

ダイナミック・ balancer に関する基礎的研究 (その 4)

—設備機械が加振する 4 層建物の防振実験報告—

渡辺 清 治 寺 村 彰
田 口 彰 宏 末 松 清 治
(福岡支店 建築部) (福岡支店 建築部)

Basic Studies on Dynamic Balancer (Part 4)

—Experiments of Dynamic Balanced Methods
on 4-Storeyed Structure Excited by Machinery—

Seiji Watanabe Akira Teramura
Akihiro Taguchi Seiji Suematsu

Abstract

This paper describes the response reduction tests of the Dynamic Balanced (D.B.) Method which has been developed by the authors and has been applied to machinery foundations, etc., for the vibrations of an actual 4-storied steel structure (16 m×46 m×12 m height) under dynamic forces created by machinery in operation.

Prior to the tests, the vibration amplitudes were measured to be about 600 microns on the second floor and 1,500 microns on the R-th floor. The authors made a plan for reduction to 100~150 microns on each floor for safety of industrial equipment on the floor, and carried out the plan by means of setting a 10-t D.B. apparatus on the second floor and an 0.7-t D.B. apparatus on the R-th floor to make reductions for the upper part of the structure.

As a result, the amplitudes were reduced to about 110 microns on each floor of the structure and the analytical calculations had good correlations with test results although there were dynamic interferences between the 10-t D.B. and 0.7-t D.B. method systems.

概 要

本報告は、機械振動に起因する基礎などの防振方法の一つとして開発してきたダイナミック・ balancer 防振装置 (D. B. 装置) を基準階寸法 16 m×46 m、高さ 12 m の 4 層 S 造建物に適用した実施例について述べる。

この建物は対策前の振動測定の結果、2 階で約 600 μ 、R 階で約 1,500 μ の比較的大きな振動が生じていたため、防振目標値は配管などの設備機器対策上また作業環境の改善のために各階共、100~150 μ に設定された。防振対策はまず建物全体の振動を 1/4 以下に減振するための約 10 t の D. B. 装置と、次に R 階の部分構造を防振するための約 0.7 t の D. B. 装置を取付ける方法で順次実施した。

この結果、二つの D. B. 装置は動的に相互に影響をおよぼし合い、特に重量の小さな 0.7 t D. B. 装置の防振性状に強く影響が現われたが、各階共約 110 μ に減振して初期の防振効果の目標が達せられた。また解析結果も測定値との対応が確認された。

1. 序

工場内の建物・機械基礎の振動に関する防振対策の方法を研究することは、近年頻発する振動公害と製造設備機械に対する振動障害などを軽減あるいは防止する上で重要な課題である。この種の研究の一つとして振動体の振動エネルギーを吸収するダイナミック・ balancer 防振

