

交通振動に起因する建物振動のTMD制振

此 上 典 文 安 井 譲
吉 田 治

Control Effects of Tuned Mass Damper for Building Vibration Caused by Traffic Loads

Norifumi Konoue Yuzuru Yasui
Osamu Yoshida

Abstract

A Tuned Mass Damper (TMD) device was installed on top of a steel-framed building for the purpose of reducing building vibration caused by traffic loads. This paper reports that the TMD device was capable of reducing vibrations of the building in two horizontal directions at the same time, and the reduction ratio has been made clear using several methods. An effective evaluation method is especially proposed to equally compare amplitudes obtained in different measurement cases such as in controlled states using the TMD and non-controlled states. It is also shown that the vibrational amplitude of the building is reduced to about 50% on time history waves and about 30% on the peak of their Fourier spectra.

概 要

本論文は、交通振動を対象とした Tuned Mass Damper (TMD) 方式による鉄骨造 3 階建物の制振に関して、① 1 基の TMD 装置により建物水平 2 方向の振動が低減できること、② TMD 装置による制振効果の評価法として通常の応答倍率や伝達関数による評価の他に建物の応答振幅そのものに関して評価できる手法などを示した。交通振動のように非定常な入力振動の場合には計測時刻の異なる制振時と非制振時の実測波形を直接比較して制振効果を評価することは適切ではない。本論文の提案する応答振幅評価手法は、制振時の入力波から非制振の場合の建物応答振幅を実測データから逆算する方法であり、制振時の建物実測データと直接比較して制振効果が評価できることが特徴である。各手法による結果の総合評価から、TMD 装置により時系列波形では約 50%、スペクトルピーク値では約 30% に振動が低減されていることを確認した。

1. はじめに

近年、建物の高付加価値化が求められるようになってきた。日常生活を対象とした居住環境の向上などもその一例であり、高層建築物の風振動に対する制振事例が多々報告されている。一方、中低層建物においても各種交通機関から発生する地盤振動などを対象とした制振事例もいくつか見られるようになってきている。ところで風振動や交通振動などの非定常外力に対する制振効果を評価する場合、計測時刻の異なる制振時と非制振時において共通する入力波を得ることは困難である。このため時刻歴波形に関しては統計的評価が、また周波数領域においては伝達関数評価が現状の評価法である。これらの評価法は制振装置による真の振幅低減量を評価しようとする場合には適正な手法とは言い難い。

本論文は、上記の評価法の改良を主な目標として非定常入力に対する制振効果の評価手法などを論じた。

2. 既往の研究及び本研究の目的

交通振動を対象とした Tuned Mass Damper (以下 TMD と称す) 方式による建物制振に関してはいくつかの実施例が報告されている^{1),2)}。いずれの場合も、① 振動源である高架道路は建物近傍に位置していること、② 制振は建物の水平 1 方向のみ対象としていること、③ 制振装置により建物振動が 40~60% に低減されていること、などが共通している。このうち、制振効果の評価に関しては、制振時と非制振時のそれぞれにおける入力振幅が最大となる時刻における応答倍率を比較する方法や入力波が近似している時刻における応答振幅を直接比較するなどの方法によっている。ところが、入力振動が制振時と非制振時それぞれ異なることから、入力の同時性という厳密な意味においては TMD の真の制振効果を評価しているとはいいがたく適切な評価法とはいえない。本論文では、上記の点に主眼をおき某研究棟において実施

