

論文審査の結果の要旨

氏名：森 川 和 彦

博士の専攻分野の名称：博士（工学）

論文題名：高減衰化を目標とした制振構造物の簡易設計手法に関する研究

審査委員：（主査） 教授 秦 一 平

（副査） 教授 中 島 肇 教授 北 嶋 圭 二

特任教授 古 橋 剛

1995年の兵庫県南部地震以降、建物に入る地震エネルギーを免震装置やダンパーによって吸収することで、建物の揺れを低減する免震構造と制振構造が発展してきた。特に、制振構造は、速度に依存するオイルダンパーや鋼材の弾塑性特性による履歴ダンパーなどの研究開発が行われ、多種多様なダンパーが現在普及している。これらのダンパーを用いることで、建物の動的な挙動を表現する運動方程式のうち、減衰項及び剛性項にあたる特性を操作し、建物の地震応答を制御することが可能となった。近年では、質量項を操作することが可能である回転慣性質量効果を利用したダイナミック・マスが開発・実用化されている。これにより設計者は、質量項、減衰項及び剛性項を任意で設定し、制振構造の設計を行うことが可能となった。

一方、2011年の東北地方太平洋沖地震以降、設計用地震動は、これまでの設計用地震動を大きく上回る巨大地震を想定することを設計で要求されはじめている。そのため、建物に要求される設計目標として従来の設計で想定していた振幅レベルや継続時間を大きく上回る地震動に対しても配慮が必要になってきている。

以上より制振構造の設計は、ダンパーの選定、建物への配置及び入力地震動レベルといった多数の設計変数に対し、試行錯誤的に時刻歴応答解析を繰り返して目標性能を満たすダンパー台数を算出している。そのため設計者は、コンピュータの高性能化に伴う計算速度の向上はあるものの、依然検討に多大な労力を有している。さらに、設計の初期段階には、平面・断面計画に未確定な部分も多いことから、ダンパーの設置スペース等は意匠・設備計画との調整も必要で、目標性能を満たすために必要なダンパーの概算台数を早期に把握したいという要望も多い。このように、より簡便に判断したい実状があることから、目標性能を満たす制振パラメータを従来のような試行錯誤的な繰り返し計算により決定するのではなく、より簡易で効率的に求めることのできる設計方法の確立が望まれている。

簡易で効率的な設計方法の研究は、最適化手法を利用する研究例もあるが、繰り返し計算である応答解析結果は設定した入力地震動に対する特殊解であり、設定する地震動が異なれば当然その解も異なるため、設計的な判断としては困難となる。加えて、応答解析結果からはどのパラメータがどの程度応答低減に寄与しているのかの判別が難しい。建物の応答量を把握する上では、設計対象の固有周期や減衰定数を入力地震動特性と分離して把握できていれば、応答低減に大きく影響するパラメータの見極めができ、変更も容易となる。

また、制振構造分野においてもダンパーの配置方法に着目した研究例は少ない。JSSIの「パッシブ制振構造 設計・施工マニュアル」には主架構の剛性に比例型でダンパーを配置する方法の提案があるが、構造物の剛性分布は下層ほど大きいため、この方法では下層部のダンパーが過剰となる傾向がある。また、主架構を弾性として仮定しているが、近年の入力地震動の増大傾向を勘案すると、震度7レベル相当となる安全余裕度レベルの検討には、主架構の塑性化を考慮した設計方法も必要であるといえる。

このような背景から、申請論文は、制振構造物の簡易設計方法として制振ダンパーの効率的な配置方法を中心テーマにしている。はじめに、オイルダンパーを用いた制振構造物の設計方法の構築を行っている。次に、減衰性能を維持しながらダンパー設置台数の削減を可能とする「ダイナミック・マス」を用いた設計方法の構築を提案している。最後に、その両ダンパーを併用した設計方法への拡張をさせ、固有値解析と図表を用いて設計の効率化を図る設計方法を提案したものである。

本研究で得られた成果は、今後の制振構造の設計方法に有益な知見を与え活用されるべきものとして期待される。以下に各章の内容と評価を示す。

本論文は、第1章「序論」から第5章「結論」に至る全5章により構成されている。審査の結果、次

のように考えられる。

第1章では、本研究の背景として、制振構造物の設計における煩雑な点を指摘し、設計の効率性を求めるための課題点を整理している。また、2011年の東北地方太平洋沖地震以降から建築構造物の耐震性に対する安全余裕度の要求が高まり、現状の耐震構造物においても構造部材の弾性領域以内に抑えるような設計では対応しきれないことを示している。現在の制振構造物では、性能指標となる粘性減衰は2%から3%程度までの付与程度しか対応できていないこと、地震動レベルが大きい場合には、構造物の主架構の塑性化を許容していることを指摘している。そして申請者は、制振構造物の効率的な設計方法とさらなる高減衰化を可能とする組合せ及び配置方法に着目し、制振構造物の簡易設計方法を研究対象とした理由を述べ、本研究の目的と位置づけを明確にしている。

