

# 時刻歴風応答解析と TMD の制振効果について

川口 彰久 寺村 彰  
表 佑太郎 安井 譲

## Numerical Simulations on Time-History Responses of a Tall Building and Suppression Effects of Tuned Mass Dampers under Wind Loading

Akihisa Kawaguchi Akira Teramura  
Yutaro Omote Yuzuru Yasui

### Abstract

Tall buildings and observation towers are subject to vibrations under strong winds and are rarely uncomfortable for occupants. Therefore, various types of dampers are being developed at present to reduce vibration of these structures. However, it cannot be said that predicting wind-induced responses of a structure equipped with a damper system and techniques of properly estimating suppression effects have been sufficiently established. The authors have therefore tried to simulate a time-history wind loading which has not been attempted in the past and have examined the vibration control effects of TMD (tuned mass damper). That frequency-domain data bases can be effectively utilized in simulations of wind forces and that behaviors and vibration control effects of TMDs with various mass ratios are estimated reasonably are discussed in this paper.

### 概要

高層建築物や高層展望タワーなどは上空の強い風の影響を受けて振動しやすく、居住性を損なうなどの問題があり、改善のための制御装置についての研究が進められている。しかし、制振システムを組み込んだ建物の風に対する振動応答の予測や制振効果を的確に評価する手法は、十分に確立されているとは言えない。

そこで、著者等は、従来風振動ではあまり試みられていない時刻歴での風応答解析を行なうこととして、時刻歴風外力のシミュレーションを試み、この時刻歴風外力に対する同調付加マスダンパー (TMD) の制振効果を検討した。その結果、風外力のシミュレーションでは周波数領域のデータベースを有効に活用できることや建物質量に対して質量比を変化させた場合の TMD の挙動や制振効果を適切に評価するなどの成果を得た。

## 1. はじめに

最近、都市地域においては、土地の高度有効利用を計る目的で、超高層集合住宅や超高層オフィスビルが多数出現し、また地方においては、シンボルとしての高層展望塔などの建設が盛んに行なわれている。これらの建造物は、地震対策上比較的軽量で剛性の低い構造形式となるために固有振動の周期が長く、そのために上空の強い風に励起されて揺れ易くなる。そこで、建物の揺れを抑えて居住性能の向上を図る目的で、種々の制振装置の開発や研究<sup>1)~4)</sup>が進められており、諸外国においてはすでに実在建物に制振システムを設置して、その効果について報告されている例もみうけられる<sup>5)</sup>。

このような状況において、建物の風による揺れを事前に予測評価することは、構造安全性と居住性能の確保という観点からも、非常に重要な問題となっている。

建物の風による振動は、その励起する要因により、

- ① 風の乱れによるパフエッティング振動
- ② 建物の背後から発生する渦による渦励振
- ③ 空気力の負減衰によるギャロッピング振動

と大きく分類されている。そして、構造物の風励起振動

応答については、いずれの場合においても周波数領域で検討することが多い。この予測手法は、確率統計的手法に基づいているので合理的ではあるが、構造部材の風荷重の作用による塑性域・崩壊の問題や、制振装置との連成問題に対しては、十分に対応できないという問題がある。そこで、風洞実験で模型に作用する時刻歴の変動風力を直接計測したり、変動風速場や風力をシミュレートして応答解析する方法が研究されている<sup>6)~10)</sup>。

著者らは、応答解析をモーダルアナリシスの考えで進めることを前提として、従来の研究成果である周波数領域でのデータベースを活用して、合理的な時刻歴風外力のシミュレーションを試みた。そして、その外力データに対するパッシブ系同調付加マスダンパーを設置した高層建物の応答解析を行ない、ダンパーの風励起振動に対する制振効果についての検討を行なった (図-1)。

## 2. 想定建物と同調付加マスダンパーの諸元

想定建物は12階建の高層建物である。建物形状は図-2に、振動特性は表-1に示す。

建物の屋上に設置する同調付加マスダンパー (Tuned Mass Dumper, 以後 TMD と記す) の諸元は、表-2に

示す。TMDの質量は、建物の一次振動有効質量に対して質量比(μ)が0.5, 1.0, 2.0, 5.0%となるように設定した。そして、TMDの固有振動数と減衰率は、(1), (2)式により最適化させるものとした<sup>1)</sup>。

$$\text{振動数比} : 1/(1+\mu) \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$\text{減衰定数} : [3\mu/\{8(1+\mu)^3\}]^{1/2} \quad \dots\dots\dots(2)$$

