

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20211111011

博物馆-展柜-浮放文物系统地震滑移与摇摆 响应分析*

刘佩¹, 袁晨瑜¹, 杨维国¹, 马伯涛²

(1. 北京交通大学土木建筑工程学院, 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: 目前评估浮放馆藏文物的地震安全性时, 未充分考虑博物馆-展柜-文物系统的影响, 并通常忽略展柜的动力特性。考虑文物与展柜间浮放界面及结构的非线性、展柜的自振频率和等效为矩形刚体的文物, 给出了博物馆-展柜-文物系统解耦的有限元建模方法。以受三条单向地震波作用的某四层框架结构为例, 考虑位于地面及不同楼层的四种展柜, 对发生纯滑移、纯摇摆及滑移-摇摆运动的三类文物响应进行了分析, 并与纯滑移和纯摇摆文物的理论运动方程所得响应进行了对比验证。结果表明: 频率为 10 Hz 的展柜中文物的滑移和摇摆响应最大, 20 Hz、30 Hz 和刚体展柜中文物的响应接近; 随着楼层升高, 文物的最大滑移量和摇摆角均增大; 文物发生滑移-摇摆运动时的最大滑移量与摇摆角分别小于相同摩擦系数下纯滑移和相同宽高比下纯摇摆的文物, 并随着文物宽高比和摩擦系数的增大而减小。

关键词: 博物馆-展柜-文物系统; 浮放刚体; 滑移-摇摆运动; 地震响应; 自振频率

中图分类号: U211.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2022)06-1203-10

Seismic Sliding and Rocking Response Analysis for Museum-Showcase-Freestanding Artifact Systems

LIU Pei¹, YUAN Chenyu¹, YANG Weiguo¹, MA Botao²

(1. School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

2. China Aviation Planning and Design Institute (Group) Co., Ltd., Beijing 100120, China)

Abstract: When assessing the seismic safety of freestanding museum artifacts, the influence of museum-showcase-artifact system was not adequately considered, and the dynamic properties of showcases were usually ignored in previous studies. The decoupled finite element modeling technique for the museum-showcase-artifact system was presented in this paper. The nonlinearity of the structure, the interface between the artifact and showcase as well as the natural frequency of the showcase were considered, and the artifact was assumed as a rigid block in the models. A four-story frame structure subjected to three unidirectional earthquake records with four types of showcases located on the ground and on different floors was taken as an example. The seismic response of the artifacts with pure sliding, pure rocking and sliding-rocking motions was analyzed. The pure sliding displacements and pure rocking angles obtained from the finite element models were compared with those from the equations of

* 收稿日期: 2021-11-11; 修回日期: 2021-11-18

基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFC1521000)资助

作者简介: 刘佩(1982—), 女, 副教授, 博士。主要从事地震易损性及结构健康监测研究。E-mail: peiliu@bjtu.edu.cn

motion, respectively. Results show that the sliding and rocking response of the artifact in the showcase with a frequency of 10 Hz is the largest, while the response of the artifacts in the showcases with frequencies of 20 Hz and 30 Hz and rigid showcase is similar. Moreover, the maximum sliding displacement and rocking angle of the artifact increase as the floor level goes higher. Besides, the maximum sliding displacement and rocking angle of the artifact in the sliding-rocking motion are smaller than the counterparts in the pure sliding motion with the same friction coefficient and in the rocking motion with the same width-to-height ratio, respectively. Also, they decrease with the increase of width-to-height ratio and friction coefficient.

Keywords: museum-showcase-artifact system; freestanding rigid body; sliding-rocking motion; seismic response; natural frequency

引言

根据国家文物局官方网站的统计数据显示,约1.08亿件可移动文物主要存放于5300余家博物馆中,其中超过70%的国家一级和二级博物馆位于7度及以上抗震设防高烈度区。国内外历次强震均对馆藏文物造成了严重的破坏。例如,2018年5月12日的里氏8.0级汶川特大地震,仅四川省就有216家文物保护单位的3169件馆藏可移动文物受损,造成了不可估量的文化损失^[1]。近年来,馆藏文物防震预防性保护已成为国家重大需求,而准确预测馆藏文物的地震运动响应是科学开展该项工作的基础。

浮放馆藏文物在地震作用下的破坏一般是由于过大的滑移量和摇摆角导致,通常基于刚体运动理论对其地震响应进行预测分析。根据前期理论研究,浮放矩形刚体的地震运动模式包括单纯滑移、单纯摇摆和滑移-摇摆等情况^[2-5];近年来,也开展了利用有限元模拟和振动台试验对浮放刚体的地震运动响应进行更全面及符合实际情况的研究^[6-9]。但大部分研究均以浮放刚体为研究对象,对其输入地震波或楼层波,而浮放文物一般放置于展柜中,其受到的激励为展柜台面波。因此,应从博物馆-展柜-文物系统的角度,并考虑结构的非线性,利用有限元模拟对文物的地震运动响应进行预测分析。

