

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 18 日現在

機関番号：27101

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2013

課題番号：24760189

研究課題名(和文) はり構造の座屈特性を利用した小型・高性能垂直方向アイソレーターの開発

研究課題名(英文) Development of a high performance miniaturized vibration isolator based on a post-buckled beam

研究代表者

佐々木 卓実 (Sasaki, Takumi)

北九州市立大学・国際環境工学部・准教授

研究者番号：80343432

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円、(間接経費) 960,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、鉛直方向の防振装置として、L字型はりの座屈に基づくパッシブ防振装置の開発を行った。研究の結果、開発装置が従来装置に比べて非常に簡便な構造で、大幅な小型化・高性能化を実現可能であることを確認した。研究では、まず、有限要素法を用いた数値解析を行い、はりの幾何学条件と静的復元力および周波数応答の関係を定性的に明らかにし、高い防振性能を得るための幾何学条件を明らかにした。また、数値解析の結果に基づき実験モデルを作成し、実験結果と数値計算結果の比較から、両結果の妥当性を検証した。

研究成果の概要(英文)：In this study, a passive vibration isolator based on the post-buckled L-shaped beam was proposed as a vertical vibration isolator. The results show that the proposed isolator achieves simplification and miniaturization of an isolator and improvement of the isolation performance. At first, a numerical analysis by the Finite Element Method was done for the L-shaped beam and the relations between the geometry of the L-shaped beam and static and dynamic characteristics of the L-shaped beam was qualitatively clarified. From this result, the geometry which achieves high isolation performance was clarified. Additionally, we investigated the relevance of the analytical result by comparing with the experimental results.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械力学・制御

キーワード：防振 受動防振 非線形復元力 伝達率

### 1. 研究開始当初の背景

機械・構造物の高性能化，高精度化に対する社会的要求が高まるにつれ，機械・構造物と周囲の環境との間を伝達する振動の低レベル化の重要性が高まっている．とくに，微弱な振動ノイズが機器性能に大きな影響を与えるような精密機器では，水平・垂直方向の振動アイソレーターの高性能化が非常に重要な課題となっている．このような要求に対して，各方面で種々のアイソレーターの開発が精力的に行われている．なかでもパッシブアイソレーターは，設備コストの面，動作の安定性と信頼性の面から，その重要度が高い．パッシブアイソレーターに求められる最も基本的な特性は，ノイズの振動数よりも十分に低い固有振動数を持ち，振動応答を十分に小さくすることである．すなわち，出来るだけ柔軟なばね要素により構造を支持することが求められる．ここで，垂直方向の防振には，支持する物体の自重による静的変位を小さく抑えるために，図1のような非線形の復元力特性を利用したものが多く，物体の自重による静的変位が，図1のAの領域になるように非線形特性を設定すれば，その近傍の局所ばね定数は小さいので，1次固有振動数は小さく抑えられる．代表的な構造としては，高剛性のばねと負のばねを組み合わせたもの[1]，軸方向に荷重を受けたはりの座屈特性を利用したもの[2]等が挙げられる．このような構造をもつ従来のアイソレーターの特徴として，(i) 非線形特性の実現のために構造が複雑化・大型化する場合が多い，(ii) 2次以上の固有振動数を十分高くすることに注意を要する，などが挙げられる．

### 2. 研究の目的

本研究では，機械・構造物と周囲の環境の間を伝達する垂直方向の振動の低レベル化を目指し，従来品よりも大幅に小型化・簡便化・高性能化した垂直方向パッシブアイソレーターの開発を行う．アイソレーターの基本構造は，複数のはりを組み合わせた構造とし，軸方向に荷重を受けたはりが座屈する際の力と変位の非線形特性を利用して，高性能な防振特性を実現する．この中で，(i) 想定される加振振動数に対して十分低い1次固有振動数と十分高い2次以降の高次固有振動数を併せ持つはり構造の検討，(ii) 構成したアイソレーターの非線形定常応答特性の検討，(iii) 基本アイソレーターの組み合わせによる実用的な防振テーブルの検討を行う．

### 3. 研究の方法

上記の目的を達成するために，具体的に以下の項目を検討した．

- (1) 2本のはりをL字型に結合した構造を鉛直方向アイソレーターとして提案した．この際，防振対象は，L字はりの結合部で支持するものとした．
- (2) L字型はりにおいて，はり結合部に鉛直方

向の強制変位を与え，はり構造が座屈する際の力と変位の非線形特性を明らかにした．

(3) はり構造の固有振動数を検討し，想定される加振振動数に対して，十分に低い1次固有振動数および十分に高い2次以降の高次固有振動数を併せ持つ構造を検討する．また，周波数応答特性を明らかにし，アイソレーターとしての性能を検討した．

