

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 26 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2014

課題番号：25820260

研究課題名(和文) 免震構造物の免震層変位を直接制御する変位依存型ダンパーに関する実験的研究

研究課題名(英文) Experimental study on displacement control damper for base isolated structure

研究代表者

池永 昌容 (Ikenaga, Masahiro)

東北大学・工学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：50552402

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：近年注目を集めている長周期地震動や、巨大地震動を免震構造物が受けた場合に、過大な応答変位を受ける可能性が指摘されている。また、一般的な速度依存型ダンパーでは巨大地震には対応できても、中小地震時における免震効果が低減してしまう。

このような問題に対して、申請者らは複素剛性の特徴である楕円形履歴特性に着目し、複素剛性を実時間領域で模擬するために2種類のデジタルフィルタを磁気粘性流体ダンパーに用いた制御を提案した。数値解析の結果から、その提案制御によって複素剛性を精度よく模擬できること、また提案制御を導入した免震構造物の免震性能を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：In recent years, a lot of seismically isolated structures have been constructed in Japan. It is considered to be effective to incorporate certain damping devices that control vibrations in direct response to the response displacement, and this concept is advocated as "displacement control design". This study examined the behavior of complex-valued stiffness, which plainly achieves the concept of "displacement control design", incorporated into a seismically isolated building structure subjected to strong ground motions. We compared three types of seismically isolated building model; one contains viscous damping, the other contains complex-valued stiffness into the isolation level, and at last the control theory by using two kind of digital filter to realize the complex-valued stiffness on MR damper. The results say the subjected theory can realize the complex damping and the performance is almost same as the ideal model.

研究分野：免震構造

キーワード：免震構造 変位制御設計 MRダンパー

1. 研究開始当初の背景

免震構造は、建物基礎部に水平剛性が低い免震層を設置することで、大地震時に上部構造に作用する水平力を低減し、応答加速度を抑制することを目的としている。ただし免震層には大きな変位が生じるため、基礎擁壁部と免震層の間にクリアランスを設けるとともに、減衰要素によって免震層変形を抑制して免震層と基礎擁壁部との衝突を防いでいる。しかしながら、免震構造物が近年注目を集めている長周期地震動を受けて共振した場合や、設計で想定されている地震動をはるかに上回る巨大地震動を受けた場合には、免震層に過大な応答変位が生じて免震層が基礎擁壁部と衝突する危険性が指摘されている。通常、免震層変位を抑制するために速度依存型ダンパーなどを導入するが、巨大地震を想定して免震層の減衰性能を高めると、上部構造の応答加速度が増大して、中小地震時における免震効果が低減してしまう。

このような問題に対して、申請者は複素減衰の特徴である楕円形履歴特性に着目し、直前の最大変位によって最大制御力を決定し変位情報のみによって楕円形履歴特性を模擬する制御則(図1)を提案し、免震層変位と応答加速度の抑制に対する有効性を示している

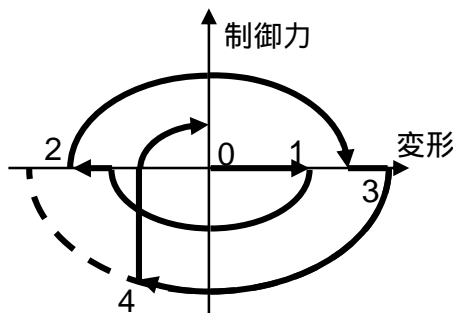


図1 申請者らによる制御則(図中番号は進行の順番)

2. 研究の目的

地震時の免震層変位を低減しつつ上部構造の応答加速度をも低減する試みの一つとして、セミアクティブダンパーである磁気粘性流体ダンパー(以下、MRダンパー)を用いて免震層に付加する減衰性能を制御する研究が複数の研究者らによって展開されている。

