

起振機試験による基礎地盤動特性の評価について

小堀 鐸二・日下部 馨

ESTIMATION OF DYNAMIC SOIL-FOUNDATION PROPERTIES THROUGH VIBRATION TESTS

By *Takuji KOBORI* and *Kaoru KUSAKABE*

Synopsis

The purpose of this paper is experimentally to estimate the equivalent spring and damping constants of soil-foundation and the dynamical ground compliance, and to compare the experimental result with the theoretical one. To estimate the dynamic soil-foundation properties, vibration tests on three kinds of foundations excited by an eccentric-mass vibrator have been conducted.

If the stress of the soil-ground beneath the foundation is small, the experimental result coincides with the theoretical one, but if its stress is large, the both results are apt to be different from each other, because of the nonlinearity of the soil medium.

1. ま え が き

基礎地盤の適正な動特性を評価することは建築構造物の耐震設計を行う上で重要な事柄である。というのは、地盤は剛でなく、その上に建つ構造物と一体になり、地盤自身が振動系の要素として働き、構造物と地盤とが互いに干渉し合って、地盤の動的な特性が構造物の地震応答に大きく影響を及ぼすからである。

基礎地盤の動特性に関する理論的な研究では、弾性地盤または粘弾性地盤を対象に、円形あるいは短形基礎の載荷面を考え、応力型の境界値問題あるいは応力と変位の混合境界値問題を解くことにより、加振力に対する変位応答の比として、地盤動特性の一つである *Ground Compliance* が評価されている¹⁾。さらに、*Ground Compliance* を建築構造物のモデルに持続して、地盤—構造物系の振動特性や地震応答解析が多方面で研究されている。

ところが、基礎地盤の動特性に関する実験的な研究面では、地表面に作られた模型基礎の起振機による振動実験がいろいろと行われてはいるものの、そのほとんどは基礎板の振幅特性を理論解と比較しながら論じているにすぎず、地盤の動特性まで立入って評価、検討している実験報告は数少ない²⁾。

本研究では、同一地盤上に寸法の異なる3種類のコンクリート基礎を作り、起振機試験から、基礎板の振幅および位相遅れを検出する。さらに、それらの結果を用いて、地盤を1対の *spring* と *dash-pot* に置換したときの等価剛性、等価減衰常数を算定すると共に、実測による *Ground Compliance* を理論解と比較し、理論解の妥当性、適用限界等について検討を加える。

2. 実 験 概 要

2.1 実験敷地、基礎および計測機器

本実験は昭和53年12月から昭和54年3月にかけて、綾部市内の山を切り開いた造成地において行った。この敷地は昭和48年に小高い丘を削り、周りに埋立てて造成されており、敷地の中央部は切土地盤、南西端および北東端は盛土地盤である。敷地の概要および実験基礎の配置を **Fig. 1** および **Photo. 1** に示す。敷地の

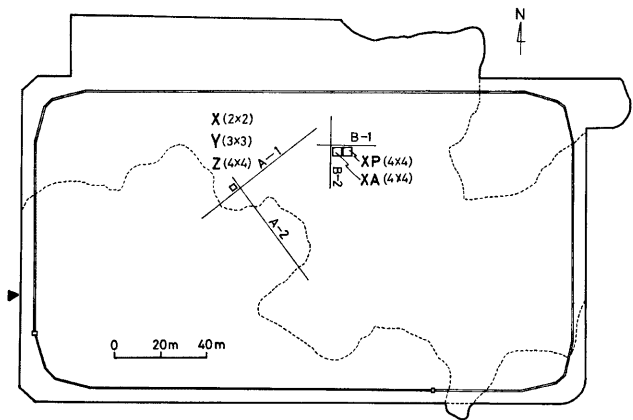


Fig. 1. Site for the experiment.

A-1 測線および A-2 測線 (Fig.1) に沿って板タタキ法による S 波探査を行っている。それによる解析断面図を Fig.2 に示す。基礎位置は切土部分で相当硬質な地盤 ($V_s=2000$ m/sec) であるが、造成時の攪乱や風化により、地表面近くでは軟らかく ($V_s=250\sim400$ m/sec) になっており、さらに極く表面 (深さ 5~10 cm) ではスコップで鋤き取ることが可能であった。したがって、地表面を約 10 cm ほどスコップで鋤き取ったのち、コンクリート基礎を表面に直接作った。ここでは、まず、底面 $2\text{ m}\times 2\text{ m}$ 、高さ 35 cm のコンクリート基礎 (X-Foundation) をつくり、ついで、その周囲にコンクリートを打増し、 $3\text{ m}\times 3\text{ m}\times 58\text{ cm}$ (Y-Foundation) および $4\text{ m}\times 4\text{ m}\times 70\text{ cm}$ (Z-Foundation) と基礎を順次大きくして、3 種類のコンクリート基礎を対象に起振機による振動実験を行う。基礎の寸法および重量 (起振機の自重も含む) を Fig.3 に示す。X 基礎で埋込んだ起振機用アンカーボルトを Y 基礎、Z 基礎にも兼用するため、基礎中央 $2\text{ m}\times 2\text{ m}$ 部分の高さは 35 cm のままとしている。X 基礎、Y 基礎および Z 基礎の写真を Photos. 2~4 に示す。ここで用いた起振機は Photo. 2 の X 基礎の上にみられる。この起振機の性能は下に示す通りである。

