

アーチモデルにおける初期変位付与型 TMD の空間配置

SPATIAL ARRANGEMENT OF TUNED MASS DAMPERS WITH INITIAL DISPLACEMENT FOR ARCH MODEL

建築構造学分野 小鶴 桂太

Structural Engineering Keita KOZURU

本研究は初期変位付与型 TMD の空間構造物への適用を想定している。初期変位付与型 TMD の配置箇所が制御モードの節以外であれば制御モードを消去し、構造物には非制御モードの振動が残留する。TMD の初期変位を算出する初期変位解放条件式を用いて、構造物の応答が最も小さくなる空間配置の評価指標を提案した。初期変位解放条件式による空間配置の評価のインパルス外力を受けたアーチモデルの有効性を検討した。

In this paper, it is assumed that Tuned Mass Damper(TMD) with initial displacement are applied to space structures. If TMDs with initial displacement are installed in structure except node, vibration mode is erased and vibrations of non-vibration mode remain in structure. I propose an evaluation of spatial arrangement using a calculation method where structural response is the smallest. I verify that an evaluation of spatial arrangement using a calculation method is effective for arch model under impulse load.

1. 序

TMD(Tuned Mass Damper)は錘・バネ・ダンパーで構成され、構造物の振動エネルギーを錘の運動エネルギーとダンパーによる熱エネルギーより吸収し、エネルギーを消散させるパッシブ型の振動制御である。¹⁾

TMD はパッシブ型振動制御であるため構造物の振動による外乱が無ければ装置の錘が振動して安定した振動状態にならないために構造物の応答の初期に対する制振効果が発揮されない。

既往研究²⁾では TMD にあらかじめ初期変位を与え、構造物の振動時に変位を解放し TMD の振動の振幅を大きくすることで振動の応答初期の制振効果を向上する手法を初期変位付与型 TMD と呼んでいる。

TMD の減衰比を大きくするとモード減衰比が各モードで分岐し、モード減衰比の高いモード単独で振動させるために初期変位解放条件式より算出した初期変位を TMD に与え、構造物の振動時に初期変位を解放することによりモード減衰比の高いモード単独で振動させることができることが確認されている。さらに、同調比の異なる 2 個の TMD を用いることで任意の時刻で構造物の応答を抑えることも確認されている。

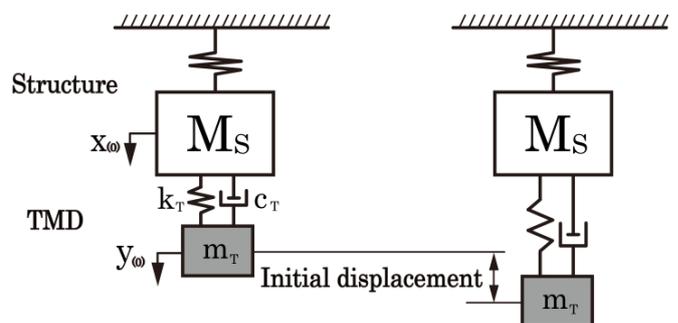
本研究は複数のモードが励起する空間構造物の初期変位付与型 TMD の適用を想定している。空間構造物の中で逆対象モードが発生するアーチモデルを扱う。既往研究³⁾により、水平方向のインパルス外力に対し

2 個の初期変位付与型 TMD を制御モードの腹に設置させ制御モードを消去できることは確認されている。構造物は制御モード以外の振動モードで振動している場合、TMD をモードの腹に設置することが適当とは言えない。そこで本研究では初期変位付与型 TMD の配置箇所と構造物の制振効果への影響を確認する。

2. 初期変位付与型 TMD について

TMD 構成要素の質量 m_T 、ばね k_T 、減衰器(減衰係数 c_T)の特性係数を定めるために、それぞれを無次元化した質量比 μ (構造物の質量に対する TMD の質量の比)、減衰比 ξ_T (ダッシュポットの減衰定数)、同調比 γ (構造物の制御する固有振動数に対する TMD の固有振動数の比)がパラメータとなる。

