

アーチモデルにおける初期変位付与型 TMD による振動制御に関する研究

STUDY ON VIBRATION CONTROL USING TUNED MASS DAMPER WITH INITIAL DISPLACEMENT FOR ARCH MODEL

建築構造学分野 光藤 龍郎

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。そのため、本研究は制御モードを考慮した初期変位の算出方法を示し、その有効性を検証することで、多自由度系におけるインパルス外力作用時に制御モードを的確に制御できる初期変位の算出方法を提案した。また、本研究ではインパルス外力だけでなく、地震力に対する初期変位付与型 TMD の有効性も検証した。

Because Tuned Mass Damper(TMD) with initial displacement controls only one vibration mode, it is difficult to calculate the initial displacement of the TMD which controls a target mode accurately for the multi-degree-of-freedom system. In this paper, we have validated a calculation method which takes into consideration of a target mode. As a result, we can propose accurately a calculation method of the optimal initial displacement which can control a target mode for the multi-degree-of-freedom system 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が提案された。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¹⁾が提案された。しかし、多自由度系は様々な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。そこで本研究では空間構造の代表例とし、アーチモデルを取り扱うこととする。

通常の TMD に関する既往の研究より、「TMD の設置によるモード形状の変化」という点から制御モードの腹に分散配置させることで構造物全体での制振効果が高くなるという知見が得られている。本研究でも「TMD の設置によるモード形状の変化」に着目して、初期変位付与型 TMD の配置方法の違いによる制振効果を比較し、「TMD の設置によるモード形状の変化」と TMD 設置個数による制振効果の関係を明らかにする。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難しいと考えられる。そこで速度応答をモード分解する方法を提案し、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数値解析結果と比較し、考察を行う。そして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 の基本的設計手法を構築することを目的とする。

2.解析モデル

2.1 アーチモデルの概要

本研究で用いる解析モデルは、図 1 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。

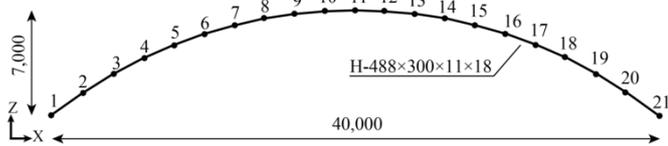


図 1:アーチモデル

2.2 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 1 に X、Z 方向の有効質量比上位 3 位の固有振動数を示し、図 2 に振動モード形状を X、Z 方向それぞれ示す。

表 1: 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(%)	
		X 方向	Z 方向
1	3.188	31.94	0.000
2	7.258	0.000	1.718
3	13.71	6.626	0.000
4	20.39	0.000	16.35
5	25.32	0.000	69.69
9	63.79	45.61	0.000

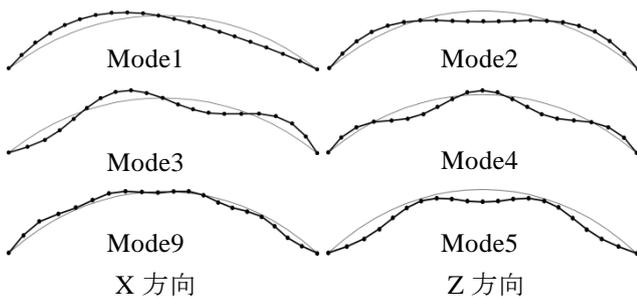


図 2:振動モード形状

3. TMD の配置方法の違いによる制振効果の比較

3.1 集中配置と分散配置での振動モード形状の比較

TMD を集中配置 (1 個) させたときと分散配置 (2 個) させたときの振動モードの形状を比較する。水平、鉛直方向それぞれの場合で考え有効質量比を考慮して、水平方向の制御モードは 1 次モード、鉛直方向の制御モードは 5 次モードとした。TMD の設置位置は制御モードの腹であり、図 3、4 のように設置した。なお TMD の作動方向は Z 方向とした。TMD の質量比は 2.0% とし、TMD 質量は制御モードの TMD 設置位置における等価質量に対して 2.0% となるようにした。同調比には、自由振動最適パラメータである式(1)、減衰比には式(2)を用いた。

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

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

表 2 に各モードを制御対象としたときの TMD 設計パラメータを集中配置、分散配置それぞれ場合で示す。

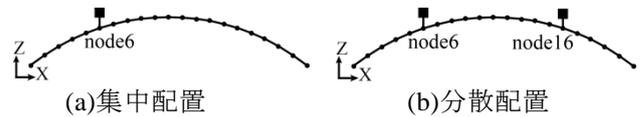


図 3: 1 次モード制御対象時の TMD 設置位置

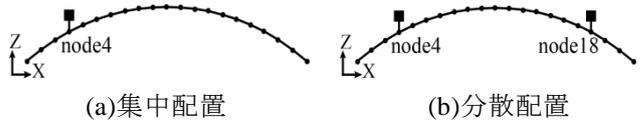


図 4: 5 次モード制御対象時の TMD 設置位置

表 2: TMD の設計パラメータ

(a) 1 次モード制御のとき

	質量 (kg)	ばね剛性 (N/m)	減衰定数 (N-sec/m)
集中配置	79.98	30845.6	729.0
分散配置	39.99	15422.8	364.5

