

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 3 日現在

機関番号：24402

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2014

課題番号：23560678

研究課題名(和文)空間構造の振動制御のための初期変位付与型TMD設計法の構築

研究課題名(英文)Design Method of Tuned Mass Dampers with Initial Displacement for Vibration Control of Spatial Structures

研究代表者

吉中 進(YOSHINAKA, SUSUMU)

大阪市立大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：70401271

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：主としてインパルス外力に対する設計式の提案と制振効果の検証を実施した。(1) TMD減衰比とモード減衰比の関係に着目し、既往の研究と比較して、インパルス外力に対する制振効果がより高い新しい初期変位付与型TMDの設計式を提案した。(2) 自由振動応答の理論解より、初期条件に依存せずにTMD初期変位の解を求めることが可能な初期変位解放条件式を提案した。(3) 空間構造モデルとして40mスパンのアーチモデルを用いて、(1)と(2)で提案した設計式の有効性を解析的に確認した。(4) 1.5mスパンの小型の鋼板アーチモデルを用いてインパルスハンマーを用いた打撃試験を行い、提案手法の有効性を実験的に検証した。

研究成果の概要(英文)：In this study, I proposed the new design formulas and verified control effect of the proposed method under impulse loading. (1) I focused on the vibration property between TMD damping ratio and modal damping ratio and proposed a new design formulas with higher control effect compared with the previous study. (2) Based on the theoretical solution for free vibration response, I proposed the formula for initial conditions to release initial displacement which can derive TMD initial displacement independently of various initial conditions. (3) By using an arch model with 40 meter span, I validated the proposed design formulas by the analytical method. (4) In order to verify control effect of the proposed method experimentally, using a small arch model with 1.5 meter span and 2.3mm thick steel plate, a vibration test using an impulse hammer was executed.

研究分野：工学(建築構造)

キーワード：建築構造 振動制御 TMD 空間構造

1. 研究開始当初の背景

(1) 研究代表者は、固有振動数の異なる小型のTMDがあるバンド幅を持って設置されるMTMD(Multiple TMD)を空間的に分散配置させることにより、空間構造において特徴的な固有振動数の近接した複数の振動モードを効率的に制御することが可能であることを確認している。TMDは構造物1点の絶対応答量に対して作用する制御方法であり、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空間構造には適用性が高いと考えられる。

(2) 一方、通常のTMD(またはMTMD)の制振効果は、構造物-TMDの全体系が安定した振動状態である定常状態にあることを基本としているため、地震力や衝撃力など非定常性が強い外力に対する制振効果は定常的外力に比較して小さいことが分かっている。

(3) そこで研究代表者は、TMDの同調比と減衰比に調和外力最適化パラメータを用いた既往の研究において、TMDに初期変位を付与する(初期変位付与型TMD)ことにより、TMD設置後の固有振動数が近接した2つの振動モードの位相を変化させることが可能となる原理を用いて、過渡応答初期の制振効果を向上させることが可能であることを解析的手法および小型の平板モデルを用いた振動実験により確認している。

2. 研究の目的

1. で述べた研究背景に基づき、空間構造の応答制御を目標として、制御手法として初期変位付与型TMDを選択し、設計法を構築することを本研究の目的とする。最終的な目標外力としては地震力または風荷重を想定しているが、本研究では過渡応答の制振効果を向上させることを目的としていることから、主としてインパルス外力を用いて検討した。

本研究で対象とした空間構造のように自由度が高く複数のモードが励起する場合は、1自由度系の場合とは異なるパラメータの設定が必要であると考えられる。さらに前述したMTMDの場合と同様に、初期変位付与型TMDの空間配置が課題となる。

前述した同調比と減衰比に調和外力最適化パラメータを用いた場合は、固有振動数の異なる2つのモードが重畳して生じる“うなり”の位相をTMDの初期変位でコントロールすることによる原理に基づくため、初期変位解放直後の応答とある一定の時間経過後の応答にはトレードオフの関係がある。すなわち、本設計法を用いた場合は制振効果に上限が存在する。そこで、TMDの減衰比を調

