

論文の内容の要旨

氏名：郭 鈞桓

博士の専攻分野の名称：博士（工学）

論文題名：慣性質量同調システムを用いた建築物のモード減衰制御に関する研究

建築物の超高層化や人口の集中が進む現代社会において、地震被害のリスクが高まっている。2011年の東北地方太平洋沖地震では、震源地から遠い東京都心の超高層建築物が長時間にわたって大きく揺れた。家具の転倒やエレベーターの閉じ込め、設備機器の損傷など人々に恐怖心を与え、深刻な問題となっている。この問題の原因は、建築物が持つ「減衰性能」が低く、長周期地震動に対して「共振現象」が起きていることである。また、地震活動の活発化により震度6弱以上の揺れに見舞われる確率が高まっている。その中でも、南海トラフ巨大地震や首都圏直下型地震などが懸念されている。特に、超高層建築物は地震による影響が大きく居住性と安全性が求められるため、建築物に減衰性能を与える「制振構造」が必要とされている。超高層建築物には複数の揺れやすい周期があり、それぞれの周期に対応する振動モード形状が存在する。現状の制振設計では、超高層建築物は付加的な要素として制振ダンパーを採用している。しかし、制振性能として粘性減衰条件は、建築物の応答変位に大きな影響を及ぼす振動成分の1次モードを対象としているため、高次の振動モードを制御するまでに至っていない。

制振設計で使用する制振装置は、弾塑性ダンパー系やオイルダンパー系などが挙げられるが、1次モードに付与される減衰定数が小さく、一般的に減衰定数は約5%以下であり、2次モードと3次モードの減衰がほぼ付与されていない。この課題に対して本論文では、回転慣性質量装置を用いて、建築物の振動モードに効率よく減衰定数を付与できる制振システムを分析し、建築物の振動特性に応じた「モード減衰制御」の構築を目指し、より高性能な制振構造の構築が可能であることを示す。なお、本論文では、回転慣性質量をダイナミック・マス(D.M.)と呼称する。

D.M.を用いた設計方法として、「モード同調制御」が代表的な手法がある。D.M.とばね剛性を直列に接続して構成された付加振動系によって、対象建築物の振動モードと同調することで、建築物の応答を低減させるものである。石丸・秦らはD.M.と粘性減衰を並列に配置し、ばね剛性を直列に配置したシステムの最適設計式および設計方法を提案し、多質点系モデルへの適用性が示されている。その最適設計式は固有値の関係式としてまとめられているため、複素固有値解析を介して、最適同調および最適減衰を満足する制振システムのパラメータを簡易に求めることができる。本論文では、この制振システムをD.M.同調システムと呼称し、この付加振動系の要素配置より略してMC-K型と呼称する。

MC-K型は、オイルダンパーなどの粘性減衰系を単体で使用した設計よりも、制御対象モードに大きな粘性減衰定数が与えられるため、応答変位に対しての制振効果が高い。しかし、超高層建築物に対して1次モード同調制御を行った場合、高次モードに対しての応答低減効果がないため、応答加速度及び応答変位を抑えることが困難である。その改善方法として、MC-K型による複数モード同調制御が提案され、超高層建築物などに対しても高次モード制御を考慮した設計が可能となった。しかし、目標制御モードごとに対応したMC-K型が必要であり、制振装置を増やさなければいけない課題が残っている。

一方、他の種類のD.M.同調システムとして、粘性減衰とばね剛性を並列に配置し、D.M.を直列に配置したシステムがある。本論文では、この付加振動系の要素配置から、略してM-CK型と呼称する。Lazarらは3質点系モデルを対象にして、共振曲線を用いて、ばね剛性と減衰係数のパラメータスタディによる1次モード同調制御を示している。しかし、M-CK型を用いたモード同調制御の最適設計式や設計方法、ダンパーの構築や性能検証に関する実験、そして実大建築物への適用性などについては、現在まで確立されていない。

以上を踏まえて、本論文では、保守性が高い制振構造を構築するために、MC-K型およびM-CK型D.M.同調システムを用いたモード同調制御により、対象建築物の「モード減衰制御」を提案している。まず、両システムの応答特性を検討し、周波数（周期）依存性があることを解明した。更に、両システムは制御対象外のモードに対する付与減衰効果について、相補性を持っていることも明らかにした。

MC-K 型では高次モード制御の場合には低次モードへの付与減衰効果を、M-CK 型では低次モード制御の場合には高次モードへの付与減衰効果を確認できた。より効率的なモード減衰制御を実現するために、MC-K 型の検討では、低次モードへの付与減衰を定量的に評価し、MC-K 型の低次モードへの減衰定数の推定式を提案した。また、M-CK 型の検討では、M-CK 型を用いたモード同調制御の最適設計式を示し、M-CK 型の高次モードへの減衰定数の推定式を提案した。

