

ダイナミック・ダンパーに関する基礎的研究 (その2)

渡辺 清治 寺村 彰
島口 正三郎

Basic Studies on Dynamic Dampers (Part 2)

Seiji Watanabe Akira Teramura
Shosaburo Shimaguchi

Abstract

The previous report (Part 1) presented the fundamental principle on dynamic dampers to be applied for vibration elimination of machine foundations resting on the ground. This study is concerned with additional experiments on dynamic dampers of machine foundations in which vibrations show both horizontal and rocking motions. The authors have made it possible to solve complex eigen values and responses by computer programs for practical uses. As a result, it appears that dynamic dampers will be very useful for reduction of vibration, especially in case of study-state vibration.

概 要

ダイナミック・ダンパーによる防振方法に関し、前報告は円型基礎を用いた定常振動の上下加振における基礎的研究結果から、その防振効果は1/5~1/20と大きく実用的に有効であることを示し、防振対策上の基本原理を述べた。今回は更に実際面への応用を考えて行った追加実験から、水平およびロックンク振動に対する振動実験結果と理論解析との対応が得られ、定常振動に対する防振対策として十分利用できることが明らかになった。実設計での解析手順およびその使用方法に関して報告する。

1. 序

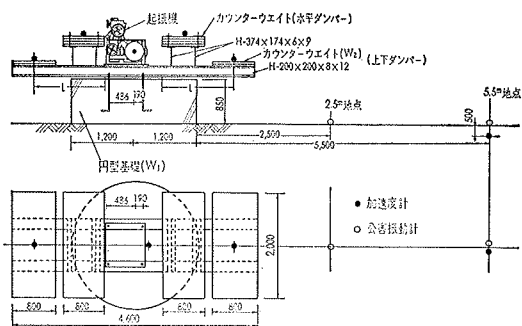
ここに云うダイナミック・ダンパー (Dynamic Damper, 略称 D-D) は、在来の通念で云う D-D とは多少理論的にも、概念的にも異なることは、前回報告で述べたとおりであるが、本報告はその応用面の拡大と理論的実証を更に追求したものである。

前報告¹⁾ は、円型基礎にダイナミック・ダンパーを取り付けて定常振動 (上下加振) による実験研究を行ったところ、その防振効果は非常に大きく、振動体の振源自身の振動を極めて小さくすることができるため、また D-D の固有振動数の設定方法により低周波範囲に至るまでの防振が可能であることから、今日問題になっている振動公害の防振対策として役立つばかりでなく、機械基礎の設計においては基礎重量を低減できる可能性もあり、経済設計上の効果も期待出来る事を述べた。

筆者等は、数年来地盤の影響を強く受ける構造物に対して地盤の減衰項が重要であり、また構造物の減衰定数が小さい場合の位相遅れの問題が非常に重要であることを痛感して、いくつかの位相検出装置を用いて高層ビル、実在基礎等の測定データを検討してきた。

この結果、集中質量を有する振動系の解析方法は各部減衰の考え方で解析すればよく、その応答計算は「直接法」あるいは「複素応答」に基づく計算が考えられた。そして機械基礎のように調和振動の場合「複素応答法」が適する。D-D の解析は、ダンパーと基礎との関係が両者の剛性ばかりでなく減衰が異なるので、解析上典型的な地盤との相互作用の問題と見なせるであろう。このような観点に立ち複素応答解析および複素固有値解析プログラムを作成し、円型基礎実験値との対応を試みたところ十分満足できる結果を得た。

本報告は、以上の計算方法、プログラム内容および円型基礎水平加振実験結果とその解析について述べる。



図一 実験概要図

実験番号	ダンパー重量	重量比	ダンパー固有振動数	最大効果時振動数	防振効果領域振動数	最大防振効果比	備考
CASE-No.	W(kg)	$\mu = m/M$	f_0 (Hz)	f(Hz)	(Hz)		
1	0	—	—	—	—	1	ダンパー無
2	900	1/10	11.21	10.9 (10.9)	8.5~12.2 (7.9~12.2)	1/19.7 (1/32.2)	水平ダンパー取付
3	$W_H=900$ $W_V=1,800$	$\mu_H=1/10$ $\mu_V=1/5$	11.6~11.82 13.83	9.5 (8.2)	7.3~11.9 (6.5~以上)	1/15.8 (1/13.8)	水平及上下ダンパー取付

