

論文の内容の要旨

論文題目 セミアクティブ構造制御システムの研究

氏名 倉田成人

1. 研究の背景と目的

構造制御 (structural control) とは、構造物の応答を制御する手法のことであり、アクティブ制御、セミアクティブ制御、パッシブ制御、免震及びこれらを組み合わせたハイブリッド制御等の総称である。構造制御手法には、大地震時の建築土木構造物の構造安全性向上による人命の確保、財産の保全はもとより、中小地震や風に対する居住性の向上や交通振動の低減等、様々な構造性能の実現が求められている。このような状況で、セミアクティブ制御の以下のような特長が注目され、近年活発に研究開発が行われている。

- ・ アクティブ制御の高性能性、パッシブ制御の経済性と高信頼性の両者の利点を有する
- ・ 剛性、減衰係数といった制御装置自体の特性を調節するだけなので、わずかな供給エネルギーでよく、低コストで大きな制御力が得られる
- ・ コンパクトな外形の制御装置になるので、構造物内に特別な設置スペースを設けなくても多数台を設置できる
- ・ 制御対象を不安定化するような制御力は発生できない為、信頼性が高い
- ・ メンテナンスが比較的容易である

これらにより、小さな地震から大きな地震までを対象として優れた応答制御性能を発揮するセミアクティブ構造制御システムを、経済的な裏付けと高い信頼性を持って実現することが可能である。上記を背景として、本論文では以下の3点を研究目的とした。

- (1) 建築構造物を対象としたセミアクティブ構造制御の基本特性を明らかにする

(2) 多自由度構造物に対する多入力セミアクティブ構造制御手法を提案し、解析的及び実験的に制御性能を示す

(3) 提案したセミアクティブ構造制御手法を実建物に適用して、その有効性を実証する

2. セミアクティブ構造制御システムの基本特性

研究目的(1)に対して、セミアクティブ構造制御システムを有する1自由度モデルにより基本特性を確認した。従来多くの研究で扱われているが、ある特定のモデルや外乱に対する制御効果が議論されているのみであった。本研究では、調和地動に対する定常応答倍率と1周期のサイン波（1サイン波）入力に対する応答倍率を求め、セミアクティブ制御系の基本性能を確認するとともに、地震応答をスペクトル表現し、任意の無制御固有周期を持つ構造物に対する制御効果を考察した。これらより、以下のような知見が得られた。

- ・ 変位応答を小さくする為には大きなゲインで制御した方がよいが、加速度応答を小さくする為には適当な大きさのゲインで制御した方がよい
- ・ 主系に対する付加系の剛性比 k_r が制御性能に与える影響は多大で、これが大きいほど制御性能が高く、アクティブ制御の結果に近づく傾向がある
- ・ 最適に調整されたパッシブ制御に対して、セミアクティブ制御ではさらに応答が低減されており、その優位性は明確である
- ・ 通常地震応答スペクトル上で減衰定数を大きくしていくと応答が小さくなるような地動が共振的に作用する周期では、定常応答の結果と同様に制御による応答低減効果が高い
- ・ 逆に、地動が衝撃的に作用するなど地震応答スペクトル上で減衰定数を大きくしても応答が小さくならないような周期では、1サイン波応答の結果と同様に明瞭な共振ピークを生じない為、制御による応答低減効果も小さくなる
- ・ すべての地震波に対する制御効果を保証することは難しいが、制御手法に減衰を付加する相対速度フィードバックを用いていることと、定常応答、1サイン波応答で得られた制御効果を合わせて考えると、本制御手法により、通常の耐震設計手法やパッシブ制御手法よりも高い構造安全性を付与できることは明らかであると考えられる

3. 多自由度構造物に対する多入力セミアクティブ構造制御

研究目的(2)に対して、多自由度構造物に対する多入力セミアクティブ構造制御手法を提案し、制御性能を確認した。まず、多自由度系モデルに対して最適制御理論を応用した制御系設計手法を示した。従来は、免震構造物や橋梁構造物などを対象とした1自由度系あるいは1制御入力系が検討されていたが、本研究により、多自由度構造物に対する多入力セミアクティブ制御系が初めて扱われ、合理的な設計が可能となった。制御則には、適用実績の多さと信頼性、多数の制御装置が設置される多自由度系への適用性からLQ制御を応用した。これを、振動台実験で用いる3層試験体モデルに適用し、セミアクティブ制御時の

