

平成 26 年 5 月 27 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23360239

研究課題名(和文)地震動入力レベルに対応したクライテリアを満たす免震建物の変位制御設計の開発

研究課題名(英文)Development of Displacement Control Design Method

研究代表者

井上 範夫(Inoue, Norio)

東北大学・工学(系)研究科(研究院)・名誉教授

研究者番号：50250725

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 15,200,000円、(間接経費) 4,560,000円

研究成果の概要(和文)：より性能の高い免震建物を設計するためには、頻繁に発生する小さな地震から一般的な設計レベルを超える巨大地震までを対象として、地震入力レベルに対応した設計目標を満たす設計法が必要であり、本研究では応答変位に応じて特性を変化させることのできるダンパーを開発し、それを用いた「変位制御設計」を提案した。これにより、各地震レベルに対して、上部建物の応答加速度をあまり大きくしないで、免震層の応答変位を効果的に抑制できることを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：A new design strategy is required to achieve a higher performance seismic isolation system, which satisfies multiple design criteria for multiple earthquake input levels; a moderate input level as frequently experienced one, a severe input level as the design input level, and an extreme input level. This research work developed new energy dissipating devices that changes their control properties in direct response to isolator displacements, and proposed the "displacement design" strategies for seismic isolated buildings, which enabled more efficient displacement control of isolator displacement without increasing floor response accelerations in the superstructure.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：建築学・建築構造・材料

キーワード：免震構造 変位制御設計 ダンパー 地震入力レベル 多目的最適設計

### 1. 研究開始当初の背景

阪神淡路大震災で地震に対する効果が実証されて以来、免震構造は様々な建物に多数使用されている。現行法において、その設計における目標は、極めて稀に起こる大地震に対して人命のみならず財産も保全することである。しかしながら、発生する頻度の高い中小地震時には上部建物の応答加速度が低減できず、免震効果が不十分になる事例や、長周期成分を持つ巨大地震時には減衰が不足して免震層の過大な応答変位が生じる恐れが指摘されている。このような問題を解消し、より性能の高い免震建物を設計するためには、小さい地震から大きい地震までを対象として、地震動入力レベルに対応した設計目標を満たす設計法を開発する必要がある。

### 2. 研究の目的

免震建物の応答を抑制するためには、免震層に設置する減衰装置が重要である。現状では、オイルダンパーや鉛・鋼棒ダンパーなどが減衰装置として使用されているが、これらの性能は、極めて稀に起こる大地震の時に最適となるように設定されているため、中小地震や巨大地震時には免震効果を十分発揮することが出来ない。この問題を克服するためには、免震層の応答変位に対応して、ダンパーの減衰特性を自ら変化させることのできる、パッシブなスマートダンパーが有効である。研究代表者は、この設計法を「建築物の変位制御設計」と呼び、それを具体化できるいくつかの免震装置を開発し、それを用いた制御法を提案している。本研究では、この設計法の理論的根拠を明らかにするとともに、開発したダンパーの特性とその適用法を実験と解析により示す。さらに、実大建物を想定した解析を行い、実用化についても検討を行う。

### 3. 研究の方法

(1) 応答変位に応じて減衰性能を変化させる減衰装置として、磁気粘性流体ダンパー、性能可変オイルダンパー、連結機構摩擦ダンパーを開発・改良した。さらに、可変ではないが、効果の高い粘性マスダンパーも開発した。これらを対象として、振動台を用いたダンパー単体の動的加振実験を実施して、動的特性を明らかにした。

(2) 上記の各種ダンパーを、1層あるいは3層の鉄骨造縮小免震試験体の免震層に設置して、振動台実験を行った。地震動の入力レベルを小・中・大の三段階に設定して加振を行い、各ダンパーが応答変位レベルに応じて可変となること、およびそれにより入力レベルに対応したきめ細やかな免震効果を発揮できることを明らかにした。