図 1 に 1 自由度系の構造物に設置した TMD への初期変位付与のイメージを示す。



(a) 初期変位なし (b) 初期変位付与時

図 1 1 自由度系と TMD

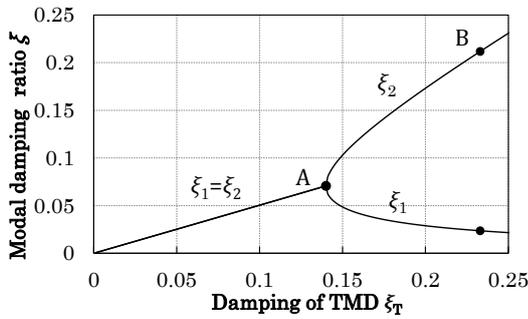


図2 TMDの減衰比とモード減衰比の関係

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

既往研究²⁾で図1の1自由度系の構造物にTMDを設置した場合においてTMDの減衰比をある値(点A)よりも大きくするとモード減衰比の大きさが分岐する。点BのTMDの減衰比は式(1)である。モード減衰比の大きいモード単独で振動させるために式(2)の初期変位解放条件式から得られる初期変位をTMDに与え構造物の振動時に解放することでモード減衰比の大きいモード単独で振動させることが確認されている。

$$\{\lambda_1 \Psi_1 \quad \Psi_1\} a \begin{Bmatrix} \dot{u}(0) \\ u(0) \end{Bmatrix} = 0 \quad (2)$$

$\lambda_1 \Psi_1$ と Ψ_1 はモード減衰比の低いモードのモーダル速度とモーダル変位、 a は質量と減衰からなる行列、 $\dot{u}(0)$ と $u(0)$ は構造物とTMDの初期条件である。

さらに既往研究³⁾では2個の同調比 γ の異なるTMDをアーチモデルし、水平方向のインパルス外力と地震力に対して任意の時刻で構造物の制御モードを消去できることが確認されている。

3.3 自由度系の構造物のインパルス応答への検討

3.1 解析条件

図3に3自由度系のモデルとStructure1を1で正規化したモード形状を示す。質量を $M_S=1.0(\text{kg})$ 、ばね係数 $k_S=100(\text{N/m})$ とする。構造物には図3のモードの成分に比例した速度のみを与える。

表1 構造物の固有振動数

	固有振動数(Hz)
mode1	1.218
mode2	2.250
mode3	2.941

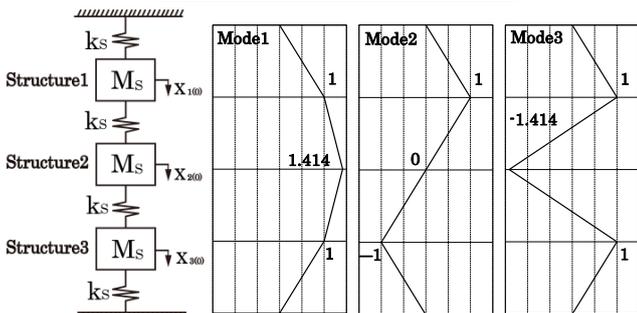


図3 3自由度系とモード形状

制御するモードはmode1と振動に腹と節が存在するmode2を制御する。

TMDの質量は全てのモードで腹の等価質量の2%となるように設定し、全てのモードでTMDの1つあたりの質量 m_T が0.02(kg)となった。

質量比 μ は2%とする。

TMDの減衰比 ξ_T は前章の式(1)を用いて質量比 μ は2%なので0.2321と設定した。

2個のTMDの同調比は既往文献⁴⁾より、仮にTMD1を1.2とTMD2を0.73と設定する。

各モード制御におけるTMDのばね係数 $k_T(\text{N/m})$ と減衰係数 $c_T(\text{N-sec/m})$ を示す。

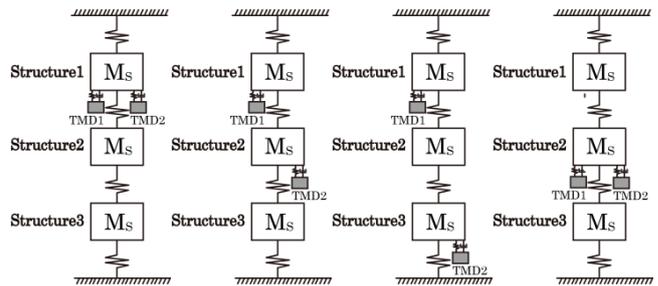
表2 mode1制御のTMDのパラメータ

	ばね係数 $k_T(\text{N/m})$	減衰係数 $c_T(\text{N-sec/m})$
TMD1	1.687	0.08526
TMD2	0.624	0.05187

表3 mode2制御のTMDのパラメータ

	ばね係数 $k_T(\text{N/m})$	減衰係数 $c_T(\text{N-sec/m})$
TMD1	5.758	0.1575
TMD2	2.131	0.0958

2個のTMDの配置パターンは図4に示す4パターンで行ものとする。



(a)pattern1 (b)pattern2 (c)pattern3 (d)pattern4

図4 TMDの配置パターン

3.2節から3.3節におけるモード表記だが図3の構造物単体のモードでは”mode1s”と数字の後ろに”s”を付属し、図4のTMD設置後のモードを”mode1t”と数字の後ろに”t”を付属し表記する。

