

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——

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 4. EFFECTS OF EMBEDMENT AND GROUND WATER—

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

Synopsis

As a series of the experimental studies on foundation-ground system, the vertical and horizontal harmonic excitation tests by the rotating mass type oscillator are carried out for the two identical reinforced concrete foundations, one of which is constructed on and the other embedded in the typical soft ground in Osaka area. In the neighborhood of the embedded foundation the ground water level is lowered, if necessary, below its bottom surface by the well point. It is the main purpose of this report to clarify the effects of embedment and ground water both on the amplitude and phase characteristics of foundation responses and on the stiffness and damping coefficients representing equivalently the restoring force of soil medium.

1. ま え が き

起振機による基礎構造模型の一連の振動実験を主体にした本研究の目的は、軟弱地盤に固有の動特性と各種の形式をもつ基礎構造と地盤との動的相互作用の性質を、現実の軟弱地盤を対象にした実験的研究を通じて明らかにすることであり、構造物—地盤系の地震応答解析にさいして連成系モデルを構成するための基礎資料の集積をめざすものである。

本実験は大阪地方の典型的な軟弱地盤において実施している一連の実験計画の一環をなすもので、同一敷地における第3回目の振動実験にあたる。昭和46年および48年に実施した前2回の実験では、計画の第1段階として、地表面に直接設置された鉄筋コンクリート製の基礎構造模型の振動特性に注目した。予備実験の性格をもつ第1回の実験では、軟弱な地層の上に比較的しっかりした薄い盛土の表層からなるもとの地表面に単一の基礎構造模型を設け、また第1段階の本実験にあたる第2回の実験では、軟弱な地層の特性を直接検出するため、表層の盛土部分を相当広い面積にわたって掘削し、露出した軟弱層の地表面に大きさの異なる3個の基礎構造模型を設置した。起振機試験によって基礎自身の応答の振巾特性と基礎底面に生じる土圧応答分布を計測し、構造物に被害を生じるような地震のさいに問題となる応答レベルの大きい所の地盤の動特性に関して、非弾性的なあるいはレオロジカルな諸性質とともに隣接基礎の影響を、得られた基礎の応答特性からいくつかの側面について明らかにした。さらに波動論から導いた“Dynamical Ground Compliance”の理論に基づいて若干の理論的検討を試みた^{1)~4)}。

今回の実験は引続く第2段階のもので2つの目的をもっている。第1は、前回の基礎構造模型を使用し、起振機試験によって基礎の振巾特性に加えて位相特性を計測し、この2つの観測量から地盤復元力の剛性と減衰

性に関わる特性を等価的に分離・抽出してその性質を明らかにし、前回の実験の補完を行なうことにあり、その詳細は(その3)にまとめたとおりである⁵⁾。第2の目的は、新たに根入れのある基礎を同一敷地内に打設し、その振動特性を同じ起振機試験によって、主として基礎の根入れあるいは側面上の作用効果と地下水の影響という2つの観点から明らかにすることであり、この目的に関わる部分を本報(その4)にまとめた。すなわち、1辺2mの立方体状の基礎構造模型を2個製作し、うち1個を地表に設置し残る1個を地中に埋設した。後者の模型では、基礎側面の周囲に狭い空隙を設けた場合とこの空隙を現場の土で埋戻し側面土が作用するようにした場合とを設定した。さらに埋戻しのある場合については、周辺の地盤に基礎を囲むようにウエルポイントを打込んで地下水位を人工的に下げうようにし、周辺地盤に地下水が存在する場合としない場合を設定した。以上の各場合の振動特性を検出し、基礎応答の振巾特性と位相特性およびこの2つの量の等価的に換算・分離した地盤復元力の剛性と減衰性を表わす係数のもつ諸性質を比較・検討することによって、基礎の振動特性と地盤復元力に及ぼす根入れと地下水の影響を明らかにした。なお基礎と土との接触状態をモニターするため、基礎の底面および側面に数個の土圧計を埋設し、土圧応答分布の変動を計測した。

本報の第2節には前述の第2の目的のために実施した実験の概要を、第3節には得られた加振方向別の計測結果および実験結果の考察と総括をまとめた。なお現在、根入れのある基礎に関する実験結果の理論的解釈を行ないうる適当な解析理論と計算法を得るまでに至っていないので、ここでは実験結果のみの検討の範囲にとどめ、理論面からの分析は次の機会にゆずりたい。

2. 実験概要

2.1 実験の期間および敷地

本実験は昭和49年5月から6月にかけて大阪市城東区森町の大阪市交通局森之宮営業所跡の敷地において行なわれた。今回の実験は、同一敷地内で実施した昭和46年11月～12月の予備実験および同48年5月～8月の第1次実験——いずれも地表面に設置した基礎構造模型の起振機による加振実験——に引続く一連の実験計画に基づく研究の一環である。

敷地の配置図をFig. 1に示したが、これは前回の第1次実験のときと変わっていない。すなわち、図に示すように東西・南北60m×60mの面積にわたって深さ約2mまで表層を掘削し、瓦礫類を含む厚さ1.5m程度の盛土部分を除去してある。盛土の下地の軟弱な地層を露出させ、軟弱地盤の影響を直接検出しようとするためである。

前回の報告(その1)(その2)^{3),4)}では、敷地南端中央より約10m南側での地盤調査および速度検層の結果から地層構成と地盤常数を示したが、今回新たに敷地中央においてボーリングを行ない、地盤調査と弾性波探査(検層法および屈折法による)を実施したので、その結果をまとめて敷地の地盤構造としてFig. 2に示した。図に示す深さは掘削された敷地の地表面(G.L. - 2m)を基準としている。前回の報告に記した地盤構造図と比べると、今回は表層付近の浅い部分の測定を詳しく行なっているので、この部分の微細な構造に少し相異がみられるが、全体としてはほぼ似た構造をもっていることがわかる。当敷地の地盤は深さ約1.5m～4mの間にN値が10以下の砂質土を含むが、それ以降深さ18m付近まではN値が零に近い軟弱な粘土層が占めている。そしてこの粘土層の下に硬い砂または礫層が現われ、それ以降は粘土・シルト層と砂・砂礫層が互層になって現われるという大阪地方の典型的な軟弱地盤の構造をもっている。

2.2 基礎構造模型

実験には同一寸法の鉄筋コンクリート製の2個の基礎構造模型F4およびF5を製作し、Fig. 1のように配置した。ともに1辺2mの立方体状で、F4基礎は掘削面より1.65mの深さまで埋込み(したがって掘削面から0.35m露出することになる)、またF5基礎は前回の実験に使用したF2基礎(寸法2m×2m×0.35m)上に打継いで作製し、掘削面上に直接設置した。根入れのあるF4基礎については側面土の作用効果を知るため次の2つのcaseを設定した。すなわちFig. 3に示すように、基礎の周囲に側面から0.2m離れた位置にシートパイルを打込み、基礎側面と周辺地盤との間に空隙を設けて側面の土が作用しない場合、および、シートパ

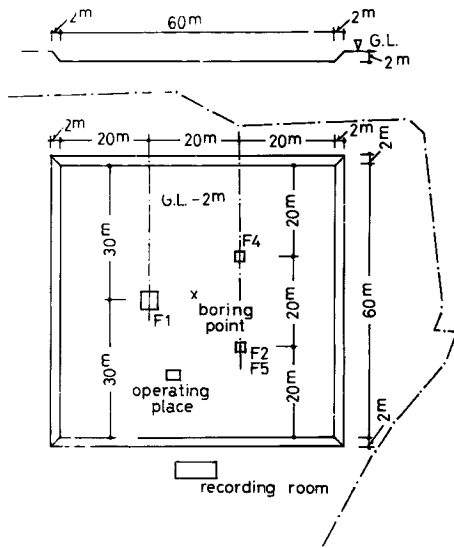


Fig. 1 Site of the experiment.

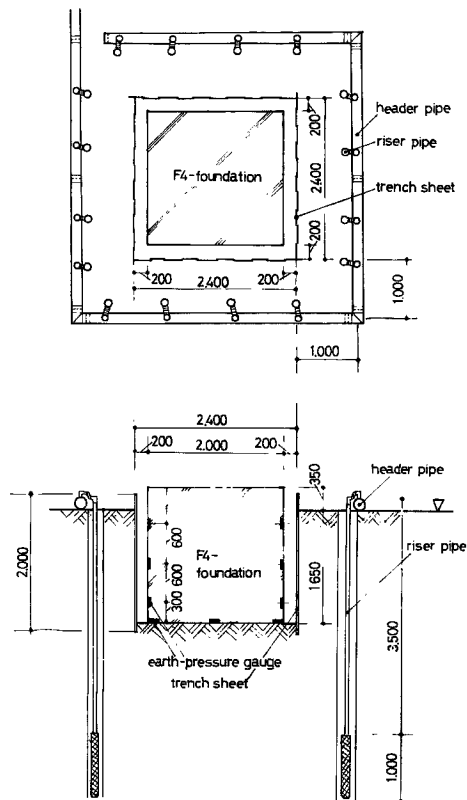


Fig. 3 Detailed profiles for construction of F4-foundation.

