

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——

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 2 EFFECTS OF AN ADJACENT FOUNDATION——

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

Synopsis

This paper deals with the experimental study on the coupled response of two square foundations over the soft soil deposit. An oscillator is placed on one of two foundations and it excites the foundation in a vertical direction or a horizontal direction. In order to examine the effects of adjacent foundation on the response of active foundation, the velocity responses of the active and passive foundation are measured, varying the distance between two foundations, and measuring results are shown in graphically forms. And also, the experimental results are compared to the theoretical results.

1. ま え が き

構造物の地震応答に与える地盤の影響は非常に大きいということから、地盤—構造物連成系の地震応答解析に関する研究がここ十数年間盛んに行なわれ、多くの研究者から、この分野の論文が発表されている。しかしながら、これまでの研究の殆んどは単独の構造物と地盤との相互作用であり、その構造物の周囲に近接して如何なる建物が建っているともその影響を無視するという条件であった。また、現在の構造物の耐震設計法でも隣接構造物との相互作用による影響を全く無視して行なわれているのが実情である。ところが、都市の建築構造物は広い敷地内にただ一つ建てられていることは非常に稀であり、その周囲に近接して他の多くの構造物が建っている。このように林立している構造物群に地震波が入射した場合、各構造物は地盤を通じて隣接構造物と相互作用を起し、それぞれが単独に建っているときの地震応答とは異なった応答を示す筈である。近年、このような観点から、構造物間の相互連成振動に関する研究が注目を集めてきた。これら構造物間の相互連成に関する理論的な研究としては、半無限弾性地盤上の2個の剛体円形基礎に対して Warburton, G. B., Richardson, J. D. and Webster, J. J. (1971), 粘弾性層地盤上の2個または7個の剛体および質点系に対して小堀, 南井, 日下部 (1971, 1973), Kobori, T. (1971), Kobori, T. Minai, R. and Kusakabe, K. (1973) および Kobori, T. and Minai, R. (1973), 平面的に並ぶ3個の質点系に対して Lee, T. H. and Wesley, D. A. (1973), 2次元問題としての扱いによる2個の剪断型連続体に対して Luco, J. E. and Contesse, L. (1973) がそれぞれ行なっている。一方、実験的研究としては、2個の円形基礎に対して MacCalden, P. B. and Matthiesen, R. B. (1969, 1973) が理論的研究と比較しながら振動特性に関する結果を発表している。しかしながら、同一地盤上で基礎間距離の変更や単独基礎との比較等に対する実験は行なわれていない。

本報では2個の相等しい正方形底面をもつ基礎の連成振動実験を取扱かう。特に、剛体基礎の振動特性に隣接基礎がその基礎間距離により如何なる影響を与えるかを明らかにしようとするものである。2節では、主として2-剛体基礎系の実験概要を述べる。ただし、前報¹⁾(その1)と一部重複するところがあるが、本報の理

解を助けるため、敢えて重複をいわず記す。3節では、2個の基礎に対する上下加振、水平平行加振および水平直角加振に対する加振基礎および受振基礎の応答を速度振巾特性の形でグラフに示し、基礎間距離による影響の検討を行なう。4節では、2-剛体系相互連成振動の波動論による解析法を概説し、理論による数値解と実験値との比較検討を両者の条件を明らかにしながら行なう。

2. 実験概要

本実験は(その1)の実験と同時期に同一敷地内において行なったもので、特に近接した2個の基礎間の相互作用を扱い、基礎の応答特性に与える隣接基礎の影響を検討する。

2.1. 実験の期間および敷地

本実験は昭和48年5月から同年8月まで約4ヶ月間、大阪市城東区の典型的な軟弱地盤と考えられる敷地内で行なったもので、Fig. 1 および Photo. 1 には実験敷地内での基礎および計測室等の配置を示す。Fig. 1 で F1, F2, F3 は振動実験に用いた基礎構造物を表わす。Fig. 2 は Fig. 1 中×印で表わされるボーリング地点での柱状図、標準貫入試験のN値および弾性波探査の結果である。柱状図に示される0~1.5m部分にはコンクリートやレンガの破片が含まれており、ここで波動の不規則な反射等が生じ、基礎の応答特性に不自然な影響を及ぼすものと考えられるので、この部分を60m四方に渡り深さ2mまで削除した。

2.2. 基礎構造模型および起振機

実験に用いた基礎は Fig. 3 に示されるように2m×2m×0.35mの鉄筋コンクリート製の2個の基礎(F2およびF3基礎)で、この基礎を Fig. 1 に示されるF2, F3の位置で打設した。F2基礎には起振機(伊藤精機製, EX-400 DL型)を設置し、この基礎を上下方向または水平方向に加振させる。F3基礎には直接外力を作用させず、F2基礎から地盤を通じて伝わる振動によりF3基礎の入力を与える。したがって、この論文では、F2基礎を加振基礎、F3基礎を受振基礎と呼ぶ。

