

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 11 日現在

機関番号：32682

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560542

研究課題名(和文)周波数に基づき制御則を切替える実用的振動制御に関する研究

研究課題名(英文)Practical vibration control to switch a control law based on frequency

研究代表者

阿部 直人(Abe, Naoto)

明治大学・理工学部・教授

研究者番号：10202673

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円、(間接経費) 1,140,000円

研究成果の概要(和文)：構造物などの振動を抑制する方法として、付加質量を使用する動吸振器は良く知られているが、その性能は限定的である。動吸振器を付加した共振曲線は剛性によって性能が変化する。そこで可変剛性を実現した動吸振器により、構造物の振動している振動周波数に応じて動吸振器の剛性を可変させるセミアクティブコントロールを提案した。共振曲線から剛性を可変させる周波数を定め、構造物の振動周波数をフィルタによって検出する手法も提案した。円錐型のばねを一對用いて予圧縮変位を変化させる動吸振器を一層構造物に、ばね要素も持つエアダンパの空気流出量を可変させる動吸振器を二層構造物に適用し、実験によりその効果を確かめた。

研究成果の概要(英文)：As a method to shift the resonance frequency, the dynamic absorber using additional mass is well known; However, its performance is restrictive. The resonance curve with the dynamic absorber will be changed by stiffness. Therefore, by the dynamic absorber which realized variable stiffness, we proposed that a semi-active control to switch the stiffness of the dynamic absorber depending on the vibration frequency of the structure. We proposed that a technique which is detected the vibration frequency of the structure by some Butterworth filter, and the frequency to change stiffness is determined from a resonance curve. We applied the dynamic absorber which changed pre-compression displacement with one pair of cone type spring to one-degree-of-freedom structure, and also the dynamic absorber with an air damper which changed air flow to change the stiffness by an air spring to two-degree-of-freedom structure. The effects were checked by some experiments.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・制御工学

キーワード：振動制御 セミアクティブ制御 可変剛性 動吸振器 切替制御

1. 研究開始当初の背景

付加質量を用いたアクティブ制振制御は高性能ではあるが、付加質量の可動範囲の制限から大きな地震には対応できない。一方質量とはね、ダンパという受動素子から構成される動吸振器の性能は限定的であるが大きな地震に有効になる。過去の研究において、その両者の長所を活かすために、二重構造を持ち、運動エネルギーの大きさに応じてアクティブ制振制御と動吸振器を切り換える方法を提案したが、以下のような問題点が明らかになった。

1. 動吸振器(パッシブ制振)の性能向上を検討する必要がある。
2. 切替則にエネルギーを用いることは有効だが、閾値の選定に試行錯誤を要する。

1.の問題に関しては複数の付加質量を用いるなどの方法が他研究者によって提案されている。しかし、付加質量のダンパを可変にするセミアクティブ制御手法は従来提案されていなかった。そこで付加質量の減衰係数と周波数特性に着目して、制御対象の振動周波数に応じて減衰係数を変化させるセミアクティブ制御手法を提案し、基礎実験において有効な結果が得られた。ここでの結果が本研究の「周波数に基づく切替制御」という発想につながっている。また、周波数特性から切替制御に用いる周波数の閾値も直ちに求めることから、2.の問題の解決につながる。

二層構造物に対しては、通常1次モード抑制のために頂部に一つ動吸振器が設置される。しかし、2次モードが励起されるような地震波が印加された場合には、2次モードが励起され頂部の動吸振器だけでは十分な効果が発揮されない。そのために複数の動吸振器を設置する方法が提案されている。

2. 研究の目的

本研究の目的は、地震波が加わる構造物において、付加質量を用いた動吸振器の特性を構造物の周波数に基づいて変化させるセミアクティブ制御を提案し、動吸振器の性能を向上させることを目的とする。一層構造物における周波数に基づいた可変剛性切替制御と二層構造物における1次モードと2次モードを一つのセミアクティブ動吸振器で抑制する切替制御を行う。

3. 研究の方法

一層構造物の上部に動吸振器を設置したときの共振曲線を図1に示す。

ここで、Soft とは動吸振器の剛性が低い場合、Hard とは高い場合を表す。一般の動吸振器は破線で示されるように二つのピークがほぼ同じになるように剛性を定める。剛性が低い Soft の場合は高い周波数側のピークが高く、逆に剛性が高い Hard の場合は低い周波数側のピークが高くなる。そこで、構造物の振動数を測定し、その周波数に応じて動吸振器の剛性を Soft と Hard に切り換えるセミ

