

耐震マットを用いた文化財の転倒防止に関する実験的研究

Use of adhesive mats to protect cultural properties from fall down during earthquakes

岸祐介¹・伊津野和行²・土岐憲三³

Yusuke Kishi, Kazuyuki Izuno and Kenzo Toki

¹立命館大学大学院 理工学研究科 総合理工学専攻 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

Graduate Student, Ritsumeikan University, Graduate School of Science and Engineering

²立命館大学教授 理工学部都市システム工学科 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

Professor, Ritsumeikan University, Dept. of Civil Engineering

³立命館大学教授 グローバル・イノベーション研究機構 (〒603-8577 京都市北区等持院北町56-1)

Professor, Ritsumeikan University, Global Innovation Research Organization

Protecting the cultural assets against earthquakes is important task to carry on our culture for the next generations. Shaking table tests were conducted to examine the efficiency of countermeasures for the art objects from falling down during earthquakes. Two types of the earthquake-proof adhesive mats were used; one was made of urethane elastomer and the other was made of silicon. The results showed that each mat could prevent the specimen from falling down successfully. Both mats didn't affect on the dominant period of the specimen. Strong adhesive force kept the specimen standing during the shaking table tests. Comparing with the urethane elastomer mat, the silicon mat resulted in less displacement response, because it has higher damping and higher stiffness than the urethane mat.

Key Words : *shaking table test, earthquake-proof adhesive mat, protecting from fall down*

1. はじめに

1995年兵庫県南部地震では、博物館や美術館において展示資料や収蔵されていた資料が展示ケースや収蔵棚などの移動によって損壊した¹⁾。文化財を地震時の転倒から守ることは、破損を防いで後世によりよい形で文化を継承するために重要なことである。しかし、物体の地震時転倒問題には、外力の不確定性に加え、物体表面の局所的な形状や床面との接触面における摩擦等、理論的に解決する事の難しい点が多く存在する。

これまで、家具の転倒防止^{2), 3)}や、墓石の転倒現象解明^{4), 5)}など、文化財以外を対象とした実験や解析、調査が数多く実施されてきた。文化財の転倒防止に関しても、美術館や博物館の展示物を対象として実験や解析が行われてきたが^{6)~8)}、主に免震化に着目した研究が多く、実際にも免震作用を考慮した転倒防止対策が施されることが多い。

そのような状況の下、2004年の10月に新潟県中越地震が発生し、十日町市博物館(震度6弱)では、展示されていた縄文式土器の半数以上が破損した。このうち、免震台上に置かれていた国宝の火焰型土器(笹山遺跡出土深鉢形土器)も転倒した。この免震台は、神戸海洋気象台記録には耐えられる性能を持っていた。また、長岡市立科学博物館(震度6弱)においても、免震台に設置されていた土器が転倒している。土器はもともと一部破損して出土することが多く、亀裂や破損を修復することは可能な場合が多いが、文化財や美術工芸品の中には、亀裂や破損を防ぐことが重要な物もある。

神庭らは⁹⁾、新潟県中越地震の被害報告を元に、免震装置とその他の安全対策について振動台実験を実施している。これによると、五徳、テグス、支持棒、錘の設置は有効であり、特に個別に作成し固定した支持

棒はあらゆる状況に対応可能だということ、二次元免震装置は水平方向の揺れに特に有効だということが述べられている。しかし、いずれも設置の仕方に確立されたものはなく、その要求性能は必ずしも明らかではない。すべての文化財について実験をすることは不可能であり、どのような具体的対策をとるのかは、各文化財管理者の判断に任されているのが現状である。

転倒防止においては、地震時の家具転倒を防止するために、近年様々な器具が普及している。その中でも耐震マットは手頃な転倒防止装置として、市販量が豊富である。一方で耐震マットによる転倒防止効果に関しては、実証実験は多いものの定量的な評価例は少なく、転倒防止における必要性能は明らかになっていない。

