

文化財の転倒防止に用いる 耐震マットの振動特性に関する考察

Vibration tests using adhesive mat to protect cultural properties from fall down during earthquake

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, Graduate School of Science and Engineering, Ritsumeikan University

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, Dept. of Civil Engineering, Ritsumeikan University

³立命館大学教授 グローバル・イノベーション研究機構 (〒603-8341 京都市北区小松原北町58)

Professor, Global Innovation Research Organization, Ritsumeikan University

Protecting the cultural assets against earthquakes is important task to carry on our culture for the next generations. Impulse tests and shaking table tests were conducted to evaluate the dynamic characteristics of the adhesive mat. Two types of earthquake-proof adhesive mats were used; one was made of urethane elastomer and the other was made of silicon. The impulse test results showed that the silicon mat had higher damping and higher natural frequency than the urethane mat. The urethane mat showed higher isolation for 10Hz-over oscillation than the silicon mat in the shaking table tests, because of its lower natural frequency and lower damping.

Key Words : *impulse test, shaking table test, earthquake-proof adhesive mat, dynamic characteristics*

1. はじめに

美術工芸品などの文化財は先人たちの精神活動の証であり、これらの遺産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、2004年に発生した新潟県中越地震では、十日町市博物館で免震台の上に展示されていた国宝の火焰型縄文土器が転倒し、破損してしまった。また長岡市立科学博物館においても免震台の上で展示されていた土器が転倒しており、免震作用では転倒を防ぐ事ができないケースに対し考慮する必要性が示された。

一方、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。取り付け方法は免震台と同様、対象の底面に設置するため、美観への配慮も可能だと考えられる。ただ、実際の文化財に設置して検証を行うことは不可能なので、数値シミュレーションによりその有効性を確認することが必要である。

既往の研究において耐震マット設置によるシミュレーションは、粘着力による転倒防止の結果にのみ着目されている場合が殆どであり、設置による対象の応答への影響を定量的に評価した研究は殆ど報告されていない。一方、実験的研究に関しては、耐震マットを用いた物体の地震時転倒防止としてこれまで幾例もの研究が成されてきた。

例えば仲谷らは¹⁾、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、加速度の振幅が大きい

場合や高振動数領域では耐震マットから模型が外れる危険性が指摘されている。しかし、材質の違いによる振動特性に言及されている研究や、耐震マットを装着することによる模型の応答の変化に関する定量的な実験的研究は、まだまだ少ないのが現状である。

著者らは²⁾、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、地震動を用いた振動台実験による検討を行っている。その結果、等価な震度 0.2G 以下の加速度で転倒する木製模型に 1995 年神戸海洋気象台記録を入力した場合、ウレタンエラストマー素材、シリコン素材の 2 種類の耐震マットを設置すると、どちらの場合も転倒しないことが明らかとなった。相対変位に関しては、シリコン素材の方が小さい値に抑えられていたが、これはシリコン素材の厚みが、ウレタン素材より薄いことが減衰性および形状による剛性に影響しており、振動性能を正確に比較するためには、厚みを合わせる必要がある。

本研究では、数値シミュレーションのモデル作成を念頭に置き、パラメータ取得を兼ねた耐震マットの振動特性把握のために、インパルスハンマーを用いた衝撃加振実験と振動数の異なる正弦波を用いた振動台実験を行った。

2. 実験器具

今回の実験で使用した器具を表 1 に記す。

耐震マットに関して、前報²⁾では市販品を用いたため、素材の違いとともに厚みも異なった。そのため、形状による剛性の違いと、素材による剛性や減衰の違いとにより、結果に及ぼす原因を明確にすることができなかった。今回の実験では使用する 2 種の耐震マットの厚みを揃え、振動特性の差が厚みで生じないようにした。



写真1 耐震マット



写真2 インパルスハンマー



写真3 3次元振動台、模型および加速度計設置箇所

表 1 実験器具詳細

実験器具	器具詳細
耐震マット	ウレタンエラストマー製およびシリコン製、50×50×3mm、各 4 枚（写真 1）
インパルスハンマー	1 台、2200N まで測定可能（写真 2）
振動台	動電式、テーブルサイズ 100×100cm（写真 3）
模型	木製直方体、9×13×62cm、2.03kg（写真 3）
加速度計	3 台（振動台上、模型底部、模型上部）（写真 3 赤丸）

3. 衝撃加振実験

インパルスハンマーを用いた衝撃加振実験は、各耐震マットの減衰定数および固有振動数の算定を目的に実施した。模型底部に耐震マットを設置し（写真 3）、模型上部の長手方向面、短手方向面をそれぞれ複数回打撃し、模型の上部、底部の加速度およびインパルスハンマーの衝撃荷重を測定した。この作業を 2 種類の耐震マットそれぞれにおいて行った。模型上部での計測加速度を図 1、2 に示す。

減衰定数の算定にあたっては、インパルスハンマーにより測定された衝撃荷重がほぼ同等の値を示した時のデータを選び、模型上部の加速度時刻歴波形より対数減衰率を計算し、平均的な減衰定数を求めた。その

結果、ウレタンマットでは 0.12、シリコンマットでは 0.23 という値が得られ、シリコンマットの方がウレタンマットより減衰定数が約 2 倍大きいと分かった。

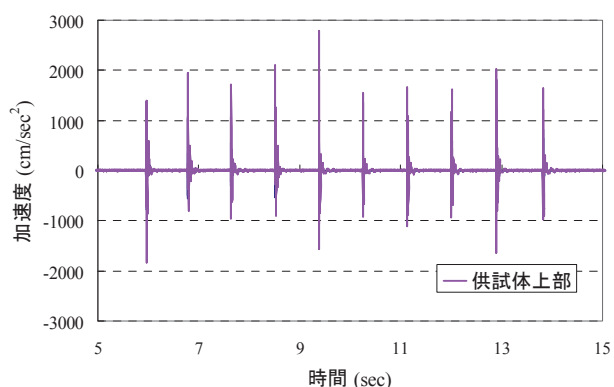


図1 ウレタンマット設置時の計測加速度

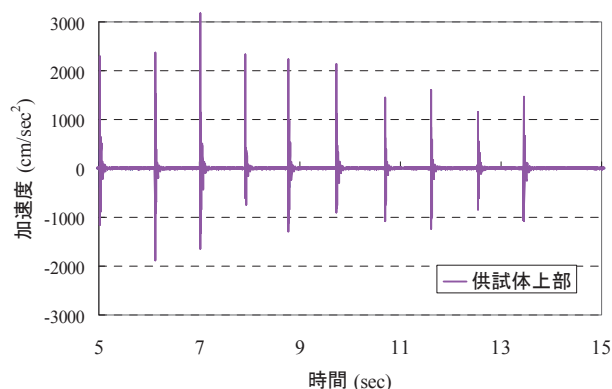


図2 シリコンマット設置時の計測加速度

固有振動数の算定においても減衰定数の算定時と同様に、インパルスハンマーにより測定された衝撃荷重がほぼ同等の値を示した時の加速度データを用いた。図 3、図 4 はウレタンマットおよびシリコンマット設置時の、模型上部における応答加速度のフーリエ解析結果を表している。ほぼ同じ衝撃荷重が得られたケース（ウレタンマットで 8 ケース、シリコンマットで 7 ケース）のフーリエスペクトルを重ね描きして示した。両耐震マットの固有振動数を比較すると、ウレタンマット設置時は 11Hz 付近で卓越しているのに対して、シリコンマット設置時は 20Hz 以上で卓越しており、シリコンマットの方がウレタンマットよりも剛性が高い事が確認できる。また、ウレタンマット設置では 35Hz 付近で 2 次モードのピークがかなりはっきりと表れており、シリコンマット設置でも 50Hz 付近で表れている。このことから、数値シミュレーションでは耐震マットを簡単な 1 本のばねでモデル化する事は適切ではないと考えられる。

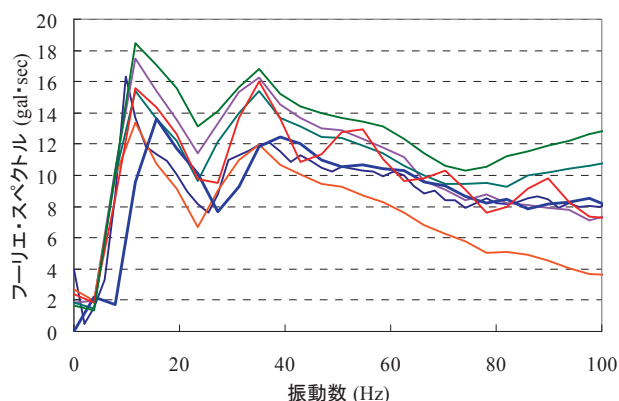


図3 ウレタンマット設置時のフーリエスペクトル

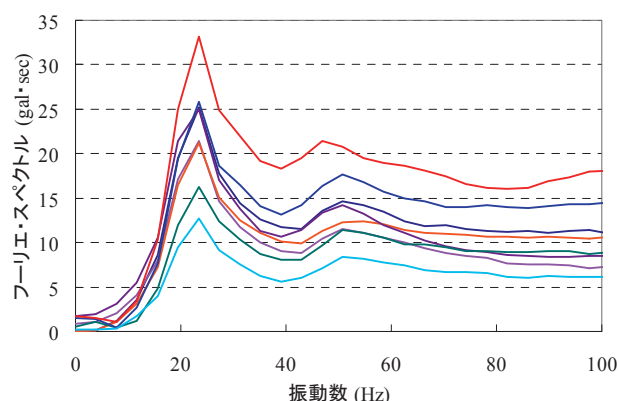


図4 シリコンマット設置時のフーリエスペクトル

4. 振動台実験

振動台実験においては応答が確認しやすいように、模型の短手方向 1 方向にのみ加速度波形入力を行い、耐震マットを設置した状態で加振した。入力加速度には最大加速度 100gal の正弦波を用いて振動数は 5Hz、10Hz、15Hz、20Hz の 4 パターンを用いた。加速度の計測は入力振動数毎に 3 回行った。

