

機関番号：24402

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2009～2010

課題番号：21760440

研究課題名（和文）初期変位を与えたセミアクティブTMDによる過渡応答の制御

研究課題名（英文）Vibration Control of Transient Response by using Semi-Active Tuned Mass Dampers with Initial Displacement

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

研究成果の概要（和文）：（1）TMDが弱点とする過渡応答初期の制振効果を向上させることを目的として初期変位を導入する新しいセミアクティブTMDを提案し、数値解析による基礎的検討を実施し、最適初期変位や各種パラメーターに関する設計式を提案した。（2）提案した設計式を用いてインパルス外力を受けたときの大スパン屋根構造モデルにおける制振効果を解析的に確認した。（3）初期変位付与型TMDの小型モデルを試作し、平板モデルに対する制振効果を実験的に確認した。

研究成果の概要（英文）：(1) To effectively control transient response, we propose semi-active tuned mass dampers with initial displacement. We analytically studied about the basic characteristics and proposed design formulas for the optimal initial displacement and other design parameters. (2) We analytically confirmed the effect of vibration control of the proposed system for a large-span roof structure under an impulse load. (3) We made an experimental model of the tuned mass damper with initial displacement and experimentally confirmed the effect of vibration control with a plate model.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,300,000 円	390,000 円	1,690,000 円
2010年度	2,000,000 円	600,000 円	2,600,000 円
総計	3,300,000 円	990,000 円	4,290,000 円

研究分野：工学

科研費の分科・細目：建築学 建築構造・材料

キーワード：建築構造 振動制御 TMD 過渡応答 初期変位

## 1. 研究開始当初の背景

研究の背景を以下の2項目に整理して述べる。

（1）TMDの制振効果は構造物—TMDの全体系が安定した振動状態（TMDが作動してからある程度の時間が経過してTMDの振幅が大きい状態）にあることを前提としているため、定常的外力に対する制振効果は優れているが、地震力や衝撃力など非正常性が

強い外力に対する制振効果は定常的外力ほど期待できないことが確認されている。

（2）研究代表者（吉中進）は、これまで固有振動数の異なる複数の小型のTMDがあるバンド幅を持って設置されるMTMD（Multiple TMD）が有する構造物の固有振動数変動に対するロバスト性に着目して、大スパン構造を主対象に、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分散

型MTMD法を提案し、その制振効果を解析的および実験的に確認してきた。その結果、MTMDも通常のTMDと同様に、特に衝撃的な地震波に対してはあまり効果が期待できないことが分かった。

以上のことが、TMDまたはMTMDを地震動など非定常性の強い外力に対する応答制御に適用することを難しくしている一つの理由になっていると考えられる。

## 2. 研究の目的

1. で述べた背景を踏まえて、研究代表者（吉中進）は、TMDに初期変位を与える簡単な機構を導入することにより、応答の初期から強制的にTMDの振幅を大きくし、通常のTMDまたはMTMDの弱点である過渡応答初期の制振効果を向上させる手法を提案した。このように、初期変位を与える機構を導入することで従来のTMDの主要な制御外力であった機械振動のような定常振動や風荷重のみでなく、大規模な地震動や衝撃力などへもTMDまたはMTMDの適用範囲を拡大することが期待される。

本研究では、インパルスを外力として選択し、各種パラメータに関する設計式を提案し、提案した初期変位付与型TMDが有効であることを解析的および実験的に確認する。さらに、小型のTMDモデルを製作し、製作したモデルが初期変位付与型TMDとして有効に機能し、実際の装置として用いる際の原理モデルとして使用することができることを確認することを目的とする。

## 3. 研究の方法

研究の方法を以下の3項目に整理して述べる。

### (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、①初期変位の向きと大きさ、②同調比、③減衰比がある。1自由度の主振動系モデルを用いたインパルス応答解析により、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設計式を提案する。

### (2) 多自由度系モデルにおける制振効果の確認

多自由度系モデルとして、本研究では大スパン屋根構造モデルを例題として用いて、1. で提案した設計式の一般の建築構造物における有効性を数値解析的に確認する。

### (3) 平板モデル実験による制振効果の確認

通常のTMDに加えて、電磁石、コントローラー、振動センサーを付加した初期変位付与型TMDの小型モデルを製作し、鋼板モデルに設置し、インパルスハンマーを用いた打撃試験を行う。

