

# 卡固件固定馆藏文物的抗震效果及优化设计研究

王 萌<sup>1</sup>, 李孟青<sup>1</sup>, 葛家琪<sup>2</sup>, 马伯涛<sup>2</sup>, 杨维国<sup>1</sup>

(1. 北京交通大学土木建筑工程学院建工系, 北京 100044; 2. 中国航空规划设计研究总院有限公司, 北京 100120)

**摘要:** 为评估博物馆中最常用的卡固件措施对馆藏文物的抗震固定效果并对此措施进行优化设计, 开展较大尺寸、不同体型的典型地震易损文物复制品(瓷器梅瓶)-固定措施抗震系统在不同工况下的振动台试验, 获得影响文物复制品运动状态的关键体型参数, 并探讨采用独立卡固件固定较大尺寸文物的抗震有效性。基于试验结果, 建立文物-固定措施抗震系统数值预测方法, 开展关键影响因素的参数分析, 获得地震作用下能够有效固定不同体型文物所需的最小卡固件尺寸, 为兼顾安全性及最小干预原则的固定措施优化设计提供必要依据。结果表明: 相比圆柱卡固件, 随形卡固件可以有效固定更大尺寸的文物; 对于重心位置较高的不均匀分布体型文物, 高度、轮廓宽度、底面直径(面积)会显著影响其动力响应与相互作用行为, 轮廓宽度/底面直径以及高度/底面直径越大摇摆响应越明显; 为保证文物安全, 建议卡固件与文物间安装缝隙不大于 2 mm; 在缝隙中填充橡胶垫及硅胶垫可使文物与卡固件间相互作用力降低 60%~70%, 有效防止文物受到局部损害; 当文物体型超过一定限值时, 独立卡固件不再适用, 建议采取卡固件+鱼线组合固定措施; 采用圆柱卡固件固定后与纯浮放状态相比摇摆响应增加的文物, 宜采用随形卡固件或组合固定措施。

**关键词:** 抗震效果; 馆藏文物; 卡固件; 试验研究; 优化设计

**中图分类号:** TU352.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-4523(2023)05-1356-15

**DOI:** 10.16385/j.cnki.issn.1004-4523.2023.05.020

## 1 概 述

馆藏文物在强烈地震作用下会遭受损坏, 造成不可估量的损失, 这引起了文物保护和防震技术人员的高度重视<sup>[1-3]</sup>。中国“十四五”规划纲要对“加强文物保护研究利用”提出了明确要求。因此, 基于国家文物预防性保护事业高质量发展的迫切需求, 开展馆藏文物防震措施研究十分必要。调研国内馆藏文物放置现状可知, 传统抗震固定措施仍被广泛应用于文物预防性保护中<sup>[4-8]</sup>。由于卡固件具有力学性能良好、构造简单、安装方便等优势, 是最常用的文物固定措施之一<sup>[9-13]</sup>。近年来, 已有学者对采取卡固件固定的文物动力响应开展了振动台试验研究<sup>[10-11, 14]</sup>, 结果表明: 卡固件固定措施能够有效降低文物的动力响应。

然而, 已有试验研究的试件均为尺寸较小、质量较轻的文物复制品, 但通过博物馆实际调研可知, 大量较大尺寸、体型易损的文物仍采用独立卡固件固定, 同时卡固件尺寸很小, 如图 1 所示, 急需对其抗震固定效果进行评估。此外, 在实际布展中, 卡固件

的形状、尺寸选择主要依托经验, 对卡固件有效固定文物的体型范围并未有研究, 故目前卡固件固定措施无法实现对馆藏文物精准防护, 同时如何选择文物最恰当的固定措施也缺乏依据。因此, 迫切需要对较大尺寸文物采用独立卡固件固定后的抗震效果以及有效固定不同体型文物所需的最小卡固件尺寸进行深入研究。

为实现上述目标, 将建筑结构防震理念应用于馆藏文物的预防性保护之中, 选取较大尺寸、不同体型的多种典型地震易损文物复制品(瓷器梅瓶)为研究对象, 开展文物复制品-卡固件措施抗震固定系统振动台试验, 获得影响文物地震响应及运动状态的关键体型参数、文物复制品与卡固件相互作用规律, 检验采用独立卡固件对较大尺寸、不同体型文物的抗震固定效果。同时, 基于试验结果, 利用经过试验验证的数值预测方法, 开展卡固件与文物间安装缝隙对动力响应的影响研究, 获得有效固定不同体型文物所需的最小卡固件尺寸, 为兼顾安全性及最小干预原则的固定措施优化设计提供必要依据, 为博物馆布展设计提供有效的科学建议与优化方案。

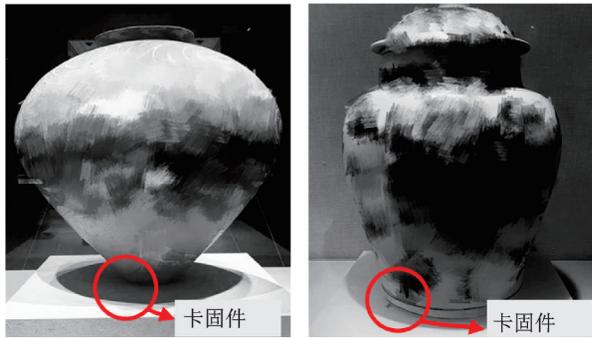


图 1 某博物馆中用卡固件措施固定文物

Fig.1 Fixing cultural relics with fasteners measures in a certain museum

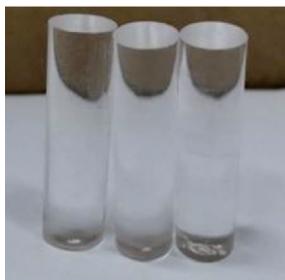
## 2 卡固件固定馆藏文物复制品振动台试验

### 2.1 试验模型

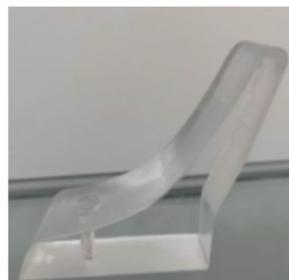
根据博物馆实际调研,综合考虑材质易损和体型易损,选取 3 种不同高度较大尺寸的典型地震易损文物复制品(瓷器梅瓶),如图 2(a)所示,几何参数如表 1 和 2 所示。固定措施分别选用圆柱、随形亚克力卡固件,如图 2(b)~(c)所示,卡固件直径或厚度采用博物馆中最常用的尺寸,如表 3 所示。



(a) 三种文物复制品  
(a) Replicas of three kinds of cultural relics



(b) 圆柱卡固件  
(b) Cylindrical fastener



(c) 随形卡固件  
(c) Conformal fastener

图 2 文物复制品与卡固件

Fig.2 Cultural relics replicas and fasteners

表 1 文物复制品几何参数

Tab. 1 Geometrical parameters of cultural relics replicas

编号	高度/ mm	底面直 径/mm	轮廓宽 度/mm	高度/轮 廓宽度	轮廓宽 度/底面 直径	高度/底 面直径
1	390	86	160	2.44	1.86	4.53
2	490	160	200	2.45	1.25	3.06
3	620	200	280	2.21	1.40	3.10

表 2 文物复制品质量、密度及质心

Tab. 2 Mass, density and barycenter of cultural relics replicas

编号	质量/kg	密度/ ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	质心高度/mm
1	1.98	2600	215
2	3.54	2650	238
3	11.60	2670	330

表 3 卡固件参数说明

Tab. 3 Parameters description of fasteners

卡固件类型	尺寸
圆柱形	直径为 10 mm, 高度为 10, 20, 30, 50 mm
随形	厚度为 10 mm, 高度为 20, 30 mm

### 2.2 试验仪器设备

试验在北京交通大学土木工程实验中心进行,试验设备包括水平地震模拟振动台、朗斯加速度传感器、东方所 COINV 采集仪、松下激光位移传感器、拉力计(量程 50 N)、亚克力陈列台座、木块支架、小型龙门架、鱼线、热熔胶枪等,部分设备如图 3 所示,主要技术性能参数如表 4 所示。

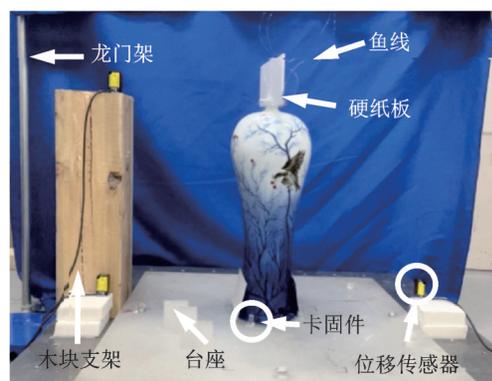


图 3 试验设备

Fig. 3 Test equipments

### 2.3 测试内容及测量方案

中国《馆藏文物防震规范》(WW/T 0069—2015)<sup>[15]</sup>中的性能目标要求在罕遇地震作用下文物不倾覆、仅发生有限滑移(不发生碰撞)并且不损坏。

表4 主要试验设备性能参数

Tab. 4 Performance parameters of main test equipments

试验设备	性能参数
水平地震模拟振动台	文物-展柜系统振动台,台面尺寸为1 m×1 m。系统的位移精度为0.02 mm,运动范围为±150 mm。空载时加速度最大为2g,满载时加速度最大为1g
朗斯加速度传感器	型号为WA0119T,灵敏度为5000 mV/g,量程为±10g,质量为12 g
松下激光位移传感器	型号为HG-C1400,量程为400 mm,精度为0.3 mm,测量中心距离和测量范围为400±200 mm

测量内容主要包括文物复制品的顶部转角和底部滑移、地震波台面加速度、台面摩擦系数。

为准确测量文物顶部位移,在瓶顶架设一白色轻质硬板,在距离硬板400 mm处布置激光位移传感器(保证可测出文物倾覆前±20°范围),激光照射方向垂直于白色硬板中心点,如图3所示。为测量底部滑移,在瓶底左右两侧对称布置硬纸板,在距离硬板400 mm处布置相同高度的激光位移传感器,如图3所示。摇摆转角及滑移具体计算方法如图4所示。

