可変減衰ダンパーを用いた免震システムの変形抑止制御

DISPLACEMENT CONTROL METHOD OF BASE-ISOLATION SYSTEM USING VARIABLE DAMPING DEVICE

長島 一郎*, 欄木 龍大**, 日比野 浩***, 高木 政美****

*Ichiro NAGASHIMA, Ryota MASEKI, Hiroshi HIBINO
and Masayoshi TAKAKI*

After 1995 Hyogoken-Nanbu earthquake, buildings equipped with base-isolation systems are steadily increasing in Japan. However, large displacement pulses and large ground velocities have been observed in the near-source region of 1999 Chi-Chi earthquake in Taiwan and this kind of strong ground motions may cause a large displacement response in base-isolation buildings and may lead to severe damage and possible collapse.

To counteract the excessive displacement response of base-isolation systems, we have developed a displacement control method of base-isolation systems using variable damping devices. This system is applied to a floor isolation system and the control performance is demonstrated by shaking table tests.

Keywords: Base-isolation, Semi-active control, Large displacement pulse, Isolation floor, Shaking table test

免震構造, セミアクティブ制御, 大変形パルス, 床免震, 振動台実験

1. はじめに

建物の耐震性能を飛躍的に向上させる免震技術は, 1995年の兵庫県南部地震を契機に普及が進んでいる。ところが, 1999年台湾・集集地震では, 断層近傍において長周期で速度レベルが極めて大きな地震動が観測されており, このような地震動に対して免震構造物が過大な変形を生じる危険性が指摘されている^{1)~3)}。また, 建物が密集する市街地では, 敷地面積の制約から, 建物周辺部に十分なスペースを確保することが出来ず, 特に既存建物のレトロフィット等で免震技術が適用出来ない場合もある。

上述した課題に対処して免震構造物の過大变形を抑止するには, 免震装置周辺部にストッパーを設ける方法が先ず考えられるが, ストッパーの復元力特性を様々に設定しても(復元力が変形とともに増大するハードニング型や復元力が一定値で頭打ちになる降伏型), 一定以上の変形に対しては強い衝撃力が発生し, 非免震構造物と同等以上の応答せん断力が発生する危険性が指摘されている^{3), 4)}。

これは, 装置周辺部の限られた範囲で作動するストッパーでは, 十分なエネルギー吸収が達成できないためであり, 衝突の危険がある場合には, 免震装置部の減衰性能を高める方法が有効と考えられる。すなわち, 衝突の危険の無い通常の地震時には減衰性能を低く設定して, 従来の加速度応答低減効果を発揮させ, 衝突の危険のあ

る場合には減衰性能を高く設定して, 加速度応答をある程度犠牲にしても免震層の変形を抑止する戦略である。このような目的に対して, 減衰性能が制御可能ないわゆるセミアクティブ制振システムの応用が考えられる。

セミアクティブ制振システムは, 少ないエネルギー投入で高い制振性能が実現できることから, 大地震までを適用範囲とした制振システムとして近年活発に研究開発が行われて来ている。具体的には, ブレースのon/offを利用する可変剛性機構⁵⁾や, オイルダンパー^{6) 7) 8)}, 摩擦ダンパー^{9) ~12)}, MRダンパー^{13) ~16)}, ERダンパー^{17) 18)}等を利用する可変減衰機構が研究・開発されて来っており, 免震構造物への応用研究も行われている^{9) 10) 19) 20)}。

セミアクティブ制振システムの制御法では, 通常のパッシブダンパーでは実現できない高減衰を構造物に付加するアルゴリズムを開発したり^{7) 8) 12)}, 最適制御理論やリアプノフ関数を用いる非線形制御理論等に基づいたフィードバック制御則を応用することにより^{14) 21) 22) 23)}, パッシブ制振システムよりも制振効果を向上させて, 加速度応答や変位応答を低減させることに主眼が置かれている。

免震構造物への応用についても目的は基本的に同じであり, 最適制御やスライディングモード制御等を適用して, より広い周波数帯域で制御性能を発揮させることにより, 通常の免震構造物と比べ

* 大成建設技術センター 主任研究員・博士(工学)
** 大成建設技術センター 主任・工修
*** 大成建設技術センター 主任研究員・工修
**** 大成建設技術センター チームリーダー・博士(工学)

Chief Research Engineer, Technology Center, Taisei Corporation, Dr. Eng.
Chief, Technology Center, Taisei Corporation, M. Eng.
Chief Research Engineer, Technology Center, Taisei Corporation, M. Eng.
Team Leader, Technology Center, Taisei Corporation, Dr. Eng.

