

氏名	木田英範
授与学位	博士(工学)
学位授与年月日	平成22年9月8日
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第1項
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科(博士課程) 都市・建築学専攻
学位論文題目	多重同調粘性マスダンパーによる建築構造物の地震応答制御に関する研究
指導教員	東北大学教授 井上 範夫
論文審査委員	主査 東北大学教授 井上 範夫 東北大学教授 源栄 正人 東北大学教授 植松 康 東北大学准教授 五十子幸樹

## 論文内容要旨

1995年の兵庫県南部地震以降、地震に対する建物の損傷を制御する免震構造や制振構造などの多くの設計法が提唱され、実建物に採用されるようになった。これらの設計法は、一般的に運動方程式において復元力の項や粘性項、あるいは両項を積極的に操作することで構造物の応答を制御しようとするものである。復元力の項を操作する方法としては、構造物の層間変位に対応して履歴ループを描くことで地震エネルギーを吸収する方法が、粘性項を操作する方法としては、速度に依存して減衰力を発揮する部材を付加する方法がある。具体的には、前者の方法に対応する部材として低降伏点鋼等を用いた履歴系ダンパーが、後者の方法に対応する部材としてオイルダンパーなどの粘性系ダンパーが知られている。

復元力の項や粘性項のみでなく、質量、減衰、剛性の3要素からなる付加振動系を用いる応答制御手法としては、絶対加速度に比例して抵抗力を生じる実質量を利用した動吸振器が有名である。この動吸振器はTMD(Tuned Mass Damper)と呼ばれ、対象構造物(主に機械振動や橋梁などの交通振動、塔状・高層建築物の風荷重による振動の制御に利用)の固有振動数に動吸振器の固有振動数を適切に同調させることで、主系の共振点近傍における応答を低減させるものである。動吸振器を適切に同調させる手法(最適同調振動数比や最適減衰定数の諸元決定手法)としては、構造物の応答倍率曲線のピークを最小化することを目的とした $H_{\infty}$ ノルム(定点理論)や、主系の応答倍率曲線の下での自乗面積の最小化を目的とした $H_2$ ノルムが良く知られている。実質量を扱うため、通常、構造物の質量に対して1~2%程度の動吸振器の質量で構成するのが一般的であるため、振動低減効果にも限界があり、地震応答制御には用いられないことが特徴である。

これに対して近年、節点間の加速度差に比例して抵抗力を生じる回転慣性を利用した慣性接続要素に柔支持部材を直列に接続して付加的な振動系を構成し、そこに粘性体による減衰を介在させることで主系の応答を制御する研究がある。この慣性接続要素と粘性要素および支持部材要素の3要素からなる付加振動系は「同調粘性マスダンパー」または単純に「付加系」と呼ばれ、対象構造物の固有振動数に同調粘性マスダンパーの固有振動数を適切に同調させることで、主系の共振点近傍における応答を低減させるものである。これら既往の研究では、定点理論に基づいて同調粘性マスダンパーを「単一」で用いて応答を制御していたが、単一同調型のシステムでは、制御対象となる主系の質量の増減および塑性化による固有振動数の変動や動吸振器パラメータ変動の影響を受けやすく、諸パラメータの変動により制

振効果が目減りしてしまうなど解決すべき課題があった。実質量を扱った動吸振器（TMD）に関する制御分野では「単一動吸振器」を「多重（複合）動吸振器」にすることで、これらの課題に対処している。即ち、多重に配置された動吸振器の各々の固有振動数を分散させることにより、単一動吸振器の質量比と多重動吸振器全体の質量比が同じ場合でも、応答倍率を小さく抑えることができ、また制御対象および動吸振器のパラメータ変動による制振効果の減少も改善できることが報告されているため、本研究でもこの実質量を扱った多重動吸振器の特性を利用し、地震外乱を受ける建築構造物の制振を目的として、慣性接続要素、粘性要素、支持部材要素の3要素からなる付加系を各々異なる固有振動数に分散配置した多重同調粘性マスダンパー制振システムとその応答制御法を提案する。