三輪らは⁵⁾、接着・粘着工法による補強を施された墓石の耐震性に関する実験を行っている。この中では、ブチルゴムを使用した粘着工法に関し、墓石の挙動、最大応答加速度、伝達関数よりその有効性を示している。ブチルゴムは止水性、耐久性のあるシール材として河川ダムのコンクリートの目止め等に使用されているが、接着が難しいという問題が存在する。それに対して、市販されている耐震マットは、家具用に製造されているため取り扱いが非常に簡単である。

仲谷らは¹⁰⁾、居室や家具自体の条件、転倒防止器具による対策が家具の挙動および転倒に及ぼす影響について考察している。この中では、耐震マットを使用した実験も行われており、震度の大きい波や高振動数領域では耐震マットから供試体が外れる危険性が指摘されている。しかし、耐震マットを装着することによる供試体の応答の変化に関する定量的な評価には言及されていない。

そこで本研究では、耐震マットの転倒防止効果による対象物への影響について、振動台実験による検討を行った。

2. 実験方法および使用器具

本研究では、対象となる供試体に素材の異なる 2 種類の耐震マットを設置した場合に関する振動台実験を実施し、その挙動を確認した。2 種類のマットはそれぞれ、ウレタンエラストマー、シリコンから出来ており、ウレタンエラストマー素材のマットよりも、シリコン素材のマットの方が剛性が高く減衰も大きいとされている。

振動台実験を実施するに当たり、まずは供試体に 2 種類の耐震マットを設置していない状態、設置した状態で自由振動をさせ、供試体の固有周期および耐震マットの減衰定数を得た。試験は各々 4 回行い、値はその平均を使用した。これを踏まえて振動台実験を実施した。

写真-1～写真-4 および表-1 は、実験で用いた器具とその詳細である。供試体の寸法は、転倒しやすいよう等価な水平震度 0.2 以下（静的に 0.14G 相当の水平力）で転倒するように諸元を設定した。変位の計測には、自由に台上を移動する物体を非接触で計測するために、モーションキャプチャー装置を利用した。ライトを当てて光らせたポインタ（供試体の角部と台上に設置）の軌跡を、同期した 2 台のビデオカメラで撮影する。この映像をコンピュータに取り込むことによって、3 次元空間における各ポインタの位置情報を時々刻々計算して表示することが可能である。また方向成分に関しては、写真-3 に記載している通り、水平方向に X 軸、Y 軸を取り、鉛直方向を Z 軸とした。以降での説明を簡便にするために、ウレタンエラストマー素材を耐震マット 1、シリコン素材を耐震マット 2 とする。

加速度計は、振動台および供試体の底部と上部に 1 台ずつ設置し、供試体自体に作用する加速度を詳細に計測した（写真-1：赤丸）。

表-1 実験器具詳細

供試体	寸法 9×13×62(cm)、質量 2.03kg の木製直方体（写真-1）
耐震マット	寸法 50×50×5(mm)、プロセブン株式会社製の粘着質マット 2 種類（写真-2）左：ウレタンエラストマー素材、右：シリコン素材
加速度計	株式会社共和電業製、水平 2 成分、垂直 1 成分測定、3 台
振動台	1m×1m、動電型 3 次元同時加振、株式会社振研（写真-3）
モーションキャプチャー装置	カメラ 2 台、ポインタ 10 個、株式会社ライブラリー製（写真-4）

