

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 30 日現在

機関番号：82620

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2015

課題番号：26750102

研究課題名(和文) 塑像・乾漆像の部材構造を考慮したより高精度な地震時応答解析手法の開発

研究課題名(英文) Development of an analysis method for seismic response of clay and dry-lacquered statues

研究代表者

森井 順之 (MORII, MASAYUKI)

独立行政法人国立文化財機構東京文化財研究所・その他部局等・研究員

研究者番号：30342942

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、我が国でも希少である塑造立像や乾漆造立像の保存上最大のリスクである地震時転倒に関して予測手法の開発を行った。まずは対象となる塑造立像や乾漆造立像について調査を行い、免震装置など地震対策を行っている事例が少ないこと、塑像でも乾漆像同様踵に応力集中による破壊痕跡があることを確認できた。また、塑像および乾漆像を剛体ではなく複数の部材から成る構造体として考え、部材ごとの強度や揺れ方の違いを反映できる個別要素法を用いてより高精度の地震時応答予測手法の開発を進めた。さらに、乾漆像より胴体が重いとされる塑像について振動台実験により地震時挙動を把握した。

研究成果の概要(英文)：The assessment system for falling standing statue made by clay and dry-lacquer by earthquake was developed. At first, it was confirmed a few cases that was adopt any anti-seismic measures for example seismic isolator. And it was found that the heel of some standing statues was clacked because of stress concentration when they were shaken. Then, higher accuracy method using extensive distinct element method (EDEM) was developed that was considered as a structure body. Furthermore, it was confirmed the seismic behavior of clay image by the vibration table examination.

研究分野：文化財科学

キーワード：仏像 地震対策 振動台実験 個別要素法 回転角 移動量 塑像 乾漆像

### 1. 研究開始当初の背景

1995年兵庫県南部地震以降、博物館や美術館に展示される美術工芸品等も、重心の引き下げや免震装置の設置などといった直下型地震対策が進んでいる<sup>1)</sup>。しかし、本研究で取り扱う塑造や乾漆造の立体像のうち特に立像として表されたものは、造立当時からほぼ同じ状態で残ってきたものが多く、過去に受けた大地震でも被害の記録がないという理由で特に地震対策を講じてこなかった事例が多い。しかし大地震の頻発化が言われている現在、このように過去の地震で被害が報告されなかったものに対しても、地震時転倒確率が低いことを合理的な説明が必要となってきた。

### 2. 研究の目的

研究代表者は過去、造立当時から変わらず残ってきた東大寺法華堂安置仏像群や塑造四天王立像(戒壇堂安置)を対象に三次元計測を行い、これらを密度均質の剛体と仮定したうえで重心を計算し、簡易な転倒確率の予測手法を開発した<sup>2)</sup>。またその検証において、剛体模型、乾漆像の構造を再現した模型でそれぞれ加振実験を行った<sup>3,4)</sup>。そのなかで、開発した簡易な転倒確率予測手法と大きな相違がないことを確認するとともに、部材構造を再現した乾漆像模型において、台座と胴体の揺れ方が違うことを明らかにした。そこで本研究ではさらに、乾漆像より胴体が重いとされる塑像について地震時挙動を確認すること、また、塑像および乾漆像を剛体ではなく、複数の部材から成る構造体として考え、部材ごとの強度や揺れ方の違いを反映したより高精度の地震時応答予測手法の開発を進めることを目的とする。

### 3. 研究の方法

本研究は、(1) 塑像や乾漆像の残存事例調査による残存状況や損傷個所の類型化、(2) 塑像模型の一軸振動台による加振実験、(3) 実験結果と個別要素法による数値解析結果の比較による考察、から成る。

#### (1) 塑像や乾漆像の残存事例調査による残存状況や損傷個所の類型化

塑造立像や乾漆造立像の残存事例のうち、免震装置等地震対策を行っている事例について確認するとともに、過去に行った振動台実験<sup>4)</sup>を参考に、台座と胴体の付け根となる部分を中心に観察を行った。損傷箇所もしくは既に修理された箇所を確認したうえで、どのような部分が「揺れに弱い」のかを確認した。

