

彫像台の滑り板免震装置の振動台実験

愛知工業大学耐震実験センター 青木徹彦
国立西洋美術館 河口公男

1. はじめに

美術館には絵画のほか多くの彫像が設置されており、地震時にはこれらの展示物は重心が高い位置にあるので転倒しやすい。そのため見学者に対する安全性や、美術品の損傷防止のために地震対策が必要である。住宅や公共構造物に対する耐震工法には従来から、耐震補強、制震、免震があるが、美術品のような小型の設置物には免震が有効であり、できるだけ小型、簡単、経済的な装置とすることが望ましい。免震の方法にも、従来から滑り免震、転がり免震、リンク機構を用いた水平移動装置、及びこれらを組み合わせたものなどがある。

今回、彫像台の免震対策として、彫像設置台の下にステンレス板を取り付けた最も簡単な滑り免震を採用し、その有効性を振動台実験により確認する。ステンレス板の裏にはテフロンシートを貼り付ける。採用した滑り板免震装置は、彫像設置台下端に取り付けた滑り板を美術館の床材の上に直接載せるだけという、考えられる最も簡単な免震装置で、従来ある免震装置に比べ、構造が簡単、安価、サイズが小さく美術品の鑑賞の妨げにならない等の利点がある。

彫像台に滑り免震を採用した動機は、1994年1月17日にアメリカ・カルフォルニア州サンタモニカで発生したノースリッジ地震において、マリブにあるゲッティ美術館にあったいくつかの石造彫刻が滑動し、転倒や損傷を免れたという事実をこと発している。

滑り免震に関する研究は日本では古くから行われており、建築物^{1,2}、橋梁構造物³⁻⁶、その他の免震方法の研究が数多くなされている。ところがわが国では、1995年の兵庫県南部地震および2004年の新潟県中越地震の小地谷で、非常に大きな上下動(約800 gal)が観測され、滑り免震装置がこのような大きな上下動の地震動に対しても有効であるかどうか疑問が生じ始めたが、その実験的検証例は今日までほとんどない。そこで今回は特に滑り板免震装置に及ぼす上下動地震動の影響に注目し、振動台を用いて一方向の水平動と同時に上下動を加震して免震装置としての有効性を確認することを本研究の主な目的とする。

振動台実験で用いる床材は実際の美術館で用いる材質の異なった5種類を用意し、その上に固定具なしで彫像台を設置し、地震波として国内で最大級の兵庫県南部地震、および新潟県中越沖地震での観測地震波を用いて加震する。

滑り免震を用いた振動台実験として、橋英三郎⁷は今回の実験で行ったと同様の滑りのみを有する安価な簡易免震を建築物に対して適用する場合の実験結果を紹介しており、望ましい摩擦係数 μ と、最大移動距離 δ_{max} および残留変位 δ_{rem} を主要パラメータとしている。ばねのような復元力を与える装置はないから、地震後にこの残留変位をジャッキで押し戻す。摩擦係数 μ として、小さな地震や風では動かないようにある程度大きいこと、大地震で動く程度(最大加速度200 cm/sec²)に小さいこと条件として $\mu=0.2$ をあげ、滑り材料としてステンレス板がよいとしている。この滑り免震を3回建てのビル模型の底部に設置し、加震実験を行ったところ、免震のない基部固定の場合には建物の上部階は、基部に対して大きく揺れているのに対して、免震装置をつけた場合、各階の加速度は免震装置をつけない場合の25%~70%低下する

1 坂田利文, 岡本修一, 柴田耕一. 軽量住宅に適した滑り免震構造の研究: 摩擦係数変動型滑り支承の動的応答解析. 日本機械学会 Dynamics and Design Conference 99 講演論文集. 1999.03, p. 6-19.

2 井川望, 米田春美, 橋英三郎, 橋野龍雄. 滑り免震支承の振動台実験と数値解析による応答低減効果の検証(その2). 日本建築学会技術報告集. 2009, vol. 15, no. 31, p. 685-690.