装置 (以下 D. B. 装置と呼ぶ) の開発を今日まで実施して主に機械基礎、RC 床版の防振対策に適用してきた^{1), 2), 3)}。

本報告は、設備機械により振動する比較的大きな 4 層建物で D. B. 装置による防振工事を実施したのでこの方法、測定結果および解析結果について述べる。

2. 建物概要

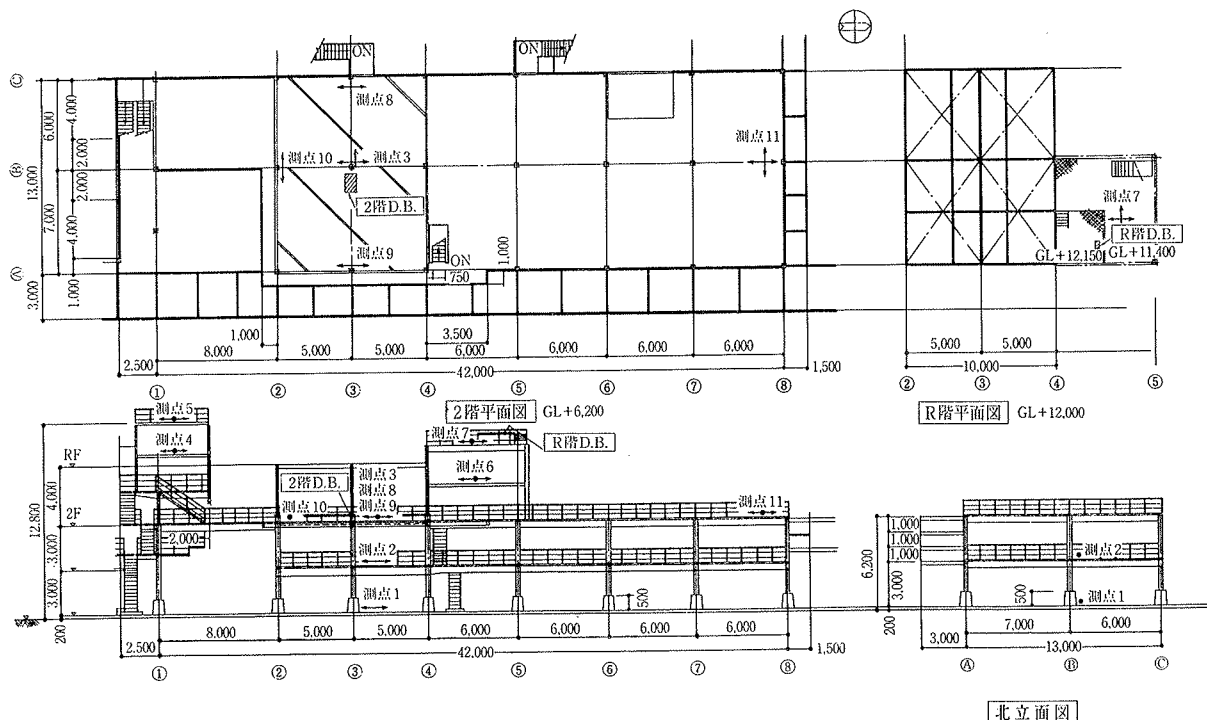


図-1 建物概要

建物形状は図-1に示す。建物はS造、平面寸法16m×46m、M2階、2階、MR階とR階の4階建、最高高さ約12mである。各階の床版は図-1にて②④通り間のM2階と2階が厚さ200mmのRC板でその他各所の吹抜け部分を除いて薄い鉄板床である。尚、この建物は既設建物であり、①通り側には1層の付属建物が構造上つながっている。

3. 対策前の振動調査

3.1. 調査の目的と方法

防振計画に先立って対策前に建物の振動性状を調べるためまた計画に必要な資料を得る目的で次の様な振動測定を実施した。測定はまず操業中に図-1に矢印で示す測定1~11で実施し、変位量、振動数、変形性状などを調べた。次に機械整備の操業停止中に代表測点で常時微動測定を行ない、建物の固有振動数と固有振動形また人力加振方法などで減衰定数を調べた。これらの測定に当っては動コイル形固有周期2秒変位計(国際機械)、14chデータレコーダ(TEAC)、F.F.T.アナライザ(model 660A, NICOLET)などの計器を使用した。

3.2. 測定結果

操業中の建物の振動は、約40秒から100秒の周期間隔で変化するビート振動であり、その短周期成分の振動数は、図-2の解析例に示される通り2.75Hzである。この振動数に対応する機械は十数台の内、2階③④通り付近の165 r.p.m.の特定の2台であることが判った。その

他の機械は、20Hz以下の範囲でこの解析結果に顕著に表われていない。建物の最大変位量は時期により若干異なる傾向がみられたが、測定期間中の最大値は後記する表-

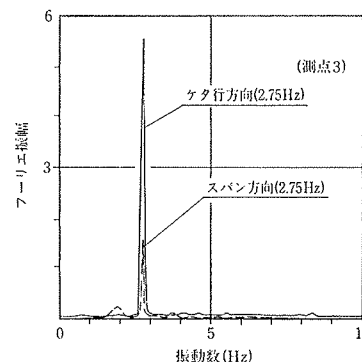


図-2 操業時の建物振動数解析結果

1の対策前の欄に示す通り、ケタ行方向が2階で約650 μ 、R層で約1,500 μ 、スパン方向が2階で約90 μ 、R層で約250 μ である。建物の振動性状はこのようにケタ行方向の変位量が多いこと、同一階の同一方向の変位量がほぼ等しいこと、また波形が同相であることなどから、ケタ行方向の並進動が主たる振動であると判断された。

