

2015年度（第7回）免震構造・制振構造に関わる研究助成の成果報告

空間構造への適用を目的とした初期変位付与型TMDの地震力に対する設計法の確立

吉中 進 （大阪市立大学）

1 はじめに

TMD(Tuned Mass Dampen)は構造物の2点の相対応答量ではなく、構造物の1点の絶対応答量に対して作用する制御手法であり、空間的な設置自由度の高さから形状と構造システムが多様で複雑な構造物に対して適用性が高いと考えられるため、本研究では空間構造への適用を想定している。TMDの制振効果は定常状態を基本とするため、地震動など非定常性の強い外力に対する制振効果は定常外力と比較すると低いことが分かっている。そこで著者は、TMDに予め初期変位を付与し、TMDの制振効果が低い過渡応答初期の効果を向上させるための手法として初期変位付与型TMDを提案し、インパルス外力が作用した場合の設計式を提案した¹⁾。本設計式は、インパルス外力の作用直後、言い換えると、応答速度が極大の時点で初期変位を解放する条件の下で、TMD初期変位の向きと大きさを適切に設定することにより、モード減衰比の大きいモードで振動させることが可能となる現象に基づいている。一方、本設計式は限定された初期条件の下で摂動法を用いて得られた近似解であるため、物理的な意味が明確ではない。そこで著者は、自由振動の理論解より初期変位解放条件式を導き、TMD初期変位に関する物理的な意味を明確にした²⁾。さらに、モード減衰比の大きいモードで振動させることが可能となる構造物の初期条件に関して、TMDが1個の場合は構造物の初期変位と初期速度の関係が固定されているが、2個以上のTMDを用いることにより、構造物の初期変位と初期速度に関して初期変位解放条件式を満足する任意の値を選択することが可能であることを示した。以上に述べたインパルス外力を受ける初期変位付与型TMDの制振効果と提案した設計式の有効性を実験的に検証するために、写真1に示すように、小型の初期変位付与型TMDモデルを試作してインパルスハンマーを用いたアーチモデル打撃試験を実施した³⁾。

以上のように、既往の研究はインパルス応答または自由振動を対象としたものである。本研究では地震力を対象外力とした場合における初期変位付与型TMDの制振効果を確認し、空間構造における適用性を確認することを目的とする。なお本報では

TMDを1個用いた場合の結果のみを述べる。

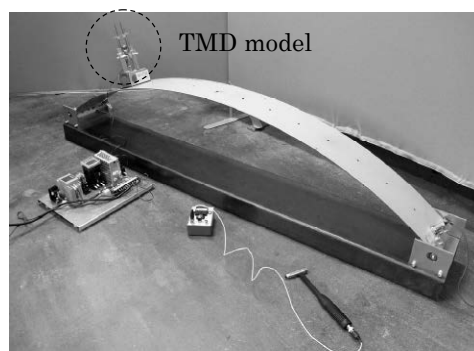


写真1 打撃試験の様子

2 初期変位付与型 TMD の設計パラメータと初期変位解放条件式

初期変位付与型 TMD の設計パラメータは、図1に示すように、TMDの重錘の質量 m_T に対する主振動系（構造物）の等価質量 M_S の比である質量比 μ の他に、(i)同調比 γ 、(ii)減衰比 ξ_T 、(iii)初期変位 y_0 がある。(1)式に示すように、同調比は主振動系の固有円振動数 ω_S に対するTMDの固有円振動数 ω_T の比であり、減衰比 ξ_T はTMDの臨界減衰係数に対するTMDの減衰係数 c_T の比である。

$$\mu = \frac{m_T}{M_S}, \quad \gamma = \frac{\omega_T}{\omega_S}, \quad \xi_T = \frac{c_T}{2m_T\omega_T} \quad (1)$$

