鉄筋コンクリート構造物に適用可能な周期適応型セミアクティブ同調質量ダンパの開発

DEVELOPMENT OF ADAPTIVE SEMI-ACTIVE CONTROLLED TUNED MASS DAMPER FOR REINFORCED CONCRETE STRUCTURES

中井 武 — * 1 栗野治彦 — * 2
皆川俊平 — * 3 金子貴司 — * 4

Takeshi NAKAI — * 1 Haruhiko KURINO — * 2
Shumpei MINAGAWA — * 3 Takashi KANEKO — * 4

キーワード：
制震, TMD, セミアクティブ制御, 鉄筋コンクリート, 振動台実験

Keywords:
Structural control, Tuned mass damper, Semi-active control, Reinforced concrete, Shaking table test

To use tuned mass damper (TMD) for structures with period fluctuation, the authors proposed a newly developed semi-actively controlled TMD. Its resonance frequency is controlled by changing the damping coefficient of the variable dampers. This paper reports on its shaking table tests. First, the configuration and control method of the proposed TMD are described. Second, the design concept and specification of the specimen are presented. Finally, the results of the shaking table tests are shown. They are compared with that of simulation analyses, and the accurate operation of the control system and expected behavior of the specimen are confirmed.

1. はじめに

近年、鉄骨造の超高層建物において同調質量ダンパ (TMD: Tuned Mass Damper) を大地震対応の制震装置として用いる事例が増加している^{1)~3)}。一方、鉄筋コンクリート (RC) 造建物では、地震時に躯体にひび割れが発生して固有周期が長くなるため、TMD の適用にあたっては、同調ずれに対する配慮が必要となる。

この課題に対し、筆者らは図 1 に示す周期変動に適応可能なセミアクティブ TMD (以下、提案 TMD) を提案した⁴⁾。提案 TMD は、加速度センサ、コントローラ、および減衰係数切替型オイルダンパからなる制御システムを備えており、地震により建物が振動している最中に、加速度センサの観測信号に基づいてコントローラで適切な設定を判断し、オイルダンパの減衰係数を逐次切り替える。図 2 に提案 TMD の周期調整の原理を示す。オイルダンパの減衰係数が大きい場合、上部の積層ゴムは拘束されるため、TMD は相対的に短周期となる。逆にオイルダンパの減衰係数が小さい場合、上下の積層ゴムは両方自由に変形できるため、TMD は相対的に長周期となる。このように、提案 TMD は復元力要素の剛性の操作無しに、TMD の共振周期を変化させることができ、特に大重量の錘を有する建物用の大地震対応 TMD に適した装置である。

提案 TMD の適用にあたっては、オイルダンパの減衰係数を建物の振動状態に応じてどのように切り替えるかという制御法が重要である。筆者らは TMD のエネルギー吸収効率に基づいた制御法を提案し、その制震効果やパラメータの設定法を提示した⁵⁾。本制御法は、TMD 設置位置の応答加速度のみに基づいて、簡単なアルゴリズムで効果的な制御を行うことができ、RC 造建物を模した多質点系モデルの地震応答解析によって、その妥当性は確認されている。

本報では、提案 TMD の振動台実験の結果を報告する。実験の目的は、制御システムの一連の処理および動作 (加速度センサの計測、コントローラの計算、減衰係数切替型オイルダンパの切替動作) において技術的な問題が生じないことを確認することである。試験体は縮小モデルであるが、制御システムは実機と同様の機器で構成されており、実現可能性を十分検証することができる。

本論文では、まず 2 章において、提案 TMD の設計法、および制御法の概要を述べる。次に 3 章で、振動台実験に用いる試験体および制御システムの概要を示し、実験の計測計画を示す。4 章では、振動台実験の結果を報告する。試験体の基本的な振動特性を定常正弦波入力により確認した後、地震応答波を入力して制御システムの動作および試験体の挙動を解析結果との比較によって検証する。