次に、MC-K 型および M-CK 型を用いた複合制振を提案し、両システムの特性を活用したモード減衰制御を示した。多質点系モデル試験体を用いた振動実験により、複合制振の応答低減効果を検証した。更に、推定式を用いて複合制振の設計方法を提案し、超高層建築物への適用性を示した。

本論文の構成は以下の通りである。

1 章「序論」では、本論文に関連した研究背景と研究課題、本研究の目的と論文構成について述べている。

2 章「MC-K 型同調システムを用いたモード減衰制御」では、MC-K 型を用いたモード同調制御の設計方法および高次モードのモード同調制御による低次モード付与減衰の効果を示し、それらの付与減衰を推定できる評価式について述べている。

まず、MC-K 型の応答特性を示す。MC-K 型の単体配置時の解析モデルを用いて、調和変位に対するダンパー変形増幅率を求め、周波数領域における同調システムの応答性能を確認する。MC-K 型のダンパー変形増幅率の関係から、MC-K 型を用いた多質点系モデルでは、同調モードの周期より短い周期領域において、ダンパーの変形が 0 に収束し作動しなくなる。そのため、D.M.同調システムに用いられる粘性減衰の効果が小さい。一方、同調モードの周期より長い周期領域において、ダンパーの変形増幅率が 1 に収束し、減衰の効果が大きいことが確認される。

多質点系の解析モデルに対して、MC-K 型を用いた 1 次モード制御では、高次モードに減衰効果が付与されるのが小さい。2 次もしくは 3 次モードを対象とした制御では、副次的に低次モードにも減衰効果が付与されることが大きいことが確認された。そのため、前述した MC-K 型の周波数依存性に起因していると判断できる。低次モードへの付与減衰効果を活用すれば、より高性能な制振構造の構築が可能であると考えられる。そこで、本章では MC-K 型の高次モード制御による低次モードの粘性減衰推定式を提案し、その適用性を示す。

3 章「M-CK 型同調システムを用いたモード減衰制御」では、M-CK 型によるモード同調制御の最適設計式を示している。多質点系の解析モデルに対して、M-CK 型を用いたモード同調制御の設計方法およびモード同調制御による高次モード付与減衰の効果を示し、それらの付与減衰を推定できる評価式について述べている。

まず、M-CK 型の応答特性を示す。2 章と同様な検討手順で M-CK 型の単体配置時の解析モデルを用いて、調和変位に対するダンパー変形増幅率を求め、周波数領域における同調システムの応答性能を確認する。M-CK 型のダンパー変形増幅率の関係から、M-CK 型を用いた多質点系モデルでは、同調モードの周期より短い周期領域において、ダンパーの変形増幅率が 1 に収束し、D.M.同調システムに用いられる粘性減衰の効果があることが確認される。一方、同調モードの周期より長い周期領域において、ダンパーの変形が 0 に収束し作動しなくなるため、減衰の効果が小さい。2 章に示した MC-K 型の応答特性と逆の性質を有していることが分かる。

多質点系の解析モデルに対して、M-CK 型を用いた 1 次モード制御では、副次的に高次モードにも減衰効果が付与されるが、2 次もしくは 3 次モード制御では、低次モードへの減衰効果は付与されない。そのため、前述した M-CK 型の周波数依存性に起因していると判断できる。高次モードに付与される減衰効果を活用すれば、より高性能な制振構造の構築が可能であると考えられる。そこで、本章では M-CK 型の 1 次モード制御による高次モードの粘性減衰推定式を提案し、その適用性を示す。

4 章「MC-K 型および M-CK 型による複合制振のモード減衰制御」では、MC-K 型と M-CK 型の組合せによる複合制振のモード減衰制御を提案している。複合制振の構築として、低次モードのモード

同調制御では M-CK 型、高次モードのモード同調制御では MC-K 型を用いた組み合わせを提案し、複素固有値解析を介した複合制振の設計方法を示している。また、8 層せん断モデル試験体を用いた振動実験を行っている。M-CK 型 1 次モード制御と MC-K 型 3 次モード制御の組み合わせた複合制振試験体により、制御対象外の 2 次モードにも大きな減衰効果が確認され、複合制振の有効性を実験的に検証している。

次に、M-CK 型高次モード粘性減衰推定式および MC-K 型低次モード粘性減衰推定式を用いて、対象建築物の 1 次モード～3 次モードに対して、複合制振の設計フローおよびモード減衰制御手法を提案している。予備設計として、非制振モデルの固有値結果を用いれば、他のモードに付与される粘性減衰が推定できるため、設計の自由度の向上が期待できる。

最後に、20 層の超高層建築物を対象にして、オイルダンパーや他の減衰要素のみを用いた「C-K 型」、複数モード制御を用いた「MC-K 型」、および MC-K 型と M-CK 型の相補性を活用した「複合制振」の 3 つの設計例を示している。複合制振は、制振装置の設置箇所を最小限に抑えることで、保守性が高い制振構造を実現可能であることを示している。

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。