

令和元年6月5日現在

機関番号：31303

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H04454

研究課題名(和文) ダイナミック・マスと性能可変ダンパーを併用した超長周期ハイブリッド免震構造の開発

研究課題名(英文) Development of the hybrid base isolation structure system with extreme long natural period by the dynamic mass and the variable oil damper

研究代表者

堀 則男 (HORI, Norio)

東北工業大学・工学部・教授

研究者番号：60292249

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題では、ダイナミック・マスと性能可変オイルダンパーを併用したハイブリッドシステムを提案し、免震建物の地震時応答性能のさらなる高度化を目的としている。提案システムで用いているダンパーにはいくつかの設計変数があり、本研究では多目的遺伝アルゴリズムを用いて、効果的な地震応答低減を実現するための最適設計解の導出と地震応答に与える影響を検討した。これらの検討結果に基づき、ダイナミック・マス試験体、及び実大性能可変オイルダンパーの部分試験体を作製し、リアルタイム・ハイブリッドシミュレーション実験によって検証を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

免震構造は固有周期を伸長することによって地震力の低減を図るものであるが、水平剛性の低減は構造物の安定性を犠牲にし、また建物質量の増加は基礎構造への負担増を招くこととなる。本研究課題で用いたダイナミック・マスは見掛けの慣性質量を増大するデバイスであるため、水平剛性低減も質量増加も伴わずに、免震構造を超長周期化することが可能となる。また性能可変オイルダンパーを併用することで、免震層の変位・速度・加速度の応答量をパッシブに検知しながら最適な制御力を発揮する免震制御性能を実現できると期待される。

研究成果の概要(英文)：In this study, the hybrid system that consists of the dynamic mass and the variable oil damper, is proposed for base isolated structures to improve reduction performances of earthquake response.

Because dampers used in the proposed system have several design parameters, optimum values are investigated by the multi-objective genetic algorithm, and effects for earthquake response are studied. A dynamic mass specimen and a partial specimen of the variable oil damper, are made based on the results of this study. And the proposed system is investigated by the real-time hybrid simulation experiment of damper specimens.

研究分野：工学

キーワード：免震構造 長周期地震動 応答制御 ダイナミック・マス オイルダンパー

1. 研究開始当初の背景

免震構造は、建築物の基礎下に水平剛性が小さい免震装置を設置して建物全体の固有周期を伸長することにより、地震力の低減を図るものである。免震周期を従来の免震構造よりも更に長周期化することでより高い免震効果を得られるが、長周期化の為に免震層の静的な水平剛性を過度に低減することは構造物の安定性を犠牲にし、日常的な建築物の使用に支障を与える恐れもある。剛性を低下させる他に質量を増大させる方法も考えられるが、基礎構造への重量負担増などが問題となる。

ここで、ダイナミック・マスまたはイナーターと呼ばれる新しい質量要素を構造物の振動制御に用いる研究が注目を集めている。ダイナミック・マスとは見掛け質量要素であり、節点間の相対加速度に比例する抵抗力を発揮する。ダイナミック・マスを実デバイスとして実装する方法は様々であるが、現在、最も有望と考えられているものはボールネジ機構である。既に我が国で、実質量は1トンに満たないのに一台当たり数千トンの見掛け質量を有する装置が、慣性こまという名の下に高層建物の制振装置として実用に供されている。慣性こまは、質量要素と並列に粘性要素を回転機構部に有しており、エネルギー吸収能力を併せ持つことも特長である。

ダイナミック・マスは基礎構造への重量負担を増大させることなく、地震時の見掛け質量を増大させて応答周期を伸長させるので、免震層の静的な剛性を維持したまま超長周期化を図ることができる。このような理由から、ダイナミック・マスを免震層に設置する制御方法は我が国を中心として複数の研究グループにより提案されている。一方でダイナミック・マスにより誘導される高次モードの床応答加速度を低減するために、過大な慣性抵抗力を頭打ちにする軸力制限機構や、それによって励起される衝撃的な力を緩和する緩衝バネ、ダンパー支持部材に並列に設置される粘性要素など様々な対策が検討されている。

