

長周期建物の長周期長時間地震動対策に有効な次世代型ダンパーの開発と多目的最適設計

Development and multi-objective optimization of next-generation dampers effective against long-period/long-duration ground motions for long-period building structures

東北大学災害科学国際研究所 教授 五十子 幸樹

1. 研究手法の概略

本研究課題では、近年社会的な関心を呼んでいる長周期地震動の対策技術として、長周期構造物の過大变位制御に有効な次世代型ダンパーの開発を目指す。本研究では、その実装に磁気粘性流体ダンパー(以下MRダンパー)を用いる。MRダンパーに対しては、現代制御理論等に基づいた線形2次制御(LQR制御)など既に様々な制御則が提案されているが、本研究ではこれまでにない独創的な制御方法を提案する。即ち、制御力が振動数に比例せず、構造物の応答変位に比例する理想的理論減衰モデルであるRate-independent linear damping (複素剛性)を用いることを検討する。

Rate-independent linear damping ではダンパー力が振動数に依存しないので減衰力の振幅は変位振幅のみに依存する。この減衰モデルは、複素数を用いて表現される仮想の減衰モデルであり、解析において非因果性の問題もあり周波数応答解析が行われることが通常であった。この減衰モデルを実時間領域で表現して解析する方法が多くの研究者により試みられているが、これを実時間領域の制御デバイスとして厳密に実装するためには複雑な手順を踏まなければならない。一つの方法として、構造物の応答変位時刻歴のHilbert変換に目標損失剛性を乗じることで目標の制御が可能である。また、Hilbert変換をデジタルフィルターとして実装する方法も提案されているが、本研究にこれを適用するためにはフィルターの急峻な振幅特性を実現することに困難を伴っていた。特に、長周期構造物の制御ではフィルターの時間遅れが大きな問題となる。本研究では、この問題点を克服するため、応答速度の計測値に対して、振動数に反比例するフィルターを乗じ、それに伴う時間遅れを補償する方法を提案する。図1はそのブロックダイアグラムである。

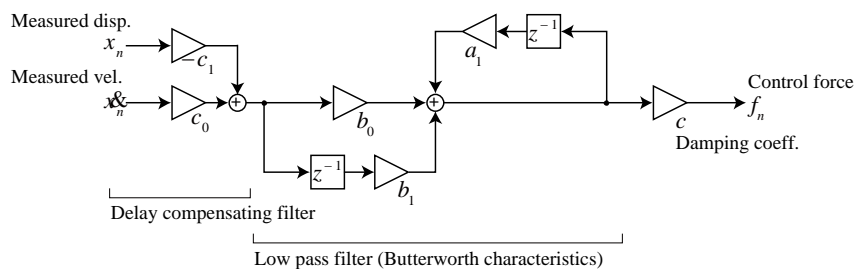


図1. 提案低次デジタルフィルターのブロックダイアグラム

本研究で提案する低次デジタルフィルターは既往研究で示されている複素剛性の実時間領域表現と比べて非常に単純である。図2に提案フィルターのBode線図(振幅特性と位相特性)

を示す．図2(a)はフィルターの遅延補償部の特性である．低周波領域を増幅すると共に，位相を低周波領域ほど進める遅延補償特性を示している．図2(b)は1次のバターワース特性フィルター一部の特性を示しており，ローパスフィルターとしての特性を示すと同時に高周波領域で望ましくない位相遅れが観察される．これら二つのフィルターを組み合わせると図2(c)を得る．先ず振幅特性については振動数に反比例する目標通りの特性が得られていることが分かる．位相特性については，特定の振動数に対してのみ歪が無いものの，広い帯域に渡って歪みを生じてしまう．このように，提案フィルターは振幅特性については精度良く目的の特性を発揮するが，その単純さ故位相特性は犠牲になっている．しかしながら，構造物の応答は固有振動数付近に支配的な周波数成分を有する狭帯域過程となることが多いので，フィルターの位相ひずみが構造物の固有振動数や応答の中心振動数に近くなるようにフィルターパラメータを調整することが出来れば，位相ひずみの影響を小さくすることができる可能性がある．

