

第 I 部門

逆変位増幅機構を有する TMD のパルス性地震動に対する構造物応答低減効果

京都大学工学部 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

地震動対策に利用される同調質量ダンパー(TMD)は、一般に大質量比の重錘を利用することでその制振効果を高めているが、実用可能な質量比には設計上の制約条件が存在している。金子ら¹⁾は TMD を改良し、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によって、より大きな制御力を制振対象に付加し制振効果を高めたパワフル TMD (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、応答塑性率の低減効果が得られることを示している。しかし、金子²⁾はパルス性地震動に対して構造物固有周期がパルス幅よりも小さい場合に TMD の制振効果が喪失することを示しており、パルス性地震動に対して課題が残っている。また、PTMD に関してはパルス性地震動に対する制振効果については検討していない。そこで本研究では、PTMD を拡張し、PTMD と反対方向に変位を増幅する機構を逆変位増幅機構と呼び、これを有する制振装置を提案し（以降、「提案装置」と呼ぶ）、PTMD 及び提案装置のパルス性地震動に対する応答低減効果について比較、検討を行う。

2. 変位増幅機構を有する制振装置

図 1 に PTMD 及び提案装置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 a と定義する。PTMD の場合の変位増幅率を正とすると、提案装置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る。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。ここで a は減衰マトリクス C 及び剛性マトリクス K にのみ影響し、その対称性は失われない。

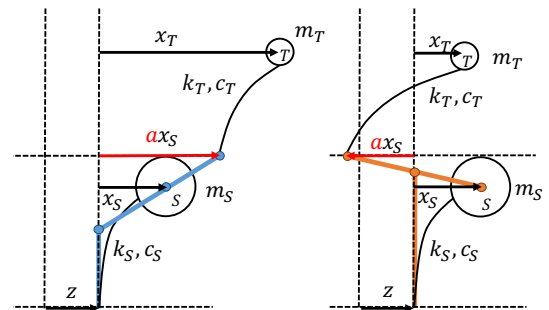


図 1:PTMD(左)と提案装置(右)の動力学モデル

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = -M1\ddot{z} \quad (1)$$

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

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。

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

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いる。ここに添字は *opt*:最適値であることを示す。

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

本研究でもこれを用いる。この最適パラメータが $a^2\mu$ 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 a^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。

4. インパルス入力に対する低減効果

入力の周波数特性に依存しないインパルス応答を用いて

その低減効果を確認する。図 2 に減衰定数 0.05 の主振動系に対し、 $\mu=5\%$ 、 $a=\pm 5$ の副振動系を付加した場合の主振動系変位の時刻歴応答を示す。また $a=0,1$ はそれぞれ非制振系、通常の TMD を表す。時刻歴応答は横軸を非制振系固有周期で正規化、縦軸を非制振系の最大変位で正規化している。破線は最大変位応答を示し、凡例にその値を記した。最大変位応答は $a=5$ で 79.1%に対し、 $a=-5$ で 65.9%に低減され、逆変位増幅機構を利用する方がより応答が小さくなることわかる。また、 $|a|=5$ の場合、通常の TMD ($a=1$)に比べて減衰効果が大きくなっていることがわかる。次に、図 3 に μ 及び a をパラメータとし、最大変位応答のコンター図を示す。 μ 及び $|a|$ が大きい程その低減効果が大きく、さらに a が負の場合の方が低減効果が大きい。

5. パルス性地震動に対する応答低減効果

最も単純なパルス性地震動の数理モデルとして地動入力加速度 $\ddot{z}(t)$ を次のように正弦波パルス 1 波とする。

$$\ddot{z}(t) = \begin{cases} A_0 \sin\left(\frac{2\pi t}{T_p}\right) & (0 \leq t \leq T_p) \\ 0 & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (4)$$

ここに、 A_0 :最大加速度、 T_p :パルス幅である。最大変位応答を考察する上で主振動系固有周期とパルス幅の比が重要であるため⁴⁾、ここでは T_s/T_p をパラメータとして考察する。

