Kobe University Repository : Kernel

PDF issue: 2025-07-15

周期変動に適応可能なセミアクティブ同調質量ダンパに関する研究

中井，武

(Degree)
博士（工学）
(Date of Degree)
2022-03-07
(Date of Publication)
2023-03-01
(Resource Type)
doctoral thesis
(Report Number)
乙第3412号
(URL)
https://hdl.handle.net/20.500.14094/D2003412

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。

（別紙様式３）

論　文　内　容　の　要　旨

氏　名　　中　井　　武

論文題目

周期変動に適応可能なセミアクティブ同調質量ダンパに関する研究

論文内容要旨

同調質量ダンパ（TMD : Tuned Mass Damper）は古くから知られた振動制御技術であり、建築分野では主に中小地震や風揺れを対象とした高層建物用の制震装置として普及している。近年では、大質量の錘と大ストロークを許容する支持機構を組み合わせることによって、これを大地震対応に拡張し、鉄骨造の既存超高層建物の長周期地震動対策として利用される事例が増加している。これは、外観デザインの棄損や建物利用者への影響を最低限に抑えながらも、耐震安全性と居住性を同時に改善することができる有用な技術であるが、鉄筋コンクリート（RC）造の建物に用いるにあたっては、TMD の同調ずれに対する配慮が必要となる。RC 造建物では地震や経年によって躯体にひび割れが生じ、固有周期が初期の 1.5～2 倍程度まで長くなるため、通常の TMD では十分な効果を得ることができないためである。本博士論文では、このような周期変動する建物に対してセミアクティブ制御によって適応する大地震対応 TMD を開発することを目的としている。

1 章では、研究背景と既往研究について述べた後、本研究の全体構成を示した。本研究では、提案するセミアクティブ TMD に関して、以下の 3 点を主な検討事項としている。第一は、「実用的な機構の提案と設計法の構築」である。超高層建物用の大地震対応 TMD では、数百トン級の大質量の錘を平面二方向に、±1 メートルを超える大きなストロークで稼動させる必要がある。周期変動に適応可能な TMD を実現するためには、この条件を満たしながらも即座に TMD の共振周期を変化させられる機構、およびその設計法が必要とされる。第二は、「安定した制御則の構築と地震応答解析による効果の検証」である。地震力の作用

時間中に時々刻々と変化する建物状態に TMD を適応させるための制御法を提案し、従来型の TMD との比較を通してその妥当性を検証する。第三は、「システムの試作と振動台実験による制御動作の検証」である。TMD の制御システムにおいては、計測ノイズやコントローラの処理速度の問題など、シミュレーション解析上に表れない、実機ならではの問題が存在する。実際に TMD の制御システムを試作し、縮小試験体を用いた二方向同時入力の振動台実験により、提案した TMD の機構や制御システムの動作に問題がないことを確認する。

2 章では、はじめに最も基本的な 1 自由度のパッシブ型 TMD（単一 TMD）を対象として、検討に用いる基本的なパラメータを整理するとともに、制震効果をランダム振動論に基づいて定量的に評価する手法を示した。本論文では、定常ホワイトノイズ地動に対する制震対象（主系）の応答変位の RMS 値（平均応答）に着目し、これを制震効果（平均応答の低減率）の評価に用いる。この手法に基づいて、単一 TMD の設定が最適設定からずれた場合の影響や、主系の固有周期が長くなった場合の影響を評価し、TMD における同調の重要性を示した。

次に既往の研究で提案されている多重 TMD、および剛性・減衰可変 TMD について検討した。多重 TMD は、互いに異なる同調周期を有する複数の TMD を設置する方法であり、完全にパッシブな構成で主系の周期変動に対応することができる。しかし、各 TMD の錘が全て同時に同調することはないため、投入する錘質量に対する制震効率の面で課題が残る。剛性・減衰可変 TMD は、剛性と減衰を両方とも自在に変化させられる TMD であり、制震効率の面では多重 TMD を上回る。しかし、質量の大きな錘を使用する場合は周期調整機構の実現難易度が高く、既往の研究で提案されている機構では超高層建物用の大地震対応 TMD として用いることが難しいことを示した。