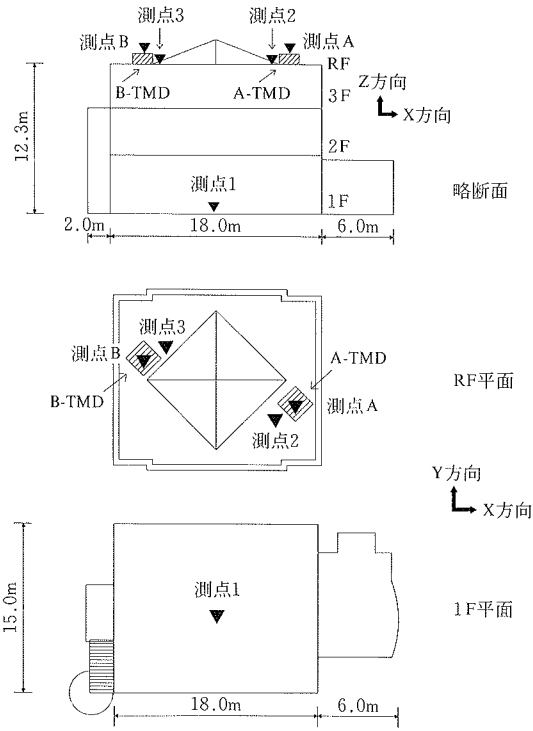


図-2 振動測定位置 (TMD 振動数設定用)

した TMD 工法による制振対策の事例に関して、① 1 個の TMD により建物 2 方向に対する制振の可能性、② 制振時と非制振時の応答を共通する入力振動に対して評価が行える手法の提案を主な目的としている。

3. 建物の概要とその振動特性

当該建物は振動源である北陸自動車道の橋梁から約 100 m の位置にある鉄骨造 3 階建て(軒高 18.51 m)の研究棟である(図-1 の全体配置図参照)。建物外壁はアスロック仕上げとなっており、建物総重量は約 700 tf である。屋上階中央付近にはピラミッド型の居室がある(図-2 参照)。当初、この建物は最上階において水平方向に十数 gal の加速度が生じていたが、高速道路橋の路面補修などにより大幅に振動が低減されたという経緯がある。現在は居住者に船酔気分を感じさせる程度(1~2 gal)の振動が、車両走行状況が一定の条件を満たした場合に発生している。このような時折発生する不快振動の解消及び将来の道路損傷による振動増加を考慮して現状の振動を約半分に低減させることを目標にして当該建物に制振装置を設置することとなった。建物の固有振動数は、高速道路橋車両走行時の振動測定から 1 階に対する屋上階の伝達関数によって評価した。図-3 に水平 X 及び Y 方向の結果を示す。なお、屋上階のデータはねじれ振動の影響を取り除くために測点 2 と測点 3 の波形平均値を用いている。同図より建物水平各方向の固有振動数は、 $f_x=2.54$ Hz、 $f_y=2.37$ Hz と得られた。また、減衰定数は RD 法解析³⁾より求めた結果、X、Y 方向とも約 2% であった。

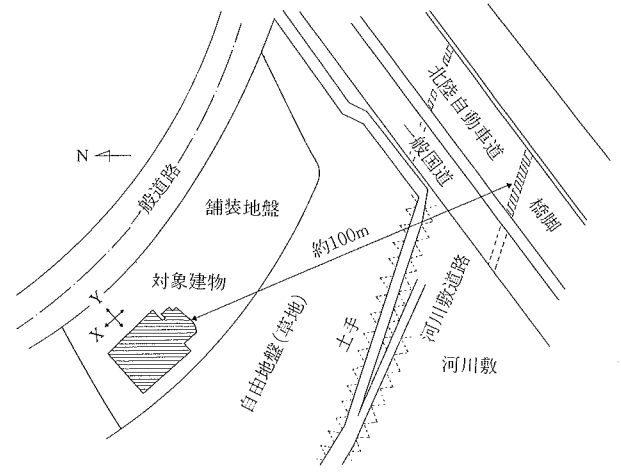


図-1 全体配置図

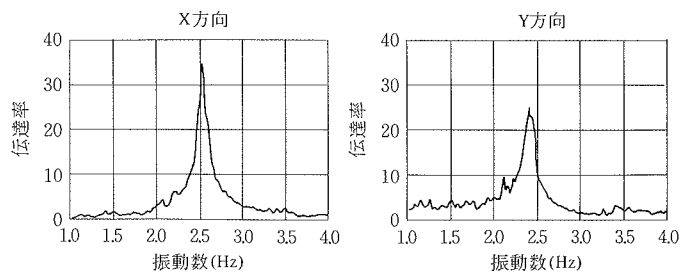


図-3 建物伝達関数 (非制振時)