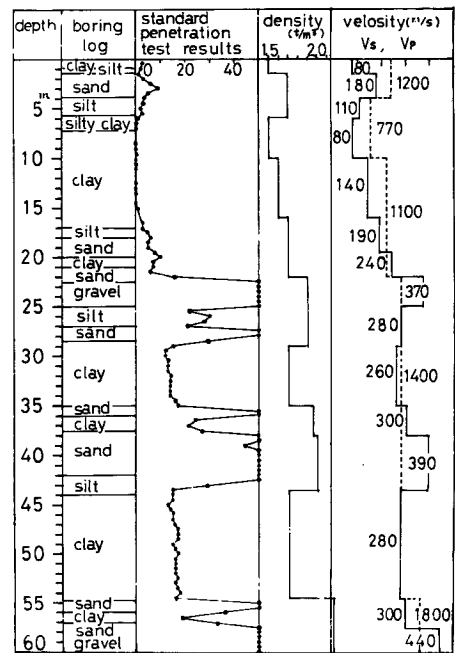


Fig. 2 Geological section and velocity profiles of the site.

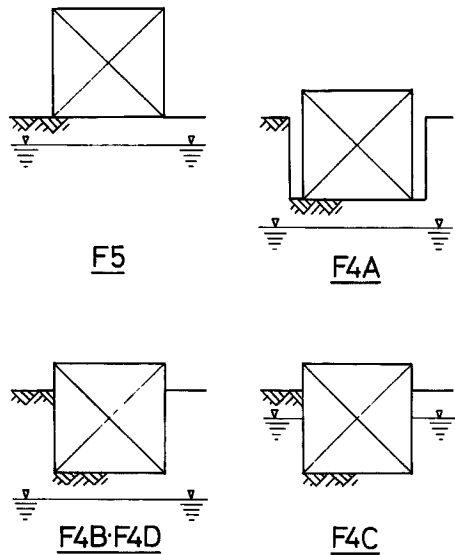


Fig. 4 Ground conditions of F4- and F5-foundations.

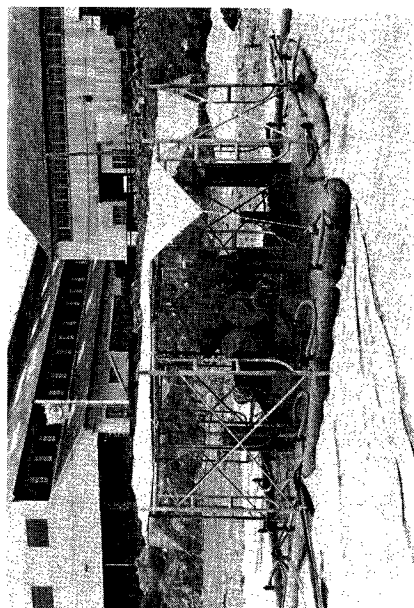


Photo. 1 A-condition of F4-foundation.

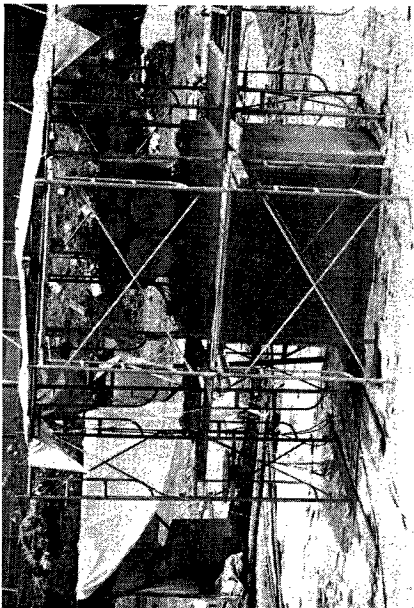


Photo. 3 F5-foundation.

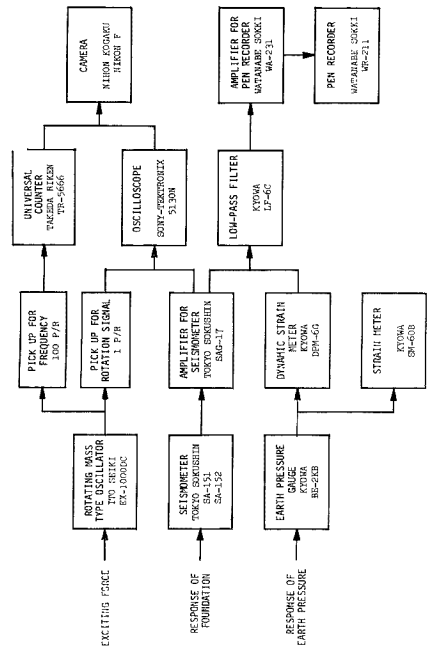


Fig. 5 Flow chart of measurement system.

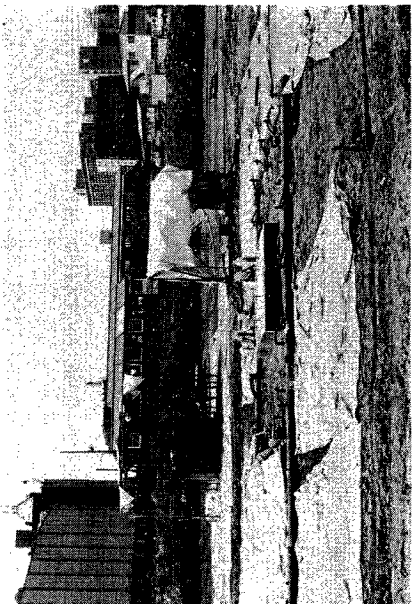


Photo. 2 B-, C- and D-conditions of F4-foundation.

Table 1. Ground conditions for the four cases of F4-foundation.

case	基礎側面	地 下 水 位	ウエルポイント
F 4 A	空 隙	基礎底面下（約－2 m）	作 動
F 4 B	埋 戻	” ”	”
F 4 C	”	自然水位（約－0.5m）	停 止
F 4 D	”	基礎底面下（約－2 m）	作 動

イルを引抜き現場の土をこの空隙に埋戻して周囲の土が基礎側面に直接作用するようにした場合である。さらに、この地盤の地下水位の常水面は掘削面から深さ約 0.5m の位置にあるので、模型の製作・設置の便宜をも考慮して、**Fig. 3** に示すように基礎の周囲にウエルポイントを設け、周辺地盤の地下水位を基礎底面位置より下げることが可能なようにした。そして、側面土の作用の有無と地下水位の上下を組合わせて、**Table 1** と **Fig. 4** に示すような 4 つの case を設定し、F 4 A～F 4 D なる記号をつけて表現した。ウエルポイント作動中の地下水位はウエルポイントの位置で－2 m 以下であり、基礎構造模型全体が地下水位の上にあることを基礎の製作中に確認している。F 4 B と F 4 D は同一の状態であるが、実験は F 4 A → F 4 B → F 4 C → F 4 D の順序で行なわれた。なお F 5 基礎に関する実験は自然水位で行なっている。また、基礎と土との接触面に生じる静圧および動圧の分布を測定し両者の接触状態をモニターする目的で、F 4 基礎の相対する側面に各 3 個と底面に 4 個の土圧計を新たに埋設し、F 5 基礎についてはこれが F 2 基礎であったときに既設されている 3 個の土圧計をそのまま使用した。F 4 基礎の F 4 A の状態を **Photo. 1** に、F 4 B～F 4 D の状態を **Photo. 2** に、また F 5 基礎を **Photo. 3** にそれぞれ示した。

F 4 基礎の打設方法は次のとおりである。まず、1 辺 2.4m の正方形に 25cm 巾のシートパイル（トレンチシート）40枚を深さ約 2 m まで打込み、シートパイル内部の土を深さ 1.65m まで掘削する。掘削した土の構成は約 0.5m まで比較的硬い粘土層、0.5～1.5m 程度まではシルト層、それ以下はシルト混りの砂層である。一方、周辺地盤に 1 辺約 4 m の正方形に長さ 4.5m のライザーパイプを打込み、ヘッダーパイプを介して吸水作業を行なって地下水位を掘削底面以下に下げた。基礎を設置する部分をできるだけ原地盤を乱さないよう平らに鋤き、予め土圧計を装置したモルタル製の土圧計ブロック（寸法 15cm×15cm×5 cm）を設置し、基礎底面全体にわたって厚さ約 5 cm の捨てコンクリートを打ち、これを固定した。次に、仮枠を立てこれに側面圧を計測する土圧計ブロックを固定したのち、土圧計コードの配線と配筋を行ない所定の寸法に仕上げた。コンクリートの適当な養生期間をおいて側面の仮枠を引抜いたのち、ウエルポイントを常に作動させながら F 4 A の実験を実施した。実験終了後シートパイルをすべて引抜き、基礎側面の空隙に土層構成にしたがい現場の土をそのまま使用して埋戻しを行ない、できるだけもとの状態に復するよう、自然水位に戻して密実に締固めを行なった。その後ウエルポイントの作動・停止によって地下水位を上下し、F 4 B、F 4 C および F 4 D の実験を順次実施した。なお、土圧計ブロックの設置面には受圧板に圧力が均等にかかるよう均質な川砂を敷いた。

2.3 計測器および起振機

本実験に使用した計測システムのフローチャートを **Fig. 5** に示す。加振実験では、基礎の上面に取付けた地震計によって基礎自身の応答を、基礎底面と側面に取付けた土圧計によって基礎面に生じる静および動土圧分布をそれぞれ計測した。使用した地震計および土圧計の主要性能を **Table 2** に示した。地震計と土圧計の出力はそれぞれ専用増巾器と動歪測定器によって積分および増巾され、ローパス・フィルターで機械的・電気的な高周波の雑音成分を汨汰したのち、それぞれ基礎の速度応答および土圧応力の形でペン書きレコーダに応答波形を記録した。一方、起振機の回転軸に取付けられた回転信号ピックアップ（1 P/R）の出力波形（矩形波）を、専用増巾器を通ったあとの地震計の応答波形とともにブラウン管オシロスコープに導き、ユニバーサル・カウンター上にデジタルに表示された加振振動数と一緒にこれをカメラに撮影し、これより加振力と応答波

Table 2. Specifications of seismometer and earth pressure gauge.

