

# セミアクティブマスダンパーのエネルギー吸収特性と 制振効果

## ENERGY ABSORPTION CHARACTERISTICS AND VIBRATION CONTROL EFFECT OF SEMI-ACTIVE MASS DAMPER SYSTEM

田村和夫\*, 和田 章\*\*  
*Kazuo TAMURA and Akira WADA*

The energy absorption characteristics of mass damper systems in time domain were studied in this paper. The control performance of the semi-active mass damper (SAMD) system was mainly discussed, analyzing two-degree-of-freedom models. Through the results of response analyses under harmonic or random excitations, the efficiency of the semi-active mass damper system was proved. The analyses also proved that the SAMD system has an optimum control gain magnitude which maximizes the vibration control efficiency. It was demonstrated that a couple of SAMDs were effective for reducing the transverse-torsional vibration response of a building against wind excitations.

**Keywords :** *vibration control, semi-active control, mass damper, control force, wind response*

制振, セミアクティブ制御, マスダンパー, 制御力, 風応答

### 1. はじめに

近年、高層建物の強風時の振動低減を目的とした各種制振装置が開発されて実用に供されている。その中で、マスダンパーは最も事例が多く、パッシブのみならずアクティブ制御を施した多くのタイプが提案されている。

パッシブマスダンパーについては、外乱をホワイトノイズとした場合についての制振特性に関する解析的研究が行なわれており<sup>1)~3)</sup>、時系列の風外乱データを用いた応答解析による制振効果予測<sup>4), 5)</sup>、さらには実測による制振効果確認も行なわれている<sup>6)~8)</sup>。また、最近各種の制御理論を用いたアクティブ制御方式のマスダンパーに関する研究事例も非常に多く、実建物の強風時あるいは地震時の応答観測により、制振効果を明らかにしているものも増えつつある<sup>9)~15)</sup>。しかし、これらの研究においては、主にマスダンパーによる建物の振動低減効果について論じられており、制振のメカニズムについての考察は必ずしも十分ではなかった。

これに対し、アクティブ、パッシブ、ハイブリッドの各方式のマスダンパーについて、エネルギー吸収特性に着目した研究が行なわれている<sup>16)~19)</sup>。このうち金子ら<sup>17), 19)</sup>は、各マスダンパーシステムの制振特性をエネルギーの観点から論じており、これにより各システムの制振メカニズムの理解が容易になる。ただし、この研究では、各周波数毎の平均的エネルギー吸収特性を論じているが、時刻歴制振特性に関する分析はほとんど行なわれていない。

一方、構造物の剛性や減衰を変化させることで振動を低減させるセミアクティブ制御の研究も従来より行なわれており<sup>20), 21)</sup>、マスダンパーにこの考え方を適用したセミアクティブマスダンパーの概念も提案されている<sup>22)</sup>。セミアクティブマスダンパーは、アクティブ制御用のエネルギーが不要で、構造物を加振することが少ない安全なシステムになり得る。構造物のセミアクティブ制御用の可変減衰装置として摩擦力可変方式<sup>23), 24)</sup>や

\* 清水建設和泉研究室 主任研究員

Chief Research Engineer, Izumi Research Institute, Shimizu Corporation

\*\* 東京工業大学 教授・工博

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

可変減衰オイルダンパー<sup>25)</sup>なども提案されており、さらに、印加電圧変化に対して抵抗力がほぼ瞬時に変化する電気粘性流体 (electro-rheological fluid) を用いた可変ダンパーも提案されている<sup>26), 27)</sup>。従って、これらを利用することで、セミアクティブマスダンパーの実現が可能と考えられる。しかし、セミアクティブマスダンパーについては、Hrovatら (1983)<sup>22)</sup>がその概念の提案と制振効果に関する検討事例を示しているものの、現在までにセミアクティブマスダンパーの制振メカニズムや応答特性に関する十分な検討は行われていない。

本論文では、マスダンパーが構造物に及ぼす力の観点からマスダンパーの特性を論じ、時間領域におけるエネルギー吸収特性に関する検討を行なう。さらに、セミアクティブマスダンパーのエネルギー吸収特性に着目した分析を行ない、マスダンパーと建物との固有周期の比や制御ゲインの大きさが制振効果に及ぼす影響に関する基礎的な検討を行なう。また、セミアクティブマスダンパーを2台用いて行なう、強風時の高層建物の並進一様振動制御の可能性についても検討する。

なお、本論文ではチューンドマスダンパー、ハイブリッドマスダンパー、セミアクティブマスダンパーを、それぞれTMD、HMD、SAMと略記する。

## 2 マスダンパーの調和外乱時の応答特性

### 2.1 TMDとHMDのエネルギー吸収特性

ここでは、図-1に示す2自由度系モデルを用いて、マスダンパーの基本制振力特性を検討する。

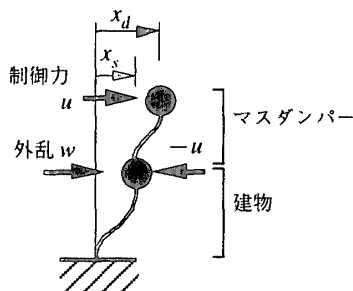


図-1 建物-マスダンパーモデル

建物とマスダンパーの変位をそれぞれ  $x_s$ ,  $x_d$  とすると、外乱が建物に作用する時の運動方程式は次式のような状態方程式の形で表せる。

$$\dot{X} = A X + B u + C w \quad (1)$$

ここに、 $X = [\dot{x}_s \quad \dot{x}_d \quad x_s \quad x_d]^T$

$$A = \begin{bmatrix} -(c_s + c_d)/m_s & c_d/m_s & -(k_s + k_d)/m_s & k_d/m_s \\ c_d/m_d & -c_d/m_d & k_d/m_d & -k_d/m_d \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$B = [-1/m_s \quad 1/m_d \quad 0 \quad 0]^T \quad (3)$$

$$C = [1/m_s \quad 0 \quad 0 \quad 0]^T \quad (4)$$

である。また、 $m_s$ ,  $c_s$ ,  $k_s$  と  $m_d$ ,  $c_d$ ,  $k_d$  はそれぞれ建物と装置の質量、減衰係数、剛性を表し、 $u$  は制御力を、 $w$  は外乱をそれぞれ表す。

