

# 高層建物制振用アクティブ・マスダンパの 誤動作防止方法について

——その 1, マスダンパの吸収エネルギーを監視する方法——

Fault Diagnosis Method in Active Mass Dampers for Vibration Control of Tall Buildings

——Part 1, Monitoring of Energy Absorbing Performance of Mass Damper——

藤田 隆 史\*・鎌 田 崇 義\*

Takafumi FUJITA and Takayoshi KAMADA

## 1. は じ め に

高層建物の居住性向上を目的としたアクティブ・マスダンパの研究が進み、実用化の段階に入ってきている<sup>1)</sup>。実用化の際には、安全性に関する考慮が十分になされなければならないことは当然であり、装置の故障やセンサ等のノイズへの対応はもちろんのこと、考えられるすべての状況に対して対応がなされているはずである。しかし、安全性に対する保障はそれがシステムにとって過度な負担とならなければ行き過ぎということはなく、またシステムの異常はできるだけ早急に発見されることが望まれる。

本報告では、アクティブ・マスダンパの誤動作防止方法として、新たなハードウェアを必要とせずシステムの負担とならないソフトウェア的なフェイルセーフ対策を提案している。第 1 報では、本来建物の振動エネルギーを吸収すべきマスダンパが不測の原因で建物を加振（エネルギーを供給）してもすぐにこれを感知する方法について検討を行った。マスダンパのエネルギー的考察としてはマスダンパの構成要素ごとのエネルギー吸収に注目した研究<sup>2)</sup>やエネルギー評価による誤動作防止の提案や制振効果の評価を行った例<sup>3)</sup>があるが、フェイルセーフ対策を組込んだシミュレーション等は行われていない。

## 2. アクティブ・マスダンパの基礎理論

図 1 のような解析モデルを考える。高層建物を  $n$  質点系とし、その下から  $s$  層目にマスダンパが設置されている系に対して、外力として地震および風が加わる場合を考える。このとき、建物・マスダンパ系の運動方程式は以下のようなになる。

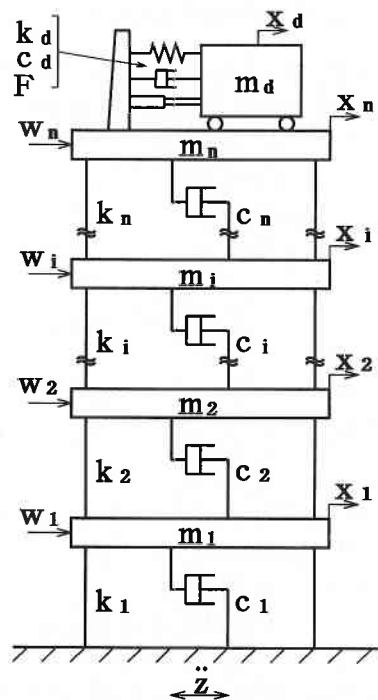


図 1 解析モデル

$$[M] \{\ddot{x}\} + [C] \{\dot{x}\} + [K] \{x\} = \{s\} (c_d \dot{x}_d + k_d x_d - F) - [M] \{1\} \ddot{z} + \{w\} \quad (1)$$

$$m_d (\ddot{x}_s + \ddot{x}_d + \ddot{z}) + c_d \dot{x}_d + k_d x_d = F \quad (2)$$

ただし、

$$\begin{aligned} [M] : & \text{建物の質量マトリクス } (n \times n) & (\text{kg}) \\ [C] : & \text{建物の減衰マトリクス } (n \times n) & (\text{Ns/m}) \\ [K] : & \text{建物の剛性マトリクス } (n \times n) & (\text{N/m}) \\ \{x\} : & \text{建物の地面からの相対変位ベクトル } (n \times 1) & (\text{m}) \end{aligned}$$

\*東京大学生産技術研究所 第 2 部

## 研 究 速 報

$\{s\} = (0 \dots 1 \dots 0)^T (n \times 1)$  : マスダンパの設置階を表すベクトル

$\{1\} = (1 \dots 1)^T (n \times 1)$

$\ddot{z}$  : 地震の地動加速度 (m/s<sup>2</sup>)

