

## リアルタイムハイブリッド実験による 磁気粘性流体を用いた回転慣性質量ダンパーの応答制御

富澤 徹弥<sup>1\*</sup>・伊藤 麻衣<sup>2</sup>・青山 優也<sup>1</sup>

<sup>1</sup>工学研究科建築学専攻

<sup>2</sup>自然科学系先端融合研究環

(受付:January 16, 2014 受理:February 28, 2014 公開:March 6, 2014)

キーワード: 免震、磁気粘性流体、慣性質量、セミアクティブ制御

本論では、MR 回転慣性ダンパーを用いたリアルタイムハイブリッド実験を通じて、制御対象とする構造体の固有周期、構造体質量に対する慣性質量の比、断層近傍地震動を含む標準的な入力地震動による応答性状を比較して論じている。また、慣性質量に関する既往の研究の解析研究成果を実験により補足し、確認を行った。さらに、リアルタイムハイブリッド実験により得られた、地震動の入力速度と構造体の応答変位との関係から、地震動の入力速度に着目したセミアクティブ制御則を提案している。電流無印加時のパッシブ制御時、1Aの一定電流印加時のパッシブ制御時、セミアクティブ制御時それぞれにおける最大応答値を比較し、セミアクティブ制御時は電流無印加時のパッシブ制御時と比較して、概ね10~40%程度最大応答変位が低減されることを示している。セミアクティブ制御の効果が最も大きいのはJMAKobeの場合であり、パッシブ制御に比べて、床応答加速度の上昇を抑制しながら応答変位を低減する効果が期待できるとしている。

### 1. はじめに

1995年の兵庫県南部地震以降、それまでの耐震構造に対し、制震構造や免震構造など、地震による建築物の挙動をコントロールしようとする性能設計の考えが急速に普及してきている。特に、高度情報化社会の昨今においては、大地震時における建築物の倒壊防止による人命保護のみならず、そこに付与された多様な機能を維持することが社会的要求として高まりつつある。このような社会的要求に対する研究開発分野のひとつとして、建築物のアクティブ・セミアクティブ振動制御がある。アクティブ・セミアクティブ振動制御は、これまで機械工学や航空宇宙工学などの分野で研究開発がなされ、多くの実績が上がっている。建築分野においては、1989年にアクティブマスダンパーが実際の建築物に初めて適用された後、1995年までの6年半程度の間、20棟の建築物にアクティブマスダンパーが設置され<sup>1)</sup>、その後も建築・土木構造物についてのアクティブ制御に関する研究発表や適用が数多くなされている。装置駆動に必要な外部からの供給エネルギー量が極めて少ないセミアクティブ制御についても、兵庫県南部地震を契機に研究開発が加速してきている。なかでも、免震構造にセミアクティブ制御の考え方を導入したセミアクティブ免震は、大地震時に免震効果を保ちながら免震層の層間変位を小さくするだけでなく、中小地震時にも振動低減を図ることを意図しており、その成果が報告されている<sup>2),3)</sup>。

これらのセミアクティブ制御を実現する代表的な振動制御

装置として、可変オリフィスによるオイルダンパー、磁気粘性流体(以下、「MR流体」という)や電気粘性流体などの機能性流体を用いたダンパー、可変摩擦ダンパーなどがある。著者らは、MR流体を用いたダンパー(以下、「MRダンパー」という)とその制御法に関する研究を進める中で、セミアクティブ制御でみかけの負剛性を与えることによる絶対加速度の低減効果の報告事例に着目し、慣性質量により見かけ上の負のばね特性を示す慣性質量ダンパーに、MR流体を組み合わせた新しいセミアクティブ振動制御装置(以下、「MR回転慣性ダンパー」という)を提案している<sup>4)</sup>。

慣性質量に関しては、近年我が国では精力的に研究が進められている。慣性質量は、振動方程式上の質量項に相当し、理論的な式展開が可能であることから、伝達関数による周波数応答の整理や数値解析による検証などを通じて、モード制御の概念を利用する「モード制御型」や動吸振器の概念を利用する「同調型」など、様々なアイデアが示され、実際の建築物にも適用されている。しかしながら、制御対象とする構造物の固有周期やその質量に対する慣性質量の比、非定常性の強い地震動が時刻歴応答に及ぼす影響などを実験的に整理し、比較した報告は少ない。

本論は、既往の研究の理論的成果を、数値解析と実験を通して比較検証するものである。具体的な実験方法としては、著者らが開発したMR回転慣性ダンパーを用いたリアルタイムハイブリッド実験<sup>5)</sup>を通じて検証を行うこととする。制御対象とする構造体の固有周期 $T$ 、構造体質量に対する慣性質量の比(質量比 $\mu$ )、断層近傍地震動を含む標準的な入力地震動による応答性状

を比較し、慣性質量に関する理論的成果を実験により補足し、確認を行う。また、セミアクティブ制御による効果についても比較を行い、セミアクティブ振動制御装置としてのMR回転慣性ダンパーの各種構造物への適用可能性や地震動に対する制御効果を検証する。

