

# 実地盤中に根入れされた模型ケーソン基礎の振動実験

後藤 尚男・亀田 弘行・吉原 進  
本久 明・弥田 和夫・北川 隆

## VIBRATION TESTS ON MODEL CAISSONS EMBEDDED INTO THE ACTUAL GROUND SURFACE

By Hisao GOTO, Hiroyuki KAMEDA, Susumu YOSHIHARA  
Akira MOTOHISA, Kazuo YADA and Takashi KITAGAWA

### Synopsis

This paper presents the results of experiments on reinforced concrete model caissons with circular and square sections, embedded in a clay layer under surface fill. They were excited by a mechanical vibrator whose exciting force can be controlled during operation. Along with discussion of various experimental results obtained, the vibrational characteristics of the model caissons are dealt with in comparison with a simple linear oscillator, in which it is pointed out that the spring coefficient and the damping constant due to soil layer are regarded as functions of the excitation frequency, as a result of the soil-substructure interaction. And their frequency characteristics are calculated from the frequency response curve and the phase curve gained in the above mentioned experiments.

### 1. 緒 言

ケーソン基礎が土木構造物の基礎としてよく採用されているのは周知のところであり、その耐震設計においては、これを取りまく地盤との相互作用を考慮に入れることが望ましいことはいうまでもない。

一般にケーソンをも含めた構造物基礎と地盤の相互作用については、これまでに各方面で理論的、実験的な多くの研究が行なわれてきている。理論的研究では、ばね-ダッシュポットモデルに対する線形振動論の適用<sup>1)</sup>、地盤を半無限弾性体としての弾性波動論の適用<sup>2), 3)</sup>、あるいは有限要素法による研究<sup>4)</sup>などがあり、実験的研究では室内模型実験、実地盤模型実験、実物実験、実測などの研究が行なわれ、それらの現象を追求すると同時にそれらの現象をたとえばばね定数、減衰定数を振動数に無関係とした1自由度あるいは2自由度の振動系で表示して、既存の振動学上の概念で説明しようとしたもの<sup>5)</sup>、あるいは弾性波動論による解析解との対応関係を論じたもの<sup>6)</sup>などがある。

本研究では、かなり限定されているが、実地盤中に円形断面および正方形断面を有する2基の鉄筋コンクリート製ケーソン模型を沈設し、できるだけ詳細な実験<sup>\*</sup>)を行ない、幅広い実現象の追求に努めるとともに、その結果を線形1自由度の振動論のもとで解析して、解析結果の有効性と問題点を論ずるとともに、さらに地盤のばね係数や減衰定数の振動数特性を検討することによって弾性波動理論による解析解との対応関係について論じようとしたものである。

\*) 正方形断面ケーソン模型については、主軸方向ばかりでなく任意の方向に加振する実験も実施したが、本論文では主軸方向に加振して得られた結果のみを取り上げる。

## 2. 実験装置および実験方法

### 2.1 実験装置

本実験を実施した地盤，供試模型および実験・計測機器の概略は以下のとおりである。

#### (1) 供試地盤

本研究における実験は，京都大学防災研究所宇治川水利実験所構内で実施した。実験地点近くで実施された地盤調査の結果は Fig. 1 に示すように，約 1 m の表土層の下に自然堆積状態と思われる約 3 m の厚さの様なきわめて軟弱な粘土層があり，その下層は約 2.5 m の厚さの軟弱な砂質シルトとなっている。

また弾性波探査の結果，表土層の SH 波の伝播速度は約 180 m/sec，P 波の伝播速度は約 490 m/sec であった（したがってポアソン比は 0.42）。また粘性土中を伝わる SH 波と思われる波の伝播速度は約 80 m/sec と推定された。

#### (2) 模型基礎体

実験に供したケーソン基礎模型は Fig. 2 (a), (b) に示すように，一辺 1.5 m，高さ 3 m の正方形断面および直径 1.7 m，高さ 3 m の円形断面を有する鉄筋コンクリート製の中空のケーソン模型 2 基で，その上部にはいずれも一辺 2 m，厚さ 0.5 m のコンクリート製頂版を有するものである。なおこれら両ケーソンは，上に示したように施工の都合上同一の寸法ではないが，それらの断面積を等しくした。

ケーソン模型の施工に先立って，層厚約 1 m の表土層を約 4 m × 4 m にわたって掘削し，厚さ 3 m の粘土層中に，周辺地盤を乱さないように沈下・設置した。これら 2 基のケーソン模型の中心間距離は 12 m で

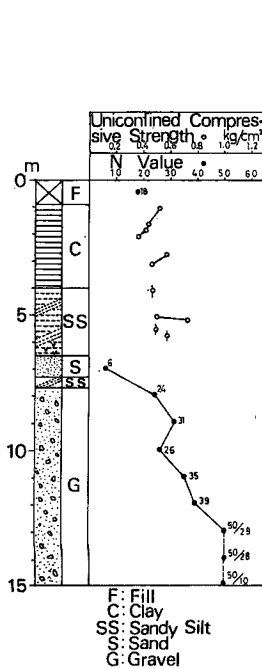


Fig. 1 Soil profile of the site.

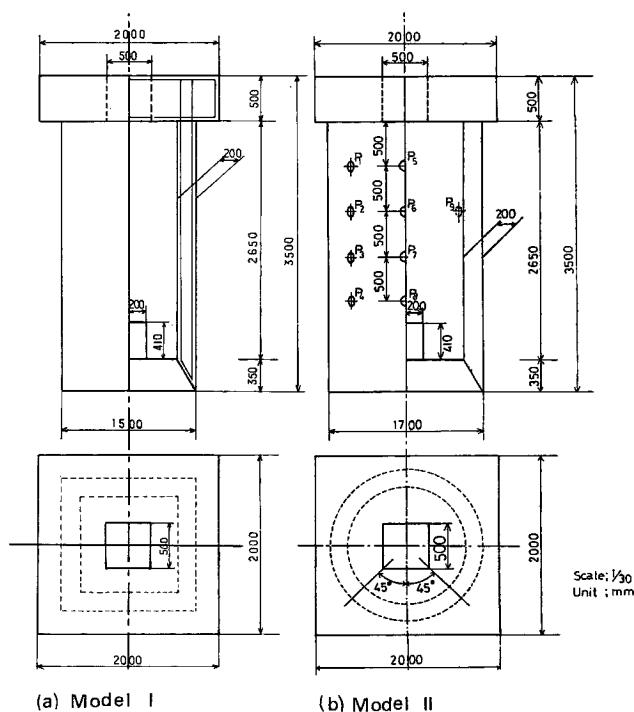


Fig. 2 Model caissons.

(a) Square section (model I)

(b) Circular section (model II)

Table 1 Dimensions of Model Caissons

		Model I	Model II
Weight	$W$ (ton)	13.4	12.8
Mass	$M$ (ton·sec <sup>2</sup> /m)	1.37	1.31
Center of Gravity*	$d_G$ (m)	2.08	2.08
Center of Vibrational Force*	$d_e$ (m)	3.91	3.91
Moment of Inertia	$J_G$ (ton·m·sec <sup>2</sup> )	2.20	2.85
Area of Section	$A$ (m <sup>2</sup> )	2.25	2.27

Model I: Square Section

Model II: Circular Section

\* Height from the Bottom of the Caisson

あるが、正方形断面ケーソンは昭和46年7月下旬に、円形のそれは昭和47年8月上旬にそれぞれ施工を完了した。したがって正方形断面ケーソン模型の実験時には円形断面ケーソンは設置されていない。

これら両ケーソン模型に起振機と駆動モータを設置した状態での重量、寸法等を Table 1 に示した。ま

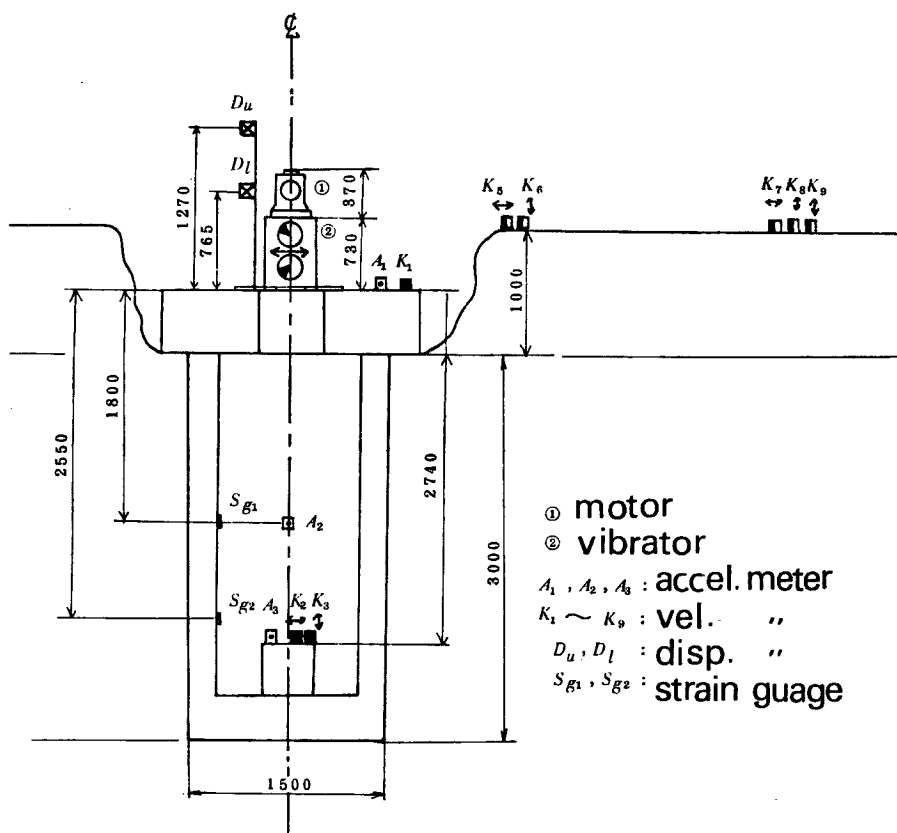


Fig. 3 Measurement instrumentation of caisson.