(b) 5 次モード制御のとき

	質量 (kg)	ばね剛性 (N/m)	減衰定数 (N-sec/m)
集中配置	67.74	1647741.0	4904
分散配置	33.87	823870.5	2452

図 5,6 に各制御モードに対する TMD を集中配置、分散配置させたときの振動モード形状図を示す。1 次モードの場合は配置の仕方により変化はほとんど無いが、5 次モードの場合は配置の仕方により、若干の変化が見られる。

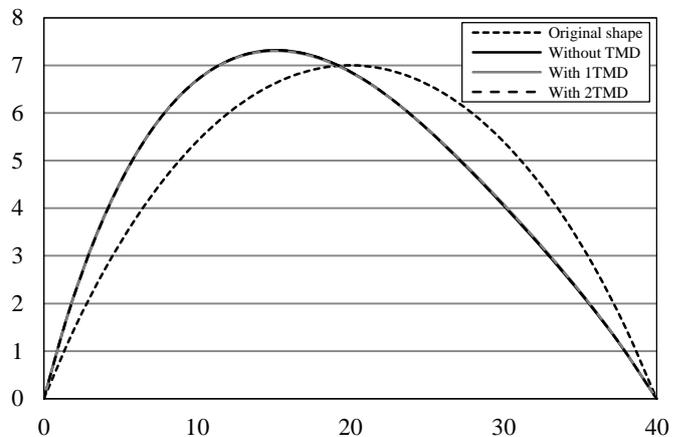


図 5: 1 次モードの場合の振動モード形状の比較

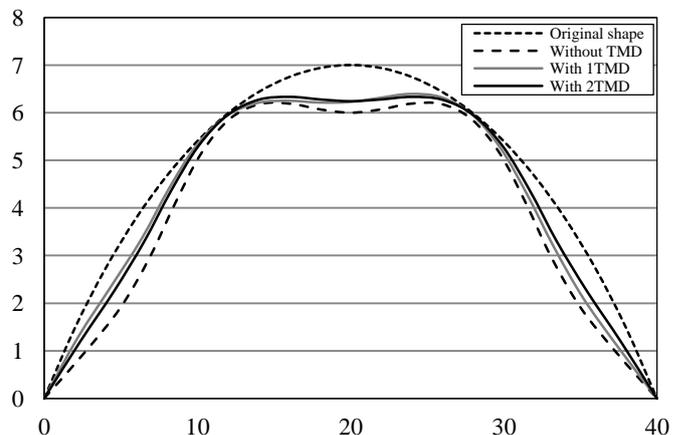


図 6: 5 次モードの場合の振動モード形状の比較

3.2 インパルス応答解析による制振効果の比較

インパルス外力が作用した場合の配置方法の違いによる制振効果を比較するため時刻歴応答解析を行う。解析手法は直接過渡応答解析とする。X 方向は 0.00 秒から 0.01 秒で $80(\text{m/s}^2)$ の、Z 方向は 0.00 秒から 0.001 秒で $1540(\text{m/s}^2)$ のインパルス加速度を基礎部に与えた。なお構造物の減衰は考慮していない。初期変位の算出は式(3)の係数 α を -1.13 にして求めた。

$$y_0 = \alpha \times \frac{(\xi_T + \gamma)}{\mu\omega_a} \dot{x}_0 \quad (3)$$

\dot{x}_0 : TMD 設置位置での応答初期速度

ω_a : 主振動系と TMD の固有円振動数の平均値

式(3)より 1 次モード制御用の初期変位付与型 TMD を集中配置した場合の初期変位は $y_0 = -1.042\text{m}$ 、分散配置の場合は $y_0 = -1.032\text{m}$ であった。5 次モード制御用の初期変位付与型 TMD を集中配置した場合の初期変位は $y_0 = 0.1854\text{m}$ 、分散配置の場合は $y_0 = 0.1824\text{m}$ であった。この初期変位は TMD の設置点の応答速度をそのまま用いて求めた。図 7 に 1 次モード制御時に初期変位付与型 TMD を集中配置させたときの TMD 設置点の時刻歴応答変位を示す。同様に図 8,9 に 5 次モード制御時に初期変位付与型 TMD を集中配置、分散配置させたときの TMD 設置点の時刻歴応答変位を示す。なお縦軸は TMD 無しときのインパルス直後の最大応答値で、横軸は $\omega_a/2\pi$ で無次元化している。

図 7 より 1 次モードを制御する場合は初期変位付与型 TMD を用いることでインパルス応答の初期でも応答を抑えることができていることが確認できる。また分散配置のときも同様の制振効果が見られた。

