

文化財の転倒防止に関する2,3の考察

Study on measures to prevent fall of cultural properties during earthquake

岸祐介¹・伊津野和行²・酒井久和³・土岐憲三²

Yusuke Kishi, Kazuyuki Izuno, Hisakazu Sakai, Kenzo Toki

¹立命館大学大学院 理工学研究科 創造理工学専攻 (〒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広島工業大学准教授 工学部建築工学科 (〒731-5193 広島県広島市佐伯区三宅2-1-1)
Associate Professor, Hiroshima Institute of Technology, Dept. of Architectural Engineering

Experimental and numerical studies were carried out to evaluate the effect of measures to prevent fall of cultural properties and art objects during earthquakes. Though the isolation tables and binding strings are widely used to prevent fall of small objects, the effect and limitation of the measures are not precisely understood. This paper describes some experimental results and numerical simulations on seismic rocking and falling of test pieces.

Key Words : *cultural properties, prevention of fall, isolation table, strings*

1. はじめに

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、理論的に解決するのが難しい点も多く存在する。

これまで、家具の転倒防止^{1), 2)}や、墓石の転倒現象解明^{3), 4)}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^{5)~7)}、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。

日本でも、国宝第一号である京都広隆寺の弥勒菩薩像をはじめとして、多くの文化財や美術工芸品が免震台の上に安置されるようになってきた。しかし、その効果を検証するのに使われているのは、1995年兵庫県南部地震における神戸海洋気象台記録であり、ほとんど唯一と言っていい地震波形であった。

そのような状況の下、2004年新潟県中越地震が発生すると、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。そのうち、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)も転倒してしまった。この免震台も、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⁸⁾、新潟県中越地震の被害を受け、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。

そこで本研究では、振動台実験と数値解析とにより、免震台や固定用テグスに対する必要性能を明らかにするための基礎的な検討を行った。まず、振動台実験を行って、物体の転倒挙動を詳細に追跡し、それを数値解析で再現することを試みた。まだ解決すべき問題は多く残っているが、ここでは現状報告を行う。

2. 振動台実験

(1) 実験方法

対象となる供試体には、以下の転倒防止策を用いた。

- ①対象物を免震台の上に載せる
- ②対象物を支持糸（テグス）で固定する

上記のパターンに加えて、転倒防止策を施していない場合の計3パターンに関して、3次元振動台実験で実際の挙動や効果を確認しながら、その有効性についての検討を行った。



写真1 供試体



写真2 免震台



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1 実験器具詳細

供試体	寸法9×13×62(cm)、重さ2.03kgfの木製直方体(写真1)
免震台	寸法44×44×5(cm)、株式会社エーエス製の美術品展示用小型免震装置(写真2)
支持糸	テグス(直径:0.9mm,耐力:383N/mm ²)
振動台	1m×1m、静電型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11個、株式会社ライブラリー製(写真4)

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。供試体の寸法に関して、転倒しやすいように等価な水平震度 0.2G 以下（約 0.14G）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ト（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ト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。（図1）

今回の実験では、対象となる供試体に転倒防止策を施したもの（①と②の2パターン）、施していないものを振動台によって揺らし、その挙動を確認した。また実験では、支持糸の取り付け方として、供試体の上で交差するように、振動台の対角線方向に支持糸を固定した。

入力地震動は、3次元振動台の作動範囲の都合により、JMA 神戸の70%の加速度波形を使用した。

(2) 実験結果

○転倒防止策を施していない場合

供試体は振動開始3秒ほどで小刻みに震え始めた後、1秒後の振動台の大きな変位とともに転倒した。

○免震台による転倒防止策を施した場合

供試体は振動開始4秒あたりまで、転倒防止策を施していない場合に見受けられた小刻みな震えは無かった。その後振動台の大きな変位に伴い免震台上でのロッキング現象は確認できたが、実験終了までに転倒することは無かった。

