

可変減衰オイルダンパーを用いたセミアクティブ免震構造の開発

DEVELOPMENT OF SEMI-ACTIVE BASE-ISOLATION SYSTEM UTILIZING VARIABLE DAMPING DEVICE

石田 琢志*, 渡壁 守正**, 谷地 畝和夫***, 稲井 慎介*
 Takushi ISHIDA, Morimasa WATAKABE, Kazuo YACHIUNE and Shinsuke INAI

This paper proposes a semi-active control system with oil dampers which changed damping factor according to seismic response integrated for base-isolated buildings. It is easy for the proposed system to control only the displacement response of base-isolated story. In this paper, the design concept, control system, control performance, simulation analysis and experimental results by Full-Scale vibration tests are discussed.

By building up the proposed control scheme, the dynamic responses of the base isolation system under seismic excitations are predicted. The predicted results are compared with the measured ones to validate the effectiveness and prediction accuracy of the model. The comparative studies show the proposed semi-active control scheme possesses good prediction accuracy.

The results obtained from the proposed scheme demonstrate that this control algorithm can reduce the base displacement without increasing the base acceleration.

Keywords : *Semi-Active Base-Isolation, Variable Damping Device, Control Algorithm, Hysteresis Control, Full-Scale Vibration Tests*

セミアクティブ免震, 可変減衰オイルダンパー, 制御アルゴリズム, 履歴制御, 実大振動実験

1. はじめに

ダンパーの減衰性能を応答量に応じて変化させるセミアクティブ免震は、建物に生じる加速度と変形を効果的に低減させる手段として注目され、これまでに様々な制御則が提案されている。しかしながら、その多くは最適制御理論等^{例え¹}の建物の正確なモデル化を必要とする制御則であり、建物の応答量をモニタするセンサが複数台必要となる上、制御演算も複雑である。そこで、筆者らは、免震層の変形のみを制御パラメータとした簡便な制御則に着目し、開発した電気信号による 2 値切換型の可変減衰オイルダンパー（以下、可変減衰オイルダンパー）を用いた実大規模の振動実験とシミュレーション解析によりその制御性能を検証した。本稿ではまず、開発した可変減衰オイルダンパーの基本性能と、免震層の変形のみを制御パラメータとする簡便な制御則について示す。続いて、上記のダンパーと制御則を用いた実大振動実験と、その実験を模擬したシミュレーション解析について報告する。最後に、本制御則を実建物に適用した場合のシミュレーション解析について報告する。

2. 可変減衰オイルダンパー

2.1 ダンパーの構造

オイルダンパーには、ダンパーの伸び、縮み時に作動油の流れの方向が異なるバイフロー型ダンパーと、流れの方向が一方向となるユニフロー型ダンパーがある。ここでは、ユニフロー型ダンパーをベースにした可変減衰オイルダンパーを開発した。

ユニフロー型ダンパーは、アウターシリンダ、インナーシリンダ、ピストンロッド及びピストンを主要構成部品とし、ピストンの受圧面積とピストンロッドの断面積を 2:1 にし、ダンパーの伸び、縮み時の作動油の流れの方向が同じとなるようにバルブを構成したダンパーである。通常ユニフロー型ダンパーの減衰力は、調圧弁を作動油が通過するときに発生するが、開発した可変減衰オイルダンパーは、電磁弁により作動油の通路をバイパスさせることで、減衰力の切換が可能な構造とした。可変減衰オイルダンパーの概略図を図-1 に示す。

ユニフロー型ダンパーは、アウターシリンダ、インナーシリンダ、ピストンロッド及びピストンを主要構成部品とし、ピストンの受圧面積とピストンロッドの断面積を 2:1 にし、ダンパーの伸び、縮み時の作動油の流れの方向が同じとなるようにバルブを構成したダンパーである。通常ユニフロー型ダンパーの減衰力は、調圧弁を作動油が通過するときに発生するが、開発した可変減衰オイルダンパーは、電磁弁により作動油の通路をバイパスさせることで、減衰力の切換が可能な構造とした。可変減衰オイルダンパーの概略図を図-1 に示す。

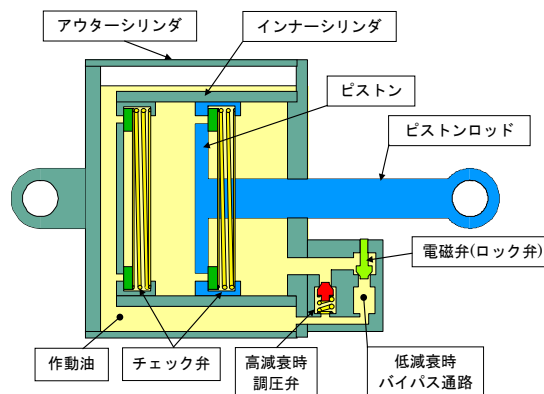


図-1 可変減衰オイルダンパーの概略図

* 戸田建設(株)技術研究所 修士 (工学)

** 戸田建設(株)技術研究所 工学博士

*** 戸田建設(株)構造設計部

Technical Research Institute, TODA CORPORATION, M.Eng.

