

# ダイナミック・ダンパーに関する基礎的研究

渡辺 清治 寺村 彰  
島口 正三郎 此上 典文

## Basic Studies on Dynamic Dampers

Seiji Watanabe Akira Teramura  
Shosaburo Shimaguchi Norifumi Konoue

### Abstract

The studies are concerned with basic experiments on dynamic dampers to be applied for vibration elimination of machine foundations resting on the ground and corresponding theoretical analyses taking dissipation damping into consideration. The effect of vibration elimination of a dynamic damper is due to mass ratio and frequency ratio between damper and machine foundation and to damping factors of the damper and the foundation-soil system. The less the damping factor of the damper the more effective will it be. In the range of mass ratios experimented with, the maximum effects reached about  $1/5 \sim 1/20$  in terms of vibration amplitude. It appears that the dynamic damper will be very useful for reduction of vibration especially in case of steady state vibration.

### 概 要

本研究は、地盤上にある機械基礎などの防振を目的とした Dynamic Damper の基礎的な実験を行うと共に、これに対応する地盤減衰を考慮した理論解析を試みたものである。

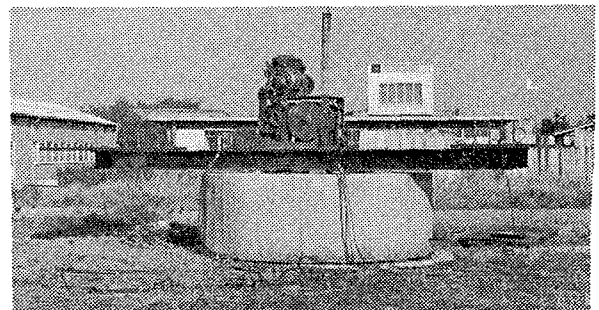
その結果、理論計算と実験との対応が得られた。Dynamic Damper の防振効果は、基礎とダンパーの質量比、振動数比および地盤減衰、ダンパーの減衰等のパラメーターにより決定される。特にダンパーの減衰が小さくなるほどその効果は大きい。

最大の防振効果は、重量比がこの実験程度に大きいときは振幅において  $1/5 \sim 1/20$  にも達し、定常振動に対する防振対策の一方法として、十分利用できることが明らかになった。

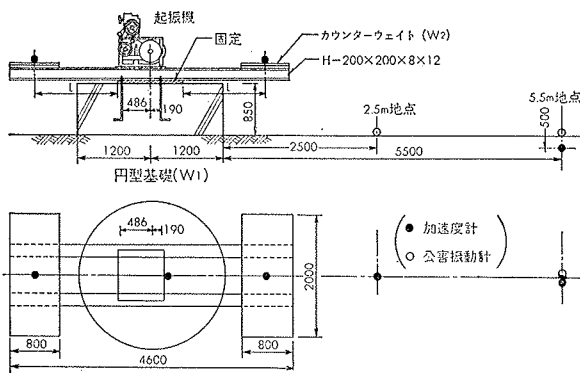
### 1. まえがき

Dynamic Damper という防振方法は古くから機械分野で使用され、その理論は振動学の書物に詳しく紹介されている。しかしこれらに関する周知は、機械の一部の防振とか、最近においては風による自励振動が生じる構造物の防振機構として使用されているのが見受けられる。今機械基礎のように振動物体が大きく、基礎の底面積が拡く極めて減衰力の大きいといった物体にはたして Dynamic Damper 方式は効果があるや否やという問題については、疑問視される傾向が強かった。そこで筆者らは、極めてプリミティブな研究問題として、基礎に Dynamic Damper を取り付けてその効果を実験的に調べると共に未開発であった地盤減衰の非常に大きい基礎を対象として、これらのシミュレーション解析を進めてみた。その結果、新たに研究

問題としていろいろの課題が与えられたが興味ある結果が得られた。本報告は、研究課題としてまだ未完成であるが実用的には有効であるという見通しが得られたので、それらの実験結果、シミュレーション解析結果と共に実設計上の適用とその問題点について報告する。