(1) 式を解いて得られる  $\ddot{x}_d$  と装置の質量を乗じて符号を逆にした  $-m_d \ddot{x}_d$  は建物に作用するマスダンパーの制振力に相当する。この制振力と建物の速度との積はマスダンパーが建物に対して単位時間当たりになす仕事量である。

ここでは、HMDの制御則として、外乱をホワイトノイズとして、最適レギュレータ理論に基づくフィードバック制御を行なう場合を考え、次式の評価関数  $J$  を最小化する制御ゲインを用いた。

$$J = \int_0^{\infty} (q \dot{x}_s^2 + r u^2) dt \quad (5)$$

ここで  $q$  と  $r$  はそれぞれ建物速度と制御力にかかる重み係数である。この場合、最適制御力は (6) 式の形で得られる。

$$u = k_1 \dot{x}_s + k_2 \dot{x}_d + k_3 x_s + k_4 x_d \quad (6)$$

ここに、 $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$ ,  $k_4$  は (5) 式の評価関数を最小化する最適フィードバックゲインであり、よく知られるように、Riccati方程式を解くことで得られる。

今、外乱  $w$  が下式で表される絶対値が単位の大きさの調和波とする。

$$w = a \sin(\theta - \beta) \quad (7)$$

ただし、 $a = 1$ ,  $\theta = \omega t$  とし、 $\beta$  は外乱と応答制振力  $-m_d \ddot{x}_d$  との位相差を表す。なお  $\omega$  は角速度、 $t$  は時間である。

制振力  $-m_d \ddot{x}_d$  と建物速度  $\dot{x}_s$  の絶対値と位相をそれぞれ  $F_d$ ,  $\alpha_d$ ,  $V_s$ ,  $\alpha_s$  とし、 $\alpha = \alpha_s - \alpha_d$  とすると、 $0 \sim \theta$  の間でマスダンパーが建物になす仕事量  $E_\theta$  は下式のようなになる。

$$\begin{aligned} E_\theta &= - \int_0^\theta \frac{1}{\omega} F_d \sin \theta V_s \sin(\theta + \alpha) d\theta \\ &= \frac{1}{2\omega} F_d V_s \left[ \frac{1}{2} \sin 2\theta \cos \alpha - \frac{1}{2} (\cos 2\theta - 1) \sin \alpha - \theta \cos \alpha \right] \end{aligned} \quad (8)$$

従って、 $0 \sim \theta$  の間の仕事量の変化率は下式となる。

$$\begin{aligned} \frac{dE_\theta}{dt} &= \frac{dE_\theta}{d\theta} \frac{d\theta}{dt} \\ &= - \frac{1}{2} F_d V_s [\cos 2\theta \cos \alpha + \sin 2\theta \sin \alpha - \cos \alpha] \end{aligned} \quad (9)$$

ここでは、具体例として表-1のモデルを用いて、マスダンパーのエネルギー吸収特性に関する考察を行なう。解析モデルは建物モデル1と建物モデル2の2種類とし、建物モデル1はマスダンパーと建物の固有周期がともに4.0secの場合で、建物モデル2は建物の固有周期

を3.2secとしたものである。建物モデル2における建物とマスダンパーの固有周期の関係は、並進と振れの固有周期が異なる建物において、マスダンパーの固有周期を建物の並進周期に同調させた場合の、振れ外乱に対する応答を扱う問題に相当している。

各ケースに対し、単位の調和外力が作用する場合について、(1)式を解いて  $F_d, \alpha_d, V_s, \alpha_s$  を求め、これからマスダンパーによる制振力と建物の速度との関係を求めたものを図-2に示す。なお、ここでの検討におけるHMDの制御ゲインとしては表-1の小さい方のゲイン1を用いた。図-2によると、建物モデル1で加振周期を4.0secとした場合には、TMD、HMDともに建物速度と制振力に強い相関があるが、HMDの方が全体的にやや曲線の勾配がきつく減衰効果が大いことがわかる。また、マスダンパーと建物周期が同調していない建物モデル2のケースでは、TMDの3.2sec加振の場合に建物速度と制振力の相関が小さくなっている。

次に、(9)式から求められるマスダンパーが単位時間当たり建物になす仕事量(ここでは仕事率と呼ぶ)の時刻歴を、(7)~(9)式の  $\alpha, \beta$  の値とともに図-3に示す。なお、この図では、縦軸のスケールがそれぞれ異なっていることに注意されたい。図より、TMDの場合、マスダンパーと建物の周期が同調している場合には、建物周期と同じ周期の正弦波加振に対しては、常に建物からエネルギー吸収を行なっているが、他の周期の場合には建物からのエネルギー吸収と、エネルギー供給

表-1 解析モデルの諸元

$m_s = 100 \text{ ton}, m_d = 1 \text{ ton}, T_d = 4.0 \text{ sec}$
$h_s = 0.01, h_d = 0.05$
$T_s = 4.0 \text{ sec}$ ----- 建物モデル1
$T_s = 3.2 \text{ sec}$ ----- 建物モデル2
[制御ゲイン]
ゲイン1 (小ゲイン) --- 重み係数 $q=1, r=2 \times 10^4$
ゲイン2 (大ゲイン) --- 重み係数 $q=1, r=1 \times 10^3$