図 8,9 より 5 次モードを制御する場合もインパルス応答の初期に応答を低減させることができていることが確認できる。また分散配置の場合は、応答変位の中盤からうなりが見られないが、集中配置の場合はいうなりが見られる。この理由として、図 10 に示す図 8 の時刻歴応答曲線から得られるフーリエスペクトルから、元々対称形であったモード形状に TMD を集中配置させることでその対称形が崩れてしまい対称形のときには現れない振動モード(1 次モードと 3 次モード)を誘発してしまうため、それらのモードの重ね合わせの結果図 8 のようにうなりを生じた不規則な応答を示したのであると考えられる。このことから、初期変位付与型 TMD の設置においては、TMD 設置によるモード形状の変化に注意する必要があることが分かった。

また高次の振動モードはインパルスの加力時間によっては制御できない場合があるため、地震力作用時に制御モードを決定する際は注意する必要がある。

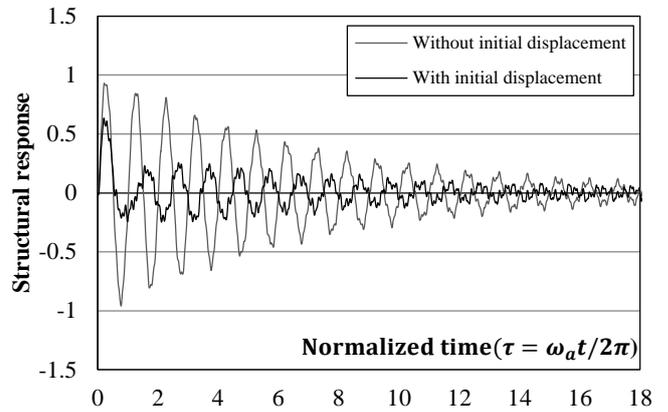


図 7: 集中配置のときのインパルス応答(1 次モード)

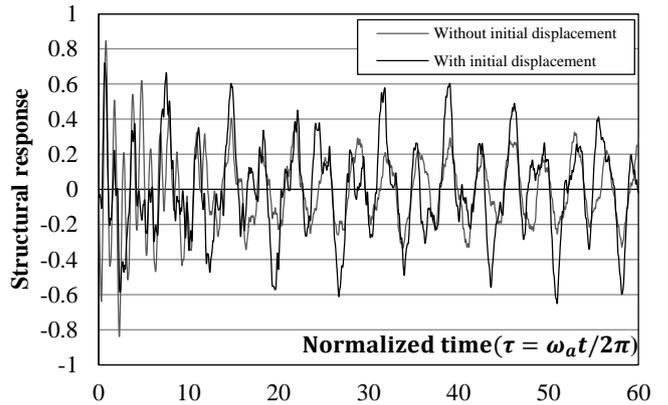


図 8: 集中配置のときのインパルス応答(5 次モード)

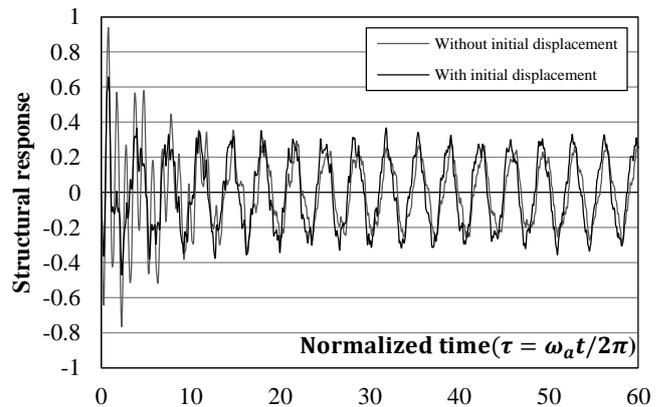


図 9: 分散配置のときのインパルス応答(5 次モード)

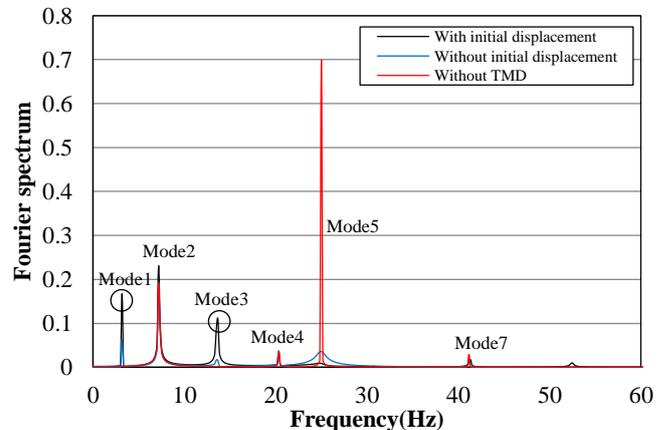


図 10: 図 8 の時刻歴応答曲線から得られるフーリエスペクトル

4. 制御モードを考慮した初期変位の算出法と自由振動 応答の理論解との比較

4.1 応答速度のモード成分分解による初期変位の算出

前節では初期変位の算出にあたり、TMD 設置点の応答速度をそのまま用いて初期変位を算出したが、多自由度系は複数の振動モードが励起されるため、制御モードを的確に制御することは難しい。この節では TMD の設置点から得られる応答速度から制御モードの応答速度成分を求める方法を示し、それを用いて求めた初期変位を用いたときの制振効果を確認する。

