

氏 名	金 子 美 香
授 与 学 位	博 士 (工 学)
学位授与年月日	平成 5 年 11 月 10 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 5 条第 2 項
最 終 学 歴	昭 和 59 年 3 月 東北大学工学部建築学科卒業
学 位 論 文 題 目	付加質量型制振装置を用いた高層建物の 振動制御機構に関する研究
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 和泉 正哲 東北大学教授 柴田 明德 東北大学教授 杉村 義広

論 文 内 容 要 旨

近年、高層建物の増加に伴って、塔状構造物や高層建物の強風や地震による揺れを、各種装置または機構によって制御しようとする「制振」が注目されるようになり、研究だけではなく実用化も盛んになってきている。中でも、建物頂部に付加質量型の制振装置（マスダンパー）を設置する方法は、装置がコンパクトで設置が比較的簡単であり、維持管理も容易であることなどの理由によりその主流を占めている。本研究は、この付加質量型制振装置の最適設計への指標を示すことを目的とする。

付加質量型制振装置の代表的なものとしては、外部から動力を必要としない受動型のチューンド・マスダンパー（TMD）、TMD に外部から制御力を加えて受動的な効果と能動的な効果の両方を期待したハイブリッド・マスダンパー（HMD）、HMD の周期を長くして減衰要素を取り除き、制御力のもつ能動的な効果のみを期待したアクティブ・マスダンパー（AMD）の 3 種類が挙げられる。TMD は、既に海外や日本国内において多くの塔状構造物や高層建物に設置され、その効果が確認されている。これに対して最近では、制御力を加えることによって、より大きな制振装置効果が期待できる能動的付加質量型制振装置（HMD、AMD）が注目され始めている。本研究では、これら 3 種類の制振装置を中心に比較検討を行う。

付加質量型制振装置による応答制御の特性については、多くの研究者によって種々の観点から研究が行われてきたが、その総合的な検討は為されておらず、不明解な点も多い。本研究では、特に、以下に示す項目に着目して検討している。

- (1) 装置の最適なパラメータ（固有振動数および減衰定数）

- (2) 高次モードの制御特性
 - (3) エネルギーの伝達および吸収特性
 - (4) 装置を構成する各要素（ばね要素，減衰要素，制御力要素）の具体的な働き
- 本論文は全文6章で構成されている。

第1章 序 論

第1章では，本研究の目的，概要および構成について述べている。

第2章 既往の研究

第2章では，制振の研究の背景および本論文で検討している付加質量型制振装置に関する既往の研究をまとめている。また，本論文で特に注目している付加質量型制振装置のエネルギー吸収特性を扱った研究や，制振の目的（応答低減の指標）に関する研究についても整理している。

第3章 付加質量型制振装置の応答制御

第3章では，付加質量型制振装置の応答制御特性について検討している。

最初に，受動的付加質量型制振装置（TMD）および能動的付加質量型制振装置（HMD）の最適パラメータについて検討している。一般に，TMDやHMDのパラメータ（固有振動数および減衰定数）は，Den Hartogの提案式から求めた最適値に設定されることが多いが，実際には，応答低減の評価基準を何にするのかによって，最適なマスダンパーのパラメータは異なる。また，HMDの場合は，どの程度の制御力をかけるのかによっても異なってくる。ここで言う最適とは，TMDの場合は，「建物の応答に対する何らかの評価基準が最小または最適」という意味であり，HMDの場合は，「同じ応答低減効果を得ようとした時に必要な制御力が最小」という意味である。

本論文では，このマスダンパーの最適パラメータについて検討を行い，整理している。特にHMDの場合には，建物やマスダンパーの定数が変わると，同程度の応答低減効果を期待した時の制御力の大きさや，制御ゲインを設計する際の評価関数の重みの係数が変化するため，無次元化した値で整理をしている。その結果，マス比が数%程度と小さいTMDの場合には，どの評価基準で最適パラメータを求めてもあまり違いはなく，また，HMDで制御力が比較的小さい場合には，制御力の無い場合の最適パラメータを用いても制御効果にはほとんど影響しないが，マス比が大きいTMDやHMDで大きな制御力を加える場合には，パラメータの設定に注意を払う必要があることが確認された。特にHMDの制御力の大きさは，マスダンパーの減衰定数にはあまり影響を受けないが，固有振動数には大きく影響されることがわかった。