3.2 各配置の解析結果

・ mode1sの制御結果

速度は $\dot{x}_{1(0)} = 1.0(\text{m/s})$, $\dot{x}_{2(0)} = 1.414(\text{m/s})$, $\dot{x}_{3(0)} = 1.0(\text{m/s})$ を与えた。モード減衰比は図4の(a)pattern1で $\xi_{1t}=0.2292$, $\xi_{2t}=0.0053$, $\xi_{3t}=0.2265$, $\xi_{4t}=0.0047$, $\xi_{5t}=0.0014$ となり、全ての配置でmode1tとmode3tが高くなる。

表4 TMDの初期変位

(m)	pattern1	pattern2	pattern3	pattern4
TMD1	-10.43	-10.29	-10.33	-7.379
TMD2	-17.39	-12.57	-17.85	-12.60

mode1sに対応するmode1tとモード減衰比の大きいmode1tとmode3tのモード振幅を示す。

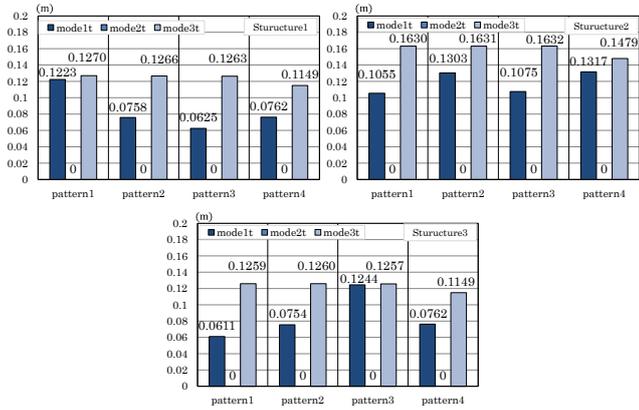


図5 mode1t~mode3tの各配置のモード振幅

次に非制御モードの mode2s に対応する mode4t と mode3s に対応する mode5t のモード振幅を示す。

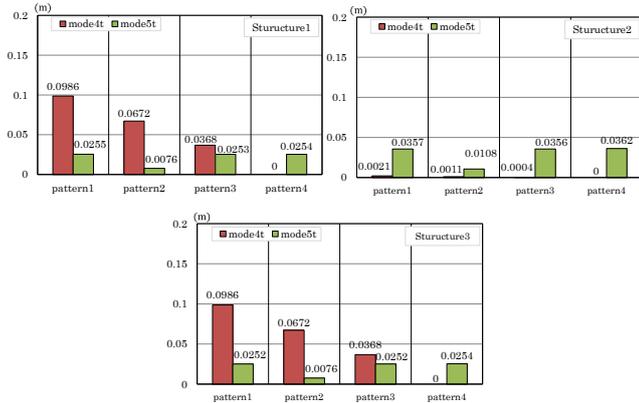


図6 非制御モードの各配置のモード振幅

図4の(a)pattern1の場合の各構造物の応答を示す。

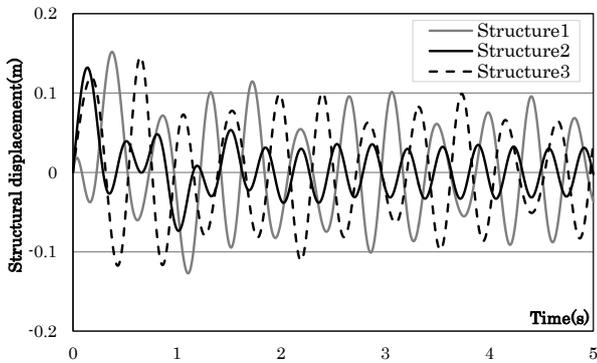


図7 配置が pattern1 の各構造物の応答

・ mode2s の制御結果

速度は $\dot{x}_{1(0)} = 1.0(m/s)$, $\dot{x}_{2(0)} = 0(m/s)$, $\dot{x}_{3(0)} = -1.0(m/s)$ を与えた。モード減衰比は(a)pattern1 で $\xi_{1t}=0.0016$, $\xi_{2t}=0.2262$, $\xi_{3t}=0.0104$, $\xi_{4t}=0.2235$, $\xi_{5t}=0.0065$ となり全ての配置で mode2t と mode4t が高くなる。

表5 TMDの初期変位

(m)	pattern1	pattern2	pattern3
TMD1	-2.821	-2.873	-2.829
TMD2	-4.865	14.23	4.863

pattern4のTMDの初期変位は変位が他の配置と比較して極大となるため節にTMDは設置できない。

mode2sに対応するmode3tとモード減衰比の大きい

mode2tとmode4tのモード振幅を示す。

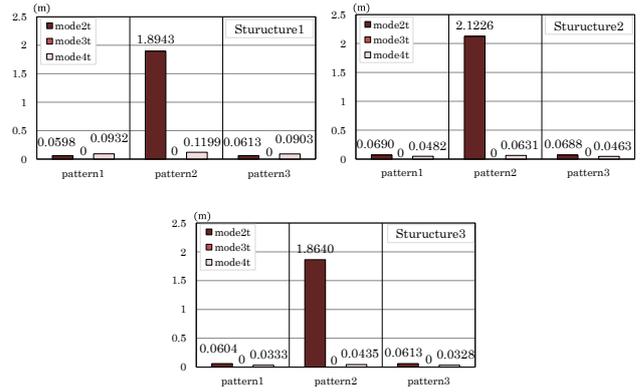


図8 mode2t~mode4tの各配置のモード振幅

次に非制御モードの mode1s に対応する mode1t と mode3s に対応する mode5t のモード振幅を示す。

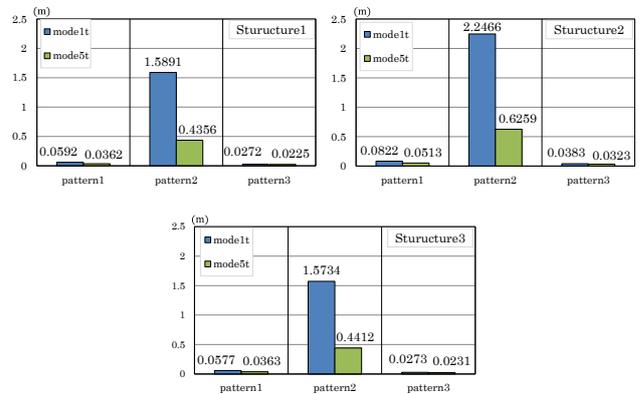


図9 非制御モードの各配置のモード振幅

図4の(a)pattern1の場合の各構造物の応答を示す。

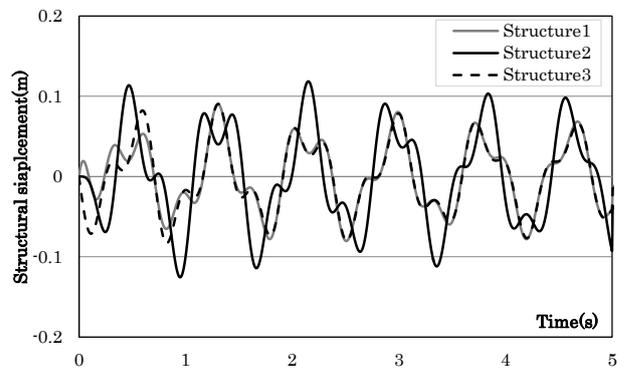


図10 配置が pattern1 の各構造物の応答

図5と図8より制御モードを消去できる。このことからTMDは制御モードの節以外の箇所であれば制御モードを消去できる。構造物の応答は図7と図10でTMDの初期変位解放後の構造物はモード減衰比の大きいモードと非制御モードで振動し、一定の時間が経過した後非制御モードが残留する。

また、非制御モードが大きく発生する。これはTMDに初期変位を与えたことによるTMDのばねの力により構造物に加速度が加わったためである。このことから初期変位付与型TMDは構造物の非制御モードを励起しない箇所に設置することが好ましいと考えられる。

3.3 初期解放条件式による空間配置の評価

前節より初期変位付与型 TMD は構造物の非制御モードを励起しない箇所に設置することが好ましいと述べた。初期変位付与型 TMD の空間配置における非制御モードへの影響の評価指標を提案する。

$$u_n(t) = B_n \Psi_n e^{\lambda_n t} + \bar{B}_n \bar{\Psi}_n e^{\bar{\lambda}_n t} = 2\text{Re}(B_n \Psi_n e^{\lambda_n t}) \quad (3)$$