図 1 提案 TMD の構成

図 2 提案 TMD の周期調整の原理

¹⁾ 鹿島建設(株)建築設計本部 チーフエンジニア・修士 (工学)
(〒107-8502 東京都港区赤坂 6-5-30)

²⁾ 鹿島建設(株)建築設計本部 統括グループリーダー・博士 (工学)

³⁾ 鹿島建設(株)建築設計本部 グループ員・修士 (工学)

⁴⁾ 鹿島建設(株)技術研究所 上席研究員・修士 (工学)

¹⁾ Chief Engineer, Architectural Design Division, Kajima Corp., M.Eng.

²⁾ Senior Group Leader, Architectural Design Division, Kajima Corp., Dr.Eng.

³⁾ Engineer, Architectural Design Division, Kajima Corp., M.Eng.

⁴⁾ Chief Research Engineer, Kajima Technical Research Institute, Kajima Corp., M.Eng.

2. 提案 TMD の設計法と制御法の概要

2.1 試験体の設計法

図 3 に主系 (建物に該当) に提案 TMD が設置された系の力学モデルを示す。筆者らは、文献 4) において TMD 系の振動特性について検討し、ランダム振動論に基づいた提案 TMD の設計法を提示した。この設計法によると、提案 TMD が対応可能な周期範囲は、主系質量 M に対する TMD 系の質量 m の比 (質量比: $\mu = m/M$) と、TMD 系の各ばね要素の剛性 (k, k') の比 (剛性比: $\lambda = k'/k$) によって定まる。例えば、RC 造の超高層建物に適用される質量比 0.05、剛性比 0.5 の提案 TMD を想定すると、主系の固有周期が初期 (弾性) 固有周期 T_0 の 1.6 倍程度まで伸びた場合でも、可変減衰要素の減衰係数 c の調整によって提案 TMD は同調を保つことができる。また、この減衰係数は連続的に変化させる必要はなく、2~3 段階の切り替えで周期変動に対して十分対応可能であることも文献 4) において示している。本報で振動台実験に用いる試験体は上記の知見に基づき、質量比 $\mu = 0.05$ 、剛性比 $\lambda = 0.5$ 、減衰係数切り替え式を想定する。

図 3 提案 TMD の力学モデル

2.2 試験体の制御法

図 4 に振動台実験で用いる制御法の概要を示す。制御においては、予め TMD の減衰係数とる状態 (以下、TMD モード) に対応した仮想的な TMD (以下、仮想 TMD) の数値モデルを用意し、TMD 設置位置で観測された応答加速度を入力とする時刻歴応答解析を実行する。この解析によって評価指標 (本実験では、仮想 TMD への入力エネルギー) が最大となる仮想 TMD を見つけ、設置されている TMD の特性を対応する TMD モードに切り替える。本論文では、この制御手法を提案制御法と呼ぶ。

図 5 に提案制御法のアルゴリズムの概要を示す。時刻歴応答解析は、各仮想 TMD に対して一定時間で区切った単位 (解析窓) 毎に実行する。また、制御間隔を開けすぎないように、解析窓長 W_L 秒の時刻歴応答解析を W_D 秒でオーバーラップさせて並列に実行する。各解析窓における評価指標 E は次式によって算定する。

$$E = \int_{t_0}^{t_0+W_L} m \ddot{x} \Delta x dt \quad (1)$$

ここで、 t_0 は解析窓の開始時刻、 m は錘の質量、 $\ddot{x}$ は短時間時刻歴応答解析における錘の加速度、 Δx は同じく錘の変位増分である。

制御においては、共振的な大入力に対する即応性を犠牲にすることなく、地震動の一時的な卓越振動数の変動に起因する不要な切り替え動作を回避するために、新たに算定した評価指標 E が、過去 W_B 秒間における評価指標の最大値を超えた時のみ、TMD モードの切り替えを実行する。