(3) 各種ダンパーを設置した実大の免震建物を想定して地震応答解析を行い、性能が可変するダンパーの有効性を明らかにし、「変

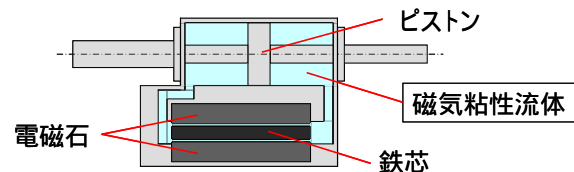
位制御設計」の妥当性を示した。

### 4. 研究成果

(1) 本研究の成果の一部を、丸善出版より「建築物の変位制御設計 地震に対する免震・長周期建物の設計法」と題して、研究代表者の井上と研究分担者の五十子との共著として出版した。「建築物の変位制御設計」は、研究代表者が東北大学で長年研究してきたテーマであり、本研究はその最後のまとめとして実施されたものである。



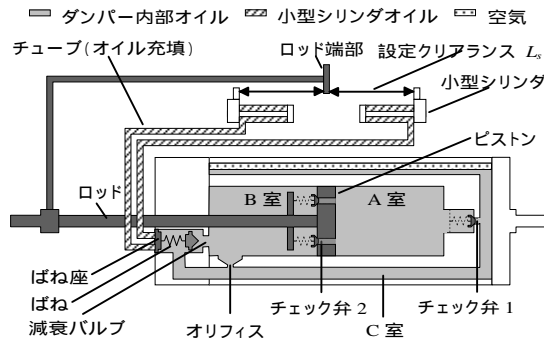
(2) 磁気粘性流体ダンパーを用いて、変位制御設計の理論的妥当性を実験・解析により明らかにした。従来のオイルダンパーなどの流体ダンパーでは、応答速度に応じてダンパー力が発揮されるので、応答変位が小さくても無駄に大きなダンパー力を生じてしまう可能性があるが、変位制御設計に基づいて制御する磁気粘性流体ダンパーを用いると、オイルダンパーより小さな力で効果的に変位応答を抑制できることが分かった。ただし、本ダンパーを理論的に制御しようとする、現時点より先の地震入力情報が必要になってしまうので、現時点までの情報から先を予想して効果的に制御を行うことのできる実用的方法を考案し、振動台実験により実現可能性を明らかにするとともに、変位制御の有効性を明らかにした。



磁気粘性流体ダンパーの機構図

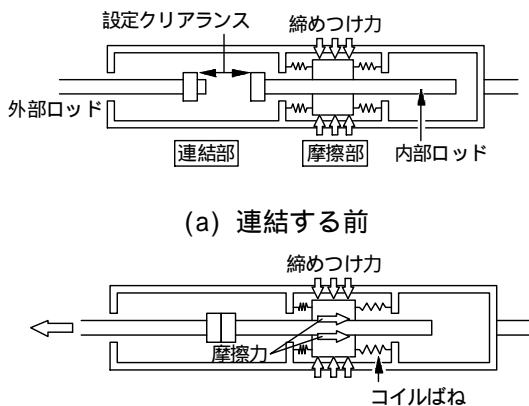
(3) 性能可変オイルダンパーを用いて、変位制御設計の有効性を明らかにした。ダンパーについては、既往のものに比べてストロークと耐力を大きくした新たなダンパーを製作し、その特性を明らかにした。また、ストロークを大きくしたことにより、地震入力レベルを3段階に設定した振動台実験が可能となり、1層および3層の鉄骨造縮小免震試験体に設置して動的実験を実施した。本ダンパーは、応答変位が大きくなると、小型シリンダーからの油圧で減衰バルブが閉まって減衰特性が大きくなるという機構を有してい

るが、動的実験によりその可変性が精度よく発揮できることを確認した。また、減衰特性を増加させることにより、上部構造の応答加速度をあまり大きくしないで免震層の応答変位を効果的に抑制することができ、変位制御設計の有用性を明らかにした。さらに、戸建て住宅や事務所ビルへの適用性についても解析的検討を行い、有用性を明らかにした。