型式 EX-1000 DC 型 (伊藤精機 KK 製), 加振方式 不平衡重錘同期反転式 (4 組)
最大加振力 4 ton, 加振振動数範囲 1~40 Hz (3 段切換式)
偏心モーメント 0~1000 kg·cm, 加振方向 垂直および水平併用式

Photo. 5 には換振器を, Photo. 6 には計測装置の写真を示す。これらの性能一覧表を下に示す。

換振器	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
増幅器	東京測振製 SAG-17	固有振動数 3 Hz
		周波数特性 0.3~30 Hz
		最大測定値 600 gal or 60 kine
		最小分解能 0.0003 gal or 0.00003 kine
		遮断特性 -18 dB $\pm$ 1dB/Oct.
ローパスフィルター	共和電業製 LF-6 C	6 ch 用
リニアコーダ	渡辺測器製 WTR-331	4 ch 用
オシロスコープ	ソニーエレクトロニクス 5103N	14 ch 用
データレコーダ	共和電業製 RTP-110 A	

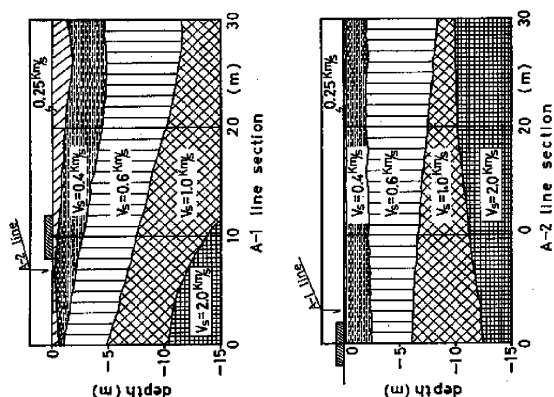


Fig. 2. Shear wave velocity at the field site.



Photo. 1 Field site.

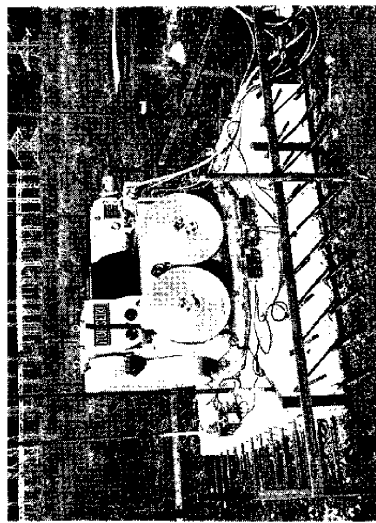


Photo. 2 X-foundation with rotating mass type oscillator.

2.2 計測方法

基礎板を起振機で上下あるいは水平方向に加振し、基礎上端の挙動を換振器 (SA 151 or SA 152) により検出し、増幅器 (SAG-17) で増幅すると同時に、得られた加速度応答を SAG-17 に組込まれた積分回路により速度応答に変換してデータレコーダ (RTP-110 A) に録音すると共に、ローパスフィルター (LF-6 C) を通してリニアコーダ (WTR-931) に書かせる。ここで、基礎板の挙動を速度応答として記録するのは、起振機で加振している基礎そのものの動きを計測するので、起振機の取付け部や起振機自身の機械的な高振動数の雑音があり、殊に、それが加速度応答に敏感に現われるためである。



Photo. 3 Y-foundation.



Photo. 4 Z-foundation.

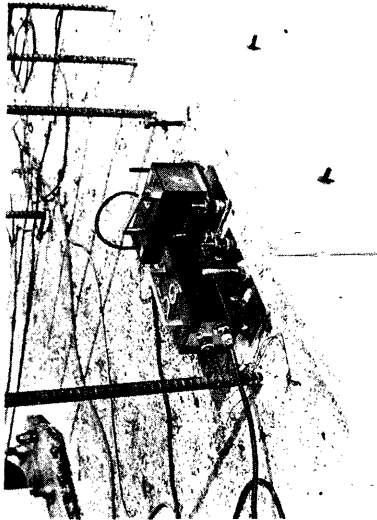


Photo. 5 Seismometers.