3 岡本晋, 深沢泰晴, 藤井俊二, 尾崎大輔. 滑り方式免震システムを有する橋梁の地震時挙動特性. 土木学会論文集. 1995-04, No.513/I-31, p. 191-200.

4 金治英貞, 鈴木直人, 家村浩和, 高橋良和, 美濃智広, 高田佳彦. 低摩擦型滑り支承の面圧・速度依存性検証と床組免震構造の設計モデル構築. 土木学会論文集A. 2006, vol. 62, no. 4, p. 758-771.

5 高橋良和, 家村浩和, 平井崇士. 滑り型免震支承の軸力変動が連続桁橋の地震応答に及ぼす影響. 土木学会地震工学論文集. 2003, p. 1-4.

6 遠藤和男, 岡田大賀雄, 運上茂樹. 滑り系支承を有する免震橋梁の振動台実験. 第9回地震時保有耐力法に基づく橋梁等構造の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集. 2006-02, p. 1-4.

橋英三郎. 日本での取り組み事例の紹介①: 復元機構を持たないローコストの滑り免震. ローコスト免震技術の開発に関する講演会資料. つくば市(ほか, 5か国を結ぶビデオ会議), 2007-02-08.
<http://www.kenken.go.jp./japanese/information/information/event/tokyo-2007/index.htm>
 (参照2009-05)

ことを示している。

ところが興味あることに、試験体の基部に注目すると、その最大加速度は、常識に反し滑り免震のある構造物の基部のほうが、固定基部すなわち振動台より50%~400%大きくなっていることである。上部階の加速度は基部の加速度より小さいが、それでも滑り免震を持たない固定基部より大きい。ただし、滑り板の潤滑性を高めた場合には、常識で予想されるとおり、滑り免震をつけた場合の基部の最大加速度は、固定の場合より20%~50%ほど小さい。以上のことは今回の実験で参考となる注意すべき点である。

2. 実験計画および方法

2.1 実験計画

(1) 彫像モデルおよび滑り板

実験に用いた彫像モデルは写真1に示す1種類で、高さ約1015 mmの設置台の上に高さ535 mmの彫像がボルトで固定されている。寸法を図1に示す。全高は1550 mmである。設置台は実験用に鋼製のアングル4本で組み立てられ、断面寸法400×400 mmで、実際の彫像台と重さおよび重心が等しくなるよう、中央部に $t=12$ mmの鋼板16枚が等価な錘として固定されている。設置台の底部には一辺が500×500 mm、板厚 $t=16$ mmの鋼板が取り付けられ、その下に高さ75 mmの結合ブロックを介して、寸法900 mm×900 mm、板厚 $t=5$ mmのステンレス製滑り板が固定され、その底面には厚さ3 mmのテフロン板が接着されている。彫像モデルの全重量は約332 kgで、重心位置はフロアーから高さ600 mmの位置にある。

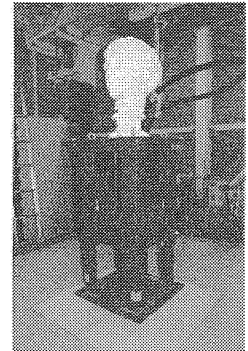


写真1 彫像台モデル

(2) 床材

展示室の床材料として、実験に用いたものは1) 木製床材、2) 硬貨ゴム床材、3) 木質繊維硬化床材、4) カーペットタイル および 5) 磁器タイルの5種類である。これらの材料はいずれも、12 mm厚の合板2枚を組み合わせ、厚さ約60 mmのパネルを作ったうえで、これを6枚組み合わせた広さ2.7 m×2.7 m木製フロアー上に接着されている。木製フロアーは鋼製の振動台にボルトでしっかりと固定されている。彫像モデルはこれらの床材の中央に置いた(写真2参照)。