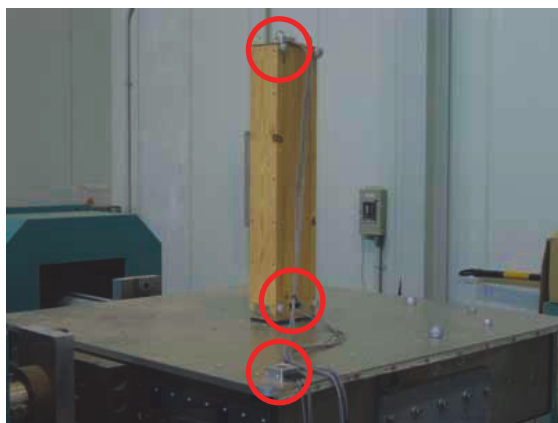


写真-1 供試体

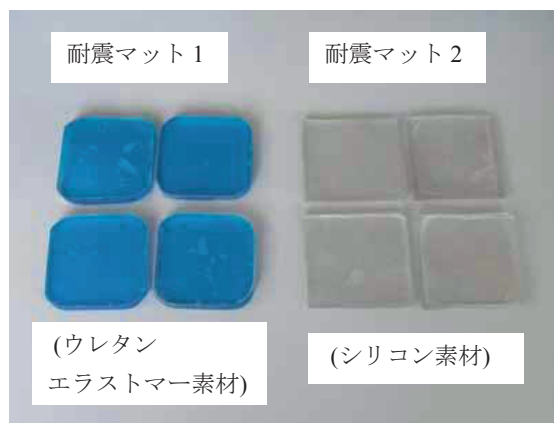


写真-2 耐震マット

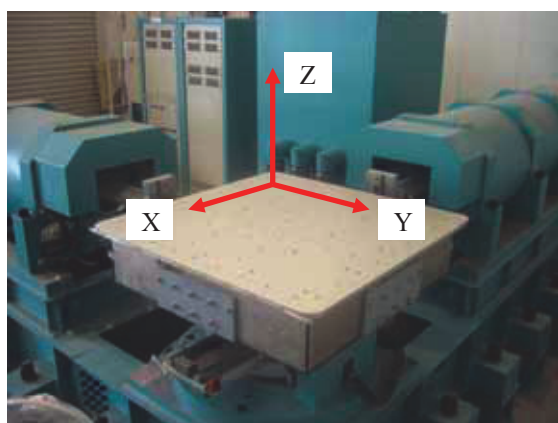


写真-3 振動台



写真-4 モーションキャプチャー用カメラ

表-2 供試体の固有周期および減衰定数

	固有周期(sec)	減衰定数
振動台上 (供試体長手方向)	2.56	/
振動台上 (供試体短手方向)	1.46	
耐震マット1 設置	0.11	0.12
耐震マット2 設置	0.05	0.27

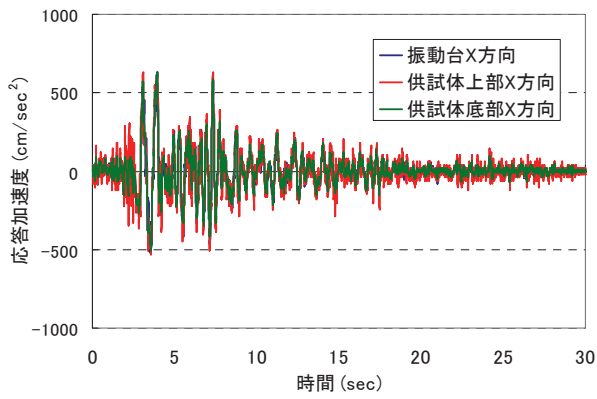
入力地震動は 1995 年兵庫県南部地震の神戸海洋気象台記録を使用し、3次元振動台の作動範囲の制限により、振幅に関して水平方向 100%、垂直方向 50%の加速度波形を使用した。

3. 固有周期

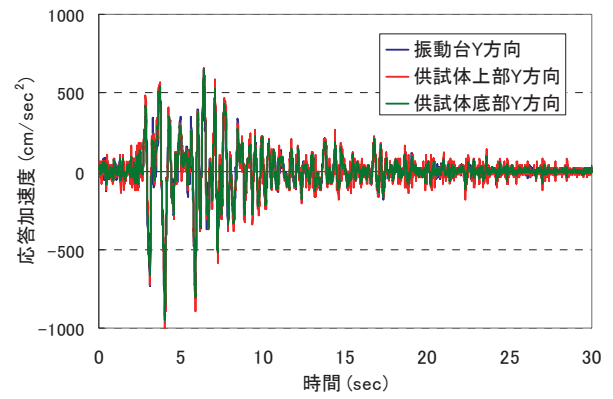
表-2 は供試体を自由振動させた結果より得られた、固有周期および減衰定数である。耐震マットを設置することにより、供試体の固有周期が変化している。耐震マット設置時は、供試体の長手方向と短手方向で固有周期は同じになった。耐震マットを設置した場合の固有周期を比較すると、耐震マット 2の方が 0.06 秒短く、減衰定数においては 2 倍以上大きい値を示しており 27%という高い減衰定数を有している事が確認できる。

4. 地震応答

振動台実験においては、耐震マット 1、耐震マット 2 ともに供試体は転倒に至ることはなかった。供試体の最大加速度に着目すると耐震マット 1において、供試体底部で 619cm/sec^2 、供試体上部で 663cm/sec^2 を共に X 方向で記録した。Y 方向では、供試体底部で 917cm/sec^2 、供試体上部で 1012cm/sec^2 を記録した(図-1)。

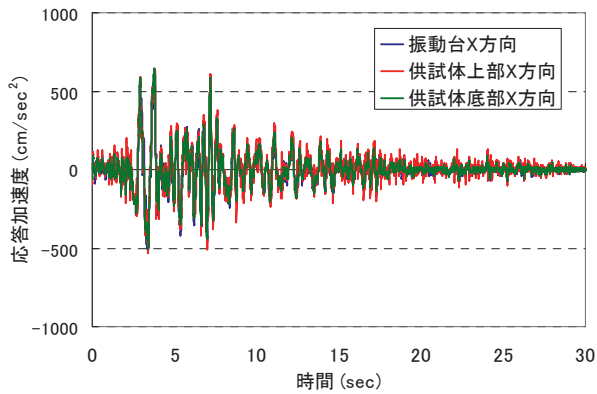


(a) X方向

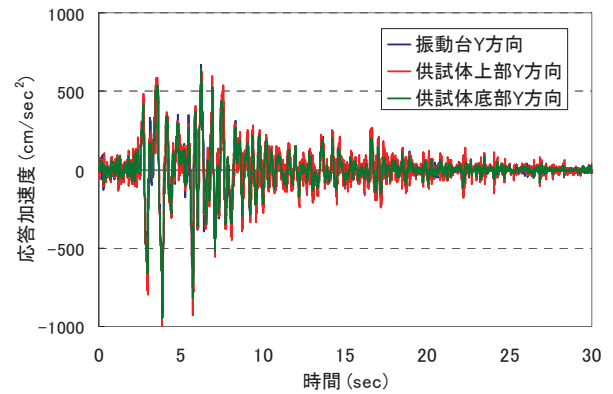


(b) Y方向

図-1：耐震マット1設置時の時刻歴応答加速度波形

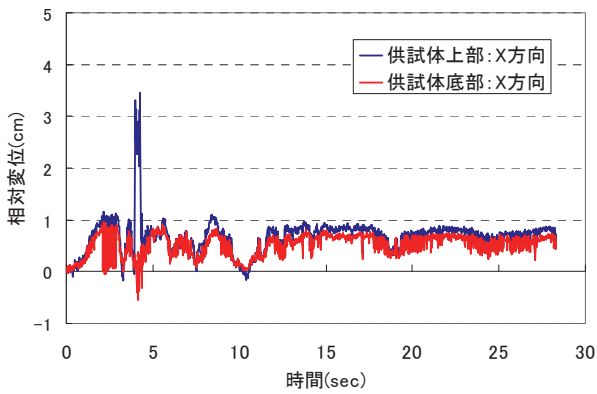


(a) X方向

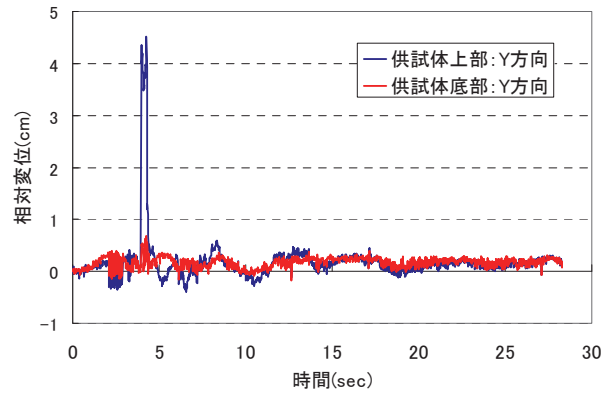