## 2. リアルタイムハイブリッド実験

本論のリアルタイムハイブリッド実験では、パラメトリックスタディを実施するモデル化可能な構造物の部分は応答計算により解析し、不確定要素が比較的多く含まれているセミアクティブ振動制御装置について実時間での加振を行う。応答解析と実際の試験体（本実験では、セミアクティブ振動制御装置を指す。）との複合実験であり、実際のセミアクティブ振動制御装置の力学特性や時間遅れを考慮することができる。本実験においては、セミアクティブ振動制御装置として、著者らが開発したMR回転慣性ダンパー<sup>4)</sup>を用いた。

### 2.1 実験概要

MR回転慣性ダンパーを用いたリアルタイムハイブリッド実験の概要をFigure 1に示す。まず、コンピュータ内で構造物モデルに地震動を入力した際の解析モデル全体の応答値を数値積分により求め、得られた構造物モデルの応答変位を加振装置のスライドテーブルに実現させる。同時に、制御演算により所定の制御則に基づき、実際のMR回転慣性ダンパーに印加すべき電流値を求め、直流電源装置からMR回転慣性ダンパーに電流を印加する。その際のMR回転慣性ダンパーの出力荷重をロードセルにより計測し、コンピュータ内にその値を取り込み、MR回転慣性ダンパーの実際の出力荷重を用いて応答解析をコンピュータ内で実施する。続いて、次のステップにおける構造物モデルの応答変位、MR回転慣性ダンパーの印加電流値を求め、前者を試験機のスライドテーブルに出力し、後者を直流電源装置に出力してMR回転慣性ダンパーに電流を印加する。これらの操作を繰り返すことで、MR回転慣性ダンパーが設置された、ある構造物モデルに地震動が作用した際の時刻歴応答が得られることになる。

### 2.2 セミアクティブ振動制御装置概要

本実験に用いたMR回転慣性ダンパーの構造概略図をFigure 2に、ダンパー設計時における主な仕様特性をTable 1に示す。MR回転慣性ダンパーの出力発生部は、主にボールねじとボールナット、フライホイール（付加質量）およびMR流体と磁場発生機構（電磁石）で構成されている。ボールねじとボールナットにより直線運動が回転運動に変換され、ボールねじの先に取り付けられたフライホイールが回転することにより回転慣性力が発生し、回転慣性力により増幅された質量効果が、ボールねじを介して直線運動として伝達され、軸方向加速度に比例した慣性力が出力される。また、フライホイールが回転することで、フライホイールとケース間の相対変位からせん断速度が生じる。これにより、慣性力と同時にフライホイールの周囲に充填されたMR流体のせん断流れに対する抵抗による減衰力を得ることができる。MR

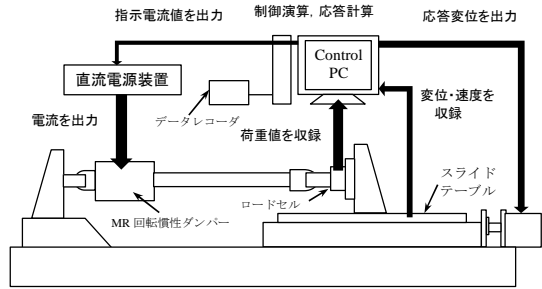


Fig. 1 Real-time-hybrid experiment

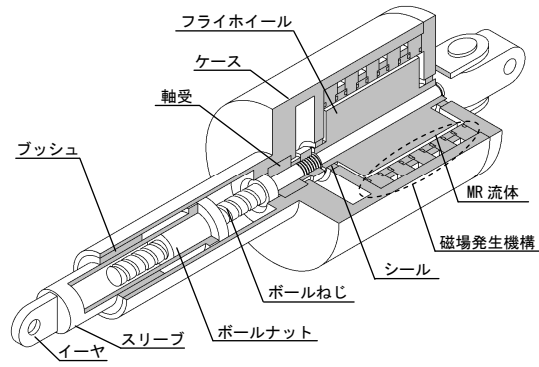
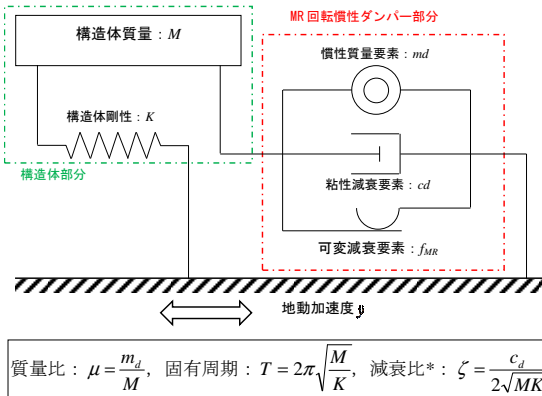


Fig. 2 Structural sketch of “MR rotary inertia damper”

Table 1. Properties of “MR rotary inertia damper” in design

項目	単位	数値
許容最大出力荷重	kN	2.45
許容最大加速度	cm/s <sup>2</sup>	980
許容最大速度	cm/s	100
許容ストローク	mm	600(±300)
慣性質量	ton	0.25
MR流体による可変減衰力	kN	1.34(1.0A)
	kN	0.61(0.5A)



