Kobe University Repository : Kernel

PDF issue: 2025-12-04

磁気粘性流体を用いた回転慣性質量ダンパーによるパルス性地震動に対するセミアクティブ制御

富澤, 徹弥

(Citation)
神戸大学大学院工学研究科・システム情報学研究科紀要,5:33-39

(Issue Date)
2013

(Resource Type)
departmental bulletin paper

(Version)
Version of Record

(URL)
https://hdl.handle.net/20.500.14094/81005531

神戸大学大学院工学研究科・システム情報学研究科紀要　第 5 号　33～39 頁　2013 年
doi:10.5047/gseku.j.2013.005

磁気粘性流体を用いた回転慣性質量ダンパーによる パルス性地震動に対するセミアクティブ制御

富澤　徹弥 [1*]

[1] 工学研究科建築学専攻

（受付:December 2, 2013　受理:January 17, 2014　公開:February 12, 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、パルス性地震動

本研究は，筆者が開発した，回転慣性による質量効果と MR 流体による可変減衰効果の 2 つを狙いとする振動制御装置，MR 回転慣性ダンパーによる応答制御に関する研究である．固有周期 4 秒の免震建築物モデルを対象とし，周波数領域における伝達関数および地震動に対する時刻歴応答の観点から検討を行い，慣性質量およびセミアクティブ制御の効果について論じている．周波数領域における検討から，質量比と減衰比のトレードオフ関係をパッシブ制御では解消できないことを示し，スカイフック方式を採用したセミアクティブ制御により，課題の解決を図っている．また，時刻歴応答における検討から，慣性質量効果を取り入れたセミアクティブ制御は，床応答加速度を抑制しながら，免震層の応答変位を低減するのに有効な制御法であると結論付けている．

１．はじめに

近年の地震学の進歩は著しく，1995年兵庫県南部地震以降，全国の活断層調査，堆積平野の地表から地下の基盤までの地下構造調査，全国の数千ヶ所にわたって強震計を設置した地震動観測などが実施され，震源特性や伝播特性，増幅特性の解明が進んでいる．1995年兵庫県南部地震，2004年新潟県中越地震，2007年新潟県中越沖地震などの調査研究から，内陸（型）地震の断層近傍の地震動には継続時間は短いものの，1～2秒周期の大きな振幅のパルス波が含まれることが明らかになった．その過程では，従来の建築基準法の水準を大きく超える地震動も数多く観測され，2011年東北地方太平洋沖地震を契機に，地震動予測研究は起こり得る最大級の地震動予測へと，建築物に対しては地震後の速やかな再使用に向けた対応策策定へと変化し，社会はより安全より安心を求めるようになった．特に，建設地近傍や直下で起こる地震は建築物に与える影響が大きく，活断層による地震としては，大阪の上町断層や東京の立川断層などによる地震の発生が懸念されている．また，関東平野では首都圏の直下で起こるプレート境界地震も懸念されている．このような地震は規模がさほど大きくないものでも，建設地に近いために非常に大きな地震動となり，建築物に与える影響も大きい．大阪では2006年に大阪府自然災害総合防災対策検討委員会より大阪府市予測波が公表されており，それに基づき，一般社団法人 日本建築構造技術者協会（以下，「JSCA」という）関西支部を中心とする「大阪府域内陸直下型地震に対する建築設計用地震動及び設計法に関する研究会」により，その地震動に対する設計法に関する検討[1)]も行われている．また，首都圏直下地震に対しては文部科学省で関東地方各所の予測波が公表されている．

一方で，一般的な免震建築物における応答変位のクライテリアは設計で想定するレベルの地震動に対し，40～50cm程度とする場合が多く，擁壁とのクリアランスとしてさらに20～30%程度の余裕をとり，60cm程度に設定される場合が多い．しかしながら，前述のような従来の設計で想定されていた振幅レベルを大きく上回る地震動に対しては，免震建築物の安全性が脅かされる可能性がある．内陸（型）地震の断層近傍で発生するパルス性地震動によっては，免震層の過大な応答変位により，擁壁への衝突による建築物躯体やExp.Jの部分的損傷，過大変位による免震部材の破断や圧壊，座屈による支持能力の損失なども懸念される．このような免震層の過大変形を抑制するために，ダンパー量をいたずらに増加させた場合には，床応答加速度が上昇して免震建築物の長所が損なわれてしまうことも考えられる．