既往の研究¹⁾において、図2に示すTMD減衰比とモード減衰比の関係に基づき、主振動系に減衰が無い場合の初期変位付与型TMDの最適同調比と最適減衰比として以下の式を提案した。

$$\gamma_{opt} = 1/(1+\mu) \quad (2)$$

$$(\xi_T)_{opt} = (31.25 \times \mu^2)^{1/3} \quad (3)$$

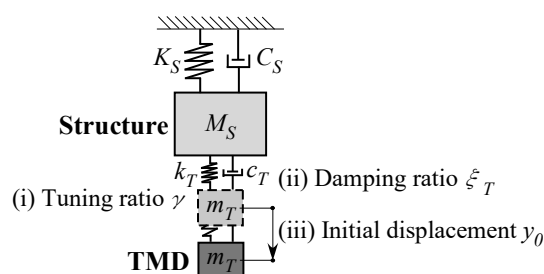


図1 初期変位付与型 TMD の設計パラメータ

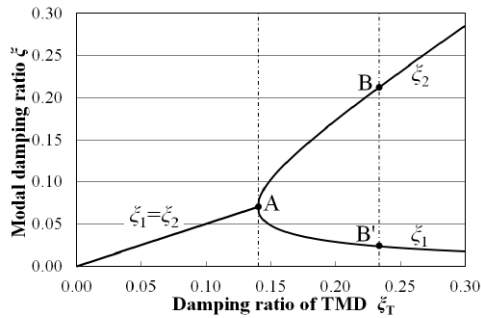


図2 TMD減衰比とモード減衰比の関係 ($\mu=2\%$)

主振動系の減衰比が ξ_s の場合における最適同調比と最適減衰比は以下の式となる。

$$\gamma_{opt} = \frac{\xi_T - \xi_s}{(1 + \mu)\xi_T - \xi_s} \quad (4)$$

$$(\xi_T)_{opt} = (31.25 \times \mu^2)^{1/3} + ((\xi_T)_A - (\xi_T)_A) \quad (5)$$

(5)式の右辺の第2項は、モード減衰比が分岐する点(図2のA点)において、主振動系に減衰が存在する場合と存在しない場合のTMD減衰比の差である。

既往の研究²⁾では、モード減衰比の小さい1次モード(図2のB'点)の応答が0、すなわちモード減衰比の大きい2次モード(図2のB点)単独で振動するための初期変位解放条件式として以下の式を導いた。

$$\{\lambda_1 \psi_1 \quad \psi_1\} \mathbf{a} \begin{Bmatrix} \dot{\mathbf{u}}(0) \\ \mathbf{u}(0) \end{Bmatrix} = 0 \quad (6)$$

ここで、 λ_1 は図1に示す2自由度系の1次モード固有値、 ψ_1 は1次の固有ベクトル、 $\mathbf{a}$ は以下の(7)式に示す質量マトリクス $\mathbf{m}$ と減衰マトリクス $\mathbf{c}$ で構成される状態マトリクスである。 $\dot{\mathbf{u}}(0)$ と $\mathbf{u}(0)$ は初期速度、初期変位に関する初期条件ベクトルである。

$$\mathbf{a} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{m} \\ \mathbf{m} & \mathbf{c} \end{bmatrix} \quad (7)$$

(6)式の物理的な意味は、1次の固有ベクトル(モーダル速度、モーダル変位)と初期速度、初期変位に関する初期条件ベクトルが、マトリクス $\mathbf{a}$ に関して一般直交性を有することである。一般直交性を有するとは、固有ベクトルと初期条件ベクトルが力学的に互いに独立で、エネルギー的に無関係であることを意味する。すなわち、1次モードと力学的に独立で、エネルギー的に無関係な初期条件を与えた場合に1次モードの応答が0となる。なお、一般粘性減衰における固有ベクトルは一般に虚数を含む複素数となるため、(6)式より得られるTMD初期変位は

複素数となる。既往の研究²⁾で述べたようにTMDの初期変位を実数とするためには、TMDが2個以上必要であるが、初期変位を主振動系の応答速度が極大となる時刻で解放する場合には、TMDが1個の場合も虚数を小さくすることができるため、実数のみを用いた場合も同等の制振効果を得ることができている。