て、免震層の変形を同等以下に抑制しつつ、加速度応答を更に低減させる効果が報告されている^{9) 15) 19) 20)}。しかしながら、大地震時の耐震安全性を向上させるための免震構造物において、セミアクティブ制御を付加することにより、中小地震時の加速度応答を更に低減させることの有用性については、今後更なる検討が必要と思われる。

本研究では、減衰性能が制御可能なオイルダンパーを用いて、免震層に生じる過大な変形を抑止する制御法を開発し、床免震システムへ適用してその有効性を実証した。本制御法では、免震層の基準振幅値を設定し、一定時間後の予測振幅値との相対誤差に基づいて、減衰性能を時々刻々切替え、免震層の変形が常に一定値に近づくように制御する。これにより、変形が過大にならない地震動レベルの範囲では減衰性能を低く設定して、通常の免震構造物と同等の加速度応答低減効果を発揮させ、衝突の危険のある場合には減衰性能を高く設定して、加速度応答の増加をある程度許容して、免震層の変形を抑止する効果を発揮させる。

本論文では、床免震システムの制御に用いた減衰性能可変型オイルダンパーの基本特性と、免震層の過大变形抑止を実現する制御法、振動台実験による性能実証結果とシミュレーション解析について述べる。

2. 可変減衰ダンパーの基本特性

本研究では、電磁比例リリーフ弁により減衰力が無段階に制御可能なオイルダンパーを使用した²⁴⁾。最大減衰力は14.7kN、ストロークは±10cmである。図1の油圧回路図に示す通り、本ダンパーは作動油の流れが一方のユニフロータイプであり、伸縮方向の各々にアンロード弁を配置し、減衰力がほぼ0の状態も実現できる。実験では24Vの直流電源を使用し、電流制御のアンプにより電磁比例リリーフ弁を制御した。

電磁比例リリーフ弁への指令電圧を変化させた場合の、ピストン速度-減衰力の試験結果を図2に、試験状況を写真1に示す。図2からわかる通り、減衰力はリリーフ前の調圧弁（オリフィス）の特性が支配的な部分（第一勾配部）と、リリーフ後の特性（第二勾配部）に分かれている。リリーフ後の減衰力は指令電圧を0Vから5Vの範囲で増減させることで制御が可能である。

2.1 ダンパー特性の同定

解析では、減衰力のリリーフ前後の特性を、各々直線近似することとした。同定結果を図2に実線で示す。試験結果と同定結果は、指令電圧が小さく、かつ速度が大きな領域で若干差が見られるが、全般的に概ね良く対応している。指令電圧を V (V)、速度を $\dot{x}_d$ (cm/s) とすると、同定式は以下の通りである。

$$1) 1.03 < v \leq 5 \text{ の時} \quad : F(v, \dot{x}_d) = \min(F_1, F_2)$$

$$\text{ただし, } F_1 = c_1 \cdot \dot{x}_d, \quad F_2 = c_2 \cdot \dot{x}_d + N_a \cdot v + N_b$$

$$2) 0 \leq v \leq 1.03 \text{ の時} \quad : F(v, \dot{x}_d) = (N_c \cdot v + c_3) \cdot \dot{x}_d$$

$$3) \text{ アンロード時} \quad : F(\dot{x}_d) = c_0 \cdot \dot{x}_d$$

ここで、上記パラメータ値は下記の通りである。

$$c_0 = 0.0263 \text{ kN} \cdot \text{s/cm}, \quad c_1 = 5.03 \text{ kN} \cdot \text{s/cm}, \quad c_2 = 0.187 \text{ kN} \cdot \text{s/cm}$$

$$c_3 = 0.1149 \text{ kN} \cdot \text{s/cm}, \quad N_a = 2.3839 \text{ kN/V}, \quad N_b = -2.4524 \text{ kN}$$

$$N_c = 0.0699 \text{ kN} \cdot \text{s/cm/V}$$

図1 油圧回路図（文献²⁴⁾より引用加筆）

図2 減衰力-速度関係

写真1 オイルダンパー試験状況

図3 応答加速度と応答変形のトレードオフ

3. 可変減衰ダンパーの制御法1

免震構造物の応答加速度と応答変形には、図3に示すような減衰係数を介したトレードオフがあると考えられる。そこで本研究では、まず、減衰力がピストン速度に比例するように、電磁比例リリーフ

図4 減衰係数制御の特性

弁への指令電圧を変化させて減衰係数の制御を実現する。次に、アクティブマスダンパーの振幅制御用に開発した可変ゲイン制御法²⁵⁾を援用し、ダンパー変形の基準振幅値と一定時間後の予測振幅値に基づいて減衰係数を制御することで、過大変形を抑止する制御法を開発した。

リリーフ荷重を直接制御する方法も考えられるが、減衰係数制御に比べて最大応答加速度や最大応答変形とリリーフ荷重の相関が明瞭ではないこと、単純にリリーフ荷重を増減させるだけでは残留変形が生じやすい等の理由により、本研究ではリリーフ荷重制御よりも減衰係数制御の方法を採用した。

3.1 減衰係数の制御

減衰係数の設定値を c (ただし、 $c_3 \leq c \leq c_1$) とすると2.1の同定式を用いて電磁比例リリーフ弁への指令電圧 v は、以下のように決定できる。

1) $c_2 \leq c \leq c_1$ の時

$$v = \left\{ (c - c_2) \cdot \dot{x}_d - N_b \right\} / N_a$$

2) $c_3 \leq c \leq c_2$ の時

$$v = (c - c_3) / N_c$$

減衰係数を 0.5kN·s/cm に設定した場合の、正弦波加振に対する指令電圧と減衰力の時刻歴波形を図4(a)に例示する。指令電圧の初期値を5Vに設定したため、制御開始時の2.5秒付近に5Vのスパイクが見られるが、以後指令電圧は安定している。

次に、減衰係数を0.25kN·s/cm、0.5kN·s/cm、1.0kN·s/cmに設定した場合の速度-減衰力関係を、実験値と解析値を合わせて図4(b)に例示する。図中点線が目標値である。速度と減衰力には若干の位相ずれがあるが、概ね意図した減衰係数の制御が実現できている。速度と減衰力の位相ずれは、減衰力がリリーフ荷重に達する場合(本例では減衰係数が1.0kN·s/cmの場合)に、特に顕著である。指令電圧に対応するダンパー減衰力が発生するまでに、10msecの時間遅れを仮定して解析した、ピストン速度-減衰力関係を図4(b)下段に示すが、上段の実験値と良く対応している。

3.2 変形抑止制御(連続可変制御)

制御アルゴリズムを図5に示す。本アルゴリズムは以下のステップから成っている。

Step1: $i=0$ として減衰係数に初期値 c_{init} を設定する。

Step2: $i=i+1$ として、現時点のダンパー振幅値 $\tilde{x}_d$ と速度 $\dot{x}_d$ を計測する。

Step3: $\tilde{x}_d$ と $\dot{x}_d$ から ΔT 秒後の予測振幅 $\tilde{x}_{d\Delta T}$ を計算する。

$$\tilde{x}_{d\Delta T} = \tilde{x}_d + \Delta T \cdot \dot{x}_d$$

Step4: 振幅値の所定基準値 $X_{d\Delta T}$ (以下基準振幅値と呼ぶ) と予測振幅 $\tilde{x}_{d\Delta T}$ との相対誤差 β_i を評価する。

$$\beta_i = \left| \frac{\tilde{x}_{d\Delta T}}{X_{d\Delta T}} \right| - 1.0$$

Step5: β_i を用いて減衰係数 c_i を増減する。

$$c_i = c_{i-1} + \Delta c \cdot \beta_i$$

ここで、 Δc は減衰係数の増分値である。増加時 ($\beta_i > 0$) と減少時 ($\beta_i \leq 0$) で異なった値を設定出来るようにしている。

