

強風時のエネルギー吸収量に基づく同調質量 ダンパーの制振指標に関する検討

VIBRATION CONTROL PERFORMANCE INDEX OF MASS DAMPER SYSTEM BASED ON ABSORBED ENERGY DURING STRONG WIND

田村和夫*¹, 柴 慶治*², 和田 章*³

Kazuo TAMURA, Keiji SHIBA and Akira WADA

This paper describes equivalent damping ratio (EDR) of a mass damper system, based on the absorbed energy by the mass damper during strong wind. The proposed EDR is evaluated from the ratio of absorbed energy and the building's response velocity. By using the EDR, we can simply express the vibration control performance of the mass damper system, not only at the design stage but also after the completion of the building. The EDR is easily obtained from the response time histories of the building and the mass damper which are recorded during strong winds. We have studied the effect of some parameters of mass dampers to the EDR, and demonstrated the applicability of the EDR using the response records of the two actual buildings in which the mass damper systems are installed.

Keywords : *mass damper, active tuned mass damper, hybrid mass damper, wind response, energy*

マスダンパー, 能動型同調質量ダンパー, ハイブリッド・マスダンパー, 風応答, エネルギー

1. はじめに

高層建物の強風時および地震時の応答を低減するために、パッシブ型あるいはアクティブ型の多様な質量ダンパーシステムが提案され、装置特性や制御効果などについて多くの解析的研究および実験、実測に基づく研究が行なわれている^{1)~13)}。このような制振システムでは、設計段階における制振性能の評価とともに、建物に設置された後に設計時に想定された制振性能が発揮できていることの確認が重要である。また、建物の竣工直後のみならず竣工後の経年に対しても制振性能が維持されていることを確認しておく必要がある。

これに対し設計段階では、外乱を仮定して、応答解析により制振装置作動時の効果を確認しているのが一般的である。また、制振装置設置後の建物に対しては、地震時応答については観測データを基にシミュレーション解析の援用により性能確認が行われており、強風時応答については外力の測定が困難なことから、同一に近い外乱

条件下における制振装置作動有無の応答観測データを比較することで、制振効果が確認されていることが多い。また、風応答については、厳密には同一風外力条件下での比較はできないため、制振装置作動の有無のケースについて、一定時間毎の平均的な風速と建物応答値との関係を数多く求め、これらの全体的な傾向の比較で制振効果を論じている場合もある。しかし本来は、制振効果を把握するためには風速だけでなく、風向の変化による応答への影響も考慮する必要があり、問題はより複雑になる。さらに、建物内部に居住者がいる場合に、制振装置の作動を故意に止めることは実際には不可能な場合が多く、しかも長期間にわたる性能の追跡をこのような方法で行うことは難しいと考えられる。

制振装置のない一般の建物に対して行われるように、風外力が定常ランダム過程であるとして、応答観測データからハーフパワー法や自己相関法などにより、制振装置作動状態の建物減衰定数を同定する方法も考えられる

*¹ 清水建設和泉研究室 主任研究員

*² 清水建設技術研究所 博士(工学)

*³ 東京工業大学 教授・工博

Chief Research Engineer, Izumi, Research Institute, Shimizu Corporation.

Institute of Technology, Shimizu Corporation, Dr. Eng.

Prof., Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.

が、これらの手法ではデータによるばらつきが大きいことや推定精度を高めにくいなどの問題が指摘されている¹⁴⁾。また、RD法と呼ばれる減衰評価手法についての検討が行われており、比較的簡便に減衰の評価ができることが示されているが¹⁴⁾、長周期構造物の場合には減衰定数の推定精度を高めるためにかなり長時間の応答データが必要になる。いずれにしても、以上の手法では制振装置と建物内部減衰の合計に対する減衰定数を得ることはできるが、制振装置のみの制振性能の評価を直接的に行うことはできない。

一方、最近制振装置のエネルギー吸収特性に着目した研究例が増えている^{5), 15)~17)}。構造物の振動をエネルギーの観点から論じることが、複雑な挙動を全体的に把握するのに適しており、現象が理解しやすくなる。

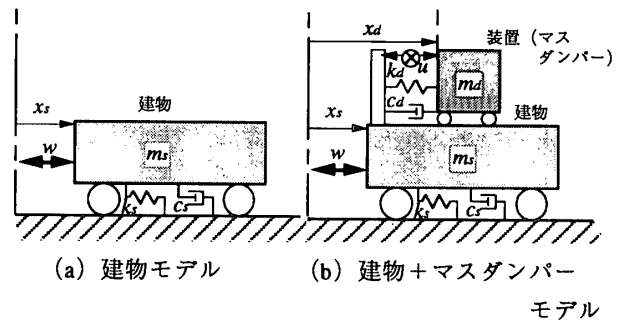
本論文では、建物に設置した同調質量型ダンパーの強風時制振性能を、装置が吸収したエネルギー量に基づく等価減衰定数で評価する方法を提案する。この方法によると、設計時に制振装置の性能を簡潔に表現でき、設計の見通しがよくなると同時に、竣工後の建物についても、建物自身の減衰性能や風外力のパワーや風向などにかかわらず、制振装置を故意に停止せずに制振装置による効果を把握することが可能となる。また、マスダンパーの場合には、ダンパーと建物の応答を観測することにより装置作動中にダンパーが吸収したエネルギー量を求めることは容易であり、これを制振の指標にすることは実用上有効な手法となる。

ここでは、パッシブ型とアクティブ型のマスダンパーについて、ホワイトノイズ外乱に対するエネルギー吸収量に基づく等価減衰定数を提案し、マスダンパーおよび風外力のパラメータが等価減衰定数におよぼす影響を検討する。さらに、マスダンパーを設置した2件の実建物の強風時応答観測データを分析し、エネルギー吸収の時系列特性と制振性能評価に関する考察を行う。なお、以下ではパッシブ型の同調質量ダンパーをTMD、アクティブ型のものをHMDと略記する。

2. 制振装置のエネルギー吸収量に基づく等価減衰定数

2.1 等価減衰定数の定義

構造物の等価減衰定数としては、1自由度系のモデルに対して、1周期当たりのエネルギー消費量を等しくする等価粘性減衰定数が一般的である。また、多モード構造物の場合にも、各モードに分解して等価減衰定数を求めることが行われている。これに対し、TMDの場合に、ホワイトノイズ外乱に対する主構造系の応答変位の分散値を同一にする主構造系の等価減衰定数を定義しているものもある^{18), 19)}。建物の強風時応答を評価する場合