Table 2 List of Experiments

Model I				Model II			
Name of Exp.	Vibrator Parameter { $m_0 r$ (ton·sec <sup>2</sup> )}		Date of Test	Name of Exp.	Vibrator Parameter { $m_0 r$ (ton·sec <sup>2</sup> )}		Date of Test
(1)	A	$\alpha=0.5$	$0.68 \times 10^{-5}$	23-10-1971	J-1 J-2 J-3	$\alpha=1$ $\alpha=3$ $\alpha=5$	$1.36 \times 10^{-5}$ 4.04 6.63
	B	1	1.36	25 "			
	C	2	2.71	26 "			
	D	3	4.04	27 "			
	E	4	5.35	27 "			
	F	5	6.63	28 "			
(2)				K-1	$F=100$ kg		24 "
				K-2	$F=250$ kg		25 "
				K-3	$F=400$ kg		26 "
(3)				L-1	$D_1^*=0.1$ mm		25 "
				L-2	$D_1=0.3$ mm		25 "
				L-3	$D_1=0.5$ mm		26 "

\* Displacement of Caisson

たケーソン模型およびこれらにピックアップを設置した概略を Fig. 3 に示した。同図は正方形断面ケーソン模型の加振時における概略図で、円形断面ケーソン模型の加振時においてもほぼこれと同様にピックアップを設置した。

### (3) 計測計器 (ピックアップ等)

本実験に用いた計測機器は次のとおりである。

i) 加速度計 (新興通信工業製, 抗抵線ひずみ計式加速度計, UA 型,  $\pm 2G$ , 固有振動数 120 Hz)

これはケーソン模型の水平加速度応答を計測するために用いたものである。また模型の振動モードを求めるために、高さを変えて 3 か所に設置したが、このうち円形断面ケーソン模型の中央の加速度計は計測不能となった。

ii) 速度計 (東京振動研究所製, 動線輪型電磁式換振器, TSD-1H (水平成分), TSD-1V (鉛直成分), 固有振動数 1.0 Hz)

模型および周辺地盤の速度応答を計測するために用いたもので、加振しているケーソン模型の頂版上と底部、円形断面ケーソン模型の加振時には正方形断面ケーソン模型の頂版上、両ケーソン模型の中間点の地表面上にそれぞれ設置した。

iii) 小型土圧計 (共和電業製, ストレンゲージ式土圧計, BE-2KC, 測定範囲  $2 \text{ kg/cm}^2$ )

これはケーソン模型に働く反力土圧を計測するために用いたもので、Fig. 2 (b) に示すように円形断面ケーソン模型表面の正方形ケーソンに対向する面 (加振方向) およびそれより  $45^\circ$  方向に設置した。なおこれはケーソン模型の躯体完成時 (沈設前) に、ケーソン模型の面と受圧面とが同一平面になるようにモルタルで埋め込んだ。

iv) 変位計 (日本測器製, 可動コア型振動計 508-A 型, 測定範囲  $\pm 5 \text{ mm}$ )

ケーソン模型と地盤の水平相対変位を測定するために用いたものである。この場合変位計に近接して不動点が必要になるが、そのために模型から 4 方向に約 20 m 隔った 4 地点に直径約 6 cm, 長さ 3 m の鋼管を地中に約 2 m 打ち込み、それらの間にピアノ線を互に直交するように張りわたした交点をもって不動点とした。変位計本体は、鋼製アングルを介してケーソン頂版に固定した。しかし測定した結果は、高い加振振動数域では満足できるものでなかったため、円形断面ケーソン模型の実験時には用いていない。

v) ひずみ計（共和電業製，紙ゲージ，K-70-A1-11）模型の軀体は剛体運動を行なうように十分な剛性を持たせたが，その検証のために，振動時の軀体の曲げひずみを測定した。

#### vi) 増幅器および記録器

上記の測定用ピックアップのうち，加速度計，小型土圧計およびひずみ計のゲージ電圧供給および出力増幅用に動ひずみ計（共和電業製，DMP-6G および新興通信製，DS6/MTX，計 12 成分）を用い，変位計および速度計の出力電圧の増幅器として，直流増幅器（渡辺測器製，WA221-6，6 成分，2 台）を使用した。また記録器としては，ペンレコーダ（渡辺測器製，WTR-211-6C，3 台，計 18 成分）および磁気テープ式データレコーダ（TEAC 製，R351 型 4 成分および R1100 型 7 成分）を用いた。これらの記録器ですべての成分を同時に収録することはできないので，若干の成分を重複させながらスイッチボックスで結線を切換えて測定を行ない，実質的には全成分の同時記録をうるようにした。

#### (4) 起振機

本実験に用いた起振機は早坂機械製作所製の不平衡質量型起振機（メカニカルバイブレータ，V-120R，自重（駆動モータ含む）331 kg）である。本機の最大偏心荷重によるモーメントは 120 kg・cm（最大偏心質量モーメントは 0.122 kg・sec<sup>2</sup>），最大回転数は 1800 rpm（30Hz）であるが，最大起振力は連続使用時で 3000 kg におさえられている。本機の特徴を簡単に述べると，Fig. 4 に示したように，たがいに逆方向に回転する 2 軸にそれぞれ 2 個ずつの重錘が取り付けられており，この開き角度を変えることにより，運転中に偏心質量モーメントを連続的に 0 から最大値まで変えることができる。したがって起振力一定の実験や一定振動数で起振力を変える実験（過渡的正弦波加振実験や応答変位一定の加振実験）が可能である。

起振機に目盛られている，偏心質量モーメントを表わす指標を  $\alpha$  に設定すれば，起振力振幅  $F$  (kg 重) は

$$F = \frac{120}{\cos 45^\circ} \cdot g \cdot (2\pi f)^2 \cdot \cos \frac{180^\circ - 9^\circ \alpha}{2} \quad (0 \leq \alpha \leq 10) \quad (1)$$

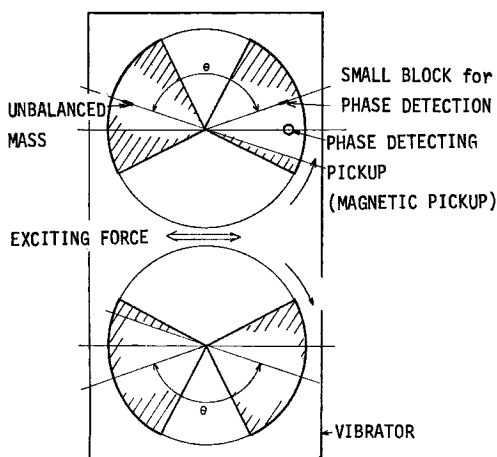


Fig. 4 Schematic illustration of the vibrator.

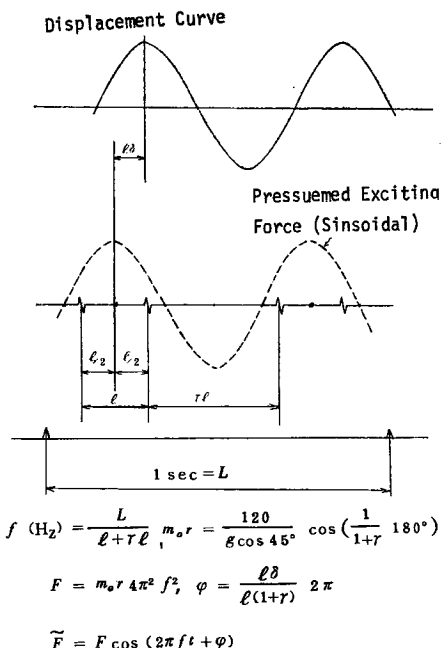


Fig. 5 Time history of vibrating force and phase lag.

で与えられる。以後この  $\alpha$  を起振力パラメータと称する。

一般に実物あるいは大規模な模型の強制振動実験においては、起振機がよく用いられるが、その場合起振力と応答の位相差あるいは起振力波形を測定することがかなり困難である。本実験ではこれらを次に述べる方法により求めることにして、起振機を一部改造した。

Fig. 4 に示したように、起振機の 1 つの回転軸に取り付けられている 2 個の重錘の中心位置に鋼製の小さな検出片 (厚さ 4 mm) を設け、起振機の枠に反応速度の大きい検出器 (電磁ピックアップ、小野測器製、MP-9) を取り付けておくと、それぞれの検出片が検出器の位置を通過するごとに 1 個のパルスを発生するので、定常状態で起振機が回転しておれば、それらは Fig. 5 に示すように、その間隔が短いもの ( $l$ ) と長いもの ( $\gamma l$ ) とが交互に現れてくる ( $\alpha=0$  のときはパルス間隔は等しく、 $\alpha=10$  のときは短長の比が 1:3 となる)。したがって短い間隔のパルス間の中心が起振力の最大位置となるので、この位置と応答の最大位置との距離より応答の位相遅れが求まり、起振力振幅  $F$  は、パルスの短長の間隔の比  $\gamma$  を計測すれば

$$F = \frac{120}{g \cos 45^\circ} \cdot (2\pi f)^2 \cdot \cos \frac{180^\circ}{1+\gamma} \quad \dots\dots\dots (2)$$

で求められる。したがって起振力波形  $\tilde{F}(t)$  はその最大位置と振幅がわかれば、次式で推定することができる。

$$\tilde{F}(t) = F \cos (2\pi f t + \varphi) \quad \dots\dots\dots (3)$$

実験では、単位時間あたりのパルスの個数をユニバーサルカウンタ (東京電子測器製、UFC-203D) により計数して振動数  $f$  (パルス数の 1/2) を求め、タイムインターバルカウンタ (日本電波製、N-4206S) によって  $\gamma$  を求めて起振力振幅を算定した (図表を使用)。

## 2.2 実験方法

2 基のケーソン模型を用いて行なった実験の方法の概略を記せば次のとおりである。

### (1) 偏心質量モーメント一定実験 ( $\alpha$ 一定実験)

起振機の起振力パラメータ  $\alpha$  を一定に保ったまま、加振振動数を約 7 から 25 Hz まで変化させ、ケーソン模型の応答が定常状態に達したと思われるときに手早くすべての記録をとる。