3. 振動方程式

建物の多質点系へのモデル化では、立体モデル、平面モデル、串モデルなどが考えられるが、いずれにしても振動方程式は、(3)式で表わすことができる。

$$[m]\{\ddot{X}(t)\} + [c]\{\dot{X}(t)\} + [k]\{X(t)\} = \{Q(t)\} + \{F(t)\} \quad \dots\dots\dots(3)$$

ここで、{X(t)}:変位, {Ẋ(t)}:速度, {Ẍ(t)}:加速度, [m]:質量, [c]:減衰, [k]:剛性, {Q(t)}:風外力, {F(t)}:制振力, t:時刻である。

建物は、弾性範囲内で応答するとしてモーダル解析を適用する。変位を(4)式で表わすと、r次の振動方程式は(5)式となる。

$$\{X(t)\} = \sum_{i=1}^n X_{ri}(t) \cdot \{\phi_{ri}\} \quad \dots\dots\dots(4)$$

$$\ddot{X}_r(t) + 2h_r\omega_r\dot{X}_r(t) + \omega_r^2 X_r(t) = \{Q_r(t) + F_r(t)\}/m_r \quad \dots\dots\dots(5)$$

ここで、X<sub>r</sub>(t):一般化変位, {φ<sub>r</sub>}:固有振動モード, m<sub>r</sub>:一般化質量 (=∑<sub>i=1</sub><sup>n</sup> m<sub>i</sub>φ<sub>ir</sub><sup>2</sup>), Q<sub>r</sub>(t):一般化風力 (=∑<sub>i=1</sub><sup>n</sup> Q<sub>i</sub>(t)φ<sub>ir</sub>), F<sub>r</sub>(t):一般化制御力 (=∑<sub>i=1</sub><sup>n</sup> F<sub>i</sub>(t)φ<sub>ir</sub>), h<sub>r</sub>:減衰定数, ω<sub>r</sub>:固有円振動数, 添字 r:振動次数, i:質点番号である。なお、TMDの質量を定義する基となる一次振動の有効質量は、(∑<sub>i=1</sub><sup>n</sup> m<sub>i</sub>φ<sub>ir</sub><sup>2</sup>)/(∑<sub>i=1</sub><sup>n</sup> m<sub>i</sub>φ<sub>ir</sub><sup>2</sup>)である。次に、TMDは建物モデルの質点sだけに設置するとした場合には、TMDの振動方程式は(6)式となる。

$$m_D\ddot{X}_D(t) + c_D\{\dot{X}_D(t) - \dot{X}_s(t)\} + k_D\{X_D(t) - X_s(t)\} = 0 \quad \dots\dots\dots(6)$$

(6)式は(7)式と書くことができる。

$$\ddot{X}_D(t) + 2h_D\omega_D\{\dot{X}_D(t) - \dot{X}_s(t)\} + \omega_D^2\{X_D(t) - X_s(t)\} = 0 \quad \dots\dots\dots(7)$$

ここで、m<sub>D</sub>, c<sub>D</sub>, k<sub>D</sub>はTMDの質量、減衰、剛性であり、X<sub>D</sub>(t), h<sub>D</sub>, ω<sub>D</sub>はTMDの変位、減衰定数、固有円振動数である。X<sub>s</sub>は、(4)式から求まる質点sの変位である。従って、TMDから建物に作用する一般化制御力は(8)式となる。

$$F_r(t) = F_D(t)\phi_{sr} = -m_D\ddot{X}_D(t)\phi_{sr} \quad \dots\dots\dots(8)$$

以上から、一般化風力Q<sub>r</sub>(t)が想定出来れば、建物とTMDの連成振動応答は予測することができる。実際の計算では、時間刻みを細かくして、1ステップ前のTMDの応答値を用いて次のステップの建物応答を求める方法を採用した。

なお、本件の解析では振動方向は建物の弱軸1方向として、建物は12層の串モデルと仮定した。また、1次振動だけでなくモード合成法によって3次振動モードまでを考慮して解析を行ない、TMD動作による高次振動への