図 11 に TMD が無いときの時刻歴応答曲線から得られる水平、鉛直方向加振時の TMD 設置点である node6, node4 の応答速度のフーリエスペクトルを示す。図 11 のスペクトルからも制御モード以外の振動モード成分が含まれていることが確認できる。

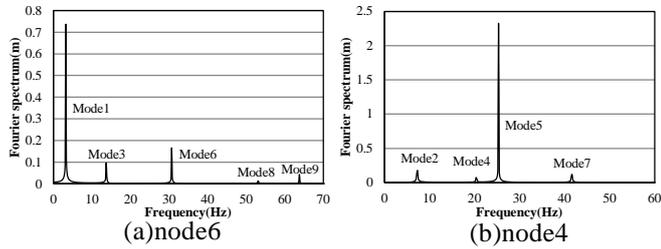


図 11: TMD を設置していないときの応答速フーリエ
スペクトル

水平方向加振の場合、1次、3次、6次、8次、9次の5つのモード成分が含まれているため、この5つのモードを用いて応答速度のモード成分分解を試みる。仮に点 A、点 B、点 C、点 D、点 E を選択し、各点の1次の Z 方向のモード成分を $z_A^1, z_B^1, z_C^1, z_D^1, z_E^1$ とすると1次モードで振動しているときの各点の Z 方向の速度は $\alpha z_A^1, \alpha z_B^1, \alpha z_C^1, \alpha z_D^1, \alpha z_E^1$ (α は係数) となる。ある時刻における点 A の Z 方向の応答速度を \dot{Z}_A と表すと以下のように表すことができる。ここで近似式となっているのは、厳密にはここで対象とした5つ以外のモードの成分が含まれているためである。

$$\begin{aligned}\dot{Z}_A &\cong \alpha z_A^1 + \beta z_A^3 + \gamma z_A^6 + \delta z_A^8 + \varepsilon z_A^9 \\ \dot{Z}_B &\cong \alpha z_B^1 + \beta z_B^3 + \gamma z_B^6 + \delta z_B^8 + \varepsilon z_B^9 \\ \dot{Z}_C &\cong \alpha z_C^1 + \beta z_C^3 + \gamma z_C^6 + \delta z_C^8 + \varepsilon z_C^9 \\ \dot{Z}_D &\cong \alpha z_D^1 + \beta z_D^3 + \gamma z_D^6 + \delta z_D^8 + \varepsilon z_D^9 \\ \dot{Z}_E &\cong \alpha z_E^1 + \beta z_E^3 + \gamma z_E^6 + \delta z_E^8 + \varepsilon z_E^9\end{aligned}$$

行列で表すと、

$$\begin{Bmatrix} \dot{Z}_A \\ \dot{Z}_B \\ \dot{Z}_C \\ \dot{Z}_D \\ \dot{Z}_E \end{Bmatrix} \cong \begin{bmatrix} z_A^1 & z_A^3 & z_A^6 & z_A^8 & z_A^9 \\ z_B^1 & z_B^3 & z_B^6 & z_B^8 & z_B^9 \\ z_C^1 & z_C^3 & z_C^6 & z_C^8 & z_C^9 \\ z_D^1 & z_D^3 & z_D^6 & z_D^8 & z_D^9 \\ z_E^1 & z_E^3 & z_E^6 & z_E^8 & z_E^9 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \alpha \\ \beta \\ \gamma \\ \delta \\ \varepsilon \end{Bmatrix} \quad (4)$$

となり係数を求めると式(5)のようになり逆行列を用いて求めることができる。

$$\begin{Bmatrix} \alpha \\ \beta \\ \gamma \\ \delta \\ \varepsilon \end{Bmatrix} \cong \begin{bmatrix} z_A^1 & z_A^3 & z_A^6 & z_A^8 & z_A^9 \\ z_B^1 & z_B^3 & z_B^6 & z_B^8 & z_B^9 \\ z_C^1 & z_C^3 & z_C^6 & z_C^8 & z_C^9 \\ z_D^1 & z_D^3 & z_D^6 & z_D^8 & z_D^9 \\ z_E^1 & z_E^3 & z_E^6 & z_E^8 & z_E^9 \end{bmatrix}^{-1} \begin{Bmatrix} \dot{Z}_A \\ \dot{Z}_B \\ \dot{Z}_C \\ \dot{Z}_D \\ \dot{Z}_E \end{Bmatrix} \quad (5)$$

