

令和 2 年 7 月 7 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2016～2019

課題番号：16H04447

研究課題名（和文）様々な制振・免震構造の統一的評価法による応答制御性能の把握と改善

研究課題名（英文）Unified evaluation and design methods for the increased varieties of vibration-controlled buildings and base-isolated buildings

研究代表者

笠井 和彦（Kasai, Kazuhiko）

東京工業大学・科学技術創成研究院・特任教授

研究者番号：10293060

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）：制振・免震構造が多様化し、構造モデルが複雑化するなか、本研究はそれらの簡易かつ精度の高い様々な評価手法・設計手法を提案し、更に非構造材の応答にも着目したものである。その内容は以下の4つに大別できる。

(1)任意履歴を有するダンパーの簡易モデル化手法の提案。(2)各種制振建物の簡易モデル化と、その時刻歴応答解析に基づく制振設計法の提案。(3)非構造材の応答に着目したスペクトル法による最大応答評価法の提案。(4)電気配線用ケーブルラックの動的挙動検証。

研究成果の学術的意義や社会的意義

挑戦的な設計や最新技術の導入により、様々な構造モデルが建物ごとに作成されている。しかし、構造モデルが複雑化すると個別性が高くなり、統一的な尺度で評価することが難しい。また、様々なパラメータが及ぼす応答への影響を巨視的に把握することも難しくなる。本研究は個別性を極力なくし、様々な制振・免震構造に共通して適用できる簡易的な構造モデルの提案を試みたものであり、その適用範囲は広い。また、地震後の建物継続使用に向けて非構造材の地震応答にも着目し、応答評価手法を提案するなど多くの検討を行っており、その社会的意義は大きい。

研究成果の概要（英文）：This study addresses unified evaluation and design methods for the increased varieties of vibration-controlled buildings and base-isolated buildings against the seismic attacks. It also considers protection of non-structural components. The contents are summarized below:

(1) Damper modeling method covering a wide range of damper hysteretic characteristics, (2) Simplified structure modeling and design methods based on time-history analyses, (3) Prediction method of floor response spectra predicting the peak responses of non-structural components, and (4) Experiments and analyses of electric cable-tray system as one of non-structural components subjected to seismic vibration.

研究分野：建築構造・材料

キーワード：制振構造 免震構造 設計法

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

近年、損傷制御構造として発展してきた制振構造や免震構造だが、最下層を意図的に変形させる免震構造に似せた制振構造や、最近の超高層制振建物や免震構造での異種の減衰機構の混用などのように、それぞれが多様化してきている。設計に際して作成される構造解析モデルは、建物ごとに試行錯誤的に作られ、かつ複雑化する傾向にあり、それぞれを共通の基準で評価することが難しくなっている。そこで、できるだけ簡易なモデルでそれらを表現することにより、横ならびの評価をすることの必要性が高まっている。

2. 研究の目的

上述した背景のもと、本研究課題では、建物の巨視的な評価をする際に有用となる様々な評価手法を提案することを目的とした。具体的には、任意ダンパー履歴を対象とした簡易モデル化手法、制振建物を対象とした高精度なせん断・曲げせん断モデルの作成法、それらを用いた制振設計法、および非構造材を対象とした応答スペクトルを用いた最大応答評価手法、などを提案することである。また、近年は非構造材の応答が大地震後の建物の継続使用性に大きく影響することが指摘されるため、非構造材については詳細な検討が必要と考え、実験研究によりその挙動を詳細に分析し、地震時の動的挙動を理解することも目的とした。

3. 研究の方法

本研究課題で実施した検討について、代表的なものを以下に示す。

- (1) 減衰機構における様々な荷重-変形履歴の形状を、バイリニア型の弾塑性要素（変位依存）と、楕円の線形粘性要素（速度依存）の2つの基本要素の並列結合で近似し、統一的に表現する手法を提案した。
- (2) 制振構造の各部材およびダンパーを簡易に表現した時刻歴解析モデルの作成法を提案し、それを用いた制振設計法も示した。任意のダンパー履歴、かつ、任意の主架構履歴に対して適用できるものとなっている。
- (3) 建物床に取り付く非構造材の応答スペクトル作成法を提案し、解析条件をパラメトリックに変化させた時刻歴応答解析に基づく精解との比較により、非構造材の最大加速度と最大変位の予測精度を論じた。
- (4) 電気配線用ケーブルラックの耐震性を検証するために、B種・A種・SA種という代表的な耐震支持を検討対象とし、上海の同済大学キャンパス内にある大型振動台を用いて振動実験を行った。

4. 研究成果

本研究課題で得られた研究成果について、代表的なものを以下に示す。なお、番号は「3. 研究の方法」で記述した番号に対応している。

- (1) 提案した減衰機構の履歴評価手法は、非線形・バイリニア粘性ダンパー、線形・非線形粘弾性ダンパー、鋼材ダンパー、摩擦ダンパー、慣性質量ダンパー、高硬度ゴム、高減衰ゴムなど、研究代表者らが詳細を熟知する殆どの減衰機構の履歴を近似できる。減衰機構の貯蔵・損失剛性、最大力、エネルギー吸収などの動的特性を、2つの基本要素の周知の動的特性の組合せで表し、履歴形状の再現精度が高いことを確認した。また、そのモデルを用いて行った時刻歴応答解析は、様々な履歴形状を有するダンパーの詳細モデルによる時刻歴応答解析の結果を、精度よく再現できることを示した。
- (2) 次に示す具体的な制振設計法を提案した。手順1で部材構成モデルによる架構のみの静的荷重増分解析を行うことで、多質点系せん断モデルに変換し、さらに等価1質点系に変換する。手順2で等価1質点系にダンパーを付与しながら設計用地震動（例えばBCJ-L2波）で直接時刻歴応答解析を実施し、目標層間変形角を満たすダンパー量を決定する。手順3では、手順2で求めたダンパー量を各層に分配することで設計が完了する。提案する設計法は、研究代表者らがこれまで提案してきた性能曲線を使わずに、1質点系の時刻歴応答解析でダンパー量を決定することに特徴がある。ダンパー履歴や主架構履歴による動的特性値を定式化する必要がないため、任意のダンパー・主架構に対して適用できるものとなっている。
- (3) 建物と非構造材がともに1質点系の場合、建物周期成分をもつ正弦波と地震波それぞれの非構造材応答への影響を表す2種の伝達関数、建物最大加速度、地震応答スペクトルにより、非構造材の擬似加速度、変位応答スペクトルの作成が可能であることを示した。また、時刻歴応答解析に替わり、建物モデルの各モードの周期・減衰定数に基づいて上述した方法で作成したスペクトル曲線をCQC法で組み合わせ、非構造材の擬似加速度スペクトル曲線を得た。変位スペクトルの場合は、その結果を簡易に変換した。30層建物の中高層階では、1~8次モード分の組み合わせで良好な精度を得ることを示した。
- (4) 平面寸法が約13m×12mの大空間を振動台上に作成し、電気配線に用いられるケーブルラッ

クを対象として、大型試験体の振動台実験を実施した。建築設備耐震設計・施工指針で規定された耐震要素B種・A種・SA種の耐震支持について、必要最低限の耐震性を確保した約12mのケーブルラック試験体3本を作成した。また、一般的な耐震要素であるA種を対象として、ケーブルラックの立ち上がり部や、直角の水平接合部を有し、試験体設置スペースをギリギリに使用した大型試験体も作成した。それらの大型試験体の振動台実験を行うことで、より実状に近いケーブルラックシステムの最大変位・最大加速度の分布、破壊モードといった基本的な耐震性能や、周期・減衰定数などの動的特性を詳細に把握した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

| | |
|--|-----------------------|
| 1. 著者名 笠井和彦, 小松真吾, 近藤さゆみ, 赤塚希美 | 4. 巻 758 |
| 2. 論文標題 地震時における建物非構造材の応答スペクトルの作成法 | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 日本建築学会構造系論文集 | 6. 最初と最後の頁 489-499 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