(4) はり構造の非線形定常応答特性を明らかにした．

### 4. 研究成果

まず，L次型はりが座屈する際の非線形復元力特性を有限要素法により数値解析し，2つの座屈モードにおける復元力特性の違いを定量的かつ詳細に検証した．図1に静的復元力の解析結果の一例を示す．図中の青および赤の実線は安定座屈モードおよび不安定座屈モードの静的復元力を左縦軸により示し，破線はそれぞれの接線剛性を右縦軸により示している．図のように，安定座屈モードでは，座屈後の接線剛性が常に正の勾配を示しているのに対し，不安定座屈モードでは，負の勾配を示すことが分かる．はりの寸法を種々に変化させて解析を行った結果，L字型はりの静的復元力について，以下のような定性的な特徴を確認した．

(1) はりの長さを短くすると，また，はりの厚さを厚くすると静的復元力は増加する．

(2) はりの厚さを厚くすると，安定座屈モードの静的復元力が不安定座屈モードの静的復元力よりも大きくなる領域が広くなり，厚さを薄くすると，不安定座屈モードの静的復元力が安定座屈モードの復元力より大きくなる．

(3) はりの厚さを薄くすると，座屈後の動的剛性が小さくなる．

次に，上記の解析に基づき，適切な防振対象を搭載し，系の振動伝達率の周波数応答の数値計算を行った．この際，安定座屈モードでは，はりの座屈変位がはり長さに対して概ね1%となるように防振対象の質量を決定した．また，不安定座屈モードでは，座屈変位が1%の箇所で，接線剛性が10N/mとなるように線形コイルばねを並列に接続し，さらに，はりとコイルばねの復元力を考慮した上ではりの座屈変位が1%となるように防振対象の質量を決定した．はりの構造を種々に変化させて解析を行った．図2に伝達率の解析結果の一例を示す．図の青および赤の実線は，それぞれ安定座屈モードおよび不安定座屈モードの周波数応答を示している．まず，系の1次固有振動数を確認した．安定座屈モードでは，座屈後の接線剛性と防振対象の質量によって1次固有振動数が概ね決定されるため，はり構造の変化に伴って，1次固有振動数も広い範囲で変化した．これに対して，不安定座屈モードでは，L字はりとコイルばねを含めて接線剛性が10N/mとなっているため，1次固有振動数ははり構造の変化に依

存せず、概ね同じ値 (0.4Hz 程度) を示した。これは、等価な線形防振装置の固有振動数と比較して、1 次固有振動数の大幅な低減化を実現しており、モデルによっては 95% 以上の低減化率を示した。しかしながら、図 2 の周波数応答からも分かるように、防振領域は 2 次の固有振動数に依存しており、防振装置としての性能向上は 2 次への固有モードへの対応が不可欠である。ただし、図 2 のモデルでは、3 次以上の固有振動数が高い振動数領域に存在するため、2 次と 3 次の固有振動数の間では、高い防振性能が得られる。

上記の解析に基づき実験装置を製作し、復元力特性の計測、ハンマリング試験およびスイープ加振試験による周波数応答の計測を行った。製作した実験装置の写真を図 3 に示す。復元力特性の実験結果は、数値解析とよく一致した。図 4 に伝達率の周波数応答の結果を示す。図中の黒線は実験により得られた変位伝達率の周波数応答、赤線は有限要素解析により得られた力伝達率の周波数応答を示す。図のように、数値解析により得られた共振ピークは実験においても全て確認され、両者はよく一致した。なお、実験の結果では、数値解析で得られない共振ピークがいくつ

か存在するが、これらは L 字型はりの面外方向 (図 3 の紙面に対して垂直方向) の固有モードによる微小な共振および実験装置のフレーム部の固有振動数に対応する共振であることを確認している。このように、実験結果と解析結果はよく一致し、それぞれの妥当性が示された。

次に、装置の自由振動の計測結果に対して、Hilbert 変換を適用することにより、自由振動の瞬時振動数を求めた。その結果、瞬時振動数の振幅依存性が確認された。図 5 に、自由振動の瞬時振動数の背骨曲線を示す。図の横軸は瞬時振動数、縦軸は自由振動の振幅を示す。図中の黒線および赤線は、実験によって得られた瞬時振動数および適切なパラメー