以上のような背景から，免震層の応答変位を低減しながらも床応答加速度の上昇を抑制することを目的として，免震建築物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に関する研究[2), 3), 4)]が行われている．セミアクティブ制御は，外部からの供給エネルギーが少なく，制御を実装するハードウェア装置自体はパッシブ方式でありながら，パッシブ制御だけでは実現できない制御効果が期待できる．本論文においては，前述のような建築基準法の水準を大きく超える地震動に対して，セミアクティブ制御により床応答加速度を抑制しながら，免震層の応答変位を低減する制御方法を提案する．このとき，近年我が国で精力的に研究が進められている慣性質量機構による入力低減効果および変位抑制効果[5)]を基に，その効果をセミアクティブ制御で適切にコントロールする方法について論ずる．

２．セミアクティブ振動制御装置

本研究で想定するセミアクティブ振動制御装置は，回転慣性質量による見かけの大きな質量効果を利用した慣性質量ダンパーに，磁気粘性流体（以下，「MR 流体」という）を組み合わせたセミアクティブ振動制御装置[6]（以下，「MR 回転慣性ダンパー」という）である．構造概略図を Figure 1 に，各要素の復元力特性のモデルを Figure 2 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 *md* 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 流体自体のせん断流れによる粘性減衰係数 *cd* を得ることができる．MR 流体を封入しているケースには磁場発生機構が取付けられており， MR 流体に作用する磁場の強さを変えることによって MR 流体の降伏応力による抵抗力 f_{MR} を任意に設定し，*cd* による減衰力に加算できる仕組みとなっている．

３．周波数領域における検討

Figure 3 に示すような 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した場合の振動特性を伝達関数の形で整理し，その応答制御効果について考察する．なお，対象モデルは免震建築物を想定し，構造体の固有振動数は 0.25Hz（固有周期 4 秒）に設定している．構造体の絶対変位を x_1，支持部の絶対変位を x_0 とすると，Figure 3 の対象モデルにおいて，支持部が加振される場合の振動方程式は Eq.(1)で表される．なお，振動方程式は絶対座標系とし，入力（加振）に対する出力（応答）の伝達関数は，構造体に対する質量比μや減衰比ζ，固有振動数比λにより無次元化することで一般性を持たせている．MR 流体による可変減衰力 f_{MR} は構造体質量 M と慣性質量 m_d との和の 5%としている．これは免震建築物の上部構造重量に対する免震層降伏せん断力の比 α_s[7]を意図しており，一般的な免震建築物では α_s=3%程度とすることが多い[7]が，本論では建築基準法の水準を大きく超える地震動を想定しているため，α_s=5%として一般的な値より大きく設定した．

$$M\ddot{x}_1 + K(x_1 - x_0) + m_d(\ddot{x}_1 - \ddot{x}_0) + c_d(\dot{x}_1 - \dot{x}_0) + f_{MR} \cdot sign(\dot{x}_1 - \dot{x}_0) = 0 \quad (1)$$

3．1 パッシブ制御による場合

パッシブ制御による場合，Eq.(1)の第 5 項，MR 流体による可変減衰力 f_{MR} は 0 となり，構造体の絶対変位 x_1，支持部の絶対変位 x_0 の初期値を 0 とおいてラプラス変換すると，Eq. (1)は複素数 s を用いて次のように表される．なお，X_1, X_0 は構造体および支持部の変位の複素振幅を表す．

$$Ms^2X_1 + K(X_1 - X_0) + m_d s^2(X_1 - X_0) + c_d s(X_1 - X_0) = 0 \quad (2)$$

Eq.(2)から，入力に対する出力の伝達関数 X_1/X_0 を求め，

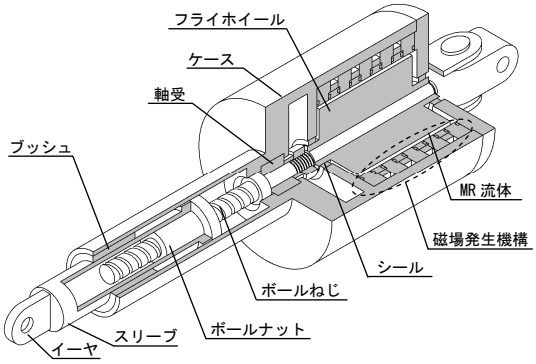
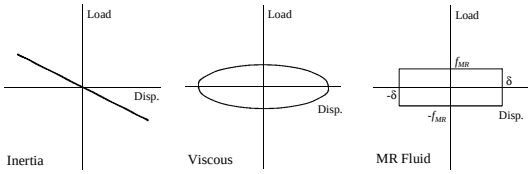
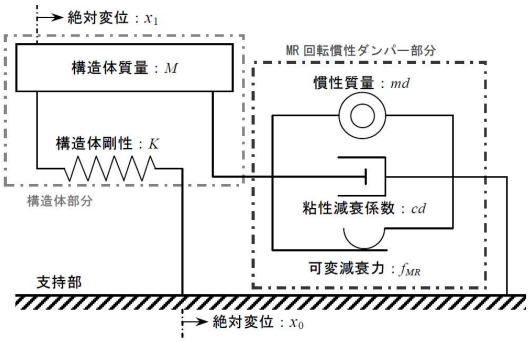


