

## 研究助成実施報告書

助成実施年度	2019 年度
研究課題（タイトル）	RC 造建物に導入する非線形 TMD の普及に向けた新たな制振設計 アプローチ
研究者名※	金子 健作
所属組織※	東京工業大学 環境・社会理工学院 建築学系 助教 (東京工業大学 科学技術創成研究院 未来産業技術研究所 特任准 教授)
研究種別	研究助成
研究分野	建築技術
助成金額	120 万円
発表論文等	日本建築学会構造系論文集, Vol. 85, No. 777, 2020 年 11 月

※研究者名、所属組織は申請当時の名称となります。

( ) は、報告書提出時所属先。

## 大林財団 2019 年度研究助成実施報告書

所属機関名 東京工業大学

申請者氏名 金子健作

研究課題	RC 造建物に導入する非線形 TMD の普及に向けた新たな制振設計アプローチ
(概要)	
<p>耐震性の不足する鉄筋コンクリート造 (RC 造) を対象に、低コストな制振改修を可能とする線形・非線形 TMD に対する制振設計法を構築した。はじめに、線形 TMD に対して、非線形応答する建物への最適な剛性調整手法を定式化した。この手法をもとに、TMD の最大変形と建物の変位応答低減効果と関係づける制振性能曲線図を提示した。この図から、必要な制振性能と TMD の変形制限に対して、TMD の合理的な質量や減衰係数を視覚的に定めることができる。5 階から 14 階建てまでの RC 造共同住宅の立体振動解析を実施し、中小～大地震を想定した観測地震動に対して、15～20%の変位応答低減効果を確認した。さらに、線形 TMD の減衰機構を摩擦機構に置き換えた非線形 TMD を提案し、RC 造に適用した場合の制振設計を支援するツールを整備した。このツールは、多数の非線形時刻歴応答解析を学習した深層ニューラルネットワークをソルバーに有し、ユーザーが対話的に TMD の諸元を変えることにより、制振性能を視覚的に評価できる。</p>	

## 1. 研究の目的

本研究では、鉄筋コンクリート造 (以下、RC 造) を中心として形成された海外の都市圏を意識して、屋上に設置する同調質量ダンパー (以下、TMD) を用いた耐震改修を高度化する。日本と異なり改修技術が未熟な諸外国に適するよう、簡易な摩擦機構により地震エネルギーを吸収する TMD を提案し (図 1)、都市の低コストな耐震化に貢献する。

わが国では、1981 年以前に竣工した既存不適格建築物について、公共施設では耐震化率が 90% を超えている。民間建物でも、特に特定緊急輸送道路沿道建築物に関しては、徐々に耐震改修が進んでいる。一方、海外に目を向けると事情は大きく異なる。例えば、同じ地震国である台湾については、わが国以上に脆弱な建物が密集するものの、耐震改修の進捗は遅い。1992 年の 921 集集大地震をはじめとする地震で多数の建物が倒壊し、人的・物的被害が生じた。台湾にある建物の特徴として、1 階を店舗、それ以外を共同住宅とした鉄筋コンクリート造が主流であり (図 2)、12 階建てまでの建物が多い (図 3)。これら建物の多くが、日本の震度 6 弱程度の地震で倒壊する可能性が高い。そのため、台湾では政府による都市更新の政策が推進されている。

しかしながら、台湾では、様々な改修構法の開発や改修設計指針が整備されてきたわが国と社会状況が異なる。さらに、一つの建物に商業施設と共同住宅の両用途がある場合、改修の実施に

ついて、区分所有者の合意形成をすることが困難である。そこで、多数の既存建築物の耐震改修をいかに首尾よく進めるかについて、政府からの経済的補助だけでなく、耐震性と居住性の双方を考慮した改修工法が必要である。

本研究の特色は、以下のとおりである。

- 1) 工事が屋上に限定され、居ながら補強，低コストな改修，改修後の眺望確保の実現
- 2) 建物の屋上スラブと接合する TMD の施工の容易性
- 3) 別置きオイルダンパー（減衰機構）が不要（図 1）

