

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 14 日現在

機関番号：52605

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2014～2016

課題番号：26350382

研究課題名（和文）転倒防止装置の普及を目的とした文化財用の簡易小型免震装置の開発

研究課題名（英文）Development of the small simple seismic isolation system for displayed cultural properties in the museum

研究代表者

栗田 勝実（KURITA, Katsumi）

東京都立産業技術高等専門学校・ものづくり工学科・教授

研究者番号：90282871

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,800,000円

研究成果の概要（和文）：地震の揺れによる展示文化財の転倒を防止するため、揺れを低減させるために必要最低限の要素だけで構成し、かつ、機構が単純な簡易小型免震装置の開発を行い、振動実験や数値解析から小型免震装置自体の振動特性を調査した。更に、展示文化財の一例として花瓶を装置に載せた状況下で、正弦波と甚大な被害を引き起こした地震の観測記録を入力波として振動実験を実施した。

結果、簡易小型免震装置は地震の揺れにより起きる展示文化財の転倒を防止し、一定の有効性を持つことを確認した。

研究成果の概要（英文）： In order to introduce a seismic isolation system in museums that would prevent overturning of a displayed cultural property by seismic ground motion, a simple small seismic isolation device was developed consisting of two metal plates placed on top of each other. In this study, the vibration characteristics of this device were investigated by excitation experiment and evaluated by numerical analysis. Dynamic behavior of the system was also investigated by installing a vase on the device.

As a result the device indicated good performance to reduce seismic response against sine wave and the four seismic ground motions that may cause immense damage, thus preventing the overturning of the vase.

研究分野：地震工学

キーワード：文化財 転倒防止 免震 地震防災

## 1. 研究開始当初の背景

大地震が起きると、構造物は被害を受け大きな損害を被る。一般的に、地震による構造物の被害は、人間生活に深く関わる建物や土木構造物に注目が集まる傾向が高い。そのため、これらに対する防災対策は、様々な角度から実施されており、また、その必要性についても十分認知もされている。一方、仏像や美術品など歴史的、芸術的価値の高い文化財も破損等の被害を受けるにも関わらず、その認知度は意外と低いのが実情である。

しかし、文化財の地震被害を少なくする対策は、その進歩の度合いはゆっくりとせよ、一歩ずつ積み重ねられている。例えば、1923年関東地震などにより鎌倉の大仏が被害を受けたことにより、1960年から61年にかけて行われた改修において、文化財としては初めて仏像の台座部分に免震装置が導入された(例えば、中村・他,2010)。また、建物自体が歴史的価値を有している国立西洋美術館は、1998年に免震技術を取り入れた耐震改修を実施したことにより、建物構造物が被災することを免れるだけでなく、内部にある作品の転倒防止が計られることとなった(例えば、大木・他,1988)。

文化財自体に対しても免震技術は取り入れられているが、建物構造物の免震化には莫大な費用を要するため、小型の文化財を展示する建物は一般的に耐震強度を高める改修に留まることが多い。実際、東京国立博物館の東洋館では、建物全体の免震化よりも安価に耐震改修が可能である耐震強度を高める方法で2011年に改修を実施した(神庭,2012)。しかし、建物内部に展示された文化財は大きな揺れにさらされることから、内部に設置する重要文化財に対して小型免震装置を導入するなどの対策を講じている。

このように規模の比較的大きな博物館では、免震機能を持つ小型展示ケースなどを導入することで文化財の安全を講じている。しかしながら、小型免震装置の導入もそれ相応の経費がかかることは否めない。そのため、数多数の博物館では、文化財を揺れから守るための小型免震装置が導入されていないのが実情である。

## 2. 研究の目的

本研究では、小型の仏像や美術品など歴史的または芸術的価値を有する文化財が、地震の揺れで転倒するのを防止することを目的として

- (1)機構が単純で、かつ安価で製作が可能な小型免震装置の開発
- (2)装置の振動試験および数値解析による評価
- (3)展示美術品を設置した状況での振動特性把握

以上3項目について取り組む。

## 3. 研究の方法

### (1)簡易免震装置

美術品用に開発された転がり形免震装置は(上田・他,2005)、復元力を発生させるために傾斜させたレール上を転がる車輪と車軸および軸受け部で構成されているが、加工された多くの部品を使用することから機構は自ずと複雑になる。一方、単純な摩擦支承は復元力を生じさせる機構を有さないが、構造が非常に単純であることから保守点検が容易に実施でき、かつ安価で装置が製作できる利点を有する。