アクティブ制御によって動吸振器の性能の向上が期待できる。共振曲線から、切り換える周波数は直ちに求まるために閾値の設定などの試行錯誤を行う必要はない。

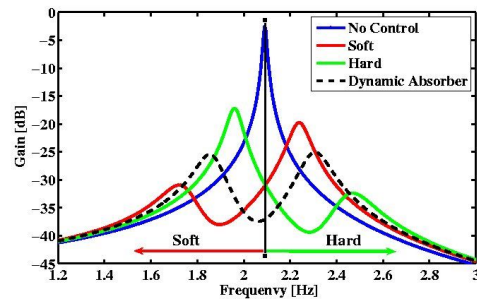


図1 一層構造物の共振曲線

このセミアクティブ制御則を実装するためには、次の点を解決しないと行けない。

1. 現在の構造物の振動数をリアルタイムで判定する手法の確立。
2. 可変剛性機構を持つ動吸振器の作成
また、二層構造物に対しては、2次モードが励起されているかどうかをリアルタイムで判定し、1次モード抑制と2次モード抑制を切り換えることが可能な可変剛性機構を持つ動吸振器を作成する必要がある。

これらの問題を解決し、実験室内でのモデルを作成し、様々な地震波を再現できる振動台を用いて、検証実験ならびにシミュレーションを行った。

4. 研究成果

構造物の振動数は一般にFFT解析などで行われるが、FFTではある程度の時間データが必要になるために、リアルタイムでの判定には不向きである。そこで、本研究では、バターワース型のフィルタを用いて、振動数を判定する。すなわち、測定データをフィルタに通した値と、フィルタの次数だけシフトレジスタで遅らせたデータを比較することで、構造物の振動数を判定する。バターワース型フィルタはカットオフ周波数で3dBの減衰があるために、平坦な通過域を3dBだけ高める。フィルタの次数は高いほど正確に判定できるが時間遅れを考慮して6次と定めた。

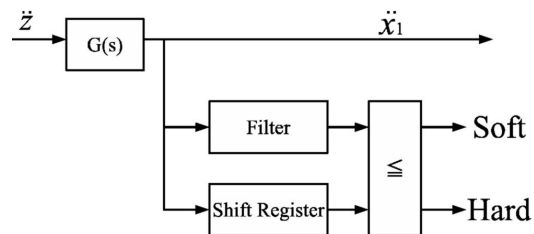


図2 フィルタによる振動数の判定

振動のデータは原点を往復するために、上記の方法だけでは切り換えが頻繁に起こる。それを防ぐ目的で、比較する二つのデータの極大値を比較している。極大値を比較するこ

とは、二つの波形の包絡線の近似を求めて比較していると考えられる。

4 - 1 . 一層構造物の場合

可変剛性機構はセミアクティブサスペンションなどに実用化されているが構造が複雑なものが多く本手法での切換には不向きである。そこで、一層構造物の場合は、一對の円錐ばねの予圧縮変位 L を変化させることで剛性を変化する機構を用いた。円錐ばねの荷重特性は非線形であり、ある変位から急激に剛性が高くなり、2 次関数に近似することができる。一對の円錐ばねの剛性は線形の荷重特性となり、その値は予圧縮変位に依存する。円錐ばねの予圧縮変位をモータによるラックアンドピニオン機構で素早く変化させることで、Soft と Hard の剛性の変化を実現した。

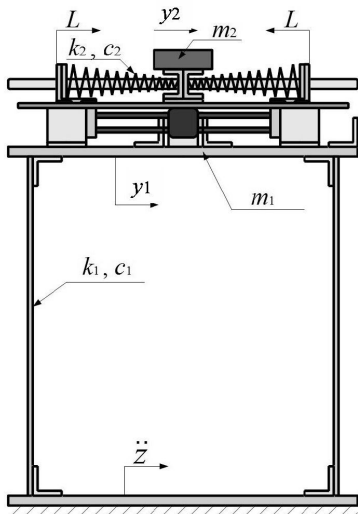


図3 一層構造物のモデル図

地震波としては、新潟中越沖地震を用いた。この地震波のスペクトルは Soft と Hard にまたがってピークをもつために、検証には適していると考えられる。制御の指標としては、絶対加速度の最大値 (MAX)、二乗誤差面積 (RMS)、パワースペクトルのピーク値 (PSD) を用いた。シミュレーションにおいてはセミアクティブ制御が全てにおいて最も良い結果となった。実験でも動吸振器よりは全て良い結果となった。表1にシミュレーションと実験結果をまとめた。動吸振器に対するそれぞれの指標の比率を表している。