\*式(1)よりMR回転慣性ダンパーの減衰力は相対速度のべき乗に比例するモデルに設定しているため、減衰比ζは参考値と算出している。

Fig. 3 Analysis model

流体を封入しているケースには磁場発生機構が取り付けられており、MR流体に作用する磁場の強さを変えることによってMR流体の抵抗力を任意に設定し、減衰力を調整できる仕組みとなっている。

リアルタイムハイブリッド実験に先立ち、正弦波加振

**Table 2.** Lists of analysis model

対象モデル	実験パラメータ		構造体諸元		減衰比* ζ	地震動入力倍率		
	質量比μ	固有周期T (s)	質量M (kg)	剛性K (N/m)		EICentro1940NS	Hachinohe1968NS	JMAKobe1995NS
μ10T3	0.10	3.0	2411.7	10578.9	0.09	45cm/s基準化	45cm/s基準化	原波の0.8倍
μ10T5	0.10	5.0	2411.7	3808.4	0.14	45cm/s基準化	45cm/s基準化	原波の0.8倍
μ30T3	0.30	3.0	803.9	3526.3	0.26	45cm/s基準化	45cm/s基準化	原波の0.8倍
μ30T5	0.30	5.0	803.9	1269.5	0.43	45cm/s基準化	45cm/s基準化	原波の0.8倍

\*式(1)よりMR回転慣性ダンパーの減衰力は相対速度のべき乗に比例するモデルに設定しているため、減衰比は参考値として示している。

による単体性能試験を行い、本実験の試験体である MR 回転慣性ダンパーについて、Eq.(1)によりモデル化した。なお、モデル化にあたり、慣性質量  $md$  は 241kg で固定とし、相対速度の係数 (以下、「 $cd$ 」とおく) は相加重平均、電流値の項は最小二乗法により近似している。Eq.(1)より、1A 電流印加時の可変減衰力  $f_{MR}$  は 1.07kN 程度となる。

$$F = 0.241\ddot{x} + 0.877\dot{x}^{0.442} + \text{sign}(\dot{x}) \cdot (0.458I^2 + 0.487I + 0.129) \quad (1)$$

$F$  : MR 回転慣性ダンパーの出力荷重 (kN)

$\ddot{x}$  : 相対加速度 (m/s<sup>2</sup>),  $\dot{x}$  : 相対速度 (m/s)

$I$  : 印加電流値 (A)

### 2. 3 対象モデル

本実験で対象とするモデルを Figure 3 に示す。対象モデルは免震構造物を想定し、1 質点系非減衰振動モデルに MR 回転慣性ダンパーを付加する。実験パラメータは構造体質量  $M$  に対する慣性質量  $md$  (=241 kg) の比  $\mu$  を 0.10, 0.30 の 2 通り、構造体の固有周期  $T$  を 3 秒, 5 秒の 2 通りとする。対象モデルの一覧を Table 2 に示す。それぞれの対象モデルについて、パッシブ制御時およびセミアクティブ制御時の実験を行っている。対象モデルの呼称は以下のように設定する。

例：μ30 T3 (質量比 0.30, 固有周期 3 秒の場合)  
     ├── T3 : 固有周期 3 秒, T5 : 固有周期 5 秒  
     └── μ10 : 質量比 0.10, μ30 : 質量比 0.30

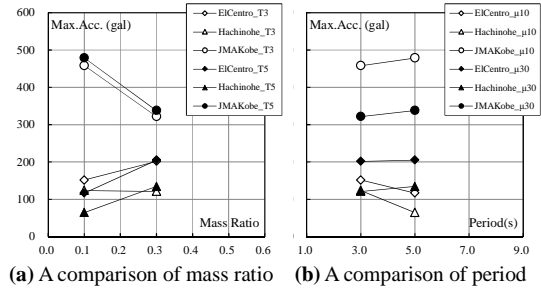
### 2. 4 入力地震動

入力地震動には代表的な観測記録として、Ei Centro 1940 NS, Hachinohe 1968 NS, JMA Kobe 1995 NS (以下、それぞれ「EiCentro」, 「Hachinohe」, 「JMAKobe」と略す) を用いる。入力地震動の倍率は試験機および MR 回転慣性ダンパーの許容値限界から、EiCentro および Hachinohe については最大速度振幅を 45cm/s に基準化した波形, JMAKobe については原波を 0.8 倍した波形としている。

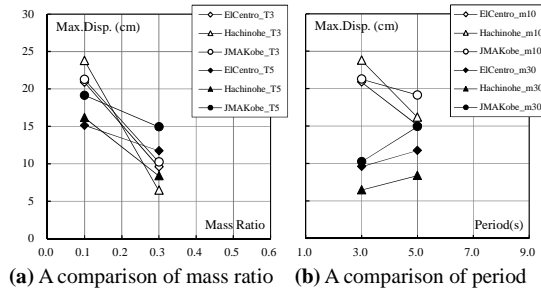
## 3. リアルタイムハイブリッド実験による 応答結果

### 3. 1 パッシブ制御時の応答結果

Figure 4, Figure 5 にパッシブ制御である電流無印加時の最大床応答加速度, 最大応答変位の絶対値をそれぞれ示す。Figure 4 (a)より, JMAKobe については質量比  $\mu$  が大きくなると最大床応答加速度は小さくなる。それ以外の地震動では, 質量比  $\mu$  が大きくなると, 最大床応答加速度は同程度か, もしくは大きくなる。また, Figure 4 (b)を見ると, 固有周期  $T$  の違いによる目立った傾向はなく, 特に質量比 0.30 の場合は, それぞれの地震動において, 固有周期によらず, ほぼ同程度の値となる。次に最大応答変位について着目すると, Figure 5 (a)より質量比  $\mu$  が大きくなると, どの地震動においても最大応答変位は小さ