#### (2) 塑像模型の一軸振動台による加振実験

塑像模型を作成し、一軸振動台に載せて

加振実験を行った。本研究では、各部位に取り付ける加速度計と、高精度3次元変位計測システムを用いて、まずは固有周期および振幅変化による固有周期の変化について求めるとともに、実際の地震動を再現した状況で、転倒の有無、詳細な揺れ方について確認を行った。

#### (3) 実験結果と個別要素法による数値解析結果の比較による考察

本研究で行う塑像の加振実験結果に乾漆像の結果<sup>4)</sup>を加えて、実験で得られた固有周期、各部位の変位などのコンピュータ上での再現を試みた。アルゴリズムは、最近木造建築の倒壊解析でも用いられている<sup>5)</sup>個別要素法を用いた。

### 4. 研究成果

#### (1) 塑像や乾漆像の残存事例調査による残存状況や損傷個所の類型化

本研究で対象とする塑造立像は類例が少ない<sup>6)</sup>。その少ない塑像残存事例のうち免震装置上の設置など地震対策を行っているものは2011年に法華堂修理に伴い東大寺ミュージアム(免震構造)に移動した2例、大分県立歴史博物館への寄託にあたり免震装置を設計した1例のみであることが確認された。

塑像の損傷箇所の類型であるが、例えば17においては膝から下が欠失しており、免震装置も欠失部のサポートを兼ねたものとなっている(写真1)。その後、完存している塑像を実見したところ、多くの塑像で写真2に見られるとおおり、踵に縦方向のひび割れが生じていることを確認した。その結果から、塑像立像は乾漆造立像と同じく、台座からのびる心木が揺れた場合、台座と像本体の付け根となるかかと部分に応力が集中しやすいと考えられる。



写真1 塑像残欠の展示例



写真2 塑像立像に見られる亀裂(踵部)

## (2) 塑像模型の一軸振動台による加振実験

### 【概要】

塑造の仏像をモデルとした試験体を用いて、振動台実験を行い、塑像の場合での地震時の挙動及び転倒特性の把握を行った。また、既往の研究における成果(剛体角柱の転倒条件)が適応可能であるかの検討を行った。

### 【実験計画】

#### ・試験体概要

本実験では、東大寺戒壇堂に安置されている塑像を対象とする。しかし、試験体形状は、球・円錐柱・円柱からなる比較的単純なものとした。試験体形状は、実際の試験体との再現性を取っていないが、高さに関しては、東大寺戒壇堂に安置されている仏像の像高を 60%縮小した試験体としている。試験体高さ 103.2cm、総重量 62.7kg の試験体となっている。また、実物の塑像は台座まで粘土で覆われているが、今回の試験体の台座は板材のみとなっている。図 1 に試験体の概要を示す。19mm×19mm×773mm の角柱と 300mm×500mm×9mm の板材を用いて軸組みを製作し、軸組みに麻紐を巻いたのち、粘土を塗り重ねて製作を行なっている。また、土台は八角形である。

実験に用いた仏像底面と床面の材料および摩擦係数を表 1 に示す。表 1 に示す摩擦係数は、デジタルフォースゲージ (AD-4932-50N) のピーク値を測定する機能を用いて 5~7 回計測した荷重の平均値を試験片の質量で除した値を採用している。

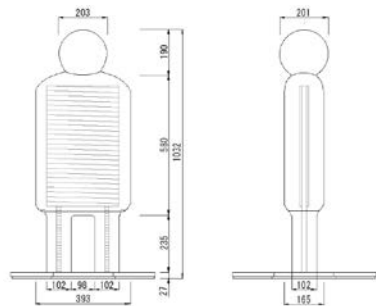


図 1 試験体概要

表 1 使用材料及び摩擦係数

床面	底面	摩擦係数 $\mu$
合板	合板	0.307

#### ・加振計画

本実験の加振には、三重大学構造実験室にある米国 MTS 社製水平一軸振動台(写真 4)を用いることとする。振動台には床材として、合板を設置した状態で加振を行なっている。