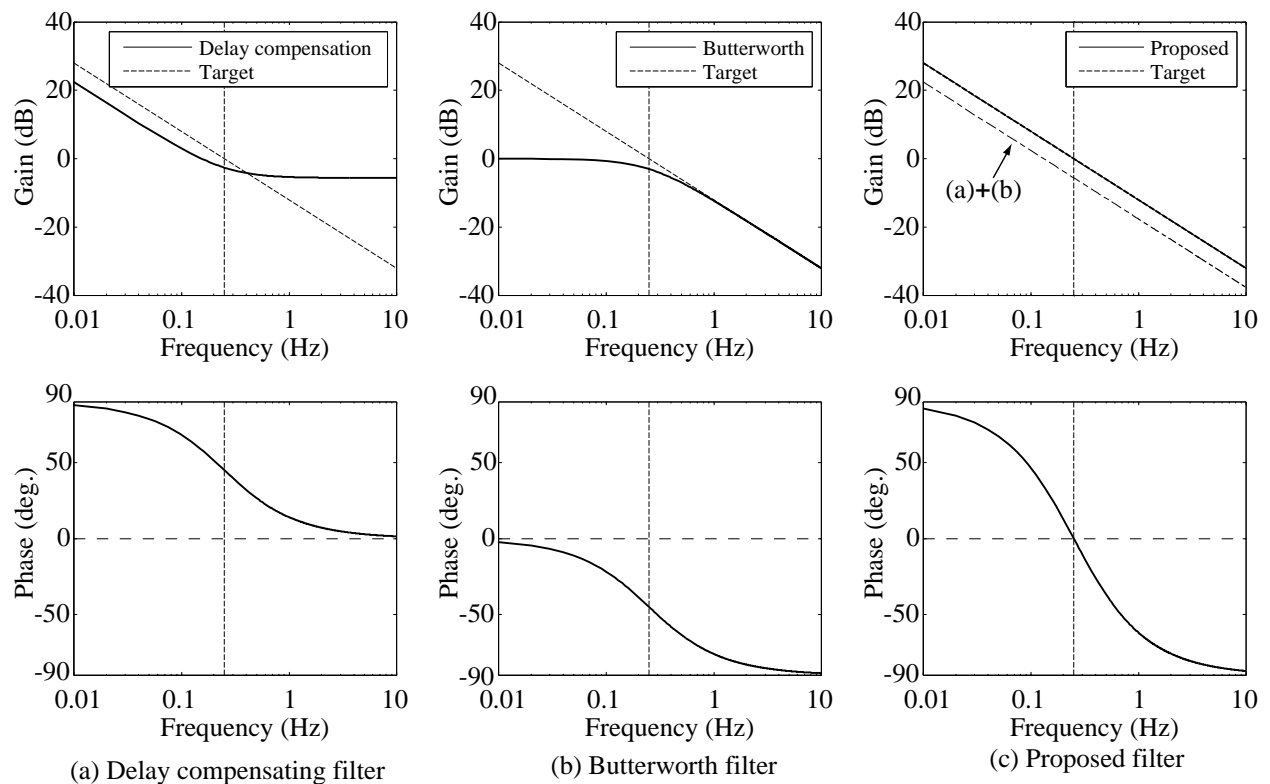


図2 提案提示デジタルフィルターのBode線図

提案フィルターの設計には，従来のスカラー化ではなく，多目的遺伝的アルゴリズム(MOGA)のようなモダンヒューリスティクスを用いることで，複数の有効解(パレート解群)を得る方法の適用を提案する．

既往のビル用ダンパーとして用いられている履歴型ダンパーはコストパフォーマンスが高い振動制御デバイスであるが，ダンパー力が予め決められた降伏耐力に達しないとエネルギー吸収性能を発揮しない．また，やや高コストであるが性能が高い速度依存型ダンパーは，減衰抵抗力が構造物の応答速度に依存するので低速度の応答に対しては大きな減衰力を発揮し難い．このように，既往のビル用ダンパーが直接的に長周期地震動に対して効果を発揮するためには様々な工夫が必要であるが，短周期成分が卓越する地震動に対する対策と，長周

期地震動に対する対策を同時に行うことには困難を伴う。

従って、本研究課題で目指す次世代型ダンパーの設計においては、変位と加速度及び短周期地震動と長周期地震動という互いに相反する関係にある制御対象を同時に考慮する必要がある。このような、互いにトレード・オフの関係にある制御量を同時に最適化する問題は多目的最適化問題と呼ばれており、その数値解法として近年注目されているのは遺伝的アルゴリズムなどの発見的な方法（モダンヒューリスティクス）である。ヒューリスティクスと対照的な関係にある準Newton法など勾配法に基づく解法との違いは、複数のトレード・オフ解を一回の最適化計算で一度に得ることができる点にある。