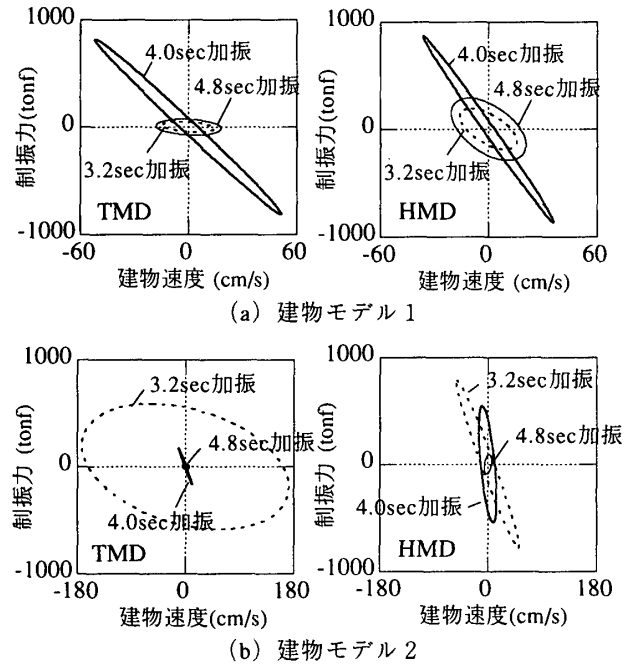


図-2 建物速度とマスダンパーの制振力との関係

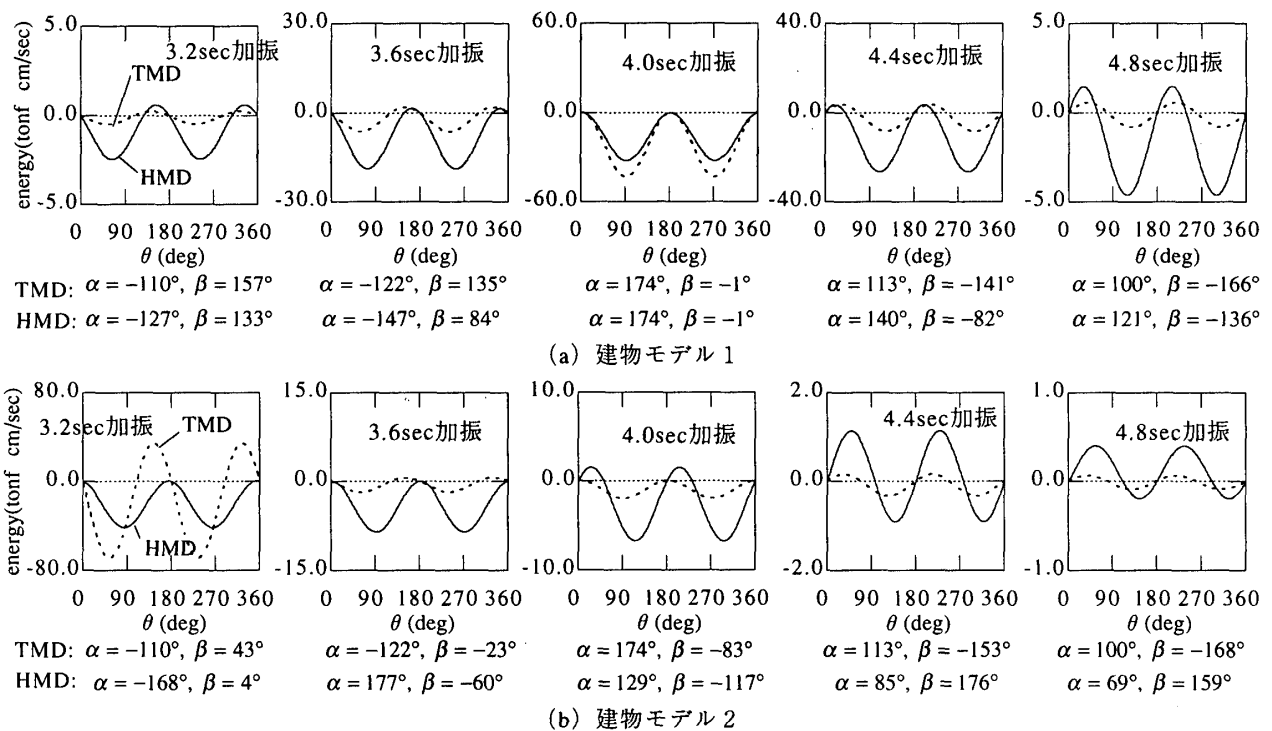


図-3 マスダンパーの一周期当たりのエネルギー吸収特性

の両方が交互に行なわれ、一周期全体ではエネルギー吸収が行なわれていることがわかる。また、HMDの場合には、建物モデル2の4.4sec加振と4.8sec加振の場合にエネルギー供給傾向になっているが、その他では全体的にTMDよりも加振周期の広い範囲で、大きなエネルギー吸収が行なわれている。

### 2.2 SAMDのエネルギー吸収特性

SAMDは、TMDの剛性や減衰などの特性をリアルタイムで変化させることで、エネルギー吸収効率を高めようとするものといえる。ここでは、SMADの制御則として、HMDの場合と同様に(6)式で必要制御力を求めた上で、マスダンパーと建物との相対速度と必要制御力との符号関係に基づき、この必要制御力をパッシブ抵抗力を利用して作用させるか否かの判断をするものとした。

即ち、必要制御力を  $u_r$ 、パッシブ的に付加する制御力を  $u$  とすると、

$$(i) \quad u_r (\dot{x}_d - \dot{x}_s) \leq 0 \text{ の時} \\ u = u_r \quad (10)$$

$$(ii) \quad u_r (\dot{x}_d - \dot{x}_s) \geq 0 \text{ の時} \\ u = 0 \quad (11)$$

とし、パッシブ的に必要制御力が付加できる場合のみ抵抗力を発揮させるものとした。

SAMDの調和外乱に対するエネルギー吸収特性を検討するために、表1の建物モデル1と建物モデル2に単位の調和外乱を作用させた場合について、Newmarkの $\beta$ 法を用いて時刻歴で解いた。定常状態において、マスダンパーが建物になす単位時間当たり仕事量の時刻歴波形を図4に示す。図より、建物モデル1の4.0sec加振ではTMDの制振性能がよいためセミアクティブ制御の効果が少ないが、その他の場合にはSAMDの方がTMDよりもエネルギー吸収量が大きくなっていることがわかる。