Technical Research Institute, TODA CORPORATION, Dr.Eng.

Structural Design Dept., TODA CORPORATION

ダンパーの減衰係数は、本来は後述する 5.1.3 項に示す方法により決定するが、ここでは切換による応答性能の差がより明確となるよう、高減衰（以下、CH）は実現可能な範囲内で最大の 2kNs/cm とし、低減衰（以下、CL）はバイパス通路の圧損のみのほぼ 0kNs/cm とした。各減衰係数を図-2 に示す。なお、最大 70cm/s の高速対応の免震ダンパーをベースにしたため、8cm/s 以下の低速時における減衰力 F_d は、設計値よりも低い傾向を示した。また、減衰係数は CH を基本状態とすることで、停電・故障時等における安全性を確保する仕様とした。

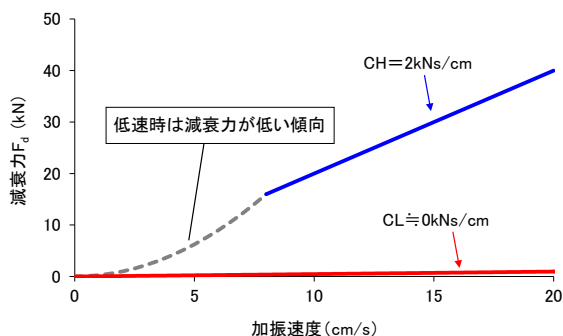


図-2 減衰係数

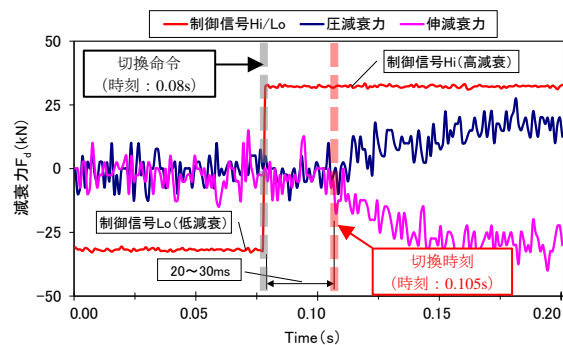
2.2 ダンパー性能確認試験

可変減衰オイルダンパーは、電氣的に指令を与えて減衰係数を切換るダンパーであり、切換指令を与えてから減衰力に変化するまでには時間遅れが生じる。こうした時間遅れは、制御則を選択するうえでの重要な要素となり、免震性能に大きな影響を与えることが懸念される。そこで、時間遅れを三角波加振によるダンパー単体試験により評価した。加振条件を表-1 に示す。

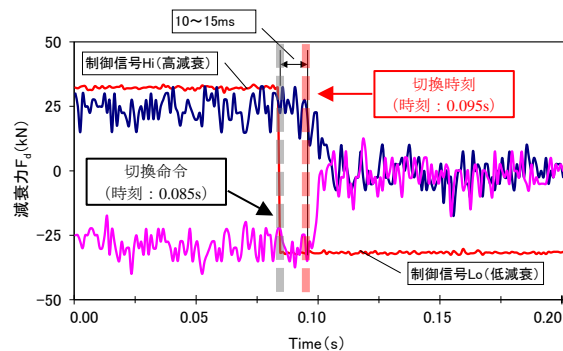
表-1 加振条件

減衰力切換方向	加振速度 (cm/s)	加振波
CH → CL	13, 26, 45	三角波
CL → CH	13, 26, 45	三角波

加振速度 13cm/s 時の試験結果を代表例として図-3 に示す。ダンパーの伸び、縮み方向ともに CL から CH への時間遅れはおよそ 20~30ms であった。一方、CH から CL 切換時の時間遅れは 10~15ms 程度であった。CL→CH と CH→CL の時間遅れの違いは、作動油の圧力と体積弾性係数の関係によるもので、CL から CH に切換ってからしばらくは圧力が上昇しないことによる。なお、紙幅の都合上図示しないが、加振速度 26cm/s、45cm/s の試験においても同様の結果が得られた。また、図-4 に示した各加振ケースから求めた減衰力-速度関係より、設計値通りの減衰力が得られていることを確認した。



(a) 減衰力切換：CL→CH



(b) 減衰力切換：CH→CL

図-3 ダンパー減衰力切換試験結果（加振速度：13cm/s）

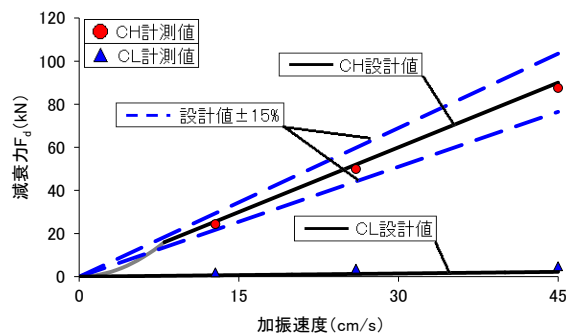


図-4 ダンパーの減衰力-速度関係

3. 制御則

2章で示したダンパーの性能確認試験より、減衰係数を切換た際の時間遅れは 10~30ms と短く、切換が頻繁な制御則にも適用可能であると判断できた。そこで、本検討では、下記に示す制御則を用いることとした。