○支持糸による転倒防止策を施した場合

供試体は振動開始3秒ほどで、転倒防止策を施していない場合と同様に小刻みに震え始めた。その後振動台が大きく変位した際に、固定されていない供試体の下部が僅かに動いたものの、後は振動台に固定された状態で転倒せずに終了した。

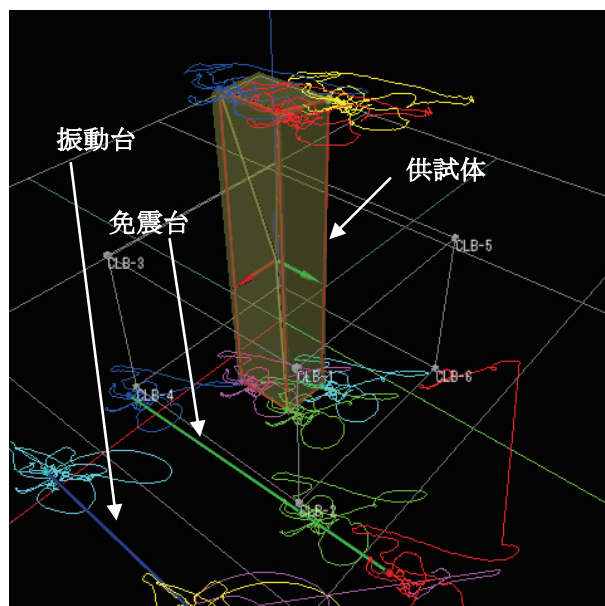


図1 モーションキャプチャーによる挙動の履歴

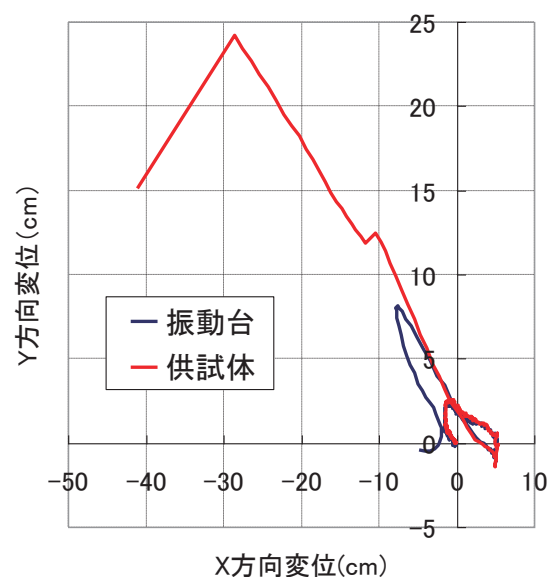


図2 転倒防止策なしの場合の挙動

図2、図3、図4はそれぞれ転倒防止策を施していない場合の振動台および供試体の重心位置の挙動履歴、免震台による転倒防止策を施した場合の振動台と免震台および供試体の重心位置の挙動履歴、支持糸による転倒防止策を施した場合の振動台および供試体の重心位置の挙動履歴を、水平方向についてのみプロットしたものである。

図2では、振動台が大きく変位するより前に供試体が転倒してしまったため、途中から重心位置だけが大きく変位してしまっている。

図3では、供試体は振動台よりも全体的に狭い範囲の中で動いていることが確認できる。供試体と免震台

の挙動はほぼ一致しており、供試体は免震台上を移動していないことが確認できる。また直前に動いていた方向と逆の方向へ動く際に、供試体は振動台よりもシャープな円を描くように動く傾向が見られる。

図4では、供試体は振動台とほぼ同じ挙動を描いていることが確認できる。これは支持糸により供試体が振動台にしっかりと固定されているためであり、支持糸の張力が供試体に作用する慣性力よりも大きいためであると考えられる。