一方で申請者が検討している複素減衰については、その応答は非因果的であり、応答計算には入力全時間情報を必要とする。そこで、複素減衰を実時間領域で因果性を保った状態で実現する手法として、セミアクティブデバイスである磁気粘性流体ダンパー以下、MRダンパーを用いて、リアルタイムの制御で複素剛性ダンパーの特徴を模擬する手法について検討している。しかしながら図1で示した制御則についても、例えばパルス型入力地震動に対しては減衰効果が小さいことなどの問題点も明らかになっている。

そこで本研究では図1のようなこれまで提案してきた制御則とはことなり、デジタルフィルタを用いた新たなセミアクティブ制御手法を提案し、時間領域の応答計算で複素剛性ダンパーを擬似的・近似的により高い精度で実現することを目的とする。

3. 研究の方法

制御の目標である複素剛性ダンパーは、図2(a)に示すような、複素剛性ダンパーは振動数に依存せず、変位振幅に比例した大きさの力を発揮する。ダンパーの履歴形状としては図2(b)のように最大変位に応じた大きさの右回りの楕円を描く。

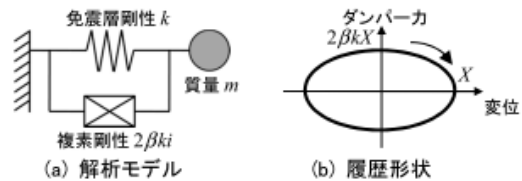


図2 複素剛性ダンパー

波形の振幅は変化させずにその位相を $\pi/2$ 進める操作はヒルベルト変換と呼ばれ、複素剛性ダンパーは応答変位のヒルベルト変換に比例した力を発揮する。

ヒルベルト変換は非因果的なフィルタであり、現在までの変位情報のみを用いて位相を $\pi/2$ 進めた、すなわち固有周期の $1/4$ だけ未来の変位波形を得ることは不可能である。調和応答の場合、速度の位相は変位よりも $\pi/2$ 先行しているが、任意外乱に対しては含まれる全周波数に対しこの処理をする必要があるため、応答速度にフィルタ処理を行い、その周波数ごとの振幅特性を変化させることで応答変位のヒルベルト変換を導出する手法を提案する。

例えば、固有周期4秒の免震構造物に対して複素剛性ダンパーを適用したときに、そのダンパーによるフィルタ特性は図3のようになる。

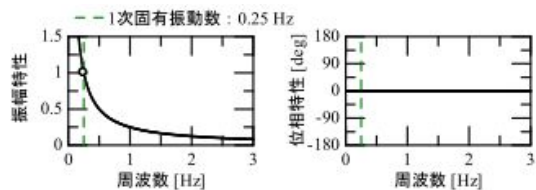


図3 複素剛性ダンパーのフィルタ特性

図3のように、固有振動数における利得を1としながら振動数に反比例して振幅を低減するローパス特性を持ち、かつ位相歪みの無いフィルタを応答速度にかけると、応答変位のヒルベルト変換に相似な波形を得ることが可能であり、複素剛性ダンパーを実現できる。以降はこれを目標のフィルタ特性とし、擬似ヒルベルト変換と呼ぶ。

位相歪みの全く無いフィルタの設計は不可能であるため、比較的位相ずれの小さいデジタルフィルタとしてバターワースフィルタ

を用いる。次数 $N=1$ 、遮断周波数 $f_{co}=0.4$ Hz として設計したバターフィルタの周波数特性を図 4 に示す。図 4 より、設計したバターフィルタの振幅特性は目標の擬似ヒルベルト変換と比べて高振動数側の振幅低減率は小さいが、大まかな傾向は類似しており、ここではこれを許容する。しかし、バターフィルタによって位相特性に最大 0.5 s 程度の大きな遅れが生じており、このフィルタを制御にそのまま用いるのは好ましくない。

