{\pi^2} \int_0^{\pi/2} d\theta \int_0^\infty d\xi \left[\frac{g_s \xi \alpha_P}{F(\xi)} \{ \xi^2 \coth a_0 d_{\alpha P} - \alpha_P \alpha_S \coth a_0 d_{\alpha S} \} \right. \\ &\quad \left. \cdot S(a_0 \xi, \theta, b, c) \cdot S(a_0 \xi, \theta, b, c) \right] \dots \dots \dots (A-1) \end{aligned}$$

(2) 水平の場合

$$\begin{aligned} J_x^x &= \frac{\tilde{U}_{ave}}{P_x \tilde{Q}(a_0)} b\mu \\ &= \frac{a_0 g_s}{\pi^2} \int_0^{\pi/2} d\theta \int_0^\infty d\xi \left[\frac{\xi}{\alpha_S} \tanh a_0 d_{\alpha S} \cdot \sin^2 \theta - \frac{g_s \xi \alpha_S}{F(\xi)} \{ \xi^2 \coth a_0 d_{\alpha S} \right. \\ &\quad \left. - \alpha_P \alpha_S \coth a_0 d_{\alpha P} \} \cdot \cos^2 \theta \right] \cdot S(a_0 \xi, \theta, b, c) \cdot S(a_0 \xi, \theta, b, c) \dots \dots (A-2) \end{aligned}$$

(3) 回転の場合

$$\begin{aligned}
 J_{ZX}^{ZX} &= \frac{\tilde{\varphi}_{ave}}{M_Y \tilde{Q}(a_0)} b^3 \mu \\
 &= \frac{a_0 g_S}{\pi^2} \int_0^{\pi/2} d\theta \int_0^\infty d\xi \left\{ \frac{g_S \xi \alpha_P}{F(\xi)} \{ \xi^2 \coth a_0 d \alpha_P - \alpha_P \alpha_S \coth a_0 d \alpha_S \} \right. \\
 &\quad \cdot N_Y(a_0 \xi, \theta, b, c) \cdot N_Y(a_0 \xi, \theta, b, c) \dots\dots\dots (A-3)
 \end{aligned}$$

ここに,

$$\begin{aligned}
 \alpha_P &= \sqrt{\xi^2 - n^2 g_P}, & \alpha_S &= \sqrt{\xi^2 - g_S} \\
 g_P &= \frac{1}{1 + i a_0 \eta_P}, & g_S &= \frac{1}{1 + i a_0 \eta_S} \dots\dots\dots (A-4)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \eta_P &= \frac{V_S}{b} \frac{\lambda' + 2\mu'}{\lambda + 2\mu} = n^2 \eta_S \left(2 + \frac{\lambda'}{\mu'} \right), & \eta_S &= \frac{V_S}{b} \frac{\mu'}{\mu} \\
 n^2 &= \frac{\mu}{\lambda + 2\mu} = \left(\frac{V_S}{V_P} \right)^2 = \frac{1 - 2\nu}{2(1 - \nu)}, & d &= \frac{D}{b} \\
 F(\xi) &= \xi^2 \{ (2\xi^2 - g_S)^2 + 4\alpha_P^2 \alpha_S^2 \} \\
 &\quad - \alpha_P \alpha_S \{ (2\xi^2 - g_S)^2 + 4\xi^4 \} \coth a_0 d \alpha_P \cdot \coth a_0 d \alpha_S \\
 &\quad + 4\alpha_P \alpha_S \xi^2 (2\xi^2 - g_S) \operatorname{cosech} a_0 d \alpha_P \cdot \operatorname{cosech} a_0 d \alpha_S \dots\dots\dots (A-5)
 \end{aligned}$$