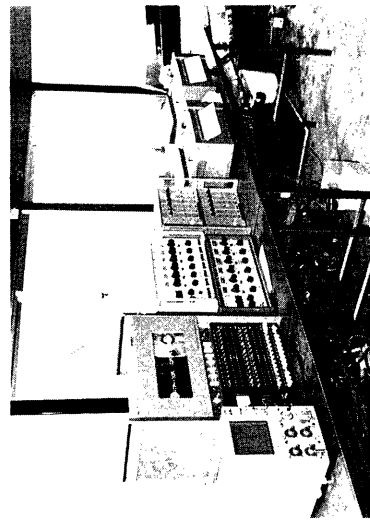


Photo. 6 Vibration-measuring system.

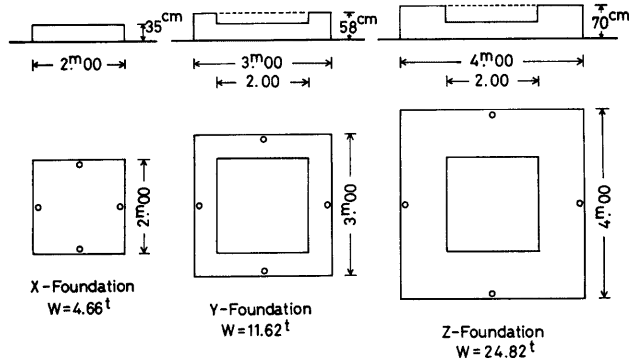


Fig. 3. Foundation geometries.

計測は離散的に振動数を変更しながら測定する方法をとった。すなわち、ある振動数で基礎板を加振し、その応答が定常に達するのを待って記録をとり、次のステップの振動数に移る方法である。ここで振動数を逐次上げながら計測を進めるものを Up の過程、下げていくものを Down の過程と名付ける。

3. 実験結果および考察

3.1 振幅特性および位相特性

ここでは、X 基礎 (2 m × 2 m × 35 cm, $W=4.66$ t), Y 基礎 (3 m × 3 m × 58 cm, $W=11.62$ t) および Z 基礎 (4 m × 4 m × 70 cm, $W=24.82$ t) の上下加振による基礎板の上下方向の速度振幅特性と位相特性を検討する。基礎の応答は基礎上端稜の中央 4 点で計測した値の平均をとる。Figs. 4~6 はそれぞれ X 基礎, Y 基礎および Z 基礎における単位加振力当りの速度振幅特性 $|V/P|$ および加振力に対する速度応答の位相遅れ θ_r を示す。パラメータ EM は起振機の偏心モーメントを表わし、ここでは、 $EM=30$ kg·cm, 60 kg·cm, 90 kg·cm および 120 kg·cm の 4 つの場合について計測している。図中○印は振動数を逐次上げながら計測した Up の過程の結果であり、●印は Down の過程での応答を示している。偏心モーメント EM と加振力 P の関係は、加振振動数 f 、重力の加速度 g を介して下式で与えられる

$$P = \frac{4\pi^2 EM f^2}{g}$$

したがって、 EM と f に対する加振力 P を示すと下表のようになる。ただし、起振機の性能上、 $P \leq 4$ ton である。

Table 1. Exciting force on an eccentric mass vibrator.

$EM \backslash f$	15 Hz	20 Hz	25 Hz	30 Hz	35 Hz	40 Hz
30 kg·cm	0.27 t	0.48 t	0.76 t	1.09 t	1.48 t	1.93 t
60	0.54	0.97	1.51	2.18	2.96	3.87
90	0.82	1.45	2.27	3.26		
120	1.09	1.93	3.02			

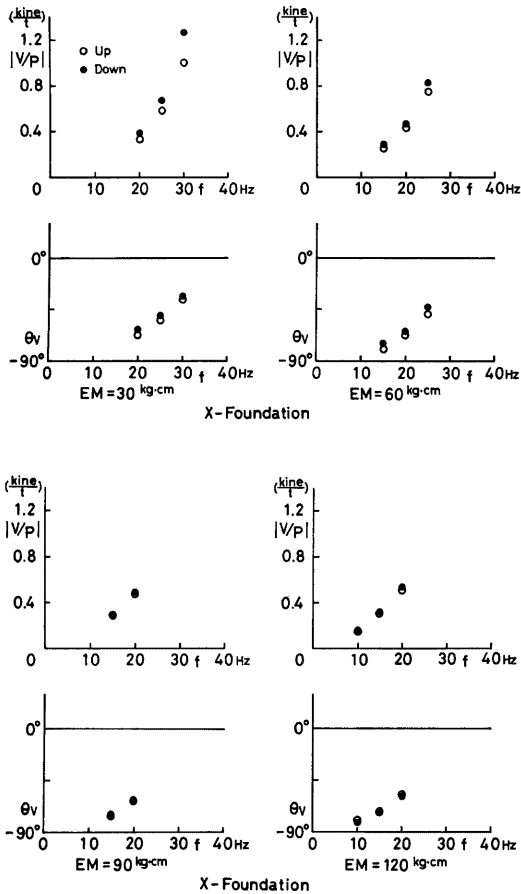


Fig. 4. Magnification factor and phase angle of X-foundation.