**Fig. 4** Max. floor response acceleration (no applied current)



**Fig. 5** Max response displacement (no applied current)

くなる傾向となる。特に固有周期 3 秒の場合の方が質量比  $\mu$  による最大応答変位の低減率は大きい。また, 構造体の固有周期  $T$  が長くなると, 質量比 0.10 の場合は最大応答変位が小さくなり, 質量比 0.30 の場合は最大応答変位が大きくなる。これらのことから, 質量比  $\mu$  が大きくなると, 最大床応答加速度は地震動により傾向が異なるものの, 最大応答変位についてはどの地震動においても小さくなることが確認できる。

次に, これらの傾向を周波数領域の観点から考察する。Figure 6 は, リアルタイムハイブリッド実験により得られた時刻歴応答波形のフーリエスペクトルと, 入力地震動のフーリエスペクトルとの比から求めた伝達関数である。代表的な例として, EiCentro 入力時の固有周期 3 秒の場合における質量比  $\mu$  による比較を示している。Figure 6 (a)より, 構造体の固有周期 3 秒付近では, 質量比 0.30 では質量比 0.10 と比較してピーク値が 50%程度低減されている。しかしながら, 概ね周期 2 秒以下の範囲では加速度伝達率が全般に渡り, 2 倍以上になっている。一方, Figure 6 (b)では, ほぼ全領域に渡り, 変位が低減されていることが確認でき, 特に構造体の固有周期 3 秒付近における変位低減率は顕著である。

質量比  $\mu$  が大きくなると共振点付近の応答は小さくなるものの, 短周期領域で加速度が増幅する現象はどの入力地震動においても顕著に見られていた。これは既往の研究においても, 理論的に導出された周波数応答や数値解析による検証で明らかにされており, その改善方法と

