

# フレキシブル免震の開発

## Development of FLEXIBLE BASE-ISOLATION SYSTEM

舟木秀尊\* 川井伸泰\*\* 安井健治\* 山上 聡\*

### 要 旨

従来の免震構法の性能を更に向上させる技術として、「フレキシブル免震」を開発した。フレキシブル免震は、免震建物の揺れをセンサーで検知し、揺れに応じてダンパーの減衰特性をコンピュータ制御により切り換えるセミアクティブ免震システムである。本システムの性能を検証するために、外部から磁界をかけると減衰力が変化する MR 流体を用いた可変粘性ダンパーを採用し、振動実験を行った。その結果、免震層の応答変位を従来のパッシブ免震と同等に抑制しながら、建物の応答加速度を更に低減できることを確認した。また、振動実験の結果と MR ダンパーの特性を適切にモデル化した応答解析の結果は良く一致しており、制御手法と解析方法の妥当性を確認した。

キーワード：免震建物、セミアクティブ制御、可変粘性ダンパー、振動実験、応答解析

### 1. まえがき

免震構法は、地震時に建築物の応答が低減する技術として広く普及している。近年では、多種多様な免震装置が開発され、免震構法が実用化された当初は難しいとされた超高層や軟弱地盤上の免震建物も増えている。一方、長周期成分を含む大地震が発生した際に、これらの免震建物が大きく揺れて、地盤と建物間に生ずる変形量が増大することが懸念されている。この問題に対して、敷地条件の制約によって十分なクリアランスの確保が難しい場合には、変形量を抑制するためのダンパーを増設するなどして対応できる。しかし、免震建物の応答変位と応答加速度には、減衰係数を介してトレードオフの関係があるので、減衰係数を増やすことで変形量を抑制すると免震効果が低下する可能性がある。

このような課題に対応できる技術として、図-1に示すように、免震建物の揺れをセンサーで検知し、揺れに応じてダンパーの減衰特性をコンピュータ制御により切り換え、免震建物の応答変位や応答加速度を低減するセミアクティブ免震（以降、フレキシブル免震と呼ぶ）を開発した。本報では、フレキシブル免震の性能に関する検討として、流体に外部から磁界をかけると減衰力が変化する MR 流体を用いた可変粘性ダンパー（以下、MR ダンパーと称する）の単体実験と MR ダンパーを適用した免震模型による振動実験の結果、ならびに実在の免震建物を想定した質点系の解析モデルによる地震応答解析の結果について報告する。

### 2. フレキシブル免震システム

#### 2.1 可変減衰ダンパー

セミアクティブ免震システムに用いられる一般的な減衰装置には、可変摩擦ダンパーや可変減衰ダンパー<sup>1)</sup>がある。これらの装置は、指令信号に基づいて減衰力を調整することができる。本研究では、模型振動実験に用いる可変減衰ダンパーとして MR ダンパーを採用した。MR ダンパーは、制御信号により電流を入力すると、その電流に応じて減衰力を変化させることができる。

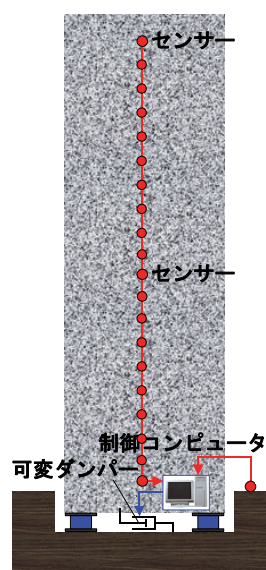


図-1 概念図

## 2.2 MR ダンパーの単体実験

実験に用いた MR ダンパーを図-2に、諸元を表-1に示す。本ダンパーは、3 A の電流を印加することで最大 0.8 kN の減衰力を発生させることができる。単体実験は、動的な载荷とし、MR ダンパーのピン両端部を加振装置と反力治具に設置して行った。また、MR ダンパーの減衰力の特徴を把握するため、印加電流を実験パラメータ (0~3 A) とした。印加電流と減衰力の関係を図-3に示す。実験に用いた加振波は、正弦波 (0.67 Hz、±120 mm) であり、加振中の速度は一定でない。印加電流と減衰力には概ね比例関係があり、入力電流 1 A に対して 0.17 kN の減衰力が発生することを確認した。また、0 A と 3 A の STEP 信号を与えた三角波加振 (10 kine、±11.5 cm) におけるパソコンからの制御信号と MR ダンパーへの入力電流の関係を図-4に示す。制御信号に対する入力電流の反応は 0.05~0.10 秒の時間遅れがあり、MR 流体の流動抵抗と合わせて、制御信号から減衰力の発生までには遅れが生じている。

## 2.3 制御の方法

本研究におけるセミアクティブ制御則には、最適レギュレータ理論<sup>2)</sup>を用いた。質点系の運動方程式を MR ダンパーの減衰力を外力とすることで線形化し、最適レギュレータにより最適な外力を算出する。運動方程式は式(1)で与えられる。

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} + [F]\{u\} = -[M]\{1\}\ddot{y}_0 \quad \dots (1)$$

[M]: 質量行列、[C]: 減衰行列、[K]: 剛性行列、[F]: 制御力配置行列、{x}: 各層の相対変位、{u}: 制御力、 $\ddot{y}_0$ : 地動加速度

一方、評価関数  $J$  を式(2)のように設定する。ただし、 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  は、それぞれ応答加速度、応答変位、制御力に対する重み行列である。

$$J = \int_0^{\infty} (\alpha(\ddot{x} + \ddot{y}_0)^2 + \beta \cdot x^2 + \gamma \cdot u^2) dt \quad \dots (2)$$

式(1)から得られるシステムの状態方程式を、地動加速度を外乱とみなし (形式的に  $\ddot{y}_0 = 0$  とおく)、式(3)のように表す。

$$\dot{X} = AX + Bu \quad \dots (3)$$

次に、式(3)に対する評価関数  $J$  を式(4)とする。ただし、 $Q$ 、 $S$ 、 $R$  は、重み行列である。

$$J = \int_0^{\infty} (X^T Q X + 2X^T S u + u^T R u) dt \quad \dots (4)$$

ここで、式(3)、式(4)からなる最適レギュレータ問題を解いて最適操作量  $u^*$  を求めると、式(5)となる。

$$u^* = -R^{-1}(B^T P + S^T) X \quad \dots (5)$$

ただし  $P$  は、式(6)のリカッチ方程式の解である。

$$P(A - BR^{-1}S^T) + (A - BR^{-1}S^T)^T P - PBR^{-1}B^T P + (Q - SR^{-1}S^T) = 0 \quad \dots (6)$$

ところで、セミアクティブ制御に用いる可変ダンパーは、免震装置の相対速度と同じ方向の力を発生できないので、実際の制御は式(7)に従って行われる。

$$u = \begin{cases} u^* & (u^* x \geq 0) \\ 0 & (u^* x < 0) \end{cases} \quad \dots (7)$$

なお、本研究において、可変ダンパーの減衰力をセミアクティブ制御とする際、2種類の制御方法について検討している。ひとつは、計算で得られた最適な制御力をそのまま発生できるセミアクティブ制御であり、これを無段階制御と称している。もう一つは、切り替え可能な減衰係数が2値である可変減衰ダンパーを想定し、計算で得られた最適な制御力が、設定された閾値よりも上回るか下回るかで2段階に減衰係数を切り替えるセミアクティブ制御であり、これを2値切り替え制御と称する。

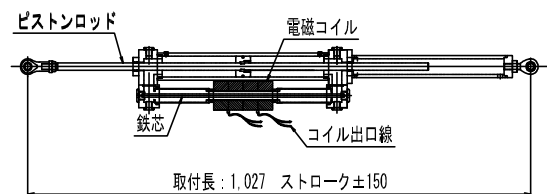


図-2 MR ダンパー

表-1 MR ダンパーの諸元

項目	内容
シリンダ内径	φ40 mm
ロッド径	φ14 mm
ストローク	±150 mm
最大減衰力	1 kN
コイル印加電流	3.0 A
コイル抵抗	14.6 Ω
コイルインダクタンス	40.4 mH
作動油	LOAD社 MRF-132DG