第2章では、オイルダンパー（C型）を用いた制振構造物を対象として効率的な配置方法について述べている。特筆すべき点として、まず効率性を判断する評価関数として「制振ダンパー台数」と「地震波倍率」から構成される評価式を構築し、その評価指標を主架構の塑性化を考慮する場合に剛性比例や全層同一、層間刺激関数に比例する配置とそれらを組み合わせる方法に適用して、各ダンパー配置方法の効率性を比較している。そしてこの検討から、構造物の1次固有周期に応じて、効率的な配置方法は異なることを示している。審査においても、効率性を判断する評価式に対し、「制振ダンパー台数」と「地震動倍率」という点に着目し、効率性を評価している点に十分な議論がなされ、評価方法が妥当であると判断した。

続いてそれらの効率評価に基づいて、効率的な配置指標図を示している。それにより、目標性能を満たすために必要なモーダル減衰定数を応答性能設計図表で把握し、配置指標図を用いて、必要な減衰定数を最小となるダンパー台数で付与する設計方法を構築している。この設計方法では、複素固有値解析により算出した構造物の固有周期に応じて、より少ない台数で目標性能を満たす効率的なダンパーの配置方法を容易に決定でき、既往研究にあるC型の剛性比例配置と同等の応答変位を3割程度の台数減でも実現できることを示している。この設計方法は、試設計例により精度を検証し、有効性を確認している。なおこれに伴う知見として、高次モードの減衰定数が小さい場合はダンパーが少ない層で主架構の塑性化が進行する傾向にあることを示し、ダンパーを全層に設けて高次モードの減衰定数にも配慮する考え方が重要であると指摘している。また、高減衰化に限界がある点をC型配置の課題点として挙げている。これらの成果は、有益な設計方法の判断材料となり得るものと高く評価できる。

第3章では、ダイナミック・マスを利用した制振システム（MC型）の簡易設計方法を提案している。オイルダンパーの配置だけではダンパー台数の大幅な削減は困難であり、高減衰化にも限界があることから、慣性質量効果を利用するダイナミック・マスを用いて高次の複数モードに同調させる制振システムを構築し、合わせて制振層の剛性を低減することでモード減衰定数を大きく向上できることを多くの数値解析により示している。また、複素固有値解析により制振層の位置や複数モードの制御、制振層の剛性を低減する効果を定量的に把握し、モード減衰定数とダイナミック・マス及びオイルダンパーの必要量の関係性を整理している。振動モードの腹となる位置に制御層としてダンパーを集中的に配置することで、効率良くモーダル減衰定数を付与できる点は、振動実験においても確認している。

また、MC型の配置方法の効率性についても検討されている。入力地震動により主架構の塑性化の程度は異なるため、弾性剛性に対して同調させるシステムを構成し、主架構の塑性化を考慮してMC型を構成する際の利点と欠点を明確にしている。MC型では全層同一配置が効率的であることを示し、建物規模が大きい場合にはダンパー台数の削減効果が小さいと指摘している。また、同調モードではC型より効率良く減衰定数を付与できるが、同調モード以外に減衰定数が付与されない点を課題に挙げている。

第4章では、下層にダイナミック・マスによる同調システム、上層にオイルダンパーを配置する併用システム（C-MC併用型）を提案している。この提案によって、前章までのC型及びMC型配置の課題点を改善している。

下層に全層同一で配置したMC型で1次モード、上層に剛性比例で配置したC型で2次モードに減衰定数を付与し、既往研究のC型剛性比例配置と同程度の変形・加速度を4～5割減程度のダンパー台数で実現できることを示している。さらに、C-MC併用型のダンパー配置方法の効率性を明確にし、2章で

提案している簡易設計法の適用性を拡張させている。2～4章でのC型・MC型・C-MC併用型配置方法に関する分析結果も反映し、固有周期と減衰定数に応じた効率的な配置方法も提示している。拡張した設計法では併用システムでも目標性能を満たすダンパー台数を容易に把握できると述べている。

本章は、高減衰化及びダンパー台数を最小とする制振構造物設計のモデル例として、有益な方法としてまとめられている点が高く評価できる。

以上のことから、本論文の申請者が自立して研究活動を行い、又はその他の高度な専門的業務に従事するに必要な能力及びその基礎となる豊かな学識を有していると判断できる。

よって本論文は、博士（工学）の学位を授与するに値するものと認められる。

以 上

令和2年10月22日