建物の固有振動に関しては、常時微動測定の振動数解析結果図-3から基本振動数がケタ行方向で3.10Hz、スパン方向で2.90Hzであり、1次減衰定数($h=C/C_c$)は自由振動波形の対数減衰率から $h=0.004\sim 0.008$ の範囲で得られ比較的小さな値であった。

以上の結果、建物は2階に設置されている165 r.p.m.(2.75Hz)の2台の機械が加振源になりケタ行方向の1次固有振動が強く刺激されていることが明らかになった。

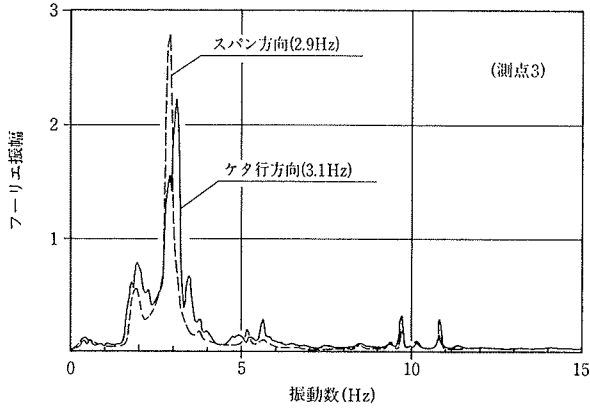


図-3 建物の常時微動振動数解析結果

4. 防振対策

4.1. 防振目標値

現状にて2階以上に据えられている機器・配管・夜間照明灯の鉄柱などがよく揺れ、また建物内の作業において若干不安を感じる程の振動であることから、防振目標値は機器などの揺れが目視上小さくなり、人体感覚上も小さく感じる程度を目標として2階床の防振率を約 $\frac{1}{4}$ 以下、R階のそれを約 $\frac{1}{10}$ 以下とした。

4.2. 防振方法

防振対策の具体的方法としては、(イ)建物の剛性を高めて共振域から離す方法、(ロ)D.B.防振装置を取付ける方法とが考えられ、両者の検討が行なわれた。この結果、前者は配管類が多く建物内で火気使用をなるべくさけたい

