

アーチモデルを対象とした初期変位付与型 TMD の過渡応答制御に関する研究

STUDY ON TRANSIENT RESPONSE CONTROL USING TUNED MASS DAMPERS WITH INITIAL DISPLACEMENT FOR ARCH MODEL

建築構造学分野 吉田 力
Structural engineering Riki YOSHIDA

初期変位付与型 TMD は 1 つの振動モードしか制御することができないため、多自由度系では的確に制御モードを抑える初期変位を求めることが難しい。本研究は、構造物の初期条件を考慮した初期変位解放条件式を示し、その有効性を検証する。アーチモデルにおいてインパルス外力作用時に制御モードを的確に制御するには少なくとも TMD は 2 個以上必要であることが分かった。また、本研究ではインパルス応答だけでなく、地震力に対する初期変位付与型 TMD の有効性も検証した。It is difficult to calculate the initial displacement of the Tuned Mass Damper(TMD) which controls a target mode accurately for the multi-degree-of-freedom system because TMD with initial displacement controls only one vibration mode . In this paper, we have validated a calculation method which takes into consideration of initial condition of structure. It is concluded that at least two TMDs with initial displacement are needed to control a target mode for arch model under impulse loading. In addition, we also verify that TMD with initial displacement is not only effective for reducing impulse response, but is also effective for seismic response.

1. 序

TMD は、錘、ばね、ダンパーで構成され、その固有振動数を構造物に同調させて大きく振動させ、構造物の振動エネルギーを錘の運動エネルギーとして吸収することによりエネルギーを消散するパッシブ型の振動制御手法である。しかし、TMD は錘が安定した振動状態となるまで制振効果が発現されないため、応答の初期における制振効果はあまり期待できない。そこで TMD にあらかじめ初期変位を与えることにより応答の初期から強制的に TMD の振幅を大きくし、弱点であった過渡応答初期の制振効果を向上する手法を提案している。既往の研究より 2 自由度系の場合、TMD の減衰比をある特定の値よりも大きくすると TMD 減衰比 とモード減衰比の関係が変化することに注目して、TMD の初期変位を適切に設定してモード減衰比の高い振動モードを主体として振動させることにより、インパルス応答の初期だけでなく時刻歴全体での制振効果がより高い設計式が提案された¹⁾。しかし、多自由度系は複数の振動モードを有しておりビルなどの重層式骨組み構造と異なり、空間構造は地震動などの水平入力により上下応答が生じやすく、高次のモードを含む複数の振動モードが卓越し易いという特徴がある。そこで本研究では、2 自由度モデルによる基礎的な検討をまず行い、次に空間構造の代表例であるアーチモ

デルを取り扱うこととする。

初期変位のない通常の TMD に関する既往の研究より、衝撃的な地震波により起こる過渡応答に対しては有効に作用しないことが分かっている。また多自由度系は複数のモードが励起されるため、的確に制御モードを制御することは困難である。そこで自由振動応答の理論式から多自由度系のインパルス応答に対する最適初期変位を算出して数値解析結果と比較し、考察を行う。そして、衝撃的な地震力に対する初期変位付与型 TMD の有効性を確認することで、アーチモデルにおける初期変位付与型 TMD の基本的な設計手法を提案することを目的とする。

2. 2 自由度系モデルによる基礎的検討

2.1 TMD の設計パラメータ

TMD は質量 m_T 、減衰係数 c_T 、ばね定数 k_T の 3 要素からなるが、それぞれを無次元化し、質量比 (構造物の質量 m_s に対する TMD の質量 m_T の比)、減衰比 ξ_T (ダッシュポットの減衰係数) 同調比 γ (構造物の固有円振動数 ω_s に対する TMD の固有円振動数 ω_T の比) をパラメータとする。

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

TMD に初期変位を付与したときの最適なパラメータは既往の研究¹⁾より以下のように表すことができる。

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

2.2 自由振動応答理論解と初期変位解放条件式

N 自由度系の自由振動運動方程式を状態方程式に変換し、固有ベクトルの直交性を利用することで²⁾、自由振動応答理論解は以下のように表すことができる。

$$\mathbf{u}(t) = \sum_{n=1}^N e^{-\xi_n \omega_n t} [\boldsymbol{\beta}_n \cos \omega_{nD} t - \boldsymbol{\gamma}_n \sin \omega_{nD} t] \quad (3)$$

$$\boldsymbol{\beta}_n = 2\text{Re}[B_n \boldsymbol{\psi}_n e^{\lambda_n t}], \boldsymbol{\gamma}_n = 2\text{Im}[B_n \boldsymbol{\psi}_n e^{\lambda_n t}] \quad (4)$$

$$B_n = \frac{\boldsymbol{\kappa}_n^T \mathbf{a} \dot{\mathbf{u}}(0)}{\boldsymbol{\kappa}_n^T \mathbf{a} \boldsymbol{\kappa}_n}, \mathbf{a} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{m} \\ \mathbf{m} & \mathbf{c} \end{bmatrix}, \boldsymbol{\kappa}_n = \begin{Bmatrix} \lambda_n \boldsymbol{\psi}_n \\ \boldsymbol{\psi}_n \end{Bmatrix} \quad (5)$$