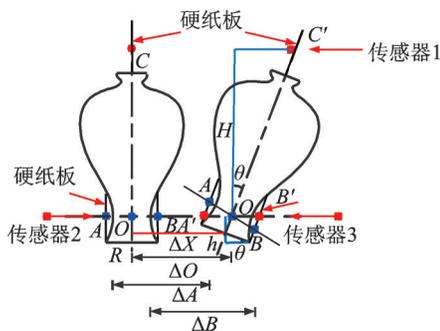


图4 摇摆转角及滑移计算方法

Fig. 4 Calculation method of swing rotation angle and slip

硬纸板顶部与底部测点的垂直高度为 $H$ ,底部两侧测点距文物底部垂直高度为 $h$ ,瓶底半径为 $R$ ,瓶底硬纸板两侧水平向位移分别为 $\Delta A$ 和 $\Delta B$ ,瓶顶硬纸板水平向位移为 $\Delta C$ ,转角为 $\theta$ ,底部滑移为 $\Delta X$ 。推导转角及滑移关系如下式所示:

$$\theta = \arctan \left[ \left( \Delta C - \frac{\Delta A - \Delta B}{2} \right) / H \right] \quad (1)$$

$$\Delta X = \frac{\Delta A - \Delta B}{2} - (h - R \sin \theta) \tan \theta \quad (2)$$

每种地震波输入时需将加速度传感器设置在亚克力台面上,分别采集对应的台面波加速度时程曲线,作为后续有限元模拟地震输入。用拉力计对3种文物复制品与亚克力台面间的摩擦系数进行测定,分别进行5次测量并取平均值,用于后续有限元模拟参数输入。最终摩擦系数取值如表5所示。

#### 2.4 地震波的选择及试验工况

以某抗震设防烈度为8度地区的博物馆为原型

表5 摩擦系数测量均值

Tab. 5 Measured mean of friction coefficient

试件编号	摩擦系数
1	0.339
2	0.320
3	0.319

(设计地震分组为第二组,场地类别为Ⅱ类),根据《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)<sup>[16]</sup>中选波的基本原则,按照距离、场地、震源类型等,从地震记录库中选取了7条实际监测适合结构场地的地震波,以NO.1~NO.7作为其代号,生成地震反应谱。用地震反应谱均值与博物馆场地信息生成的目标反应谱进行对比,如图5所示,可看出曲线基本吻合,说明选波基本合理可行。在现场试验中由于振动台3个方向最大位移参数限制,选取NO.1~NO.3作为输入波,截取作用时间为前20 s。地震加速度峰值调幅分别按照多遇、设防及罕遇要求,分别为0.07g,0.2g和0.4g( $g=9.8 \text{ m/s}^2$ )。为检验在更强烈地震作用下卡固件对馆藏文物的固定效果,增加了抗震设防烈度9度地区的罕遇地震峰值加速度0.62g,作为8度地区的极罕遇地震峰值加速度,详见表6。

为分析不同地震波类型及强度、不同卡固件类型及尺寸对不同体型文物复制品运动状态与地震响应的影响,具体试验工况如表7所示。

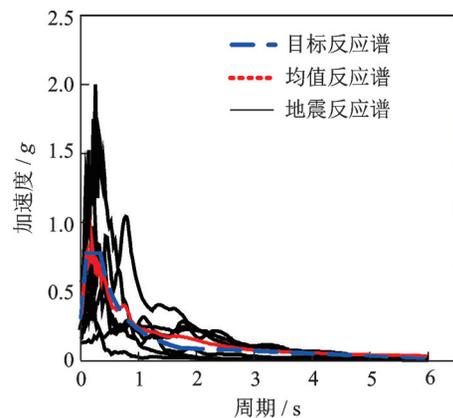


图5 地震反应谱、均值反应谱及目标反应谱

Fig. 5 Earthquake response spectrum, mean response spectrum and target response spectrum

表 6 地震波参数说明

Tab. 6 Parameters description of seismic waves

编号	地震波名称	震级	原始加速度峰值/g	调幅后加速度峰值/g
NO.1	Hollister	5.60	0.191	
NO.2	Northridge	6.69	0.557	
NO.3	Imperial Valley-05	5.40	0.044	
NO.4	El Centrol	7.10	0.034	0.07,0.2,0.4,0.62
NO.5	Taft	7.40	0.018	
NO.6	Humbolt Bay	5.80	0.035	
NO.7	San Fernando	6.61	0.074	

表 7 试验工况说明

Tab. 7 Description of test conditions

文物复制品	加速度峰值/g	地震波类型	卡固件类型
高 390 mm 梅瓶	0.4,0.62	NO.1,NO.2,NO.3	圆柱卡固件高 10,20,30,50 mm;随形卡固件高 20,30 mm
高 490 mm 梅瓶			
高 620 mm 梅瓶	0.07,0.2,0.4,0.62		

### 3 试验结果及分析

根据《馆藏文物防震规范》(WW/T 0069—2015)<sup>[15]</sup>对文物复制品进行浮放状态(不加卡固件固定措施)抗倾覆性验算,如下式所示:

$$a_{h0} \leq \frac{g}{k_0(h/b)} \quad (3)$$

式中  $a_{h0}$  为浮置物体水平地震加速度最大值; $g$  为重力加速度; $k_0$  为抗倾覆安全系数; $h/b$  为浮置物体的高宽比。文中  $g$  取  $9800 \text{ mm/s}^2$ ,  $k_0$  取 1.6,  $h/b$  按表 1 和 2 选取,  $h$  为 2 倍质心高度。

求得高 390 mm 梅瓶在峰值加速度大于  $0.13g$  时,高 490 mm 梅瓶在峰值加速度大于  $0.21g$  时,高 620 mm 梅瓶在峰值加速度大于  $0.19g$  时发生倾覆,故需要对文物施加抗震固定措施,防止文物在地震作用下发生倾覆损坏。

限于篇幅,以 NO.2 地震波、 $0.62g$  峰值加速度作用工况为例,3 种文物复制品在圆柱、随形卡固件固定下的摇摆运动状态如图 6 所示。由于卡固件固定下测量文物的底部滑移是由转动引起,故文中仅给出文物的转角时程曲线,如图 7 所示。3 条地震波作用下文物转角及底部滑移响应峰值如表 8 和 9 所示,滑移值为倾覆前的最大滑移量。

结合图 6 和 7、表 8 和 9 可知:

(1)对于高 390 mm 梅瓶,底面直径很小,高度/底面直径很大,重心高,在加速度峰值为  $0.4g$  工况下,圆柱卡固件固定下发生剧烈摇摆现象,甚至倾覆(10~20 mm 卡固件固定时);在随形卡固件固定下,摇摆减小,无倾覆现象。在加速度峰值为  $0.62g$  工

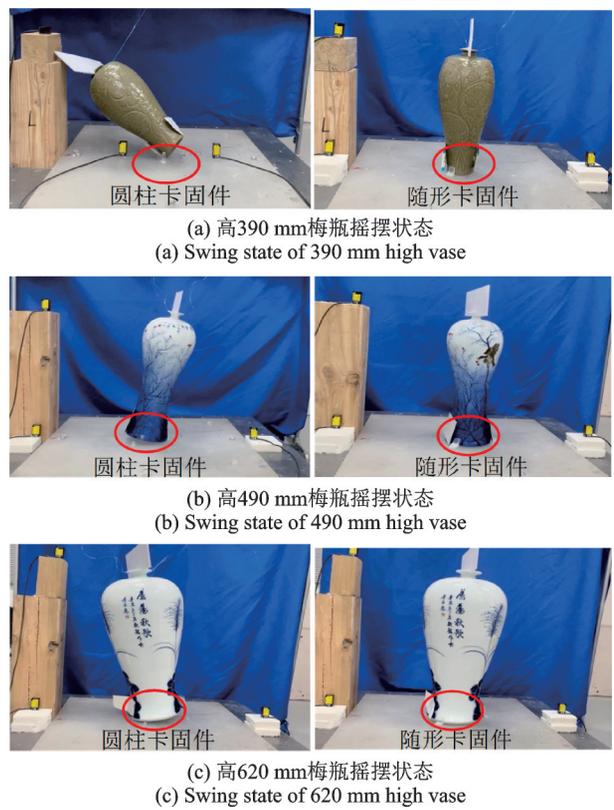


图 6 不同文物复制品摇摆状态  
Fig. 6 Swing states of different cultural relics replicas

况下,圆柱卡固件固定下,文物复制品基本全部在地震波峰值处发生倾覆;即使采用随形卡固件固定,文物复制品摇摆现象也较为明显,当随形卡固件尺寸较小时在 NO.2 地震波作用下仍发生倾覆。

(2)对于高 490 mm 梅瓶,底面直径较大,轮廓宽度较小,轮廓宽度/底面直径以及高度/底面直径相对较小。在加速度峰值为  $0.4g$  工况下,圆柱卡固件固定下,仅在 10 mm 卡固件、NO.2 地震波作用下