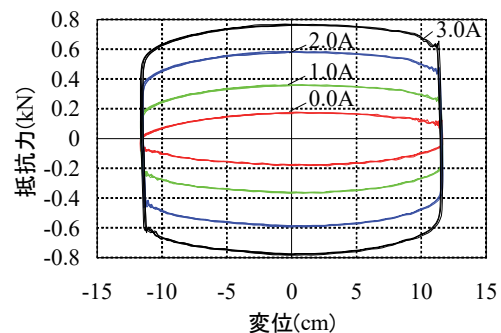


図-3 印加電流と減衰力の履歴特性

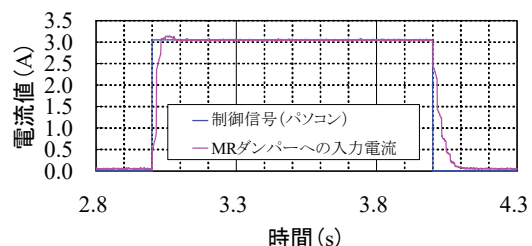


図-4 制御信号と入力電流の関係

### 3. 模型振動実験

#### 3.1 実験の概要

フレキシブル免震の性能を検証するため、模型を用いた振動実験を行った。模型の概要を図-5に示す。模型は、各層のおもりをバネ鋼板で連結した3質点モデルと、スライドテーブルならびにコイルバネで造られる免震装置（固有周期 2.0 秒）により構成され、高さが約 2 m、重量は約 720 kg である。振動実験の状況を写真-1に示す。免震装置および MR ダンパーとも 1 方向の加振実験を想定した試験体である。実験では、振動台と模型各層の加速度、模型各層における層間変形量、免震装置の相対変位、MR ダンパーの減衰力、制御用パソコンからの指令信号を計測した。実験のパラメータは、MR ダンパーによる減衰係数の設定と入力地震波とした。

#### 3.2 制御方法

振動実験におけるセミアクティブ制御のフローを図-6に示す。制御ゲインの算定において、各層毎の重み係数は同一とした。評価対象の重み係数は、制御モデルの複素固有値解析結果において、1 次固有周期を変えずに減衰定数が 25%となることを確認した。また、セミアクティブ制御は、上部構造の状態量（相対速度、相対変位）に応じて MR ダンパーに電流を与えた。最適制御力の計算に用いる相対変位と相対速度は、測定された各層の層間変形量をもとに算出した。なお、計算で得られた制御力と相対速度の方向が異符号の場合に対しては指令値をゼロとした。減衰力の切替えは、計算された最適制御力がそのまま得られるように指令する無段階制御と、閾値を設定して最適制御力が閾値よりも大きい小さいかによって 2 段階の減衰係数から選択する 2 値切替え制御の 2 ケースとした。

さらに、フレキシブル免震の効果を検証するために、パッシブ免震（減衰 5%、減衰 25%）の実験を行った。減衰 5%のパッシブ免震は MR ダンパーへの指令信号をゼロとした。減衰 25%では MR ダンパーを制御することによってパッシブ免震を模擬し、免震層の相対速度から減衰 25%の減衰係数に相当する減衰力を求め、その減衰力を得るための印加電流を指令信号として与えた。

#### 3.3 入力地震波

振動台入力波は、2003 年十勝沖地震の札幌市内の建物における EW 方向観測波 70 gal（札幌波）と 2008 年岩手県内陸地震の KiK-net 一ノ関西における EW 方向観測波 600gal（一ノ関波）の 2 種類とした。入力加速度のレベルは、免震装置の応答変位が 10 cm 程度になるように設定した。加振波の応答スペクトルを図-7に示す。札幌波は免震装置の応答変位が大きくなる 1 次固有周期（2.0 秒）の成分を、一ノ関波は模型頂部の応答加速度が大きくなる 2 次固有周期（0.5 秒）の成分を多く含んだ入力波である。

