

逆変位増幅機構を有する TMD のパルス性観測地震動に対する構造物応答低減効果

京都大学工学研究科 学生員 ○加藤 滉大
 京都大学防災研究所 正会員 澤田 純男
 京都大学防災研究所 正会員 五十嵐 晃

1. 序論

同調質量ダンパー(TMD)の構造物の地震動対策への適用を検討する際の課題として、パルス性地震動に対しては高い応答低減性能が得られない問題がある。金子¹⁾は、構造物固有周期がパルス性地震動のパルス幅よりも小さい場合に TMD の制振効果が低下することを示している。TMD の制振効果を高めるため重錘質量を増加する方法が考えられるが、重錘の質量は実用上の上限が存在するため、質量比は設計上大きくできない制約がある。一方で金子ら²⁾は、TMD と制振対象構造物をてこなどの変位増幅機構を介して接続することで制振効果を高めたパワフル TMD(以降、「PTMD」)を提案している。PTMD の変位増幅機構は擬似的に質量比を増幅する効果を有し、構造物応答の低減効果が得られることを示しており、有効性が期待されるものの、TMD のパルス性地震動に対する効果は未検討である。本研究では、PTMD の概念を拡張し、PTMD と反対方向に重錘変位を増幅する逆変位増幅機構を導入した制振装置(以降、「RTMD」:Reversal powerful TMD)を新たに提案した。PTMD 及び RTMD のパルス性観測地震動に対する応答低減効果の検討および両者の効果の比較を行った。

2. 変位増幅機構を有する制振装置

図 1 に PTMD 及び RTMD の動力学モデルを示す。ここに m :質量, c :減衰定数, k :ばね定数, x :相対変位, z :地動変位であり、添字は T :副振動系(TMD), S :主振動系(対象構造物)を意味する。また、変位増幅機構による増幅率を α と定義する。PTMD の場合の変位増幅率を正とすると、RTMD は変位増幅率を負にすることで表現される。これら変位増幅機構はてこなどを用いることで実現され、アーム比によって変位増幅率を変化させることが可能である。この動力学モデルの地震時の運動方程式は式(1)のように表される。

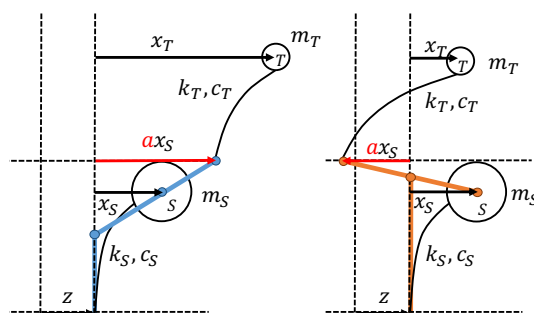


図 1:PTMD(左)と RTMD(右)の動力学モデル

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

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} m_T & 0 \\ 0 & m_S \end{bmatrix}, \mathbf{C} = \begin{bmatrix} c_T & -\alpha c_T \\ -\alpha c_T & \alpha^2 c_T + c_S \end{bmatrix}, \mathbf{K} = \begin{bmatrix} k_T & -\alpha k_T \\ -\alpha k_T & \alpha^2 k_T + k_S \end{bmatrix}$$

ここで α は減衰マトリクス $\mathbf{C}$ 及び剛性マトリクス $\mathbf{K}$ への影響し、その対称性は失われない。

3. 定点理論に基づく最適設計

4 つの無次元設計パラメータを式(2)のように定義する。

$$\mu = \frac{m_T}{m_S}, \gamma = \frac{\omega_T}{\omega_S}, \zeta = \frac{c_T}{2m_T\omega_T}, \alpha \quad (2)$$

それぞれ質量比、同調比(固有周波数比)、減衰比、変位増幅率を表している。金子ら¹⁾は Den Hartog³⁾の古典理論に倣い、主振動系変位の周波数領域における最大応答を低減することを目的とした、次の最適固有周波数比及び最適減衰比を導出しており、ここに添字は *opt*:最適値である。

$$\gamma_{opt} = \frac{1}{1 + \alpha^2 \mu}, \zeta_{opt} = \sqrt{\frac{3\alpha^2 \mu}{8(1 + \alpha^2 \mu)}} \quad (3)$$

本研究でもこの最適値を用いる。この最適値が $\alpha^2 \mu$ によって定義されることから、変位増幅機構の導入は、質量比を α^2 倍する効果を持つことがわかる。また、変位増幅率の正負で最適固有周波数比及び最適減衰比の値は等しい。

キーワード 逆変位増幅機構, 同調質量ダンパー(TMD), パルス性地震動, 最大変位応答, パッシブ型制振
 連絡先 〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄 京都大学防災研究所耐震基礎分野 mail:kato@catfish.dpri.kyoto-u.ac.jp

4. 解析条件

対象構造物を1自由度振動系とし、非制振・TMD($\alpha=1$)・PTMD($\alpha=5$)・RTMD($\alpha=-5$)によって制振するケースの解析を行う。解析は直接積分法により行うものとし、式(1)の運動方程式を解いた。また、TMDは質量比 $\mu=0.05$ で一定とし、いずれのケースも式(3)により最適調整を施した。入力地震波にはパルス性観測地震動として1995年兵庫県南部地震におけるJMA Kobe NS成分(以降、「Kobe波」)及び2016年熊本地震本震における西原村小森EW成分(以降、「NSH波」)の2ケースを用いた。それぞれ図2に示す擬似速度応答スペクトル(減衰定数 $h_s=5\%$)より、Kobe波でパルス幅0.9sec、NSH波でパルス幅3secが卓越しており、Kobe波は短周期パルス、NSH波は長周期パルスの代表として用いる。