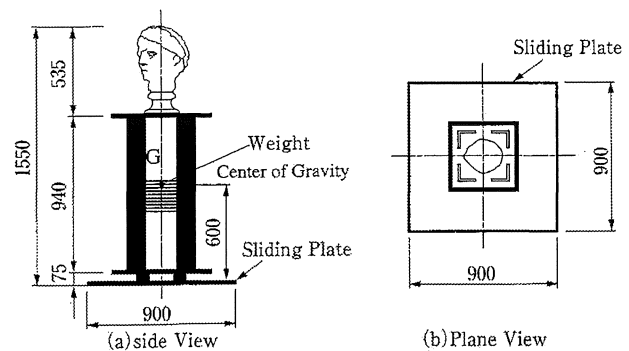


図1 彫像台の寸法 (mm)

(3) 振動台

振動台は今回の実験用に愛知工業大学内の耐震実験センターで新たに開発されたもので、米国MTS社製25 tfアクチュエータ2基を用いて、上下および水平1方向に5 tの重量物が加震可能である(写真2)。

振動台は断面寸法200×200 mmの角型鋼管を溶接組み立てた鋼製フレーム2層から成る。

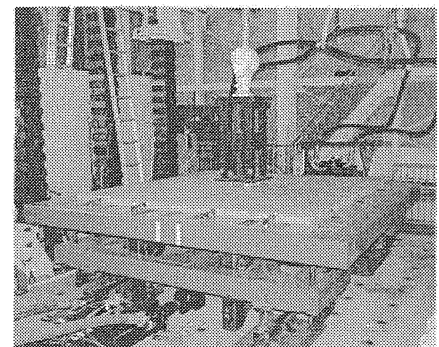
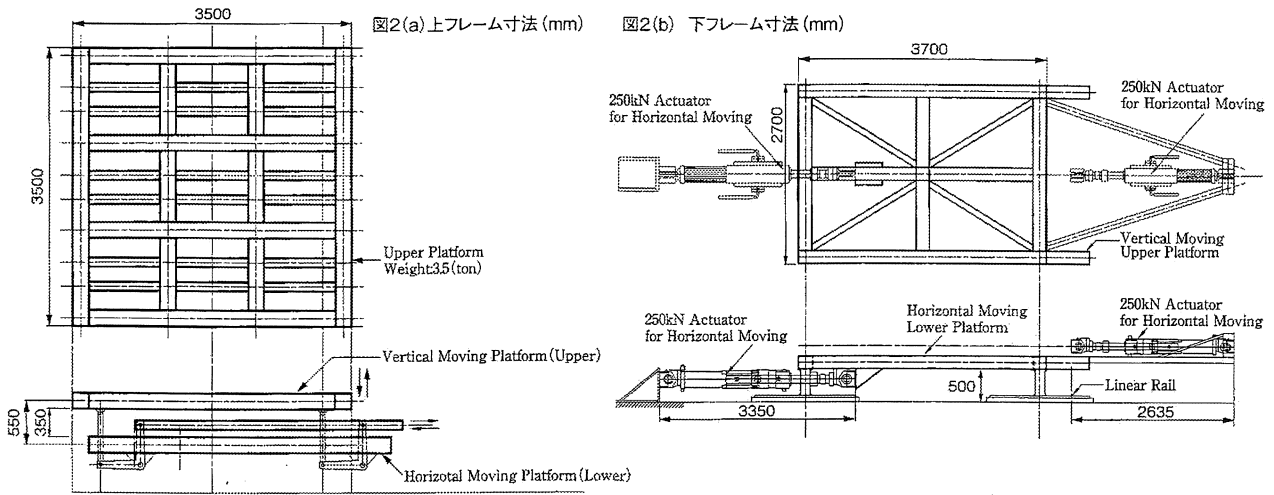


写真2 振動台と彫像台



上部フレームは図2(a)に示すように、平面寸法3.5 m×3.5 mで重量は約1960 kgあり、下部フレームの上に350 mm離して4本の鉛直棒を介して設置されている。水平に移動する下部フレームには、鉛直振動用のアクチュエータを水平に設置し、その動きをL型レバーにより鉛直方向に変換している。したがって、上下フレームは一体となって水平方向に同時に同じ振幅で動き、上フレームにはさらに上下の動きが加えられる機構となっている。このような構造とした理由は、既存の2本の25 tアクチュエータを有効利用することと、アクチュエータの長さが約2.6 mと長いので、上下方向に設置するにはピットが必要となりこれを避けるためである。

