

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 9 日現在

機関番号：32665

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420183

研究課題名(和文) 想定を超える地震動に対抗しうる構造制振システムの構築

研究課題名(英文) Structural control system that can withstand earthquake exceeding assumed level

研究代表者

渡辺 亨 (WATANABE, Toru)

日本大学・理工学部・教授

研究者番号：80265933

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：想定を超える地震動に対向しうる制振システムとして「通常構造物と免震構造物とを連結した相補連結制振システム」「ワイヤで垂下された錘を復元力としストロークを拡大するワイヤ動吸振器」「前後対称な可変ピッチプロペラを用い迎え角を切り替えることで推力を可変とした空気力制振装置」の3つのシステムを提案し、その制振効果を実験的に検討し、原理的な有効性を確認した。

研究成果の概要(英文)：Three type of structural control system that can withstand earthquake exceeding assumed level are presented; complementary connected control system by coupling ordinary and base-isolated structures, tuned mass damper utilizing wired pendulum to obtain restoring force, and air-thrust system using symmetrical variable-pitch propeller. Experimental analysis are carried out and fundamental property are clarified.

研究分野：機械力学・計測制御

キーワード：振動制御 連結制振 免振 動吸振器 ワイヤ 可変ピッチプロペラ 構造制御

1. 研究開始当初の背景

従来、地震防災で想定されていた地震動は、卓越周期が0.5秒～1秒程度、地震自体の継続時間が30秒程度の「短周期・短時間地震動」であった。しかし近年の地震の経験から、卓越周期が6～8秒、継続時間が1分を超える「長周期・長時間地震動」が注目されている。

従来の構造制御は、「短周期・短時間地震に対する対策」が主であった。例として、ビル自体の剛性を下げて振動エネルギーを吸収させる「柔構造」や、ビル全体を柔軟な部材で支持する「免震構造」などがあるが、長周期地震動に対しては効果が無いか逆効果になる。また、長時間振動に対しては部材のエネルギー吸収能力が限界を超える可能性も指摘されている。また、「構造物に付加質量（おもり）を搭載し、両者をばねとダンパで結合させる『動吸振器』」や「隣接する構造物同士をばねとダンパで結合させる『連結制振』」など、相対運動を活用する手法もあるが、長大振幅地震に対しては機械的ストロークが不足がちである。

2. 研究の目的

そこで申請者は、従来の制振手法を系統的に組み合わせる、あるいは機構的な改良を加えることによって、長周期・長時間・長大振幅に対する制約を取り除くことを考えた。本研究では、以下の3つの手法を発展させる。

- (1) 免震構造物と通常構造物を連結し、相補的に制震を行なう「免震+連結制振」（図1）。短周期地震に際しては免震構造が通常構造を抑え、長周期地震に際しては通常構造が免震構造を抑える。



図1 免震+連結制振の概念

- (2) ばね・ダンパをワイヤ・重錘に代え長ストロークを実現する「ワイヤ動吸振器」（図2）。ワイヤと重錘で復元力を得るのでワイヤ長さ=ストロークは原理的には無限に伸ばせる。

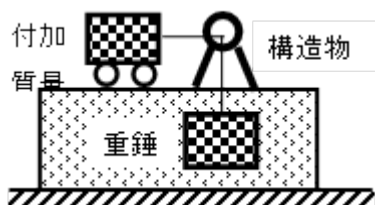


図2 ワイヤ動吸振器の概念

- (3) 可変ピッチプロペラの迎え角を切り替えて推力=制振力を制御する「プロペラダンパ」（図3）。モータの回転速度は一定で、プロペラピッチの正負の切り替えて推力方向を切り替えるので動作が速く省エネルギー。また動作周期は原理的に無限大。

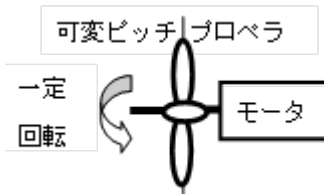


図3 可変ピッチプロペラダンパの概念

(1)は、免震と連結制振とを組み合わせることで相補的に両者の長所を活かし、いかなる周期にも対応可能とするものであり、(2)は機構的な改良で動吸振器のストロークの限界を克服しようとするものである。また(3)は申請者がこれまでクレーン吊荷の制振を対象として研究していたが、原理的に超長周期振動の制御も可能であり、新たに建物の制振に適用するものである。

3. 研究の方法

前項で示した3つの手法それぞれについて以下のような検討を行なう。

- (1) 免震+連結制振手法について
振動現象においては例えば「変位を抑えようと加速度が増加する」というようなトレードオフ関係が存在するため、特定の物理量だけではなく多数の物理量を比較することで真の制振性能を評価する必要がある。また、連結制振では連結部に極端な応力集中が生じるため、その緩和手法も検討する必要がある。このため、実際の構造制御の場面で問題となる「最大（ピーク）応答」について、特性の異なる地震波を様々な組み合わせ（建物および連結部のパラメータ）に適用し、応答を計算することで、免震におけるトレードオフ＝「免震層変位と構造物頂部の加速度」の関係、および連結制振におけるトレードオフ＝「連結箇所の数と連結部にかかる応力集中」の関係を明らかにする。これにより、提案する手法がどのような状況に対しどのような得失があるかを多面的に評価する一方、実用的に意味のある免震+連結制振システムの設計に必要な指針を得る。