地 震 計	土 圧 計
東京測振製 SA151 (水平用) SA152 (上下用)	共和電業製 BE-2KB
サーボ方式動電型加速度計	ひずみゲージ式土圧計
固有振動数; 3Hz	受 圧 板 径; 94φ
周波数特性; 0.3~30Hz	容 量; 2kg/cm ²
感 度; 0.93~0.98kine/kine	感 度; 0.008~0.01kg/cm ² /10 ⁻⁶ 歪

形との間の位相差を計測した。また静土圧は土圧計の出力を静歪測定器から直接読みとることによって測定した。地震計のキャリブレーション (校正) は現場で使用した計測システムと同一のものに対して検定用の振動台を用いて行ない、結果の一部を (その3)⁵⁾ に示した。なお土圧計については単体として静的に得られている感度を準用した。

基礎に正弦波の加振力を作用させる起振機には、垂直・水平両用で4対の偏心質量をもつ不平衡重錘反転同期式のものを使用した。その性能と仕様を **Table 3** に示す。この方式の起振機は回転中に偏心モーメントの設定値を変更できないので、基礎に作用する加振力は加振振動数の2乗に比例する。

2.4 実験の方法

本実験の加振および測定方法は前回と同様で (その1) に述べたとおりである。実験の1 case は、静止の状態から出発し振動数を増加させながら最大加振振動数に達するまで計測を続ける“UP”と、逆に同様な手順で最大加振振動数から振動数を減少させながら計測していく“DOWN”の2つの加振過程の組合わせからなる。測定振動数範囲は偏心モーメントの設定値に対する起振機の制限により異なるが、通常4~30Hzで、0.5ないし1Hzの間隔で計測した。すべての基礎の case について、上下・水平NSおよび水平EWの3方向の加振実験を、3~5種類の偏心モーメントの設定値 (以下の図ではE.M. と略す) に対して実施した。各偏心モーメントと加振振動数に対する加振力の大きさを **Table 4** に示した。なお以下に示す図中の記号は次のような意味をもっている。

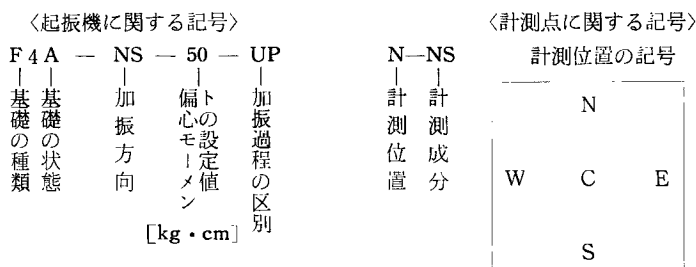
Table 3. Specifications of oscillator.

区 分	仕 様
型 番	伊藤精機製 EX-1000DC
加 振 方 式	水平4軸不平衡重錘同期反転式
加 振 方 向	垂直・水平両用 (360°回転自在)
最大加振力	4000kg (10Hz以上)
加振力波形	正弦波
偏心モーメント	0~1000kg・cm
本 体 重 量	約1300kg
加振振動数	減速歯車の3段切替 0.1~10 0.2~20 0.4~40Hz
水平加振時の 加振力作用高さ	300mm

Table 4. Exciting force of oscillator for various eccentric moments and frequencies.

偏心モーメント	5Hz	10	15	20	25	30
50kg・cm	0.05	0.20	0.45	0.81	1.26	1.81
100	0.10	0.40	0.91	1.61	2.52	3.63
200	0.20	0.81	1.81	3.22	—	—
400	0.40	1.61	3.63	—	—	—
800	0.81	3.22	—	—	—	—

[単位 ton]



3. 實驗結果

3.1 結果の表示

結果の表示法は次のとおりである。ペン書きレコーダに記録された基礎の応答波形から応答振巾を、写真に写された加振力の位相波形と基礎の応答波形から両者の位相差を、さらに起振機の回転軸に取付けられたパルス発生機(1000P/R)の出力から加振振動数を读取る。前述のように加振力は振動数の2乗に比例するので、各加振振動数に対する単位加振力当りの速度応答振巾[kine/ton]によって基礎応答の振巾特性を、また同じようにして基礎の速応応答と加振力との間の位相差により位相特性を表現し、両者を合わせて基礎の応答特性あるいは応答曲線と呼ぶことにする。同様に加振振動数に対して単位加振力・単位面積当りの土圧応力の応答振巾[kg/cm²/ton]を描き、基礎面に生じる変動土圧の応答特性を表現し、これを土圧応答曲線と呼ぶ。

次に、基礎構造模型と周辺地盤の連成系を質量とバネとダッシュポットからなる簡単な集中質量系(上下加振のとき上下振動の1自由度系、水平加振のとき水平一回転振動の2自由度系)に置換し、振巾特性と位相特性の2種の観測量からその等価係数を振動数の関数として換算し、連成系における地盤復元力を加振振動数に対する等価剛性と等価減衰常数の変化として表示する。なお、根入れがあり側面土が作用する場合の水平加振に対する等価係数については、地盤の水平復元力が基礎底面と側面から同時に作用するので、両者の作用位置をどこに選ぶかという問題が残るが、ここでは水平復元力がその合力として基礎底面位置に作用するような等価の意味でのロッキング振動を表わす2自由度系に置換し、(その3)に述べた地表面にのる基礎と同一の換算方式による。

3.2 上下加振の場合

1° 応答特性と等価係数の一般形

代表的な例として、F4D（側面土を埋戻し地下水位を下げた状態）の case について、基礎の応答特性（振中特性と位相特性）を Fig. 6 に、また（その 3）に述べた方法により換算した地盤の等価剛性 K_v と等価減衰常数 C_v を Fig. 7 に示した。測定値のわずかな変動が等価係数の値にかなり大きく影響する性質もっているため、とくに等価係数の観測データにややバラツキがみられるが、これらの図から全体を通じていちおう滑らかな応答および係数の曲線を描けることがわかる。また、加振実験中に振動数を上昇させながら計測する UP の過程（実線）と逆に下降させながら測定する DOWN の過程（点線）で、応答曲線が必ず hysteresis を描くことが今回の実験結果にも共通して認められるが、その hysteresis の主要な性質については前報（その 1）に詳しく述べたとおりである。したがって、以下の図では視察により描いたこれらの応答および係数の曲線のうち UP の加振過程のもののみを示すことにする。

2° 基礎の振動形と加振レベルの影響

F4D の case について、Fig. 8 に基礎上の 4 測点（各辺の中央点 N, S, E, W）での振巾特性の比較を、また Fig. 9 に起振機の偏心モーメントすなわち加振力の大きさを変えた場合の結果を示した。計測システムの測定チャンネルによる総合感度のバラツキと測定精度を考慮すれば、基礎はほぼ一様な上下方向の振動形をもっていることがわかる。また、加振力すなわち基礎の応答レベルが大きくなると、共振点が低振動数側に移行

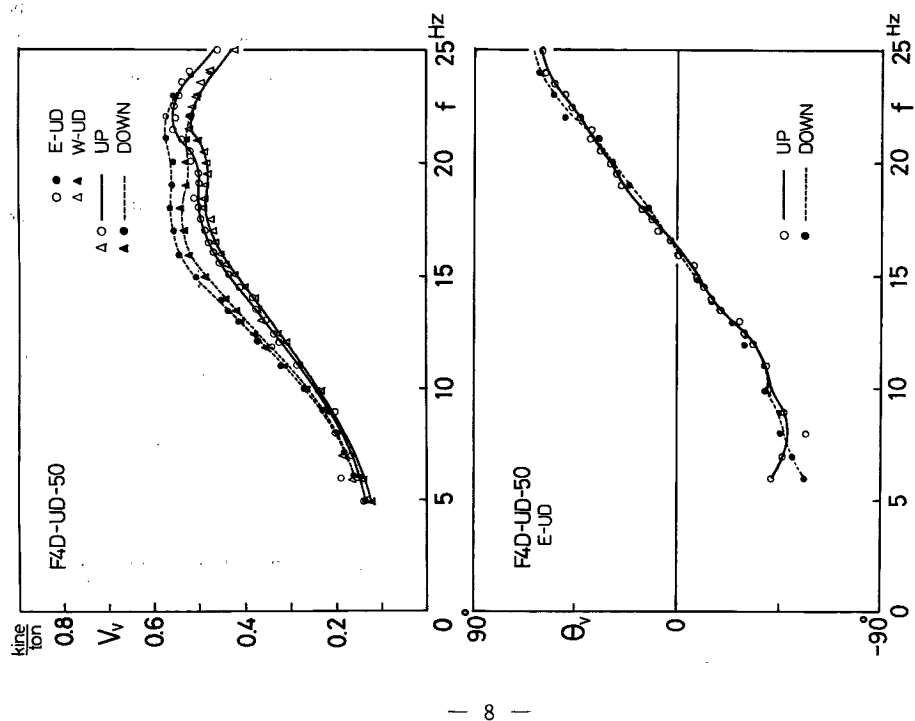


Fig. 6 Amplitude and phase characteristics.

Vibrational characteristics of F4D-foundation, vertical excitation.

