

XY運動機構を用いた高層建物制振用マスダンパの制振性能について

On the Performance of a Tuned Mass Damper Using XY-Motion Mechanism
for Vibration Control in Tall Buildings藤 田 隆 史*・宮 野 宏*
Takafumi FUJITA and Hiroshi MIYANO

1. ま え が き

XY運動機構を用いたマスダンパは、1986年3月に竣工した「千葉ポートタワー」および、1989年2月に竣工した「福岡タワー」の制振装置として実用化されているマスダンパである¹⁾。本マスダンパは、X方向とY方向の振動特性を独立に設定することができるため、剛性に異方性のある建物にも適用できる二次元制振装置であり、固有周期の調整はコイルばねの本数変更によって容易に行うことができるなど、多くの長所を持った制振装置であるが、最大の短所は直線運動機構の摩擦にある。実機でも3/1000~5/1000と相当に小さい摩擦係数が実現されているが、設置階の床応答加速度が3~5 Gal以下では、本マスダンパは作動しないことを意味している。したがって、5~6秒の固有周期を持つ高層建物に適用する場合には、この摩擦が問題となる。

以下では、XY運動機構の摩擦が本マスダンパの制振性能に及ぼす影響について解析する。

2. 建物・マスダンパ系の解析モデル

2.1 運動方程式

図1に示すように、建物をn質点系でモデル化し、マスダンパは下から数えてs層目に設置されているものとする。また、マスダンパの質量は建物の質量に比べて十分小さく、建物のモードには影響を与えないものとする。

XY運動機構の摩擦を考慮すると、図1の系の運動方程式は、マスダンパが動いている場合—Phase(I)と、摩擦によりマスダンパが動かない場合—Phase(II)について、それぞれ以下になる。

マスダンパが動いている場合—Phase(I)

$$\begin{aligned}
 [M]\{\ddot{X}\} + [C]\{\dot{X}\} + [K]\{X\} \\
 = \{S\}(c_d\dot{x}_d + k_d x_d + \mu_k \operatorname{sgn}(\dot{x}_d) m_d g) \\
 + \{F\} \\
 m_d(\ddot{x}_d + \ddot{x}_s) + c_d\dot{x}_d + k_d x_d + \mu_k \operatorname{sgn}(\dot{x}_d) m_d g = 0
 \end{aligned} \quad (1)$$

*東京大学生産技術研究所 第2部

(2)

マスダンパが動かない場合—Phase(II)

$$\begin{aligned}
 [M]\{\ddot{X}\} + [C]\{\dot{X}\} + [K]\{X\} = \{S\}(-m_d \ddot{x}_s) \\
 + \{F\}
 \end{aligned} \quad (3)$$

$$x_d = \text{const} \quad (4)$$

ここで、[M]、[C]、[K]、{X}は、それぞれ、建物の質量マトリックス、減衰マトリックス、剛性マトリックス、変位ベクトル、{F}=(f₁, f₂, …, f_n)^Tは風による外力ベクトル、{S}=(0 …, 0, …, 1, …, 0)^Tは制振装置の設置階を示すベクトル、x_sは制振装置の設置階の絶対変位、また、c_d, c_s, k_d, m_d, μ_kは、それぞれ、制振装置の設置階との相対変位、減衰係数、ばね定数、質量、動摩擦係数である。

