

# 博士論文概要

## 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

2019年12月

1989年に世界初のアクティブ制御による制震建築物である「京橋成和ビル」が登場して以降、建築物の構造設計への応答制御技術の適用は一般的なものとなっている。中でも、省エネルギーで高い性能を発揮できるセミアクティブ制御は、制御を現実の建築物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いる。

他方、通常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も、安全性の確保と機能継続が期待されるが、免震層の変位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。上述のセミアクティブ制御との融合により、両者をともに満たすことが可能となり、2000年の「慶応義塾大学創想館」を始めとして、その後いくつかの実用例がある。

このような状況の中、本論文は、免震機構に減衰力切り替え機構を有するセミアクティブ制御を融合して、免震層の変位抑制を果たしながら、効率的で、安定性の高い、高度な応答制御の実現を目指すものであり、特に近年その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を行っている。

第1章は序論である。「研究の背景と目的」と題し、免震構造に関する研究の進展とセミアクティブ制御の適用に関する分類、また長周期地震動の取り扱いに関する経緯とその対応について整理している。同時に、応答低減の必要性など検討目的を明らかにするとともに、論文の全体構成について示した。

第2章は「MRダンパーによる減衰力切替制御」と題し、通常的设计に用いられる程度の地震に対する性能の向上を目的として、減衰力を連続的に変化させて免震層の応答変位のみならず上部構造の応答加速度の両者を低減することについて検証を行っている。免震構造に制御を適用するにあたって、デバイスとしてMRダンパーを採用し、制御アルゴリズムとしてはゲインスケジュール（GS [Gain Scheduled]）制御を適用している。さらに、制御理論の適用にあたっては実機における指令値と制御力との間の時間遅れ等の要因が影響を及ぼす可能性があることから、模型試験体を用いた振動台実験と解析との比較を行っている。

MRダンパーはオイルダンパーの一つであり、作動油として機能性流体の一つである磁気粘性（MR [Magneto-Rheological]）流体を封入することで様々な制御則に対して柔軟に対応できる特徴を有するデバイスである。MR流体は外部から供給される磁場の強さを変えることにより粘度を変化させ、デバイスの発生する減衰力を連続的に可変とすることができる。本検証では、定電流における繰り返し加振結果に基づく速度—減衰力関係から定式化された制御力と印加電流との関係式を用いて制御を行った。

G S制御は、制御力がデバイスの速度に比例する双線形系のシステムに対し適切な解を得ることが可能な制御理論である。制御力に関するパラメータである減衰係数及び速度を時変パラメータとして制御系設計に組み込み、これら2つの時変パラメータをそれぞれ軸とする平面上での各時変パラメータの最大値及び最小値の組合せ、すなわち端点についてあらかじめ設計された特定の制御器(ゲイン)を一定のルールで組み合わせて(スケジュール)制御を行う。本検証では、時変パラメータに応じた適切な端点制御器の設定により、制御の切り替えに伴う応答の劣化(加速度応答の増加)を防止しつつ、免震層の応答変位を効果的に低減できることを示した。

検証にあたっては、免震構造の応答周期と上部構造の固有周期とが近接する可能性や、無視した上部構造の影響によるスピルオーバー現象発生の可能性に対応するため、免震試験体の上部構造を1層(1質点)でなく2層の構造物として設計するとともに、G S制御の端点制御器の設計にロバスト性を理論的に担保できる $H^\infty$ 制御を適用し、免震層の応答変位の低減と同時に上部構造の応答加速度の増大も防止できることを示した。

第3章は「二段階切替制御による長周期地震動に対する応答低減効果」と題し、南海トラフ沿いの巨大地震などにおいて発生が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」)に関連して、免震層の過大な応答変位やそれに伴う周囲構造物との衝突などの問題への対応の必要性が提起されていることから、地震応答の過程で一度だけ減衰係数を切り替えて応答変位を低減する二段階切替制御の有効性について検証を行っている。なお、二段階切替制御では制御効果に対する減衰力の時間遅れなどの影響は生じないと考えられるため、実験による検証は不要と判断して実施していない。