なお、振動台実験で用いたアルゴリズムは上述の通りであるが、評

価指標の算定式は、実験後に詳細な検討を行って改良しており、その内容は文献 5) に詳述している。これは計算負荷にほとんど影響を与えない変更であるため、本実験の目的の一つであるコントローラの処理速度の検証において問題とはならない。

図 4 制御法のコンセプト

図 5 実験で用いた制御アルゴリズム

3. 試験体および計測計画

3.1 試験体の概要

写真 1 に試験体全景を、写真 2 に制御システムの構成要素を示す。本試験体は、初期固有周期 $T_0 = 2.5$ 秒の 30 階建て RC 造建物の頂部に設置される、有効質量比 $\mu = 0.05$ の TMD を想定しているが、振動台の加振能力、および積層ゴムの変形能力の制限から、実スケールに対して錘重量を約 1/10 に低減し、さらに周期を約 0.5 倍に縮めた縮小モデルである。振動台テーブル面が建物頂部に相当し、実験では地震応答解析によって得た建物頂部の応答を振動台で再現することによって、制御システムの動作と試験体の挙動を確認する。

図 6 に試験体図を、表 1 に試験体の諸元を示す。錘はプレキャストコンクリート製とし、鋼製の錘受けフレーム上に設置する。錘と錘受けフレームは一体として挙動するように PC 鋼棒で緊結されている。復元力要素は天然ゴム系積層ゴムとし、中間フレームを介して上部の積層ゴムは 2 段に積み重ね、下部の積層ゴムは 1 段とすることによって、下部の水平剛性に対する上部の水平剛性の比が 0.5 となるようにした。

振動台実験においては、X, Y 二方向の入力に対応するため、減衰係数切替型オイルダンパを試験体中央に十字形に配置した。コントローラは X, Y 各方向のオイルダンパに対応して独立に設けており、振動台テーブル上に設置した加速度センサから送信される計測信号に基づいて 2.2 節に示した制御を行う。

写真 1 試験体全景

(a) コントローラ・加速度センサ (b) 減衰係数切替型オイルダンパ

写真 2 制御システム

(a) 立面図 (単位: mm)

(b) A-断面図 (単位: mm)

図 6 試験体図

表 1 試験体の諸元

項目	諸元
錘	重量 : 407.9 (kN) (錘受けフレーム含む)
中間フレーム	重量 : 40.0 (kN)
天然ゴム系 積層ゴム	ゴム外径 : 225 (mm)、ゴム総厚 : 56 (mm) 水平剛性※ : 上部 (4 台×2 段) 490.6 (kN/m) 下部 (4 台×1 段) 981.2 (kN/m)

※積層ゴムの剛性はせん断ひずみ 100%時の単体試験結果

3.2 制御システムの概要

制御システムの構成要素の諸元を表 2 に示す。

表 2 制御システムの諸元

項目	諸元
加速度センサ	加速度検出方式 : 静電容量式 定格加速度 : $\pm 1.5G$ 検出方向 : X, Y, (Z)
コントローラ	A/D コンバータ : 12 (bit) 制御サイクル : 100 (Hz) 最大消費電力 : 約 100 (W)
減衰係数切替型 オイルダンパ	最大荷重 : 75 (kN), 内圧 12.7 (MPa) 減衰係数 : モード A~D の 4 段階※ 最大ストローク : ± 120 (mm) 中立長さ : 1650 (mm) 質量 : 170 (kg)

※各モードの減衰係数は 4.1 節参照

(1) 加速度センサ

本実験の制御システムでは、地震計などで多数の実績を有する静電容量式加速度計を使用した。加速度センサ 1 台で水平二方向 (X, Y) と鉛直方向 (Z) の計測が可能であるが、制御においては水平二方向の計測結果のみを用いる。計測結果は電圧信号でコントローラに送信される。

(2) コントローラ

コントローラは、既往のセミアクティブオイルダンパ⁶⁾で用いられている製品の内部プログラムを書き換えて使用した。本製品も多数の実績を有しており信頼性が実証されている。外部電源は AC100V で、これを内部で 2 系統に分岐させ、一方は CPU に分配し、もう一方はオイルダンパの電磁制御弁の駆動に用いる。