2.2 Phase(I)とPhase(II)の切換条件

静止中のマスダンパが外力により動き出す場合、その逆に振動中のマスダンパが静止する場合の切換条件は次のようになる。

Phase(I)→Phase(II)の場合

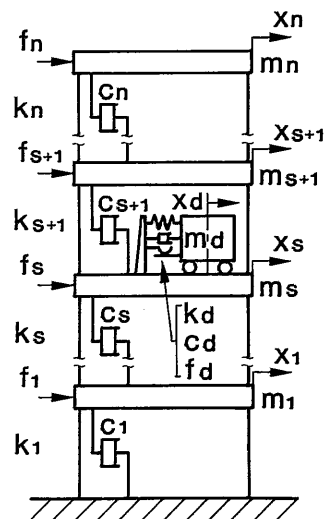


図1 建物とマスダンパの多質点系モデル

研究速報

$\dot{x}_d = 0$ かつ

$$|m_d(\dot{x}_d + \dot{x}_s) + k_d x_d| \leq \mu_s m_d g \quad (5)$$

Phase(II)→Phase(I)の場合

$$|m_d \dot{x}_s + k_d x_d| \geq \mu_s m_d g \quad (6)$$

ここで、 μ_s は静止摩擦係数である。

2.3 2 質点系モデルの導出

モデルマトリックス $[T]$ および基準座標 $\{Z\}$ を用いて

$$\{X\} = [T]\{Z\} \quad (7)$$

と座標変換すると、式(1)および(3)は次のように変形される。

$$\begin{aligned} [M^*]\{\ddot{Z}\} + [C^*]\{\dot{Z}\} + [K^*]\{Z\} \\ = \{D\}(c_d \dot{x}_d + k_d x_d + \mu_k \operatorname{sgn}(\dot{x}_d) m_d g) + [T]^T \{F\} \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} [M^*]\{\ddot{Z}\} + [C^*]\{\dot{Z}\} + [K^*]\{Z\} \\ = \{D\}(-m_d \ddot{x}_s) + [T]^T \{F\} \end{aligned} \quad (9)$$

ただし、

$$\{D\} = (t_{s1} t_{s2} \cdots t_{sn})^T \quad (10)$$

ここで、 $[M^*]$ はモード質量マトリックス、 $[C^*]$ はモード減衰マトリックス、 $[K^*]$ はモード剛性マトリックスである。

建物の1次モードだけを考慮する場合は、運動方程式は次のようになる。

Phase(I)の場合

$$\begin{aligned} m^*_1 \ddot{z}_1 + c^*_1 \dot{z}_1 + k^*_1 z_1 \\ = t_{s1}(c_d \dot{x}_d + k_d x_d + \mu_k \operatorname{sgn}(\dot{x}_d) m_d g) + \Sigma t_{j1} f_j \end{aligned} \quad (11)$$

$$m_d(t_{s1} \ddot{z}_1 + \ddot{x}_d) + c_d \dot{x}_d + k_d x_d + \mu_k \operatorname{sgn}(\dot{x}_d) m_d g = 0 \quad (12)$$

$$x_s = t_{s1} z_1 \quad (13)$$

Phase(II)の場合

$$m^*_1 \ddot{z}_1 + c^*_1 \dot{z}_1 + k^*_1 z_1 = t_{s1}(-m_d \ddot{x}_s) + \Sigma t_{j1} f_j \quad (14)$$

$$x_d = \text{const} \quad (15)$$

$$x_s = t_{s1} z_1 \quad (16)$$

ここで、 m^*_1 、 c^*_1 、 k^*_1 は、それぞれ、建物の1次モード質量、1次モード減衰係数、1次モードばね定数、 t_{j1} はモデルマトリックスのj1成分である。

式(11)～(16)において $t_{s1} = 1$ とすると、以下のような簡単な運動方程式が得られる。

Phase(I)の場合

$$\begin{aligned} m^*_1 \ddot{x}_s + c^*_1 \dot{x}_s + k^*_1 x_s \\ = c_d \dot{x}_d + k_d x_d + \mu_k \operatorname{sgn}(\dot{x}_d) m_d g + \Sigma t_{j1} f_j \end{aligned} \quad (17)$$

$$m_d(\ddot{x}_s + \ddot{x}_d) + c_d \dot{x}_d + k_d x_d + \mu_k \operatorname{sgn}(\dot{x}_d) m_d g = 0 \quad (18)$$