4. TMD 装置の概要

本建物の固有振動数は、水平各方向で若干異なっている。このため、建物両方向の固有振動数の平均値を TMD の設計用のとりあえずの目標振動数とすることにより建物 2 方向の制振を図った。予測計算⁴⁾から TMD の重錘重量を約 7 tf (建物の総重量に対する比率は約 1%)、固有振動数を 2.45 Hz、減衰定数を 8% とすることにより、最大振幅を約 50% 低減できることが推定された。屋上中央部分には居室があるため、図-2 のごとく同一仕様の TMD を 2 箇所 (A、B 位置) に分散設置することとした。この TMD は、図-4 に示すように、1 基当たり約 3.7 tf の重錘及び 4 個の積層ゴムとシリコンオイルを用いた 4 個の粘性ダンパーで構成されている。シリコンオイルには若干温度依存性があるため、冬期にはサーモスタット付きのヒータ、また夏期にはファンによりダンパー部分の温度を一定に保つよう調整を図っている。また、本装置には大変形時の安全装置として 4 隅 8 箇所にとりあえずのストッパーを設けている。このストッパーのボルトを利用すれば TMD を固定して非制振状態とすることが可能である。なお、この TMD 装置については、予想される振動振幅レベル (200 μ m 程度) に対して各素材試験や装置全体としての振動特性試験を行い、設計用諸元の確認を行っている。

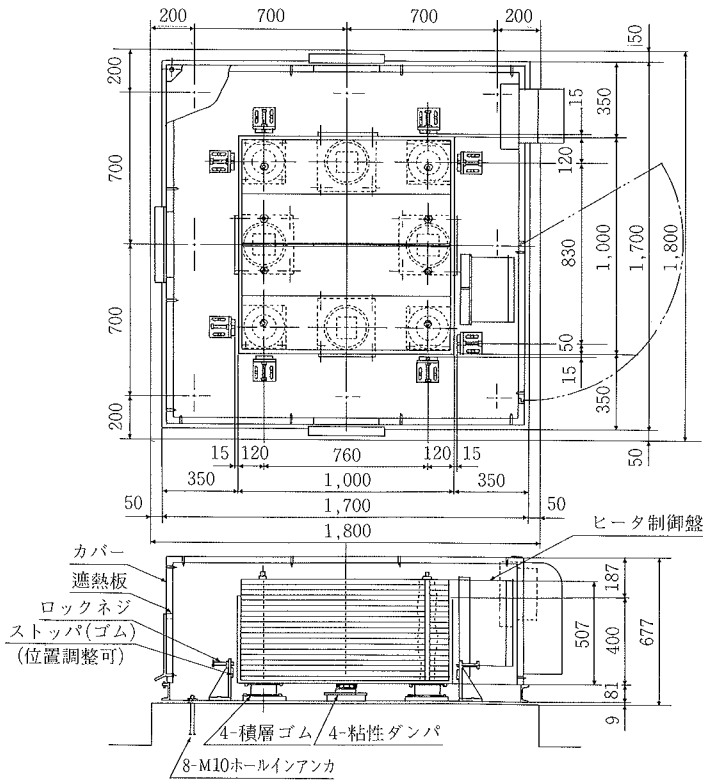


図-4 TMD 装置

5. TMD 装置の最適振動数設定試験

TMD 装置を建物に据え付けるに当たって、現地で最適振動数設定試験を行った。この試験は、水平 2 方向の固有振動数が互いに若干異なっている建物を 2 基の TMD で制振する場合、この TMD の設定振動数に最適な組み合わせがないかどうかを探る目的で行われた。設定振動数の調整は、調整用の重錘を加減して行った。図-5 に TMD の重錘重量と固有振動数の関係の測定結果を示した。また表-1 には最適振動数の検討ケースとその制振効果を示した。各ケースの評価は、測定時にオンラインで得られる建物 1 階に対する屋上階の水平各 2 方向の伝達関数を相互に比較することによって行った。CASE-2 と CASE-4 の伝達関数を例として図-6 に示した。建物両方向の固有振動数(X 方向 2.54 Hz, Y 方向 2.37 Hz)付近に着目すると、CASE-4 の場合の方が制振効果が良いことがわかる。表-1 より建物の 2 方向制振を考えると、2 基の TMD とも建物両方向の固有振動数の平均値とした CASE-4 の場合が最も良い組み合わせであると判断し、これを TMD の設定振動数とした。なお、この場合の 1 基あたりの TMD の重錘重量は 3.68 tf であった。

