

TMDによる構造物の振動制御に関する基礎的研究

松尾橋梁 k. k.	正員	○室井 広年
徳島大学工学部	正員	成行 義文
徳島大学工学部	正員	児嶋 弘行
徳島大学工業短期大学部	正員	平尾 潔

1. まえがき

構造物の振動制御方法としては、従来より Passive な方法が主に用いられている。これは外部からのエネルギー供給を必要としない方法で、例えば、遮断溝やゴム支承等のように、構造物に入る外乱を抑える方法や、付加質量により振動エネルギーを吸収する方法等がある。これらは比較的安価ではあるが、ある限られた制御しかできないという欠点がある。そこで、近年 Active な制御方法が考えられるようになった。これは、他の工学分野で広く用いられている制御理論を土木の分野に応用したもので、外部から供給されるエネルギーによって振動を制御し、高価ではあるが、高い制振効果を得るものである。この場合、一般に線形最適フィードバック制御理論が用いられている。しかし、土木・建築の分野においては、制御すべき対象構造物が比較的大きいため、一般に構造物の振動制御に Active 制御方法を用いた場合、多大な供給エネルギー、すなわち制御力を必要とするものと思われる。そこで、より経済的な Active 制御を行なうために、Semi-Active 制御方法が考えられている。これは、Passive と Active の両制御方法の特性を組み合わせることにより、より経済的に、高い振動制御効果を得ようとするものである。従って、本研究では、構造物の振動制御に関する基礎的研究として、風荷重をうける高層建築物を想定した正弦波外力をうける一質点系を対象とし、Tuned Mass Damper (以下 TMD とよぶ) を基本とした各種 (Passive, Semi-Active, および, Active) 制御方法による制振効果について若干の比較・検討を試みた。

2. Active TMD 制御

本研究では、構造物は 1 次モードで振動するものとし図-1 のような 1 自由度系にモデル化した。 m , c , および k はそれぞれ質量, 粘性減衰係数, および剛性を表わし, また添字 1 および 2 は構造物および TMD の諸量であることを示す。また $y_1(t)$, $y_2(t)$ は構造物, TMD の絶対変位である。 $f(t)$ は構造物のみに作用する風荷重を表わし, $u(t)$ は加えられる制御力である。ここで, $\mathbf{x} = [y_1, z, \dot{y}_1, \dot{z}]^T$, $z = y_2 - y_1$ とおくと, 運動方程式より次式が得られる。

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A} \mathbf{x} + \mathbf{B} u + \mathbf{f} \quad (1)$$

ここで, $\mathbf{A}$, $\mathbf{B}$, $\mathbf{f}$ は, つぎのようである。

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -\frac{c_1}{m_1} & \frac{k_1}{m_1} & -\frac{c_1}{m_1} & \frac{c_1}{m_1} \\ \frac{k_1}{m_1} & -(\frac{k_2}{m_2} + \frac{k_2}{m_1}) & \frac{c_1}{m_1} & -(\frac{c_2}{m_2} + \frac{c_2}{m_1}) \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -\frac{1}{m_1} & \frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2} \end{bmatrix}^T$$

$$\mathbf{f} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{f}{m_1} & -\frac{f}{m_1} \end{bmatrix}^T$$

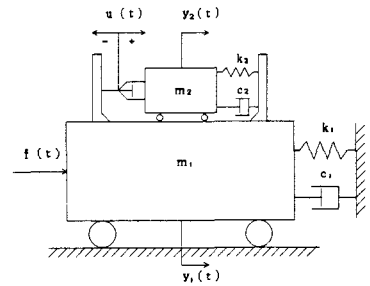


図-1

また, フィードバックを形成しているため, 制御力 $u(t)$ は次の形で表わされる。 $u(t) = \mathbf{K}^T \mathbf{x}(t)$

ここで, 最適制御力 $u(t)$ を決定するために, 次の評価関数を考える。

$$J = \int_0^{\infty} \{ \mathbf{x}^T(t) \mathbf{Q} \mathbf{x}(t) + r u^2(t) \} dt \quad (2)$$