整することにより、さらに高い制振効果を得ることが可能な手法を提案する。

3. 研究の方法

(1) 初期変位付与型TMD設計式の提案

初期変位付与型TMDの設計パラメータには、通常のTMDと同じ同調比と減衰比のほかに、初期変位の向きと大きさがある。2自由度系の基本モデルを用いた自由振動応答解析により、各パラメータが応答に与える影響を調べ、解析結果に基づいて最適設計式を提案する。

(2) 初期変位解放条件式の提案

(1) で提案した設計式は、ある特定の初期条件の下で得られた近似式に基づいているため、物理的な意味が明確でなく、汎用性が無い。そこで自由振動応答の理論解より、初期条件に依存しない解である初期変位解放条件式を提案する。

(3) 空間構造モデルにおける制振効果の確認

空間構造モデルとして40mスパンのアーチモデルを用いて、(1)と(2)で提案した設計式の有効性を解析的に確認する。

(4) アーチモデルを用いた振動実験による制振効果の確認

1.5mスパンの小型の鋼板アーチモデルを製作し、インパルスハンマーを用いた打撃試験を行った。初期変位付与型TMDモデルのダンパーは非接触型の磁気ダンパーを用いた。

4. 研究成果

(1) 初期変位付与型TMD設計式の提案

初期変位付与型TMDの設計パラメータには、Fig.1に示すように通常のTMDと同じパラメータである①同調比、②減衰比、他に、③初期変位の向きと大きさがある。このうち、①同調比には自由振動最適化パラメータを用いた。

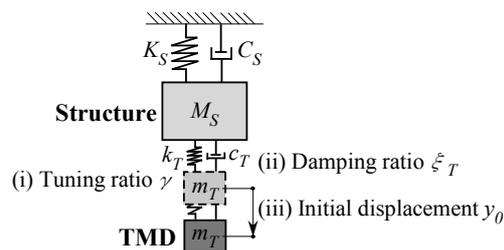


Fig.1 Design parameters of TMD with initial displacement

Fig.2にTMD減衰比とモード減衰比の関係を示す。図に示すように自由振動最適化パラメータであるA点を境にして1次と2次のモード減衰比の大きさが大きく異なる。

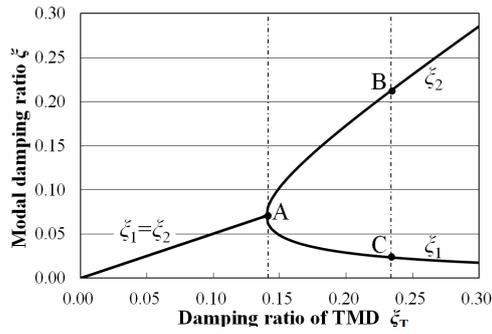


Fig.2 Relationship between TMD damping ratio and modal damping ratio

本研究ではB点とC点におけるTMD減衰比を用いた。初期変位付与型TMDの原理は、TMDの初期変位を適切に与えることにより、モード減衰比の大きいB点（2次モード）で振動させることが可能となることにある。構造物に減衰が無い場合のTMD最適減衰比として、以下の式を提案した。TMDの質量比を μ とする。なお、構造物に減衰が存在する場合の式も本研究で提案している。

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

初期変位に関しては、インパルス応答の大きさに関する時間積分が最小となることを目標として、以下の式を提案した。本式を用いたインパルス応答の比較をFig.3に示す。提案式の優れた制振効果が確認できる。

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

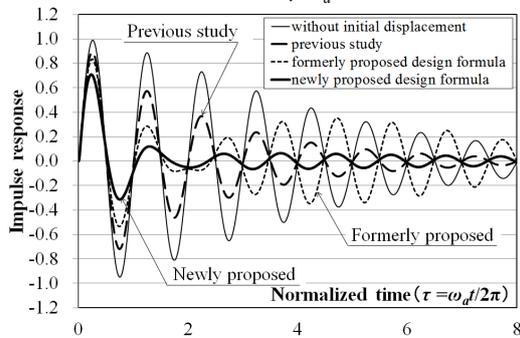


Fig.3 Comparison of impulse response curves

(2) 初期変位解放条件式の提案

(2)式を導出する際に用いた設計式は、「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となる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、モード減衰比が大きい2次モード単体で振動させることが可能となる原理」に基づいている。しかし、これはある特定の条件の下で振動解を用いて求められた近似解であり、その物理的な意味は明確ではない。さらに振動法を用いるにあたって前提となる仮定条件が存在する。そこで、自由振動応答の理論解より、初期