免震層の応答変形と建物の応答加速度を効果的に低減することを目的に、EF 制御²⁾などダンパーの減衰力-変形関係の履歴形状を制御する、MR ダンパーによるセミアクティブ免震が提案されている³⁾。本検討では、この制御則を 2 値切換型の可変減衰オイルダンパーに応用し、免震層のせん断力が減少する（すなわち、変形も減少する）第 2、4 象限では減衰係数を CH に設定することで効果的なエネルギー吸収を図り、せん断力が増加する（すなわち、変形も増加する）第 1、3 象限では減衰係数を CL に設定することで加速度の増大の抑制を図った。本制御則の概念図を図-5 に示す。なお、本稿では以降、この制御則を「MinMax 制御」と称す。

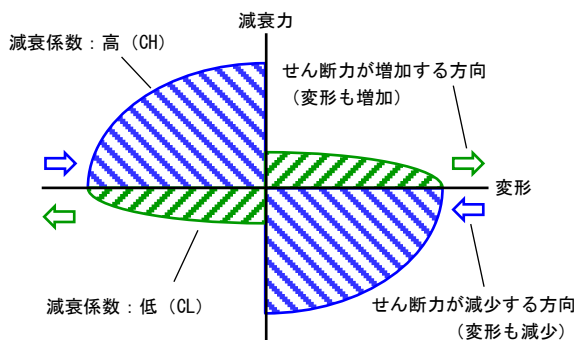


図-5 制御則の概念図

4. 実大振動実験による検証

前述した可変減衰オイルダンパーと制御則を用いた実大規模の振動実験を実施し、その性能を検証した。

4.1 実験概要

4.1.1 試験体および測定概要

試験体の概要を図-6 に示す。試験体は、第 1 層と第 4 層を免震層（以下、それぞれ M1 階、M3 階）とした実大 8 層鉄骨造であり、本実験では、M1 階の免震層を固定した中間層免震試験体を対象とした。可変減衰オイルダンパーは、図-6 (b) に示す通り M3 階の X 方向に設置した。可変減衰オイルダンパーの設置状況を図-6 (a) に併せて示す。なお、本試験体の X 方向の 1 次固有振動数は、事前の測定より約 0.4Hz であった。

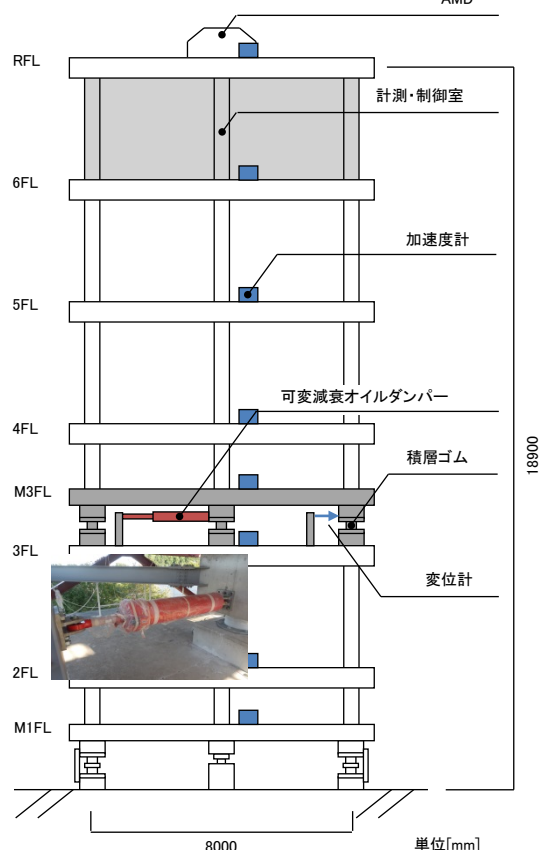
測定はサーボ型加速度計により全階の加速度を、可変減衰オイルダンパーに設置した油圧計によりダンパーの減衰力を、M3 階に設置したレーザー変位計により当該層の層間変形をそれぞれ計測する計画とした。各測定位置を図-6 に併記する。測定時のサンプリング周波数は 100Hz とした。