性能可変オイルダンパーの機構図

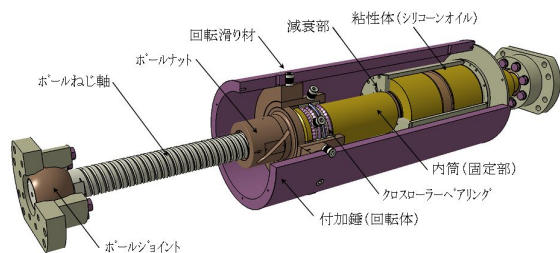
(4) 連結機構摩擦ダンパーを3層の鉄骨造縮小免震試験体に設置して振動台実験を実施した。免震層の応答変位が大きくなってダンパーのロッドが連結する際には、多層の上部構造に衝撃的な加速度が生じるが、適切なバネを設置することによりその影響を低減できることを明らかにした。また、応答を効果的に抑制するためには、ダンパーの諸定数を適切に設定する必要があるため、逐次2次計画法を用いて算定した。これにより、免震層の応答変位、残留変位、上部構造の加速度などに関して地震動レベルに応じた目標値を定めて設計を行うことが可能になった。さらに、滑り支障を持つ戸建て免震建物への適用性を検討し、その有用性を明らかにした。



連結機構摩擦ダンパーの機構図

(5) 研究代表者らは、ボールねじを用いて直線運動を回転運動に増幅変換する機構を用いた粘性マスダンパーを開発し、これを柔な

部材で支持した同調粘性マスダンパーシステムが、超高層建物の過大变位応答の抑制に効果があることを明らかにしている。この粘性マスダンパーを免震用に改良して、免震建物へ適用することを目指して、解析・実験的検討を行った。その結果、免震層に大きな質量を付加すると地震入力を低減できることが分かった。また、それに伴って入力される短周期成分を低減するためには、ダンパー軸力を摩擦力で頭打ちすることや、ダンパーを支持するバネを適切な値に設定してフィルター効果を利用することが有効であることが分かった。1層鉄骨造縮小免震試験体に設置して振動台実験を実施し、実験的にもこれらの効果を確認することが出来た。しかしながら、実大の建物に対する効果的な適用方法については、継続的に研究をすすめることとした。



粘性マスダンパーの機構図

(6) 以上の研究を総合的にまとめて評価を行った。本研究では、免震層の応答変位に対応してダンパーの減衰特性を可変させ、地震入力レベルに応じてきめ細かな免震設計ができることを明らかにし、「免震建物の変位制御設計」の妥当性を示すことが出来た。さらに、この考え方を実現するために、いくつかのダンパーを開発・改良し、振動実験によりダンパー特性を明らかにするとともに、鉄骨造縮小免震試験体に設置して、免震構造物への適用の効果を示した。さらに、実大の建物にこれらのダンパーを設置して、上部建物の応答加速度をあまり大きくせず、免震層変位を小さく抑えることが出来ることを示した。設計に当たっては、最適設計手法を用いて最適なダンパー定数を定めることにより、地震動入力レベルごとに設定する各種目標応答値を満足することが出来ることを示した。

### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 4 件)

1. Zou Shuang, Masahiro Ikenaga, Norio Hori, Kohju Ikago, Norio Inoue, DEVELOPMENT OF FRICTION DAMPER WITH COUPLING MECHANISM FOR DISPLACEMENT CONTROL OF BASE-ISOLATED SYSTEM, AIJ Journal of Technology and Design, 査