長周期地震動については、時刻歴応答解析を行う大臣認定建築物の性能評価で必ず採用しなければいけない地震動(国土交通省の通知において示された、いわゆる公開波)を対象とした。

免震構造については、各種の減衰材の採用を仮定した代表的な複数の免震構造に公開波を入力し、免震部材の繰り返し依存性の影響を考慮した解析を行った結果、免震層の過大な応答変位の発生につながる可能性の高いものとして、鉛プラグ入り積層ゴム支承を設けた既存の免震建築物を検討対象とした。

二段階切替制御は、免震層に減衰要素としてオイルダンパーを設けて応答を抑制する際に見られる免震層の応答変位と上部構造の応答加速度とのトレードオフの関係を改善するためのものである。長周期地震動に対して免震層の応答変位を許容範囲に収めることを意図した減衰の設定では、減衰係数が一定値であると上部構造の応答加速度が増大して上部構造の損傷や居住性の劣化につながる恐れが

ある。そこで、加速度応答より変位応答の成長が時間的に遅れる傾向を踏まえ、地震応答の後半にのみ応答変位の抑制への対応として減衰を高めるよう、地震時に一度だけ減衰係数の切り替えを行う二段階切替制御を提案し、解析により検証した。減衰係数の切り替えに関しては、免震層の応答変位と鉛プラグ入り積層ゴムの繰り返し依存性（切片荷重の低下率）との関係に着目したところ、過大な応答変位の見られた解析ケースでは、すべて低下率が0.715未満となっていたことから、地震応答の初期状態（すなわち低下率1.0）から切片荷重が逡減して低下率0.715に達することを防止するために、低下率が0.8または0.9に達する時点が減衰係数の切り替えの閾値として設定した。

公開波のうち免震層の応答の大きくなる波形を用いて二段階切替制御を適用した解析の結果、通常用いられるレベル2地震動に対する上部構造の頂部応答加速度を抑制し、同時に、免震層の応答変位を限界変位以内に抑えることができた。鉛プラグ入り積層ゴムにおいては切片荷重の低下率が積層ゴムの吸収エネルギーに対し逡減する特性に着目することで、地震応答の後半に過大な変形発生の恐れが大きくなる場合に付加減衰を高くして対応することが可能となった。

また、公開波を用いた検討に対する補足として、位相が変化した場合の影響を把握するため、公開波のうちターゲットスペクトル  $pS_v$  ( $h=5\%$ ) の大きな波形について、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、二段階切替制御を適用した解析を実施した。鉛プラグ入り積層ゴムの切片荷重の低下が吸収エネルギーと関連することから地震波のエネルギースペクトル  $V_e$  ( $h=10\%$ ) に着目して比較したところ、公開波の  $V_e$  の数値はばらつき検討用波形の変動の範囲内にあるが、ばらつき検討用波形の平均よりも下回る場合もあった。こうした  $V_e$  のばらつき等の影響によって、公開波を用いた結果はばらつきを考慮した解析に対して必ずしも安全側の評価とならないこともある。ただし、減衰を付加することでいずれの波形に対しても応答のばらつきは抑えられることも示されており、二段階切替制御は地震動の位相の変化を考慮しても想定する性能を発揮できるものと考えられる。

第4章は「結論」と題し、総括として本研究の成果を要約するとともに、今後の課題について示している。

本研究は、大地震時の安全性確保や地震直後からの機能継続など高い性能を目標とする免震構造について今後想定される巨大地震を含む様々な特性を有する地震に対し免震層の応答変位の抑制と上部構造の応答加速度の低減を同時に達成し、かつ、既存の免震建築物にも適用可能な免震構造の性能向上手法として、地震に対する都市のレジリエンスを高めることに寄与するものと考えられる。

## 早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

氏名 井上 波彦 印

(2019年12月 現在)