(b) Y方向

図-2：耐震マット2設置時の時刻歴応答加速度波形

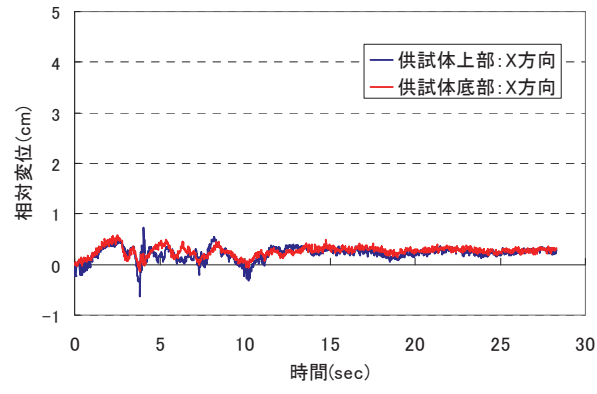


(a) X方向

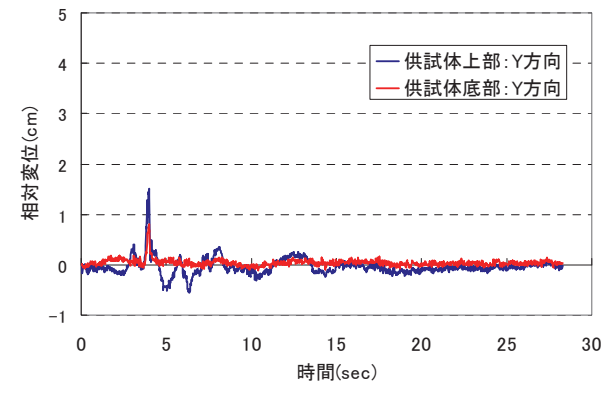


(b) Y方向

図-3：耐震マット1設置時の相対変位波形



(a) X方向



(b) Y方向

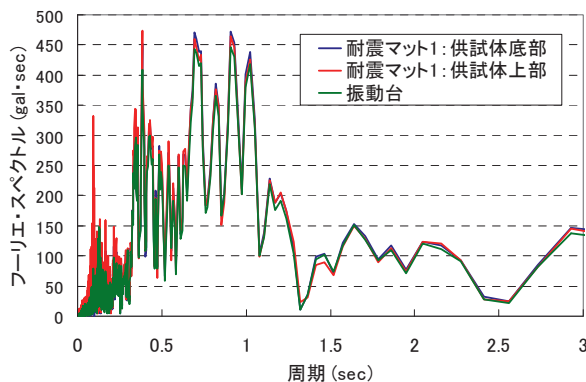
図-4：耐震マット2設置時の相対変位波形

耐震マット 2 では供試体底部で 634 cm/sec^2 、供試体上部で 663 cm/sec^2 を耐震マット 1 と同様に X 方向で記録した。Y 方向では、供試体底部で 966 cm/sec^2 、供試体上部で 1042 cm/sec^2 を記録した（図-2）。