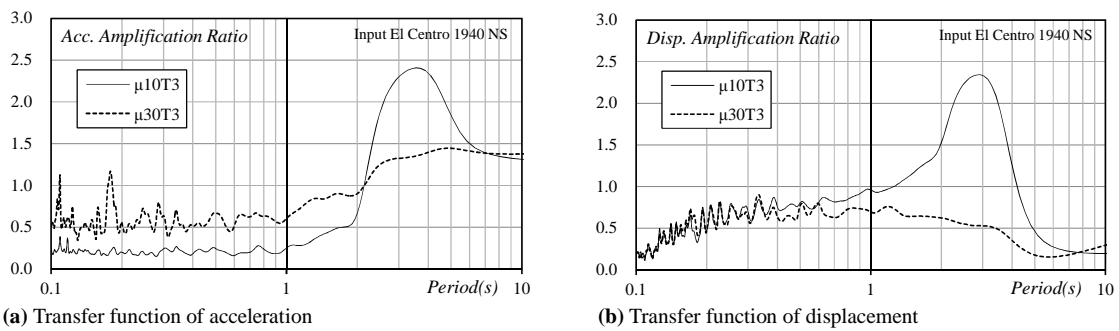


Fig. 6 Transfer function on ElCentro input

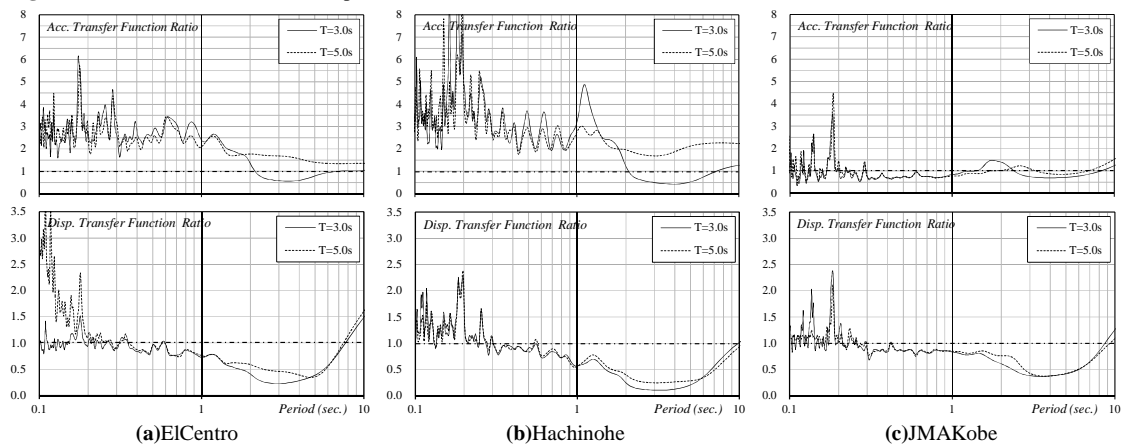


Fig. 7 Transfer function ratio on mass ratio 0.30 to mass ratio 0.10

しては、慣性質量をばね要素と直列にして免震層剛性と並列に配置する方法や摩擦スライダー<sup>6)</sup>を併用する方法などが提案されている。Figure 7はそれぞれの固有周期および入力地震動の場合において、質量比 0.10 に対する質量比 0.30 の伝達関数の比を示したものである。加速度、変位ともに、伝達関数比が 1 より小さい領域が質量比を大きくすることにより応答低減を図れる周期帯、伝達関数比が 1 より大きい領域が質量比を大きくすることにより応答が増幅する周期帯である。これらの伝達関数比は周波数領域におけるスペクトル解析より導出される慣性質量の特徴であることから、図中の実線と破線は概ね似たような傾向を示しているが、ElCentro および Hachinohe の固有周期 5 秒の場合は質量比を大きくすることで、構造体の固有周期付近での加速度伝達関数比が大きくなっている。また、固有周期 5 秒の場合は ElCentro の周期 0.2 秒以下における変位伝達関数比も大きくなっている。上段の加速度伝達関数を見ると、周期 2 秒から 6 秒付近の加速度が低減される領域および周期 2 秒以下 (JMAKobe の場合は周期 0.3 秒以下) の加速度が増幅する領域がある。質量比の変化による加速度の増幅が最も顕著に表れているのは Hachinohe であり、加速度伝達関数比において最も加速度の増幅が小さい、つまり慣性質量による悪影響が小さいと考えられるのは JMAKobe である。一方、下段の変位伝達関数を見ると、どの地震動においても周期 0.4 秒から 8 秒程度の範囲で変位低減効果が期待できる。これより、JMAKobe においては慣性質量により質量比を大きくしても、短周期領域での床応答加速度の増幅

を抑えながら、同時に応答変位を低減することが期待できると考えられる。

### 3. 2 セミアクティブ制御則

本節では、前節において、慣性質量の効果により床応答加速度の増幅を抑えながら応答変位を小さくすることが期待できると考えられる JMAKobe について、セミアクティブ制御により床応答加速度および応答変位をさらに低減する方法を提案する。

JMAKobe に代表されるパルス性地震動は、短い時間に大きな振幅の変位を生ずるという特徴を持つため、最大応答を考えると、短時間の大幅変位入力、つまり大きな速度が入力されることで最大応答に至る場合が多い。Figure 8, Figure 9 に本実験で用いた ElCentro および JMAKobe の時刻歴速度波形、ElCentro および JMAKobe 入力時の  $\mu 10T3$  の時刻歴応答変位波形を示す。図中には解析結果を灰色線で併せて示しており、両者の対応から解析により実験結果を概ね再現できていることが確認できる。Figure 8, Figure 9 を見ると、地震動の入力速度と構造体の応答変位には密接な関係があり、入力地震動の速度が最大となった数秒後に構造体に最大応答変位が生じていると考えることができる。

Figure 10 は、パッシブ制御である電流無印加時の場合について、地震動の入力速度が最大となる時刻から構造体が最大応答変位を記録するまでに要する時間 (以下、「最大速度入力からの時間差」という) を横軸に取り、構造体の最大応答変位を縦軸に取り、両者の関係を質量比および地震動ごとにプロットしたものである。Figure

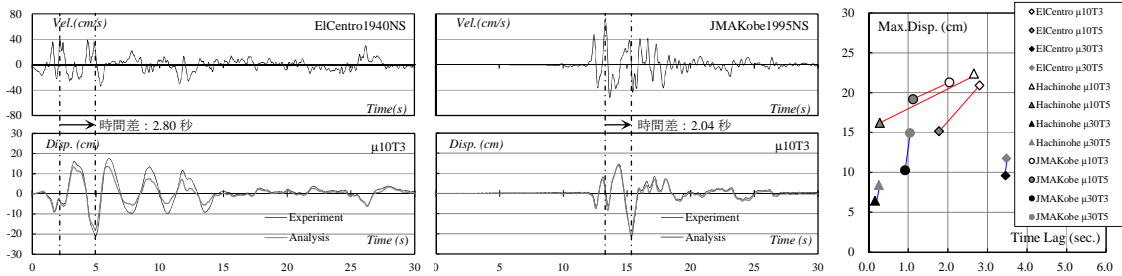


Fig. 8  $\mu 10T3$  time history response displacement and time history input velocity of EICentro      Fig. 9  $\mu 10T3$  time history response displacement and time history input velocity of JMAKobe      Fig. 10 Time lag from max. velocity input

10 より, EICentro 入力時の $\mu 30T3$ ,  $\mu 30T5$  の場合を除くと, 構造体の最大応答変位が大きいくほど, 最大速度入力からの時間差も大きくなる傾向(相関係数: 0.81)が見取れる. 質量比に着目すると, 図中の赤線で結ぶ質量比 0.10 では最大速度入力からの時間差の差異は大きい, 図中の青線で結ぶ質量比 0.30 ではその差異は少なく, 地震動ごとに概ね一定値となっている. また, 地震動別に比較すると, 最大速度入力からの時間差は, EICentro の場合では 2.0~3.5 秒程度の範囲, Hachinohe の場合では 0.3 秒程度(ただし,  $\mu 10T3$  では 2.6 秒程度), JMAKobe では 1.0~2.0 秒程度の範囲となっており, 地震動の性質による影響が支配的であると考えられる.