このように同調付加系を多重にすると、付加すべきトータルの付加系諸元（慣性接続要素質量、粘性減衰係数、支持部材剛性）が小さくても、既往の研究で示されている単一同調型システムと同等の応答低減効果が得られる。本研究では主として、多重同調粘性マスダンパーの最大の特徴であるこの特性について論じる。検討は、多重同調粘性マスダンパーの最も単純な場合、即ち2重同調型のシステムを中心に調和地動に対する主系の応答特性を調べ、粘性ダンパーシステムや、単一同調粘性マスダンパーシステムとの比較を通して行う。本研究は全6章で構成されており、以下に各章の概要について示す。

## 第1章「序論」

第1章では、本研究に関連した既往の研究の概況と、研究の背景、目的、および論文の構成と概要について論じている。

## 第2章「用語・記号の定義と同調粘性マスダンパーの基本概念」

本論文では、提案する多重同調型システムの応答性状を、粘性ダンパーシステムや単一同調型システムと比較を行いながら論じるため、第2章の2.1節では、これらの用語と記号の定義を行っている。2.2節では、慣性接続要素と粘性要素を併せ持つ制振装置の概要について、2.3節では、慣性接続要素と粘性要素を併せ持つ制振装置に柔支持部材を接続した「同調粘性マスダンパー」の概念、つまり同調粘性マスダンパーの固有振動数を主系の固有振動数に同調させることにより、粘性要素部の変位を動的に拡大することができるため、効率よくエネルギーを吸収できる特徴について論じている。また、本論文の実験で実際に慣性接続要素と粘性要素を併せ持つ制振装置（減衰こま）を使用しているため、2.4節では、減衰こまのボールねじ等の摩擦なども考慮した詳細設計式についても論じている。ここで、減衰こまの解析モデルは、最終的にボールねじ部などの摩擦抵抗や減衰部の粘性抵抗力、回転慣性による慣性力などの成分の総和を、非線形粘性減衰係数  $c$  と等価質量  $m$  としてモデル化でき、この2つの係数を実験により正確に評価することで、実用上精度良く減衰こまの性能を把握することができることを示している。2.5節は本章のまとめである。

## 第3章「多重同調粘性マスダンパーシステムの最適調整条件とその応答性状」

第3章では、本論文で提案する多重同調粘性マスダンパーを持つ1質点系構造物の地震外乱や調和地動を対象とした相対変位応答倍率や絶対加速度応答倍率の最適調整条件（最適同調振動数比、最適減衰定数）とその応答性状について論じている。最適調整条件の算出手法には、構造物の応答倍率曲線のピークを最小化することを目的とした  $H_{\infty}$  ノルム（定点理論）や、主系の応答倍率曲線の下の方乗面積の

最小化を目的とした H2 ノルムなどがあるが、本論文では、2 重同調型システムでは解析解が得られることと、単一同調型システムでは既往の研究成果が活用できることから、定点理論 (H $\infty$ ノルム) を用いて検討を行っている。

第 3 章の論文の流れとしては、3.1 節で、単一および多重同調粘性マスダンパーを持つ 1 質点系構造物の地震外乱や調和地動を対象とした相対変位応答倍率や絶対加速度応答倍率を示しており、3.2 節では、本論文中での記号の統一性を図るために既論文<sup>30),55)</sup>で示されている定点理論に基づく単一同調型システムの変位・加速度応答倍率の最適調整条件について論じている。3.3 節では 2 重同調型システムの定点理論を準用した最適調整条件について、3.4 節では付加系が 3 つ以上の多重同調型システムの定点理論を準用した最適調整条件について論じている。続いて 3.5 節では、3.2 節での単一同調型と 3.3 節での 2 重同調型システムの最適調整条件における付加系諸元の比較について論じており、変位応答倍率最適調整条件の硬バネ解を除いて、2 重同調型は、すべての同一質量比において、単一同調型よりも最適調整条件時の必要な付加系全体の支持部材剛性や減衰係数が小さくて良いことなどの特徴を示している。さらに 3.6 節では、4 重同調型システムの付加系諸元についても論じており、多重になればなるほど同一質量比において必要な付加系全体の支持部材剛性や減衰係数が小さくなることを示している。3.7 節では、3.3 節から 3.4 節で論じた多重同調型システムの最適調整条件 (最適同調振動数比、最適減衰定数) における応答性状を、粘性ダンパーシステムや単一同調型システムと比較を行いながら論じるため、これらのシステムの調和地動による伝達関数特性やランダムな地震波入力における応答性状について比較検討を行っている。付加系全体の減衰係数 (付加減衰比  $h_d$ ) を同条件として比較した場合、2 重同調型は、単一同調型よりも応答倍率の最大値を常に低く抑えており、最適調整条件時の必要な付加系全体の減衰係数が小さいほど、粘性ダンパーシステムの場合と比べて応答倍率低減効果の効率が非常に良く、ランダムな地震波入力においても同様の考察が得られることを示している。またこの現象を言い換えると、2 重同調型は単一同調型より、同じ応答倍率 (同程度の制振効果) に必要なトータルの付加系諸元 (等価質量、粘性減衰係数、支持部材剛性) が小さくて良いことを示している。3.8 節では多重同調型システムを等価粘性減衰係数と等価剛性の並列モデルに置換した際の動特性について考察し、3.9 節では多質点系多重同調型システムにも適用可能な複素モーダルアナリシスによる伝達関数算出手法などについても論じている。また、本論文の実験で実際に粘性マスダンパー (減衰こま) を使用しているため、3.10 節では同調粘性マスダンパーの詳細モデル (ボールねじ等の摩擦も考慮) を組み込んだせん断型多質点系モデルの応答解析プログラムについても論じている。3.11 節は本章のまとめである。