()内数値は、地表面での値を示す。

表一 振動実験結果一覧表

2. 振動実験

2.1. 実験概要

実験模型および測定計器配置図を図一に示す。実験は前回¹⁾と同じく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水平方向に加振したときの基礎、ダンパー、周辺地盤の振動性からダイナミック・ダンパーの防振効果を調べたものである。

防振効果の判定は、CASE-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その効果の検討を行った。

ダンパー材料は、容易に入手でき、かつ減衰の小さなH型鋼を用い、水平方向のダンパーとしてはH型鋼のウェブを、上下方向については前回実験と同じくH型鋼を片持梁のばね材として使用した。

実験実施：昭和49年4月10日～20日

実験場所：(株)大林組技術研究所 屋外実験場

地盤性状，加振方法，測定計器：文献1)に示す。

ダンパー材料：

水平ダンパー H-374×174×6×9 $l=1200 \times 4$ 本

上下ダンパー H-200×200×8×12 $l=4600 \times 4$ 本

ダンパー重錘 田-2000×800×35 $W=450 \text{ kg}$ /枚

2.2. 実験方法

前報告¹⁾と同じ加振装置，測定計器を使用し，次の3CASEの強制振動実験を行った。

CASE-1 ダンパー無しの場合

CASE-2 水平ダンパーを取り付けた場合


CASE-3 水平および上下ダンパーを取付けた場合尚，実験時の諸元については表一に示す。

2.3. 実験結果と考察

前回実験(上下加振)に引きつづき，今回は水平加振に対するダイナミック・ダンパーの防振性の検討を行った。

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二，図三に，このときの

地盤の応答曲線を図四，図五に示す。図二，図四は水平振動に対する防振を目的とし，水平方向のダンパーを使用したものであり，図三，図五は水平およびロッキング振動の防振を目的として，水平および上下方向のダンパーを同時に使用したものの結果である。

図二～図五はいずれもダンパーの無い場合(CASE-1)に対するその防振性を示すもので，の部分にはダンパーを取り付けることにより生じた防振効果の量とその周波数領域を示している。表一は実験結果をまとめたものである。表中，ダンパー固有振動数(f_D)は衝撃による自由振動実験より求めた。このとき水平ダンパーの減衰定数(H_D)は0.044~0.09%と非常に小さな数値を示していた。以上，円型基礎による実験結果をまとめると次のようである。

- 1) 定常振動における水平加振実験の結果，最大防振効果時の基礎の振幅は1/15~1/20に，周辺地盤における地表面の振動は1/13~1/32と効果的な減少を示し，前回の上下加振実験同様十分な防振効果が得られた。
- 2) また，防振周波数領域に関しては，本実験の場合基礎上で3.7~4.6Hzの範囲を示している。地盤上ではその効果範囲は若干大きくなる傾向がみられる。すなわちCASE-3実験の場合，地盤での防振効果領域は広範囲である。これらはダンパーと基礎の重量比およびダンパーの取り付け数と固有振動数の設定周波数により変化するものである。(文献1)参照)