### (2) 起振力一定実験 ( $F$ 一定実験)

すべての加振振動数において起振力を一定に制御して加振するもので、起振力パラメータ  $\alpha$  および加振振動数  $f$  を適宜組み合わせで所定の起振力をうる。

### (3) 応答変位一定実験

すべての加振振動数においてケーソン模型の応答変位を一定にして加振するもので、振動数を設定した後、 $\alpha$  を徐々に増加させて、定常応答変位が予め定めた目標値になったところで記録をとる。

### (4) 過渡的正弦波加振実験

上記のすべての実験は、振動が定常状態になったと思われるところで記録をとるものであるが、この実験は、加振振動数  $f$  を一定に保ったまま、 $\alpha$  を適当な速さで漸次増加させ、ケーソンの応答変位が予定最大振幅となったところで、 $\alpha$  を減少させてその全過程の記録をとる。したがってここでいう過渡的正弦波というのは、加振振動数は一定で、その振幅のみが時間とともに漸次変動するものをいう。

上記 (1)、(2) の実験からは、ケーソン基礎模型の振動特性およびケーソン基礎模型側面に生じている反力土圧 (振動土圧) を把握できる。また (3) の応答変位一定の実験からは、主に反力土圧 (振動土圧) の振動数特性が得られる。

なお正方形断面ケーソン模型では上記 (1) の実験のみを行ない、円形断面模型では、(1)～(4) のすべての実験を実施した。これらの詳細を一括して Table 2 に示す。

## 3. 実験の結果とその考察

本節では、前節の方法でケーソン基礎模型の加振実験を実施して得られた測定記録を整理した結果を図示

し、あわせて模型の振動特性について考察を行なった。ここで取り扱うのは加振した2基のケーソン模型、周辺地盤および円形断面ケーソン模型を加振したときの正方形断面ケーソン模型の共振曲線、模型の応答と起振力の位相差、模型に働く振動土圧などである。

なお正方形断面ケーソン模型に張り付けたひずみ計の測定結果によれば、模型躯体の曲げひずみは本実験装置の感度の範囲では検出できないほどに小さく、模型を剛体として取り扱ってよいことを示している。以下においてはひずみの測定結果を省略して模型は剛体運動をしているものとする。なお円形断面ケーソン模型ではひずみの計測を行っていないが、正方形断面模型と大きさ、地盤条件等がほとんど同じ条件であるので、同様に剛体運動を行なっているものとする。

### 3.1 ケーソン模型の共振曲線

#### (1) 正方形ケーソン

正方形断面ケーソン模型（以下正方形ケーソンと略称する）を加振したときの同ケーソン頂版上の加速度共振曲線および同位置における換算変位共振曲線を Fig. 6 (a), (b) に示す。なお同図 (b) の換算変位共振

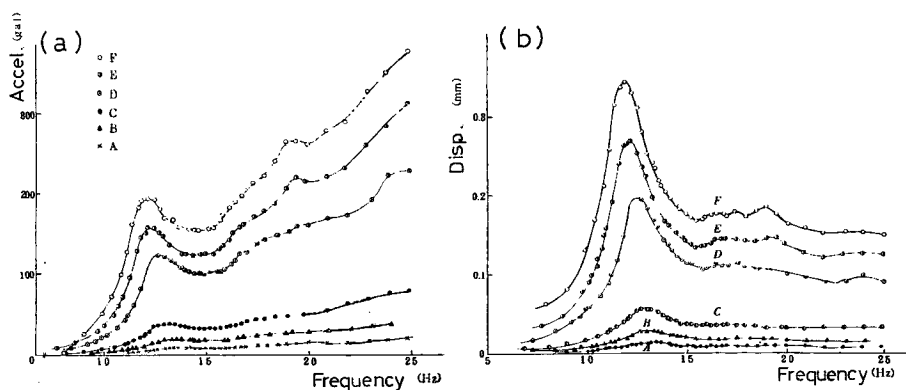


Fig. 6 Frequency response curves, model I.

(a) Acceleration,  $A_1$

(b) Displacement (reduced from accel.  $A_1$ ).

Table 3 Resonant Frequency (Hz) of the Models.

Model I			Model II		
	<i>fra</i>	<i>frd</i>		<i>fra</i>	<i>frd</i>
A	13.4	13.4	J-1	15.0	14.0
B	13.5	13.3	J-2	(13.7)	12.8
C	13.2	12.7	J-3	12.0	12.0
D	12.7	12.7	K-1	13.7	13.5
E	12.6	12.2	K-2	12.6	12.3
	(12.2)				
F	12.2	11.9	K-3	11.7	11.6

曲線は、加速度波形が正弦波に近いので、これを加振円振動数の2乗で除して求めたものである。このようにして得られた換算変位の精度は、15Hz程度以下においては別に設置した変位計による記録と比較することにより、ほぼ妥当なものであることが確認されている。変位計による記録は、15Hz程度以上の高振動数時には、変位計支持部の部分共振のために安定した記録が得られなかったため、以下の考察・解析にはこの

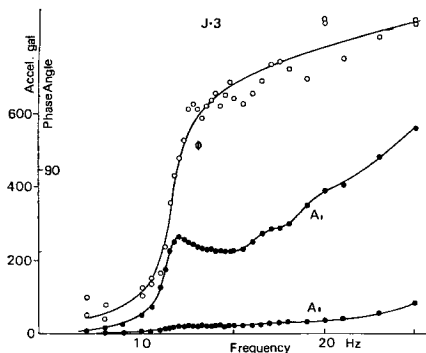
換算変位の結果を用いて行なう。

**Fig. 6** の各共振曲線は明らかな 1 つのピークを持つ比較的滑らかな曲線となっており、本実験の範囲では、2 次の共振点はみられず、いわゆる起振機外力による加速度および変位の線形 1 自由度振動系における理論共振曲線の形状によく対応している。起振力パラメータ  $\alpha$  が大きくなるにつれて、共振振動数  $f_r$  が少しずつではあるが低下するのが認められる。これがケーソン模型を取りまく地盤の非線形性に基づくものかどうかはこの図だけからは即断できない。

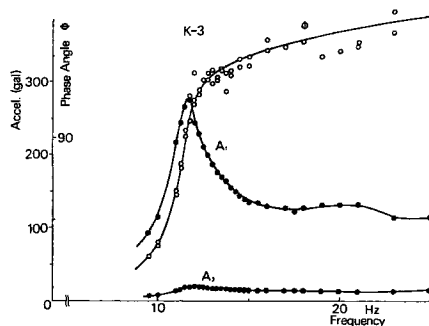
加振振動数が 15~20 Hz の範囲で、いずれの共振曲線も少し乱れているが、これは後述するところの地盤の共振による影響であろう。これらの図から、加速度および変位の共振振動数  $f_{ra}$  および  $f_{rd}$  を読み取り、一括して表示したのが **Table 3** である。

## (2) 円形ケーソン

円形断面ケーソン模型（以下円形ケーソンと略称する）を加振したときの同ケーソンの頂版上および底面上の加速度記録  $A_1$  および  $A_3$  の共振曲線と  $A_3$  の起振力に対する位相曲線について、実験 J-3 の場合を **Fig. 7** に、実験 K-3 の場合を **Fig. 8** にそれぞれ示す。



**Fig. 7** Frequency response curves, model II (acceleration and phase lag).



**Fig. 8** Frequency response curves, model II (acceleration and phase lag).

すでに述べたように、起振力の制御および位相遅れの検出は反応速度の大きい電磁ピックアップにより行なったものであるが、これらの図の位相曲線は加速度計自身の位相遅れを次に述べる方法により補正したものである。すなわち加速度計の減衰定数  $h$  は一般に 0.7 前後であるので、加速度計自身の位相遅れ  $\varphi_a$  は、その固有振動数  $f_a$  までほぼ  $\varphi_a \cong f/f_a \cdot 90^\circ$  で与えられるとして、この  $\varphi_a$  だけ加速度記録の位相を補正した。

これらの図においても、加速度の共振曲線には大きなばらつきもなく明瞭な 1 個のピークがあり、比較的滑らかとなっていてかつ 2 次の共振点は本実験の範囲ではみられない。しかし位相曲線は高い振動数域で若干ばらつきが大きい。しかしながら、位相遅れが  $90^\circ$  となる振動数すなわち固有振動数は共振振動数に等しいか少し小さくなっており、両者の関係がよく対応している。特に **Fig. 8** に示した起振力一定実験の結果によれば、加速度振幅は加振振動数が大きくなるにつれてほぼ一定の値をとり、1 自由度線形振動系の理論共振曲線の形状とかなりよく対応していることがわかる。すなわちこれら起振力一定の実験では、起振力がうまく一定に制御されていたといえよう。

次に **Fig. 9** および **Fig. 10** は、 $\alpha$  一定実験 (J-1~J-3) および  $F$  一定実験 (K-1~K-3) の結果を、それぞれ一括して図示したものである。なおこれらの図には、先に述べた方法で算出した換算変位共振曲線を示してある。**Fig. 9** の実験 J-2 の共振点付近で特異な形を示しているが、その原因はよくわからない。こ

これらの図から円形ケーソンにおいても正方形ケーソンと同様な傾向のあることがわかる。またこれらの図から共振振動数を読み取り一括して **Table 3** に示した。

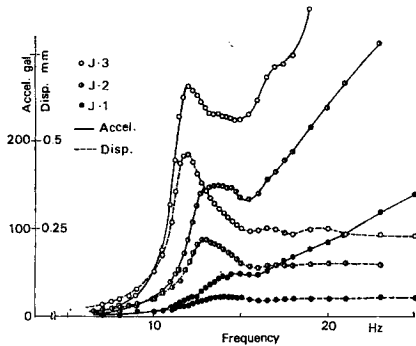


Fig. 9 Frequency response curves, model II (acceleration  $A_1$  and displacement reduced from accel.  $A_1$ ).