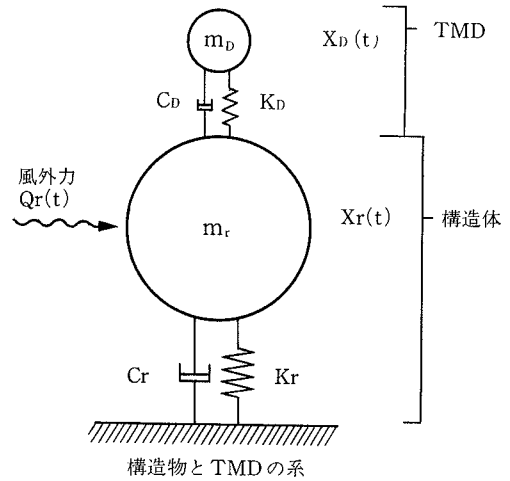


図-1 建物とTMDのモデル

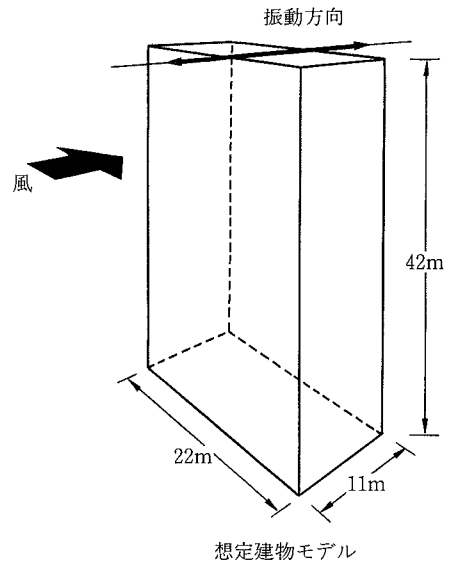


図-2 想定建物の寸法

表-1 想定建物の振動特性

振動次数	1-st	2-nd	3-rd
有効質量 (t・s <sup>2</sup> /m)	211	42	2
固有振動数 (Hz)	0.71	1.82	2.93
減衰定数 (%)	1.0	2.5	4.1

表-2 TMDの特性

case No.	T-1	T-2	T-3	T-4
質量比 (%)	0.5	1.0	2.0	5.0
固有振動数 (Hz)	0.71	0.70	0.70	0.67
減衰定数 (%)	4.3	6.0	8.4	12.7