$\{w\} = (w, w_2, \dots, w_n)^T (n \times 1)$  : 風による外力ベクトル (N)

$x_s$  : マスダンパ設置階の地面からの相対変位 (m)

$m_d$  : マスダンパの質量 (kg)

$c_d$  : マスダンパの減衰定数 (Ns/m)

$k_d$  : マスダンパのばね定数 (N/m)

$x_d$  : マスダンパの設置階床面に対する相対変位 (m)

$F$  : アクチュエータによる制御力 (N)

である。

## 3. マスダンパの吸収エネルギー

(1) 式において,  $\{x\} = [T] \{q\}$  なるモード行列  $[T]$  とモード座標  $\{q\}$  を導入すると次式が得られる。

$$\begin{aligned} [M^*] \{\ddot{q}\} + [C^*] \{\dot{q}\} + [K^*] \{q\} \\ = [T]^T \{s\} (c_d \ddot{x}_d + k_d x_d - F) \\ - [M^*] \{\beta\} \ddot{z} + [T]^T \{w\} \end{aligned} \quad (3)$$

すると, 建物の  $i$  次モードに関する式は, 次のようになる。

$$\begin{aligned} m_i^* \ddot{q}_i + c_i^* \dot{q}_i + k_i^* q_i \\ = t_{si} (c_d \ddot{x}_d + k_d x_d - F) - m_i^* \beta_i \ddot{z} + w_i^* \end{aligned} \quad (4)$$

ただし,

$m_i^*$  :  $i$  次のモード質量

$c_i^*$  :  $i$  次のモード減衰定数

$k_i^*$  :  $i$  次のモードばね定数

$w_i^*$  :  $i$  次モードの一般化風外力 ( $= \sum_{j=1}^n t_{ji} w_j$ )

(2), (4) 式より  $i$  次モードでの建物・マスダンパ系の運動方程式は次のように表される。

$$\begin{aligned} m_i^* \ddot{q}_i + c_i^* \dot{q}_i + k_i^* q_i \\ = t_{si} \{-m_d(\ddot{x}_d + \ddot{x}_s + \ddot{z})\} - m_i^* \beta_i \ddot{z} + w_i^* \end{aligned} \quad (5)$$

(5) 式の両辺に建物の  $i$  次モードの速度を乗じて  $0 \sim t$  時間内で積分すると,  $i$  次モードに対応した建物・マスダンパ系のエネルギーの釣り合い式が得られる。

$$\begin{aligned} \int_0^t m_i^* \dot{q}_i \ddot{q}_i dt + \int_0^t c_i^* \dot{q}_i^2 dt + \int_0^t k_i^* q_i \dot{q}_i dt \\ = \int_0^t t_{si} \{-m_d(\ddot{x}_d + \ddot{x}_s + \ddot{z})\} \dot{q}_i dt \\ + \int_0^t (-m_i^* \beta_i \ddot{z}) \dot{q}_i dt + \int_0^t w_i^* \dot{q}_i dt \end{aligned} \quad (6)$$

(6) 式の左辺第 1 項は建物の運動エネルギー, 第 2 項は建物の減衰によって吸収されるエネルギー, 第 3 項は建物のひずみエネルギーである。また, 右辺第 1 項はマスの慣性力が建物になす仕事であり, この正負を反転したものがマスダンパの吸収エネルギーである。第 2 項は地震による入力エネルギー, 第 3 項は風による入力エネルギーである。制御は 1, 2 次モードに対して行うため任意の時間間隔  $\Delta t$  についてのマスダンパの 1, 2 次モードでのマスダンパの吸収エネルギーを  $W$  とすると  $W$  は次のように表される。

$$W = \sum_{i=1}^2 \int_t^{t+\Delta t} t_{si} \{-m_d(\ddot{x}_d + \ddot{x}_s + \ddot{z})\} \dot{q}_i dt \quad (7)$$