式中で、 $\omega_n, \omega_{nD}, \xi_n, \lambda_n$ はそれぞれ n 次モードの非減衰固有円振動数、減衰固有円振動数、モード減衰比および固有値である。 $\boldsymbol{\psi}_n, \lambda_n \boldsymbol{\psi}_n$ はそれぞれ各固有値に対応するモーダル変位とモーダル速度を示し、 $\dot{\mathbf{u}}(0)$ は初期速度、初期変位に関する初期条件ベクトルを表す。マトリックス \mathbf{a} は、質量と減衰定数から成る行列である。(4) 式中における $\text{Re}[], \text{Im}[]$ は、それぞれの項の実数値または虚数値を表すものとする。

(3)式で 1 次モードの応答が 0 となるためには、(5) 式を用いて、 $B_1 = 0$ すなわち $\boldsymbol{\kappa}_1^T \mathbf{a} \dot{\mathbf{u}}(0) = 0$ を満たすことが十分条件になる。速度と変位に関する成分に分けて、表示すると初期変位解放条件式は以下ようになる³⁾。

$$\left\{ \lambda_1 \boldsymbol{\psi}_1 \quad \boldsymbol{\psi}_1 \right\} \mathbf{a} \begin{Bmatrix} \dot{\mathbf{u}}(0) \\ \mathbf{u}(0) \end{Bmatrix} = 0 \quad (6)$$

(6)式の物理的意味は、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変位を与えた場合に、1 次モードの応答が 0 になるということである。なお、一般粘性減衰の系における固有ベクトルは一般に虚部を含む複素数になるため、上式で得られる TMD の初期変位も複素数になる。

2.3 解析モデル

構造物と TMD 系の解析モデルを図 1 示す。解析モデルは 2 質点系モデルとし、構造物の質量、バネ定数、減衰比は、それぞれ 1.0(kg), 322.2(N/m), 0.02 とした。

バネ定数は、空間構造の 1 次モード固有周期 T とスパン L の間には式(7)で示す関係⁴⁾があることから、50m スパンのときの値を採用した。初期変位付与型 TMD の質量比は 2% とし、TMD の同調比と減衰比に関しては、構造物の減衰を考慮した最適設計式¹⁾から算出した値(0.9787, 0.2517)を用いた。TMD 減衰比とモード減衰比の関係を図 2 に示す。同調比が 0 になる特異点近傍(図 2 における○)では固有円振動数比は大きく変化するが、それ以外の点では主振動系の減衰がないときと同様の性状を示すことが分かっている。本解析モデルでは主振動系に 2% の減衰を考慮しているため、1 次モードと 2 次モードの分岐点は A' 点となり、主振動系の減衰がない時の分岐点 A とは異なる値を示す。

$$T = 0.007L \quad (7)$$

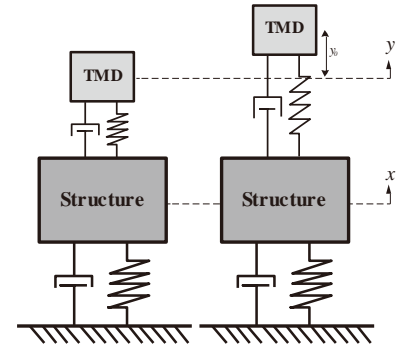


図 1 解析モデル

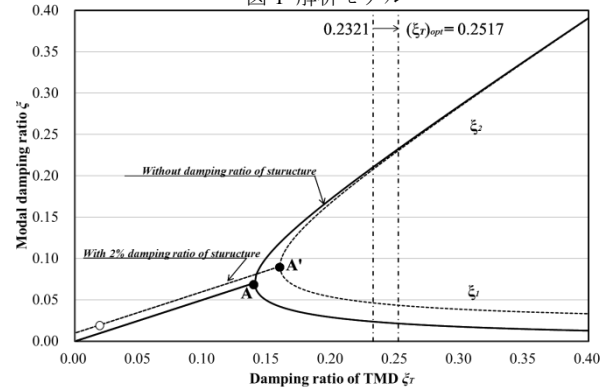


図 2 TMD の減衰比とモード減衰比の関係

2.4.1 自由振動に対する検討

構造物の初期速度 \dot{x}_0 を 1.0m/sec、構造物の初期変位である x_0 を 0 とすると、式(6)で 1 次モードの応答を 0 にするような TMD 初期変位は $y_0 = -1.185 - 0.006112i$ (m) となり、虚数を含む形で表される。既往の摂動解を用いて求めた最適設計式は以下の式(8)で表される¹⁾。

$$y_0 = -1.13 \times \frac{(\xi_T + \delta)}{\mu \omega_a} \dot{x}_0 \quad (\delta = \sqrt{\xi_T^2 - \mu}) \quad (8)$$