Phase(II)の場合

$$(m^*_1 + m_d) \ddot{x}_s + c^*_1 \dot{x}_s + k^*_1 x_s = \Sigma t_{j1} f_j \quad (19)$$

$$x_d = \text{const} \quad (20)$$

以上より、 $t_{s1} = 1$ となるモード、すなわち、マスダンパの設置階での成分が1となるモードベクトルを用いれば、

座標変換による係数を考慮する必要のない一般的な2質点系の問題として扱えることがわかる(図2)。したがって、マスダンパの設計には、このようなモードベクトルから得られる有効質量 m^*_1 を建物の有効質量 m_s として用いる必要がある。

3. シミュレーション・アルゴリズム

運動方程式の数値計算にはルンゲ・クッタ法(時間刻み1/100秒)を用い、Phase(I)とPhase(II)の切り換えに関しては、以下のようなことを考慮した計算アルゴリズムによりシミュレーションを行った。

Phase(I)において

- ①マスダンパ相対速度の符号が反転したら、1ステップ戻り、時間刻みを1/1000秒にして再計算する。
- ②再びマスダンパ相対速度の符号が反転したら、1ステップ戻り、停止するかしないかの判断を行う。
- ③停止と判断された場合は、運動方程式をPhase(II)に切り換え計算する。
- ④停止しないと判断された場合は、摩擦力を反転させ、計算を続ける。

Phase(II)において

- ①マスダンパが動き出すかどうかの判断を行い、動き出すならば運動方程式をPhase(I)に切り換え、次の1ステップを時間刻み1/1000秒で計算する。

4. 正弦波外力に対する制振性能

基礎的検討として、式(17)、(19)の一般化外力 $\Sigma t_{j1} f_j$ を正弦波外力とした場合の制振性能について述べる。

計算例では、制振装置の固有周期と減衰比は、次の式(21)、(22)で与えられる、減衰を有する主系の場合の最適調整条件²⁾に従って定めた。

$$\begin{aligned} \zeta_d = [3\rho / \{8(1+\rho)\}]^{1/2} + (0.130 + 0.12\rho + 0.4\rho^2) \zeta_s \\ - (0.01 + 0.9\rho + 3\rho^2) \zeta_s^2 \end{aligned} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} \omega_d / \omega_s = 1 / (1+\rho) - (0.241 + 1.74\rho - 2.6\rho^2) \zeta_s \\ - (1.00 - 1.9\rho + \rho^2) \zeta_s^2 \end{aligned} \quad (22)$$

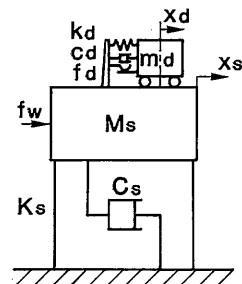
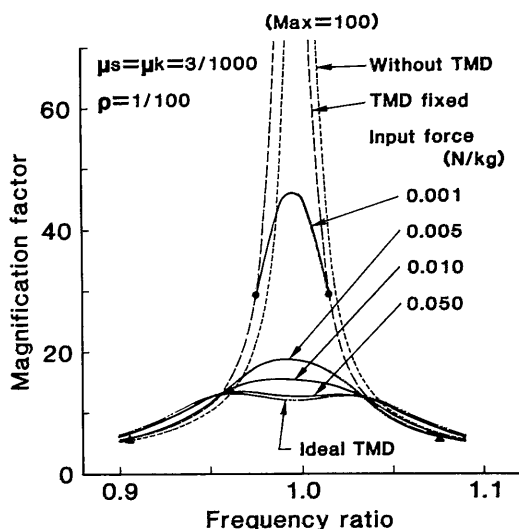
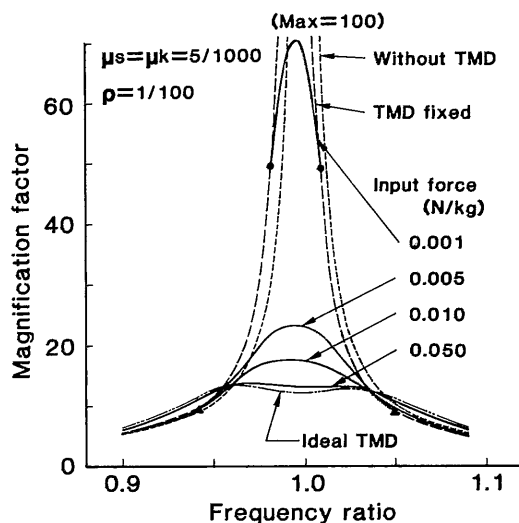