そこで、摩擦支承を免震部材として開発を試みた。

### (2)振動実験と数値解析

簡易小型免震装置の振動特性を得るため、振動試験装置を用いた正弦波による引掃加振実験を実施した。引掃加振の条件は振動数範囲を1-10[Hz]、振動数を3.33[oct/min]とし、加速度振幅が200,400,600[Gal]の状況で水平一方向に加振させた。測定は、振動台と装置上板に加速度計を設置し、出力される信号を、インターフェイスを通して0.01秒間隔でPCに記録した。

また、簡易小型免震装置の評価をおこなうため、振動実験で得た記録と数値解析結果の比較から数値モデルの妥当性を検討した。なお、装置は1自由度系でモデル化し、線形加速度法により数値解析を実施した。

### (3)展示文化財を設置した状況での振動実験

簡易小型免震装置の有効性を確認するため、転倒加速度が400Galの花瓶を簡易小型免震装置に設置した状況で振動実験を実施した。入力波は、振動数と振幅が容易に制御できる正弦波。甚大な被害を引き起こした地震の観測記録として実施した。

## 4. 研究成果

### (1)簡易免震装置の概要

使用した簡易小型免震装置は、アルミニウムに潤滑性の高い固体潤滑剤を表面にコーティングした質量1.1[kg]、寸法500[mm]×500[mm]×1.5[mm]の下板に、質量0.91[kg]、125[mm]×125[mm]×15[mm]の上板を重ね合わせたものである。上田・他(2005)は、美術品展示ケースには水平最大速度0.5m/sに対して応答加速度がおおむね1.0m/s<sup>2</sup>以下になるような免震性能が要求されることになっていることから、動摩擦係数 $\mu$ は0.1程度が望ましいこととなる。本実験で使用した金属板の動摩擦係数 $\mu$ は実験の結果、0.12であった。

### (2)振動実験と数値解析

結果の一例として、入力波の加速度振幅が約400[Gal]の場合を図1示す。どの振動数帯域でも動作し応答が低減されている。また、最大加速度振幅が約700[Gal]では、上板の最大応答加速度は入力に対して1/5まで低減さ

れた。なお、装置の上板はどの条件でも振動実験中に下板をはみ出すことはなかった。

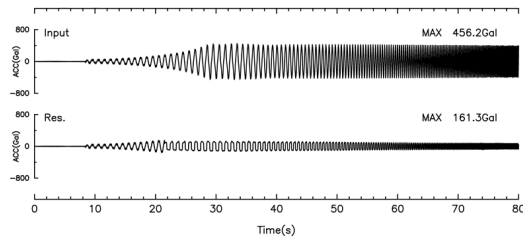


図1 正弦波による振動実験結果  
(上：入力波 下：免震装置上)

次に、振動実験とそれに使用した正弦波を入力として数値解析した結果の比較を図2に示す。両者の最大振幅および位相の対応は良いことから、仮定した簡易小型免震装置の数値モデルは適切と判断できる。

そこで、旧神戸海洋気象台で観測された平成7年兵庫県南部地震（JMA-KOBE波）、および防災科学技術研究所 KiK-net KMMH16（益城）で観測された平成28年熊本地震を入力波とした場合の簡易小型免震装置の加速度応答を数値解析から求めた。例として JMA-KOBE 波の南北成分を入力とした場合の結果を図3に示す。入力波の最大加速度が818[Gal]であるのに対して、応答では1/6以下の111[Gal]と十分な応答低減効果を示した。

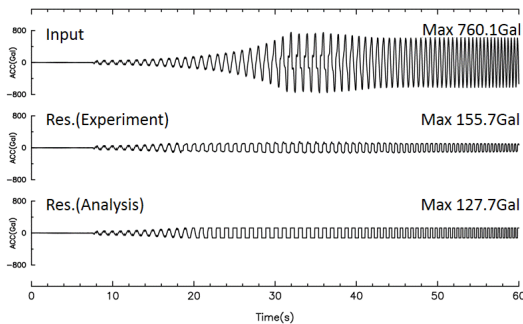


図2 正弦波の振動実験と数値解析の結果  
(上：入力 中：振動実験 下：数値解析)

