

# 博士論文審査報告書

## 論文題目

免震層の変位抑制を意図した減衰力切替えによる応答制御に関する研究

Response Control of Base Isolation Structures with Variable Damping Force

申請者

井上	波彦
Namihiko	INOUE

建築学専攻 建築構造デザイン研究

2020年10月

1989年に世界で初めてアクティブ振動制御建築物「京橋成和ビル」が誕生して以来、建築構造設計における応答制御技術の適用は、きわめて一般的なものとなった。中でも、省エネルギーでありながら、高い性能が期待できるセミアクティブ制御は、制御技術を現実に適用する際のさまざまな制約を軽減しうる枠組みとして、技術者の関心を集めてきた。

他方、通常はパッシブ型の制御となる免震構造の建築への適用例は膨大な数にのぼる。免震構造物は大地震に対して、安全性の確保と機能維持が期待されるが、免震層の変形抑制と上部構造の加速度応答抑制は、一般的にトレードオフの関係にある。この相反関係にある両者を、上述のセミアクティブ制御との融合によって共に満たすことは可能であり、2000年に完成の「慶應義塾創想館」をはじめとして、いくつかの実用例もある。

このような状況の中、本論文は、免震機構に減衰力切替え機構を有するセミアクティブ制御を融合して、免震層の変形抑制を果たすと同時に、効率的で安定性の高い、高度な応答制御の実現を目指すことを目的とし、更に近い将来に高い確率で危険性が叫ばれている長周期地震動にも有効な制御の実現に向けた検討・検証を行っている建築応答制御分野での先進的な研究である。

本論文は4章より構成されている。

第1章は序論である。本研究の背景として、これまでの免震構造に関する研究の進展とセミアクティブ振動制御の適用に関する分類を示し、加えて長周期地震動の行政的取り扱いに関する経緯とその対応について整理したうえで、本論文の目的を提示し、検討・検証項目を明らかにして、論文全体構成を提示している。

第2章は「MRダンパーによる減衰力切替え制御」と題して、磁気粘性(MR)流体を用いたMRダンパーをデバイスとするセミアクティブ制御を免震構造物に適用する目的で、ゲインスケジュール(GS)制御に関する検討・検証を行っている。

MRダンパーは外部から供給する磁場の強さを変動させることで、減衰力を連続的に変化させて必要な制御力を得ることができる。本章の検討では、定電流における繰返し加振試験結果に基づいて、速度-減衰力関係を把握し、必要な制御力を得るための印加電流に関する定式化を行っている。

制御力が減衰係数とダンパー速度の2つのパラメータの積で表現される双線形系のシステムにおいては、それぞれのパラメータを独立に検討できるGS制御が有効である。あらかじめ設計しておいた両パラメータの端点制御器を一定のルールで組合せて、GS制御は行われる。

近年の免震建築物の高層化にともなう免震周期と上部構造固有周期の近接、高次モードの影響によるスピルオーバー発生に対応するために、端点制御器の

設計に際しては、ロバスト性を担保できる  $H_{\infty}$  制御理論を適用している。このような端点制御器の組合せで構成される  $G_S$  制御によって免震層の応答変位の低減と上部構造の応答加速度の増大防止を同時に実現できることを、上部構造と免震層を模擬した 2 層試験体を対象とする実験と解析を通して確認している。

第 3 章は「二段階切替え制御による長周期地震動に対する応答低減効果」と題し、発生の予測されている長周期・長時間地震動（以下、単に「長周期地震動」）への対応として、免震層の過大な応答変位の抑制を目的に、免震層に設置したオイルダンパーの減衰係数の二段階切替え制御について検討を行っている。

減衰係数が一定であると、免震層の応答変位を許容範囲に収めようとするれば、上部構造の応答加速度が増大してしまう。加速度応答より変位応答の成長が遅れるという一般的な傾向を踏まえて、地震動の後半における免震層の応答変位を抑制するため、加振中に一度だけオイルダンパーの減衰係数を高めることを意図した制御則を構成している。

国土交通省大臣認定建築物への適用が義務付けされた地震動（公開波）を長周期地震動として採用した既存免震建築物の予備解析結果から、繰返し依存性が免震層の過大な応答変形の発生につながる免震部材として、鉛プラグ入り積層ゴム支承を検討対象としている。減衰係数の切替えの制御則に関しては、鉛プラグ入り積層ゴムの繰返しによる切片荷重低下にともなう免震層の変形増大に着目して、切片荷重低下率を減衰係数切替えの閾値として採用している。

複数の公開波を対象とした解析による検証を行い、上部構造応答加速度の増大を生ずることなく、免震層の応答が限界変形以下に抑えられることを示している。地震動の後半に一度の減衰係数切替えが行われることにより、過大な応答変形発生が抑制可能であることが示された。

更に、地震動のばらつきの影響を確認するため、公開波のうちターゲットスペクトルの最大値の大きな 3 波形を対象に、位相の異なるばらつき検討用波形をそれぞれ 21 波ずつ作成し、提案制御則を適用した解析を実施している。これは、位相特性の設定によっては、現在の公開波以上に危険側となる波の発生が予想され、そのような場合に関しても提案制御則が有効であることの検証を目的としている。入力地震動にばらつきを考慮した、いずれの波形に対しても一度の減衰係数切替えで、免震層の過大な変位抑制と上部応答の増大を抑えられることを確認している。提案制御則は地震動のばらつきを考慮しても想定する性能を十分に発揮できるものとして極めて有効である。

第 4 章は「結論」であり、第 2 章、第 3 章で得られた成果をまとめている。

以上を要するに、本論文は、MRダンパー、オイルダンパーの減衰係数の切替えによって免震層の過大な変位応答抑制を達成しながら、上部構造の加速度応答の低減が可能であることを示している。建築構造設計への制御技術の融合は今後ますます進むことが予想される。本論文の成果は、建築構造学、構造制御学の発展に寄与するところ大であり、博士（工学）早稲田大学の学位に相応しいものであり、価値あるものと認める。

2020年10月

審査員

主査 早稲田大学理工学術院教授 博士（建築学）早稲田大学

早部 安弘 署名 \_\_\_\_\_

早稲田大学理工学術院教授 博士（工学）早稲田大学

前田 寿朗 署名 \_\_\_\_\_

早稲田大学理工学術院特任研究教授

Ph.D.（コロンビア大学） 工学博士（早稲田大学）

西谷 章 署名 \_\_\_\_\_

早稲田大学研究院客員教授（足利大学教授）博士（工学）早稲田大学

仁田 佳宏 署名 \_\_\_\_\_