X 基礎では、振動数を高くすると応答が大きくなり、換振器が頭打ちして、共振点まで振動数を上げることができなかった。Y 基礎の振幅特性 (Fig. 5) は振動数と共に増加する一方で、この図からは共振点を確認することはできないが、位相特性から判断すると共振振動数は約 35 Hz である。Z 基礎の共振振動数は位相特性から判断するとほぼ 33 Hz であり、振幅特性も 33 Hz で頂点がかすかに読みとれる (Fig. 6, $EM = 30 \text{ kg} \cdot \text{cm}$ および $60 \text{ kg} \cdot \text{cm}$)。

3.2 等価剛性および等価減衰常数

基礎板を支えている地盤を単純に 1 対の Spring と dash-pot で構成されると仮定し、先に得られた振幅と位相から、Spring の等価剛性と dash-pot の等価減衰常数を算定する。すなわち、等価剛性 K_F と等価減衰常数 C_F は式で与えられる²⁾。

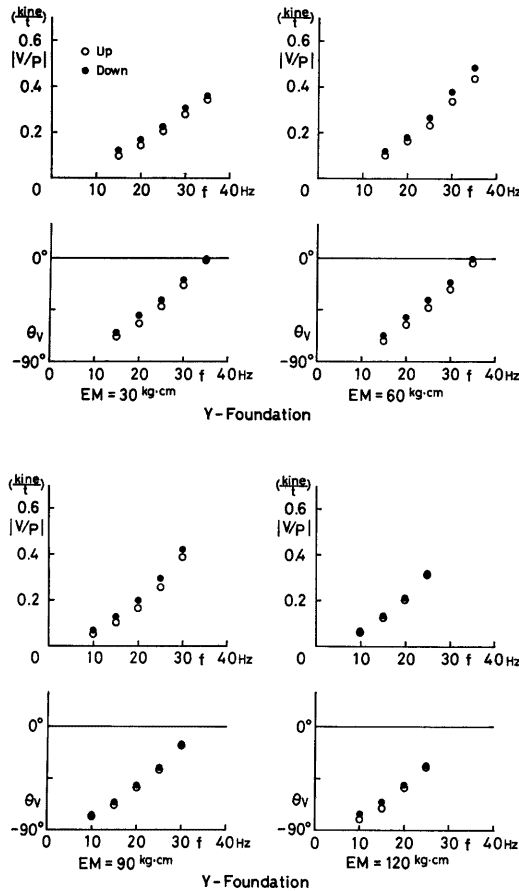


Fig. 5. Magnification factor and phase angle of Y-foundation.

$$K_V = 2\pi f \left\{ 2\pi f \cdot m - \frac{\sin \theta_V}{|V/P|} \right\} \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$C_V = \frac{\cos \theta_V}{|V/P|} \quad \dots\dots\dots(2)$$

ここに、 f は加振振動数、 $m=W/g$ は起振機を含む基礎の質量、 $|V/P|$ と θ_V は単位加振力当りの振幅と加振力に対する速度応答の位相遅れ、 g は重力の加速度である。

Figs. 4~6 に示された振幅および位相の実測値を (1) 式および (2) 式に代入して算定した等価剛性 K_V および等価減衰常数 C_V を **Figs. 7~9** の (a) および (b) に示す。さらに、各々の K_V 、 C_V のグラフに、基礎下の応力分布を放物分布と仮定した半無限弾性地盤における正方形基礎の Ground Compliance の理論解から算定した地盤の等価剛性と等価減衰常数を実線で示す。無次元量として得られている理論解を有次元

