

令和 2 年 5 月 12 日現在

機関番号：12608

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K14756

研究課題名(和文)地震対策用TMDの包括的な制振性能の理解に向けた応答指定型設計法の確立

研究課題名(英文)Methodology of performance-based design of tuned mass damper effective in reducing seismic response in steel structures

研究代表者

金子 健作(Kaneko, Kensaku)

東京工業大学・科学技術創成研究院・特任准教授

研究者番号：00715279

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、地震対策として建築物の屋上などに設置する大型の同調質量ダンパー(TMD)に対して、制振設計法と応答予測法を構築した。はじめに、建築物の弾性応答に限定して、不規則振動理論に基づいて作成した制振性能曲線から、TMDの変形制限を考慮した最適化とシステムの等価付加減衰定数の評価を可能にした。地震動特性に依存せずに、従来のパッシブ制振構造とTMDの制振性能を客観的に比較できることが特徴である。さらに、展開した理論を参考にして、TMDを履歴系に変えることにより、従来のTMDに比べて格段に幅広い塑性率に対して、建築物の非弾性応答を制御できることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

南海トラフを震源とする長周期地震動の発生が懸念され、その影響を受ける超高層建物の改修が徐々におこなわれている。工事箇所が限定されるTMDはその改修に適していると考えられ、建設会社を中心に大型のTMDが精力的に開発されているものの、その制振設計法や性能評価法は確立されていない。本研究では、不規則振動理論による高度な数式の展開により得た学術的成果だけでなく、構造設計者が知見を使えるように簡易な制振設計体系を構築した。これにより、従来は地震対策として利用されることの少ないTMDの社会的普及に貢献できた。また、本研究が国際共同研究に繋がり、建築物の低コストな耐震改修法の開発へと発展した。

研究成果の概要(英文)：This study proposed a design methodology of tuned mass damper mounted on steel buildings for seismic protection. On the basis of stochastic vibration theory, closed forms of the equivalent damping ratio for elastic TMD-building systems are derived together with their defamration ratio. These formulae allow us to construct a control performance diagram and optimize TMD under the constraint of the deformation. The present theories were further developed to consider displacement-dependent TMD that can be self-tuned to nonlinear buildings. Time-history analysis also showed the effectiveness of the proposed TMD for extremely large ground motions.

研究分野：振動制御

キーワード：同調質量ダンパー TMD 制振改修 応答制御 応答スペクトル法 制振性能曲線 非線形応答 地震応答解析

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。

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

南海トラフを震源とする長周期地震動の発生が懸念され、その影響を受ける超高層建築物の改修が徐々におこなわれている。近年、工事箇所が限定される同調質量ダンパー (TMD) は改修利用に適していると考えられ (図 1a)、建設会社を中心に地震対策用の TMD が精力的に開発されている。

これまで、TMD は暴風時に生じる高層建築物の揺れを抑え、居住性を向上させる目的でももに使用されてきた。揺れの振幅が小さいことから、使用される TMD は小型であり、定点理論などを用いて最適な TMD の剛性や減衰量を簡単に計算できる。これに対して、地震対策用の TMD には、建築物の総質量に対して数パーセントと大きな質量が必要である。揺れを抑える原理は、TMD が建築物と共振することに類似していることから、揺れ抑制の効果を発揮するまでには時間がかかる。風に比べて地震動に伴う揺れの時間は短く、かつ非定常であることから、TMD は地震応答の抑制 (制振) に効果的ではないと判断する構造技術者や研究者もいる。

現状、TMD の制振性能を検証するには、時刻歴地震応答解析が一般的であるものの、結果は用いる地震動に強く依存する。一方で、建築物の層間に制振ダンパーを有する従来型のパッシブ制振構造では、対象の建築物を一自由度系に置換した上で、応答スペクトル法を用いて制振性能を評価できる。この利点は、時刻歴解析を用いないため、特定の地震動に依存せずに制振性能の一般解が得られることである。一方で、TMD と建築物から成る制振システムは、簡単には一自由度系に置換できないこと、強い非比例減衰系であるために古典的モード重ね合わせ法を利用できないこと、などの理由から、従来のパッシブ制振構造と同様の手順により設計できない。また、従来のパッシブ制振構造と制振性能を客観的に比較することは困難である。