## 4. 研究成果

研究成果を3. で分類した3項目に整理して述べる。

### (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、図1に示すように、①初期変位の向きと大きさ、②同調比、③減衰比がある。

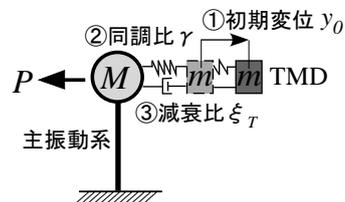


図1 設計パラメーター

このうち、②同調比と③減衰比についてはTMDの最大のメリットである共振応答低減効果の活用を前提とし、TMDが過渡応答初期で制振効果を発揮しにくい弱点を初期変位を付与することにより向上させ、過渡応答、特に地震動を受けたときの時刻歴全体に対する制振効果を向上するという本研究の目的に基づいて、調和外力に対する最適化パラメータの設計式を用いることとした。

TMDの初期変位の大きさを変えた場合のインパルス応答の比較の例を図2に示す。図に示すように、初期変位を大きくすると初期の応答は大きく低減するが、後期の応答が逆に大きくなる。この理由について摂動法を用いたTMDの初期変位を考慮した自由振動応答式を分析した結果、主振動系にTMDを取り付けて2自由度系となることにより、固有振動数の近接した2つの振動モードが生じ、応答の時刻歴で重畳することで“うなり”が生じ、初期変位の大きさにより“うなり”の位相が変化するためであることが分かった。

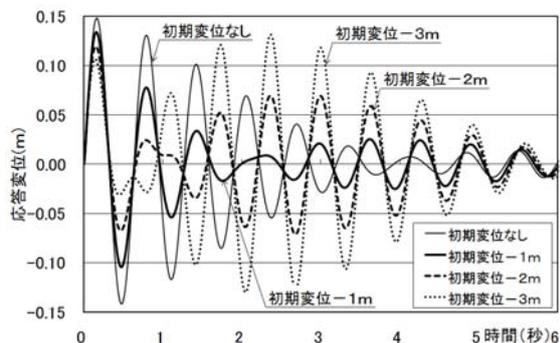


図2 初期変位の大きさと時刻歴応答変位

衝撃力直後の応答の大きさと、“うなり”の固有周期に対応する時間経過後の応答の大きさはトレードオフの関係にある。そこで、インパルスを受けた後期の応答が過大とならず、且つ初期の応答を可能な限り低減させ

ることを目標として、初期変位の無い通常のTMDの場合にTMDの振幅が大きくなり制振効果が明確になるインパルスを受けてから1周期経過後の応答を「残留振動」と定義し、残留振動の最大振幅が最も小さくなる時の初期変位を最適なTMD初期変位とした。

具体的には、数値解析による検討結果から、本研究で提案したTMDの最適初期変位は、 $\omega t = 5\pi/2$ のときの振幅と、 $\omega t = 5\pi/2$ 以降の“うなり”の影響を強く受ける時刻の振幅と関係することに注目して、最適初期変位の設計式を導いた。

以上の考え方に基づいたTMDの質量比2.0%のときの最適初期変位の設計式を(1)式に示す。なお、質量比2.0%以外のときの初期変位の設計式も同様の考え方により構築可能である。

$$y_0 = -11.1 \times \frac{\dot{x}_0}{\omega_a} \quad (1)$$

ここで、 $\dot{x}_0$ は主振動系がインパルスを受けたときの応答初速度、 $\omega_a$ は主振動系とTMDの固有円振動数の平均値である。

(2) 多自由度系モデルにおける制振効果の確認

(1)で提案した設計式の一般的な建築構造物への適用性を確認し、建築構造物における初期変位付与型TMDの制振効果を確認するために、図3に示す大スパン構造屋根モデルを対象として、基礎部にインパルス外力を与えたときの解析的検討を実施した。TMDを設計する制御モードは有効質量の大きい図4に示す6次モードとした。