写真一 1 振動実験状況



図一 実験概要図

## 2. 強制振動実験

### 2.1. 実験概要

実験状況を写真一1に、実験模型および測定計器配置図を図一1に示す。

実験は写真一1、図一1に見られるように、偏心質量型起振機を外乱力としてダイナミック・ダンパーを取り付けた基礎を上下方向に加振したときの基礎、ダンパー、周辺地盤の振動性状からダイナミック・ダンパーの防振効果について実験的に検討した。実験はダンパー材料として鋼材と防振ゴムを用いて行ない、防振効果の判定はCASE 1-1に示されるダンパーの無い場合をパラメーターの基準として考え、各々のCASEで得られたダンパーと基礎の重量比、振動数比およびダンパー材料の相違によるその効果を調査した。

実験実施：昭和48年11月19日～27日

実験場所：榎大林組技術研究所 屋外実験場

地盤性状：参考文献1), 2), 3)に示されているが、地盤はGL-7mまで関東ロームで、それ以下は砂レキ層になっている。地盤の伝播速度は表層でS波が143m/sec, P波が380m/secである。

実験項目：表-1に示す。

実験番号	ダンパー重量	支点長さ	ダンパー計算振動数	重量比	ダンパー材料
CASE. No.	W (kg)	L (cm)	$f_v$ (Hz)	ダンパー/基礎	
1-1	0	—	—	—	無し
2-1	1,000	150	22.05	$\frac{1}{10}$	H型鋼
2-2		175	17.50		
3-1		125	20.50		
3-2	2,000	150	15.59	$\frac{1}{5}$	
3-3		175	12.37		
4-1	4,000	125	14.49	$\frac{1}{2.5}$	
4-2		150	11.03		
5-1	1,000	—	14.16	$\frac{1}{10}$	防振ゴム
5-2	2,000	—	10.0	$\frac{1}{5}$	

表一1 実験項目

加振方法：起振機偏心モーメント 4.00kg × 16cm

加振周波数範囲 300～1100rpm

25rpm 毎に連続加振

測定計器：偏心質量型起振機

埋設型加速度計 (3成分用)

加速度計 120A-2D

公害振動計 VM-13

動的歪測定器 DPM-6E型

ビジュグラフ FR-102型

測定位置：測定配置は図一1に示されるとおり、円型基礎上に3成分、各ダンパー・ウエイト上に各々上下成分の加速度計を設置した。また基礎端より2.5m, 5.5mの地盤上に各々3成分の公害振動計を、5.5m地点には併せて地中埋設型加速度計を設置した。

### 2.2. 実験結果と考察

本実験地盤の振動特性は、今回実験および参考文献1)2)から基礎-地盤の共振々動数は水平加振時で8～10Hz, 14～15Hz, 上下加振時では16～17Hzである。このような地盤上で同一基礎を同じ加振装置を用いて行なった本実験からダイナミック・ダンパーの防振性の検討を行なった。

ダイナミック・ダンパー取り付けの有無による代表的な基礎の応答曲線を図一2、図一3に示し、このときの地盤の応答曲線を図一4、図一5に示す。図一2、図一4はダンパーのバネ材料としてH型鋼を使用したものであり、図一3、図一5は防振ゴムによるものである。また実験結果を一覧表にまとめ表一2に示す。実験結果の代表的な一例であるCASE 3-2の場合、ダンパーの無い場合(CASE 1-1)に対するその防振性は図一6の如くなる。図一6はダンパーを使用することにより生じた防振効果の量とその領域を示した一例である。図はA, B, C点で囲まれる部分 $\blacksquare$ 部分が防振効果範囲であり、825rpm (13.75Hz)においてその最大防振効果(C点)を示す。また $\square$ 部分はダンパーを用いたことによって振幅が増大した領域を示している。これらの傾向は他の実験結果でも同様である。以上、起振機を用いた定常振動における実験結果をまとめて列挙すると、

- 1) ダンパーと基礎の重量比と振動数比を変化させて行なった実験の結果、最大防振効果時の基礎の振幅は $\frac{1}{5} \sim \frac{1}{20}$ に効果的に減少している。
- 2) ダンパーの固有振動数の選定によりその防振効果範囲は任意に変化させることができる。
- 3) またダンパーの固有振動数の設定位置により、振