3 章では、新しい周期適応型のセミアクティブ TMD の機構および設計法を提案した。提案する機構は、2 層に積み重ねた復元力要素の一方に並列に可変減衰要素を設けるものであり、その減衰係数を切り替えるだけで主系の周期変動に適応することができる。本研究では、これを減衰係数切替式適応 TMD（ACVD TMD: Adaptive Control by Variable Dampers）と名付け、その周期調整の原理について複素剛性の観点から考察した。減衰係数を変えた際に TMD の共振周期が変化すること、またその際に等価減衰定数が連動して変化することを明らかにし、この特徴を利用して ACVD TMD の復元力要素の剛性、および可変減衰要素の減衰係数を設計する手法を構築した。この設計法による TMD の制震効果を、他の TMD（多重 TMD、剛性・減衰可変 TMD）と比較し、ACVD TMD が広い周期帯域に対して良好な制震効果を有することを確認した。

ACVD TMD においては可変減衰要素の減衰係数を連続的に変化させる必要

は無く、3段階程度の切替式で、想定する周期変動に対して十分な制震効果を発揮することができる。このように、TMD装置がとり得る値を予め規定することは、可変オイルダンパの機構の合理化のみならず、4章で提案する制御法を適用するにあたっての必要条件でもある。また、ACVD TMDにおいてはその構成上、錘以外の質量（中間質量）が存在するが、このような中間質量が制震効果に与える影響を把握し、目安として錘質量の 20%程度までは影響が小さいことを示した。さらに、中間質量が無視できないほど大きい場合に、設計値を補正して制震効果を改善する手法を提案した。

4章では、周期適応型TMDの新しい制御法を提案するとともに、地震応答解析による検証結果を示した。はじめに、既往の研究において提案されている剛性・減衰可変TMDの制御法について、その特徴や制御における課題を把握した。「入力の卓越振動数にTMDの同調周期を合わせる制御法」は、特に狭帯域の入力外乱に対して有効であり、最適設定された単一TMDを上回る制震効果を得ることができる。しかし、この制御法はある程度広い振動数帯域を有する入力外乱に対して十分な効果を発揮することができず、地震動を想定した場合は「建物の固有振動数にTMDを同調させる制御法」が有効となる。この制御法を実現するには、速度と安定性に優れた固有周期の同定法が必要とされるため、本研究ではRC造の建物の周期同定にしばしば用いられるARXモデルを用いたシステム同定について検討を行った。その結果、同定結果が設定パラメータによる影響を受けやすく、妥当な結果を得るためには試行錯誤が必要とされるため、信頼性が重視される大地震対応 TMD の制御法としては課題が残ることを示した。

このような状況を背景として、本研究ではエネルギ吸収効率を評価指標とした新しい制御法を提案した。この制御法の基本コンセプトは、TMDがとり得る状態（TMDモード）に対応した数値計算モデルを予め準備し、TMD設置位置の応答加速度をその数値計算モデルに入力した際に、単位時間あたりの吸収エネルギが最大となるTMDモードを選択するというものである。本制御法は制御に要する情報がTMD設置位置の応答加速度だけであり、建物への適用が非常に容易である。また、TMD の状態や入力外乱の特性によらず、安定的に適切なTMD設定を見つけることができ、入力外乱が狭帯域の時は入力の卓越周期に同調し、入力外乱が広帯域のときは建物周期に同調するという、制御において望ましい特性を有する。本研究ではこの制御法を、ACVD TMDの制御アルゴリズムに落とし込み、地震応答解析によってその効果を確認した。建物モデルはRC造の超高層建物を模した弾塑性多質点系とし、他のTMDを設置したモデルと、制震効果およびTMDの応答ストロークを比較した。結果として、ACVD TMDの制震効果はパッシブ型のTMD（単一TMD、二重TMD）のそれを上回っており、提案したTMDの機構および制御法の妥当性が確認された。

5章では、ACVD TMDの試設計を示し、その実現可能性の検証を目的とした振動台実験について述べた。はじめに、実大（錘質量約400トン）のTMDユニットの試設計を通じて、構成要素（錘、中間フレーム、積層ゴム、オイルダンパ）の概略サイズおよびそれらの設計法を示した。次に、1/10スケールの縮小試験体を用いた振動台実験の概要、および実験結果を示した。振動台実験では、はじめに定常正弦波入力による基本特性確認試験を実施し、オイルダンパの減衰係数の切り替えのみで TMD の同調周期を変えることができるというACVD TMD特有の振動性状を実験的に確認した。次に、建物頂部位置の水平二方向の揺れを振動台で再現した、地震応答波試験を実施した。その結果、試作した制御システムは想定通り動作しており、試験体の挙動はシミュレーション解析モデルと良好に対応することが確認された。なお、実験で用いた制御システムは実機と同様の構成としており、ACVD TMDの実用化に向けた目途をつけることができた。