Fig. 1 Structural sketch of “MR rotary inertia damper”



(a) Inertia　**(b)** Viscous damping　**(c)** Variable damping

Fig. 2 Restoring property



構造体の固有振動数：$\omega_n = \sqrt{\dfrac{K}{M}}$，固有振動数比：$\lambda = \dfrac{\omega}{\omega_n}$

質量比：$\mu = \dfrac{m_d}{M}$，減衰比：$\zeta = \dfrac{c_d}{2\sqrt{MK}}$，重力加速度：$g$

MR 流体による可変減衰力：$f_{MR} = (M + m_d) \cdot 0.05 \cdot g$

Fig. 3 Analysis model

s=jω（j は虚数単位，ωは円振動数）とおき，質量比μや減衰比ζ，固有振動数比λにより無次元化し，Eq.(3)を得る．

$$\frac{X_1}{X_0} = \frac{1 - \mu\lambda^2 + 2\lambda\zeta \cdot j}{1 - (1+\mu)\lambda^2 + 2\lambda\zeta \cdot j} \quad (3)$$

これより，加速度伝達関数は分母分子を ω^2 で除して｜X_1/X_0｜，変位伝達関数は｜$(X_1 - X_0)/X_0$｜と以下に表される．

$$\left|\frac{X_1}{X_0}\right| = \sqrt{\frac{(1-\mu\lambda^2)^2 + (2\lambda\zeta)^2}{\{1-(1+\mu)\lambda^2\}^2 + (2\lambda\zeta)^2}} \quad (4)$$

$$\left|\frac{X_1 - X_0}{X_0}\right| = \sqrt{\frac{(\lambda^2)^2}{\{1-(1+\mu)\lambda^2\}^2 + (2\lambda\zeta)^2}} \quad (5)$$

Eqs. (4)と(5)より，質量比および減衰比を変化させた場合の加速度伝達率と変位伝達率を Figure 4 に示す．図中の黒線は質量比 0 で一定として減衰比を 0.10, 0.30, 0.50 と変化させた場合，図中の赤線は減衰比 0.10 で一定として

質量比を 0.05, 0.10 と変化させた場合である．Figure 4(a)より，質量比が一定の場合，共振周波数（λ=1）近傍では減衰比が大きいほど，加速度伝達率は小さくなる．これは Figure 4(b)の変位伝達率においても同様である．しかしながら，高周波数領域$\lambda=\sqrt{2}$ 程度以上の範囲においては，減衰比が大きいほど，加速度伝達率は大きくなる．一方，減衰比を一定として質量比を変化させた場合，共振周波数より高周波入力域で変位伝達率がやや小さくなる．特に，$\lambda=\sqrt{2}$ 程度以上の高周波数領域においては，加速度伝達率に大きな変化が見られる．Figure 4(a)の加速度伝達率において，例えばμ=0.00, ζ=0.50 の場合と，μ=0.05, ζ=0.10 の場合を比較すると，$\lambda=\sqrt{2}$ 程度以上の領域において，λ=20 程度の範囲まではμ=0.00, ζ=0.50 よりもμ=0.05, ζ=0.10 の場合の方が加速度伝達率を小さくすることができる．逆に，λ=20 を超えるとμ=0.05, ζ=0.10 の場合の方が加速度伝達率は大きくなってしまうが，適切な質量比を取ることにより，減衰比を大きく取るよりも加速度伝達率を効果的に小さくできる周波数領域が存在すると考えることができる．本論の対象モデルの固有周期は 4 秒としているため，0.2 秒～2.8 秒（$\lambda=\sqrt{2}$～20）程度の周期帯がこの範囲に該当する．しかしながら，共振周波数近傍においては，質量比の変化のみでは加速度伝達率に大きな変化は見られず，加速度伝達率を低減させるには，減衰比を大きく取る必要がある．しかし，減衰比を大きく取ると前述のように，$\lambda=\sqrt{2}$ 程度以上の範囲で加速度伝達率が大きくなる．また，減衰比が等しい場合の質量比による効果を，例えばμ=0.00, ζ=0.10 と，μ=0.05, ζ=0.10 の場合における加速度伝達率の観点から比較すると，$\lambda>\sqrt{2}$ で加速度伝達率が相対的に小さくなる周波数領域は上限がλ=7 程度までと狭くなる．このように，加速度伝達率および変位伝達率において，質量比および減衰比を調整することにはそれぞれ一長一短があり，パッシブ制御による場合はこれらのトレードオフ関係を，想定する外乱の周波数特性を考慮し，適切に調整する必要がある．

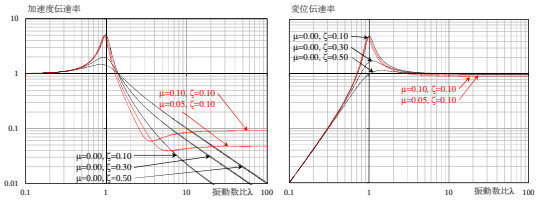
3．2 セミアクティブ制御による場合

前節におけるパッシブ制御時の質量比および減衰比のトレードオフ関係を踏まえ，セミアクティブ制御によりこれを解決する方法を提案する．地震動に対する応答制御にあたって，主に加速度伝達率の観点から，質量比または減衰比の調整を先に行った場合，それぞれのトレードオフ関係は，以下のように整理できる．

① 質量比を優先して調整する場合，適切な質量比を取ることにより，加速度伝達率および変位伝達率が共に小さくなる特定の周波数の範囲が存在する．減衰比が小さい方がこの範囲は広い．しかし，減衰比が小さい場合は減衰比が大きい場合に比べて共振周波数近傍での伝達率が大きくなる．

② 減衰比を優先して調整する場合，減衰比を大きく取ると，共振周波数近傍での加速度伝達率および変位伝達率が共に小さくなる．しかし，高周波数領域$\lambda=\sqrt{2}$ 以上の範囲で，加速度伝達率が大きくなる．

セミアクティブ制御による上記の解決方法を考える．①の解決方法としては，適切な質量比および減衰比の組



(a) Acceleration　**(b)** Displacement

Fig. 4 Transfer function on passive control

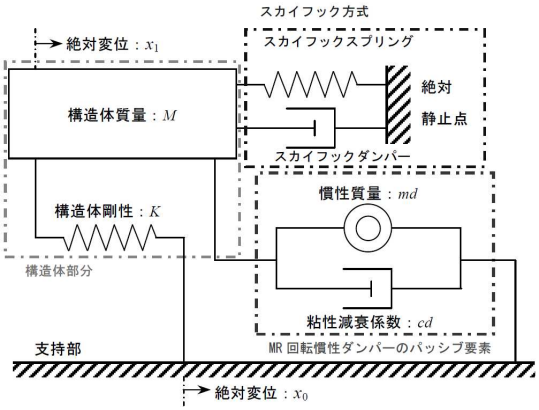
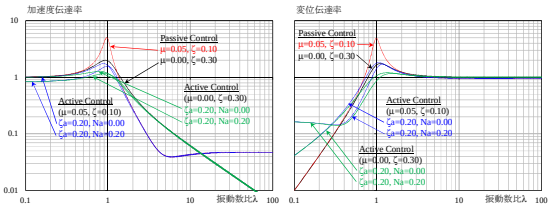


Fig. 5 The principle of skyhook control



(a) Acceleration　**(b)** Displacement

Fig. 6 Transfer function on semi-active skyhook control

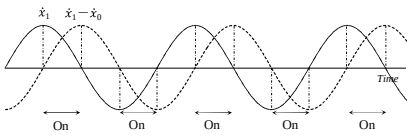


Fig. 7 Switching rule by skyhook control

み合わせを取り，セミアクティブ制御により，共振周波数近傍での伝達率を小さくすれば良い．②の解決方法としては，適切な減衰比を取り，セミアクティブ制御により，$\lambda=\sqrt{2}$ 以上の高周波数領域での加速度伝達率を小さくすれば良い．本論では，慣性質量による質量効果を取り入れることを前提として，①の解決方法に関するセミアクティブ制御について，以降に論ずることとする．セミアクティブ制御方式の基本的な考え方は，フルアクティブの制御力を与えるシステムを仮定し，まず理論的検討を行い，セミアクティブで再現できる力のみを出力するものである．そのため，周波数領域における制御系の検討はアクティブ方式として議論を進める．制御系の検討において，前述①の共振周波数近傍で伝達率を小さくし，かつ高周波数領域における伝達率を悪化させない方法として，スカイフック方式を採用する．スカイフック方式は，Figure 5 に示すように，絶対静止点に構造体質量 M