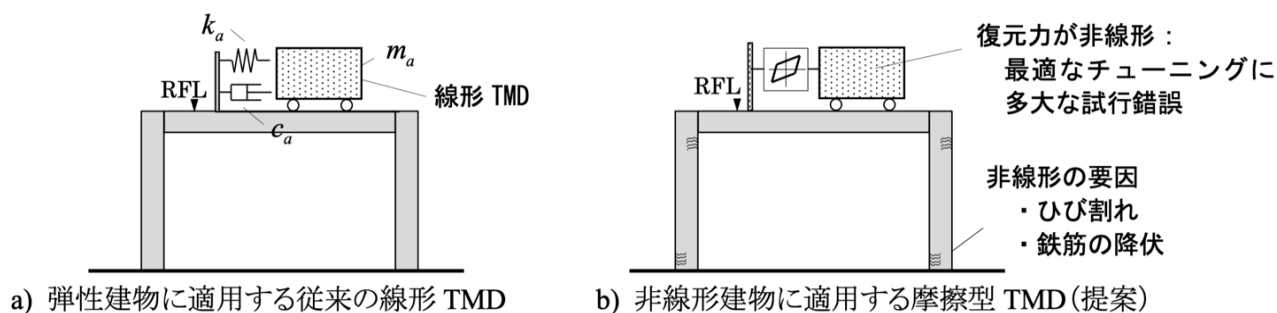


図 1 耐震改修効果を上げるための TMD の調整の概要



図 2 台北市内の典型的な建物

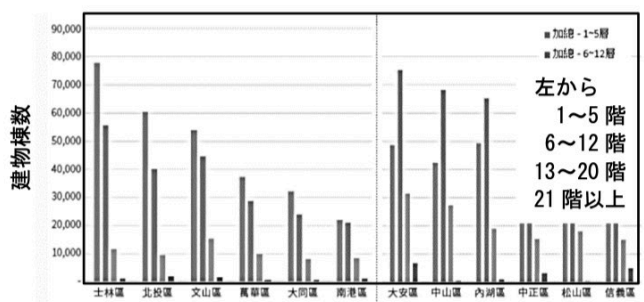


図 3 台湾における既存 RC 造建物の地上階数の分布

## 2. 研究の経過

当初計画していた TMD の制振設計法に関する研究は、概ね完了した。RC 造建物について、線形 TMD や非線形 TMD を付加することにより、中小地震から大地震まで、最大変位応答が概ね 15~20%減少することを確認した。強震時に強い非線形性の応答を示す RC 造建物について、地震レベルに拘わらず応答低減効果が確認されたことは重要である。この知見から、これまでは主に鋼構造建物に限定された地震用 TMD が、RC 造建物に適用されることが期待される。

高精度な振動計測器による常時微動測定を通じて、台湾の建物の固有周期を調査する予定であったが、未実施に終わった。この理由は、新型コロナウイルスによる海外渡航自粛の影響によるものである。TMD の設計には建物の固有周期の把握が非常に重要であるため、コロナ禍の終息次第、調査を実施したいと考えている。

### 3. 研究の成果

#### 3.1 質点系モデルを用いた線形 TMD に対する最適同調比の考察

非線形 TMD に先立ち、RC 造建物における線形 TMD の最適化について検討した。最適化については、TMD の固有振動数と建物の固有振動数の比（同調比）の最適値（最適同調比）が建物の最大応答塑性率とどのように関係づけられるかを調べた。図 4 は、多数の質点系モデルを用いて、目標スペクトルに適合する模擬地震動を入力とする時刻歴応答解析から、最適同調比を求めたものである。塑性率に応じて、最適同調比が低下する傾向にあり、この傾向を推定する理論式を構築した。この理論式は、観測地震動にも適用できることを確認した。最後に、最適同調比の理論式を用いた場合の TMD による変位応答低減効果を調べた。

