

可変減衰ダンパーを用いた高性能免震技術の開発

長島 一郎*¹・欄木 龍大*¹・日比野 浩*¹・高木 政美*¹

Keywords : *semiactive damper, oil damper, base-isolation, computer, displacement control*

可変減衰ダンパー, オイルダンパー, 免震構造, コンピュータ制御, 変形抑止

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⁾。また、国内で近い将来に発生が懸念されている東海地震でも、長周期の地震動が生起する可能性が指摘されている。一方、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²⁾。

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、オイルダンパー³⁾、摩擦ダンパー^{4)、5)}、MRダンパー^{6)、7)}等を利用する可変減衰システムが研究・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^{4)、8)}。

筆者等は可変減衰システムとして、減衰性能が制御可能なオイルダンパー(以下、可変減衰ダンパーと呼ぶ)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、半導体工場用免震床の模型実験システムに適用して、振動台実験により有効性を実証した。また、1999年台湾・集集地震の際に記録された長周期地震動に対して、10階建てRC免震構造物の応答変形が、変形抑止制御により許容範囲に抑制される効果をシミュレーション解析により検証した。

筆者等は既に、可変減衰ダンパーの実建物への適用も始めており⁹⁾、2004年3月には建物の加速度低減による居住性向上に主眼を置いたダンパー制御技術を開発し、レベル2地震動まで制御を継続する、世界初の可変減衰型免震システムとして、建築センター審査会の認定を取得した。

加速度低減技術に関する内容紹介は、別の機会に譲ることとし、本論文では過大变形抑止技術の開発に関連した内容を紹介する。

2. 可変減衰ダンパー

可変減衰ダンパーには、電磁弁の開閉で減衰係数を多段に切替える方式(以下、減衰係数制御と呼ぶ)と、リリーフ弁の圧力を制御する方式(以下、減衰力制御と呼ぶ)がある。図-1に減衰係数制御のメカニズムを示す。

本ダンパーは、図中に示す通りシリンダーが二重構造で、ピストン伸縮時に油が常に一定方向に流れる。油の流路中に図中上に示す調圧弁とリリーフ弁が組み込まれてお

*1 技術センター建築技術研究所防災研究室

り、電磁弁の開閉により調圧弁を通過する油量を制御して、減衰係数を切換えることが出来る（図-2(a)）。

また、電磁比例リリーフ弁を用いてリリーフ弁の圧力を制御して、リリーフ荷重を制御する方式もある（図-2(b)）。後述する床免震システムの変形抑止制御では、このタイプのダンパーを使用した¹⁰⁾。

3. 変形抑止制御¹¹⁾

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、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¹¹⁾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して、過大変形を抑止する制御法を開発した。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。