Step6: 減衰係数 c_i を、上限値 $c_{\max}$ と下限値 $c_{\min}$ の範囲で決定する。

Step7: ダンパーに減衰係数の指令値を出力する。

4. 振動台実験による性能確認

3.で提案した可変減衰ダンパーの制御法の有効性を実証するため、本論文では床免震システムを対象として、振動台実験による性能検証実験を実施した。

4.1 床免震システムの概要

可変減衰ダンパーを適用する床免震システムの外観を写真2に示す。本システムは、2次元免震装置、鉄骨架台、フリーアクセス床(平面寸法3m×3m)から構成され、床上に鋼製重錘を設置している。2次元免震装置は、中心部が円弧状の直線状レールと、軸受け部にテフロン材を使用した車輪部から成る1次元免震装置が、直交

図5 変形抑止制御のアルゴリズム (連続可変制御)

する形で2段に重ねられている。可変減衰ダンパーは、振動台と根太間に設置している。尚、加振実験は水平1方向に対して行った。

床免震システムの試験体図面を図6に示す。免震床の変形と加速度は、図中に示す位置で計測した。力学モデルを図7に示す。免震装置の車輪部の静摩擦特性とその速度依存性を、速度の関数として近似して、下式によりモデル化した^{26), 27)}。

$$\text{静摩擦特性: } F = Mg \cdot \mu_S \cdot \frac{1 - e^{-\alpha x}}{1 + e^{-\alpha x}}$$

$$\text{速度依存性: } \mu = \mu_{\max} - (\mu_{\max} - \mu_S) \cdot e^{-\beta |x|}$$

ここで、 M は免震装置の支持質量 ($7.239 \times 10^3 \text{ kg}$)、 g は重力加速度、 μ_S は静摩擦係数 (0.034)、 $\mu_{\max}$ は動摩擦係数の最大値 (0.054)、摩擦特性を規定するパラメータ $\alpha = 5.0$ 、 $\beta = 0.4$ とした。

尚、免震装置レール部復元力の第一勾配に対応する、本床免震システムの固有周期の解析値は、1次が2.73秒 (0.367Hz)、2次が0.026秒 (38.8Hz) である。

4.2 正弦波加振による基本性能確認

周期1.5秒の正弦波で、加速度振幅を漸増漸減させる加振を行い、変形抑止制御の有無による床免震システムの応答を比較検討した。

変形抑止の制御パラメータは、以下のように設定した。

$$c_{init} = c_0 = c_{min} = 0.1149 \text{ kN} \cdot \text{s/cm}, c_{max} = 1.0 \text{ kN} \cdot \text{s/cm}$$

$$\Delta c = 0.0025 \text{ kN} \cdot \text{s/cm} \text{ (増加時)}, 0.00125 \text{ kN} \cdot \text{s/cm} \text{ (減少時)}$$

$$x_{dT} = 1.5 \text{ cm}, \Delta T = 0.375 \text{ s} \text{ (加振周期の } 1/4 \text{ に設定)}, \text{制御周波数 } 200 \text{ Hz}$$

本制御を用いると、正弦波加振時の免震床の応答変形は、基準振幅値 x_{dT} に対して、下式の値に自動調整される (以下、この振幅値 x_{ad} を調整振幅と呼ぶ) ことが明らかにされており^{25), 28)}、本ケースでは1.26cmである。

$$x_{ad} = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{x_{dT}}{\sqrt{1 + \left(\frac{2\pi}{T} \cdot \Delta T\right)^2}} \quad \dots\dots\dots (1)$$

写真2 床免震システムの外観

図6 床免震システムの試験体図面

ここで、 T は制御対象の卓越周期に合わせれば良い。通常は、1次固有周期に設定すれば良いが、本例では加振周期に合わせて1.5秒とした。

図8に入力加速度と免震床の応答加速度、応答変形、減衰係数の指令値の時刻歴波形を示す。非制御では応答変形が大きく増幅するのに対し、制御により減衰係数が変化し、応答加速度は若干大きくなるものの、応答変形はほぼ調整振幅以内に制御されていることがわかる。

4.3 地震波加振による性能実証

ダンパーの制御を行わない (アンロード) 場合、減衰係数を一定に制御する場合、変形抑止制御を行う場合の各々について、振動台

(a) El-Centro1940NS 加振

(b) Hachinohe1968NS 加振

図 11 入力加速度と最大応答

(a) El-Centro1940NS 加振 (400Gal)

(b) Hachinohe1968NS 加振 (400Gal)

図 12 実験結果のシミュレーション

揮させて、それ以上の加速度レベルで変形抑止が始まる設定にした
が、基準振幅値を増減することで、免震効果を発揮させる入力加速
度レベルが調整可能である。

(3) シミュレーション

El-Centro1940NSとHachinohe1968NSの400Gal加振について、免
震床の応答加速度、応答変形、ダンパー減衰力、減衰係数、制御指
令電圧の時刻歴波形と、ダンパーのピストン速度-減衰力関係をシ
ミュレーションした結果を図12に例示する。解析では、制御指令
電圧に応じた減衰力が発生するまでの時間遅れとして、3.1の減衰
係数制御の場合と同じ10msecを考慮している。

免震床の応答変形の増減に応じて減衰係数が切り替っており、減
衰係数が大きな所では応答加速度も増大するが、それ以外では減衰
係数は小さくなり、応答加速度が低減している。また、解析結果と
実験結果は良く対応しており、設定した力学モデルの妥当性が検証
された。

5. 可変減衰ダンパーの制御法II

3.2で提示した可変減衰ダンパーの制御法は、減衰係数を制約内
で連続的に切換える方法であるが、使用する可変減衰ダンパーの構
造によっては減衰係数が不連続的に数段階にしか切換えられない場
合も想定される。免震床の変形が増大する可能性がある場合に、直
ちに最大減衰係数に切換えて変形を抑止する方法も、実用的には意
義があると思われる。そこで、最も極端なケースとして、減衰係数
が2段階にのみ切換え可能な（以下、2値切換え制御と呼ぶ）可変
減衰ダンパーを用いた変形抑止制御について検討を行った。

5.1 2値切換え制御

2値切換え制御のアルゴリズムを図13に示す。Step6までは図5
に提示したアルゴリズムと同じであり、Step7を下記の通り修正し
ている。

Step7: 減衰係数 c_i が $c_{\min}$ の場合は、ダンパー減衰係数を下限値 $c_{\min}$
に設定し、それ以外の場合は上限値 $c_{\max}$ に設定する。

5.2 振動台実験による性能実証

2値切換え制御と3.2の連続可変制御の性能比較を行った。振動
台実験の実験条件は以下に示す通り、4.3の地震波加振の場合と同
様である。

(1) 実験条件

加振波: El-Centro1940NS, Hachinohe1968NS

入力加速度: 50Gal から 400Gal まで 50Gal ピッチで増加

2値切換え制御: ダンパー減衰係数の上限値 $c_{\max}$ を0.5kN・s/cm 及び
1.0kN・s/cm の2種類に設定した。その他のパラメータは4.3の変形
抑止制御と同じに設定した。

(2) 実験結果

El-Centro1940NSとHachinohe1968NS加振の各々について、入力
加速度に対する最大応答加速度と最大応答変形を比較して図14に
示す。図中には、アンロードと減衰係数一定制御（減衰係数
 $c=1.0\text{ kN}\cdot\text{s}/\text{cm}$ ）、並びに4.3の連続可変制御の結果を合わせて示し
ている。両地震波加振共に150Gal加振までは、アンロードと同じ
最大応答を示している。200Gal加振以上では、最大応答変形は頭打
ちになる傾向が見られ、400Gal加振時の最大応答変形は、アンロー
ドの50%以下に低減されている。一方、最大応答加速度は、

図13 2値切換え制御アルゴリズム

$c_{\max}=1.0\text{ kN}\cdot\text{s}/\text{cm}$ の場合は急激に増加し、 $c_{\max}=0.5\text{ kN}\cdot\text{s}/\text{cm}$ の場合は
比較的緩やかに増加している。

最大応答変形の抑止効果は、連続可変制御に比べると若干劣って
おり、入力加速度レベルの増加とともに比例的に変形が増加する傾
向が見られる。しかし、 $c_{\max}=0.5\text{ kN}\cdot\text{s}/\text{cm}$ の場合は、概ね連続可変制
御に近い効果が得られており、減衰係数を2値に切換える制御でも
実用的には十分な性能が得られる場合もあると考えられる。

(3) シミュレーション

El-Centro1940NSの400Gal加振について、免震床の応答加速度、
応答変形、ダンパー減衰力、減衰係数、制御指令電圧の時刻歴波形
と、ダンパーのピストン速度-減衰力関係をシミュレーションした
結果を図15に例示する。 $c_{\max}=0.5\text{ kN}\cdot\text{s}/\text{cm}$ に設定している。

減衰係数が最大値に切換えられるタイミングを含めて、解析結果
と実験結果は概ね良く対応しており、設定した力学モデルの妥当性
が検証された。

6. まとめ

可変減衰ダンパーを用いて免震構造物の過大変形を抑止する制御
法を開発し、床免震システムへ適用して、その有用性を振動台実験
により実証した。本研究の成果は以下の通りまとめられる。

- 1) 可変減衰ダンパーの制御に、アクティブマスダンパーの振幅制
御用に開発した可変ゲイン制御法を援用し、ダンパー変形の基準振
幅値と一定時間後の予測振幅値を時々刻々比較して減衰係数を制御
することにより、過大変形を抑止する制御法を開発した。従来のス
トッパー式の変形抑止方法では、衝撃的な過大加速度が生じる危険
が指摘されて来たが、本制御によりこのような危険を回避して、確
実に過大変形を抑止する効果が期待できる。
- 2) 開発した制御法により、免震構造物の応答加速度と応答変形の

(a) El-Centro1940NS 加振

(b) Hachinohe1968NS 加振

図 14 入力加速度と最大応答

El-Centro1940NS 加振 (400Gal)

図 15 実験結果のシミュレーション (2 値切換え制御)

トレードオフを考慮して、性能調整できる効果を実証した。すなわち、ダンパー変形の基準振幅値を調整することにより、許容変形値と免震効果を発揮させる入力地震動の加速度レベルを調整することが可能である。

3) 可変減衰ダンパーと床免震システムの精度の高い力学モデルを構築し、振動台実験の結果を精度良くシミュレーションできることを実証した。

4) 本研究では、減衰力が無段階に制御可能なオイルダンパーを使用した。減衰係数を多段に切換えるダンパーへも本制御は適用可能であり、減衰係数を 2 値に切換える制御の有効性を振動台実験により検証した。

なお、本論文では、床免震システムを対象として実証実験を行ったが、振動台性能とダンパー性能の制約から、地震波加振では 1 次固有周期成分が充分励起されない、加振周期が卓越するような条件下での実証実験となった。本制御法は建屋免震を含む幅広い免震システムを適用対象とするものであり、長周期地震動により過大変形が生じる可能性がある、建屋免震に適用した場合の性能については、別途解析的な検討結果を報告する予定である。

参考文献

- 1) T. H. Heaton, J.F.Hall, D.J.Wald and M.W.Halling: Response of high-rise and base-isolated buildings in a hypothetical MW7.0blind thrust earthquake. Science 267, 206-211,1995.
- 2) J.F.Hall, T.H.Heaton, M.W. Halling and D.J.Wald: Near-Source Ground Motion and its Effects on Flexible Buildings. Earthquake Spectra, 11, No.4, 569-605,1995.
- 3) 梶井文史, 迫谷政則, 久田嘉章: 衝突を考慮した免震構造物の弾塑性応答解析, 日本建築学会学術講演梗概集, B-2, 構造II, 527-528, 2000.
- 4) 宮崎光生, 水江正: 震源近傍の地震動に対して免震構造は対応可能か?, 第 28 回地震動シンポジウム, 日本建築学会, 119-136, 2000.
- 5) T. Kobori, M. Takahashi, T. Nasu, N. Niwa: Seismic Response Controlled Structure with Active Variable Stiffness System. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 22(9), 925-941,1993.
- 6) N. Kurata, T. Kobori, M. Takahashi, N. Niwa, H. Midorikawa: Actual Seismic Response Controlled Building with Semi-active Damper System. Earthquake