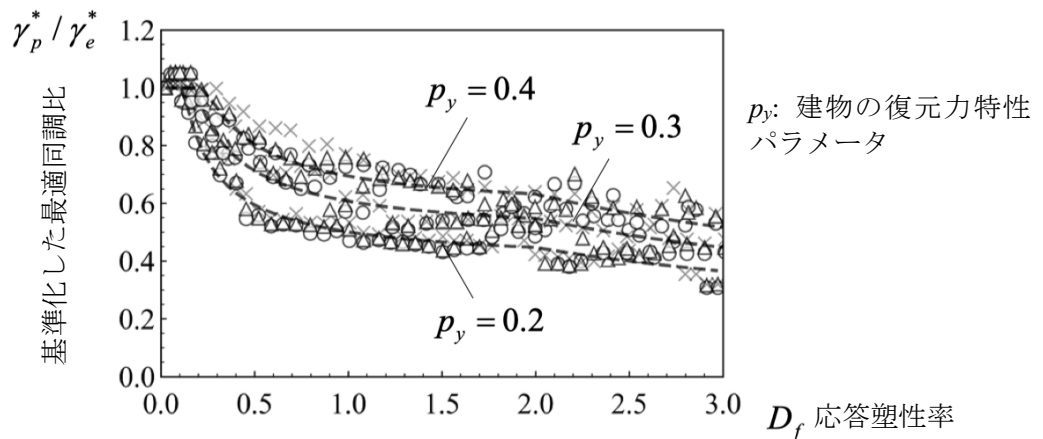


図 4 最大応答塑性率に応じた最適同調比

#### 3.2 線形 TMD に対する制振性能曲線の提案

等価一質点系の時刻歴応答解析を繰り返すことにより、線形 TMD に対して、制振性能曲線図を提示した（図 5）。この制振性能曲線図は、横軸に応答低減効果、縦軸に TMD の変形指標をとり、TMD の設計変数（質量、減衰係数）をパラメータに描いた曲線である。TMD の変形を許容値以内に抑え、目標とする応答低減効果を得るための TMD の諸元が視覚的に分かる。

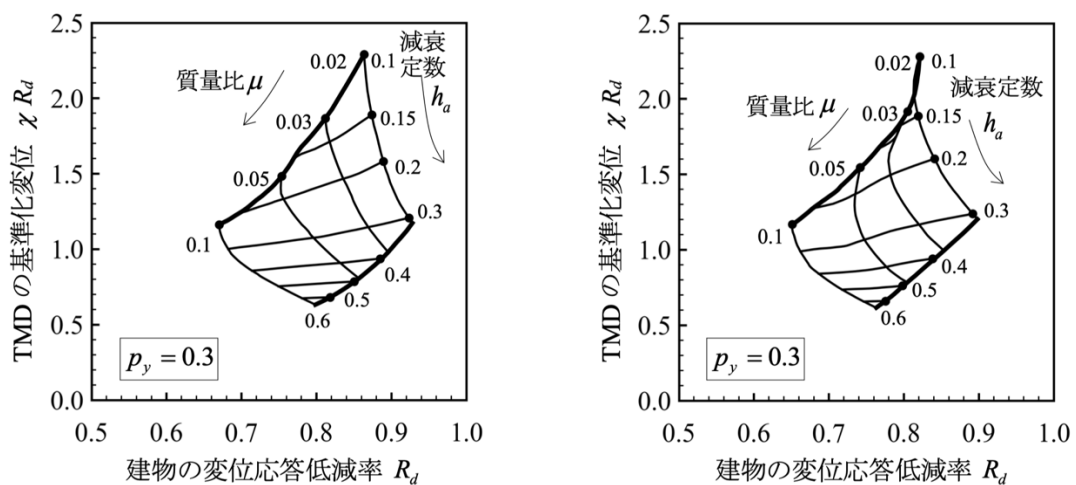
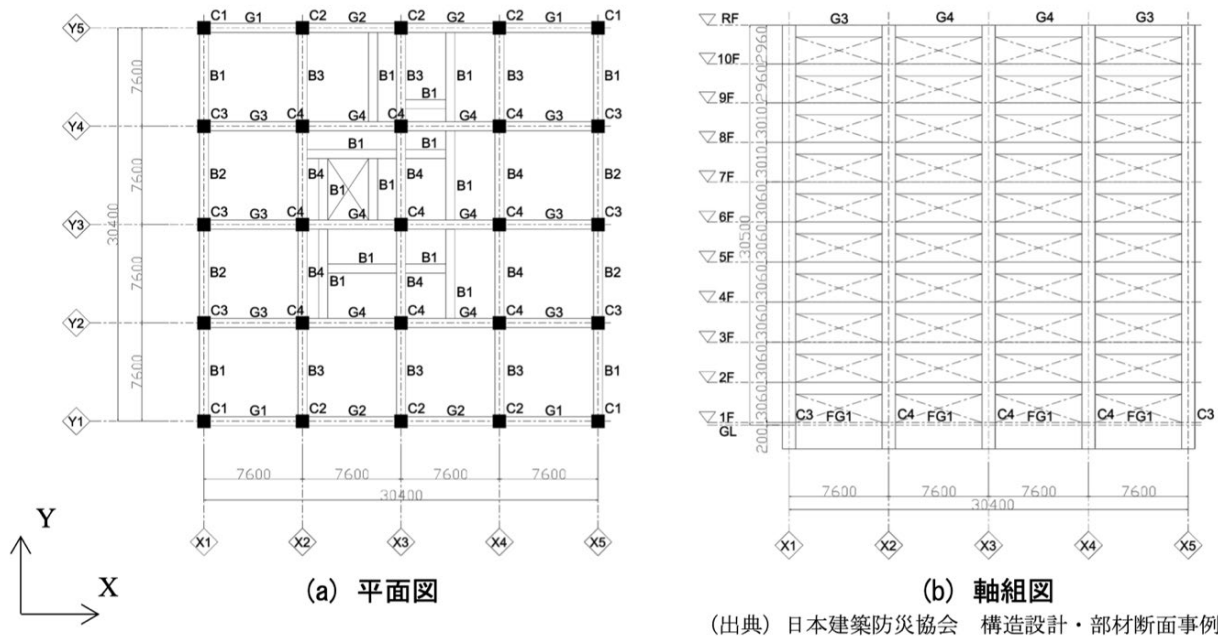