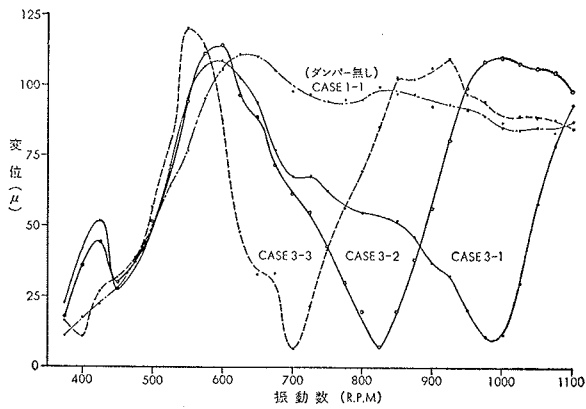


図-2 基礎変位共振曲線 (鋼材)

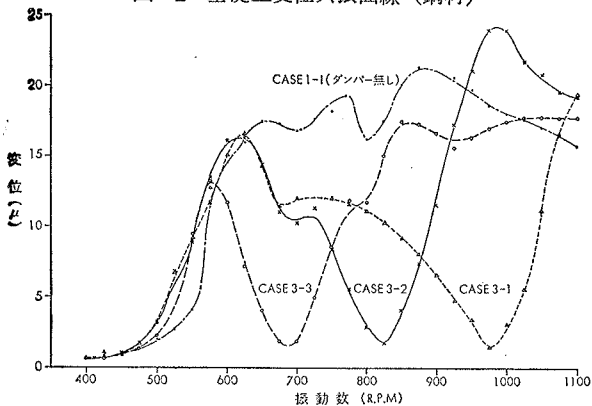


図-4 地盤上変位共振曲線 (鋼材)

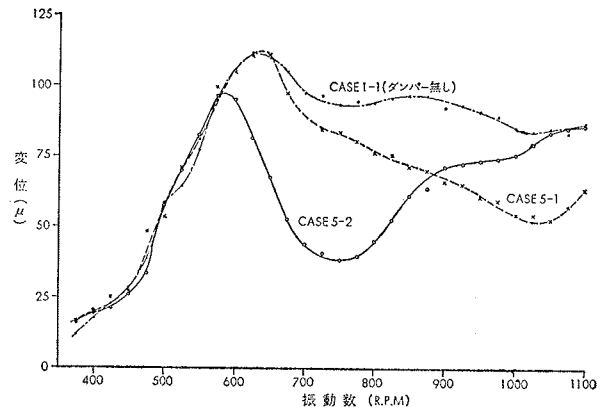


図-3 基礎変位共振曲線 (防振ゴム)

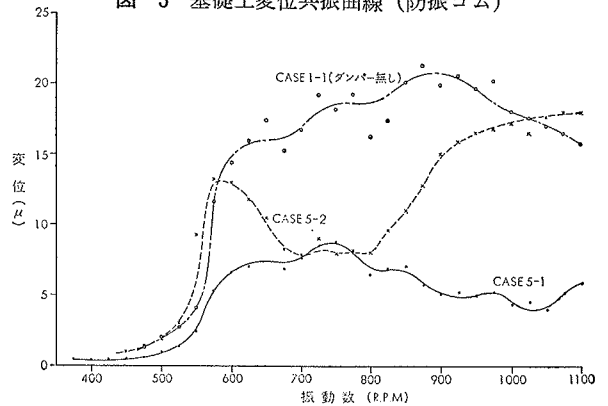


図-5 地盤上変位共振曲線 (防振ゴム)