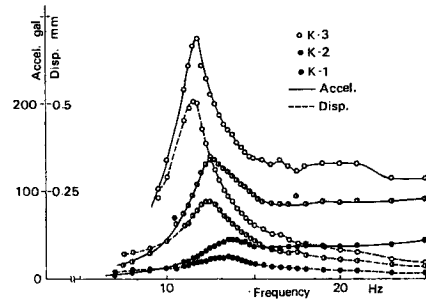


Fig. 10 Frequency response curves, model II (acceleration  $A_1$  and displacement reduced from accel.  $A_1$ ).

実験の概要のところで示したように、円形および正方形の両ケーソンはほぼ同一の地盤中に設置されており、しかも円形ケーソンの実験 J-1, 2, 3 は正方形ケーソンの実験 B, D, F と同じ起振力パラメータによる結果であるので、これらの対応する実験結果を比較すれば、円形ケーソンと正方形ケーソンの断面形状の相違による振動特性の差異を検討することができる。まず両ケーソンの共振振動数については、**Table 3** によるとそれほど大きな差異はなく、正方形ケーソンの方が若干小さい程度である。一方共振振幅については、正方形ケーソンの方が小さくいくぶん揺れにくいようである。この結果から判断する限りでは、正方形ケーソンの方が少し大きい減衰力が働いているようであるが、これらは特に大きな差とは考えられず、結局円形断面ケーソンと正方形断面ケーソンの振動特性は、この実験のような条件下ではほとんど同じであるといえよう。この点に関しては、さらに後節で考察を加える。

**Fig. 11** は各実験における加速度共振振幅（最大振幅）と共振時の起振力の関係を示したものである。同図によれば、円形ケーソンは、実験 J-2 の共振点付近は原因不明の特異な形をしていたのでこれを除けば一つの曲線に乗っておりいわゆる軟化型の非線形振動の傾向がみられる。しかし共振振幅は地盤のばね係数、

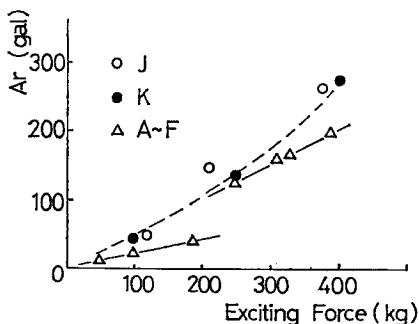


Fig. 11 Relations of exciting force and resonant amplitude of accel.  $A_1$ , model I and model II.

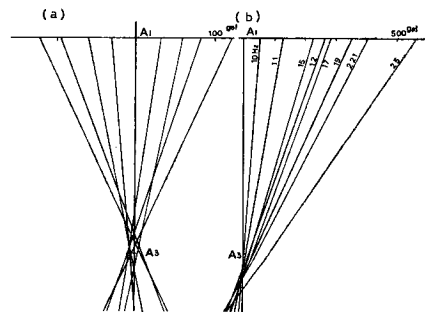


Fig. 12 Mode of vibration drawn from accel.  $A_1$  and  $A_3$ , model II.  
(a) Measured mode, J-3, 11 Hz  
(b) Modified mode, J-3

減衰定数とも関係するので、この点に関しては後で若干の検討を行なう。他方正方形ケーソンの場合は同図にみるように直線関係にあるが、起振力が小さい部分 (実験 A, B, C) と大きい部分 (実験 D, E, F) で直線のこう配が異なっている。正方形ケーソンのこの相違は、ちょうどこの間に激しい降雨があったので、その影響で地盤の剛性が変化したものであろうと推察される。この図からは結局円形ケーソンの方が若干振動しやすいといえよう。

### 3.2 模型の振動モード

円形ケーソン模型の振動モードの代表例を Fig. 12 (a) に示した。同図は実験 J-3 による加速度記録  $A_1$ ,  $A_8$  からケーソンを剛体として、それらの同時刻の値を読みとり、所定の位置にプロットして求めたものである。同図より、ケーソン模型の回転中心が 1 周期の間に上下に移動していることから、模型は回転と並進を含む 2 自由度振動系の運動をしているものと解される。さらに模型の回転角がほとんど 0 に近づいても並進成分が見られるところから、回転振動と並進振動の間には位相差のあること、したがって両振動に対する減衰性状が異なるものと推測される。

一方 Fig. 12 (b) は、ケーソン模型上下の加速度記録  $A_1$ ,  $A_8$  の間には位相差がないものとして描いた図である。この図に関する説明は後節で行なう。

### 3.3 周辺地盤と近接模型の共振曲線

2.1 で述べたように、本実験ではそれぞれのケーソンを加振したときの周辺地盤の振動速度を計測したが、特に円形ケーソンを加振したときには、周辺地盤ばかりでなく加振していない正方形ケーソン模型の振動

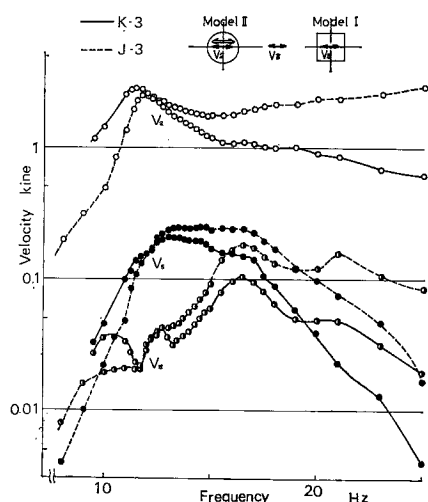


Fig. 13 Frequency response curves of the model I ( $V_s$ ), Surface fill ( $V_8$ ) and excited model II ( $V_2$ ), vibrational velocity.

動をも計測した。この場合加振している円形ケーソンを振動源として、両ケーソンは互いに関連しあいながら振動することになる。この結果を表わしたのが Fig. 13 である。この図には実験 J-3 および K-3 の結果より  $V_2$  (加振されている円形ケーソン頂版上の加振方向振動速度),  $V_s$  (正方形ケーソン頂版上の加振方向の振動速度) および  $V_8$  (両ケーソンの中間点における地表面上の同方向振動速度) の共振曲線が示されている。同図から読み取った振動速度の共振振動数を Table 4 に一括して示した。

同図によると加振されている円形ケーソンの振動速度  $V_2$  は Fig. 9 および Fig. 10 に示したと同様に 12 Hz 付近で共振している。15~20 Hz では曲線は少し乱れているが、これは後述する地盤の影響によるものであろう。一方円形ケーソンにより加振された地表面上の振動速度  $V_8$  は、円形ケーソンが約 12 Hz で共振しているにもかかわらず、その影響はこの図ではほとんど現われないで約 16.5 Hz にピークを持っており、これが地盤の同方向成分の共振点であると考えられる。しかもその共振振幅は、加振されている円形ケーソンの速度に比べてかなり小さいことがわかる。

さらに、この地盤の速度振幅は、加振源である円形ケーソンからの距離とともに小さくなるものであるから、正方形ケーソン付近の地盤の振動はさらに小さくなっていく。

次に起振機で直接に加振されていない正方形ケーソンは、周辺地盤の振動を加振源としており、その速度共振曲線  $V_s$  は、地盤の共振曲線  $V_8$  との関連で検討されるべきものである。このような観点からすれば、Fig. 13 において、正方形ケーソンの振動速度  $V_s$  と地盤の振動速度  $V_8$  の比が 13 Hz 付近で最大となっていることから、これを正方形ケーソンの共振振動数とみなすことができよう。この値は、正方形ケーソン

Table 4 Resonant Frequency (Hz) of the Models and the Surface Layer

		J-3	K-3
Model II	$V_8$	12.0	11.5
Soil Layer	$V_8$	16.5	16.5
Model I	$V_8$	13.4	13.0

を直接に加振して得られた結果（この場合は加振力が小さいから、Table 3 の実験Aと比較）とよく対応している。このようにいわゆる起振機実験で得られる振動特性は、たとえば地震時のように地盤を通して揺られる場合の振動特性とかなりよく一致する可能性のあることを示すもので、起振機実験の有用性の一つの論拠になるものといえよう。しかしながら正方形ケーソンは、これを取りまく地盤の振動性状の影響を強く受け、地盤の共振点付近までその振動速度  $V_8$  の振幅はほとんど低下していない。

以上の結果より、本実験のような場合は、地盤は局部的な外乱に対しては、その固有振動数以外の振動数時にはその影響をほとんど受けないのに対し、模型は地盤ごと加振されるので、振動数成分に関係なく地盤の振動振幅の影響を強く受けるといえよう。

### 3.4 振動土圧の共振曲線および振動数特性

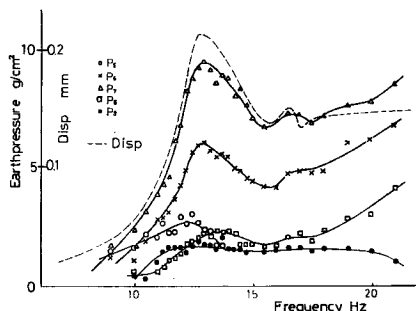


Fig. 14 Frequency response curves, model II (dynamic earthpressure and displacement).

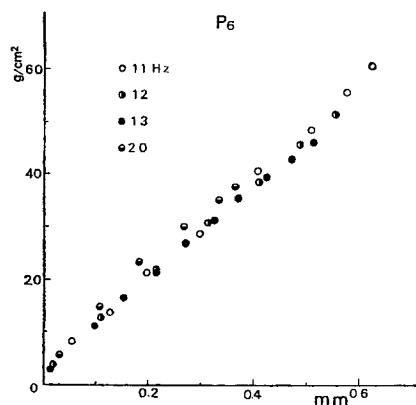


Fig. 15 Relations of dynamic earthpressure and displacement, model II.