式中の ω_a は構造物と TMD の固有円振動数の平均値で、式(8)の初期変位の設計式を用いた初期変位の値は -1.463m である。

初期変位のない TMD を用いた場合、式(8)により求めた初期変位を用いた場合 ($\alpha = -1.13$)、(6)式から得られた虚数を除く実数部分のみ初期変位を用いた場合 (only real number)、(6)式から得られた複素数の初期変位を用いた場合 (complex number) の構造物のインパルス応答を図 3 で比較する。

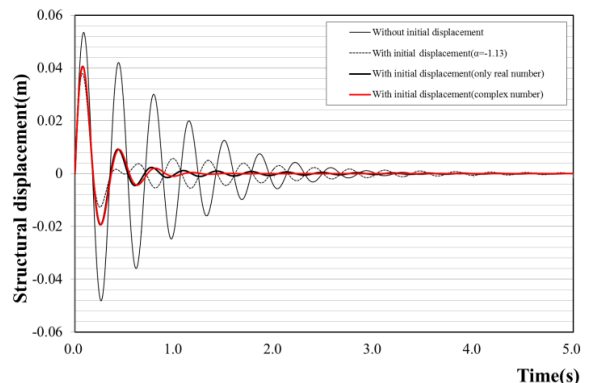


図 3 構造物のインパルス応答

複素数の TMD の初期変位を用いた場合、3 秒付近で応答がほぼ 0 となっている。時刻歴応答曲線から得られた固有円振動数にはほぼ等しく、2 次モード単体で振動していることが確認できる。しかし、複素数の初期変位は現実では存在しない。また、実数部分のみ用いた場合を確認すると 1 次モードが残留しているのが分かる。複素数の TMD の初期変位を用いた場合と実数部分のみ用いた場合の時刻歴応答変位はほとんど変化せず、ともに優れた応答低減効果が確認できる。

TMD 初期変位の解放時における構造物の初期条件を $\dot{x}_0 \neq 0, x_0 = 0$ から変更する、つまり初期変位解放時の構造物の振動の位相を変えた場合における式(6)から得られる TMD 初期変位を検討する。初期変位の解放時刻はすべて $t = 0$ である。主振動系のポテンシャルエネルギーが一定の条件のもとで、構造物の初期条件を設定した。初期条件として構造物が速度のみ有する場合(i),変位のみ有する場合(ii),速度及び変位を有する場合(iii),(iv)とすると式(6)から得られる TMD 初期変位の複素平面上で整理すると図 4 のように表される。なお Case(i)の場合の時刻歴応答は図 3 と対応している。

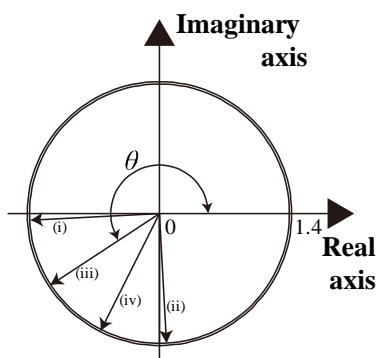


図 4 TMD 初期変位の複素平面へのプロット

表 1 構造物の初期条件と TMD 初期変位の絶対値及び偏角

Case	Structure (initial state)		TMD	
	初期速度 \dot{x}_0 (m)	初期変位 x_0 (m/sec)	絶対値	偏角 θ (deg.)
(i)	1.0	0	1.407	183.0
(ii)	0	0.05527	1.425	273.2
(iii)	0.8660	0.02786	1.412	213.3
(iv)	0.50	0.04825	1.430	243.4

TMD 初期変位に関して、複素数の絶対値である半径 r がほぼ等しい円弧状にあり、偏角 θ が異なる。また表 1 に各解析ケースにおける構造物の初期条件、TMD 初期変位の絶対値と偏角をまとめる。また、偏角は初期条件により異なることが分かった。Case(iii)のインパルス応答を図 5 に示す。図 5 を確認すると実数部分のみと複素数を用いた場合では応答に大きな差が生じることが分かった。構造物の初期条件が他の場合においても、同様の傾向を示すこと確認している。式(6)

で求めた TMD 初期変位の実数部分のみ用いた場合、複素平面上の実軸から離れるに連れて制振効果も低下することを確認した。これらの結果から、式(6)で求めた TMD 初期変位の実数部分のみ使った場合において、最も有効に作用する構造物の初期条件は Case(i)である速度のみを有する場合であることが確認できた。このように初期変位付与型 TMD を 1 個用いて初期変位解放条件式を用いる場合、構造物の解放条件は限定される。