次に，50階建て高層建物を応答制御することを想定して，各制振装置（TMD，HMD，AMD）の制御特性を比較検討している。TMDでは，同調振動数付近のみで制御効果があるのに対して，TMDに制御力を付加したHMDでは，TMDよりも広い振動数範囲で制御効果があり，しかもすべての振動数領域でのTMDよりも大きな制御効果がある。また，加速度をTMDの7割程度に低減する制御力を加えようとすると，風応答のように1次モードの卓越する場合には，HMDはAMD

の $1/3 \sim 2/3$ 程度の制御力、制御パワーしか必要とせず、効率的である。また、過去の研究では、高次モードの制御についてHMDとAMDで比較検討されているものは数少ないが、本論文では、理想的なモード制御を行う場合、高次モードの制御に対しても、HMDはAMDに比べて不利にならないことを明らかにした。一方、特定の固有振動数をもたないAMDは、全振動数領域で一律な応答制御効果があり、入力幅広い振動数範囲にわたる場合に効果的であると言える。

また、能動的な制御の際に問題となる制御の時間遅れや制振装置の周期ずれに対する安定性についても検討し、特に複雑な制御回路を組まない限り、時間遅れはあまり問題にならないこと、制振装置の周期ずれも2割程度であれば、制御効果にはあまり影響せず、ロバスト性のあることを確認している。

第4章 付加質量型制振装置のエネルギー吸収特性

第4章では、付加質量型制振装置の特性を、エネルギー吸収の観点から検討している。これまでの研究において、付加質量型制振装置の制御特性を、エネルギーの観点から検討している例は数少ない。付加質量型制振装置の付いた系では、外乱により建物に入力されたエネルギーが建物の振動エネルギーとなり、その一部は装置に伝達され、残りは建物減衰によって吸収される。また、装置に伝達されたエネルギーは、装置減衰要素または制御力要素によって吸収される。本論文では、各制振装置(TMD, HMD, AMD)の付加された系に対して、これらの一連のエネルギー伝達および吸収の基本的特性を振動数領域で検討する。各制振装置のエネルギー吸収特性は、建物側から見た場合と制振装置側から見た場合に分けて整理している。

建物側から見た場合には、入力エネルギーに対する各制振装置のエネルギー吸収の割合や、建物のもつ振動エネルギーがどの程度装置の振動エネルギーに変換されているかに着目している。TMD, HMD, AMDの単位時間当たりのエネルギー吸収特性を振動数領域で比較検討すると、TMDが同調振動数付近のみでエネルギー吸収効果があるのに対して、HMDは同調振動数を中心に幅広い振動数領域でエネルギー吸収効果があり、AMDはすべての振動数領域で一律にエネルギーを吸収する。建物とマスダンパーの振動エネルギーを比較すると、TMDの場合は、マスダンパーと建物とのマス比を1.0以下の範囲内で大きくしても、マスダンパーのパラメータを建物応答に対して最適に設定している限り、マスダンパーの振動エネルギーが建物の振動エネルギーを超えることはない。これに対してHMDの場合には、実用の範囲でそれほど大きくない制御力を加えても、マスダンパーの振動エネルギーが建物の振動エネルギーを超えており、制御力は建物の振動エネルギーを付加マスに伝える上で大きな役割を果たしていることがわかる。

制振装置側から見た場合には、エネルギー伝達、吸収の過程における制振装置の各構成要素の働きに着目している。これまでの研究では、付加マス、ばね要素、減衰要素、制御力要素で構成される付加質量型制振装置の制御特性を、総合的に検討しているものがほとんどで、各構成要素が応答制御を行う際にどのような働きをしているかについては、言及されていない。本論文では、建物の振動エネルギーが付加マスに伝達され吸収される過程で、制振装置を構成する各要素がどのような働きをしているかを分析している。