図 5 TMD の最大変形と応答低減効果を可視化した制振性能曲線

### 3.3 立体振動解析による TMD の制振効果の検証

典型的な口の字型の共同住宅を対象とし（図 6）、5 階建て、10 階建ておよび 14 階建ての RC 造物の立体骨組解析モデルを作成した。制振性能曲線を用いて TMD の諸元を定め、代表的な観測地震動に対して、最大層間変位が概ね 15~20%減少することを確認した（図 7）。



(出典) 日本建築防災協会 構造設計・部材断面事例集<sup>14)</sup>

図 6 立体振動解析に用いる RC 造共同住宅の一例（10 階建て）

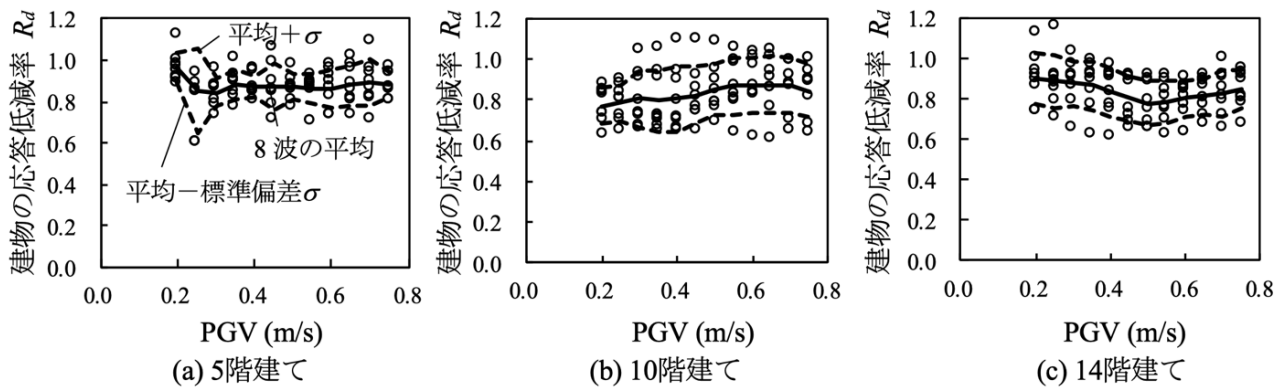


図 7 様々な最大地動速度 PGV に対する TMD による応答低減効果

### 3.4 非線形 TMD の制振設計における深層学習の活用

非線形 TMD に関しては、制振性能曲線とは別のアプローチを試みた。設計パラメータを変えた場合の応答変化を視覚的に確認できるツールを整備した（図 8）。非線形 TMD の設計パラメータである質量比、同調比、摩擦係数などを設定するスライダーを左右に動かすと、建物の制振効果と TMD の応答が即座に変化する。TMD の制振は動的相互作用に基づくものであり、建物と TMD がともに非線形応答することから、元来は理解が難しいものである。これらの現象を可視化することにより、制振性能の理解を助け、設計の試行錯誤を格段に減らすことができる。

このツールは、内部のソルバーに深層ニューラルネットワーク（以下、DNN）を有している。DNNは、多数の時刻歴解析を通じて作成された訓練データにより学習されている。時刻歴解析では、ラテン超方格法でサンプリングした様々な建物特性とTMDの諸元、地盤特性などを振動解析モデルと入力地震動に反映している。数千ケースの時刻歴解析から得た、振動解析モデルや入力地震動と建物応答の関係を訓練データとして用意し、これを隠れ層数5のフィードフォワードニューラルネットワークで学習した。学習済みのニューラルネットワークに、グラフィカル・ユーザ・インターフェースを実装した。このツールは、WebアプリケーションとMathematicaの計算ノートブックを利用したスタンドアロン形式の2通りを用意した。いずれのツールも、台湾の構造技術者との円滑なコミュニケーションに繋がり、手法の有効性を確認した。