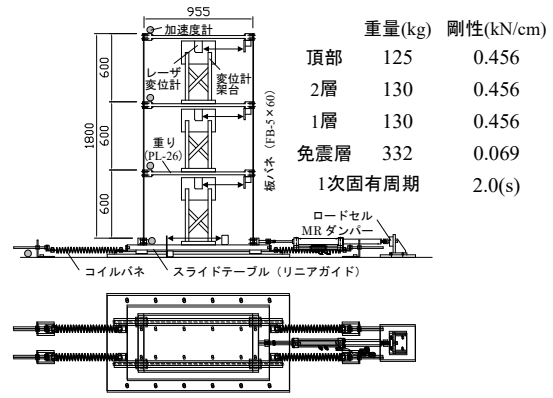


図-5 模型の概要

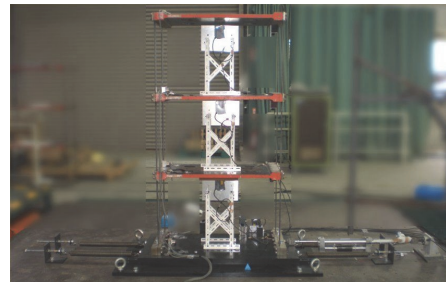


写真-1 振動実験の状況

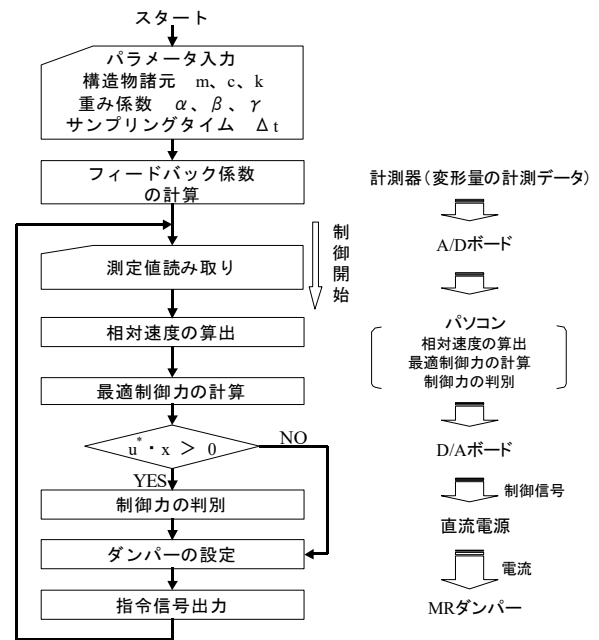


図-6 振動実験の制御フロー

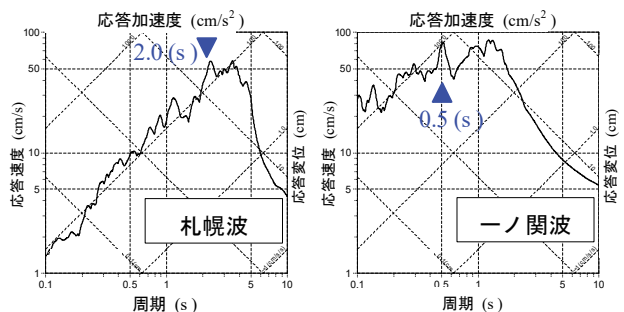


図-7 加振波の応答スペクトル

### 3.4 実験結果

パッシブ免震（減衰 5%、減衰 25%）とフレキシブル免震（無段階制御、2 値切替え制御）の比較として、模型頂部の最大応答加速度と免震装置の最大応答変位を図-8に示す。パッシブ免震では、札幌波における減衰 5%の応答変位が減衰 25%に比べて 2 倍近くになる一方、一ノ関波においては減衰 25%の頂部の応答加速度が減衰 5%に比べて 24%程度大きくなる。フレキシブル免震では、無段階制御と 2 値切替え制御とも応答変位は減衰 25%のパッシブ免震と同等に抑制している。また、頂部の応答加速度を比較すると、札幌波と一ノ関波の双方において無段階制御のフレキシブル免震の応答がパッシブ免震も含めて最も小さい。特に免震 2 次固有周期に近い成分を多く含む一ノ関波では、無段階制御のフレキシブル免震の応答加速度が減衰 25%のパッシブ免震に比べて 20%程度低減されており、制御の効果が表れている。2 値切替え制御のフレキシブル免震では、無段階制御ほどではないがパッシブ免震よりも応答変位と応答加速度をバランス良く低減している。

一ノ関波における頂部の応答加速度のフーリエスペクトルを図-9に示す。減衰 25%のパッシブ免震では免震 2 次固有振動数(1.9Hz)の成分が励起されているが、フレキシブル免震ではこれが抑制されており、最大応答値を低減する要因となっている。一ノ関波における時刻歴応答波形を図-10に示す。MR ダンパーの減衰力が制御信号により刻々と可変している状況が確認できる。これらの結果から、無段階制御および 2 値切替え制御のフレキシブル免震が、免震層の応答変位を従来のパッシブ免震と同等に抑制しながら、建物の応答加速度を更に低減できることを確認した。