3. 理論解析

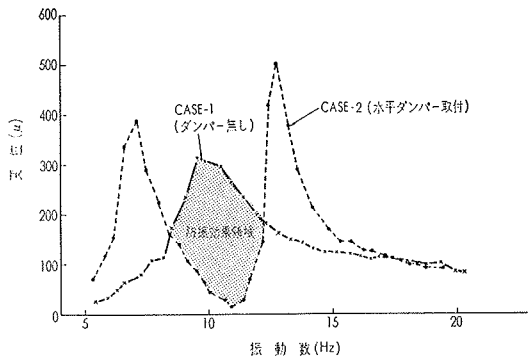
3.1. 解析方法

運動方程式は(1)式である。

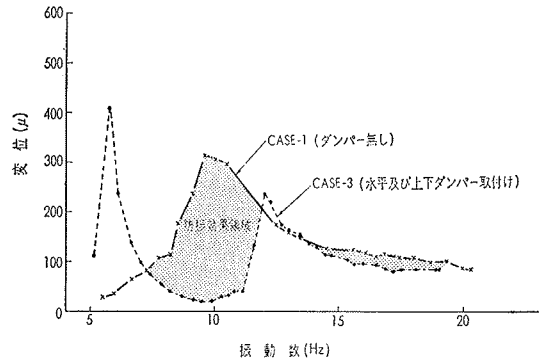
$$[A]\{\dot{Y}\} + [B]\{Y\} = \{Q\} \quad \dots(1)$$

ここで

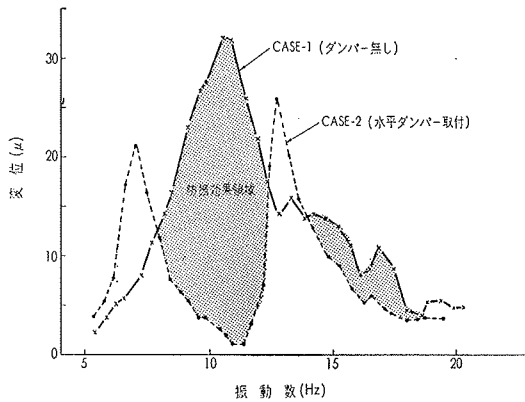
$$[A] = \begin{bmatrix} 0 & [m] \\ [m] & [c] \end{bmatrix}$$



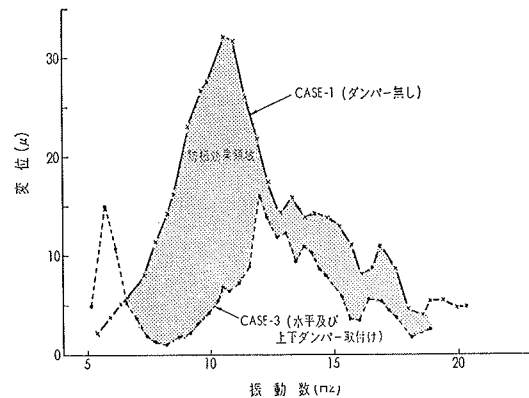
図一2 基礎変位応答曲線 (CASE-2 実験)



図一3 基礎変位応答曲線 (CASE-3 実験)



図一4 地盤上変位応答曲線 (CASE-2 実験)



図一5 地盤上変位応答曲線 (CASE-3 実験)

$$[B] = \begin{bmatrix} -[m] & [0] \\ [c] & [k] \end{bmatrix}$$

$$\{Y\} = \begin{Bmatrix} \dot{q} \\ q \end{Bmatrix}$$

$$\{Q\} = \begin{Bmatrix} 0 \\ Q \end{Bmatrix}$$

[m]: 質量マトリックス [k]: 剛性マトリックス

[c]: 減衰マトリックス

{q}: 変位ベクトル {Q}: 外力ベクトル

を示す。

D-Dを用いた基礎に関する振動系の減衰項は、内部減衰と外部減衰との組み合わせで決められず、非比例、減衰型の減衰項になる。そこで各部減衰あるいは履歴減衰を有する運動方程式に関する解法である複素平面を考慮した複素固有値解法、複素応答解法を採用して(1)式を解く。

3.2. プログラム概要

計算プログラムの概要は、次のとおりである。

振動計算およびD-D用鋼材の応力計算に関する全体のフローを図一6に示す。外力項は機械が安定した振動数で稼動する場合と、偏心 Mass を有する場合である。複素固有値、複素応答計算プログラム部分は、