| | |
|--|-----------------------|
| 1. 著者名 中井亜里沙, 佐藤大樹, 村上智一, 笠井和彦 | 4. 巻 57 |
| 2. 論文標題 超高層免震建物の地震動観測記録に基づく免震層および上部構造の剛性の評価 | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 日本建築学会技術報告集 | 6. 最初と最後の頁 571-576 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

| | |
|--|---------------------|
| 1. 著者名 Kimura, Y., Suzuki, A. and Kasai, K. | 4. 巻 2 |
| 2. 論文標題 Estimation of Plastic Deformation Capacity for Ishaped Beams with Local Buckling under Compressive and Tensile Forces | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 Jpn., Archit. Rev. | 6. 最初と最後の頁 26-41 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

| | |
|--|---------------------|
| 1. 著者名 松田和浩, 笠井和彦, 中村哲也 | 4. 巻 24 |
| 2. 論文標題 電気配線用吊り式ケーブルラックシステムの力学的挙動とその制振化に関する実験研究 | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 日本建築学会技術報告集 | 6. 最初と最後の頁 63~68 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

| | |
|--|-----------------------|
| 1. 著者名 笠井和彦, 渡井一樹, 前田周作, 佐藤大樹, 鈴木庸介 | 4. 巻 772 |
| 2. 論文標題 建築物のさらなる超高層化に向けた等価質点モデル化手法(その1): 曲げせん断モデル作成に関する既往手法の考察と新たな手法の提案 | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 日本建築学会構造系論文集 | 6. 最初と最後の頁 791-801 |
| 掲載論文のDOI(デジタルオブジェクト識別子) なし | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

| | |
|---|-----------------------|
| 1. 著者名 上野史也, 渡井一樹, 佐藤大樹, 笠井和彦, 佐分利和宏, 前田達彦, 増田寛之 | 4. 巻 66B |
| 2. 論文標題 オイルダンパーと変形制御機構を併用した大振幅地震動に対する既存超高層建物の制振改修設計法 | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 構造工学論文集 | 6. 最初と最後の頁 353-365 |
| 掲載論文のDOI(デジタルオブジェクト識別子) なし | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

〔学会発表〕 計16件(うち招待講演 3件/うち国際学会 8件)