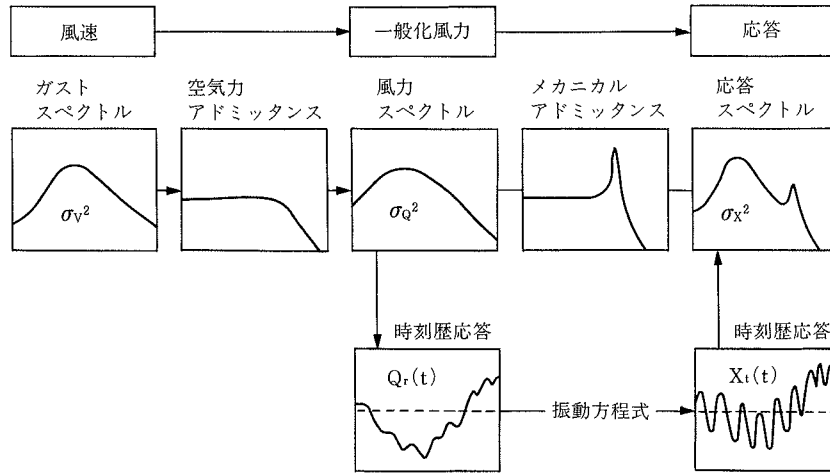


図-3 解析手順概念図

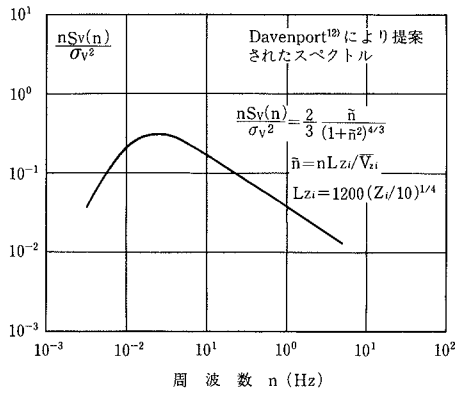


図-4 変動風力のパワースペクトル

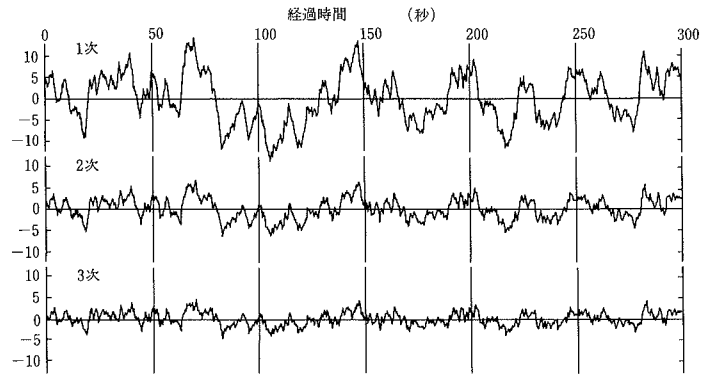


図-5 シミュレーションした一般化風力の時刻歴波形

影響も含めて、制振効果を調べることにした。

#### 4. 時刻歴風力のシミュレーション

一般的に、ある時刻歴データが平均値ゼロの定常ガウス過程に従うとすると、時刻歴データは三角級数モデルにより近似的に表わすことが出来る<sup>11)</sup>。すなわち、一般化風力の時刻歴データとスペクトルは、(9)式の関係式となる。

$$Q_r(t) = \sum \{ \sqrt{2T^{-1}S_{Qr}(n_k)} \cos(2\pi n_k t + \psi_k) \} \dots\dots(9)$$

ここで、 $Q_r(t)$ ：一般化風力の時刻歴データ、 $T$ ：継続時間、 $S_{Qr}(n_k)$ ：一般化風力のパワースペクトル、 $n_k$ ：振動数、 $\psi_k$ ：位相差、添字  $k$ ：振動数の分割 ( $k=1, 2, \dots, k_n$ ) である。

従って、図-3に示す周波数領域での応答解析手順において、 $r$ 次振動の一般化風力のパワースペクトルを(9)式に代入すると、 $r$ 次振動応答解析用の時刻歴風力を人工的に作成することができることになる。

本報告では、建物の風による振動は風の乱れによるパフエッティング振動であるとして、建物の広い壁面に作用する風方向の変動風力をシミュレーションした。なお、風の特徴は、建物は都市域に建設されるとして、次のよ

うに仮定した。

- 平均風速の鉛直分布： $\bar{V}_{z1} = \bar{V}_0(Z_1/Z_0)^{1/4}$   
 $\bar{V}_{z1}$  は地上  $Z_1$  高さの平均風速  
 $\bar{V}_0$  は地上  $Z_0=42$  m 高さの平均風速 (23.6 m/s)
- 乱れの鉛直分布： $\sqrt{v_i^2} = \sqrt{6\kappa} \bar{V}_{10}$   
 $\kappa$  は地表面粗度係数で0.009  
 $\bar{V}_{10}$  は地上 10 m の平均風速
- 変動風速のスペクトル：  
 $nS_{v_i}(n)$   
 $\frac{nS_{v_i}(n)}{\sigma_{v_i}^2} = \frac{2}{3} \frac{\bar{n}^2}{(1+\bar{n}^2)^{4/3}}$  図-4参照  
 $\bar{n} = nL_{z1}/\bar{V}_{z1}$ ,  $L_{z1} = 1200(Z_1/10)^{1/4}$
- 風力のスペクトル：  
 $S_{Q_i}(n) = \frac{4\bar{P}_i^2}{\bar{V}_i^2} |X(n)|^2 S_{v_i}(n)$   
 $\bar{P}_i$  は平均風力 ( $=1/2\rho C_i \bar{V}_i^2 A_i$ )  
 $X(n)$  は風速-風力アドミッタンスで線形関係と仮定
- $r$ 次振動一般化風力のパワースペクトル：  
 $S_{Q_r}(n) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n S_{Q_{ij}}(n) \phi_{ir} \phi_{jr}$
- 質点  $i$  と  $j$  に作用する風力のクロススペクトル：  
 $S_{Q_{ij}}(n) = R_{Q_{ij}}(n) \sqrt{S_{Q_i}(n) S_{Q_j}(n)}$

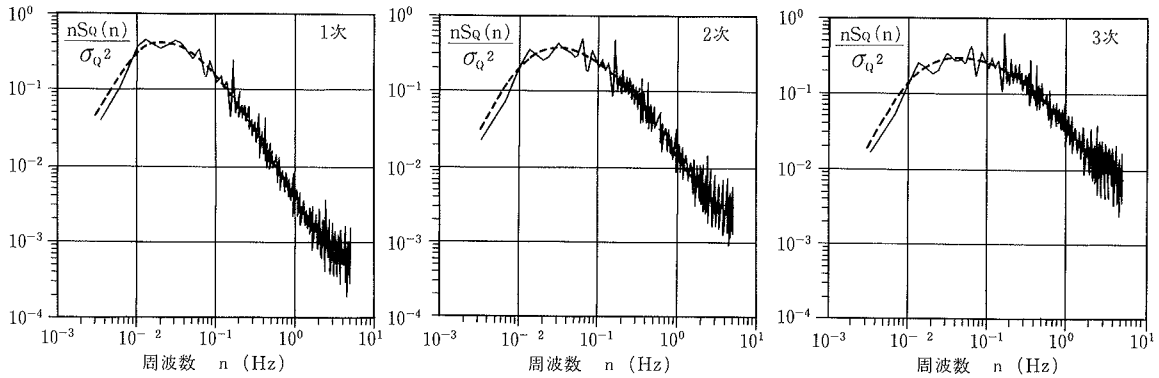


図-6 シミュレーションした一般化風力のパワースペクトル (-----元のスペクトル, ——シミュレーション)