種々の構造モデルについて共通に使える搬用性をもたせている。すなわち、メインプログラムは以下に述べる3つのケースについて作成した。

3.2.1. 2 質点・2 自由度系プログラム これは(1)式の最も簡単な場合である。D-Dの防振効果に関する定性的な検討を簡便に行えるものであり、また同時に上下動の卓越する基礎および、床板の防振等を行う。

3.2.2. 水平動防振基礎プログラム 地盤、クイに支持された基礎の水平振動を1~4個のD-Dを用いて防振する場合に用いる。D-Dの使用する個数は、複数種の外力振動数に対処する場合あるいは、外力振動数が一定でない基礎の防振周波数範囲を拡げたい場合に応じて適当に決められる。

3.2.3. 水平・上下両用防振基礎プログラム 基礎の振動においてロッキング動も大きい場合に、基礎端の上下、水平成分を同時に防振する場合に適要され、基礎の支持形式、D-Dの個数は前者と同一である。

3.3. 解析結果

3.1.で述べた「複素解析法」を用いて、円型基礎実験の解析を行った。解析結果を図一7~図一8に示す。図一7はCASE-2実験に対するもので、図一8~

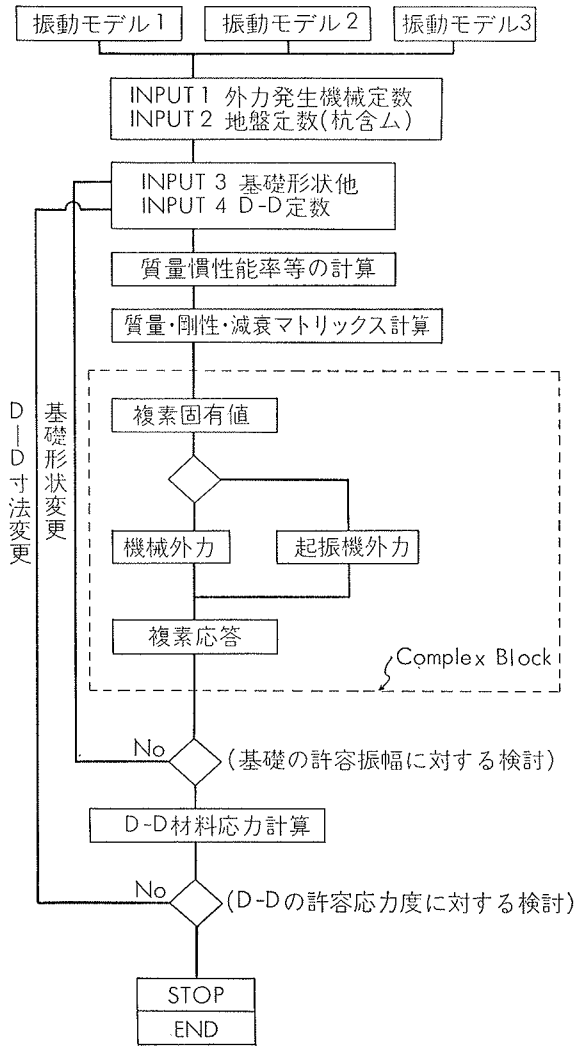


図-6 振動計算のフローチャート

図-9はCASE-3実験に対する基礎上端の水平および上下成分の共振曲線を示している。これらは1つのピークを有するD-D取り付け前の基礎の応答曲線と、2つのピークを有するD-D取り付け後の応答曲線を比較している。図-7の点線で示されるP、M曲線は各々外力 $P \cdot e^{i\omega t}$ と $M \cdot e^{i\omega t}$ に関する応答であり、これらの位相を考慮して合計したものが実線で示される解である。図-10～図-12は位相遅れの計算結果である。図-10はCASE-2実験に、図-11、図-12はCASE-3実験に対応し、それぞれ外力 $P \cdot e^{i\omega t}$ によるものと $M \cdot e^{i\omega t}$ によるものを示す。(図-13参照)