### 2.3 SAMDの周波数応答曲線

本節ではSAMD(ゲイン1)の周波数応答をTMDやHMD(ゲイン1)と比較する。表1のモデルに単位の調和外乱を作用させた場合に対する、建物の応答加速度とマスダンパーの応答変形の定常応答値を、外乱の振動数に対してプロットしたものをそれぞれ図5、図6に示す。図5より、建物モデル1、建物モデル2の両ケースとも、SAMDの場合の建物応答加速度は、TMDとHMDの中間の応答レベルになっている。ただし、建物モデル1の場合には、ここで設定したTMDモデルが最適に近い特性を有しているため、SAMDの効果はわずかしが見られないが、建物モデル2の場合にはより大きな制振効果が得られている。また、図6より両建物モデルと

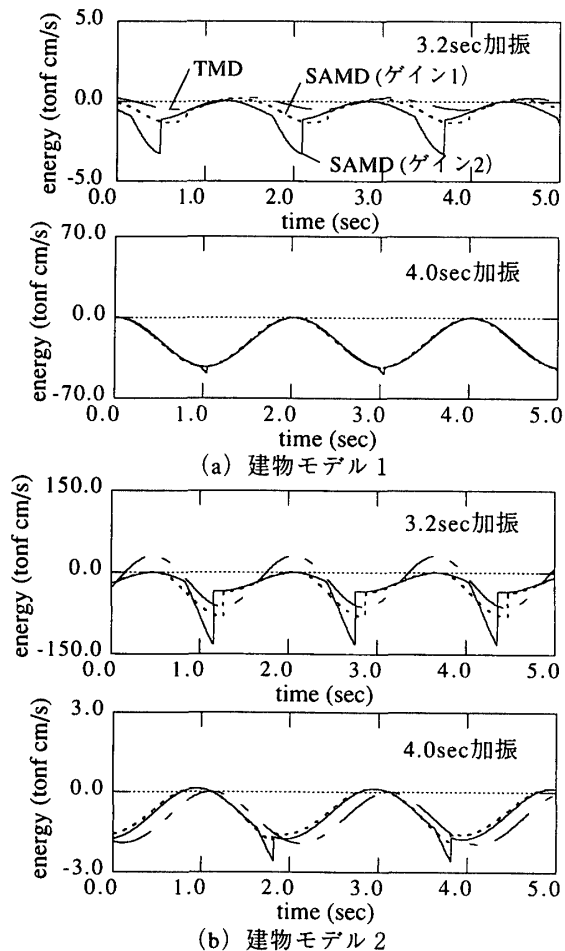


図4 単位時間当たり仕事量の時間変化

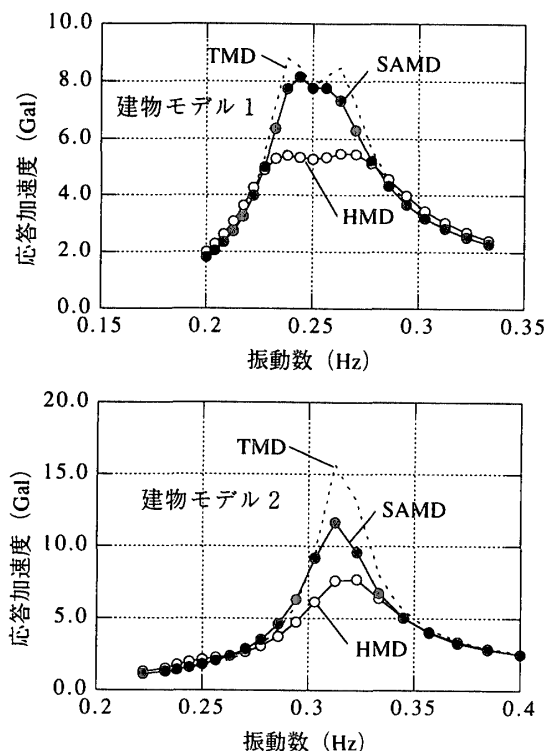
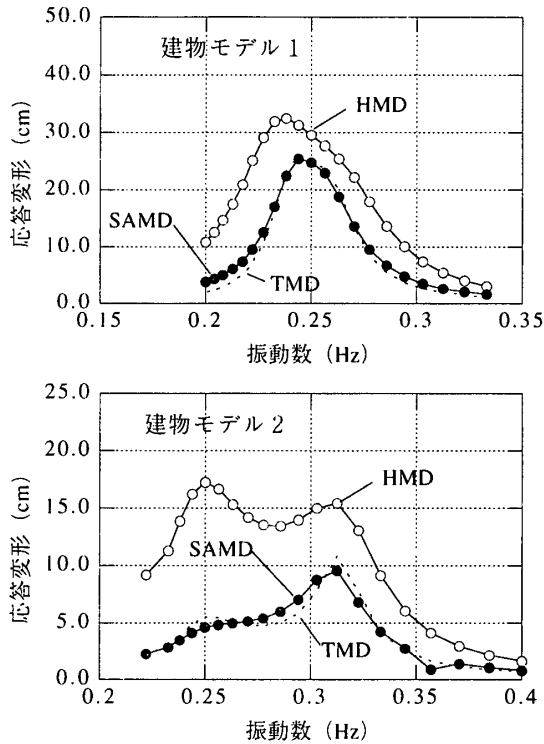