表-3 応答解析結果 (建物頂部の応答値)

応答	周波数解析		時刻歴解析									
	TMDなし		TMDなし		TMD $\mu=0.5$		TMD $\mu=1.0$		TMD $\mu=2.0$		TMD $\mu=5.0$	
	標準偏差	ピーク値	標準偏差	ピーク値	標準偏差	ピーク値	標準偏差	ピーク値	標準偏差	ピーク値	標準偏差	ピーク値
変位 1st	1.78	6.12	1.73	5.97	1.05	3.61	0.93	3.20	0.83	2.83	0.72	2.44
2nd	0.08	0.29	0.06	0.23	0.06	0.23	0.06	0.23	0.06	0.23	0.06	0.21
3rd	0.02	0.06	0.01	0.04	0.01	0.04	0.01	0.04	0.01	0.04	0.01	0.04
all	3.19	10.50	3.32	10.81	3.05	8.42	3.01	8.15	2.98	8.00	2.94	7.80
加速度 1st	3.50	12.10	3.43	11.69	1.95	6.73	1.68	5.99	1.41	4.89	1.11	3.82
2nd	1.00	3.72	0.82	3.06	0.82	3.06	0.82	3.05	0.81	3.00	0.75	2.02
3rd	0.57	2.19	0.39	1.52	0.39	1.52	0.39	1.52	0.39	1.52	0.39	1.52
all	3.69	13.10	3.56	12.35	2.22	8.40	1.98	7.92	1.75	7.10	1.48	5.54

周波数範囲：1st=0.40-1.42Hz, 2nd=1.42-3.64Hz, 3rd=3.64-5.0Hz, all=0.0033-5.0Hz

・風力の空間相関関数：

$$R_{Qij}(n) = \exp(-k_z n \Delta z / V_i) \cdot \exp(-k_1 n \Delta l / V_i)$$

$k_z = k_1 = 8$  と仮定,

$\Delta z, \Delta l$  は質点  $i, j$  間の鉛直, 水平距離

・風力係数： $c_i = 1.4$

・位相  $\psi_k$ ：ランダム

各次振動毎の位相は同じと仮定

以上の仮定のもとに, 一般化風力の時刻歴波形をシミュレーションすると, 時刻歴波形は図-5, そのパワースペクトルは図-6となる。いずれの振動次数にたいしても, 周波数の分割は  $n=1/300$  Hz, 1500区分としたので, 評価する振動数範囲は 0.0033~5 Hz の区間である。また, 平均化時間 (T) は 5 分間とした。時刻歴波形のスペクトル計算は, MEM 法によった<sup>13)</sup>。

スペクトル形状を目標とした元のスペクトルと比較すると, 全体的にみて両者は良い一致を示しており, (9)式によるシミュレーションは時刻歴風力波形の作成に有効であると認めることができる。

5. 応答解析結果

振動方程式の解法は, ルンゲクッタ法によった。このとき, 刻み時間の設定はさらに1/5細かくして1/50秒毎とした。

建物頂部の応答解析結果は表-3に, 応答波形は図-7, そのスペクトル解析結果は図-8に示す。なお, 表中の統計量の内, 時刻歴応答解析の全周波数領域にわたる値は波形から直接読み取り, その他の振動次数毎の応答値は, スペクトルの積分値として求めている。なお, 本報告で示す応答の値は, 平均成分を除く変動成分につ

いてのみ記述した。

5.1 時刻歴応答結果と周波数応答結果の比較

応答スペクトルについて, 時刻歴応答解析と周波数応答解析から求めたものの両者を比較すると, 次のようになる。すなわち, ①時刻歴応答波形から求めたスペクトルは固有振動数間で深い谷間を形成しているが, 周波数応答解析ではこの現象はない。②固有振動数や低振動数領域での傾向は, 周波数応答解析のスペクトル形状と良く一致している。③応答量の値では, 高次振動成分毎で多少のバラツキがみられるものの, 加速度応答で数10%, 変位応答ではわずか数%のオーダである。④1次振動成分に限ると, その差はわずかである。以上より, 工学的には, 風振動応答予測において, 解析方法による結果の相異はなく, 両者は良い一致を示していることが出来る。