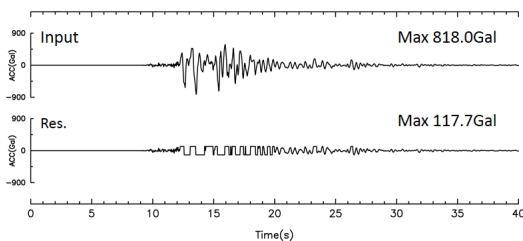


図3 数値解析による簡易免震装置の応答波形

### (3) 展示文化財を設置した状況での振動実験

#### (3.1) 正弦波による振動実験

簡易免震装置上に転倒加速度400Galの花びんを置き、振動台、免震装置および花瓶最上部に加速度計を設置した状況にて正弦波による振動実験を実施した。

結果の一例として、振動数1.5Hz、最大加速度振幅600[Gal]の応答波形を図4に示す。入力波の最大加速度振幅が600[Gal]の場合、花瓶のみでは転倒したが、装置上に花瓶を設置した場合には、花瓶は僅かにロッキング運動を示したが転倒には至らなかった。実際、入力波の最大加速度振幅は585[Gal]であったのに対し、装置上は143[Gal]と花瓶の転倒限界加速度以下まで低減されていた。

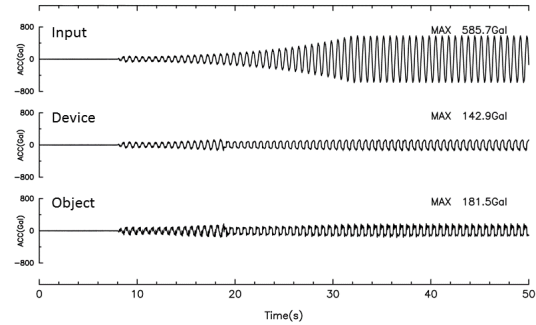


図4 正弦波による振動実験  
(上：入力波 中：免震装置上の応答 下：花瓶最上部の応答)

#### (3.2) 実地震波観測記録を入力波とした場合の振動実験

次に、甚大な被害を引き起こした地震の観測記録を入力波として振動実験を実施した。入力波には、JMA-KOBE波を昭和43年十勝沖地震の八戸での記録（八戸波）、JMA-KOBE波、平成16年新潟県中越地震のK-NET NIG019での記録（小千谷波）および平成28年熊本地震のKiK-net KMMH16での記録（益城波）の以上4つを用いた。一例として JMA-KOBE 波の結果を図5に示す。入力波に対し上板の応答波形は十分低減されており、花瓶が転倒することにはなかった。また、免震装置上板はどの条件でも加振中に下板をはみ出すことはなかった。なお、花瓶の応答波形にパルス状の波形が見受けられるが、これは装置上の花瓶が極わずかなロッキング運動が生じたことによるものである。

以上のことから、簡易小型免震装置は甚大な被害を引き起こした4つの観測記録の揺れに対して有効に動作し、展示文化財の転倒を防止する役目を果たすことが可能と考えられる。

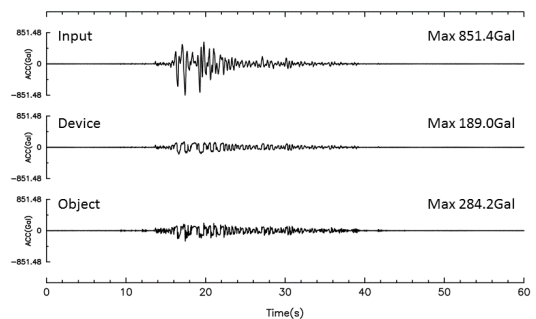


図5 地震波を入力とした場合の簡易免震装置の応答波形  
(上：入力 中：免震装置上の応答 下：花瓶最上部の応答)

<参考文献>

上田智士；秋元將男；榎本孝雄；藤田隆史：美術品用転がり形免震装置の研究．日本機械学会論文集 C 編．2005, 71(703), p. 807-812.  
大木典雄；望月茂喜；伊藤昭浩；阿部文昭；小川修；保坂陽之助；秋山稔；持田泰秀：国立西洋美術館本館保存免震レトロフィット：施工の計画と概要．日本建築学会技術報告集, 1998, Vol. 4, No. 6, p. 19-22.  
中村 豊；齋田 淳；立花三裕；森井順之；井上修作；大町達夫；鎌倉大仏およびその周辺地盤の常時微動調査．第 13 回日本地震工学シンポジウム論文集．2010. p. 231-238.