下部フレームは図2(b)に示すように、平面寸法2.7 m×3.7 m、重量約1730 kgで、水平に1方向移動できるリニアール上に設置され、実験床に反力を取るよう固定された水平駆動用アクチュエータ1基に結合され、東西方向に加震できる。このアクチュエータの反対側には上下加震用の第2のアクチュエータがこのフレームの上に水平に固定されている。上部フレームの反力はこの下部フレームから取る。

(4) 地震波

地震波は2種で、それらの最大加速度は、兵庫県南部地震の観測地震波JMA(神戸)の水平方向は820 gal、鉛直方向333 gal、および新潟県中越地震JMA(小千谷)では水平方向1140 gal、鉛直方向818 galである。地震波は加速度記録として与えられているが、アクチュエータへの信号は変位記録を与えねばならないため、加速度記録を2回微分し、さらに動的アクチュエータの作動を滑らかにするために、高周波成分、低周波成分を除去した後、加震用の変位データを作成した。比較のため、これをもう一度加速度に変換して元の加速度記録と比較した図が図3である。またこの再現加速度データのスペクトル図を図4に示す。

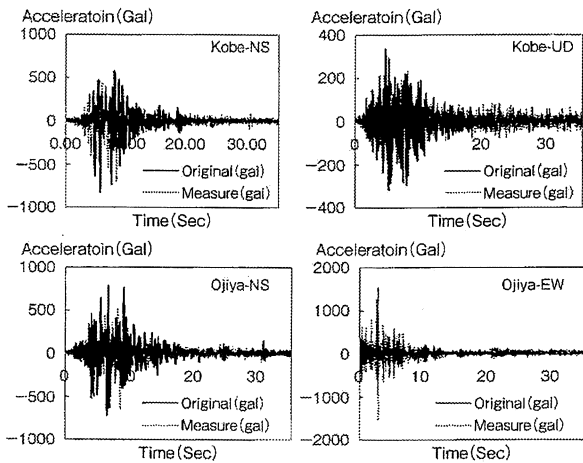


図3 実測加速度と元の加速度記録との比較

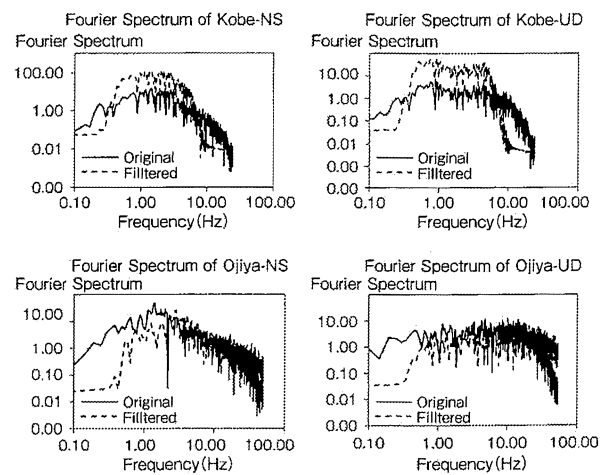


図4 再現加速度データのスペクトル図

2.2 実験方法

(1) 変位および加速度の計測

彫像モデルを写真2のように床材(2.7 m×2.7 m)の中央に置き、図5に示す位置にレーザー変位計および加速度計を設置する。変位計は上部振動台フレームの端部にセットし、水平変位を計測する。加速度計(10G型)は空間3成分計測できる。

(2) 加震方法

入力地震波のJMA(神戸)およびJMA(小千谷)の地震波加速度記録の水平2成分のうち最大値を記録したN-S成分を選び、鉛直成分とともに同時加震する。加震は安全のため、はじめに元の振幅の1/4、ついで1/2、等倍の順で行ない、実験ごとに彫像モデルを元の位置に置きなおした。