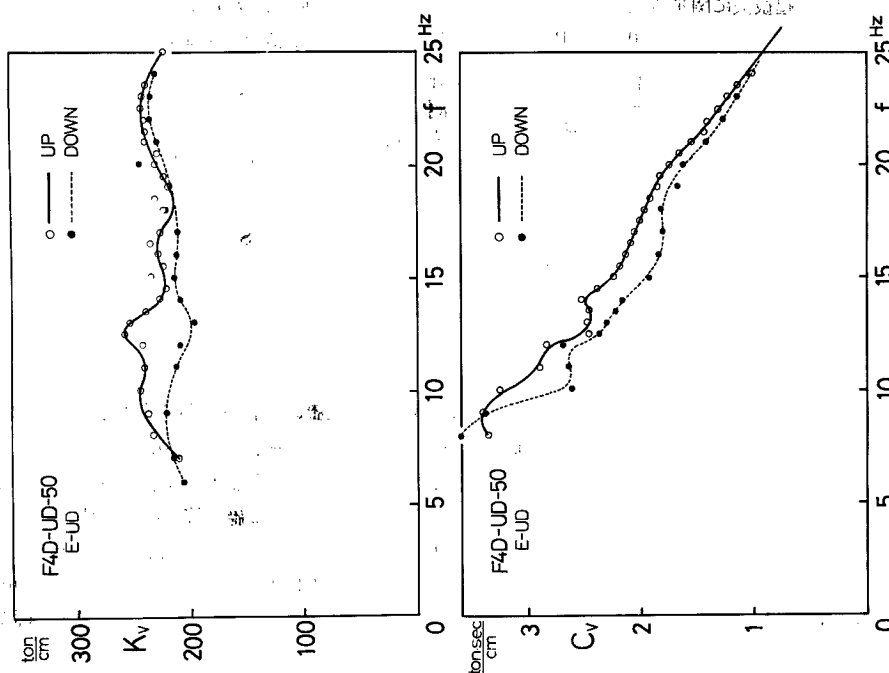


Fig. 7 Equivalent stiffness and damping coefficients.

し、単位加振力当りの応答振巾が漸増するという、基礎が地表にのるこれまでの実験結果に共通する傾向が現われ、根入れのある場合にも地盤復元力には **underlinear** なあるいは **soft** 型の非線形特性を発生する機構が存在することを意味している。

3° 等価係数の全般的な性状

F4A～F4Dに対する応答特性と等価係数をそれぞれ Fig. 10 と Fig. 11 に示した。等価係数の振動数に関する全般的な傾向は、4つの case について量的にはかなり相異があるが、定性的には共通した性質をもっている。すなわち、局所的な小さな変動を別にすれば、等価剛性は低振動数側でやや減少、逆に高振動数域でやや増加の傾向を示すが、総体的には振動数に関してはほぼ平坦であり、等価減衰常数はこの振動数域ではほぼ直線的に減少するような傾向をもっている。

これを基礎面積が等しく自重が F4 基礎の約 1/6 になる F2 基礎の場合〔その3〕の Fig. 14 参照〕と比較してみよう。基礎自重の増加は等価減衰常数の周波数特性としての傾向にはあまり影響を与えず、低振動数域での減衰常数の値を大きくするにすぎないが、振動数とともに等価剛性が減少していく性質を押え、ほぼ平坦化する結果となっている。ちなみに（その3）の同じ図で同一地表面にのる F2 と F5 基礎の比較をみると、理論の上では基礎自重が等価係数に影響を与えないはずであるが、実際には両者は一致せずやはり上述のような相異が現われている。振動数が高くなると土が強く反応する、すなわち剛性が大きく観測されるという室内実験で確認されている性質、および基礎と土とが密着することによって振動エネルギーの伝達能力が大きくなり波動による逸散減衰が増大するであろうと思われる性質が、基礎自重の増加あるいは土への拘束応力の増加とともにより強く現われるからではなかろうか。

4° 基礎底面の設置位置の影響

Fig. 3, 10, 11 において F5 と F4A を比較してみよう。同一寸法の基礎でかつ底面のみで地盤と接し、その設置位置が地表面と地中で異なるという2つの case である。後に述べる水平加振の場合とは異なり、両者の応答特性や等価係数の間には相当の違いが認められる。F5 の振巾特性は F4A よりやや鋭いピークをもつとともに全体に低振動数側に移行し、共振振巾も大きくなっているという関係に対応して、2つの等価係数はともに F5 の方が小さく得られている。“Dynamical Ground Compliance” の理論⁸⁾を参照すれば、これは

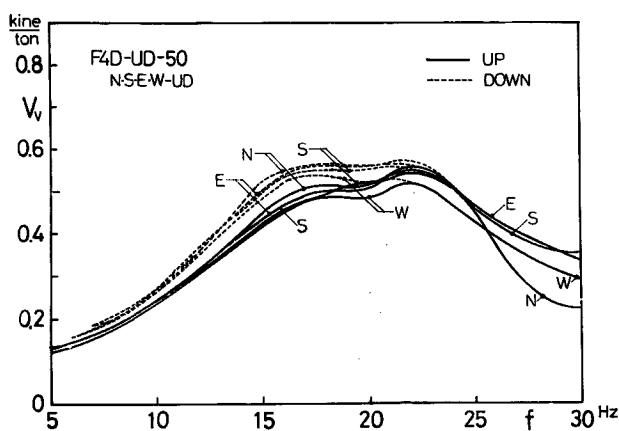


Fig. 8 Effects of the differences in observational points over the foundation.

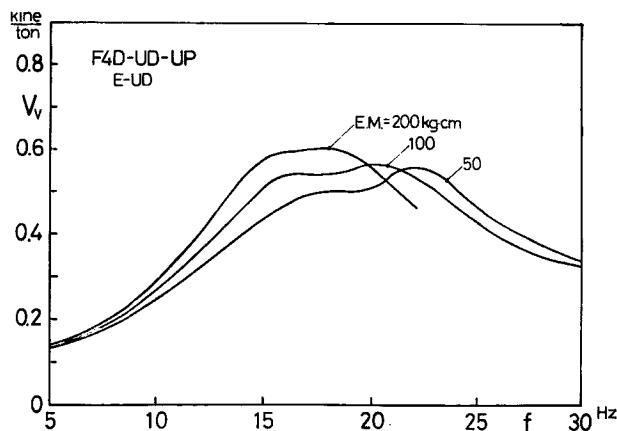


Fig. 9 Effects of the magnitude of exciting force
Amplitude characteristics of F4D-foundation,
vertical excitation.

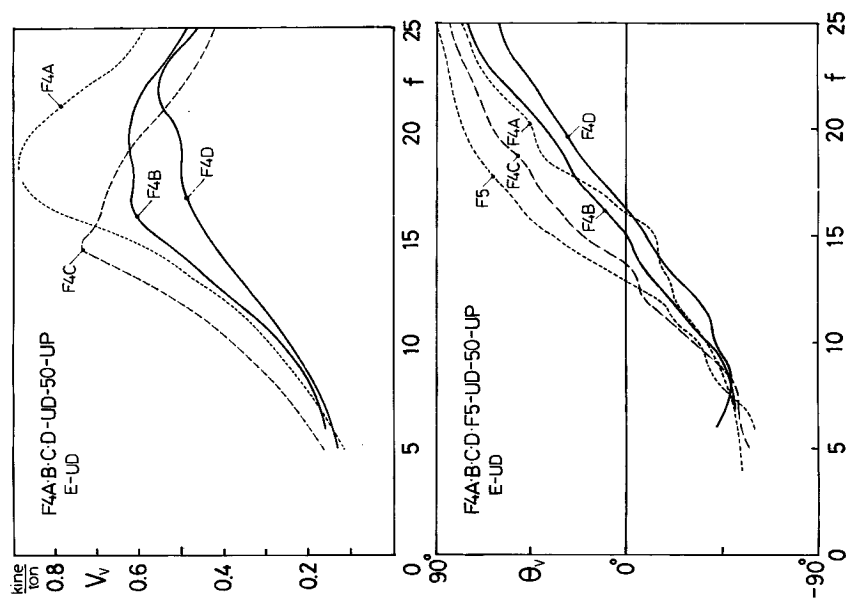


Fig. 10 Amplitude and phase characteristics.

Vibrational characteristics of F4A • B • C • D- and F5-foundation, vertical excitation.

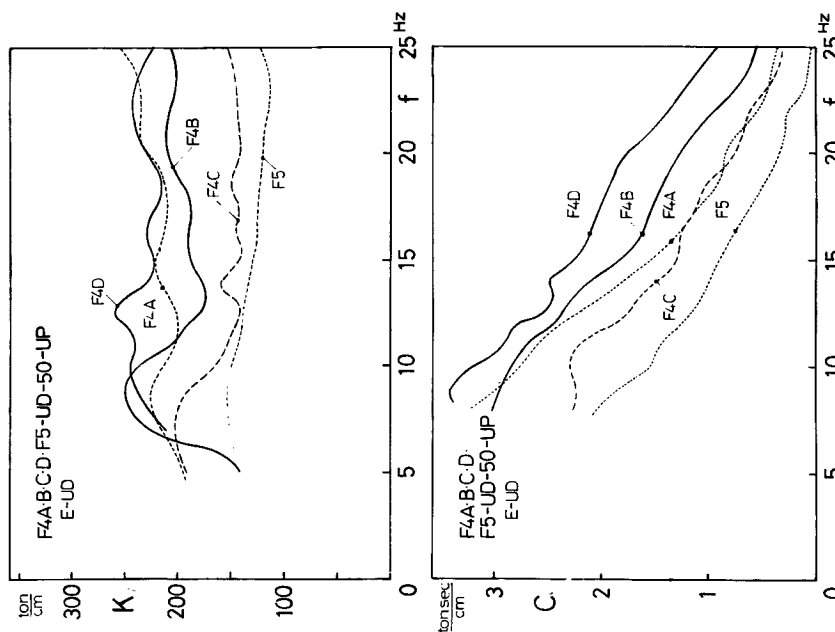


Fig. 11 Equivalent stiffness and damping coefficients.