合計質量比が2%のTMDを6次モードの腹(図3のA点とB点)に分散式に設置したときのA点とB点における時刻歴応答変位を図5に示す。本検討モデルにおける(1)式で計算した最適初期変位は55.7cmであり、インパルス外力の作用と同時に解放した。図5に示すように、初期変位が無い通常のTMDは応答初期には制振効果は発現されない。一方、TMDに最適初期変位を与えることにより、応答初期と時刻歴の応答全体共に制振効果が大きく向上することが確認できる。

また、この例のように制御モードの腹が複数個存在する場合は、構造全体で良好な制振効果を得るためには、TMDを1点ではなく、空間的に分散配置する必要があることが分かった。この理由については現在確認中である。

図6にTMDの初期変位の大きさと、A点とB点での構造物の応答変位の大きさの関係を示す。最適初期変位近傍でインパルス外力直後の振幅(図中の $\omega t = \pi/2$ の振幅)およ

び時刻歴全体の最大振幅がともに小さくなっており、(1)で提案した設計式の本モデルへの適用性が確認できた。

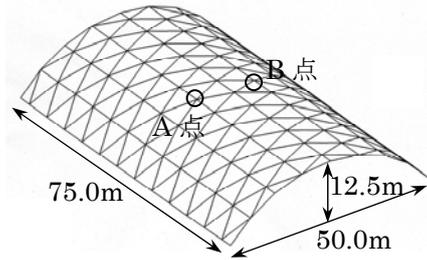


図3 大スパン構造屋根モデル

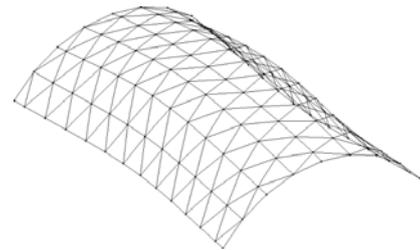


図4 制御モード(6次モード)