制御アルゴリズムを図-4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を設定する。

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

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

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

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

$$\beta_i = \left| \frac{\tilde{x}_d}{X_{dr}} \right| - 1.0$$

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. 変形抑止制御の床免震システムへの適用

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、床免震システムを対象として、振動台による

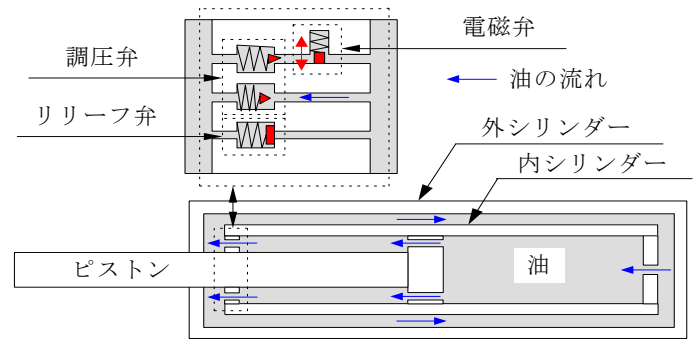


図-1 可変減衰ダンパーのメカニズム
Mechanism of variable oil damper

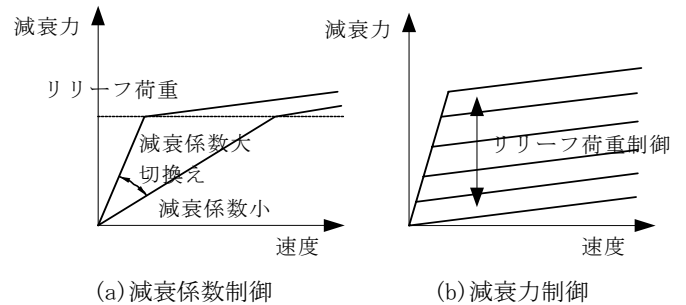


図-2 可変減衰ダンパーの特性
Characteristics of variable damper

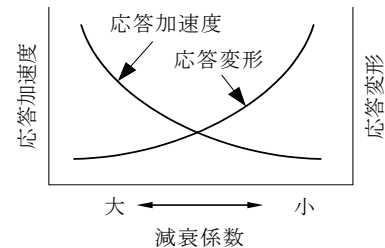


図-3 応答加速度と応答変形のトレードオフ
Trade-off between response acceleration and displacement

性能実証実験を実施した。尚、加振実験は水平1方向に対して行った。

4.1 床免震システムの概要

床免震システムと可変減衰ダンパーの外観を各々写真-1と写真-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。本ダンパーは減衰力制御型のダンパーであるが、ダンパー速度に応じてリリーフ荷重を時々刻々切換えることで、減衰係数を無段階に切換え可能なダンパーとして使用した。尚、本ダンパーにはアンロード弁が付いており、減衰力がほぼ0の状態も実現できる。

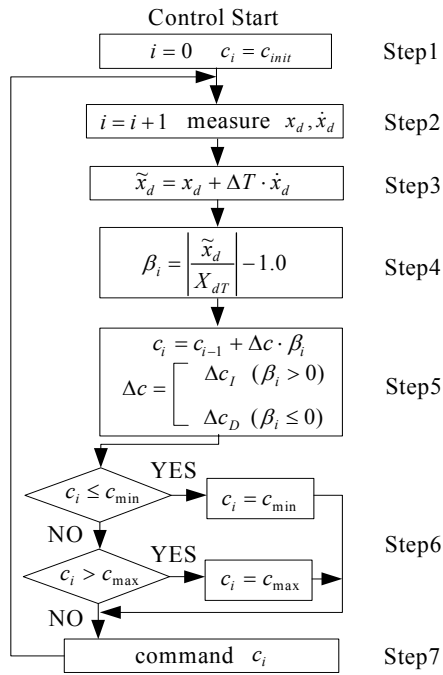


図-4 変形抑止制御のアルゴリズム
Displacement control algorithm

床免震システムの試験体図面を図-5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。円弧状の免震装置レール部の復元力に対応する、本床免震システムの1次固有周期の解析値は、2.73秒(0.367Hz)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。

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

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

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

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、この振幅値を調整振幅と呼ぶ)ことが明らかにされており^{11)、13)}、本ケースでは1.26cmである。

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

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-6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



写真-1 床免震システムの外観
Floor isolation system

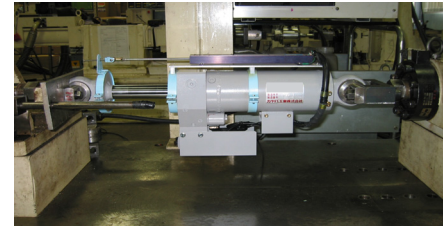


写真-2 可変減衰ダンパーの外観
Variable oil damper

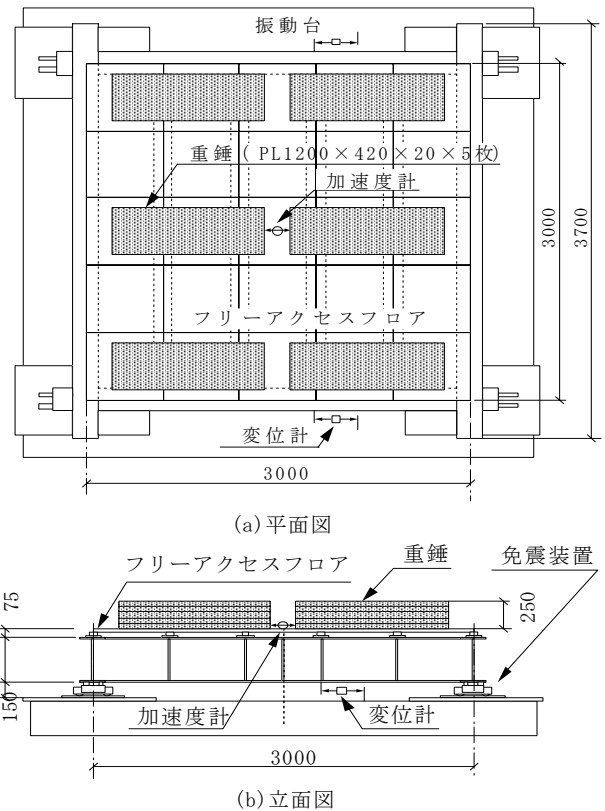


図-5 床免震システムの試験体図面
Floor isolation system for shaking table test

とがわかる。

4.3 地震波加振による性能実証

(1) 実験条件

加振波 : E1-Centro1940NS、Hchinohe1968NS

入力加速度 : 50Gal から 400Gal まで 50Gal ピッチで増加
ダンパーをアンロードにした状態から制御を開始し
($c_{init} = c_0 = c_{min} = 0.0263kN \cdot s/cm$)、減衰係数が初めて増加

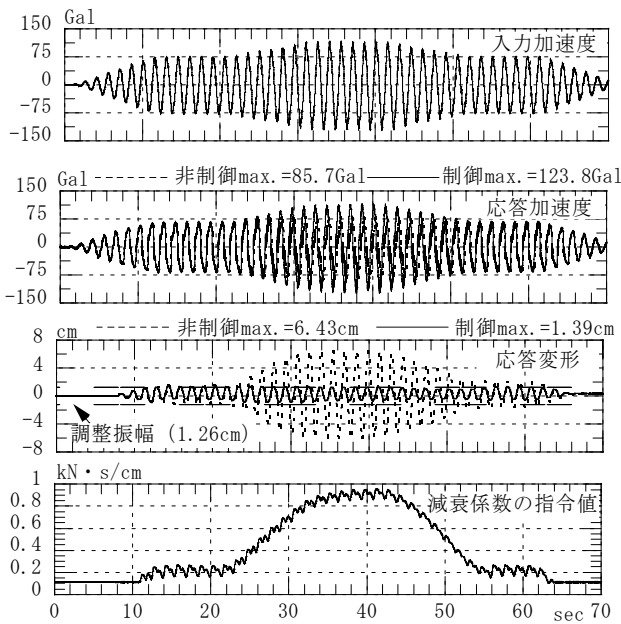


図-6 時刻歴波形（正弦波加振）
Floor responses (Sinusoidal excitation)

($\beta_i > 0$) した時点以後はアンロード弁を閉じて ($c_{\min} = 0.1149 \text{ kN} \cdot \text{s/cm}$; 減衰定数で34%に相当) 制御を行った。その他のパラメータは以下のとおり設定した。

$\Delta c = 0.125 \text{ kN} \cdot \text{s/cm}$ (増加時)、 $0.003 \text{ kN} \cdot \text{s/cm}$ (減少時)、 $X_{dt} = 4.0 \text{ cm}$ 、 $\Delta T = 0.25 \text{ sec}$ 、制御周波数 200Hz

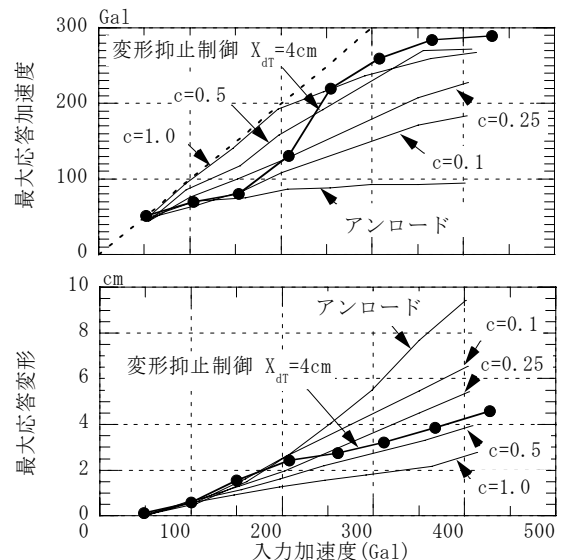
(2) 実験結果

El-Centro1940NS と Hchinohe1968NS 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-7に示す。変形抑止制御の場合、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。一方、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、最大応答加速度は、アンロードに比べて徐々に大きくなるが、図中に示す点線を越えないことから、入力加速度よりも増幅はしていない。両加振共に、300Gal加振以上ではダンパー減衰力がリリーフ荷重に達したため、変形抑止効果が若干低下するものの、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。