基礎の位置する周辺地盤の形状の効果をも含めた平均的なあるいは等価的な意味での波動伝播速度もしくは剛性が、地表面にのる場合においてより小さいことを意味している。しかし、基礎の設置された周辺地盤の形状の相異とその物理常数の違いが、2つの case の応答特性や等価係数が異なるというこのような結果に、相互にどの程度関与しているかはなお検討を要する。

5° 根入れの影響

Figs. 10, 11 における F4A（点線）と F4B・D（実線），すなわち，ともに地下水位を下げ側面土が作用しない状態と埋戻した状態の比較から読みとることができる。埋戻しを行なうと，振巾特性の共振振動数の位置はあまり変わらないが，曲線の形状が全体に扁平になり，最大振巾が顕著に減少しており，根入れの効果は上下加振の場合にも相当大きく現われていることがわかる。これを等価係数でみると，応答特性の変動に対応して，等価剛性はあまり変化していないのに対して，等価減衰常数が明瞭に減少していることが読みとれる。“Dynamical Ground Compliance”の理論から予測されるように，このような起振機による加振実験で観測される減衰量の大半が逸散減衰により生じるであろうことを考えあわせると，上下加振の場合の側面土の効果は基礎の上下変位に対する地盤の剪断抵抗の変化としての現われは少なく，基礎側面と地盤との接触面から放散される逸散減衰の増加として現われるように考えられる。

6° 地下水の影響

Figs. 10, 11 における F4B・D（実線）と F4C（破線），すなわち，ともに埋戻しがあり地下水位を基礎底面より下げた場合と自然水位にある場合との比較から読みとることができる。水位が上昇し地下水が基礎をほぼ囲むようになると（1.65mの根入れ中底面より約1.15mが地下水中に没する），応答曲線の共振振動数が減少し，ピークの形状がやや鋭くなり共振振巾が増大する。そして，これに対応して2つの等価係数がともに明らかに減少していることがわかる。地下水の効果は所謂地盤の軟弱化を意味し，地盤剛性の劣化を惹起するとともに，逸散減衰を減少させているように思われる。後者の現象が生じるのは，基礎と地盤との境界面において水が介在するため，基礎から地盤への応力の伝達あるいは振動エネルギーの伝達が行なわれにくくなるからではなかろうか。

次に，ともに同一の状態にあって，両者の実験実施の中間に地下水位の変動過程を含む F4B と F4D の case を比較しておこう。両者の結果は一致せず再現性が得られていないこと，そして，実験順序として後にある F4D において，応答振巾が全体に減少し，2つの等価係数にかなり顕著な増加の傾向がみられることが特徴的である。水位の上下と加振力の作用が相俟って，基礎周囲のとくに底面近傍の土が一種の compaction（締固め）の作用を受けて密実になり，さらに基礎と周囲の地盤とかより密着するようになったからではなかろうか。

7° 動土圧応答にみられる特徴

土圧応答曲線の一般形として F4D の case を **Fig. 12** に示した。土圧応答は接地条件の局所的な影響を微妙に受けやすいので，基礎自身の速度応答に比べるとデータのバラツキがやや大きい，図の実線（UP）と点線（DOWN）に示すように，いちおう滑らかな応答曲線を描くことができる。したがって，以下の図では UP の曲線のみを図示することにする。UP と DOWN の加振過程で応答曲線が描く hysteresis は基礎の速度応答のときほど明瞭な規則性をもってはいないが，応答曲線全体の形状をも含めて基礎応答とはほぼ類似の現われ方をしており，一般に DOWN の応答は UP のそれより大きく，しかも共振点より低振動数側で両者の差がよりひろくという結果になっている。

次に，F4A と F4B（側面土の効果），F4B と F4C（地下水の影響）および F4B と F4D（再現性）の比較をそれぞれ **Figs. 13~15** に示した。これらの図からわかることは，共振振動数の位置が基礎応答振巾のそれとは必ずしも一致せず，F4A，F4B および F4C では高振動数側に，F4D では逆に低振動数側にずれてはいるが，各 case の土圧応答曲線について形状とその位置や大きさの相互関係が基礎の応答曲線と類似の傾向をもっていることである。すなわち，たとえば F4A から F4B になると，側面土の存在が基礎応答そのものを小さくし，かつ生起する土圧応力の一部を側面土が分担してくれるので，土圧応答振巾が中央点Cを例

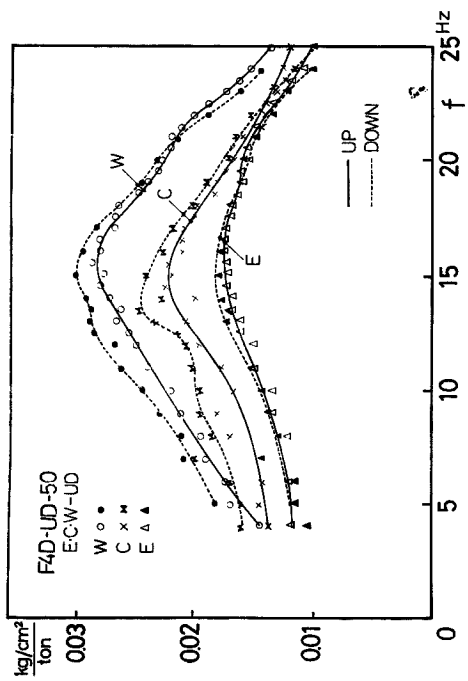


Fig. 12 F4D-foundation.

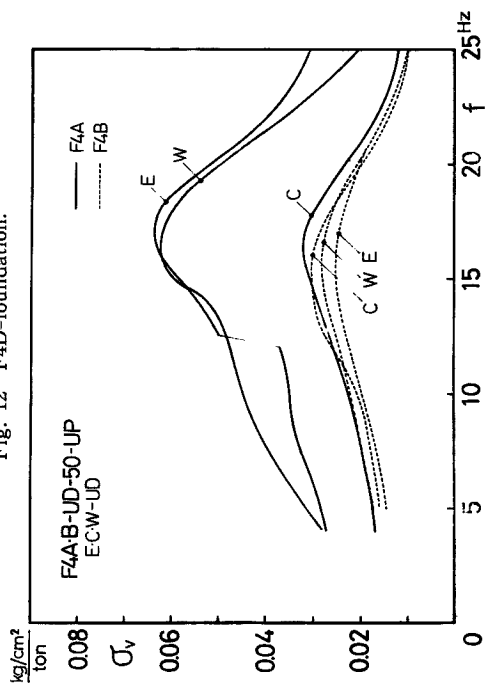


Fig. 13 F4A- and F4B-foundation.

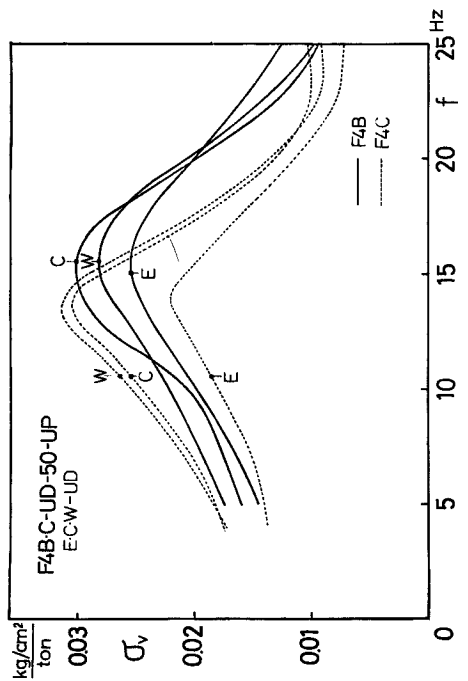


Fig. 14 F4B- and F4C-foundation.

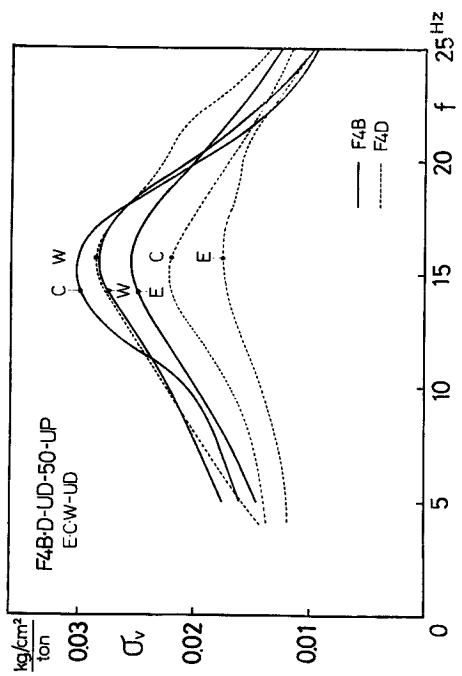


Fig. 15 F4B- and F4D-foundation.

Earth pressure response curves of F4-foundation, vertical excitation.

