

都市型小変位免震の開発

パッシブ型可変減衰オイルダンパーの開発と免震建物への適用解析

欄木 龍大^{*1}・長島 一郎^{*1}・新居 藍子^{*1}・勝田 庄二^{*2}・木村 雄一^{*3}・西本 信哉^{*2}

Keywords : short-stroke base-isolated structure, passive variable oil damper; simple control, habitability, efficient use of Site

小変位免震, パッシブ型可変減衰オイルダンパー, 簡易制御, 居住性, 敷地有効利用

1. はじめに

都市部の市街地など、狭隘な敷地に建物を計画する場合、免震層のクリアランスが50cm程度必要な従来の免震は、敷地の有効利用の観点から採用され難く、クリアランスを10~15cm程度とした小変位免震建物の実現が望まれている。図-1に都市型小変位免震の位置付けを示す。都市型小変位免震は、従来免震と比較して大きな建築面積（建物内部に制震装置を設置する制震建物と同程度）を確保でき、地震時の揺れに対しては、制震建物と比較して応答加速度を大幅に低減させる免震建物としての効果をもつ。

一般に、免震層の変形を抑制するためにダンパーの減衰力を大きく設定すると上部構造へのエネルギー伝達が大きくなり、建物の加速度応答が増大してしまう。逆に、減衰力を小さく設定すると、上部構造へのエネルギー伝達は小さくなるが免震層の変形が増大するといったように、建物の加速度と免震層の変形にはトレードオフの関係がある。そのため、免震層の変形を抑制した小変位免震建物では、比較的頻度の高い中小地震でも、クリアランスの大きな従来免震と比較して応答加速度が大きくなってしまう。筆者らは、可変減衰ダンパーを用いて、擁壁との衝突の危険がない地震動レベルの範囲では減衰性能を低く設定して上部構造の