図5 建物加速度の周波数応答曲線の比較



図—6 マスダンパー変形の周波数応答曲線の比較

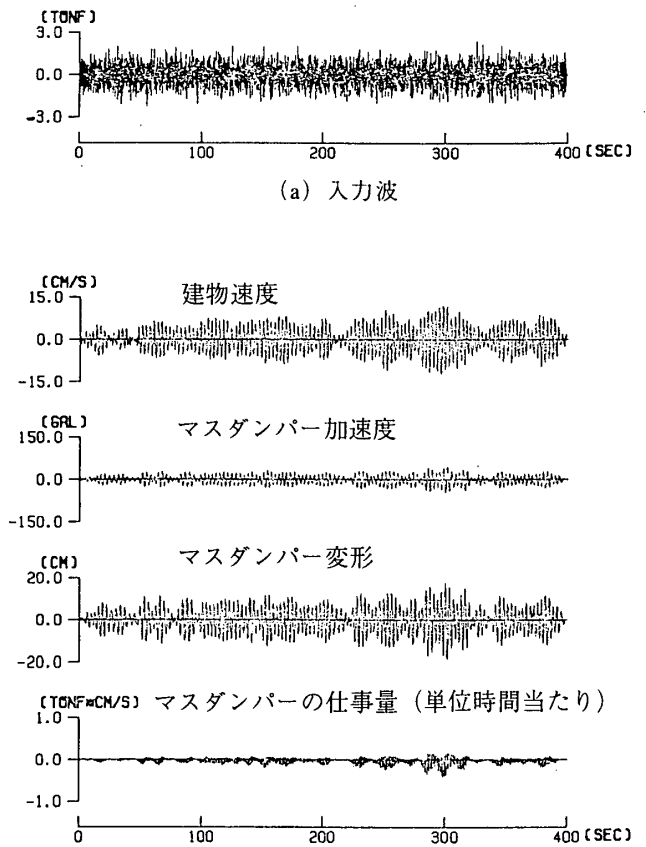
も、SAMDの応答変形はTMDの場合との差が少ない。これらより、SAMDはTMDと同程度のマスダンパーの変形で、TMDよりも効率的にエネルギー吸収を行なっているといえる。

### 3. SAMDの不規則外乱時の応答特性

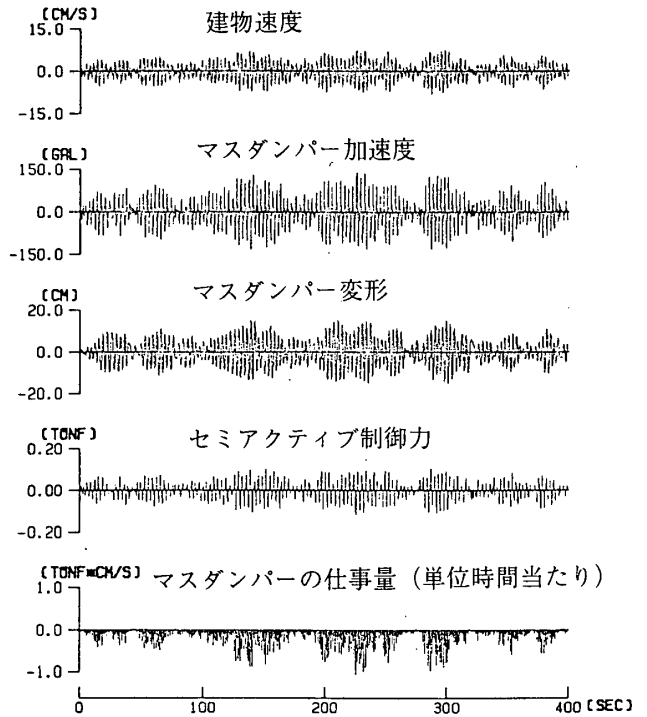
#### 3.1 入力波と応答波形

本章では、外乱として0~10Hzの間で一定のパワーを有するランダム波を作成して（時間刻み $\Delta t=0.01\text{sec}$ 、サンプル数=8192）、これが表—1の建物モデル2に作用した時の応答を時刻歴応答解析により求め、SAMDの制振特性とエネルギー吸収特性についての検討を行なう。

図—7は、入力波形、TMDとゲイン2のSAMDに対して得られた応答波形、およびマスダンパーが建物に単位時間当たりになした仕事量の時刻歴波形である。これらより、SAMDの場合にはTMDの場合よりもマスダンパーの加速度が大きくなり、建物応答速度が小さくなっているが、マスダンパーの変形にはほとんど差が見られないことがわかる。また、SAMDの場合には、マスダンパーによる制振力の特性を反映し、建物に加えたエネルギーがほぼ全域で負符号になっており、建物の振動エネルギーを有効に吸収していることがわかる。

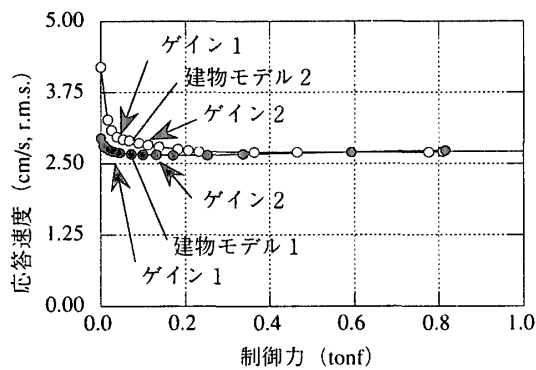


(b) TMDの場合の応答波

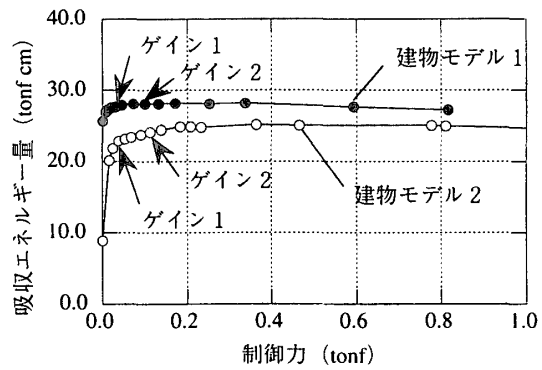


(c) SAMDの場合の応答波

図—7 ランダム外乱と応答波形  
(建物モデル2)



(a) 制御力と建物応答速度 (r.m.s.値)