これらの傾向を基に, Figure 11 に示すような制御方法を提案する. Figure 3 の対象モデルが Figure 11 に示すように, 時刻歴波形上の B 地点において  $V_{present}$  の入力動を受けているとする. この  $V_{present}$  と  $\Delta t$  秒前の入力速度  $V_{past}$  を比較して, 現在の入力速度が  $\Delta t$  秒前の入力速度より大きければ制御力を ON にし, 小さければ制御力を OFF にする. 現在の入力速度  $V_{present}$  を時々刻々と観測しながら, その都度  $\Delta t$  秒前の入力速度  $V_{past}$  との比較を行い, 制御力の ON, OFF を切り替える制御則である. このとき,  $\Delta t$  には制御力発生の時間遅れや構造体の固有周期(あるいはその 1/4 や 1/2) を取るなど, いくつかの定義が考えられる. ここで, Figure 12 に示すように, 免震構造物の固有周期  $T$  に一致する成分を持ち, その振幅が時間とともに次第に増幅し, 最大値を記録した後に次第に減衰する漸増漸減正弦波が入力された場合を考える. この正弦波が Figure 3 の対象モデルそれぞれに入力された場合について, 電流無印加時のパッシブ制御時, Figure 11 の  $\Delta t$  をそれぞれ 0.2 秒,  $T/4$  秒,  $T/2$  秒,  $T$  秒とした場合のセミアクティブ制御時の最大応答値の一覧を Table 3 に示す. ここで,  $\Delta t$  の設定方法として, 0.2 秒は制御力発生の遅れ時間を想定しており,  $T$  は免震構造物の固有周期を表し,  $T=3$  秒の場合は  $T/4=0.75$  秒,  $T/2=1.5$  秒,  $T=5$  秒の場合は  $T/4=1.25$  秒,  $T/2=2.5$  秒となる. Table 3 より,  $\Delta t$  の設定値による最大応答値を比較すると, 最大床応答加速度は  $\mu 10T3$  を除き,  $\Delta t$  を構造体の固有周期と同じにした場合( $\Delta t=T$ ) が最も小さくなるが,  $\Delta t=T/2$  とした場合も概ね同程度に小さくなる事が確認できる. 次に, 最大応答変位に着目すると,  $\Delta t=T/2$  とした場合が最も小さくなるため, ここでは  $\Delta t$  を構造体の固有周期  $T$  の 1/2 と設定し, MR 回転慣性ダンパーをセミアクティブ制御した場合の制御効果について次節で比較を行う.

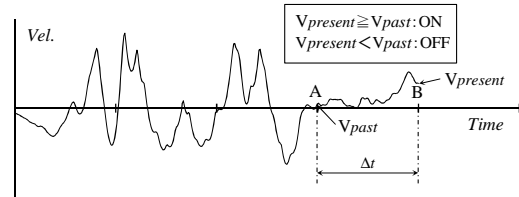


Fig. 11 The proposal semi-active control method

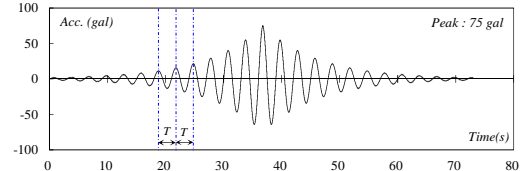


Fig. 12 The gradual increase and decrease sine wave with natural period  $T$

Table 3. Lists of max. response on gradual increase and decrease sine wave input

対象モデル	最大床応答加速度 (gal)					最大応答変位 (cm)				
	Passive	Semi-active				Passive	Semi-active			
		0.2s	T/4	T/2	T		0.2s	T/4	T/2	T
$\mu 10T3$	215	159	169	101	93	50	26	29	12	20
$\mu 10T5$	91	84	90	66	64	50	20	25	9	17
$\mu 30T3$	230	250	251	199	190	50	25	27	11	20
$\mu 30T5$	134	199	206	175	170	50	19	27	12	19

### 3. 3 セミアクティブ制御時の応答結果

Table 4 に, パッシブ制御時(電流無印加時, 1A の一定電流印加時)およびセミアクティブ制御時における最大応答値の一覧を示す. また, Figure 13 に電流無印加時のパッシブ制御時, 1A の一定電流印加時のパッシブ制御時, セミアクティブ制御時(以下, それぞれ「0A」, 「1A」, 「SA」という)それぞれにおける最大応答値の比を示す.

Figure 13(a)は, 電流無印加時に対する 1A 一定電流印加時の比 (1A/0A) を示している. 1A, つまり 0A にクーロン摩擦力による減衰が付加された場合, 質量比 0.30 の JMAKobe 入力時(図中●印, ●印)を除き, 最大応答変位は大きく低減されている. 特に, Hachinohe 入力時(図中▲印, ▲印)の最大応答変位は 0A に比べて 70~80% 程度低減され, クーロン摩擦減衰による変位低減効果が最も顕著に表れている. しかしながら, Hachinohe 入力時の最大床応答加速度は 2.1~2.6 倍程度に増幅し, 免震構造物の長所である加速度低減効果が損なわれてしまい, 適正值を超えた過度な減衰が付加されていると考えられる.