3 地震力に対する制振効果

はじめに、地震力に対する初期変位付与型TMDの基本的な振動性状を確認するために、図1に示す2自由度系モデルを用いて検討を行った。主振動系の M_s 、 ξ_s は1kg、0.02とする。主振動系のバネ定数 K_s に関して、空間構造の1次モード固有周期 T_1 (s)とスパン L (m)に以下の(8)の式で示す相関性があることから、50mスパンのときの固有周期0.35sを用いて322.2(N/m)に設定した⁴⁾。

$$T_1 = 0.007L \quad (8)$$

TMDの質量比は2%とし、同調比と減衰比は主振動系に減衰が有る場合の設計式(4)式と(5)式を用いて0.9787、0.2517とした。TMDの初期変位は主振動系の応答変位が0、すなわち応答速度が極大のときに解放するものとし、(6)式の初期変位解放条件式より求めた値の実数のみを用い、係数1.13を掛けた¹⁾。初期変位を付与するために必要な時間は考慮していない。また、本報では通常のTMDの効果が低い衝撃的な地震動JMA Kobe 1995 NS(以下JMA Kobe NS波)波を用いた場合の結果のみを述べるが、他の地震動でも同様の性状を示すことを確認している。最初に、TMDの初期変位を解放する閾値として構造物の応答変位を用いた場合と応答速度を用いた場合を比較する。TMD無しの構造物単体がJMA Kobe NS波を受けたときの最大応答変位は0.1221mであった。初期変位を解放する閾値として、仮に最大応答変位の約1/2の+0.06mに設定し、応答変位が+0.06mを超えて次に応答変位が0となった時刻で初期変位を付与・解放した。図3に解析結果を示す。初期変位を解放する時刻は10.88sと11.30sの2回であり、初期変位は1.793m、1.243mと差がある。

次に、初期変位を解放する閾値をTMD無しの場合の最大応答速度2.105(m/s)の約1/2の+1.0(m/s)に設定した場合の結果を図4に示す。初期変位を解放する時刻は10.72sの1回のみであり、初期変位は-1.661mである。表1に示すように、最大応答変

位、40 秒間の応答変位の 2 乗平均値ともに応答速度を閾値とした場合の方が制振効果が高い。減衰力は応答速度に比例すること、減衰力を付与するために必要な TMD 初期変位は前述の解放条件においては構造物の応答速度に比例することから、本研究では応答速度を設計用閾値として用いることとした。

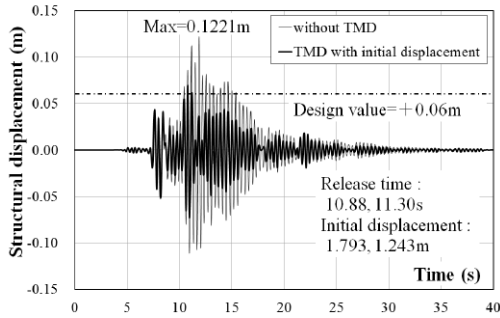


図 3 時刻歴応答曲線の比較 (Case2)

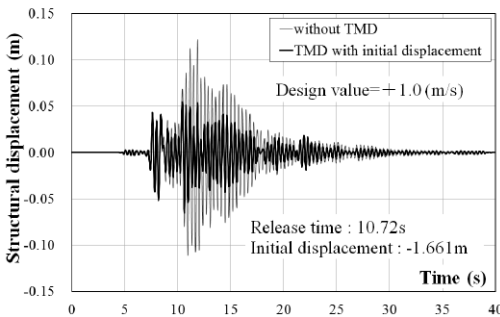


図 4 時刻歴応答曲線の比較 (Case3)

図 5 に質量比が同じで同調比と減衰比に調和地盤振動最適化パラメータである 0.9901, 0.08617 を用いた通常の TMD と、極配置法を用いて AMD の極を初期変位付与型 TMD の 2 次モードの極に一致させて制御力 $u(t) = -7.481\dot{x}_s$ を用いた場合の AMD の応答曲線を示す。AMD は時刻歴全体で優れた制振効果を示している。通常の TMD は制振効果が明確に現れるまで時間がかかるため、表 1 に示すように最大応答が大きい。一方、初期変位付与型 TMD は図 4 に示すように制振効果の発現が早い。

今回は閾値として TMD 無しの場合の最大応答速度の約 1/2 に設定したが、閾値を小さくすると解放回数が多くなり現実的でない。また既往の研究⁵⁾より、初期変位付与型 TMD の場合は、必要な初期変位は長くなるが質量比を小さくしても同等の最大応答変位の抑制効果を有することが分かっている。そのため、通常の TMD と組み合わせて、通常の TMD で効かない領域で初期変位付与型 TMD を用いるな