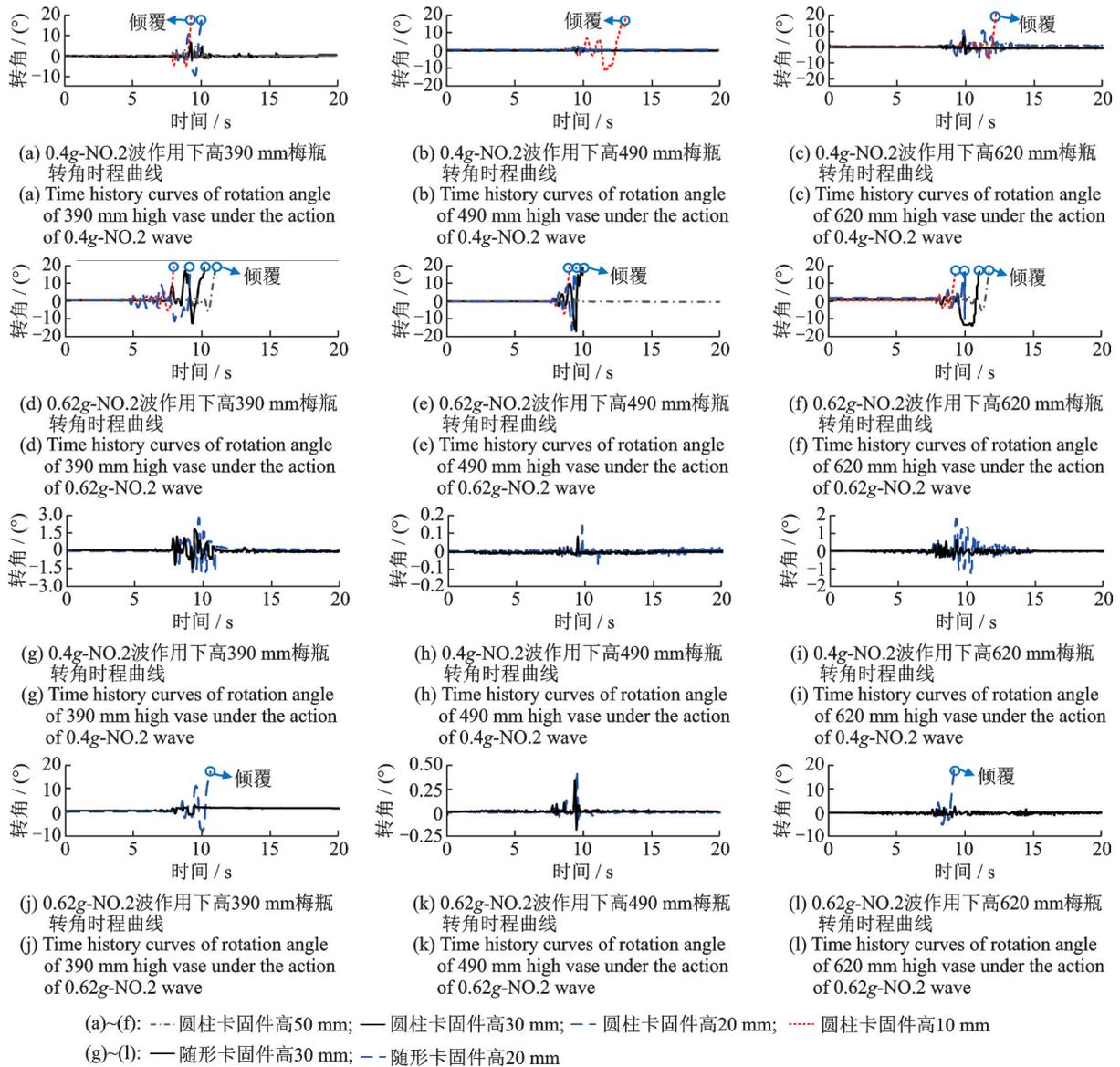


图7 卡固件固定下不同文物复制品的转角时程曲线

Fig. 7 Time history curves of rotation angle of different cultural relics replicas fixed by fasteners

出现倾覆;随形卡固件固定下,无明显摇晃现象。在加速度峰值为0.62g工况下,圆柱卡固件固定下摇摆响应较为剧烈,10~30 mm卡固件固定均发生倾覆;在随形卡固件固定下,只出现较小摇摆现象。

(3)对于高620 mm的梅瓶,尺寸最大,虽然底面直径最大,但轮廓宽度/底面直径较大,仍产生较大的动力响应。在加速度峰值为0.4g工况下,圆柱卡固件固定下,滑移与摇摆响应明显,在10 mm卡固件、NO.2地震波作用下出现倾覆;在随形卡固件固定下,无明显摇晃现象。在加速度峰值为0.62g工况下,圆柱卡固件固定下,在NO.1地震波下发生较大摇摆未倾覆,其余地震波激励下发生较长时间较大的摇摆响应,最后倾覆;在随形卡固件固定下,响应均明显减小,当随形卡固件尺寸较小时在NO.2地震波作用下仍发生倾覆。

为研究体型参数对文物复制品运动状态的影

响,对比文献[14]在相同试验工况下高294 mm梅瓶(高294 mm,底面直径82 mm,轮廓宽度145 mm,高度/底面直径为3.58,轮廓宽度/底面直径为1.77)在圆柱卡固件固定下的转角响应结果,4种不同体型文物复制品在3种地震波作用下的转角峰值规律如图8所示。

(1)随地震强度的增加,4种不同体型梅瓶的地震响应均显著增大,随着卡固件高度的增加而减小。圆柱卡固件固定工况下,随着卡固件高度增加,曲线斜率降低,说明当卡固件尺寸增加到一定程度,对文物的抗震固定作用提高有限。

(2)高度/轮廓宽度相似的文物,底面直径显著影响动力响应。底面直径越小,轮廓宽度/底面直径、高度/底面直径越大,文物的摇摆响应越为明显。高390 mm梅瓶与高490 mm梅瓶相比,具有相似的高度/轮廓宽度,因高390 mm的底面直径小,导致

表 8 文物复制品转角与底部滑移响应峰值点(一)

Tab. 8 Response peak points of rotation angle and bottom slip of cultural relics replicas (1)

编号	峰值 加速 度/g	圆柱卡固件高 10 mm						圆柱卡固件高 20 mm						圆柱卡固件高 30 mm					
		高 390 mm		高 490 mm		高 620 mm		高 390 mm		高 490 mm		高 620 mm		高 390 mm		高 490 mm		高 620 mm	
		转角/ (°)	滑移/ mm	转角/ (°)	滑移/ mm	转角/ (°)	滑移/ mm	转角/ (°)	滑移/ mm	转角/ (°)	滑移/ mm	转角/ (°)	滑移/ mm	转角/ (°)	滑移/ mm	转角/ (°)	滑移/ mm	转角/ (°)	滑移/ mm
NO. 1	0.07	—	—	—	—	0.017	0.018	—	—	—	—	0.015	0.011	—	—	—	—	0.012	0.008
	0.2	—	—	—	—	0.15	0.19	—	—	—	—	0.09	0.14	—	—	—	—	0.06	0.12
	0.4	倾覆	9.03	0.90	1.01	5.76	5.97	8.74	2.45	0.22	0.32	2.84	3.00	3.96	2.96	0.13	0.29	1.93	2.54
	0.62	倾覆	6.07	倾覆	60.32	倾覆	30.14	倾覆	9.45	6.78	2.36	倾覆	35.76	倾覆	10.21	1.71	1.79	5.03	2.92
NO. 2	0.07	—	—	—	—	0.065	0.112	—	—	—	—	0.036	0.045	—	—	—	—	0.025	0.036
	0.2	—	—	—	—	0.19	0.39	—	—	—	—	0.16	0.22	—	—	—	—	0.14	0.18
	0.4	倾覆	7.51	倾覆	30.51	倾覆	7.54	倾覆	7.60	2.32	4.14	6.51	2.01	7.97	2.89	1.86	1.78	3.92	2.83
	0.62	倾覆	11.95	倾覆	20.98	倾覆	14.73	倾覆	9.24	倾覆	60.72	倾覆	11.38	倾覆	10.36	倾覆	79.13	倾覆	17.34
NO. 3	0.07	—	—	—	—	0.050	0.064	—	—	—	—	0.028	0.018	—	—	—	—	0.023	0.013
	0.2	—	—	—	—	0.25	0.75	—	—	—	—	0.23	0.46	—	—	—	—	0.21	0.34
	0.4	倾覆	10.13	5.86	6.76	7.13	7.96	倾覆	5.18	1.38	2.86	4.11	6.74	9.63	5.86	0.94	1.32	2.16	3.22
	0.62	倾覆	6.32	倾覆	78.36	倾覆	18.07	倾覆	7.96	倾覆	38.35	倾覆	10.14	倾覆	14.68	10.05	7.32	倾覆	18.65

表 9 文物复制品转角与底部滑移响应峰值点(二)

Tab. 9 Response peak points of rotation angle and bottom slip of cultural relics replicas (2)

编号	峰值 加速 度/g	圆柱卡固件高 50 mm						随形卡固件高 20 mm						随形卡固件高 30 mm					
		高 390 mm		高 490 mm		高 620 mm		高 390 mm		高 490 mm		高 620 mm		高 390 mm		高 490 mm		高 620 mm	
		转角/ (°)	滑移/ mm	转角/ (°)	滑移/ mm	转角/ (°)	滑移/ mm	转角/ (°)	滑移/ mm	转角/ (°)	滑移/ mm	转角/ (°)	滑移/ mm	转角/ (°)	滑移/ mm	转角/ (°)	滑移/ mm	转角/ (°)	滑移/ mm
NO. 1	0.07	—	—	—	—	0.009	0.007	—	—	—	—	0.007	0.006	—	—	—	—	0.005	0.005
	0.2	—	—	—	—	0.05	0.07	—	—	—	—	0.02	0.04	—	—	—	—	0.008	0.03
	0.4	2.59	1.95	0.11	0.23	1.84	1.76	1.07	1.34	0.08	0.12	0.45	0.53	0.58	0.27	0.06	0.08	0.16	0.15
	0.62	9.88	7.18	0.75	0.75	4.25	3.66	2.52	2.97	0.42	0.50	1.94	2.34	1.76	2.83	0.36	0.34	1.37	1.96
NO. 2	0.07	—	—	—	—	0.018	0.032	—	—	—	—	0.009	0.010	—	—	—	—	0.005	0.008
	0.2	—	—	—	—	0.07	0.07	—	—	—	—	0.032	0.05	—	—	—	—	0.009	0.02
	0.4	6.95	4.77	0.78	1.54	3.04	1.76	2.92	2.50	0.13	0.56	1.89	1.13	1.69	1.73	0.07	0.23	0.57	0.87
	0.62	倾覆	18.90	1.18	1.56	倾覆	20.94	倾覆	10.34	0.42	0.78	倾覆	30.01	3.21	3.31	0.40	0.47	2.79	2.04
NO. 3	0.07	—	—	—	—	0.015	0.012	—	—	—	—	0.012	0.009	—	—	—	—	0.006	0.007
	0.2	—	—	—	—	0.09	0.17	—	—	—	—	0.03	0.09	—	—	—	—	0.02	0.05
	0.4	2.88	4.57	0.37	0.39	1.82	1.43	1.60	1.76	0.10	0.23	0.73	0.77	0.55	0.94	0.06	0.14	0.54	0.40
	0.62	倾覆	15.17	1.47	1.47	倾覆	20.97	3.68	3.08	1.39	1.20	2.35	2.34	2.34	2.56	0.44	0.38	1.77	1.89