コントローラは加速度センサからの計測信号を受信する入力ポートと、オイルダンパの各制御弁に制御電流を流す出力ポートを備える。加速度センサからの計測信号は、内部のアナログフィルタを通過した後、A/D コンバータにより 12 ビットの分解能でデジタル信号に変換される。その信号は CPU で加速度に変換され、ローパスフィルタ処理が行われた後、2.2 節の制御アルゴリズムの入力加速度として用いられる。制御アルゴリズムに従って TMD モードが選択されたのち、制御弁の開閉が制御電流の ON/OFF によって制御される。CPU (常時稼動) の消費電力は 10W 強、制御弁 (制御電流 ON 時) の消費電力は 1 つあたり約 30W である。制御弁 3 つを用いる場合でも消費電力は最大 100W 程度と小さく、無停電電源装置 (UPS) を用いることにより、停電に対する備えも容易に行うことができる。

(3) 減衰係数切替型オイルダンパ

減衰係数切替型オイルダンパは、両ロッド型シリンダに独立に動作する複数の電磁制御弁を内蔵する外付けバルブブロックを取り付けた構成とした。解放する弁を組み合わせることで、4 段階の減衰係数 (4.1 節で後述) をとることができるよう設計されている。本論文ではそれぞれに対応した TMD の状態をモード A~D と呼ぶ。事前にオイルダンパ単体の特性確認試験を実施し、制御弁の切り替えが瞬時に行われ、TMD の挙動に影響が生じるような制御遅れがないことを確認している。

本オイルダンパに用いる制御弁は、既往のセミアクティブオイルダンパ⁶⁾の実機で用いられるものと同じものであり、十分な耐久性が実証されている。また、制御弁の開閉状態は制御電流の ON/OFF 状態に任意に対応させることができ、供給される電力が遮断されるような非常時においても、フェイルセーフモードとして予め定めた減衰係数に自動的に切り替わるように設定することができる。

オイルダンパの端部は、平面二方向の大きな変位に加え上下の変位にも対応可能なボールジョイントとした。また、加振中にダンパが軸回りに回転することを防止するため、シリンダ部に回転止めを設けてダンパ受けのブラケットで支持している。本オイルダンパは縮小型の試作機であるが、作動油やボールジョイント等の基本的な構成要素は想定する実機と同じ材料、機構を採用している。

3.3 計測計画

錘受けフレームの隅角部（南西、北東）にはサーボ型加速度計を設置しており、それらの計測結果を平均することによって錘の応答加速度を求める。また、中間フレームおよび錘受けフレームの各辺には、振動台テーブル面からの相対変位を計測するレーザー変位計を設置しており、対面する 2 つの変位計の計測結果を平均して図心位置の変位を求める。さらに制御システムの加速度センサの計測結果、およびコントローラからオイルダンパに送られる制御電流を計測し、制御システムの動作を把握する。減衰係数切替型オイルダンパの荷重は、圧力計によって計測したピストン両側のシリンダ圧力の差に、ピストン受圧面積を乗じて算出する。

4. 振動台実験

4.1 試験体の基本特性確認試験

(1) 実験概要

試験体の基本的な振動特性を把握するために、定常正弦波入力試験を行った。入力加速度振幅を一定 (27 cm/s^2) とし、各振動数に対する定常振動状態の錘の応答加速度振幅を計測した。この試験ではコントローラによる自動制御は行わず、オイルダンパの減衰係数は手動のスイッチで設定した。結果の処理においては、計測ノイズや振幅レベルの誤差の影響を排除するため、入力波と応答波の双方に適切なバンドパスフィルタをかけた後、錘位置の振動台テーブル面に対する加速度応答倍率を算出した。