実験番号 CASE.No.	ダンパー 重量 W (kg)	支点長さ L (cm)	ダンパー 自由振動数 f' (Hz)	最大効果時 振動数 fo (Hz)	防振効果領域 振動数 (Hz)	最大防振 効果 比	重量比 ダンパー重量 基礎重量
1-1	0	—	—	—	—	1	0
2-1	1,000	150	24.05	17.9	10.4 ~	1/5.4	1/10
2-2		175	16.29	15.4	10.0 ~ 16.5	1/10.6	
3-1	2,000	125	20.20	16.25	10.2 ~ 18.0	1/13.5	1/5
3-2		150	16.83	13.75	10.2 ~ 15.7	1/13.0	
3-3		175	12.32	11.67	9.8 ~ 14.0	1/13.3	
4-1	4,000	125	10.10	12.08	8.5 ~ 15.5	1/13.3	1/2.5
4-2		150	9.18	10.00	8.8 ~ 15.0	1/20.8	
5-1	1,000	—	18.20	17.33	10.83 ~	1/1.6	1/10
5-2	2,000	—	9.1 ~ 11.0	12.50	9.58 ~ 17.92	1/2.4	1/5

表-2 振動実験結果一覧表

幅は若干増加する範囲がでてくることがある。

4) 本実験では、各 CASE 共、最大防振効果時 (C 点) の変位振幅はほぼ一定値を示す傾向が見られる。しかし防振効果はダンパー材料により異なり、H鋼材と防振ゴムを比較すると、前者の方がはるかに優れている。このことは、後述されるダンパー材料の減衰性に関係している。

5) 周辺地盤における地表面の振動は、各測点において上下、水平方向とも基礎と同じ様な傾向の振幅減少を示している。

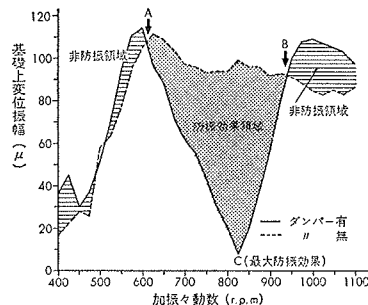


図-6 ダイナミックダンパーによる防振効果

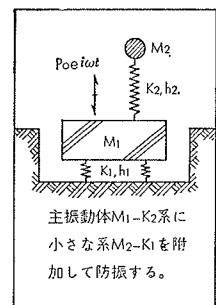


図-7

### 3. 理論解析

#### 3.1. 理論解

上下動、水平動あるいは回転動に関する基本式は(1)式を仮定する。

$$\left. \begin{aligned} M_1 \ddot{X}_1 + K_1 X_1 + C_1 \dot{X}_1 + K_2 (X_2 - X_1) + C_2 (\dot{X}_2 - \dot{X}_1) &= P_0 e^{i\omega t} \\ M_2 \ddot{X}_2 + K_2 (X_2 - X_1) + C_2 (\dot{X}_2 - \dot{X}_1) &= 0 \end{aligned} \right\} (1)$$

(1)式に  $C_1$  が導入してあることが、従来の解より一歩進んでいる。その解 ( $X_1, X_2$ ) は強制振動解 (特解) のみを考えて  $X_1 = X_1 e^{i\omega t}$ ,  $X_2 = X_2 e^{i\omega t}$

と仮定する。(1)式は次の記号を用いて変換する。

$X_1, X_2$ : (主振動体およびダンパー変位振幅)

$\mu = M_2 / M_1$  (質量比)

$C_1 = h_1 \omega_1 M_1$  (主振動体の減衰項)

$$\begin{aligned}
 C_2 &= h_2 \omega_2 M_2 \quad (\text{ダンパーの減衰項}) \\
 \omega_1^2 &= K_1 / M_1 \quad (\text{主振動体の振動数}) \\
 \omega_2^2 &= K_2 / M_2 \quad (\text{ダンパーの振動数}) \\
 f &= \omega_2 / \omega_1 \quad (\text{振動数比}) \\
 g &= \omega / \omega_1 \quad (\text{強制外力振動数比}) \quad (2) \\
 \text{減衰を省く自由振動の固有振動数は(3)式である。}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \omega_i &= \left[ \frac{1}{2} \{ \omega_1^2 + (1 + \mu) \omega_2^2 \} \right. \\
 &\quad \left. \pm \sqrt{ \{ \omega_1^2 + (1 + \mu) \omega_2^2 \}^2 - 4 \mu \omega_2^4 } \right]^{1/2} \quad (3)
 \end{aligned}$$

