

論文の内容の要旨

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

制振構造物の設計では、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。ダンパーは多様で、特性の適切な評価が重要となる。制振設計では、どのような入力地震動を想定し、どんなダンパーをどこにどれだけ配置するのかを考える必要がある。多くのパラメータがあるため、コンピュータの高性能化に伴って計算速度は飛躍的に向上したものの、検討には多大な労力を要している。一方、設計の初期段階では平面・断面計画に未確定な部分が多い。ダンパーの設置スペースは意匠・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。この段階では、より簡便に判断したいのが実状である。そのため、従来のような試行錯誤的な繰り返し計算で目標性能を満たす制振パラメータを決定するのではなく、より簡易な手法の確立が望まれている。

当然、設計では効率性も求められる。ダンパー量を最少化する方法として最適化手法を利用する研究もあるが、繰り返し計算である応答解析の結果は設定した入力地震動に対する特殊解でしかない。入力が異なればその解も異なり、設計的な判断は困難である。応答解析結果のみで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断が難しく、建物の応答量を把握する上では入力地震動の特性とは分離して設計対象の固有周期や減衰定数といった動特性の評価が必要不可欠と言える。設計の初期段階では計画の変更点も多いが、建物の固有周期や減衰定数を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、ダンパーの配置方法に着目した研究は少ない。JSSIの「パッシブ制振構造 設計・施工マニュアル」には剛性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程大きいため、下層部のダンパーが過剰となる傾向がある。また、この手法では主架構を弾性と仮定している。近年の入力地震動の増大傾向を勘案すると、どのような地震動に対しても主架構を弾性とする設計が効率的であるとは判断できない。今後は最低限の安全基準を満たす設計だけでなく、性能設計的な考え方を取り入れた事例が増加するものと推察される。極めて稀に発生する入力地震動を大きく超えた余裕度レベルに対しては、主架構の塑性化を考慮した設計手法も必要と言える。

ダンパー台数の検討では配置できるスペースに制限がある場面が多く、ダンパーは意匠計画等に支障がない位置に配置される。主架構の損傷を抑えるためには建物の減衰性能を高め、揺れにくく設計することが重要である。ダンパー台数を削減できる制振システムが有益で、強く望まれていることも言うまでもない。

このような背景から、ダンパー台数を削減できる制振システムの開発を意図して、本研究では現状の設計手法を簡便化させた設計法を提案している。合わせて、減衰定数を効率良く付与するダンパーの効率的な配置方法についても分析し、主架構の塑性化も考慮して近年の入力地震動の増大傾向にも対応できるように拡張性のある設計手法を構築している。本論で提案している設計法は試行錯誤的な応答解析の繰り返しではない。設計図表を利用することで検討に要する負荷が大幅に軽減される。設計の初期段階では、十分な精度で目標性能を満たすより少ないダンパー台数の概算が極めて容易となる。なお、本論で提案しているダイナミック・マスを利用した制振システムは効率良く減衰定数を付与することができ、ダンパー台数の削減が可能となる。

まずは、オイルダンパーを用いた制振システム（C型）の動特性を検証し、固有周期に応じた効率的となるダンパーの配置方法を提案している。また、石丸・秦らが提案している応答性能設計図表を利用した簡易設計法を構築し、設計例により妥当性を検証している。

続いて、近年の開発も進んでいる慣性質量効果を利用したダイナミック・マスを用いた制振システム（MC型）を提案している。制振層の剛性を低減させることで、より少ないダンパー量で減衰性能を大きく向上するシステムを構築できることを示している。解析及び実験的な検証により提案システムの有用性を確認している。また、ダンパー配置方法の効率性の分析とともに、利点と欠点を整理し

ている。

さらに、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。構築した簡易設計法を併用システムでも適用できるように拡張し、併用型ではより少ないダンパー台数で高次モードにも減衰定数を付与できるシステムを構築でき、効率良く応答を低減できることを示している。また、設計者が参考にできる効率的なダンパー配置も提示している。

本論文の構成は以下の通りである。

1 章「序論」では、研究の背景を概観している。現状の設計方法に関する課題点や既往研究を整理し、本研究の目的と論文の構成を述べている。

2 章「オイルダンパーを用いた C 型制振システムの簡易設計法」では、オイルダンパー(C 型)の配置方法について述べている。まずは、ダンパー台数と地震波倍率から構成される効率性の評価指標を構築している。その指標を用いて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の効率性を評価し、評価の高い配置を提案している。建造物の 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。

また、石丸・秦らが提案する応答性能設計図表を利用して設計作業を単純化する簡易設計法について述べている。提案手法では、応答解析の繰り返しは不要となる。設計する制振システムが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、より少ないダンパー台数で必要な減衰定数を付与する方法を構築している。複素固有値解析により算出した建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、既往研究にある応答が小さい 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、試設計例により精度も検証している。

なお、内部減衰をレーリー型で仮定する場合は高次モードの減衰定数が小さくなる。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述べている。

また、C 型配置の課題点として効率性の向上に限界がある点を挙げている。

3 章「ダイナミック・マスを利用した MC 型制振システム」では、ダイナミック・マスを利用した制振システム(MC 型)を提案している。オイルダンパーの配置方法の工夫だけではダンパー台数の大幅な削減は困難で、高減衰化にも限界がある。そこで、慣性質量効果を利用するデバイスを用いて高減衰化を図る制振システムを提案している。ダイナミック・マスを用いて複数の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システムのモーダル減衰定数を大きく向上できることを示している。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、モーダル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。制御する振動モードの腹となる位置にダンパーを配置すれば、効率良くモーダル減衰定数を付与できると述べている。

続いて、提案システムの動特性を振動実験により確認し、その有用性を検証している。設計例では、高次モードにも減衰定数を付与することで、少ないダンパー台数で応答加速度も低減できる制振システムとなることを示している。高次モードの制御では、1 次モード制御に必要な量の $1/4 \sim 1/2$ のダンパー台数で同程度のモーダル減衰定数を付与できると述べている。

また、MC 型の配置方法の効率性についても述べている。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と述べ、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 形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。

4 章「C-MC 併用型制振システムの簡易設計法」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。この提案では 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する MC 型で 1 次モード、上層に剛性比例で配置する 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と述べている。

なお、ダイナミック・マスを用いる MC 型の設計として定点理論の考え方に基づく応答倍率を最小化する手法の提案があるが、地震入力時の応答量は把握できない。C-MC 併用型のダンパー配置方法の効率性を明確にし、2 章で提案した簡易設計法の適用性を拡張している。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。

5 章「結論」では、本研究で得られた知見をまとめ、今後の課題を述べている。