条件に依存しない初期変位の設計式を導いて物理的な意味を明確に示し、初期変位解放条件式を提案した。提案した初期変位解放条件式は以下のとおりに表される。

$$\{\lambda_1 \boldsymbol{\psi}_1 \boldsymbol{\psi}_1\} \mathbf{a} \begin{cases} \dot{\mathbf{u}}(0) \\ \mathbf{u}(0) \end{cases} = 0 \quad (3)$$

ここで、 $\boldsymbol{\psi}_1$ は1次固有ベクトル、 λ_1 は1次固有値、 \mathbf{a} は状態マトリクス、 $\dot{\mathbf{u}}(0)$ と $\mathbf{u}(0)$ は初期速度と初期変位に関するベクトルである。(3)式は固有ベクトルと初期条件ベクトルの一般直交性の式である。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になるということである。

なお、一般粘性減衰における固有ベクトルは一般に虚部を含む複素数となるため、(3)式で得られるTMD初期変位も複素数となる。初期変位が複素数とは、変位のみでなく初期速度が存在することを意味している。そのため、TMDが1個の場合は複素数が小さくなる、すなわち応答速度が極大となる時点で初期変位を解放した場合が最も制振効果が高いが、TMDを2個以上用いることにより、初期変位の解放条件を操作することも可能となる。すなわち、応答変位が極大となる時点で初期変位を解放することで2次モード単独で振動させることも可能である。

よって、本式は初期変位付与型TMDの基盤となる最も重要な式であり、他の質量付加方式のダンパーへも適用が可能であるとと思われる。

(3) 空間構造モデルにおける制振効果の確認

(2)で提案した初期変位解放条件式の空間構造モデルへの適用性を確認するために、Fig.4に示すスパン40m、ライズ7mのアーチモデルを用いて、時刻歴応答解析により、制振効果を確認した。外力は地盤面にインパルス外力を与えた。

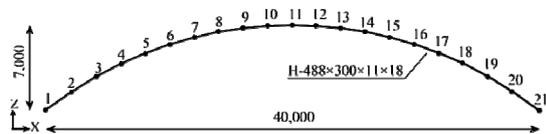


Fig.4 Analytical model

Fig.5に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。制御モードは逆対称1波の1次モードとした。TMDは1次モードの腹であるFig.4の節点6に設置し、TMDの作動方向は鉛直(Z)方向とした。TMDの質量比 μ は2%とし、同調比と減衰比は(1)で提案した式を用いた最適値とした。

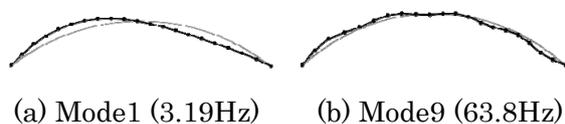


Fig.5 Modal shape

Fig. 6 で(3)式の初期変位解放条件式で得られた初期変位のうち実数値のみを用いた場合 (-0.701m)、既往の研究における摂動法により得られた設計式で得られた初期変位を用いた場合 (-0.922m) の解析ケースにおける節点 6 のインパルス応答を比較する。

(3)式の初期変位解放条件式を用いた場合は 1 自由度系モデルと同様に、約 3 周期で 1 次モードの応答が収束している。既往の研究における設計式を用いた場合は、初期応答は小さいが 1 秒付近で応答が大きくなっている。これは初期変位を求めるときに解析で得られた節点の速度値をそのまま用いたが、実際には 1 次モードだけでなく、9 次モードなど他のモードの速度成分が含まれているためであると考えられる。