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
a. 論文 ○	<p>a. 1) <b>井上波彦</b>, 仁田佳宏, 西谷章: 二段階制御を適用した免震構造物の長周期地震動時に対する応答低減効果の検討, 構造工学論文集, Vol. 65B, pp. 115-121, 日本建築学会, 2019. 3</p> <p>a. 2) 森田高市, <b>井上波彦</b>: 時刻歴免震データベースに基づく既存免震建物の構造特性と長周期地震動に対する影響評価, 日本建築学会技術報告集, Vol. 22, No. 52, pp. 901-904, 日本建築学会, 2016. 10</p> <p>a. 3) 猿田正明, 山本祥江, 森川和彦, 中西啓二, 飯場正紀, 小豆畑達哉, 井上波彦: 東北地方太平洋沖地震における超高層免震建物の挙動, 日本建築学会技術報告集, Vol. 19, No. 42, 日本建築学会, pp. 477-480, 2013. 6</p> <p>a. 4) 渡壁守正, <b>井上波彦</b>, 西村秀和, 龍神弘明, 仲宗根淳, 中村佳也, 長屋雅文, 金川基: 多自由度系免震構造物に適用したMRダンパによるセミアクティブ(GS)制御性能, 日本建築学会構造系論文集, Vol. 628, pp. 875-882, 日本建築学会, 2008. 6</p> <p>○ a. 5) <b>井上波彦</b>, 渡壁守正, 西村秀和, 龍神弘明, 仲宗根淳, 中村佳也: 2自由度系免震建物に適用したMRダンパによるセミアクティブ制御(GS制御)性能, 日本建築学会構造系論文集, Vol. 609, pp. 57-64, 日本建築学会, 2006. 11</p> <p>a. 6) 樋渡健, 藤谷秀雄, <b>井上波彦</b>, 川辺秀憲: MRダンパーを用いた免震構造の長周期地震動に対する変形抑制効果, 第12回日本地震工学シンポジウム, pp. 942-945, 日本地震工学会, 2006. 11</p> <p>a. 7) 小豆畑達哉, 飯場正紀, <b>井上波彦</b>, 緑川光正: 2004年新潟県中越地震における免震建築物の対地震性能に関する建築物利用者へのアンケート調査, 日本地震工学論文集, 第6巻第4号, pp. 19-37, 日本地震工学会, 2006. 11</p> <p>○ a. 8) <b>N. INOUE</b>, H. NISHIMURA, M. WATAKABE: "Performance Improvement of Base Isolation System with Semi-active Magneto-Rheological Fluid Damper", The Second International Workshop on Advanced Smart Materials and Smart Structures Technology, pp. 455-468, Techno Press (Korea), 2005. 7</p>
b. 総説	(該当なし)
c. 講演	<p>c. 1) <b>井上波彦</b>, 田中京介, 梁川幸盛, 庄司正弘: 公開波及び異なる位相に基づく長周期地震動に対する免震構造物の応答, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造 II, No. 21030, pp. 59-60, 2019. 9</p> <p>c. 2) 森田高市, <b>井上波彦</b>, 小豆畑達哉, 飯場正紀: 時刻歴免震データベースに基づく既存免震建物の構造特性, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造 II, No. 21288, pp. 575-576, 2015. 9</p> <p>c. 3) 猿田正明, 森川和彦, 中西啓二, 山本祥江, 飯場正紀, 小豆畑達哉, <b>井上波彦</b>: 免震建築物の地震観測記録の分析とシミュレーション解析, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造 II, No. 21213, pp. 425-426, 2012. 9</p> <p>c. 4) 飯場正紀, 小豆畑達哉, <b>井上波彦</b>, 平野茂: 2011年東北地方太平洋沖地震における戸建免震住宅の地震時挙動(その2 宮城県内の戸建免震住宅の調査および変位応答と近傍地震動の関係), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造 II, No. 21257, pp. 513-514, 2012. 9</p> <p>c. 5) <b>井上波彦</b>, 飯場正紀, 三上和久: 変位抑制部材を用いた免震モデルの振動台実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造 II, No. 21499, pp. 997-998, 2007. 7</p>