但し  $i$  は 1 次, 2 次を示す。

(1)式から導かれるベクトル表示の複素解からベクトル長さの変位振幅の解 ( $X_1, X_2$ ) は(4), (5)式である。

$$\begin{aligned}
 \frac{X_1}{X_{st1}} &= \left[ \frac{(f^2 - g^2)^2 + (h_2 g f)^2}{\{ (1 - g^2)(f^2 - g^2) - (\mu f + h_1 h_2) f g^2 \}^2 + g^2 (h_1 f + h_2) f} \right. \\
 &\quad \left. - (h_1 + \mu h_2 f + h_2 f) g^2 \}^2 \right]^{1/2} \quad (4)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \frac{X_2}{X_{st2}} &= \left[ \frac{(\mu f^4)^2 + (\mu h_2 f)^2 \cdot g^2 \cdot f^4}{\{ (1 - g^2)(f^2 - g^2) - (\mu f + h_1 h_2) f g^2 \}^2 + g^2 \{ (h_1 f + h_2) f} \right. \\
 &\quad \left. - (h_1 + \mu h_2 f + h_2 f) g^2 \}^2 \right]^{1/2} \quad (5)
 \end{aligned}$$

$X_{st1}, X_{st2}$  は系の静的たわみの項で強制外力 ( $P_0$ ) が  $P_0 = m_0 r \omega^2$  の場合は(6)式である。

$$X_{st1} = (m_0 r / M_1) g^2, \quad X_{st2} = (m_0 r / M_2) \cdot (g^2 / f^2) \quad (6)$$

また強制外力が外力振幅一定の正弦波外力の場合は(7)式である。

$$X_{st1} = P_0 / K_1, \quad X_{st2} = P_0 / K_2 \quad (P_0 : \text{一定}) \quad (7)$$

強制外力の作用点が偏心距離( $e$ )を有する場合外力項 ( $P_0$ ) は  $P_0 X_e$  となる。

強制外力波形に対する  $X_1, X_2$  の位相遅れ  $\varphi_1, \varphi_2$  は(8), (9)式で示される。

$$\varphi_1 = \tan^{-1} \left( \frac{(f^2 - g^2) \alpha - h_2 f g \beta}{(f^2 - g^2) \beta - h_2 f g \cdot \alpha} \right) \quad (8)$$

$$\varphi_2 = \tan^{-2} \left( \frac{\mu f^4 \alpha - \mu f h_2 f^2 g \cdot \beta}{\mu f^4 \beta - h_2 f g \cdot \alpha} \right) \quad (9)$$

$$\begin{aligned}
 \text{ここに } \alpha &= g \{ (h_1 f + h_2) f - (h_1 + \mu h_2 f + h_2 f) g \} \\
 \beta &= (1 - g^2) \cdot (f^2 - g^2) - (\mu f + h_1 h_2) f g^2
 \end{aligned}$$

図-8 は位相遅れの計算例を示した。

図-9 は地盤減衰  $H_B = (h_1/2) = 0.20$ , 質量比  $\mu = 1/5$ , 振動数比  $f = 0.7$  が一定で強制外力振動数 ( $g$ ) の関数としてダンパーの減衰 ( $H_A$ ) を変えた変位応答倍率 ( $X_1/X_{st1}$ ) の計算値(4), (7)式を示す。図は  $H_A$  が

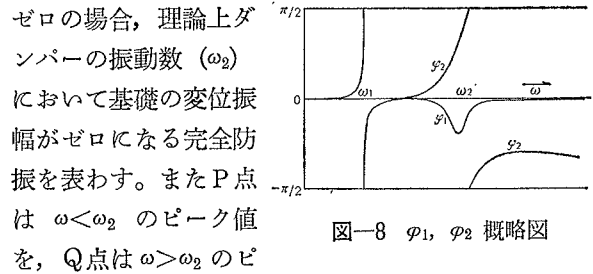


図-8  $\varphi_1, \varphi_2$  概略図

ゼロの場合, 理論上ダンパーの振動数 ( $\omega_2$ ) において基礎の変位振幅がゼロになる完全防振を表わす。また P 点は  $\omega < \omega_2$  のピーク値を, Q 点は  $\omega > \omega_2$  のピーク値を表わす。ダンパーの減衰 ( $H_A$ ) と変位応答倍率との関係は次のとおりである。  $H_A$  が増加すると P, Q 点は順次下降し, P1, Q1 点に達する。この P1, Q1 点は両者の変位振幅が等しい場合を示すものである。さらに  $H_A$  が増加すると, P1, Q1 点は上昇し  $H_A = \infty$  の場合のピーク値 (R 点) に集まる。