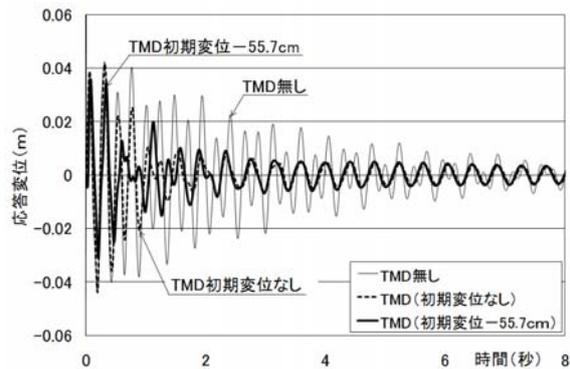


図5 A点とB点の時刻歴応答変位

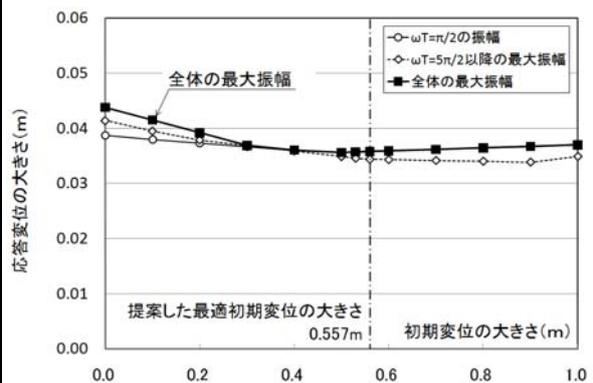


図6 TMDの初期変位と構造物の応答変位

(3) 平板モデル実験による制振効果の確認  
初期変位付与型TMDの小型模型を試作し、有効に機能することを確認するとともに、

初期変位付与型TMDの制振効果を実験的に確認するために、小規模の平板モデルを用いて、インパルスハンマーを用いた打撃試験を行った。

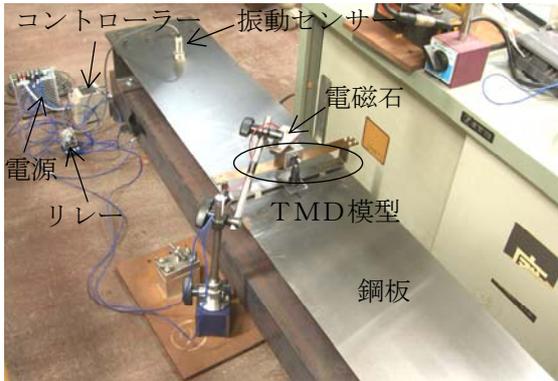
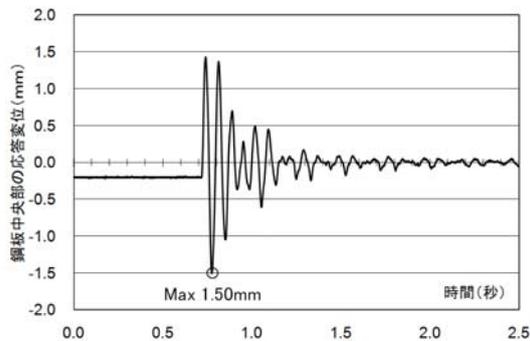


写真1 試験体全体写真

初期変位付与型TMDは写真1に示すように、通常のTMD模型に加えて、電磁石、コントローラー、振動センサーで構成される。

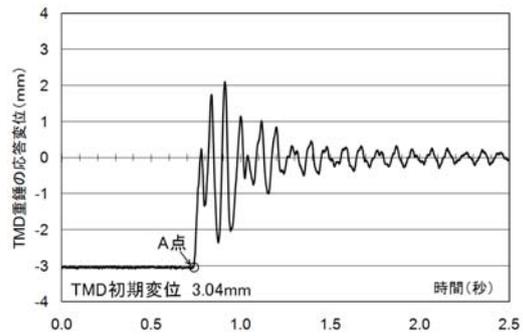
電磁石でTMD模型の錘を持ち上げて初期変位を与え、インパルスハンマーで鋼板を打撃すると、振動センサーが感知して電磁石の電源がOFFとなり、TMDの初期変位が解放されるシステムとなっている。

図7にTMDの初期変位が3.04mmのときの鋼板中央部とTMDの重錘の時刻歴応答変位を示す。図8にTMDの初期変位が9.28mmのときの鋼板中央部の時刻歴応答変位を示す。図9に初期変位が5.20mmのときの時刻歴応答曲線から求めたフーリエスペクトルを示す。2つの振動モードが時刻歴で重畳していることが確認できる。図7と図8より、TMDの初期変位が大きくなるにつれて応答が最大となる時刻がインパルス加振を受けてから3/4周期目、9/4周期目と後ろの周期に移動し、2つの振動モードが時刻歴で重畳した結果生じた“うなり”の位相が変化していることが確認できる。



(a) 鋼板中央部の時刻歴応答変位

図7 初期変位 3.04mm のとき



(b) TMD重錘の時刻歴応答変位

図7 初期変位 3.04mm のとき

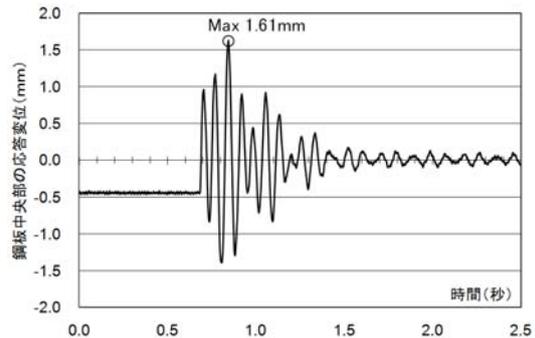


図8 初期変位 9.28mm のとき

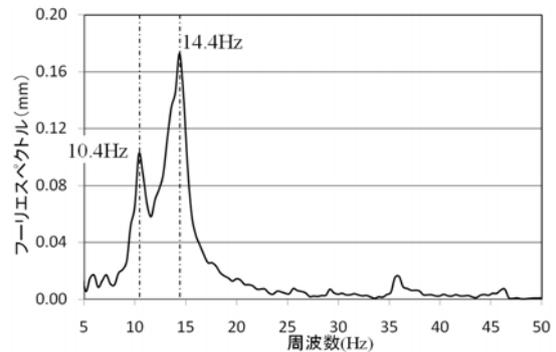


図9 初期変位 5.20mm のときの

フーリエスペクトル

図10にTMD初期変位の大きさと鋼板中央部の応答変位の関係について、解析結果と実験結果を比較する。実験結果には多少のばらつきが存在するが、初期の応答変位(図中の $\omega t = \pi/2$ )または時刻歴全体の最大振幅に関して、全体の傾向は解析結果と良く一致することが確かめられた。

