

# 8 大型コンプレッサー基礎の

## 強制振動試験とその解析

—東燃石油化学川崎工場における実測—

山 原 浩

### §1. はじめに

最近、海岸の埋立地において、大規模な工場が次々と建設されている。大規模な工場には必ず大型の発電機、あるいはコンプレッサーなどが設置される。こうした基礎の設計には、静力学的な構造設計の他に、動力学的な振動特性を検討しなくてはならない。これを怠ることによって周囲に著しい振動障害を与えたり、甚しい場合には、機械自体が実用に耐えない状態になることがある。

工場の振動騒音による公害防止が叫ばれている今日であっても、こうした振動に関する検討は等閑にされている傾向が強い。あるいは実際に構造設計に携わる諸賢が、不慣れな振動計算を敢えて行なう余裕がないのかもしれない。また基礎の防振設計に関する実用参考書も、大築志夫氏の「防振基礎の設計法」ぐらいしかなく、一般にこの方面の研究が遅れている感が強い。事実この方面の実測資料が乏しいため、設計に当って「振動計算は行なったが、その結果に自信がない」というのが正直な告白でもある。

このような空白を埋める一助として、東燃石油化学川崎工場に立てられた大型コンプレッサー基礎について、強制振動試験を行ない、その結果を検討し、将来の設計に関する一参考資料とした。

### §2. 概 要

#### (1) 地盤条件

同基礎は川崎市大師河原の県営埋立地に立てられたもので、基礎直下の柱状図及び標準貫入試験の結果を図-1に示してある。

杭は同基礎に関して、385φ×12tまたは485φ×9tの鋼杭を5本継ぎとし、全長67mに8本打込んである。振動試験を行なった基礎を中央にして、両隣りに同種同規模のコンプレッサー用基礎があり、同様の地業が施されている。

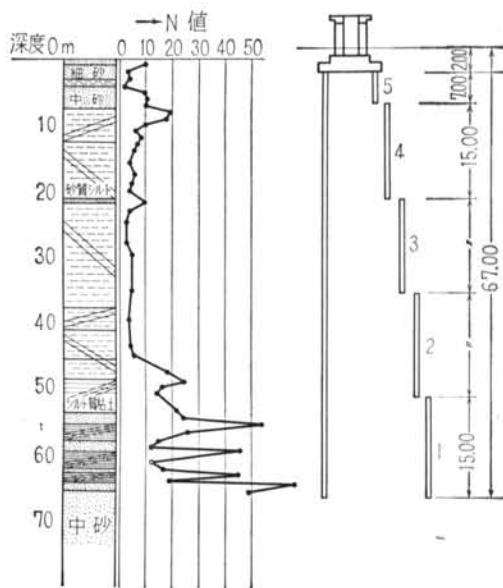


図-1 地質柱状図、N値および杭継手位置図

図-2 は 8 本の鋼杭の平面位置を示したものである。

### (2) コンクリート基礎

コンクリート基礎の概形は 図-3 に示してあるが、底盤は 10.8m×6.1m×1.0m の長方形になっている。高さは底盤より 6.2m で、6 本の柱で上部の梁および機械

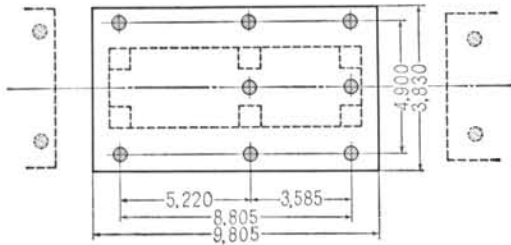
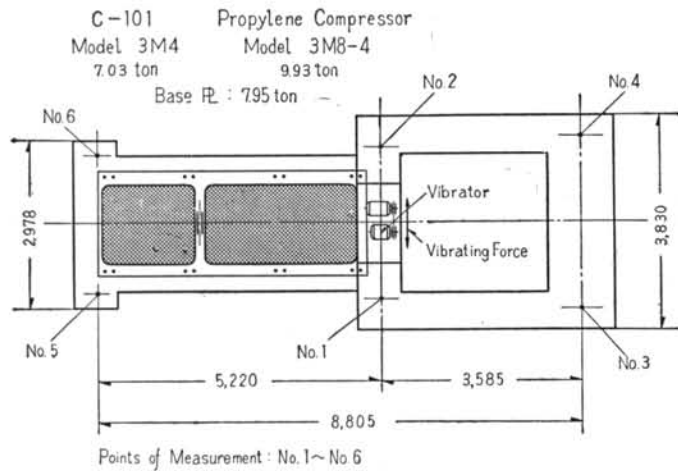