図一 解析モデル

には、このようなホワイトノイズ外乱に対する応答を等価にする減衰定数を求めることで設計の見通しがよくなると考えられ、本論文でもこの方式を踏襲する。

まず、図一 (a) に示す1自由度系建物モデルを考える。この運動方程式は下式のようにになる。

$$\ddot{x}_s + \frac{c_s}{m_s} \dot{x}_s + \frac{k_s}{m_s} x_s = \frac{w}{m_s} \quad (1)$$

ここに、 m_s 、 c_s 、 k_s は建物の質量、粘性減衰係数、剛性を表し、 x_s は建物の変位を w は外乱をそれぞれ表す。

外乱 w が、(2) 式で定義されるパワースペクトル密度 $S(\omega)$ が S_0 のホワイトノイズとすると、(1) 式右辺項のパワースペクトル密度は S_0/m_s^2 となるので、1自由度系建物モデルの変位と速度の各2乗平均値は(3) 式で得られる²⁰⁾。

$$S(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \varphi(\tau) e^{-j\omega\tau} d\tau \quad (2)$$

ただし、 $\varphi(\tau)$ は外力波の自己相関関数である。

$$E[x_s^2] = \frac{S_0}{4h_s m_s^2 \omega_s^3}, \quad E[\dot{x}_s^2] = \frac{S_0}{4h_s m_s^2 \omega_s} \quad (3)$$

ここに、 $E[x_s^2]$ と $E[\dot{x}_s^2]$ はそれぞれ x_s と \dot{x}_s の2乗平均値を表し、 h_s は建物の減衰定数で $h_s = c_s/(2m_s \omega_s)$ 、また $\omega_s^2 = k_s/m_s$ である。

(3) 式より、ある制振システムについて $E[x_s^2]$ または $E[\dot{x}_s^2]$ を等価にする等価減衰定数 h_{e1} 、 h_{e2} は下式で定義できる。

$$h_{e1} = \frac{S_0}{4m_s^2 \omega_s^3 E[x_s^2]} - h_s \quad (4)$$

$$h_{e2} = \frac{S_0}{4m_s^2 \omega_s E[\dot{x}_s^2]} - h_s \quad (5)$$

(4)、(5) 式より、外力のパワースペクトルと建物の減衰定数が与えられれば、制振システムの等価減衰定数を求めることができる。

次に、 S_0 と h_s が未知の場合に等価減衰定数 h_e を求め

る方法を示す。即ち、建物の粘性減衰による平均的なエネルギー損失量を Φ とすると、 $\Phi = c_s E[\dot{x}_s^2]$ であるから、これを用いることで h_e は以下のように表せる。

$$h_e = \frac{c_{se}}{2\omega_s m_s} = \frac{\Phi_e}{2\omega_s m_s E[\dot{x}_s^2]} \quad (6)$$

ここに、 c_{se} は等価減衰係数であり $c_{se} = \Phi_e / E[\dot{x}_s^2]$ である。ただし、 Φ_e は考えているシステムにおける平均エネルギー損失量であり、ここでは建物の内部減衰による分を含まないものとしている。なお、(6) 式の h_e と (5) 式の h_{e2} とは等しい値になる。

マスダンパーの場合には (6) 式を用いることにより、マスダンパーと建物の応答観測結果を基にして等価減衰定数が求められる。

2.2 同調質量ダンパーの等価減衰定数

次に、図-1 (b) のHMDの場合について (6) 式に基づく等価減衰定数を求める。金子ら¹⁷⁾ は、HMDについて周波数領域と時間領域のそれぞれに対してエネルギー吸収量を整理しているが、ここでは周波数領域の伝達関数から時間領域のエネルギー吸収量を算出する。

制御力 u が

$$u = g_1 \dot{x}_s + g_2 \dot{x}_d + g_3 x_s + g_4 x_d \quad (7)$$

の形で表されるとすると、運動方程式は (8) の形になる。ただし、 x_d は装置の変位を、 g_1, g_2, g_3, g_4 は建物と装置の速度および変位にかかるフィードバックゲインをそれぞれ表す。

$$\mathbf{M} \ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{C} \dot{\mathbf{x}} + \mathbf{K} \mathbf{x} = \mathbf{w} \quad (8)$$

ここで、

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} m_s & 0 \\ 0 & m_d \end{bmatrix}, \quad \mathbf{C} = \begin{bmatrix} c_s + c_d + g_1 & -c_d + g_2 \\ -c_d - g_1 & c_d - g_2 \end{bmatrix}, \\ \mathbf{K} = \begin{bmatrix} k_s + k_d + g_3 & -k_d + g_4 \\ -k_d - g_3 & k_d - g_4 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{x} = \begin{bmatrix} x_s \\ x_d \end{bmatrix}, \quad \mathbf{w} = \begin{bmatrix} w \\ 0 \end{bmatrix}$$

である。ただし、 m_d, c_d, k_d はマスダンパーの質量、粘性減衰係数、剛性を表す。

$j = \sqrt{-1}$ とおき、 $w = w_0 e^{j\omega t}$ を (8) 式に代入し、整理すると次式が得られる。

$$\mathbf{A}_1 \mathbf{x} = \mathbf{w} e^{j\omega t} \quad (9)$$

ここに、

$$\mathbf{A}_1 = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix}$$

である。ただし各成分 $a_{11}, a_{12}, a_{21}, a_{22}$ は次式である。

$$\begin{aligned} a_{11} &= -m_s \omega^2 + j\omega(c_s + c_d + g_1) + k_s + k_d + g_3 \\ a_{12} &= -j\omega(c_d - g_2) - k_d + g_4 \\ a_{21} &= -j\omega(c_d + g_1) - k_d - g_3 \\ a_{22} &= -m_d \omega^2 + j\omega(c_d - g_2) + k_d - g_4 \end{aligned} \quad (10)$$

(9) 式より

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} x_s \\ x_d \end{bmatrix} = \mathbf{A}_1^{-1} \mathbf{w} e^{j\omega t} \quad (11)$$

となり、この式を解いて求めた x_s と x_d を用いて、建物速度 \dot{x}_s 、装置加速度 \ddot{x}_d は以下の式から求められる。

$$\dot{x}_s = \omega x_s, \quad \ddot{x}_d = -\omega x_d \quad (12)$$

$w=1$ として (11)、(12) 式から得られる単位外力当たりの周波数応答は周波数伝達関数に相当する。

ところで、一般に2つの励振過程 $f_1(t), f_2(t)$ および応答過程 $q_1(t), q_2(t)$ がそれぞれエルゴード過程であるとすると、応答過程の相互相関関数 $R_{q_1 q_2}(\tau)$ は次式で表現される²¹⁾。

$$\begin{aligned} R_{q_1 q_2}(\tau) &= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} q_1(t) q_2(t + \tau) dt \\ &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} H_1^*(\omega) H_2(\omega) S_{f_1 f_2}(\omega) e^{j\omega \tau} d\omega \end{aligned} \quad (13)$$