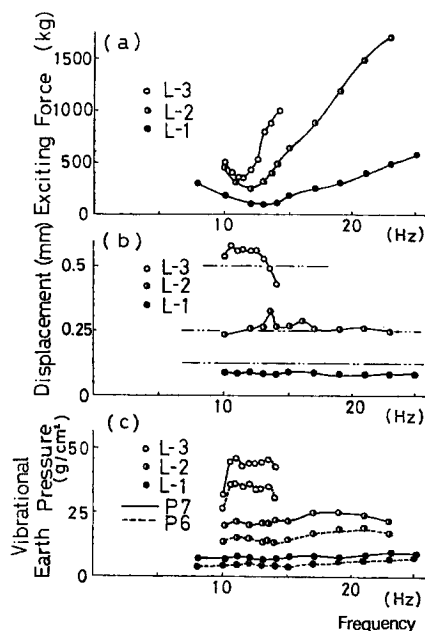


Fig. 16 Frequency characteristics of dynamic earthpressure, model II.

円形ケーソンの外壁面に取り付けられた小型土圧計による振動土圧  $P_6 \sim P_9$  の共振曲線を Fig. 14 に示し、変位の共振曲線をもあわせ示した。この図からまずわかることは、計測された振動土圧が土圧計の容量に比べてかなり小さく、この点で精度に若干の問題はあるが  $P_6, P_7$  のようにケーソン長さ方向の中央部分における記録は比較的安定しており、しかもケーソンの変位の動向とかなりよく類似していることが認められる。

Fig. 15 は過渡的正弦波加振実験から得られた振動土圧  $P_6, P_7$  とケーソン変位との関係を示したもので、加振振動数をパラメータとしている。したがってこの図から振動土圧（ケーソンに働く水平方向反力）の非線形性を検討することができる。同図によると、プロットした点はかなりばらついているが、この程度のケーソンの変位レベルでは、振動数によって軟化型の曲線のものもあるが、おおむね直線比例的な関係にあるようである。またその振動数による特性は明らかでなく、この範囲の振動数ではそれほど変動していないようである。

一般にケーソン基礎をモデル表示する場合、そのばね係数は振動数に対して一定値とすることが多いが、5. で述べるような理由によりこれが常に妥当なものであるとは限らない。そこでこの点を実験的に直接求めようとして実施したのが、応答変位一定の加振実験 L-1, 2, 3 である。この実験の結果を Fig. 16 に示す。同図 (c) の縦軸は振動土圧であるが、ここでは応答変位を一定に制御しているのので、各加振振動数においてケーソンの振動モードが大きく変動しないものとするれば、そのままこれは地盤のばね係数に比例することになる。また同図で実験 L-1 から 2, 3 と変るにつれて実験を実施した加振振動数範囲が狭くなっているのは、起振機の容量が不足で、図に示した振動数以外の振動数では目標値まで変位を増すことができなかったものである。

同図 (a) は、ケーソン模型を目標変位で振動させるに要した起振力を各加振振動数に対して表わしたもので、この図から、各ケースにおいて起振力が最小値になる振動数がいわゆる共振振動数であるので、実験が可能であった振動数領域は小さいものもあるが、いずれもケーソン模型の共振点を含んでいたことが了解できる。同図 (b) は目標変位と実際に得られた変位を示したもので、変位制御の精度を検討するための図である。これによると L-3 での変位が少し目標値より大きいが、ほぼ一定に近く全体的にみて比較的良好な変位制御が行なわれていたといえよう。最後に同図 (e) はケーソン外壁面に働く振動土圧のうち、比較的安定した  $P_6, P_7$  を図示したものである。この図によると、振動土圧  $P_6, P_7$  は加振振動数に対してほとんど一様な結果となっている。

一方別に行なった、ケーソン模型の実験結果では、模型の共振振動数が 12Hz 程度のとき、振動土圧は 8Hz から実験を行なった最大の加振振動数の 20Hz 程度まで徐々にではあるが低下するという結果が得られている<sup>7)</sup>。さらに直接基礎模型の実験結果でも、ほぼ同様な結果が得られ、明らかに振動数特性があり、模型の共振点を越え地盤の共振点までは一様に低下し、以後はほぼ一定であるという結果も得られている<sup>8)</sup>。

このように地盤のばね係数の振動数特性は、ケーソン基礎の振動特性に重要な影響を持つものであるので、さらに多くの実験的研究が必要である。

#### 4. 線形 1 自由度系としての解析

本節では、構造物基礎の模型振動実験において、測定結果の解析に便宜的によく用いられる線形 1 自由度系の理論により、前節 3. で示した本実験の結果をさらに整理して考察を進める。いうまでもなく、線形 1 自由度系の理論は、理論的取り扱いが簡潔であり、また質量、ばね、減衰という振動現象の基本的な力学機構をそれぞれ単一の線形要素で代表させたものである。したがってそれらの物理的意味も明快であり、少なくとも 1 次近似としては、多くの土木構造物の振動を説明しうるところから、これまで多くの構造物の実物および模型振動実験の理論的根拠として用いられてきた。本節でも、このような意味から、本実験の結果を線形 1 自由度ロッキング振動の理論を中心として考察するが、必ずしも線形 1 自由度系の理論が現象の細部にまで適用しうることを主張しようとするものではない。むしろここでは逆に、地盤中に根入れされたケー

ソン基礎の振動では、線形 1 自由度系のみで現象をすべて説明することには難点があり、その適否ないしは適用範囲を論ずる必要があるとの見地から本実験の結果を用いて検討を行なおうとするものである。

#### 4.1 振動モデルおよび振動数応答

前述のように、Fig. 12 (a) の振動モード図から、本実験のケーソン模型の並進運動と回転運動には位相差があり、それぞれの減衰特性が異なるものと考えられるが、いま 1 次近似的に両者の位相差を無視する。すなわち円形ケーソンの加速度計  $A_1$ ,  $A_3$  の記録の時間軸をずらして、両者の位相を一致させて各振動時における最大振幅を用いて振動モード図を描いた例が Fig. 12 (b) であった。正方形ケーソン模型の上下加速度の位相を一致させて、1 周期にわたる回転中心を求めてみると、これは 10~20cm の変動が認められると報告されている<sup>9)</sup> が、同図からわかるように最大振幅より求めた回転中心は振動数によっても変動している。ケーソン模型が 1 自由度ロッキング振動を行なっていると考えるときには、この Fig. 12 (b) から回転中心を求めることにした。回転中心 O の模型の底面からの距離を  $d_0$  とすると、O 点まわりの慣性モーメント  $J_0$  は次式で与えられる。

$$J_0 = J_G + Md_0^2 \quad \dots\dots\dots (4)$$

ただし、 $d_0 = d_G - d_G$ 。ここに、 $J_G$ ,  $M$ ,  $d_G$  は、それぞれ模型の重心まわりの慣性モーメント、模型の質量、模型底面から重心までの高さで、いずれも Table 1 にそれらの数値が示されている。このようにして求めた  $d_0$ ,  $J_0$  を Table 5 に示した。かくして得られる模型の線形 1 自由度回転振動モデルは周知の Fig. 17 で

Table 5 Height  $d_0$  of Rocking center (O), Moment of Inertia  $J_0$  about O and Resonant Rocking Amplitude.

	$d_0(\text{m})$	$J_0(\text{t}\cdot\text{m}\cdot\text{sec}^2)$	$\theta_{rm}$		$d_0(\text{m})$	$J_0(\text{t}\cdot\text{m}\cdot\text{sec}^2)$	$\theta_{rm}$
A	0.25	6.79	$0.42 \times 10^{-5}$	J-1	0.46	6.28	$1.97 \times 10^{-5}$
B	0.23	6.89	0.84	J-2	0.45	6.34	4.67
C	0.26	6.74	1.72	J-3	0.48	6.20	15.5
D	0.31	6.49	6.01	K-1	0.43	6.40	2.05
E	0.37	6.20	8.70	K-2	0.45	6.35	7.24
	(0.30)	(6.54)	(8.30)				
F	0.33	6.39	10.7	K-3	0.44	6.37	16.6

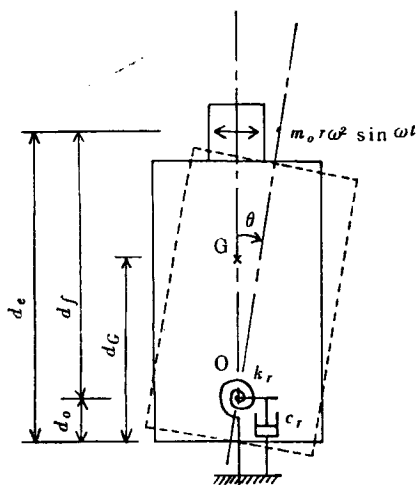


Fig. 17 One-degree-of-freedom vibration model of a caisson.

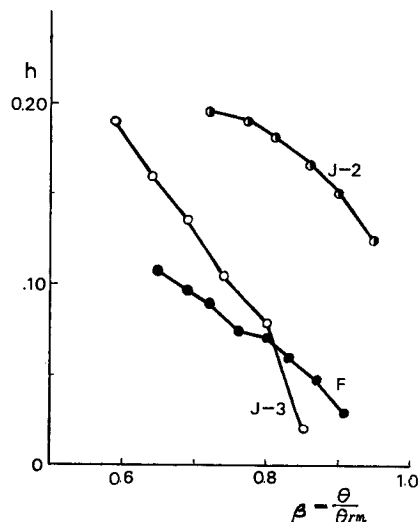


Fig. 18 Damping factor calculated from eq. (10).