シミュレーション	実験	
MAX	56.3%	87.5%
RMS	55.8%	82.6%
PSD	64.2%	75.0%

表1 新潟中越沖地震によるシミュレーションと実験結果 (動吸振器に対する比率)

	エルセン ト口地震	兵庫県南 部地震
MAX	99.9%	101.3%
RMS	88.9%	105.9%
PSD	80.8%	92.1%

表2 その他の地震に実験結果 (動吸振器に対する比率)

他の地震波についてもほぼ同様の結果が得られたが、兵庫県南部地震波ではわずかながら動吸振器の性能が良い場合も見受けられた。実験において予圧縮変位はおよそ 0.2 秒で変化させているが、その時間遅れがシミュレーションほどよい結果ではなかった原因と考えられる。

また、共振曲線は定常特性を表すものであり、地震波のように多くの周波数成分を含む場合には、全ての場合において必ずしも性能が良いということは保証されない。しかしながら、共振曲線から切り換え周波数が直ちに定められるため、実用的ということができる。

4 - 2 . 二層構造物の場合

二層構造物の1次モードと2次モードを、頂部においた一つのセミアクティブ動吸振器で抑制することを目的とする。頂部の動吸振器は通常1次モード抑制に設定される。1次モードが抑制されれば2次モードもある程度抑制されるが、2次モードを励起する地震波の場合は必ずしも十分な効果は得られない。

可変剛性機構としてはエアダンパを用いた。エアダンパは空気の流出量を調整して減衰を変化させることができるが、同時に空気であるために空気ばねとしての性質も併せ持つ。これを利用して、二種類の空気調節ねじを三方弁でエアダンパに接続し、電磁弁によって可変剛性を実現した。電磁弁は非常に高速であるために、切り換え速度は十分に速い。しかしながら、空気の流出量が一定になってはじめて所望の特性が得られるため、過渡的な状態では必ずしも減衰や剛性が所望の値を示している保証はない。

二層構造物の上部の可変剛性機構を持つ動吸振器の上面図を図4に示す。

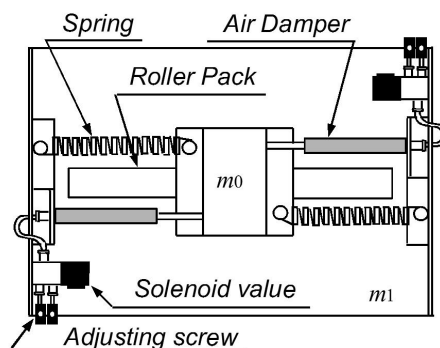


図4 エアダンパを用いた動吸振器

同定された構造物のパラメータから、動吸振器のばねを1次モード抑制に選び、1次モードにおける2つの頂点が等しくなるように、空気調節ねじを調整した。以下ではこれをSoftと呼ぶ。次に、2次モード抑制のために適した空気調節ねじの回転数を選ぶ。ばね定数を大きく選ばなければならないので、かなり空気調節ねじを絞る必要がある。以下ではこれをHardと呼ぶ。

2次モード成分が表れやすい構造物の中間層の相対変位の応答を計測し、1次モードの振動が大きい場合はSoft、逆に2次モードの振動が大きい場合はHardに動吸振器の特性を切り換える。基本的な考え方は一層構造物の場合と同じである。共振曲線から、中間層の反共振点である2.4 Hzにカットオフ周波数をもつバターワース型ハイパスフィルタを用いた。