4.1.2 制御システム概要

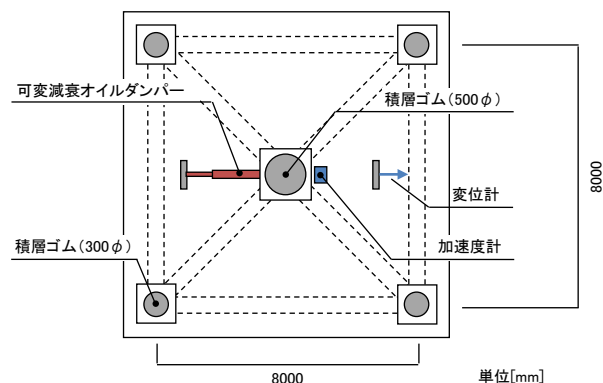
制御システムを図-7 に示す。レーザー変位計により測定した免震層の層間変位のデータを LabVIEW に送信し、10ms 毎にその増減を判定し、上述した制御則に基づき制御 BOX に電圧信号を送る制御システムとした。

4.1.3 加振波の概要

本実験では、頂部階に設置したアクティブマスタダンパー（以下、AMD）を加振装置とする。AMD の加振波は、文献 4) の手法により作成した波に対し、AMD の加振性能内で極力大きな変形を再現できるよう、狭帯域のバンドパスフィルタ処理により、建物の共振周波数帯域（0.4Hz）を取り出すことで作成した。なお、加振方向は X 方向とし、加振波には、建築研究所で観測された東北地方太平洋沖地震の NS 成分（以下、Tohoku 波）と、新東海地震模擬波⁵⁾の EW 成分（以下、Sannomaru 波）を用いた。作成した各 AMD 加振波の時刻歴波形を図-8 に示す。



(a) 断面図



(b) M3 階の平面図

図-6 試験体と測定位置の概要

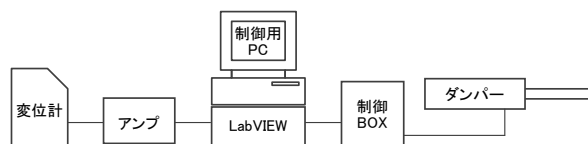
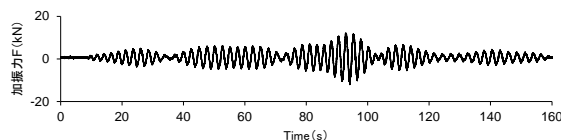
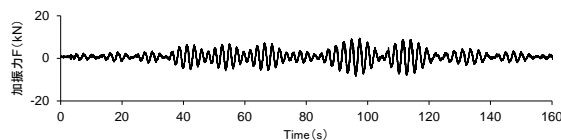


図-7 制御システム



(a) Tohoku 波



(b) Sannomaru 波

図-8 AMD 加振波の時刻歴波形

4.2 実験結果

本実験システムは地盤と建物が固定された状態であるため、絶対加速度の応答評価が行えない。そのため、ここではダンパーの応答特性について報告する。なお、紙面の都合上、4.2、4.3節は Tohoku 波入力時の結果を代表して示すが、Sannomaru 波においても同様の傾向であることを確認している。

MinMax 制御時における M3 階の層間変位と制御信号の時刻歴波形を図-9 に示す。同図より、変形が増加する時には CL に、減少する時には CH に制御信号が切り、本制御システムが正しく作動していることが確認できた。

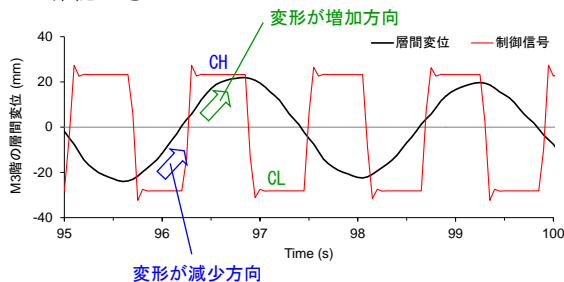


図-9 層間変位と制御信号の時刻歴波形 (Tohoku 波)

また、図-10 に示した減衰力と制御信号の時刻歴波形より、減衰切換時の、減衰力が変化し始めるまでの時間遅れは、CL→CH、CH→CL とともに約 20ms であり、2章で示したダンパー性能確認試験結果と同程度であることが確認できた。

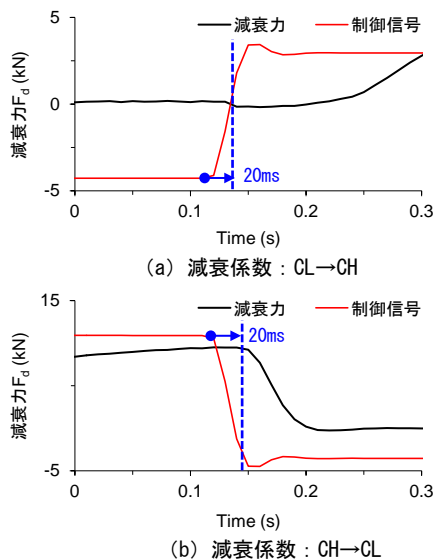
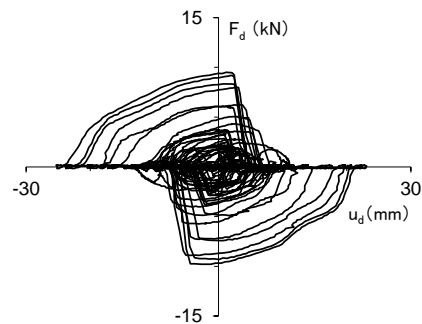
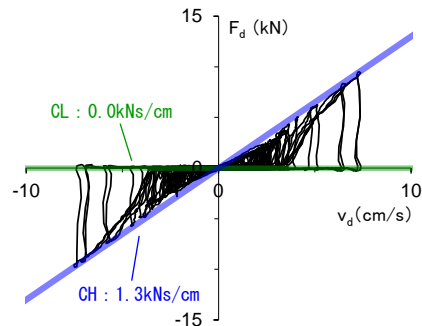