(2) 実験結果

実験結果を図 7 に示す。X 方向の共振振動数（ピーク位置）に着目すると、モード A の時は 0.7 Hz （周期 1.4 秒 ）付近であるのに対し、モード D の時は 0.45 Hz （周期 2.2 秒 ）付近と共振周期が 1.6 倍程度長くなっている。ピーク高さは最大で 3.3、最小で 2.2 程度であるがこれは減衰定数に換算すると 15%～23%程度に相当する。図中にはモード A～D の結果を全て示しているが、いずれも 0.57 Hz 付近の定点を通る特徴的な性状を示している。この試験結果より、減衰係数の切り替えのみで TMD の共振振動数を変化させることができるといふ、提案 TMD の振動特性を確認することができた。

(3) シミュレーションモデルの作成

試験体の振動特性をシミュレーション解析モデルにより模擬することを試みる。図 8 に示す解析モデルによって X 方向と Y 方向を独立にモデル化した。積層ゴムは線形ばねに置換し、剛性は定常振動状態（せん断ひずみ約 60%）における下部積層ゴムの荷重－変形関係

から同定した。天然ゴム系積層ゴムであるが履歴ループが確認されたため、その面積から履歴減衰を同定し、等価な内部粘性減衰 ($h=3\%$) に置き換えて考慮した。オイルダンパはダッシュポットのみでモデル化しても問題ない十分な剛性を有しているが、ここでは正確に Maxwell モデルで扱うこととした。摩擦要素として動摩擦力を降伏点とする剛塑性ばねを配置するが、影響が小さいため本節の定常正弦波試験では無視し、次節の地震応答試験でのみ考慮している。

図 7 には、上記のモデルに定常正弦波を入力して求めた解析結果を、解析で用いた減衰係数と共に破線で示している。解析モデルは試験体の振動特性を概ね捉えられていることが確認できる。また、モード A の実験結果において、X 方向と Y 方向のピーク高さに若干の違いがみられるが、減衰係数を変えると実験結果と解析結果は良好に対応することから、差異の原因はオイルダンパの減衰係数の製造ばらつきであると考えられる。

(a) X 方向

(b) Y 方向

図 7 定常正弦波入力試験結果

(※ 4.2 節の地震応答試験のシミュレーションでのみ考慮)

図 8 試験体のシミュレーションモデル

4.2 地震応答波試験

(1) 実験概要

地震応答波試験では、予備応答解析によって得た建物頂部の応答加速度を振動台への入力波として用いる。想定した建物モデルおよび入力波の作成法を図9に示す。想定する建物はX方向とY方向が同じ構造特性の、初期（弾性）固有周期 $T_0 = 2.5$ 秒、最下層の降伏層せん断力係数 $C_B = 0.13$ のRC造建物である。入力は平成12年建設省告示第1461号の手法で作成した模擬地震動とし、X方向はHachinohe 1968 EW位相、Y方向は同NS位相とした。

入力波の作成にあたっては、周期が実大の約0.5倍である試験体との対応を考慮し、建物部分の初期固有周期を1.25秒とし、入力地震動の時間スケールを0.5倍に縮めて用いた。建物は弾塑性多質点せん断棒モデルとし、各層の復元力特性は武田モデルとした。減衰は瞬間剛性比例型の内部粘性減衰とし、建物部分の1次固有周期に対して減衰定数3%を与えた。建物頂部には、4.1節の結果に基づいた表3に示す三段階の切り替え型の提案TMDを設置し、2.2節で示した制御法によって解析を行った。本実験では制御パラメータを解析窓長 $W_L = 5$ 秒、窓間隔 $W_D = 1$ 秒、記憶時間 $W_B = 10$ 秒と設定した。なお、実験後に制御パラメータが制震効果に与える影響について詳細検討しており、建物周期に対する推奨値を文献5)に示している。