表 1:解析条件

対象 構造物	固有周期	$T_s = 0.1 \sim 10 \text{ sec}$			
	減衰定数	$h_s = 0.05$			
制振手法		非制振	TMD	PTMD	RTMD
	質量比	—	$\mu=0.05$ (5%)		
	変位増幅率	($\alpha=0$)	$\alpha=1$	$\alpha=5$	$\alpha=-5$
入力地震波		1995年兵庫県南部地震 JMA KOBE NS 成分 2016年熊本地震(本震)西原村小森(NSH) EW 成分			

5. 地震応答解析

図3,4はそれぞれ横軸に構造物固有周期 T_s 、縦軸に変位応答スペクトルを非制振系最大変位応答値で正規化したものを示し、これは副振動系の付加によって最大変位応答値がどの程度に低減するかを意味する。図3がKobe波、図4がNSH波を入力したものである。

まず、TMDとRTMDの効果を比較すると、TMDではほとんど低減効果が得られていないが、RTMDでは T_s 全域でTMDよりも高い低減効果を示し、最大で40%程度まで低減している。よって従来のTMDの弱点を克服していると言える。次に、PTMDとRTMDの効果を比較すると、Kobe波においては $T_s>1$ で両者の低減効果がほぼ等しく、 $T_s<1$ では常にRTMDの方が低減効果が高くなっている。NSH波においては T_s のほぼ全域で常にRTMDの方が低減

効果が高い。したがって、短固有周期構造物では常にRTMDの方が低減効果が高く、長固有周期構造物では長周期パルスが作用する場合にRTMDの方が低減効果が高い。また、PTMDでは悪化方向に作用するケースが存在するが、RTMDでは悪化方向に作用するケースが見られず、RTMDはPTMDに比べて信頼性が高いと言える。

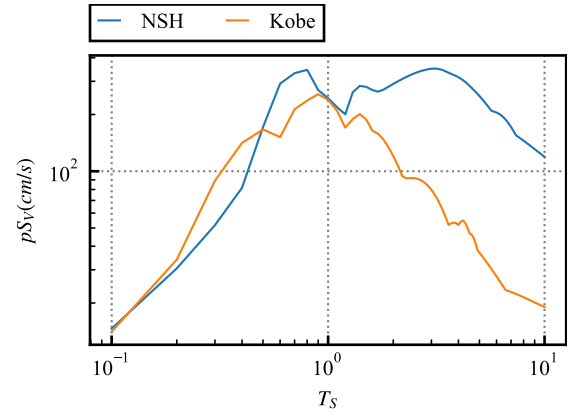


図 2:擬似速度応答スペクトル(減衰定数 5%)

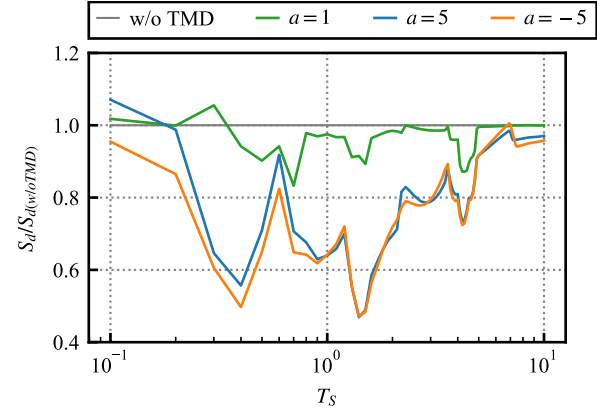


図 3:Kobe 波

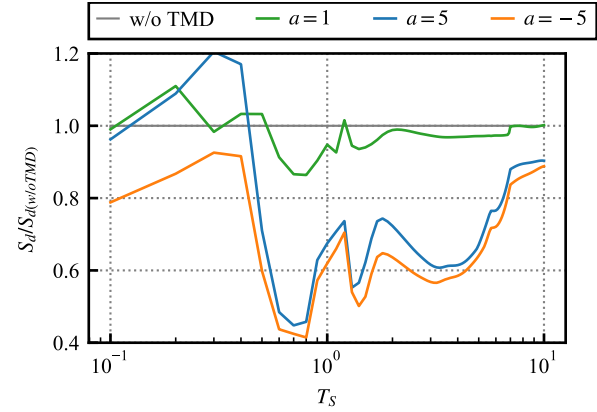


図 4:NSH 波

参考文献

1) 金子健作. 地震動の経時特性および周期特性を考慮した同調質量ダンパーの応答指定型設計法. 日本建築学会 構造系論文集, 2016, 81.730: 2057-2067.
2) 金子誉, et al. てこを利用して制震効果を高めた TMD 型橋梁用制震装置. 土木学会第 1 回免震制震コロキウム論文集, 1996, 241-248.
3) DEN HARTOG, Jacob Pieter. Mechanical vibrations. Courier Corporation, 1985.