此外,存放文物的展柜是附属于博物馆主体结构的二次结构,对保证文物的地震安全至关重要。前期有关浮放馆藏文物地震运动响应的研究,通常将展柜假定为刚体,而忽略其自身动力特性的影响。杨维国等^[10]对不同层数的文物储藏柜进行了

环境振动测试,发现储藏柜的自振频率为13~18 Hz;周乾等^[11]对文物陈列柜进行了振动台试验,发现其自振频率为24~35 Hz;E.Cosenza等^[12]对药品柜进行了振动台试验,发现其自振频率为6~7 Hz。目前展柜的动力特性对文物地震运动响应的影响尚不明确。

本文对位于博物馆不同楼层的不同频率的展柜中文物的纯滑移、纯摇摆及滑移-摇摆等地震响应进行研究。首先,给出了浮放刚体的纯滑移和纯摇摆运动的产生条件及方程。其次,给出了考虑展柜-文物接触界面及结构非线性的解耦的博物馆-展柜-文物系统有限元建模方法。随后,以某四层框架结构为例,输入三条单向地震波并调幅至不同强度,分析各楼层及四种频率展柜的响应、以及不同楼层和展柜中纯滑移、纯摇摆及滑移-摇摆文物的运动响应规律。

1 浮放文物的滑移与摇摆理论运动方程

1.1 单纯滑移运动

为保证可等效为矩形刚体的浮放文物在地震作用下仅发生滑移而不发生摇摆,须满足

$$\mu_s < b/h \quad (1)$$

式中, μ_s 为文物与展柜台面间的静摩擦系数; b 为文物宽度; h 为文物高度。

当文物所受外部激励大于摩擦力时,则发生滑移,即

$$|\ddot{x}_s| > \mu_s g \quad (2)$$

式中, \ddot{x}_s 为展柜台面的加速度。

根据文物的惯性力、所受摩擦力与外部激励间的平衡关系,可得其滑移运动方程为^[13]:

$$\ddot{x}_a(t) + \mu_k g \operatorname{sgn}[\dot{x}_a(t)] = -\ddot{x}_s(t) \quad (3)$$

式中, \ddot{x}_a 为文物的滑移加速度; μ_k 为文物与展柜台面间的动摩擦系数; $\operatorname{sgn}(y)$ 为符号函数, 当 $y > 0$ 时, $\operatorname{sgn}(y) = 1$, 而当 $y < 0$ 时, $\operatorname{sgn}(y) = 0$ 。式(3)中的微分方程可利用 MATLAB 中的 ODE45 命令进行求解, 从而得到文物的滑移时程 $x_a(t)$ 。

1.2 单纯摇摆运动

为保证矩形刚体的浮放文物在地震作用下发生摇摆, 须满足:

$$\mu_s > b/h \quad (4)$$

当文物所受外部激励产生的力矩大于重力产生的力矩时, 则发生摇摆, 即:

$$|\ddot{x}_s| > b/h \times g \quad (5)$$

并且当文物所受外部激励不大于摩擦力时, 则发生纯摇摆运动, 即:

$$|\ddot{x}_s| \leq \mu_s g \quad (6)$$

根据文物对摇摆点(矩形底部的两个角点)的力矩平衡, 其摇摆运动方程可表示为^[14]:

$$\begin{aligned} I\ddot{\theta}(t) + mgR \sin[\alpha \operatorname{sgn}(\dot{\theta}(t)) - \theta(t)] = \\ -m\ddot{x}_g(t)R \cos[\alpha \operatorname{sgn}(\dot{\theta}(t)) - \theta(t)] \end{aligned} \quad (7)$$

式中, R 为文物的质心到摇摆点的距离; θ 为文物的摇摆角; α 为文物的静态倾覆角, $\tan \alpha = b/h$; I 为文物绕摇摆点的转动惯量, $I = 4mR^2/3$ 。式(7)中的微分方程可利用 MATLAB 中的 ODE45 命令进行求解, 从而得到文物的摇摆角时程 $\theta(t)$ 。