以上の検討により、アーチモデルのように複数のモードが励起する構造物の場合にも (2) で提案した初期変位解放条件式が有効であることを確認した。

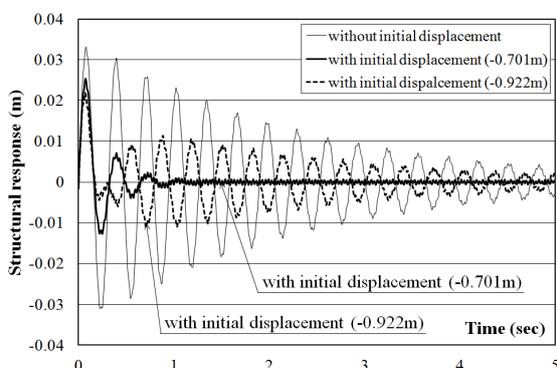


Fig.6 Comparison of impulse responses

(4) アーチモデルを用いた振動実験による制振効果の確認

空間構造モデルでの提案した設計式を用いた初期変位付与型 TMD の制振効果を実験的に検証するために、スパン 1.5m、ライズ 25cm、幅 15cm、厚さ 2.3mm の鋼板アーチモデルを製作し、インパルスハンマーを用いた打撃試験を行った。制御モードは逆対称 1 波の 1 次モード (7.12Hz) とした。TMD は 1 次モードの腹に設置した。

TMD のダンパーは非接触型の磁気ダンパーを用いた。磁気ダンパーはアルミニウム導体とネオジム磁石を用いて構成した。既往の研究の設計式^{文献①}で求められた理論値と比較したところ、実験値とほぼ一致することが確かめられた。TMD の初期変位は電磁石を用いて与え、インパルスハンマーでアーチモデルを打撃し、アーチ端部に設置された振動センサーがアーチの振動を感知するとコントローラーにより電磁石への電流が止まり、初期変位が解放される構成となっている。

最初にインパルスハンマーの打撃と同時に初期変位を解放した場合の試験結果を示す。Fig. 9 に TMD に初期変位を与えた場合と初期変位が無い場合の応答曲線を比較する。TMD の初期変位の大きさはほぼ最適値

である。初期変位が無い場合と比べて、応答初期の制振効果に優れていることが確認できる。一方で、初期以降の応答低減効果が減少するのは、微小振幅では TMD の錘が振動しないためである。



Fig.7 Vibration test

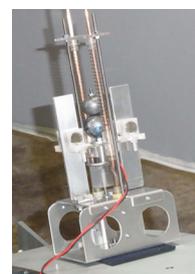


Fig.8 TMD model

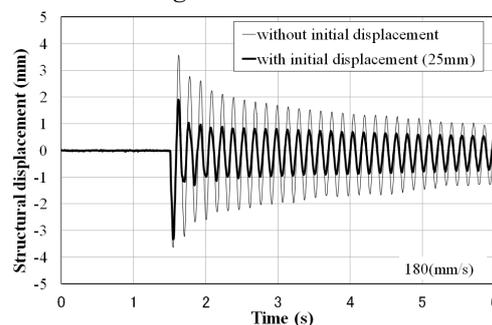


Fig.9 Comparison of impulse responses

Fig. 10 にタイマーを用いて、加振から半周期後に初期変位を解放した場合の応答曲線を示す。TMD が無い場合と比較しても、逆に制振効果が落ちている。このように初期変位付与型 TMD の制振効果は初期変位の解放時刻に敏感であることが分かる。初期変位の解放時刻に対する制振効果のロバスト性については今後さらに検討を進める。

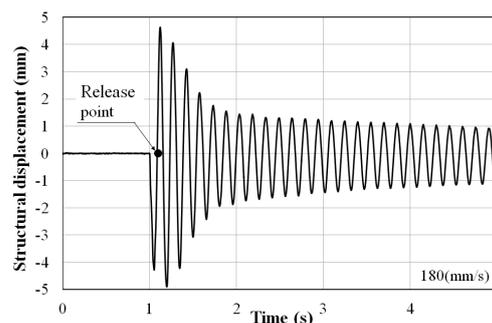


Fig.10 Impulse response

以上の(1)～(4)までに述べた研究成果により、提案した初期変位付与型TMDの設計法の空間構造モデルでの制振効果を解析的および実験的に確認し、適用可能性を確認することができた。一方で、本研究は主としてインパルス外力に対するものであり、地震力や風荷重を対象とした場合については、今後さらに研究を進めていく必要がある。