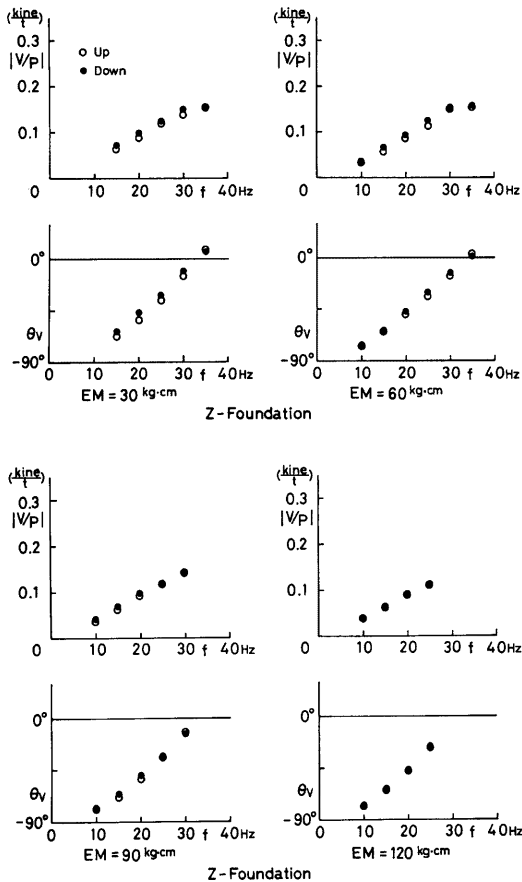
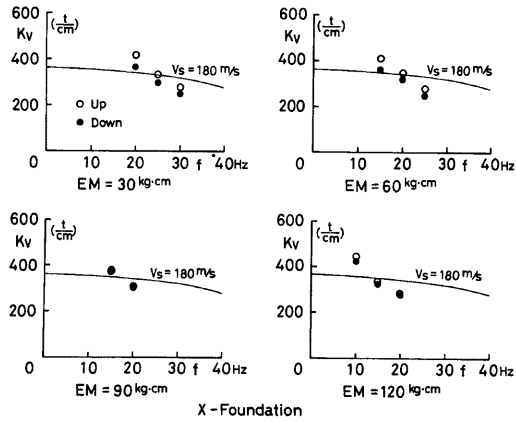
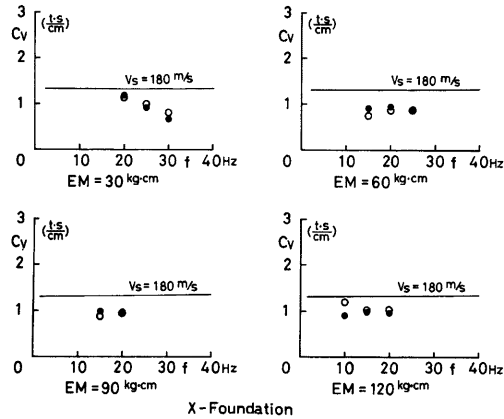


Fig. 6. Magnification factor and phase angle of Z-foundation.

量に変換するのに、ここでは、地盤の密度 ρ を各基礎に対して $\rho = 2.0 \text{ t/m}^3$ とし、S 波の速度を X 基礎では $V_S = 180 \text{ m/sec}$ 、Y 基礎では $V_S = 220 \text{ m/sec}$ 、Z 基礎では $V_S = 250 \text{ m/sec}$ を採用している。等価剛性について調べると、この振動数域 (0~40 Hz) では振動数の増加に伴ない、理論値はすべての基礎で減少している。実験値も振動数の増加に伴ない等価剛性は減少し、X 基礎を除くと、等価剛性は定性的、定量的に実験結果と理論値とは良く対応している。しかし、X 基礎では実測点が少ないこともあるが、振動数の増加に対する等価剛性の減少率は大きいようである。等価減衰常数に関しては、理論値では各基礎とも振動数が高くなるとやや増加きみではあるが、ほぼ一定とみなせる。X 基礎の実測値は、 $EM = 30 \text{ kg-cm}$ を除くとはほぼ振動数に関し一定であり、Y 基礎では、振動数が 20 Hz を越えると減少きみではあるが、20 Hz 以下ではほぼ一定の値とみなせる。Z 基礎では振動数の増加につれ等価減衰常数もやや増える傾向にあり、理論値と良い一致がみられる。



(a) Equivalent spring constant.



(b) Equivalent damping constant.

Fig. 7. Equivalent spring constant and damping constant of X-foundation

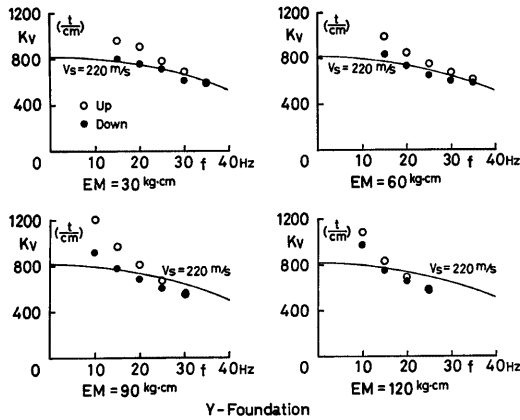
3.3 応力と変位の関係

起振機による加振力と基礎の慣性力から地盤の反力 R を算出することができる。すなわち、反力 R は次式で表わせる。

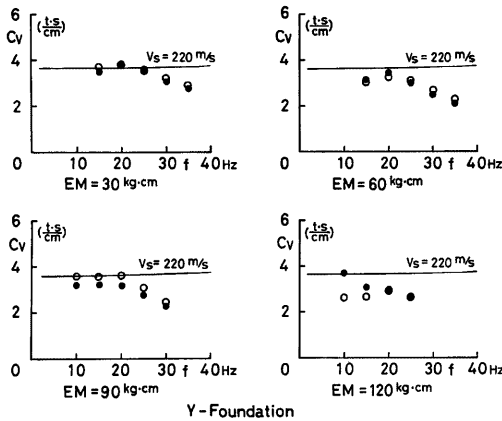
$$R = P \left\{ \left(1 - 2\pi f \frac{W}{g} |V/P| \cos \theta_v \right) + 2i\pi f \frac{W}{g} |V/P| \sin \theta_v \right\} \quad \dots\dots\dots(3)$$

ここで、 P は加振力、 f は加振振動数、 W は基礎の重量、 $|V/P|$ は基礎の速度振幅、 θ_v は速度応答の加振力に対する位相遅れである。

Fig. 10 は応力と歪の関係に対応するもので、基礎の変位 δ を横軸として基礎下の平均応力 $|R/4b^2|$ を示す。この図で、(a) は X 基礎、(b) は Y 基礎、そして (c) は Z 基礎を対象としたもので、●印は振動数



(a) Equivalent spring constant.