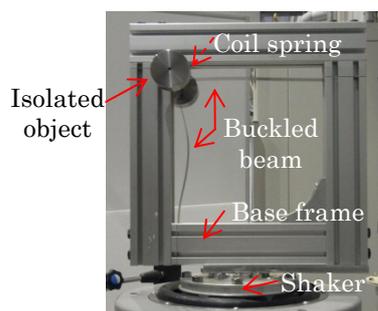


図 3 実験装置

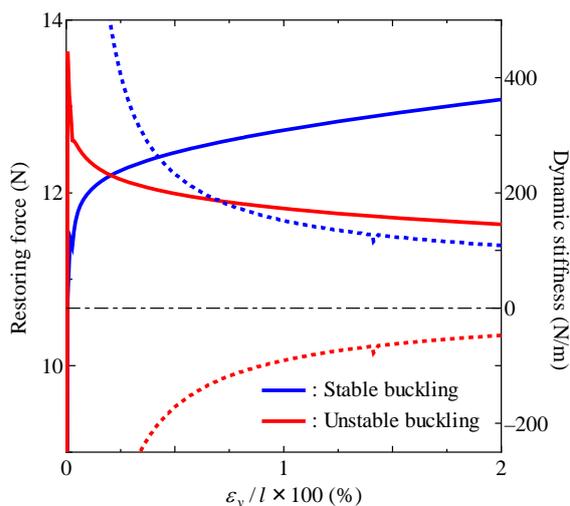


図 1 L 字型はりの静的復元力の一例

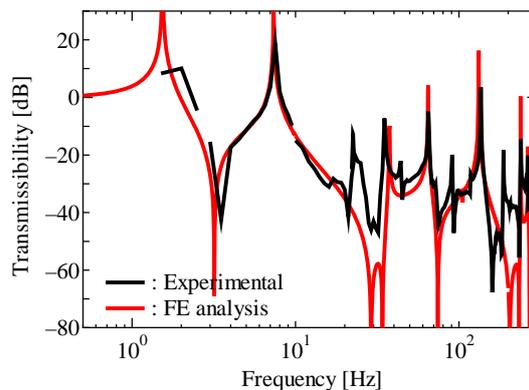


図 4 伝達率の周波数応答の比較

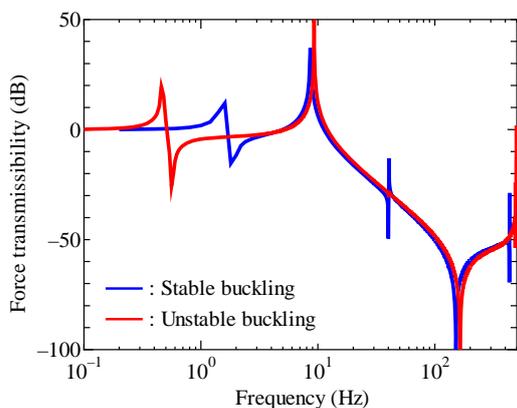


図 2 L 字型はりを用いた防振装置の周波数応答の一例

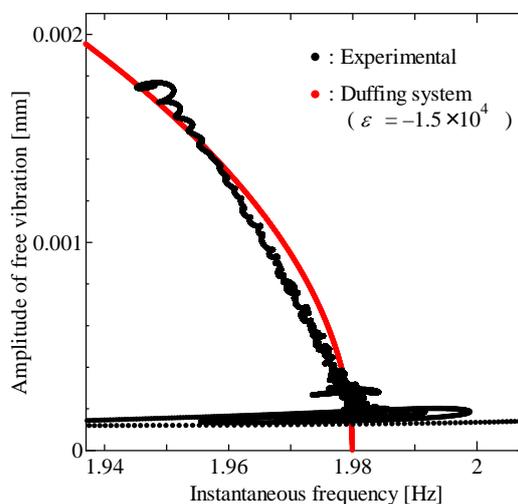


図 5 提案装置の自由振動の背骨曲線

タに調整された Duffing 系の背骨曲線を示す。図のように、本装置は、静的平衡点近傍の非対称非線形性によって漸軟非線形特性を示すことが確認された。また、静的復元力の実験結果から復元力の非線形性を同定し、装置を 1 自由度非線形系にモデル化した。このモデルに対して数値解析を行った結果、分数調波共振の発生を確認した。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 2 件)

- (1) Takumi Sasaki, Timothy Waters, Koichi Fujito and Yumiko Tsuji, Experimental study on a nonlinear vibration isolator based on a post-buckled inverted L-shaped beam, Proc. of The Twelfth International Conference on Motion and Vibration Control, [掲載確定, 印刷中], 査読あり
- (2) Yumiko Tsuji, Takumi Sasaki, Timothy Waters, Koichi Fujito and Dong Wang, A Nonlinear Vibration Isolator Based on a Post-buckled Inverted L-shaped Beam, Proc. of The Sixth World Conference on Structural Control and Monitoring, [掲載確定, 印刷中], 査読有り

[学会発表] (計 4 件)

- (1) 辻優美子, 佐々木卓実, L 字型はりを用いた防振装置の動的力学特性の検証, 日本機械学会 Dynamics and Design Conference 2014, 2014 年 8 月, 上智大学 [発表確定]
- (2) 辻優美子, 佐々木卓実, L 字型はりの座屈を用いた防振装置に関する実験的研究, 2013 年日本機械学会年次大会, 2013 年 9 月 9 日~11 日, 岡山大学
- (3) 藤戸孝一, 佐々木卓実, はりの座屈を用いた防振装置の高度化へ向けた減衰材の最適設置法, 2013 年日本機械学会年次大会, 2013 年 9 月 9 日~11 日, 岡山大学
- (4) 佐々木卓実, 王棟, 藤戸孝一, 辻優美子, L 字型はりを用いた非線形防振装置に関する研究, 日本機械学会 Dynamics and Design Conference 2013, 2013 年 8 月 26 日~30 日, 九州産業大学

## 6. 研究組織

研究代表者

佐々木 卓実 (Sasaki Takumi)

北九州市立大学・国際環境工学部・准教授

研究者番号: 80343432