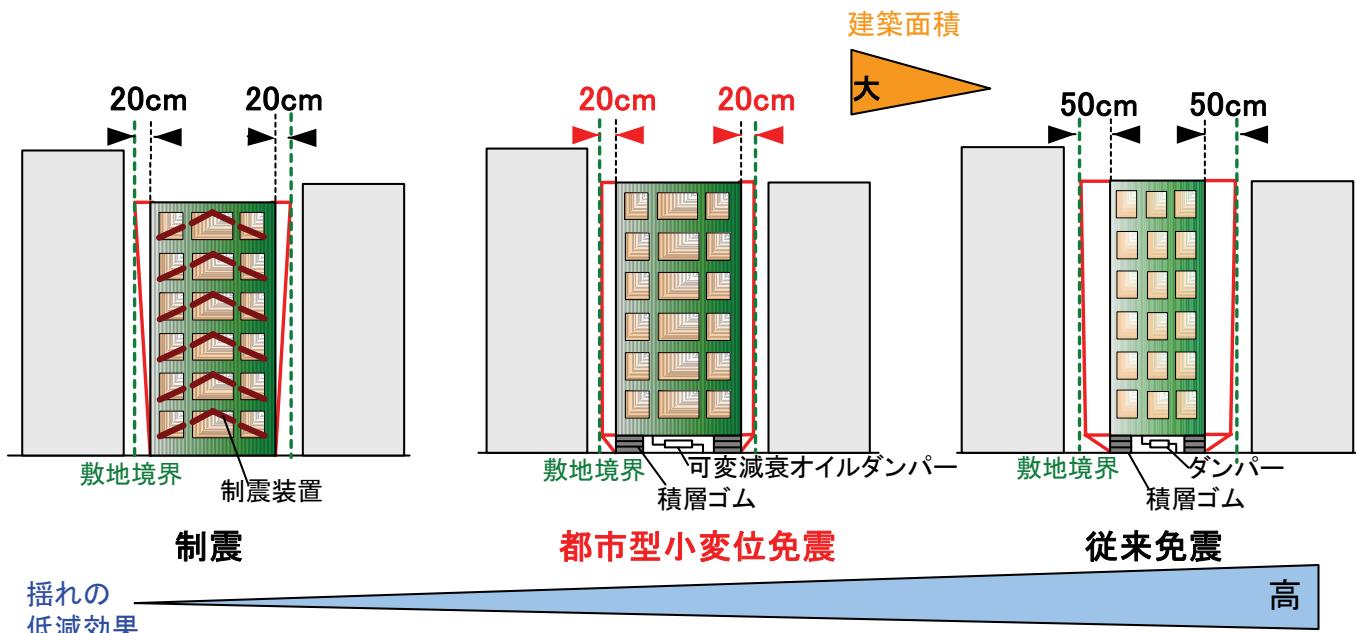


図-1 都市型小変位免震の概念図
Fig.1 Concept of short-stroke base-isolated structure

*1 技術センター建築技術研究所防災研究室

*2 設計本部構造グループ

*3 設計本部構造計画グループ

加速度応答を低減し、衝突の危険のある場合には減衰性能を高く設定して、免震層の変形を抑止する簡易制御法を開発し¹⁾、その有効性を確認している。また、モニタリングを行うことで大地震時にも制御を継続する信頼性の高いセミアクティブ免震システムを実建物へ適用している²⁾³⁾。

今回、免震層の変形が所定の変位を超えた場合にダンパーの減衰係数が大きな値に切り換わるパッシブ型の可変減衰オイルダンパーを開発した。開発したダンパーの適用により、演算やモニタリングを必要としない、簡便な可変減衰免震システムが可能となる。

本論では、試作した実大のパッシブ型可変減衰オイルダンパーの概要と性能試験結果、及び、可変減衰オイルダンパーを小変位免震建物に適用した場合の効果を解析的に検討した結果を述べる。

2. パッシブ型可変減衰オイルダンパー

2.1 作動原理

図-2 にパッシブ型可変減衰オイルダンパーの作動原理を、図-3 にバネ駆動シャットオフ弁の構造を示す。また、図-4 にバネ駆動シャットオフ弁を有する油圧回路の構成を示す。可変減衰ダンパーはシャットオフ弁を介する系統とシャットオフ弁を介さない系統を併せ持ち、シャットオフ弁の開閉により 2 段階の減衰係数を実現できるようになっている。従来の可変減衰ダンパーではシャットオフ弁の開閉を電磁ソレノイドアクチュエータで行っていたのに対し、本品ではシャットオフ弁の外側に設けられたバネ式のアクチュエータによる作動スイッチを用いている。作動スイッチの保持部材であるピンがはずれるとバネ力が解放されてアクチュエータが作動し、シャットオフ弁を開弁する仕組みである。ダンパーのストロークが設定変位以下の場合、ピンが保持され（図-3(a)）減衰係数が低い状態に固定される。一方、図-2(b)(c)に示すように、地震時にダンパーのストロークが設定変位に達すると、スライドブロックがアームレバーを押してピンを離脱させ、減衰係数が高い状態に固定される（図-3(b)）。図-5 に減衰力計画線図を示す。初期減衰係数は $C_{1L}=25\text{ kN}\cdot\text{s}/\text{cm}$ 、 $C_{1H}=50\text{ kN}\cdot\text{s}/\text{cm}$ 、リリーフ後の 2 次減衰係数 $C_2=1.695\text{ kN}\cdot\text{s}/\text{cm}$ 、リリーフ荷重は 400kN、ストロークは $\pm 200\text{ mm}$ である。なお、CL は小変形時の減衰係数、CH は大変形後の減衰係数を表す。