よって、当初の研究目的はおおむね達成することができたと考えられる。

<引用文献>

- ①背戸一登、山之内三男：磁気ダンピングを有する定数可変形動的吸振器の研究、日本機械学会誌 44 巻 378 号、pp.542-553、1978 年 2 月。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 3 件)

- ①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 年、査読有り。
- ②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 年、査読有り。
- ③吉中進、西山秀司、谷口与史也：インパルス外力下における初期変位付与型 TMD 制振効果の確認のための平板モデル実験、日本建築学会技術報告集、第 37 号、pp.835-840、2011 年、査読有り。

[学会発表] (計 12 件)

- ①吉中進、光藤龍郎、谷口与史也：初期変位付与型 TMD の初期変位解放条件式とアーチモデルへの適用、日本建築学会学術講演梗概集構造 I、pp.863-864、2014 年 9 月 13 日、神戸大学 (兵庫県神戸市)。
- ②光藤龍郎、吉中進、谷口与史也：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、日本建築学会近畿支部研究報告集、第 54 号・構造系、pp.249-252、2014 年 6 月 21 日、大阪工業技術専門学校 (大阪府大阪市)。
- ③吉中進：振動制御の現状と展望—TMD・アクティブ制振のシェル・空間構造への適用とアーチ振動実験—、日本建築学会構造委員会・シェル空間構造運営委員会、「シェル・空間構造」セミナー 2013 空間骨組構造の性能評価と制御、pp.51-72、2014 年 2 月 10 日、日本建築学会会館会議室 (東京都港区)。
- ④ Susumu YOSHINAKA and Yoshiya TANIGUCHI : Proposal of Design Formulas of Tuned Mass Dampers with Initial Displacement to Control Impulse Response, Proceedings of the 13th World Conference on Seismic Isolation, Energy Dissipation and Active

Vibration Control of Structures, Sendai, September 24-27, Paper No.865245, 2013.9.25, 東北大学 (宮城県仙台市)。

- ⑤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 の初期変位の設定、日本建築学会学術講演梗概集構造 I、pp.1037-1038、2013 年 9 月 1 日、北海道大学 (北海道札幌市)。
- ⑥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、日本建築学会近畿支部研究報告集、第 53 号・構造系、pp.521-524、2013 年 6 月 15 日、大阪工業技術専門学校 (大阪府大阪市)。
- ⑦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 1 インパルス外力に対する設計式の提案、日本建築学会学術講演梗概集構造 I、pp.877-878、2012 年 9 月 12 日、名古屋大学 (愛知県名古屋市)。
- ⑧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、pp.879-880、2012 年 9 月 12 日、名古屋大学 (愛知県名古屋市)。
- ⑨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 設計式の提案、日本建築学会近畿支部研究報告集、第 52 号・構造系、pp.357-360、2012 年 6 月 17 日、大阪工業技術専門学校 (大阪府大阪市)。
- ⑩吉中進、谷口与史也：振動モードを選択可能な初期変位付与型 TMD の提案、第 61 回理論応用力学講演会講演論文集、CD-ROM (OS12-03)、2012 年 3 月 7 日、東京大学生産技術研究所 (東京都目黒区)。
- ⑪吉中進：大スパン屋根構造への適用と制震効果の向上を目的とした新しい TMD 設計法の提案、日本建築学会近畿支部・構造力学部会コロキウム、構造力学講録第 53 号、pp.1-40、2012 年 3 月 16 日、大阪市立大学文化交流センター (大阪府大阪市)。
- ⑫ Susumu YOSHINAKA, Shuji NISHIYAMA and Yoshiya TANIGUCHI : Vibration Test of TMD with Initial Displacement under Impulse Loading, Proceedings of IABSE-IASS2011, September 20-23, CD-ROM 0175 (pp.1-8), 2011.9.21, ロンドン (英国)。

6. 研究組織

(1) 研究代表者

吉中進 (YOSHINAKA, Susumu)

大阪市立大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号：70401271