## 早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
c. 講演 (続き)	<p>c. 6) <u>井上波彦</u>, 西村秀和, 荒武宗伸, 渡壁守正, 伊藤嘉朗, 仲宗根淳, 長屋雅文, 龍神弘明, 中村佳也, 金川基: MR ダンパを用いたセミアクティブ免震建物に関する研究 (その 15 3 層試験体モデルとセミアクティブ免震実験概要), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造 II, No. 21320, pp. 639-640, 2006. 7</p> <p>c. 7) 渡壁守正, 西村秀和, 荒武宗伸, 稲井慎介, 大川出, <u>井上波彦</u>, 龍神弘明, 中村佳也, 仲宗根淳, 長屋雅文, 金川基: 2 層化されたセミアクティブ免震システムの基礎実験 (その 2 実験とシミュレーション解析による検証), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造 II, No. 21323, pp. 645-646, 2006. 7</p> <p>c. 8) 仲宗根淳, 西村秀和, 荒武宗伸, 渡壁守正, 稲井慎介, 大川出, <u>井上波彦</u>, 龍神弘明, 中村佳也, 金川基, 長屋雅文: 複数層に配置されたセミアクティブダンパによる多自由度構造物の制振 (その 2 実験とシミュレーション解析による検証), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造 II, No. 21337, pp. 673-674, 2006. 7</p> <p>c. 9) 樋渡健, 藤谷秀雄, <u>井上波彦</u>, 川辺秀憲: 南海地震および山崎断層地震を想定した免震構造の応答制御 (その 5 MR ダンパーを用いた変位抑制制御による応答結果), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造 II, No. 21351, pp. 701-702, 2006. 7</p> <p>c. 10) H. FUJITANI, H. FUJII, H. SAKAE, T. HIWATASHI, H. KAWABE and <u>N. INOUE</u>: Structural Control Capability of MR Damper in Shaking Table Tests by Comparison with Variable Hydraulic Damper, Proceedings of 4<sup>th</sup> World Conference on Structural Control and Monitoring, No.175, 2006. 7</p> <p>c. 11) T. HIWATASHI, H. FUJITANI, H. KAWABE and <u>N. INOUE</u>: Response Control of Base-Isolated Structure to Long Period Earthquake Ground Motions Near Fault, Proceedings of 4<sup>th</sup> World Conference on Structural Control and Monitoring, No.369, 2006. 7</p> <p>c. 12) 藤谷秀雄, 渡辺一弘, <u>井上波彦</u>, 樋渡健, 曾田五月也: MR ダンパーの実用化に向けた試み, 日本地震工学会年次大会 2005 梗概集, pp. 178-179, 2005. 11</p> <p>c. 13) 小豆畑達哉, 緑川光正, 飯場正紀, <u>井上波彦</u>: ストッパーによる戸建て免震住宅の地震応答変位抑制効果に関する考察, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造 II, No. 21411, pp. 821-822, 2005. 7</p> <p>c. 14) <u>井上波彦</u>, 渡壁守正, 仲宗根淳, 龍神弘明, 中村佳也, 西村秀和, 岩田直衛, 宮原悠: MR ダンパを用いたセミアクティブ免震建物の実用化に関する研究 (その 1: 振動台実験およびシミュレーション解析による制御性能検証), 第 3 回日本制震シンポジウム, 2004. 11</p> <p>c. 15) <u>N. INOUE</u>, H. NISHIMURA, J. NAKASONE, M. WATAKABE, M. KANAGAWA, Y. NAKAMURA, H. RYUJIN: Study on Semi-active Isolation System with Magneto-rheological Fluid Damper, Proceedings of 10<sup>th</sup> Anniversary Symposium of Japan Society of Seismic Isolation, 2004. 11</p> <p>c. 16) <u>N. INOUE</u>, H. NISHIMURA, N. IWATA, Y. MIYAHARA, J. NAKASONE, M. WATAKABE, S. TAKAI, Y. NAKAMURA, T. FUJINAMI and H. RYUJIN: Study on Semi-active Isolation System with Magneto-rheological Fluid Damper, Proceedings of 13<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering, No. 2693, 2004. 8</p> <p>c. 17) <u>井上波彦</u>, 西村秀和, 渡壁守正, 龍神弘明, 仲宗根淳, 中村佳也, 高井茂光: MR ダンパを用いたセミアクティブ免震建物に関する研究 (その 6 MR ダンパを応用したセミアクティブ制御の現状と今後の展望), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造 II, No. 21172, pp. 343-344, 2004. 7</p>