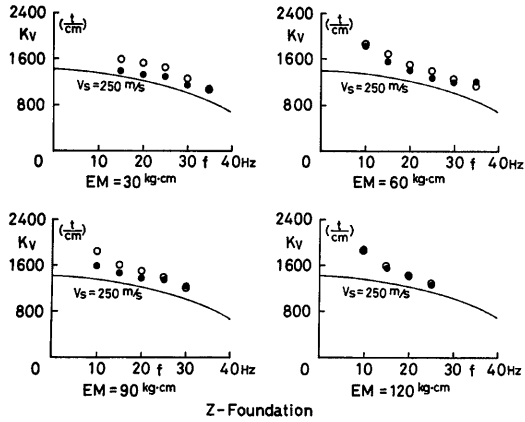


(b) Equivalent damping constant.

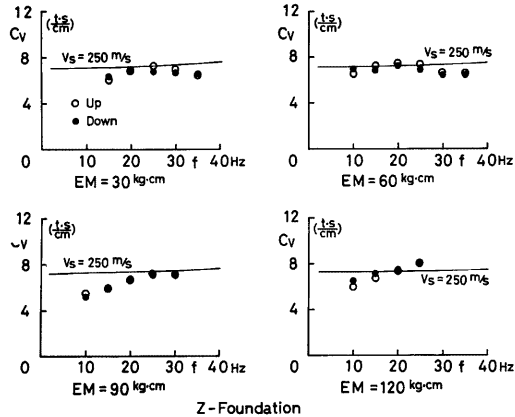
Fig. 8. Equivalent spring constant and damping constant of Y-foundation.

を 15 Hz として種々の偏心モーメントに対する応力と変位の関係をプロットしており、△印は 20 Hz, ▲印は 25 Hz, また、□印は 30 Hz の場合の応力と変位の関係を示している。Z 基礎の応力-変位特性の勾配はほぼ一定であるのに対し、X 基礎および Y 基礎では変位が増すにつれ勾配が小さくなり、地盤の *undrained* 特性を示している。

地盤の剪断剛性は基礎下の反力 R を変位 δ と基礎半幅 b の積で割った値、すなわち、 $|R/(\delta \cdot b)|$ に比例する。Fig. 11 は基礎下の平均応力 $|R/4b^2|$ を横軸にとって、地盤の剪断剛性に対応する量 $|R/(\delta \cdot b)|$ を示す。ここでは各基礎 (X, Y および Z) における $|R/(\delta \cdot b)|$ を種々の振動数および偏心モーメントに対して示している。この図から、Z 基礎では基礎下の平均応力に対する剪断剛性の低下はあまり認められない



(a) Equivalent spring constant.



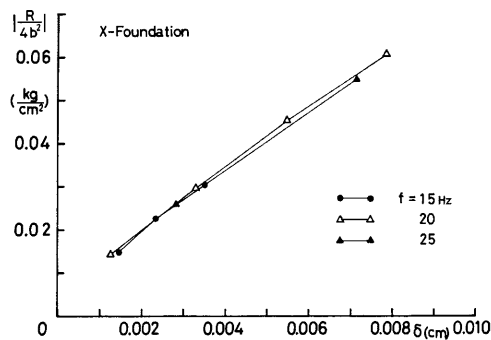
(b) Equivalent damping constant.

Fig. 9. Equivalent spring constant and damping constant of Z-foundation.

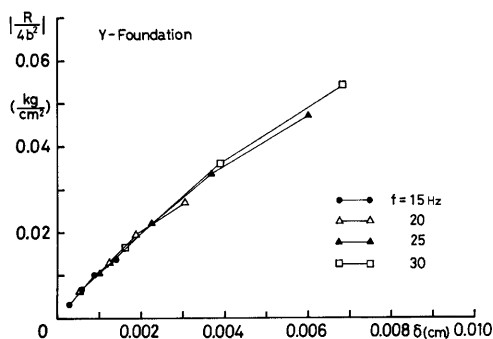
が、X 基礎、Y 基礎では応力の増加に伴ない剪断剛性が低下する様子がうかがえる。X 基礎、Y 基礎および Z 基礎は同一地盤上に載っているため、本来、地盤の剪断剛性は同じ値をとる。すなわち、X、Y および Z 基礎のプロットがほぼ一つの直線上に並ぶべきであるが、この実験では寸法の小さい基礎での剪断剛性は小さく、基礎幅が大きくなる程、剪断剛性が大きくなっている。基礎幅が大きくなると、それに比例して応力球根の作用範囲が深くなり、Fig. 2 の S 波速度の解析断面図に示されるように、硬い地盤の占める割合が多くなる。だから、X、Y および Z 基礎の順に剪断剛性が大きくなるのであろう。