ここに、 $H_1(\omega), H_2(\omega)$ は2つの系の周波数伝達関数を表し、 $H_1^*(\omega)$ は $H_1(\omega)$ の複素共役を表す。また、 $S_{f_1 f_2}(\omega)$ は2つの励振に関する相互スペクトル密度関数を表す。

$m_d \ddot{x}_d(t) \dot{x}_s(t)$ を時間積分したものがHMDが建物から吸収したエネルギー量と等価であるから、(13) 式を利用して $\tau=0$ 、 $f_1(t)=f_2(t)$ とし、 $S_{f_1 f_2}(\omega)$ を外乱のパワースペクトル密度関数 $S(\omega)$ に置き換えることにより、マスダンパーが建物から吸収する単位時間当たりのエネルギー吸収量は以下ようになる。

$$\begin{aligned} \Phi_e &= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} m_d \ddot{x}_d(t) \dot{x}_s(t) dt \\ &= \frac{m_d}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} H_{da}^*(\omega) H_{sv}(\omega) S(\omega) d\omega \end{aligned} \quad (14)$$

ただし、 $H_{da}(\omega), H_{sv}(\omega)$ はそれぞれマスダンパーの加速度と建物速度の周波数伝達関数である。

また、同様に建物応答速度の2乗平均値は以下のように表される。

$$E[\dot{x}_s^2] = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} H_{sv}^*(\omega) H_{sv}(\omega) S(\omega) d\omega \quad (15)$$

(14) 式と (15) 式から得られた Φ_e と $E[\dot{x}_s^2]$ とを (6) 式に代入することにより、HMDの等価減衰定数が求められる。なお、TMDの場合にはフィードバックゲインをゼロとして同様に求めればよい。

なお、建物が n 質点系モデルで表される場合には、マスダンパーの重量、剛性、減衰、制御力等を実スケールとし、建物の質量 m_s を次式のような1次モード質量とすればよい。

$$m_s = \sum_{i=1}^n m_i u_{1i}^2 \quad (16)$$

ここに、 m_i は建物 i 層の質量、 u_{1i} は建物1次固有ベクトルの i 層の成分であり、マスダンパー設置階の成分を1.0に規準化したものとする。得られた2自由度系モデルの m_s の応答は建物のマスダンパー設置階の応答を表すことになる。なお、ここでは建物の粘性減衰定数は数%以下とし、固有モードにおける各層間の位相差は少いモデルを想定している。ここで定義したマスダンパーの等価減衰定数はあくまで各次モードのモデルを想定したものであることに注意する必要がある。また、風外力の場合には一般に1次モード成分が支配的であり、本論文でも1次モードを検討の対象とする。

2.3 等価1自由度系モデルの応答特性

本節では、図-1 (b) の2自由度系モデル (TMDモデルあるいはHMDモデル) について、ダンパーの吸収エネルギー量に基づき等価減衰定数を算定し、この等価減衰定数をもつ等価1自由度系振動モデル (等価TMDモデル、等価HMDモデル) の応答特性について検討する。

なお、HMDの制御則としては最適制御理論に基づく状態フィードバック制御を採用した。(8)式を(17)式に示す状態方程式の形に変形し、(18)式の評価関数を最小化するフィードバックゲイン(7)式の g_1, g_2, g_3, g_4 に相当)を求めた。

$$\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{A} \mathbf{X} + \mathbf{B} u \quad (17)$$

$$J = \int_0^{\infty} (q \dot{x}_s^2 + ru^2) dt \quad (18)$$

ここに、 $\mathbf{X} = [\dot{x}_s, \dot{x}_d, x_s, x_d]^T$ であり、

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -(c_s + c_d)/m_s & c_d/m_s & -(k_s + k_d)/m_s & k_d/m_s \\ c_d/m_d & -c_d/m_d & k_d/m_d & -k_d/m_d \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{B} = [1/m_s, -1/m_d, 0, 0]^T \quad (19)$$

である。また、 q, r はそれぞれ建物速度と制御力にかかる重み係数である。

検討に用いた解析モデル定数を表-1に示す。なおここでは、(14)、(15)式に基づき周波数軸での積分を数値的に行うことにより、単位時間当たりのエネルギー吸収量と建物速度の2乗平均値を求め、等価減衰定数を(6)式から求めた。なお、表中には求めたHMDおよびTMDの等価減衰定数も示している。

これらのモデルについて、単位正弦波外力に対する、エネルギー吸収量と建物加速度応答の周波数領域にお

表-1 解析モデル定数

$m_s = 10,000$ ton,	$T_s = 4.0$ sec,	$h_s = 0.01$
$m_d = 100$ ton,	$T_d = 4.0$ sec,	$h_d = 0.05$
(HMD) 制御ゲイン算定用重み係数 $q = 1,$	$r = 0.1$	
等価減衰定数 $h_e = 0.105$		
(TMD) 等価減衰定数 $h_e = 0.024$		