外として顕著に小さくなる。しかし、このCの挙動が本来のものか局部的な接地条件の影響によるかはこの結果のみから速断はできない。F4BからF4Cになると、応答曲線が全体に低振動数側に移行し、ピークがやや鋭くなって共振振巾が漸増するという、地下水の存在が地盤の軟弱化を意味するような傾向を反映した結果となっている。またF4BからF4Dになると、共振点の位置は変わらないが、共振振巾が全体にかなり小さくなり、応答の分布形も相当変動し、同一の実験条件に対して再現性の崩れていることがわかる。各 case を通じて、3つの測点の振動数に関する特性は定性的には変わらないが、量的な大きさの相互関係が case 毎に変動しており、動土圧の分布には対称性があまりみられず、case 毎に応答分布形が変わるようである。したがって、このような土圧応答の変動の様子から考えて、基礎面と土との接触状態が局所的には実験の case 毎に相当大きく変動していることがわかる。逆に言えば、側面土や地下水の存在、加振履歴などが原因となって生じる基礎面と土との接触状態の局所的な変動が、極めて微妙で顕著な影響を土圧応答に与えていることが推測されるのである。

3.3 水平加振の場合

1° 応答特性の一般形

F4Dの水平NS加振に対する振巾特性と位相特性をFig.16に示した。応答特性の実験値のパラツキの程度、および、UPとDOWNの加振過程によって応答特性に hysteresis が描かれる様子が上下加振のときと同様に現われているので、以下の応答特性を表わす図では滑らかに描いたUPの加振過程の曲線のみを示す。等価係数のグラフについては、4つの観測量から4つの係数を換算することになり、データのバラツキがそれだけ大きく増巾され係数の変動がかなり激しいので、観測値から得られたデータのままで示すことにする。なお水平加振時には、NSとEWの加振方向にかかわらず、ほぼ類似の結果が得られ異方性がほとんどみられなかったため、本報ではNS加振の結果のみを示す。

2° 根入れの影響

F5（地表にのる場合）とF4A（地中にあって側面土が作用しない場合）およびF4C（地中にありかつ埋戻しがある場合）の3つの case について、基礎端部の水平（N—NS）および上下（N—UD）方向の速度応答の応答特性をそれぞれFig.20の実線と点線で示した。まず、ロッキング振動が卓越するこの水平加振のときには、上下加振とは多少異なり、側面土が作用しなければ、基礎底面の設置位置が地中にあっても（F4A）地表にのる場合（F5）でも、高振動数域を除くと両者の応答特性にほとんど差のないことが注目される。一方、埋戻しを行ない側面土が作用するようになると、鋭いピークをもつ応答曲線が著しく偏平になり最大振巾を大きく減じるとともに、共振点の位置を高振動数側に顕著に移動させる。すなわち、この水平加振の場合、側面土の効果は上下加振のときよりはるかに大きく作用し、基礎の水平変位に対する地盤の横抵抗を増大させるとともに、基礎側面の接触面積の増加に伴うこの側面から地盤への逸散減衰量をも著しく増大させていることが推察されるのである。

3° 根入れのある場合の等価係数の性状

Figs.18, 19に示した根入れのある3つの case（F4B, F4CおよびF4D）について、4つの等価係数の振動数に関する全般的な傾向をみると、すべての case を通じてその周波数特性としての定性的な性状は変わらず、しかも基礎が地表面にのる（その3）に扱ったF1およびF2基礎などの場合〔（その3）のFigs.16～19参照〕ともかなり共通する特徴をもっていることがわかる。すなわち、剪断に関する等価剛性 K_H と回転に関する等価減衰常数 C_R は振動数とともに一様に減少し、残る2つの剪断に関する等価減衰常数 C_H と回転に関する等価剛性 K_R は最初やや減少の傾向を示すが、振動数が高くなると漸増するように変わる性質をもっている。なお C_R の高振動数域においてその値が負になるのは、基礎の底面と側面から作用する地盤の水平復元力の合力としての作用位置が基礎底面にあるとした先の仮定が、現実にそぐわないことの反映であろう。

4° 地下水の影響

根入れのある場合について地下水位を上下させたF4B, F4CおよびF4Dの3つの case の応答特性をFig.17に、その等価係数をFigs.18, 19に示した。地下水位を下げた場合（F4B・F4D）と自然水位の場合

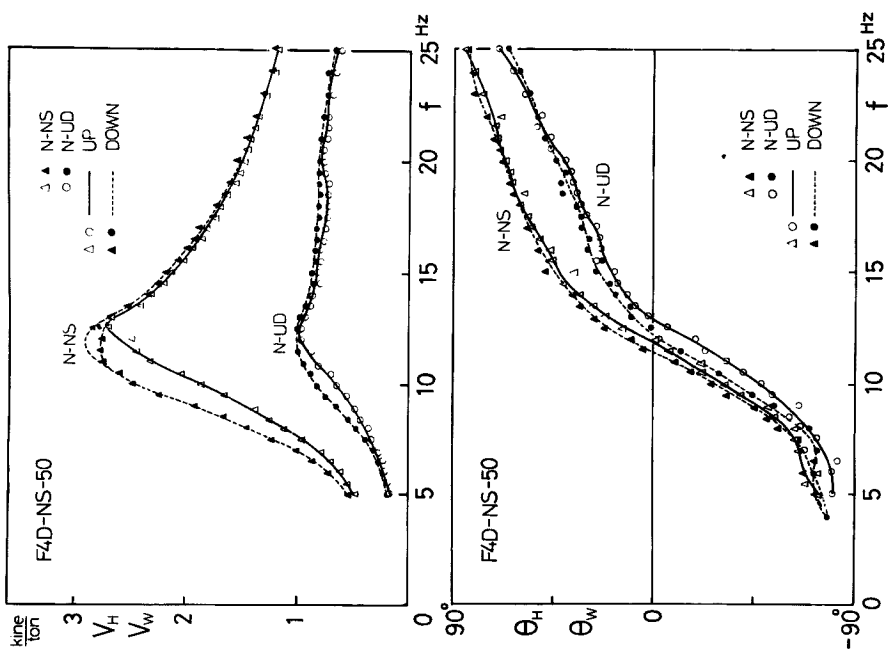


Fig. 16 F4D-foundation.

Amplitude and phase characteristics, horizontal excitation.

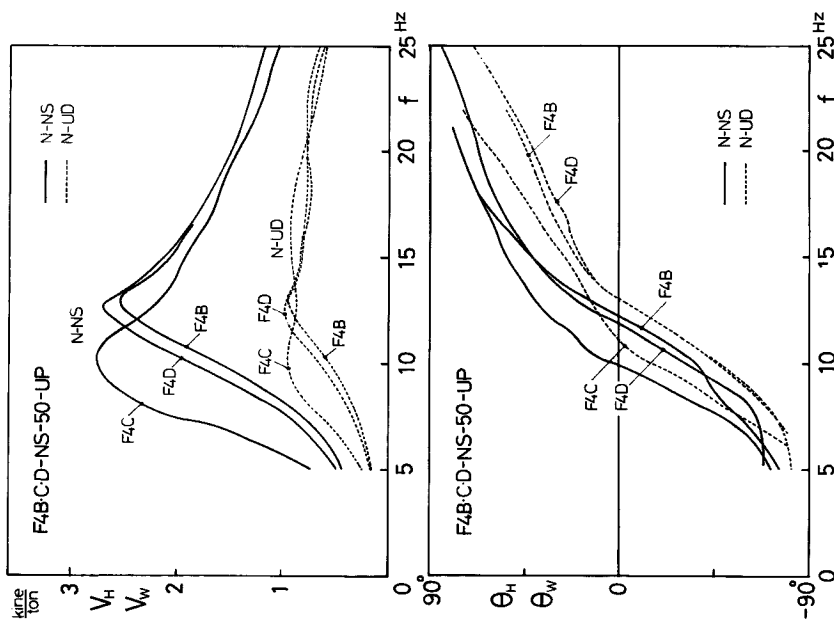


Fig. 17 F4B-, F4C- and F4D-foundation.

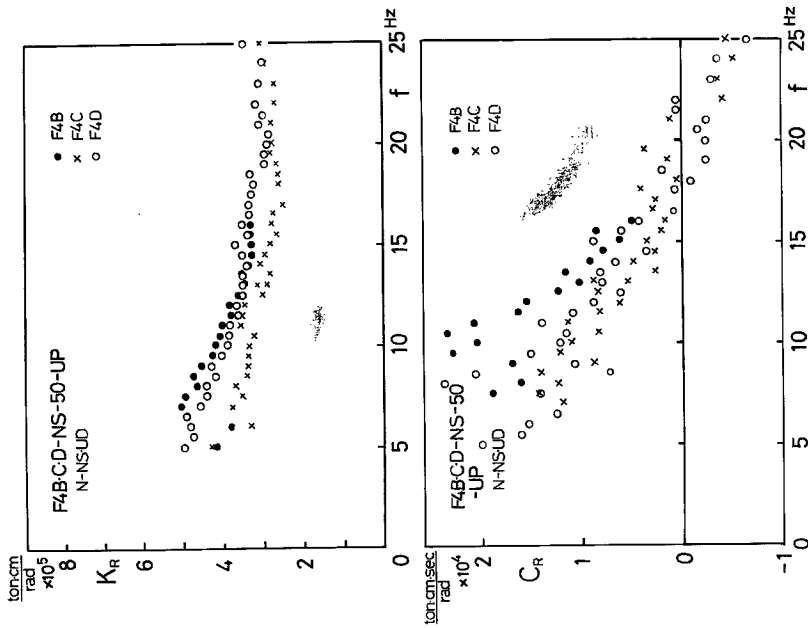


Fig. 18 Coefficients for translation.
Equivalent stiffness and damping coefficients of F4B-, F4C- and F4D-foundation, horizontal excitation.