6. 制振効果の評価手法

非定常外力に対して制振効果を評価する場合、制振時と非制振時の計測時刻が異なるため建物への入力波は同

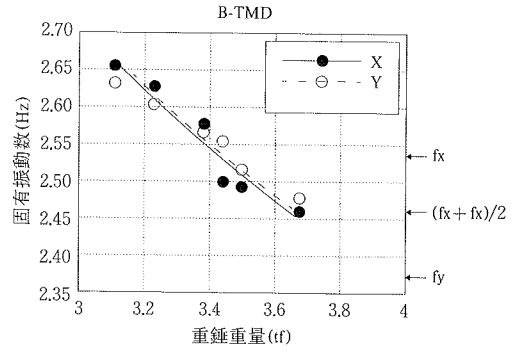


図-5 TMD の固有振動数と重量との関係

表-1 最適振動数の検討ケースと制振効果

検討ケース	TMD の設定振動数		建物の制振効果	
	A-TMD	B-TMD	X 方向	Y 方向
CASE-1	f_x	f_x	◎	×
CASE-2	f_x	$\frac{f_x+f_y}{2}$	△	△
CASE-3	$\frac{f_x+f_y}{2}$	f_x	△	△
CASE-4	$\frac{f_x+f_y}{2}$	$\frac{f_x+f_y}{2}$	○	○

評価記号	◎	○	△	×
制振効果	大	⇒	⇒	⇒

(f_x, f_y : 建物 X 及び Y 方向の固有振動数)

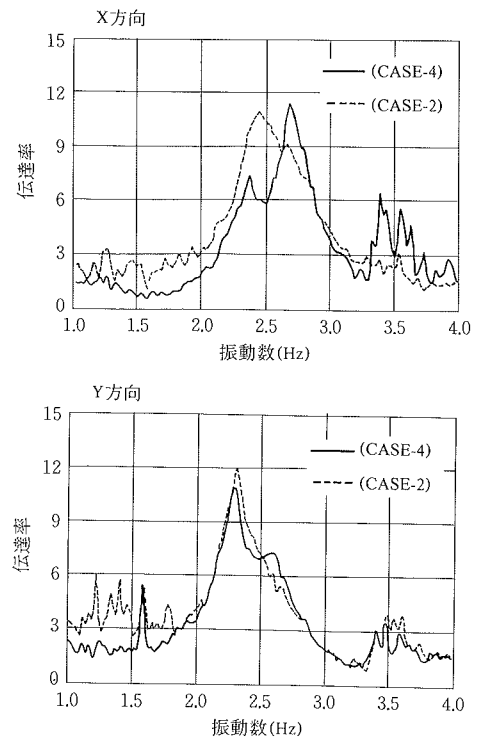


図-6 建物伝達関数 (TMD 最適周期調整試験)

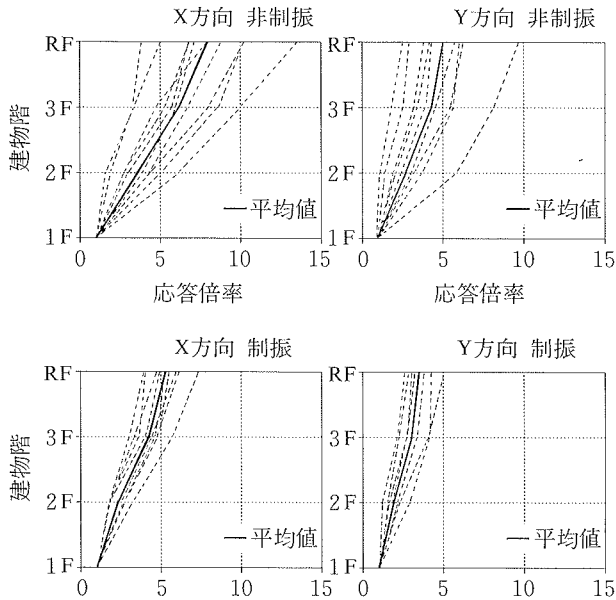


図-7 制振効果の確認 (応答倍率評価法)