図10に建物の等価固有周期の時刻歴を示す。この結果は、各層が経験した正負の最大変形から層の等価剛性を算出し、解析時間ステップごとに固有値解析を実行して得た結果である。両方向とも初期固有周期1.25秒に対し、解析開始後30秒の時点では1.8秒程度まで等価固有周期が伸びていることが分かる。

実験では、上記の手法で得た建物頂部位置の応答加速度を振動台にX・Y同時入力し、制御システムの動作と試験体の挙動を確認する。作成された地震応答波は実物よりも時間スケールを縮めているため、制御システムの動作面において実物よりも厳しい条件である。なお、実験にあたっては錘の変位が過大にならないよう、解析結果の建物頂部の加速度振幅を0.25倍に調整して振動台に入力した。

図9 想定した建物モデルと入力波の作成手法

表3 予備応答解析で設定した提案TMDの設定

	モードA	モードB	モードD
錘重量 m (kN)	407.9		
中間フレーム重量 m' (kN)	40.0		
上部積層ゴム k' (kN/m)	490.6		
下部積層ゴム k (kN/m)	981.2		
減衰係数 c (kNs/cm)	5.87	2.35	0.94

図10 建物部の等価固有周期の時刻歴

(2) 制御システムの動作の確認

制御システムの動作が想定通りであることを、実験結果とシミュレーション解析結果を比較することにより確認する。実験における制御システムの設定（仮想TMDの特性、解析窓長等のパラメータ）は前述の予備応答解析と同じとし、減衰係数切り替え型オイルダンパは表3に示す、モードA, B, Dの3段階の切り替え式とした。

図11に制御システムの加速度センサで計測された、振動台テーブルの加速度時刻歴を示す。また、図12にオイルダンパの減衰係数の切り替え状況を示す。図中の実線は実験結果、破線は図11の波形に2.2節で示した制御を適用した場合のシミュレーション解析結果である。解析初期の入力が微小な範囲、およびX方向の20～30秒の範囲を除き、実験と解析の切り替え状況は良好に対応している。相違の要因としては、コントローラが信号を取り込む際の量子化誤差や、窓の開始/終了時刻が実験と解析で完全に一致していない点が挙げられる。若干の相違があるものの、塑性化が進行する前は短周期側の設定で、その後長周期側の設定に切り替わるという、制御システムの所期の動作を確認することができる。なお、90秒前後で一時的に短周期の設定が選択されているが、これは(1)式の指標において地震動の卓越振動数が優越と判定されたことを示している。また、全時間帯においてコントローラの処理が追い付かないという状況は生じておらず、処理速度は問題ないことが確認された。

図11 入力波の加速度時刻歴（振動台上の計測値）

図12 オイルダンパの減衰係数切り替えの状況

(3) 試験体の挙動の確認

試験体の挙動を、実験結果とシミュレーション解析結果を比較することにより確認する。図 13 に錘の変位の時刻歴を示す。実線は実験結果、破線は図 8 のシミュレーションモデルに、図 11 の加速度波形を入力して得た解析結果である。解析では 2.2 節で示した制御により、オイルダンパの減衰係数を切り替えており、そのタイミングは図 12 の解析結果の通りである。X・Y の各方向ともに実験結果と解析結果は良好に対応しており、二方向同時入力の地震応答波に対して、試験体が想定通りの挙動を示していることが確認できる。

図 14 にオイルダンパの荷重の時刻歴を示す。オイルダンパの制御状況が実験と解析で異なる X 方向の 20～30 秒の範囲を除き、実験結果とシミュレーション解析結果は良好に対応している。減衰係数の切り替えの際に想定外の荷重などは生じておらず、システムが想定通り安定して動作していることが確認できる。

図 13 錘の変位時刻歴

図 14 オイルダンパの荷重時刻歴

5. まとめ

周期変動に適應可能なセミアクティブ同調質量ダンパ（提案 TMD）の試験体を製作し、振動台実験により下記の事項を確認した。

1) 制御システムの構築

実機と同様の構成で提案 TMD の制御システムを試作した。その主要部には十分な実績のある機器を用いることで、信頼性の高い制御システムを構築した。本システムの制御に伴う電力負荷は 100W 程度と非常に小さく、無停電電源装置（UPS）の使用により停電に対する備えも容易である。また、断電時に自動的に移行するフェイルセーフ機構により、非常時に対する冗長性をさらに高められる。