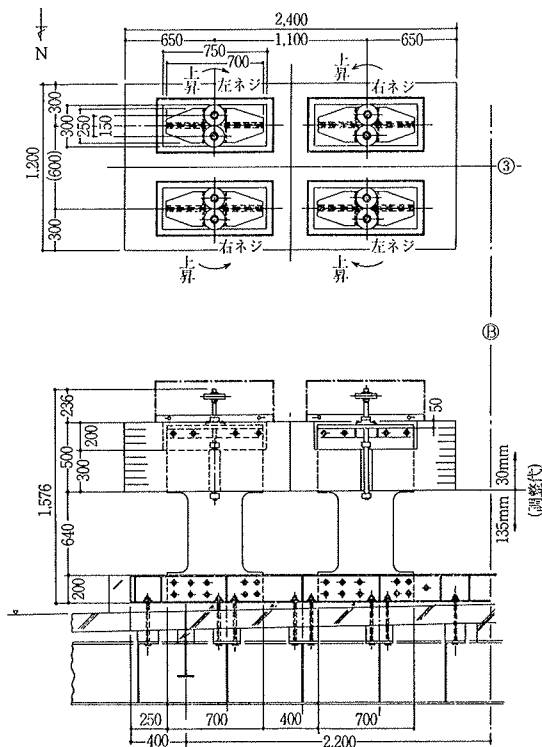


図-4 2階 D.B. 装置の概要

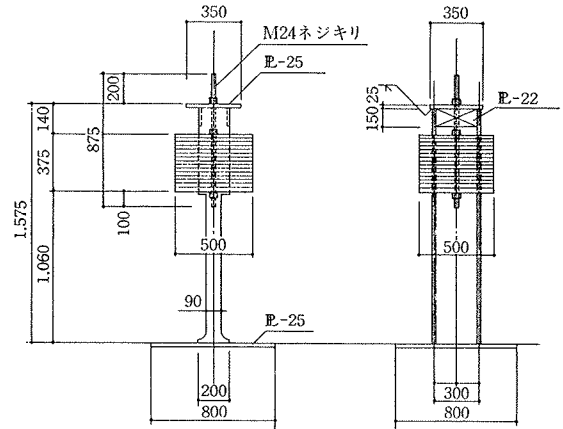


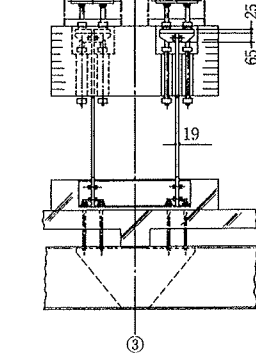
図-5 R階 D.B. 装置の概要

などのために工事に手間がかかるのに対し、後者は屋外で防振装置を製作して現地へ搬入し取付ければよいことまた費用の面でも有利であると判断され、後者の方法が採用された。

4.3. ダイナミック・バランス防振装置

D.B. 装置は、建物のよく揺れている場所に取付けられて建物の振動数に同調すると建物の振動エネルギーを吸収し防振効果を発揮するものである。今回、建物の主振動がケタ行方向の並進動であることから、加振源の2階床③④通り柱付近にケタ行方向に揺れる D.B. 装置(2階 D.B. と呼ぶ)を1個取付け、さらに、この装置だけでは上層階の防振率が不足するためにR階床④⑤⑥通り間にも、もう一つの D.B. 装置 (R階 D.B. と呼ぶ)を取付ける計画を立てた。その場所は図-1 に示す。

2階 D.B. 装置の概要は図-4 に示す。D.B. 装置はおもり材料、ばね材料と振動数調整機能などで構成され、本例ではおもり材料が幅 1,200 mm、奥行 2,400 mm、厚さ 500 mm の積み重ね鉄板であり重量は 10.08 t である。ばね材料は高さ 640 mm の 4 枚の鉄板である。振動数調整は最上部のナット 4 か所を廻らすことによってギアとネジボルトが回転しておもり材がばね材鉄板に沿って上下に移動する仕組みを利用している。



R階 D.B. 装置の概要は図-5 に示す。おもり材料は幅と奥行とが 500 mm、厚さ 375 mm の積み重ね鉄板で、その重量は 0.73 t である。ばね材は高さ 1,060 mm の 2 枚の鉄板であり、振動数調整はおもり材中央のネジボルトのナットを廻らす

方法と同様に行なう。

5. 対策後の振動調査

5.1. 2階 D.B. の防振効果

D.B.装置の取付け工事が実施されて後、操業状態で、まず2階 D.B. の振動数調整作業を実施した結果、ばね材高さが 639 mm、振動数 2.75 Hz 付近で最大防振効果が得られることが判った。そこで対策前と同じ測定場所、2D.B. 取付け対策後の確認測定を実施した。

この測定結果は対策前と比較して表-1 に示す。

また代表的なケタ行方向の変位測定波形を図-6 に示し、2階床中央測点3のケタ行・スパン両方向のビート変位波形約1周期分を合成して描いた振動軌跡を図-7 に、さらにケタ行方向の変位波形のフーリエ振幅解析結果を図-8 にそれぞれ対策前と比較して示す。

以上の結果、2階 D.B. の防振効果は建物内のすべての場所に対してほぼ均等にケタ行方向が約1/6に減振し、それに伴ってスパン方向も自然に約1/4に減振し、2階以

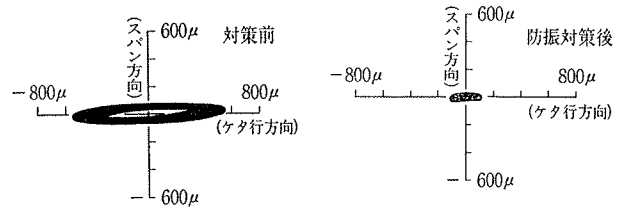


図-7 対策前・後のX-Y振動軌跡の比較(測点3)