其更易发生摇摆倾覆。

(3)高度/底面直径相似的文物,轮廓宽度影响动力响应。轮廓宽度越大,轮廓宽度/底面直径越大,文物的摇摆响应越明显。高 490 mm 梅瓶与高 620 mm 梅瓶相比,具有相似的高度/底面直径,由于高 620 mm 梅瓶较宽,轮廓宽度/底面直径较大,导致其易发生摇摆。同时对比 4 种文物,由于高 490 mm 梅瓶轮廓宽度/底面直径最小,则摇摆响应最小;反之,高 390 mm 梅瓶轮廓宽度/底面直径最大,则摇摆响应最大。

(4)轮廓宽度/底面直径相似的文物,高度影响

动力响应。高度越大,高度/底面直径越大,文物的摇摆响应越为明显。高 294 mm 梅瓶与高 390 mm 梅瓶相比,具有相似的轮廓宽度/底面直径,由于高 390 mm 梅瓶重心较高,高度/底面直径更大,导致其易发生摇摆倾覆。

(5)随形卡固件具有更好的固定效果,可显著降低文物的摇摆及滑移响应。20 mm 随形卡固件固定下,仅在 NO.2 波、0.62g 地震波下,高 390 mm 梅瓶与高 620 mm 的梅瓶发生倾覆;30 mm 随形卡固件固定下所有文物均未发生倾覆,也未出现较大的摇摆。20 mm 随形卡固件的固定效果优于 50 mm 圆

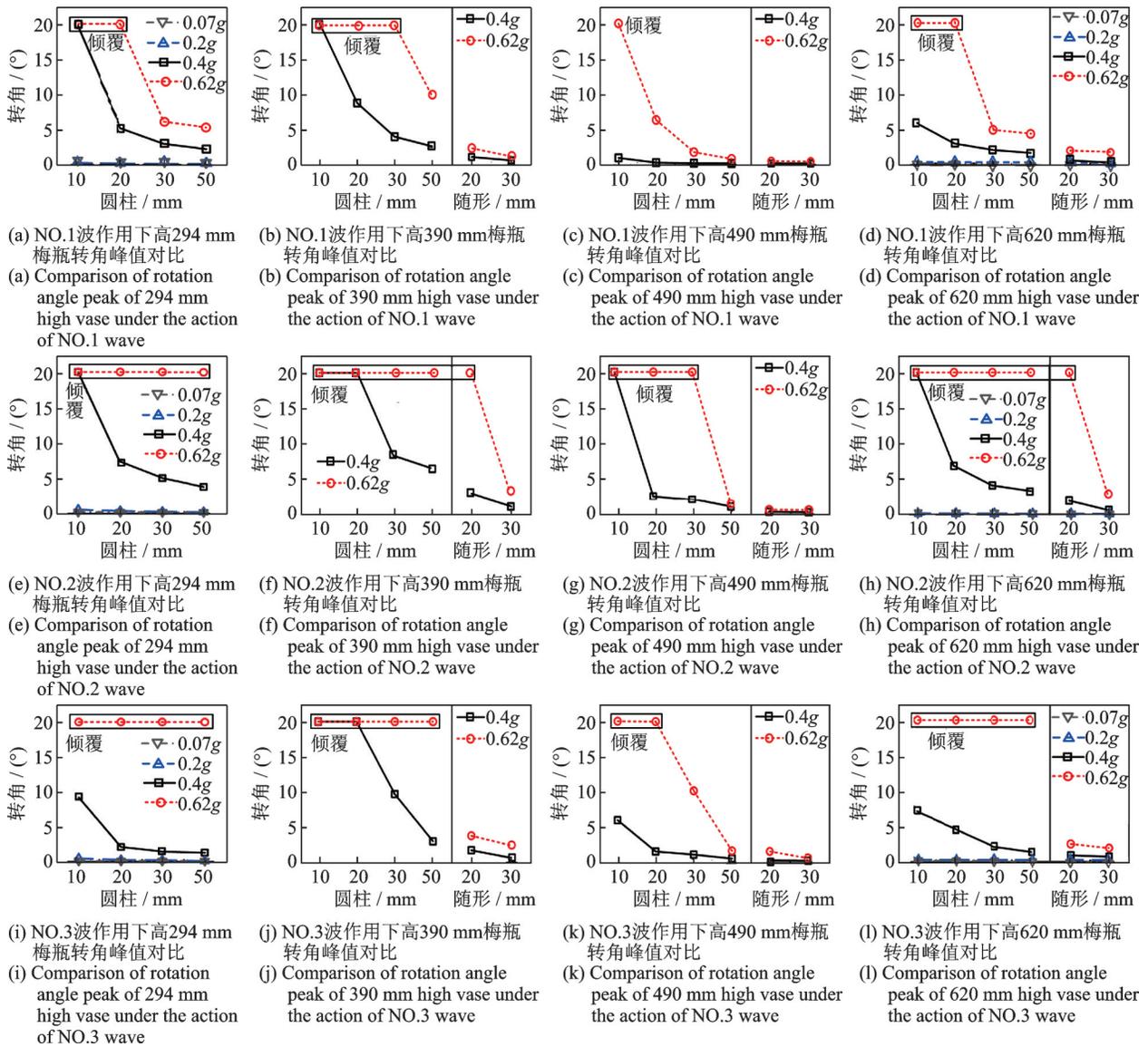


图8 不同文物复制品的转角峰值变化趋势曲线

Fig. 8 Changing trend curves of rotation angle peak of different cultural relics replicas

柱卡固件。

综上所述,对于重心位置较高的不均匀分布体型文物,高度、底面直径、轮廓宽度是影响其运动状态的关键体型参数。在独立卡固件固定下,高度/轮廓宽度对此类文物动力响应影响并不显著,轮廓宽度/底面直径以及高度/底面直径越大,摇摆响应越明显。

#### 4 有限元模型验证

为进一步开展参数分析,进行卡固件的优化设计,采用ABAQUS有限元软件建立1:1抗震系统数值分析模型。采用C3D8R单元模拟陈列台座、振动台及卡固件,采用S4R单元模拟文物复制品。按照试验中实际情况对文物复制品与台面之间、文物复制品与卡固件之间建立接触;3种文物复制品与陈

列台座的摩擦系数分别与试验测量值保持一致,切向方向为库仑摩擦,法向方向为硬摩擦,允许接触后分离。

利用上述NO.1~NO.3地震波作用下的试验结果进行验证,各个部件材料的力学性能参数如表10所示,系统数值模型如图9所示。代表性文物复制品倾覆或摇摆变形模拟如图10所示。

表10 材料的力学性能参数说明

Tab. 10 Parameters description of mechanical property of materials

材料名称	密度/( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	弹性模量/MPa	泊松比
瓷质文物 <sup>[17]</sup>	2600	160000	0.28
亚克力卡固件 <sup>[18]</sup>	1200	3000	0.38
亚克力台座 <sup>[18]</sup>	1200	3000	0.38
钢制振动台	7900	206000	0.25

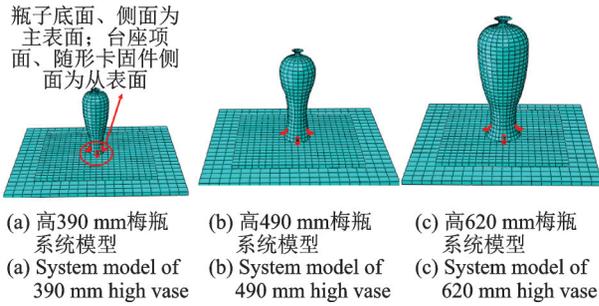


图9 文物复制品的系统模型

Fig. 9 System models of cultural relic replicas

以NO.2地震波作用为例,30 mm圆柱卡固件、随形卡固件固定下,加速度幅值为0.62g的3种梅瓶典型试验测量转角及数值预测转角对比如图11所示。两

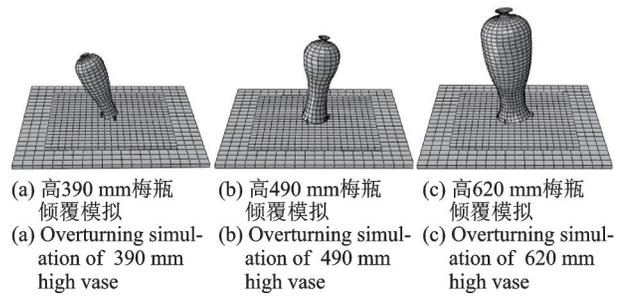


图10 文物复制品的运动状态模拟

Fig. 10 Simulation of motion states of cultural relics replicas

者峰值点的大小及出现时刻基本吻合,说明建立的数值模拟方法具有一定的有效性和可行性,为后续卡固件固定馆藏文物优化设计研究提供有利工具。

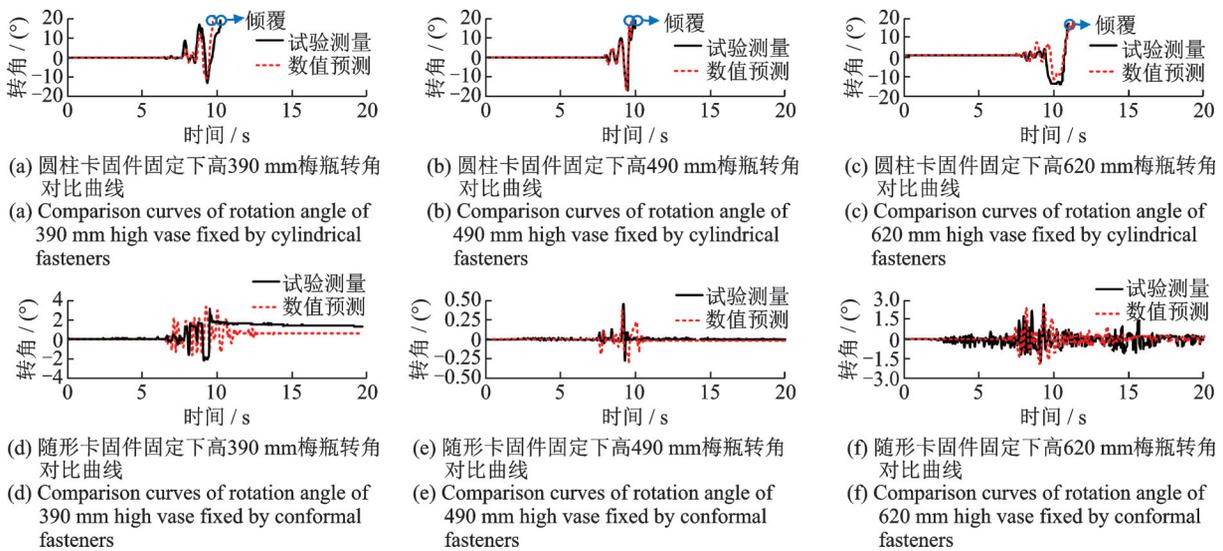


图11 不同文物复制品的试验结果与数值模拟对比曲线

Fig. 11 Comparison curves of experiment results and numerical simulation of different cultural relics replicas