$$B_n = \frac{\kappa_n^T a \hat{u}(0)}{\kappa_n^T a \kappa_n} \quad (4)$$

κ_n は n 次モードの固有ベクトル、 a は質量と減衰からなる行列、 $\hat{u}(0)$ は構造物と TMD の初期条件である。

式(3)は自由振動応答理論解の n 次モードの自由振動の式である。式(2)の初期変位解放条件式は式(4)の分子に由来する。つまり n 次モードの B_n の分子が 0 に近づけば構造物全体のモードの振幅が小さくなる。式(2)で TMD の初期変位を算出後、構造物の初期条件と共に非制御モードの式(4)の $\kappa_n^T a \hat{u}(0)$ へ代入する。 $\kappa_n^T a \hat{u}(0)$ は複素数である。各配置で各非制御モードの $\kappa_n^T a \hat{u}(0)$ のスカラー値の総和の式(5)を算出し、0 に近づけば構造物はモード減衰比の大きいモードで振動するということになる。 $\text{Re}()$ 、 $\text{Im}()$ は実数値、虚数値を表す。

$$\sum_{n=1}^N \sqrt{\left(\text{Re}(\kappa_n^T a \hat{u}(0))\right)^2 + \left(\text{Im}(\kappa_n^T a \hat{u}(0))\right)^2} \quad (5)$$

mode1s と mode2s の制御結果を用いて、図4の各配置の式(5)を示す。mode1s の制御の各配置の式(5)と各構造物の非制御モードの振幅の総和を示す。

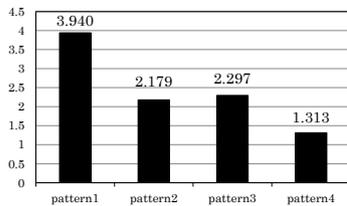


図 11 mode1s の制御の各配置の式(5)

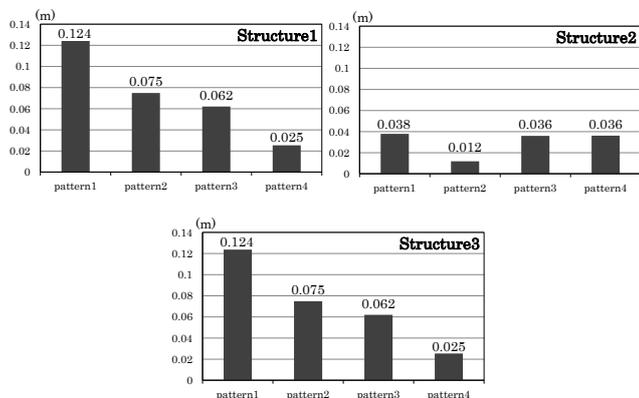


図 12 非制御モードのモード振幅の総和

各構造物で差が見られるところもあるが、式(5)と非制御モードのモード振幅の総和が近い傾向を得ることができた。mode2s の制御における各配置の式(5)と各構造物の非制御モードの振幅の総和を示す。mode2s の制御結果でも近い傾向が得られた。

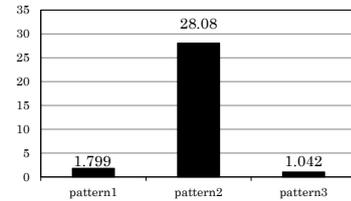


図 13 mode2s の制御の各配置の式(5)

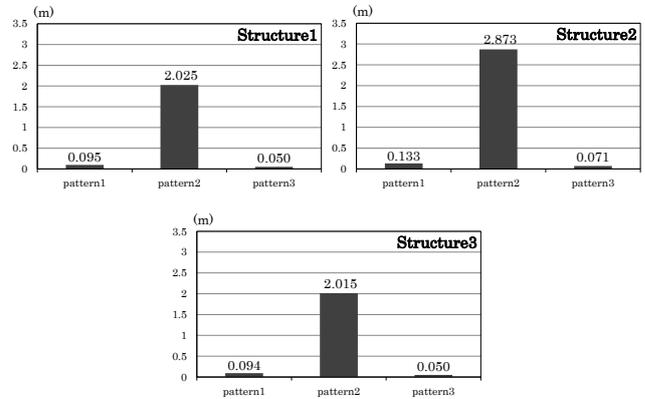


図 14 非制御モードのモード振幅の総和

4. 2次元アーチモデルへの適用

4.1 アーチモデル

ヤング係数は 2.05×10^{11} (N/m²)、せん断弾性係数は 7.94×10^{10} (N/m²) ポアソン比 0.3、比重は 7850(kg/m³)。

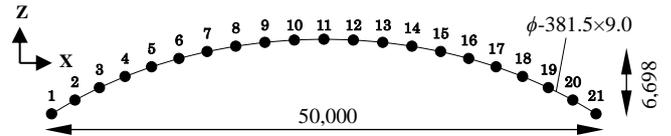


図 15 解析モデル

Z 方向の有効質量比の合計が 90%以上となる mode1 から mode7 までの固有振動数を表 6 にモード形状を図 16 に示す。

表 6 固有振動数と有効質量比

	固有振動数(Hz)	有効質量比(%)	
		X	Z
mode1	1.198	20.57	0.000
mode2	2.673	0.000	0.430
mode3	5.038	4.487	0.000
mode4	7.761	0.000	0.780
mode5	11.41	1.845	0.000
mode6	14.71	0.000	35.35
mode7	16.59	0.000	54.72