本モデルでは、点 A、点 B、点 C、点 D、点 E はモードの腹の付近である node5,6,7,15,16 の5節点を選ぶ。インパルス直後における node6 の Z 方向の応答速度が応答初期速度に達するときの5節点の応答速度を用いると係数 $\alpha \sim \varepsilon$ は以下の式(6)のようになる。

$$\begin{Bmatrix} \alpha \\ \beta \\ \gamma \\ \delta \\ \varepsilon \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 65.71 \\ 1009.41 \\ -170.19 \\ 487.29 \\ -731.32 \end{Bmatrix} \quad (6)$$

$\alpha \sim \varepsilon$ の係数の正確さを検証するために、選択する節点数を増加させることを試みる。5節点増やした10節点で行う場合、長方形列となるため、数値解析ソフトウェア MATLAB を用いて一般逆行列を用いて解く。追加する5節点として、node4,8,14,17,18 を選択すると以下のようになる。

$$\begin{Bmatrix} \alpha \\ \beta \\ \gamma \\ \delta \\ \varepsilon \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 72.98 \\ -1.51 \\ 6.38 \\ 4.23 \\ 0.89 \end{Bmatrix} \quad (7)$$

取り上げる節点数が5の場合と10の場合で係数の違いが大きいため、更に4節点増やし14節点で計算を試みる。追加する節点に node3,9,13,19 を選択すると以下のようになる。

$$\begin{Bmatrix} \alpha \\ \beta \\ \gamma \\ \delta \\ \varepsilon \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 70.54 \\ -2.20 \\ 6.80 \\ 3.57 \\ -0.97 \end{Bmatrix} \quad (8)$$

更に node2,10,12,20 を追加で選択して合計18節点とすると以下のようになる。

$$\begin{Bmatrix} \alpha \\ \beta \\ \gamma \\ \delta \\ \varepsilon \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 68.68 \\ -2.61 \\ 7.06 \\ 3.10 \\ -2.52 \end{Bmatrix} \quad (9)$$

全ての場合で選択した5つの節点、node5,6,7,15,16 に関する2乗誤差を比較すると選択した節点数が10のときは0.00010、節点数が14のときは0.00013、節点数が18のときは0.00016となった。これより4節点の2乗誤差が最も小さい10節点の場合を採用する。これより TMD 設置点である応答速度は0.8748m/sであったのに対して、上記の速度分解を用いると1次モードの応答速度成分は0.7334m/sとなった。これを用いて式(3)より初期変位を求めると、 $y_0 = -0.8696\text{m}$ となった。図 12 に速度分解前・後の応答速度から求めた初期

変位を用いたときの時刻歴応答変位を示す。ここでは1次モード制御用のTMDを集中配置させた場合の応答変位を比較する。図より時刻歴全体で制振効果が向上していることが確認できる。

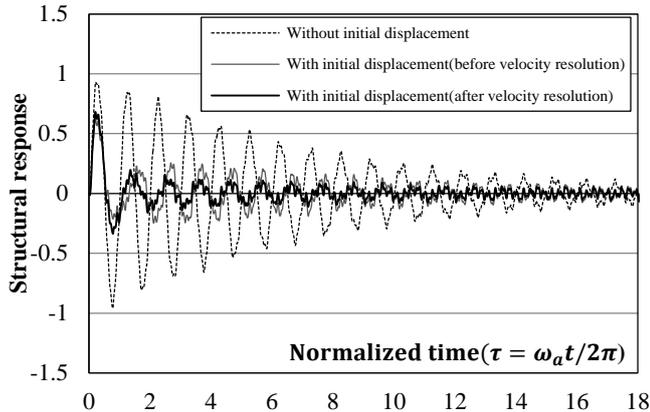


図 12: 初期変位の大きさの違いによる制振効果の比較 (水平方向加振)

鉛直方向加振の場合は図 11 より、2次、4次、5次、7次の4つのモード成分が含まれているため、この4つのモードを用いて応答速度のモード成分分解を行う。水平方向加振の場合と同様に逆行列を用いて4つのモード成分に関わる係数を求めて、5次モードの応答速度成分を求めると-1.3532m/sとなった。TMD設置点の速度分解前の応答速度は、-1.2218m/sであった。これを用いて式(3)より初期変位を求めると、 $y_0=0.2019\text{m}$ となった。図 13 に速度分解前・後の応答速度から求めた初期変位を用いたときの時刻歴応答変位を示す。5次モード制御用のTMDを分散配置させた場合の応答変位を比較する。図より速度分解前・後で制振効果はほとんど変わっていないが、この理由として図 11 の node4 の応答速度スペクトルからTMD設置点の応答速度は5次モードの成分が支配的であったためと考えられる。