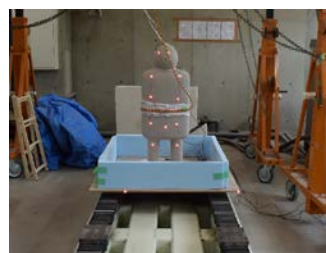


写真 4 水平一軸振動台と試験体設置状況

入力波には、調和正弦波、JMA-Kobe NS 波を用いている。調和正弦波については、変位一定とした場合、速度一定とした場合の二通りについて振動数を 0.2~2Hz まで変化させ加振を行なった。また、波の立ち上がり部分の過渡応答の影響を小さくするため、徐々に振幅を大きくし、定常状態で 20 秒間加振を行っている。JMA-Kobe NS 波については、縮小模型実験であること、振動台の性能限界から、振幅 20%、時間軸 50%に縮小している。JMA-Kobe NS 波については、縮小していない波形を示している。

### 【測定計画】

#### ・加速度計による計測

本実験では、株式会社東京測器研究所の小型低容量加速度計 ARF-50A を使用し、加速度の計測を行なった。サンプリング周波数は 100Hz に設定し計測を行った。

#### ・運動形態の記録

本実験では、転倒の有無、ひび割れの確認及び運動形態について記録を行った。さらに、全加振ケースについてビデオカメラによる撮影を実施した。

#### ・三次元画像計測

本実験の一部の加振ケースにおいて、三次元画像計測による変位測定を実施した。三次元画像計測は、試験体及び振動台に発光マーカー(LED)を設置し、加振時の発光マーカーの挙動を高感度カメラで多方向から撮影、記録を行ない、記録データの解析により各マーカーの初期座標値からの差を変位として算出し、試験体の動的挙動を正確に把握する計測手法である。



写真 4 計測マーカー設置状況 (左)



写真 5 高感度カメラ (右)



**【実験結果】**

本実験では、試験体足元に破損が見られたら、実験を終了するとし、実験を行なった。その結果、速度一定 22.5mm/s-1.0Hz 入力時に足の付け根に破損が生じたため、実験を終了とした。その後、デモンストレーションとして、JMA-Kobe NS 波を入力した後、実験を終了した。

三次元画像計測から得られた結果を用いて、それぞれの加振での変形モードを確認したところ、変位 2mm-0.8Hz の調和正弦波入力時において、足元と胴下で変形量が大きくなった。加振終了時にひび割れは確認されていないが、試験体内部でひび割れなどが起きたことで、結果に影響が出たのではないかと考える。

調和正弦波による実験結果を図 14 および表 9 に示す。本実験において、調和正弦波入力時において、速度一定 22.5mm/s-1.0Hz 時を除き、転倒限界加速度以下に結果が収まっており、転倒の危険はないことが確認された。速度一定 22.5mm/s-1.0Hz 時は転倒限界加速度の値を越えているが、表 9 に示すように回転角から考えると、静的限界回転角以内に収まっているため、転倒の危険はないと言える。表 9 の転倒限界回転角は、試験体前後方向(Bx/H=0.607)の静的な転倒限界時の回転角である。

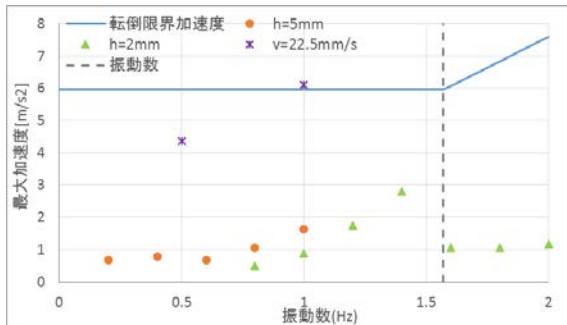


図 14 加振における最大加速度と転倒限界加速度

表 9 頭部および足元の最大回転角

調和正弦波				
頭部		足元		
変位5mm				
振動数	最大回転角		最大回転角	
Hz	rad	°	rad	°
0.2	-	-	-	-
0.4	0.0009	0.05	0.0033	0.19
0.6	-	-	-	-
0.8	0.0049	0.28	0.0051	0.29
1	0.0073	0.42	0.0073	0.42
変位2mm				
0.8	0.0016	0.09	0.0019	0.11
1.0	0.0056	0.32	0.0041	0.23
1.2	0.0091	0.52	0.0072	0.41
1.4	0.0167	0.96	0.0116	0.66
1.6	-	-	-	-
1.8	-	-	-	-
2.0	0.0055	0.32	0.0048	0.28
速度22.5mm/s				
0.5	0.0193	1.11	0.0126	0.72
1.0	0.0588	3.37	0.0391	2.24
転倒限界 回転角	0.5459	31.27	0.5459	31.27