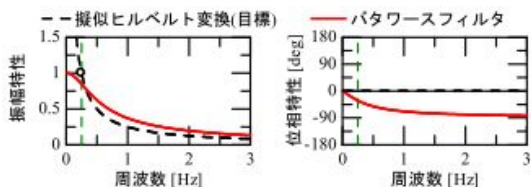


図 4 バターフィルタの特性

上記の位相遅れを解消するため、あらかじめ応答速度の位相を進めるフィルタを適用し、その結果に上記のバターフィルタを適用する。応答速度の位相を進めるには、位相遅れに対応する分だけ未来の応答速度を推定すればよい。しかし、非定常性が強い地動加速度を予測することは困難であるため、ここでは現時刻以降の地動加速度を 0 とし、以降は構造物が減衰自由振動すると仮定して未来の応答速度を計算する。この操作（以下、位相進みフィルタ）を模式的に表したものを図 5 に示す。図 5 に示す減衰自由振動曲線は現在の応答変位と応答速度を用いれば一意的に決定されるので、位相遅れに対応する分だけ未来の応答速度が計算でき、この操作を時々刻々行うことで位相を進めた速度波形が得られる。また、位相進みフィルタは低振動数成分を増幅するローパスフィルタにもなっていることが確認できる。また、位相特性から低振動数側ほど位相進みが大きくなる特徴があることがわかる。

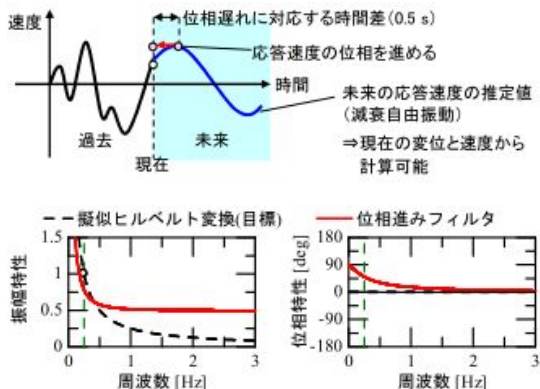


図 5 位相進みフィルタの概要と特性

図 4 と図 5 の 2 種類のフィルタを適用した制御フローと、そのフィルタ特性を図 6 に示す。振幅特性は 2 種類のフィルタのローパスフィルタ特性が掛け合わされることで、目標である擬似ヒルベルト変換と比べると振幅

の低減率が大きいですが、振幅を 1.5 倍することでほぼ等しい特性が得られている。位相特性は固有周期である 0.25Hz において位相がほぼ同じ特性を示しており、本研究ではこのフィルタ特性を用いて数値解析による検討をおこなった。

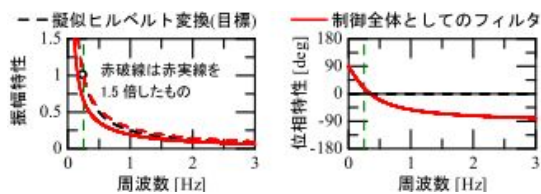


図 6 提案制御フィルタの特性

4. 研究成果

提案制御を MR ダンパーに適用し、目標である複素剛性ダンパーと比較することで、制御の妥当性を検討した。検討建物は図 7 に示す 10 層 RC 造の基礎免震建物とし、11 質点系でモデル化する。なお、固有値解析によって得られた建物 1 次固有周期は 4.06 秒であった。

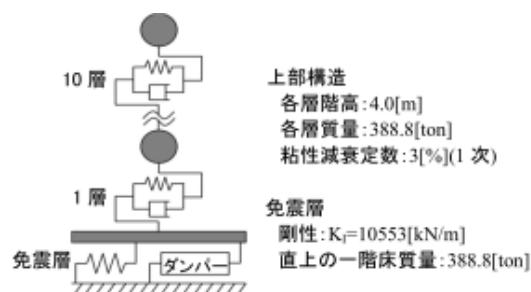


図 7 検討免震建物

設置ダンパーは、等価減衰定数 20% 相当の提案制御を適用した MR ダンパーと、複素減衰定数 20% の複素剛性ダンパーとし、それぞれの応答を比較することで、提案制御の妥当性を検討する。MR ダンパーの力学モデルには、一般的に用いられるビンガムモデルとし、制御の効果を明確にするため、粘性抵抗力は無視して取り扱う。