5.2 TMDの挙動

TMDの建物の頂部層部分に対する相対的な挙動や制御力の大きさについては, 図-9に示す。TMDの質量が増すと制御力はおおきくなり, 質量比が0.5%から5.0%になると約2倍に増大している。一方, TMD自体の建物に対する相対変位や加速度は約1/4.5程度に減少している。また, スペクトル解析結果から周波数応答特性をみると, 建物の一次振動数域で著しく卓越しており, 高次振動の影響はほとんどないに等しい。

5.3 TMDの制振効果

TMDの制振効果については, 建物頂部の時刻歴応答波形およびスペクトル解析結果からも容易に認めることができる。特に, 建物頂部の応答変位と応答加速度のスペクトル形状を比較すると, TMDを設置しない場合の

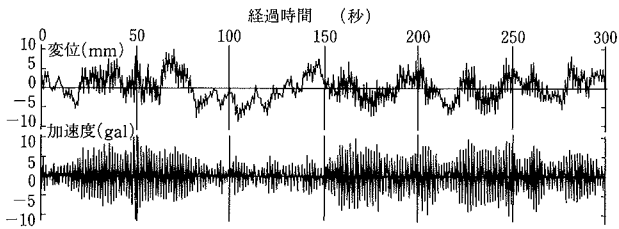


図-7(1) TMD を設置しない場合の建物頂部の応答

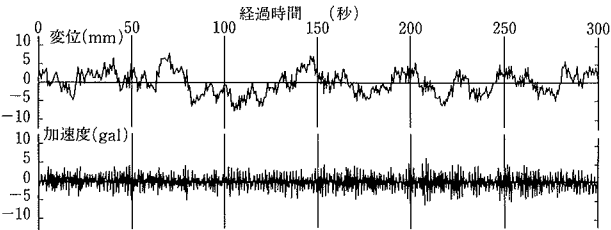


図-7(2) TMD ( $\mu=2\%$ ) を設置した場合の建物頂部の応答

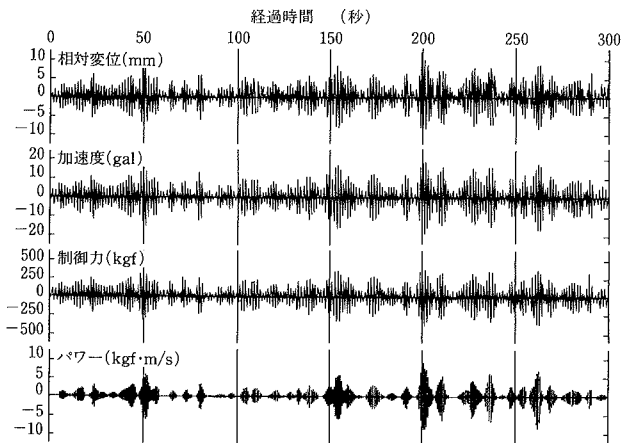


図-7(3) TMD ( $\mu=2\%$ ) を設置した場合のTMDの応答

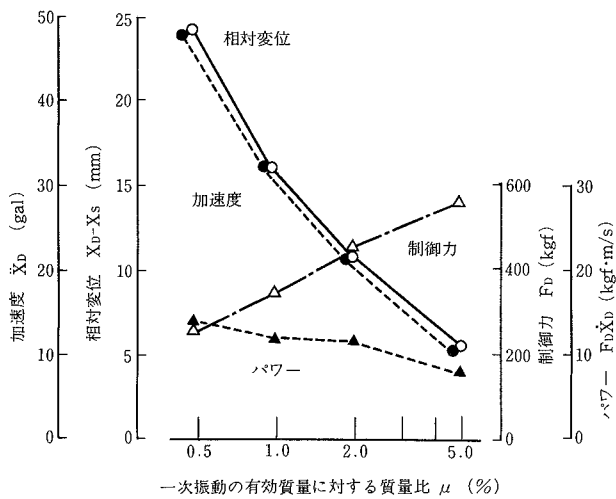


図-9 TMD の挙動

一次振動成分における鋭い卓越が、TMD を設置すると相対的に非常に小さくなり、しかも一次振動成分のピークの先端が二つに分かれて小さな谷を形成していることが解る。ただし、一次振動成分より低い周波数域や高次