図-10 減衰力と制御信号の時刻歴波形 (Tohoku 波)

続いて MinMax 制御時のダンパーの履歴曲線を図-11 に示す。同図 (a) の減衰力 F_d -変形 u_d 関係から、第 1、3 象限においては CL、第 2、4 象限においては CH となり、本制御則通りダンパーが動作していることが確認できた。また、同図 (b) に示した減衰力 F_d -速度 v_d 関係から、CL の減衰係数はほぼ 0kNs/cm で設計値通りであるが、CH は 8cm/s 以下の低速度のため、前述の図-2 に示した設計値の 2kNs/cm より低い約 1.3kNs/cm であった。



(a) 減衰力 F_d -変形 u_d 関係



(b) 減衰力 F_d -速度 v_d 関係

図-11 ダンパーの履歴曲線 (Tohoku 波)

4.3 実験のシミュレーション解析

実験結果に基づいたシミュレーション解析モデルを作成し、その妥当性を検証した。

解析モデルは、1層を1質点とした8質点系等価せん断型モデルとした。各層の質量は設計値を、剛性は全階の加速度記録から求めた各層の層せん断力-層間変位関係から算出した。また、ダンパーの減衰係数および切換時間は実験から得られた 0.0kNs/cm (CL)、1.3kNs/cm (CH)、20ms をそれぞれ用いた。切換信号と減衰力の時刻歴波形を実験と解析を比較して図-12 に示す。同図より、切換時間を正確にモデル化することで実験と解析の減衰力は概ね良い対応を示すことが確認できた。

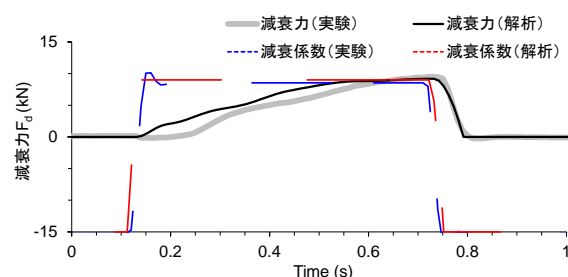


図-12 時間遅れのモデル化 (Tohoku 波)

次に、M3 階の層間変位と相対加速度の時刻歴波形を実験と解析を比較して図-13 に示す。同図より、加速度、変位ともに解析は実験と良好な対応を示すことが確認できた。以上から、上述のモデル化により、本制御則時の応答を精度良くシミュレートできることを確認した。

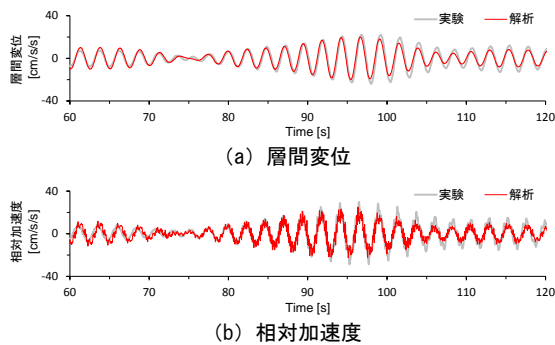


図-13 解析と実験結果の比較 (Tohoku 波)

5. 実建物を想定したシミュレーション解析

ここでは実大建物に本制御則を適用した場合のシミュレーション解析を行い、MinMax 制御の応答低減効果を検証した。

5.1 解析条件

5.1.1 建物モデル

建物モデルは、超高層免震建物と中層免震建物の規模の異なる 2 つの基礎免震建物を対象とした。以下に各建物モデルの作成条件を示す。

- 1) 超高層免震モデルは地上 27 階建てを想定し、建物の 1 次固有周期は 4.0 秒、構造減衰は 1 次固有周期に対し剛性比例型で 3.0% に設定した。
- 2) 中層免震モデルは地上 12 階建てを想定し、建物の 1 次固有周期は 3.0 秒、構造減衰は 1 次固有周期に対し剛性比例型で 2.0% に設定した。
- 3) いずれもせん断多質点系でモデル化し、免震層の構成は積層ゴムとオイルダンパーとした。