| |
|--|
| 1. 発表者名 関雄佑, 松田和浩, 笠井和彦 |
| 2. 発表標題 電気配線用ケーブルラックの制振化に関する研究開発 その5 親桁と子桁の接合部の実験 |
| 3. 学会等名 日本建築学会 |
| 4. 発表年 2016年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 杜東升, 笠井和彦, 白崎和幸, 山下哲郎, 久田嘉章, 中西真子 |
| 2. 発表標題 長周期地震動等を考慮した既存超高層建築の耐震性能とダンパー補強効果の評価 その4 入力地震動特性を考慮した制振補強設計 |
| 3. 学会等名 日本建築学会 |
| 4. 発表年 2016年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 笠井和彦, 杜東升, 白崎和幸, 山下哲郎, 久田嘉章, 中西真子 |
| 2. 発表標題 長周期地震動等を考慮した既存超高層建築の耐震性能とダンパー補強効果の評価 その5 時刻歴解析による非制振建物と制振補強建物の応答比較 |
| 3. 学会等名 日本建築学会 |
| 4. 発表年 2016年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Kasai Kazuhiko |
| 2. 発表標題 Buildings with Seismic Protective Systems: Full-scale Shake Table Tests and Actual Earthquake Observations |
| 3. 学会等名 Technical University of Civil Engineering, Bucharest (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2016年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Kasai Kazuhiko |
| 2. 発表標題 Current Status of Motion Control to Mitigate Seismic Damage of High-Rise Buildings and Contents |
| 3. 学会等名 The 14th International Symposium on Structural Engineering (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2016年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Kasai K., Sakata H., Matsuda K., Yamazaki Y. |
| 2. 発表標題 Tokyo Tech. Research on Vibration Control Systems for Japanese Houses |
| 3. 学会等名 PEER, SEMM, and Dept. of Civil and Environmental Engineering, University of California (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2016年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 西島正人・笠井和彦・田中清 |
| 2. 発表標題 非線形粘性ダンパーをもつ制振構造の架構の塑性化を考慮した応答制御設計法 その1 等価1質点系の時刻歴応答解析による制振設計法 |
| 3. 学会等名 日本建築学会 |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 田中清・笠井和彦・西島正人 |
| 2. 発表標題 非線形粘性ダンパーをもつ制振構造の架構の塑性化を考慮した応答制御設計法 その2柔らかい低層鉄骨架構に対する制振設計例 |
| 3. 学会等名 日本建築学会 |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 安藤咲季, 松田和浩, 笠井和彦 |
| 2. 発表標題 様々な履歴の制振壁簡易モデルを用いた時刻歴応答解析に関する研究 |
| 3. 学会等名 日本建築学会東海支部 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Kasai, K., Nishijima, M., Tanaka, K., Wang, S. and Mahin S. |
| 2. 発表標題 Simplified Design Method for Frames with Nonlinear Viscous Dampers |
| 3. 学会等名 Proceedings of 11th NCEE (国際学会) |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Kasai, K., Mori, T., Masaki, N. and Murota N. |
| 2. 発表標題 Simplified Modeling for Two-directional Behavior of High Damping Rubber Isolation Bearings |
| 3. 学会等名 Proceedings of 11th NCEE (国際学会) |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 中井亜里沙, 佐藤大樹, 笠井和彦 |
| 2. 発表標題 観測記録に基づく超高層免震建物の地震応答時の剛性の分析 その1 多質点等価せん断型モデルおよび3次元部材モデルを用いた剛性評価手法の検討 |
| 3. 学会等名 日本建築学会関東支部 |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 呉 嘉瑞, 佐藤大樹, 中井亜里沙, 笠井和彦 |
| 2. 発表標題 観測記録に基づく超高層免震建物の地震応答時の剛性の分析 その2 東北地方太平洋沖地震発生前後における上部構造および免震層の剛性の比較 |
| 3. 学会等名 日本建築学会関東支部 |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 K. Kasai, S. Komatsu, and D. Lau |
| 2. 発表標題 A PREDICTION METHOD OF NON-STRUCTURAL RESPONSE SPECTRA Part 1: Outline of Prediction Method and Verification with SDOF Building |
| 3. 学会等名 17th World Conference on Earthquake Engineering (国際学会) |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 S. Komatsu, K. Kasai, and D. Lau |
| 2. 発表標題 A PREDICTION METHOD OF NON-STRUCTURAL RESPONSE SPECTRA Part 2: Verification of Components in Multi-story Building |
| 3. 学会等名 17th World Conference on Earthquake Engineering (国際学会) |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 K. Kasai, K. Watai, S. Maeda, D. Sato, Y. Suzuki |
| 2. 発表標題 DEVELOPMENT OF BENDING-SHEAR MODEL FOR SIMPLIFIED ANALYSIS OF SUPER-TALL BUILDINGS |
| 3. 学会等名 17th World Conference on Earthquake Engineering (国際学会) |
| 4. 発表年 2020年 |

〔図書〕 計1件

| | |
|--|-----------------|
| 1. 著者名 Fujino, Y., Siringoringo, D., Kikuchi, M., Kasai, K. and Kashima, T. | 4. 発行年 2019年 |
| 2. 出版社 Theory to Successful Applications | 5. 総ページ数 447 |
| 3. 書名 Seismic Structural Health Monitoring | |

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

| | 氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号) | 所属研究機関・部局・職 (機関番号) | 備考 |
|-----------|---|---|----|
| 研究 分担者 | 佐藤 大樹 (Sato Daiki) (40447561) | 東京工業大学・科学技術創成研究院・准教授 (12608) | |

6. 研究組織（つづき）

| | 氏名 (研究者番号) | 所属研究機関・部局・職 (機関番号) | 備考 |
|-------------------|---|--|----|
| 研究 分 担 者 | 松田 和浩 (Matsuda Kazuhiro) (80567397) | 名城大学・理工学部・准教授 (33919) | |