をダッシュポット，あるいは，ばねにより連結し，ダッシュポットの減衰係数またはばね定数を大きく（極論すると無限大に）することにより，支持部の外乱の大小に関わらず，構造体質量 M を常に絶対静止することを意図したものであり，前者はスカイフックダンパー，後者はスカイフックスプリングと呼ばれている [8]．アクティブ制御によるスカイフック方式の場合，Eq.(1)の第 5 項，可変減衰力の項を，状態フィードバックゲイン g_1, g_2 を用いた次式の制御力項に置き換えるものとする．

$$f_{skyfook} = g_1\dot{x}_1 + g_2 x_1 \tag{6}$$

Eq.(1)の制御力項を Eq.(6)に置き換えた式について，前節と同様にして加速度伝達関数｜X_1/X_0｜，変位伝達関数｜$(X_1 - X_0)/X_0$｜を求める．

$$\left|\frac{X_1}{X_0}\right| = \sqrt{\frac{(1-\mu\lambda^2)^2 + (2\lambda\zeta)^2}{\{1+N_a-(1+\mu)\lambda^2\}^2 + \{2\lambda(\zeta+\zeta_a)\}^2}} \tag{7}$$

$$\left|\frac{X_1 - X_0}{X_0}\right| = \sqrt{\frac{(\lambda^2 - N_a)^2 + (-2\lambda\zeta_a)^2}{\{1+N_a-(1+\mu)\lambda^2\}^2 + \{2\lambda(\zeta+\zeta_a)\}^2}} \tag{8}$$

ここで，

$$\zeta_a = \frac{g_1}{2\sqrt{MK}}, N_a = \frac{g_2}{K} \tag{9}$$

Eqs. (7)と(8)による加速度伝達率と変位伝達率を Figure 6 に示す．図中の赤線は質量比を 0.05，減衰比を 0.10 としたパッシブ方式の場合，図中の青線は同じ質量比および減衰比で，Eq.(9)で表されるアクティブ減衰比ζa（=0.20），アクティブ剛性比 Na（=0.20 または 0.00）によりスカイフック方式を採用した場合である．また，黒線はμ=0 で，減衰のみをζ=0.30 で付加した場合，緑線はμ=0，ζ=0.30 でスカイフック方式を採用した場合を示している．Figure 6 より，スカイフック方式では共振周波数近傍の伝達率は減衰のみをζ=0.30 で付加した場合と同程度以下になっており，質量比が同じ場合には高周波数領域における伝達率も上昇しないことが確認できる．また，スカイフックダンパーにスカイフックスプリングを加えた場合には，主に共振周波数以下の低周波数領域において，加速度伝達率はより小さくなり，λ=0.3～1.0 程度の範囲（本論の対象モデルでは固有周期 4 秒～13 秒）までは変位伝達率も小さくなる．λ<0.3 の範囲においては，変位伝達率が大きくなるが，本研究で対象とする地震波の周波数域からは大きく外れている．これらの結果から，スカイフック方式は①の解決方法として期待できる．

４．時刻歴応答における検討

これまでの周波数領域における一連の検討に，時刻歴応答の観点から考察を加える．Eq.(6)では，制御力は構造体の絶対速度および絶対変位をフィードバックしているが，実際の MR 回転慣性ダンパーの可変減衰力の作用方向は構造体と支持部との相対速度の向きに依存している．そのため，前述のスカイフック方式を具現化するにあたっては，絶対速度および絶対変位と，相対速度との位相差を考慮する必要がある．Figure 7 に，構造体の絶対速度と構造体－支持部間の相対速度の時刻歴波形の例によるスカイフック方式の切替え則を示す．Figure 7 に示すように，構造体の絶対速度 $\dot{x}_1$ と構造体－支持部間の相対速度 $(\dot{x}_1 - \dot{x}_0)$ とでは，時刻歴のある領域で位相特性が等しくなる場合と，そうでない場合の二つの状態が存在する．よって，セミアクティブ制御において，スカイフック方式を実現させるために，$\dot{x}_1$ と $(\dot{x}_1 - \dot{x}_0)$ が同符号の場合のみ，制御力としてMR回転慣性ダンパーの可変減衰力を作用させる．また，$\dot{x}_1$ と $(\dot{x}_1 - \dot{x}_0)$ が異符号となる場合には，セミアクティブ方式では意図する方向と逆方向に制御力が働いてしまうため，次善の策としてMR回転慣性ダンパーの可変減衰力を0とする．以降では，パッシブおよびセミアクティブ制御時の地震動に対する応答制御効果を時刻歴応答解析にて検討する．