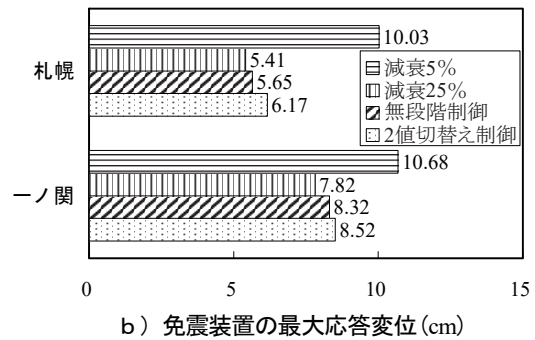
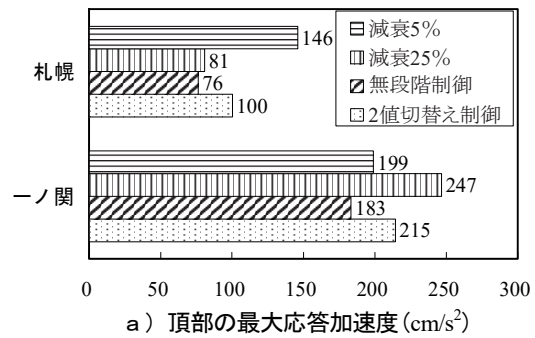