一とはならない。このため建物頂部における実測波形を直接比較して制振効果を評価することは適切ではない。そこで本論文においては制振効果を、① 応答倍率、② 伝達関数、③ フーリエスペクトル、④ 時系列波形、⑤ 応答振幅の5つの視点から総合的に評価した。

6.1 応答倍率による評価

まず、非制振時と制振時の実測波形から10箇所の時間帯について各階の応答振幅を読みとり、入力波(1階床)に対する応答倍率による評価を行った。図-7に各時間帯の応答倍率を破線で、またその平均を実線でそれぞれ表示した。TMDの設置によりX、Y両方向とも建物の応答倍率が約65%に低減されていることが確認できる。

6.2 伝達関数による評価

第二の評価法として、非制振時と制振時の建物伝達関数を直接比較することによって、制振効果の評価を行った。本手法も前項の応答倍率評価法と同様、入力波の相違の影響を相対的に消去した評価手法である。図-8に、建物1階に対する屋上階の伝達関数を示した。この伝達関数は制振効果が明瞭に表現できるようにハニングウィンドによるスムージングが施されている。同図からTMD制振の対象とする2.5 Hz付近(X方向)と2.4 Hz付近(Y方向)においては建物振動が約35%に低減されていることが分かる。なお、同図のY方向の3.5 Hz付近のピークは振れ振動に対応するものであるが、今回の制振対象からは除外されている振動数である。

6.3 フーリエスペクトルによる評価

次に、入力波が異なる場合の建物応答(弾性応答に限定)の測定結果から入力波を同一とする応答計算により制振効果を評価しうる手法を提案する。本手法は、式(1)に示すように図-9(a)における非制振時の建物伝達関

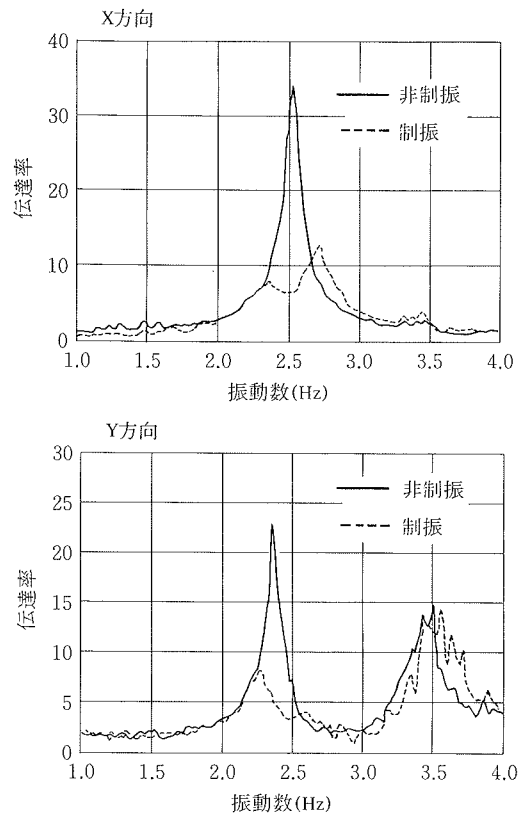
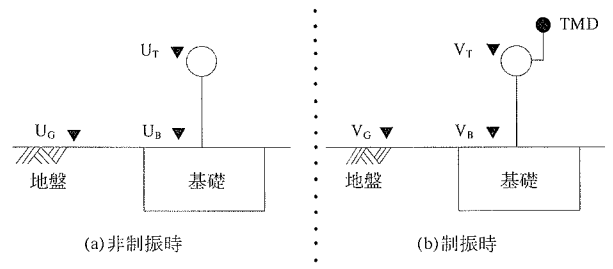


図-8 制振効果の確認 (伝達関数評価法)