3.4 Dynamical Ground Compliance の評価

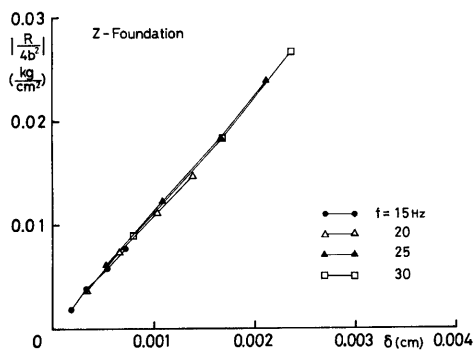
上下加振に対する Ground Compliance を $J_F = J_{r1} + iJ_{r2}$ と表わすと、実験基礎の運動方程式は次式とな



(a) X-foundation.



(b) Y-foundation.



(c) Z-foundation.

Fig. 10. Stress-displacement relations.

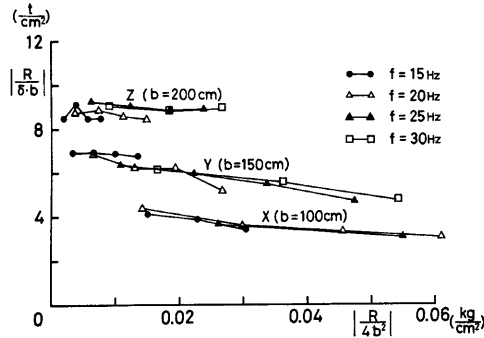


Fig. 11. Rigidity-stress relations.

る。

$$\frac{W}{g} \ddot{x} + \frac{1}{J_{r1} + iJ_{r2}} x = P e^{i\omega t} \quad \dots\dots\dots(4)$$

ここで W は基礎の重量, P は加振力の大きさ, x は基礎の上下変位, i は虚数単位, ω は角振動数, そして $\cdot$ は時間に関する微分を表す。この変位 x を速度振幅 $|V/P|$ と位相 θ_V で表わすと下式となる。

$$\frac{x}{P} = \frac{1}{i\omega} |V/P| e^{i(\omega t - \theta_V)} \quad \dots\dots\dots(5)$$

(5) 式を (4) 式に代入して, Ground Compliance の実数部 J_{r1} および虚数部 J_{r2} を求めると下式が得られる⁴⁾。

$$J_{r1} = \frac{1}{\omega} \frac{\frac{W}{g} \frac{\sin \theta_V}{|V/P|}}{\omega^2 \left(\frac{W}{g} \right)^2 - 2\omega \frac{W}{g} \frac{\sin \theta_V}{|V/P|} + \frac{1}{|V/P|^2}} \quad \dots\dots\dots(6)$$

$$J_{r2} = -\frac{1}{\omega} \frac{\frac{\cos \theta_V}{|V/P|}}{\omega^2 \left(\frac{W}{g} \right)^2 - 2\omega \frac{W}{g} \frac{\sin \theta_V}{|V/P|} + \frac{1}{|V/P|^2}}$$

Figs. 4~6 の振幅 $|V/P|$ および位相 θ_V を (6) 式に代入して得られた Ground Compliance $J_V = J_{r1} + iJ_{r2}$ をプロットしたのが **Fig. 12** である。このグラフの縦軸は J_{r1} または J_{r2} と基礎半幅 b との積で、横軸は振動数 f と基礎半幅 b の積で示している。これは幅の異なる基礎に対する Ground Compliance を次元を合わせて同一のグラフに描くためである。**Fig. 12** には起振機の偏心モーメント $EM = 30 \text{ kg} \cdot \text{cm}$, $60 \text{ kg} \cdot \text{cm}$, $90 \text{ kg} \cdot \text{cm}$ および $120 \text{ kg} \cdot \text{cm}$ 毎に, X 基礎の Ground Compliance の実測値を□, ■印で, Y 基礎を△, ▲印で, Z 基礎を○, ●印で示す。さらに, 実験結果と理論解が対照できるように地盤のポアソン比 $\nu = 0.404$, S 波の速度 $V_s = 250 \text{ m/sec}$, 密度 $\rho = 2.0 \text{ t/m}^3$ とし, 基礎下の応力分布を放物分布と仮定した理論解析による Ground Compliance が実線 (実数部) および破線 (虚数部) で **Fig. 12** に描かれている。すべての偏心モーメント EM のグラフについて, 基礎幅が小さくなるにつれ, Ground Compliance は大きくなっている。Z 基礎の Ground Compliance はどの偏心モーメントに対しても $V_s = 250 \text{ m/sec}$ の理論解とよく一致している。Y 基礎では偏心モーメントが $EM = 30 \text{ kg} \cdot \text{cm}$ の場合は, 理論解に概ね合っているが, EM が大きくなると振動数の増加に伴ない実測値はやや大きくなり, それが, 基礎幅がさらに小さく (X 基礎) になると, 振動数とともに実数部は大きくなる傾向にある。これは, **Fig. 11** で示されるように基礎幅が小さく