図-2 鋼杭の打込位置



Points of Measurement: No.1~No.6

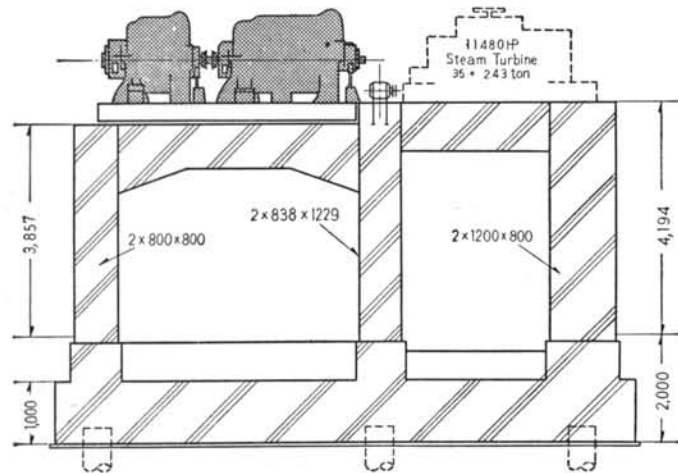


図-3

を支えている恰好になっている。

コンクリート基礎の重量は

上部梁および柱の上半分 = 57 ton

底盤、繫梁および柱の下半分 = 259 ton

である。

### (3) 機 械

同基礎には propylene compressor 2 基と steam turbine が直列に据付けられる。

各機械の重量は 図-3 に示すように

Compressor	Model 3M4	7.03 ton
	Model 3M8-4	9.93 ton
	Base plate	2.95 ton
Turbine		35 ton
	Accessories	2.43 ton

合計 57.34 ton

である。回転数は 4,200~6,050r.p.m. の間で運転することになっている。

また各機械の回転子 (rotor) の重量は

Model 3M4	453.6 kg
Model 3M8-4	725.8 kg
Turbine	4,500 kg

合計 5.7 ton

で、すべて動約合試験によって不平衡力を生じないように調整されている。

## § 3. 強制振動試験

### (1) 試験方法

図-3 に示すように、同基礎の中央梁上に尺角を楔で打込み、これに起振機を 4 本の 16φ anchor bolt にて固定した。

起振機の加振モーメントを 10kg-cm および 20 kg-cm とし、各振動数に対する加振力は 図-4 のようになる。

試験振動数は起振機駆動用モーターの能力から 500~24,400r.p.m. と

し、2,000~2,400 r.p.m. からの自然減衰による連続記録と、500~2,400 r.p.m. の段階的定常運転による振動記録とを並行して行なった。

振動測定は固有周期 2 sec の変位計を使用し、振動記録は 50 c/s まで直線性のペン書きオシロを使用した。

振動の測定位置は 図-3 に示す 6 点で、それぞれ加振力方向の振動のみ測定した。

## (2) 測定結果

振動記録を各振動数について整理した結果を 表-1 に示した。 図-5 は測定点 1, 3, 6 について振動数-振幅特性を図示したものである。

実験に使用した起振機は、不平衡質量の回転による遠心力を利用したもので、 図-4 に示すように起振力は振動数に対して 2 次元的に変化する。たとえば 20 kg·cm の加振モーメントの時 500 r.p.m. にて起振力は 56 kg であるが、2,000 r.p.m. になれば 900 kg にも達する。

そこで各振動数に対する起振力を一様に 1 ton として振幅を比例換算した結果を 図-6 に示した。 図-5 からわかるように、加振モーメントを 10 kg·cm から 20 kg·cm にした場合、すなわち起振力を 2 倍にしても振幅は約 1.6 倍にしか増えていない。したがって起振力の比例換算による振幅の算定は、実際より相当大きく計算されるが、傾向は失われていない。