Table 1. Lists of input ground motions

入力地震動	継続時間（秒）	最大値			備考
		加速度（gal）	速度（kine）	変位（cm）	
JMAKobe	160	818	91	20	観測地震動
JRTakatori	150	606	122	41	観測地震動
SPW[1)]	40	131	88	70	人工地震動
UMT[1)]	40	812	101	58	人工地震動

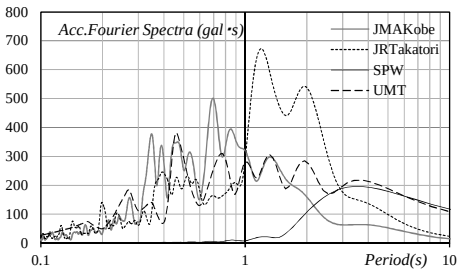


Fig. 8 Acceleration fourier spectra

４．１ 対象モデル

時刻歴応答解析における対象モデルは Figure 3 と同様とし，質量比を 0.00, 0.02, 0.05, 0.10, 0.30, 0.50 の 6 通り，減衰比を 0.00, 0.10, 0.30, 0.50 の 4 通りに変化させた場合について比較検討を行う．なお，対象モデルの呼称は以下のように設定する．

例：μ05 ζ10（質量比 0.05，減衰比 0.10 の場合）
　　└ζ00, ζ10, ζ30, ζ50：減衰比 0.00, 0.10, 0.30, 0.50
　　μ00, μ02, μ05, μ10, μ30, μ50：
　　質量比 0.00, 0.02, 0.05, 0.10, 0.30, 0.50

４．２ 入力地震動

入力地震動にはパルス性地震動の代表的な観測記録として，JMA Kobe 1995 NS, JR Takatori 1995 NS（以下，それぞれ「JMAKobe」,「JRTakatori」と略す）を用いる．建築基準法の水準を大きく超えるパルス性地震動として，SPW3125_T3V125N[1)], UMTA4_B1EW[1)]（以下，それぞれ「SPW」,「UMT」と略す）を用いる．各地震動の継続時間および最大加速度，最大速度，最大変位を Table 1 に示す．各地震動の加速度フーリエスペクトルを Figure 8 に示す．なお，スペクトル解析の際，ウィンドウ幅 0.2Hz の Parzen ウィンドウによる平滑化処理を行っている．

４．３ パッシブ制御による場合

各入力地震動におけるパッシブ制御時の最大床応答加速度および最大応答変位を Figure 9 に示す．Figure 9 は横軸に質量比，縦軸に最大床応答加速度または最大応答変位を取り，それぞれの減衰比ごとにプロットしたものである．図より，質量比0.10程度より大きい範囲では，全体として，質量比が大きくなると，最大応答変位は小さ

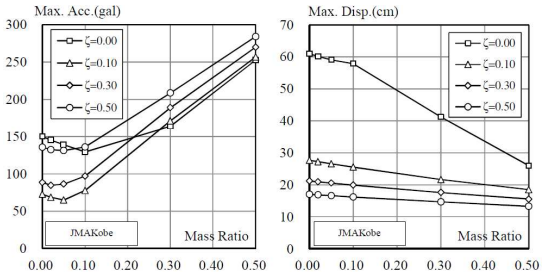
く最大床応答加速度は大きくなる傾向が見てとれる．前述のように大きな質量比を付加することで，高周波数領域の加速度伝達率が大きくなってしまうためと考えられる．SPW については，質量比の増大とともに，最大応答変位のみならず，最大床応答加速度も減少する傾向にあるが，これは Figure 8 から分かるように，SPW が 1 秒以下の短周期帯成分をほとんど含まないためである．

次に，最大床応答加速度に着目すると，質量比の増大とともに最大床応答加速度が増大する傾向があるものの，SPW 以外の地震動では，質量比μ=0.02 からμ=0.10 の範囲で極小値を取り，下に凸の特性を示していることが確認できる．これは前述のように，質量比による特定の周波数領域での加速度低減効果であり，例えば 3.1 節で示したμ00ζ50 とμ05ζ10 との比較において，固有周期 0.2~2.8 秒程度の周期帯では減衰比の小さいμ05ζ10 の方が加速度低減効果は大きいことは既に述べた．時刻歴応答においては，特に JMAKobe および JRTakatori の場合に，μ00ζ50 に比べμ05ζ10 の方が 50%以上も最大床応答加速度が低減していることが確認できる．このように，質量比 0.05 および減衰比 0.10 を取ることにより，特に周期 1～2 秒程度に大きな振幅を持つようなパルス性地震動に対しては床応答加速度を効果的に減少させることができると考えられる．しかしながら，JMAKobe や JRTakatori での最大応答変位に着目すると，μ00ζ50 に比べμ05ζ10 の方が最大応答変位は最大 56%増大しており，床応答加速度をより低減するという観点において，免震効果をより高めているという見方もできるが，本論における検討の範囲では最大床応答加速度と最大応答変位の両方を同時には抑制できず，パッシブ制御のみでは限界があることが分かる．また，UMT の場合においても，最大床応答加速度が最も小さくなるのはμ02ζ30 であるが，さらに減衰を付加して最大応答変位を小さくしようとしたμ02ζ50 の場合では，最大床応答加速度がやや上昇してしまうことが分かる．