図-8 最大応答値の比較

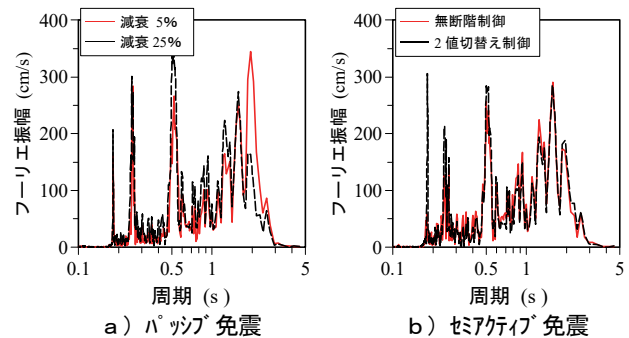


図-9 頂部の応答加速度のフーリエスペクトル

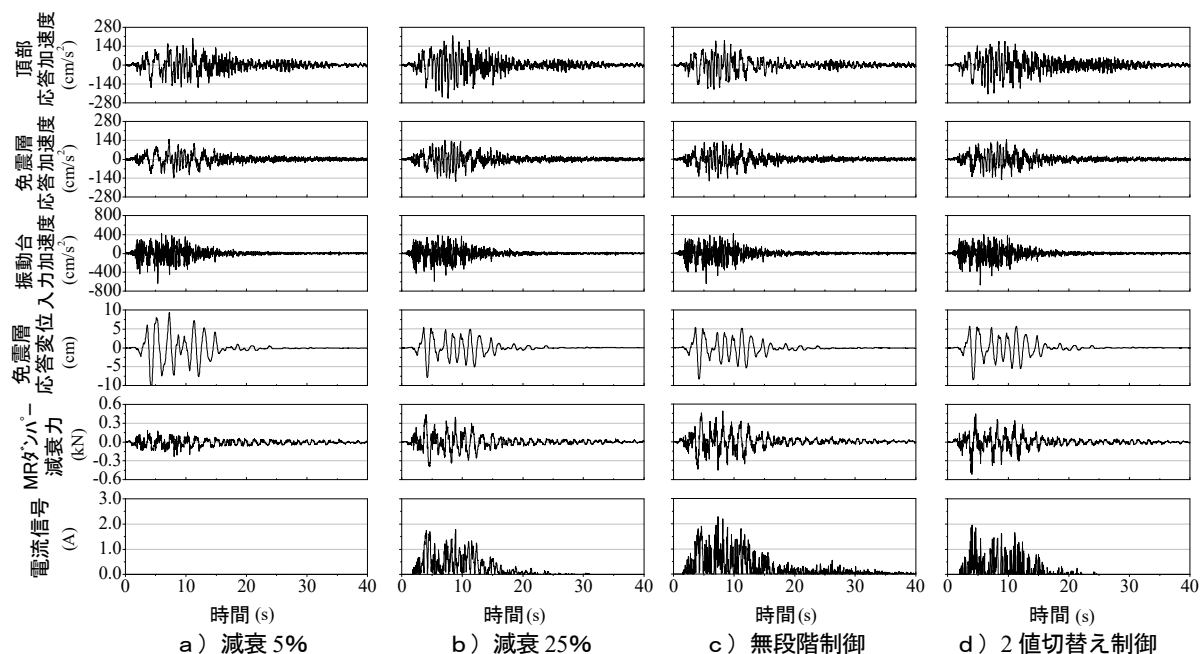


図-10 時刻歴応答波形（一ノ関波）

### 3.5 解析値との比較

模型振動実験を対象として地震応答解析を行った。解析モデルを図-11に示す。また、振動模型と解析モデルの比較として、入力波をランダム波とした頂部の応答加速度におけるフーリエスペクトル比を図-12に示す。解析モデルの固有振動数は、振動模型と概ね一致している。免震層のダッシュポットとして設定した減衰モデルを図-13に示す。パッシブ免震では、減衰5%と減衰25%に相当する減衰係数を設定した。フレキシブル免震では、最適制御力そのまま発揮できる無段階制御と、最適制御力に対して減衰係数を2種類(減衰5%、減衰25%)から選択される減衰2値切替え制御とした。減衰2値切替えのモデル化について図-14に示す。実験と同様に、計算によって求められた最適制御力と免震層速度の関係が設定した閾値(減衰係数20%相当)よりも大きければ減衰25%に、小さければ減衰5%の減衰係数に切り替えるモデルとした。

解析結果と実験結果を比較して、無段階制御のフレキシブル免震におけるダンパー減衰力と速度の関係を図-15に示す。解析結果は実験結果と良く対応しており、入力波によらずダンパー速度に対する減衰力の変化を再現できている。次に、ダンパー減衰力と免震層変形の関係を図-16に示す。解析結果は、札幌波および一ノ関波とも実験結果の履歴曲線と概ね一致している。時刻歴応答波形の実験値と解析値について、無段階制御のフレキシブル免震における札幌波の結果を一例として図-17に示す。時刻歴応答波形の解析結果は、実験結果の波形および最大値を再現しており、制御ゲインの設定に用いた解析モデルとそのゲインを用いた制御の妥当性を確認できた。さらに、減衰2値切替え制御のフレキシブル免震について、一ノ関波の応答値を比較して図-18に示す。減衰2値切替え制御の解析モデルについても実験値と対応し、想定通りの履歴特性を示していることから、解析方法の妥当性が確認できた。

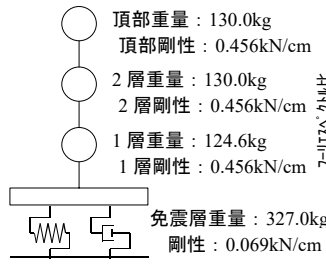


図-11 解析モデル

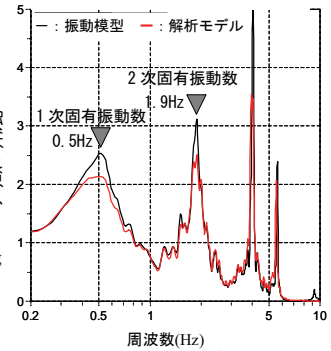


図-12 フーリエスペクトル比

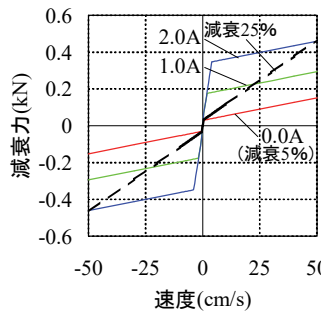


図-13 減衰モデル

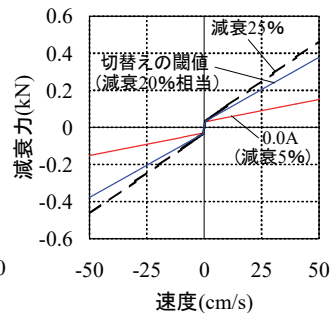
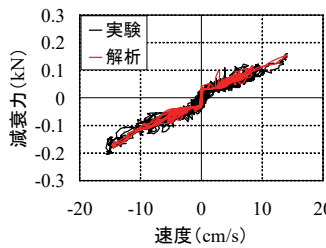
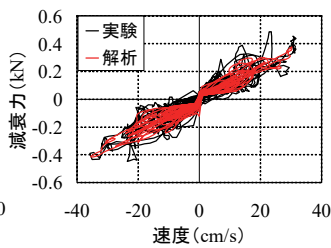