上記条件により作成した解析モデルの概要を図-14 に示す。

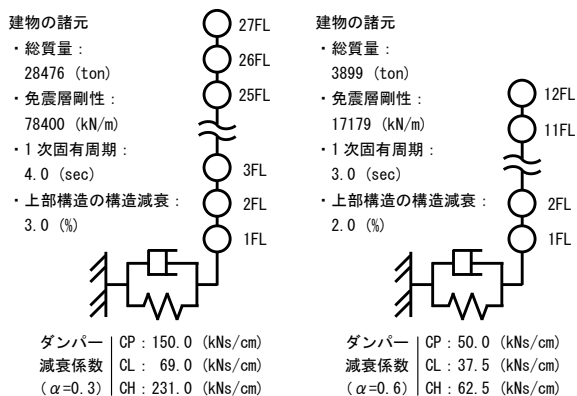


図-14 建物モデルの概要

5.1.2 検討用地震動

地震動は、JMA Kobe 1995 NS (以下、JMA Kobe)、El Centro 1940 NS (以下、El Centro)、Taft 1952 EW (以下、Taft) の既往の観測波 3 波とし、各地震動の最大速度が 50cm/s になるように基準化した。各地震動の加速度フーリエスペクトルを図-15 に示す。

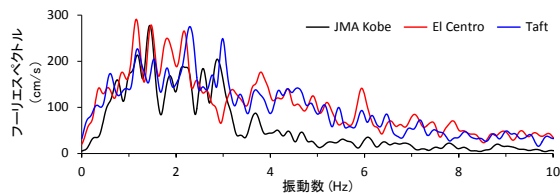


図-15 検討用地震動の加速度フーリエスペクトル

5.1.3 ダンパーの減衰係数

MinMax 制御の比較対象となるパッシブ制御型オイルダンパーの減衰係数 CP は、狭隘な敷地を想定し、上記の地震動入力時の免震層の最大変形が 20cm 程度となるよう、超高層免震モデルは CP = 150kNs/cm、中層免震モデルは CP = 50kNs/cm にそれぞれ設定した。一方、MinMax 制御の低減衰 (CL)、高減衰 (CH) は、ある変形 u_d に対する 1 ループあたりのダンパーの吸収エネルギー W_d がパッシブ制御と同値となるように決定した。上記の条件を満たす MinMax 制御の減衰係数 CH は、下式により求められる。

$$CH = \frac{2}{1+\alpha} CP, \quad \alpha = \frac{CL}{CH} \quad (0 < \alpha < 1) \quad (1)$$

ここでは JMA Kobe を入力とした時の、 α をパラメータとした検討から各建物モデルの CL と CH を決定した。パッシブ制御に対する、MinMax 制御の免震層変位の最大値比率と頂部階加速度の二乗平均平方根 (以下、RMS) 値比率を縦軸、 α を横軸にし、建物モデル毎に求めた結果を図-16 に示す。同図より、建物により応答比率の分布傾向は異なることが確認できる。本検討では、変位と加速度の両者を効果的に低減することを目的として、超高層免震モデルは $\alpha = 0.3$ 、中層免震モデルは $\alpha = 0.6$ を選択した。各建物モデルの減衰係数は図-14 に示した。なお、減衰切換時の時間遅れは、CL→CH、CH→CL とともに実験値と同じ 20ms に設定した。

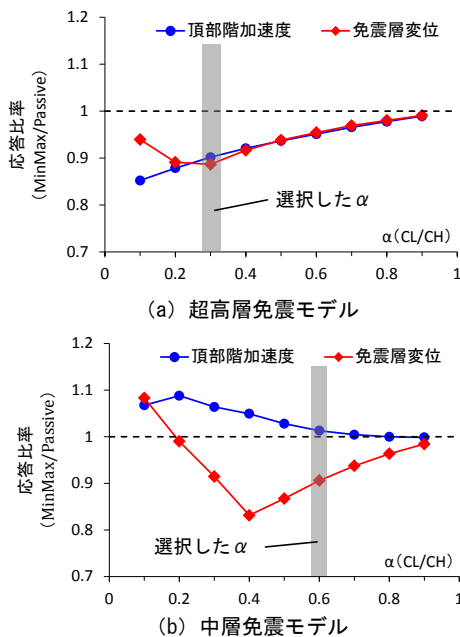


図-16 α をパラメータとした応答比率分布 (JMA Kobe)

5.2 解析結果

5.2.1 高さ方向の応答分布の比較

高さ方向の相対変位，層せん断力，絶対加速度の最大値分布と，絶対加速度の RMS 値分布における，パッシブ制御と MinMax 制御の応答比較を図-17，19 に示す．なお，ここでは紙幅の都合上，JMA Kobe 入力時の結果について示すが，他の地震波も同様の傾向であったことを確認している．