ここで制振が正常に行われていればマスダンパは建物の振動のエネルギーを吸収するはずであり,  $W$  はほとんど正の値を示すはずである。ただし, 時間  $\Delta t$  の設定がきわめて小さい場合, センサのノイズ等によって正常な制振が行われていても  $W$  が負値をとることがあるので, 判定の基準値  $E$  を設け,  $W$  が  $E$  以下となる時には何らかの異常によってマスダンパが建物を加振していると判断する。このような場合には制御を止めて非制振状態にすることによって, マスダンパが建物を加振するという事態を回避することができ

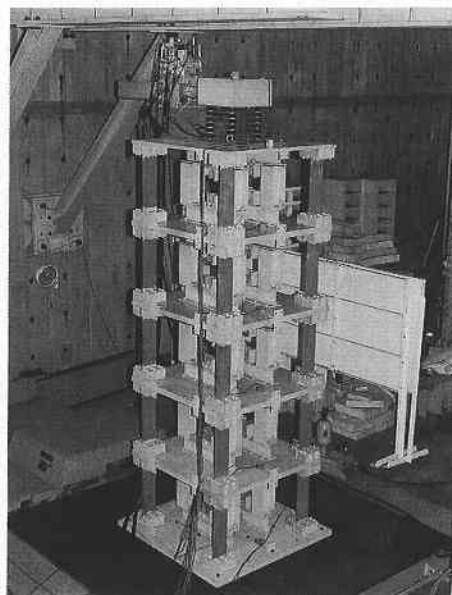


図 2 実験モデル

表 1 建物モデルパラメータ

	1 次	2 次
固有振動数	2.43Hz	7.28Hz
減衰比	0.6%	1.2%
高さ	3.58m	
総質量	6029kg	

る。なお、 $\Delta t$ 、 $E$ の値はシミュレーションによって決定する。

#### 4. 実験データを用いたシミュレーション

##### 4.1 アルゴリズムの有効性の確認

最上階にマスダンパの実験モデルを設置した建物モデルの振動台による加振実験のデータを基に、シミュレーション解析によって誤動作防止アルゴリズムの有効性の確認を行う。図2に示すのが建物・マスダンパの実験モデルである。建物モデルは1層約1 tonの5層モデルで、その仕様および1, 2次の特性は表1に示す通りである。マスダンパ質量は約200kgで建物の1次モード質量の約4%にあたり、固有振動数は建物モデルの1次モードにあわせて約2.5Hzにチューンされている。また、制御は最適レギュレータによる状態フィードバック制御で、その制御対象は建物の1, 2次モードとし、アクチュエータには油圧アクチュエータを用いている。

図3にエルセントロ・NS波(入力加速度 $0.8 \text{ m/s}^2$ )に対する建物・マスダンパの応答、および1, 2次モードでのマスダンパの吸収エネルギーを示す。これは正常な制御が行われた場合の応答結果であり、 $\Delta t$ は建物の1次の固有周期である0.4秒とした。Wはほとんど0以上であるため、制御異常のための判別値Eを $-1.0$ として、フェイルセーフ対策の効果を確認する。制御異常としてはマスダンパへ