2.2 減衰係数固定時の試験結果

減衰係数を CH、CL に固定した場合について、ピ

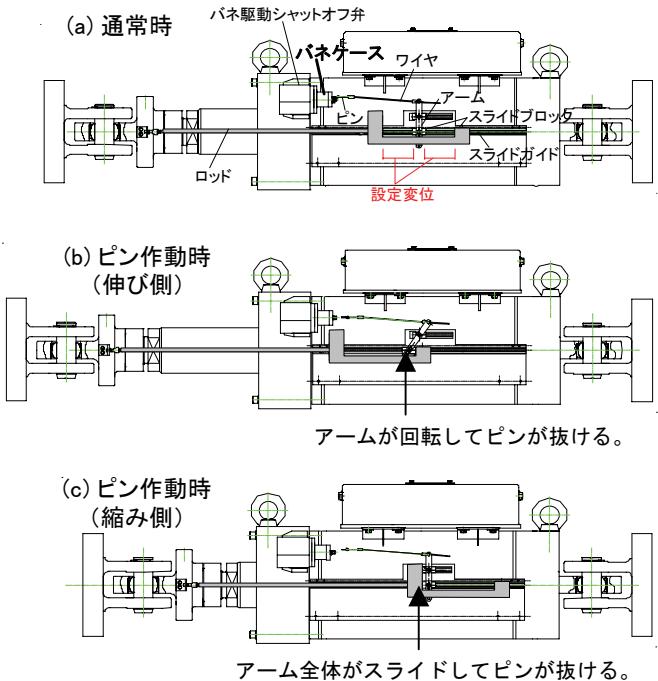


図-2 パッシブ型可変減衰オイルダンパーの作動原理
Fig.2 Mechanism of variable oil damper

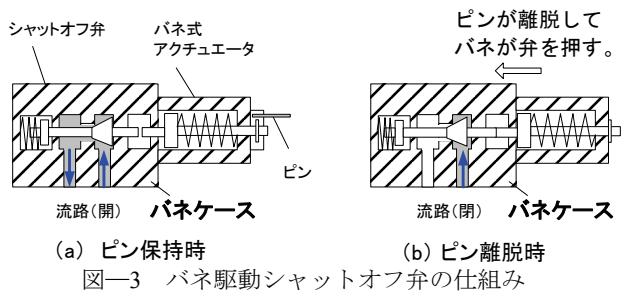


図-3 バネ駆動シャットオフ弁の仕組み
Fig.3 Mechanism of shutoff valve

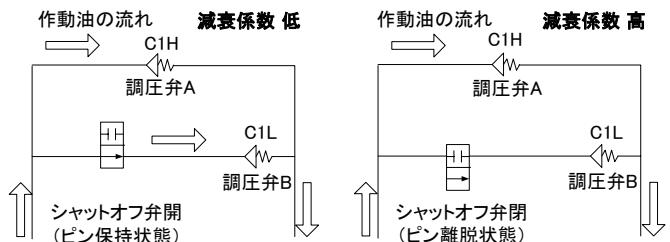


図-4 可変減衰オイルダンパーの油圧回路図
Fig.4 Hydraulic circuit of variable oil damper

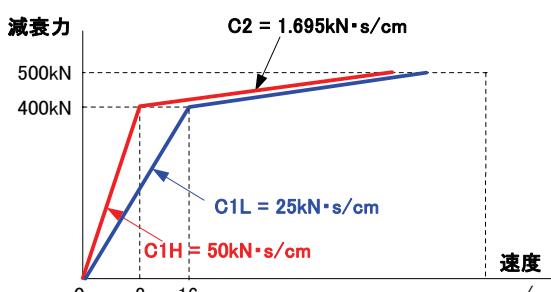


図-5 減衰力計画線図
Fig.5 Damping characteristics

ストン速度を変えて可変減衰ダンパー単体の加力実験を行った。実験状況を図-6に示す。図-7、図-8に実験で得られた1次減衰勾配（最大速度6cm/s）と2次減衰勾配（最大速度30cm/s）における変位-減衰力関係（F- δ 線図）の例を示す。伸び側、縮み側とともに安定した履歴ループを描いていることを確認した。