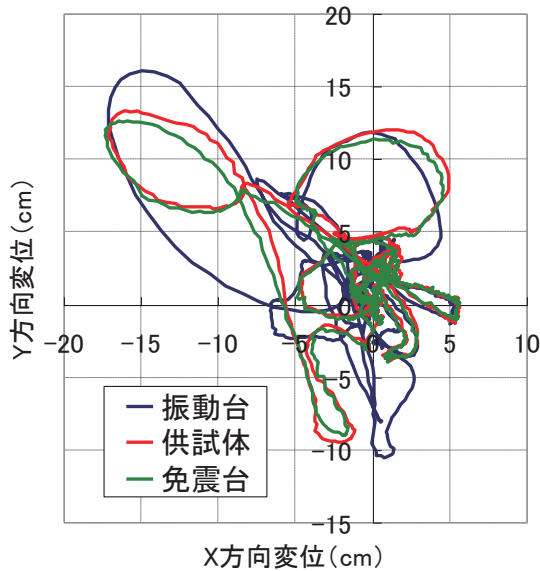


図3 免震台を用いた場合の挙動

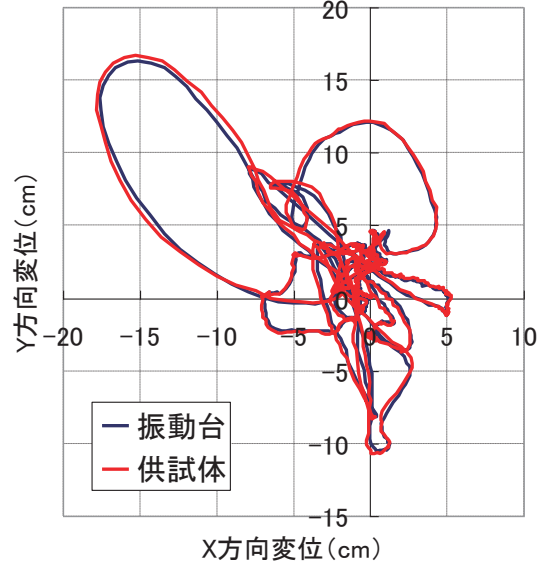


図4 支持糸を用いた場合の挙動

3. 数値解析

(1) 解析ケース

解析に関しては、市販の汎用構造解析ソフトウェア LS-DYNA (CTC ソリューションズ) を使用し、対象物を実寸値に設定した。(図5) また解析を行うにあたり、供試体—免震台間の摩擦係数や支持糸の弾性係数などの各パラメータに関しては、事前に測定を行って得られた値(表2)を用いた。

供試体、免震台および地盤に関しては、全て剛体としてモデル化し、単位体積重量等の材料特性を詳細に設定することで、区別した。

実験同様に転倒防止策なしの場合と、転倒防止策を施した場合(2パターン)の計3パターンについて解析を行った。なお、入力地震動は実測値との比較のために、実験時と同様の JMA 神戸の 70%の加速度波形を使用した。

表2 解析に用いた実測パラメータ

供試体—振動台間の摩擦係数	0.44
供試体—免震台間の摩擦係数	0.99
支持糸の弾性係数	1000 N/mm ²
免震台の固有周期	2.3sec

(2) 解析結果

○転倒防止策を施していない場合

供試体は振動開始 1 秒後あたりからロッキングを始めるが、その後転倒することなく地盤上を滑るように動き回り、供試体自体があまり傾くようなことは無かった。

○免震台による転倒防止策を施した場合

供試体は振動開始直後から、徐々に免震台の上を滑るように移動し始め、振動開始 4 秒後には免震台か

ら転落するような挙動を示した。

○支持糸による転倒防止策を施した場合

供試体は振動開始直後はあまり急激な動きを示さず、7秒あたりから糸で固定していない供試体底部が滑るような動きを見せ、徐々に供試体が傾いていき10秒辺りではほぼ転倒していた。

図6、図7、図8はそれぞれ転倒防止策を施していない場合の振動台および供試体の重心位置の挙動履歴、免震台による転倒防止策を施した場合の振動台と免震台および供試体の重心位置の挙動履歴、支持糸による転倒防止策を施した場合の振動台および供試体の重心位置の挙動履歴を、水平方向についてのみプロットしたものである。