その結果、TMD、HMDでは主にばね要素によって建物からマスダンパーへエネルギーが伝達され、AMDでは制御力要素によって伝達されることが明らかになった。また、マスダンパー内で吸収されるエネルギーを見ると、制御力要素は、AMDの場合はエネルギーを吸収する働きをするが、TMDとして最適なパラメータを用いたHMDの場合は、エネルギーを供給する側に働き、その分、減衰要素の吸収しなければならないエネルギーが大きくなることがわかった。但し、HMDの減衰定数を小さくすると、制御力要素が逆にエネルギー吸収側に働くことから、制御力要素によるエネルギーのやり取りはマスダンパーの減衰定数に大きく依存し、また、必要とされる減衰要素の容量も減衰定数によって大きく変化することがわかった。

また、制御側が最適制御以外の建物加速度フィードバックや建物変位フィードバックの場合についてもエネルギー吸収特性の検討を行い、最適制御の場合と比較している。その結果、エネルギー伝達および吸収における各要素の働きについては制御側による違いは見られないものの、建物加速度および建物変位フィードバックの場合には、最適制御に比べて大きな制御エネルギーを必要とし、減衰要素の容量も大きくなければならないことがわかった。

第5章 実験による検証

第5章には、鋼製6層試験体の最上層にマスダンパーを取付け、制御効果およびエネルギー吸収特性についての検証実験を行った結果を示している。マスダンパーとしては、電磁式振動加振器を用いて、TMDと、固有振動数の異なる2種類のHMD状態を作り出し、実験を行っている。その結果、TMDによる応答低減効果、および制御力を加えることによるより大きな応答低減効果を確認できた。また、エネルギー吸収特性についても、解析結果と良く対応し、マスダンパーを構成する各要素の働きを確認できた。

第6章 結論

第6章では、本論文で得られた知見を示すとともに、成果の利用と将来の展望について述べている。

審査結果の要旨

近年、建築物の高層化に伴い、強風、地震等動的載荷時の居住性が重要な問題となってきた。このため各種制振装置が開発・設置されており、中でも、付加質量型制振装置がその主流を占めている。これは、制御対象の質量の大きさ、付加質量の利用、入力ランダム性、コストと制御効果等を考慮した際の、性能が優れているためである。しかし、その装置特性についての総合的な検討は未だなされておらず、不明解な点が多かった。本論文は、受動的および能動的付加質量型制振装置の応答制御特性を、制振装置の最適パラメータ、建築の高次モードに対する制御特性、エネルギーの伝達および吸収特性、制振装置を構成する各要素の働きに着目して検討し、この制振装置の最適設計法を明らかにしたものであり、全編6章より構成されている。

第1章は序論である。

第2章では、既往の研究を本論文との関係において整理している。

第3章では、まず、受動的および能動的付加質量型制振装置の最適パラメータ（固有振動数および減衰定数）について検討している。その結果、応答低減の指標や制御力の大きさにより、最適パラメータが変化すること、ならびに、その変化の度合いが明らかにされている。ここで示された最適パラメータの汎用的指標は、装置の最適設計に役立つものである。次に、高層建築物に対する受動的および能動的装置の応答制御特性を、高次モード制御を含めて比較検討している。特に、能動的装置に受動的な効果をも見込めるように装置に減衰と復元力を持たせた場合の有効性を明らかにしている。

第4章では、受動的および能動的付加質量型制振装置の特性を、エネルギー吸収の観点から検討している。これにより、各装置の特徴がより明確に把握され、また、装置を構成する各要素（バネ要素、減衰要素、制御力要素）が建物のエネルギーを装置に伝達し吸収する過程でどのような働きをするかが示されている。これは、装置の基本的な制御機構を認識する上で有益な情報である。

第5章では、第3章、第4章で解析的に検討した付加質量型制振装置の応答制御、効果ならびにエネルギー吸収特性を実験により検証している。具体的には鋼製6層試験体の最上層に制御装置として電磁式振動加振器を取付け振動台実験を行った結果を分析している。その結果、解析的検討より得られた付加質量型制振装置の特性が実験においても明瞭に確認されている。

第6章は結論である。

以上要するに本論文は、高層建物に対して付加質量型制振装置を設計する際に、考慮すべき諸特性と各パラメータの最適値の設定手法を明確にしたものであり、今後の建築構造物の振動制御分野の発展に寄与することが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。