表-1 各振動数における各点の平均振幅

R.P.M.	c/s	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5	No. 6
500	8.3	0.5	...	0.2	...	0.5	0.5
600	10.5	0.6	...	...	...	...	...
700	11.7	1.3	...	...	...	...	...
800	13.2	1.1	...	0.6	...	1.3	1.2
900	15.0	0.9	...	...	...	...	...
1000	16.7	0.6	0.7	0.3	0.4	0.3	1.7
1100	18.3	0.7	0.7	0.5	...	2.1	...
1200	20.0	0.7	0.9	1.1	0.6	2.7	2.3
1300	21.7	1.1	6.0	3.5	2.0	4.9	...
1400	23.4	4.0	4.1	6.7	6.6	7.0	3.8
1500	25.0	4.4	3.5	9.7	14.2	8.3	...
1600	26.7	2.4	2.3	8.1	10.2	3.1	2.7
1700	28.6	1.5	1.1	7.2	7.2	1.9	...
1800	30.0	0.6	0.6	6.1	6.1	1.7	1.9
1900	31.7	0.7	0.7	5.3	4.3	1.4	...
2000	33.3	1.6	2.0	5.0	4.0	1.2	1.5
2100	35.0	2.9	3.3	4.2	3.6	...	...
2200	36.7	5.1	1.0	3.8	2.8	0.5	1.3
2300	38.3	5.8	1.9	3.4	...	...	...
2400	40.0	6.6	2.1	3.4	3.6	...	...