ど、最も効果的な適用方法を考えていく必要がある。

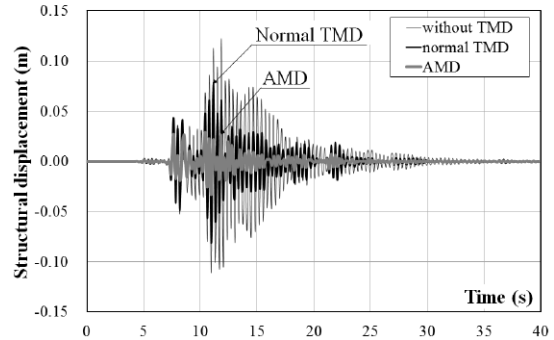


図 5 時刻歴応答曲線の比較 (Case4,5)

表 1 最大応答と 2 乗平均値の比較

Analytical case		Maximum displacement (m)	Mean square value (m ²)
1	Without TMD	0.1221	5.646×10^{-4}
2	TMD with initial displacement (Design value: displacement)	0.07258	1.814×10^{-4}
3	TMD with initial displacement (Design value: velocity)	0.06509	1.614×10^{-4}
4	Normal TMD	0.08148	1.665×10^{-4}
5	AMD	0.03324	2.963×10^{-5}

4 アーチモデルにおける制振効果

初期変位付与型 TMD の空間構造への適用性を確認するため、図 6 に示すスパン 40m、ライズ 7m のアーチモデルを用いて解析的検討を行った。境界条件は両端の節点 1 と 21 をピン支持とし、部材間は全て剛接合とした。材料は鋼材を仮定した。外力は水平 (X) 方向に地震動を入力した。アーチの減衰は考慮していない。図 7 に水平方向の有効質量比が大きい 1 次モードと 9 次モードの形状を示す。有効質量比はそれぞれ 0.319, 0.456 である。制御モードは空間構造の代表的な振動モードである逆対称 1 波の 1 次モードを選択した。TMD は 1 次モードの腹である節点 6 に設置し、作動方向は鉛直 (Z) 方向とした。TMD の質量比 μ は 2% とし、同調比 γ と減衰比 ξ_r は (2) 式と (3) 式より 0.980, 0.232 とした。

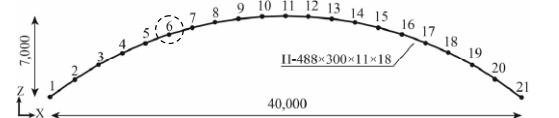


図 6 解析モデル

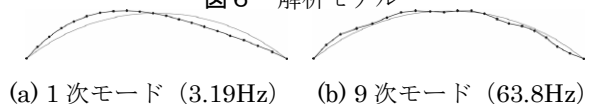


図 7 振動モード形状

最初に、JMA Kobe NS 波を入力した場合の制振効果を調べる。初期変位を解放する応答速度の閾値は前章と同じ考え方より、TMD を設置する節点 6 における最大応答速度の約 1/2 を超えて次に応答変位が 0 となった時刻に解放した。初期変位は(6)式を用いて境界節点以外の 19 節点の応答速度と応答変位を用いて計算した $-0.6135 - 0.1451i$ (m) の実数のみを用いた。図 8 に節点 6 の鉛直方向の時刻歴応答変位を初期変位が無い場合と比較する。初期変位付与型 TMD は初期変位の解放直後から優れた制振効果を発現している。次に、継続時間の長い 2011 年東北地方太平洋沖地震の岩手県大船渡市で観測された地震動（以下、Tohoku 2011 波と示す）を用いた場合の結果を述べる。図 9 に TMD の質量比 2% で同調比と減衰比に調和地盤振動最適化パラメータを用いた場合の節点 6 の時刻歴応答曲線を TMD 無しの場合と比較する。70 秒付近の 2 回目のピークにおける制振効果は高いが、28 秒付近の 1 回目のピークにおける制振効果は低い。1 回目のピークの応答を抑制するために初期変位付与型 TMD を適用した結果を図 10 に示す。初期変位は同様に(6)式を用いて計算した $-0.5616 - 0.09172i$ (m) の実数のみを用いた。初期変位付与型 TMD は 1 回目のピークの応答も効果的に抑制できていることが分かる。