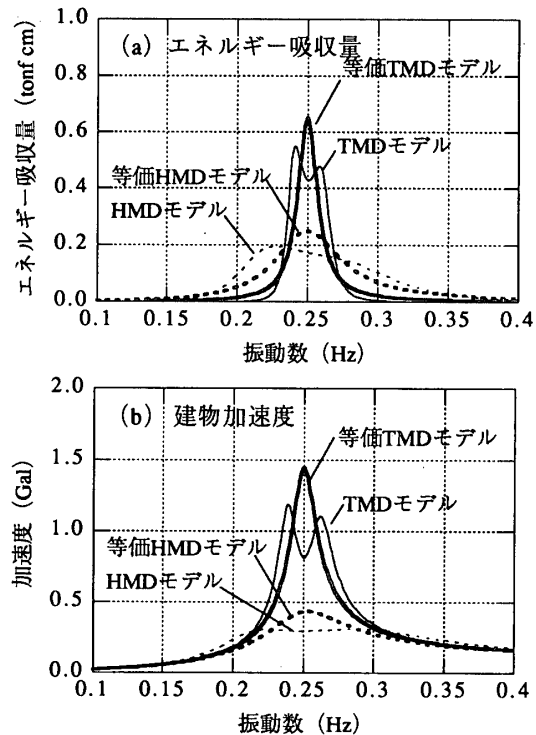


図-2 周波数応答曲線の比較

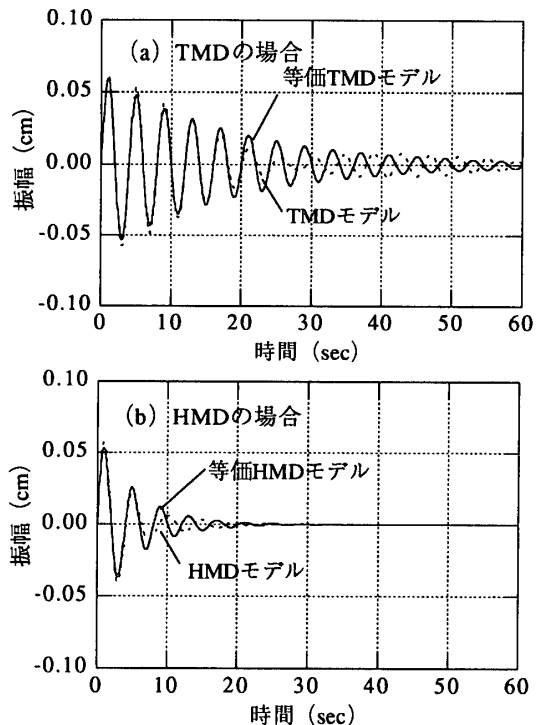
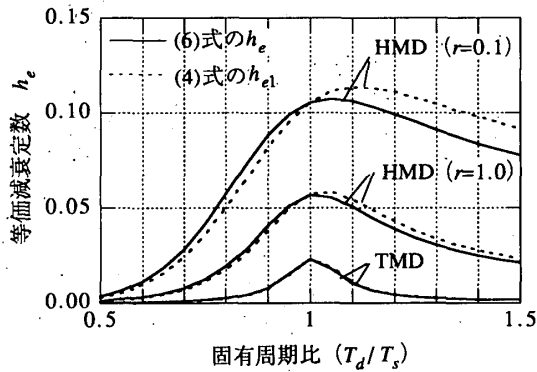


図-3 インパルス応答曲線の比較



図一四 固有周期比と等価減衰定数

る値の例を、図一2に示す。図より、マスダンパーを有する系とエネルギー吸収量が等価な1自由度系建物モデルの応答は、各周波数毎には2自由度系のTMDモデルあるいはHMDモデルの応答と異なるが、全体的な傾向は類似している。

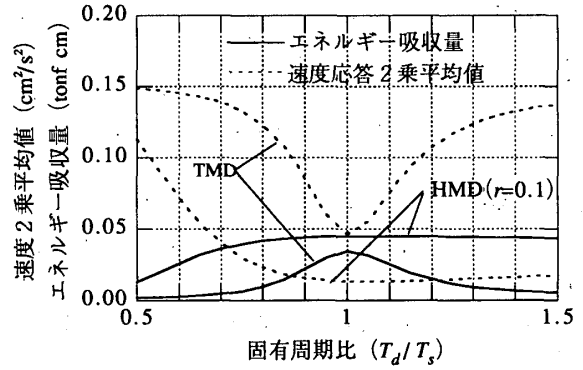
また、インパルス応答曲線の比較を図一3に示す。等価1自由度系の応答は2自由度系の応答と比べると後半部で位相が逆転するが、振幅の変化の全体的な傾向はほぼ一致している。

3. 等価減衰定数におよぼす各種パラメータの影響

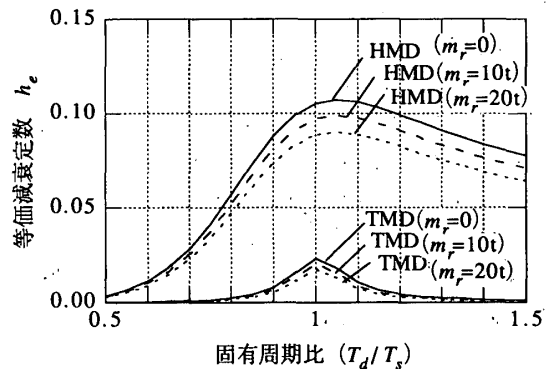
3.1 装置および制御パラメータの影響

マスダンパーのパラメータが制振効果に及ぼす影響については、既に多くの検討が行われている。本節では、これらのパラメータの一部について、ここで提案したエネルギー吸収量に基づく等価減衰定数との対応を求める。

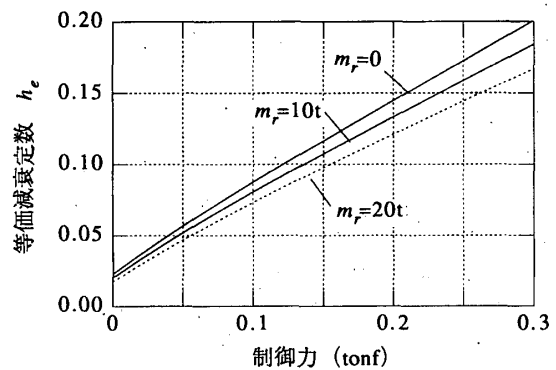
装置と建物の固有周期の比と(6)式に基づく等価減衰定数との関係を、TMDの場合とHMDの制御ゲイン2ケース ($q=1, r=1$) と ($q=1, r=0.1$) について求め図一4に示す。また、(4)式に基づく等価減衰定数も同図中に示している。ただし、装置の固有周期以外の値は表一1のモデルと同じにした。また同様に、固有周期比とホワイトノイズ外乱に対する建物の速度応答の2乗平均値、およびマスダンパーによるエネルギー吸収量との関係を図一5に示す。図一4より、等価減衰定数は固有周期比が1付近で大きな値になっている。また、固有周期比が1.0より小さくなると急激に低下するが、大きい側ではそれほど低下しない。また(4)式に基づく減衰定数は、(6)式の減衰定数よりも固有周期比が1より大きい範囲で大きな値になっている。図一5より、TMDのエネルギー吸収量は固有周期比が1.0の付近で大きいですが、HMDでは幅広い固有周期比の範囲ではほぼ一定になっ



図一五 固有周期比と速度応答・エネルギー吸収量



図一六 装置回転慣性の等価減衰定数に及ぼす影響



図一七 装置回転慣性の駆動効率に及ぼす影響

ている。

3.2 回転慣性の影響

HMDにおいて、駆動装置部の回転慣性など、建物とマスダンパーとの相対加速度に関係する慣性力即ち質量マトリクスの連成項が存在する場合について、制振性能の劣化特性を検討する。

このような場合には、(8)式における \mathbf{M} は次式のような形になる。

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} m_s + m_r & -m_r \\ -m_r & m_d + m_r \end{bmatrix} \quad (20)$$

ここに、 m_r は装置部の変形に起因する慣性項である。この M を (8) 式に代入すると、(9) ~ (12) 式と同様に建物および装置の応答を求めることができる。

表-1 のモデルに装置部の慣性項 m_r が加わる場合を考え、 $m_d + m_r = 100\text{ton}$ として、 m_r を 0, 10, 20ton にした場合について、 $m_r = 0, r = 0.1$ に対する制御ゲインを用いた HMD と TMD の場合の、装置固有周期比と等価減衰定数の関係を図-6 に、制御力の r.m.s. 値と等価減衰定数の関係を図-7 にそれぞれ示す。これらより、 m_r の比率が大きくなるにつれ等価減衰定数が小さくなり、制振の効率が低下している。