図-17 に示した超高層免震モデルにおける応答比較では，MinMax 制御はパッシブ制御に比べ，相対変位最大値は全階で約 10% 低減できていた．層せん断力最大値は，下層部ほど低減効果が大きく，特に最下階（免震階）ではパッシブ制御に対し約 20% の応答低減が見られた．絶対加速度の最大値は，パッシブ制御に対し低層部は増大し，頂部階では同程度であるが，RMS 値は，低層部は同程度で，頂部階は約 10% 低減できており，MinMax 制御が加速度低減にも効果があることを確認できた．また，図-18 に示したダンパーの吸収エネルギー W_d の時刻歴から，MinMax 制御はパッシブ制御に比べて約 10% エネルギー吸収量が少なく，エネルギー吸収量に対する応答低減効果が高いことが確認できた．

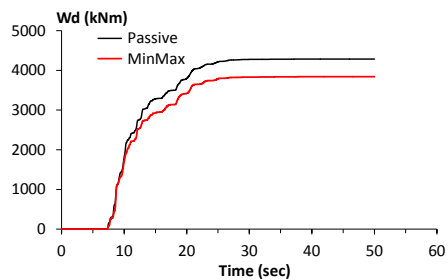
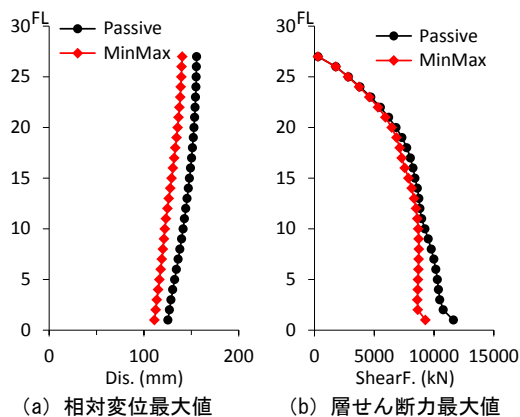
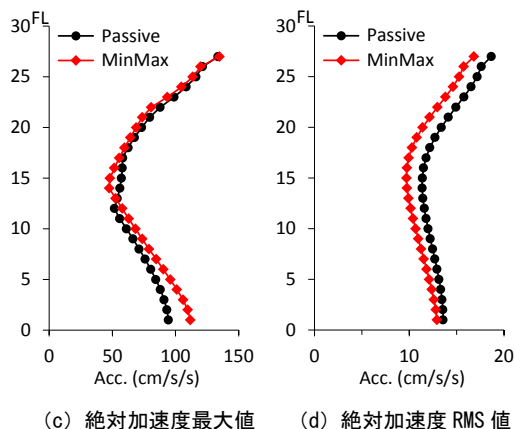


図-18 超高層免震モデルのダンパーの吸収エネルギー W_d (JMA Kobe)

図-19 に示した中層免震モデルにおける応答比較では，MinMax 制御はパッシブ制御に比べ，相対変位最大値は全階で約 10%，層せん断力最大値は最下階で約 15% の応答低減が見られ，超高層免震モデルとほぼ同程度の低減率を示した．一方，絶対加速度は，中・下層部はパッシブ制御と同程度であるが，上層部において応答が増大し，最上階の最大値は 10% 程度パッシブ制御より増大する結果となった．図-20 に示したダンパーの吸収エネルギーの時刻歴では，MinMax 制御は，パッシブ制御と同程度のエネルギー吸収量であることが確認できた．

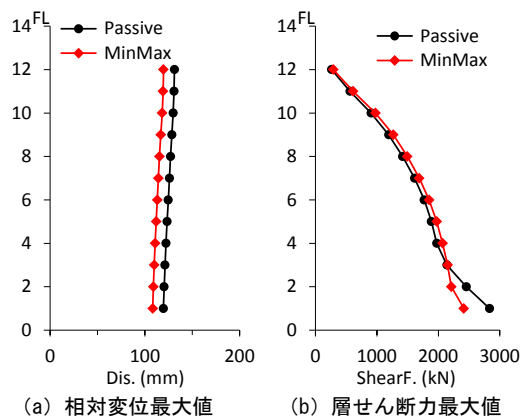


(a) 相対変位最大値 (b) 層せん断力最大値

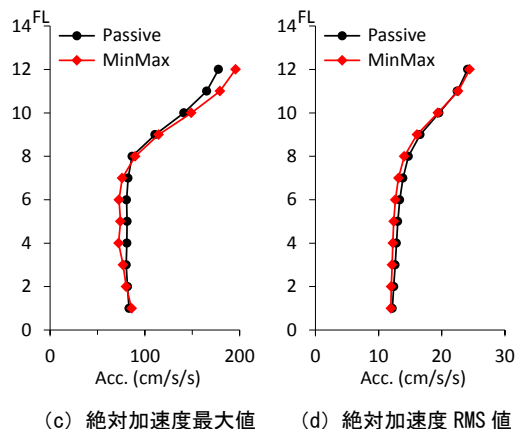


(c) 絶対加速度最大値 (d) 絶対加速度 RMS 値

図-17 超高層免震モデルの高さ方向の応答分布 (JMA Kobe)



(a) 相対変位最大値 (b) 層せん断力最大値



(c) 絶対加速度最大値 (d) 絶対加速度 RMS 値

図-19 中層免震モデルの高さ方向の応答分布 (JMA Kobe)