### 5 卡固件固定馆藏文物优化设计研究

#### 5.1 卡固件与文物间安装缝隙及填充橡胶垫、硅胶垫等构造措施优化设计

采用常见卡固件固定馆藏文物时,除上述试验中已研究的卡固件形状、尺寸,关键参数还包括卡固件与文物间的安装缝隙及填充橡胶垫、硅胶垫等相关构造措施。博物馆实际布展时主要依托经验,无法保证卡固件与文物完全贴合,文物与卡固件之间常存在缝隙。在地震作用下会对文物运动状态产生不利影响,因此需要获得缝隙对文物运动状态的定量影响并提出优化建议。同时,提出在缝隙中填充橡胶垫、硅胶垫等构造措施,减小文物与卡固件之间的相互作用,降低局部损伤风险。

以典型的高30 mm圆柱卡固件、随形卡固件固定方式为例,为了比较不同缝隙值对较大体型文物

运动状态的影响,在采用前述3种文物复制品的基础上,增加了高700 mm和高800 mm梅瓶作为研究对象。采取的橡胶垫、硅胶垫层力学性能及建模方法参考文献[19]及[20]。典型卡固件固定文物的有限元模型如图12所示,具体工况如表11所示。

以高620 mm梅瓶在NO.2地震波作用下为例,

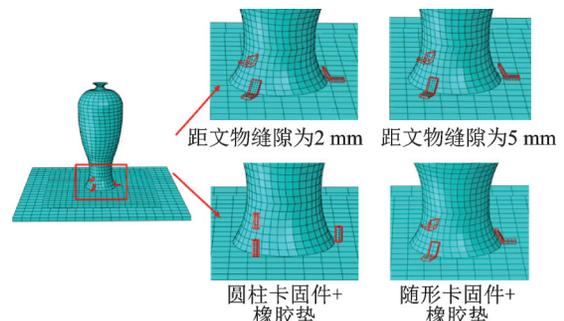


图12 高620 mm梅瓶在不同工况下的有限元模型

Fig. 12 Finite element models of 620 mm high vase under different working conditions

表 11 数值模拟工况  
Tab. 11 Numerical simulation conditions

文物类型	卡固件类型	影响参数	地震波类型	加速度峰值/g
高 390 mm 梅瓶	30 mm 圆柱; 30 mm 随形	卡固件距文物缝隙 0, 2, 5, 7, 10 mm; 无任何构造措施; 添加橡胶垫; 添加硅胶垫	NO.1~NO.7	0.62
高 490 mm 梅瓶				
高 620 mm 梅瓶				
高 700 mm 梅瓶				
高 800 mm 梅瓶				

根据数值分析结果得到缝隙-文物转角响应时程曲线及文物与卡固件间相互作用时程曲线,如图 13 所示。典型文物的转角、文物接触应力变化规律如图 14 所示。可得:随着卡固件与文物间缝隙增大,文物转角峰值逐渐增大,甚至倾覆,文物与卡固件间的相互作用逐渐减小;缝隙越小,文物与卡固件间的相互作用越大,但远远未达到文物与卡固件的破断应力<sup>[21-24]</sup>。当缝隙超过 2 mm,文物摇晃响应显著增加,故为保证文物安全,建议缝隙不大于 2 mm。

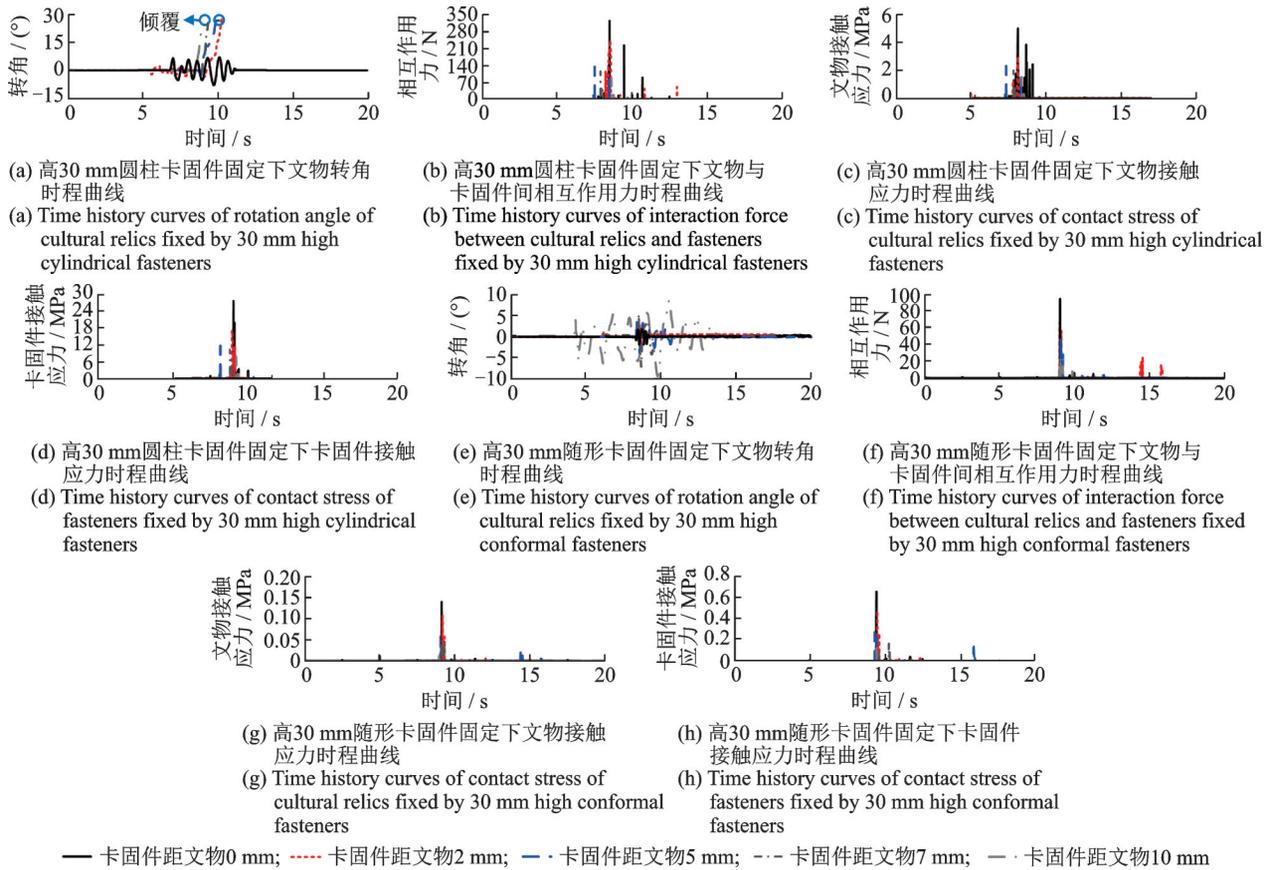


图 13 随着文物与卡固件间缝隙大小变化的文物动力响应及相互作用时程曲线

Fig. 13 Time history curves of dynamic responses and interaction of cultural relics with different gap sizes between cultural relics and fasteners

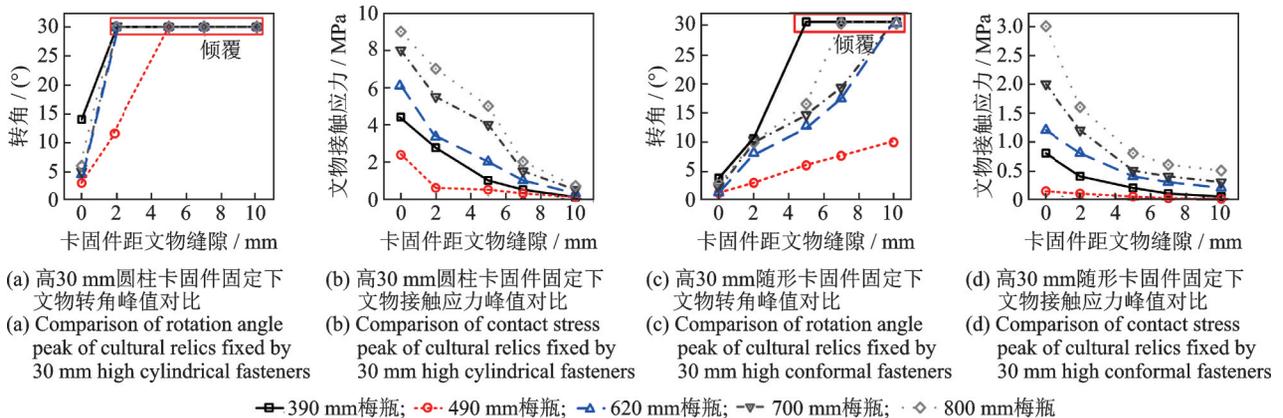


图 14 文物与卡固件间缝隙大小与文物转角及接触应力峰值的变化趋势曲线

Fig. 14 Changing trend curves of gap sizes between cultural relics and fasteners and rotation angle and contact stress peak of cultural relics

在文物与卡固件贴紧、2 mm 缝隙间填充橡胶垫、硅胶垫的工况下,文物与卡固件间相互作用峰值变化如表 12 所示。以高 620 mm 梅瓶在 NO.2 地震波作用下为例,得到有无构造措施-文物与卡固件间的相互作用时程曲线,如图 15 所示。可得:①填充橡胶垫、硅胶垫能有效降低文物所受接触应力、卡固

件所受接触应力以及两者间相互作用力,但与完全贴合工况相比,文物摇摆响应增加。②硅胶垫相比橡胶垫弹性模量更小,降低文物与卡固件相互作用的效果更显著。在缝隙中填充橡胶垫及硅胶垫可使文物与卡固件间相互作用力降低 60%~70%,有效防止文物受到局部损害。

表 12 有无构造措施工况下文物与卡固件间相互作用峰值

Tab. 12 Peak of interaction between cultural relics and fasteners with or without structural measures