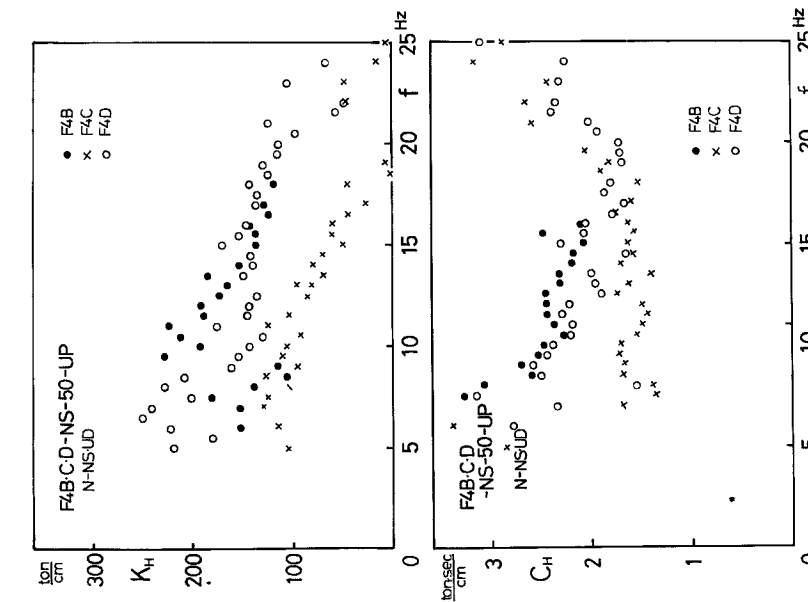


Fig. 19 Coefficients for rotation.

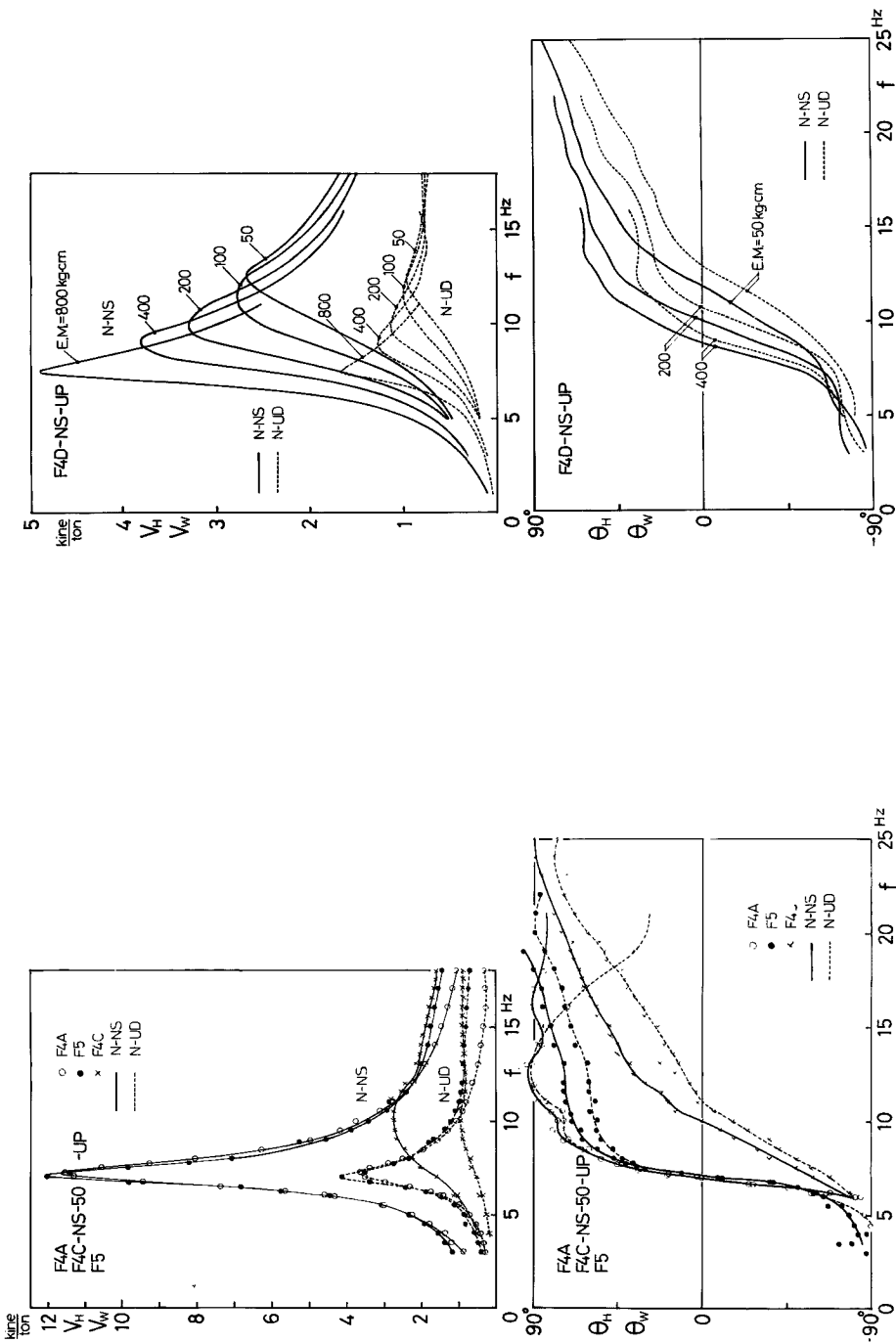


Fig. 21 F4D-foundation.

Fig. 20 F4A-, F4C- and F5-foundation.

Amplitude and phase characteristics, horizontal excitation.

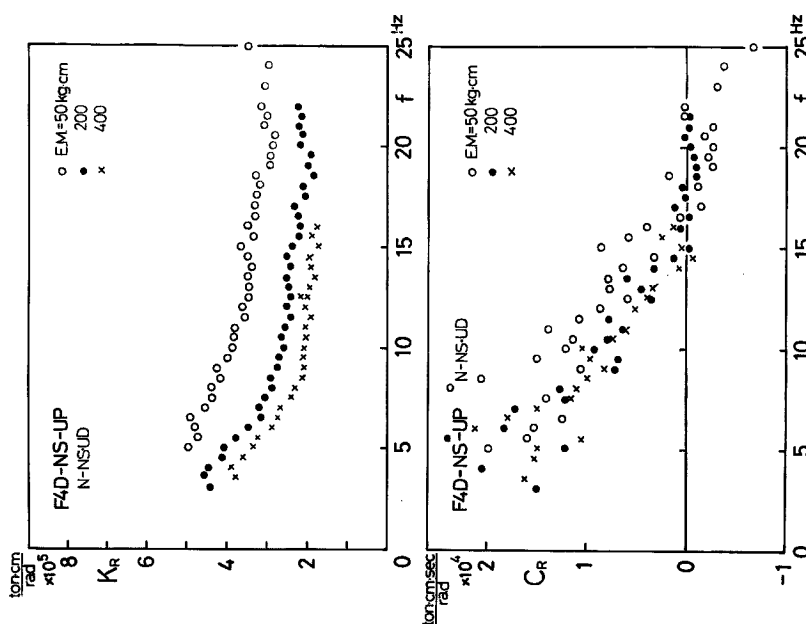


Fig. 22 Coefficients for translation.
Equivalent stiffness and damping coefficients of F4D-foundation, horizontal excitation.

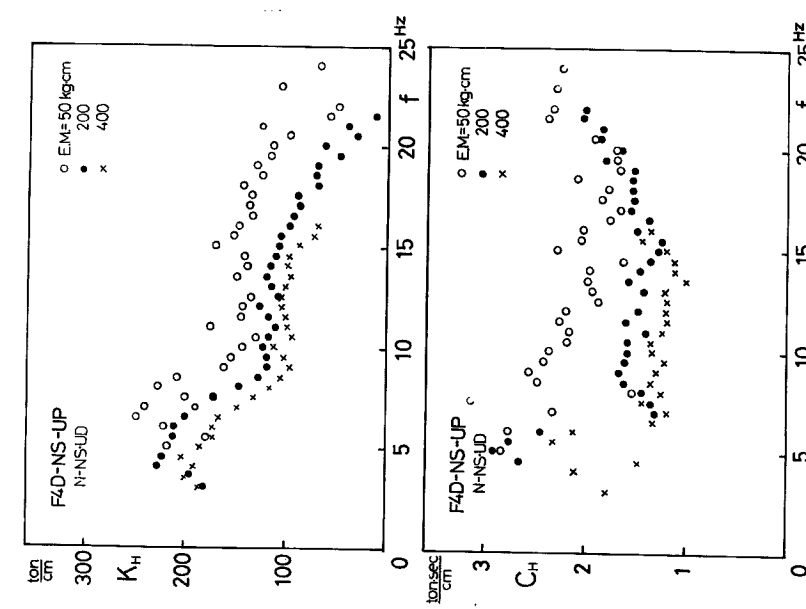


Fig. 23 Coefficients for rotation.