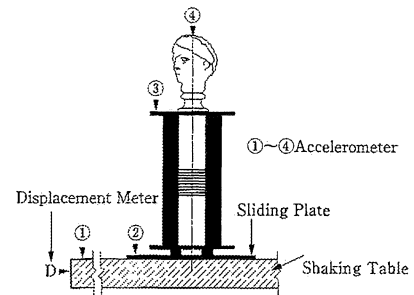


図5 加速度計、変位計の取り付け位置

3. 実験結果と考察

3.1 目視観測結果

水平および鉛直地震波の同時入力による加震実験の結果、いずれの地震波、床材に対しても、振動台の激しい揺れにもかかわらず、今回採用した滑り板免震装置は安定した動きを見せ、いずれの場合も試験体が上下に飛び跳ねた様子や、彫像台の転倒は見られず、免震の機能が有効に働いていることが確認できた。

3.2 加速度計測結果

滑り板の下の床の加速度を基準に、彫像台各部の加速度がどのように変化しているかを5つの床材ごとに図示すると図6(a)~(e)のようになる。縦軸は加速度計の設置位置で、横軸は加速度応答倍率である。太実線が神戸のNS(北南)、太破線が神戸のUD(上下)、細実線が小地谷のNS、細破線が小地谷のUDを示す。神戸地震波の一部の床材の頭部の加速度を除くと、全体的に小地谷の地震波の方が大きな値を示している。滑りがないと、彫像台は上部になるに従い、非常に大きな加速度倍率を示すと思われるが、滑りがあるために、セラミック・タイル、タイル・カーペットの場合の頭部を除いて、加速度倍率は2倍以下に抑えられている。神戸地震波の上下動の場合、セラミック・タイルとカーペットでは、④で示す頭頂部が最も大きくなっている。

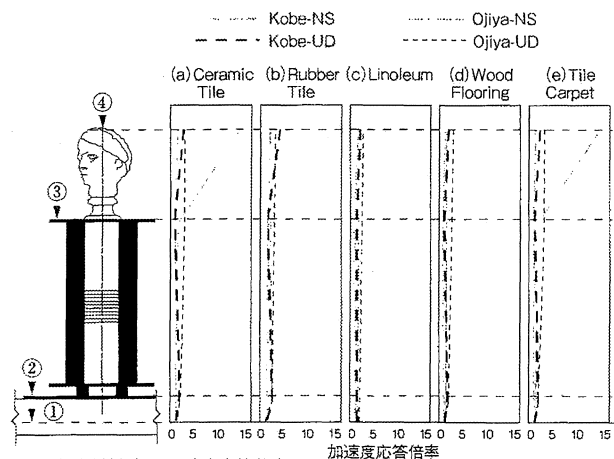


図6 各床材料ごとの加速度応答倍率

表1 基部の加速度(m/s²)と加速度応答倍率

	床材料	Kobe(NS)	Kobe(UD)	Ojiya(NS)	Ojiya(UD)
No.1	セラミック・タイル	8.6(0.71)	3.2(1.03)	9.9(1.46)	9.6(1.62)
No.2	ゴム・タイル	8.1(0.91)	3.4(1.89)	9.9(1.78)	9.3(1.98)
No.3	リノリウム	8.2(0.81)	3.0(1.15)	9.8(1.27)	12.5(1.38)
No.4	木製フローリング	8.2(0.92)	3.4(1.28)	10.0(1.23)	8.7(1.67)
No.5	タイル・カーペット	8.0(0.84)	3.1(1.09)	9.9(1.58)	9.9(1.42)

滑り免震付き彫像台基部の最大加速度および振動台に対する加速度応答倍率を表1に示す。同表から分かるように、各実験での振動台の最大加速度の床材ごとの実験値はほぼ同じ値である。

図6および表1のカッコ内の数値からわかるように、今回の実験では、振動台の加速度に対する滑り免震台の加速度の比率の値が神戸NS地震波を除いて1より大きく、これは振動台の加速度より滑り免震台