2. 研究の目的

建物の耐震性能を向上するために TMD が有効であると期待できるものの、その理論的背景が不足している。地震対策用の TMD が広く普及するには、個別の装置の開発だけでなく、制振設計法や応答評価法などの枠組みの構築が必要である。

本研究は、地震対策用の TMD に対して、従来のパッシブ制振構造と連続する制振設計法や性能評価法を確立することが目的である。建物については弾性応答に留まらず、非弾性応答も含める。そのために、下記の三つのフェーズに区分して、それぞれの研究課題に取り組んだ。

第一フェーズ

- A1) 建物の弾性応答に限定し一自由度系に縮約したうえで、地震応答に対する最適な線形 TMD の剛性や減衰係数を定式化する。
- A2) 特定の地震に依らない制振性能の客観的指標として、TMD と建物から成る制振システムの等価付加減衰定数を導出する。
- A3) 上記に基づいて、応答スペクトル法に基づいて建物の最大応答を評価する枠組みを構築する。
- A4) TMD の変形制限を考慮できるように、TMD の最適設計法と応答予測法を拡張する。

第二フェーズ

- B1) 一自由度系で予測した値から、多自由度系の最大応答を復元する方法を構築する。
- B2) 様々な経時的特性を有する地震動の応答に対する TMD の制振性能の客観的指標を提案する。
- B3) TMD から中間層免震までの相互作用システムについて、包括的な応答の理解に資する考え方を提示する。

第三フェーズ

- C1) 建物の地震応答が弾性限を超えて制振性能が低下する場合に適用できるように、構築した応答予測法を拡張する。
- C2) 建物の非弾性応答に対して制振性能を低下させないため、履歴型 TMD を提案し、その最適設計法と応答予測法をこれまでと同様に定式化する。

3. 研究の方法

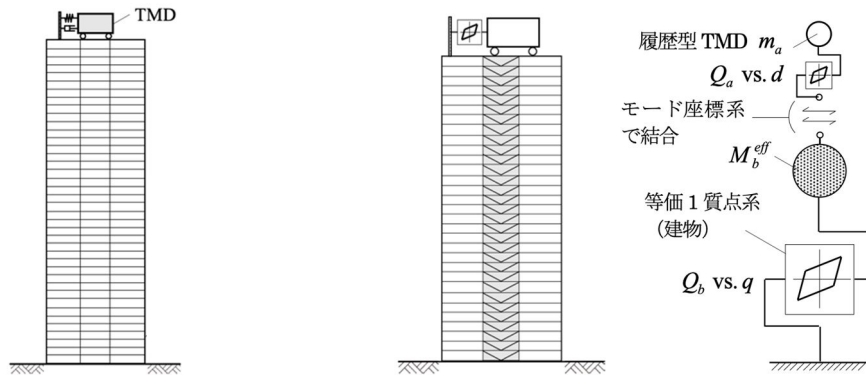
一般に、制振対象とする一つのモードが TMD の付加により二つに分岐し、もとの有効質量も概ね等しく分配される。TMD と建物から成る、この 2 自由度系の制振システムは、強い非比例減衰系となるため、古典的モードを用いた応答スペクトル法を適用できない。そのため、不規則振動理論に基づいて統計的な手法により、この有意な二つのモードを一つに縮約した。これにより、任意の質量、減衰係数および剛性を有する TMD に対する等価付加減衰定数を導出。さらに、建物の最大変位応答を最小化する TMD の剛性と減衰係数を導出し、最適同調条件として整理した。このときに生じる建物と TMD の変形比の閉形式解を導出した。これを基準にして、最適同調条件以外のシステムの等価付加減衰定数や変形比の近似解を導出した。

4. 研究成果

(1) 縦軸を TMD の変形指標、横軸を建物の応答低減効果とする制振性能曲線を提示した(図 2)。これにより、TMD の変形制限を考慮しながら、視覚的に必要な TMD の質量や減衰量を推定することができる。また、この図を作成するために用いた基本式から、応答スペクトル法を用いて建物と TMD の最大応答を予測することが可能になった(図 3)。