2. 研究の目的

本研究課題では、慣性こまを用いたダイナミック・マスによって免震構造の超長周期化を図り、さらに応答の大きさに応じて制御を行う性能可変型デバイスを併用したハイブリッドシステムを提案し、免震建物の地震時応答性能のさらなる高度化を目指す。その際、完全にパッシブなシステムでは発生しうるあらゆるタイプの地震動全てに対応することには限界があることも明らかなので、本研究課題では地震動の作用下における応答に応じて制御力を可変とする対策を検討する。地震時における電力供給の問題により、アクティブ制御やセミアクティブ制御の信頼性には課題があるため、あくまでも電力供給を必要とせず、パッシブに応答量を検知しながら性能を可変とするデバイスを検討する。

慣性こまについては、その制御力は免震層の相対加速度と相対速度で決定され、既に開発済みの軸力制限機構によってこれをパッシブに検知して制御力を頭打ちとする。さらに、免震層の応答変位を検知して制御力を可変にする（粘性減衰力を変化させる）機構としては、性能可変オイルダンパーを併用とする。慣性こまと性能可変オイルダンパーを併用したハイブリッドシステムにより、パッシブなシステムでありながら、免震層の相対加速度、相対速度、相対変位の時々刻々の状態を検知しつつ制御性能を可変にするシステムの構築を目指す。

研究は、解析と実験の両面から進める。理論面では、これら免震層の相対加速度、相対速度、相対変位に関して検知された応答量とダンパーが発揮すべき最適な制御力の関係を、多目的最適化の理論に基づいて明らかにすることを目的とする。制御デバイスとしてのダンパー、即ち慣性こまと性能可変オイルダンパーについては試験体を試作し、まずは単体加力実験によって特性を詳細に把握する。得られたダンパー特性を基に数値解析モデルを構築し、提案ダンパーを免震建物に設置した場合の地震時応答制御効果を解析的に明らかにし、さらにリアルタイム・ハイブリッドシミュレーション実験で検証する。本研究課題では、リアルタイム・ハイブリッドシミュレーション実験の安定・安全な実施技術の確立も目的の一つである。

3. 研究の方法

(1) 提案システムの最適設計値の探索

提案システムである慣性こまと性能可変オイルダンパーを併用したハイブリッド免震制御システムについて、最適なダンパーパラメータの組み合わせを解析的に探索する。この場合の設計変数は、慣性こまの見掛け質量、粘性減衰係数、制限軸力、性能可変オイルダンパーの初期粘性減衰係数、可変後粘性減衰係数、性能可変変位、リリーフ荷重である。

免震建物にダンパーを設置した場合、一般に地震時の免震層応答変形を小さくしようとする。と上部構造の床応答加速度が増大してしまうなどするので、両者はトレード・オフの関係となる。また、比較的発生頻度の高いレベルの地震動と、極めて稀に発生する地震動では、免震構造に要求される性能が異なってくる他、基礎免震構造においては、免震層クリアランスに一定の限界があるなど、制約条件も様々である。このように本研究課題で扱う設計問題は、設計変数が多く、目的関数が単一では無く複数存在し、制約条件も多い。このような最適化問題を効率的に解く方法として有望なものの一つが多目的遺伝アルゴリズムであり、本研究課題ではこれを最適解の探索に用いる。

(2) ダンパー試験体の作製と特性把握

解析的検討から得られたシステムの最適設計値を参考に、慣性こまと性能可変オイルダンパーの試験体を作製する。試験体に対して、様々な振幅と加力周期の正弦波入力による単体加力実験を行い、詳細な特性を把握する。

(3) リアルタイム・ハイブリッドシミュレーション実験によるシステムの検証

まずは既往の磁気粘性流体ダンパー試験体を用いた試行実験を行い、リアルタイム・ハイブリッドシミュレーション実験のシステム構築を行う。これによって実験システムの特性和問題点、精度などを検証し、本研究で検討・作製するダンパーの実証実験に有効であることを確認する。