(F4C) を比較すると、両者の応答特性および等価係数は上下加振のときと同様な関係にあることがわかる。すなわち、地下水位が高くなると、振巾特性が全体に低振動数側に移行し、共振振動数が明らかに減じるとともに、共振振巾がやや増加する。地下水の存在は地盤剛性の劣化と同時に基礎と地盤との間の振動エネルギーの伝達能力の低下を意味するようで、等価係数においても水平および回転の両方に共通して、基礎周囲に地下水の存在する方が剛性・減衰常数とも明らかに小さいという結果になっている。一方、地下水位の上昇と下降の過程を間に挟んだ同じ状態の F4B と F4D とを比べてみると、上下加振のときほど大きな差は生じていないが、詳細にみるとやはり再現性は得られていないことがわかる。水平加振の場合は基礎底面より側面に接する土の効果の方が大きく現われ、かつ側面土へは水位の上下と加振力の相乗作用による一種の **compaction** の効果が底面の土ほどには影響を与えていないから、F4B と F4D の両者の差が小さくなっているのであろう。

5° 加振力レベルの影響

起振機の偏心モーメントの大きさを変えた場合、すなわち加振力レベル言換えると基礎の応答レベルまたは土の応答歪レベルが応答特性に与える影響を Fig. 21 に、またその等価係数による表現を Figs. 22, 23 に示した。Fig. 21 のような単位加振力当りの応答特性の表現をとるとき、地盤復元力が完全に弾性の性質をもつならば、これらの曲線はすべて一致することになるが、得られた結果には、加振力レベルの増加とともに共振点の位置が低振動数側に漸次移行するとともに、応答曲線のピークが鋭くなり最大振巾が急増するという、非常に顕著な **soft** 型のあるいは **underlinear** な非線形特性が現われている。一方、この影響を等価係数の上でみると、水平・回転の場合にかかわらず、加振力の増大とともに4つの係数の値がともにはっきり減少しており、剛性・減衰性とも明らかに小さくなっていることがわかる。このような傾向は基礎が地表にのる場合にもみられるものであるが、根入れのあるこの場合にははるかに顕著に現われている。基礎周囲の土の応力-歪関係における **underlinear** な非線形特性と、基礎底面における圧力分布の変化や有効接触面積の減少などの原因に加えて、基礎の応答振巾の増大が基礎近傍の土にキレツを生じ、基礎と土との接触面にもまた周辺の土の内部にも空隙をつくるため——実験中視察によっても確認されている——、局部的な土の隆伏・破壊の進行とともに、側面土の効果が横抵抗の面でも振動エネルギーの伝達能力の面でも次第に期待できなくなっていく影響が、応答特性の上に重要な役割を果たしているように思われる。

3.4 実験結果のまとめ

1° 根入れの影響について

根入れあるいは側面土の効果は上下加振と水平加振で異なった影響を与える。上下加振の場合には、地盤復元力の剛性へ及ぼす影響は小さくあまり変化を与えないのに対して、減衰量を増大させ応答振巾をかなり減じる作用をもっている。波動理論に基づく解の性質から予想されるように、起振機による加振実験で生じる減衰の大半が逸散減衰によることを考えあわせると、根入れの効果は主として基礎側面から地盤への逸散減衰の増加として現われるようである。一方、水平加振の場合になると、剛性と減衰性への影響はともに大きく、剛性および減衰量の増加として現われ、共振振動数を高振動数側へ移行させるとともに最大振巾を著しく減少させる。すなわち、根入れの効果は主として基礎の水平変位に対する地盤の横抵抗の増加と基礎側面から地盤へ伝えられる逸散減衰の増大として現われるようである。

2° 地下水の影響について

地下水の存在は上下および水平加振の場合に共通する影響を与え、地盤復元力の剛性と減衰性をともに減少させる作用をもっている。すなわち、地下水の効果は、一方で土の動力学的な特性の変化として所謂地盤の軟弱化（主として剛性の劣化）を意味し、また一方で基礎と土との接触面において水の介在が振動エネルギーの伝達を行なわせにくくし、逸散減衰を減じる働きをもつように思われる。

3° 地下水位の上昇・下降過程の影響について

地下水位の上下と加振力の作用が相乗すると、その前後で地盤復元力の大きさが変動し、剛性および減衰性がともに増加する結果となる。このような操作は基礎周辺に接する土に一種の **compaction**（締固め）作用を与え、周囲の土が密実化するとともに基礎周囲に密着するようになるためであろうと考えられる。この作用効

果は主として基礎底面において顕著と思われるから、上下加振の場合にこうした影響がより明瞭に現われている。

4° 土圧応答の特徴と速度応答との関連について

土圧応答と速度応答の関連についてみると、共振振動数の位置は必ずしも一致しないが、全般的にはほぼ共通する性質をもっている。UP と DOWN の加振過程で描く hysteresis あるいは側面土や地下水の影響などが両者の応答曲線に同じように現われている。しかし、各測点における土圧応答の周波数特性は定性的には変わらないものの、測点相互の量的な大きさが実験の case 毎に変動し、しかも一般に系の対称性から離れた分布をもっている。動土圧応答の分布がこのように実験の条件によって大きな影響を受けることは、基礎面とその周辺の上との接触状態が側面土の存在や地下水の有無、加振履歴などによって、局所的には微妙にかつ顕著に変動していることを意味する。なお以上の考察は主として上下加振時の底面圧に対するものである。水平加振時の側面圧は、底面圧ほど静圧が大きくないので周辺の土が受ける拘束力が弱く、実験条件に対してより強い影響を受けて大きく変動してしまうため、側圧としての特徴的な法則性を実験的に見出すまでには至らなかった。しかし、全般的には上下加振時の底面圧にみられるような特徴をもっているようである。

5° 基礎と周辺の土との接触状態の影響について

基礎構造の振動特性には、前項の土圧応答の性状からも推測されるように、その周辺の土との接触状態、言換えると基礎と地盤との間に生じる抵抗力と振動エネルギーの伝達機構が微妙にかつ顕著な影響を与えているように思われる。たとえば、基礎構造の加振実験に通常みられる underlinear な非線形特性にも、動力学的な土の応力-歪関係の非線形性ととともに、圧力分布の変化や有効接触面積の減少などに代表される幾何学的ともいふべきこの接触状態の変動が、重要な役割を果たしていると考えることができそうである。

4. む す び

基礎構造と実在地盤の連成系の振動特性に関する一連の実験的研究の一環として、大阪地方の典型的な軟弱地盤に、根入れ基礎および地表面設置基礎という同一寸法の 2 つの基礎構造モデルを作製し、根入れ基礎では側面土の作用の有無に加えて地下水位を人工的に操作しながら、起振機による加振実験を実施した。基礎自身の速度応答の振巾特性と位相特性および基礎底面と側面に生じる土圧応答分布を計測し、根入れあるいは側面土の効果と地下水の影響を中心に、連成系を規定する環境条件がその振動特性の上に現われる特徴を実験的に明らかにした。

実験結果の分析から

(1) とくに地震動の作用時に通常主要な対象となる基礎構造のロッキング振動に対して、基礎の根入れが顕著な影響を与え、地盤復元力の剛性と減衰性をともに増加させ、応答量を減じる働きをもっていること。一方、上下振動に対してもほぼ同様な傾向にはあるが、現われ方の程度が全体に小さく、とくに剛性への影響が少ないこと。

(2) 大振巾時には周辺の土の局所的な降伏・破壊を生じるので側面土が有効に働かず、根入れの効果がそれほど期待できなくなること。

(3) 地下水の存在は地盤復元力の剛性の劣化と減衰性の減少を惹起すること。したがって、地下水の有無は地盤の動的性質の評価および基礎構造と周辺地盤との振動エネルギーの伝達機能に相当大きな影響を与えるように思われること。

(4) 土の動力学的な応力-歪関係に加えて、基礎構造と周辺の土との間の幾何学的ともいふべき接触状態が、連成系の振動特性に重要な役割を果たしていること。

などの主要な結論が得られた。

本報では、実験結果の分析と部分的な解釈にのみ議論を限定しているが、

(1) 適切な理論による解析的研究に基づいた実験事象の定量化

(2) このような実験での規模と実在建物での規模とのスケールの相異が得られた諸結果に影響を与えはしな

いかという点の検討

(3) 加振実験により導かれた結果が実際の地震時にも成立するかという観測事象に基づく検証などが今後の重要な課題になろう。

謝 辞

本振動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）、基礎構造模型の製作と実験現場の設営をおねがいがした竹中一熊谷共同企業体、終始実験の実施に御協力いただいた熊谷組設計部の各関係者の方々に、そして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の技官市川信夫氏と実験作業に参加された研究室の諸兄に、深く感謝の意を表します。最後に、等価係数を算出す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) 小堀鐸二・南井良一郎・鈴木 有：基礎の振動に及ぼす地層構造の影響について——実地盤モデルによる検討——，日本建築学会近畿支部研究報告集〈構造I〉，昭47. 6，pp. 5—8.
- 2) 小堀鐸二・南井良一郎・鈴木 有：基礎版の振動に現われる地盤特性の非弾性的な性質について，日本建築学会大会学術講演梗概集〈構造系〉，昭47. 10，pp. 487—488.
- 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，昭49. 10，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，昭49. 10，pp. 139—156.
- 5) 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50. 4，pp. 59—78.
- 6) Kobori, T., R. Minai and T. Suzuki: The Dynamical Ground Compliance of a Rectangular Foundation on a Viscoelastic Stratum, Bulletin of the Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, Vol. 20, Part 4, No. 183, March, 1971, pp. 289—329.