计算结果类别	高 390 mm 梅瓶						高 490 mm 梅瓶						高 620 mm 梅瓶					
	圆柱卡固件			随形卡固件			圆柱卡固件			随形卡固件			圆柱卡固件			随形卡固件		
	高 30 mm	高 30 mm	高 30 mm	高 30 mm	高 30 mm	高 30 mm	高 30 mm	高 30 mm	高 30 mm	高 30 mm	高 30 mm	高 30 mm	高 30 mm	高 30 mm	高 30 mm	高 30 mm	高 30 mm	高 30 mm
卡固件接触应力/MPa	25.73	8.42	2.34	3.23	0.87	0.62	13.4	0.87	0.35	0.38	0.13	0.08	18.92	8.14	5.37	0.59	0.25	0.17
文物接触应力/MPa	4.36	1.37	0.86	0.94	0.14	0.05	7.1	0.15	0.09	0.19	0.07	0.04	3.48	2.02	1.25	0.11	0.06	0.04
相互作用力/N	110	34	28	45	15	13	105	40	31	52	20	11	223	84	36	91	32	26
相互作用力降低百分比/%	—	69.1	74.5	—	66.7	71.1	—	61.9	70.5	—	61.5	78.8	—	62.3	83.8	—	64.8	71.4

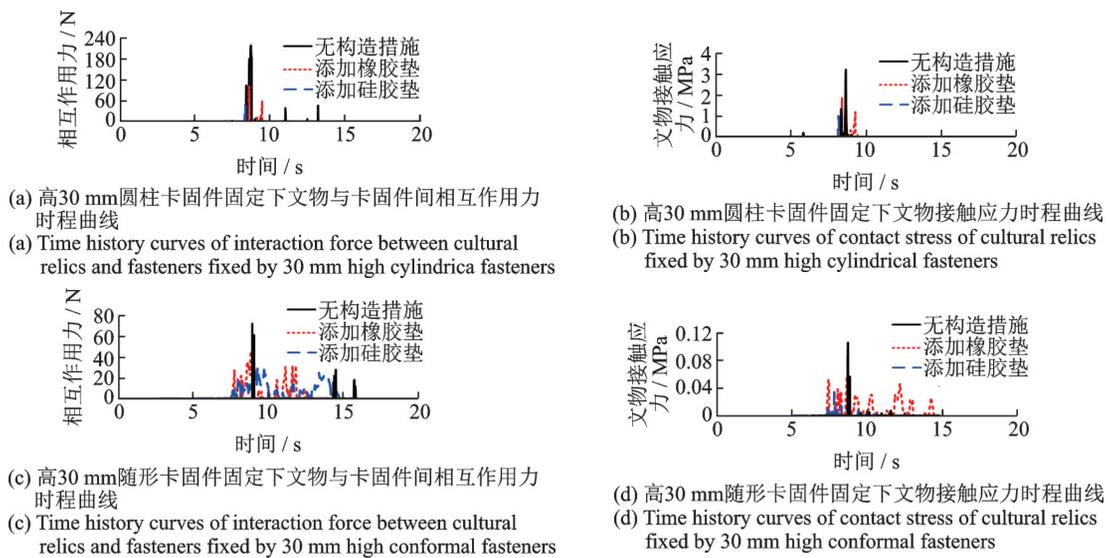


图 15 有无构造措施工况下文物与卡固件间相互作用时程曲线

Fig. 15 Time history curves of interaction between cultural relics and fasteners with or without structural measures

5.2 有效固定不同体型文物所需的最小卡固件尺寸

基于前述研究结果,影响无任何构造措施的文物-卡固件相互作用系统动力响应的关键参数包括:地震波种类、强度,卡固件尺寸、形式、缝隙,文物自身体型特征(重心位置、轮廓宽度、高度、底面直径等)。结合博物馆实际调研,梅瓶重心更高,地震作用下易发生倾覆,故以梅瓶体型为依托,模型尽可能包含不同体型参数的地震易损文物。根据 5.1 节的

分析结果,采取卡固件距文物的缝隙为 2 mm,获得的限值结果偏于保守。部分典型地震易损文物的数值模型如图 16 所示(x/y表示文物轮廓宽度/文物底面直径),工况说明如表 13 所示。

结合馆藏文物常见高度,选取文物高度为:300~800 mm。针对不同体型文物选取相适应的卡固件固定措施,根据文物是否倾覆、卡固件是否达到破断应力为失效判据<sup>[21-24]</sup>,获得有效固定不同体型

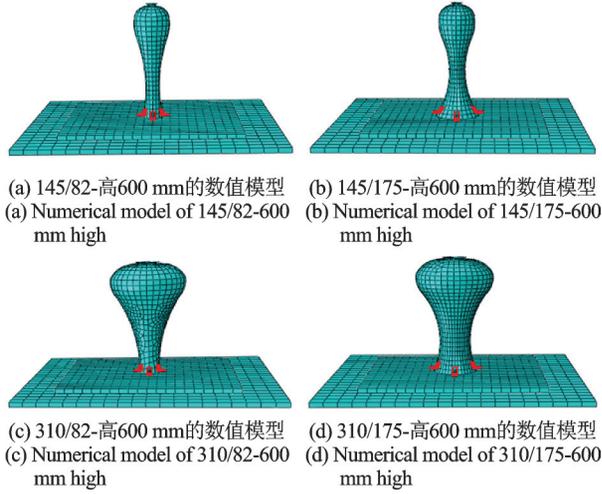


图 16 代表性体型文物的数值模型

Fig. 16 Numerical models of representative body-shaped cultural relics

表 13 数值模拟工况

Tab. 13 Numerical simulation conditions

文物底面直径/mm	文物轮廓宽度/mm	文物高度/mm	地震波类型	加速度峰值/g
82				
113	145, 200,	300, 400, 500,	NO.1~	0.62
144	255, 310	600, 700, 800	NO.7	
175				

文物所需的最小卡固件尺寸,如表 14 所示(表中“0”表示浮置状态也不会发生倾覆)。保持底面直径一定,随着宽度变化的最小卡固件尺寸规律如图 17(a)~(d)所示;保持文物轮廓宽度一定,随着底面直径变化最小卡固件尺寸规律如图 17(e)~(h)所示。最终结果取保守值即选取 7 条地震波作用下所需要卡固件尺寸的最大值。

由图 17 及表 14 可知,采取卡固件的形式、尺寸与文物的高度、底面直径(面积)、最大轮廓宽度均有关。文物的底面直径与轮廓宽度相同时,文物高度与卡固件高度呈正相关近似线性关系。

当文物底面直径较小时:底面直径为 82 mm 时,不同高度的文物只能采用随形卡固件固定,当文

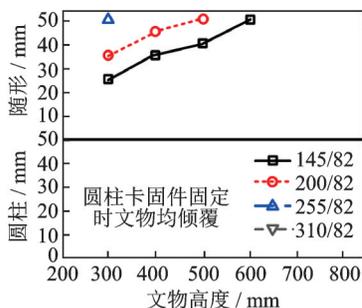
表 14 不同体型文物所需的最小卡固件尺寸(单位:mm)

Tab. 14 Minimum sizes of fasteners required for cultural relics with different sizes (Unit: mm)

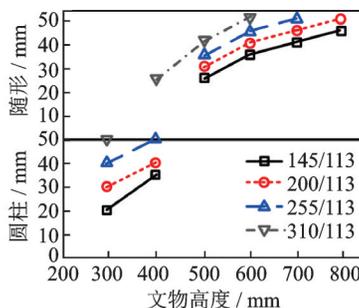
底面直径	轮廓宽度	高度					
		300	400	500	600	700	800
82	145	随形 25	随形 35	随形 40	随形 50	—	—
	200	随形 35	随形 45	随形 50	—	—	—
	255	随形 50	—	—	—	—	—
	310	—	—	—	—	—	—
113	145	圆柱 20	圆柱 35	随形 25	随形 35	随形 40	随形 45
	200	圆柱 30	圆柱 40	随形 30	随形 40	随形 45	随形 50
	255	圆柱 40	圆柱 50	随形 35	随形 45	随形 50	—
	310	圆柱 50	随形 25	随形 40	随形 50	—	—
144	145	0	圆柱 15	圆柱 30	随形 15	随形 30	随形 40
	200	0	圆柱 25	圆柱 40	随形 20	随形 35	随形 45
	255	0	圆柱 35	圆柱 50	随形 35	随形 45	随形 50
	310	0	圆柱 45	随形 25	随形 40	随形 50	—
175	145	0	0	0	圆柱 50	随形 15	随形 25
	200	0	0	圆柱 20	随形 15	随形 25	随形 35
	255	0	0	圆柱 30	随形 30	随形 35	随形 40
	310	0	0	圆柱 40	随形 35	随形 45	随形 50

物高 600 mm 以上时,随形卡固件需要大于 50 mm 高的尺寸;文物宽度为 255 mm 以上时,独立卡固法不再适用,见表 14 中灰色部分。底面直径为 113 mm 时,文物高度为 400 mm 以下可采用圆柱形卡固件固定,400 mm 以上则要采用随形卡固件固定;且文物宽度为 310 mm 以上时,对于较高的文物,独立卡固法不再适用。根据文献[25-26],鱼线具有较好的弹性和拉结性能,通常采取栓绑在文物颈部或腰部的固定方式,可以有效降低文物的摇摆响应,卡固法能够有效控制文物滑移,故对于摇摆、滑移响应显著的文物,建议采用卡固件+鱼线组合固定的方式,可以有效控制文物的摇摆和滑移响应。综合考虑降低文物动力响应与最小展示干预原则,采用独立卡固法抗震作用失效的文物可采取以上组合固定措施。

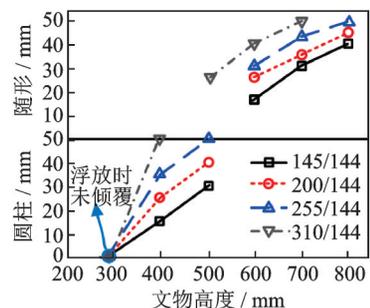
当文物底面直径较大时:底面直径为 144 mm



(a) 底面直径为 82 mm 时所需最小卡固件尺寸  
(a) Minimum sizes of fasteners required for bottom diameter of 82 mm



(b) 底面直径为 113 mm 时所需最小卡固件尺寸  
(b) Minimum sizes of fasteners required for bottom diameter of 113 mm