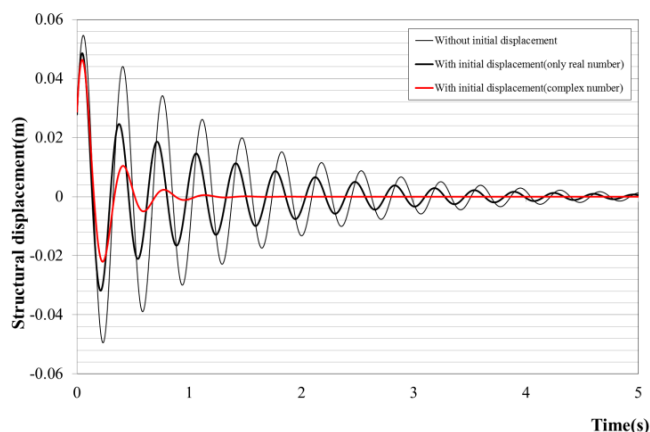


図 5 Case(iii)におけるインパルス応答

2.4.2 地震動による強制振動

次に 2 自由度系モデルを用いて、地震力に対する効果を確認する。岩手県大船渡市において観測された 2011 年東北地方太平洋沖地震と JMA KOBE NS 波において、通常の TMD が有効に作用しない応答が表れることを確認したため、この 2 波の結果を述べる。

TMD の初期変位はインパルス応答でも確認したように、構造物の応答速度が極大、すなわち構造物の応答変位が 0 近傍で解放したとき最も応答低減効果が高かったため、解放点は構造物の応答変位が 0 の点で解放するものとする。初期変位の算定は初期変位解放条件式から求めた式(6)の実数部分のみ用いて、係数 1.13 を掛けた¹⁾。初期変位を付与するための時間はこの解析において考慮していない。

また、初期変位の解放点以降の構造物の応答は以下の①②の応答の和になると考えられる。

①解放点においてインパルス外力が作用したと置換したときの応答

②初期変位の解放点以降の外力が作用したときの応答

初期変位解放条件式を用いる場合は①の応答を制御する初期変位を算出することを意味する。解放点での構造物の初期条件を入力しインパルス応答に置換している。初期変位解放のイメージを図 6 に示す。図中の R は初期変位の解放点を示す。初期変位を解放していない時は初期変位を付与していない通常の TMD と同じ制振性能である。

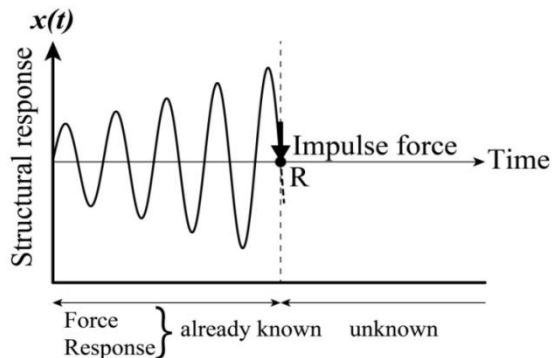


図 6 初期変位解放のイメージ

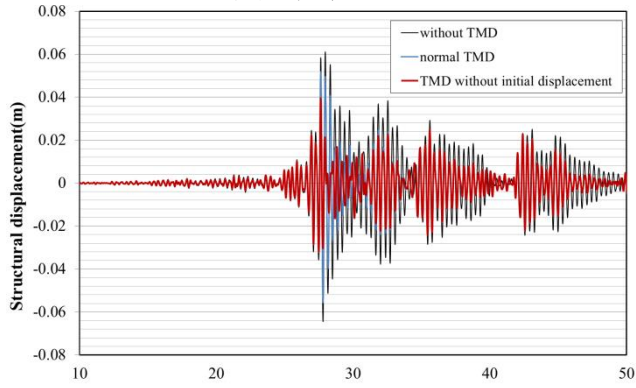


図 7 2011 年東北地方太平洋沖地震

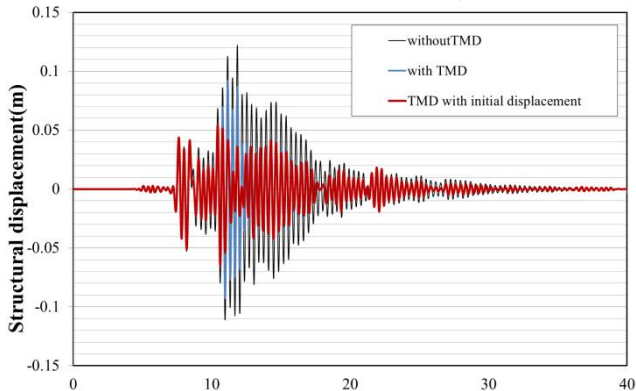


図 8 JMA KOBE NS 波

図 7 に 2011 年東北地方太平洋沖地震を受けたときの TMD なしの場合、通常の TMD の場合、初期変位付与型 TMD の場合の構造物の時刻歴応答変位を示す。閾値としては構造物の最大応答速度の半分 (0.61m/s) とした。初期変位の解放回数は 2 回であり、その大きさは 1.0m 程度であった。