また、全ての加振において、ロッキング振動は生じることはなく、転倒までに至らなかった。静的な転倒限界回転角は 31.27° であり、最大の回転角であっても 3.37° に留まっているため、転倒の危険はないことがいえる。

既往の転倒限界加速度と調和正弦波の比較を行うため、卓越振動数の設定を行う。波の卓越振動数を表す一つの指標である最大加速度値  $A_{max}$  と最大速度値  $V_{max}$  から(4)式により算出される等価振動数  $F_e$  を用いることとする。

$$F_e = \frac{A_{max}}{2\pi V_{max}} \quad (4)$$

等価振動数を用いて転倒限界加速度との比較を行った結果を図 18 に示す。全てが転倒限界加速度を超えない結果となっており、転倒の可能性はないことがわかる。

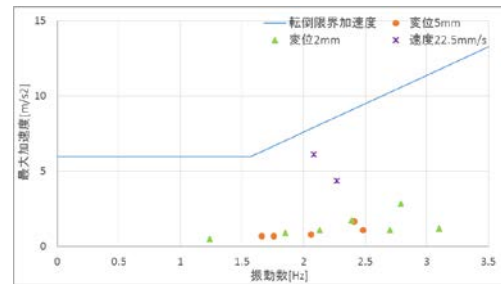


図 18 転倒限界加速度と等価振動数における最大加速度

**【まとめ】**

本実験により、転倒限界加速度以上の実験結果は確認されなかったため、転落・衝突などのような転倒確率を著しく上げる要因がない限り、今回の入力波において、転倒の危険はないことが確認された。この結果より、既往の転倒限界は安全側に設定されており、適応可能であると言える。また試験体の B/H より、静的限界回転角の算出を行い、今回の実験結果から得られた最大回転角との比較を行ったが、全ての結果が静的限界回転角の範囲内に収まる結果となった。これらの結果より、形状係数に大きな違いがなければ、転倒する可能性は低いと推測できる。しかし危惧しなければならぬ要因としては、加振によって足元に負荷がかかり、足元が破損することが推測される。

**(3) 実験結果と個別要素法による数値解析結果の比較による考察**

本研究で行う塑像の加振実験結果に乾漆像の結果を加えて、実験で得られた固有周期、各部位の変位などのコンピューター上での再現を試みた。アルゴリズムは、最近木造建築の倒壊解析でも用いられている、

独立行政法人建築研究所が開発した個別要素法数値解析ソフトウェア wallstat ver3.0.0<sup>8,9)</sup>を用いて、拡張個別要素法 (EDEM) に基づいたシミュレーションを行った。解析対象としては、脱活乾漆造の仏像と塑造の仏像とし、それぞれ仏像の骨組みを参考として、解析モデルを作成した。その後、振動台実験結果とシミュレーション結果の比較を行い、EDEM に基づいた解析手法が仏像の解析を行うのに有効な手法であるかの検討を行った。

#### 【解析対象モデル】

##### ・脱活乾漆像

振動台実験が行われた実物大模型と同様の仏像(持国天立像)の骨組みをモデルとして用いる。総高 350.4cm、床面の形状についての条件は、実物の仏像と等価となるようにモデルを作成する。モデル各節点の重量に関しても、仏像の総重量 231.5kg となるように、節点重量を計算し、重量分配を行なっている。また、モデルの各節点間は軸組バネで繋いでおり、最大曲げモーメント達しない限りは、接合部は固定されている。バネのパラメータとしては、仏像の骨組みに用いられている木材(ベイマツ)のヤング係数 11.8kN/mm<sup>2</sup>を用いている。図 19 に仏像の骨組み及び解析モデルを示す。

