

TMDにダイナミック・マスを用いたシステムの応答効果に関する研究

Development of a New TMD System Using a Dynamic Mass System

○浅野颯太<sup>1</sup>, 秦一平<sup>2</sup>, 郭鈞桓<sup>3</sup>, 阿久戸信宏<sup>2</sup>

\*Souta Asano<sup>1</sup>, Ippei Hata<sup>2</sup>, Kuo Chumhuan<sup>3</sup>, Nobuhiro Akuto<sup>2</sup>

Abstract : This study investigates the design method and response effectiveness of a Tuned Mass Damper (TMD) incorporating a Dynamic Mass. An optimal design formula was derived to control building responses by integrating the proposed system into structures. Furthermore, the response performance of the proposed system is examined in comparison with that of conventional TMDs.

1. はじめに

建物が風や地震などの外力を受ける際の振動制御手法として、Tuned Mass Damper (以下「TMD」)の使用が挙げられる。建物最上部にTMDを設置し、建物の固有周期と同調させることが可能となり、顕著な制振効果が得られる。

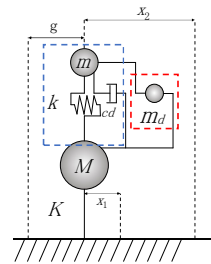
しかし、建物の固有周期は必ずしも設計値と一致するとは限らず、設計段階で最適同調を行っても、竣工時には再調整が必要となるため、施工性や保守性に課題がある。これに対し、既往研究<sup>[1]</sup>では、周期調整を容易にする回転慣性質量 (ダイナミック・マス、以下「D.M.」)を用いたTMDシステム(D.M.同調型TMD)が開発された。<sup>[1]</sup>

以上の研究背景より本研究では、TMD層にD.M.を組み込むことで、付加層を変更することなく調整を可能とし主構造に対する制振効果を保持、TMDの応答を抑制させる複合型制振システムの応答効果の研究を目的とする。

2. 提案システムの概要および最適設計式の導出

本項では、D.M.を複合したTMDの1質点せん断モデルを対象とする。定点理論に基づき、最適同調式および最適減衰式を提案する。Fig.1の左側の青枠部分が従来のTMDを表し、ここに赤枠で示したD.M.を追加した制振システムのモデル図を示す。本研究で扱うモデルに対して Euler-Lagrange の方程式を用いて解析モデルの振動方程式は(1)式のように誘導できる。ここで、(1)式において定常振動 $x_1 = X_1 e^{i\omega t}$ ,  $x_2 = X_2 e^{i\omega t}$ ,  $\ddot{g} = -\omega^2 Y e^{i(\omega t + \varphi)}$ とおき、(1)式の一般解が(2)式となる。なお、(2)式の記号を(3)式としている。TMDの絶対加速度応答倍率 $(|\ddot{X}_2 + \ddot{Y}|/|\ddot{Y}|)$ および相対加速度応答倍率 $(|\ddot{X}_2/\ddot{Y}|)$ を質量比 $\mu$ および入力低減率 $\eta$ 、強制振動数比 $\lambda$ 、固有振動数比 $\gamma$ の関係式として(4)式、(11)式を示す。(4)式、(11)式は3次方程式となるため $c_d=0$ 又は $c_d=\infty$ の

絶対加速度応答倍率の交点を強制振動数比の小さい点から $\lambda_q$ ,  $\lambda_p$ , 相対加速度応答倍率の交点を $\lambda_s$ ,  $\lambda_r$ とする。この時、応答倍率が等しくなる条件は定点の周期関係に応じて関係式が異なるため、場合分けが必要である。その場合分けをした最適同調式は(6)式、(9)式、(13)式、(16)式で表せる。最適同調時の最大振幅倍率は(7)式、(10)式、(14)式、(17)式と表せる。



M	Structure Mass
K	Structure Stiffness
m	Added Mass
K	Additional Stiffness
m <sub>d</sub>	Dynamic Mass(D.M.)
c <sub>d</sub>	Damping coefficient of damper

Fig.1 proposed system model

$$\begin{bmatrix} m+m_d & -m_d \\ -m_d & M+m_d \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_2 \\ \ddot{x}_1 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_d & -c_d \\ -c_d & c_d \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x}_2 \\ \dot{x}_1 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k & -k \\ -k & k+K \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_2 \\ x_1 \end{Bmatrix} = -[M] \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \end{Bmatrix} \ddot{g} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} -\omega^2 + \frac{\eta(\omega_2^2 + 2h\omega_2 i\omega)}{1 + \mu(1-\eta)} & \frac{-\eta(\omega_2^2 + 2h\omega_2 i\omega) + (1-\eta)\omega_1^2}{1 + \mu(1-\eta)} \\ \frac{-\eta\mu(\omega_2^2 - 2h\omega_2 i\omega)}{1 + \mu(1-\eta)} & -\omega^2 + \frac{\eta\mu\omega_2^2 + \omega_1^2 + 2h\omega_2\eta i\omega}{1 + \mu(1-\eta)} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} X_2 \\ X_1 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \omega^2 \\ \omega^2 \end{Bmatrix} Y e^{i\varphi} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \mu &= m/M & \omega_1 &= \sqrt{K/M} & \gamma &= \omega_2/\omega_1 \\ \eta &= m/(m+m_d) & \omega_2 &= \sqrt{k/m} & \lambda &= \omega/\omega_1 \end{aligned} \quad (3)$$