の加速度が大きいということを示している。特に水平方向地震動に対してこのようなことが起こるのは常識的には考えられないことであるが、本論の「1.はじめに」の項で述べたように、今回と同様の実験を行った橋英三郎⁷による研究でも同様の結果が示されているので、参考にその一部を図7に再録する。同図は滑り免震付き3階建建築モデルの振動実験における各階の最大加速度応答を縦軸に、応答加速度を横軸にとり、基部固定の場合を実線で、滑り免震つきで潤滑剤のないものを細実線、潤滑のあるものを破線で示している。同図からわかるように、滑り免震付きの建物のほうが、1,2,3階部分で全体的に最大応答加速度が小さくなっており、その値は基部固定の場合の25~70%であるとしている。

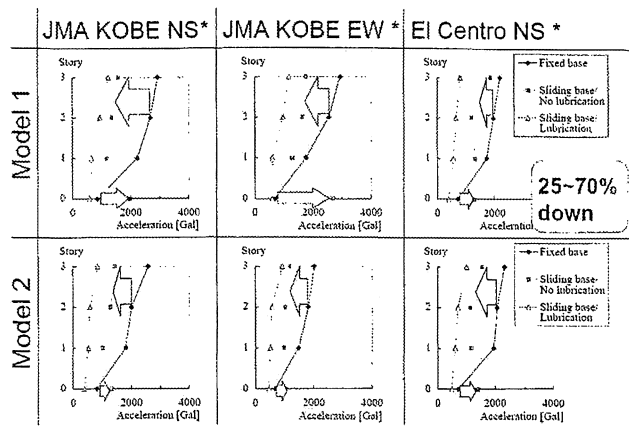


図7 滑り免震付き3階建建築モデルの振動実験—各階の最大加速度応答⁷

しかし同図の基部位置に注目すると、いずれの地震波の場合も常識に反し、滑り免震付きの構造基部（潤滑のない場合）での最大加速度の方が、基部を固定したもの、すなわち振動台の加速度より60~400%も大きな値となっている。これらは今回の彫像台の実験結果と符合する結果となっている。しかし、滑り免震に潤滑剤を付した場合には、常識通り、滑り免震基部のほうが、基部固定の場合より最大加速度応答が5~50%小さくなっている。

以上の結果から、滑り免震装置の滑り摩擦がある程度大きい場合には、基部に限って言えば滑り免震付の構造の基部の最大加速度は、免震のない構造の固定基部すなわち振動台より大きくなる可能性があることを示しており、興味ある実験結果といえる。このような現象が起きる理由は現段階で定かではないが、振動台の変位が逆転するとき、いったん速度がゼロとなって滑り板の動摩擦が瞬間的に最大になるためと推察される。また図7からわかるように、滑り免震基部の加速度が、固定基礎すなわち振動台の加速度より大きい場合でも、構造体の上部は基部と同程度か、それより小さい加速度となっており、固定の場合の構造体上部より十分小さい加速度となっており、免震効果は十分にあることに注意すべきである。すなわち瞬間的に現れる基部の最大加速度だけでは免震効果は判断できない。

3.3 変位振幅と摩擦係数との関係

滑り板の摩擦係数が大きいと一般に、滑り免震構造の変位は小さくなる。すなわち変位振幅と摩擦係数は逆関係にあるので、これをグラフにしてみると反比例の曲線が得られるはずである。

小千谷の地震波に対する、実験中の映像から読み取った彫像台の水平移動量 δ_{max} および変位振幅 δ_A 、摩擦係数 μ を床材料ごとにまとめると表2のようになる。変位振幅と摩擦係数との関係を図示すると図8のようになった。同図から変位振幅と摩擦係数はほぼ反比例的な関係にあることが分かる。変位振幅 δ_A は表2に示した実験順に大きく、また摩擦係数は逆順になっている。摩擦係数は今回の実験に先立って行われた計測で得られた数値を用いた。本実験では予測通り、摩擦が少なければ大きく滑り、摩擦が大きいときは、滑り量が小さくなっている。木質フローリングの摩擦係数は計測していないが、変位振幅は260 mmであったので、このグラフから摩擦係数は0.135程度であることが推察される。