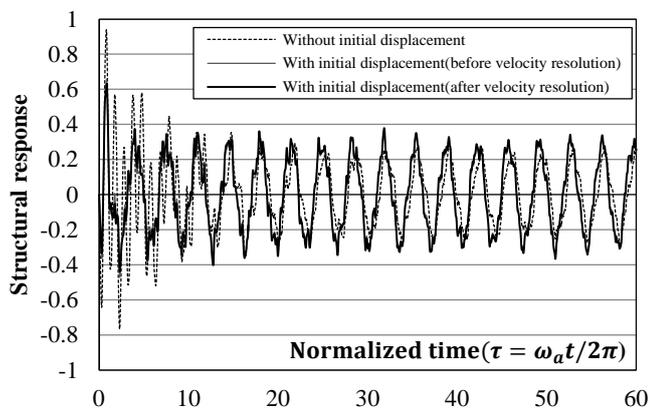


図 13: 初期変位の大きさの違いによる制振効果の比較 (鉛直方向加振)

4.2 自由振動応答の理論解と数値解析結果との比較

この節では自由振動応答の理論解を用いた初期変位の算出法を示し、数値解析結果と比較を行っていく。初めに自由振動応答の理論解を式(10)に示す。

$$\mathbf{u}(t) = \sum_{n=1}^N e^{-\xi_n \omega_n t} [\boldsymbol{\beta}_n \cos \omega_n t - \boldsymbol{\gamma}_n \sin \omega_n t] \quad (10)$$

$$\boldsymbol{\beta}_n = 2R_e[B_n \boldsymbol{\psi}_n e^{\lambda_n t}], \quad \boldsymbol{\gamma}_n = 2I_m[B_n \boldsymbol{\psi}_n e^{\lambda_n t}]$$

$$\omega_{nD} = \omega_n \sqrt{1 - \xi_n^2} \quad B_n = \frac{\boldsymbol{\kappa}_n^T \mathbf{a} \hat{\mathbf{u}}(0)}{\boldsymbol{\kappa}_n^T \mathbf{a} \boldsymbol{\kappa}_n} \quad \mathbf{a} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{m} \\ \mathbf{m} & \mathbf{c} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{k}_n = \begin{cases} \lambda_n \boldsymbol{\psi}_n \\ \boldsymbol{\psi}_n \end{cases} \quad \begin{matrix} \lambda_n \boldsymbol{\psi}_n: n \text{ 次モードのモーダル速度} \\ \boldsymbol{\psi}_n: n \text{ 次モードのモーダル変位} \end{matrix}$$

またn次モードを打ち消す初期変位は式(11)に示すように表される。n次モードを打ち消すTMDの初期変位を求めるということは、構造物に初期変位または初期速度が存在するときに、式(11)を満足するTMD初期変位を求めるとなる。

$$\{\lambda_n \boldsymbol{\psi}_n \quad \boldsymbol{\psi}_n\} \mathbf{a} \begin{Bmatrix} \dot{\mathbf{u}}(0) \\ \mathbf{u}(0) \end{Bmatrix} = \mathbf{0} \quad (11)$$

自由振動応答の理論解と数値解析の比較をする際は、インパルス外力加振時のTMD設置点が応答初期速度に達するときの各節点の応答速度を初期条件として与えたときの時刻歴応答変位を比較する。水平方向加振時に式(11)から求めた1次モードを打ち消す初期変位の大きさは $y_0 = -0.7005 - 0.03681i(\text{m})$ 、同様に鉛直方向加振時の5次モードを打ち消す初期変位の大きさは $y_0 = 0.1972 + 0.007736i(\text{m})$ となり複素数の形になる。n次モードを打ち消す初期変位を求めるということは式(3)の場合は係数 α を-1.13から-1.0に変えるということの意味する。係数を-1.0に変えたときに4.1節で求めた速度分解前・後の応答速度を用いると、1次モードを制御する初期変位の大きさはそれぞれ、 $y_0 = -0.9221\text{m}$ 、 $y_0 = -0.7695\text{m}$ となった。同様に5次モードを制御する初期変位の大きさはそれぞれ、 $y_0 = 0.1614\text{m}$ 、 $y_0 = 0.1787\text{m}$ となった。これより自由振動応答の理論解から求めた初期変位の実数部と比較すると速度分解後の初期変位の大きさは、理論値に近づけることができていることがわかる。図 14, 15 に複素数のTMD初期変位を用いた場合、速度分解前・後の応答速度を用いて設計式より求めた初期変位を用いた場合の時刻歴応答変位を比較する。