D-Dに関する位相曲線の特徴は、防振される応答成分の位相遅れが0。ラジアンの方へ落ち込む現象(谷が生ずる)であり、図-10においては11Hz附近に1つの谷が生じ、図-11～図-12の場合は、9Hz～10Hzと12Hz弱～13.5Hzとに2つの谷があらわれている。解析の結果、先の解析方法で述べた如く非比例減衰

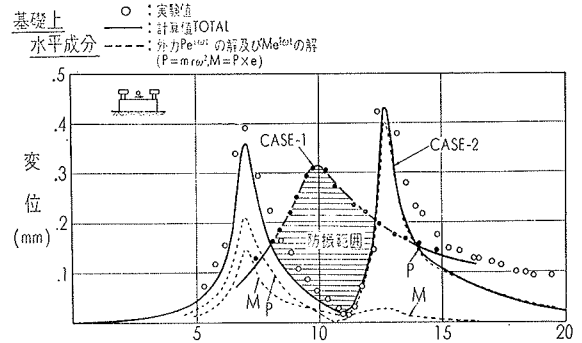


図-7 CASE-2 実験値との対応図

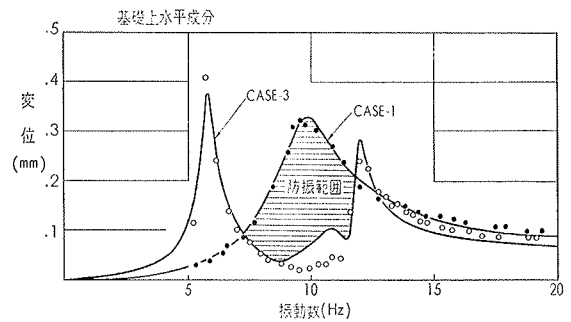


図-8 CASE-3 実験値との対応図

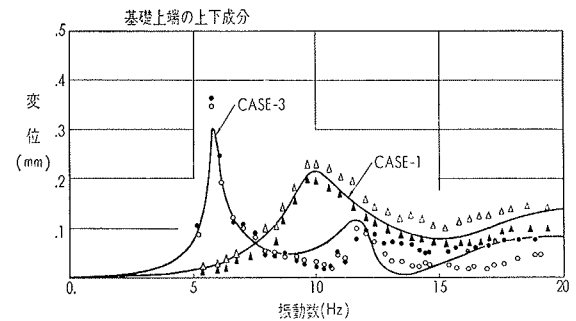


図-9 CASE-3 実験値との対応図

型の応答解析は、加振外力に対する各応答成分の位相遅れが1次共振点を過ぎてからじょじょに大きくなるため、位相遅れを考慮して加え合わせた応答量を求めると、実測応答値によく対応してくる。

3.4. D-D方式によるコンプレッサー基礎の試算例

コンプレッサーはその基礎に1次と2次の水平力と回転力が同時に作用する。今、このような基礎を対象として、3.2.3.のプログラムを用い試算してみた。

3.4.1. 機械および基礎の諸定数

機械重量：150 ton

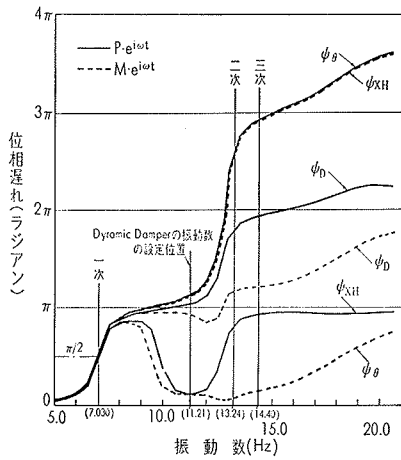


図-10 位相遅れ (CASE-2)

