

ダマックスによる周期伸長効果を利用した建物質同調制震に関する研究

Study on seismic response control method of BMD having inertial mass proportioned to relative acceleration

日本大学大学院 牛坂伸也

1. はじめに

近年、ダマックスなどと称される節点間の加速度差に応じて慣性抵抗力を生じるデバイスが開発され、これを用いた新たな制震技術の開発が進められている。本報では、そのダマックスを用いた新たな同調質量型制震構造の提案を行うものである。

以下では、ダマックスによる周期伸長効果を利用した建物質同調制震 (Building Mass Damper, 以下 BMD) の最適同調条件を明らかにし、シミュレーション解析にてその動的特性を検証する。

2. 建物質同調制震 (BMD)

TMD に代表される同調質量効果を利用した制震構造は、その慣性抵抗力となる補助質量比が大きくなるほど制震対象構造物の応答低減が大きいという性質がある (Fig.1,2)。既往の研究¹⁾には、その質量比を大きくするために中間層免震を用い、免震層上部の建物質同調質量を補助質量として利用した BMD の研究報告がある。

本報ではそのような免震構造による剛性調節に限らず、ダンパーの付加すなわちダマックスの周期伸長効果を利用することで、上部構造と下部構造の同調が可能であること、また、TMD では得ることのできない大きな応答低減効果 (Fig. 3) が得られることを示す。

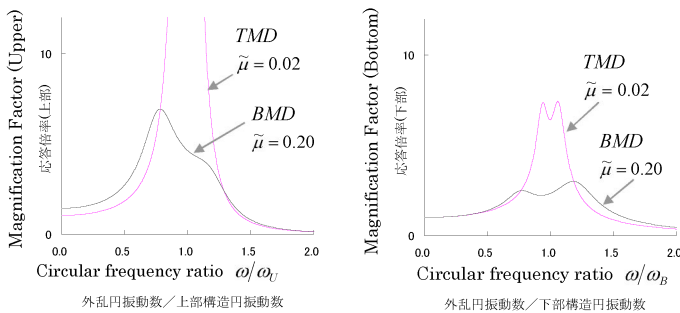


Fig.1 周波数加速度応答倍率

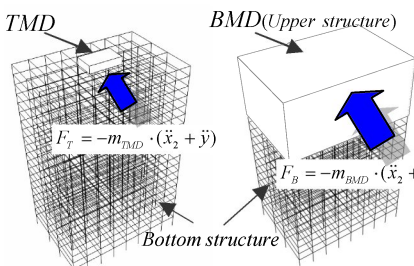


Fig.2 TMD と BMD の概念図

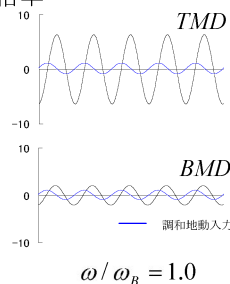


Fig.3 調和地動入力応答: \ddot{x}_1

3. ダマックスを含んだ BMD の最適同調条件

3-1. 振動方程式の誘導

BMD を図 (Fig.4) のように 2 質点系にモデル化する。第 1 層、第 2 層はそれぞれ下部構造と上部構造を表し、また第 2 層にはダマックスが付与してある。その振動方程式を以下に示す。

$$(\mathbf{M} + \mathbf{M}_d)\ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{C}_d\dot{\mathbf{x}} + \mathbf{K}\mathbf{x} = -\mathbf{M}\mathbf{i}\ddot{y} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \mathbf{M} = \begin{bmatrix} m_2 & m_2 \\ m_2 & m_2 + m_1 \end{bmatrix} \\ \mathbf{M}_d = \begin{bmatrix} m_{d2} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} & \mathbf{K} = \begin{bmatrix} k_2 & 0 \\ 0 & k_1 \end{bmatrix} \\ \mathbf{C}_d = \begin{bmatrix} c_{d2} & 0 \\ 0 & c_{d1} \end{bmatrix} & \mathbf{i} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \\ \ddot{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} \ddot{x}_2 \\ \ddot{x}_1 \end{bmatrix} & \dot{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} \dot{x}_2 \\ \dot{x}_1 \end{bmatrix} & \mathbf{x} = \begin{bmatrix} x_2 \\ x_1 \end{bmatrix} \end{cases}$$