各測定点における共振振動数を求めると、 表-2 に示すようになる。

各点の共振振動数はほぼ同じで、その平均は 1,470 r.p.m.=22.2 c/s である。

測定点 1. および 2. の 800 r.p.m. 附近にも共振現象

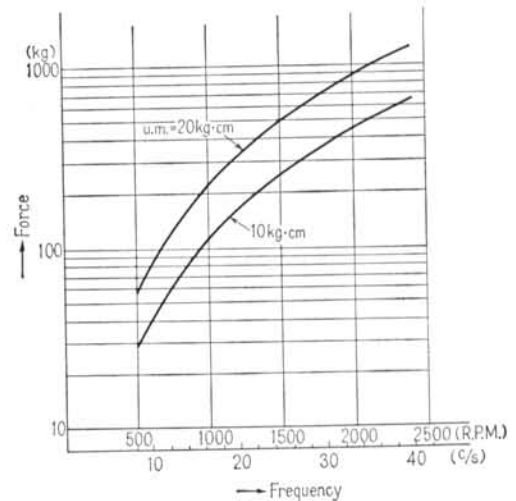


図-4 起振機の起振力特性

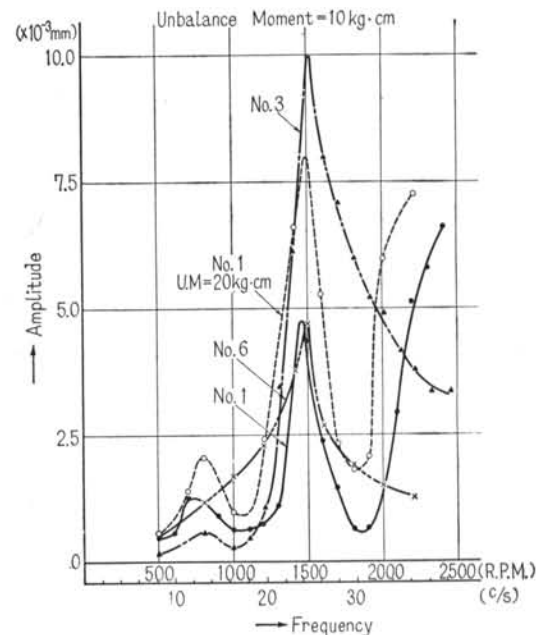


図-5 振動数-振幅の実測特性

が現われているが、他の4点にないことから起振機を据付けた尺角、あるいはその下の梁の共振のためだと思う。

§ 4. 解 析

同基礎の力学機構の概要を示すと 図-7 のようになっている。

この系の運動方程式は粘性抵抗を無視すれば、

$$M_1 \ddot{x}_1 = -K_1(x_1 - x_2) + P \sin \omega t \dots\dots\dots(1)$$

$$M_2 \ddot{x}_2 = -K_2 x_2 + K_1(x_1 - x_2)$$

ここで

$M_1$  = 機械および上部コンクリート質量

測定時にはタービンが未設定のため、

$M_1 = 77 \text{ ton (c.g.s.)}$

表-2 各測定点における共振振動数

No	共振振動数	
	R.P.M.	c/s
1	1460	22.1
2	1340	21.1
3	1530	22.7
4	1520	22.6
5	1470	22.2
6	1500	22.5

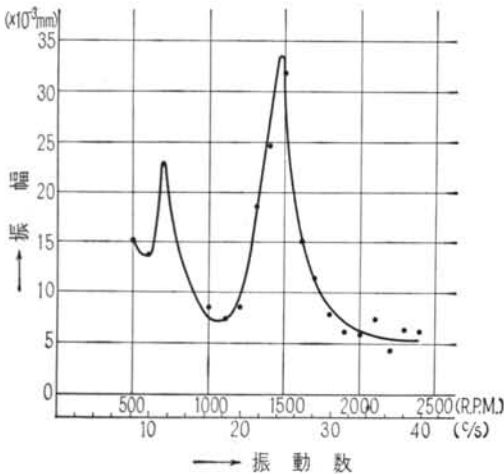


図-6 加振力を 1 ton とした場合の平均特性

$M_2$  = 下部コンクリート質量 = 259 ton (c.g.s.)

$K_1$  = 柱部の水平ばね常数

$K_2$  = 地盤および鋼杭の見かけの水平ばね常数

$x_1$  = 基礎上部 ( $M_1$ ) の水平変位

$x_2$  = 基礎底盤 ( $M_2$ ) の水平変位

$P$  = 起振力振巾

$$x = dx^2/dt^2$$

(i) 振動方程式

(1)式を書きかえて

$$M_1 \ddot{x}_1 + K_1 x_1 - K_1 x_2 = P \sin \omega t \dots\dots\dots(2)$$

$$M_2 \ddot{x}_2 + (K_1 + K_2)x_2 - K_1 x_1 = 0$$

$$\frac{K_1}{M_1} = a \quad \frac{K_1 + K_2}{M_2} = b \quad \frac{K_1}{M_2} = c \quad \text{とおくと} \dots\dots\dots(3)$$

$$x_1 + ax_1 - ax_2 = P \sin \omega t \dots\dots\dots(4)$$

$$x_2 + bx_2 - cx_1 = 0$$

自由振動の場合について特別解を

$$x_1 = A \sin(\omega t + \alpha) \dots\dots\dots(5)$$

$$x_2 = B \sin(\omega t + \alpha)$$

として(4)式に代入し整理すると

$$A(a - \omega^2) - B = 0$$

$$-cA + B(b - \omega^2) = 0$$

$A = B = 0$  以外の解は

$$(\omega^2 - a)(\omega^2 - b) - ac = 0$$

$$\omega^4 - (a+b)\omega^2 + a(b-c) = 0$$

$$\omega_{1,2}^2 = \frac{a+b}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{a-b}{2}\right)^2 + ac} \dots\dots\dots(6)$$