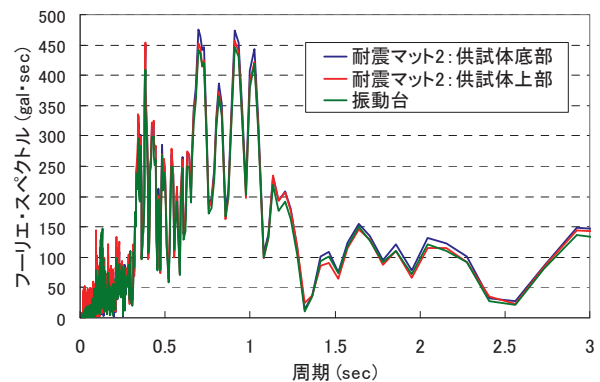
供試体の最大応答変位に着目すると、耐震マット 1 の Y 方向において供試体底部で 6.9mm，供試体上部で 45.2mm となった（図-3）。耐震マット 2 においては供試体底部で 8.2mm，供試体上部で 15.2mm を同じく Y 方向で記録した（図-4）。いずれの変位も 4~5 秒辺りで記録されている。このときの加速度を確認すると、供試体の応答加速度は振動台の加速度とほぼ同じである。図-3 では、一度大きく傾いていることが示されている。今後、限界変形角に関する検討が必要であるが、加速度が増幅されていないことと合わせて考えると、この時の大きな振幅の揺れは物体の破壊には直接影響しないと考えられる。

最大加速度に着目すると、耐震マット 1 では供試体底部に比べ供試体上部が X 方向で 7% 方向で 10% 高い値を示している。これに対し耐震マット 2 では X 方向で 4%、Y 方向で 7% 高い値となっている。これより、耐震マット 2 の方が供試体の上部と底部における加速度の差が小さい事が確認できる。また相対変位に着目すると耐震マット 1 に比べて耐震マット 2 の方が、供試体底部で 1mm 以上、供試体上部では 30mm 近く相対変位を小さく抑えられていることが確認できた。耐震マット 1、耐震マット 2 共に底部での相対変位が生じていることから、供試体はスウェイ振動を生じていると考えられる。供試体上部の相対変位に差が生じているのは、ロッキング運動による傾き具合が異なるためであり、耐震マット 2 は耐震マット 1 より傾き具合が小さかった。

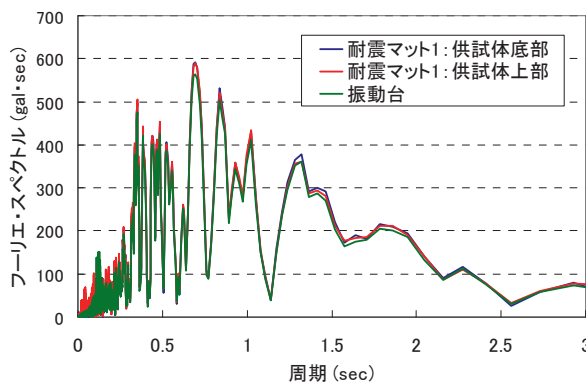
最大加速度、水平変位の差および傾きの異なりは、耐震マット 2 の方が減衰性および剛性が大きいことと、厚みが薄いことが影響していると考えられる。図-3、4 の X 方向で 1mm 程の変位が生じたまま収束しているのは、モーションキャプチャーの誤差（キャリブレーション結果より $\pm 3\text{mm}$ ）であると考えられ、実験後に元の位置に戻っていることは確認している。



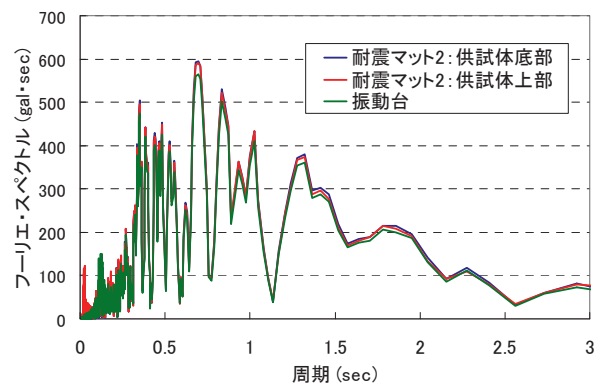
(a) X 方向：耐震マット 1 設置時



(b) X 方向：耐震マット 2 設置時



(c) Y 方向：耐震マット 1 設置時



(d) Y 方向：耐震マット 2 設置時

図-5: 加速度フーリエ・スペクトルによる比較

耐震マット設置による供試体—振動台間の周期成分の変化について着目すると、耐震マット 1、耐震マット 2 共に 0.4～1 秒あたりで卓越していることが図-5 より確認できた。これは入力波の卓越周期であり、この領域において振動数成分に変化は見られない。0.5 秒以下の短周期域については、耐震マット 1 では 0.1 秒に、耐震マット 2 では 0.05 秒に影響が出ている。これは表-2 に示した供試体の固有周期である。