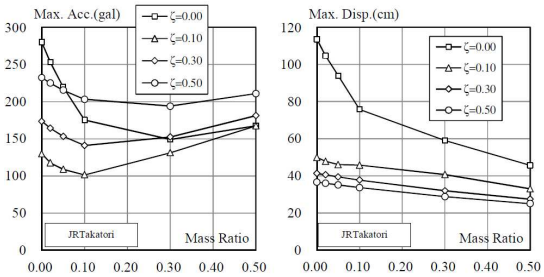
4．4 セミアクティブ制御による場合

次に，セミアクティブ制御による場合について考察する．Figure 9 に示したパッシブ制御時において，最大床応答加速度が最も小さくなる質量比および減衰比の組み合わせの場合について，各入力地震動に対するセミアクティブ制御効果を確認する．Figure 10 は，パッシブ制御時およびセミアクティブ制御時の JMAKobe のμ05ζ10，JRTakatori のμ10ζ10，SPW のμ50ζ30，UMT のμ02ζ30 それぞれの場合における最大床応答加速度と最大応答変位を示している．なお，本節におけるセミアクティブ制御則は 3.2 節において提案したスカイフック方式のうち，アクティブ剛性比 Na を 0 としたスカイフックダンパー単独による制御を用いている．

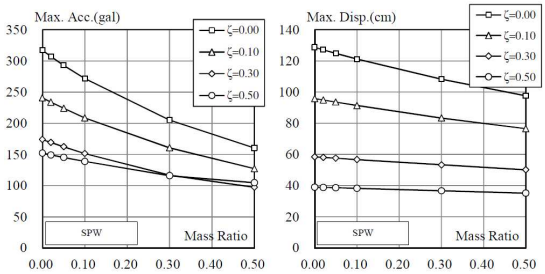
Figure 10 より，どの地震動においても，セミアクティブ制御時はパッシブ制御時に比べて，最大床応答加速度を同程度もしくは小さく抑制しながら，応答変位も低減できていることが確認できる．Figure 10 において検討に用いた計 4 種類の地震動では，最大床応答加速度は平均 5%程度，最大応答変位は平均 22%程度低減されており，本論における検討の範囲内では，提案する慣性質量効果を取り入れたスカイフック方式によるセミアクティブ制



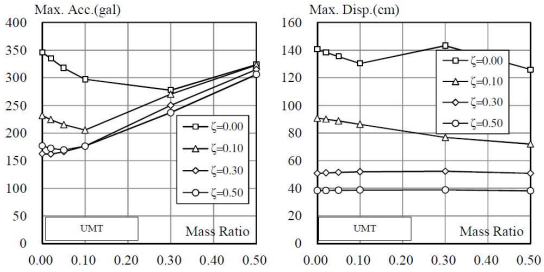
(a) Max. Acceleration and displacement on JMAKobe input



(b) Max. Acceleration and displacement on JRTakatori input

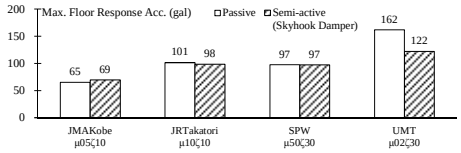


(c) Max. Acceleration and displacement on SPW input

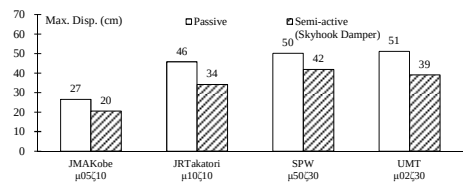


(d) Max. Acceleration and displacement on UMT input

Fig. 9 Max. Acceleration and displacement on passive control



(a) Max. floor response acceleration



(b) Max. displacement

Fig. 10 The comparison of passive with semi-active

御法は，床応答加速度を抑制しながら免震層の応答変位を低減する有効な制御方法であると言える．

５．結　　言

MR 回転慣性ダンパー[6)]による応答制御効果に関して，固有周期 4 秒の免震建築物モデルを対象として，周波数領域における伝達関数および地震動に対する時刻歴応答の観点から検討を行い，慣性質量効果を取り入れたスカイフック方式によるセミアクティブ制御方法を提案し，その効果について論じた．本論により得られた知見は以下の通りである．