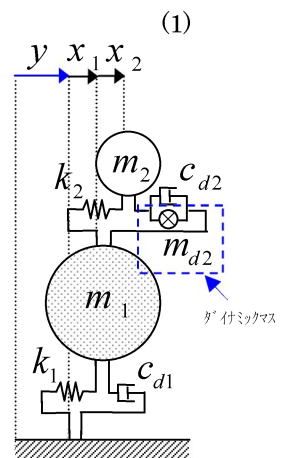


Fig.4 BMD 振動モデル

\ddot{y} : 地動加速度入力

\mathbf{M} : 質量マトリクス

\mathbf{K} : 剛性マトリクス

\mathbf{M}_d : 慣性質量マトリクス

\mathbf{C}_d : 減衰マトリクス

ここで、(1)式の両辺の質量項を $\hat{\mathbf{M}} = \mathbf{M} + \mathbf{M}_d$ で表すと外乱の作用ベクトル \mathbf{i} は(2)式の $\boldsymbol{\eta}$ で表され、(3)式のように変形できる。

$$\boldsymbol{\eta} = \hat{\mathbf{M}}^{-1}\mathbf{M}\mathbf{i} \quad (2)$$

$$\hat{\mathbf{M}}\ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{C}_d\dot{\mathbf{x}} + \mathbf{K}\mathbf{x} = -\hat{\mathbf{M}}\boldsymbol{\eta}\ddot{y} \quad (3)$$

$\boldsymbol{\eta}$ は(4)式から結局、 $\boldsymbol{\eta} = \mathbf{i}$ となるため、(3)式は(5)式となり、(1)式の左辺と右辺の質量項は等しく表せる。

$$\boldsymbol{\eta} = \begin{bmatrix} m_2 + m_{d2} & m_2 \\ m_2 & m_2 + m_1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} m_2 & m_2 \\ m_2 & m_2 + m_1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\hat{\mathbf{M}}\ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{C}_d\dot{\mathbf{x}} + \mathbf{K}\mathbf{x} = -\hat{\mathbf{M}}\mathbf{i}\ddot{y} \quad (5)$$

また最適同調条件を導くために(5)式をさらに、2 質点の Voigt モデルと同様なマトリクス形式に変換する。第 2 層のみが入力低減効果の影響を受けることから、

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} \eta_2 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad \eta_2 = \frac{m_2}{m_2 + m_{d2}} \quad (6)$$

(6)式により、(5)式は(7)式のように変換できる。すなわち、各項の第2層のパラメータは入力低減効果を含んだ有効質量 $\tilde{m}_2 = m_2 \eta_2$ 、有効減衰 $\tilde{c}_{d2} = c_{d2} \eta_2^2$ 、有効剛性 $\tilde{k}_2 = k_2 \eta_2^2$ として表すことができる。

$$\mathbf{T} \hat{\mathbf{M}} \mathbf{T}^{-1} \ddot{\hat{\mathbf{x}}} + \mathbf{T} \mathbf{C}_d \mathbf{T}^{-1} \dot{\hat{\mathbf{x}}} + \mathbf{T} \mathbf{K} \mathbf{T}^{-1} \hat{\mathbf{x}} = -\mathbf{T} \hat{\mathbf{M}} \mathbf{T}^{-1} \ddot{\mathbf{y}} \quad (7)$$

$$\begin{cases} \mathbf{T} \hat{\mathbf{M}} \mathbf{T}^{-1} = \begin{bmatrix} m_2 \eta_2 & m_2 \eta_2 \\ m_2 \eta_2 & m_2 + m_1 \end{bmatrix}, & \mathbf{T} \mathbf{C}_d \mathbf{T}^{-1} = \begin{bmatrix} c_{d2} \eta_2^2 & 0 \\ 0 & c_{d1} \end{bmatrix} \\ \mathbf{T} \mathbf{K} \mathbf{T}^{-1} = \begin{bmatrix} k_2 \eta_2^2 & 0 \\ 0 & k_1 \end{bmatrix}, & \hat{\mathbf{x}} = \mathbf{T} \mathbf{x} \end{cases}$$