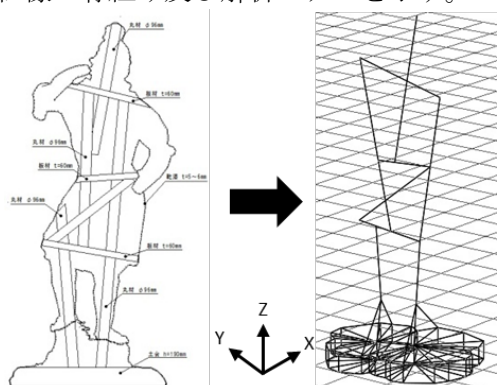


図 19 仏像骨組みおよび解析モデル

##### ・塑像

振動台実験が行われた縮小模型の骨組みをモデルとし、総高 103.2cm、床面の形状についての条件は、試験体と等価となるようにモデルを作成する。モデル各節点の重量に関しても、試験体の総重量 62.7kg となるように、節点重量を計算し、重量分配を行なっている。また、モデルの各節点間は軸組バネで繋いでおり、最大曲げモーメント達しない限りは、接合部は固定されている。バネのパラメータとしては、仏像の試験体に用いられている粘土のヤング係数 0.61kN/mm<sup>2</sup>を用いている。

#### 【解析方法】

解析条件として、固有振動数、静止摩擦係数、動摩擦係数、弾性剛性、減衰定数を

設定し、地震動を入力する。固有振動数は、振動台実験から算出したもの、静止摩擦係数、動摩擦係数については、振動台実験を実施した際に実験を実施し、算定された値をそれぞれ用いる。弾性剛性、粘性減衰については、振動台実験の際は固い床である振動台の上に、合板による簡易的な床を作成し、その上に試験体を載せて実験を行なった。そのため、今回は地盤とモデル床面の跳ね返りがあるということ仮定し、設定を行なった。入力地震動には、脱活乾漆像の場合は、JMA-Kobe NS 波(1029gal)、K-NET 小千谷 EW 波(1357gal)、JR 鷹取(1134gal)を使用し、塑像の場合は調和正弦波 速度一定 22.5mm/s-1.0Hz を使用した。表 14 に脱活乾漆像、塑像それぞれの解析条件を示す。

表 14 解析条件 (台座と床の間)

	脱活乾漆像	塑像
固有振動数[Hz]	2.8	1.4
静止摩擦係数	0.8	0.36
動摩擦係数	0.73	0.31
弾性剛性[kN/m]	100000	100000
粘性減衰	0.005	0.01

#### 【解析結果】

##### ・脱活乾漆像

振動台実験結果 10) と解析結果の回転角の比較を表 15 に示す。また加振前後の移動量について、表 16 に示す。解析結果として、本軀の回転角 R1、底面の回転角 R2、変形角 D は実験結果の 50% 程度の結果となった。また、頭部の変形量についても相違が出る結果となった。次に、加振前後の移動量について比較を行なった結果、実験結果に対して、解析結果の方が移動しており、相違が出る結果となったが、移動方向は同じ結果となった。さらに、弾性応答及び残留変形について考えると、実験結果・解析結果ともに弾性応答は起こっており、また実験結果・解析結果ともに残留変形はないということが確認されたため、再現性が図れている。今回の解析では接合部を剛接として行なっているが、実際は接合部の影響があると考えられるため、今後の解析において接合部の影響を考慮したモデルの設定を行なう必要性が考えられる。

表 15 回転角の比較 (乾漆像)

		実験結果	解析結果
JMA-Kobe NS波(1029gal)			
最大回転角R <sub>1</sub>	[°]	3.03	1.48
最大回転角R <sub>2</sub>		2.39	0.74
最大変形角D		1.09	0.75
最大変位δ <sub>max</sub>	[mm]	66.9	45.8
K-NET 小千谷 EW波(1357gal)			
最大回転角R <sub>1</sub>	[°]	9.66	4.27
最大回転角R <sub>2</sub>		8.09	4.22
最大変形角D		2.70	1.78
最大変位δ <sub>max</sub>	[mm]	165.1	108.9
JR鷹取(1134gal)			
最大回転角R <sub>1</sub>	[°]	15.48	9.13
最大回転角R <sub>2</sub>		14.94	6.95
最大変形角D		3.17	2.59
最大変位δ <sub>max</sub>	[mm]	193.9	158.4