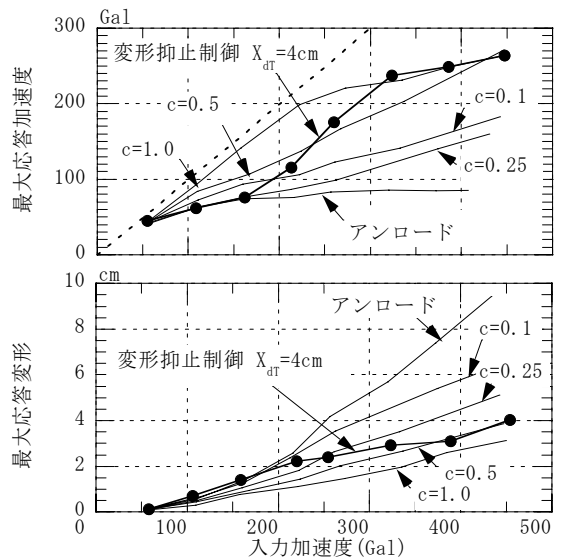
本実験では入力加速度が150Gal程度までは通常の免震効果を発揮させて、それ以上の加速度レベルで変形抑止が始まる設定にしたが、基準振幅値を増減することで、免震効果を発揮させる入力加速度レベルが調整可能である。

5. 変形抑止制御の建屋免震への適用

本章では、長周期成分が極めて優勢な地震動を対象として、すべり支承と積層ゴムを用いた複合免震構法へ可変減衰ダンパーを適用した場合の有効性をシミュレーション解



(a) El-Centro1940NS 加振



(b) Hachinohe1968NS 加振

図-7 入力加速度と最大応答
Maximum responses

析によりケーススタディした結果について述べる。

5.1 建物モデルと入力地震動

図-8に示すように、RC造10建て基礎免震建物を想定した。上部構造は11質点の等価剪断モデルで、復元力特性は武田モデル、減衰は上部構造に対して1次モードで2%の剛性比例減衰とした。表1に上部構造モデルの固有周期および減衰定数を示す。入力地震動は、1999年台湾・集集地震の際に観測された石岡 (TCU068) および新街 (TCU129) である。表1に入力地震動の最大値を、図-9及び図-10に入力地震動波形と応答スペクトルを各々示す。石岡の記録では1秒以上の長周期成分が、新街の記録では0.5秒以下の短周期成分が卓越しており、建築基準法の応答スペクトルを大きく上回っている。

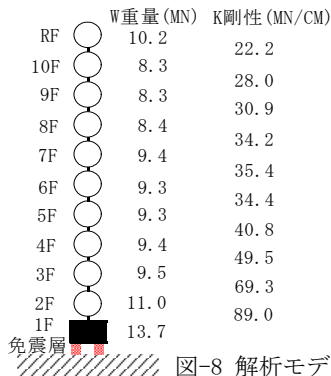
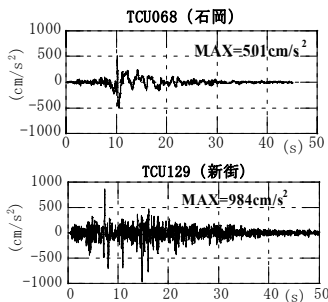
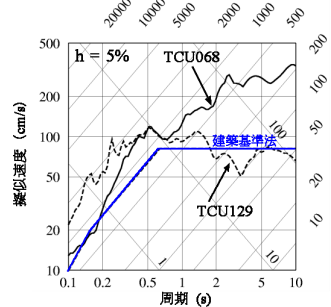
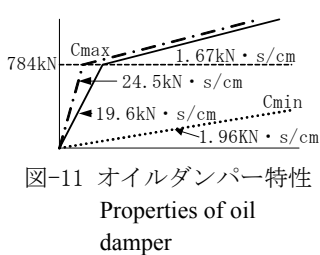
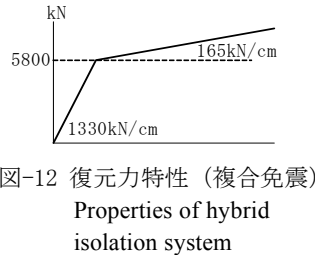


図-8 解析モデル

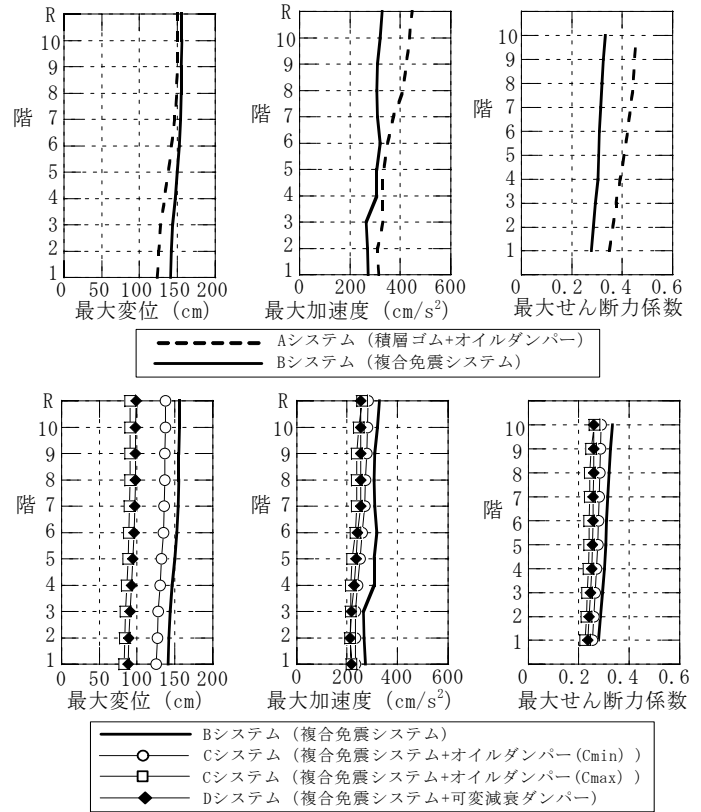
Building model

図-9 入力地震動波形
Input accelerations図-10 擬応答スペクトル
Pseudo response spectrum図-11 オイルダンパー特性
Properties of oil damper図-12 復元力特性 (複合免震)
Properties of hybrid isolation system

5.2 免震システムモデル

以下のシステムモデルを想定した。

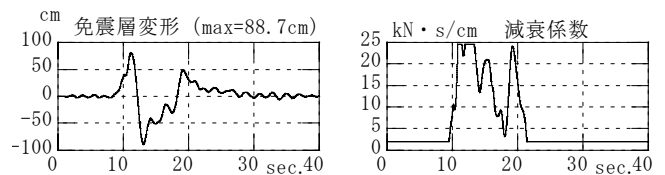
- 1) Aシステム (積層ゴム+オイルダンパー) ; 全体1次固有周期を4秒、1次モード減衰を36%に設定した。図-11に示す通り、減衰係数の1次勾配 $19.6 \text{ kN} \cdot \text{s/cm}$ 、リリース荷重 784 kN のオイルダンパーを6台設置する。
- 2) Bシステム (複合免震システム; 弾性すべり支承+積層ゴム) ; すべり前の全体1次固有周期を1.78秒、すべり後の2次勾配に対する固有周期を5.1秒に設定する。復元力特性を図-12に示す。
- 3) Cシステム (複合免震システム+オイルダンパー) ; Bシステムに、リリース荷重 784 kN のオイルダンパーを6台付加する。減衰係数として $1.96 \text{ kN} \cdot \text{s/cm}$ (Cmin) と $19.6 \text{ kN} \cdot \text{s/cm}$ (Cmax) の2種類を設定する。Cmin と Cmax に対応したダンパー特性を図-11中に示す。
- 4) Dシステム (複合免震システム+可変減衰ダンパー) ; Cシステムのオイルダンパーを可変減衰ダンパーに置換して、減衰係数の変化範囲を $1.96 \text{ kN} \cdot \text{s/cm}$ (Cmin) ~ $24.5 \text{ kN} \cdot \text{s/cm}$ (Cmax) に設定する。



(a) 最大応答 (石岡)

(b) 最大応答 (新街)

図-13 最大応答値分布
Maximum response distribution

図-14 Dシステムの可変減衰ダンパー時刻歴波形 (石岡)
Responses of variable oil damper for system D

s/cm (Cmax) に設定する。

5.3 応答解析結果と考察

5.3.1 石岡 (TCU068) に対する応答解析

通常の免震構造物の応答例として、A、Bシステムの最大応答値の解析結果を図-13(a)上段に示す。A、Bシステムで各々 123 cm 、 141 cm の最大変位が免震層に生じている。Aシステムの最大変位は若干小さいが、その分上部構

造の最大加速度と最大せん断力係数が增大している。これは積層ゴムの復元力が増加するためである。

Cシステムでは図-13(a)下段に示す通り、オイルダンパー減衰係数を C_{max} に設定すると、免震層の最大応答変位は82.8cmに抑制される。また、最大加速度とせん断力係数も共に減少する。減衰係数が增大すると、一般に高次モードに対する地震動の振動伝達率が上がり、加速度応答が増大するが、長周期成分が優勢な本地震に対しては、ダンパー減衰係数が大きいほど加速度応答も減少する傾向がある。また、 C_{min} 時はBシステムに近い応答結果である。

Dシステムの変形抑止制御パラメータを以下の通り設定した。； $\Delta c = 0.098kN \cdot s/cm$ 、 $X_{dT} = 40cm$ 、 $\Delta T = 1.0sec$

図-13(a)下段中にDシステムの解析結果を示すが、ほぼCシステムの C_{max} に近い応答結果である。図-14に免震層の変形と、ダンパー減衰係数の時刻歴波形を示す。免震層変形に応じて減衰係数が増減し、最大変形が抑制される効果が確認できる。

5.3.2 新街(TCU129)に対する応答解析

B、C、Dシステムの応答解析結果を図-13(b)に示す。本地震ではオイルダンパーの減衰係数が大きいと高次モードに対する振動伝達率が上がり、加速度応答が増大する。本事例のように免震層変形が過大にならない場合は、変形抑止制御では減衰係数が増加しないため、Dシステムで減衰係数を C_{min} に設定したのと同等の応答結果である。

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。また、長周期成分が卓越する地震動に対する免震構造物の変形抑止制御に適用し、有効性をシミュレーション解析により検証した。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) 長周期地震動に対して安全な免震構造物を設計することは原理的に可能であっても、通常の地震に対する免震性能が低下する問題点が指摘されていた²⁾。可変減衰ダンパーを採用すれば、長周期地震動で免震層の変形が過大に

なる場合は、減衰係数が増加して応答変形が抑制され、一方、短周期成分が卓越する地震動に対しては、減衰係数が小さく設定されて加速度応答が低減される。状況に応じた理想的な免震性能が実現できる。

変形抑止制御は、新設の免震構造物はもちろん、変形制限のある既存建物の免震レトロフィットへも適用可能と考えられる。可変減衰ダンパーは既に、建築基準法の免震材料の認定を取得している。本論文では紹介しなかったが、加速度抑止制御と共に、今後は次世代の免震技術として積極的に展開を図る予定である。

参考文献

- 1) T. H. Heaton, J.F.Hall, D.J.Wald and M.W.Halling : FResponse of high-rise and base-isolated buildings in a hypothetical MW7.0blind thrust earthquake. Science 267, pp.206-211,1995.
- 2) 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回地盤震動シンポジウム, 日本建築学会, pp.119-136, 2000.
- 3) 西谷章, 仁田佳宏, 池田芳樹, 伊藤敦史, 欄木龍大 : 可変スリップレ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, pp.93-100, 2002.
- 4) M.Q.Feng, M.Shinozuka and S.Fujii : FFricition controllable Sliding Isolation System, Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 119(9), pp.1845-1864, 1993.
- 5) 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), pp.3467-3471, 1997.
- 6) B.F.Spencer Jr., S.J.Dyke, M.K.Sain and J.D.Carlson : Phenomenological Model for Magnetorheological Dampers. Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 123(3), pp.230-238,1997.
- 7) 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
- 8) 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), pp.2851-2858, 2002.
- 9) Shinozaki et.al. : An advanced base-isolation system for irregular buildings, 13th WCEE, Vancouver, 2004.8.
- 10) 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, pp.30-33, 2003.
- 11) 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, pp.39-49, 1996.
- 12) 長島一郎, 欄木龍大, 日比野浩, 高木政美 : 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, 日本建築学会構造系論文集, 第577号, pp.37-45, 2004.
- 13) I.Nagashima et. al. : Performance of hybrid mass damper system applied to a 36-storey high-rise building. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 30(11), pp.1615-1637, 2001.