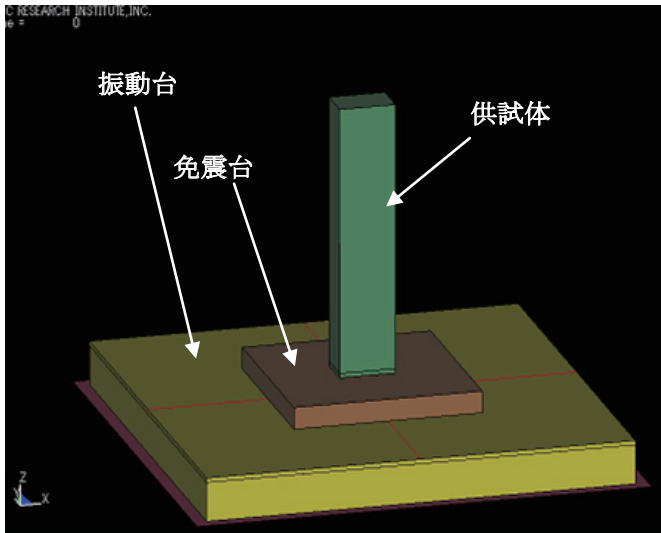


図5 解析モデル例 (免震台使用)

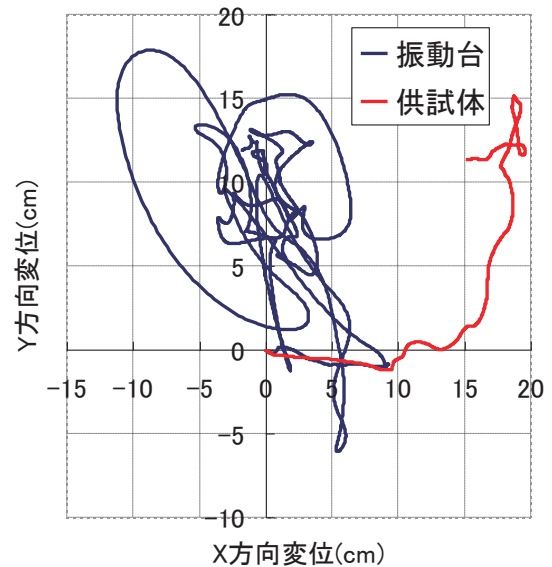


図6 転倒防止策なしの場合の挙動

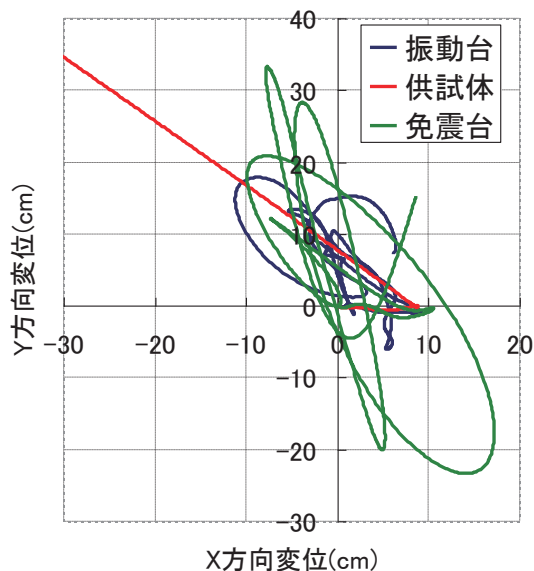


図7 免震台を用いた場合の挙動

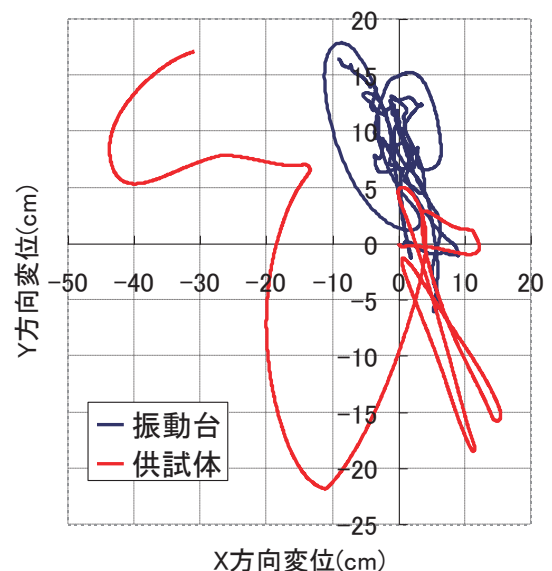


図8 支持糸を用いた場合の挙動

図6では、振動開始1秒あたりから供試体がロッキングを始め、その後ある方向に地盤上を滑るように動いていたため、地盤とは異なった動きを示した。

図7では、免震台が地盤自体の挙動よりもかなり大きな変位をしている事が確認できる。これに伴い地震動が作用し始めて4秒ほどで、免震台上の供試体は地盤の上に転倒してしまった。これは免震台の変位量と速度が大きかったことが、転倒の原因として考えられる。また、免震台の位置を復元させるために設けたばねが想定以上に強く働いてしまった事も原因として考えられる。

図8では、振動開始と同時に供試体がロッキングを始めた後、供試体底部がある方向に滑り始めた。しかし、供試体上部は支持糸で固定されているため、供試体の底部と比較すると初期の位置から大きくは変位はしなかった。一方、供試体底部は地盤上を大きく移動していた為、それに伴い重心位置は大きく変位していることが確認できる。結果として供試体が転倒した。

以上より考えられるのは、供試体と免震台・地盤との接触が上手くモデル化出来ていない可能性がある事である。接触に関しては、ペナルティー法による2方向処理(対称処理)を行っているが、免震台や地盤に回転運動を起こさせないために幾つかの拘束条件を設定しており、その作用によって伝えられるべき接触力に変動している可能性がある。また、免震台の減衰値や接触時の反撥係数など、実験挙動を再現できるよう調整しなければならないパラメータがあり、今後のさらなる検討を要する。

4. 結論

- i) 実験では転倒防止策を施さない場合、対象となる供試体は簡単に転倒してしまう。
- ii) 実験においては JMA 神戸の 70%の地震動に対し、免震台および支持糸による転倒防止法は、それぞれ単独でその効果を確認することができた。
- iii) 解析では実験の場合と異なり、転倒防止策を施していない場合のみ転倒しなかった。
- iv) 解析の結果を導いた原因として、摩擦係数をはじめとする各パラメータの設定が不十分であったものと考えられる。