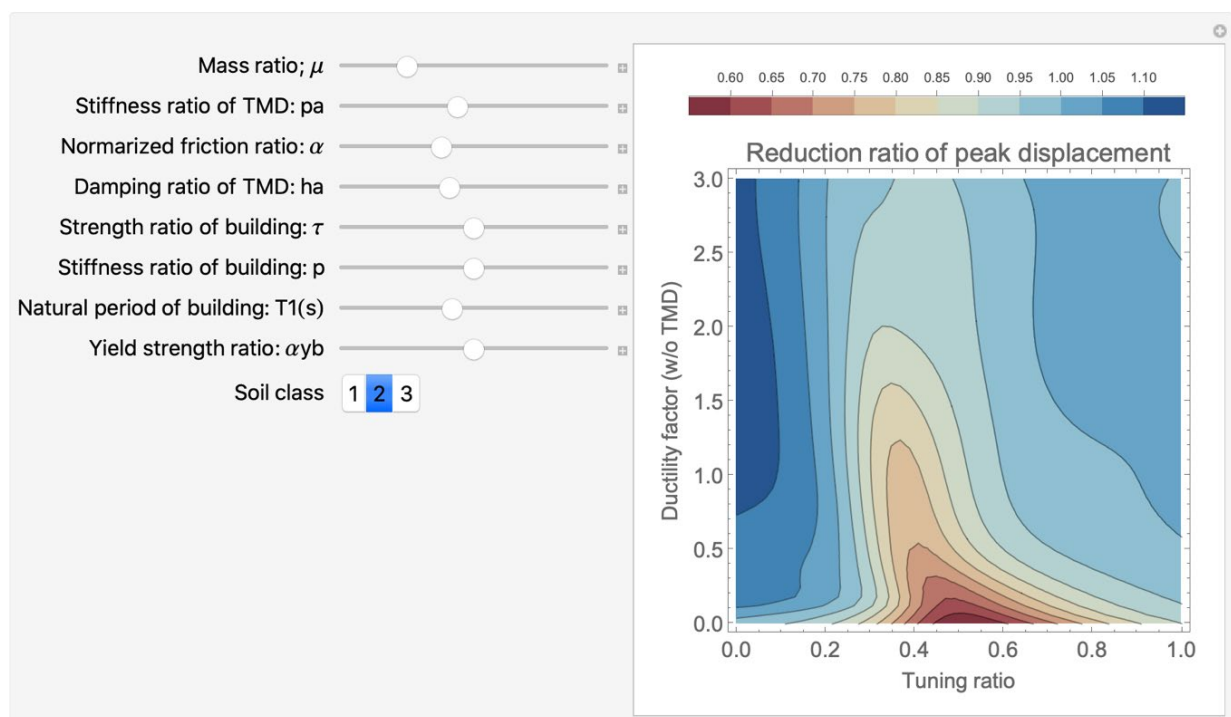


図8 深層学習を利用した対話的な制振設計ツール

### 3.5 学会等への発表

線形TMDの最適同調比に関する成果については、日本建築学会構造系論文集に採用された。

- 金子健作, 高橋和久: 非弾性鉄筋コンクリート造建物に設置する地震用TMDの最適同調比, 日本建築学会構造系論文集, Vol. 85, No. 777, 2020年11月

また、線形TMDの制振性能曲線に関する成果の一部を日本地震工学会論文集に投稿し、現在査読中である。

- 高橋和久, 張开煒, 陳宗斌, 陳俊仲, 李伯翰, 金子健作: 鉄筋コンクリート造建物の非線形地震応答解析によるTMDの制振性能曲線, 日本地震工学論文集, 日本建築学会構造系論文集, 2021年1月投稿(査読中)

#### 4. 今後の課題

現在、摩擦機構を有する非線形 TMD のデバイス開発に着手している段階である。今後、台湾の **National Center for Research on Earthquake Engineering** が有する大型の振動台を用いて、地震波入力に対する非線形 TMD の制振性能を実証する計画である。なお、深層学習を利用した対話的な制振設計ツールについては、研究グループでの範囲の使用に留めたが、国内外で幅広く利用できるように整備を進めていく予定である。以上の活動をさらに発展させ、海外向けのローコストな制振改修に貢献していきたい。