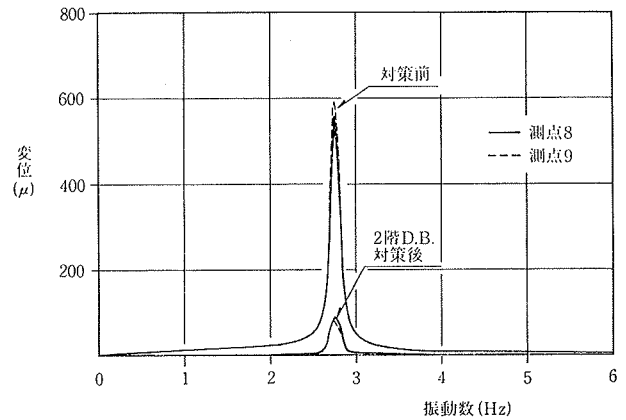


図-8 対策前・後のフーリエ解析振幅の比較

方向	階数	測点番号	対策前 (μ)	2D.B.対策後 (μ)	防振効果		
ケタ行方向	1階	1	30	5	1/6.0		
	M2階	2	215	36	1/5.5		
		3	659	101	1/6.5		
	2階	8	659	98	1/6.7		
		9	675	107	1/6.3		
		11	680	—	—		
	①通側	MR階	4	1398	124	1/11.3	
R階		5	1500*以上	250	1/6以下		
⑤通側		MR階	6	1135	180	1/6.3	
		R階	7	1500*以上	250	1/6以下	
スパン方向	2階	3	89	—	—		
		10	91	22	1/4.1		
		11	66	18	1/3.7		
	①通側	MR階	4	80	27	1/3.0	
		R階	5	227	—	—	
		⑤通側	MR階	6	72	19	1/3.8
			R階	7	271	—	—

*測定器の許容範囲1500μ

表-1 対策前と2階 D.B. 装置取付け後の測定結果

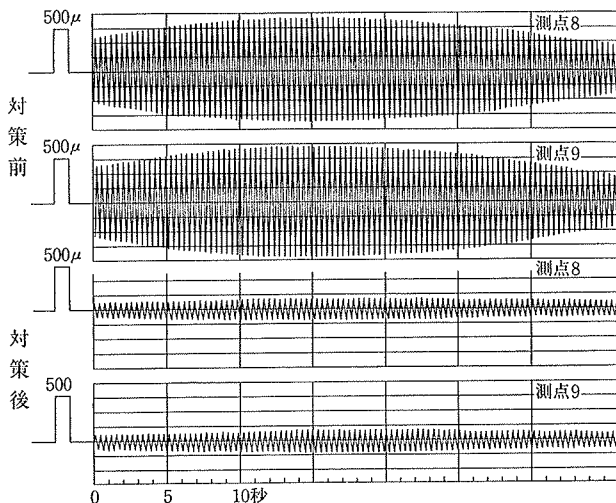


図-6 対策前・後の変位波形の比較

下の階においては配管・機器の揺れがおさまリ、体感上も振動が無くなった。

5.2. R階 D.B. 装置の防振効果

R階の振動は、2階 D.B. 装置の防振機能が十分発揮された結果、約1/6に減振したが、量的には表-1 に示される通り 250 μであり、未だR階から立上っている照明灯の鉄柱が周期的に揺れ、振動を若干感じる状態であった。

そこでR階 D.B. の調整を実施したところ、ばね材高さが1,060 mm、振動数 2.85 Hz 付近で照明灯鉄柱の揺れが完全に止まることが確認され、R階の変位量は約 110 μに減振した。この状態の建物全体の確認測定は実施できなかったが建物内でさまざまな観察を行ない特に下層階での変動は認められなかった。

以上の2階 D.B. とR階 D.B. の調整作業の結果、建物内すべての機器・配管・照明灯の柱あるいは建物の個材などの揺れは目視上無くなり、各所で静止して観察しても体感も無くなり、さらに周辺の他の建物の振動も小さくなるなど初期の目標通りの十分な防振効果が得られた。