図 8 に JMA KOBE NS 波を受けたときの TMD なしの場合と初期変位を与えた場合の構造物の時刻歴応答変位を示す。閾値としては構造物の最大応答速度の半分 (0.75m/s) とした。初期変位の解放回数は 2 回であり、その大きさは 1.661m, 1.097m であった。TMD 無しの場合に構造物単体が JMA KOBE NS 波を受けた時の最大応答変位は 0.1221m であるのに対し、初期変位付与型 TMD の構造物の最大応答変位は 0.0548m であり、構造物の応答変位をよく抑えていることが分かる。

初期変位を解放する閾値を TMD なしの場合の構造物の最大応答速度の半分にすることで最大応答を効果的に低減できることが分かった。

3. アーチモデルによる検討

3.1 解析モデル

本研究で用いる解析モデルは、図 9 のようなスパン 40m, ライズ 7.0m, 曲率半径が約 32m の 2 次元アーチモデルである。境界は両端部をピン支持とし、接合部は全て剛接合である。ヤング係数 $2.05 \times 10^{11} (\text{N/m}^2)$, ポアソン比 0.3, 質量密度 $7,850 (\text{kg/m}^3)$ を材料定数とする。

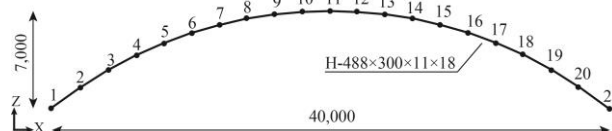


図 9 アーチモデル

3.2 アーチモデルの基本振動性状

線形固有値解析を行い、対象モデルの基本的な振動性状を確認する。表 2 に X 方向の有効質量比上位 3 位の固有振動数を示し、図 10 に 1 次モードと 9 次モードの振動モード形状を示す。

表 2 固有振動数と有効質量比

モード次数	固有振動数(Hz)	有効質量比(%)
1	3.188	34.94
3	13.71	6.626
9	63.79	45.61



図 10 モード形状

3.3 TMD の配置方法

TMD の制御モードは水平方向の有効質量比を考慮して、1 次モードとした。TMD の設置位置は制御モードの腹の位置である節点 6 であり、図 11 のように設置した。なお TMD の作動方向は Z 方向とした。TMD 1 個の場合の質量は TMD 設置位置である節点 6 における等価質量に対して 2.0% となるようにした。同調比と減衰比は(1)式を用いた。TMD 2 個の場合は TMD1 個の場合の質量を 2 分割し、減衰係数はそれぞれに対し、(2)式を用いた。同調比はそれぞれ 0.8, 1.2 とする。表 3 に各 TMD の設計パラメータを示す。

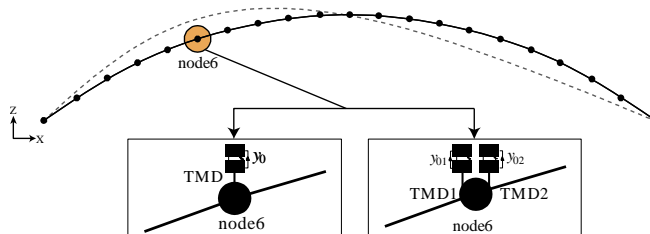


図 11 TMD の設置方法

表 3 TMD の設計パラメータ

	質量(kg)	ばね剛性(N/m)	減衰係数(N-sec/m)
TMD	79.98	30845.6	729.0
TMD1	39.99	10269.1	297.4
TMD2	39.99	23105.5	446.2

3.4 TMD 初期変位の算定方法

TMD 1 個の場合(6)式を満たすためには初期変位解放条件式を展開し、 $\{\lambda_i \psi_i \quad \psi_i\} \mathbf{a}$ の 1×78 のマトリクスの成分を $\psi_i a^{(i)}$ ($i=1 \sim 78$) とする. TMD の初期変位を y_0 とし、アーチモデルの各節点の X 方向と Z 方向の速度および変位をそれぞれ $\dot{x}_{j+1}, \dot{z}_{j+1}, x_{j+1}, z_{j+1}$ ($j=1 \sim 19$) とすると求める初期変位は以下ようになる.

$$y_0 = -\sum_{j=1}^{19} \{\psi_i a^{(2j-1)} \dot{x}_{j+1} + \psi_i a^{(2j)} \dot{z}_{j+1} + \psi_i a^{(2j+38)} x_{j+1} + \psi_i a^{(2j+39)} z_{j+1}\} / \psi_i a^{(78)} \quad (9)$$

$\psi_i a^{(i)}$ は一般的に複素数となるため式(9)から求められる TMD の初期変位も複素数となる. TMD1 個の場合は構造物の応答速度が極大の条件で、求めた初期変位の実数部分のみ用いる.