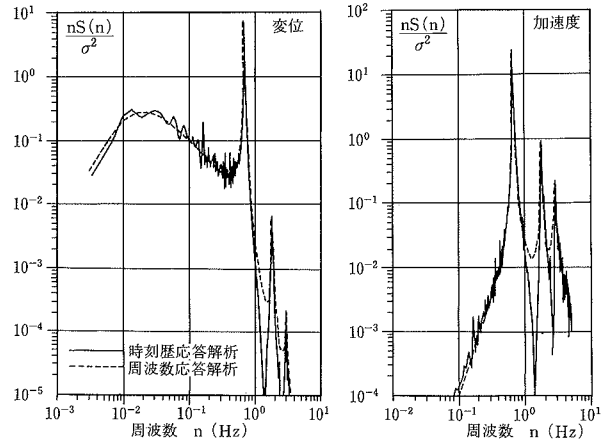


図-8(1) TMD を設置しない場合の建物頂部の応答スペクトル

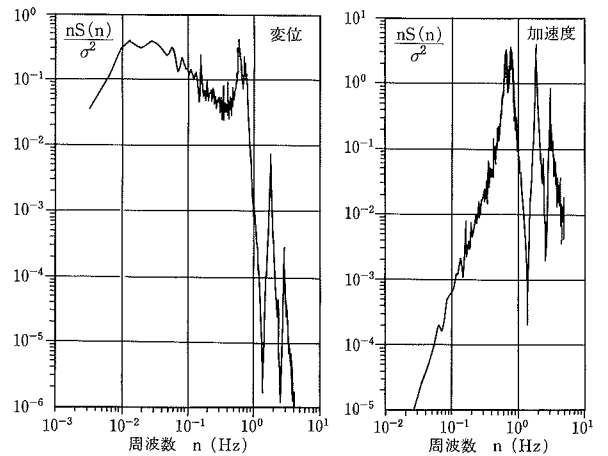


図-8(2) TMD ( $\mu=2\%$ ) を設置した場合の建物頂部の応答スペクトル

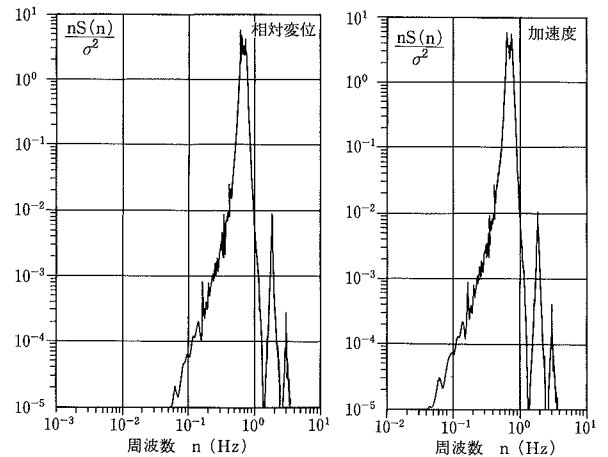
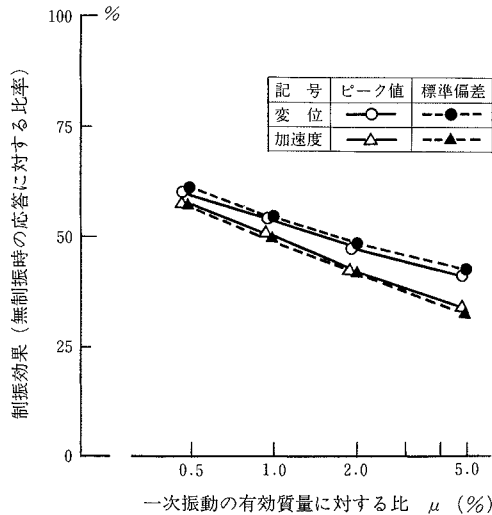


図-8(3) TMD ( $\mu=2\%$ ) を設置した場合のTMDの応答スペクトル

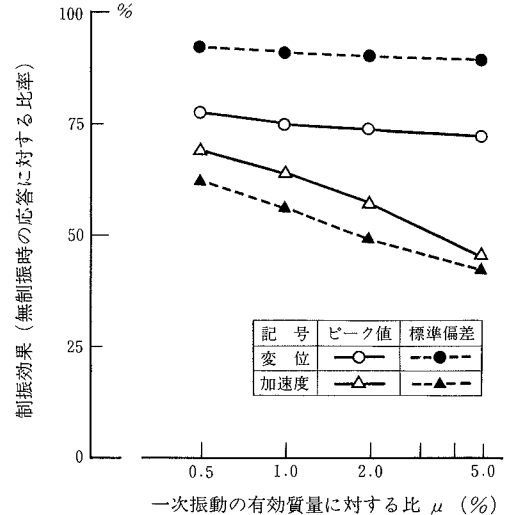
振動成分には、TMD の影響が表われていない。

次に、制振効果を表わす指標として、TMD を設置した場合の応答量を TMD を設置しない場合に対する比率を求めると、図-10となる。

TMD の振動数を同調させた1次振動成分に対して、質



図一10(1) TMDの制振効果(一次振動数域)