まず El Centro NS(0.5 m/s 基準化)を用いた場合の、提案制御および複素剛性ダンパーの時刻歴応答波形と履歴形状を図 8 に示す。

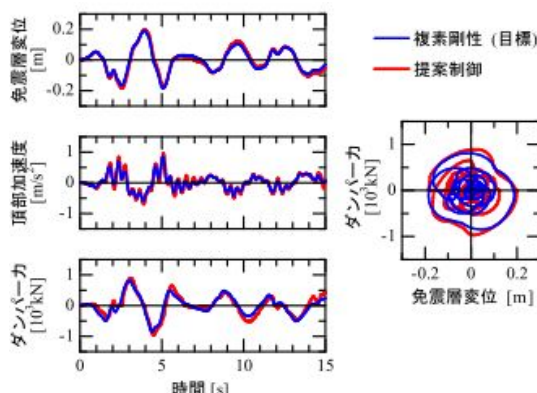


図 8 提案制御と複素剛性の地震応答比較

図 8 より、提案制御は複素剛性ダンパーよりも変位応答、加速度応答がわずかに増加してしまうものの、ダンパー力の挙動は概ね一致していることがわかる。この結果から、提案制御は時間領域の応答計算でありながら、工学上十分な精度で複素剛性ダンパーを実現できていると判断した。

免震建物に広く用いられているリリーフ機構付きオイルダンパーと提案制御を比較し、提案制御が既存のパッシブ型ダンパーよりも有効となることを示す。図 7 に示した 10 層基礎免震建物に、提案制御を適用した MR ダンパーとオイルダンパーを設置し、表 1 に示す。レベル 1~3 の地震動を入力した際の応答を比較する。

表 1 入力地震動

入力地震動	PGV [m/s]		
	レベル 1	レベル 2	レベル 3
神戸 NS, 東北大 1978NS El Centro NS, 八戸 EW, Taft EW	0.25	0.50	0.75
東北大 2011NS(原波)	0.49		
三の丸 EW(原波)			0.51
鷹取 EW(原波)			1.27

リリーフ付きオイルダンパーと、提案制御を導入した MR ダンパーの場合の数値解析結果を図 9 に示す。応答は、最大免震層変位、最大ダンパー力、そして免震効果に直接的に関連性がある最大頂部加速度の 3 種類を比較対象としている。

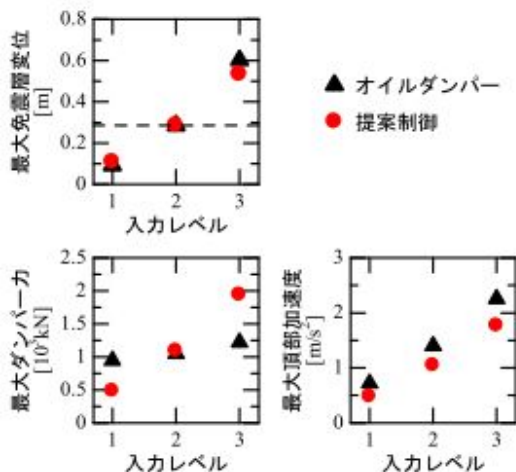


図 9 オイルダンパーと提案制御の応答比較

図 9 より、レベル 1 地震動入力時は提案制御の方がわずかに大きな変位を生じるものの、ダンパー力はオイルダンパーの半分程度となっている。一方レベル 3 地震動入力時は、提案制御は大きいダンパー力を発揮することで過大变位を抑制できている。つまり、レベル 2 地震動を対象にダンパー諸元を決定した場合、オイルダンパーはレベル 1 地震動に対し過大なダンパー力を発揮し、レベル 3 地震動に対してはダンパー力が不足してしまうが、線形な減衰性能を発揮する提案

制御は地震入力レベルに対応した応答低減が可能であると考えられる。また、頂部加速度については入力レベルを問わず提案制御の方が小さい値となっている。特に、レベル 3 地震動入力時は提案制御の方が大きなダンパー力を発揮しているにも関わらず、加速度を低減できている。