$\mu=5\%$ 、 $a=\pm 5$ の副振動系を付加した場合の変位応答スペクトルでその低減効果を検討する。図 4 は横軸に T_s/T_p 、縦軸に変位応答スペクトルを非制振系応答スペクトル値で正規化したものを示し、副振動系の付加によって最大変位応答がどの程度に変化するかを意味する。 $T_s/T_p > 1$ の領域では、 $|a|=5$ 共に 50~80%に低減されており、 $a=-5$ の方がより大きい低減効果を示している。反対に $T_s/T_p < 1$ の領域において、 $a=5$ の場合は非制振系に比べて最大変位が 100~140%と悪化方向に作用している一方、 $a=-5$ では 60~80%に低減されている。構造物固有周期を固定すると、長周期幅パルスに対する応答は図の左側、短周期幅パルスに対する応答は右側に着目することでその低減効果が

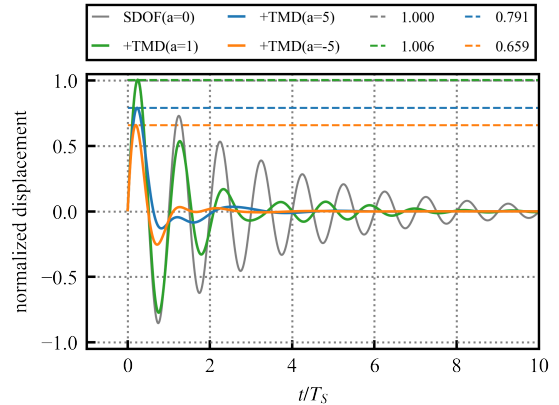


図 2:主振動系変位のインパルス応答

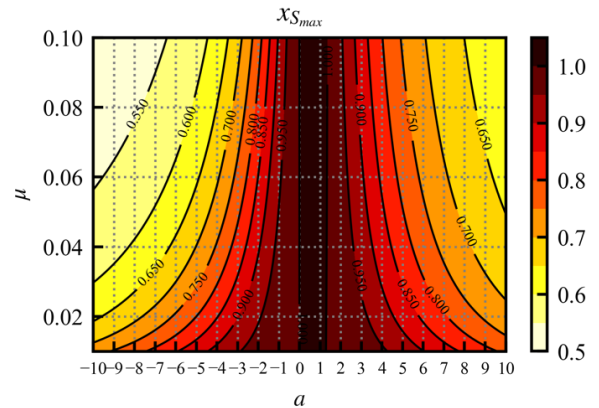


図 3:最大変位インパルス応答コンター図

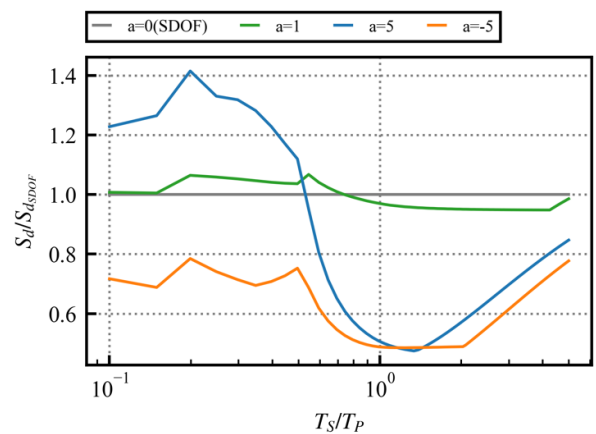


図 4:主振動系変位応答スペクトル

確認できる。従って、パワフル TMD では長周期幅パルスに対する低減効果が期待できないが、一方で提案装置ではあらゆる周期幅のパルス性地震動に対応可能性があることが示された。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) DEN HARTOG, Jacob Pieter. *Mechanical vibrations*. Courier Corporation, 1985.
- 4) 安井 雅明, et al. パルス地震動に対する 1 自由度系最大応答理論解と応答特性. 日本建築学会構造系論文集, 2010, 75.650: 731-739.