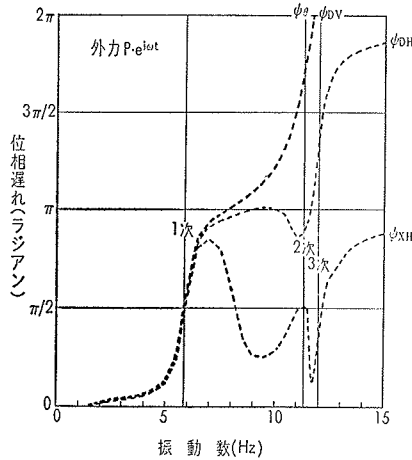


図-11 位相遅れ (CASE-3)

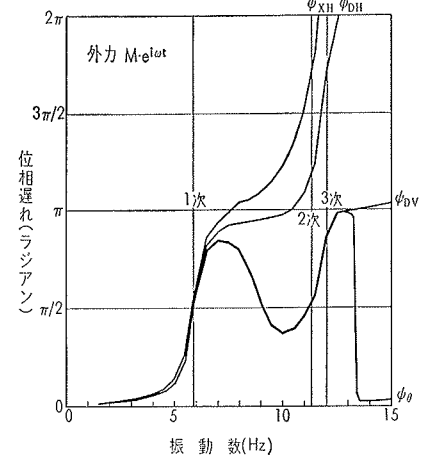


図-12 位相遅れ (CASE-3)

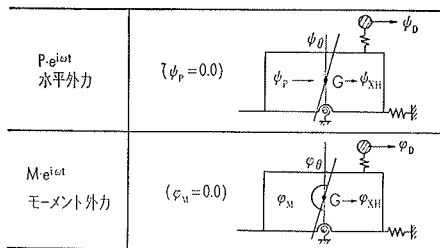
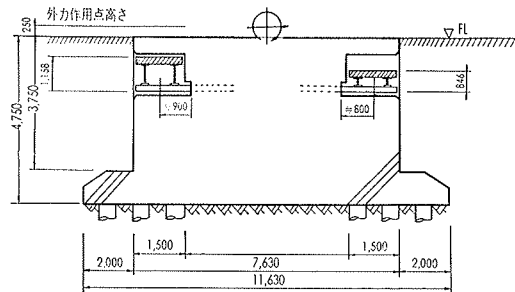
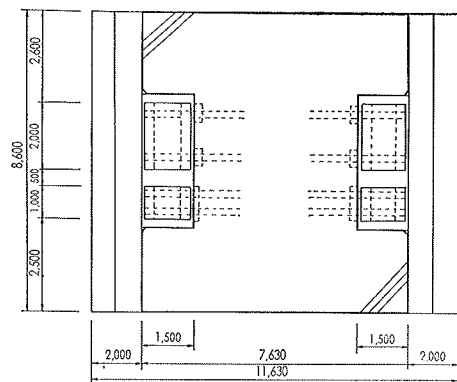


図-13



断面図



平面図

図-14 機械基礎形状図

機械振動数：1次=200rpm 2次=400rpm

外力：1次水平力=0.0 2次水平力=2.00 ton

1次垂直隅力=20.0t·m, 2次垂直隅力=0.0

外力作用点：基礎上端中央+25cm (仮定)

その他、機械サイドから要求される基礎形状は、

7.630m×8.600m×3.750m (重量約550 ton)

である。そこでこの基礎に次の寸法を有する基礎底盤

11.630m×8.600m×1.000m (重量240 ton)

を付加し、図-14に示す如き全体基礎 (総重量790 ton)