U_G, U_B, U_T: 非制振時における地盤と建物基礎及び頂部の各測定波形
V_G, V_B, V_T: 制振時における地盤と建物基礎及び頂部の各測定波形

図-9 フーリエスペクトルによる評価モデル

数(U_T/U_B)に図-9(b)における制振時の入力波(V_B)を乗ずることによってこの入力波(V_B)に対して非制振時に相当する建物応答(U₀)を推定する方法⁵⁾である。

$$U_0 = \frac{U_T}{U_B} \times V_B \quad \dots\dots\dots(1)$$

ところで、制振時の建物基礎においては地盤との連成を考慮した場合にはTMDの影響が基礎にも含まれていると推定されるため、この影響を受けない建物から充分離れた自由地盤上の測定波形(U_G, V_G)を基準にする必要がある。そこで式(2)によって評価する。

$$U = \frac{U_T}{U_G} \times V_G \quad \dots\dots\dots(2)$$

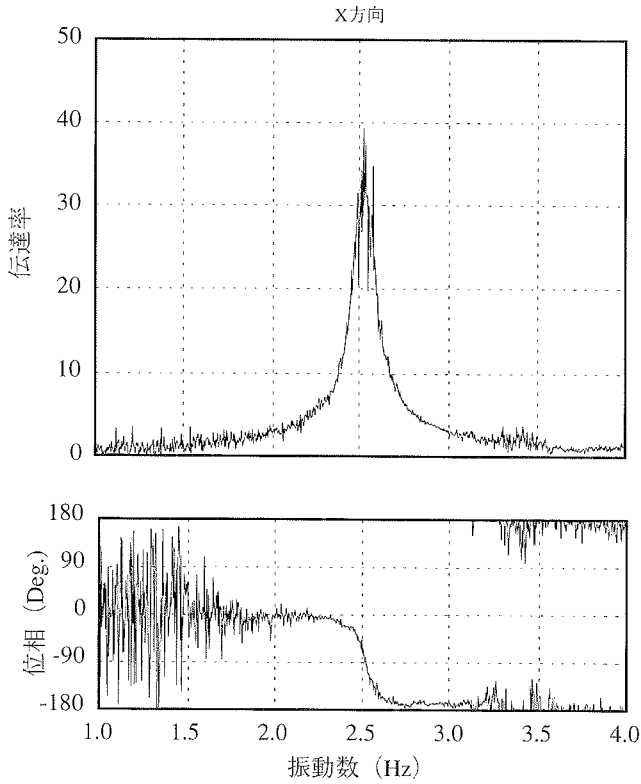


図-10 非制振時の建物伝達関数 (振幅検討用)

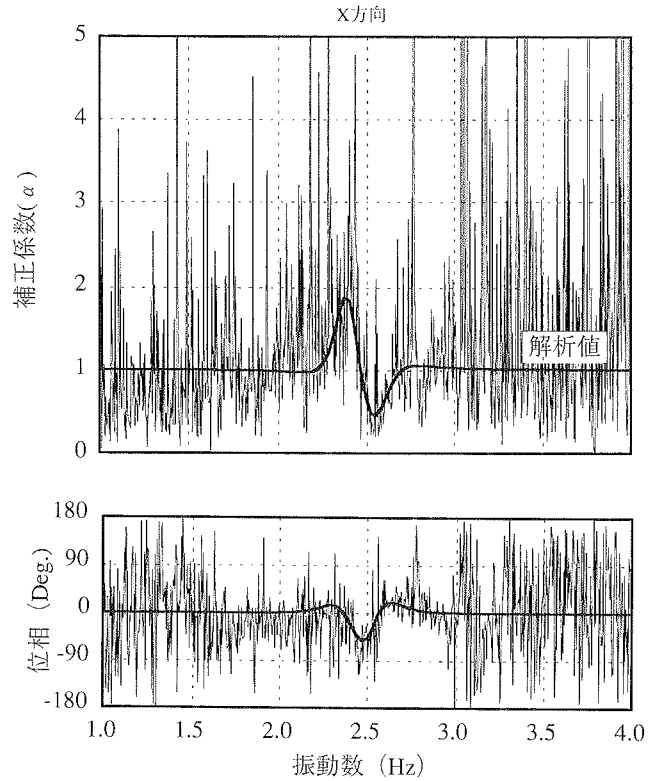


図-11 補正関数 (α)

この式(2)は、式(3)、(4)に示すように補正関数(α)を考慮することによって式(1)から求められる。

$$U = \frac{U_T}{U_B} \times V_B \times \frac{U_B}{U_G} / \frac{V_B}{V_G} = U_0 \times \alpha \quad \dots\dots\dots(3)$$

$$\text{ここで } \alpha = \frac{U_B}{U_G} / \frac{V_B}{V_G} \quad \dots\dots\dots(4)$$