彫像台が転倒しなければ、見学者との衝突被害を避けるためには彫像台の変位振幅は小さいほうがよく、滑り板と床材間の摩擦係数はある程度大きいほうがいいといえる。図8から変位振幅を400 mm以下には抑えたいときには、摩擦係数は0.12以上は欲しいということがわかる。滑り板の摩擦係数が小さい場合、滑り変位振幅が増大し、彫

表2 彫像台の水平移動量 δ_{max} 、変位振幅 δ_A 、摩擦係数 μ (小千谷地震波)

	床材料	δ_{max} (mm)	$-\delta_{max}$ (mm)	δ_A (mm)	δ_R (mm)	μ
No.1	セラミック・タイル	+80	-300	380	-180	0.12
No.2	ゴム・タイル	+240	-60	300	+9	0.13
No.3	リノリウム	+50	-160	210	-3	0.14
No.4	木製フローリング	+75	-190	265	-75	—
No.5	タイル・カーペット	+30	-150	180	-30	0.15

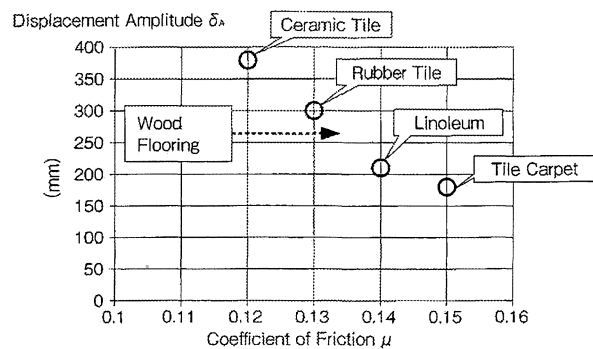


図8 変位振幅と摩擦係数との関係

像の鑑賞者に衝突する可能性がある。今回の実験では最大振幅はセラミック・タイルの床材で約400 mm生じたが、この程度の変位量は、通常、鑑賞者と彫像間は1 m程度離れているので、問題はないと思われる。大地震の際、滑り免震付き彫像台がどの程度の最大変位を生じるのかを把握しておくことが重要である。

滑り板の摩擦力があるレベルより大きくなると、彫像台の最大振幅は小さくなるが、ロッキングや転倒の恐れが生じる。その限界値は、滑り板の摩擦係数 μ 、滑り板の大きさ $a \times b$ 、彫像台の重量 w 、重心高さ h によって変わる。これらの関係を明らかにすることが、今後の課題である。また、ロッキングが生じ始める状況と、これに及ぼす上下振動の影響を調べることも、他の地震波の影響、テフロン以外の滑り材料、数値解析モデルの構築も将来の課題といえる。

以上の実験結果から総合的に判断して、今回、実際に美術館で用いられている5種類のフローア材料に対しては、いずれの場合もステンレス板の裏面にテフロンを貼り付けた滑り免震は、有効に機能したといえる。また滑りが働いている状態で、すなわち彫像台に傾きが生じない状態で、上下動を加震してもその影響はないものと思われる。逆に摩擦力が大きくなり、ロッキング現象を生じて彫像台に傾きが生じたときに、上下動が与えられると、この彫像台は転倒しやすくなるのが容易に想像できる。

4. まとめ

本研究では、彫像台の免震装置として考えられる最も単純な滑り板免震装置を提案し、その耐震性能を振動台実験により調べたものである。本滑り免震装置は、構造がステンレス板一枚という簡単で、安価、小型のため美術品鑑賞者の妨げを最小にしているという点で優れたものである。振動台実験によって得られた結論は以下のようにまとめられる。