(6)式によって計算される  $\omega_1$  および  $\omega_2$  が  $M_1$  および  $M_2$  の固有振動数に相当する。

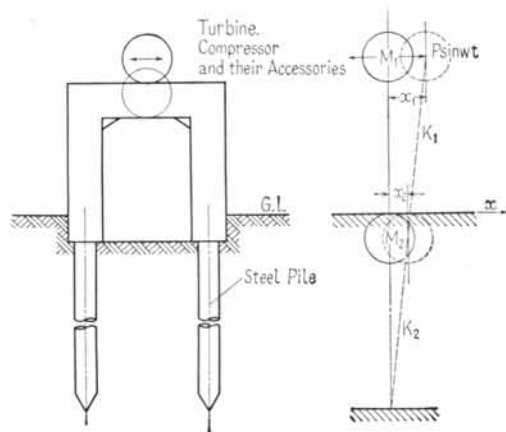


図-7

次に強制振動の場合について考えると  
特別解を

$$x_1 = C \sin \omega t \dots\dots\dots(7)$$

$$x_2 = D \sin \omega t$$

とおいて(4)式に代入し整理すると

$$C(a-w^2) - Da = q \dots\dots\dots(8)$$

$$-cC + D(b-w^2) = 0$$

これをC, Dについて解くと

$$C = \frac{q(b-w^2)}{(a-w^2)(b-w^2) - ac} \dots\dots\dots(9)$$

$$D = \frac{cq}{(a-w^2)(b-w^2) - ac} \dots\dots\dots(10)$$

C, Dをこのようにとると(7)式は時間のすべての値に対して方程式(4)を満足する。

この系の共振点は2つあって  $w = p_1$  or  $p_2$  に対応することがわかる。

(2) 柱の水平ばね常数  $K_1$

6本の柱の断面寸法は 800×800 が2本, 838×1,229 が2本, 1,200×800 が2本である。

振幅の非常に小さい範囲であるから, コンクリートのヤング率  $E_c = 4.0 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$  とする。

$$\Sigma E_c I = 4 \times 10^5 \times 6 \times (80^4 + 84 \times 123^3 + 120 \times 80^3)$$

$$= 1.72 \times 10^{13} \text{ kg} \cdot \text{cm}^2 \dots\dots\dots(11)$$

水平力に対する基礎上部の撓り  $x_0$  は

$$x_0 = \frac{l^3 P}{12 E_c I} \dots\dots\dots(12)$$

柱の水平ばね常数  $K_1$  は

$$K_1 = \frac{P}{x_0} = \frac{12 E_c I}{l^3} \dots\dots\dots(13)$$

ここで  $l$  は柱長にて有効長さ  $l = 300 \text{ cm}$

$$K_1 = \frac{12 \times 1.72 \times 10^{13}}{300^3} = 7.6 \times 10^6 \text{ kg} \cdot \text{cm} \dots\dots\dots(14)$$

(3) 地盤の見かけのばね常数  $K_2$

コンプレッサー等の基礎を設計する場合, 地盤を質量のないばねにおきかえて振動計算するのが一般的である。地盤の動力学的な性質は未だ曖昧な点が多いが, ここでは大築氏法によって地盤の見かけのばね常数を求めよう。同地盤の水平地盤係数を  $k_h$  として, 地盤の見かけの水平ばね常数  $K_h$  は

$$K_h = 10.8 \times 6.1 \times k_h \times 10^4$$

$$= 66 k_h \times 10^4 \text{ kg/cm} \dots\dots\dots(15)$$

次に杭の曲げによる水平ばね常数  $Kp$  は

$$Kp = \frac{12 EI}{l^3} N \dots\dots\dots(16)$$

$l$  = 曲げに影響する杭長

$E$  = 杭材のヤング率  $N$  = 杭の本数

$I$  = 杭の断面二次モーメント

多くの実測資料によると, 杭頭の曲げに影響する長さは, 変位の小さい範囲ではせいぜい深さ3mまでとなっている。ここで使用した杭は外径48.5cm厚さ12mmの鋼管で

$$Kp = \frac{1^2 \times 2.1 \times 10^6 \times 5.0 \times 10^4}{300^3} \times 8$$

$$= 37 \times 10^4 \text{ kg/cm} \dots\dots\dots(17)$$

よって, 計算によって求められる地盤の見かけの水平ばね常数は

$$K_2 = (66 k_h + 37) \times 10^4 \text{ kg/cm} \dots\dots\dots(18)$$

となる。

(4) 水平地盤係数  $k_h$

水平地盤係数  $k_h$  を 2.0~10.0  $\text{kg/cm}^2$  として, 基礎の共振振動数を数値計算してみよう。

(3)式から  $a, b, c$  を求め, これを(6)式に代入し,  $p_1, p_2$  および  $f_1, f_2$  を計算すると, 表-3のようになる。

この結果  $k_h = 10 \text{ kg/cm}^2$  とすると,  $M_2$  の共振振動数  $f_2 = 22 \text{ c/s}$  となり, 実測値と一致する。