2.3 減衰係数切り換え時の試験結果

加振速度6cm/sで8秒周期の変位制御三角波加振を実施し、速度一定領域においてバネ駆動シャットオフ弁を作動させ、減衰力の切り換わりを確認した。スライドブロックの設定変位は±110mmとした。図-9にダンパーの伸び側でバネ駆動シャットオフ弁を作動させた場合の減衰力とダンパー変位の関係を、図-10にバネ駆動シャットオフ弁をダンパー縮み側で作動させた場合の結果を示す。伸び側127mm、縮み側123mmで減衰力が増加しており、伸び側・縮み側共にほぼ同等のストロークで減衰係数が切り換わることを確認した。

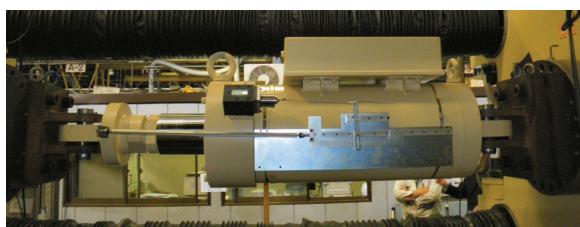


図-6 加力試験状況
Fig.6 Dynamic test

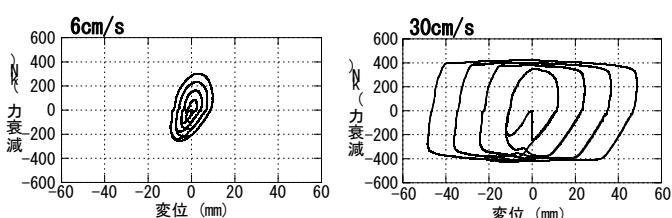


図-7 変位一減衰力関係 F- δ 線図 (CH固定時)
Fig.7 Damping characteristics (fixed at CH)

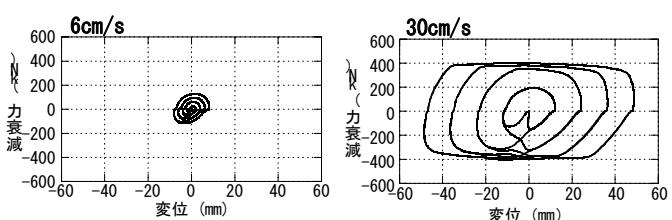


図-8 変位一減衰力関係 F- δ 線図 (CL固定時)
Fig.8 Damping characteristics (fixed at CL)

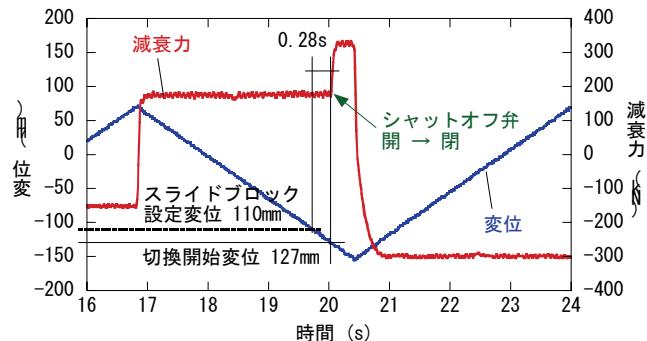


図-9 三角波加振（速度6cm/s）伸び側切り換え時
Fig.9 Transition of damping force and displacement of damper elongated

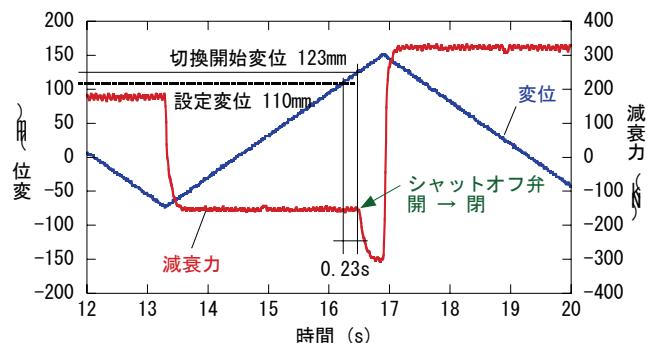


図-10 三角波加振（速度6cm/s）縮み側切り換え時
Fig.10 Transition of damping force and displacement of damper compressed