- 1) 加震実験に先立ち、25 tf動的アクチュエータ2本を用いた水平一方向と鉛直方向の加震を同時に行なうことのできる振動台を開発し、性能を確認した。水平、上下方向とも入力地震波に対しての正確な作動が確認できた。
- 2) 兵庫県南部地震および中越地震における水平加速度1200 gal、鉛直加速度800 galというわが国で過去に観測された最も大きな地震加速度を水平、鉛直に同時に入力したところ、提案した滑り板免震装置は5種類の床材すべてに対して問題なく機能することがわかった。すなわち彫像台はどの地震波に対しても、ロッキングや転倒することなく、水平移動して停止した。
- 3) 滑り免震板付き彫像台の基部の水平最大加速度は、神戸NS地震波を除き、常識に反し、振動台の加速度より大きな値を示した。滑り免震装置の滑り摩擦がある程度大きい場合には、滑り免震付の構造の基部の水平最大加速度が、免震のない構造の固定基部のより大きくなることもある。同様の実験結果は他の研究者により示されており、興味ある結果といえる。このような現象が起きる理由は現段階で定かではないが、振動台の変位が逆転するとき、いったん速度がゼロとなって滑り始め、滑り板の動摩擦が瞬間的に最大になるためと推察される。
- 4) 小千谷の地震波に対する、実験中の映像から読み取った彫像台の変位振幅 δ_a と摩擦係数 μ との関係を床材料ごとに図示すると、反比例的な滑らかな曲線関係が得られた。本滑り免震板の5つの床材に対する摩擦係数は0.12~0.15で、対応する変位振幅は380~180 mmであった。
- 5) 摩擦係数の最も少なかったのはセラミック・タイルで、その値は $\mu=0.12$ 、変位振幅は最大値380 mmであった。一方、摩擦係数の最も大きな床材料は、タイルカーペットで、 $\mu=0.15$ 、変位振幅は最小値180 mmであった。摩擦係数を測定していない木質フローリングの摩擦係数は、実験で得られた変位振幅と摩擦係数の関係より、 $\mu=0.134$ と推定できる。

- 6) 今回非常に大きな加速度を与えたにもかかわらず、実験では滑り板免震付き彫像台に及ぼす上下動地震波による上下動は観察されず、影響はほとんどないといえる。これは滑らかな水平の滑りによって、彫像台にロッキングが生じなかったこと、すなわち振動中に彫像台に傾きが生じなかったために、上下動の作用力が元の重心点にのみ作用し、傾きを増加させる効果を与えなかったためと思われる。逆にもしロッキングが生じる状況では、上下動が傾きを増加させ、転倒しやすくなると考えられる。
- 7) 滑り板の摩擦力が小さい場合、滑り変位振幅が増大し、彫像の鑑賞者に衝突する可能性がある。今回の実験では最大振幅はセラミック・タイルの床材で約400 mm生じたが、この程度の変位量は、通常、鑑賞者と彫像間は1 m程度離れているので、問題はないと思われる。大地震の際、滑り免震付き彫像台がどの程度の最大変位を生じるのかを把握しておくことが重要である。
- 8) 滑り板の摩擦力が大きくなると、彫像台の最大振幅は小さくなるが、ロッキングや転倒の恐れが生じる。その限界値は、滑り板の摩擦係数 μ 、滑り板の大きさ $a \times b$ 、彫像台の重量 w 、重心高さ h によって変わる。これらの関係を明らかにすることは今後の課題である。また、ロッキングが生じ始める状況と、これに及ぼす上下振動の影響を調べること、他の地震波の影響、テフロン以外の滑り材料、数値解析モデルの構築も将来の課題といえる。

おわりに、わが国の地方には多くの美術館があり、展示物や収蔵物の地震対策が必要であるが、予算の関係上、対応が取れていないところが多い。これに対し、安価で、効果的な免震装置が提案されれば、多くの美術館で採用されることとなろう。本研究がそれらの参考になれば幸いである。実験は愛知工業大学耐震実験センターで行なわれた。実験の実施に際して同センターの技術員鈴木博氏、都市環境学科の学生、大学院生諸君の協力を頂いた。ここに謝意を表する。