したがって同基礎の水平地盤係数は

$$k_h = 10 \text{ kg/cm}^2 \text{ と見なされる。}$$

(5) 振動数—振幅の理論特性

水平地盤係数を 10  $\text{kg/cm}^2$  として, 実験の各振動数に対する振幅の理論特性を求めてみよう。(3)式について各数値計算を行なうと

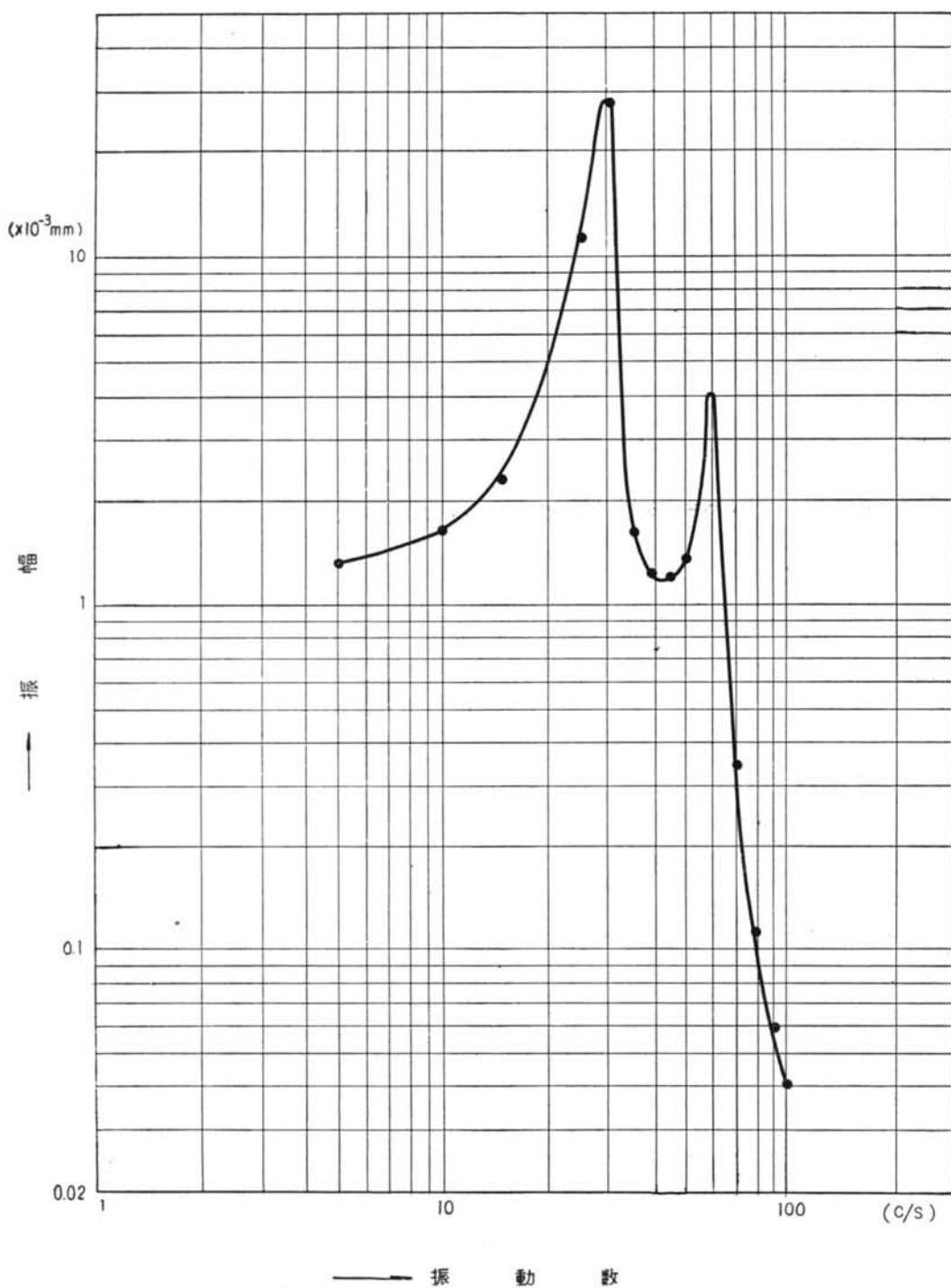
$$a = 9.7 \times 10^4 \quad b = 5.9 \times 10^4 \quad c = 2.9 \times 10^4$$