ただし, $\mathbf{Q}$ は非負の対称行列, r は非負の定数である。

以上より, 状態の安定と評価指標 J を最小にすることより, 最適制御力 $u(t)$ は次式で与えられる⁽¹⁾。

$$u(t) = -\frac{B^T H}{r} x(t) \quad (3)$$

ここで、 H は次のリカッティ方程式を満足する。 $Q + HA + A^T H - HBB^T H r^{-1} = 0$ (4)

3. Semi-Active TMD制御

Semi-Active TMD制御とは、Passive TMD制御方法と Active TMD制御方法とを適当に使い分けることにより、より少ない供給エネルギーのもとでActive制御に準ずるような制振効果を得ようとするものである。本研究では、Passive制御にするか、あるいは Active制御にするかの判定条件として、次の2つを考えている。

(1) 建物の変位に対してある基準値($y_{r,r}$)を定め、 $y_1(t)$ がその基準値以下のときには制御力を0 (Passive)とする場合。 $y_1(t) < y_{r,r}$ のとき $u(t) = 0$

(2) 建物の速度に対してある基準値($\dot{y}_{r,r}$)を定め、 $\dot{y}_1(t)$ がその基準値以下のときには制御力を0 (Passive)とする場合。 $\dot{y}_1(t) < \dot{y}_{r,r}$ のとき $u(t) = 0$

4. 計算例

ここでは各々の場合の建物の変位($y_1(t)$)応答の結果をもとに、それらの制振効果を比較する。図-2はいかなる制御装置も取り付けない場合と、Passive, Active 両制御装置を取り付けた場合との比較図である。図-3、図-4は質量比($m_2/m_1=1/50, 1/100$)の違いによる、Passive, Active両TMD制御の比較図である。図-5は建物の変位に基準値($y_{r,r}=1\text{cm}$)を設けた場合のSemi-Active TMDと、Active, およびPassive TMDとの比較図であり、図-6は同様に速度に基準値($\dot{y}_{r,r}=1\text{cm/s}$)を設けた場合の三者の比較図である。

5. むすび

本研究によりつぎのことが明らかになった。(1) Passive, Active両制御方法とも振動制御に有効に働いている。(2) Active制御方法では、質量比はほとんど影響しない。(3) Semi-Active制御において、変位に基準値を設けた場合、その制振効果はActive 制御の場合とほぼ同等である。(4) 同様に、速度に基準値を設けた場合の制振効果はActive制御の場合より多少劣っている。

参考文献

1) 高橋安人: システムと制御 下, 岩波書店, pp. 320-325.

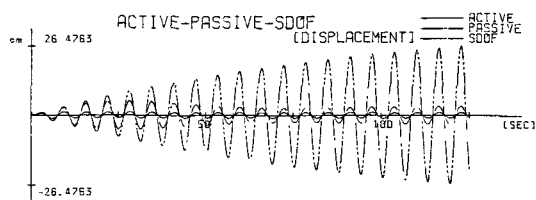


図-2

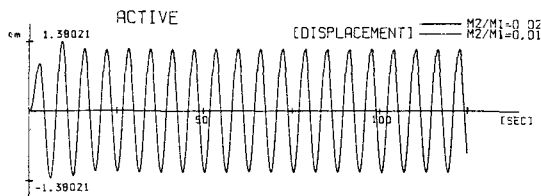


図-4

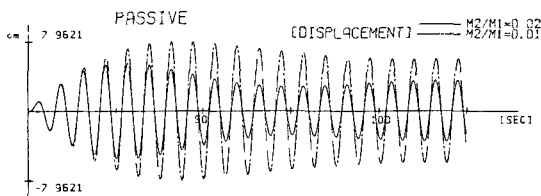


図-3

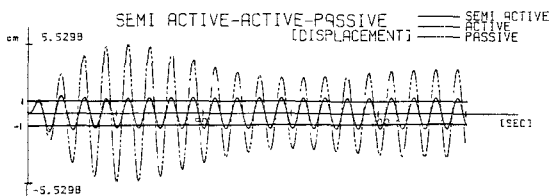


図-5

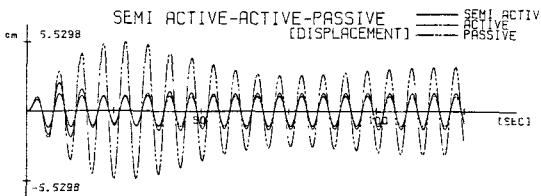


図-6