表示され、これを起振機で加振した場合の運動方程式は周知のとおり次式で表わされる。

$$J\ddot{\theta} + Cr\dot{\theta} + k_r\theta = Fd_f e^{i\omega t} \dots\dots\dots (5)$$

ここに、  $J$ : 0 点まわりの慣性モーメント

$Cr$ : 0 点まわりの回転粘性係数

$k_r$ : 0 点まわりの回転ばね係数

$F$ : 起振力の振幅 ( $\alpha$  一定実験では  $m_0 r \omega^2$ )

$m_0 r$ : 起振機の偏心質量モーメント (Table 2)

$\omega$ : 起振円振動数

$d_f = d_e - d_0$ : 0 点から起振力作用線までの距離,  $d_e$  は模型底面から起振力作用線までの高さ (Table 1)

$\theta$ : 0 点まわりの回転角

これらのうち、 $J$  は本来式 (4) の  $J_0$  に等しくとるべきものであるが、後述するように、実験結果を線形 1 自由度系で説明しようとする、場合によっては  $J_0$  より大きな値を  $J$  に与える必要も生ずる。そのため、式 (5) では振動系として等価な慣性項という意味で  $J$  なる一般表示を用いた。さらに振動系の減衰定数を  $h$ , 固有円振動数を  $\omega_0$  とすれば

$$\frac{Cr}{J} = 2h\omega_0, \quad \frac{k_r}{J} = \omega_0^2$$

であるから、式 (5) は

$$\ddot{\theta} + 2h\omega_0\dot{\theta} + \omega_0^2\theta = \frac{F \cdot d_f}{J} e^{i\omega t} \dots\dots\dots (6)$$

となる。強制振動実験は、一定時間起振機の回転を持続させて行なうから、式 (6) の解は、強制振動解 (特解, 定常解) のみを考えて、

$$\left. \begin{aligned} \theta &= \frac{F \cdot d_f}{J \cdot \omega^2} \cdot \frac{(\omega/\omega_0)^2}{\sqrt{\{1 - (\omega/\omega_0)^2\}^2 + 4h^2(\omega/\omega_0)^2}} e^{i(\omega t - \varphi)} \\ \varphi &= \tan^{-1} \frac{2h(\omega/\omega_0)}{1 - (\omega/\omega_0)^2} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (7)$$

ただし

共振振動数  $\omega_r$  は式 (7) の第 1 式の右辺を  $\omega$  で微分したものを 0 とおくことにより次式で与えられる。

$$\omega_r = \frac{\omega_0}{\sqrt{1 - 2h^2}} \dots\dots\dots (8)$$

次に共振時の回転角  $\theta$  の最大値を  $\theta_{rm}$  とすると、 $h$  が小さい場合、式 (8) より  $\omega_r \cong \omega_0$  であるので式 (7) より

$$\theta_{rm} \cong \frac{F \cdot d_f}{J \cdot \omega^2} \cdot \frac{1}{2h} \dots\dots\dots (9)$$

## 4.2 減衰定数

一般に振動系の減衰が小さいほど共振ピークが鋭くなることを利用して、共振曲線から減衰定数を求めることが行なわれるが、ここでははじめに、最もよく用いられる  $1/\sqrt{2}$  法<sup>10)</sup> によって、本実験の模型の減衰定数  $h$  を算出した。この方法により算出された減衰定数の値を Table 6 に示した。ただし、これらの値はいずれも Fig. 9, 10 等の、模型頂部の換算変位共振曲線から求めたものである。同表によると、 $h$  の値は正方形ケーソンでは 8~12%, 円形ケーソンでは 8~14% となっている。しかし傾向的には、外力レベルが大きくなるにつれて、すなわち共振振幅が大きくなるにつれて  $h$  は小さくなり、またケーソンの断面形状が円形の場合が正方形より若干大きい。これは前節で述べたところの共振曲線から観察されたこととは逆である。この場合両者とも同じ求め方をしているので、ここで用いたいわる  $1/\sqrt{2}$  法で  $h$  を正しく推定することが、いかなる時にも可能なのではなく、適用条件を考えねばならないことを示すものである。

Table 6 Damping Factor reduced from  $1/\sqrt{2}$  Method.

	$h(\%)$		$h(\%)$
A	11.0	J-1	—
B	12.0	J-2	11.4
C	10.3	J-3	9.1
D	8.9	K-1	13.7
E	9.0	K-2	11.4
	(8.3)		
F	8.6	K-3	8.3

Table 7 Damping Factor calculated from eq. (11).

	$h(\%)$		$h(\%)$
A	28.9	J-1	45.8
B	25.0	J-2	33.8
C	29.4	J-3	24.2
D	24.0	K-1	45.4
E	23.8	K-2	33.0
	(24.1)		
F	22.7	K-3	20.6

一方、 $\alpha$ 一定実験の場合  $m_0 r d_f / J_0 < \theta < \theta_{rm}$  なる範囲の任意の  $\theta$  に対して、式(7)を満足する  $\omega$  を  $\omega_s$  とすると、次の関係が導かれる<sup>10)</sup>。

$$\frac{(\omega_1^2 + \omega_s^2) \omega_0^2}{2\omega_1^2 \omega_s^2} = 1 - 2h^2 \quad \dots\dots\dots (10)$$

この関係は  $\theta$  のみでなく、ケーソンの変位  $x$  についても成立するものであるから、実験 F, J-2, J-3 の換算変位共振曲線より種々の変位  $x$  の値に対して式(10)から  $h$  を算出した結果が Fig. 18 である。実験より得られた共振曲線が式(7)から得られる理論的共振曲線と相似であれば、 $h$  は  $x$  の値に無関係に一定値をとるはずであるが、同図によれば、 $h$  の実験値は  $x$  の増大とともに減少する傾向にある。またこの結果も円形ケーソンの  $h$  の方が大きいことを示している。

次に式(7)で  $\omega \rightarrow \infty$  として得られる  $\theta$  の値を  $\theta_s$  とすると、同式と式(9)とから

$$h \cong \frac{\theta_s}{2\theta_{rm}} \quad \dots\dots\dots (11)$$

をうる。模型頂部の換算変位共振曲線について、式(11)から  $h$  を算出した結果が Table 7 である。ただし起振力一定の実験 K については、式(7)と同様な形で与えられる加速度共振曲線より求めた。同表の値は、他の方法で求めたいずれの場合よりかなり大きい。しかし外力レベルが大きくなると  $h$  が小さくなること、円形断面の方が  $h$  が大きいという傾向は他の方法で求めた結果と同様である。

以上主に共振曲線より減衰定数  $h$  を求める 3 通りの方法を示し、実例についてそれぞれの方法で  $h$  を求めた。この結果によれば、 $h$  の求め方によって値が大幅に異なることのほかに、外力レベルの大きさすなわち変位振幅の大きさ、共振曲線を切る位置すなわち振動数の違いで、かなり異なった値が得られた。もし対象とする振動系が定数係数の線形 1 自由度振動系で完全に表示できるものであれば、同一の値を示すはずのものであるから実験を行なった両ケーソンは、そのような簡単な運動方程式で表示できないことを示すものであろう。すなわち運動方程式が式(5)で表わせる線形 1 自由度の振動系では、速度比例の粘性減衰のみしか考慮していないのに対し、実物ケーソンでは、粘性減衰のほかにクーロン減衰、履歴減衰あるいは波動の逸散により生ずる逸散減衰等を含みそれが総合された形で、振動現象が生じているものと考えられるので、

共振曲線から上記の方法で求めた減衰定数は特定の条件のもとでの等価的な値にすぎないといえよう。したがって、上に述べたような方法、たとえば  $1/\sqrt{2}$  法で求められた結果は、減衰量の相対的な大小しか表わし得ないもので、その絶対値としての意味（たとえば後述する仮想質量を評価するときに必要な）がない場合もあることを注意しなければならない。

一般に減衰を評価する方法として、材料学的（物性論的）な方法と、ここで行なったような現象論的な方法が考えられるが、現在のところ前者の方法をケーソン基礎の減衰というような境界値問題、あるいは逸散減衰という波動問題に適用するということは不可能であるので、ここで行なったような後者の方法についてさらに多くのデータを集積すると同時に十分な検討を必要とする。

#### 4.3 固有振動数

式(7)により描かれる共振曲線に対して原点を通る接線を引いたとき、その接点に対応する円振動数  $\omega_0$  が固有振動数に等しいことがわかっている<sup>10)</sup>。この手法を Fig. 9, 10 に適用して求めた固有振動数  $f_0$  を Table 8 に示した。

Table 8 Natural Frequency. (Hz)

	by Resonant Curve	by Phase Lag Curve		by Resonant Curve	by Phase Lag Curve
A	13.3	13.2	J-1	14.0	—
B	12.8	13.0	J-2	12.7	13.2
C	12.6	12.8	J-3	11.8	11.8
D	12.2	12.2	K-1	13.1	—
E	12.0	12.0	K-2	12.2	13.1
	(12.0)	(11.8)			
F	11.6	11.6	K-3	11.6	11.5

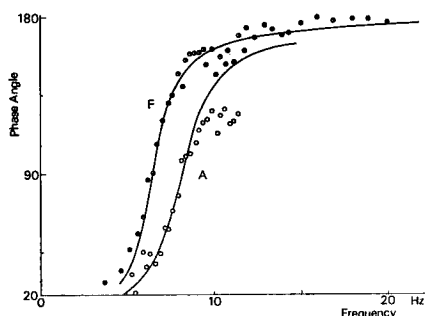


Fig. 19 Frequency response curves of phase lag, model I (theoretical and measured).