本手法による検討結果の一例を以下に示す。検討用データとして約3分間の実測波形を1データとみなし、これを計測時刻の異なる4データを使用した。各伝達関数(U_T/U_B , U_B/U_G , V_B/V_G)は4データの平均値としている。図-10に非制振時の建物伝達関数(U_T/U_B)、図-11に補正関数(α)をX方向について示した。図-11には参考値として3次元薄層要素法による解析結果(太実線)も併せて示している。図-12は式(3)によって推定されるX及びY方向の非制振時に相当する建物応答のフーリエスペクトルであり、制振時の実測データに基づく結果も併記している。いずれもハニングウィンドによるスムージングが施されている。両スペクトルは共通の入力波(V_G)に対する制振及び非制振の建物応答を示していることから直接比較してTMDの制振効果を評価することができる。TMD制振の対象とする振動数域におけるフーリエ振幅のみた場合の制振効果は、前項の伝達関数評価の場合と同程度でありTMDによって約35%に振動が低減されている。

6.4 時刻歴波形による評価

前項で求めた非制振のフーリエスペクトルを逆フーリ

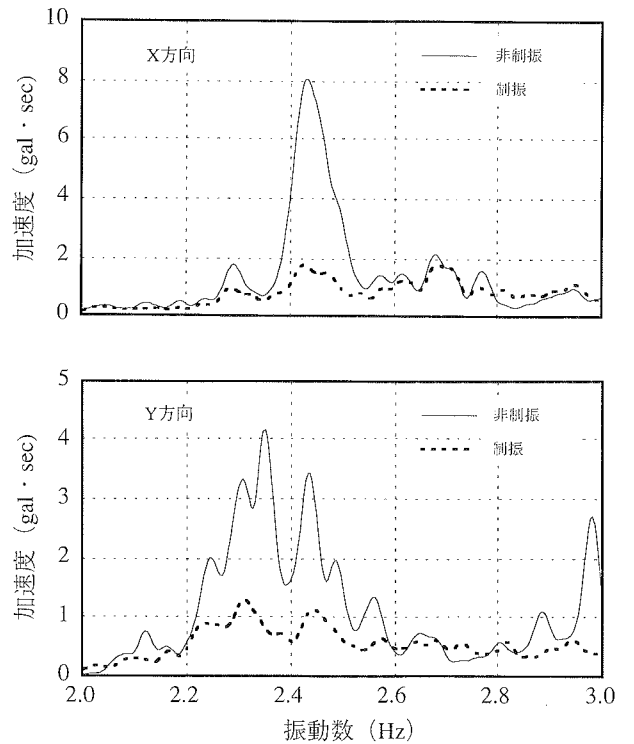


図-12 制振効果の確認 (フーリエスペクトル評価法)

エ変換することによって非制振の応答波形が求められる。図-13に計算で求めた非制振時に相当する屋上階の応答波形と制振時の実測による時刻歴波形をそれぞれ示した。波形振幅の低減や振動継続時間の大幅な短縮など制振効果

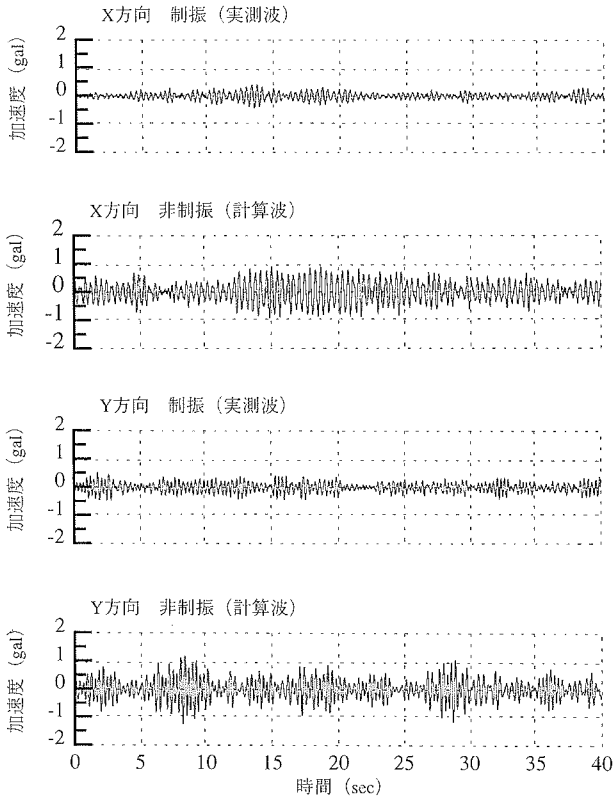


図-13 制振効果の確認
(時系列波形評価法)

