

論文審査の結果の要旨

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

審査委員：（主査） 教授 秦 一 平

（副査） 教授 北 嶋 圭 二 教授 渡 辺 亨

元教授 古 橋 剛

長周期・長時間地震動として観測された2011年の東北地方太平洋沖地震により、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。これにより、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の被害が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。それにより、超高層建築物の居住性と安全性が求められるようになった。その対策として2016年6月、国交省から「超高層建築物等における南海トラフ沿いの巨大地震による長周期地震動への対策について（技術的助言）」が発出された。これは、対象区域内で超高層建築物、地上4階以上の免震建築物を2017年4月1日以降に申請する性能評価に基づく大臣認定によって新築する場合等において、長周期地震動への対策が義務付けられた。

これ以降、超高層建築物においては、「減衰性能」を高くするために、付加的な要素として制振ダンパー等を用いている。しかし、制振性能を示す粘性減衰定数の評価は、建築物の応答変位に大きな影響を及ぼす1次の振動モードのみを対象としているため、設計時に高次の振動モードの付与減衰は不明確である場合がある。一般的に、超高層建築物は複数の揺れやすい周期をもち、各周期に対応する振動モード形状が存在するため、各モードの「減衰性能」を把握する必要がある。

現在の制振設計では、各振動モードへの減衰付与を定量的に評価する考え方はなく、設計者が設計用入力地震動に対して目標クライテリアを満足する制振装置の配置を模索している状況にあり、本質的な振動制御の概念とは異なる。

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、一般的に粘性減衰定数は約2~5%程度である。また、2次モードと3次モード以上について粘性減衰定数がほぼ付与されていない場合がある。

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」の構築を目指すことで、より高性能な制振構造の構築が可能であることを示している。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粘性減衰が付与されないことで、応答加速度が大きくなる課題があった。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手法が提案された。だが、この手法は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あった。

以上の課題から、本論文ではMC-K型と同等の性能を有し、かつ高次モードにも粘性減衰を付与できるシステムを提案している。そのD.M.同調システムは、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である。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。このM-CK型に関する研究は、Lazarらにより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ため、オリジナル性が高い研究である。

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。

2, 3章では、それぞれの同調システムの周期特性を明確にし、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。

その相補性を利用して、4章では各振動モードの粘性減衰を制御する手法を提案し「モード減衰制御」という設計方法を提案した論文となっていることから、今後の制振構造の設計方法としての社会的意義が高いと判断できる。

本論文の構成は以下のとおりである。

1章「序論」では、超高層建築物に要求される性能を最近の基準改正を踏まえた背景と既往研究について概観し、本研究の目的と位置づけを明確化すると共に、本論文の構成を示している。既往の研究をよく調査し、研究課題の妥当性と社会的意義が高いことを明確にしている。

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。

特に、MC-K型の場合、高次モード制御による低次モードへの付与減衰効果を論理的に示していることや、その低次モードに付与される粘性減衰定数を推定する推定式を提案している。

以上のことから、本章の内容に新規性と有効性が認められると判断できる。

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。

特に、M-CK型の場合、1次モード制御による高次モードへの付与減衰効果を論理的に示していることや、その高次モードに付与される粘性減衰定数を推定する推定式を提案している。

以上のことから、本章の内容に新規性と有効性が認められると判断できる。

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。

本提案手法を採用することで適切な応答評価が可能となることを示しており、社会的意義の高い結論が得られている。

5章「結論」では、本研究を通じて得られた知見を整理すると共に、今後の課題について述べている。

このことは、本論文の提出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ことを示すものである。

よって本論文は、博士（工学）の学位を授与されるに値するものと認められる。

以 上

令和5年10月12日