

提供するものであり、その先駆性は高く評価されるものである。

とりわけ、本調査の実行により、「準近居」という、あまたの研究者によってもその存在が指摘されることになかった親子両世帯の居住関係を発見し、新しい概念として定義付けたことは、今後における高齢者の居住政策を再検討する上において一石を投じるものとなる。

このように、本論文は特筆すべき内容と意義を有するものではあるが、限られた自治体あるいは特定の自治体を対象とする調査による結果であることから、調査結果を普遍化するにはやや説得力に欠ける面があることを否めない。また、本研究により導き出された全体的傾向としての実態を前提として、さらに具体的な環境整備の手法にまで展開することも今後の課題であろう。しかし、本研究で得られた知見は大筋において間違いないものと判断され、また後続の研究者への貴重なデータの提供と内容的な示唆を与えるものとなっている。よって本論文は博士（工学）の学位論文に値するものと認める。

(試験の結果)

本論文に関して、審査委員から調査方法の妥当性、分析概念の適切性、データ表示の的確性、分析結果の解釈の妥当性など、研究の目的および方法の全般について質問がなされたが、いずれも著者から明確な回答が得られた。また、公聴会においては、住宅研究者、建築設計関係者、高齢者研究者など学内外の各方面から多数の出席者があり、多様な角度から活発な質問と議論が交わされたが、著者の説明により質問者および出席者の理解が得られた。

以上の結果から、著者は最終試験に合格したものと認める。

氏名（本籍）	曹 鳳英（ ^{そう} ^{ほうえい} 中華民国）
学位の種類	博士（工学）
学位記番号	甲第25号
学位授与日	平成16年3月19日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当 工学研究科 生産システム工学専攻
論文課題目	非線形アクティブ制振装置を用いた 建造物のスライディングモード制御 に関する研究
審査委員	主査 九州産業大学 教授 西谷 弘 信 副査 九州産業大学 教授 藤崎 渉 副査 九州産業大学 教授 日垣 秀彦

内容の要旨

建造物に対する制振対策の主要な目的は、振動による損傷や破壊を防止するといった建造物の耐震性の向上や安全性を確保することである。しかし、それ以外に、振動によって生じる搭載機器や人への悪影響を防止することも重要な目的となってきた。そのような目的を達成するには、制振装置として従来のパッシブ・ダンパーだけでは対応が難しく、それを打開するものとしてアクティブ・マスダンパーが開発されている。しかし、アクティブ・マスダンパーは慣性反力を制御力として利用するため、その重量や寸法形状がきわめて大きくなるという欠点がある。

本研究は、制振装置の小型化と軽量化を目的として、圧縮空気を用いたON-OFF型の流体噴射式制振装置と軽量・小型のアクティブ・マスダンパーを組み合わせた制振装置のプロトタイプを開発し、そのような非線形アクティブ制振装置を建造物の制振に適用した制御系設計法の確立を目的としている。本論文は7章から構成されており、それぞれの内容は次のとおりである。

第1章では、建造物の制振装置について概観し、本研究の背景および目的を明確にし、さらに本論文の構成について説明する。建造物の大型化や柔軟化に伴って建造物自体の固有振動数が低下し、その結果外乱によって生じる揺れが長周期化するとともに振幅が増大する傾向にあるため、慣性反力を利用するアクティブ・マスダンパーは大きな可動質量を必要とする。実例を挙げれば、来島海峡大橋の主塔建設時に搭載されたアクティブ・マスダンパーの可動質量の総重量は28トン、また現在稼働して

いる横浜ランドマークタワーの可動質量 2 台の総重量は 350 トンにも及ぶ。このことから、本研究の目的としている制振装置の小型化と軽量化は、アクティブ制振技術の応用分野における重要課題の一つとなっていることが分かる。

第 2 章では、本研究における制御系設計理論の基礎について述べる。まず、制御系設計理論が適用できるように、偏微分方程式で表される無限自由度をもつ構造物の運動方程式を有限次元で近似したいわゆる低次元化数式モデルとして表す方法を説明する。その中で、数値計算上性質のよい数式モデルを導くための座標変換式を提案する。次に、非線形アクティブ制振装置を用いることを前提とした制御系設計において、現在最も有効な理論であるとされるスライディングモード制御理論を概説し、制御系の設計手法を示す。さらに、振動モードを分離制御するという観点から、構造物の振動時における変位や速度などの状態量を振動モード成分ごとに推定する新しい方法を提案する。

第 3 章では、制御系設計手法の妥当性を検証するために試作した供試体構造物について述べる。供試体は比較のために標準とされている 5 層からなる構造物とし、その固有振動数と減衰比を明らかにする。固有振動数については、周波数応答実験によって得られた結果と有限要素法による解析結果がよく一致することを確認する。一方、固有振動数に対応する減衰比は理論的に推定することが難しく、また実験結果からも直接求めることが困難であるため、その求め方として採用した半理論・半実験的方法について説明する。

第 4 章では、試作した圧縮空気噴射式制振装置と軽量・小型のアクティブ・マスダンパーの寸法仕様ならびに実験的に検証したそれぞれの動特性を示す。とくに、圧縮空気噴射式制振装置については、使用可能周波数限界と遅れ時間（タイムラグ）を明らかにし、構造物の最低次振動の制御に適用できることを確認する。

第 5 章では、制振装置を取り付けた供試体構造物に対する制御系設計について述べる。まず、具体的に構造物の低次元化数式モデルを作成する手順を示す。次に、アクティブ・マスダンパーは 3 次モードまでを制御対象とし、圧縮空気噴射式制振装置は最低次の 1 次モードだけを制御対象とすることとし、それぞれの制御系の設計手順を示す。さらに、各制御系に対応すべく振動モードを分離推定するためのオブザーバの構成方法を具体的に示す。そして、2 つの制振装置を取り付けた全体システムについて初期値応答と周波数応答シミュレーションを行