2) 提案 TMD の縮小試験体の特性確認

提案 TMD の 1/10 スケールの縮小試験体を製作し、定常正弦波入

力による基本特性確認試験を実施した。その結果、オイルダンパの減衰係数の切り替えのみで TMD の同調周期を変えることができるといふ、提案 TMD 特有の振動性状を確認した。また、試験結果をシミュレーション解析によって精度よく表現できることを確認した。

3) 制御システムの動作の検証

平面二方向の地震応答波を入力し、制御システムによる自動制御の状況、および試験体の挙動を確認した。制御システムは想定通り動作しており、試験体の挙動に関してもシミュレーション解析結果と良好に対応する。試験体は実機と比較して周期が約半分であり、制御システムには通常より短い時間での制御が要求されるが、加速度センサにおける計測ノイズやコントローラの処理速度に起因する問題、またオイルダンパの減衰係数の切り替えの遅れ等は生じておらず、構築した制御システムの妥当性を検証することができた。

以上、振動台実験による提案 TMD の実現可能性の検証結果を示した。本実験で用いた試験体は錘の変位を抑えた縮小試験体であるものの、制御システムに関しては実機と同等の構成であり、提案 TMD の実用化に向けた目途をつけることができた。

謝辞

減衰係数切替型オイルダンパ、およびコントローラの開発においては、センクス株式会社の銭志偉博士に多大なご協力をいただきました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) Sone, T., et al.: Experimental verification of a tuned mass damper system with two-phase support mechanism, Japan Architectural Review (Transactions of AIJ), Vol.2, No.3, pp250-258, 2019.7
- 2) Ishikawa, Y., et al.: Development and analysis of long stroke tuned mass damper for earthquakes, Japan Architectural Review (Transactions of AIJ), Vol.2, No.3, pp259-268, 2019.7
- 3) Nakai, T., et al.: Control effect of large tuned mass damper used for seismic retrofitting of existing high-rise building, Japan Architectural Review (Transactions of AIJ), Vol.2, No.3, pp.269-286, 2019.7
- 4) Nakai, T. and Kurino, H.: Proposition of semi-active controlled tuned mass damper adaptable to a structure's period fluctuation, Journal of Structural and Construction Engineering (Transaction of AIJ), Vol.83, No.744, pp.233-243, 2018.2 (in Japanese)
中井武, 栗野治彦: 周期変動に適應可能なセミアクティブ同調質量ダンパの機構及び設計法の提案, 日本建築学会構造系論文集 第 83 巻 第 744 号, pp.233-243, 2018.2
- 5) Nakai, T. and Kurino, H.: Control method based on energy absorption rate of semi-active controlled tuned mass damper adaptable to a structure's period fluctuation, Journal of Structural and Construction Engineering (Transaction of AIJ), Vol.86, No.782, 2021.4 (in Japanese)
中井武, 栗野治彦: 周期変動に適應可能なセミアクティブ同調質量ダンパのエネルギー吸収効率を評価指標とした制御法, 日本建築学会構造系論文集 第 86 巻 第 782 号, 2021.4
- 6) Fukuda, R. and Kurino, H.: Development of semi-active structural control system using oil damper with energy recovery system, Journal of Structural and Construction Engineering (Transaction of AIJ), Vol.81, No.726, pp.1221-1231, 2016.8 (in Japanese)
福田隆介, 栗野治彦: エネルギー回生を導入したセミアクティブ制震オイルダンパの開発, 日本建築学会構造系論文集 第 81 巻 第 726 号, pp.1221-1231, 2016.8

[2021 年 2 月 3 日原稿受理 2021 年 5 月 6 日採用決定]