(2) 地震動の継続時間に対する建物固有周期の比を用い、地震特有の非定常性を考慮した制振性能の損失を定式化した。得られた知見は、建物の固有周期が長い、あるいは地震動の継続時間が短くなるほど、TMD の制振性能は低下するという従来の認識に合致するものの、制振対象とする大きさのマグニチュードにみられる継続時間では、制振性能の低下は無視できるほど小さいことを明らかにした。したがって、TMD には、継続時間の長い長周期地震動のみならず、一般的な地震動も含めて効果的な制振性能がある。TMD の性能が従来型のパッシブ制振と同様である事実は従来の認識と異なり、TMD が幅広い耐震改修に有用であることを示した。

(3) 建築物の地震応答が弾性限を超えると、TMD の制振性能が低下することを数理的に明らかにした。そのうえで、可変剛性・減衰などのアクティブな手法を採用せずにこの低下を抑える方法として、TMD の復元力特性を弾塑性(履歴型)にする方法を提案した(図 1b)。二つの非線形システムが組み合わさる相互作用システムは、線形に比べて格段に複雑であるため、TMD の最適化に関する設計式を整理した。幅広い建物の塑性率について、時刻歴解析により制振効果を実証したうえで、応答スペクトル法により最大応答を簡易に予測できることを示した。