この実験システムは、非線形性が強く実験での確認が必要となるダンパーなどの実試験と、性能が比較的良く分かっておりシミュレーション解析の容易な構造物の数値解析を組み合わせるものであり、労力、時間、コストを抑え、大規模な試験機性能を必要とせず、実時間に忠実な実験を行えるシステムである(図1)。それに加えて、ダンパーの実試験体が1台しかなくても、数値モデルと接続する際に数値的に台数分の係数を乗じて計算モデルと接続できるので、任意のダンパー台数の組み合わせを計算モデルの調整のみでシミュレーションできる。このようにして、実験的に最適解の設計解感度分析等を容易に実施可能である。

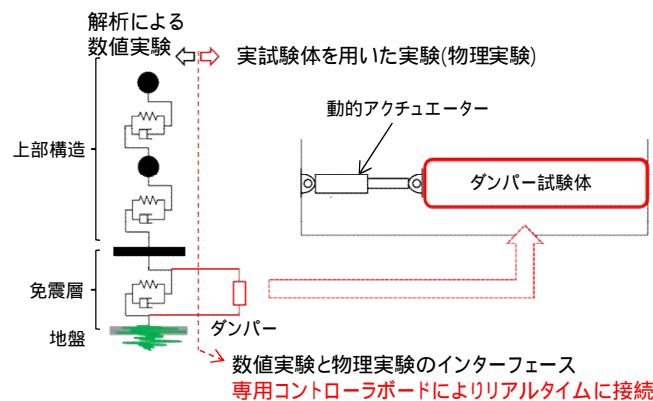


図1 リアルタイム・ハイブリッドシミュレーション実験模式図

4. 研究成果

(1) 提案システムの最適設計解の探索

提案システムで用いているダンパーにはいくつかの設計変数があり、本研究では多目的遺伝アルゴリズムを用いて、効果的な地震応答低減を実現するための最適パラメータの探索を行った。即ち、慣性こまと性能可変オイルダンパーについて、設計変数の最適設計解の導出と地震応答に与える影響を明らかにした。

この過程で慣性こまについては、ダイナミック・マス、粘性要素、支持部材を直列に配置したダンパーシステムが、中小地震から巨大地震までの異なる入力レベルに対しても免震建物の応答変位を効果的に抑制できることが分かった。

性能可変オイルダンパーについては、設計変数の変化に対して最大応答変位と最大応答加速度の間にはトレード・オフ関係があることを確認し、さらに、設計変数の変動が応答最大値と他の設計変数値に与える影響を検討した。特に、減衰バルブばね剛性(この値に比例して、性能変化後のダンパーのリリーフ力が上昇する)の変動の影響が大きいことが分かった。

(2) ダイナミック・マス(慣性こま)試験体の作製と特性把握

前記の検討結果に基づき、ダイナミック・マス試験体を作製した(写真1)。これに対して単体加力実験、同調ばねユニットを直列設置した正弦波加力実験、リアルタイム・ハイブリッドシミュレーション実験による地震応答加力実験を行い、特性の把握、同調応答の確認、実験システムの安定性確立などを検討した。

(3) 性能可変オイルダンパーの部分試験体の作製と特性把握

前記の検討結果に基づいて実大性能可変オイルダンパーの部分試験体(性能変化のための小型シリンダーと可変減衰バルブから構成された性能変化機構)を作製した(写真2)。これに対して単体加力実験、部分試験体の実験とダンパー本体モデルの数値解析を組み合わせるリアルタイム・ハイブリッドシミュレーション実験による地震応答加力実験を行い、特性の把握、性能変化機構の検証を行った。



写真1 ダイナミック・マス試験体
(慣性こま)