6章では、以上の検討結果を総括するとともに、今後の課題と展開について述べた。本研究で提案したACVD TMDの構成および制御法は汎用的なものであり、建築分野だけではなく土木や機械など他分野への適用拡大が期待される。

（別紙１）　　論文審査の結果の要旨

氏名	中　井　　武		
論文題目	周期変動に適応可能なセミアクティブ同調質量ダンパに関する研究		
審査委員	区　分	職　名	氏　　名
	主　査	教　授	藤　谷　秀　雄
	副　査	教　授	多　賀　謙　蔵
	副　査	教　授	向　井　洋　一
	副　査	京都大学 教授	池　田　芳　樹
	副　査		

要　　旨

同調質量ダンパ（Tuned Mass Damper（以下、TMD））は、比較的実績の多い振動制御技術であり、建築分野では、従来は中小地震や風による揺れを低減することを目的に活用されてきた。近年は長周期地震動による揺れを低減することを目的に、大質量の錘を用い、大ストロークを許容する支持機構を組み合わせることによって、既存の超高層建物に適用される事例も増加している。これらは、外観デザインを変化させずに、建物の利用制限を最低限に抑えながら、耐震安全性と居住性を同時に改善することができる有用な技術として、主に鋼構造の建物に用いられている。

一方、鉄筋コンクリート（RC）造の建物においては、建物本体の変形が増大するにしたがって周期が伸長されるために、TMD の周期が同調状態からずれることになり、その対策が必要となる。RC 造の建物では、大地震時には、建物本体の周期が初期の 1.5～2 倍程度に長くなるため、周期が固定された TMD では十分な効果を得ることができない。

そこで本論文では、周期が変動する建物に対して、セミアクティブ制御により建物本体の周期の変動に適応できる TMD（以下、セミアクティブ TMD）を提案することを目的としている。

第１章では、研究背景と既往研究を整理し、本論文の全体構成を示している。本論文では、提案するセミアクティブ TMD に関して以下の３点を主な研究項目としている。

1)実用的な機構の提案と設計法の構築

超高層建物に適用され大地震に対応できる TMD では、数百トンの大質量の錘を、平面内の二方向に±1メートルを超える大きなストロークで稼動させる必要がある。周期変動に適応可能な TMD を実現するために、この条件を満足しながら、できるだけ短時間に TMD の周期を変化させられる機構およびその設計法を構築する。

2)安定した制御則の構築と地震応答解析による効果の検証

地震動の作用中に時々刻々と変化する建物の周期に TMD を適応させるための制御法を提案し、従来型の TMD との比較によって、建物の応答低減効果を検証する。

3)システムの試作と振動台実験による動作の検証

TMD のセミアクティブ制御システムにおいては、ノイズやコントローラの処理速度の問題など、数値シミュレーションでは現れない実機ならではの問題が存在する。そのため、実際に TMD の制御システムを試作し、縮小試験体を用いた二方向同時入力の振動台実験により、提案した TMD の機構や制御システムの動作に問題がないことを確認する。

第２章では、まず１自由度系のパッシブ型 TMD（以下、単一 TMD）を用いて、TMD の周期が同調周期からずれた場合や、建物本体の固有周期が伸長された場合の応答低減に与える影響を評価している。次に、周期の異なる複数の TMD を組み合わせたパッシブ型 TMD（以下、多重 TMD）、剛性と減衰を可変にできる TMD（以下、剛性・減衰可変 TMD）について、建物の周期変化への適応性を比較検討している。その結果、剛性・減衰可変 TMD については、多重 TMD より建物の応答低減効果が大きいことを確認できたが、質量の大きな錘を使用する場合は剛性可変機構の実現が難しいことを示している。

第３章では、TMD の減衰係数を切り換えることによって建物本体の周期の変動に適応できる減衰係数切替式適応 TMD（Adaptive Control by Variable Dampers TMD（以下、ACVD TMD））の機構と設計法を提案し、その応答低減効果を検証している。この機構は、２層に積み重ねた復元力要素（積層ゴム）の上層の方に可変減衰要素を設けるものであり、その減衰係数を切り替えることによって建物本体の周期

