

7) 国際地震工学センター

7) - 2 建物の周期変動に対応するセミアクティブ TMD の制御手法の構築と減衰性能評価【安全・安心】

Control Method of Semi-active Tuned Mass Damper Adaptable to Change in Natural Period of Buildings and Evaluation of Its Damping Performance (研究開発期間 令和4~6年度)

国際地震工学センター

International Institute of Seismology and Earthquake Engineering

伊藤 麻衣

ITO Mai

Tuned mass dampers have been used as a countermeasure against long-period ground motions for high-rise steel buildings. However, as the natural period of RC buildings increases due to cracking when they are subjected to earthquakes, the application of TMDs to RC buildings is limited. This study has developed a semi-active control method for TMD adaptable to changes in the natural period of buildings. In addition, the damping performance of this system was evaluated through real-time hybrid simulations using a shaking table.

【研究開発の目的】

同調質量ダンパー（以下、TMD）は、地震動に対する応答制御装置の一つとして、近年、鉄骨造の超高層建物を対象とした長周期地震動対策に適用されている。一方、鉄筋コンクリート造建物や鉄骨鉄筋コンクリート造建物では、地震を受けた際にコンクリートのひび割れや鉄筋の降伏が生じて建物の固有周期が長くなるため、TMDの同調ずれが発生し制振効果が低下する可能性がある。

このような背景のもと、本研究では、RC造SRC造建物へのTMDの効果的な適用を目指して、建物の固有周期の変動に対応可能なTMDのセミアクティブ制御手法の構築を行う。また、振動台を用いたリアルタイムハイブリッド実験により、本システムの減衰性能を評価する。

【研究開発の内容】

- ① 建物の周期変動に対応するセミアクティブ TMD の制御アルゴリズムの検討
- ② リアルタイムハイブリッド実験によるセミアクティブ TMD の性能検証

【研究開発の結果】

- ① 建物の周期変動に対応するセミアクティブ TMD の制御アルゴリズムの検討

TMDの減衰装置として磁気粘性流体を封入したダンパー（MRダンパー）を使用し、建物の幅広い周期変動に対応できるセミアクティブ TMD の制御アルゴリズムを検討する。MRダンパーは、電磁石に印加する電流を変化させることでダンパーの出力を任意にコントロールできるという特性がある。その特性を利用し、MRダンパーにより TMD に負剛性を与えることで、剛性低下後

の建物に同調させる方策を検討する。

建物の応答変位が最初に層間変形角 200 分の 1 を超えたときに損傷が発生し、建物の剛性が 25%低下すると仮定する。まず、式(1)を用いて、剛性低下後の建物周期 T_s から、TMD の同調周期 T_{TMD} を求める。その後、式(2)により、TMD の周期を T_{TMD} とするために必要な負剛性 k_{mr} を求める。得られた負剛性 k_{mr} を MR ダンパーで与えることで、剛性低下後の建物に同調させる。

$$T_{TMD} = \frac{T_s}{\nu} \quad (1)$$

$$T_{TMD} = 2\pi \sqrt{\frac{M_{TMD}}{K_{TMD} - k_{mr}}} \quad (2)$$

ここで、 ν は最適同調比（ $= 1/(1 + \mu)$ ）、 μ は質量比、 M_{TMD} は TMD 質量、 K_{TMD} は TMD 剛性である。本研究では、質量比 μ は 0.1 とする。建物と TMD の諸元を表 1 に示す。なお、損傷発生後の建物の剛性は 15 kN/m となる。

表 1 建物と TMD の諸元

	質量 (kg)	剛性 (kN/m)	固有周期 (s)
TMD	2547	20	2.24
建物	25470	242	2.03

- ② リアルタイムハイブリッド実験によるセミアクティブ TMD の性能検証

振動台を用いたリアルタイムハイブリッド実験を実施し、セミアクティブ TMD の性能を検証した。リアルタイムハイブリッド実験では、TMD を試験体として振動台上で加振し（実験部分）、主架構をパソコン内で解析し（解析部分）、その 2 つを組み合わせることで、全体

の応答を得る実験手法である。図1にリアルタイムハイブリッド実験システムの概要図を示す。パソコン内の質点系モデルに地震動を入力し時刻歴応答解析を行い、建物屋上に生じた変位を振動台に入力する。加振中に得られたダンパー荷重とばね荷重をパソコン内の質点系モデルに入力し、次ステップの時刻歴応答解析を行う。この操作を繰り返すことで、全体の応答を得ることができる。