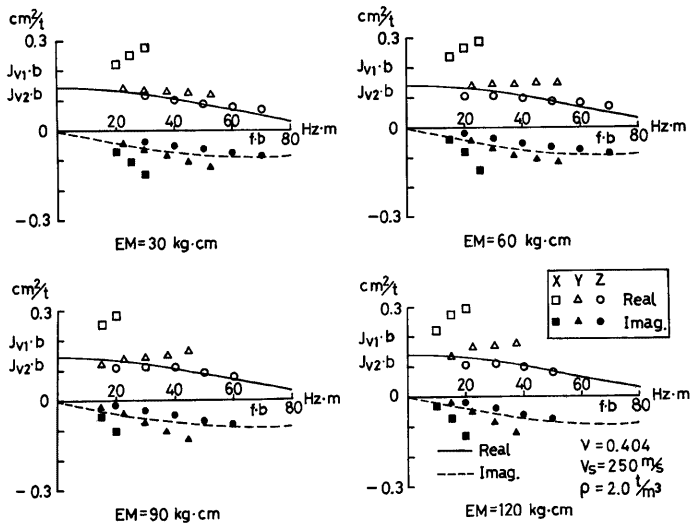


Fig. 12. Dynamical ground compliances.

なると剛性が低下し、また、応力の増加によっても剛性は低下するため、すなわち、地盤の非線型性のために実験値は弾性体として解析した理論値と異なるのである。

4. ま と め

3種類のコンクリート基礎、すなわち、X基礎 ($2\text{ m} \times 2\text{ m} \times 35\text{ cm}$, 重量 4.66 t)、Y基礎 ($3\text{ m} \times 3\text{ m} \times 58\text{ cm}$, 重量 11.62 t) および Z基礎 ($4\text{ m} \times 4\text{ m} \times 70\text{ cm}$, 重量 24.82 t) を対象に起振機試験を行い、上下加振による基礎板の振幅および位相から地盤の等価剛性および等価減衰常数、基礎下の応力と変位の関係および Ground Compliance を評価し、それらの値と基礎寸法ならびに起振機の偏心モーメントの関係について検討を加えた。ここで得られた主な知見を以下にまとめる。

(1) 等価剛性及等価減衰常数

大きい基礎では実験による等価剛性、等価減衰常数は定性的に理論値とよく一致しているが、基礎寸法が小さいと実測値と理論値とで傾向がやや異なってくる。実測値と理論値の定量的な比較となると、地盤係数 (例えば、S波速度や密度) の評価、選定に検討の余地は残るが、概ね合っている。

(2) 基礎下の応力と変位の関係

基礎底面が大きく、応力の小さいところでは応力と変位は linear な関係にあるが、基礎底面が小さく、かつ、起振機の偏心モーメントや振動数が増加して、地盤の応力レベルが高くなると、応力と変位の関係は under linear な性状を示す。

(3) Ground Compliance

幅の大きい基礎の実測による Ground Compliance は理論値とよく一致しているが、基礎幅が小さくなると実測値は大きく現われ、かつ、理論値とは定性的にも異なってくる。この理由として、地盤の非線型性が関係していると思われる。

以上、基礎幅が大きいと実験結果と理論値とは定性的、定量的に良い一致がみられるが、弾性理論を使っている限り、小さい基礎や偏心モーメントの大きい加振では実測値と理論値との対応を結び付けることが困難である。

謝 辞

本実験は京都大学工学部助手篠崎祐三氏、同院生松村孝夫氏および関西電力株式会社建設部瀬戸川葆氏の協力のもとに行なった。さらに、基礎板の製作には竹中工務店設計部の方々の協力を得ました。ここに、関係諸氏に深く感謝の意を表します。

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, 昭和42年3月, pp. 283~314.
- 2) 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3) — 地盤復元力の剛性と減衰性について —, 京都大学防災研究所年報第18号B, 昭和50年4月, pp. 59~78.
- 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4) — 根入れと地下水の影響について —, 京都大学防災研究所年報, 第18号B, 昭和50年4月, pp. 79~98.
- 4) 小堀鐸二, 日下部馨, 瀬戸川葆, 松村孝夫: Dynamical Ground Compliance の実測値について, 日本建築学会近畿支部研究報告集, 構造・材料・施工, 昭和55年6月, (投稿中).