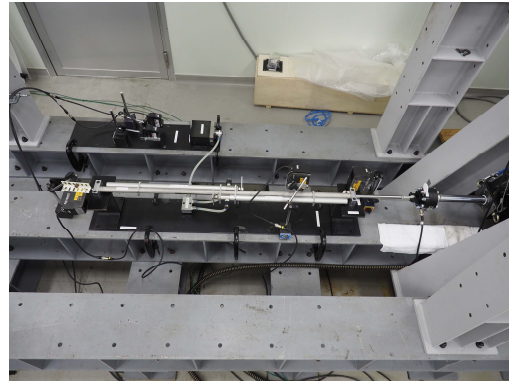


写真2 性能可変オイルダンパーの
部分試験体

(4) リアルタイム・ハイブリッドシミュレーション実験によるシステムの検証

提案システムの最適解とダンパーの単体加力実験結果を基に、リアルタイム・ハイブリッドシミュレーション実験を実施した。実験の安定性、安全性を確保するために、まずは全ての要素の解析モデルを構築して実験の解析的シミュレーションを行い、次に、慣性こまと性能可変オイルダンパーの試験体を用いた実験を行った。

実験の実施にあたっては、実験システムの時間遅れ、電氣的ノイズの影響と除去フィルターの効果、試験体剛性の低減や付加的な減衰の付与などの検討を行い、実験の安定性・安全性を確保するためのノウハウを修得することができた。

以上の解析的・実験的検討により、ダイナミック・マスによる長周期化の効果と問題点(短周期加速度の発生など)、性能可変オイルダンパーの最適設計解の探索方法における多目的遺伝アルゴリズムの有効性、実用実大ダンパー作製の可能性、リアルタイム・ハイブリッドシミュレーション実験の安定性・安全性の確立などの成果が得られた。

5. 主な発表論文等

[学会発表](計 7件)

半澤吉将, 五十子幸樹: 流体軸力制限機構付きダイナミック・マス-ダンパーの基礎的研究, 日本建築学会大会学術講演会, 2018

日向野颯, 五十子幸樹: ダイナミック・マス-バネ-ダンパー直列システムによる複素剛性ダンパー模擬, 日本建築学会大会学術講演会, 2018

南遼太, 五十子幸樹: 軸力制限機構付き粘性マスダンパー免震システムの多目的最適設計と設計解感度解析, 日本建築学会大会学術講演会, 2017

倉重万梨乃, 五十子幸樹: 遺伝的アルゴリズムを用いた性能可変オイルダンパー付免震建物の多目的最適設計, 日本建築学会大会学術講演会, 2017

Kohju Ikago, Hayate Higano, Cholap Chong, Brian M. Phillips: Multi-objective optimal design of a base-isolated structure equipped with a series-configured inerter-spring-damper system, 日本建築学会大会学術講演会, 2017

南遼太, 護法亜弥, 池永昌容, 五十子幸樹: 地震動入力レベルを考慮した粘性-マス直列型ダンパー免震システムの多目的最適制御, 日本建築学会大会学術講演会, 2016

五十子幸樹, 池永昌容, 谷口洵, 菅野秀人, 黒澤祐, Brian M. Phillips: 非線形性を有するダンパーに対するリアルタイム・ハイブリッドシミュレーションの適用, 日本建築学会大会学術講演会, 2016

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名: 五十子 幸樹

ローマ字氏名: IKAGO, kohju

所属研究機関名: 東北大学

部局名: 災害科学国際研究所

職名: 教授

研究者番号(8桁): 20521983

研究分担者氏名：菅野 秀人
ローマ字氏名：KANNO , hideto
所属研究機関名：秋田県立大学
部局名：システム科学技術学部
職名：准教授
研究者番号(8桁): 20336449

研究分担者氏名：池永 昌容
ローマ字氏名：IKENAGA , masahiro
所属研究機関名：関西大学
部局名：環境都市工学部
職名：准教授
研究者番号(8桁): 50552402

(2)研究協力者

研究協力者氏名：井上 範夫
ローマ字氏名：INOUE , norio

研究協力者氏名：鎮目 武治
ローマ字氏名：SHIZUME , takeharu

研究協力者氏名：木田 英範
ローマ字氏名：KIDA , hidenori

研究協力者氏名：村尾 秀己
ローマ字氏名：MURAO , hideki

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。