となる。(4)式の  $P$  は加振力にてこの実験では加振モーメント  $T = 10 \text{ kg} \cdot \text{cm}$  とした。

$$P = \frac{T}{g} w^2 = \frac{(2\pi f)^2}{g} T \dots\dots\dots(19)$$

表-3

$k_h(\text{kg/cm}^2)$	$p_1$	$f_1 \text{ c/s}$	$p_2$	$f_2 \text{ c/s}$
2.0	358	5700	81	12.8
3.0	359	57.1	92	14.6
4.0	370	57.3	102	16.2
5.0	361	57.4	111	17.6
6.0	362	57.6	119	18.9
8.0	364	57.9	133	21.1
10.0	366	58.3	138	22.0



図—8 理論計算による振動数—振幅特性と実測値との比較

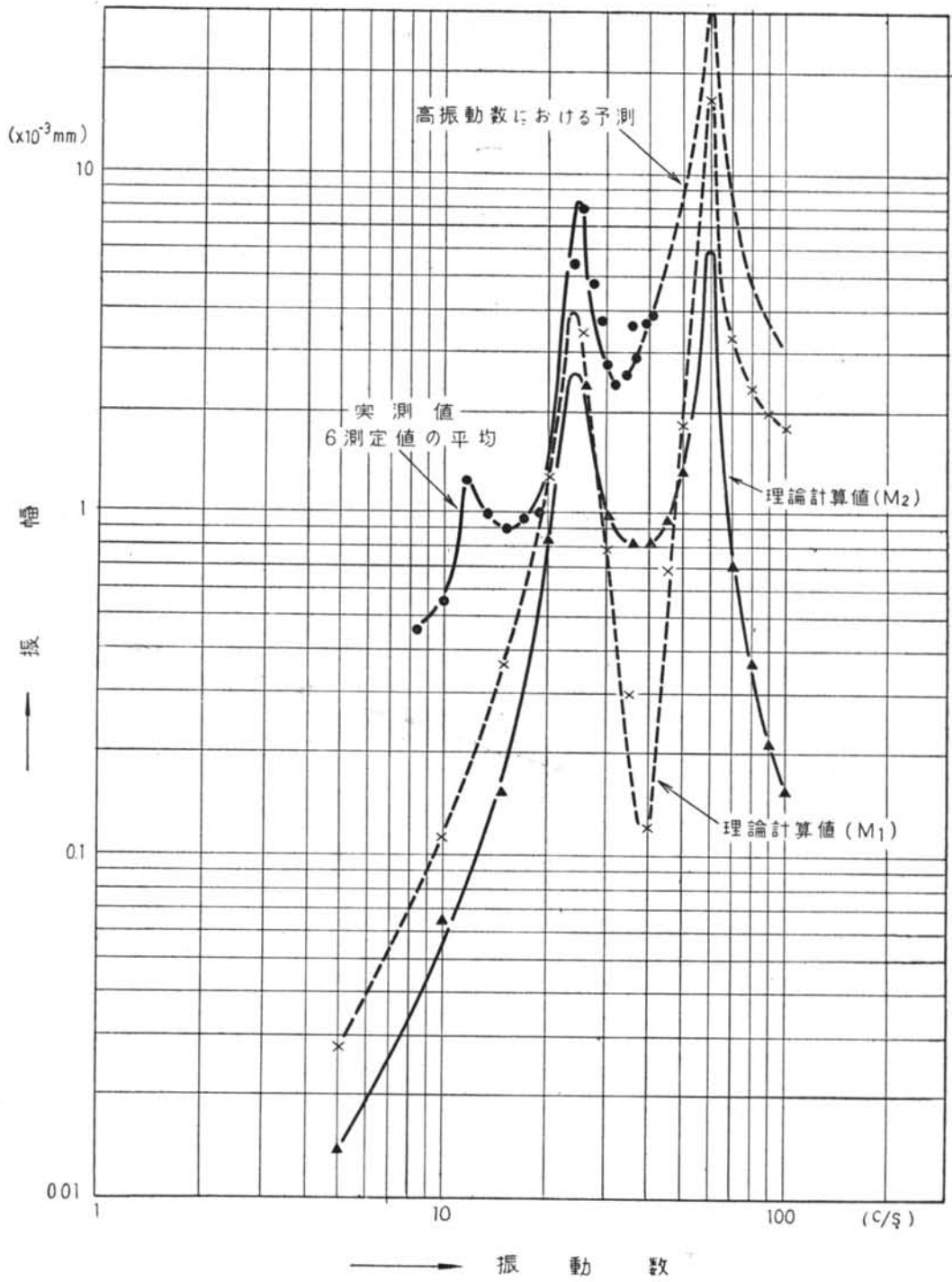


図-9 加振力を 1 ton とした場合の理論特性

$$q = \frac{Pg}{W_1} = \frac{(2\pi f)^2}{W_1} T \dots\dots\dots(2)$$

以上を(6)および(2)式に代入してC, Dについて数値計算を行なうと表-4の結果を得る。Cは基礎上部(M<sub>1</sub>)の振幅であり、Dは基礎底盤(M<sub>2</sub>)の振幅を意味する。

以上が2自由度系振動方程式(1)の数値解で、図-8はこれを実測値と比較したものである。図-9は起振力を一様に1 tonとした場合の理論特性である。

理論計算値は諸仮定の誤差により実測値と多少異なるが、傾向はほぼ一致していることがわかる。

§ 5. む す び

発電機あるいはコンプレッサー等の基礎の設計に当てまず当面する迷いは、地盤係数をどの程度に考えるべきかという問題である。

杭のない基礎の場合には比較的多くの実験資料があり、質量比(b=m/ρ<sub>0</sub>³)=25の時の標準値が表-5のように与えられている。