図2 建物とマスダンパの2質点系モデル

図3 建物の共振曲線 ($\rho=1/100$, $\mu_s=\mu_k=0.003$ の場合)図4 建物の共振曲線 ($\rho=1/100$, $\mu_s=\mu_k=0.005$ の場合)

ここで、 ζ_d は制振装置の減衰比、 ζ_s は建物の減衰比、 ω_d は制振装置の固有円振動数、 ω_s は建物の固有角振動数、 $\rho=m_d/m_s$ は質量比である。

図3、4は、 $\rho=1/100$ 、 $\mu_s=\mu_k=0.003$ 、 0.005 の場合の建物の共振曲線である。いずれの場合も外力が小さいと、摩擦のために制振装置は全く、あるいは、十分には作動しないため、応答倍率は大きくなっている。しかし、外力が大きくなると、制振性能は理想的な（線形特性を

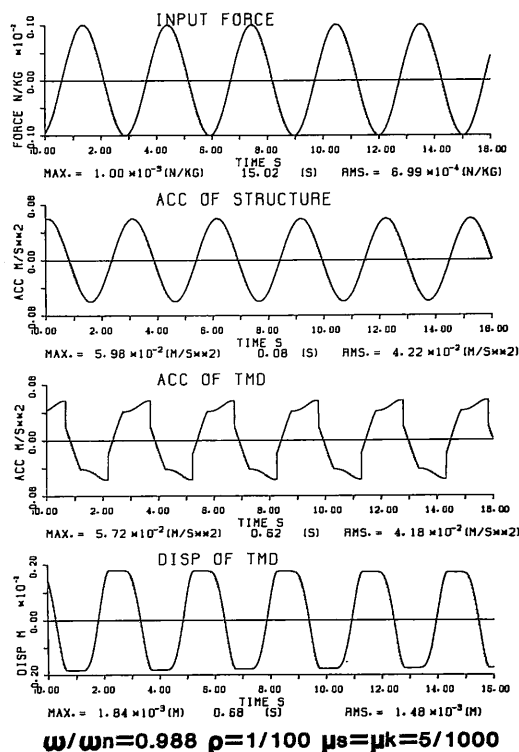


図5 マスダンパが途中で停止する場合の応答波形例

有する) 制振装置のそれに近づいて行くことがわかる。図5は、振幅0.001N/kg、振動数比0.988の正弦波外力に対する建物とマスダンパの応答波形を示したもので、マスダンパが振動途中で静止する場合の応答波形例である。

5. あとがき

筆者らは、ここで取り上げた本マスダンパの欠点を克服するために、比較的小きな外力（風や中小地震）に対しては、油圧アクチュエータによるアクティブ・コントロールを用い、大きな外力（大地震）に対しては、パッシブ・マスダンパとして作動するアクティブ・パッシブ・マスダンパを開発中である。

(1990年9月12日受理)

参考文献

- 1) 藤田, XY運動機構を用いた高層建物制振用マスダンパの開発と実用化, 生産研究, 42巻, 5号, 1990.5.
- 2) 池田, 五百井, 減衰を有する振動系の動吸振器について, 日本機械学会論文集, 43巻, 369号, 1977.5.