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 5 件)

栗田勝実, 青木繁, 中西佑二, 富永一利, 金澤光雄, 新しい摩擦軸受による小型免震装置の振動特性, 第 14 回日本地震工学シンポジウム論文集, 3842-3848, 2014  
Yuki SATO, Katsumi KURITA, Shigeru AOKI, Mitsuo KANAZAWA, Effectiveness of a simple small seismic isolation system intended for art objects, INFORMATION, 査読有, Vol.19, No.6(A), 2039-2044, 2016  
Koichi Nomura, Shigeru Aoki, Katsumi Kurita, Naoki Miyata, Damping Performance Evaluation Eddy Current Damper, INFORMATION, 査読有, Vol.19, No.6(B), 2341-2348, 2016  
Koichi Nomura, Shigeru Aoki, Katsumi Kurita, Study on Performance Evaluation of Silicon Oil Damper, INFORMATION, 査読有, Vol.19, No.6(B), 2349-2356, 2016  
栗田勝実, 佐藤優樹, 青木繁, 金澤光雄, 展示文化財を対象とした簡易小型免震装置 - 装置の評価と振動実験による実証 -, 文化財保存修復学会誌, 査読有, Vol.60, 10-21, 2017

[学会発表](計 14 件)

佐藤優樹, 栗田勝実, 青木繁, 金澤光雄, 金属板を用いた簡易小型免震装置の振動特性, 山梨講演会講演論文集, 2014.  
栗田勝実, 青木繁, 中西佑二, 富永一利, 金澤光雄, 積載重量の変化に伴う摩擦軸受を用いた小型免震装置の振動性能, 日本機械学会 2014 年度年次大会, No.14-1, J1010403, 2014  
佐藤優樹, 栗田勝実, 青木繁, 金澤光雄, 美術品を設置した場合の簡易小型免震装置の振動特性, 山梨講演会論文集, No.150-3, 601, 2015  
野村幸一, 青木繁, 栗田勝実, 宮田尚起,

渦電流式ダンパの制振性能評価, 日本機械学会関東支部第 21 期総会講演会, N0.150-1, 20414, 2015

佐藤優樹, 栗田勝実, 青木繁, 金澤光雄, 実地震波による簡易小型免震装置の最大応答量のばらつき, 日本機械学会関東支部第 21 期総会講演会, No.150-1, 20417, 2015

栗田勝実, 青木繁, 中西佑二, 富永一利, 金澤光雄, 摩擦軸受を用いた小型免震装置のモデル化, 日本機械学会関東支部第 21 期総会講演会, No.150-1, 20418, 2015  
佐藤優樹, 栗田勝実, 青木繁, 金澤光雄, 美術品を載せた場合の簡易小型免震装置の応答性状, 日本機械学会北陸信越支部 第 5 3 期総会・講演会, GS020101, 2016

尾和徹彦, 野村幸一, 青木繁, 栗田勝実, シリコンオイルを用いた小型球型ダンパの質量と体積の変化による減衰力の検討, 日本機械学会関東支部第 22 期総会講演会, No.160-1, OS1109, 2016

神戸陽也, 栗田勝実, 青木繁, 中西佑二, 富永一利, 金澤光雄, 摩擦軸受を用いた小型免震装置の振動特性 (マープル型ベアリングの形状が免震性能に与える影響), 日本機械学会関東支部第 22 期総会講演会, No.160-1, OS1110, 2016

栗田勝実, 佐藤優樹, 青木繁, 金澤光雄, 簡易小型免震装置の開発と美術品への適用, 文化財保存修復学会 第 38 回大会研究発表要旨集, pp.150-151, 2016  
Katsumi Kurita, Yuki Sato, Shigeru Aoki, Mitsuo Kanazawa, Development of a simple seismic isolation system for art objects, Proceedings of the 11th International Conference on Seismic Microzoning and Risk Reduction (USB), 2016

栗田勝実, 青木繁, 金澤光雄, ベアリング形状を変化させた摩擦軸受による小型免震装置の地震応答低減効果とその評価, 日本機械学会北陸信越支部第 54 期総会講演会講演論文集, N0.177-1, K031, 2017

尾和徹彦, 青木繁, 栗田勝実, シリコンオイルを用いた小型球型ダンパの効果的な内部パラメータの選定 (直径比と動粘度による検討), 日本機械学会関東支部第 23 期総会講演会, N0.170-1, GS0101-01, 2017

尾和徹彦, 青木繁, 栗田勝実, シリコンオイルを用いた小型球型ダンパの実験式による数値解析, 日本機械学会東海支部第 66 期総会講演会講演論文集, N0.173-1, 131, 2017

6. 研究組織

(1) 研究代表者

栗田 勝実 (KURITA, Katsumi)

東京都立産業技術高等専門学校・ものづくり工学科・教授  
研究者番号：90282871

(2)研究分担者

青木 繁 (AOKI, Shigeru)  
東京都立産業技術高等専門学校・ものづくり工学科・教授  
研究者番号：20106610

(4)研究協力者

佐藤 優樹 (SATO, Yuki)  
野村 幸一 (NOMURA, Koichi)  
神戸 陽也 (KAMBE, Haruya)  
尾和 徹彦 (OWA, Tetsuhiko)