- 読有, Vol.19, No.43, 2013, 855-860  
DOI:10.3130/aijt.19.855
2. 佐上瑠子, 堀則男, 五十子幸樹, 井上範夫, 免震用ダンパーにおける周波数依存性の有無がダンパー力に与える影響に関する検討, 日本建築学会構造系論文集, 査読有, 第 77 巻, 第 674 号, 2012 年, 529-536  
DOI: 10.3130/aijs.77.529
  3. 中南滋樹, 木田英範, 五十子幸樹, 井上範夫, 軸力制限機構付き粘性マスダンパーの免震構造物への適用とその有効性, 日本建築学会構造系論文集, 査読有, 第 76 巻, 第 670 号, 2011 年, 2077-2086  
DOI:10.3130/aijs.76.2077
  4. 五十子幸樹, 井上範夫, 複素剛性ダンパーを用いた免震構造物の地震入力エネルギー, 日本建築学会構造系論文集, 査読有, 第 76 巻, 第 664 号, 2011 年, 1095-1100  
DOI:10.3130/aijs.76.1095
- [学会発表](計 38 件)
1. K. Ikago, N. Inoue, Seismic Control of Buildings Using Apparent Mass Dampers with Rotational Amplifying Mechanisms - A Review of the State of the Art, Antiseismic Systems International Society, 2013.9.25, Sendai
  2. K. Kakemoto, M. Ikenaga, K. Ikago, N. Inoue, Seismic Control of Base-isolated Structures incorporated with a Force-restricted Viscous Mass Damper, Antiseismic Systems International Society, 2013.9.25, Sendai
  3. N. Hori, S. Zou, M. Ikenaga, K. Ikago, N. Inoue, Control of Seismic Response Displacement of Base Isolated Structure Specimen by Friction Damper with Coupling Mechanism, Antiseismic Systems International Society, 2013.9.25, Sendai
  4. N. Inoue, K. Ikago, Displacement Control Design Concept for Long-period Structures - Design Strategies for High-rise and Seismically Isolated Buildings Subjected to Strong Ground Motions, Antiseismic Systems International Society, 2013.9.24, Sendai
  5. M. Ikenaga, K. Ikago, N. Inoue, Feasibility of Variable Oil Damper for Base-Isolated Detached Houses, Antiseismic Systems International Society, 2013.9.24, Sendai
  6. M. Ikenaga, K. Ikago, N. Inoue, Application of Friction Damper with Coupling Mechanism Designed in Accordance with Input Ground Motion Levels to a Base-Isolated Detached House, Antiseismic Systems International Society, 2013.9.24, Sendai
  7. M. Ikenaga, K. Ikago, N. Inoue, A Study of a Base Isolated Structure with Complex Damping for Displacement Control Design, International Conference on Civil, Structural and Environmental Engineering Computing, 2013.9.5, Sardinia, Italy
  8. K. Ikago, M. Ikenaga, K. Kakemoto, N. Inoue, Optimum Base-Isolation System Control using Force Restricted Viscous Mass Dampers, International Conference on Civil, Structural and Environmental Engineering Computing, 2013.9.5, Sardinia, Italy
  9. 掛本啓太, 五十子幸樹, 井上範夫, 主系剛性分布に比例する付加質量を有する同調粘性マスダンパー制振システムの固有モード応答, 日本建築学会, 2013 年 9 月 1 日, 北海道
  10. 池永昌容, 三木広志, 五十子幸樹, 井上範夫, 性能可変オイルダンパーを有する 4 質点系免震試験体の振動台実験およびその適用性の検討: その 1 性能可変オイルダンパーの概要・単体実験結果および振動台実験の概要, 日本建築学会, 2013 年 8 月 30 日, 北海道
  11. 三木広志, 池永昌容, 五十子幸樹, 井上範夫, 性能可変オイルダンパーを有する 4 質点系免震試験体の振動台実験およびその適用性の検討: その 2 振動台実験結果および VOD の適用性の解析検討, 日本建築学会, 2013 年 8 月 30 日, 北海道
  12. 菊地淳哉, 掛本啓太, 池永昌容, 五十子幸樹, 井上範夫, 軸力制限機構付き粘性マスダンパーを有する免震構造物の加振実験とその解析的検証, 日本建築学会, 2013 年 8 月 30 日, 北海道
  13. 中南滋樹, 木田秀範, 田中久也, 渡邊義仁, 五十子幸樹, 井上範夫, 軸力制限機構付き粘性マスダンパーの免震構造物への適用性に関する研究: その 7: 実大ダンパーの単体加振実験, 日本建築学会, 2013 年 8 月 30 日, 北海道
  14. 五十子幸樹, 柏倉優太, 成田悠, 熊谷成晃, 池永昌容, 井上範夫, 速度非依存型ダンパー付き免震建物の有効性とその実現性: その 1 速度非依存型ダンパーの有効性, 日本建築学会, 2013 年 8 月 30 日, 北海道
  15. 柏倉優太, 成田悠, 熊谷成晃, 池永昌容, 五十子幸樹, 井上範夫, 速度非依存型ダンパー付き免震建物の有効性とその実現性: その 2 速度非依存型ダンパーの床応答加速度低減理由, 日本建築学会, 2013 年 8 月 30 日, 北海道
  16. 成田悠, 熊谷成晃, 柏倉優太, 池永昌容, 五十子幸樹, 井上範夫, 速度非依存型ダ