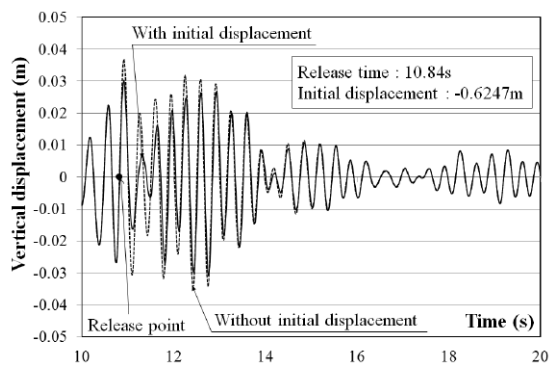


図 8 時刻歴応答曲線の比較 (JMA Kobe NS 波)

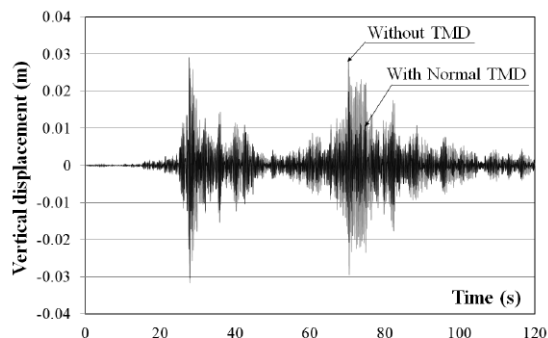


図 9 時刻歴応答曲線の比較 (Tohoku 2011 波)

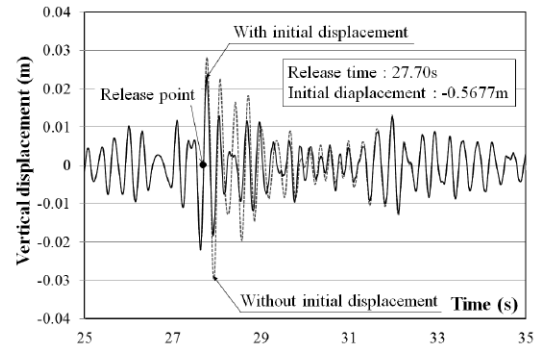


図 10 時刻歴応答曲線の比較 (Tohoku 2011 波)

5 まとめ

本研究の結果を以下にまとめる。

- 1) 2 自由度モデルを用いた検討により、地震外力に対して、初期変位付与型 TMD は初期変位の解放直後から制振効果が発現するため、通常の TMD と比較すると、特に最大応答の抑制効果に優れていることが分かった。
- 2) アーチモデルを用いた検討により、複数の振動モードが励起する構造物においても初期変位解放条件式を適用することにより、2 自由度モデルと同等の優れた制振効果を発現することが分かった。

本研究より、アーチモデルのような空間構造の地震応答制御に対する初期変位付与型 TMD の適用性を確認することができた。初期変位付与型 TMD の制振効果は、通常の TMD とアクティブ制振の中間にある。今後はより簡易な制御システムを構築するとともに、通常の TMD との併用など、より効果的な適用方法を検討する必要があると思われる。

参考文献

- 1) 吉中進，谷口与史也：振動モードに着目したインパルス応答制御のための初期変位付与型 TMD 設計式の提案，日本建築学会構造系論文集，第 688 号，pp.1071-1079，2013.6.
- 2) 吉中進，谷口与史也：初期変位付与型 TMD の初期変位解放条件に関する考察，日本建築学会構造系論文集，第 703 号，pp.1247-1258，2014.9.
- 3) 吉中進，谷口与史也，山川誠：初期変位付与型 TMD を設置したアーチモデルの打撃試験，日本建築学会構造系論文集，第 722 号，pp.735-745，2016 年 4 月.
- 4) 日本建築学会編：空間構造の動的挙動と耐震設計，2.4 節空間構造の減衰，丸善株式会社，2006 年 3 月.
- 5) 吉中進，谷口与史也，山川誠：初期変位付与型 TMD の地震力に対する制振効果に関する一考察，日本建築学会学術講演梗概集構造 I，pp.665-666，2015 年 9 月.