レベル 3 地震動時の最大ダンパー力と最大頂部加速度の関係について詳しく考察するために、レベル 3 の免震層変位および最大ダンパー力で最大応答値を示した鷹取 EW 入力時の時刻歴波形と履歴形状を図 10 に示す。図 10 から、提案制御の方がオイルダンパーよりもダンパー力の変動が緩やかになっている。これは、2 種類のフィルタを適用した提案制御では、フィルタの性能によって高振動数成分が除去されており、その結果最大応答加速度についてはオイルダンパーよりも提案制御のほうが最大応答値が小さくなっている。一方で変位と最大ダンパー力については低振動数成分によって最大値が決定されているが、提案制御とオイルダンパーはそれぞれ低振動数成分の応答を抑制するためにダンパー力を発揮しており、その結果、変位はほぼ同程度の応答となっている。なおダンパー力については、提案制御のほうがオイルダンパーよりも大きくなっているが、これはオイルダンパーと提案制御での位相特性の違いが原因と考えられる。ただし提案制御について、最大ダンパー力と最大加速度の発生時刻を見ると、それぞれは発生時刻がずれており、その結果提案制御では最大ダンパー力が大きくなるものの、最大加速度は増大しないことを突き止めた。

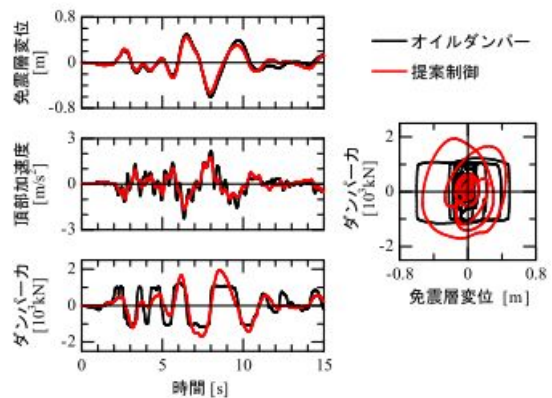


図 10 提案制御とオイルダンパーの鷹取 EW 派時応答

以上、複素剛性ダンパーを実時間領域で模擬するために提案した 2 種類のデジタルフィルタを利用した提案制御によって、複素剛性ダンパーを模擬できること、また一般的に免震構造物の減衰要素として用いられるリリーフ付きオイルダンパーと比べて、その最大応答値は免震構造物としての性能に優れていること、を示した。

5. 主な発表論文等
(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 0件)

〔学会発表〕(計 4件)

成田悠、熊谷成晃、柏倉優太、池永昌容、五十子幸樹、井上範夫：速度非依存型ダンパー付き免震建物の有効性とその実現性 その3 擬似複素減衰制御の修正案、2013年度日本建築学会大会(北海道) 北海道大学(北海道札幌市)、2013.8.30-9.1

熊谷成晃、成田悠、柏倉優太、池永昌容、五十子幸樹、井上範夫：速度非依存型ダンパー付き免震建物の有効性とその実現性 その4 修正案の有効性と実現性、2013年度日本建築学会大会(北海道) 北海道大学(北海道札幌市)、2013.8.30-9.1

熊谷成晃、中村俊介、池永昌容、五十子幸樹、井上範夫：MRダンパーを用いた免震建物用複素剛性ダンパーの実現手法の検討 その1 フィルタ処理を用いた制御則の提案とその概要、2014年度日本建築学会大会(近畿) 神戸大学(兵庫県神戸市)、2014.9.12-9.14

中村俊介、熊谷成晃、池永昌容、五十子幸樹、井上範夫：MRダンパーを用いた免震建物用複素剛性ダンパーの実現手法の検討 その2 提案制御の有効性の検討、2014年度日本建築学会大会(近畿) 神戸大学(兵庫県神戸市)、2014.9.12-9.14

〔図書〕(計 0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0件)

取得状況(計 0件)

〔その他〕

ホームページ等

なし

6. 研究組織

(1)研究代表者

池永 昌容 (IKENAGA, Masahiro)

東北大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号：50552402