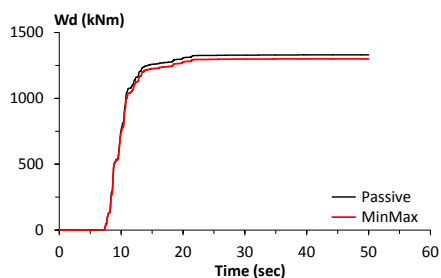


図-20 中層免震モデルのダンパーの吸収エネルギー W_d (JMA Kobe)

5.2.2 パッシブ制御に対する応答

各地震動入力時における、パッシブ制御に対する免震層最大変位と最大層せん断力、頂部階絶対加速度の最大値と RMS 値、ダンパーの吸収エネルギーの各応答比率を表-2 に示す。同表より、MinMax 制御の応答低減効果は層せん断力において最も高く、3波の平均低減率は各モデルとも約 15%であった。また、超高層免震モデルでは、いずれの地震動においても最大変位と加速度 RMS 値は 1.0 を下回り、MinMax 制御により両者を同時に低減できることが確認できた。

中層免震モデルでは、最大変位と加速度 RMS 値の3波の平均値は、1.0 を若干下回る程度であり、超高層免震モデルと比べると低減効果が低い結果であった。ダンパーのエネルギー吸収量は、いずれの地震動も 1.0 を下回り、3波の平均値は、超高層免震モデルで 10%、中層免震モデルで約 4%パッシブ制御よりも少ないことが確認できた。

6. おわりに

開発した可変減衰オイルダンパーに、免震層の変形のみを制御パラメータとする簡便な制御則 (MinMax 制御) を適用し、実大規模の振動実験およびシミュレーション解析によりその制御効果を検証した。得られた結果を以下に示す。

- 1) 開発した 2 値切換型可変減衰オイルダンパーの減衰係数切換時の遅れ時間は 10~30ms と短く、切換が頻繁な制御則にも適用可能であることが確認できた。

- 2) 免震層の変形のみを制御パラメータとした簡便な制御則である MinMax 制御について実大規模の振動実験を行い、減衰係数の切換が制御指令通り正しく作動していることを確認した。
- 3) 実験結果に基づいたシミュレーション解析モデルを作成し、MinMax 制御時の建物応答を精度良くシミュレートできることを確認した。
- 4) 実建物を想定した超高層免震モデルと中層免震モデルのシミュレーション解析により、MinMax 制御は、パッシブ制御と同程度以下のエネルギー吸収量で、より高い低減効果を発揮することが確認でき、その傾向は超高層免震モデルにおいて顕著であった。

謝辞

本稿は、次世代免震工法の開発 PJ および早稲田共研の成果の一部をまとめたものである。本稿で用いた制御則においては、早稲田大学理工学術院の西谷章教授と足利工業大学の仁田佳宏教授にご助言をいただいた。可変減衰オイルダンパーの製作においては、カヤバシステムマシナリー(株)の猪口敏一氏、鈴木太輝雄氏にご協力いただいた。振動実験およびシミュレーション解析においては、当該 PJ メンバーにご助言とご協力をいただいた。ここに謝意を表す。

参考文献

- 1) 吉岡宏和他:MR ダンパを用いたセミアクティブ免震構造の振動台実験, 日本機械学会第 2 回ダンピングシンポジウム講演論文集, pp.120-124, 2002.1
- 2) 塩崎洋一他:MR ダンパーを用いた免震構造物の簡易なセミアクティブ制御に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, No.570, pp.37-43, 2003.5
- 3) Y.Nitta, A.Nishitani and B.F. Spencer, Jr.: Semiactive Ccontrol Strategy for Smart Base Isolation Utilizing Absolute Acceleration Information, Journal of Structural Control and Health Monitoring, Vol.13, No. 2-3, pp. 649-659,2006.4
- 4) 石田他: AMD を加振装置として利用した実大振動実験その 2 試験体の加振方法, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2, pp.1081-1082, 2012.9
- 5) 愛知県設計用入力地震動研究協議会: 愛知県設計用入力地震動の作成, 推定地震動による強震動予測, 概要版 (改正版), 2006.2

表-2 各地震動入力時のパッシブ制御に対する応答比率

		免震層		頂部階		ダンパー
		最大変位	最大層せん断力	絶対加速度最大値	絶対加速度 RMS 値	エネルギー吸収量
超高層免震モデル	JMA Kobe	0.88	0.80	1.00	0.90	0.89
	El Centro	0.96	0.88	1.13	0.98	0.91
	Taft	0.97	0.94	1.02	0.93	0.90
	平均	0.94	0.87	1.05	0.94	0.90
中層免震モデル	JMA Kobe	0.91	0.85	1.10	1.01	0.97
	El Centro	0.99	0.85	0.93	0.92	0.92
	Taft	1.02	0.87	1.12	1.03	0.98
	平均	0.97	0.88	1.05	0.99	0.96