#### 第 4 章「多重同調粘性マスダンパー制振システムの振動実験による有効性の検証」

第 4 章では、1450ton の質量効果を持つ実大同調粘性マスダンパーの要素加振実験と本論文で提案する 2 重同調粘性マスダンパー制振システムのシステム全体としての模型振動実験を行い、その制振効果について理論および解析手法の妥当性の検証を行っている。ここで、2 重同調型システムは 2 つの付加振動系を持ち、それぞれの付加振動系の動特性が把握できれば、その単純な足し合わせで 2 重同調型システムの付加振動系全体の特性が表現できるため、実大同調粘性マスダンパーの要素加振実験をはじめに行っている。

第 4 章の論文の流れとしては、4.1 節で、2 種類の支持部材 (支持部材タイプ 1 : 18kN/mm、支持部材タイプ 2 : 8.5kN/mm) と、1450ton の質量効果を有する 1 種類の粘性マスダンパーで構成した実大サイ

ズと同調粘性マスダンパーの加振実験結果を示している。粘性マスダンパーおよび支持部材の解析モデルを正確に評価することで、主系の層間変位をモデル化したアクチュエータの入力変位に対して、粘性マスダンパーおよび支持部材の実験による変位-荷重関係などが、解析値と良い整合性を示すことを主に論じている。4.2節では、第3章で提案した2重同調型システムの制振効果（解析値）の妥当性を確認するため、付加系を2基並列に設置した2重同調型の一層応答制御システムの振動実験を行っている。主系の剛性の変化に伴う制振効果の変化を確認するために、主系の剛性を逆行型（付加系諸元による応答低減効果を明確にするために、主系の履歴減衰が生じない逆行型を採用）とし、主系の応答変位が7mm時の等価剛性で調整した付加系諸元に対して、主系の応答変位が3mm時（弾性域）または7mm時（塑性域）となるような正弦波入力に対する応答性状を明らかにしている。また主系の最大応答変位が10mm程度となる地震波入力に対しても主系諸元および付加系諸元（粘性マスダンパー、支持部材）を正確に把握することによって、実験値と解析値は良い整合性を示すことを論じている。4.3節は本章のまとめである。

## 第5章「多重同調粘性マスダンパーの超高層建物への適用に関する検討」

第5章では、提案する多重同調粘性マスダンパー制御法の超高層建物への適用を試みるため、曲げせん断型50質点系モデル（付加系である同調粘性マスダンパーは主系のせん断成分のみに作用）を対象に地震応答解析を行い、層方向の最大応答値分布について検討を行っている。