Figure 13 (b)は, 電流無印加時に対するセミアクティブ

Table 4. Lists of max. response

対象モデル	最大床応答加速度 (gal)									最大応答変位 (cm)								
	ElCentro入力時			Hachinohe入力時			JMAKobe入力時			ElCentro入力時			Hachinohe入力時			JMAKobe入力時		
	0A	1A	SA	0A	1A	SA	0A	1A	SA	0A	1A	SA	0A	1A	SA	0A	1A	SA
$\mu 10T3$	152	139	132	124	112	113	459	498	455	20.9	10.3	14.1	23.8	5.8	12.4	21.3	12.5	16.3
$\mu 10T5$	117	155	140	65	112	108	479	531	494	15.1	11.5	14.7	16.2	5.8	14.0	19.2	16.6	16.7
$\mu 30T3$	202	312	283	121	320	197	322	473	436	9.6	3.3	8.0	6.5	1.1	3.9	10.3	15.1	8.7
$\mu 30T5$	205	310	286	135	277	190	338	476	456	11.8	3.6	11.5	8.4	2.2	5.4	14.9	19.6	9.9

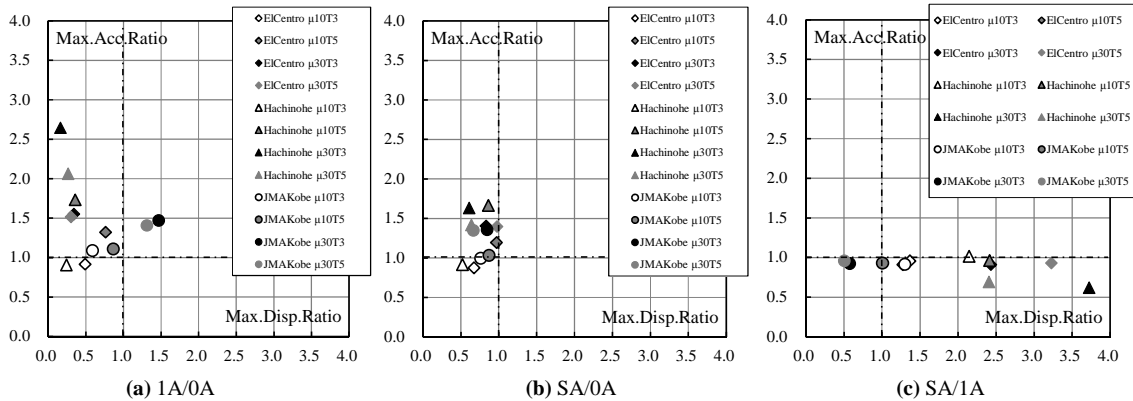


Fig. 13 Max. response ratio in no applied current, constant 1A applied current and semi-active control

制御時の比 (SA/0A) を示している。図より、ElCentro 入力時の $\mu 10T5$ 、 $\mu 30T5$  の場合を除くと、概ね 10~40% 程度最大応答変位が低減されている。Figure 10 においても、ElCentro 入力時は相関から大きく外れるケースもあり、地震動の特性によっては本論で提案した制御則のみでは制御効果が見込めない場合もあるが、パッシブ制御で質量比を大きくすることにより最大応答変位の低減を期待することはできる。最大床応答加速度は最大で 1.6 倍程度の増幅となっており、Hachinohe 入力時 (図中▲印、●印) では前述の Figure 13 (a) に比べて、最大応答変位は大きくなるものの、最大床応答加速度の上昇は抑えられている。また、質量比 0.10 の JMAKobe 入力時 (図中○印、●印) は最大床応答加速度を上昇させずに最大応答変位が低減されている。Figure 13 (b) を見ると、Figure 13 (a) に比べて全体的なプロットのばらつきが小さく、前節において提案した制御則は全ての場合について一様な効果を発揮していると言える。

Figure 13 (c) は、1A 一定電流印加時に対するセミアクティブ制御時の比 (SA/1A) を示しており、最大減衰力を等しくして、減衰力一定のパッシブ制御の場合と、減衰力を ON-OFF で切り替えたセミアクティブ制御の場合の効果を比較したものである。図より Hachinohe 入力時 (図中三角印全般) については 1A のパッシブ制御の場合の方が最大応答変位は小さくなるが、質量比 0.30 の JMAKobe (図中●印、●印) はセミアクティブ制御の方が最大応答変位は小さくなる。

#### 4. おわりに

MR 回転慣性ダンパーを用いたリアルタイムハイブリッド実験を通じて、制御対象とする構造体の固有周期 T、構造体質量に対する慣性質量の比 (質量比 $\mu$ )、断層近傍地震動を含む標準的な入力地震動による応答性状を比較した。また、慣性質量に関する既往の研究の解析研究成