今後、供試体の応答加速度および支持糸に掛かる張力を計測して、支持糸に必要な条件を明らかにしていく予定である。まだ詳細な結論は得られていないが、これまでの検討では、糸固定をすることにより、供試体の鉛直軸まわりの回転運動が励起される状況が観察されている。回転角の計測や糸の張力測定を進め、定量的な評価を行う予定である。同時に解析に用いたパラメータを見直し、解析自体を実際の挙動に近づけていく。その上で、より多くのケーススタディを行う必要があると考えている。

謝辞：新潟県中越地震による文化財の被害について、長岡市立科学博物館の小熊博史氏と鳥居美栄氏、十日町市博物館の菅沼亘氏に、詳しく説明していただいた。また、実験と解析においては、当時立命館大学生であった進野努氏と村松万由佳氏の協力を得た。記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 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，日本建築学会構造計論文集，第469号，pp.53-60，1995年3月。
- 2) 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，日本建築学会構造計論文集，第517号，pp.45-51，1999年3月。
- 3) 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。
- 4) 三輪滋・古川愛子・清野純史・樺山貴昭：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。
- 5) 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.
- 6) Augusti, G., Ciampoli, M. and Airolidi, L.: Mitigation of seismic risk for museum contents: An introductory investigation, Proc. of 10th World Conference on Earthquake Engineering, pp.5995-6000, 1992.
- 7) Calio, I. and Marletta, M.: Passive control of the seismic rocking response of art objects, Engineering Structures, Vol.25, pp.1009-1018, 2003.
- 8) 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。