3.3 外力パワースペクトルの影響

前節では、外力のパワーを振動数領域で一定としたが、ここでは一般の建物に作用する風外力を想定して、振動数によりパワーが変化する対象にする。

風外力のパワースペクトルは一般には図-8 (a) のような形状をしており、通常の建物振動を対象にする場合には、振動数の増加とともにパワースペクトル密度が低下する領域にあることが多い。ここでは、対象とする建物の固有振動数付近において、対数軸で振動数の増加に対しパワースペクトル密度が直線的に減少するものと考え、この負のスペクトル勾配の等価減衰定数への影響度を検討する。

即ち、振動数と風外力パワーとの関係を次のようにモデル化する。

$$\log S_0(f) = \beta - \alpha \log f \quad (21)$$

ここで f は振動数、 α, β は定数で、 α はパワースペクトル密度の振動数に対する対数軸での負の勾配を示す定数であり、通常の建物のケースでは $\alpha = 2 \sim 3$ 程度になることが多い。パワースペクトル勾配有 ($\alpha = 2.5$) と無 ($\alpha = 0$) の両ケースに対して、固有周期比と等価減衰定数の関係を図-4 と同様にして図-9 に示す。ただしここでは、振動数が 0.1Hz 程度以下になると外力のスペクトル値が低下すると考え、対象建造物の周期が 4.0sec であることも考慮し、積分範囲を 0.1 ~ 2.0Hz として解析を行った。

図-9 より、外力のスペクトル勾配 α が 2.5 の場合の等価減衰定数は、TMD では $\alpha = 0$ の場合とほぼ同じ値になっている。HMD の場合には、 $(T_d/T_g) \leq 1.0$ では $\alpha = 2.5$ の方がやや低め、 $(T_d/T_g) \geq 1.0$ ではやや高めの傾向が見られるが、それほど大きな差はない。従って、自然風に対する建物応答を考える場合、ホワイトノイズ外乱を仮定して導入した (6) 式の等価減衰定数は、制振の指標として意味を持つと考えられる。なお、実観測結果との対応を考慮して、設計用の外力スペクトルとして勾配のあるものを用いる方法も有効と考えられる。

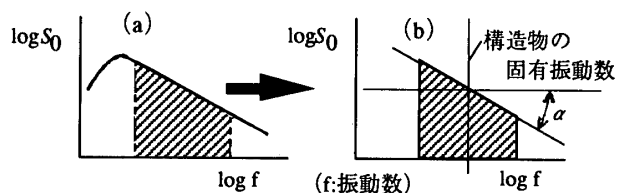


図-8 風外力のパワースペクトルのモデル化

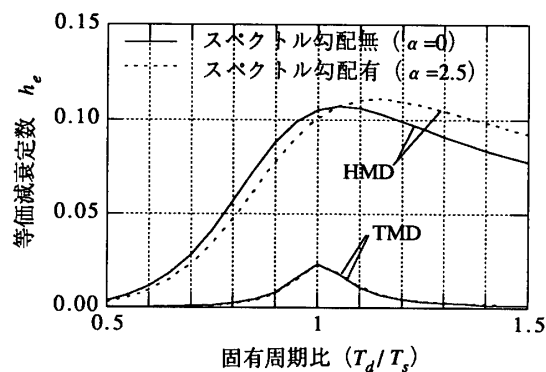


図-9 外力のパワースペクトル形状による等価減衰定数の比較

4. 実観測記録に基づく制振特性評価

4.1 検討対象建造物と装置概要

本章では、実際にマスダンパーを設置した建物での観測結果を基に、等価減衰定数を求める。検討の対象とした建物は以下の (1)、(2) に示す 2 件である。

(1) 建物-1

高さ約 105m の鉄骨造観光タワーであり、約 7 ton の重りを多段積層ゴムで支持している TMD が 1 台、タワーの頂部に設置されている²³⁾。建物の固有周期は 1.5 ~ 1.6sec であることが、制振装置固定時の強風時応答記録の分析結果を基に確認されている^{23) ~ 25)}。また、装置を固定した状態における建物の減衰定数は応答振幅により差があり、1 ~ 4% の間に分布している²⁵⁾。建物の設計における 1 次のモード質量は 699ton である²³⁾。平面が円形に近い形状であり、応答に対する風向の影響が比較的少ない建物と考えられる。

(2) 建物-2

高さ 200m の 50 階建て鉄骨造建物である^{11), 12)}。多段積層ゴムで支持された重りを、ボールねじを介して AC サーボモーターで駆動するタイプの HMD が 2 台、建物頂部の PH1 階に設置されている。建物の平面形状は比較的偏平であり (高層階の平面が約 15m x 50m)、約 19.2m 離れて設置された 2 台の HMD で建物短辺方向の並進振動と捩れ振動を制御する仕組みになっている。制御則としては、建物の並進と捩れの両 1 次モードに対して、最適レギュレータ理論に従い設計されたフィードバック制御が

採用されている。建物短辺方向にのみアクティブに駆動し、長辺方向にはパッシブなTMDとして働く方式である。アクティブ制御力は、PH1階のHMD設置位置の床およびHMDの重り上の速度計の出力と、これらを数値的に積分して得られた変位にフィードバックゲインを乗ずることで求めている。また、本システムにおいては、変位を求める際と求められた制御力に対し、次に示す形のデジタルハイパスフィルターをかけている。

$$x_{HF} = x_0 - x_{LF} \quad (22)$$

ここに、 x_{HF} はハイパスフィルターをかけた後の値、 x_0 はハイパスフィルターをかける前の値、 x_{LF} はカットオフ振動数 f_c を用いて次式で表されるローパスフィルターをかけた後の値である。

$$\dot{x}_{LF} = -2\pi f_c x_{LF} + 2\pi f_c x_0 \quad (23)$$

なお、本ケースでは変位、制御力ともに $f_c = 0.1\text{Hz}$ としている。

なお、この建物では、2台のHMDを利用して、並進および振れ方向の強制振動試験が実施され、建物動特性が測定されている。建物の固有周期は、短辺方向並進1次モードが約3.8sec、振れ方向1次モードが約2.2secとなっている²²⁾。減衰定数は並進方向1次が約1.0%強、振れ方向1次が約2.4%である²²⁾。また、設計時の並進方向1次のモード質量は15,600tonである。

4.2 強風時応答観測波に基づく等価減衰定数の算出

上記の2件の建物では、既に強風時の応答観測記録が多く得られている。これらの一部を利用して一定時間毎の建物応答速度の2乗平均値とマスダンパーによるエネルギー吸収量を求め、これらから等価減衰定数を算定した結果を以下に示す。