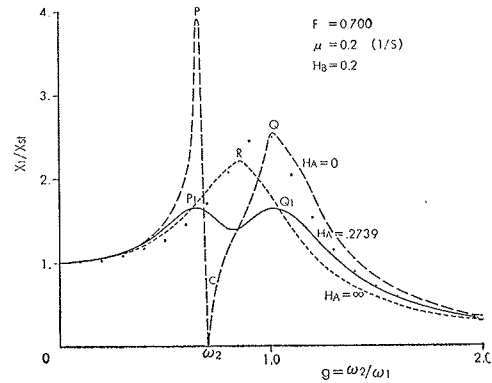


図-9 基礎変位応答倍率曲線

### 3.2 シミュレーション解析

第 2 章で述べた起振機実験結果の代表例として CA SE-3 のシミュレーション解析を行なった。解析に用いた地盤の諸定数 ( $\omega_1, H_B$ ) は所内で行なった同種の実験結果(1)(2)を参考にして求め, 鋼材の減衰定数 ( $H_A$ ) は 0.01 と仮定し(4)(5)(6)式を用いた。図-10 は基礎の振動性状を近似的に上下振動として扱った基礎 ( $X_1$ ) に関するシミュレーション結果であり, 実験値とよく対応している。また第 4 章で示す図-11~13 の各種パラメーターに関する最大振幅および防振効果の数値計算結果についても満足される結果を得た。

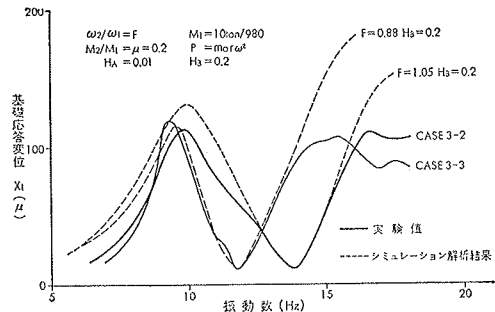
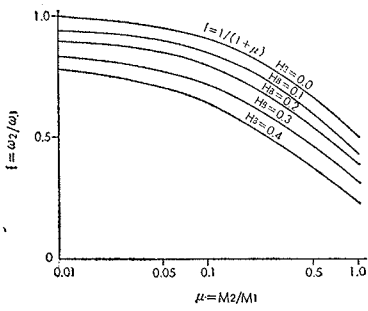
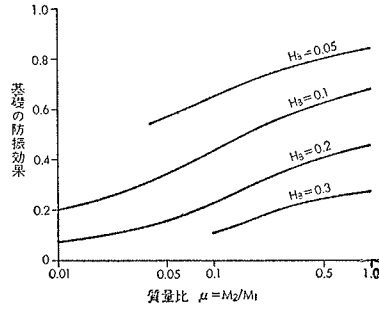


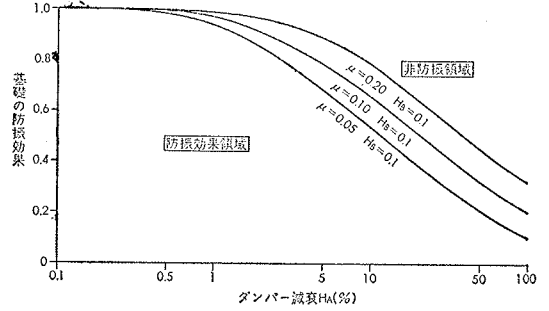
図-10 シミュレーション解析結果



図一11 最適設計の振動数比



図一12 (a)に関する防振効果

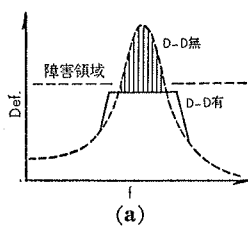


図一13 (b), (c)に関する防振効果

#### 4. 防振設計の実際面への応用

防振の基本となることは振動源の振動を小さくすることが先ず重要である。

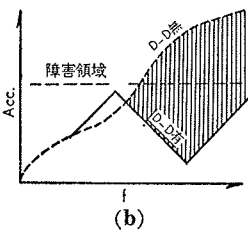
Dynamic Damper は用途に応じて適当な振動数を設定できるところに特徴がある。これを用いた機械基礎の防振設計は、次に示す(a), (b), (c)に代表される3つの場合が考えられる。