果を実験により補足し、確認を行った。得られた知見から、セミアクティブ制御則を提案し、セミアクティブ振動制御装置としての MR 回転慣性ダンパーの同様の入力地震動に対する制御効果を検証した。本論により得られた知見は以下の通りである。

- ① パッシブ制御である電流無印加時の最大床応答加速度、最大応答変位の比較から、JMAKobe については質量比 $\mu$ が大きくなると最大床応答加速度は小さくなり、それ以外の地震動では、質量比 $\mu$ が大きくなると、最大床応答加速度は同程度か、もしくは大きくなることを確認した。また、固有周期の違いによる目立った傾向は確認されなかった。
- ② リアルタイムハイブリッド実験により得られた時刻歴応答波形の伝達関数から、質量比が大きくなると、共振点付近の応答は小さくなるものの、短周期領域で加速度が増幅することを確認した。
- ③ 加速度伝達関数において、②の傾向が最も顕著に表れていたのは Hachinohe であり、JMAKobe が最も影響は小さかった。変位伝達関数においては、どの地震動においても広範囲の周期帯で変位低減効果が確認された。これらのことから、JMAKobe については質量比を大きくすることで、短周期領域での床応答加速度の増幅を抑えながら、同時に応答変位を低減することができるものと考えられる。
- ④ 地震動の入力速度と構造体の応答変位との関係から、ElCentro 入力時の $\mu 30T3$ 、 $\mu 30T5$  の場合を除くと、構造体の最大応答変位が大きいほど最大速度入力からの時間差も大きくなることを確認した。
- ⑤ 電流無印加時のパッシブ制御時、1A の一定電流印加時のパッシブ制御時、セミアクティブ制御時それぞれにおける最大応答値の比較から、ElCentro 入力時の $\mu 10T5$ 、 $\mu 30T5$  の場合を除くと、セミアクティブ制御時は電流無印加時のパッシブ制御時と比較して、概ね 10~40% 程度最大応答変位が低減され、

最大床応答加速度は最大でも1.6倍程度の増幅となっており、1A印加によるパッシブ制御時に比べて適度な減衰の調整により、応答の増加を抑制する効果を確認した。

- ⑥ セミアクティブ制御による効果が最も大きいのはJMAKobeの場合であり、電流無印加時のパッシブ制御に比べて、床応答加速度をあまり上昇させずに応答変位を低減する効果が期待できることを確認した。

[謝辞] 本研究はJSPS科研費23560672の助成を受けたものであり、本研究の遂行にあたり神戸大学大学院工学研究科建築学専攻 向井洋一准教授には大変貴重なご意見をいただきました。ここに記して謝意を表します。

## References

- 1) Architectural Institute of Japan; Active and Semiactive Control for Buildings - State of the Art -, (2001)
- 2) K. Yoshida and T. Fujio; Application of Semi-active Control Based on Bilinear Optimal Control Theory to Building Base Isolation, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, pp.96-102 (2001)
- 3) I. Nagashima, Y. Shinozaki, R. Maseki; Sliding mode control of base-isolation system using semi-active hydraulic damper, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), No.649, pp.511-519 (2010)
- 4) T. Tomizawa, O.Takahashi, H. Fujitani, K. Shibata and Y. Sato; PERFORMANCE TESTS OF ROTARY INERTIA MASS DAMPER USING MAGNETORHEOLOGICAL FLUID AND ITS ANALYTICAL VERIFICATION, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), No.693, pp.1859-1867 (2013)
- 5) A. Ito, R.Kawasaki, H. Fujitani; EFFECTIVENESS OF REAL TIME HYBRID TEDT IN SEMI-ACTIVE CONTROLLED BASE ISOLATION SYSTEM, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), No.663, pp.891-897 (2011)
- 6) M. Saitoh; BASE ISOLATION SYSTEMS INCORPORATED WITH GYRO-MASS DEVICE AND FRICTION SLIDER ARRANGED IN SERIES FOR RESTRICTING LATERAL DISPLACEMENTS, Journal of JSCE, Vol.64, No.2, pp.258-272 (2008)

## **Response Control by Using Rotary Inertia Mass Damper Filled with Magneto-rheological Fluid on Real-time-hybrid Experiment**

Tetsuya TOMIZAWA<sup>1</sup>, Mai ITO<sup>2</sup>, Yuya AOYAMA<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Graduate School of Engineering, Department of Architecture*

<sup>2</sup>*Organization of Advanced Science and Technology*

**Key words:** Seismic isolation, Magneto-rheological fluid, Inertia mass, Semi-active control,

**In this paper, through the real-time-hybrid experiment with the use of “MR rotary inertia damper” the authors have been developed, the seismic response properties are discussed by changes in the parameters on building structure. The setup parameters in this paper are three of the followings; natural period of building structure, inertia mass ratio to building structure mass and variety of input earthquake motion. From the knowledge obtained by the experiment, the authors propose the semi-active control method focused on input velocity of earthquake. Then, in comparison between passive control and semi-active control, it have been confirmed the effects of the displacement reduction in the all case of experiments performed in this paper. Especially, in the case of JMAKobe earthquake, by the proposed semi-active control, it have been confirmed both floor response acceleration and displacement were reduced.**