6. 解析

6.1. 1質点系理論解析

対策前の調査結果によると、加振振動数 (2.75 Hz) と建物の基本振動数とは近いためほとんど基本振動が刺激されていると考えられる。従って建物は各次の独立な振動形に分解したときの1次の方程式に還元して近似的に

表わすことができる。

$$m_1\ddot{x}_1 + c_1\dot{x}_1 + k_1x_1 = -P \cdot e^{i\omega t} \quad \dots\dots\dots(1)$$

ここで、 m_1 、 c_1 、 k_1 はそれぞれ1次有効質量、減衰係数、ばね定数、 P は外力の大きさ、 p は加振振動数である。

この1質点系建物に1個のD.B.装置(1質点1自由度系)が連成すると運動方程式は(2)式である。

$$\begin{aligned} m_1\ddot{x}_1 + k_1x_1 + k_2(x_2 - x_1) + c_1\dot{x}_1 + c_2(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) &= -P e^{i\omega t} \\ m_2\ddot{x}_2 + k_2(x_2 - x_1) + c_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) &= 0 \quad \dots\dots\dots(2) \end{aligned}$$

ここで、 m_2 、 k_2 、 c_2 はD.B.装置の質量、ばね定数と減衰係数である。(2)式の解は(3)式、(4)式で仮定し、その

$$x_1 = X_1 \cdot e^{i(\omega t - \phi_1)} \quad \dots\dots\dots(3)$$

$$x_2 = X_2 \cdot e^{i(\omega t - \phi_2)} \quad \dots\dots\dots(4)$$

ベクトル量 X_1 、 X_2 は $\nu_j^2 = k_j/m_j$ 、 $c_j = 2 \cdot h_j \nu_j m_j$ 、 $j=1, 2$ また建物とD.B.との質量比 $\mu = m_2/m_1$ 、固有振動数比 $f = \nu_2/\nu_1$ 、強制振動数比 $g = p/\nu_1$ を用いて(2)式に代入して導びくとそれぞれ(5)式、(6)式になる。

$$X_1 = (P/k_1) \cdot \sqrt{\{(f^2 - g^2)^2 + 4h_2^2 f^2 g^2\}}/A \quad \dots\dots\dots(5)$$

$$X_2 = (P/k_2) \cdot \sqrt{(f^2 + 4h_2^2 g^2) \mu^2 f^6}/A \quad \dots\dots\dots(6)$$

ここで係数 A と A に係る B 、 C 、 D は次式である。
 $A = \{(1 - g^2)(f^2 - g^2) - B \cdot g^2\}^2 + (C - Dg^2)^2 \cdot g^2$
 $B = \mu f^2 + 4h_1 h_2 f$
 $C = 2h_1 f^2 + 2h_2 f$
 $D = 2(1 + \mu) h_2 f + 2h_1 \quad \dots\dots\dots(7)$

また、(3)式、(4)式の位相解 ϕ_1 、 ϕ_2 は加振正弦波の位相を基準にして(8)式、(9)式である。

$$\tan \phi_1 = \frac{(f^2 - g^2)E - 2h_2 f g F}{(f^2 - g^2)F - 2h_2 f g E} \quad \dots\dots\dots(8)$$

$$\tan \phi_2 = \frac{\mu f^4 E - 2\mu h_2 f^3 g F}{\mu f^4 F - 2h_2 f g E} \quad \dots\dots\dots(9)$$

ここで
 $E = 2g \{(h_2 + h_1 f) f - (h_1 + \mu h_2 f + h_2 f) g\}$
 $F = (1 - g^2)(f^2 - g^2) - (\mu f + 4h_1 h_2) f g^2 \quad \dots\dots\dots(10)$

である。
 防振効果は、建物だけの(1)式の周知の解とD.B.装置が取付いた場合の建物側の解(5)式とを対比して得られる。解(5)式では P/k_1 (静的変位) と増幅率を表わす平方根との積で表わしているの、周知の1質点系の増幅率と対比して防振効果が予測される。また、防振効果の最も良い状態はD.B.装置の単独の振動数(ν_2)が加振振動数(p)に同調するときであり、近似的にはほぼ $\nu_2 \doteq p$ の関係が成り立つ。特に、各部減衰定数を全て零と仮定すると $\nu_2 = p$ の条件で(5)式の建物変位ベクトル(X_1)が零となり、建物が静止することが判り、またD.B.防振方法の原理として理解される性質であろう。