(a) 弾性建物に設置する線形 TMD (b) 弾塑性建物に設置する非線形 TMD
図 1 建物と TMD から成る制振システム

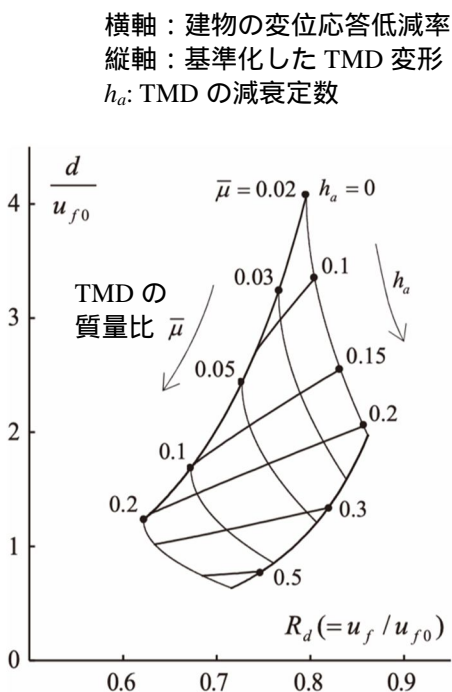


図 2 制振性能曲線の例

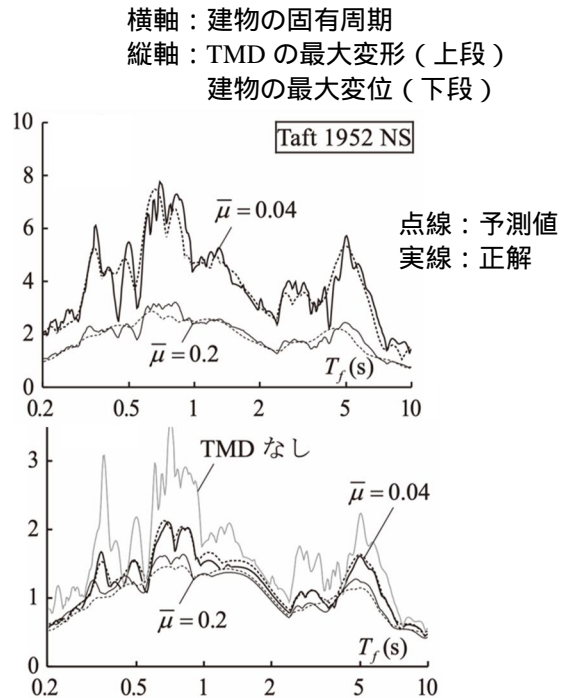


図 3 応答スペクトル法による予測例
(上段：TMD の変形，下段：建物の最大変位)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 8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 金子 健作 | 4. 巻 83 |
| 2. 論文標題 任意階の床応答スペクトルの機械学習に基づく非構造部材の設計支援手法 | 5. 発行年 2018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 1757 ~ 1765 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.3130/aijs.83.1757 | 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 金子 健作 | 4. 巻 83 |
| 2. 論文標題 弾性限を超える限界状態に対して制振性能を維持する履歴型TMDの調整法 | 5. 発行年 2018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 1423 ~ 1433 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.3130/aijs.83.1423 | 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 金子 健作 | 4. 巻 83 |
| 2. 論文標題 非構造部材の共振時応答倍率に関する地震動の継続時間を考慮した期待値 | 5. 発行年 2018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 553 ~ 563 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.3130/aijs.83.555 | 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 金子 健作 | 4. 巻 82 |
| 2. 論文標題 全体曲げ変形に伴う制振建物の性能低下を補償する同調質量ダンパーの最適設計法 | 5. 発行年 2017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 1003 ~ 1012 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.3130/aijs.82.1003 | 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 金子 健作 | 4. 巻 82 |
| 2. 論文標題 広範な地震動強さに対して応答低減を可能とする履歴型層間ダンパーとTMDの併用 | 5. 発行年 2017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 1577 ~ 1587 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.3130/aijs.82.1577 | 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 金子 健作 | 4. 巻 82 |
| 2. 論文標題 主系と副系から成る建物を対象とした動的縮約モデルによる層間変位分布の復元 | 5. 発行年 2017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 1865 ~ 1872 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.3130/aijs.82.1865 | 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 金子 健作 | 4. 巻 27 |
| 2. 論文標題 大振幅地震動に対する非弾性建物と履歴型TMDの適応的同調 | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 鋼構造年次論文報告集 | 6. 最初と最後の頁 551 ~ 556 |
| 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 金子 健作 | 4. 巻 n/a |
| 2. 論文標題 応答曲面の機械学習による非線形相互作用システムの制御設計支援 | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 情報・システム・利用・技術シンポジウム論文集 | 6. 最初と最後の頁 312 ~ 317 |
| 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7件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件）

| |
|--|
| 1. 発表者名 K. Kaneko |
| 2. 発表標題 Performance-based Design Methodology of Tuned Mass Damper for Mitigating Seismic Damage to Nonstructural Components |
| 3. 学会等名 The 7th World Conference on Structural Control and Monitoring, 7WCSCM (国際学会) |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 金子 健作 |
| 2. 発表標題 弾性限を超える限界状態に対して制振性能を維持する履歴型 TMD の可能性 |
| 3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演会 |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 高橋 和久, 金子 健作, 元結 正次郎 |
| 2. 発表標題 超高層RC造建物の塑性率に応じた地震用TMDの最適同調比の推定 |
| 3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演梗概集 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 高橋 和久, 後藤 尚哉, 焦 凝, 角 友太郎, 金子 健作 |
| 2. 発表標題 強震を受ける鉄筋コンクリート造建物における制振性能曲線を用いたマスダンパーの調整法 |
| 3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演梗概集 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 後藤 尚哉, 角 友太郎, 金子 健作, 陳 宗武, 陳 俊仲, 李 柏翰 |
| 2. 発表標題 振動台実験による摩擦型同調質量ダンパーの性能評価を目的としたばらつき特性の把握 |
| 3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演梗概集 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 B-H Lee, C-C Chen, S-Y Shiao, C-R Jang, T-W. Chen, K. Kaneko, N. Goto, N. Jiao and Y. Sumi |
| 2. 発表標題 Shaking Table Test of Displacement-Dependent Tuned Mass Damper for Structural Reinforcement |
| 3. 学会等名 The Fifteenth National Conference on Structural Engineering/ The Fifth National Conference on Earthquake Engineering (国際学会) |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 K. Kaneko |
| 2. 発表標題 Adaptive Tuning of Hysteretic Mass Damper for Reducing Seismic Response in Nonlinear Multi-Story Buildings |
| 3. 学会等名 The 17th World Conference on Earthquake Engineering (国際学会) |
| 4. 発表年 2020年 |

〔図書〕 計0件

〔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 |
|---------------------------|-----------------------|----|
| | | |