図-14 減衰2値切替え

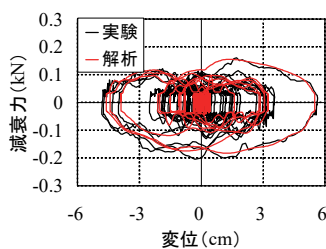


a) 札幌波

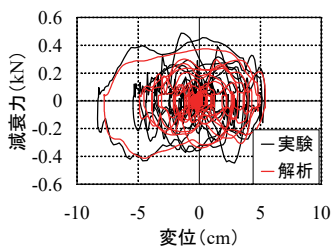


b) 一ノ関波

図-15 ダンパー減衰力と速度の関係(無段階制御)



a) 札幌波



b) 一ノ関波

図-16 ダンパー減衰力と免震層変形の関係(無段階制御)

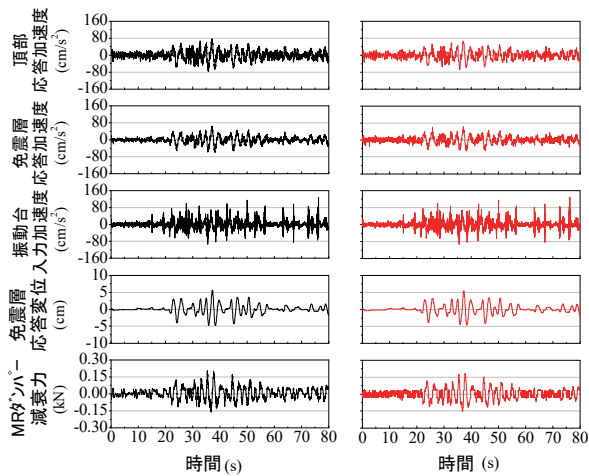
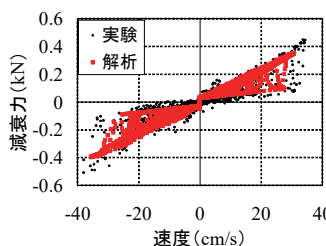
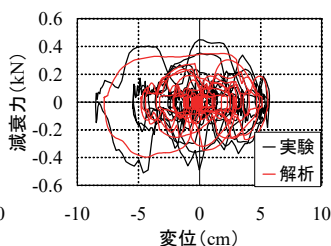


図-17 実験値と解析値の時刻歴応答波形(無段階制御、札幌波)



a) 減衰力-速度



b) 減衰力-変位

図-18 減衰2値切替え制御の応答比較(一ノ関波)

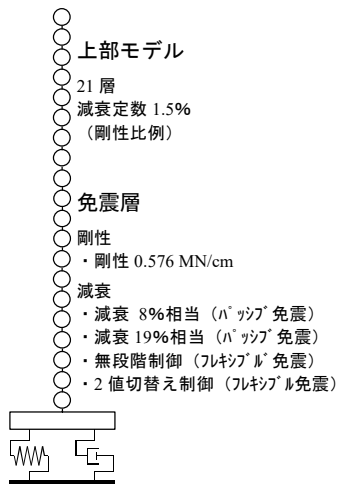


図-19 解析モデルの概要

表-2 モデルの諸元

	層質量 $W_i$ (t)	せん断剛性 $K$ (MN/cm)
21層	1503	36.4
20層	901	31.8
19層	898	30.9
18層	897	30.8
17層	897	30.8
16層	904	30.9
15層	904	31.2
14層	904	32.5
13層	904	35.2
12層	904	35.5
11層	904	35.6
10層	904	35.7
9層	904	35.8
8層	904	35.9
7層	904	36.1
6層	904	37.3
5層	904	38.9
4層	904	40.8
3層	907	51.5
2層	1149	78.5
1層	1957	0.576

#### 4. シミュレーション解析

実際の免震建物を参考にして、鉄筋コンクリート造の免震建物（21層、高さ70m）をモデル化し、シミュレーション解析を行った。解析モデルの概要を図-19に、モデルの諸元を表-2に示す。入力波は前述の札幌波と、2004年新潟県中越地震のK-NET小千谷におけるEW方向観測波（小千谷波）の2種類とした。小千谷波は、解析モデルの2次固有周期(0.71秒)の成分を多く含んだ入力波である。解析パラメータは、パッシブ免震（減衰8%、減衰19%）とフレキシブル免震（無段階制御、2値切替え制御）とした。

