

平成30年6月12日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H04070

研究課題名(和文) 長周期長時間地震動対策のための建築用スマートパッシブ制御デバイスの高度実用化

研究課題名(英文) Sophistication and practical application of a smart-passive control device for the protection of buildings against long-period/long-duration ground motions

研究代表者

五十子 幸樹 (Ikago, Kohju)

東北大学・災害科学国際研究所・教授

研究者番号：20521983

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題では、近年社会的な関心を呼んでいる長周期構造物の長周期・長時間地震動に対する脆弱性に対する対策技術の開発を目指して、同調粘性マスダンパー制振システムの更なる普及と高度実用化のための設計資料収集と一般設計理論の構築を目指した研究、及び実大の変位感応型性能可変オイルダンパーの開発と実用化を目指した研究を実施した。前者に関しては、H29年に竣工した赤坂一丁目プロジェクトにおけるダンパー支持バネの剛性確認実験データを得て分析した。これにより支持バネ剛性のばらつきを考慮したダンパー性能確認実験手法を提案した。後者に関しては、実物大ダンパーの試設計を終え、変位検知を行うパーツの試作まで完成した。

研究成果の概要(英文)：Development of counter measures to address the vulnerability issues of long-period structures subjected to long-period/long-duration ground motion is pursued in this research project. Materials regarding variations of supporting spring stiffness of the tuned viscous mass damper system that are useful for practical design is collected from the construction project at Akasaka icho-me leading to development of a general design theory and an experiment method for the system. Tentative design of a full-scale variable orifice damper and manufacturing of its prototype deformation detector parts are completed.

研究分野：耐震工学

キーワード：長周期地震動 ダイナミック・マス 同調粘性マスダンパー 性能可変ダンパー リアルタイム・ハイブリッド実験

1. 研究開始当初の背景

我が国に超高層ビルや免震ビルが建設されるようになってから半世紀が過ぎ、これら長周期構造物の長周期長時間地震動に対する脆弱性が指摘されている。

2003年十勝沖地震では長周期地震動により北海道苫小牧市石油コンビナートで石油タンク内の石油のスロッシング振動が励起され石油に引火して火災が発生した。2004年の新潟県中越地震と2007年の新潟県中越沖地震では震源から200km以上離れた東京都心の超高層ビルでエレベータの損傷や人の閉じ込め事象が発生した。これらを受け、国土交通省は2010年12月に「超高層建築物等の長周期地震動の対策試案」を発表し、パブリックコメントを募集した。これを契機に超高層ビル等の長周期地震動対策が進められることが期待されていたが、2011年に発生した東北地方太平洋沖地震では、東京都心の超高層ビルや震源から800km近く離れた大阪港湾部の超高層ビルで長時間にわたり大振幅の揺れが観測され、内外装材の損傷やエレベータ閉じ込め事象も発生している。

長周期地震動対策としては、単なる建物強度の増加を目指した補強は必ずしも有効ではなく、振動のエネルギーを消費する何等かの制振装置を取り付ける等の対策が取られる。とりわけ震動の長周期成分に選択的に効果を発揮する同調質量ダンパー(TMD)の有効性が改めて見直されており既存超高層ビルの長周期地震動対策としての適用が検討され、いくつかは既に工事も完了している。TMDに類似した装置としては、ボールネジを用いた質量増幅機構を用いることによりコンパクトな装置に改良した同調粘性マスダンパー制振システムも長周期地震動対策に有望であると期待されている。一方で、免震建物に対しては、地震時の建物応答を検知しそれに応じて制御力を変化させることにより効果的に建物応答を制御しようとする試みが多くある。そのなかでも長周期地震動による大振幅変位を制御することを目的とした研究として、可変減衰ダンパー、変位感応型性能可変オイルダンパー、速度感応型性能可変ダンパー、Gap damperなどが挙げられる。

以上に挙げたデバイスの内、東北大学を中心とする研究グループではこれまでに同調粘性マスダンパー制振システムの開発と変位感応型性能可変オイルダンパーの開発を行ってきている。前者の同調粘性マスダンパーについては既に実用化され、超高層建物1件を含む合計5件の適用事例があり、今後も多数の建物で採用される見込みである。しかし、特殊な場合においては簡便な設計法が提案されているものの、設計の一般理論は未だ提案されていない。後者の変位感応型性能可変オイルダンパーは特に応答変位の制御に有効であることが明らかと

なっており、最大軸力50kNの住宅免震に適用可能な装置が開発済みであるが、未だ実施物件への適用事例はなく、今後一般免震建築に適用可能な500kN~1000kN級のダンパーの開発が待たれる。

2. 研究の目的

本研究では、超高層ビル及び免震建物の長周期長時間地震動対策としてそれぞれ以下に示す2種類の振動制御デバイスの実用化と普及を目指す。

2.1 同調粘性マスダンパー制振システムの更なる普及へ向けた設計資料収集と一般設計理論の構築

同調粘性マスダンパーは支持部材の剛性を適切に調整して建物に「同調」させる必要があるため、工事段階で所要の支持部材剛性が得られることを確認することが重要である。同ダンパーは実用化されて間がないので取り付け工事における支持部材剛性調整に関する資料で広く公開されているものは本研究課題によるものを除いて存在していない。今後関連する資料を収集・蓄積・公開していく必要がある。

また設計法についても、現状では付加質量分布が主系剛性比例に近い場合の設計式が提案されるのみであり、集中配置型の設計ニーズ等には未だ対応し切れていない。

本研究では、現在同調粘性マスダンパーを採用した「赤坂一丁目プロジェクト」(設計：日本設計)の設計者・施工者から支持部材剛性確認実験に関する資料の提供を受け、今後の貴重な設計資料としてまとめる。

設計法の観点では、一般的なダンパー配置に対する等価二自由度系への縮約法を理論的に導出する。等価二自由度系への縮約法の一般理論が構築できれば、齊藤らが導いた簡便な最適設計式を用いて同調粘性マスダンパーを設計することが可能となり、多様な設計ニーズに応えることで同調粘性マスダンパーの更なる普及に繋がることが期待できる。

2.2 1000kN級免震用変位感応型性能可変オイルダンパーの開発と実用化

申請者らの研究グループが開発している変位感応型性能可変オイルダンパーについて、一般免震建物に適用可能な1000kN級大型ダンパーを試作し、実用化・量産に必要な資料を収集する。具体的には、設計で指定された変位で所定の可変性能が得られることを確認した上で、応答の振幅・周波数依存性、耐久性、高速度載荷に対する応答などに対する資料を収集し実用に耐えるダンパーとなるよう改良するための基礎資料を得る。

3. 研究の方法

3.1 同調粘性マスダンパー設計一般理論の構築とダンパー加振実験

同調粘性マスダンパーの設計理論は、付加質量分布が主系剛性分布に比例する場合において、二自由度縮約系の最適解が多自由度系に拡張できることが明らかにされている。付加質量分布と主系剛性分布の比例関係が厳密に成立しない場合においても、同調粘性マスダンパーを整形な建物に分散配置した場合は非制御主系の固有モードを用いた等価二自由度系への縮約からダンパー最適解の良い近似を得ることができることが経験的に分かっている。しかしながら、建物計画の多様化に伴い近年では超高層ビルにおいても整形性を満足しない構造計画が増えており、また、ソフトストーリーなどの特定層ダンパー集中配置の設計ニーズも増している。現状の理論ではこれらの設計ニーズに十分応えられないので拡張する必要がある。本研究課題では収斂計算や準ニュートン法等を用いることで同調粘性マスダンパーの配置方法に関わらず成立する一般的な等価二自由度縮約法を見いだす。

ダンパー実用化に関する研究として、複数層に跨った同調粘性マスダンパー配置が計画された「赤坂一丁目プロジェクト」の設計者と施工者の協力を得て同調粘性ダンパー支持部材剛性確認実験と、それによるダンパー支持バネ調整に関する資料を得る。これを基に今後の設計法の高度化へ向けた検討を行う。また、このダンパー支持バネに関する資料をもとに、支持バネ部分を数値解析モデルとした同調粘性マスダンパー試験体のリアルタイム・ハイブリッド実験手法を開発し、支持部材の性能ばらつきを考慮した製品検査手法を開発する。

3.2 変位感応型性能可変オイルダンパーの設計理論構築と 1000 kN 級ダンパー試作

研究連携者の井上と研究協力者の鎮目は変位感応型性能可変オイルダンパーに関する特許を保有している。変位感応型性能可変オイルダンパーについては理論的な有効性が確認されており縮小試験体を用いた振動台実験も実施済みである。実大 1000 kN 級ダンパー試作のための基本的な油圧回路の設計は鎮目により既に行われているが、実際にメーカーにて製品を作るためにはメーカーの生産ラインの実情を反映した詳細設計が必要であり、加えてコスト面の検討も必要である。本研究課題ではダンパーの製品化を踏まえた詳細設計、コスト検討を研究協力者の鎮目が中心となり進める。一方で理論面では、ダンパー最適諸元の導出をこれまで逐次二次計画法と呼ばれる準ニュートン法アルゴリズムによっていた。この時、免震建物の床

応答加速度を目的関数とし、免震層変形は制約条件として取り扱うなどの工夫により床応答加速度と免震層変形を同時に考慮した最適化を行っていた。準ニュートン法は収束性がよくロバストな解法であるが、多目的最適化問題を直接解くためには目的関数のスカラー化が必要で一回の演算で一つの妥協解（非劣解、パレート解とも言う）を得るのみである。複数の妥協解を得るためには重み関数を変化させて改めて数値最適化を行う必要があり、設計者が満足できる解が得られるまで重み係数を操作して数値最適化が対話的に繰り返される。これに対して、遺伝的アルゴリズムのようなメタヒューリスティクスと呼ばれる発見的アルゴリズムでは複数の候補解を保ちながら解の収束計算を行うので、複数の目的関数を有する問題に対する妥協解群（パレートフロント）を一回の演算で導出できる。この場合、設計者は得られた妥協解群を一覧して、得られた設計解と、互いに相反する目的のバランスを考えながらどの解を受け入れるかを判断すれば良いので、既往の解法よりも設計効率が高められる。

4. 研究成果

4.1 同調粘性マスダンパー設計一般理論の構築とダンパー加振実験

同調粘性マスダンパー設計一般理論について、ダイナミック・マスの建物高さ方向分布が主系剛性分布に比例しない一般的な場合について検討した。特に、建物下層部分にダンパーを集中配置した場合に、非制御系の固有モードを用いた二自由度縮約が与える簡易設計法の精度を定量的に明らかにするとともに、数値最適化を用いた H 制御解を得る手法を提示した。

同調粘性マスダンパーを用いた実プロジェクト「赤坂一丁目計画」では、設計者と施工者が同調粘性マスダンパー支持部材の剛性確認実験を実施し、設計値からのばらつきを明らかにした。このデータの提供を受けて、支持バネ剛性が設計値からばらついた場合のシステムの性能変動を実験的に確認するための方法を確立した。この方法では、リアルタイム・ハイブリッドシミュレーション実験技術を基本とし、バネ定数のばらつきを数値的にシミュレーションし実験ループに組み込むことに成功した。

4.2 変位感応型性能可変オイルダンパーの設計理論構築と 1000 kN 級ダンパー試作

実物大 1000kN 級の変位感応型性能可変オイルダンパーの詳細設計を実施し、コスト検討を行ったところ、コストが当初の概略設計を上回ることが明らかとなった。また、変位検知部分の小型シリンダの製作検討で、可動

長さを大きくすることに成功した。今後の実用化、量産に向けた課題を抽出できたと考えている。

一方で、設計法については、多目的遺伝的アルゴリズムを用いた解析・設計コードを構築し、性能可変オイルダンパーの作動時変位、性能変化前後の減衰係数、可変リリーフ荷重などの設計変数を効率的に設計する方法を確立した。

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5件)

谷口洵, 池永昌容, 中南滋樹, 五十子幸樹, 井上範夫: 同調粘性マスダンパー制振システムの特性変動を検討する実験環境の構築, 査読有, 日本建築学会技術報告集, 第23巻, 第55号, pp.815-820, 2017年10月

DOI: 10.3130/aijt.23.815

Zhao Chen, Kikuchi Junya, Ikenaga Masahiro, Ikago Kohju, Inoue Norio: Viscoelastically Supported Viscous Mass Damper Incorporated into a Seismic Isolation System, 査読有, Journal of Earthquake and Tsunami, Vol. 10, Issue 03, paper1640009, 2016.4

DOI: 10.1142/S1793431116400091

菊池淳哉, 池永昌容, 五十子幸樹, 井上範夫: 粘弾性要素支持された粘性マスダンパーを有する免震構造物の地震時応答変位制御, 査読有, 日本建築学会構造系論文集, 第80巻, 第716号, pp.1515-1524, 2015年10月

DOI:10.3130/aijs.80.1515

新城季樹, 池永昌容, 五十子幸樹, 井上範夫: 集中配置時における多質点系同調粘性マスダンパー制振システムの最適応答制御, 査読有, 日本建築学会構造系論文集, 第80巻, 第715号, pp.1393-1402, 2015年9月

DOI: 10.3130/aijs.80.1393

池永昌容, 五十子幸樹, 井上範夫: 粘性要素を軸力制限機構に用いた粘性マスダンパーの免震構造物への適用性, 査読有, 日本建築学会構造系論文集, 第80巻, 第714号, pp.1251-1260, 2015年8月

DOI:10.3130/aijs.80.1251

[学会発表](計23件)

Kohju Ikago, Shun Taniguchi, Masahiro Ikenaga, Shigeki Nakaminami, Norio Inoue, Kenji Saito, An Experimental Study on the Robustness of a Tuned Viscous Mass Damper System Incorporated into a Single-Degree-Of-Freedom Structure,

Proceedings of the 7th International Conference on Advances in Experimental Structural Engineering, pp.517-528, 2017.9.7, Pavia(Italy)(審査付き)

浜名尚美, 池永昌容, 五十子幸樹: 集中配置型同調粘性マスダンパー制振システムのモード変化, 日本建築学会大会学術講演梗概集(中国), 構造, pp.617-618, 2017年9月1日, 広島工業大学(広島県広島市)

池永昌容, 谷口洵, 中南滋樹, 五十子幸樹, 井上範夫: 同調粘性マスダンパー制振システムの特性変動が制振性能に及ぼす影響 その1 研究背景とリアルタイムハイブリッドシミュレーション実験概要, 日本建築学会大会学術講演梗概集(中国), 構造, pp.619-620, 2017年9月1日, 広島工業大学(広島県広島市)

谷口洵, 池永昌容, 中南滋樹, 五十子幸樹, 井上範夫: 同調粘性マスダンパー制振システムの特性変動が制振性能に及ぼす影響 その2 リアルタイムハイブリッドシミュレーション実験結果, 日本建築学会大会学術講演梗概集(中国), 構造, pp.621-622, 2017年9月1日, 広島工業大学(広島県広島市)

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梗概集(中国), 構造, pp.821-822, 2017年8月31日, 広島工業大学(広島県広島市)

Kohju Ikago, Shun Taniguchi, Masahiro Ikenaga, Shigeki Nakaminami, Norio Inoue: Real-Time Hybrid Simulation on a Tuned Viscous Mass Damper Incorporated into a Single-Degree-Of-Freedom Structure, Proceedings of the 13th International Workshop on Advanced Smart Materials and Smart Structures Technology, 237-243, 2017.7.23, The University of Tokyo(東京都文京区)

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, 日本建築学会東北支部研究報告集(由利本荘), 第80号, 構造系, pp.37-40, 2017年6月17日, 由利本荘市文化交流会館(秋田県由利本荘市)

M. Ikenaga, K. Ikago, N. Inoue: Feasibility of Viscous Mass Damper with Bingham Fluid Originated Force Restriction Mechanism for Base-Isolated Structure, Proceedings of the 16th World Conference on Earthquake Engineering, 16WCEE 2017, Paper No.1265, 2017.1.10, Santiago

(Chile)

浜名尚美,日向野颯,池永昌容,五十子幸樹:集中配置型同調粘性マスダンパー制振システムのダンパー配置方法が制振性能に及ぼす影響 その1 検討モデルおよび同調粘性マスダンパー最適諸元の算出方法,日本建築学会大会学術講演梗概集(九州),構造 ,pp.245-246,2016年8月26日,福岡大学(福岡県福岡市)

日向野颯,浜名尚美,池永昌容,五十子幸樹:集中配置型同調粘性マスダンパー制振システムのダンパー配置方法が制振性能に及ぼす影響 その2 効率よく制振性能が得られるダンパー配置方法の検討,日本建築学会大会学術講演梗概集(九州),構造 ,pp.247-248,2016年8月26日,福岡大学(福岡県福岡市)

五十子幸樹,谷口洵,黒澤祐,池永昌容,菅野秀人,Brian 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 その1 研究背景とリアルタイムハイブリッドシミュレーションの実験環境,日本建築学会大会学術講演梗概集(九州),構造 ,pp.899-900,2016年8月24日,福岡大学(福岡県福岡市)

谷口洵,黒澤祐,池永昌容,五十子幸樹,菅野秀人,Brian 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 その2 リアルタイム・ハイブリッドシミュレーションの制御システム構築と構築結果,日本建築学会大会学術講演梗概集(九州),構造 ,pp.901-902,2016年8月24日,福岡大学(福岡県福岡市)

池永昌容,谷口洵,黒澤祐,五十子幸樹,菅野秀人,Brian 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 その3 リアルタイム・ハイブリッドシミュレーション実験結果,日本建築学会大会学術講演梗概集(九州),構造 ,pp.903-904,2016年8月24日,福岡大学(福岡県福岡市)

中南滋樹,木田英範,谷口洵,池永昌容,五十子幸樹: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 その4 実物大同調粘性マスダンパーによるリアルタイムハイブリッドシミュレーション実験,日本建築学会大会学術講演梗概集(九州),構造 ,pp.905-906,2016年8月24日,福岡大学(福岡県福岡市)

浜名尚美,池永昌容,五十子幸樹:集中配置型同調粘性マスダンパー制振システムに及ぼす影響,日本建築学会東北支部研究報告集(仙台),第79号,構造系,

pp.97-100,2016年6月19日,東北大学(宮城県仙台市)

五十子幸樹,谷口洵,黒澤祐,池永昌容,菅野秀人,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 その1 研究背景とリアルタイムハイブリッドシミュレーションの概要,日本建築学会東北支部研究報告集(仙台),第79号,構造系,pp.45-48,2016年6月18日,東北大学(宮城県仙台市)

谷口洵,黒澤祐,池永昌容,菅野秀人,五十子幸樹,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 その2 リアルタイムハイブリッドシミュレーション実験結果,日本建築学会東北支部研究報告集(仙台),第79号,構造系,pp.49-52,2016年6月18日,東北大学(宮城県仙台市)

黒澤祐,谷口洵,池永昌容,菅野秀人,五十子幸樹,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 その3 変位制御設計制御を施したMRダンパーを用いた実験,日本建築学会東北支部研究報告集(仙台),第79号,構造系,pp.53-56,2016年6月18日,東北大学(宮城県仙台市)

新城季樹,浜名尚美,池永昌容,五十子幸樹,井上範夫:集中配置時における多質点系同調粘性マスダンパー制振システムの最適応答制御 その1 数値最適化を用いた最適ダンパー解の応答特性,日本建築学会大会学術講演梗概集(関東),構造 ,pp.685-686,2015年9月4日,東海大学(神奈川県平塚市)

浜名尚美,新城季樹,池永昌容,五十子幸樹,井上範夫:集中配置時における多質点系同調粘性マスダンパー制振システムの最適応答制御 その2 縮小3層試験体を用いた加振実験に向けた予備解析,日本建築学会大会学術講演梗概集(関東),構造 ,pp.687-688,2015年9月4日,東海大学(神奈川県平塚市)

⑳ 池永昌容,五十子幸樹,井上範夫:軸力制限付き同調粘性マスダンパーの入力地震動特性と最大応答値の関係,日本建築学会大会学術講演梗概集(関東),構造 ,pp.689-690,2015年9月4日,東海大学(神奈川県平塚市)

㉑ 浜名尚美,新城季樹,池永昌容,五十子幸樹,井上範夫:多層構造物における同調粘性マスダンパー集中配置時の地震時応答低減効果,日本建築学会東北支部研究報告集(山形),第78号,構造系,pp.57-60,2015年6月20日,山形大学(山形県山形市)

㉒ 池永昌容,五十子幸樹,井上 範夫:同調粘性マスダンパーの制限軸力と最大

応答値，日本建築学会東北支部研究報告集(山形),第78号,構造系,pp.61-64,2015年6月20日,山形大学(山形県山形市)

鎮目 武治 (SHIZUME TAKEHARU)
(有)シズメテック

〔図書〕(計 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 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 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1)研究代表者

五十子 幸樹 (IKAGO KOHJU)
東北大学・災害科学国際研究所・教授
研究者番号：20521983

(2)研究分担者

堀 則男 (HORI NORIO)
東北工業大学・工学部・教授
研究者番号：60292249

(3)連携研究者

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

(4)研究協力者

中南 滋樹 (NAKAMIMAMI SHIGEKI)
株式会社免制振デバイス

木田 英範 (KIDA HIDENORI)
株式会社免制振デバイス

フィリップス ブライアン (PHILLIPS,
BRIAN)
メリーランド大学・准教授