3-2. BMD の最適同調条件と応答解析

調和地動加速度入力 $\ddot{y} = F_0 e^{i\omega t}$ に対する最適同調条件を(7)式より導く。上部構造にダマチックマス付与系(BMD)の上部構造固有円振動数 $\tilde{\omega}_U$ 、下部構造の固有円振動数 ω_B は(8)式、(9)式で表される。ここで、全体質量に対する上部構造の質量比を $\mu_0 = m_2 / (m_2 + m_1)$ と定義する。一方で、ダマチックマスを含む系の上部構造の質量は有効質量 \tilde{m}_2 であるから、その比は(10)式ようになる。これを有効質量比 $\tilde{\mu}$ と定義する。なお、BMD の実質的な質量効果はこの $\tilde{\mu}$ の値による。ここで、 $\hat{\mathbf{x}} = \{r_2, r_1\}^T e^{i\omega t}$ としたとき、定点理論²⁾から最適振動数比 $\tilde{\lambda}_{opt}$ 、最適減衰定数 $\tilde{h}_{U,opt}$ はそれぞれ(11)式、(12)式となる。

$$\tilde{\omega}_U = \sqrt{\frac{\tilde{k}_2}{\tilde{m}_2}} \quad ; \text{ 上部構造固有円振動数} \quad (8)$$

$$\omega_B = \sqrt{\frac{k_1}{m_2 + m_1}} \quad ; \text{ 下部構造固有円振動数} \quad (9)$$

$$\tilde{\mu} = \frac{\tilde{m}_2}{m_2 + m_1} \quad ; \text{ 有効質量比} \quad (10)$$

$$\tilde{\lambda}_{opt} = \frac{\tilde{\omega}_U}{\omega_B} = \sqrt{\frac{2-3\tilde{\mu}}{2}} \quad ; \text{ 最適振動数比} \quad (11)$$

$$\tilde{h}_{U,opt} = \sqrt{\frac{3}{8} \frac{\tilde{\mu}}{\tilde{\mu}+2}} \quad ; \text{ 上部構造最適減衰定数} \quad (12)$$

3-3. 必要ダマチックマス係数 α の導出とシミュレーション解析

ダマチックマスを横軸とした $\tilde{\lambda} \cdot \omega_B$ と $\tilde{\omega}_U$ の関係を図(Fig.5)に示す。それらの交点は(11)式の最適振動数比 $\tilde{\lambda}_{opt}$ を満たす点を示している。そこで、(13)式に(8)式および(11)式を代入し、ダマチックマス m_{d2} を $m_{d2} = \alpha k_2$ と表現すると、 α は(15)式となり、質量比 μ_0 に対する最適剛性 $k_{2,opt}$ と任意の剛性 k_2 の比 $\beta = k_2 / k_{2,opt}$ 、および下部構造の固有円振動数 ω_B の関係式に整理することができる。つまり、同調条件を満たすのに必要なダマチックマスを規定する α は、図(Fig.6)に示すように β と下部構造周期 T_B から求まり、それらに比例して増加する関係がある。また、最適同調時の有効質量比 $\tilde{\mu}$ は(16)式で表される。 μ_0 と β のみによって決まり、図(Fig.7)に示すように β の増加に反比例する。

次にテマストラクチャー(20層在来モデル)³⁾を対象に、上部5層の質量をマスタンパーとして利用するBMDについて、せん断棒モデルとして複素固有値解析と弾性応答解析(鷹取 EW_原波, 八戸 EW_原波)を行った結果を示す。

$$\tilde{\lambda}_{opt} \cdot \omega_B = \tilde{\omega}_U \quad (13)$$

$$m_{d2} = k_2 \alpha = \frac{1}{\omega_B^2} \cdot (k_2 - k_{2,opt}) \quad (14)$$

$$\alpha = \frac{1}{\omega_B^2} \cdot \left(1 - \frac{k_{2,opt}}{k_2}\right) \quad (15)$$

$$\tilde{\mu} = \eta_2 \mu_0 = \frac{\mu_0}{\beta - 1.5 \mu_0 (\beta - 1)} \quad (16)$$