い、設計された制御系の妥当性を確かめる。

第 6 章では、実験による検証について述べる。まず、実験システムの構成および制御側のコンピュータへの実装について説明する。そして、数値シミュレーションと実験結果を比較し、制御系設計法の妥当性を確認する。

第 7 章では、本論文の総括として、各章で得られた成果をまとめる。

審査の結果の要旨

(論文の評価)

構造物に対する制振対策の主要な目的は、構造物の耐震性や安全性を確保することである。また、それ以外に最近では、振動によって生じる搭載機器や人への悪影響を防止することも重要な目的となってきている。そのような目的を達成するには、制御装置として従来のパッシブ・ダンパーだけでは対応が難しく、それを打開するものとしてアクティブ・マスダンパーが開発されている。しかし、アクティブ・マスダンパーは慣性反力を制御力として利用するため、その重量や寸法形状がきわめて大きくなるという欠点がある。

本論文は、以上の点を考慮して、アクティブ・マスダンパーとはまったく発想の異なる非線形制御力を利用する方法により制振装置の軽量化と小型化を試みるとともに、そのような非線形性を有する装置を構造物の制振制御に適用するための制御系設計法を提案したものである。

研究の主要な成果は、次の 6 点にまとめられる。

第一は、これまでの制振装置の欠点および新しく提案するハイブリッド方式の制振装置に関するものである。著者はまず構造物の大型化や柔軟化に伴って外乱によって生じる構造物の揺れが長周期化するとともに振幅が増大する傾向にあることを指摘し、慣性反力を利用する従来のアクティブ・マスダンパーだけでは、その小型化と軽量化が困難であることを説明している。そこで、構造物の振動モード成分を分離制御することを前提に、圧縮空気の噴出を ON-OFF 制御して、その流体反力を制御力として利用する圧縮空気噴射式制振装置と小型・軽量のアクティブ・マスダンパーを組み合わせたハイブリッド方式の非線形制振装置を提案している。

第二は、提案した非線形制御系の設計理論に関するものである。まず、制御系設計理論が適用できるように、偏微分方程式で表される無限自由度をもつ構造物の運動方程式を有限次元で近似したいわゆる低次元化数式モデルとして表す方法を説明している。次に、非線形アクティ

ブ制振装置を用いることを前提とした非線形制御系の設計において、現在最も有効な理論であるとされるスライディングモード制御理論を概説し、制御則の設計手法を与えている。さらに振動モードを分離制御するという観点から、構造物の振動時における変位や速度などの状態量を振動モード成分ごとに推定するオブザーバの構成方法を明らかにしている。

第三は、制御系設計手法の妥当性を検証実験するための供試体構造物に関するものである。まず、実験室規模の標準供試体構造物として作製した5層からなる構造物の固有振動数と減衰比を明らかにしている。固有振動数については、周波数応答実験によって得られた結果と有限要素法による解析結果がよく一致することを確認している。さらに、固有振動に対比する減衰比は理論的に推定することが難しく、また実験結果からも直接求めることが困難であるため、その求め方として採用した半理論・半実験的方法について詳細に説明している。

第四は、試作した圧縮空気噴射式制振装置と軽量・小型のアクティブ・マスダンパーからなるハイブリッド制振装置のシステム同定に関するものである。とくに、圧縮空気噴射式制振装置については、使用可能周波数限界と遅れ時間（タイムラグ）を明らかにし、構造物の最低次振動の制御に適用できることを確認している。

第五は、制振装置を取り付けた供試体構造物に対する制御系設計に関するものである。まず、構造物の低次元化数式モデルを導く手順を具体的に示している。次に、圧縮空気噴射式制振装置は最低次の1モードだけを制御し、軽量・小型のアクティブ・マスダンパーは最低次モードの残留振動成分と最低次以外の高次モードを制御することとし、それぞれの制御則の設計手順を示している。さらに、各制御則に対応する振動モードを分離推定するためのスライディングモード・オブザーバの構成方法を提案している。そして、2つの制御装置を取り付けた全体システムについて初期値応答と周波数応答の数値シミュレーションを行い、設計された制御則の妥当性を明らかにしている。

第六は、実験による検証に関するものである。まず、実験システムの構成および制御則のコンピュータへの実装について説明している。次に、制御実験では、制御系のロバスト性すなわち制御系の設計において無視した高次モードを加振する現象（スピルオーバー現象）が発生しないこと、ならびに良好な制御性能が得られることを検証している。さらに、数値シミュレーションと実験結果を比較して、その両者がきわめてよく一致することを

示し、制御系設計法の有効性を明らかにしている。

以上要するに、本論文は構造物の振動をアクティブに制御する制振装置の小型化および軽量化を目的としたハイブリッド方式の非線形アクティブ制振装置を提案し、それを適用した非線形制御系の設計方法をスライディングモード制御理論に基づいて確立するとともに、実験で本方法の有効性を明らかにしたものであり、制御工学に寄与するところが大きい。よって本論文は博士（工学）の学位論文に値すると認める。

（試験の結果）

本論文に関し、審査委員から、制振装置の重量軽減効果に関する定量的な評価、非線形制御系の設計においてスライディングモード・オブザーバを使用する理由ならびにチャタリング現象の回避対策などについて質問がなされたが、著者の回答はいずれも明確であった。また、公聴会においても出席者から質問がなされたが、著者の説明によって質問者の理解が得られた。

以上の結果から、著者は試験に合格したものと認めた。