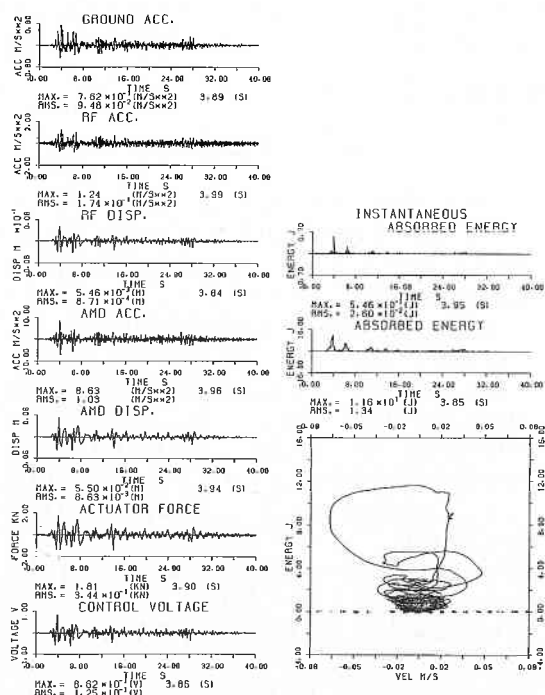
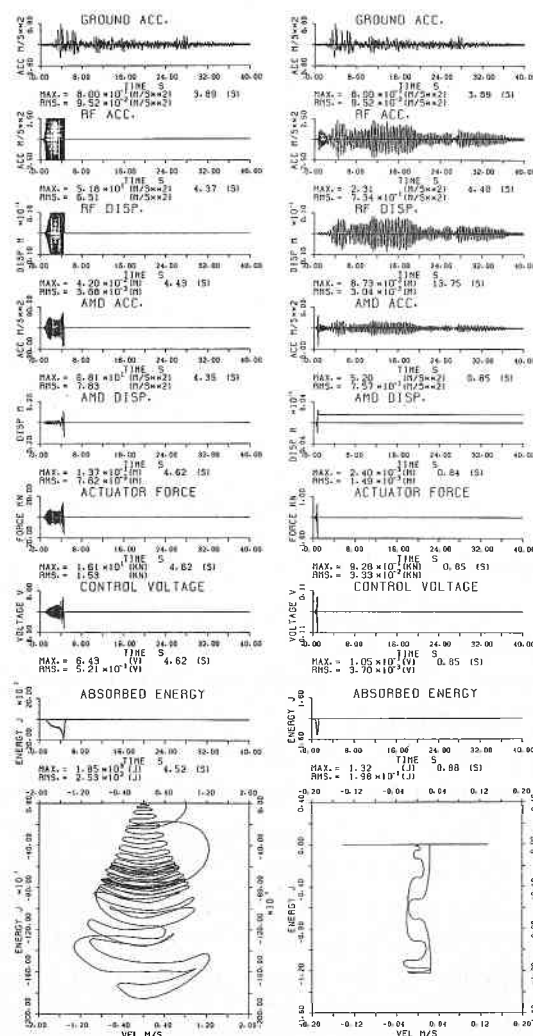


図3 エルセントロ・NS波に対する応答

の制御電圧の正負が反転した場合を考えた。図4にその結果を示すが、入力には図3と同じ大きさのエルセントロ波を用いて制御電圧の正負を反転させて入力した場合のシミュレーションであり、左がフェイルセーフ対策のない系、右がフェイルセーフ対策がある系の応答である。フェイルセーフ対策のない系では制御電圧が反転しているためマスダンパが建物を加振し、そのまま制御を続けると発振してしまう。左図のシミュレーションが途中で終わっているのは、マスダンパ変位がシステムの限界に達してしまい制御ができなくなったためである。また、最上階加速度と変位が飽和しているように見えるのはスケールを右図と一致させているためであり、実際に飽和が起きているわけではない。フェイルセーフ対策を行った系では制御を始めてすぐにマスダンパが建物を加振していることを感知し制御を停止するため建物を加振する事はほとんど無い。マスダン