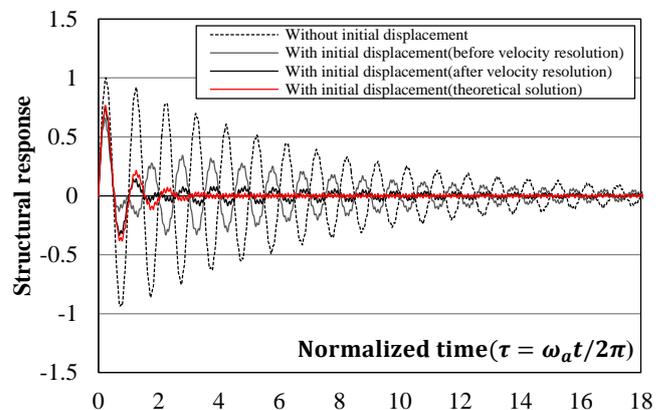


図 14: インパルス応答の比較(水平方向加振)

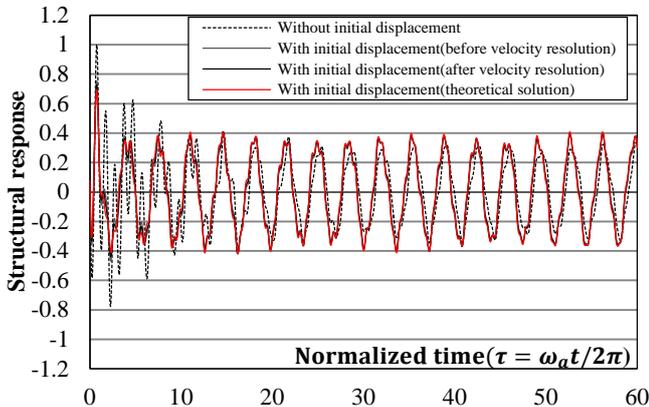


図 15:インパルス応答の比較(鉛直方向加振)

鉛直方向加振については設計式で求めた初期変位を用いた場合でも初期変位の理論値を用いた場合とほとんど等しい応答を示している。水平方向加振の場合は初期変位の理論値を用いると的確に応答を制御することができている。しかし、4.1 節で求めた速度分解後の応答速度から算出した初期変位を用いることで初期変位の理論値を用いた場合とほぼ同様の制振効果があることがわかる。

5. 地震力に対する制振効果

インパルス外力に対しては制御モードを的確に抑えることができる初期変位を算出し、その有効性を確認することができた。次に地震力に対する制振効果を確認する。既往の研究²⁾より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すると最も高い制振効果が得られることがわかっているが、実用性を考えるとその条件のみでは解放の判定として不十分であるため図 16 に示すように応答変位に閾値を設定し、その閾値を 1 回又は 2 回通過した後の応答速度が極大の点で初期変位を解放するものとした。この検討で用いた地震波は El Centro NS 波であり、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 TMD はモードの腹に集中配置とした。初期変位解放のための応答変位の閾値は 0.015m と設定した。図 17,18 に閾値を 1 回,2 回通過したあとに初期変位を解放した時刻歴応答変位を示す。共振時には式(3)の係数 α を-1.76 にすると最も高い制振効果が得られるという知見³⁾が得られているため、それとの比較も行う。初期変位は TMD 設置点の応答速度をそのまま用いて求めた。