切り換え制御を行った場合の上層の変位と中間層の変位を、スイープ波による同定結果の共振曲線と、HardとSoftを切り換えた場合の実験結果を重ねて示す。

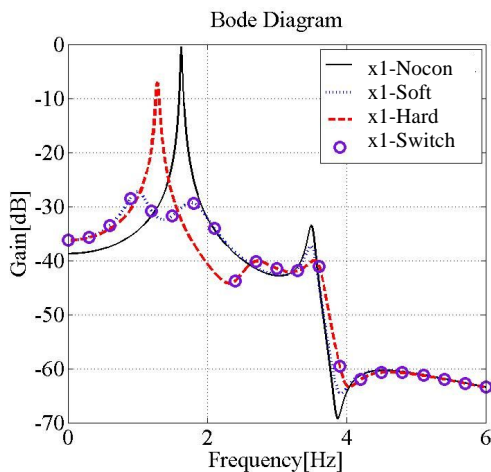


図5 上層の共振曲線

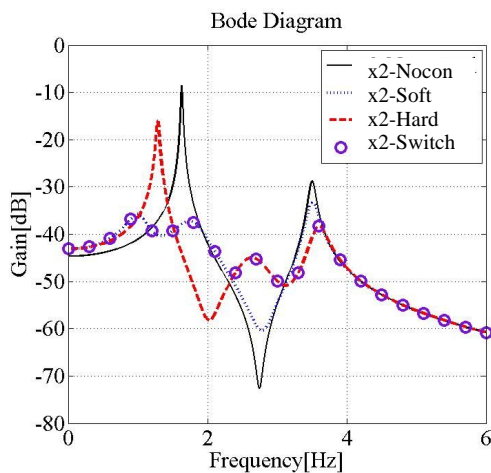


図6 中間層の共振曲線

実測値において2.4 Hzより低い周波数ではSoft、高い周波数ではHardに切り換わり、1.3 Hz付近の1次モードと3.3 Hz付近にある2次モードの双方を抑制している。

実験としては、1次モードを多く含んでいるエルセントロ地震波と、2次モードを多く含んでいる鳥取地震波を用いた。

上層 MAX	上層 RMS	中間 MAX	中間 RMS
99.8%	104.1%	96.4%	100.0%

表3 エルセントロ地震波実験結果(対動吸振器:Softとの比率)

上層 MAX	上層 RMS	中間 MAX	中間 RMS
91.0%	82.6%	88.1%	79.2%

表4 鳥取地震波実験結果(対動吸振器:Softとの比率)

表3では1次モードを励起しやすいエルセントロ地震波の結果を、1次モード抑制の動吸振器(本研究ではSoftの場合)との比率を示している。特に1次モード励起時の中間層は上層に比べて振幅が小さいため、エルセントロ地震波の持つスペクトル量に大きく依存したのではないかと考えられる。ほぼSoftと同等の結果であり、切り換え制御は比較的良好な結果であると言える。切換の様子を見ると、SoftとHardに頻りに切り換えが起きている。

表4では2次モードを励起しやすい地震波であり、本研究の主な対象である。動吸振器(Soft)に比べて、上層及び中間層の最大変位、RMSともに抑制効果が表れている。切換の様子を見ると、Hard(2次モード抑制)になっている時間が長くなっている。

以上のように本研究において解決しなければならない以下の2点を解決した。

1. 現在の構造物の振動数をリアルタイムで判定する手法の確立。
 2. 可変剛性機構を持つ動吸振器の作成
- そして、一層構造物と二層構造物のモデルを作成し、様々な地震波を再現できる振動台を用いて、検証実験を行い、その効果を確認した。

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14件)

- (1) Hiroyuki Ichihara and Hirokazu Anai, An SOS-QE Approach to Nonlinear Gain Analysis, 2011 50th IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference, 2011, 7152-7157
- (2) Taichi Matsuoka, Vibration Suppression Device Having