TMD が複数個用いる場合、(6)式の中の変数の数を増やすことで、TMD1 個のときは固定されていた複素平面上の初期変位の偏角を操作することが可能になる. TMD を 2 個用いた場合、初期変位解放条件式 $\{\lambda_i \psi_i \quad \psi_i\} \mathbf{a}$ の 1×80 のマトリクスの成分を $\psi_i a^{(i)}$ ($i=1 \sim 80$) とし、2 つの TMD のそれぞれの初期変位を y_{01}, y_{02} とすると以下の式を満足する必要がある.

$$\sum_{j=1}^{19} \{\psi_i a^{(2j-1)} \dot{x}_{j+1} + \psi_i a^{(2j)} \dot{z}_{j+1} + \psi_i a^{(2j+39)} x_{j+1} + \psi_i a^{(2j+40)} z_{j+1}\} + \psi_i a^{(79)} y_{01} + \psi_i a^{(80)} y_{02} = 0 \quad (10)$$

上式の初期変位の項である y_{01}, y_{02} 以外の項を A とおき、実部と虚部に分けると、構造物の各節点の応答変位、応答速度と TMD1, TMD2 の初期変位は実数であるから、以下の 2 式が導ける.

$$Real(A) + Real(\psi_i a^{(79)}) y_{01} + Real(\psi_i a^{(80)}) y_{02} = 0 \quad (11)$$

$$Imag(A) + Imag(\psi_i a^{(79)}) y_{01} + Imag(\psi_i a^{(80)}) y_{02} = 0 \quad (12)$$

(11), (12) を連立して解くと、 y_{01}, y_{02} は次のようになる.

$$y_{01} = -\frac{Real(A) \times Imag(\psi_i a^{(80)}) - Real(\psi_i a^{(80)}) \times Imag(A)}{Real(\psi_i a^{(79)}) \times Imag(\psi_i a^{(80)}) - Real(\psi_i a^{(80)}) \times Imag(\psi_i a^{(79)})} \quad (13)$$

$$y_{02} = -\frac{Real(A) \times Imag(\psi_i a^{(79)}) - Real(\psi_i a^{(79)}) \times Imag(A)}{Real(\psi_i a^{(80)}) \times Imag(\psi_i a^{(79)}) - Real(\psi_i a^{(79)}) \times Imag(\psi_i a^{(80)})} \quad (14)$$

TMD を 2 個設置し、初期変位解放条件式を用いた場合、初期条件が構造物の変位と速度の両方を有する場合でも、TMD 初期変位を実数で与えることが可能になる.

3.5 インパルス応答に対する制振効果の比較

インパルス外力が作用した際の制振効果を確認するために時刻歴応答解析を行った. 解析手法は直接過渡応答解析を用い、積分時間刻みを 0.001 秒とした. インパルスをアーチ基礎部に対して、0.0 秒から 0.01 秒に X 方向に与え、TMD 設置位置の節点 6 における TMD なしの場合の最大応答速度が 1.0m/sec になるように大きさを調整して、 8.0×10^4 (N) とした. なお構造物の減衰は考慮していない. TMD 初期変位の解放は節点 6 の Z 方向の応答速度が最初に極大になる点で解放した. 図 12 に各場合における節点 6 の Z 方向時刻歴応答変位を示す.

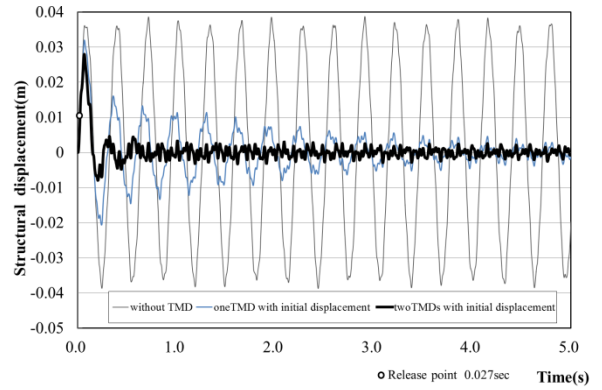


図 12 時刻歴応答変位

TMD を 2 個用いて、初期変位解放条件式を用いることにより TMD を 1 個用いた場合よりも効果的に応答低減効果を発揮していることが分かる. 2 自由度系モデル同様に TMD1 個では構造物の初期速度と初期変位によって、TMD の初期変位の効果が低下することを確認したが、アーチモデルにおいても同様であることが確認できる. 図 13 に各応答のフーリエスペクトルを示す. 図 13 から 1 次モードが有効に抑えられていることがわかる.

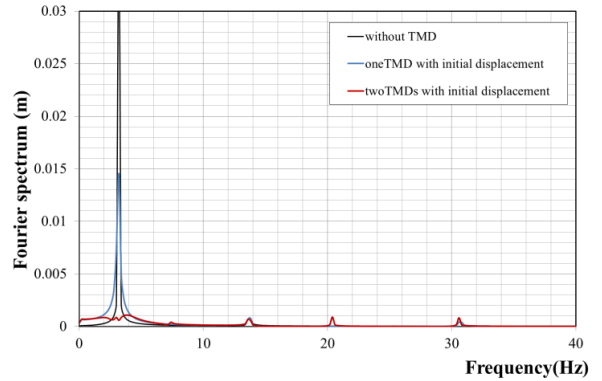


図 13 フーリエスペクトル

TMD を 2 個用いた場合、偏角による複素数の影響を受けず、TMD 初期変位を実数値で与えることができる. そのため TMD1 個の場合、初期変位の解放条件は応答速度が極大の点に限定されたが、TMD を 2 個用いることで、初期変位の解放点は限定されることなく、どの時刻においても解放することができる. 節点 6 の応答変位が極大になる点で解放した場合の時刻歴応答変位を 図 14 に示す. 解放時刻によらず初期変位付与型 TMD の優れた制振効果が確認できる.