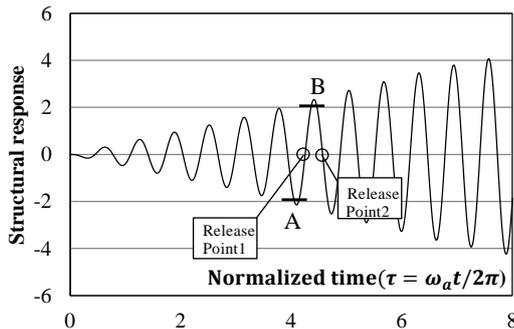


図 16: 初期変位の解放条件

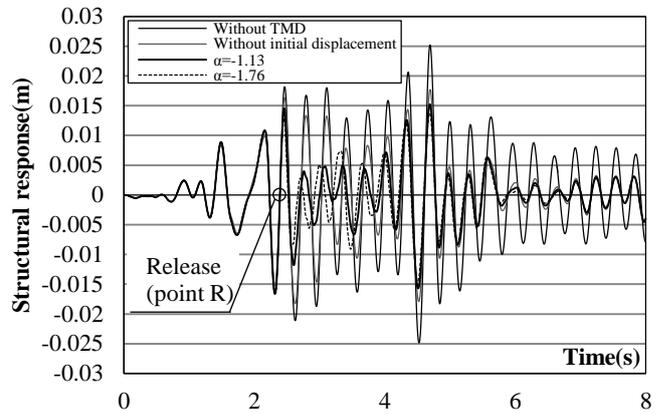


図 17: 閾値を 1 度超えたときの時刻歴応答変位

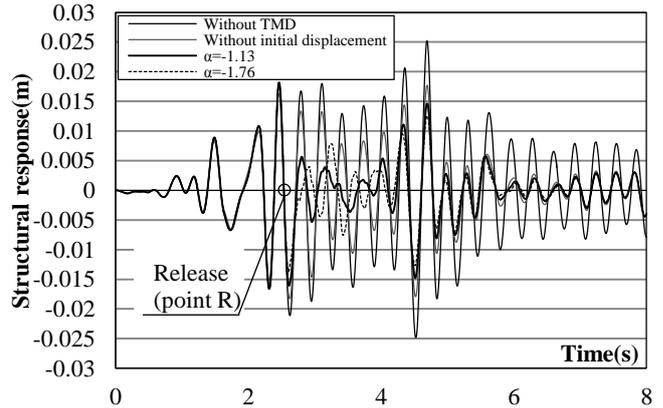


図 18: 閾値を 2 度超えたときの時刻歴応答変位

図 17,18 より閾値を超えたときの応答速度が極大の点で初期変位を解放する場合は $\alpha=-1.13$ のときの方が有効であることがわかる。これより共振時のときは初期変位の設計式の係数を $\alpha=-1.76$ に、それ以外では $\alpha=-1.13$ にすると初期変位解放後の制振効果を向上させることができることがわかった。

6. 結論

多自由度系の場合、TMD 設置点の応答速度には制御モード以外の振動モードの成分も含まれているため既往の研究では初期変位をパラメトリックに変えることで最適初期変位を求めていた。しかし、自由振動応答の理論解を用いると制御モードを的確に抑える初期変位を求めることができた。また初期変位付与 TMD の場合は、TMD 設置によるモード形状の変化がある場合は対称形ときには現れない振動モードを誘発させる可能性があるので注意する必要がある。

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。また今回は TMD 設置点の応答速度を用いて初期変位を求めたため、制御モードを考慮した初期変位の算出は今後の課題である。

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 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) 光藤龍郎、吉中進、谷口与史也：振動モードが選択可能な初期変位付与型 TMD に関する研究その 2 調和外力と地震力に対する制振効果、日本建築学会学術講演梗概集構造 I、p879-880、2012.9
- 3) 吉中進・谷口与史也：調和地動加振を受けたときの初期変位付与型 TMD の最適初期変位と制振効果時間、平成 25 年日本建築学会近畿支部研究発表会資料

討 議 等

◆討議 [谷口徹郎]

初期変位の設計式の \dot{x}_0 とはどこの速度のことを表わしているのか。また予め予測する必要があるのか。地震波が作用したときも使えるのか。

今回は集中配置、分散配置という方法をとっているが1次モードの場合は他の分散配置の仕方はあるのか。

◆回答：初期変位の設計式はインパルス外力に対する設計式であり \dot{x}_0 とは、インパルス外力が作用したときの応答速度が最大となる速度のことを示しています。設計式の中では \dot{x}_0 を応答初期速度と呼んでいます。実際の機構では応答変位に閾値を設定し、閾値を超えたときに初期変位解放点での応答速度を予測し、初期変位を与え応答速度が極大となるところで初期変位を解放するというものをイメージしております。地震力が作用するときにつきましては、初期変位解放点をインパルス外力が作用すると考えますと初期変位の設計式が用いることができ、解析結果からも地震力が作用したときに、TMDに初期変位を与えることの有効性は確認しています。

配置方法に関しましては、既往の研究によりモード形状の腹の部分にTMDを設置すると高い制振効果が得られるという知見が得られているため、本研究でもTMDの設置位置はモード形状の腹の部分としました。1次モードを制御する場合は、腹は2か所しかありませんので分散配置する場合、TMDの設置位置も2か所となるため今回のような配置方法を取りました。

◆討議 [谷口与史也]

初期変位付与TMDの場合は、TMD設置によるモード形状の変化がある場合は対称形するときには現れない振動モードを誘発させる可能性があるので注意する必要があるとはどういう意味か。

◆回答：5次モード制御用TMDを設置する場合集中配置させたときと分散配置させたときでモード形状に若干変化が見られました。またインパルス応答解析により2つの配置方法の制振効果を比較したところ、集中配置させた場合初期変位解放後の応答にうなりが生じて不規則な応答を示していました。この理由としましてスペクトル解析を行うと、梗概の図10に示しているように、水平方向の振動モード(1次モードと3次モード)が励起されるためと考えられます。これはTMDを集中配置させることで水平方向の振動モードの対称性

が崩れ、本来鉛直方向では現れない振動モードが励起したと考えられます。このことから、初期変位付与型TMDを設置する場合、制御モード以外の振動モード形状の対称性も崩さないような配置方法を取ることが必要であると考えられます。

◆討議 [松村政秀]

もともと対称性を考慮してTMDを分散配置すれば良いのではないか

◆回答：本研究では配置方法によるモード形状の変化と制振効果の関係を明らかにするため、集中配置・分散配置という2パターンで比較を行いました。松村先生が仰るように、対称形の構造物に関しましては分散配置をさせると最も効率的と考えられますが、対称形でない構造物に関しましては分散配置が効率的とは一概に言えません。配置方法の最適化に関しては今後の検討課題の1つであると考えられます。