図一10(2) TMDの制振効果(全周波数域)

質量比  $\mu=0.5\%$  で約60%,  $\mu=5\%$  では30~40%までと言うように、質量を大きくすると著しく低減する傾向が明らかである。しかし、低振動数から高い周波数域までの全域で見ると、変位応答量の減少は少なく、特に変位の標準偏差 (rms) には TMD の効果はわずかしかわわっていないことになる。

これは、外力である変動風力の周波数特性に起因するものであると推察される。すなわち、風外力のパワースペクトルや建物頂部の応答スペクトルからも解るように、風の乱れによる変動風力の卓越する周波数が建物の固有振動数と比べて非常に低い周波数域にあり、しかも周波数の広い領域に渡ってピークが広がっているため、一次振動数に同調させた TMD では長周期の振動成分を減衰させることができないのである。このことは逆に、外力の周波数特性が長周期振動成分を含まず、建物固有の振動数付近に限定されているなら、これに対しては十分な制振効果を示すものと推測できる。

## 6. まとめ

高層建築物を対象として、風外力の時刻歴シミュレーションと TMD の制振効果について検討したが、まとめると次のようになる。

① 本報告で実施したモーダル解析を前提とした時刻歴風力のシミュレーションは、従来の周波数領域での風外力に関するデータベースの継続的な活用が計れ、そして時刻歴応答解析を行なう上で非常に有効であることを、確認することができた。

したがって、今後は風の乱れに伴う風外力だけでなく、渦励振や不安定空気力についても、同様な手法での応答解析ができるものと考えられる。

② 同調付加マスダンパー (TMD) の風外力振動に対する制振効果を質量比を変化させて検討した。

その結果、一次振動の有効質量に対して0.5% (建物全質量に対して0.32%) では建物の1次振動数域で60%程

度、質量比2.0% (同1.28%) で45%程度まで、振動を減少させることを確認することができた。

## 参考文献

- 1) 武田寿一：構造物の免震防振制振, 技法堂, (1988, 5)
- 2) 建築学会関東支部構造部会, 制振構造の現状—高層建物の制振, (1989, 12)
- 3) Tanaka H., Mak C. Y.: Effect of Tuned Mass Damper on Wind Induced response of Tall Buildings, J. of W. E. I. A., Vol. 4, p. 357~368, (1983)
- 4) Modi V. J.: On the Suppression of Vibrations Using Nutation Dampers, J. W. E. of Japan, No. 37, p. 547~556, (1988)
- 5) 辻 松雄：構造力学的耐風制振対策, 日本風工学会誌, Vol. 20, p. 81~102, (1984)
- 6) 藤井邦雄, 若原敏祐：TLD-構造物系の風応答に関する数値シミュレーション, 日本風工学会誌, Vol. 41, p. 101~102, (1989)
- 7) 近藤宏二, 吉田正邦, 鈴木雅靖：変動風力による高層建物の時刻歴応答の評価, 日本建築学会大会学術講演梗概集, p. 1129~1130, (1989, 10)
- 8) 神田 順：ガスト応答に対する構造物の弾塑性挙動の影響, 日本風工学会誌, Vol. 32, p. 63~64, (1987)
- 9) 田村幸雄, 和田 章, 大越俊男, 川村 満：高層建築物の風による時系列応答解析について, 日本建築学会大会学術講演梗概集, p. 143~144, (1988, 10)
- 10) 大熊武司, 丸川比佐夫：千葉ポートタワーの風応答予測に関する数値実験, 日本風工学会誌, Vol. 41, p. 67~68, (1989)
- 11) 星谷 勝：確率論的手法による振動解析, 鹿島出版会 (1981)
- 12) Davenport A. G.: The Dependence of Wind Loads on Meteorological Parameters, Wind Effects on Buildings and Structures, p. 19~82, (1967)
- 13) 日野幹雄：スペクトル解析, 朝倉書店