この建物が1質点系で表わされる理論解(5)式は今回、

最初に調整を実施した2階D.B.装置の防振効果を予測するときに適用出来るものである。(1)式で述べた1次有効重量は、各階の建物重量(表-2)と常時微動多点同時測定波形のフーリエ振幅から求めた1次固有振動形(表-3)から約420tである。建物の1次減衰定数は測定結果から0.008とする。

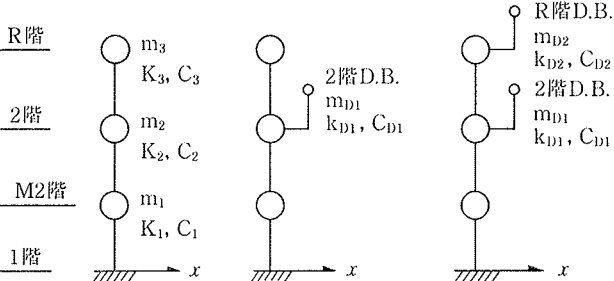
建物だけの場合と2階D.B.装置が取付いた場合とを増幅率で比べると、前者は約5倍、後者は質量比 $\mu = 10.08/420 = 0.024$ 、 $\nu_2 = P = 2.75$ として約0.93倍になり従って $0.93/5 \doteq 1/5.3$ の防振効果が予測され、測定結果の約1/6に対応する。

6.2. 多質点系理論解析

D.B.防振装置が複数個同一建物に取付くと加振振動数近傍に多くの固有値が生じて相互に干渉し合うことになり応答が複雑になる。そこで解析は多質点系の連成で実施する必要がある。本報では建物も図-9の様に3質点系で表わし、解析は、D.B.装置の調整順に(イ)建物だけの場合、(ロ)2階D.B.装置の調整を行なう過程、(ハ)2階D.B.装置の調整が完了して最大防振効果を発揮している状態で、R階D.B.装置の調整を行なう過程について実施した。

諸定数は表-2に示す。尚、D.B.装置のばね定数は最終値を示し、減衰定数は測定値の大きい方の値である。

加振力は、大きさが対策前の建物変位量の解析および2階のD.B.装置の実測変位から(6)式で逆算する方法もありこれらの方法で検討した結果、 $P \doteq 1.5t$ 程度に推定し正弦波外力とする。地盤は卓越振動数が加振振動数および建物固有振動数から離れた1階床の変位量が相対的に小さいことから解析は1階固定条件にしている。



(イ)建物、(ロ)建物・2階D.B.、(ハ)建物・2階、R階D.B.

図-9 解析用振動モデル図

建物・D.B.	重量 (t)	ばね定数 (t/cm)	減衰定数 (C/Cc)
R.D.B.	0.73	0.234	0.005
建物R階	20.	13.52	0.008
2D.B.	10.08	3.095	0.010
建物2階	260.	210.24	0.008
建物M2階	220.	358.10	0.008

表-2 解析用諸定数

固有値の計算結果は、表-3に示す。

応答計算結果は、(イ)の場合が表-4の対策前の欄に示す。(ロ)の場合は調整過程の解析として図-10に横軸に2階D.B.の振動数、縦軸に各質点の変位をとり示す。図中の初期値とは(イ)の場合の計算値であり、○印はR階、●印は2階の実測値である。図-10より最大防振効果は2階D.B.の振動数が2.76 Hzで得られ、このときの計算結果は表-4の(ロ)の欄に示す。(ハ)の場合は図-11に横軸にR階D.B.の振動数をとり同様に示す。この図-11の初期値は上記(ロ)の計算値である。図-11より(ハ)の場合の最大防振効果はR階D.B.が2.83 Hzで得られる。