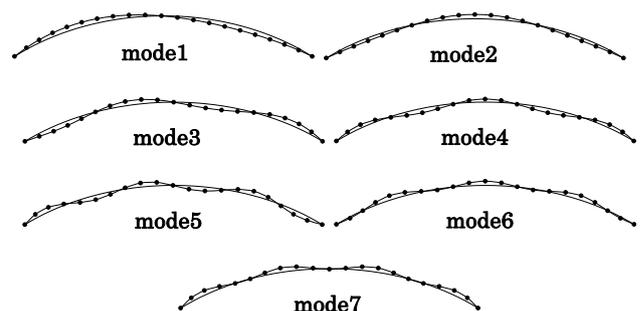


図 16 モード形状

制御モードは X 方向の制御では mode1, Z 方向は mode7 を制御する。

TMD の個数は X 方向の制御では 2 個, Z 方向は 3 個集中配置させる。質量比 μ は 2%とする。TMD1 個あたりの質量は X 方向の制御では 22.85(kg), Z 方向の制御では 9.28(kg)。TMD の減衰比 ξ_T は式(1)を用いて 0.2321 とする。同調比は X 方向の制御では仮に 1.2 と 0.73 とし, Z 方向は既往文献⁵⁾より MTMD より設定した。TMD の配置方向は図 17 に示すように Z 方向のみとする。TMD には式(5)から算出した初期変位を与える。

表 7 mode1 制御の TMD のパラメータ

	ばね係数 k_T (N/m)	減衰係数 c_T (N-sec/m)
TMD1	1864.7	95.81
TMD2	690.1	58.28

表 8 mode7 制御の TMD のパラメータ

	ばね係数 k_T (N/m)	減衰係数 c_T (N-sec/m)
TMD1	109812.6	468.6
TMD2	96867.0	440.1
TMD3	84733.0	411.6

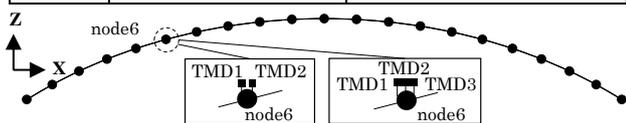


図 17 TMD の設置図 (node6 への設置の場合)

4.2 X 方向の検討 (水平方向の検討)

アーチモデルに node6 の Z 方向の最大速度が 1.0(m/s)となるように大質量法で 0 秒から 0.01 秒に 7.0×10^{14} (N)のインパルス外力を加振した。TMD の初期変位の解放時刻は node6 の Z 方向の速度が極大の時刻とする。構造物の減衰は考慮しない。

2 個の TMD を図 15 の節点 2 から節点 10 まで配置箇所を変化させた。図 18 に TMD を節点 3 から節点 7 に設置させた場合の節点 6 の応答と図 19 に全配置のフーリエスペクトルを示す。

図 19 より TMD の初期変位解放後の構造物は mode1 を消去され, TMD のばね力と TMD の固有振動数が近接する mode2 が大きく励起し 2 秒後以降残留する。