(b) 制御力とエネルギー吸収量

図一八 最大制御力の大きさと建物応答速度のr.m.s.値  
およびエネルギー吸収量との関係

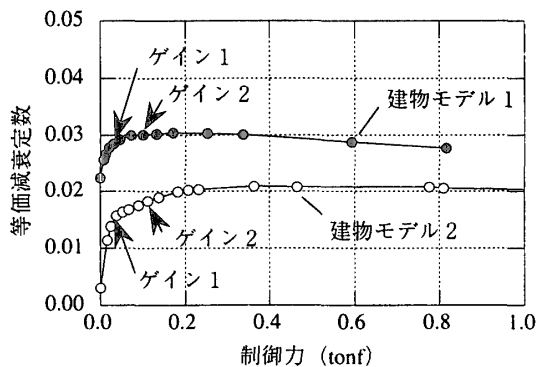
### 3.2 制御ゲインの大きさの影響

次に、制御ゲインの大きさを变化させた場合について、建物の速度応答のr.m.s.値、マスダンパーが建物から吸収したエネルギー量の総量を図一八に、さらにこれらを用いて次式<sup>28)</sup>から求められる等価減衰定数  $h_e$  の変化を図一九に示す。

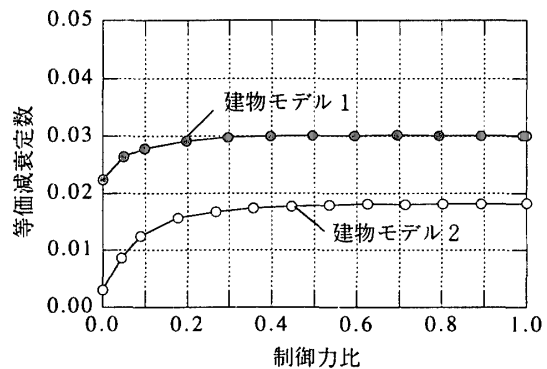
$$h_e = \frac{\Phi_e}{2\omega_s m_s E [\dot{x}_s^2]} \quad (12)$$

ただし、 $\Phi_e$  はマスダンパーが建物から吸収した平均エネルギー量、 $E [\dot{x}_s^2]$ は建物の応答速度の2乗平均値、 $\omega_s$  は建物部の角固有振動数で  $\omega_s^2 = k_s / m_s$  である。

なお、図一八と図一九には参考のため表一のゲイン1とゲイン2に対応する点も示している。また両図の横軸は各制御ゲインに対する最大セミアクティブ制御力を表している。図一九より、制御力を加えない状態から、制御ゲインを大きくしていくと、等価減衰定数は一旦大きくなるが、さらに制御ゲインを大きくすると徐々に小さくなる。建物モデル1と建物モデル2の最大等価減衰定数はそれぞれ、0.030、0.021程度となっている。このことは、SAMDの制御ゲインにはある最適値が存在することを示唆している。これは、制御ゲインを過大にすると、マスダンパーの動きを拘束し、制振力が小さくなるためと解釈できる。



図一九 最大制御力の大きさと等価減衰定数



図一10 制御力比と等価減衰定数

### 3.3 制御力に上限がある場合の応答

セミアクティブマスダンパーでは、短時間に大きな制御力が要求されるため、可変ダンパーの制御力が不足する場合も考えられる。そこで、セミアクティブ制御力に上限がある場合の制振効果の変化について検討した。即ち、必要制御力がダンパーの上限制御力を越える場合には、上限制御力を出力するものとした。図一10は、

表一のゲイン2を用いた場合について、最大必要制御力に対する上限制御力の比を横軸に、等価減衰定数を縦軸にとったものである。これより、等価減衰定数は、制御力比が1.0~0.3ではほとんど低下しないが、0.3以下になると低下している。これは、ランダム外乱時の必要制御力が過大になるのはごく短時間であり、上限制御力が最大必要制御力よりもそれほど小さくない場合には、マスダンパーの平均的なエネルギー吸収特性の劣化程度は小さいことを示している。

4. 2台のSAMDを用いた並進-揺れ振動制御効果の検討

2章では、2自由度系の解析モデルを用いて、SAMDがTMDと比較して、マスダンパーの周期が建物周期と同調していない場合に特に有効であることを示した。ところで、高層建物では強風時に風向の変化などにより、振動の並進成分と揺れ成分の比率が変化する。しかし、TMDの場合には、同調していない振動モードに対しては制振効果が小さいことから、建物の並進方向と揺れ方向の固有周期が異なる場合には、並進か揺れのどちらかの振動モードにしか制振効果が発揮できない。これに対し、アクティブ制御力を加えて並進-揺れ制御を行なうHMD方式が既に提案され、実建物に設置されている(例えば10))。本章では、SAMDがマスダンパーと建物の固有周期が同調していない時に有効であることを利用して、2台のSAMDによる高層建物の並進-揺れ振動制御法を提案し、その有効性に関する検討を行なう。

4.1 解析モデルと制御則

解析モデルとして、図-11に示すように、並進(紙面と垂直方向)と揺れの2自由度を有する建物モデルに2台のマスダンパーが距離*l*だけ離れて設置されているものを考えた。モデルの定数を表-2に示す。マスダンパーの固有周期は建物の並進方向固有周期と同じとし、並進方向には有効だが揺れ方向には周期がずれるため制振効果が少ないモデルである。このモデルに対し、揺れ方向振動をセミアクティブ制御により低減させることを考える。

建物床の各マスダンパー設置位置と、2台のマスダンパーのマスの変位を、それぞれ  $x_{s1}, x_{s2}, x_{d1}, x_{d2}$  とする。また、建物の揺れ変形角を  $\theta_s$  とし、2台のマスダンパーの変形角を  $\theta_d$  とする。制御モーメントは(6)式と同様に最適レギュレータ理論を適用して、次のような形で得られる。

$$M_u = k_{\theta 1} \theta_s + k_{\theta 2} \theta_d + k_{\theta 3} \dot{\theta}_s + k_{\theta 4} \dot{\theta}_d \quad (13)$$