とする。また、D-Dの取り付けに関しては、図示さ

れる如く1次用 (ダンパー重量 5ton×2個) と2次用

(3 ton×2個) のダンパーを同時に取り付けしており、

ダンパーと基礎の重量比は約1/50である。

3.4.2. 地盤のばね定数 基礎には PC 杭 $\phi 300$ を

40本用いるものと仮定して、地盤係数から求められる

ばね定数に加算した。

水平ばね定数：地盤係数 $k_H=2.0 \text{ kg/cm}^3$

杭1本当りばね定数

$K_H=9.0 \times 10^3 \text{ kg/cm}$

鉛直ばね定数：地盤係数 $k_V=0.0$

杭1本当りばね定数

$K_V=2.0 \times 10^5 \text{ kg/cm}$

減衰定数：スウェイ成分 $H_H=0.20$

ロッキング成分 $H_\theta=0.10$

D-D水平成分 $h_H=0.001$

D-D鉛直成分 $h_V=0.01$

3.4.3. 計算結果

a) D-D を取り付けない上記基礎の基礎上端中央における変位量は下表の如く58.0 μ である。

外力の種類		変位量	合計
1次外力	回転隅力	20.6 μ	58.0 μ
2次外力	水平力	37.4 μ	

b) D-D を取り付けた上記同一基礎の変位量は、下表の如く 2.94μ である。

外力の種類		変位量	合計
1次外力	回転偶力	1.96μ	2.94μ
2次外力	水平力	0.98μ	

以上の結果、D-D方式により振幅量を1/19.7に減少することができる。また、従来の設計法により前述の基礎の振動量を 3μ 程度にするためには、基礎底盤の一辺を35m以上にしなければならず、機械の大きさに比し過大な基礎になり、経済的に不可能であったが、当防振方法の場合、基礎形状を最小限に修めることが出来、かつ従来にもまして基礎の振動量を小さくすることができる、顕著な防振性を有するものであることが確認された。

尚、D-D材料としてのH型鋼材は、その振幅量が上下、水平両成分とも2mm以下であり、繰返し回数による疲労を考慮し、鋼構造新規準⁴⁾の許容応力度を満足する鋼材が選択されるものである。

4. むすび

D-D方式による防振は、実用化のために次の(i)~(ii)に関する検討が必要であろう。

(i) D-D方式の防振効果性能

(ii) 在来の振動計算に基づく基礎にD-D方式を採用した場合、基礎形状が小さく出来るか

(iii) D-Dを構成する材料および取付け方法が簡単で、安価であるか

今日まで模型実験および既設基礎における具体例を試算した結果、

(i)に関しては、在来基礎²⁾³⁾にD-D方式を採用すると1/2~1/35と効果的な振幅の減少が見られる。特に周波数変動の少ないコンプレッサー、ふるい機械に対しては1/20以上の顕著な防振が可能である。そのため振

動公害で問題となる低周波成分での防振に関しては有効な防振方法となる。

(ii)に関しては、3.3.の試算例で示した如く機械の設置台とD-D材料の取り付け台とだけのおもいきって小さな基礎にすることが可能となる。したがって従来の基礎建設費が大幅に低くなる。

(iii)に関しては、我々が研究初期の段階から念頭においていた問題である。そのため現時点ではD-Dを構成する「おもり」は比重の大きな鉄板、「弾性材」は減衰の小さな普通鋼材(型钢)としている。この中で問題となるのは鉄板おもりの重量がどの程度必要かということであるが、数多くの試算の結果、周波数変動の少ない機械基礎の場合は基礎全重量の約1/50以下でよいこと、ただし防振周波数範囲を拡く必要とする場合は1/20程度ある方が望ましいことが云える。

以上の結果、D-D方式の防振は十分実用に供することが明らかである。今後は、D-D方式を実大基礎に採用し実用性を確認すると共にD-Dを構成する材料の開発等が研究課題となるであろう。

謝辞

本報告を作成するにあたっては、日本検査コンサルタント(株)西村佳春氏の尽力に負うところが非常に多くここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 渡辺, 島口, 寺村, 此上: ダイナミック・ダンパーに関する基礎的研究, 大林組技術研究所報No.10, 1975
- 2) 渡辺, 島口, 寺村: 某機械基礎に関する防振基礎の試案, 技研報告 No. 75-10 1975
- 3) 渡辺, 寺村: ダイナミック・ダンパーに関する実験的研究, 技研報告 No. 82411-3, 1975
- 4) 日本建築学会: 「鋼構造設計規準」昭和48年5月