3. 建物応答性能の解析的検討

本章では、開発したパッシブ型の可変減衰ダンパーを、小変位免震建物に適用した場合の効果をシミュレーション解析により検討する。

3.1 建物モデル

対象建物は、図-11に示すように、S造8階建ての店舗用途の基礎免震建物（総重量70,400kN）である。免震層は積層ゴムとオイルダンパーで構成され、オイルダンパーのうち、一部に可変減衰ダンパーを適用する。免震建物の全体1次固有周期は3.5秒、上部構造の固有周期は1.2秒である。免震層のクリアランスは15cmとする。

3.2 入力地震動

入力地震動は、表-1に示す、設計標準3波（エルセントロNS波、タフトEW波、八戸NS波）のレベル1（最大速度25kineに基準化）とレベル2（最大速度50kineに基準化）とする。各地震動のレベル2の擬似速度応答スペクトルを図-13に示す。

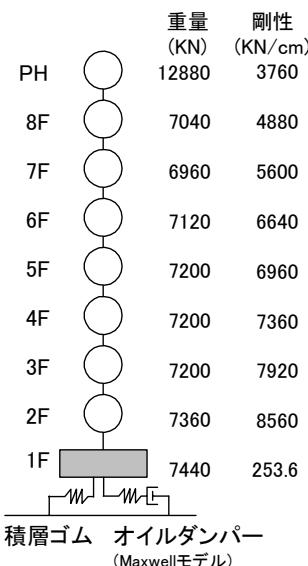


図-11 解析モデル
Fig.11 Analytical model

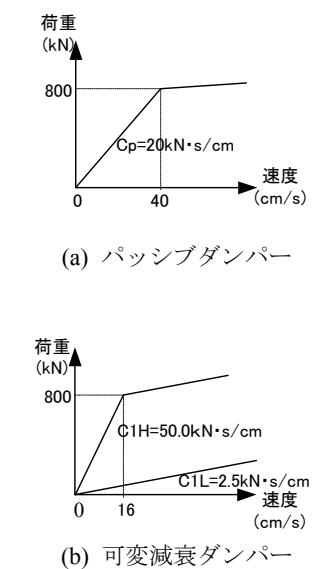


図-12 ダンパー特性
Fig.12 Damping characteristics

表1 入力地震動
Table1 Input earthquake motion

地震波		最大加速度 (cm/s ²)
レベル1 (25kine基準)	エルセントロNS	255.4
	タフトEW	248.3
地震動	八戸NS	166.7
レベル2 (50kine基準)	エルセントロNS	510.8
	タフトEW	496.6
地震動	八戸NS	333.4