- ンパー付き免震建物の有効性とその実現性:その3 擬似複素減衰制御の修正案, 日本建築学会, 2013年8月30日, 北海道
17. 熊谷成晃, 成田悠, 柏倉優太, 池永昌容, 五十子幸樹, 井上範夫, 速度非依存型ダンパー付き免震建物の有効性とその実現性:その4 修正案の有効性と実現性, 日本建築学会, 2013年8月30日, 北海道
  18. 中村俊介, 熊谷成晃, 池永昌容, 五十子幸樹, 井上範夫, 地震入力レベルを考慮したMRダンパー用可変楕円制御の制御力-変位関係の実験的検討, 日本建築学会, 2013年8月30日, 北海道
  19. 福見祐司, 鄒爽, 池永昌容, 五十子幸樹, 井上範夫, 連結機構摩擦ダンパー付きすべり支承免震住宅の設計法:その1. ストップパーとしての設計法, 日本建築学会, 2013年8月30日, 北海道
  20. 鄒爽, 福見祐司, 池永昌容, 五十子幸樹, 井上範夫, 連結機構摩擦ダンパー付きすべり支承免震住宅の設計法:その2. 地震入力レベル毎の設計法, 日本建築学会, 2013年8月30日, 北海道
  21. S. Nakaminami, K. Ikago, H. Kida, N. Inoue, Response Characteristics of a Base-Isolated Structure Incorporated with a Force-Restricted Viscous Mass Damper, World Conference on Earthquake Engineering, 2012.9.26, Lisbon, Portugal
  22. 渡辺真司, 三木広志, 池永昌容, 五十子幸樹, 井上範夫, 性能とコストを考慮した免震建物の設計方法, 日本建築学会, 2012年9月12日, 愛知
  23. Masahiro Ikenaga, Kohju Ikago, Norio Inoue, Seismic displacement control design of base isolated structures by MR dampers based on pseudo complex damping control rules, International Conference on Civil, Structural and Environmental Engineering Computing, 2011.9.7, Greece
  24. 堀則男, 佐上瑤子, 池永昌容, 五十子幸樹, 井上範夫, 変位依存型と速度依存型のダンパーを用いた免震構造の地震応答性状比較:その1 時刻歴応答解析による応答性状の検討, 日本建築学会, 2011年8月24日, 東京
  25. 佐上瑤子, 堀則男, 池永昌容, 五十子幸樹, 井上範夫, 変位依存型と速度依存型のダンパーを用いた免震構造の地震応答性状比較:その2 ダンパー力割増率の検討及び複素減衰モデルへの置換, 日本建築学会, 2011年8月24日, 東京
  26. 津裕也, 五十子幸樹, 佐上瑤子, 堀則男, 池永昌容, 井上範夫, 変位依存型と速度依存型のダンパーを用いた免震構造の地震応答性状比較:その3 変位依存型ダンパーの減衰力低減理由に関する検討, 日本建築学会, 2011年8月24日, 東京
  27. 五十子幸樹, 津裕也, 佐上瑤子, 池永昌容, 堀則男, 井上範夫, 変位依存型と速度依存型のダンパーを用いた免震構造の地震応答性状比較:その4 地震時総入力エネルギーの比較, 日本建築学会, 2011年8月24日, 東京
  28. 伊藤達也, 池永昌容, 五十子幸樹, 井上範夫, 弾性摩擦ダンパーを用いたソフトストーリー建物の地震応答制御, 日本建築学会, 2011年8月24日, 東京
  29. 福見祐司, 全昌龍, 幸山寛和, 池永昌容, 五十子幸樹, 井上範夫, 連結機構摩擦ダンパーを用いたすべり支承免震構造物の変位制御に関する検討:その1 連結機構摩擦ダンパー概要および地震波加振実験, 日本建築学会, 2011年8月23日, 東京
  30. 全昌龍, 福見祐司, 幸山寛和, 池永昌容, 五十子幸樹, 井上範夫, 連結機構摩擦ダンパーを用いたすべり支承免震構造物の変位制御に関する検討:その2 巨大地震時の応答性状に関する解析的検討, 日本建築学会, 2011年8月23日, 東京
  31. 柏倉優太, 池永昌容, 五十子幸樹, 井上範夫, 擬似複素減衰制御則に基づくMRダンパーを用いた免震構造物の地震時応答変位制御:その1 擬似複素減衰制御則の概要, 日本建築学会, 2011年8月23日, 東京
  32. 池永昌容, 柏倉優太, 五十子幸樹, 井上範夫, 擬似複素減衰制御則に基づくMRダンパーを用いた免震構造物の地震時応答変位制御:その2 振動台実験結果と擬似複素減衰制御の改善, 日本建築学会, 2011年8月23日, 東京
  33. 幸山寛和, 全昌龍, 福見祐司, 池永昌容, 五十子幸樹, 井上範夫, 連結機構摩擦ダンパーを用いた免震構造物の巨大地震時過大変位制御設計, 日本建築学会, 2011年8月23日, 東京
  34. 渡辺真司, 三木広志, 根本真孝, 池永昌容, 五十子幸樹, 井上範夫, ユニフロー式性能可変オイルダンパーの開発とその応答性状に関する実験的検討:その1 ユニフロー式性能可変オイルダンパーの概要と特性, 日本建築学会, 2011年8月23日, 東京
  35. 三木広志, 渡辺真司, 根本真孝, 池永昌容, 五十子幸樹, 井上範夫, ユニフロー式性能可変オイルダンパーの開発とその応答性状に関する実験的検討:その2 単体加振実験および地震波加振実験の概要と結果, 日本建築学会, 2011年8月23日, 東京
  36. 根本真孝, 渡辺真司, 池永昌容, 五十子幸樹, 井上範夫, 地震入力レベルを考慮した性能可変オイルダンパー付免震構造の設計法, 日本建築学会, 2011年8月23日, 東京
  37. 中南滋樹, 木田英範, 五十子幸樹, 井上