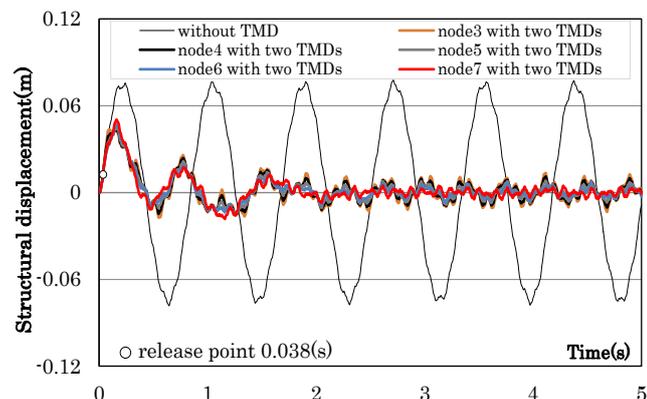


図 18 節点 6 の Z 方向のインパルス応答

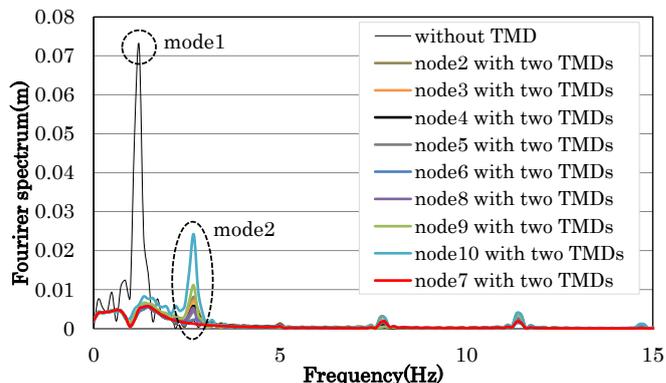


図 19 フーリエスペクトル

各配置の節点 6 の 2 秒から 5 秒までの 2 乗応答平均と非制御モードの式(4)の総和の式(5)で評価する。式(5)で考慮するモードは Z 方向の有効質量が 90%以上となる mode1 を除く mode1 から mode7 とする。

図 20 と図 21 より 2 つの図とも節点 10 で最大になり節点 7 が最少となる。

よって, 2 つの図で同じ傾向を得られたことにより 2 個の TMD を集中配置させる場合において TMD を節点 7 に配置させることが好ましい。

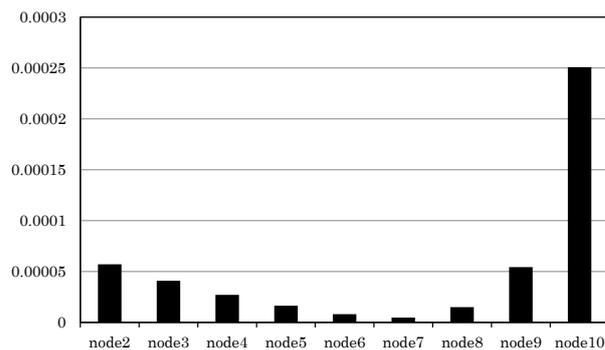


図 20 節点 6 の 2~5 秒の 2 乗応答平均

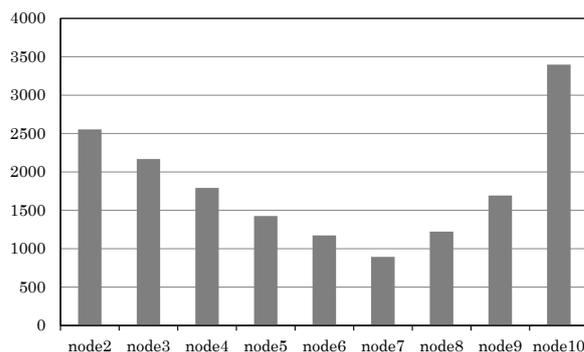


図 21 式(5)の空間配置の評価

4.3 Z 方向の検討 (鉛直方向の検討)

アーチモデルには node8 の Z 方向の最大速度が 1.0(m/s)となるように大質量法で 0 秒から 0.001 秒に 6.65×10^{15} (N)のインパルス外力を加振した。TMD の初期変位の解放時刻は node8 の Z 方向の速度が極大の時刻とする。構造物の減衰は考慮しない。

3 個の TMD を図 15 の節点 5 と節点 6 を除く節点 2 から節点 10 まで配置箇所を変化させた。

各配置の中で特に応答が小さくなった節点 2 と節点 4 と節点 8 に設置させた場合の節点 8 の応答と全ての配置のフーリエスペクトルを示す。

図 23 より mode7 が消去されていることが確認できる。また mode1 から mode6 が励起する。TMD の配置がアーチモデルで左右非対称であることと TMD の設置方向が Z 方向かつ高次モードの mode7 を制御する TMD のばね力は低次モードと比較して高いため複数のモードが励起したとも考えられる。また、有効質量比より低次モードが高いことも一要因と見られる。