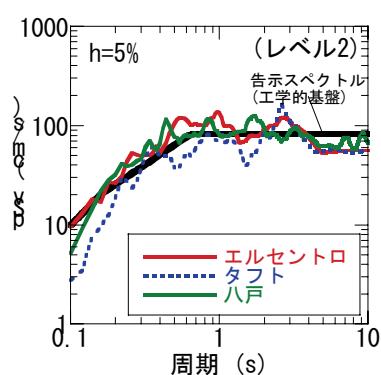


図-13 入力地震動の擬似速度応答スペクトル
Fig.13 Pseudo velocity response spectra

3.3 免震層のダンパー構成とトリガー値

免震層に設置するオイルダンパーは、図-12 に示す特性をもつ、減衰係数一定のパッシブダンパー

($C_p=20\text{kN}\cdot\text{s}/\text{cm}$)と、減衰係数を 2 値に切り換える可能な可変減衰ダンパー($C1H=50.0\text{kN}\cdot\text{s}/\text{cm}$, $C1L=2.5\text{kN}\cdot\text{s}/\text{cm}$)とする。設置する台数は、対象とする地震動に対して変形を目標とするクリアランス内に抑えるのに必要な減衰力から、合計 6 台とし、3 台を可変減衰ダンパー、残り 3 台を減衰係数一定のパッシブダンパーとした。可変減衰ダンパーの減衰係数は、ダンパーの変位が予め設定したトリガー値以下の振幅では $C1L$ をとり、トリガー値を超えた時点で $C1H$ に切り換わり、地震終了まで $C1H$ を維持する。トリガー値は、パラメータスタディにより、10cm とした。比較対象として、可変減衰ダンパーの減衰係数を $C1H$ に固定したケースと、 $C1L$ に固定したケース、及び建物内の各層にオイルダンパーを設置した制震建物(1 次固有周期の減衰定数 $h=10\%$)を設定した。

3.4 地震時応答の比較

各入力地震動に対する、建物の最大応答値（建物頂部加速度、1 階層せん断力、免震層変位、建物頂部変位）の比較を図-14 に示す。同図(c)に示すように、レベル 1 地震動では、免震層の変位はトリガー値(10cm)に達さず、減衰係数は $C1L$ のままである。レベル 2 地震動では、トリガー値を超え、減衰係数 $C1H$ へ切り換わる。減衰係数が切り換わることで、免震層の変形はクリアランス(15cm)以内、頂部の変形は 20cm 程度以内におさまっている(同図(c),(d))。また、レベル 1 地震動では、可変のケースは $C1H$ 固定と比較して、頂部の最大応答加速度は 60%程度、1 階の層せん断力は 70%程度に低減している(同図(a),(b))。

図-15 に、エルセントロ NS 波に対する建物の加速度と変位の最大応答分布を示す。レベル 1 では、可変のケースは、 $C1H$ 固定と比較してすべての層で加速度が低減しており、レベル 2 では、同等となっている。制震と比較すると可変、 $C1H$ 固定ともすべての層で加速度応答が小さい。

エルセントロ NS 波での、可変と $C1H$ 固定、及び $C1L$ 固定の地震応答波形の比較と可変減衰ダンパーの減衰係数を、レベル 1 について図-16(a)に、レベル 2 について図-16(b)に示す。レベル 1 での頂部加速度応答は、可変では減衰係数 $C1L$ をとっており、 $C1H$ 固定に比べて小さい。レベル 2 での免震層の変位は $C1L$ 固定ではクリアランスを越えるが、可変ではトリガー値に達したところで減衰係数が切り換わることにより、クリアランス内におさまっている。