次に、線形振動系では加振力と応答との位相差は、固有振動数に対して正確に  $90^\circ$  になることから、Fig. 7 および 8 の位相図により  $f_0$  を求めた結果を Table 8 にあわせ示した。同表に示したこれらの値はかなりよく一致しており、またいずれも Table 3 の共振振動数  $f_{ra}$  より若干小さな値となって、偏心モーメント一定の起振機実験の特徴を表わしている。

このようにして求めた  $f_0$  の値と Table 6 の  $h$  の値を式(7)に用いて得られた位相差  $\phi$  の理論曲線の一例を Fig. 19 に示した。固有振動数付近では、当然のことながら、理論値と計算値とはよく一致しているが、高振動数域では両者の差とともに実験値のばらつきが注目される。その原因としては、前述の線形1自由度系によるモデル化の問題

点のほかに、高い振動数域では地盤の共振点を越えるため、波動伝播による逸散減衰が増大し、さらに地盤の不均質性によって伝播する波動が散乱することが応答の位相に影響を及ぼすことが考えられよう。

#### 4.4 仮想慣性モーメントおよび共振時のばね係数

仮想質量の求め方はいくつかあるが、ここでは次に述べる方法によって、実例よりこれを求め、若干の検討を行なう。

模型躯体の回転中心まわりの慣性モーメント  $J$  は  $J_0$  として与えられているが、式(9)によれば、減衰定

数  $h$  および共振振幅  $\theta_{rm}$  を用いて  $J$  を逆算することができる。その結果を  $J_m$  とすれば

$$J_m \cong \frac{m_0 r d_f}{2h\theta_{rm}} \dots\dots\dots (12)$$

式(12)に本実験の結果を代入して  $J_m$  を算出した結果を示したのが **Table 9** である。 $h$  の値としては、ここでは **Table 6** を用いた。同表の  $J_m - J_0$  は、線形1自由度系で実験結果を説明するために模型に付加すべきと考えられる慣性モーメントで、いわゆる仮想質量に相当するものであり、ここではこれを仮想慣性モーメントと呼ぶことにする。

次に、共振点付近のばね係数は、

$$k_r = \omega_0^2 J_m \cong \frac{2\pi^2 f_0^2 m_0 r d_f}{h\theta_{rm}} \dots\dots\dots (13)$$

から算出される。その結果をも **Table 9** に示した。

Table 9 Virtual Mass and Spring Coefficient at Resonant Frequency.

	$(J_m - J_0)/J_0$	$k_r(\text{ton}\cdot\text{m})$		$(J_m - J_0)/J_0$	$k_r(\text{ton}\cdot\text{m})$
A	4.3	$2.4 \times 10^5$	J-1	—	—
B	3.7	2.2	J-2	1.1	$0.9 \times 10^5$
C	4.5	2.4	J-3	0.1	0.4
D	1.8	1.1	K-1	—	—
E	1.6	0.9	K-2	0.2	0.5
	(1.8)	(1.0)			
F	1.7	0.9	K-3	0.5	0.5

同表をみれば明らかとなり、上記の方法で求めた仮想慣性モーメントは、共振点のみに限っても実験ごとに異なり1.0~5.0ぐらいいなって、これから一つの値を定めることは非常にむずかしい。式(13)によっても明らかのように、仮想慣性モーメントは減衰定数に逆比例して求められることになるので、減衰定数の与え方により大幅に異なることが容易に予想される。実際に減衰定数として **Table 7** の値を用いて同様な計算をすれば、仮想質量はほとんど考慮しなくてもよいという結果となることがわかる。

## 5. 相互作用に関する一考察

以上の実験の結果より、ケーソン模型は並進を含む回転振動を行なっていることが認められたが、本実験の範囲では近似的には1自由度の振動系で表示することが可能であると考えて、前節でケーソンを線形1自由度振動系で抽象して若干の考察を加えた。しかし現象のすべてをこれで説明することは不可能であることがわかった。ケーソン基礎の運動を式(5)で表わすということは、ばね係数、減衰定数を定数とみなしていることになり、しかも地盤を質量をもたないばねと考えていることと同等である。

ところが地盤の質量を考慮すれば、地盤は固有の振動数特性を持つことは明らかであるので、ケーソン基礎に働く反力も振動数の関数となるであろうことは容易に予想できる。したがっていま線形振動に限れば、地盤のばね係数は振動数の関数と考えねばならないことがわかる。さらに減衰についてもすでに述べたように、半無限地盤中のケーソン基礎の運動を考えると、当然振動数の関数と考えられる逸散減衰が生ずることは周知のところである。

以上、ここでは1自由度振動系で表示できるケーソン基礎が次式のように、振動数の関数であるばね係数  $k(\omega)$  と減衰係数  $C(\omega)$  を持った、いわゆる変数係数の運動方程式で表わされるものと考えて若干の考察を行なう。このような考えは土岐によっても明らかにされているが<sup>(11), (12)</sup>、以下著者の一人吉原による結果を記述する。

$$J_0 \ddot{\theta} + C(\omega) \dot{\theta} + k(\omega) \theta = F d_f e^{i\omega t} \dots\dots\dots (14)$$

ここに,  $J_0$ : ケーソン基礎の回転中心まわりの慣性モーメント,  $\theta$ : 応答回転角

振動時には, 個々に評価することができないような様々の作用, 効果が複合されて応答が生じ, 具体的には応答振幅と外力に対する位相遅れとして現象面に現われるわけであるから, 実験により加振振動数が  $\omega$  のときの振幅  $\theta(\omega)$  と位相遅れ  $\varphi(\omega)$  が測定でき既知量となるので, 結局この振動系のばね係数  $k(\omega)$ , 減衰定数  $h(\omega)$  は次のように逆算できる。

式(14)の定常解を

$$\theta = \Theta(\omega) e^{i(\omega t - \varphi(\omega))} \quad \dots\dots\dots (15)$$

と仮定して, 同式に代入後簡単な演算を行なえば

$$\left. \begin{aligned} k(\omega) &= \omega^2 J_0 + F \cdot d_f \frac{\cos \varphi(\omega)}{\Theta(\omega)} \\ C(\omega) &= \frac{F}{\omega} \cdot d_f \frac{\sin \varphi(\omega)}{\Theta(\omega)} \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (16)$$

によって, ばね係数, 減衰係数が求められるので, 減衰定数  $h(\omega)$  はこれらを用いて

$$h(\omega) = \frac{1}{2\sqrt{J_0}} \frac{C(\omega)}{\sqrt{k(\omega)}} \quad \dots\dots\dots (17)$$

となる。

以下地盤の質量は 0 であると考えて,  $k(\omega)$ ,  $h(\omega)$  を共振実験の結果より求めることにした。

まず上記のような方法で求めたばね係数  $k(\omega)$  の例を Fig. 20 (a), (b), (c) に示す。同図 (a) は正方形ケーソン, (c) は円形ケーソン, (b) は別の機会に行なった正方形ケーソンの加振実験の結果より求めたものである。これらの図から, 一定の傾向を見い出すことはできないが, ばね係数は地盤の共振振動数付近まで

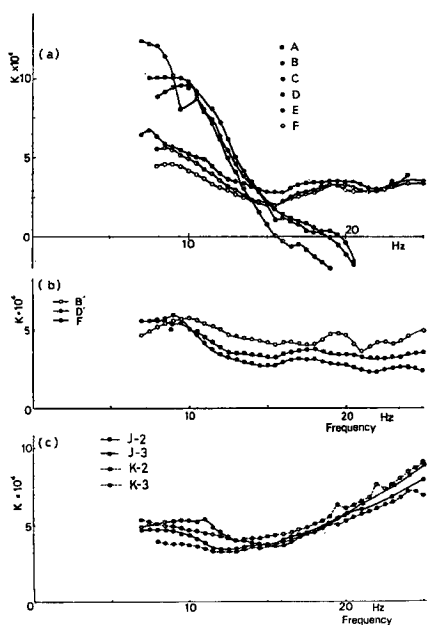


Fig. 20 Spring coefficients calculated from eq. (16).

- (a) model I
- (b) model I
- (c) model II

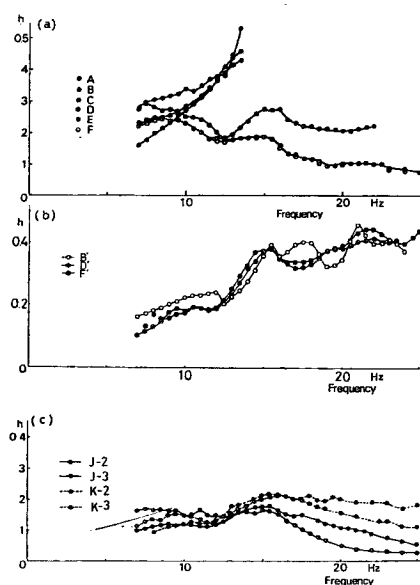


Fig. 21 Damping factors calculated from eq. (17).

- (a) model I
- (b) model I
- (c) model II

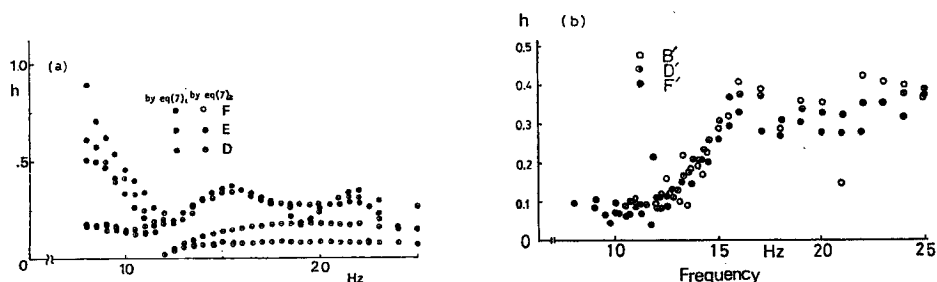


Fig. 22 Damping factors calculated from eq. (7).