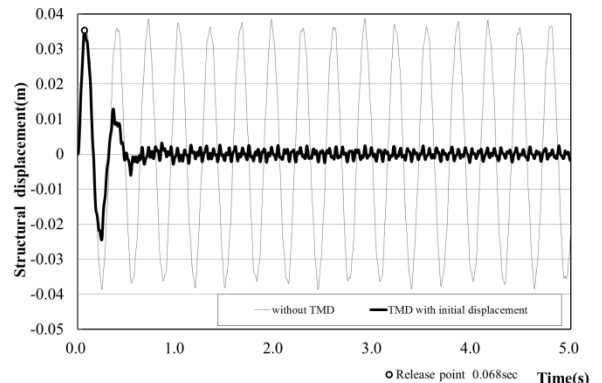


図 14 解放点を変更したときの時刻歴応答変位

3.6 地震波に対する制振効果

地震力が作用する時には応答速度が極大の点で初期変位を解放し検討を行った。地震波は2自由度系モデルと同様とする。入力方向は水平方向としたため制御モードは1次モードである。TMDの配置方法は3.3節と同様とする。図15,16に2011年東北地方太平洋沖地震とJMA KOBE NS波を受けたときの節点6におけるZ方向の時刻歴応答変位を示す。

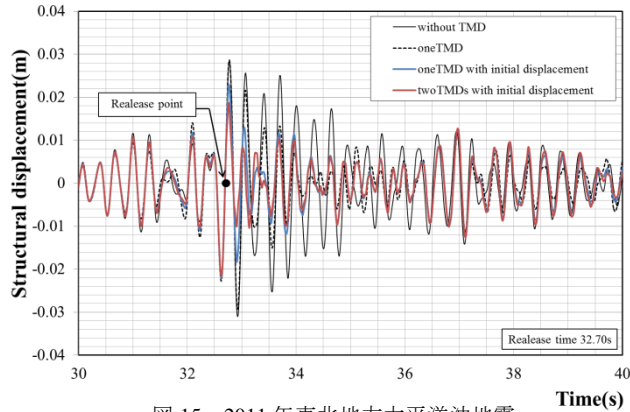


図15 2011年東北地方太平洋沖地震

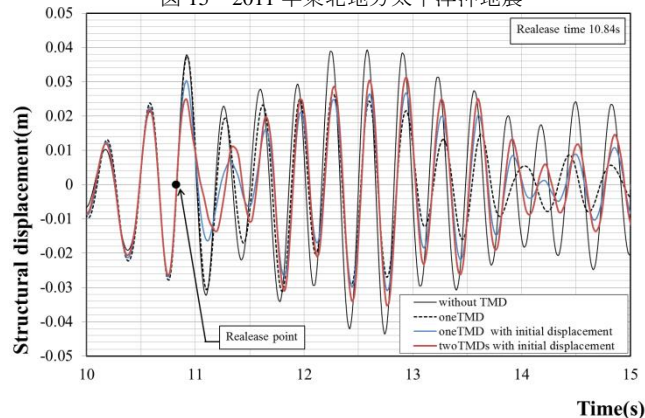


図16 JMA KOBE NS 波

初期変位の解放点以後の半周期の応答で初期変位のないTMDは有効に作用していないことがわかる。初期変位を与えた場合TMDの個数にかかわらず、初期変位を与えていないTMD設置時の最大応答を低減していることが確認できる。

4. アーチモデルによる打撃試験

4.1 実験概要

試験体として、スパン150cm、ライズ25cm、幅15cm、厚さ0.23cmの鋼板アーチを使用する。鋼板の両端はピン支持し、架台に固定した。試験体の図面及び写真を図17と写真1に示す。質量比は、TMD設置点における構造物の等価質量の7.96%とし、TMDの減衰比はTMD単体の自由振動実験より求めた。初期変位の算定には、(6)式を用いて26mmとした。

加振力はインパルスハンマーにより、写真1のアーチ法線方向から与える。計測は制御モードの1次モードの腹の位置に鉛直方向にレーザー変位計を設置し、アーチ架台に対する鉛直方向変位を計測した。TMDは1次モード腹の位置に設置した。