- (2) ワイヤ動吸振器について

本手法の原理的な有効性は確認されているが、ワイヤ動吸振器の有効性を活かした具体的な設計指針、すなわち「復元力特性をどのようにデザインするか、またそのためには個々のパラメータをどのように

設定すべきか」という点が未検討であった。このため、理論解析により個々の設計パラメータが復原力特性に与える影響を明らかにすると共に、様々な振幅レベルの地震動に対してどのような復原力特性を実現すると良いかを数値計算と実験により検討する。これにより、要求される性能を実現するための復原力特性と、その実現に必要な設計指針とを得る。

(3) プロペラダンパについて

本手法の原理的な有効性は確認されているが、これまではクレーン吊荷のような1自由度振動に対する検討が主であり、塔状構造物のような複数の振動モードを有する系に対する有効性、また切り替え制御のアルゴリズムなどは未検討である。

このため、数値計算・理論解析により複数モードを有する振動系に対する制振効果および制御手法を検討すると共に、塔状構造物に対する有効性を実験により検討する。

これにより、プロペラダンパシステムの制振系設計に必要な指針を得る。

4. 研究成果

前項で示した3つの手法それぞれについて得られた成果は以下の通りである。

まず(1)「免震+連結制振」については、提案するシステムの原理的な有効性、すなわち全く同一の上部構造を連結しても制振効果が得られることを確認できた。その上で応力緩和のために分散連結を試みた結果、変位抑制と加速度抑制の間、および応力緩和と制振性能の間にそれぞれトレードオフ関係があることを確認し、設計指針を得た。

さらに、実用面を考慮して、連結を平面(2棟)から立体(4棟)とした場合の検討も行った。ただし、実験装置において2方向免振機構の開発が難航したので、ひとまず通常の連結制振でその効果を評価した結果、やはり同様の制振効果を確認できた。

また(2)「ワイヤ動吸振器」についても、その原理的な有効性、すなわちワイヤで垂下した錘を復原力とすることでストロークを事実上無限に延長できることを確認できた。しかし、当初予定していた理論計算による設計指針の検討については、ワイヤの弾性を無視することができないことが確認されたので、それを含めた数値計算プログラムの開発に取り組んだが、方程式が非線形なものとなったために解析が非常に複雑となり開発を終えるに至らなかった。また、実験装置による実験的な検討については、加振台の機械的な制約のため原理的な有効性を実証する以上の実験が困難であり、実験的な検討も完了に至らなかった。

一方、(3)「プロペラダンパ」については、既に模型実験レベルで原理的な有効性は確認できていたので実大サイズのダンパ装置の開発(設計・製作)を行ない、開発には成功した。しかし実験的に推力を計測すると、空力的な問題で発生する推力が非常に低いレベルに留まることが確認された。そこで様々な改良を行い若干の向上を見たが、最終的には「可変ピッチプロペラを用いる限り対称翼形を用いた完全にフラットなプロペラ翼とする必要があるが、その形状では有効な推力を得ることは困難である」ことを確認し、本提案が原理的に困難であるという結論に至った。

ただし、新たに(可変ピッチプロペラでなく)「通常のプロペラ2枚を対向させクラッチにより動力との接続を切り替えて使う」という着想を得た。これは、当初提案どおりモータ軸は一定速度で回転させつつ、2枚の通常固定ピッチプロペラを対向させてその軸に通しておく。このときプロペラとモータ軸は固定せずクラッチを介してプラテンフリーの状態にしておき、推力を発生する必要が生じたらクラッチを接続し推力を発生させる。このような形態を取る事で前述の「フラットな翼面では推力が得られない」という問題を回避できると期待される。

5. 主な発表論文等

[学会発表](計 4 件)

松崎昂平, 高橋洋行, 豊田紘行, 渡辺亨, 背戸一登, 4棟連結構造制振システムの提案と実験的性能評価, 日本大学理工学部学術講演会(2016年12月3日, 日本大学理工学部(東京都千代田区))

深谷晃次, 宇田拓樹, 渡辺亨, 可変推力プロペラシステムの推力向上のための実験的研究, 日本大学理工学部学術講演会(2016年12月3日, 日本大学理工学部(東京都千代田区))

高橋洋行, 豊田紘行, 渡辺亨, 背戸一登, 単独建物のための内部4棟連結システム, 日本機械学会機械力学・計測制御部門講演会(2016年8月26日, 山口大学工学部(山口県宇部市))

Toru Watanabe, Hiroyuki Toyoda and Kazuto Seto, Bidirectional Connected Control Method Applied to an Experimental Structural Model Split into Four Substructures, International Conference on Motion and Vibration Control 2016 and Recent Advances in Structural Dynamics (MOVIC & rasd 2016, 2016年7月5日, Southernputom, UK)

6 . 研究組織

(1)研究代表者

渡辺 亨 (WATANABE, Toru)

日本大学・理工学部・教授

研究者番号：80265933