両建物においては、ダンパー設置部の建物床とダンパーの重りの加速度が記録されており、このうち建物床の加速度時系列データを数値積分することにより、建物の応答速度を求めて解析に用いた。

(1) 建物-1

建物-1については、比較的大きな応答が長時間継続した1991年の台風9号の記録の一部を取り出して検討した。この台風では、建物頂部における10分間平均風速が15m/sの状態が12時間以上継続した²⁴⁾。ここでの検討で用いた12:00~12:20の20分間の風速と建物床x方向の加速度応答の時系列波形を図-10に示す。

建物x方向について、評価時間を30secおよび60secとして、図-10の20分間のデータを40等分および20等分にした各データに対し、平均エネルギー吸収量 Φ_e と建物応答速度の2乗平均値 $E[\dot{x}_e^2]$ を求めプロットしたものを図-11に示す。また、評価時間60secの場合の各値を基に求めた等価減衰定数を図-12に示す。これ

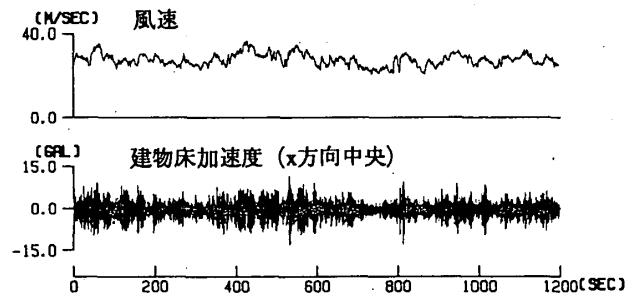


図-10 風速と建物床加速度
(1991年7月29日 12:00~12:20)

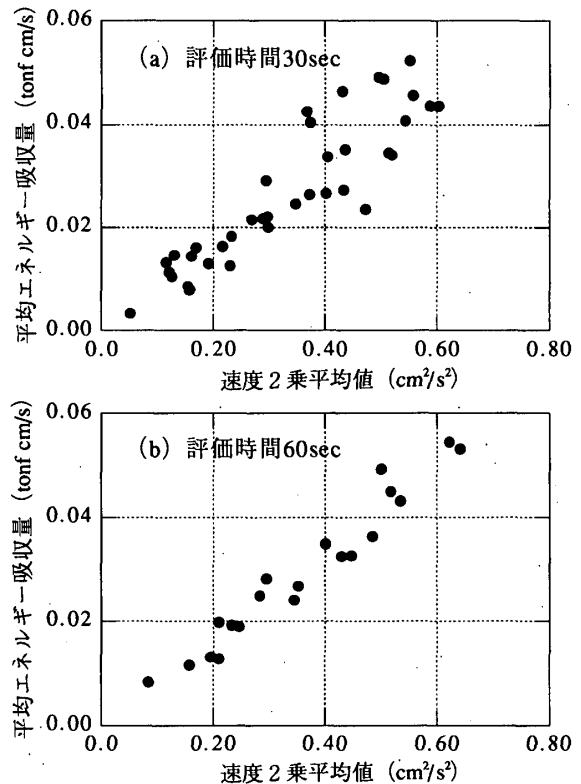


図-11 建物速度2乗平均値とダンパーによるエネルギー吸収量

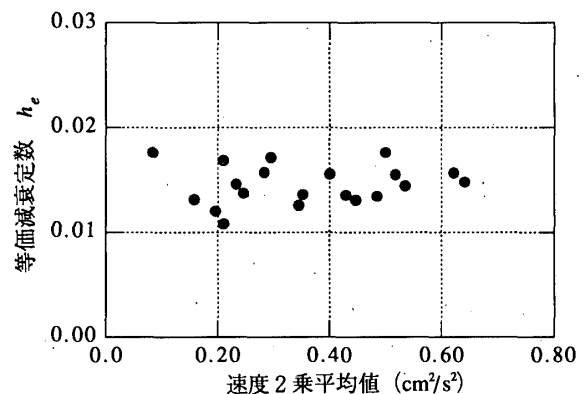


図-12 建物速度2乗平均値と等価減衰定数
(評価時間60sec)

らより、エネルギー吸収量と建物応答速度との間には強い相関があり、特に評価時間60secの場合には、等価減衰定数 h_e はほぼ0.015の周辺に分布している。また、x, yの両方向について、本データの最初である12:00を起点として、平均化の時間を30secずつ増加した場合の、等価減衰定数を図一13に示した。同図よりこの範囲では、平均化時間にかかわらずほぼ一定の値になっており、本ケースでは、60sec程度以下の比較的短時間の観測データから等価減衰定数を算定してもよいことを示している。

また、表一2に示す建物およびダンパー重量の設計値と、強風時の応答を基に求められた剛性と減衰^{23), 25)}を用いて計算した等価減衰定数は0.013~0.018となり、ここで計算された図一12の等価減衰定数とよい対応を示している。

表一2 解析モデル

$m_s = 699 \text{ ton}$,	$T_s = 1.55 \text{ sec}$, $h_s = 0.02$
$m_d = 7.2 \text{ ton}$,	$T_d = 1.45 \sim 1.50 \text{ sec}$,	$h_d = 0.04$

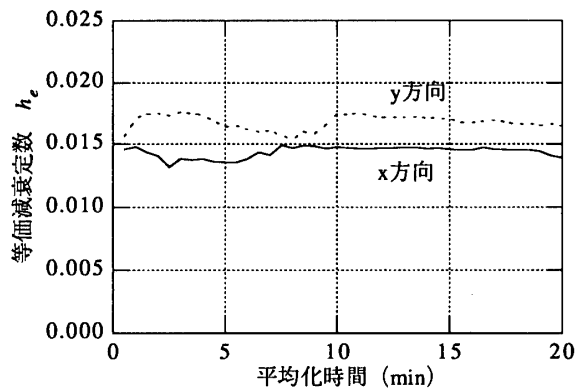
(2) 建物-2

建物-2については、1994年9月29日の台風26号の時に得られた記録について分析した。建物頂部における10分間毎の風速の時間変化を図一14に示す。図中に今回の解析の対象とした時間帯を太線で示した。なお、建物長辺方向の振幅は小さかったため、短辺方向についてのみ検討した。