(a) model I

(b) model I, calculated from eq. (7)2

は、いずれも振動数の増加に対して一様に減少し、これを越えたところではさらに減少し負の値となるもの、ほぼ一樣なもの、逆に増加するものと異なった傾向を示している。これがそれぞれの模型の実現象を忠実に反映しているものか、特定の実験における計測上の誤差などによるものであるかはこの段階では断定できない。しかしながらそれぞれのケーソン模型の共振点を越えて地盤の共振点に至るまでの傾向は波動論による複素復元力の実数項（地盤のケーソンに対する反力を表わす）の理論的傾向とはよく一致している<sup>2), 3)</sup>。

一方減衰定数  $h(\omega)$  を、正方形ケーソンの結果より求めたものを Fig. 21 (a) に、円形ケーソンの結果を同図(c) に、別の機会に行なった正方形ケーソンの結果を同図 (b) に図示した。これらの図によると、減衰定数  $h(\omega)$  の振動数特性は、ばね係数  $k(\omega)$  と同じく、振動数の増加に対して、急激に増加するものから徐々にではあるが低下するものまであって一定の傾向を見出すことはできない。しかしながら、 $h(\omega)$  の値は、たとえばケーソン模型の共振点付近では約 0.2~0.3 程度であり、4. で述べたように、 $1/\sqrt{2}$  法で求めた値 (Table 6) の 2~3 倍の大きさであり、むしろ Table 7 の結果に近い。

一方式(7)で与えられるいわゆる線形 1 自由度振動系の共振曲線および位相遅れを表わす式をそれぞれ独立に用いて、実験より得られた振幅あるいは位相遅れと、固有振動数を用いて正方形ケーソンの実験 D, E, F の結果より  $h$  を加振振動数の関数として求めた例を Fig. 22 (a) に示す。また同図 (b) には別の機会に行なった同一ケーソンの位相曲線より求めた結果を示した。同図 (a) によると、ケーソン模型の共振振動数より大きい振動数の範囲では減衰定数はほぼ一定の値をとり、しかも共振曲線および位相曲線を用いて求めた Fig. 21 (a) の D, E, F の動向と非常によく類似している。また Fig. 22 (b) によれば、地盤の共振点付近までは  $h$  が急激に大きくなり、以後ほとんど一様となっている。しかしこれは同図 (a) に示した位相曲線より求めた結果とは異なっている。結局この場合は共振曲線あるいは位相曲線をそれぞれ単独に用いているので、それらの計測精度が結果に直接影響して、このように異なった結果になるのであろう。

以上本節において、ケーソン模型の共振実験の結果を用いて、ケーソン模型と地盤の相互作用に関する一つの新しい解析の試みの結果を示し、若干の考察を加えた。すでに述べたように、これらの結果から必ずしも一定の傾向を見出すことができず、今後研究すべき点の多いことが示されているが、一部波動論による解析結果とよい対応を示すものも見られた。

なお本節で述べたと同様の解析から、土岐<sup>11)</sup>はさらに地盤の仮想質量に対して、あるいは弾性波動論による解析結果の耐震設計への適用性に対して検討を行なっている。また著者の一人亀田は、ケーソン基礎の動的な地盤反力を、振動論の助けを借りないで、変位による履歴復元力と振動速度による減衰力に直接分離する手法を考察し、いくつかの問題点を指摘しつつ動的ばね係数や減衰定数が振動数の関数となることを述べている<sup>9)</sup>。

また地盤のばね係数および減衰定数の振動数特性を究明することは、多くの議論のある地盤の仮想質量の問題に対して重要な情報を提供するとともに、ケーソン基礎の減衰機構を現象論的に解明する上でも重要な手掛りになり得るものと考えられる。

以上の観点から、本節で用いた手法による実験結果の解析の意義が認められるであろうが、ケーソン基礎の振動を線形1自由度に限っているという問題点のほかに適用例も少ないので、これらの問題点を克服しながらさらに多くの研究資料を集積しなければならない。

## 6. 結 語

本研究においては、正方形断面および円形断面を有する2基の鉄筋コンクリート製ケーソン模型の振動実験を行ない、実験の結果、記録の解析法およびその結果などを論じ、いくつかの新しい知見をうることができた。しかしながら本文中にも述べたように、それらを一般的な結論とするには、今後さらに検討しなければならない事項も少なくない。以下本研究によって得られた成果および今後の課題等を列挙して結語とする。

本研究により得られた成果は次のとおりである。

(1) 本研究におけるケーソン模型の振動は、回転と並進を含む2自由度系の性状を示しており、かつ回転振動と並進振動の間には位相差があつて、両振動の減衰性状が異なることを示している。

(2) しかし本実験の範囲では、模型の振動は1次モードが卓越して現われ、共振曲線および応答の位相遅れ図は、両ケーソン模型とも12~13Hzに固有振動数を有する1自由度振動系の基本的な特徴が現われている。

(3) 模型を取りまく周辺地盤の共振振動数は、模型の固有振動数とは異なる16~17Hz付近にあり、地盤の共振がケーソン模型の振動に影響を与え、結果的には模型の共振曲線に若干の乱れを生ぜしめる原因となっている。

(4) 起振機で加振されている円形ケーソン模型の振動により地盤を通して加振される隣接の正方形ケーソン模型の振動特性は、これを直接加振して得られる振動特性によく対応しているので、いわゆる起振機実験によっても、ケーソン基礎の地震時における振動性状を正しく推定できるといえる。

(5) 加振源である円形ケーソンから地盤、地盤から正方形ケーソンの順に振動エネルギーが伝達される過程において、地盤に対する加振源としての円形ケーソンの共振の影響は小さいのに対し、正方形ケーソンの振動振幅に与える地盤の共振の影響は大きく、このことから地震時にはケーソンのみでなく、地盤の振動特性も重要な要素となることが確かめられた。

(6) 本実験で用いたような同一地盤に根入れられ、しかもほとんど同スケールの円形断面ケーソンと正方形断面ケーソンの振動特性には際立った差は認められないが、若干円形断面ケーソンの方が振動しやすいようである。

(7) 本実験では、地盤は一部非線形領域での振動を行っていたようではあるが、1次近似として、本実験の模型を線形1自由度系でモデル化することは一応可能であると考えられた。しかし実験から得られた共振曲線が線形1自由度系による理論曲線と相似でないために、減衰定数の値がその算法によって非常に異なる。したがってこれによって、共振時の模型の慣性モーメント(仮想質量)やばね係数の値も影響を受けて大きくばらつき、これからそれぞれ、一つの値を定めることはほとんど不可能である。

(8) 本実験では、円形ケーソン模型に小型土圧計を設置して、ケーソン模型に働く振動土圧を計測したが、使用した土圧計の容量が大きく十分な精度が保てなかったようである。したがって一般的結論となりにくい、本実験の範囲では、振動土圧から推定される地盤のばね係数の振動数特性はほとんど一様である。

(9) 本実験の結果を、変数係数の線形1自由度振動系に抽象して解析する方法を示し、具体例でこれを解析した結果では、地盤のばね係数、減衰定数には各実験にわたって一定した傾向を見い出せなかった。しかし一部弾性波動論から誘導される複素ばねの振動数特性と全く同様の傾向を持つものも見られ、減衰定数もいわゆる共振点付近に注目して求めた値よりかなり大きい値が得られた。

(10) 減衰定数に関するこれらの結果は、上記(7)との関連において、仮想質量はたとえ考えるとしてもそれはかなり小さな値になりうることを示唆しており、今後のこの問題の研究に関連して興味ある一資料を提供したものと考えられる。

今後の課題、問題点を述べれば次のとおりである。

(1) 実験地盤として実地盤を用いる場合、地盤条件が変化しないように管理保持することは一般に非常に困難である。したがってこの変化の状態を常に監視するとともにその変化の状態と実験の結果との関連に十分注意しなければならない。

(2) 地盤のばね係数、減衰定数を振動数の関数と考えて、これを共振曲線および位相曲線から求めるためには、計測、整理の精度をさらに向上させねばならない。

(3) さらに上記(2)とも関連して、本実験で一部試みたようにばね係数の振動数特性を精度よく計測すること、計測した結果と上記解析結果の対応関係を検討すること。さらに本研究で行なったような振動論とのアナロジーばかりによらず、実現象に則した解析法をも開発することが必要である。

最後に、本実験は昭和46年春から昭和47年暮に至るまでの間に実施されたもので、実験場所を提供された京都大学防災研究所宇治川水理実験所の当期間にわたる御高配、御援助に深謝する次第である。

さらに当研究を取りまとめるに当たり種々御検討頂いた防災研究所土岐憲三助教授および長期間にわたる実験において献身的な御協力を頂いた当研究室の大学院学生に心からの謝意を表するものである。

なお本研究の一部は文部省科学研究費補助金(総合研究)ならびに本州四国連絡橋公団の委託研究によるものであり、正方形断面ケーソン模型の実験結果については、同公団に対する報告書<sup>9)</sup>にすでに詳しく記載されており、本論文では説明の都合上一部これと重複した部分もあることを付記する。

#### 参 考 文 献

- 1) 金多 潔・後藤尚男・竹村吉高・畑中元弘・山田善一・渡辺清治：土木建築耐震設計施工，朝倉書店，昭和43年10月，pp. 324-329.
- 2) 田治見 宏：深い基礎を有する構造物の地震応答について，日本地震工学シンポジウム(1966)講演集，1966.10，pp. 255-260.
- 3) 後藤尚男・土岐憲三・秋吉 卓：弾性地盤上にある楕円形基礎の振動性状，京都大学防災研究所年報，第11号A，昭和43年10月，pp. 255-274.
- 4) 山田善一・松村 博：有限要素法による基礎—地盤系の振動解析，日本鋼構造協会第3回大会研究集会，マトリックス構造解析論文集，昭和44年5月，pp. 578-586.
- 5) 田村浩一・神谷良陳・西村昭彦：小型井筒の強制振動試験，土木学会第11回地震工学研究発表会，講演概要，1971.7，pp. 103-106.
- 6) 伯野元彦・野尻陽一：ケーソンの動特性に関する一研究，土木学会論文報告集，第107号，1969.10，pp. 9-22.
- 7) 後藤尚男・吉原 進・森田隆三郎・小沢伸一：鋼製小型ケーソン基礎模型の動特性に関する実験，昭和47年度関西支部年次学術講演会，講演概要，昭和47年6月，I-25.
- 8) 弥田和夫：粘土地盤上の正方形底面を有する直接基礎の振動特性について，京都大学修士論文，昭和48年3月.
- 9) 財団法人防災研究協会：基礎体—地盤系の振動，地震応答，耐震設計に関する研究，昭和46年度報告書，昭和47年3月.
- 10) 田治見 宏：建築振動学，コロナ社，昭和40年5月，pp. 56-59.
- 11) 土木学会・本州四国連絡橋耐震研究小委員会，昭和47年度報告書，III，7. 地盤の動的ばね係数について(土岐憲三)，昭和48年3月，pp. 88-94.
- 12) 土岐憲三・山本和義：構造物基礎の振動モデルに関する研究，昭和48年度土木学会関西支部年次学術講演会，講演概要，昭和48年6月，I-57.