氏名　中　井　　武

変動に適応するものである。減衰係数を切り替えた際に TMD の周期が変化すること、またその際に等価減衰定数が連動して変化することを明らかにし、その特徴を利用した ACVD TMD の周期および可変減衰要素の減衰係数を設定する手法を構築している。そして、この ACVD TMD の応答低減効果を、他の TMD（多重 TMD、剛性・減衰可変 TMD）と比較し、ACVD TMD が地震動の広い周期帯域に対して良好な応答低減効果を有することを確認している。

また ACVD TMD においては、可変減衰要素の減衰係数を３段階程度に切り替えることで、想定する建物本体の周期変動に適応し十分な応答低減効果を発揮することを確認している。このことは、可変減衰要素として用いる可変オイルダンパの機構をシンプルにできるというメリットにつながる。

さらに ACVD TMD においては、復元力要素（積層ゴム）を２層に積み重ねることから、それらを上下に接合する中間フレームなど、錘以外の質量（中間質量）が存在し、このような中間質量が応答低減効果に与える影響を把握し、錘質量の 20%程度までなら応答低減効果に与える影響が小さいことを示している。

第４章では、ACVD TMD の制御法を提案するとともに、地震応答解析によってその制御法の妥当性の検証を行っている。地震動による建物の応答を低減するためには、時々刻々変化する建物の固有周期に対して TMD を同調させる制御法が有効である。それを実現するには、モデルパラメータの収束速度と安定性に優れた固有周期の同定法が必要とされるため、RC 造の建物の周期同定にしばしば用いられる ARX モデルを用いたシステム同定について検討を行っている。しかし、同定結果が設定パラメータによる影響を受けやすく、妥当な結果を得るためには試行錯誤が必要とされるため、信頼性が重視される大地震時に適用する TMD の制御法としては課題が残ることを示している。

その知見を踏まえ、本論文では、エネルギ吸収効率を評価指標とした新しい制御法を提案している。この制御法の基本コンセプトは、TMD がとり得る状態（以下、TMD モード）に対応した数値計算モデルを予め準備し、TMD 設置位置の床応答加速度をその数値計算モデルに入力した際に、単位時間あたりの吸収エネルギが最大となる TMD モードを選択するというものである。本制御法は制御に要する情報が TMD 設置位置の床応答加速度だけであり、建物への適用が非常に容易である。また、TMD の状態や入力外乱の特性によらず、可変減衰要素の適切な減衰係数を安定的に見つけることが可能であることが示されている。本論文ではこの制御法を、ACVD TMD の制御アルゴリズムに採用し、地震応答解析によってその効果を確認している。建物モデルは RC 造の超高層建物を模した弾塑性多質点系とし、他の TMD を設置したモデルと、応答低減効果および TMD の応答ストロークを比較した結果、ACVD TMD の応答低減効果はパッシブ型の TMD（単一 TMD、二重 TMD）のそれを上回っており、提案した TMD の機構および制御法の妥当性を確認している。

第５章では、ACVD TMD の試設計を行い、その実現可能性の検証を目的とした振動台実験について述べている。はじめに、実大（錘質量約 400 トン）の TMD ユニットの試設計を通じて、構成要素（錘、中間フレーム、積層ゴム、可変オイルダンパ）の概略サイズおよび力学特性の設計法を示している。次に、1/10 スケールの縮小試験体を用いた振動台実験の概要、および実験結果を示し、可変オイルダンパの減衰係数の切り替えのみで TMD の同調周期を変えることができるという ACVD TMD の動作を実験的に確認している。最終段階として、建物頂部位置の水平二方向の揺れを振動台で再現した地震応答試験を実施し、試作した制御システムは想定通り動作しており、試験体の挙動は数値シミュレーションによる結果と良好に対応することを確認している。なお、実験で用いた制御システムは実機と同様の構成としており、ACVD TMD の実用化に向けた目途をつけたと言える。

第６章では、本論文の研究結果を総括するとともに、今後の課題を述べている。

・特記事項　　なし
・特許登録数　０　件
・発表論文数　５　編

本研究は、周期変動が伴う建物の振動制御を行うための同調質量ダンパについて、建物本体の周期変動に適応可能にするセミアクティブ制御の実現性を研究したものであり、その制御方法および効果の検証について重要な知見を得たものとして価値ある集積である。提出された論文は工学研究科学位論文評価基準を満たしており、学位申請者の 中井　武 は、博士（工学）の学位を得る資格があると認める。