基礎間距離の変更は加振基礎(F2)を Fig. 1 の位置に固定し、受振基礎(F3)を Fig. 1 のA-A'線に沿っ



Photo. 1 A view of the experiment

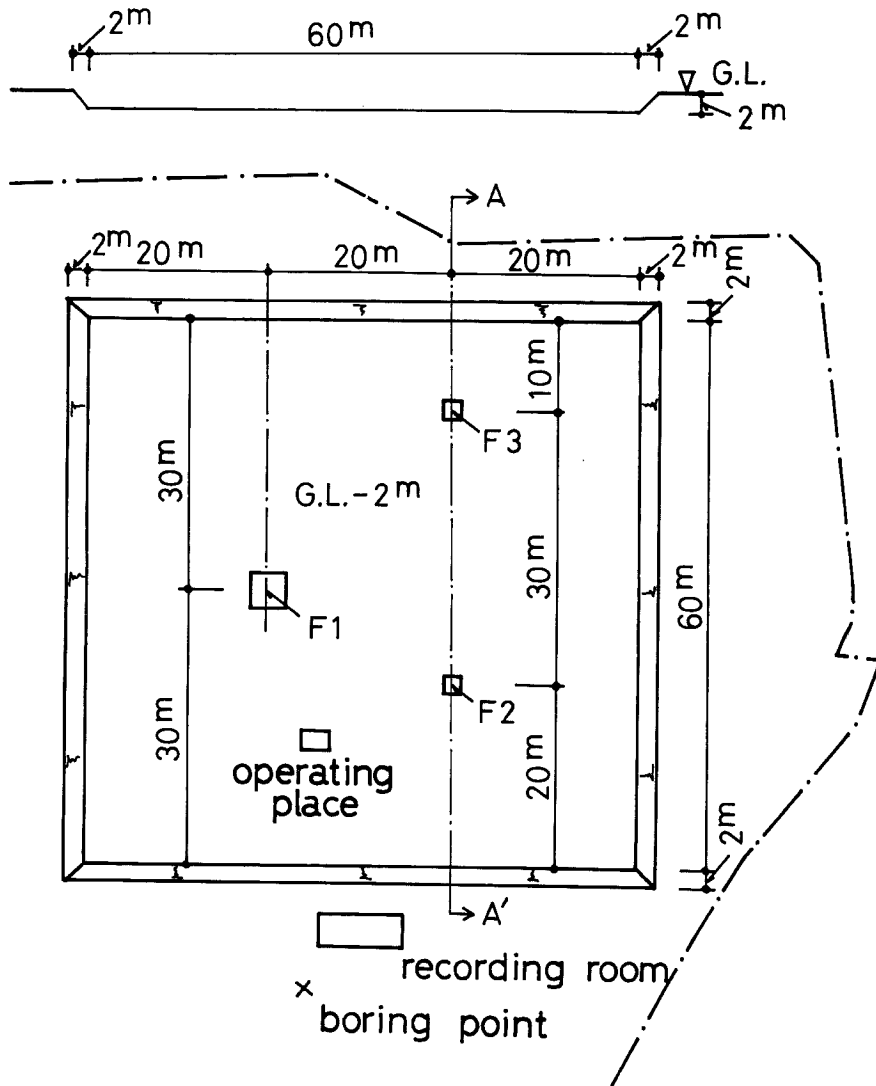


Fig. 1 Site for the experiment

て移動させた。振動実験を行なった基礎間距離 X は $X=2\text{m}$, 4m および ∞ である。 $X=2\text{m}$ は基礎巾が 2m であるため、加振基礎および受振基礎が互いに接した状態である。ただし、実際には、2つの基礎を 1cm ほど離してあるため、振動実験中に衝突は起しておらない。 $X=4\text{m}$ は **Photo. 2** に示されるように2つの基礎を基礎巾だけ離れた状態である。 $X=\infty$ は隣接基礎の影響を受けないということで約 30m ほど離れた場所に受振基礎 (F3) を置いた状態である。他方、受振基礎を取除いた地表の挙動を調べるため、受振基礎を実験敷地内の隅に移し、加振基礎から $X=2\text{m}$, $X=4\text{m}$ の地表の速度応答を計測した。**Photo. 2** は基礎間距離 $X=4\text{m}$ の情景で、右は加振基礎、左は受振基礎である。**Photo. 3** は地表の挙動検査情景であり、加振基礎および地中に埋設されている速度型換振器を示している。**Photos. 2, 3** の加振基礎上に設置されているのが起振機 (EX-400 DL 型) であり、その仕様を略記すると、最大加振力: 4000kg (15.8 Hz 以上), 加振振動数範囲: $0.75\sim$

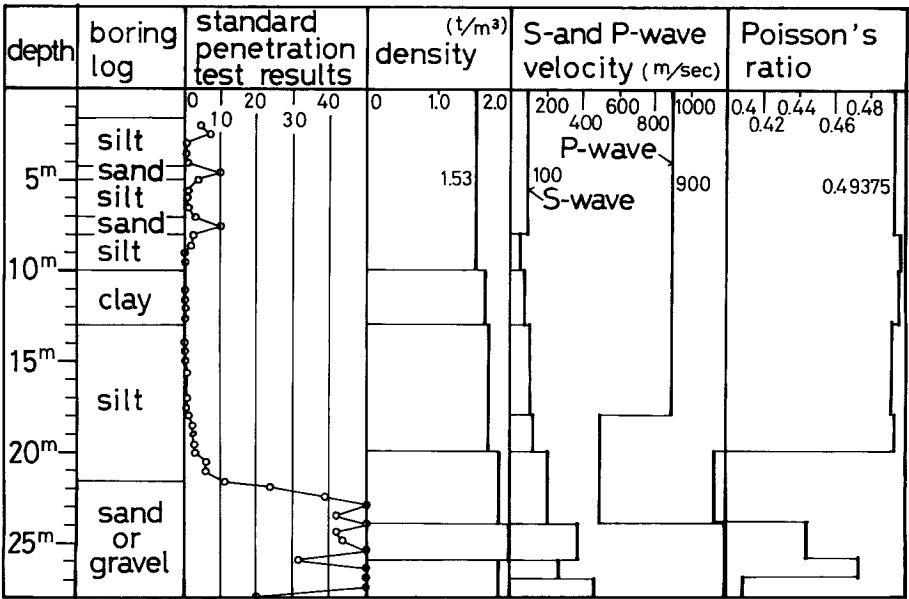


Fig. 2 Soil conditions

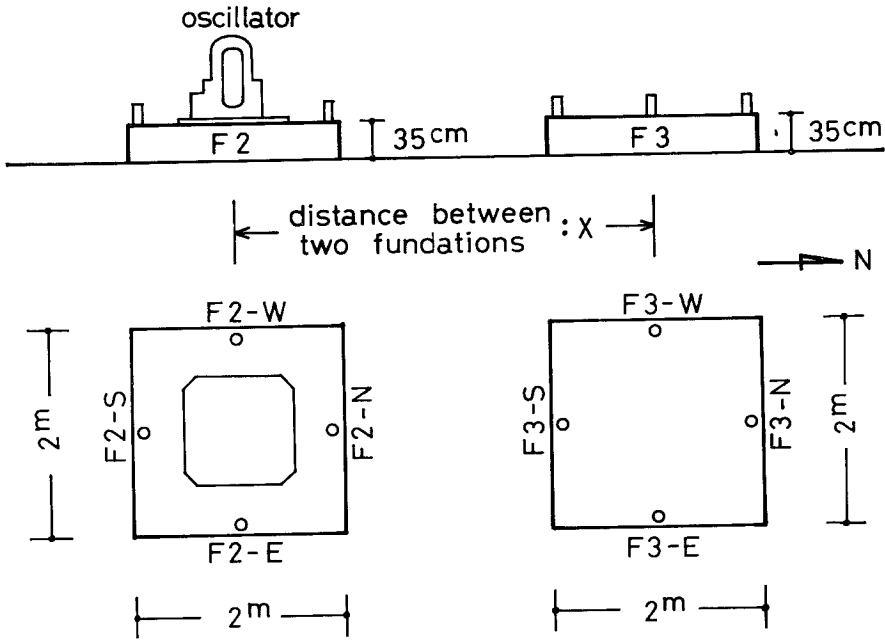


Fig. 3 Model of active (F2) and passive (F3) foundations



Photo. 2 Active (F2) and passive (F3) foundations

30Hz, 本体重量：約 1000kg, 水平加振力作用高さ：302 mm である。

2.3. 計測器およびそのキャリブレーション

本実験の振動応答の検出に用いた計測器を下に示す。

速度型換振器 東京振動研究所製, TMT 3, 固有振動数 3 Hz

プリアンプ 渡辺測器製, WA 221, 6 ch

ローパスフィルター 共和電業製, LF-6C, 6 ch

ペンアンプ 渡辺測器製, WA 231, 6 ch

ペンレコーダ 渡辺測器製, WA 211, 6 ch

このほか、換振器に制動抵抗を与えるため、それとプリアンプとの間に $10k\Omega$ の抵抗を並列に接続した。本実験では高周波数成分が応答記録の上に現われ、記録が不明確になるため、ローパスフィルターを用いた。ここで用いた加振振動数とローパスフィルターの遮断振動数との関係は下に示す通りである。

加振振動数	遮断振動数
0～6 Hz	10 Hz
6～12 Hz	20 Hz
12～24 Hz	40 Hz
24～30 Hz	80 Hz

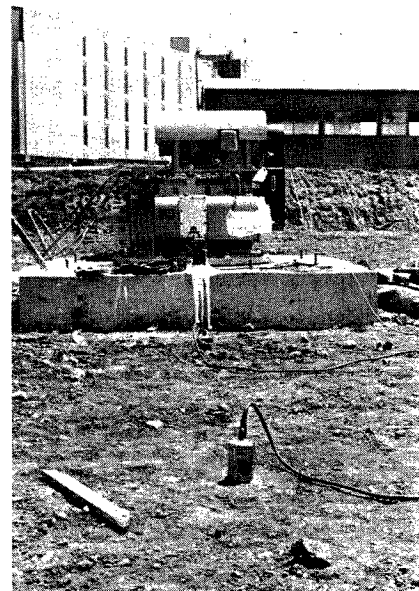


Photo. 3 Active (F2) foundation and seismometers

Photo. 4 は計測システムを示す写真で、右から順にペンアンプ、ペンレコーダ、プリアンプおよびローパ

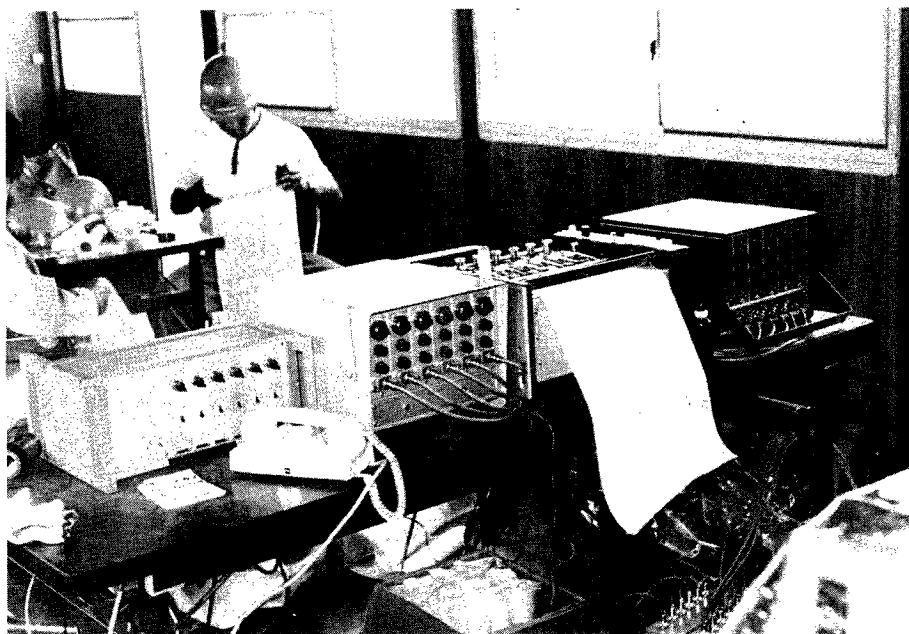


Photo 4 Recording system

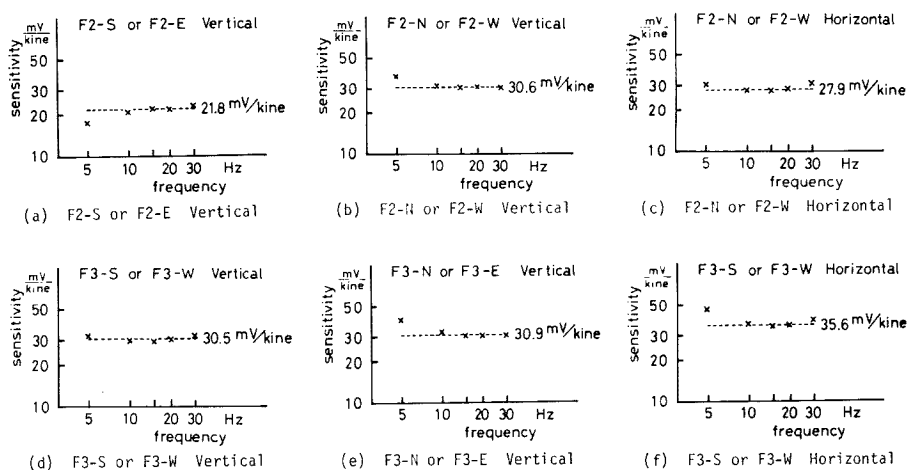


Fig. 4 Calibrations of measuring system

スフィルターである。

同じ換振器を用いても、それ以降に接続する計測システムのチャンネルが異なるとその計測システム全体としての感度が異なるため、ここでは実験に用いたのと同じ計測システム（各器具のチャンネルも合わせる）に接続し、上述のローパスフィルターの遮断振動数に合わせて換振器のキャリブレーションを行なった。

Figs. 4(a)~4(f) は本実験に主として用いた計測システムのキャリブレーションの例であり、その縦軸は感度 (mV/kine)、横軸は加振振動数 (Hz) を表す。また、図中の×印は感度の測定値を、点線は実験記録の換算に

用いた平均感度（水平成分は 10, 15, 20Hz の平均値，上下成分は 10, 15, 20, 30Hz の平均値）を示す。また，F2-N Horizontal 等の記号はそれぞれ換振器を設置した基礎の記号，設置位置（Fig. 3 参照）および検出成分を表わす。Figs. 4(a)~4(f) で示されるように実験を行なった振動数範囲内では，換振器の感度はほぼ一定であり，図に示される平均感度を用いて実験結果を整理してもあまり誤差はないと思われる。

2.4. 実験の方法および計測位置

起振機試験のように調和振動を発生させて行なう振動実験の計測法としては，段階的に変化させた種々の振動数に対する定常応答を順次結んで共振曲線等を求める方法と，振動数のある一定の速度で掃引（sweep）させ，所謂 run up または run down 振動を行ない，振動特性を求める方法とがある。しかるに，後者の場合，ここで用いる起振機と計測装置の性能上の制約で，掃引中の正確な加振振動数を知ることができず，また，応答記録から加振振動数を逆算することも困難である。したがって，ここでは前者の方法を採用する。すなわち，起振機の偏心モーメントをある値にセットしたのち，或る振動数で系の振動が定常状態になるのをまって所要の応答を計測記録し，その後，次の振動数に変化させ同様な計測を繰返す。

ここで採用した加振方向は上下加振，水平 NS 加振および水平 EW 加振である。ただし，2 個の基礎は南北軸に沿って並んでいるため，水平 NS とは 2 個の基礎が並んでいる方向であり，水平 EW とは 2 個の基礎に対し直角な方向を示す。計測位置および成分は加振基礎ならびに受振基礎の上下成分，水平成分および回転成分が検出できる位置での成分に対して行なった。すなわち，上下加振および水平 NS 加振では Fig. 3 の F2-S, F2-N, F3-S および F3-N の上下成分ならびに F2-N, F3-S の水平 NS 成分であり，水平 EW 加振に対しては F2-E, F2-W, F3-W および F3-E の上下成分ならびに F2-W, F3-W の水平 EW 成分である。

3. 実験結果およびその考察

連成基礎の振動実験により得られた結果を Figs. 5~7 に示す。ここで，グラフの横軸は加振振動数であり，縦軸は加振力 1 ton 当りの速度応答振巾を表わす。また，図中のパラメータ X は基礎間距離を示す。ここで示すグラフは起振機の偏心モーメントが 50 kg·cm (E.M.=50 kg·cm) の場合である。起振機の偏心モーメントを一定にして，加振振動数を増加させると，加振力は振動数の自乗に比例して増加する。E.M.=50 kg·cm の場合，加振振動数と加振力との関係は下に示す通りである。

加振振動数 (Hz)	10	15	20	25
加 振 力 (ton 重)	0.20	0.45	0.81	1.26

3.1. 上下加振

Figs. 5(a)~5(c) は F2 基礎に偏心モーメント E.M.=50kg·cm の上下加振力を作用させた場合で，Fig. 5(a) は加振基礎 (F2) の速度振巾特性の上下成分で，実線は受振基礎に近い側 (F2-N)，1 点鎖線は受振基礎から遠い側 (F2-S) であり，Fig. 5(b) は受振基礎 (F3) の速度振巾特性の上下成分であり破線は加振基礎に近い側 (F3-S)，2 点鎖線は加振基礎から遠い側 (F3-N) を示しており，Fig. 5(c) は加振基礎（実線；F2-N）および受振基礎（破線；F3-S）における速度振巾特性の水平 NS 成分（2 個の基礎が並んでいる方向）を表わす。さらに，Figs. 5(b), 5(c) には，受振基礎のない場合の地表における地盤の挙動を知るため，地表の速度振巾特性が点線で示されている。

Fig. 5(a) より次のことがまとめられる： $X=\infty$ （単独基礎）に対して，実線 (F2-N) と 1 点鎖線 (F2-S) とが一致しない。これは地盤内に非対称的な要素があると推定される。隣接基礎の影響は，1 点鎖線 (F2-S) では 16 Hz 近傍で，実線 (F2-N) では 20 Hz 近傍で特によく受ける。16 Hz 近傍の 1 点鎖線 (F2-S) に対しては $X=2\text{m}$ では振巾は増大するが， $X=4\text{m}$ では打消されている。20 Hz 近傍の実線 (F2-N) は $X=4\text{m}$ ， $X=2\text{m}$ とも $X=\infty$ より増大しており，特に， $X=2\text{m}$ と基礎間の間隔が狭まると大きな影響を受ける。

Fig. 5(b) より次のことがまとめられる：基礎間距離 X が同じでも破線 (F3-S) と 2 点鎖線 (F3-N) とでは

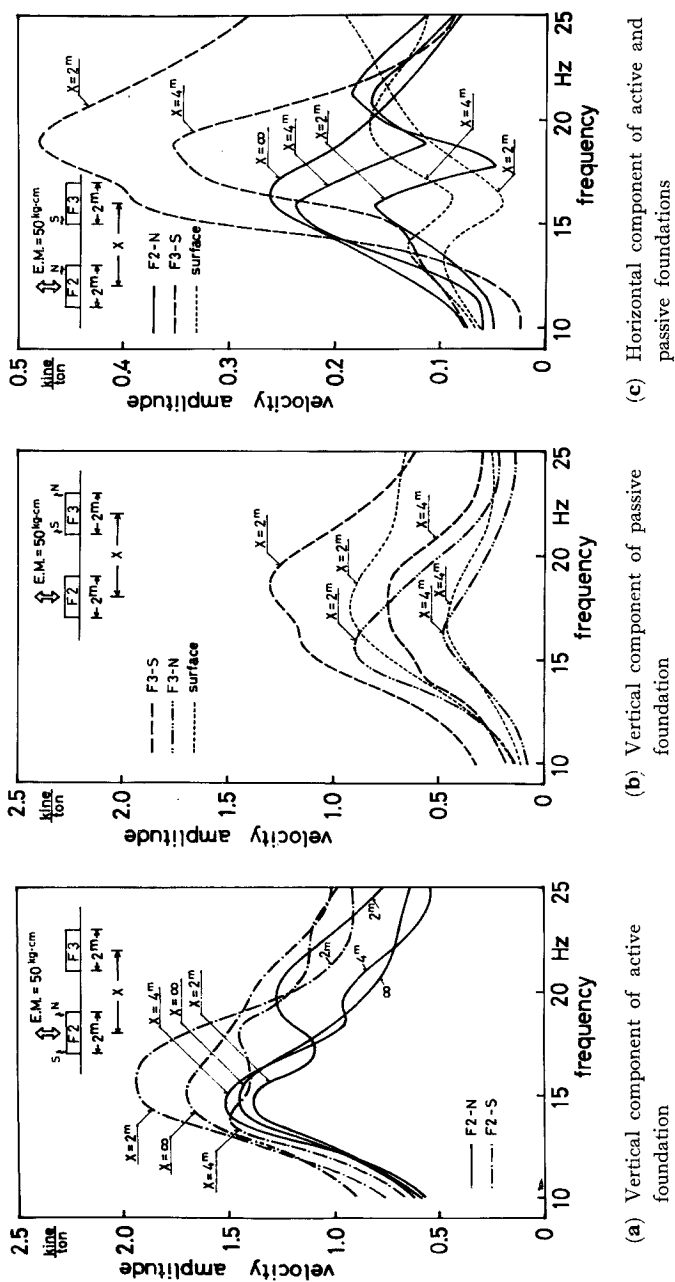


Fig. 5 Velocity amplitude for vertical excitation (experimental results)

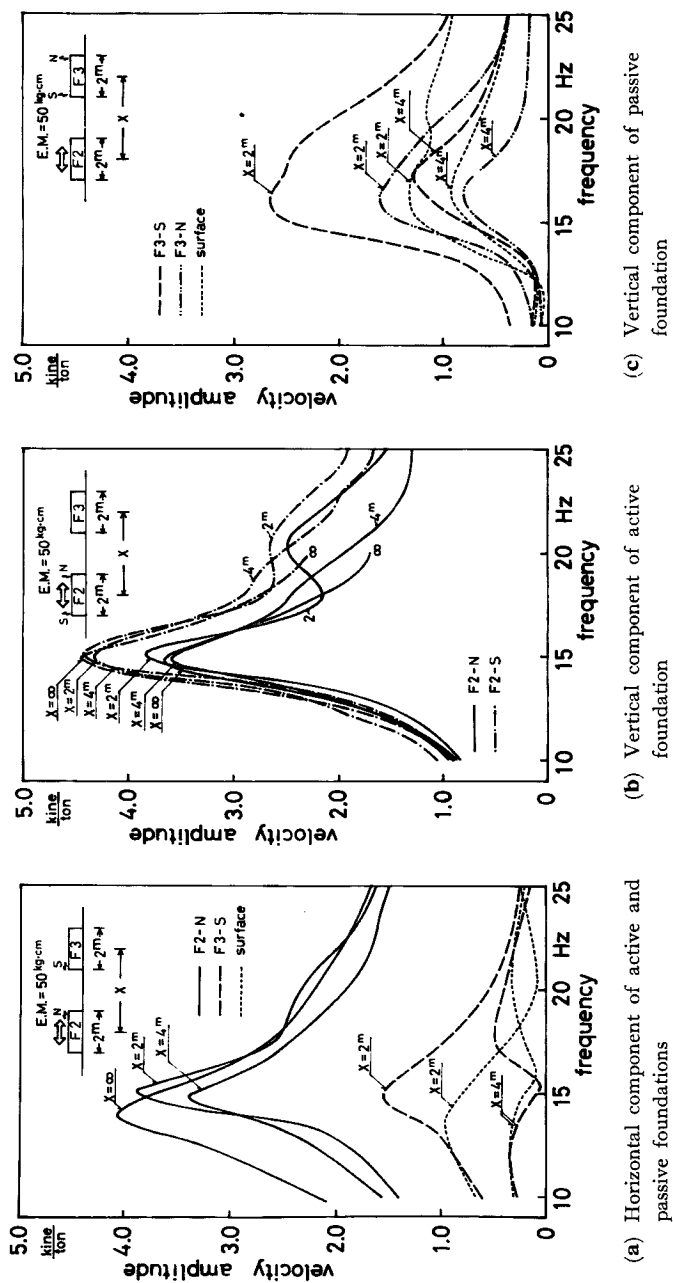


Fig. 6 Velocity amplitude for horizontal (NS) excitation (experimental results)

速度振巾特性の共振振動数が異なる。破線 (F3-S) の速度振巾特性が2点鎖線 (F3-N) よりも常に大きく、かつ、受振基礎はロッキングを起している。地表の速度振巾特性 (点線) と受振基礎のそれ (破線および2点鎖線) とは異なり、受振基礎は地表の動きに対し増巾されている。 $X=2m$ (F2-N と F3-S とが接している時) では加振基礎の実線 (F2-N) と受振基礎の破線 (F3-S) とはほぼ近い値を示している。

Fig. 5(c) より次のことがまとめられる：加振基礎の速度振巾特性の水平成分 (実線) は $X=\infty$ (単独基礎) のときは零になる筈であるが、相当の値が出ている。これは地盤内の非対称性によるものと推定される。速度振巾特性の水平成分は共振振動数近傍で加振基礎 (実線) よりも受振基礎 (破線) の方が大きく出ている。受振基礎 (破線) の速度振巾特性の水平成分は地表のそれよりも相当増巾されている。受振基礎 (F3-S) の速度振巾特性の水平成分は **Fig. 5(b)** に示される F3-S の上下成分と共振振動数近傍で形がよく似ている。

3.2. 水平 NS 加振

Fig. 6(a)~6(c) は2個の基礎が並んでいる方向、すなわち、水平 NS 方向に F2 基礎を偏心モーメント $E.M.=50kg\cdot cm$ で加振した場合で、**Fig. 6(a)** は加振基礎 (実線：F2-N) および受振基礎 (破線：F3-S) における速度振巾特性の水平 NS 成分を示し、**Fig. 6(b)** は加振基礎の上下成分で、実線は受振基礎に近い側 (F2-N)、1点鎖線は受振基礎から遠い側 (F2-S) であり、**Fig. 6(c)** は受振基礎の速度振巾特性の上下成分で、破線は加振基礎に近い側 (F3-S)、2点鎖線は加振基礎から遠い側 (F3-N) を表わす。さらに、**Figs. 6(a), 6(c)** の点線は地表の速度振巾特性である。

Fig. 6(a) より次のことがまとめられる：加振基礎の速度振巾特性 (実線) は $X=2m$ のとき、共振振動数 (約 15Hz) 近傍で $X=4m$, $X=\infty$ に比べてピークが鋭くなり、さらに、20Hz 近傍で振巾特性が少しふくらんでいる。加振基礎 (実線) の共振振動数は $X=2m$ および $X=4m$ ではほぼ 15Hz なのに対し、 $X=\infty$ では 14Hz と低振動数にずれている。ただし、実験時期が前者に対し後者は2週間ほど後にずれており、その間に他のケースの実験を同じ基礎で行なっている。受振基礎の速度振巾特性 (破線) と地表のそれ (点線) とを比べると、共振振巾は受振基礎の方が大きく出ており、特に $X=2m$ ではそのピークが鋭くなっている。

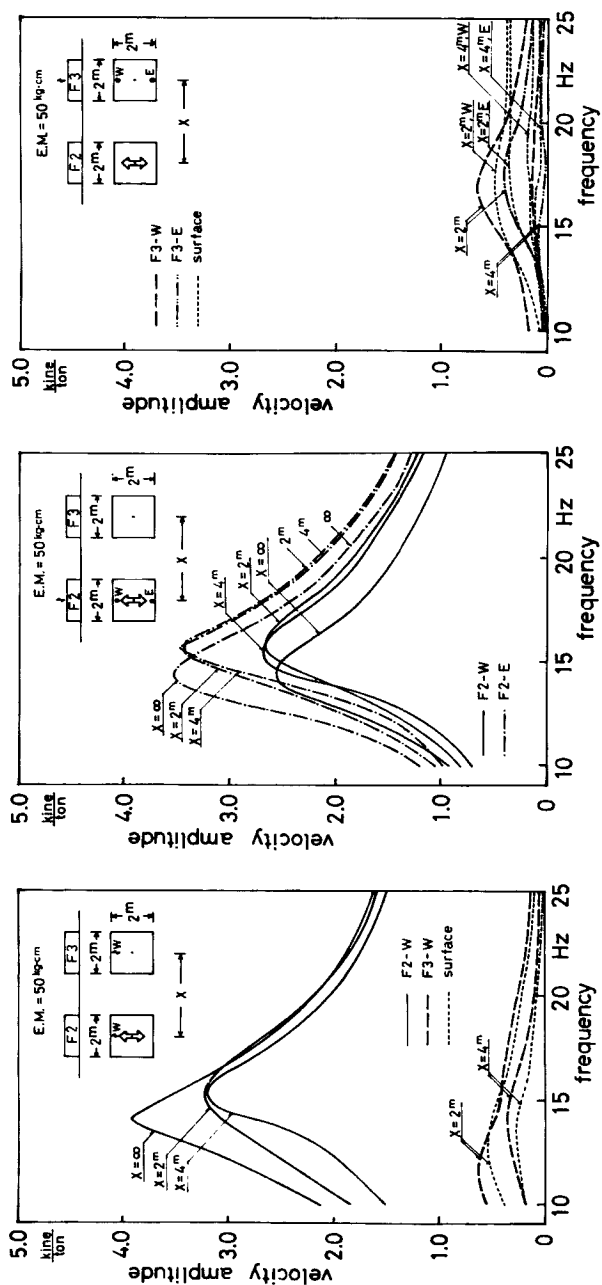
Fig. 6(b) より次のことがまとめられる：加振基礎の F2-N 点 (実線) および F2-S 点 (1点鎖線) での速度振巾特性の上下成分は $X=2m$, $4m$ および ∞ に対し、ほぼ 15Hz の共振振動数を持ち、共振振巾も殆んど変わらない。しかし、20Hz 近傍では受振基礎の影響が現われ、 $X=\infty$, $4m$, $2m$ と基礎間距離が狭くなるにつれ、実線 (F2-N)、1点鎖線 (F2-S) とともに速度振巾特性にふくらみが出てくる。この場合も、モデルが対称であれば、水平振動と回転 (ローリング) 振動のみとなり、 $X=\infty$ (単独基礎) では実線 (F2-N) と1点鎖線 (F2-S) とは一致する筈であるが、それが異なっている。

Fig. 6(c) より次のことがまとめられる：受振基礎における速度振巾特性の上下成分は基礎間距離 X が小さいほど大きく、また、破線 (F3-S) の方が2点鎖線 (F3-N) よりも大きい。しかし、その共振振動数は基礎間距離 X および計測位置 (F3-S, F3-N) によりまちまちである。受振基礎の速度振巾特性 (破線、2点鎖線) と地表のそれ (点線) とを比べると、 $X=4m$ ではあまり変わらないが、 $X=2m$ では受振基礎のピークは地表のそれよりもかなり大きくなっている。

3.3. 水平 EW 加振

Figs. 7(a)~7(c) は2個の基礎に対して直角、すなわち、水平 EW 方向に F2 基礎を偏心モーメント $E.M.=50kg\cdot cm$ で加振した場合で、**Fig. 7(a)** は加振基礎 (実線：F2-W) および受振基礎 (破線：F3-W) の加振方向と同じ成分である水平 EW 成分の速度振巾特性を示したものであり、**Fig. 7(b)** は加振基礎 (実線：F2-W および1点鎖線：F2-E) の速度振巾特性の上下成分であり、**Fig. 7(c)** は受振基礎 (破線：F3-W および2点鎖線：F3-E) における速度振巾特性の上下成分を表わしている。ここでも **Figs. 7(a), 7(c)** の点線は地表の速度振巾特性である。

Fig. 7(a) より次のことがまとめられる：加振基礎 (実線) における速度振巾特性の水平 EW 成分 (加振方向の成分) は基礎間距離 X が小さくなるにつれ、共振振動数 (約 15Hz) 近傍で振巾特性のピークが鈍ってい



(a) Horizontal component of active and passive foundations

(b) Vertical component of active foundation

(c) Vertical component of passive foundation

Fig. 7 Velocity amplitude for horizontal (EW) excitation (experimental results)

る。受振基礎(破線)の速度振巾特性は上下加振や水平 NS 加振と異なり全体に小さく受振基礎へあまり影響を与えない。受振基礎の速度振巾特性と地表のそれとはほぼ等しい。

Fig. 7(b) より次のことがまとめられる： $X=\infty$ (単独基礎) の場合，速度振巾特性の上下成分は実線 (F2-W) と 1 点鎖線 (F2-E) とでは異なっている。これは地盤の非対称性からきていると推定される。加振基礎における速度振巾特性の上下成分に関して，その共振振動数は $X=2m$ および $4m$ と $X=\infty$ とでは異なるが，形はよく似ている。**Fig. 5(a)**, **Fig. 6(b)** でみられたように X が小さくなるにつれ，20Hz 近傍で速度振巾特性が影響を受けるという現象を **Fig. 7(b)** ではみせていない。

Fig. 7(c) より次のことがまとめられる：受振基礎の速度振巾特性は上下成分についても，水平 EW 加振に対しては小さい。したがって，加振方向により隣接基礎の与える影響は異なるといえる。受振基礎と地表の速度振巾特性は $X=2m$ では受振基礎がピークのところで少し大きい， $X=4m$ では殆んど変わらず，かえって地表の方が大きいといえる。

3.1～3.3. で示した実験結果は起振機の偏心モーメント $E.M.=50kg\cdot cm$ の場合であるが， $E.M.=100kg\cdot cm$ の場合の実験も行なっている。その結果は $E.M.=50kg\cdot cm$ のときよりも共振振動数が全体として低周波数域にずれるだけで，その他の傾向は $E.M.=50kg\cdot cm$ と同じなので，ここでは， $E.M.=100kg\cdot cm$ の応答特性に関する詳述は避ける。

4. 波動論による検討

4.1. 波動論による解析法の概要

ここでは，理論的研究として弾性波動論を用い，2個の剛体基礎相互連成系の振動特性を解析する。まず，地盤の動特性を求めるため，**Fig. 8** に示す地盤—基礎モデルを考える。ここでは基礎の質量を無視した第 l 領域に上下，水平あるいは回転加振力を与え，第 k 領域の上下および水平平均変位ならびに平均回転角を求め，加振力に対する平均変位の比を無次元量で表わし，これを基礎周辺地盤の adjacent dynamical ground compliance と定義する⁵⁾。次に adjacent dynamical ground compliance を地盤の動特性として用い，基礎—地盤—基礎連成系の応答特性を解析する。今，**Fig. 9** に示す2個の剛体基礎 ($i=1, 2$) を想定する。第 i 基礎の

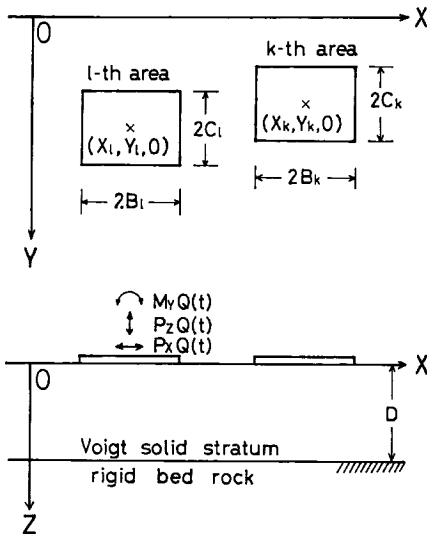


Fig. 8 Soil-foundation system considered

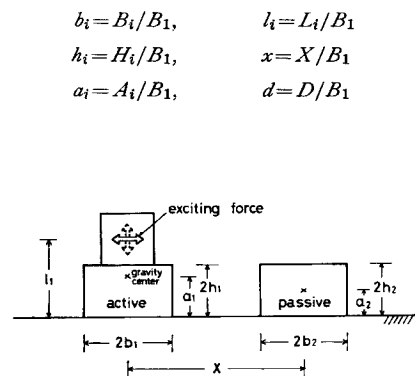


Fig. 9 Foundation-soil-foundation system considered

地表高 l_i のところに上下加振力 f_{wi} および水平加振力 f_{ui} を作用させると、第 i 基礎の運動方程式は次式となる。

$$\begin{cases} m_i \ddot{u}_i - a_i m_i \ddot{\varphi}_i + r_{ui} = f_{ui} \\ m_i \ddot{w}_i + r_{wi} = f_{wi} \\ -a_i m_i \ddot{u}_i + (I_i + m_i a_i^2) \ddot{\varphi}_i + r_{\varphi i} = -l_i f_{ui} \end{cases} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、

$$\begin{aligned} m_i &= M_i / \mu B_1^3 && : i \text{ 剛体基礎の無次元質量} \\ I_i &= I_i / \mu B_1^5 && : i \text{ 剛体基礎の無次元回転慣性} \\ a_i &= A_i / B_1 && : i \text{ 剛体基礎の無次元重心高さ} \\ u_i &= U_i / B_1, w_i = W_i / B_1, \varphi_i && : i \text{ 剛体基礎底面中心での無次元水平, 上下変位および回転角} \\ r_{ui} &= R_{ui} / \mu B_1^2, r_{wi} = R_{wi} / \mu B_1^2, r_{\varphi i} = R_{\varphi i} / \mu B_1^3 && : i \text{ 剛体基礎の無次元地盤反力(水平, 上下および回転)} \\ f_{ui} &= F_{ui} / \mu B_1^2, f_{wi} = F_{wi} / \mu B_1^2 && : i \text{ 剛体基礎底面に作用する無次元外力(水平および上下)} \\ B_1 &&& : \text{長さの規準量} \end{aligned}$$

したがって、2 個の剛体基礎の運動方程式は次式となる。

$$[A]\{\delta\} + \{R\} = \{F\} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに、

$$[A] = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & -a_1 m_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -a_1 m_1 & 0 & I_1 + a_1^2 m_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_2 & 0 & -a_2 m_2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & m_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -a_2 m_2 & 0 & I_2 + a_2^2 m_2 \end{bmatrix}, \quad \{\delta\} = \begin{Bmatrix} u_1 \\ w_1 \\ \varphi_1 \\ u_2 \\ w_2 \\ \varphi_2 \end{Bmatrix} \quad \dots\dots\dots (3)$$

また、外力 $\{F\}$ は第 1 基礎の上下加振に対し、

$$\{F\}_v = \{0 \quad f_{w1} \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0\}^T \quad \dots\dots\dots (4)$$

第 1 基礎の水平加振に対し

$$\{F\}_H = \{f_{u1} \quad 0 \quad -l_1 f_{u1} \quad 0 \quad 0 \quad 0\}^T \quad \dots\dots\dots (5)$$

一方、地盤の反力ベクトル $\{R\}$ と変位ベクトル $\{\delta\}$ との間には adjacent dynamical ground compliance $[J]$ が既知であると次の関係が成り立つ。

$$\{R\} = [J]^{-1} \{\delta\} \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここで

$$[J] = \begin{bmatrix} J_{X1}^{X1} & 0 & J_{ZX1}^{X1} & J_{X2}^{X1} & J_{Z2}^{X1} & J_{ZX2}^{X1} \\ 0 & J_{Z1}^{Z1} & 0 & J_{X2}^{Z1} & J_{Z2}^{Z1} & J_{ZX2}^{Z1} \\ J_{X1}^{ZX1} & 0 & J_{ZX1}^{ZX1} & J_{X2}^{ZX1} & J_{Z2}^{ZX1} & J_{ZX2}^{ZX1} \\ J_{X1}^{X2} & J_{Z1}^{X2} & J_{ZX1}^{X2} & J_{X2}^{X2} & 0 & J_{ZX2}^{X2} \\ J_{X1}^{Z2} & J_{Z1}^{Z2} & J_{ZX1}^{Z2} & 0 & J_{Z2}^{Z2} & 0 \\ J_{X1}^{ZX2} & J_{Z1}^{ZX2} & J_{ZX1}^{ZX2} & J_{X2}^{ZX2} & 0 & J_{ZX2}^{ZX2} \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (7)$$

ただし、 $J_{\mu}^{\lambda k}$ は第 l 領域の μ 方向加振に対する第 k 領域の λ 方向の adjacent dynamical ground compliance を表す。

(6) 式を (2) 式に代入すると

$$[A]\{\delta\} + [J]^{-1} \{\delta\} = \{F\} \quad \dots\dots\dots (8)$$

(7) 式を無次元時間 τ で Fourier 変換すると、

$$\{-a_0^2 [A] + [J]^{-1}\} \{\tilde{\delta}\} = \{\tilde{F}\} \quad \dots\dots\dots (9)$$

ここに、

$a_0 = \omega B_1 / V_s$: 角振動数 ω に関する無次元量

$\tau = V_s t / B_1$: 時間 t に関する無次元量

$V_s = \sqrt{\mu / \rho}$: S 波の速度, B_1 : 第1基礎の有次元半巾

したがって、変位ベクトル $\{\tilde{\delta}\}$ は(8)式を解くことにより次式で得られる。

$$\{\tilde{\delta}\} = ([I] - a_0^2 [J][A])^{-1} [J] \{\tilde{F}\} \quad \dots\dots\dots (10)$$

ここに、 $[I]$ は単位マトリックスである。

実験に対応する基礎両端における有次元速度応答の表現式は(10)式の変位応答を用いると次式で表わされる。

加振基礎両端の上下成分 $j a_0 (w_1 \pm b_1 \times \varphi_1) \cdot g / B_1^2 \rho V_s$

受振基礎両端の上下成分 $j a_0 (w_2 \pm b_2 \times \varphi_2) \cdot g / B_1^2 \rho V_s$

加振基礎上端の水平成分 $j a_0 (u_1 - 2k_1 \times \varphi_1) \cdot g / B_1^2 \rho V_s$

受振基礎上端の水平成分 $j a_0 (u_2 - 2k_2 \times \varphi_2) \cdot g / B_1^2 \rho V_s$

ここに、 g は重力の加速度である。

4.2. パラメータの設定

実験を行なった地盤の柱状図は **Fig. 2** に示されている。ただし、ボーリングをした場所は **Fig. 1** に×印 (boring point) で示されるように基礎を設置した地点からは約 40m ほど離れている。**Fig. 2** から表層部分の諸常数として、地盤の密度 $\rho = 1.53 \text{ t/m}^3$, S 波の速度 $V_s = \sqrt{\mu / \rho} = 100 \text{ m/sec}$, P 波の速度 $V_p = \sqrt{(\lambda + 2\mu) / \rho} = 900 \text{ m/sec}$ を採用する。このとき地盤のポアソン比 ν は $\nu = 0.49375$ となる。一方、実験に用いた基礎の寸法は **Fig. 3** に示されるように $2\text{m} \times 2\text{m} \times 0.35\text{m}$ で巾 2m の正方形底面をもっているため、無次元化の規準となる基礎半巾 B_1 は 1m ($B_1 = 1\text{m}$) である。地盤表層部分での N 値は深さ 22m まではほぼ零であり、 22m を越えると N 値は急に増加している。掘削部分 2m を除くと、実験敷地の地盤は層厚 20m の表層 ($D/B_1 = 20$) と剛基盤から構成されていると推定される。ところが、重複反射理論による S 波に関する層の1次固有振動数は $f_s = V_s / 4D$ (D : 層厚) で表わされ、この場合、 $f_s = 100/80 = 1.25 \text{ Hz}$ となる。一方、実験で応答が顕著に出る振動数帯域は $10 \sim 25 \text{ Hz}$ であり、層の固有振動数はそれより相当小さいため、 $D = 20\text{m}$ の成層地盤は半無限体とみなして差し支えない領域である。粘弾性体の減衰係数 $\eta_p = \frac{V_s \cdot \lambda' + 2\mu'}{B_1 \cdot \lambda + 2\mu}$ および $\eta_s = \frac{V_s \cdot \mu'}{B_1 \cdot \mu}$ は不明であるため、ここでは $\eta_p = \eta_s = 0.1$ と仮定しておく。

コンクリート基礎の常数については、コンクリートの比重を 2.4 t/m^3 と仮定すると、基礎本体の無次元質量は $m_2 = 3.36 \text{ t} / 1.53 \text{ t} = 2.20$, 無次元回転慣性は $I_2 = 1.154 / 1.53 = 0.754$, 重心高さ $a_2 = 17.5 \text{ cm} / 1\text{m} = 0.175$ である。次に、起振機の質量は約 1.0 t , 加振力作用高さは約 30 cm であるが、起振機の重心高さおよび回転慣性は不明のため、ここでは起振機を一辺が 60 cm の密度一様な立方体と仮定し、基礎と起振機合体の基礎底面主軸まわりの回転慣性および重量に等しく、 2m 四方の基礎底面をもつ長方形に置換する。その結果、置換基礎高さ 44.4 cm 重心高さ 22.2 cm , 密度 $\rho_1 = 2.456$ となる。したがって、置換基礎の無次元質量 $m_1 = 4.36 / 1.53 = 2.95$, 重心まわりの回転慣性 $I_1 = 1.525 / 1.53 = 0.997$, 重心高さ $a_1 = 0.222$ である。また、起振機の加振力作用高さ $l_1 = 0.35 + 0.30 = 0.65$ となる。

4.3. 理論値と実験値との比較

波動論による解析法を用い、4.2. で設定した常数をもつ2-剛体基礎連成系の速度振巾特性の数値結果(理論解)を **Figs. 10~13** に示す。ここで横軸 f は加振振動数 (Hz) を、縦軸 V は速度振巾 (kine/ton) を有次元量で表わす。さらに、理論により応答を求めた位置と3節の実験で応答を計測した位置の対応を下に示す。

理論値の位置	active-L	active-R	passive-L	passive-R
実験値の位置	F2-S	F2-N	F3-S	F3-N

Figs. 10(a)~10(c) は **Fig. 5(a)~5(c)** の実験結果に対応するグラフで、上下加振に対する (a) 加振基礎の速度振巾上下成分、(b) 受振基礎の速度振巾上下成分、(c) 加振基礎および受振基礎の速度振巾水平成分を表

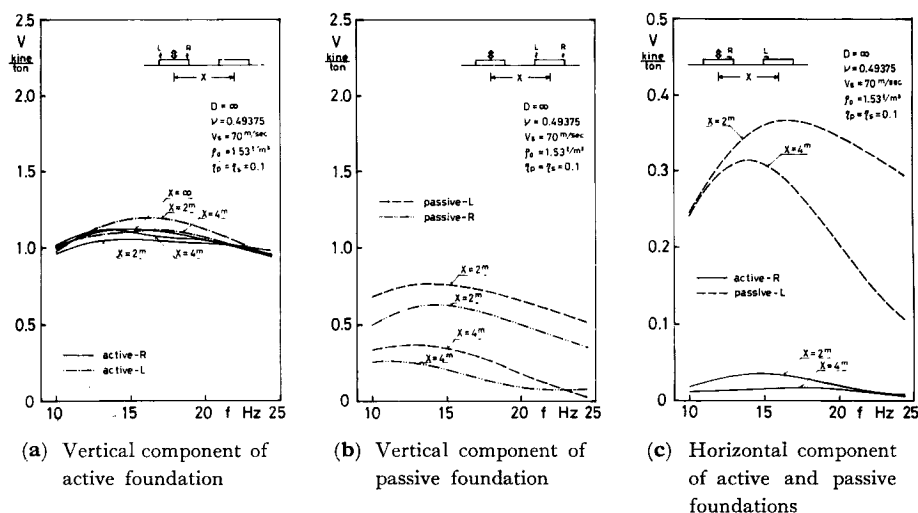


Fig. 10 Velocity amplitude for vertical excitation (theoretical results)

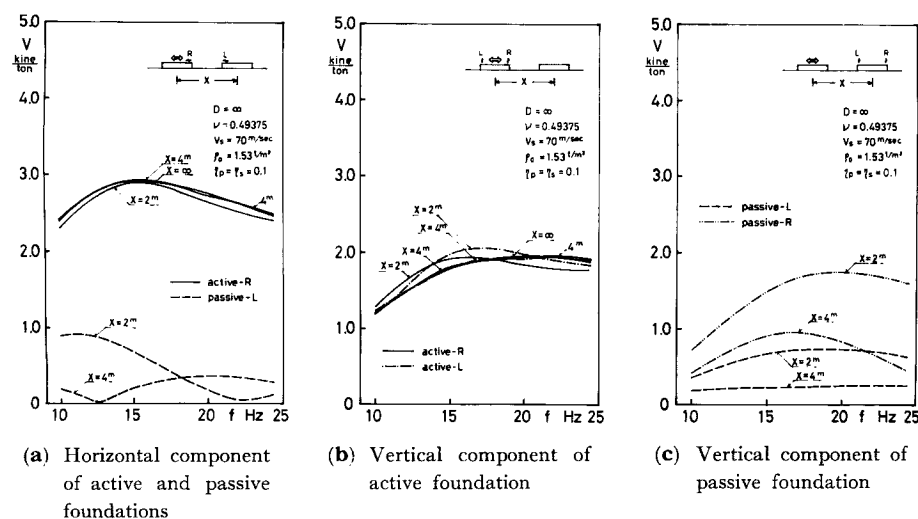


Fig. 11 Velocity amplitude for horizontal excitation (theoretical results)

わす。また、Figs. 11(a)~11(c) は Figs. 6(a)~6(c) に対応するもので、水平加振（2個の剛体が並んでいる方向）に対する (a) 加振基礎および受振基礎の速度振巾水平成分（加振方向）、(b) 加振基礎の速度振巾上下成分、(c) 受振基礎の速度振巾上下成分を表わす。ただし、Figs. 10, 11 に対し、S波の速度 $V_s=100\text{m/sec}$ とすると理論値に対する共振振動数は約 23Hz となり、実験結果の約 15Hz とかけ離れるため、数値計算には $V_s=70\text{m/sec}$, $\nu=0.49375$ を用いた。

Figs. 10, 11 の理論値から加振基礎と受振基礎の距離 X により、隣接基礎の影響がかなり効いてくる。特に、実験結果と対応するものとしては、Fig. 10(a) の $X=2\text{m}$ に対する active-R での振巾特性が単独基礎 ($X=\infty$) よりも共振振動数近傍で増巾されること、Fig. 10(c) で加振基礎よりも受振基礎の方が応答量が大いこと、Fig. 11(a) の受振基礎の応答が 13Hz 近傍で node をつくること等が掲げられ、さらに、理論による速