<b>絶対加速度応答倍率</b>	
$(-1 + \Omega)(2(1 + \mu)(-1 + (-1 + \eta)\mu)\Omega^2 + (2 + \eta + 2\mu + 2\eta(1 + \mu)^2\gamma^2)\Omega - \eta(1 + 2(1 + \mu)\gamma^2)) = 0$ (4)	
$T_{TMD} < T_f \sqrt{\frac{2\mu(\mu+1)}{1-\mu}}$ (5)	$T_f \sqrt{\frac{2\mu(\mu+1)}{1-\mu}} < T_{TMD} < T_f(\mu + 1) \sqrt{\frac{1}{1-\mu}}$ (8)
$\gamma = \frac{1}{1+\mu} \sqrt{\frac{2-\eta+(2-3\eta)\mu}{2\eta}}$ (6)	$\gamma = \frac{1}{\mu+1} \sqrt{\frac{2-\eta+2\mu(1-\eta)\mu}{\eta\mu}}$ (9)
$ \frac{X_2 + Y}{Y}  = \sqrt{\frac{2-\eta+2(1-\eta)\mu}{\eta\mu}}$ (7)	$ \frac{X_2 + Y}{Y}  = \frac{1}{\mu}$ (10)
<b>相対加速度応答倍率</b>	
$(-1 + \Omega)((-2 + \eta + 2(-1 + \eta)u)\Omega^2 + (2 + \eta(-1 + 2(1 + u)\gamma^2))\Omega - 2\eta\gamma^2) = 0$ (11)	
$T_{TMD} = T_f \sqrt{\frac{\eta}{1-\eta}}$ (12)	$T_{TMD} > T_f \sqrt{\frac{\eta}{1-\eta}}$ (15)
$\gamma = \sqrt{\frac{1-\eta}{\eta}}$ (13)	$\gamma = \frac{1}{1+\mu} \sqrt{\frac{2-\eta+2\mu(1-\eta)}{2\eta}}$ (16)
$ \frac{X_2}{Y}  = \frac{1+\mu}{\mu}$ (14)	$ \frac{X_2}{Y}  = \frac{(\eta-2)\mu-2+R}{\eta\mu-R}$ (17)

$$R = \sqrt{\eta\mu(2 + (2 - \eta)\mu)}$$

提案式の有効性を確認するため、1質点系せん断モデルを対象とした設計例を以下に示す。主構造の質量を3.0[t]とし建物1次固有周期を1.0[s]とする。

1 : 日大理工・学部・建築 2 : 日大理工・教員・建築 3 : 日大理工・専任職員・建築

TMDの絶対加速度応答倍率の設計方法を示す。

① 質量比 $\mu$ の設定

質量比 $\mu$ を設定し、付加質量  $m$  を算出する。本検討では $\mu=0.5$  とする。

② 付加層周期の設定

付加層周期を設定し、付加剛性  $k$  を算出する。本検討では、付加層周期を 1.1[s]と設定する。

③ D.M.の決定

①, ②より

$T_{TMD} < T_f \sqrt{\frac{2\mu(\mu+1)}{1-\mu}} = 1.73[s]$  (6)式を用い、D.M. $m_d$ を決定する。