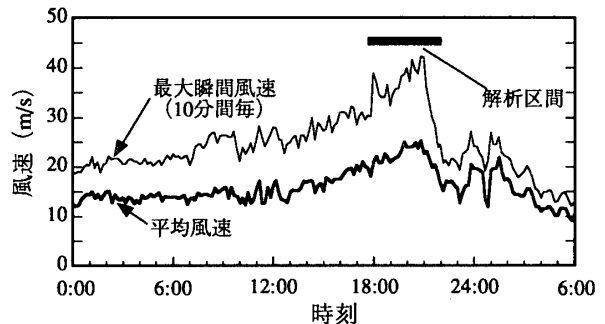
観測データを基に、建物PH1階床の短辺方向速度の並進成分の2乗平均値と、この方向に対するHMDの等価減衰定数との関係を求め、図一15に示す。同図では、60sec間毎のデータから減衰定数を求めた場合(評価時間60sec)と600sec間毎のデータから求めた場合(評価時間600sec)を示している。このうち、評価時間60secの場合については18:57~19:57の記録を用いている。評価時間60secの場合にはかなり値がばらついており、評価時間600secの場合にはばらつきが小さくなっており、ほぼ0.025周辺に分布している。また、同図より、応答振幅が小さい領域で等価減衰定数が小さくなっており、振幅の増大とともに、漸増する傾向が見られる。評価時間60secの場合にはばらつきが大きい要因としては、外力の変動特性と共に、装置特性の変動の影響も考えられる。

建物およびマスダンパーの制御ゲイン算定用諸定数と、今回の強風時応答観測波から同定したマスダンパーの固有周期・減衰を用いたシミュレーション解析用諸定数を表一3中に示す。

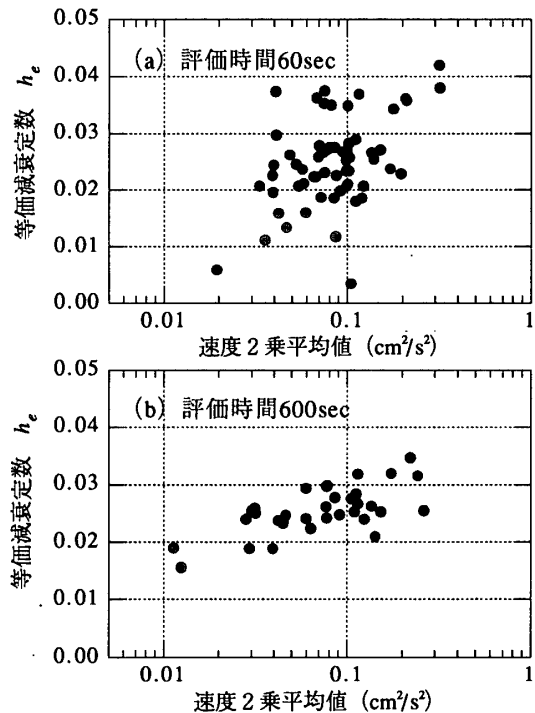
なお、強制振動試験結果より、マスダンパー装置の方が建物特性よりも非線形性が大きいことから、マスダンパーの剛性と減衰を以下の方法で同定し、幅をもたせた



図一13 平均化時間と等価減衰定数



図一14 風速の時間変化
(1994年9月29日~9月30日)



図一15 建物速度2乗平均値と等価減衰定数

値としている。即ち、マスダンパーの剛性と減衰定数を仮定して、建物床の加速度波とアクティブ制御力波を入力とした応答解析を行ない、マスの応答加速度の時系列

における観測値との誤差の2乗が最小となるような装置剛性と減衰定数を求めた。また、建物変位と制御力の算出時に用いられているハイパスフィルターの特性を状態方程式に組み込んで、周波数応答関数を求めたものから等価減衰定数 h_e を算出した。表-3の定数に基づく等価減衰定数の解析値と、観測値から求めた評価時間600secの場合の値とを、装置と建物の固有周期の比を横軸にとって図-16に示した。この図で、観測値については、マスダンパーの周期として個々の600secのデータ毎に同定したものをを用いている。また、風外力のスペクトル特性として(21)式の α が0の場合と3.0の場合の2ケースについて解析値を示している。

これらの図より、観測波を基に算定された等価減衰定数は、解析値よりもやや低めの値となっているが、風外力のスペクトル勾配を $\alpha=3.0$ とした場合については、比較的近い値になっている。また、装置と建物との固有周期比の変化による等価減衰定数の変化の傾向も同様となっている。なお、解析値と実測値の差異の原因としては、風外力の特性に起因するもの、2台のマスダンパーの非線形的性質、建物の特性変動、センサーの信号に入るノイズ等の影響が考えられ、今後本論文で提案した等価減衰定数を介して、これらの要因分析を行いたい。

5. 結論

本論文の内容を以下にまとめる。

(1) 同調質量ダンパーの制振特性を簡潔に表現する指標として、ホワイトノイズ外乱に対する建物応答速度の2乗平均値と同調質量ダンパーによる平均エネルギー吸収量に基づく等価減衰定数を提案した。この等価減衰定数は、建物自身の内部減衰や風外力のパワー、風向などに関係なく求めることができる。

(2) 同調質量ダンパーと建物との固有周期の比、および同調質量ダンパー部の相対加速度に関係する慣性項が、提案した等価減衰定数に及ぼす影響を示した。

(3) 外乱のパワースペクトル特性が、対数軸で振動数に対して直線的に負の勾配で変化する場合でも、スペクトルが平坦な場合と比較してそれほど大きく等価減衰定数は変化しない。

(4) TMDあるいはHMDが設置された2件の実建物システムの強風時応答観測データを基に、提案した等価減衰定数をそれぞれ算出し、各マスダンパーシステムの制振性能の把握ができた。

(5) TMDが設置された固有周期約1.6secのタワー建物では、約1分間分の応答時系列データからTMDの等価減衰定数の値が求められた。また、時系列の観測データから得られた等価減衰定数の値は、建物および装置の諸定

表-3 建物とHMDの諸定数

(制御ゲイン算定用定数)			
$m_s = 15,600$ ton,	$T_s = 3.8$ sec,	$h_s = 0.01$	
$m_d = 230$ ton,	$T_d = 3.7$ sec,	$h_d = 0.05$	
重み係数 $q = 1,$	$r = 0.05$		
(シミュレーション解析用定数)			
$m_s = 15,600$ ton,	$T_s = 3.8$ sec,	$h_s = 0.01$	
$m_d = 222$ ton,	$m_r = 8$ ton,		
$T_d = 3.4 \sim 3.6$ sec,	$h_d = 0.10 \sim 0.15$		