① 周波数領域における伝達関数から，適切な質量比を取ることで加速度伝達率および変位伝達率をともに小さくできる領域がある．

② 質量比と減衰比を調整することには一長一短がある．質量比を優先して調整する場合には①の領域で伝達率が小さくなるものの，共振周波数近傍での伝達率が大きくなる．一方，減衰比を優先して調整する場合には周波数近傍での伝達率は小さくなるものの，高周波数領域において加速度伝達率が大きくなる．パッシブ制御による場合はこれらのトレードオフ関係を，想定する外乱の周波数特性を考慮して，質量比と減衰比を適切に調整する必要がある．

③ ②のトレードオフ関係について，慣性質量効果を取り入れることを前提とした場合，スカイフック方式を採用することで，高周波数領域における伝達率を悪化させずに，共振周波数近傍での伝達率を小さくすることができる．セミアクティブ制御により，パッシブ制御では実現できない効果が期待できる．

④ 時刻歴応答における検討から，入力地震動によらず全体的な傾向として，質量比が大きくなると最大応答変位は小さくなるものの，最大床応答加速度は大きくなる傾向が確認できた．

⑤ 最大床応答加速度に着目すると，質量比が大きくなるに従い，最大床応答加速度は大きくなる傾向にあるものの，質量比μ=0.02 からμ=0.10 の範囲で極小値を取る，下に凸の特性を示す．これは上記①による効果と考えられ，適切な質量比および減衰比を取ることにより，特に周期 1～2 秒程度に大きな振幅を持つようなパルス性地震動に対しては床応答加速度を効果的に減少させることができると考えられる．

⑥ パッシブ制御時において，最大床応答加速度が最も小さくなる質量比および減衰比の組み合わせの場合について，各入力地震動に対するセミアクティブ制御効果を確認した．最大床応答加速度は平均 5%程度，最大応答変位は平均 22%程度低減されており，本論における検討の範囲内では，提案した慣性質量効果を取り入れたスカイフック方式によるセミアクティブ制御法は，床応答加速度を抑制しながら，同時に免震層の応答変位を低減するのに有効な制御方法である．

［謝辞］　本研究は，JSPS 科研費 23560672 の助成を受けたものであり，本論にて採用した入力地震動には，JSCA 関西を中心とする研究会の研究成果の一部 [1)]を利用させていただきました．ここに記して謝意を表します．

References

1) K. Taga, I. Kamei, A. Sumi, K. Kondo, Y. Hayashi, Y. Miyamoto and K. Inoue; Research on Design Input Ground Motion and Design Method of Building for Uemachi Fault Earthquake Part 1-2, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, B-1, pp.127-130 (2011)

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) H. Fujii, T. Hiwatashi, H. Fujitani; SHAKING TABLE TEST OF SEMI-ACTIVE CONTROL FOR BASE-ISOLATION SYSTEM BY MR-DAMPER APPLIED WITH OPTIMAL REGULATOR THEORY : Effect of changing weighting matrix, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), No.618, pp.73-79 (2007)

4) 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)

5) 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)

6) 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)

7) Architectural Institute of Japan; Recommendation for the Design of Seismically Isolated Buildings, 3rd ed. (2001)

8) N. Tanaka; “Vibration Control”（Shindou Seigyo）, (2008)

A Semi-active Control for Pulse Type Ground Motions by Using Rotary Inertia Mass Damper Filled with Magnetorheological Fluid

Tetsuya TOMIZAWA[1]

[1]*Graduate School of Engineering, Department of Architecture*

Key words: Seismic isolation, Magnetorheological fluid, Inertia mass, Semi-active control, Pulse type ground motion

This paper shows a response control efficacy by using rotational inertia mass damper filled with magnetorheological fluid. Through a study on transfer function of the frequency domain, authors indicate the effective range of decreasing floor response acceleration by designing proper mass ratio. But, on passive control, they have the performance tradeoff between mass ratio and damping ratio, and there is a limit to decrease both floor response acceleration and response displacement. Then, authors suggest the skyhook-type semi-active control method. The suggested method makes it possible to decrease response on sympathetic vibration point and not to worsen response in high frequency range. Next, through a study on time history response, authors shows the skyhook-type semi-active control is effective to decrease both floor response acceleration and response displacement.