ただし、 $k_{\theta 1}, k_{\theta 2}, k_{\theta 3}, k_{\theta 4}$  は制御力モーメントを得るための最適制御ゲインである。従って、2台のマスダンパーの必要制御力  $u_{r1}, u_{r2}$  は

$$u_{r1} = M_u / l = (1/l^2) \times [k_{\theta 1} \quad -k_{\theta 1} \quad k_{\theta 2} \quad -k_{\theta 2} \quad k_{\theta 3} \quad -k_{\theta 3} \quad k_{\theta 4} \quad -k_{\theta 4}] \times [\dot{x}_{s1} \quad \dot{x}_{s2} \quad \dot{x}_{d1} \quad \dot{x}_{d2} \quad x_{s1} \quad x_{s2} \quad x_{d1} \quad x_{d2}]^T \quad (14)$$

$$u_{r2} = -u_{r1} \quad (15)$$

となる。この  $u_{r1}, u_{r2}$  をそれぞれ  $u_r$  と見做して、各マスダンパーの建物床に対する相対速度との符号関係から、(10)、(11)式と同様な判定を行なうことで、2台の

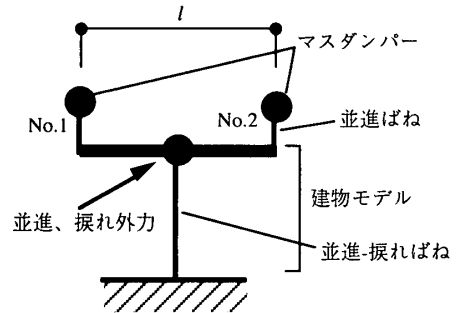


図-11 2台のマスダンパーを有する建物の並進-揺れ振動モデル

表-2 解析モデル諸定数

[建物モデル]	
重量 $m_s$	$= 10,000 \text{ ton}$ , 回転慣性 $I_s = 4.0 \times 10^{10} \text{ ton cm}^2$
固有周期 $T_{sh}$	$= 4.0 \text{ sec}$ (並進方向)
	$T_{st} = 3.2 \text{ sec}$ (揺れ方向)
減衰定数 $h_s$	$= 0.01$ (並進、揺れ方向とも)
[ダンパーモデル]	
重量 $m_d$	$= 50 \text{ ton/1台}$ , 間隔 $l = 40 \text{ m}$
固有周期 $T_d$	$= 4.0 \text{ sec}$ , 減衰定数 $h_d = 0.05$

SAMDのセミアクティブ制御力を求めることができる。

4.2 解析結果と考察

外乱としては、3章で用いた0~10Hzの間で一定のパワーを有するランダム波を、並進方向と揺れ方向に大きさを覚えて入力した。

ここでは外乱の大きさとして、マスダンパーがない時の装置設置位置の建物床応答速度のr.m.s.値が、並進方向外乱に対して1.06cm/s、揺れ方向外乱に対して1.22cm/s、両外乱を同時に入力した場合に1.61cm/sとなるものとした。

このモデルに表-2のTMDが2台、図-11のように設置された場合の装置設置位置の建物床応答速度のr.m.s.値は、並進方向外乱に対して0.60cm/s、揺れ方向外乱に対して1.05cm/s、両外乱を同時に入力した場合の左右の平均が1.21cm/sとなった。次に、建物の揺れ方向の振動に対してセミアクティブ制御を行なった場合の応答を求めた。ここでの着目点は、セミアクティブ制御による揺れ方向の制振効果の増大程度とともに、並進方向の制振効果がどの程度劣化するかという点である。制御ゲインの値は、評価関数の重み係数を  $q=1$  とし、 $r$ の値を変化させて求めたものとした。制御ゲインを変化させた場合について、SAMDのTMDに対する応答比を図-12にプロットした。この図の横軸は、2台のSAMDの制御力のうち大きい方の値、縦軸は応答速度の並進成分と揺

れ成分（ともにr.m.s.値）のTMDの場合に対する比率である。また、図-13は横軸が各SAMDの最大制御力、縦軸が各建物床位置の応答速度r.m.s.値を表している。

これらより、揺れ方向の応答速度はセミアクティブ制御によってTMDの場合の70%程度に低減しているが、並進方向の応答値はほとんど増大しておらず、パッシブな制振効果を維持している。従って、建物の応答値は全体では低減している（図-13）。

以上より、2台のマスダンパーを用いて並進方向と揺れ方向の固有周期が異なる高層建物について、ランダム外乱時の並進-揺れ振動をセミアクティブ制御により有効に制御できることがわかった。

## 5. 結論

本論文における検討から以下の点が明らかになった。

(1) マスダンパーが設置された構造物では、構造物に調和外乱あるいは不規則外乱が作用した場合に、マスダンパーは建物との間でエネルギー吸収と供給とを繰り返し、全時間ではエネルギー吸収を行なう。

(2) 最適レギュレータ理論から求まる制御力に基づくセミアクティブ制御を行なうことで、調和外乱および不規則外乱に対するマスダンパーの変形量当たりのエネルギー吸収効率が高められる。特に、マスダンパーと建物の固有周期が同調していない場合に、セミアクティブ制御の効果が大きい。

(3) セミアクティブマスダンパーの制御ゲインとして過大な値を用いると、制振効果は低下傾向になる。従って、セミアクティブマスダンパーの制御ゲインとしては、外力の大きさによって適切な大きさの値を設定する必要がある。

(4) セミアクティブ制御力が飽和する場合、上限制御力が最大必要制御力の0.3倍程度以下になるとセミアクティブマスダンパーの制振効果が低下する。

(5) 建物の並進方向と揺れ方向の固有周期が異なる場合に、マスダンパー2台を用いてこれにセミアクティブ制御を加えることで、制御を行わない場合よりも有効に強風時における建物の並進-揺れ応答を低減できる。

以上のように、本論文では、マスダンパーが構造物におよぼす力の観点からの基礎的検討を行ない、セミアクティブマスダンパーの制振性能に関する有効性を論じた。セミアクティブマスダンパーを実建物に適用する場合には、さらに建物の高次振動モードや制御の時間遅れの問題にも配慮して、制御系の設計を行なうべきものと考えている。