本研究課題では、既往のMOGAアルゴリズムを参考に、本研究に効率的に適用可能な最適化コードを開発する。

2. 本研究によって得られた新しい知見

申請者らの研究グループでは、長周期構造物に長周期地震動が作用した場合に、床応答加速度を増大させることなく過大変位も同時に低減できる減衰要素として複素剛性を用いることを提案してきた。比因果的な複素剛性の特性を考慮した周波数応答解析では、複素剛性の長周期構造物における優位性が明らかとなっている。しかしながら、複素剛性はあくまで理論モデルであって、その振る舞いを厳密に表現する物理的な材料や要素は、その非因果性の問題もあって見いだせない。

本研究課題では、MRダンパーのコンピューター制御により複素剛性の振る舞いを模擬する方法を模索し、図1に示したような低次デジタルフィルターを観測された構造物の応答速度に対して適用して、得られた信号から制御力を発揮させることを提案した。このデジタルフィルターは、米国メリーランド大学との共同研究により、下記のような極めて単純な伝達関数で表現できることが明らかとなっている。

$$H(s) = \frac{s - W}{s + W} \quad (1)$$

ここで、 W はフィルター特性を決定する周波数に基づいて決定されるパラメータで、構造物の固有振動数や中心応答周波数に基づいて決定する。(1)式で表されるフィルターは因果的であると同時に、低次フィルターなので単純で有り、実装も容易である。欠点としては、 W 近傍の特定の周波数を除く広い周波数帯域で位相ひずみがあることであるが、構造物応答の狭帯域特性を考慮するとそれ程致命的な問題ではないと考えている。

このように、既往研究と比べても単純さ、実装の容易さの程度は高く、このような低次の因果的フィルターを開発できたことは、本研究課題における最大の成果であると考えている。得られた成果は下記文献[7]として、国際専門誌Structural Control and Health Monitoringに日米国際共著論文として投稿済みで現在査読中である。

具体的に提案フィルターを適用したMRダンパーを設計するためには、既に述べたように多目的最適化手法に基づく必要があると考えており、H27年度は本助成を受けて既往のコードを参考に、本研究課題に適用可能な効率的解析コードの開発に成功している。

今後、今年度得られた上記の成果を発展させて、MRダンパーを用いた長周期構造物の地震

時応答制御実験をリアルタイム・ハイブリッドシミュレーション実験により確認する予定である。

3. 発表論文

- [1] 中村俊介, 池永昌容, 五十子幸樹, 井上範夫: 複素剛性ダンパー付き免震構造物伝達特性の理論モード解析, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (関東), 構造Ⅱ, pp. 577-578, 2015年9月6日
- [2] 佐々木裕一, 池永昌容, 五十子幸樹: ロングストローク MR ダンパーの単体加振実験, 日本建築学会東北支部研究報告集 (仙台), 第79号, 構造系, 2016年6月18日(投稿済み)
- [3] 五十子幸樹, 谷口洵, 黒澤祐, 池永昌容, 菅野秀人, Brian M. Phillips: 非線形性を有するダンパーに対するリアルタイム・ハイブリッドシミュレーションの適用 その1 研究背景とリアルタイムハイブリッドシミュレーションの概要, 日本建築学会東北支部研究報告集 (仙台), 第79号, 構造系, 2016年6月18日(投稿済み)
- [4] 谷口洵, 黒澤祐, 池永昌容, 菅野秀人, 五十子幸樹, Brian M. Phillips: 非線形性を有するダンパーに対するリアルタイム・ハイブリッドシミュレーションの適用 その2 リアルタイムハイブリッドシミュレーション実験結果, 日本建築学会東北支部研究報告集 (仙台), 第79号, 構造系, 2016年6月18日(投稿済み)
- [5] 黒澤祐, 谷口洵, 池永昌容, 菅野秀人, 五十子幸樹, Brian M. Phillips: 非線形性を有するダンパーに対するリアルタイム・ハイブリッドシミュレーションの適用 その3 変位制御設計制御を施した MR ダンパーを用いた実験, 日本建築学会東北支部研究報告集 (仙台), 第79号, 構造系, 2016年6月18日(投稿済み)
- [6] 南遼太, 護法亜弥, 池永昌容, 五十子幸樹: 地震動入力レベルを考慮した粘性-マス直列型ダンパー免震システムの多目的最適設計, 日本建築学会東北支部研究報告集 (仙台), 第79号, 構造系, 2016年6月19日(投稿済み)
- [7] Keivan, A., Phillips, B., Ikenaga, M., Ikago, K., Causal realization of rate-independent linear damping for the protection of low-frequency structures, *Structural Control and Health Monitoring*. (査読中)