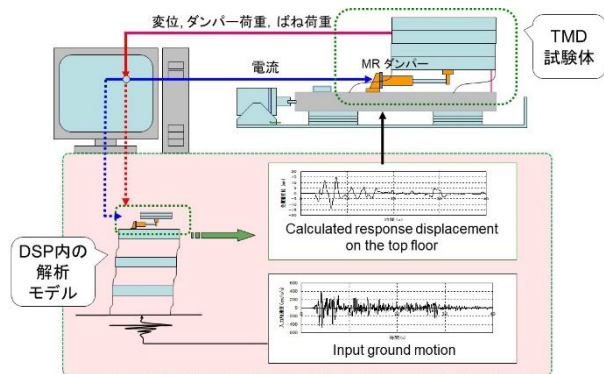


図1 リアルタイムハイブリッド実験システムの概要図

リアルタイムハイブリッド実験に先立ち、MRダンパー単体の正弦波加振実験を実施し、MRダンパーのモデル化を行った。得られたダンパー荷重 F_{mr} の近似式を式(3)に示す。

$$F_{mr} = (667I^2 + 667I + 164)sgn(\dot{x}) + 116\dot{x} \quad (3)$$

ここで、 I は印加電流値 (A)、 $\dot{x}$ は応答速度 (m/s)である。セミアクティブ TMD のダンパー荷重は次式から得られる。

$$F_{mr} = c\dot{x} + k_{mr}x \quad (4)$$

リアルタイムハイブリッド実験では、式(1)と(2)から、周期変動後の建物に同調させるために必要な負剛性 k_{mr} を求め、式(3)と(4)を用いて MRダンパーに印加する電流値 I を計算する。

まず、構造全体を解析モデルとした時刻歴応答解析とリアルタイムハイブリッド実験を実施し、建物の応答変位と TMD の変位を比較した。入力地震動を Hachinohe 1968 NS とした場合の結果を図2に示す。実験と解析は概ね一致しており、実験システムの妥当性が確認できた。

次に、周期変動が生じる建物を対象に、周期変動前の建物に同調させた TMD (通常の TMD) とセミアクティブ TMD を設置したモデルのリアルタイムハイブリッド実験を実施した。通常の TMD とセミアクティブ TMD における建物の応答変位の比較を図3に示す。建物の最大応答値の比較を表2に示す。入力地震動は Hachinohe 1968 NS、BCJ-L2、JR Takatori 1995 NS の3波とした。

表2より、BCJ-L2の加速度でほぼ同等の結果となったものの、その他の地震動における加速度および全ての地震動における変位で、セミアクティブ TMDの方が通常の TMDよりも応答が低減した。本研究より、MRダンパーで負剛性を与えたセミアクティブ TMDを適用し損傷発生後の建物と同調させることで、変位と加速度両方の低減効果が期待できることがわかった。

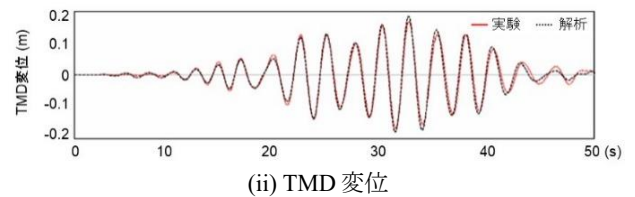
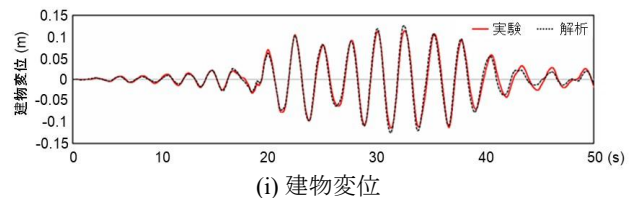


図2 リアルタイムハイブリッド実験と解析の比較

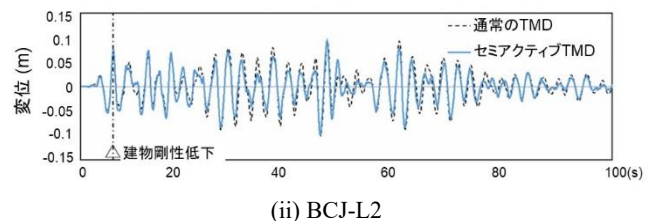
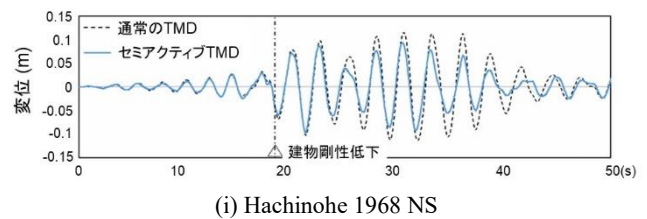


図3 建物変位の比較

表2 建物の最大応答値の比較

入力地震動		通常の TMD	セミアクティブ TMD	低減率 (%)
Hachinohe	変位 (m)	0.115	0.101	12.2
	加速度 (m/s ²)	0.673	0.641	4.75
BCJ-L2	変位 (m)	0.101	0.0935	7.43
	加速度 (m/s ²)	0.663	0.665	-0.30
JR Takatori	変位 (m)	0.0762	0.0717	5.91
	加速度 (m/s ²)	0.554	0.518	6.50