## 参考文献

1) G. B. Warburton : Optimum Absorber Parameters for Various

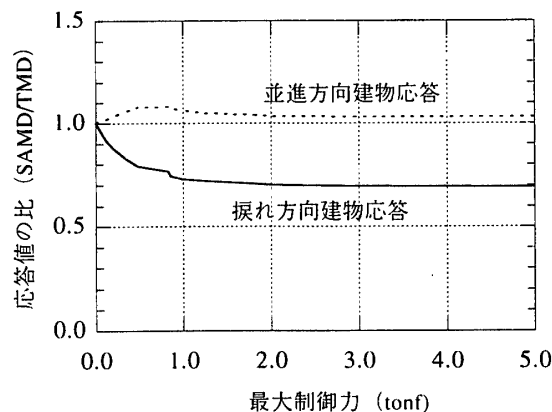


図-12 最大セミアクティブ制御力と建物速度比 (r.m.s.値, SAMD/TMD)

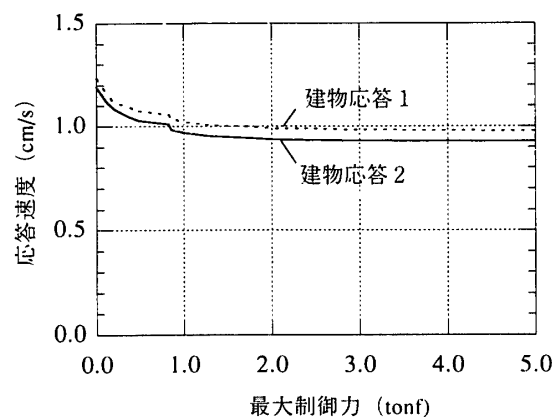


図-13 最大セミアクティブ制御力と建物応答速度 (r.m.s.値)

Combinations of Response and Excitation Parameters, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol.10, pp.381~401, 1982

- 2) Y. Fujino and M. Abe : Design Formulas for Tuned Mass Dampers Based on a Perturbation Technique, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol.22, pp.833~854, 1993
- 3) 浅見敏彦, 桃瀬一成, 細川詠延: 主系の減衰を考慮した動吸振器の設計式について (最小分散規範に基づく設計法), 日本機械学会論文集 (C編), 59巻566号, pp.56~61, 1993年10月
- 4) 又木義浩, 大竹和夫: パッシブ制振装置を有する構造物の耐風応答解析法, 風工学シンポジウム論文集, pp.355~360, 1988年
- 5) Y. L. Xu, K. C. S. Kwok and B. Samali : Control of Wind-induced Tall Building Vibration by Tuned Mass Dampers, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol.40, pp.1~32, 1992
- 6) 寺本隆幸, 又木義浩, 川端三朗, 他: 千葉ポートタワーの風観測 (その1) ~ (その3), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.153~158, 1988年10月
- 7) T. Nagase and T. Hisatoku : Tuned Pendulum Mass Damper using Ice Thermal Storage Tank Installed in Crystal Tower, Proc of the Second Conference on Tall Buildings in Seismic Regions, pp.315~324, 1991
- 8) 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
- 9) 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)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
  - 10) 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
  - 11) 小川雄一郎, 辻 英一, 他: 大阪弁天町・ORC200シンボルタワーの制振装置[その5], 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.959~960, 1994年9月
  - 12) 田村和夫, 柴 慶治, 岡田敬一, 和田 章: 能動型同調質量ダンパーを設置した高層建物の強風に対する制振特性評価, 日本建築学会構造系論文集, 第465号, pp.61~70, 1994年11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) 永田敬雄, 山崎真司, ほか: 横浜ランドマークタワーに設置した制振装置(TAD)の性能(その1)、(その2), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.955~958, 1994年9月
  - 15) 上代悟史, 藤波健剛, 齊藤芳人: 高層建物におけるハイブリッド型制振の適用事例(その2), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.953~954, 1994年9月
  - 16) 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, pp.965~968, 1992年8月
  - 17) 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
  - 18) 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
  - 19) 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5月
  - 20) D. Karnopp, M. J. Crosby and R. A. Harwood: Vibration Control Using Semi-Active Force Generators, Transaction of the ASME, Journal of Engineering for Industry, Vol.98, pp.619~626, 1974
  - 21) S. Rakheja and S. Sankar: Vibration and Shock Isolation Performance of a Semi-Active "On-Off" Damper, Transaction of the ASME, Journal of Vibration, Acoustics, Stress, and Reliability in Design, Vol.107, pp.398~403, 1985
  - 22) D. Hrovat, P. Barak and M. Rabins: Semi-Active versus Passive or Active Tuned Mass Dampers for Structural Control, Journal of Engineering Mechanics, Vol.109, No. 3, pp.691~705, 1983
  - 23) 藤田隆史, 壁矢和久, 他: 可変摩擦ダンパを用いたセミアクティブ免震構造の研究(第1報, 可変摩擦ダンパの開発とセミアクティブ制御システムの基礎的研究), 日本機械学会論文集(C編), 57巻536号, pp.1122~1128, 1991年4月
  - 24) 河村壮一, 長島一郎, 他: 摩擦力制御型滑り支承を用いたセミアクティブ制振に関する研究(その1)、(その2), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1117~1120, 1991年9月
  - 25) 荒井康幸, 奈良剛成, 溝口光男, 野路利幸, 山中久幸, 小坂英之: 減衰力可変型制振構造のための制振装置の開発, 構造工学論文集, Vol.39B, pp.177~183, 1993年3月
  - 26) 森下 信, 三井純一, 黒田洋司: 電気粘性流体を用いた可変減衰器に関する研究, 日本機械学会論文集(C編), 56巻524号, pp.928~934, 1990年4月
  - 27) 田村和夫, 福喜多輝, 他: 電気粘性流体を利用した回転型可変減衰ダンパーの基本特性に関する研究(その1)、(その2), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1115~1118, 1994年9月
  - 28) 田村和夫, 柴 慶治, 和田 章: 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, 日本建築学会構造系論文集, 第468号, pp.51~60, 1995年2月

(1995年3月10日原稿受理, 1995年8月10日採用決定)