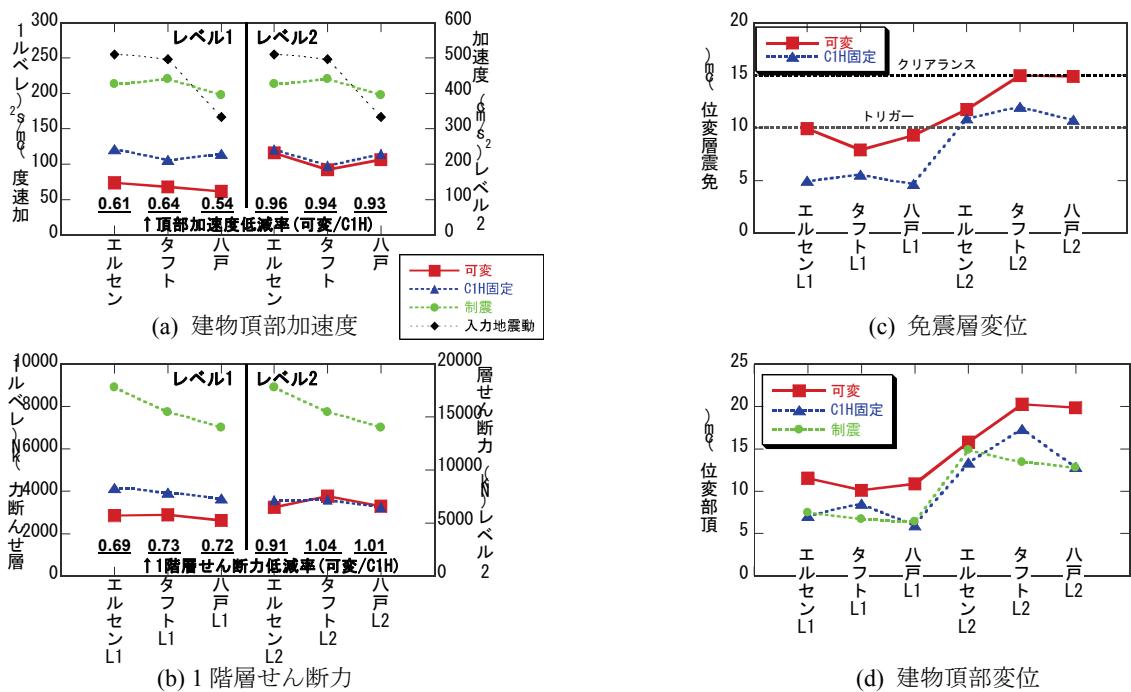


図-14 最大応答値の比較
Fig.14 Comparison of maximum response

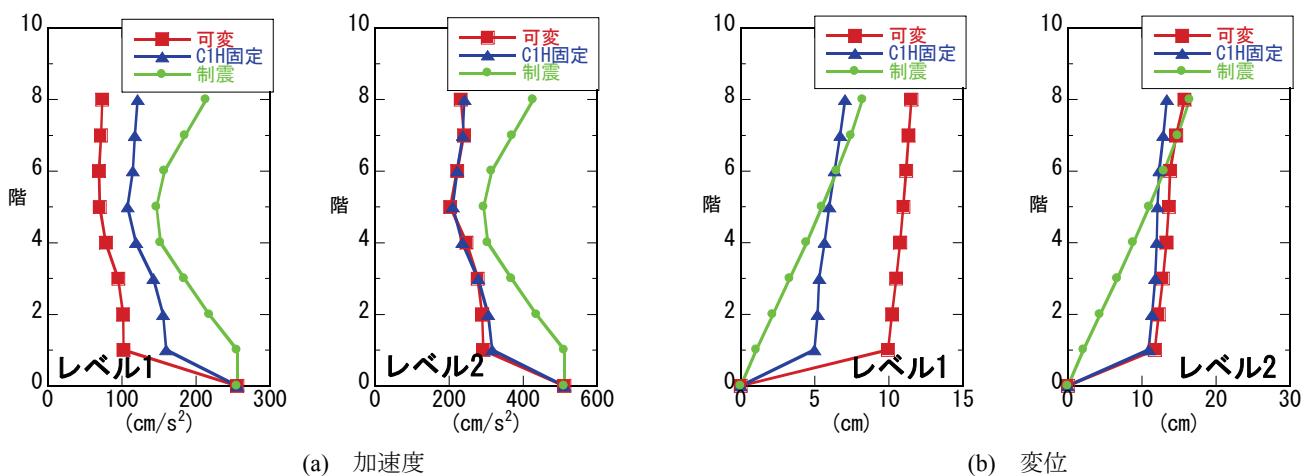


図-15 最大応答分布(エルセントロ NS 波)
Fig.15 Maximum response

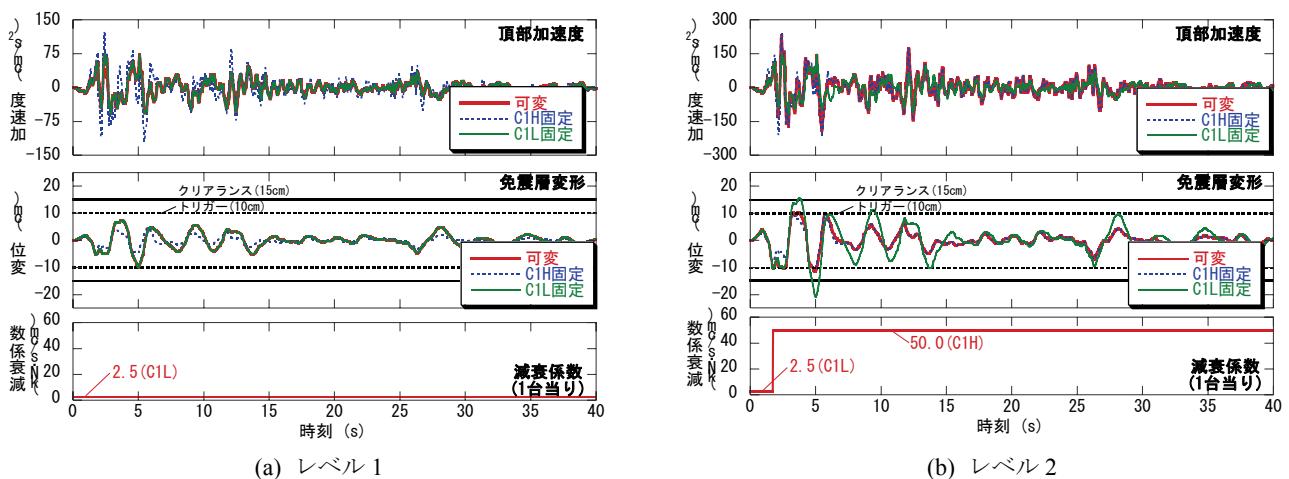


図-16 地震応答波形(頂部加速度と免震層変位)と減衰係数 (エルセントロ NS 波)
Fig.16 Time history of earthquake response and damping coefficient (Elcentro NS)

4. まとめ

狭隘な敷地の有効利用のため、免震クリアランスを10~15cm程度とする都市型小変位免震システムを開発した。

大地震時の免震層の変形を抑えながら、中小地震時の加速度応答を低減させるため、免震層の変形が所定の変位を超えた場合に、ダンパーの減衰係数が大きな値に切り換わる、パッシブ型の可変減衰オイルダンパーを開発し、動的試験により所定の変形で減衰係数の切り換えが行われることを確認した。開発したダンパーの適用により、演算やモニタリングを必要としない、簡便な可変減衰免震システムが可能となる。