図 5 は振動数毎に行った 3 回の実験で、模型上部と振動台で計測された最大加速度から応答倍率を算定し、入力振動数毎にプロットした。5Hz、10Hz ではウレタンマットの応答倍率がシリコンマットよりも大きい値を示す傾向があるが、15Hz、20Hz ではウレタンマットの方が小さく、20Hz においては倍率が 1 以下となっている。今回の実験では、入力振動数を 5Hz 毎に変化させて応答を確認したが、ウレタンマット設置時には入力加速度の振動数が高くなるほど応答倍率が低い値を示す傾向が伺える。シリコンマットにおいては、10~15Hz 辺りで応答倍率が 1.5 以下の値を示すが、それ以外の振動数では応答倍率が 1.5 を超えている

ことが確認できる。固有振動数のところで大きく共振し固有振動数の $\sqrt{2}$ 倍以上になると、減衰の小さい方が応答倍率も小さくなるという共振曲線の性質³⁾から、15Hz以上の領域においては、ウレタンマットの方が応答低減に効果的であった。逆に、10Hz以下の振動に対しては、シリコンマットの方が応答を低減させている。減衰定数が高いこともあって、応答のばらつきも小さい。ただし、対象物の固有振動数近傍では、両方の耐震マットとも応答を低減させる効果は低いと考えられる。図5からは、この模型の場合、10Hz以下のゆっくりした振動に対してはシリコンマットの方が、振動の振幅を低く抑える効果があり、15Hz以上の速い振動にはウレタンマット設置の方が効果があると確認できる。逆に模型の固有振動数で考えると、固有振動数が高い、重量が軽く剛性の高いものにはウレタンマットを、固有振動数が低い、重量が重く剛性の低い物にはシリコンマットを使えば効果があると考えられる。

1自由度系として減衰定数から算出される共振時の応答倍率（減衰定数 h に対して $1/2h$ ）は、ウレタンマットで 4.3、シリコンマットで 2.4 である。図5より、シリコンマットの 20Hz 加振では、ほぼ 1 次振動モードの共振が生じていると考えられる。一方、ウレタンマットは共振点を多少ずれていることもあるが、図1からもあまり 1 次振動モードの寄与率が大きくないことも考えられる。振動形状の詳細な観察とともに、今回 5Hz 毎の正弦波入力による加振を行ったが、今後、入力振動数の間隔を変更し、両耐震マットの設置における応答倍率の影響を詳細に追跡する予定である。

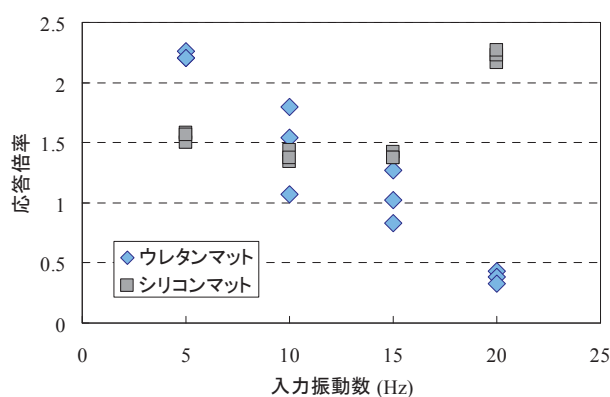


図5 入力振動数に伴う応答倍率の変化

5. まとめ

本研究では、数値シミュレーションのモデル作成を念頭に置き、パラメータ取得を兼ねた耐震マットの振動特性把握のために、インパルスハンマーを用いた衝撃加振実験と振動数の異なる正弦波を用いた振動台実験を行った。その結果、明らかになった事を以下に記す。

- 1) 減衰定数はウレタンマットが 0.12、シリコンマットが 0.23 でシリコンマットの方がウレタンマットよりも約 2 倍大きい。固有振動数はウレタンマット設置時が 11Hz、シリコンマット設置時が 20Hz で卓越しており、シリコンマット設置時の方がウレタンマット設置時よりも卓越振動数が 10Hz ほど高い。
- 2) この模型の場合、10Hz 以下のゆっくりした振動に対してはシリコンマット設置の方が振動の振幅を低く抑える効果があり、20Hz 以上の速い振動にはウレタンマット設置の方が効果がある。

謝辞：本研究を進めるにあたり、プロセブン株式会社の協力を得た。記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 岸祐介・伊津野和行・土岐憲三：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, 歴史都市防災論文集 Vol.2, pp.85-90, 2008年10月.
- 3) 小坪清眞：入門建設振動学, 森北出版, 1996年.