表 16 加振前後の移動量の比較

		実験結果	解析結果
JMA-Kobe NS波			
移動量X(①)	[mm]	-6	-276
移動量Y(②)		55	170
K-NET 小千谷 EW波			
移動量X(①)	[mm]	-11	-605
移動量Y(②)		37	393
JR鷹取			
移動量X(①)	[mm]	-280	-472
移動量Y(②)		254	338

・塑像

本鉢の回転角 R1、変形角 D、最大変位 δ max は実験結果と比較し、概ね一致する結果となったが、底面の回転角 R2 は実験結果と相違が出る結果となった。この要因として、底面と振動台間の跳ね返りが大きいことが考えられるため、課題点として解析条件において、弾性剛性を小さくすることやパラメータ設定において、ヤング係数の設定を見直すことが必要ではないかと考える。

次に、弾性応答及び残留変形について考えると、実験結果・解析結果ともに弾性応答は起こっていることが確認された。また、残留変形に関しては、実験結果では、残留変形はなかったが、解析結果では残留変形が出る結果となったため、相違が出た。相違が出た要因としては、底面の回転角 R2 の値が大きく出たことや解析モデルの足元の剛性が小さいために変形が起こったと考えられるため、モデルの改良をする必要があると考える。

【まとめ】

実験結果とそれぞれ比較を行なった結果、回転角については、塑像は概ね一致する結果となった。しかし、台座の回転角が出たことや残留変形が起こったことから、更なる検討は必要である。また、脱活乾漆像については、接合部を剛接であると仮定して解析を行なったが、実際は接合部の影響があったために回転角の結果に相違が出たの

ではないかと考える。そのため、今後の解析においては、接合部の影響を考慮に入れたモデルの設定が必要であると考え。解析手法の有効性を考えるには、解析モデルの見直しやパラメータ設定の見直しが今後の課題点として挙げられる。今回の解析において、解析モデルの設定や解析条件としてのパラメータ設定を適切に行なうことが出来れば、拡張個別要素法(EDM)に基づいた解析手法は、仏像の解析を行なうための有効な手段となると考える。

<引用文献>

- 1) 中野照夫ら:美術工芸品等の防災に関する調査研究 平成7・8年度科学研究費補助金(基盤研究(A)1)研究成果報告書(1997)
- 2) 森井順之、運天弘樹、藤田悠貴、久世めぐみ、花里利一:彫刻作品の地震時転倒確率の簡易予測に関する研究, 日本文化財科学会第29回大会研究発表要旨集, pp.288-289, 2012
- 3) 藤田悠貴、森井順之、大村真理子、花里利一:仏像の耐震対策に関する研究—縮小模型を用いた振動台実験—, 『日本建築学会2011年度大会(関東)学術講演梗概集B-2(構造Ⅱ)』, pp.419-420, 2011
- 4) 藤田悠貴、森井順之、花里利一、新津靖、御子柴正、今井弘:仏像の耐震対策に関する研究 実物大模型を用いた振動台実験, 『日本建築学会大会学術講演梗概集』B-2分冊, pp.1031-1032, 2012
- 5) 中川貴文、佐藤弘美、多幾山法子、腰原幹雄、林康裕:2007年能登半島地震における木造住宅の被害の再現, 日本建築学会構造系論文集, 78-688, pp.1113-1122, 2013
- 6) 西川杏太郎:「塑像」, 『日本の美術』, No.255, 93p, 至文堂, 1989

5. 主な発表論文等

[学会発表] (計1件)

- ① 安井佑佳、森井順之、中川貴文、花里利一:仏像の耐震対策に関する研究 EDMを用いた実物大実験の解析、2015年度日本建築学会大会学術講演会、東海大学、2015.9.4

6. 研究組織

(1) 研究代表者

森井 順之 (Morii, Masayuki)

独立行政法人国立文化財機構東京文化財研究所・保存科学研究センター・主任研究員

研究者番号: 30342942