2 博物馆-展柜-文物非线性系统有限元建模方法

本文将博物馆-展柜-文物系统解耦, 进而建立其有限元模型。首先, 利用可高效开展框架结构动力非线性分析的软件 OpenSees, 建立结构的有限元模型, 获得地震作用下各楼层的加速度时程。其次, 在 ABAQUS 中, 通过在展柜与楼板间施加约束(Tie)建立展柜-楼板模型, 如图 1 所示; 输入楼层加速度时程, 并且不考虑展柜的阻尼, 利用隐式算法获得展柜台面加速度时程。再次, 在 ABAQUS 中, 假定展柜台面为刚性, 对文物施加刚体约束, 利用耦合约束(Coupling)将展柜台面耦合于文物下方, 定义文物与展柜台面间浮放界面为通用接触, 切向特性中摩擦公式设

置为罚函数(Penalty), 法向特性设置为硬接触(Hard Contact), 从而建立矩形刚体的浮放文物-展柜台面模型, 如图 1 所示; 输入展柜台面加速度时程, 利用隐式算法获得文物的滑移和摇摆响应时程。

楼板、展柜、展柜台面、文物均采用 C3D8R 单元, 即八节点六面体线性减缩积分单元。为提高计算效率, 将文物中部网格和展柜台面外围网格做加宽处理, 如图 1 所示。

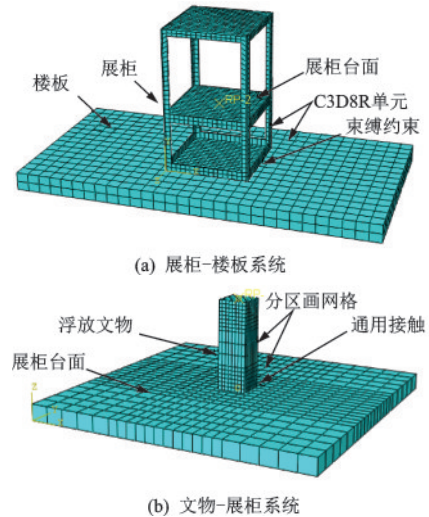


图1 展柜-楼板和文物-展柜台面局部系统有限元建模

Fig.1 Finite element modeling for the local systems of the showcase-floor and artifact-showcase surface

展柜及文物的响应均通过两个分析步来实现: 在初始分析步, 施加重力, 并约束楼板或展柜台面三个方向的平动以及转动自由度; 在第二个分析步, 释放地震作用方向的平动自由度, 并施加楼层或展柜台面加速度时程。

3 博物馆结构及展柜地震响应分析

3.1 某博物馆-展柜-文物系统

以某四层框架结构博物馆为例, 如图 2 所示, 抗震设防烈度为 8 度, 场地类别为 II 类, 具体的结构建模信息可参考文献[15], 该结构 X 向自振周期为 0.52 s。根据常见展柜的自振频率范围^[10-12], 通过设置不同的弹性模量, 分别建立自振频率为 10 Hz(S-10)、20 Hz(S-20)、30 Hz(S-30)及刚体(ST)的四种展柜, 展柜尺寸如图 2 所示。为对位于结构不同楼层的四种展柜中发生纯滑移、纯摇摆、滑移-摇摆运动

的三类文物的地震响应进行分析,文物的尺寸及其与展柜台面间的摩擦系数如图3所示,本文假定静动摩擦系数相等。

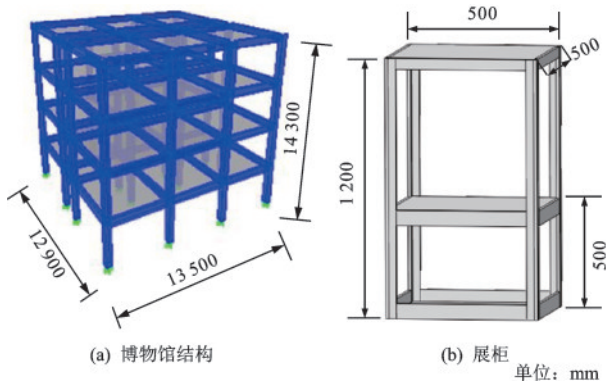


图2 博物馆结构和展柜示意

Fig.2 Schematic diagrams of the museum structure and showcase

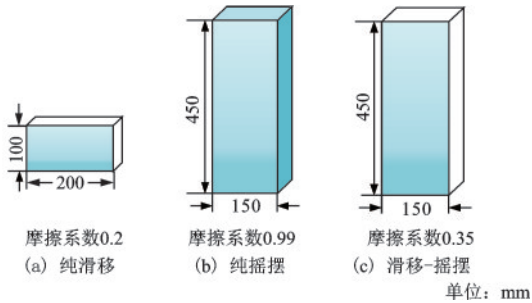


图3 三类不同运动状态的文物尺寸及摩擦系数

Fig.3 Dimensions and friction coefficients for artifacts with three different motion modes