地震応答解析を行って以下のように制御性能を確認した。

- ・ 制御力に対する重み係数 r を小さくしていくと大きなフィードバックゲインが得られ、これにともなって試験体頂部変位は単調に減少していくが、頂部加速度はある値より r を小さくしても逆に増加していく傾向が得られた
- ・ 代表的なゲインを用いて制御した結果を無制御時と比較することにより、最大応答値分布、時刻歴波形などから高い応答低減効果が確認された
- ・ 各階のセミアクティブ制御装置の減衰力は最適制御力とよく一致しており、アクティブ制御と同等の高い制御性能が得られていると考えられる
- ・ セミアクティブ制御装置の設置階が多いほど応答を小さくでき、設置階が少なくても、それに応じた応答低減効果が得られる
- ・ 制御のロバスト性については、設計に用いたモデルよりも実際の建造物の剛性が高くなると制御効果が劣化し、剛性が低くなると優位になる傾向があるが、剛性が高くなったとしても、制御効果が失われることはなく、速度フィードバック制御のロバスト性により応答は低減された。

さらに、模型セミアクティブダンパを設置した3層試験体を振動台で地震波加振しながら応答制御した実験を実施した。実験結果より、試験体の頂部最大応答値、最大応答値分布、時刻歴波形、2階床加速度のフーリエスペクトル、設置階による差に関して、解析結果と同様の傾向が得られ、十分実建造物に適用可能と考えられる。

また、実験結果のうち代表的なケースについて、シミュレーション解析を行い、設定した解析モデルにより、試験体の応答、模型セミアクティブダンパの減衰力とも、実験結果をよくシミュレートできることが確認された。

4. セミアクティブ構造制御システムの実建物への適用

研究目的(3)に対して、セミアクティブ構造制御手法を5層実建物に適用して、その有効性を実証した。建築土木建造物に対するセミアクティブ構造制御システムの適用としては、連続可変型制御装置を用いていることと、大地震に本格的に対応したことで世界初の事例となる。まず、LQ制御を応用した制御系設計と制御時の地震応答解析を行い、以下のような知見を得た。

- ・ 最大速度を50cm/secに基準化したエルセントロ波、タフト波、八戸波及び仮想東海地震波に対する結果から、LQ制御によるゲインと応答との関係を示し、小さく抑えたい応答が何であるかによって最適なゲインが異なる
- ・ この中で、ベースシア、層間変形が十分に小さく、屋上階加速度も大きくならないことを目安に、5つのゲインの中から、以後の検討で中心的に用いる代表ゲインを選定した
- ・ その代表ゲインを用いた制御により、大地震に対して建物の構造安全性はもとより、

各種機能の健全性を確保することを実現する目安として、構造体が弾性範囲を保ち、層間変形角が 1/200 程度に収まるという目標が達成された

続いて、セミアクティブオイルダンパの基本仕様と制御性能を確認する為に、セミアクティブオイルダンパ単体の動的加力実験を実施した。まず、剛性、最大・最小減衰係数、リリーフ荷重を確認した後、解析結果の時刻歴波形を用いて、セミアクティブオイルダンパが建物内に設置された状態で地震時に受けるであろう変形を再現しながら、減衰力指令を与える制御実験を実施した。実験結果から以下のことがわかった。

- ・ 最大速度を 25、50 cm/sec に基準化したエルセントロ波に対する実験を行った結果から、リリーフ荷重以下では、減衰力指令に減衰力がよく一致している
- ・ 最大速度 25 cm/sec のエルセントロ波、タフト波、八戸波、及び仮想東海地震波入力に対する実験結果から、入力地震波によらず良好な結果が得られた

性能が確認されたセミアクティブオイルダンパと、制御コンピュータ、速度センサから構成されるセミアクティブダンパシステムを建物に設置し、最大加振力 100 kN の起振機による制御状態での加振実験を行った。実験結果から以下のことがわかった。

- ・ 実験結果の時刻歴波形から、計測された各階速度から減衰力指令が作成され、これによりセミアクティブオイルダンパの流量制御弁が制御されて減衰力が発生していることが確認された
- ・ 24 kN 一定の加振で制御を行った結果を、無制御（弁開度 100%指令時、フェールセーフ時）の結果と比較することにより、無制御に対する制御効果が確認された
- ・ 16 kN 一定の加振で制御を行った結果を、セミアクティブオイルダンパを接続していない建物のみとの結果と比較することにより、ダンパなしの場合に対する制御効果が確認された
- ・ 1 自由度バイリニア履歴系の定常応答から等価線形化法により評価した等価減衰定数により、制御により付加される減衰効果が定量的に評価された

5. 結論

以上より、建築構造物を対象としたセミアクティブ構造制御の基本特性が明らかになり、提案した多自由度系構造物に対する多入力セミアクティブ構造制御手法の制御性能が解析的、実験的に示された。さらに、実建物への適用を通じて、セミアクティブ構造制御手法の有効性が実証された。本手法が、建築土木構造物に求められる様々な構造性能の実現に寄与し、人命の確保、財産の保全はもとより、多様化する現代社会の発展に貢献するものであることを信ずる。