

氏 名	やました よしたか 山 下 義 隆
学位(専攻分野)	博 士 (工 学)
学 位 記 番 号	博 甲 第 4 2 4 号
学位授与の日付	平成 18 年 3 月 24 日
学位授与の要件	学位規程第 3 条第 3 項該当
研 究 科 ・ 専 攻	工芸科学研究科 情報・生産科学専攻
学 位 論 文 題 目	超弾性形状記憶合金を用いた免震装置に関する研究 (主査)
審 査 委 員	教授 曾根 彰 教授 大住 晃 教授 小坂郁夫 助教授 増田 新

論文内容の要旨

本研究は超弾性形状記憶合金を用いた免震装置に関する研究である。超弾性形状記憶合金の応力 - ひずみ線図は見かけの降伏点以上のひずみに対して明瞭な力の飽和特性を示す。本研究ではこのような性質に着目し、超弾性形状記憶合金を免震装置の復原力要素として使用することで振動源からの加速度の伝達を抑制することを意図している。本研究で使用する超弾性形状記憶合金は、大量生産され安価で入手することができる TiNi 合金の小径のワイヤとしている。

第 1 章では、免震装置の概要について述べ、形状記憶合金の基本的性質と振動制御分野への適用例について述べた後、本論文の目的を明らかにし、本論文の構成を示した。

超弾性形状記憶合金ワイヤを引張負荷・除荷を受けるようにして免震装置に利用する場合、免震装置の所望のストロークを確保するために非常に大きな寸法の形状記憶合金ワイヤが必要となり現実的ではない場合がある。そこで、第 2 章では、形状記憶合金ワイヤが曲げ座屈変形を受けることによって、引張試験で得られるような明瞭な力の飽和特性を示すソフトニングばねを提案した。提案した形状記憶合金ばねは、合金の材料非線形性に加え、座屈による幾何学的非線形性により変形量に対して力が飽和する性質を示し、超弾性効果により大変形後でも元の形状に回復することが可能である。また、この章では、繰返しや変形速度などの形状記憶合金ばねの復原力特性への影響についての調査を行い、免震装置への適用可能性を示した。

第 3 章では、第 2 章で提案した形状記憶合金ばねを実験用に作成した小型の免震装置モデルに適用し、その周波数応答を実験的・解析的に求めた。実験では低速掃引正弦波加振法を適用し、一定加速度振幅の正弦波の周波数を緩やかに掃引させながら一定周波数間隔で掃引を停止し、このときの応答振幅より周波数応答を求めた。得られた周波数応答では振動履歴や跳躍現象といった非線形系特有の現象が確認できた。また、解析的に求めた線形系の周波数応答との比較により、正弦波入力に対して線形系よりも優れた加速度伝達の抑制効果があることがわかった。この章の後半では、形状記憶合金ばねを用いた免震装置の周波数応答を解析的に求めるための等価線形化法について述べた。形状記憶合金ばねの復原力項は最小自乗近似の意味で等価線形化され、静的な試験で求められた変位復原力曲線を用いて等価線形係数を求めることができる。等価線形化法による解析結果と実験結果がよく一致していることから、この解析法の有効性を示すことができた。

第 3 章では形状記憶合金ばねを用いた免震装置の正弦波入力に対する応答を求めたが、実際の使用に際しては正弦波に対する応答のみを調査しただけでは不十分である。そこで第 4 章では、この免震装置の地震応答を実験的・数値的に求めた。実験では地震入力として記録地震波に基づいた加速度入力により免震装置を加振し、入力加速度振幅の最大値と応答加速度振幅の最大値の

比を加速度伝達率と呼び、これをもって免震効果の指標とした。特に形状記憶合金ばねが大変形を起こすような大きな入力に対しては優れた免震効果が発揮され、このことから形状記憶合金ばねの力の飽和特性によって加速度の伝達が低減されていると考えられる。この章の後半では形状記憶合金ばねの復原力特性を現象論モデルとして知られるプライザッハモデルによりモデル化する方法について述べ、これを数値シミュレーションに適用した。シミュレーション結果は実験結果をよく再現できており、特に変位復原力曲線は実験結果と非常によく一致していることから、プライザッハモデルによる形状記憶合金ばねの復原力特性のモデル化は有効であるといえる。

第5章では、本研究で提案する形状記憶合金ばねの変位復原力線図が変位軸方向・復原力軸方向に対して拡大縮小可能であると仮定し、様々な初期剛性と最大復原力レベルを持つ形状記憶合金ばねを用いた免震装置の地震応答を第4章と同様のプライザッハモデルを用いた数値シミュレーションによって求めた。最大絶対加速度応答振幅と最大相対変位応答振幅を免震装置の固有振動数と形状記憶合金ばねの最大復原力レベルの関数として求め、線形系の最大応答振幅で規格化することでいくつかの類似性を見出し、これを免震装置の設計指針として利用することを提案し、いくつかのケーススタディによりその有用性を示した。

第6章は、本論文の結論であり、本研究についてのまとめを述べる。

論文審査の結果の要旨

申請者は超弾性形状記憶合金の引張負荷・除荷過程下で見られる応力-ひずみ曲線におけるソフトニング特性に着目し、超弾性形状記憶合金を免震装置の復原力要素として適用するという研究テーマに取り組んだ。超弾性形状記憶合金を用いた振動制御に関する研究の多くは、その応力-ひずみ曲線におけるヒステリシスに起因したエネルギー散逸能力を用いて減衰要素として使用することを目的としているが、本研究では超弾性形状記憶合金のソフトニング特性による加速度応答の低減を目的としている。振動系に形状記憶合金部材を引張負荷・除荷を受けるように配置するためには非常に大きなスペースが必要となる。そこで申請者は、超弾性形状記憶合金ワイヤが変形時に座屈するという幾何学的非線形性を持たせることによって、引張変形を利用するよりも省スペースで利用できるソフトニングばねを提案した。提案したばねを免震装置の復原力要素として用い、その免震効果の有効性を実験的に示しており、その工学的な価値は高いと考えられる。また、数値実験を行うための形状記憶合金ばねのモデル化を行い、このモデルを用いた数値実験により免震装置の設計指針を示したことの工学的意義は大きい。本研究成果は、免震技術の面で新規な提案を与えたものであると共に、免震技術に大いに貢献できるものであると考えられる。

以上により、本論文は学位論文としての水準を満たしていると判断した。尚、本学位論文は、以下3編のレフリー制のある学術論文誌、国際会議等の論文集を基に構成されており、そのいずれも申請者が筆頭著者である。

- 1) **Yoshitaka Yamashita**, Arata Masuda and Akira Sone, An Experimental Study of Base Isolation Devices Using SMA Wires, Proceedings of ASME/JSME Pressure Vessels and Piping Conference 2004, PVP-Vol. 486-2, pp. 79-84, 2004.
- 2) **山下義隆**, 増田新, 曾根彰, 形状記憶合金ワイヤを用いた免震装置, 日本機械学会論文集 C 編, 71-703, pp. 4-11, 2005.
- 3) **Yoshitaka Yamashita**, Arata Masuda and Akira Sone, Passive Seismic Control Using

Shape Memory Alloy Springs, Proceedings of ASME Pressure Vessels and Piping Conference 2006, (Accepted) .

参考論文

- 1) Yoshitaka Yamashita, Arata Masuda and Akira Sone, Base Isolation System Using Shape Memory Alloy Wires, Proceedings of 11th Annual International Symposium on Smart Structures and Materials, SPIE, Vol. 5396, pp.41-50, 2004.