(c) 底面直径为 144 mm 时所需最小卡固件尺寸  
(c) Minimum sizes of fasteners required for bottom diameter of 144 mm

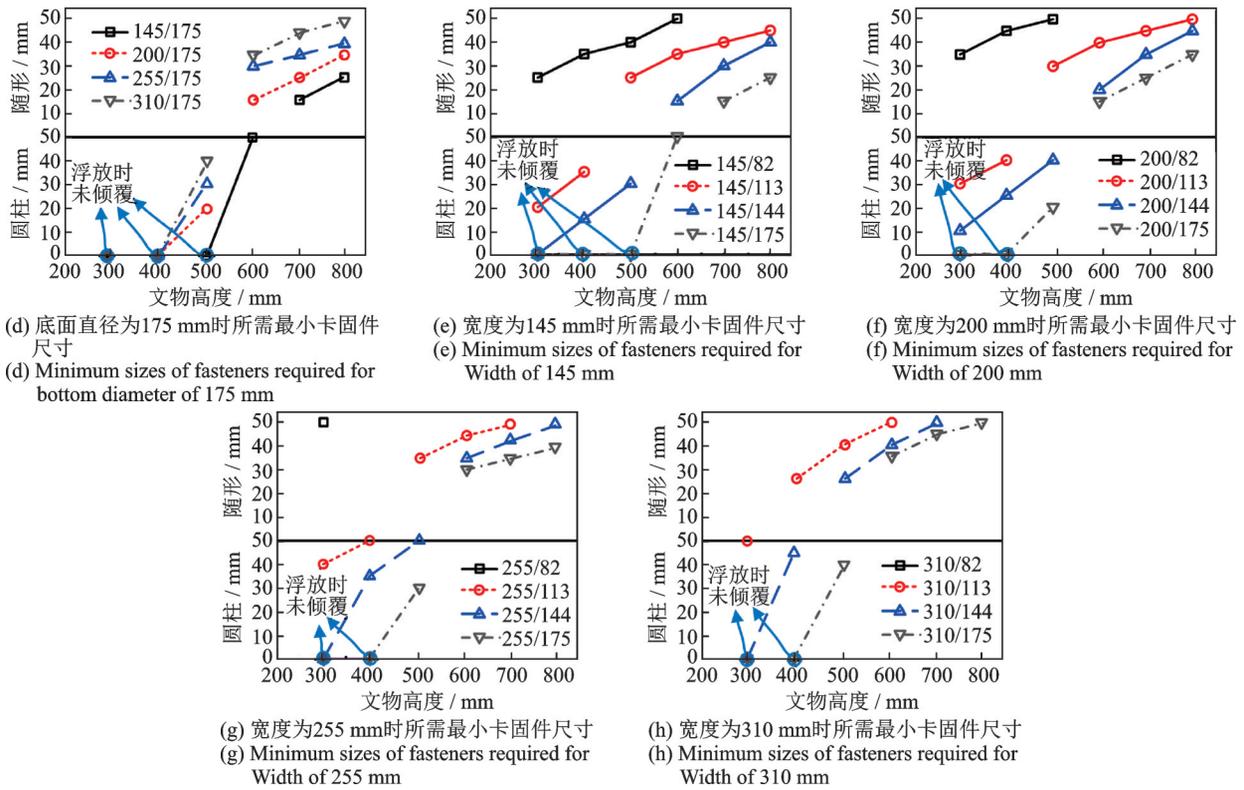


图 17 不同体型文物所需的最小卡固件尺寸变化趋势曲线

Fig. 17 Changing trend curves of minimum sizes of fastener required for cultural relics with different body shapes

时,不同类型尺寸的卡固件基本可以固定 800 mm 以下高度范围的文物。但当文物宽度为 310 mm,高度为 700 mm 以上时,独立卡固法不再适用,应采取组合固定方式。底面直径为 175 mm 时,高度为 800 mm 以下的文物基本可以采取相应的圆柱、随形卡固件固定。

### 5.3 采用圆柱卡固件固定后与纯浮放状态相比摇摆响应增加的文物体型限值

分析结果表明:当文物的体型范围如图 18 所示,文物高度有限,轮廓宽度/底面直径以及高度/底面直径在一定范围内(轮廓宽度 140~255 mm,底面直径 120~135 mm,高度 300~350 mm,比值 1.04~2.13 及 2.22~2.92;轮廓宽度 140~310 mm,底面直径 135~150 mm,高度 300~400 mm,比值 0.93~2.30 及 2~2.96),采用圆柱卡固件固定后与纯浮放状态相比摇摆响应增加。因底面直径为 144 mm,高度为 300 mm 的不同宽度文物在纯浮放状态下均未倾覆,则以此为例说明上述现象。采用圆柱卡固件固定后以及浮放状态下的转角、滑移响应规律对比如图 19 所示。

由图 19 可得,圆柱卡固件有效限制了文物的滑移响应,且高度越高,效果越显著。但相比纯浮放状态,圆柱卡固件固定下文物的转角响应反而增加,在高 10 mm 圆柱卡固件固定下,文物均倾覆;在高

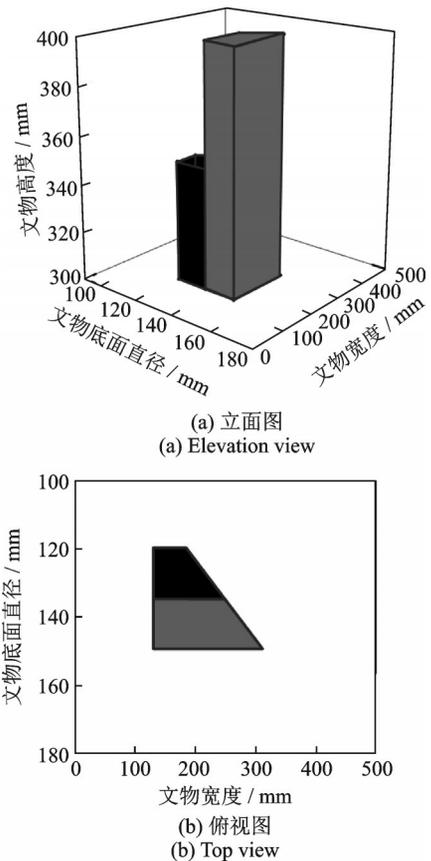


图 18 采用圆柱卡固件固定后与纯浮放状态相比摇摆响应增加的文物体型范围

Fig. 18 Size range of cultural relics increased in swing response using cylindrical fasteners after fixing compared to pure floating state

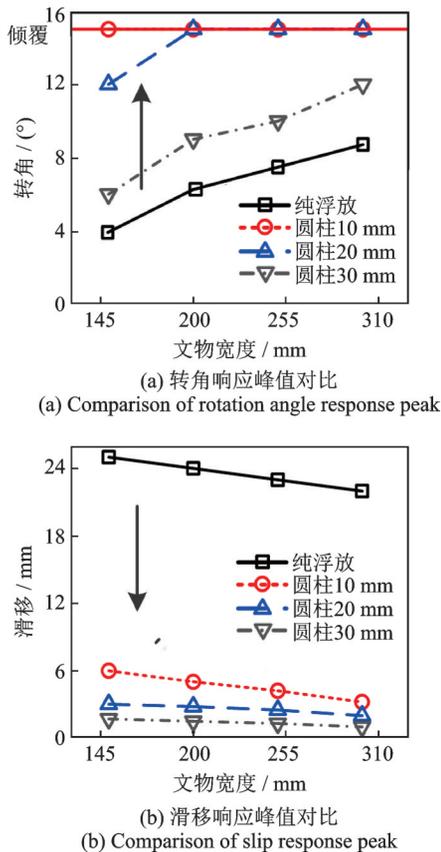


图 19 底面直径 144 mm、高 300 mm、不同宽度文物动力响应峰值曲线

Fig. 19 Peak curves of dynamic responses of cultural relics with bottom diameter of 144 mm, height of 300 mm and different widths

20 mm 圆柱卡固件固定下,仅文物宽 145 mm 时未倾覆,其余均倾覆;在高 30 mm 圆柱卡固件固定下文物虽未倾覆,但都比浮放状态下文物的转角响应大。针对这一类文物,宜采用随形卡固件或组合固定措施。

## 6 结 论

本文以圆柱、随形卡固件固定较大尺寸、不同体型的典型地震易损文物复制品(瓷器梅瓶)为研究对象,通过振动台试验与数值模拟相结合的方法,探讨了采用独立卡固件固定较大体型文物的抗震固定效果,开展了关键影响因素参数分析,给出了地震作用下能够有效固定不同体型文物所需的最小卡固件尺寸,为卡固法固定馆藏文物的优化设计提供依据。主要结论如下:

(1)随着地震强度的增加,不同体型文物的地震响应逐渐增大,随着卡固件高度的增加而减小。在圆柱卡固件固定工况下,随着卡固件高度增加,曲线斜率降低,说明当卡固件尺寸增加到一定程度,对文物的抗震固定作用提高有限。相比圆柱卡固件,随

形卡固件可以支撑尺寸更大的文物,同时具有更好的固定效果。

(2)对于重心位置较高的不均匀体型文物,底面直径、轮廓宽度、高度是影响其运动状态、受力性能与相互作用行为的关键体型参数。在独立卡固件固定下,轮廓宽度/底面直径以及高度/底面直径越大,摇摆响应越明显。当文物体型超过一定限值(轮廓宽度/底面直径以及高度/底面直径较大时),独立卡固法不再适用,建议采取卡固件+鱼线组合固定方式,进一步减小文物动力响应。

(3)卡固件与文物间安装缝隙越大,文物摇晃响应越明显,为保证文物安全,缝隙应不大于 2 mm。在缝隙中填充橡胶垫及硅胶垫可使文物与卡固件间相互作用力降低 60%~70%,有效防止文物受到局部损害。

(4)圆柱卡固件能够有效限制文物的滑移响应,且高度越高,效果越显著。但针对采用圆柱卡固件固定后与纯浮放状态相比摇摆响应反而增加的这一类体型范围内的文物,宜采用随形卡固件或组合固定措施。

## 参考文献:

- [1] 张梦. 5·12地震:一场文物浩劫[J]. 中国社会导刊, 2008(19): 24-26.  
Zhang Meng. The 5·12 earthquake: a cultural relic catastrophe[J]. China Social Guide, 2008(19): 24-26.
- [2] 卢文刚,张雨荷. 地震灾害应对视角下的不可移动文物保护问题研究[J]. 城市与减灾, 2015(6): 18-22.  
Lu Wengang, Zhang Yuhe. Study on protection of immovable cultural relics with coping perspective for earthquake disaster[J]. City and Disaster Reduction, 2015(6): 18-22.
- [3] 马伯涛,王毅,杨维国,等. 博物馆文物微振疲劳试验与分析研究[J]. 振动与冲击, 2015, 34(23): 62-67.  
Ma Botao, Wang Yi, Yang Weiguo, et al. Slight fatigue tests and numerical analysis for museum collections[J]. Journal of Vibration and Shock, 2015, 34(23): 62-67.
- [4] 吴来明,王忠良,高华平,等. 博物馆文物的防震保护研究(一)——传统抗震措施与现代隔震技术[J]. 文物保护与考古科学, 2001, 13(2): 46-53.  
Wu Laiming, Wang Zhongliang, Gao Huaping, et al. Research on protection from earthquake of cultural relics in museum (1)—traditional anti-shock methods and modern seismic isolating techniques[J]. Sciences of Conservation and Archaeology, 2001, 13(2): 46-53.
- [5] 葛家琪. 博物馆防震全系统解决方案与措施研究[J].