また、開発したダンパーをクリアランス15cmの小規模S造8階建て免震建物に適用した場合の地震時の応答についてシミュレーション解析を行い、通常の減衰係数一定のオイルダンパーを適用した免震建物の応答と比較した結果、中小地震時(レベル1)は、減衰係数一定の免震建物より加速度応答性能がよく、大地震時(レベル2)の変形は目標クリアランス内に抑えられることを確認した。

謝辞

本装置は、日立オートモティブシステムズ(株)と共同開発しました。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 欄木龍大, 長島一郎, 勝田庄二, 木村雄一, 西本信哉: 可変減衰ダンパーを利用した小ストローク免震の応答性能(トリガー方式を利用した簡易セミアクティブ), 日本建築学会学術講演梗概集,構造II,pp.1013-1014,2007.08
- 2) 篠崎洋三, 藤山淳司, 長島一郎, 欄木龍大, 北川良和, 吉田和夫:可変構造セミアクティブ免震システムの開発と適用(その1~その6), 日本建築学会学術講演梗概集,構造II,pp.723-734,2005.09.
- 3) 篠崎洋三, 細澤治, 藤山淳司, 長島一郎, 欄木龍大:連層耐震壁を有する超高層免震建物の設計(その1~その2), 日本建築学会学術講演梗概集,構造II,pp.327-330, 2008.09.