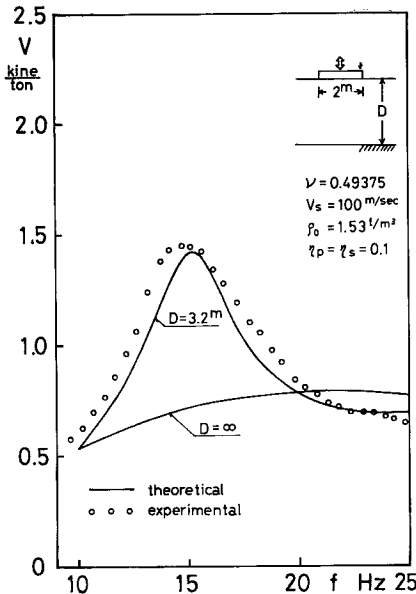


Fig. 12 Velocity amplitude for vertical excitation

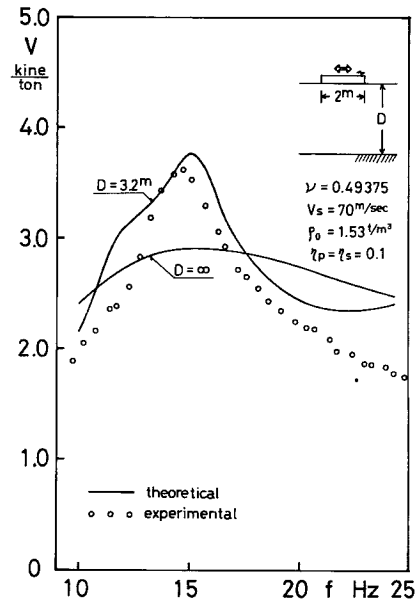


Fig. 13 Velocity amplitude for horizontal excitation

度振巾と実験による応答量とがオーダー的に合っている。他方実験値と理論値とが相違する点としては、実験値では共振振動数近傍で速度振巾の応答量が鋭く立ち上がっているのに対し、理論値では共振振動数近傍でも振巾特性は全般になだらかであること、および実験値では基礎間距離により 20Hz 近傍で隣接基礎の影響を受けたのに対し、理論値ではそれに対応するものが現われていないことが掲げられる。

Figs. 10, 11 の理論値では地盤を半無限としているが、**Fig. 2** の柱状図を調べると、深さ 4.5m と 7.5m (実験敷地表面からは 2.5m と 5.5m) のところに N 値が少し大きく ($N=10$) やや堅い砂層があり、その影響が応答量に現われていると推定される。**Figs. 12, 13** は、それぞれ上下加振および水平加振に対し、単独基礎で層厚 $D=\infty$ と $D=3.2\text{m}$ の場合の速度振巾特性である。さらに、比較のため、実験による速度振巾応答を○印で示した。ここで、 S 波の速度 V_s は上下加振に対し $V_s=100\text{m/sec}$ を、水平加振に対し $V_s=70\text{m/sec}$ を採用した。層厚 $D=3.2\text{m}$ とすると、単独基礎の場合、理論値と実験値とは定量的にもよく一致した。これは 2.5m と 5.0m に少し堅い砂層があり、そこで波動の反射が起るものと推定されるが、理論に用いた地盤モデルは 1 層の粘弾性層と剛基盤という最も単純なものであり、また、地盤調査のボーリング位置が実験基礎から約 40m 離れているための確に層構造をモデル化したとはいえない。したがって、実験値と理論値に対する詳しい検討は今後の地盤調査および地盤のモデル化にまたねばならない。

5. む す び

本報では、典型的な軟弱地盤と考えられる敷地内に $2\text{m} \times 2\text{m} \times 0.35\text{m}$ (重量約 3.36t) の 2 個のコンクリート基礎を作り、その一方の基礎を起振機 (重量約 1.0t) で上下方向あるいは水平方向に加振することにより、基礎構造物の応答特性に与える隣接基礎の影響を実験的に調べた。他方、実験結果と比較するため、2 個の剛体基礎に対する相互連成の振動特性を波動論を用いて解析的に求めた。

実験結果は次のようにまとめられる。

- 1) 対称な基礎モデル (単独基礎) に対しても実験結果は対称でなく、地盤内に非対称な性質が含まれてい

る。

- 2) 実験による共振振動数は各加振型に対しあまり異ならず、15Hz 近傍である。
- 3) 加振基礎の応答特性は受振基礎が接近するほど、共振振動数近傍でその影響をよく受ける。さらに、20Hz 近傍で単独基礎 ($X=\infty$) には見られなかった共振現象が基礎間隔がせばまるにつれ現われた。
- 4) 加振基礎に与える受振基礎の影響は加振型（上下、水平平行および水平直角）により異なり、上下加振による影響が最も大きく、つぎに、水平平行加振 (NS)、水平直角加振 (EW) と受振基礎による影響度は小さくなる。

次に、地盤モデルを半無限粘弾性体として扱ったときの理論値と実験値とを比較すると下のようにまとめられる。

- 5) 加振基礎の応答特性に与える受振基礎の影響は実験結果と同様に理論計算値にも現われ、定性的には実験値に対応する特性をよく表わしている。
- 6) 実験値と理論値との応答量はオーダーとしては合っているが、共振振動数近傍での理論値は実験値ほど鋭いピークをもたない。
- 7) 実験値での隣接基礎の影響が 20Hz 近傍で現われたが、ここで扱ったモデルに対する理論値では現われなかった。

さらに、地盤を1層の粘弾性体と剛基盤から成るとし、単独基礎の速度振巾特性を理論的に求めると次の結論が得られる。

- 8) 成層地盤に対する理論解では実験値に近い応答特性を出すことはできなかった。ここでは、理論計算に用いた層厚と実地盤の層構造とが一致しているかどうかは疑問であり、モデル化に対して検討の余地がある。

以上の結果から、基礎間の相互干渉はその間隔が狭いと顕著に表われることは理論、実験の両面から明らかにされた。したがって、大都市のように構造物が密集して建てられているところでは隣接構造物との相互連成は重要な問題となり、この種のさらに進んだ研究が必要になると思われる。

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フジタ工業（株）、起振機を借用した埼玉大学土木工学教室の各関係諸氏ならびに実験の実施とデータ整理に御協力頂いた工学部建築学教室の大学院生嶋谷和彦氏および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”を使用したことを付記する。

参 考 文 献

- 1) MacCalden, P. B.: Transmission of Steady-State Vibrations between Rigid Circular Foundations, Ph. D. Thesis, Univ. of Calif., Los Angeles, 1969.
- 2) Warburton, G. B., Richardson, J. D. and Webster, J. J.: Forced Vibrations of Two Masses on an Elastic Half Space, Journal of Appl. Mech., Vol. 37, No. 1, 1971, pp. 148-156.
- 3) 小堀鐸二, 南井良一郎, 日下部 馨: 弾性地盤上の剛体系の連成振動について, 日本建築学会近畿支部研究報告書, 構造・材料・施工, 昭和46年5月, pp. 13-16.
- 4) Kobori, T.: Random Vibrations of Structure-Foundation Interaction System, Proc. of the 3rd U.S.-Japan Joint Seminar on Stochastic Methods in Dynamical Problems, 1971.
- 5) Kobori, T., R. Minai, and K. Kusakabe,: Dynamical Characteristics of Soil-Structure Cross-Interaction System I, Bulletin of the Disaster Prevention Research Institute, Kyoto Univ., Vol. 22, Part 2, Feb. 1973, pp. 111-151.

- 6) Kabori, T. and R. Minai,: Dynamical Interaction of Multiple Structural Systems on a Soil Medium, Proceedings of the 5th World Conference on Earthquake Engineering, Session 6A, June, 1973.
- 7) MacCalden, P. B. and R. B. Matthiesen,: Coupled Response of Two Foundations, Proceedings of the 5th World Conference on Earthquake Engineering, Session 5A, June, 1973.
- 8) Lee, T. H. and D. A. Wesley,: Soil-Structure Interaction of Nuclear Reactor Structures Considering Through-Soil Coupling between Adjacent Structures, Nuclear Engineering and Design, Vol. 24, 1973, pp. 374-387.
- 9) Luco, J. E. and L. Contesse,: Dynamic Structure-Soil-Structure Interaction, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 63, No. 4, August, 1973, pp. 1289-1303.
- 10) 小堀鐸二, 南井良一郎, 日下部 馨: 粘弾性層地盤上の構造物群の振動特性, 関東地震50周年記念地震工学シンポジウム, 1973年8月, pp. 195-202.
- 11) 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, 昭和49年4月, pp. 115-138.