## 早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
c. 講演 (続き)	<p>c. 18) <u>井上波彦</u>：これからの建築構造システム —高知能建築構造システムの開発—, 第15回建築施工ロボットシンポジウム, 日本建築学会, 2004. 1</p> <p>c. 19) H. FUJITANI, H. SODEYAMA, K. HATA, T. HIWATASHI, Y. SHIOZAKI, <u>N. INOUE</u> and S. SODA : Application of Magnetorheological Fluid to Semi-Active Control of Building Structures by BRI and Partners, Key Engineering Materials, pp. 2126-2133, 2003. 11</p> <p>c. 20) 西村秀和, <u>井上波彦</u>, 仲宗根淳, 安田征一郎, 渡壁守正, 高井茂光, 木本幸一郎, 中村佳也, 藤波 健剛: MR ダンパを用いたセミアクティブ免震建物に関する研究 (その1 セミアクティブダンパのモデル化), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造 II, No. 21459, pp. 917-918, 2003. 7</p>
d. 著書	<p>d. 1) 飯場正紀, 長島一郎, 日比野浩, 竹中康雄, 近藤明洋, 中西啓二, 猿田正明, 山本雅史, 嶺脇重雄, 小豆畑達哉, <u>井上波彦</u>: 免震部材の多数回繰り返し特性と免震建築物の地震応答性状への影響に関する研究, 建築研究資料 No. 170, 2016. 4</p> <p>d. 2) 国土技術政策総合研究所 (<u>編集委員</u>): 2015 年版建築物の構造関係技術基準解説書, 日本建築防災協会・住宅性能基準推進協会, 2015. 6</p> <p>d. 3) 国土技術政策総合研究所 (<u>編集委員</u>): 2007 年版建築物の構造関係技術基準解説書, 日本建築防災協会・日本建築センター, 2007. 8</p> <p>d. 4) 建築研究所 (<u>編集委員</u>): 2001 年版建築物の構造関係技術基準解説書, 日本建築センター, 2001. 3</p> <p>d. 5) 国土技術政策総合研究所 (<u>編集委員</u>): 免震建築物の技術基準解説及び計算例とその解説 (平成 16 年改正告示の追加分一戸建て免震住宅を中心として), 日本建築センター, 2005. 10</p> <p>d. 6) 建築研究所 (<u>編集委員</u>): 免震建築物の技術基準解説及び計算例とその解説, 日本建築センター, 2001. 5</p>
e. その他	<p>e. 1) <u>井上波彦</u>: 平成 28 年熊本地震の構造別被害状況 (免震), 建築防災, Vol. 464, pp. 55-62, 日本建築防災協会, 2016. 9</p> <p>e. 2) 建築研究所: 長周期地震動対策に関わる技術資料 (別紙 5-2 免震建築物の繰り返し依存性の検証方法), <a href="https://www.kenken.go.jp/japanese/contents/topics/lpe/52.pdf">https://www.kenken.go.jp/japanese/contents/topics/lpe/52.pdf</a>, 2016. 6</p> <p>e. 3) 五條渉, <u>井上波彦</u>: 構造設計に関する法体系, 建築技術, No. 700, pp. 120-124, 建築技術, 2008. 5</p> <p>e. 4) <u>井上波彦</u>: 性能設計の考え方: 建築雑誌, Vol. 120 No. 1531, pp. 8-9, 日本建築学会, 2005. 3</p> <p>e. 5) <u>井上波彦</u>, 飯場正紀: 免震告示の改正について, MENSIN, No. 46, pp. 33-38, 日本免震構造協会, 2004. 11</p> <p>e. 6) 飯場正紀, <u>井上波彦</u>: 平成 12 年建設省告示第 2009 号「免震建築物の構造方法に関する安全上必要な技術的基準を定める等の件」の改正について, ビルディングレター, 第 463 号, pp. 1-5, 日本建築センター, 2004. 11</p> <p>e. 7) <u>井上波彦</u>: 戸建て免震住宅の設計ルート, 建築技術, No. 657, p. 118, 建築技術, 2004. 10</p> <p>e. 8) <u>井上波彦</u>: 磁気粘性流体を応用した免震システム, 工業材料, Vol. 52, No. 5, p. 54, 日刊工業新聞社, 2004. 5</p>