シミュレーション解析の結果について、免震層の減衰力と速度の関係を図-20に、応答値比較を図-21に示す。フレキシブル免震の2値切替え制御に用いる減衰係数の閾値は、減衰17%相当に設定している。減衰力と速度の関係から、フレキシブル免震における減衰力の切り替えは、札幌波に対しては地震中の殆どにおいて減衰力が大きくなるように制御し、小千谷波に対しては応答加速度を低減するために減衰力を頻繁に切り替えていることが確認できた。また、フレキシブル免震では、パッシブ免震に比べて免震層の応答変位を抑制しつつ、上部構造の応答加速度を低減した。

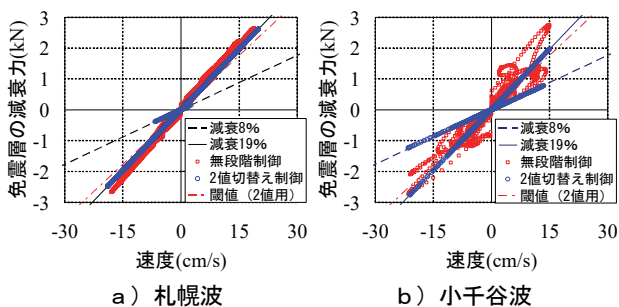
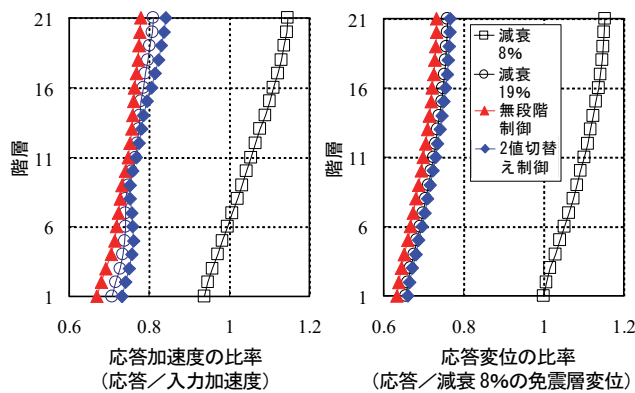
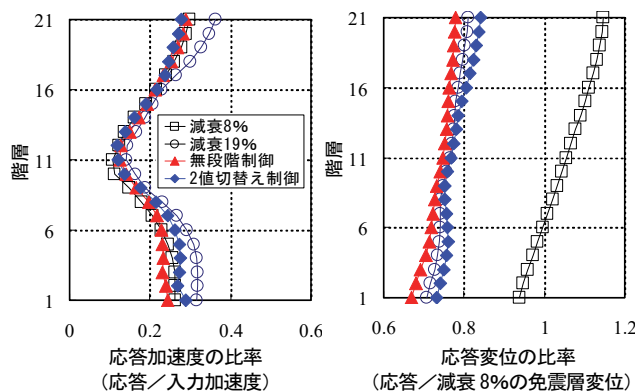


図-20 減衰力と速度の関係



a) 札幌波



b) 小千谷波

図-21 シミュレーション解析の応答値比較

#### 5. まとめ

パッシブ免震とフレキシブル免震について、模型振動実験とそれを再現した応答解析を行い、応答性状を比較した。その結果、最適レギュレータ理論に基づくフィードバック制御を用いたフレキシブル免震は、免震層の応答変位を従来のパッシブ免震と同等に抑制しながら、建物の応答加速度を更に低減できることを確認した。また、実験と解析結果は良く一致しており、制御方法と解析方法の妥当性が確認できた。

#### 6. あとがき

今回の実験により、MRダンパーを用いたセミアクティブ免震についての性能を検証することができた。今後は、可変減衰オイルダンパーを使用したセミアクティブ免震システムについても検討していきたい。

#### 【参考文献】

- 1) 佐藤栄児、藤田隆史「MR流体を用いた可変粘性ダンパーによる建築構造物のセミアクティブ免震」、日本機械学会論文集(C編)、72巻、717号、pp.24-30、2006.5
- 2) 杉本博史、安倍勇、早川邦夫、安井健治、舟山勇司「セミアクティブ制御に関する研究(その3. 制振装置および制御方法)」、日本建築学会学術講演梗概集、pp.1113-1114、1991.9