$$V_S = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} : \text{S 波の速度}$$

$$V_P = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} : \text{P 波の速度}$$

$$a_0 = \frac{\omega b}{V_S} : \text{角振動数 } \omega \text{ の無次元量}$$

λ, μ : Lamé の常数, λ', μ' : λ, μ に対する粘性定数

ν : ポアソン比, ρ : 密度, D : 層厚

b, c : 基礎底面半幅, $i = \sqrt{-1}$: 虚数単位

$W_{ave}, U_{ave}, \varphi_{ave}$: 上下, 水平平均変位および平均回転角, ただし, 応力分布の重みを掛けた平均である。

P_Z, P_X, M_Y : 上下, 水平および回転加振力の振幅

$\tilde{Q}(a_0)$: 時間に関して Fourier 変換を施された加振力の time factor

基礎下の応力が一様分布に対して,

$$\begin{aligned}
 S(a_0 \xi, \theta, b, c) &= \frac{\sin(a_0 \xi \cos \theta)}{a_0 \xi \cos \theta} \cdot \frac{\sin\left(\frac{c}{b} a_0 \xi \sin \theta\right)}{\frac{c}{b} a_0 \xi \sin \theta} \dots\dots\dots (A-6)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 N_Y(a_0 \xi, \theta, b, c) &= \frac{3b}{c} \cdot \frac{\sin(a_0 \xi \cos \theta)}{a_0 \xi \cos \theta} \left\{ \frac{\sin\left(\frac{c}{b} a_0 \xi \sin \theta\right)}{\left(\frac{c}{b} a_0 \xi \sin \theta\right)^2} - \frac{\cos\left(\frac{c}{b} a_0 \xi \sin \theta\right)}{\frac{c}{b} a_0 \xi \sin \theta} \right\}
 \end{aligned}$$

基礎下の応力が放物分布に対して,

$$\begin{aligned}
 S(a_0 \xi, \theta, b, c) &= \frac{9}{(a_0 \xi \cos \theta \cdot \frac{c}{b} a_0 \xi \sin \theta)^2} \left\{ \frac{\sin(a_0 \xi \cos \theta)}{a_0 \xi \cos \theta} - \cos(a_0 \xi \cos \theta) \right\} \\
 &\quad \cdot \left\{ \frac{\sin\left(\frac{c}{b} a_0 \xi \sin \theta\right)}{\frac{c}{b} a_0 \xi \sin \theta} - \cos\left(\frac{c}{b} a_0 \xi \sin \theta\right) \right\} \dots\dots\dots (A-7)
 \end{aligned}$$

$$N_Y(a_0\xi, \theta, b, c) = \frac{45}{(a_0\xi \cos \theta \cdot \frac{c}{b} a_0\xi \sin \theta)^2} \cdot \left[\frac{3}{a_0\xi \cos \theta} \left\{ \frac{\sin(a_0\xi \cos \theta)}{a_0\xi \cos \theta} - \cos(a_0\xi \cos \theta) \right\} - \sin(a_0\xi \cos \theta) \right] \cdot \left\{ -\frac{\sin\left(\frac{c}{b} a_0\xi \sin \theta\right)}{\frac{c}{b} a_0\xi \sin \theta} - \cos\left(\frac{c}{b} a_0\xi \sin \theta\right) \right\}$$

参 考 文 献

- 1) 小堀鐸二, 南井良一郎, 鈴木 有, 日下部 馨: 長方形基礎の Dynamical Ground Compliance (その1) —— 半無限弾性地盤の場合 ——, 京都大学防災研究所年報, 第10号A, 1967, pp. 283~314.
- 2) Kobori, T., R. Minai and K. Kusakabe: Dynamical Characteristics of Soil-Structure Cross-Interaction System I, Bulletin of the Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, Vol. 22, 1973, pp. 111~151.
- 3) 小堀鐸二, 南井良一郎, 鈴木 有, 日下部 馨: 起振機試験による基礎構造の振動特性 —— (その1) 非弾性的な性質について ——, 京都大学防災研究所年報, 第17号B, 1974, pp. 115~138.
- 4) 小堀鐸二, 南井良一郎, 鈴木 有, 日下部 馨: 起振機試験による基礎構造の振動特性 —— (その2) 隣接基礎の影響について ——, 京都大学防災研究所年報, 第17号B, 1974, pp. 139~156.
- 5) 土岐憲三, 山本和義: 構造物基礎の動的ばね係数と減衰定数, 関東地震50周年記念地震工学シンポジウム論文集, 1973, pp. 301~308.

訂 正

前報(その2)⁴⁾にミス・プリントがあったので訂正します。

		誤	正
p. 151	7行目	$m_i = M_i / \mu B_1^3$	$m_i = M_i / \rho B_1^3$
p. 151	8行目	$I_i = I_i / \mu B_1^5$	$I_i = I_i / \rho B_1^5$