まだ質量比が25以外の値に対しても、補正係数によって大過ない設計ができるようになっている。しかし杭に支持された基礎となると、地盤係数に杭がどのような効果を持つか全くわからない。

仮にこの実験の基礎について杭がないものとするれば、同地盤はむしろ軟弱な埋立地であり、砂質地盤としてもk<sub>v(25)</sub>=6.0 kg/cm³程度しか望めないであろう。

またk<sub>h</sub>=(0.6~0.7)k<sub>v</sub>となっているから、k<sub>h</sub>はせいぜい4.0~5.0 kg/cm³ぐらいにしか考えられない。さらに同基礎は質量比b=2.3程度であるから、これによる低減も加わり、共振振動数22 c/sなどおおよぶもつかない。

実験の結果k<sub>h</sub>=10 kg/cm³となったのは、杭の影響としか考えられない。杭の影響といっても杭の曲げ剛性が加わったためではない。

曲げに抵抗する杭の実効長さを3mとしても、0506の計算例でもわかるように、地盤のばね常数の1/18にしかならない。

したがって、杭を打ち込んだことによって周囲の地盤が締詰められたうえ、杭の側面の地盤抵抗が加わるためであると考えられる。

また同基礎のように、底盤が地中に埋っている場合の側面抵抗も相当に影響していると思われる。このような諸事情が重なって、意外に大きな地盤係数が導かれたこ

表-4

f c/s	C	D
5	0.03	0.01
10	0.13	0.07
15	0.37	0.21
20	1.30	0.87
25	3.45	2.41
30	0.81	1.00
35	0.30	0.81
40	0.12	0.82
45	0.70	0.96
50	1.88	1.37
60	16.88	5.92
70	3.27	0.72
80	2.37	0.37
90	1.99	0.21
100	1.82	0.16

(単位: 1/1000 mm)

表-5

地盤の種類	k <sub>v(25)</sub> (kg/cm³)
軟弱な粘土	< 2.0
ローム層	3.0~5.0
細砂	5.0~6.0
砂	8.0~10.0
砂礫	11.0~13.0

との妥当性が説明される。

最後に、この実験には川崎東燃現場の大田満次氏の協力があったことを附記しておく。