範夫, 軸力制限機構付き粘性マスダンパーの免震構造物への適用性に関する研究: その1 システムの伝達特性, 日本建築学会, 2011年8月23日, 東京

38. Masahiro Ikenaga, Kohju Ikago, Norio Inoue, Development of a design method for base-isolated houses with a variable oil damper by an optimum design method, International Conference on Structural Dynamics, EUROSDYN 2011, 2011.7.6, Belgium

〔図書〕(計 1 件)

1. 井上範夫, 五十子幸樹, 丸善出版, 「建築物の変位制御設計 地震に対する免震・長周期建物の設計法」, 2012, 1-314

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:  
出願年月日:  
国内外の別:

取得状況(計 1 件)

名称: フリクションダンパ  
発明者: 井上範夫、鎮目武治  
権利者: 国立大学法人東北大学、鎮目武治  
種類: 特許  
番号: 特許第 4915705 号  
取得年月日: 24年2月3日  
国内外の別: 国内

〔その他〕

ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

井上 範夫 (INOUE, NORIO)  
東北大学・大学院工学研究科・教授  
研究者番号: 50250725

### (2) 研究分担者

五十子 幸樹 (IKAGO, KOHJU)  
東北大学・大学院工学研究科・准教授  
研究者番号: 20521983

池永 昌容 (IKENAGA, MASAHIRO)  
東北大学・大学院工学研究科・助教  
研究者番号: 50552402