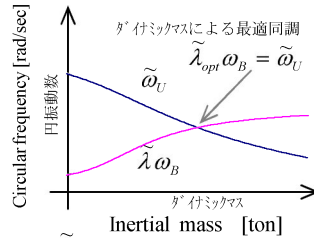


Fig.5 $\tilde{\lambda}_{opt}$, $\tilde{\omega}_U$ のダマチックマスとの依存関係

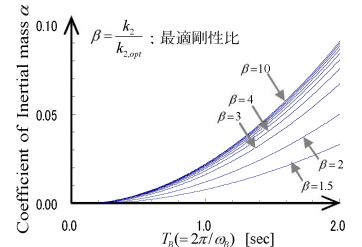


Fig.6 下部構造周期 T_B と必要 DM 係数

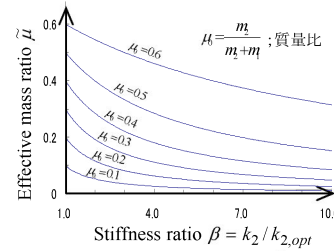


Fig.7 有効質量比 $\tilde{\mu}$ と剛性比 β の依存関係

Table.1 BMD の最適同調条件

$\tilde{\omega}_U$	6.04 [rad/sec]
ω_B	3.56 [rad/sec]
μ_0	0.23
$\tilde{\mu}$	0.07
$\tilde{\lambda}_{opt}$	0.95
$\tilde{h}_{U,opt}$	16.01 [%]
α	0.06
β	4.37

また、BMD の同調条件を表(Table.1)に示す。TYPE1 は BMD 構造(原構造+粘性ダンパー+ダマチックマス)、TYPE2 はダマチックマスを付与しない場合(原構造+粘性ダンパー)、TYPE3 は原構造(ho=3%)である。図(Fig.8)から各地震波とも原構造と比較し、BMD 構造とした場合で、最大 50%前後の応答低減がみられる。また、表(Table.2)の複素固有値解析結果から、BMD 構造の減衰定数が1次で 4.6%、2次は 15.1%であり、高い減衰定数が得られているのがわかる。

4. まとめ

ダマチックマスをを用いることにより建物質質量を利用した同調制震が可能であることを示した。また、BMD の最適同調条件を示した。さらに応答解析にて、BMD 制震(上部構造のみの制震化)による応答低減効果を確認した。

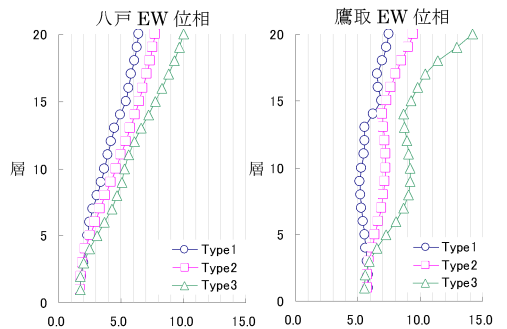


Fig.8 弾性応答解析結果(最大絶対加速度) [m/s²]

Table.2 各 Type の複素固有値解析結果

解析モデル	Type1	Type2	Type3
付加要素	粘性ダンパー + ダマチックマス	粘性ダンパー	-
固有周期 T [sec]			
1st	2.52	2.46	2.47
2nd	1.69	0.89	0.92
減衰定数 h			
1st	4.6%	3.6%	3.0%
2nd	15.1%	16.4%	8.0%

【参考文献】1) 石丸辰治ほか;「同調多重質量ダンパー(TMMD)による高層建物の制震」日本機械学会[No.910-39(III)]1991年、2) 構造物の振動制御 背戸一登 著 3) パッシブ制振構造 設計・施工マニュアル 日本免震構造協会 2005年9月