- Engineering & Structural Dynamics, 28(11), 1427-1447, 1999.
- 7) 栗野治彦, 田上淳, 清水幹: エネルギー吸収能力最大化を目的としたセミアクティブオイルダンパ, 第2回日本制震(振)シンポジウム, 77-84, 2000.
 - 8) 西谷章, 仁田佳宏, 池田芳樹, 伊藤敦史, 欄木龍大: 可変スリッパベルダンパの概念によるセミアクティブ振動制御に関する基礎的研究, 日本建築学会構造系論文集, 558, 93-100, 2002.
 - 9) 藤田隆史, 壁矢和久, 速水浩, 相沢寛, 東野雅彦, 久保智史, 羽生田信良, 森孝之: 可変摩擦ダンパを用いたセミアクティブ免震構造の研究(第1報 可変摩擦ダンパの開発とセミアクティブ制御システムの基礎的研究), 日本機械学会論文集C編, 57(536), 1122-1128, 1991.
 - 10) M.Q. Feng, M. Shinozuka, S. Fujii: Friction-controllable Sliding Isolation System, Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 119(9), 1845-1864, 1993.
 - 11) 藤田隆史, 榊和彦, 洞宏一: ピエゾアクチュエータを用いた摩擦力制御形アクティブ・ブレースによる構造物の振動制御に関する基礎的研究, 日本機械学会論文集C編, 63(614), 3467-3471, 1997.
 - 12) J.A. Inaudi: Modulated Homogeneous Friction: A Semi-active Damping Strategy. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 26(3), 361-376, 1997.
 - 13) B.F. Spencer Jr., S.J. Dyke, M.K. Sain, J.D. Carlson: Phenomenological Model for Magnetorheological Dampers. Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 123(3), 230-238, 1997.
 - 14) L.M. Jansen, S.J. Dyke: Semiactive Control Strategies for MR Dampers: Comparative Study. Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 126(8), 795-803, 2000.
 - 15) 潘公宇, 松久寛, 本田義久: 磁気粘性流体を用いた減衰可変ダンパによるセミアクティブ振動制御, 日本機械学会論文集C編, 67(656), 978-984, 2001.
 - 16) 岩田範生, 曾田五月也, 袖山裕, 砂子田勝昭, 藤谷秀雄: バイパス式MRダンパの力学特性に関する実験的研究, 第2回日本制震(振)シンポジウム論文集, 15-20, 2000.
 - 17) 森下信, 浦環: 構造物のセミアクティブ制振システム, アクティブ制震(振)シンポジウム論文集, 325-332, 1992.
 - 18) 福喜多輝, 田村和夫, 林章二, 柴慶治: 電気粘性流体を用いた回転型可変減衰装置のセミアクティブ制御に関する研究, 構造工学論文集, 41B: 23-32, 1995.
 - 19) B. Zhao, X. Lu, M. Wu, Z. Mei: Sliding Mode Control of Buildings with Base-isolation Hybrid Protective System. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 29(3), 315-326, 2000.
 - 20) 三東儀洋, 鈴木隆典, 吉田和夫: 外乱包含双線形最適切換え面を用いたスライディングモードセミアクティブ免震, 日本機械学会論文集C編, 68(674), 2851-2858, 2002.
 - 21) G. Leitmann: Semiactive control for vibration attenuation. J. Intelligent Mat. Sys. and Struct., 5, 841-846, 1994.
 - 22) S.J. Dyke, B.F. Spencer, M.K. Sain and J.D. Carlson: Modeling and control of magnetorheological dampers for seismic response reduction, Smart Mat. and Struct., 5, 565-575, 1996.
 - 23) J.N. Yang, J.-H. Kim, A.K. Agrawal: Resetting Semiactive Stiffness Damper for Seismic Response Control. Journal of Structural Engineering, ASCE, 126(12), 1427-1433, 2000.
 - 24) 内田勝, 村田充, 原靖彦, 梶谷泰史: 電磁比例リリーフ弁方式セミアクティブ・サスペンションシステム, カヤバ技報, 第26号, 30-33, 2003.
 - 25) 長島一郎, 西山正三, 篠崎祐三: アクティブマスダンパーを用いた建物の振動制御(その2), 日本建築学会構造系論文集, 第483号, 39-49, 1996.
 - 26) Q. Feng, M. Shinozuka, S. Fujii and T. Fujita: A hybrid isolation system for bridges, The first U.S.-Japan workshop on earthquake protective systems for bridges, 323-336, 1992.2.
 - 27) A. Mokha, M. Constantinou and A. Reinhorn: Teflon bearings in aseismic base isolation: Experimental studies and mathematical modeling. NCEER-88-0038, 1988.12.
 - 28) I. Nagashima et. al.: Performance of hybrid mass damper system applied to a 36-storey high-rise building. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 30(11), 1615-1637, 2001.

(2003年7月10日原稿受理, 2003年12月4日採用決定)