- 东南文化, 2016(增刊1): 13-15.
- Ge Jiaqi. Research on the whole system solutions and measures for earthquake prevention in museums[J]. Southeast Culture, 2016(Sup1): 13-15.
- [6] 韦荃, 陈显丹. 5.12汶川大地震对四川可移动文物的损坏与启示[J]. 四川文物, 2008(4): 10-13.
- Wei Quan, Chen Xiandan. The 5.12 Wenchuan Earthquake's damage to the movable cultural relics in Sichuan and its enlightenment[J]. Sichuan Cultural Relics, 2008(4): 10-13.
- [7] Saraswat A, Reddy G R, Ghosh A K, et al. Effects of base excitation frequency on the stability of a freestanding rigid block[J]. Acta Mechanica, 2016, 227(3): 795-812.
- [8] Mathey C, Feau C, Clair D, et al. Experimental and numerical analyses of variability in the responses of imperfect slender free rigid blocks under random dynamic excitations[J]. Engineering Structures, 2018, 172: 891-906.
- [9] 周乾, 闫维明. 汶川地震可移动文物震害研究[J]. 文物保护与考古科学, 2010, 22(3): 36-43.
- Zhou Qian, Yan Weiming. Analysis of damage to free-standing cultural relics caused by the Wenchuan earthquake[J]. Science of Conservation and Archaeology, 2010, 22(3): 36-43.
- [10] 钮泽蓁. 陈列文物抗震措施实验研究[J]. 工程抗震, 1992(2): 28-31.
- Niu Zezhen. Experimental research on anti-seismic measures of cultural relics on display[J]. Earthquake Resistant Engineering, 1992(2): 28-31.
- [11] 周乾, 闫维明, 纪金豹. 传统方法加固馆藏浮放文物抗震性能试验[J]. 文物保护与考古科学, 2015, 27(2): 63-72.
- Zhou Qian, Yan Weiming, Ji Jinbao. Traditional methods to strengthen the collection of floating cultural relics Seismic performance test[J]. Science of Conservation and Archaeological, 2015, 27(2): 63-72.
- [12] Chun Qing, Meng Zhe, Hua Yiwei. Aseismic strengthening techniques of Chinese typical stele relics: a case study of Xi'an Beilin[J]. Journal of Southeast University, 2018, 34(3): 323-330.
- [13] 郑求真. 博物馆的文物保护[J]. 博物馆, 1984(1): 59-62.
- Zheng Qiuzhen. The protection of cultural relics in museums[J]. Museum, 1984(1): 59-62.
- [14] 王萌, 李孟青, 巢臻, 等. 馆藏文物卡固件固定的抗震有效性试验及数值研究[J]. 振动与冲击, 2022, 41(7): 258-267.
- Wang Meng, Li Mengqing, Chao Zhen, et al. Test and numerical analysis for aseismic effectiveness of fasteners to fix cultural relics in collection[J]. Journal of Vibration and Shock, 2022, 41(7): 258-267.
- [15] 上海博物馆. 馆藏文物防震规范: WW/T 0069—2015[S]. 北京: 文物出版社, 2015.
- Shanghai Museum. Specification for seismic protection of museum collection: WW/T 0069—2015[S]. Beijing: Cultural Relics Publishing House, 2015.
- [16] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑抗震设计规范: GB 50011—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for seismic design of buildings: GB 50011—2010[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010.
- [17] 李连洲. 对含有 $Al_2O_3$ 和 $Y_2O_3$ 的氮化硅结构陶瓷材料弹性性能的研究[J]. 耐火与石灰, 2019, 44(5): 34-35.
- Li Lianzhou. Research on elastic properties of  $Si_3N_4$  structure ceramics with  $Al_2O_3$  and  $Y_2O_3$ [J]. Refractories and Lime, 2019, 44(5): 34-35.
- [18] 黄立本, 张立基, 赵旭涛. ABS树脂及其应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2001.
- Huang Liben, Zhang Liji, Zhao Xutao. ABS Resin and Its Application[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2001.
- [19] 杨维国, 王亚, 孙新阳, 等. 叠层橡胶支座竖向刚度退化对隔震结构的影响[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2019, 51(6): 162-170.
- Yang Weiguo, Wang Ya, Sun Xinyang, et al. Influence of vertical stiffness degradation of laminated rubber bearings on isolated structures[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2019, 51(6): 162-170.
- [20] 牛晓东, 卢莉蓉, 郭嘉泰, 等. 拉伸法测硅胶力学性能[J]. 大学物理, 2015, 34(7): 20-25.
- Niu Xiaodong, Lu Lirong, Guo Jiatai, et al. Measurement of silica gel mechanical properties by tensile method[J]. College Physics, 2015, 34(7): 20-25.
- [21] 范金娟, 张卫方, 陈新文. 定向有机玻璃的拉伸断裂行为研究[J]. 航空材料学报, 2006, 26(5): 106-108.
- Fan Jinjuan, Zhang Weifang, Chen Xinwen. Investigation of tensile fracture behavior of directional PMMA[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2006, 26(5): 106-108.
- [22] 束德林. 工程材料力学性能[M]. 2版. 北京: 机械工业出版社, 2010.
- Shu Delin. Mechanical Properties of Engineering Materials[M]. Second Edition. Beijing: Machinery Industry Press, 2010.
- [23] 中国建筑材料科学研究总院. 精细陶瓷弯曲强度试验方法: GB/T 6569—2006[S]. 北京: 中国标准出版

- 社, 2006.  
China Academy of Building Materials Science. Test method for bending strength of fine ceramics: GB/T 6659—2006[S]. Beijing: Standards Press of China, 2006.
- [24] 中国建筑材料科学研究总院. 精细陶瓷断裂韧性试验方法单边预裂纹梁: GB/T 23806—2009[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.  
China Academy of Building Materials Science. Test method for fracture toughness of fine ceramics-unilateral precracked beams: GB/T 23806—2009[S]. Beijing: Standards Press of China, 2009.
- [25] 周乾, 闫维明, 纪金豹. 鱼线加固馆藏浮放文物振动台试验[J]. 土木工程与管理学报, 2011, 28(3): 395-400.
- Zhou Qian, Yan Weiming, Ji Jinbao. Shaking table tests of a free-standing cultural relic strengthened by Nylon lines[J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2011, 28(3): 395-400.
- [26] 王萌, 闫一, 傅萌, 等. 栓绑法固定馆藏文物的抗震有效性振动台试验研究[J]. 工程力学, 2022, 39(2): 208-221.
- Wang Meng, Yan Yi, Fu Meng, et al. Study on seismic effectiveness of tie up method for fixing cultural relics based on shaking table tests [J]. Engineering Mechanics, 2022, 39(2): 208-221.

## Seismic effect and optimal design of fixing cultural relics by fasteners

WANG Meng<sup>1</sup>, LI Meng-qing<sup>1</sup>, GE Jia-qi<sup>2</sup>, MA Bo-tao<sup>2</sup>, YANG Wei-guo<sup>1</sup>

(1.Department of Architectural Engineering, School of Civil and Architectural Engineering, University of Beijing Jiaotong, Beijing 100044, China; 2.China Aviation Planning and Design Institute (Group) Co., Ltd., Beijing 100120, China)

**Abstract:** In order to investigate the seismic effect and optimal design of fixing cultural relics by the most commonly used fasteners in the museum, the shaking table tests are carried out on the typical large fragile cultural relics replicas with different shapes (porcelain vase) fixed by fasteners under different working conditions. The key geometric parameters affecting the motion state of cultural relics replicas are obtained and the seismic effectiveness of the independent fasteners on larger cultural relics is discussed. Based on the test results, numerical methods are established for seismic systems of cultural relics with fixing measures, and the parametric analyses of key influencing factors are carried out to obtain the minimum sizes of fasteners required to effectively fix cultural relics with different sizes under earthquake actions. It provides the necessary basis for optimal design of fixing measures in consideration of safety and minimum intervention principle. The results show that the conformal fasteners could effectively fix larger-size cultural relics compared with cylindrical fasteners. For the cultural relics with uneven body and high center of gravity, the height, outline width and bottom diameter (area) significantly affect their dynamic responses and the interaction behavior. The larger outline width/bottom diameter and height/bottom diameter, the more obvious swing responses will be observed. To ensure the safety of cultural relics, it is recommended that the gap between fasteners and cultural relics should not be larger than 2 mm. Adding rubber pads or silicone pads could reduce the interaction force between cultural relics and fasteners by 60%~70%, which effectively prevented the cultural relics from being damaged. In the case of the size of cultural relics exceeded a certain limit, the independent fastener method is no longer applicable, and it is suggested to adopt combining fixing measures (fasteners and fishing lines). For the cultural relics in the case of larger swing responses fixed with cylindrical fasteners compared with floating state, it is better to adopt conformal fasteners or combining fixing measures.

**Key words:** seismic effect; cultural relics; fasteners; experimental studies; optimal design

**作者简介:** 王萌(1985—),女,博士,教授。电话: 13811718116; E-mail: wangmeng@bjtu.edu.cn。