解析は以上の通り実際のD.B.装置調整順に実施し、最終的に2階で1/6.3, R階で1/12の防振効果が求められ、測定値とほぼ

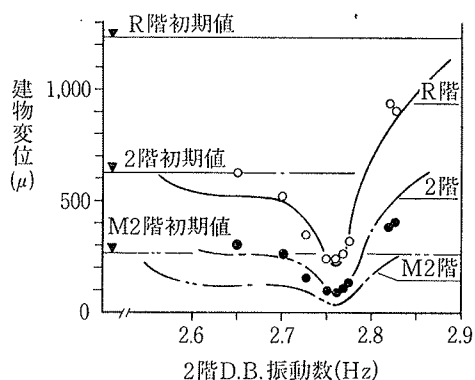


図-10 2階D.B.調整時の建物変位

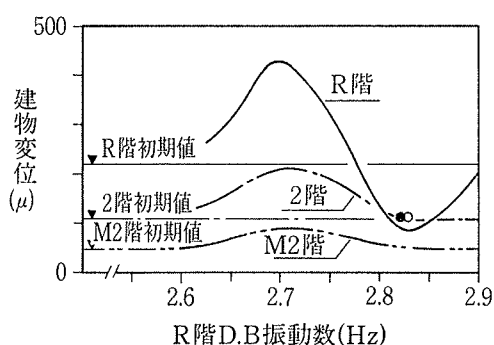


図-11 R階D.B.調整時の建物変位 (2階D.B.最適状態)

固有値		測定値	計算値		
		対策前	(イ)対策前	(ロ)2D.B.取付後	(ハ)2D.B.とR.D.B.取付後
固有振動数 (Hz)	1次	3.10	3.10	2.65	2.642
	2次	5.50	4.40	3.21	2.765
	3次	9.65	8.60	4.41	3.252
	4次			8.57	4.446
	5次				8.568
1次固有振動形	R.D.B.				46.07
	R階	5.38/M2階 3.60	5.38	4.15	5.32
	2D.B.			32.70	28.52
	2階	2.30	2.30	2.41	2.41
	1階	1.00	1.00	1.00	1.00

表-3 固有値の測定値と計算値

	(イ) 対策前		(ロ) 2D.B.取付後		(ハ) 2D.B.とR.D.B.取付後	
	測定値 (μ)	計算値 (μ)	測定値 (μ)	計算値 (μ)	測定値 (μ)	計算値 (μ)
R階	約1500	1211	約250	209	約110	102
2階	" 650	607	" 110	97	" 110	115
M2階	" 215	257	" 36	41	" 40	51
R.D.B.					11000	8322
2D.B.			2500	3080	2500	3170

表-4 建物・D.B.の変位測定値と計算値の比較

対応した。

7. 結 び

建物はビート振動をして2階で約600 μ, R階で約1,500 μ生じていた。防振対策に当り目標値を各階共100~150 μに設定しダイナミック・バランス防振装置を2階とR階とに取付けた結果、重量の小さなR階装置の振動数調整過程において解析結果にも見られる通り動的干渉現象が生じたが、最終的に約110 μに減振し十分な防振効果が得られた。

従来、D.B.装置は重量の小さな機械基礎などに適用してきたが、このような建物にも10t程度以下のD.B.装置を組み合わせる適用出来ることが明らかになった。

工事に関しては、前もってD.B.装置を作っておけば現場で実施する取付けおよび調整作業の実質所要時間は極めて短い。また採業に対する障害にならないこと、などなどの利点がより明らかになった。

謝 辞

この防振工事に当り当社工事事務所林田友八所長、野田征義職員、また測定に際して日本検査コンサルタント(株)西村佳春氏、伊波弘彰氏、ナショナル電設(株)宮地繁吉氏他皆様の御協力を得ました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 渡辺, 島口, 寺村: 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), pp. 30~34
- 2) 渡辺, 島口, 寺村: ダイナミック・ダンパーに関する基礎的研究(その2), 同上, No. 12, (1976), pp. 57~62
- 3) 渡辺, 島口, 寺村: ダイナミック・バランスに関する基礎的研究(その3), 同上, No. 14, (1977), pp. 34~38