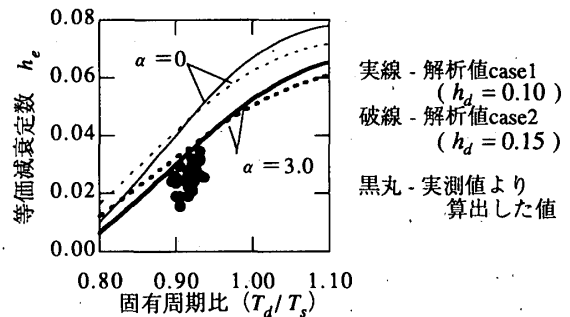


図-16 固有周期比と等価減衰定数

数を基にホワイトノイズ外乱を仮定して算定された値とよい対応を示した。

(6) HMDが設置された固有周期約3.8secの50階建高層建物の例では、時系列の観測データから評価時間を10分間として求めた等価減衰定数はほぼ一定の値になり、装置の固有周期の振幅依存性を考慮した等価減衰定数の解析値の傾向と一致した。また、風外力のパワーが振動数の増大と共に低下する場合の解析値の方が、振動数に対して一定とした場合よりも観測値との一致度が高かった。

謝辞

本論文で示した制振装置システムは、清水建設(株)技術研究所の稲田泰夫博士、同技術開発センターの小川雄一郎主査をはじめとする制振開発プロジェクトのメンバーによって開発されたものであります。開発に関与された各位に感謝致します。

参考文献

- 1) Chang, J.C.H. and Soong, T.T.: Structural Control Using Active Tuned Mass Dampers, Proc. of ASCE, Vol.106, EM6, pp.1091~1098, 1980.12
- 2) 谷田宏次: パッシブとアクティブを組み合わせた制振方式, Structure, No.32, 1989年
- 3) 渡辺亨, 吉田和夫: ハイブリッドアクティブ動吸振器のパラメータの最適化, 機械力学・計測制御講演論文集 (Vol.B), 日本機械学会, No.910-39(IIIB), pp.70~73, 1991年7月

- 4) 背戸一登, 猿渡克己, 藤田勝久, 古石喜郎: 能動的動吸振器の研究, 日本機械学会論文集 (C編), 57巻538号, pp.44~51, 1991年
- 5) 金子美香, 三田 彰: ハイブリッドマスダンパーのエネルギー吸収特性と制御手法に関する研究, 日本建築学会構造系論文報告集, 第449号, pp.103~110, 1993年7月
- 6) 永田敬雄, 山田周平, 松本竹二ほか: みなとみらい2 1ランドマークタワーの制振装置 (その1) ~ (その2), 日本建築学会大会学術講演梗概集 (中国) B, pp.885~888, 1990年10月
- 7) 藤田隆史, 水田政智, 松本喜代隆ほか: 大規模実験モデルによる高層建物制振用アクティブ・パッシブ切替え型マスダンパーの研究, 日本機械学会論文集 (C編) 59巻557号, pp.36~43, 1993年1月
- 8) 柴 慶治, 田村和夫, 佐武直紀, 横田治彦, 米田義弘: ハイブリッドマスダンパー (HMD) を用いた建築構造物の応答制御, アクティブ制震 (振) シンポジウム論文集, pp.263~270, 1992年3月
- 9) 田村和夫, 三田 彰, 金子美香, 前林和彦, 小川雄一郎, 稲田泰夫: ハイブリッドマスダンパーの高層建物への適用に関する研究, アクティブ制震 (振) シンポジウム論文集, pp.233~240, 1992年3月
- 10) 小鹿紀英, 小堀鐸二, 坂本光雄, 佐々木勝康, 池田芳樹: AMD (アクティブ・マス・ドライバー) システムの地震・強風時の制御効果, アクティブ制震 (振) シンポジウム論文集, pp.209~215, 1992年3月
- 11) 浮田高志, 稲田泰夫, 辻英一, 田村和夫ほか: 大阪・ORC200シンボルタワーの制振装置 (その1) ~ (その2), 日本建築学会大会学術講演梗概集 (北陸) B, pp.953~956, 1992年8月
- 12) 稲田泰夫, 小川雄一郎, 田村和夫, 前林和彦, 柴 慶治: 大型ハイブリッドマスダンパーシステムの開発と超高層建物への適用, 第2回振動制御コロキウムPART.B講演論文集, pp.95~102, 1993年8月
- 13) 遠山幸太郎, 相沢 覚, 山本雅史, 東野雅彦: アクティブマスダンパー (AMD) の実構造物への適用に関する研究 (その2) 実測結果, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (関東) B, pp.757~758, 1993年9月
- 14) 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, 第454号, pp.29~38, 1993年12月
- 15) 北村晴幸, 山根尚志ほか: AMDを設置した高層建物の設計と解析 (その1) ~ (その2), 日本建築学会大会学術講演梗概集 (北陸) B, pp.965~968, 1992年8月
- 16) 曾根 彰, 山本鎮男: 各種制振構造システムのエネルギー吸収能力の非定常解析, 日本機械学会論文集 (C編), 60巻571号, pp.76~82, 1994年3月
- 17) 金子美香, 三田 彰, 柴 慶治: ハイブリッドマスダンパーのエネルギー吸収特性に関する解析的検討と検証実験, 日本建築学会構造系論文集, 第459号, pp.65~72, 1994年8月
- 18) 安部雅人, 藤野陽三: 摂動解による同調質量ダンパー (TMD) - 構造物系の動特性の理解と制振評価, 土木学会論文集, 第446号/I-19, pp.157~166, 1992年4月
- 19) Mohamed Abdel-Rohman: Optimal Design of Active TMD for Buildings Control, Building and Environment, Vol. 19, No.3, pp.191~195, 1984年
- 20) 柴田明德: 最新耐震構造解析, 森北出版, pp.179~180, 1975年
- 21) L.マイロヴィッチ著, 砂川恵訳: 電子計算機活用のための振動解析の理論と応用<下>, プレイン図書出版, pp.436~439, 1984年
- 22) 岡田敬一, 中村 豊, 柴 慶治, 早川 崇, 辻 英一, 浮田高志, 山浦晋弘: 大阪弁天町・ORC200シンボルタワーの強制振動試験 (その1 試験概要と結果), 日本建築学会大会学術講演梗概集 (関東) B, pp.875~876, 1993年9月
- 23) 川村 満, 人見泰義, 須賀川勝, 前林和彦, 小川雄一郎, 稲田泰夫, 梅田幹夫: 多段積層ゴムを用いたチューンド・マス・ダンパーの適用 (その1), (その2), 日本建築学会大会学術講演梗概集 (北陸) B, pp.1065~1068, 1992年8月
- 24) 田村幸雄, 島田健司, 日比一喜: ハウスステンボス・ドム・トールンの風・振動観測 その1台風時の強風の特長, 第12回風工学シンポジウム, pp.107~112, 1992年
- 25) 田村幸雄, 島田健司, 日比一喜, 川村 満, 人見泰義: ハウスステンボス・ドム・トールンの風・振動観測 その2台風時の建物の応答性状および減衰評価, 第12回風工学シンポジウム, pp.113~118, 1992年

(1994年7月10日原稿受理, 1994年12月15日採用決定)