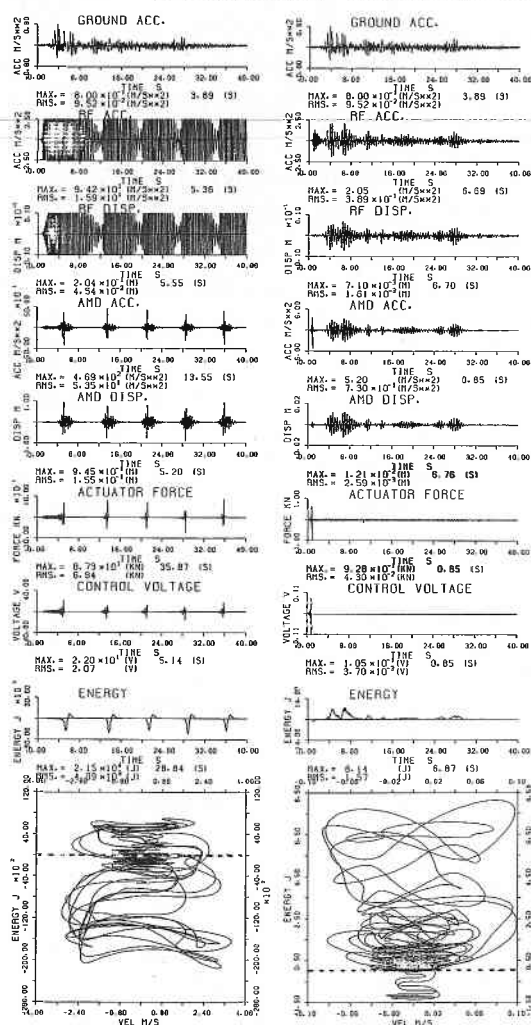


フェイルセーフ対策なし

フェイルセーフ対策あり

図4 フェイルセーフ対策の有効性の確認

## 研究速報



フェイルセーフ対策なし      フェイルセーフ対策あり  
図5 アクティブ・パッシブ切換え型マスダンパでの応答

ブ・モードに切り換えることによってアクティブ制御に比べて性能は劣るものの制振効果をあげることができる。

図5にアクティブ・パッシブ切り換え型マスダンパを用いた場合のシミュレーションを示す。アクティブ制御の限界としてはマスダンパ変位に注目し、これに応じてアクティブ・パッシブの切り換えを行うものとした。図4と同じく制御電圧の正負を反転させて入力した場合のシミュレーションであり、左がフェイルセーフ対策のない系、右がフェイルセーフ対策がある系の応答結果である。フェイルセーフのない系で発振を起こした場合でも、マスダンパ変位が限界を越えるとパッシブモードへの切り換えが起こりパッシブモードでは正常なエネルギー吸収も行っているが、再びアクティブモードに戻って建物を加振してしまっている。フェイルセーフのある系では異常を感知した時点でパッシブモードに切り換えるため、これ以後はパッシブモードでのエネルギー吸収によってマスダンパを停止させた場合に比べて制振効果をあげていることがわかる。

## 5. ま と め

本報告では、マスダンパの誤動作を防ぐ方法として、マスダンパの吸収エネルギーを監視することによって、たとえ不測の原因によりアクティブ・マスダンパが建物の加振を行ってもすぐにこれを感知し、制御停止またはパッシブモードに切り換えるソフトウェア的なフェイルセーフ対策の提案を行った。さらに、マスダンパおよび建物の実験モデルによる振動実験のデータを用いたシミュレーションによって、提案したアルゴリズムがマスダンパの誤動作防止に有効に機能することを確認した。

## 参 考 文 献

- 1) たとえば、藤田、鎌田、ほか6名：多段積層ゴムと油圧アクチュエータを用いた高層建物制振用アクティブ・パッシブ切換え型マスダンパの実用化、日本機械学会論文集投稿中
- 2) 三田、金子：日本建築学会大会学術講演梗概集、777～780、1993
- 3) 中村、藤田ほか4名：日本機械学会機械力学・計測制御講演論文集、B 213、1994
- 4) 鎌田、藤田、正木：多段積層ゴムと油圧アクチュエータを用いた高層建物制振用アクティブ・パッシブ切換え型マスダンパの研究（第一報）、（第二報）、日本機械学会論文集投稿中
- 5) 藤田、ほか3名：日本機械学会論文集、57-543、C (1991)、3532.
- 6) 藤田、ほか5名：日本機械学会論文集、59-557、C (1993)、36.
- 7) 藤田、ほか4名：日本機械学会論文集、60-572、C (1994)、1195.

パの吸収エネルギーに注目すると、制御が反転し建物を加振しているときには負の値を示しており、逆に建物にエネルギーを供給してしまっていることがわかる。

## 4.2 アクティブ・パッシブ切り換え型マスダンパでのフェイルセーフ対策

前節まではフェイルセーフ対策として、制御異常時にはマスダンパを停止させて非制振状態する方法について述べてきた。しかし、マスダンパを停止させることは建物の屋上階近傍に余分な質量を増やすだけであり、建物にとって不利にしかならない。著者らは制御を切り換えることによって同じマスダンパをパッシブ・マスダンパとしても利用できるアクティブ・パッシブ切り換え型マスダンパについて研究を行ってきており<sup>4)~7)</sup>、このようなタイプのマスダンパではアクティブ制御の限界時だけでなく、制御異常時にもマスダンパを停止させる必要はなく、制御をパッシ