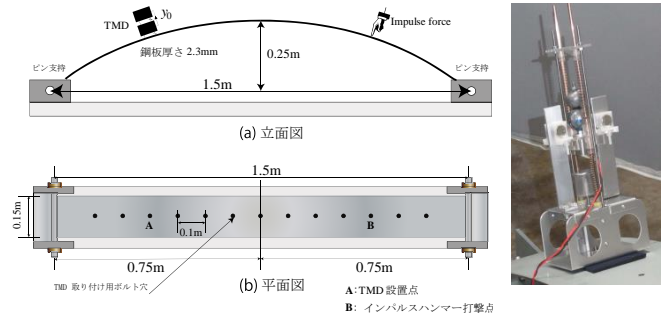


図17 アーチ試験体

写真1 TMD模型

4.2 実験結果

図18に実験結果を示す。初期変位のない通常のTMD、初期変位26mmのTMD共に制振効果を発揮している。これは実験のTMD模型の錘が微小振幅では、応答初期以降、振動せず制振効果を発揮できていないことが確認できる。アーチ法線方向とモード振動方向の角度差による影響などが原因として考えられる。

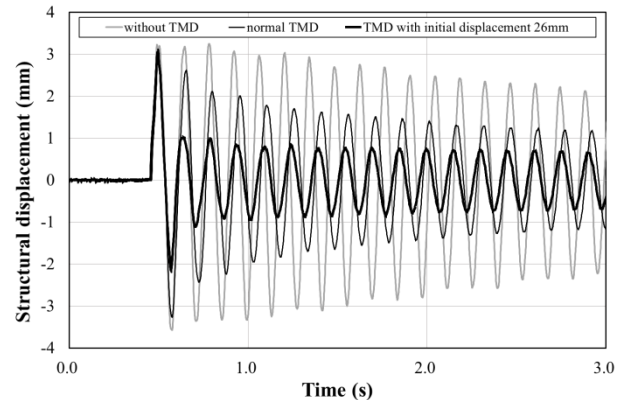


図18 実験結果

5. 結論

TMD1個で初期変位解放条件式から得られた初期変位の実数部分を用いて、効果的に応答を低減するには構造物の初期条件が限定されることが分かった。

TMDを2個用いて、初期変位解放条件式を用いると制御モードを的確に抑える初期変位を実数値で求めることができた。さらに初期変位の解放点は構造物の初期条件に依らず、効果的に応答を低減することを確認した。初期変位解放条件式を用いて、初期変位の大きさを算定するには少なくとも2個以上の初期変位を付与したTMDが必要となる。

地震力が作用する場合でも初期変位付与型TMDの有効性を確かめることができた。

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の設計式の提案，日本建築学会構造系論文集第78巻第688号，1071-1079, 2013.6
- 2) Anil K.Chopra: Dynamics of Structures, Theory and Applications to Earthquake Engineering, Fourth Edition, Chap.14 Analysis of Nonclassically Damped Linear Systems, Prentice Hall, 2011.12
- 3) 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 79(703), 1247-1257, 2014
- 4) 日本建築学会編：空間構造の動的挙動と耐震設計，丸善株式会社，2006年3月

討議

討議 [谷口与史也 教授]

TMD の初期変位解放の閾値を構造物の応答速度の半分というのは一般性があるのか。

回答

すべての地震動に対して検討を行っていないので、一般性があるとはいえません。構造物の応答速度が初期変位と関係することが既往の摂動解の設計式を確認すると分かります。また、初期変位解放条件式を利用したときの応答速度が極大になる点(変位が 0)で解放したとき効果的に応答を低減できるので、閾値として応答速度を利用しました。閾値の最適値、また一般性のある地震波に対する解放条件は今後の検討課題です。

討議 [谷口徹郎 准教授]

TMD の初期変位が複素数のときの虚数部分の物理的な意味は何なのか

回答

位相差を表しています。オイラーの公式を利用すると虚数部分は三角関数を表します。虚数単位 i をかけることは位相を $\pi/2$ 進ませることと等しくなっています。

討議 [藤本益美 准教授]

空間構造は水平入力に対し、上下応答が生じやすいと背景にあるが、それは空間構造の一部ではないのか。

回答

一部です。すべての空間構造にそのような性質があるわけではありません。重層構造とは違う性質があるということを重視し、背景として記述しました。

討議 [山口隆司 教授]

TMD を 2 つ設置した場合、2 つの初期変位は共役の状態なのか。

回答

共役な状態を作り出し、虚数部分がなくなるような TMD 初期変位を与えています。

討議 [山田卓 講師]

2次元だけでなく、3次元においても適用可能なのか

回答

モーダル速度・変位、初期条件の項数は増えますが、対象となるモードと TMD の各パラメータ及び構造物の初期条件が分かれば、初期変位解放条件式から TMD 初期変位を算出できます。3次元になれば制御モードと TMD 設置位置の検討などはより複雑になるため、

今回は 2次元アーチを使用し検討を行いました。

討議 [谷口徹郎 准教授]

TMD の個数にかかわらず、初期変位の解放点は一緒なのか。

回答

TMD 初期変位の解答点は一緒です。インパルス外力を受けた際の節点 6 における応答速度が極大になる点は TMD1 個設置しても 2 個設置しても変わりませんでした。インパルス初期で TMD は共振応答低減効果が発揮しないことも関係しています。