- Variable Inertia Mass by MR-Fluid, Proceedings of the ASME 2011 International Design Engineering Technical Conferences, 2011, No.47020
- (3) Hiroiyuki Ichihara,
Sum of Squares Based Input-to-State Stability Analysis of Polynomial Nonlinear Systems, SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration, Vol.5, No.4, 2012, 218-225
- (4) Kazuhiko Hiramoto, Taichi Matsuoka, Katsuaki Sunakoda,
Simultaneous Optimal Design of the Lyapunov-Based Semi-Active Control and the Semi-Active Vibration Control Device: Inverse Lyapunov Approach, Transactions of the ASME, Journal of Pressure Vessel Technology, Vol. 134, No. 6, 2012, 061211, 13p
- (5) 松岡太一, 高部哲也, 芥雄二郎, 若林信宏, 大亦絢一郎,
モーメント型動吸振器によるはりの振動抑制, 日本機械学会論文集 C 編, 78 巻 792 号, 2012, 2733-2745
- (6) Taichi Matsuoka, Michio Kudo, Yasuo Okazaki,
A seismic Performance of an Arc Shaped Spring Damper for Strengthening at Corner of Structure, 15th World Conference on Earthquake Engineering, 2012, No.2707
- (7) Taichi Matsuoka,
Liquid Inertia Damper Having a Screw Shaped Piston, ASME, PVP-2012 Seismic Engineering, 2012, No.78419
- (8) Yusuke Suzuki and Naoto Abe,
Variable Stiffness System for Semi-Active Vibration Control by Frequency, Proc. SICE Annual Conference 2013, 2013, 923-928
- (9) Hiroiyuki Ichihara,
A Convex Approach to State Feedback Synthesis for Polynomial Nonlinear Systems with Input Saturation, SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration, Vol.6, No.3, 2013, 186-193
- (10) Yutaka Nakamura, Akira Fukukita, Kazuo Tamura, Issei Yamazaki, Taichi Matsuoka, Kazuhiko Hiramoto, Katsuaki Sunakoda,
Seismic response control using electromagnetic inertial mass dampers, Earthquake Engineering & Structural Dynamics, Vol.43, No.4, 2013, 507-527
- (11) Kazuhiko Hiramoto, Taichi Matsuoka, Katsuaki Sunakoda,
Simultaneous optimal design of the structural model for the semi-active control design and the modelbased semi-active control, Structural Control and Health Monitoring, Vol.21, No.4, 2013, 522-541
- (12) Taichi Matsuoka, Takuya Wada, Mizuki Katakura,
Vibration Suppression of Traffic Signal Pole by Generating Electrical Power, ASME, PVP-2013 Seismic Engineering, 2013, No. 97351
- (13) Taichi Matsuoka, Variable Inertia Damper Using Half Toroidal Wheel, Proc. SICE Annual Conference 2013, 2013, 913-916
- (14) Taichi Matsuoka, Tomohiro Sugita,
Semiactive Liquid Inertia Damper with Particles Using Electromagnetic Induction, 15th Asia Pacific Vibration Conference, 2013, 830-838
- [学会発表](計 15 件)
- 鈴木雄介, 阿部直人, 剛性可変機構を用いた周波数によるセミアクティブ制振制御, 日本機械学会関東支部第 18 期総会講演会, 2012
- 河面圭太, 阿部直人, 振動モードによる動吸振器の切り替え制御, 日本機械学会関東支部第 18 期総会講演会, 2012
- 松岡太一, 工藤道男, 岡崎泰男, 地震対策用仕口補強制振ばねダンパの開発(その 2 面内せん断試験および振動実験), 日本建築学会大会, 2011
- Taichi Matsuoka, Michio Kudo, Seismic Vibration Tests Using a Wood Frame with Arc Shaped Spring Dampers, 14th Asia Pacific Vibration Conference, 2011
- 藤居, 市原裕之, ハイブリッドモデル予測制御による独立二輪駆動型移動ロボットの障害物回避, 第 55 回自動制御連合講演会, 2012
- 望月, 市原裕之, ボールバランスに対する GKYP 補題を用いた I-PD 制御系設計, 第 55 回自動制御連合講演会, 2012
- 杉田智洋, 松岡太一, 藤田浩太郎, 電磁誘導を用いた流体式ダンパに関する研究, 日本機械学会 D&D2012, 2012
- 平元和彦, 外山遼太, 松岡太一, 砂子田勝昭, セミアクティブ制御におけるモデルと目標制御則の最適化, 日本機械学会 D&D2012, 2012
- 岡野有紀, 阿部直人, 可変剛性機構を用いたセミアクティブ制御における切り替え手法, Dynamics and Design Conference 2013, 2013
- 橋本聡志, 阿部直人, 空圧機器を用いた配管系の連結制振制御, Dynamics and Design Conference 2013, 2013
- 市原裕之, YALMIP を利用した LMI 最適化問題の解法, 第 56 回自動制御連合講演

会予稿集，2013

青野絵里奈，松岡太一，富岡隆弘，瀧上唯夫，周波数依存特性をもつヨーダンパによる車体の上下弾性振動抑制効果，日本機械学会関東学生会第 53 回学生員卒業研究発表講演会，2014

杉田智洋，松岡太一，電磁石を用いた多極型MRダンパに関する研究，日本機械学会関東支部第 20 期総会・講演会，2014
杉田智洋，松岡太一，磁誘導を用いた流体式ダンパに関する研究（鋼球クラスタによる影響），Dynamics and Design Conference 2013，2013

藤井遊介，松岡太一，てこ機構を用いた標識柱用発電式動吸振器，Dynamics and Design Conference 2013，2013

〔その他〕

可変剛性機構を用いたセミアクティブ振動制御

<http://www.meiji.ac.jp/tlo/6t5h7p00000bjf6m-att/a1379556407591.pdf>

可変慣性質量効果をもつ振動抑制装置の開発

<http://www.meiji.ac.jp/tlo/6t5h7p00000bjf6m-att/a1335922897314.pdf>

6．研究組織

(1)研究代表者

阿部 直人 (ABE NAOTO)
明治大学・理工学部・教授
研究者番号：10202673

(2)研究分担者

市原 裕之 (ICHIHARA HIROYUKI)
明治大学・理工学部・准教授
研究者番号：70312072
松岡 太一 (MATSUOKA TAICHI)
明治大学・理工学部・講師
研究者番号：80360189