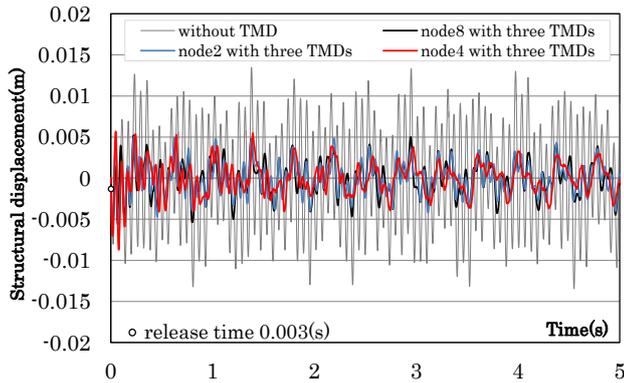


図 22 節点 8 の Z 方向のインパルス応答

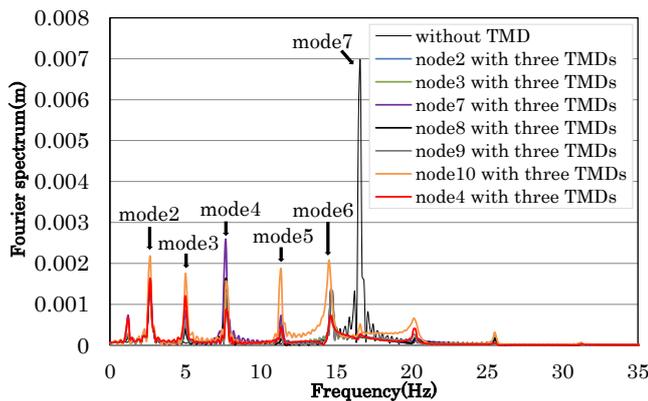


図 23 フーリエスペクトル

各配置の節点 8 の 2 秒から 5 秒までの 2 乗応答平均と非制御モードの式(4)の総和の式(5)で評価する。考慮するモードは Z 方向の有効質量が 90%以上となる mode7 を除く mode1 から mode7 とする。

2 つの図の傾向は近いが数値が最少となる設置個所が異なる。これは複数のモードが励起することと、node8 に含まれるモードの成分が原因だと考えられる。また式(5)は TMD の初期解放後の時刻で評価するのに対し、2 乗応答平均は時刻歴で評価するため式(5)では TMD の変位解放後のモード成分は評価できないためでもあると考えられる。

2 つの図で最少値となる配置は異なるが近い傾向が得られたことから Z 方向のインパルス外力でも式(5)による空間配置の評価が行えることが確認できた。

以上よりインパルス外力を受けたアーチモデルでも、式(5)による評価が行えたことを示した。

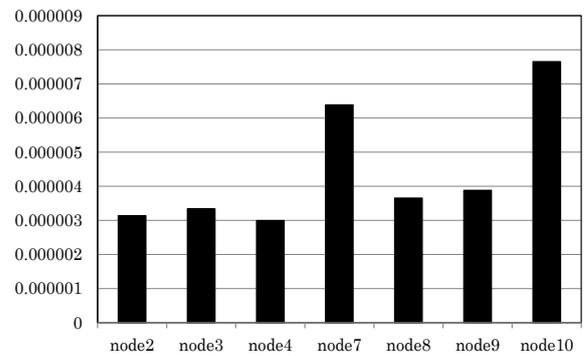


図 24 節点 8 の 2~5 秒の 2 乗応答平均

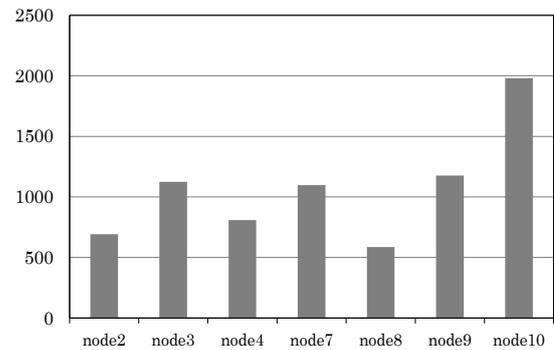


図 25 式(5)の空間配置の評価

5. 結論

初期変位付与型 TMD に空間配置において制御モードの節以外であれば初期変位付与型 TMD をどこへ設置させても初期変位解放条件式を用いて制御モードを消去できることを確認した。TMD の初期変位解放後の構造物は一定時間経過後に非制御モードが残留するため、非制御モードの励起に注意する必要がある。

TMD の配置ごとで式(5)の初期変位解放条件式に各非制御モードの固有ベクトルと構造物の初期条件と TMD の初期変位を代入した数値の総和で算出することで、構造物の応答が最も小さくなる TMD の配置を評価できることを本研究で扱ったアーチモデルでも確認した。

また、本研究ではアーチモデルにはインパルス外力のみ加振したため、周期が時間で変化する地震動などに対する制振効果は今後の検討課題となる。

参考文献

- 1) 山口宏樹著：構造振動、共立出版株式会社、1996.5
- 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 79(703), 1247-1257, 2014
- 3) 吉田力：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 大阪市立大学大学院修士論文 2015
- 4) 吉中進・小鶴桂太・谷口与史也：初期変位付与型 TMD の同調比の設定 日本建築学会構造系論文集第 82 巻第 738 号、1177-1187, 2017.8
- 5) 吉中進：分散型 MTMD による大スパン建築構造の振動制御に関する研究 2007.3