次にTMDの相対加速度応答倍率の設計方法を示す。なお、質量比および付加層周期は絶対加速度応答倍率の諸元と同じとする。

③ D.M.の決定

入力低減率により最適同調条件が変わるためD.M.の条件式(13)式、(16)式を変形して(18)式を表す。

$$m_d \geq \frac{M}{2(1+\mu)} \quad (18)$$

M,  $\mu$ より $m_d \geq 1$ となる時(16)式を用いる。(16)式よりD.M.量を決定する。

以上の設計フローに従って決定した諸元を用いた共振曲線をそれぞれ Fig.2 および Fig.3 に示す。

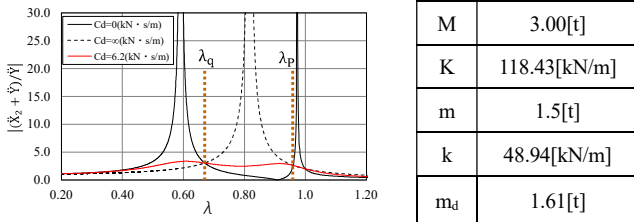


Fig.2 Absolute Acceleration Response Ratio Curve

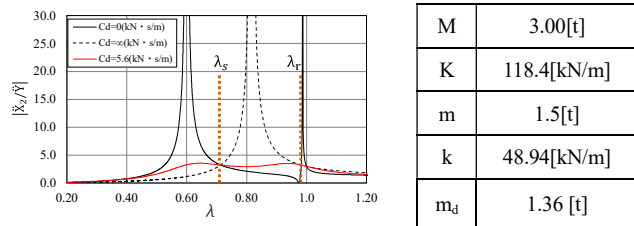


Fig.3 Relative Acceleration Response Ratio Curve

3. 従来のTMDとD.M.付きTMDの応答比較

2節に示した提案システムそれぞれの応答倍率について従来のTMDと比較する。主構造の質量を3.0[t]とし建物1次固有周期を1.0[s]とする。

主構造における最適設計した際の最適減衰式を(21)式および(24)式に示し、 $\eta$ を変更した時の傾向を Fig.4 に示す。 $\eta=1$ のものがTMDと同値である。目標粘性減衰定数  $h_{opt}$  の比較結果から、 $\eta$ を下げるほど  $h_{opt}$  も

低下する傾向が明らかとなった。 $\mu$ が小さい領域では $\eta$ の影響は小さく、従来のTMDと似た応答特性を示すことが確認された。

絶対加速度応答倍率		
$\gamma = \frac{1}{1+\mu} \sqrt{\frac{2-\mu}{2}}$ (19)	$\left  \frac{x_1 + \ddot{y}}{\ddot{y}} \right  = \sqrt{\frac{Z}{\mu}}$ (20)	$h_{opt} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\mu}{Z-\mu}}$ (21)
相対加速度応答倍率		
$\gamma = \frac{1}{1+\mu} \sqrt{\frac{Z}{2}}$ (22)	$\left  \frac{x_1}{\ddot{y}} \right  = \sqrt{\frac{Z}{\mu}}$ (23)	$h_{opt} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\mu}{Z}}$ (24)
$Z = \frac{2+2\mu}{\eta} - \mu$		

TMDの最適同調時の最大振幅倍率の比較を Fig.5 に示す。TMDの最適同調式の適用範囲である(8)式、(12)式の範囲では最大振幅倍率は(10)式、(14)式より最大振幅倍率は $\eta$ によらない。 $\mu$ が0.1以下かつ $\eta$ が0.3以上の場合には絶対応答倍率、相対応答倍率それぞれ(13)式を用いているためこの条件下ではD.M.の影響は見られず、従来のTMDと同等の応答特性を示した。

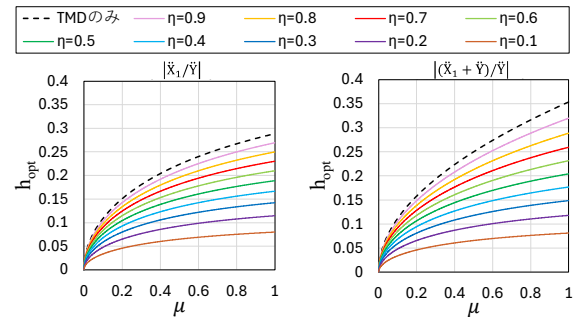


Fig.4 Effect of  $\eta$  on the Optimal Damping Ratio

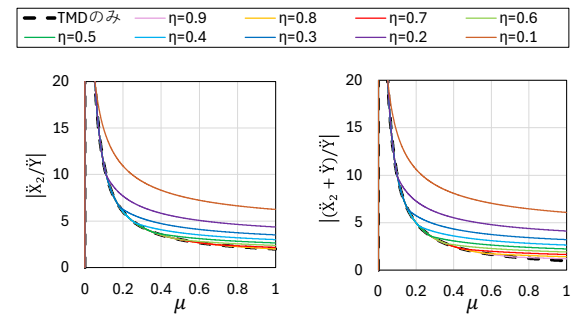


Fig.5 Effect of  $\eta$  on the TMD Response Ratio

4. まとめ

D.M.を複合したTMDシステムの概要を示すと共にTMDの最適設計式を提案した。従来のTMDとの比較により構造体およびTMDの応答は $\eta$ による変化傾向を表し、本システムの応答効果を検証した。

5. 参考文献

[1] 山下直城, 秦一平, 郭鈞桓, 阿久戸信宏, 有住洋人: ダイナミック・マス同調システムを用いた新しいTMDの開発(その1~その2), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2024.7  
 [2] 背戸一登: 構造物の振動制御, コロナ社, 2006  
 [3] 石丸辰治: 対震設計の方法, 建築技術, 2008