(a)

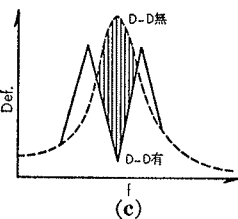
(a)は、機械の振動数が変動する広範な振動数領域に対し共振点を含めて全般的な防振を目的とする。この場合、図一9に示した如く、 $H_A$  が一定値を有する高さの等しい $P_1$ ,  $Q_1$ 点を通る応答曲線が有効となる。図一11は振動数比( $f$ )が質量比( $\mu$ )と地盤減衰定数( $H_B$ )との関係を示す。

図一12は上記の  $H_A$  を考慮して Dynamic Damper の無い場合に対する防振効果の計算例を示したもので、例えば質量比  $\mu=0.1$ , 地盤の減衰  $H_B=0.1$ , ダンパーの減衰  $H_A=0.01$  の場合、防振効果は約42%の振幅減少が期待できることを示している。



(b)

(b)は、周波数範囲が変動する機械の特定振動数領域のみを防振すると云う方法である。一例をあげると振動篩の様に機械の回転数を高くして行くと基礎に加わる加速度が大きくなり、周辺に及ぼす影響も大きくなる。この様な場合は振動篩の稼働範囲の加速度の大きくなる部分のみを防振する様 Dynamic Damper を設定すると、(c)で述べられるのと同様の結果が成り立ち、大きな防振効果が期待できる。



(c)

(c)は、機械基礎が一定の振動数で振動している場合に、その共振振動をカットしてしまう場合に対する防振対策である。この場合はその周波数

成分のみに着目して図一6あるいは図一9に示されるC点の防振効果が考慮できる。C点に関する Dynamic Damper の振動数比( $f$ )は、図一11に示される質量比( $\mu$ )と地盤の減衰定数( $H_B$ )との関数から求められる。図一13は Dynamic Damper の無い場合に対する防振効果の計算例を示す。この結果、ダンパーの減衰定数( $H_A$ )が1%で質量比 $\mu=0.05$ , 地盤減衰  $H_B=0.01$  のとき、その効果は約94%と非常に大きな防振効果が得られる。

以上の結果、通常地盤の定数は既定されるために防振効果は、基礎とダンパーの振動数比( $f$ ), 質量比( $\mu$ )およびダンパーの減衰定数( $H_A$ )により決定される。また  $H_A$  が小さくなるほどその効果は大きくなるので、ダンパー材料の選択とその取付支持方法が重要な要素となる。ダンパー材料としては減衰の比較的小さい鋼材、コイルバネあるいはそれに相当するものが考えられる。

#### 5. むすび

本報告では定常振動の上下加振に関する基礎的研究結果を示し、防振対策上の基本原理とその応用について示した。その結果、4章で示した(b), (c)に関しては防振効果も特に大きく実用的には有効であるという結果が得られた。本研究はまだ研究途上にあるため実際の応用面において数々の研究課題は残されるが、今後これらの資料の蓄積が防振設計への一助となれば幸せである。

#### 参考文献

- 1) 中川恭次, 他: 基礎周辺地盤の振動分布に関する研究(その1) 大林組技術研究所報 No. 5 1971
- 2) W. F 研究グループ: 地盤振動の遮断効果に関する実験 大林組技術研究所報 No. 8, 1974
- 3) 渡辺清治, 島口正三郎: 地盤振動の遮断効果に関する実験 (WALL FOUNDATION に関する実験報告 その12) 日本建築学会(東北)大会学術講演梗概集 昭48. 10
- 4) 田治見 宏: 建築振動学 コロナ社