耐震マットによる転倒防止効果としては、耐震マットそのものの粘着力による作用が大きな要因となっている。そのため、耐震マットと対象物との設置面の状態および設置面積により効果が異なるものと考えられる。今回使用した供試体は形状が直方体であったため、設置面を平面で取ることができ、大きな効果が得られた。今後、底面形状や素材の異なるものを用いて検討を行うことも必要だと考えられる。

5. まとめ

本研究では、耐震マットの転倒防止効果による対象物への影響について、振動台実験による検討を行った。その結果、以下のことが明らかとなった。

- 1) 等価な震度 0.2G 以下の加速度で転倒する木製供試体に 1995 年神戸海洋気象台記録を入力した場合、本研究で用いた 2 種類の耐震マットを設置すると、どちらの場合も転倒することはなかった。
- 2) スペクトル解析の結果、供試体の応答加速度は、0.4～1 秒という入力振動の卓越周期が全体としても卓越する。耐震マットの素材の違いによる影響は、0.1 秒以下の短周期領域でのみ固有振動特性の影響が出る。
- 3) 相対変位に関しては、耐震マット 2の方が小さい値に抑えられていた。これは耐震マット 2の方が減衰性および剛性が大きいことと、厚みが薄いことが影響している。

謝辞：実験における耐震マットの成分・各種データに関してはプロセブン株式会社の協力を得た。記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 三浦定俊・佐野千絵・木川りか：文化財保存環境学，朝倉書店，pp.ii-iv，pp.122-131，pp.150-159，2004 年。
- 2) 翠川三郎・佐藤俊明：1993 年釧路沖地震での釧路市役所および釧路気象台での家具の転倒調査，日本建築学会構造系論文集，第 469 号，pp.53-60，1995 年 3 月。
- 3) 佐伯琢磨・宮崎浩徳・山本晃司・翠川三郎：地震時の家財被害予測に関する研究，日本建築学会構造系論文集，第 517 号，pp.45-51，1999 年 3 月。
- 4) 澤田純男・土岐憲三・飛田哲男：墓石の回転挙動から推定される地震動特性，土木学会論文集，No.598/I-44，pp.287-298，1998 年 7 月。
- 5) 三輪滋・古川愛子・清野純史・縦山貴昭：接着・粘着工法により補強された墓石の耐震性に関する実験的検討，構造工学論文集，土木学会，Vol.53A，pp.329-338，2007 年 3 月。
- 6) Agbabian, M.S., Masri, S.F, Nigbor, R.L. and Ginell, W.S.: Seismic damage mitigation concepts for art objects in museums, Proc. of 9th World Conference on Earthquake Engineering, Vol.VII, pp.235-240, 1988.
- 7) Augusti, G., Ciampoli, M. and Airoidi, L.: Mitigation of seismic risk for museum contents: An introductory investigation, Proc. of 10th World Conference on Earthquake Engineering, pp.5995-6000, 1992.
- 8) Calio, I. and Marletta, M.: Passive control of the seismic rocking response of art objects, Engineering Structures, Vol.25, pp.1009-1018, 2003.
- 9) 神庭信幸・中野未音・前田昌考・川嶋満次・東考志・鈴木幹夫・安田由紀子：地震対策としての免震装置の適切な利用法に関する検討，文化財保存修復学会第 27 回大会，pp.86-87，2005 年。
- 10) 仲谷美咲・石川孝重・野田千津子・伊村則子・東考志：家具の転倒に影響を及ぼす要因の分析—地震時の家具の挙動に関する検討 2—，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.597-598，2006 年 9 月。