第5章の論文の流れとしては、5.1節、5.2節で、検討を行う曲げせん断型50質点系S造モデルの概要と、この主系に組み込む様々な形態（粘性ダンパー、単一同調型、2重同調型）の諸元の設定について論じ、5.3節では、5.2節で設定をした諸元での地震応答解析を行い、層方向の最大応答値分布について検討を行っている。この節で提案する2重同調型システムは、トータルの付加系諸元が単一同調型より小さくても、同等の制振効果を発揮することなどを主に示している。5.4節では、ダンパー最大軸力制限機構を適用したときの応答性状について論じており、単一および2重同調型システムは、ダンパー最大軸力のある程度制限しても最大応答値にほとんど影響を与えないことなどについて示している。5.5節では、高次モードが卓越するような地震波入力に対する検討について論じており、このような地震波入力に対しては、1次+2次といった高次モードにも付加系を対応（同調）させる必要があることを示している。5.6節は本章のまとめである。

## 第6章「結論」

第6章では、これまで得られた知見と今後の課題について論じ、本論文の総括とした。定点理論を準用した最適調整条件解において、本論文で提案する多重（主に2重）同調型システムは、単一同調型より同じ応答倍率（同程度の制振効果）に必要なトータルの付加系諸元（等価質量、粘性減衰係数、支持部材剛性）を小さくでき（2重同調型は単一同調型より付加系減衰定数が小さくなるので、システムに対する粘性要素部の変形比がより増大しエネルギー吸収効果の効率が良いため）、超高層建物の検討においてもその制振効果を明らかにした。また、ダンパー軸力制限機構を適用することにより、制振効果を損なうことなくダンパー軸力を大幅に低減できること、建物の高次モード成分が卓越する地震動に対しては1次のほか2次モードなどに対しても同調させると良い制振効果が得られることを明らかにした。

以上が論文内容要旨である。

# 論文審査結果の要旨

兵庫県南部地震以降、地震に対する建物の損傷を制御する制振構造の設計法が提唱され、実建物に多く採用されるようになった。本論文では、制振システムの一つとして、慣性接続要素、粘性要素、支持部材要素の3要素からなる付加振動系を各々異なる固有振動に分散配置した多重同調粘性マスダンパーシステムを開発し、その応答性状を実験により明らかにするとともに、地震応答解析を行って建築構造物の地震応答低減に有効であることを示したもので、全6章よりなっている。

第1章は序論である。

第2章では、多重同調型システムの応答性状を、粘性ダンパーシステムや単一同調型システムと比較して基本特性を示すとともに、本システムでは、主系の固有振動数に同調させることにより、粘性部変位を動的に拡大して効率よくエネルギー吸収を行い、制振効果を高められることを示している。

第3章では、多重同調粘性マスダンパーを持つ1質点系構造物の調和入力や地震外乱を対象とした最適調整条件とその時の応答性状について論じている。その結果、多重同調型は、単一同調型より同じ応答倍率（同程度の制振効果）に必要な付加系諸元（等価質量、粘性減衰係数、支持部材剛性）が小さくてもよいことを明らかにしている。

第4章では、実大同調粘性マスダンパーの要素動的加振実験と2重同調粘性マスダンパー制振システムのシステム全体としての縮小模型振動実験を行い、その制振効果について理論および解析手法の妥当性の検証について論じている。その結果、試験体の解析諸元を精度良く評価することによって調和加振のみでなく地震動などのランダムな加振においても実験値と解析値は良い整合性を示すこと、支持部材を柔にして同調粘性マスダンパーの固有振動数を低く抑えることで高振動数成分が入力されにくくなり安定した履歴形状を示すこと（フィルター効果）、主系の剛性が変化しても等価剛性で評価して同調させればよい制振効果が得られることを明らかにしている。

第5章では、超高層建物への適用性を論じるために、曲げせん断系50質点系建物モデルを設定してさまざまな地震動を対象として地震応答解析を行い、高さ方向の各種最大応答値分布を示している。その結果、長周期成分が支配的な地震動に対しては1次モードに同調させ、短周期成分も卓越する地震動に対しては1次のほか2次のモードに対しても同調させるとよい制振効果が得られることを示している。さらに、ダンパーの負担軸力に対しては、軸力制限機構を適用することにより、制振効果を損なうことなく軸力を大幅に低減できることを指摘している。また、単一同調型と比較して、小さいダンパー諸元で同じ制振効果が得られることを示して、多重同調型の有利性を明らかにしている。

第6章は結論である。

以上を要するに、本論文は、多重同調粘性マスダンパーシステムの動的応答性状を実験および解析で明らかにし、さらに、超高層建物に適用した場合の有効性を示すものであり、建築構造物の地震時安全性を向上させることに寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。