以上までに述べた検討結果より、これまで解析的に検討した初期変位付与型TMDの制振効果を実験的に確認するとともに、本試験で提案したTMD模型は初期変位付与型TMDとして有効に機能することを確認した。

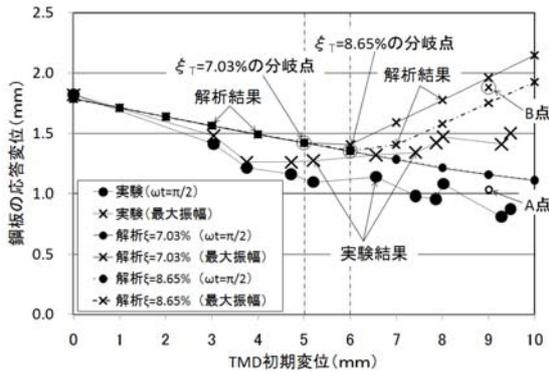


図 10 解析結果と実験結果の比較

以上の(1)～(3)までに述べた研究成果により、初期変位付与型TMDの制振効果を解析的および実験的に確認することが出来た。さらに提案した設計式は実際の建築構造物へも十分に適用可能性があることを確認した。さらに、試作した小型のTMDモデルは初期変位付与型TMDとして有効に機能し、実際の構造物に適用する際の原理モデルとして十分に使用可能であることを確認した。

よって、当初の研究目的は達成することができたと考えられる。

今後は、空間的な広がりを持つ構造物における初期変位付与型TMDの最適配置に関してさらに検討するとともに、インパルス外力以外の正弦波や地震動など様々な種類の外力に対する設計法を構築する予定である。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計1件)

①吉中進, 谷口与史也: 初期変位付与型TMDを用いた空間構造の過渡応答の振動制御—初期変位設計式に関する基礎的検討—, 日本建築学会構造系論文集, 第653号, pp.1299-1308, 2010年7月, 査読有り.

[学会発表] (計5件)

① Susumu YOSHINAKA, Yoshiya TANIGUCHI, Masahiro NAKATANI: Vibration Control using Tuned Mass Dampers with Initial Displacement for Spatial Structures, IASS Symposium 2010, CD-ROM (pp.1868-1881), 2010.11, Shanghai, China.

②吉中進: 初期変位付与型TMDによる過渡応答の振動制御, その2 初期変位設計式の提案, 日本建築学会学術講演梗概集構造I, pp.789-790, 2010年9月, 富山大学.

③西山秀司, 吉中進, 谷口与史也: 初期変位

付与型TMDによる過渡応答の振動制御, その3 単層円筒ラチスシェルにおける制振効果, 日本建築学会学術講演梗概集構造I, pp.791-792, 2010年9月, 富山大学.

④西山秀司, 吉中進, 谷口与史也: インパルスを受けた時の初期変位付与型TMDの制振効果に関する平板モデル実験, 日本建築学会近畿支部研究報告集, 第50号・構造系, pp.309-312, 2010年6月, 大阪工業技術専門学校.

⑤吉中進, 谷口与史也: 初期変位付与型TMDによる過渡応答の振動制御, その1 提案概要と衝撃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.769-770, 2009年8月, 東北学院大学.

[産業財産権]

○出願状況 (計1件)

名称: 建物の初期変位付与型 TMD 制振システム

発明者: 吉中進

権利者: 吉中進

種類: 特許

番号: 特願 2009-156526

出願年月日: 21年7月1日

国内外の別: 国内

## 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

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし