

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 8 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2011～2014

課題番号：23246098

研究課題名(和文) 様々な架構の非線形性とダンパーの極限性能の把握による多層制振建物設計法の提案

研究課題名(英文) Proposal on Passive Control Design Method for Multi-story Buildings Based on Understanding Non-linearity of Various Types of Frames and Ultimate Performance of Dampers

研究代表者

笠井 和彦 (Kasai, Kazuhiko)

東京工業大学・応用セラミックス研究所・教授

研究者番号：10293060

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 37,900,000円

研究成果の概要(和文)：鉄骨構造・RC構造・木質構造の3種架構を対象とし、それらに効率的にダンパーを組み込むための様々な検討を行った。3種制振架構の挙動を再現する部分架構試験体の強制変形実験を行うとともに、その実験を再現できる詳細モデルを用いたパラメトリック解析も行い、各架構の非線形性や詳細な挙動を把握した。鋼材・粘弾性・粘性・オイルの4種ダンパーを対象とし、実大ダンパーの動的実験によりその極限状態を把握するとともに、その挙動を再現できる解析モデルを構築した。東日本大震災で得られた極めて多くの観測記録を分析することで、建物の実際の制振効果を把握した。以上により得られた知見を各種制振設計指針へと反映させた。

研究成果の概要(英文)：Three types of structures, steel structures, reinforced concrete structures, and wooden structures were considered for various studies on damper installations and performance assessment. Loading tests on these frame subassemblies duplicated the realistic behavior. Also detailed analytical models were constructed to reproduce the behavior of these structures and parametric study was performed in order to understand the nonlinear behavior of these structures. In order to understand the ultimate performance of dampers, tests of four types of real scale dampers, steel damper, visco-elastic damper, viscous damper, oil damper were conducted, and their behaviors were reproduced by analytical models. Using the observation records obtained during the Great East Japan Earthquake, the real effectiveness of the damped buildings were examined. All of these knowledge has been implemented in the passive control design guideline manuals.

研究分野：制振構造

キーワード：制振構造 制振鋼構造 制振木質構造 制振RC構造 ダンパー 極限状態 東日本大震災 地震観測記録

## 1. 研究開始当初の背景

地震時にダンパーで運動エネルギーを吸収して建物の揺れを軽減し、人命はもとより建物の架構、非構造材、機能、財産などを保護できる制振構造が、様々な規模の建物に用いられるようになってきた。従来の設計では、試行錯誤的にダンパー量を決め、解析で確認する方法が採られていたが、これと対比して研究代表者は、各種ダンパーをもつ制振構造の応答効率と性能範囲の理解を促し、それにより必要なダンパー量を試行錯誤なしで決定できる合理的な設計手法を提案してきた。

具体的には、ダンパー、取付け材、架構の間のバランスにより制振構造の最大応答を陽に表すことで、その関係を図化して応答を予測する「性能曲線」を構築し、層間変形・加速度などの要求性能を満たす構成要素のバランスを、性能曲線から選ぶ手法を提案した。当初は架構を弾性と仮定し、各種別のダンパーの特徴を反映させながら、制振効果を共通の尺度で包括的に表した。

一方、設計地震レベルで架構降伏がおこる事例や極大地震レベルもふまえ、架構が塑性化する場合の検討の必要性が高まった。そのため、鉄骨構造を対象としたバイリニア型、木質構造を対象としたスリップ型、RC構造を対象とした剛性劣化型について検討が行われていたものの、まだそれらが整備されたとはいえ、包括的な制振設計法の確立が望まれていた。また、極大地震レベルを受けるときのダンパーの挙動およびそれによる建物応答に関して研究が少ないという状況が続いていた。

## 2. 研究の目的

以上の背景を踏まえ、本研究の目的は、実験と解析で様々な架構の非線形性や様々なダンパーの極限性能を明らかにするとともに、それらをふまえた包括的な制振構造の設計法を提案することとした。また、本研究課題が始まる直前である2011年3月11日に、東日本大震災が発生したため、その観測記録を詳細に分析し、それから得られる知見を、上述した成果へと盛り込むこととした。

## 3. 研究の方法

鉄骨構造・RC構造・木質構造の3種類を対象とし、それぞれで以下のアプローチで研究を行った。

(1) 部分架構の強制変形実験およびその結果を再現する詳細な解析により、各種制振構造の挙動を詳細に把握する。

(2) 鋼材・粘弾性・粘性・オイルの4種類のダンパーを対象とし、その極限状態を実験により把握するとともに、その挙動を解析で再現することで、ダンパーの終局特性が架構に

及ぼす影響を把握する。

(3) 2011年3月11日に発生した東日本大震災における地震観測記録を収集し、その分析を行うことで実建物の動的挙動を把握する。また、そのデータを用いて様々な検討を行う。

(4) 研究代表者らが提案してきた様々なダンパーによる応答制御設計法を、様々な非線形構造に応用し、効率的な制振設計法を提案する。

(5) 以上の検討結果を集約し、それを設計指針へと反映させる。

## 4. 研究成果

(1) 鋼構造制振建物における主架構挙動の解明：制振建物の主架構には、層間変形による曲げとダンパー力による軸力が作用し、両者の位相は異なる。この荷重条件を再現した床スラブを含む実大部分架構実験を実施し、主架構を構成する各部材（鉄骨梁・柱・ガセットプレート・パネル）の負担応力・歪を把握した。また、任意の歪を層間変形とダンパー力の影響に分ける評価法を提案し、両者による各部材の負担応力・歪の傾向を把握した。さらに、床スラブがあっても鋼梁下フランジ部の歪みがさほど増えないのは、合成梁として機能した結果、歪が柱の方に再配分されたためであることがわかった。次に、曲げと軸力を受ける合成梁を対象に、スラブと鉄骨梁の界面に生じるずれ、柱スキンプレートの抵抗、ガセットプレートによる梁断面性能の変化を考慮した解析モデルと評価式を作成し、両者を用いて各要因が合成梁の弾性挙動に与える影響を確認した。

(2) 木質制振構造の詳細フレーム解析による動的挙動把握：木質制振架構の梁柱部材および接合部のモデル化の方法を提案し、それにより2層制振木質構造の振動台実験の結果を再現し、精度の高さを示した。これにより、2層でのダンパーの効率の低下や、接合部の緩みの影響などを、当該分野において初めて再現できた。釘やビスに力が集中するため、それらの木材へのめり込み、そして力の反転によるスリップの発生という局所挙動をふまえ、接合部実験を行いながら、詳細な接合部のモデル化を行ったことが、本解析手法の鍵となった。

(3) RC制振架構の実験による効率的制振構法の開発とその挙動把握：RC骨組へのダンパー接合方法としてRC骨組全体に鋼部材を通したものの、接合部にスタッド付き鋼板を埋め込んだものの2種を提案し、RC門型架構の実験を行った。実験から、ダンパー変形量のロスは、梁の軸変形による影響が支配的であり、梁部材断面中央にダンパー力伝達用の異形

鉄筋を通すことで、安定したダンパー変形量を確保できることを示した。

#### (4) ダンパーの極限性能把握と解析による

再現：ストロークや速度に制限があるアクチュエータに対し、それ以上の载荷を行うために、変位増幅治具を作成した。その治具を用いてダンパーの大変形実験・高速度実験・長時間実験を行い、ダンパーにおける様々な条件下での極限性能に関する基礎資料を得た。また、その状態を解析により再現できるように、厳密な解析モデルを作成した。ダンパーの種類は鋼材・粘弾性・粘性・オイルの4種類を対象とした。特性が変化しやすい粘弾性ダンパーに関しては、長時間の風外力と長周期・長継続地震動における温度・動的特性の変化を把握し、ダンパーの温度や特性の変化を再現できる簡易な解析手法を提案した。

#### (5) 地震観測記録の分析による耐震・制振・

免震構造建物の実挙動把握と効率的制振改修法の提案：2011年3月11日に発生した東日本大震災で、建物の地震応答記録が多数観測された。記録の所有者の協力でそれを提供していただき、極めて多数の地震応答記録の分析を行った。実際の建物におけるダンパーの制振効果を把握した。特に、20層免震、29層耐震、43層、54層制振建物については、地震記録を用いて様々な検討を行った。例えば29層建物では、得られた地震観測記録と本研究課題で提案する制振設計法をもとに、効率的に制振効果が得られるダンパーの配置と本数について検討し、制振補強方法を具体的に示した。

#### (6) 制振 RC 構造の設計法提案：鉄筋コンクリート (RC) 架構を、ひび割れを伴う剛性劣化型架構としてモデル化し、ダンパーの最適な分配法を提案した。ダンパーは、速度依存型、変位依存型として粘弾性ダンパー、弾塑性ダンパーを考慮し、設計は時刻歴解析で実証した。これまでの研究代表者が提案した設計法と同様に、架構の剛性劣化・非線形化による等価周期や減衰の評価さえすれば、指定された目標応答を満たす応答制御設計ができることを示した。

#### (7) 各種構造の制振設計指針の作成：本研究課題の実績が、鉄骨構造を対象とした『日本建築学会鋼構造制振設計指針』に掲載された。また、木質構造や軽量鉄骨構造を対象とした『小規模住宅制振設計指針』を建築研究開発コンソーシアムを通して作成中であり、2015年度に完成する予定である。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 10 件)

① 笠井和彦, 松田頼征, 元結正次郎, 吉敷

祥一, 制振架構接合部に対し新たな载荷法を用いた基礎的実験研究, 査読有, 日本建築学会構造系論文集, 708号, 2015, pp. 309-319

② Kasai, K., Matsuda, K., Full-Scale Dynamic Testing of Response-Controlled Buildings and Their Components: Concepts, Methods, and Findings, 査読有, Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration (EEEE), Vol.13, 2014, pp. 167-181

③ 笠井和彦, 山際創, 西島正人, 馬場勇輝, 伊藤浩資, 引野剛, 大木洋司, 粘性ダンパーをもつ実大5層鉄骨建物の3次元震動台実験, 査読有, 日本建築学会構造系論文集, 695号, 2014, pp. 47-56

④ 松田和浩, 笠井和彦, 東北地方太平洋沖地震における観測記録を用いた超高層免震建物の動的挙動に関する研究, 査読有, 日本建築学会構造系論文集, 704号, 2014, pp. 1445-1455

⑤ Kasai, K., Mita, A., Kitamura, H., Matsuda, K., Morgan, T., Taylor, A., Performance of Seismic Protection Technologies During the 2011 Tohoku-Oki Earthquake, 査読有, Earthquake Spectra, Special Issue on the 2011 Tohoku-Oki Earthquake and Tsunami, 2013, pp. 265-294

⑥ 笠井和彦, 山際創, 馬場勇輝, 伊藤浩資, 引野剛, 大木洋司, オイルダンパーをもつ実大5層鉄骨建物の3次元震動台実験, 査読有, 日本建築学会構造系論文集, 693号, 2013, pp. 1999-2008

⑦ 蒲武川, 笠井和彦, 弾塑性ダンパーを用いた多層 RC 構造の地震応答制御設計法, 査読有, 日本建築学会構造系論文集, 685号, 2013, pp. 461-470

⑧ 蒲武川, 笠井和彦, 粘弾性ダンパーを用いた RC 構造の地震応答制御設計法, 査読有, 日本建築学会構造系論文集, 671号, 2012, pp. 17-25

⑨ 松田和浩, 笠井和彦, 坂田弘安, フレームモデルによる2層木質制振架構の地震応答解析, 査読有, 日本建築学会構造系論文集, 678号, 2012, pp. 1273-1282

⑩ 笠井和彦, 馬場勇輝, 伊藤浩資, 所健, 引野剛, 大木洋司, 村井 亮平, 粘弾性ダンパーをもつ実大5層鉄骨建物の3次元震動台実験, 査読有, 日本建築学会構造系論文集, 676号, 2012, pp. 985-994

[学会発表] (計 10 件)

① 笠井和彦, 松田和浩, シムアンパン・サラン, 新築・既存超高層建物における地震応答と被害の抑制: 第二報 応答記録の分析と建物性能の評価, Structural Engineering Frontier Conference, 東京工業大学(横浜), March 18th, 2015

② 杉山暢方, 笠井和彦, 佐藤大樹, 松田和浩: 長時間の風外力における実大粘弾性ダンパーの特性評価実験 その1 風応答波によるダンパー内部温度の検討, 日本建築学会関東支部研究報告集 I, 第 85 号, pp. 261-264, 建築会館(東京), 2015 年 3 月 2 日

③ Kasai, K.: Seismic Design of Protective Systems for New and Existing Buildings Considering Recorded Performance, The 5th Asia Conference on Earthquake Engineering (5ACEE), 20 pages (Keynote Paper), NCREC, Taipei, Taiwan, Oct. 17th, 2014

④ 笠井和彦, 荒川洋輔, 蒲武川, 山下哲郎, 久田嘉章: 首都圏で想定される多様な地震動に対する超高層建物の制振補強の検討 その2 オイルダンパー配置の位置決定法と減衰定数算定法, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B2, pp. 889-890, 神戸大学(神戸), 2014 年 9 月 14 日

⑤ Kasai, K.: Implications for Design of Response-Controlled Buildings from Full-scale Lab Tests and Actual Earthquake Observations, JSSI 20th Anniversary, Sendai, Japan, Sep. 26th, 2013

⑥ 茶谷友輔, 笠井和彦, 土橋徹, 安田正治, 本間剛: 東京同地区内にある先端構造建物群の東日本大震災における応答記録の分析 その1 全体概要およびグリーンマスダンパーをもつ制振建物の場合, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B2, pp. 603-604, 北海道大学(札幌), 2013 年 8 月 31 日

⑦ Matsuda, K., Kasai, K., Yamagiwa, H., Sato, D.: Response of Conventional Seismic-resistant Tall Buildings in Tokyo During 2011 Great East Japan Earthquake, The 15th World Conference on Earthquake Engineering, Lisbon, Portugal, Sep. 26th, 2012

⑧ 笠井和彦, 坂田弘安, 山口修由, 松田和浩: 財産保持性に優れた制振住宅に関する開発の経過報告 その35 住宅制振構造研究会の活動内容の概要, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B2, pp. 991-992, 名古屋大学(名古屋), 2012 年 9 月 13 日

⑨ Kasai, K., Pu, W., Wada, A.: Response of passively-controlled tall buildings in Tokyo during 2011 Great East Japan Earthquake, Reliability Engineering and Risk Management, Kanagawa University, Yokohama, Japan, Aug 6th, 2012

⑩ 松田頼征, 笠井和彦, 元結正次郎, 小橋知季, 米谷壮央, 松田和浩: 制振構造における合成梁・柱・ガセットプレート接合部の挙動に関する研究 - その1 E-ディフェンス鋼構造物実験研究 その82, 日本建築学会大会学術講演梗概集, C1, pp. 1159-1160, 早稲田大学(東京都), 2011 年 8 月 24 日

[図書] (計 1 件)

① 笠井和彦(共著), 日本建築学会, 丸善出版株式会社, 鋼構造制振設計指針, 2014, 288

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)  
なし

○取得状況 (計 0 件)  
なし

[その他]  
ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

笠井 和彦 (KASAI, Kazuhiko)  
東京工業大学・応用セラミックス研究所・教授  
研究者番号: 10293060

### (2) 研究分担者

なし

### (3) 連携研究者

元結 正次郎 (MOTOYUI, Shojiro)  
東京工業大学・大学院総合理工学研究科・教授  
研究者番号: 60272704

坂田 弘安 (SAKATA, Hiroyasu)  
東京工業大学・大学院理工学研究科・教授  
研究者番号: 80205749

松田 和浩 (MATSUDA, Kazuhiro)  
東京工業大学・応用セラミックス研究所・助教  
研究者番号: 80567397

### (4) 研究協力者

なし