果の様相が時刻歴波形によって視覚的にも充分確認できる。

6.5 応答振幅による評価

前項の時刻歴波形の最大振幅及び継続時間効果も含めた振幅自乗和平均 (RMS) を表-2 に示すが、TMD 設置により時刻歴波形の振幅についても X 方向、Y 方向とも40%程度まで建物振動が低減されている。

7. まとめ

TMD 工法による交通振動を対象とした低層鉄骨造建物の制振効果について論じた。本論から得た知見は以下のとおりである。

① 水平2方向の固有振動数が若干異なるような建物の TMD 制振においては、TMD の振動数を建物2方向の平均振動数に設定することにより建物2方向の振動を同時に低減させることが可能であることが確認できた。

② 計測時刻毎に入力振動が異なるような非定常入力に対する TMD 装置の制振効果評価法として、応答倍率に着目した方法も効果的である。実測波形から直読した最大振幅比に関しては各方向とも65%程度に、また伝達関数評価では建物固有振動数付近において約35%に振動が低減されていることを確認した。これらの手法では応答振幅そのものを評価することができないため、③項に示す手法を提案した。

③ 制振・非制振時それぞれにおいて入力振動が異なる

表-2 制振効果の確認 (応答振幅評価法)
—最大値と RMS 値—

方向	評価値	非制振	制振	制振効果
X	最大値	0.920gal	0.422gal	1/2.18
	RMS	0.358gal	0.116gal	1/3.09
Y	最大値	1.245gal	0.520gal	1/2.39
	RMS	0.365gal	0.161gal	1/2.27

る場合に、同一の入力波に換算した建物応答振幅評価法として、建物の伝達関数を利用して制振時の実測入力波を用いて非制振時に相当する応答を逆算し、制振時の実測波と直接比較できる手法を示した。本手法により入力振動が異なる場合の制振効果を、応答波形やその振幅などに関しても直接的に比較できることが可能となった。本建物では応答加速度波形の最大値や RMS 値は35%~50%に低減されていることが確認できた。

謝 辞

本研究は、金沢工業大学建築学科教授鈴木有博士のご指導のもと、TMD 装置の設置をご決断された UHT 株式会社はじめ有限会社エム・エ・エス、株式会社 SUN 設計事務所、南建設株式会社の関係各位のご尽力により実施できたことを記して深謝の意を表します。

また、TMD 装置の製作ではトキコ株式会社の関係各位及び現地での振動調査などに終始御協力頂きました金沢工業大学建築学科の学生諸氏に心から謝意を表します。

参考文献

- 1) 橋詰尚慶, 長瀧慶明, 久野雅祥: 高速道路高架橋に隣接する建物の制振装置による振動低減対策, 日本建築学会大会学術講演梗概集 D 分冊, p.11~14, (1992)
- 2) 上代悟史, 嶋田三朗, 藤波健剛, 竹沢要一, 山崎達司: 交通振動を受ける建物に対する動吸振器を用いた制振, 日本建築学会大会梗概集 B 分冊, p.1111~1114, (1992)
- 3) 田村幸雄, 佐々木淳, 塚越治夫: RD 法による構造物のランダム振動時の減衰評価, 日本建築学会構造系論文報告集, Vol. 454, p.29~38, (1993)
- 4) 武田寿一編: 構造物の免震防振制振, p.169~176, (1988)
- 5) 鈴木 有, 安井 譲, 此上典文, 吉田 治, 他: 高速道路橋車 両走行に起因する建物の TMD 制振, 日本建築学会大会学術講演梗概集 D 分冊, p.1875~1878, (1994)