3.2 结构的峰值楼层加速度分析

根据场地条件及设计反应谱与地震波均值谱相符的原则,选择三条地震波,相应的加速度时程 $\ddot{x}_g(t)$ 及由傅里叶变换所得幅值谱 $A(f)$,如图4所示。其中E1波为1992年Cape Mendocino地震波,峰值地面加速度为 $PGA=0.26g$,峰值频率 $f_p=0.55$ Hz; E2波为2010年Darfield New Zealand地震波, $PGA=0.47g$, $f_p=0.95$ Hz; E3波为1976年Friuli Italy地震波, $PGA=0.36g$, $f_p=1.99$ Hz。

将三条波分别调幅至 $0.2g$, $0.4g$ 和 $0.6g$,作用方向沿结构X轴方向,所得各层的峰值楼层加速度(PFA)见表1。可以看出,在各条波下PFA均随着楼层的升高而增大;并且随着PGA的增大,由于结构的非线性程度增加,PFA相对于PGA的放大系数减小。

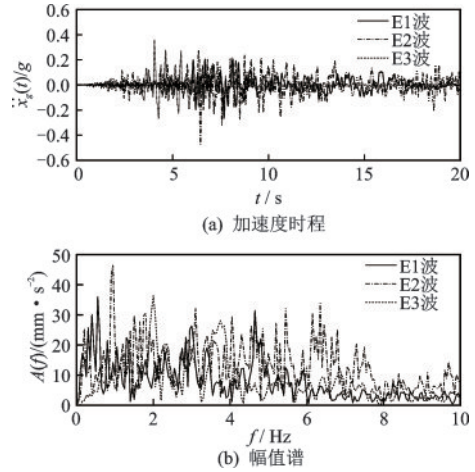


图4 所选地震波加速度时程及幅值谱

Fig.4 Acceleration time histories and amplitude spectra of the selected earthquake records

表1 三条地震波下各楼层的PFA

Table 1 PFAs of each floor under three seismic waves

单位:g

位置	$PGA=0.2g$	$PGA=0.4g$	$PGA=0.6g$
二层-E1	0.22(1.11)	0.42(1.06)	0.62(1.03)
三层-E1	0.30(1.49)	0.56(1.41)	0.78(1.30)
四层-E1	0.44(2.19)	0.73(1.83)	1.01(1.68)
二层-E2	0.17(0.85)	0.37(0.94)	0.57(0.95)
三层-E2	0.26(1.30)	0.45(1.13)	0.62(1.03)
四层-E2	0.29(1.43)	0.54(1.34)	0.77(1.28)
二层-E3	0.19(0.96)	0.41(1.03)	0.64(1.07)
三层-E3	0.31(1.53)	0.57(1.43)	0.93(1.56)
四层-E3	0.42(2.10)	0.75(1.87)	1.13(1.88)

注:括号内数值为放大系数

3.3 展柜台面的峰值加速度分析

当 $PGA=0.4g$ 时,对四种展柜输入各条楼层波,所得展柜台面峰值加速度(PSA)如图5所示。可以看出:PSA随着展柜频率的升高而降低,10 Hz展柜的PSA最大,其余展柜的PSA近似相等。而当 $PGA=0.2g$ 和 $0.6g$ 时,均为10 Hz展柜的PSA最大。此外,不同楼层波下最不利PSA见表2,可以看出:最不利工况在各条波下均有可能出现。而对于PSA相对于PFA的放大系数而言,位于地面、二层、三层以及四层展柜的平均放大系数分别为1.33、1.29、1.21及1.12,表明该放大系数随楼层的升高而减小。

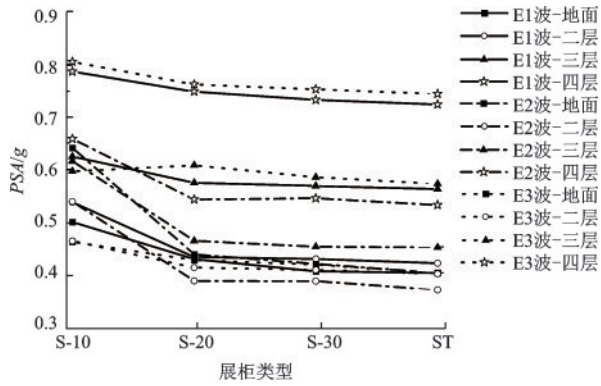


图5 $PGA=0.4g$ 时不同楼层波下四种展柜的PSA

Fig.5 PSAs of the four-type of showcases under different floor accelerations in the case of $PGA=0.4g$

表2 展柜的最不利PSA

Table 2 The largest PSAs of the showcases under different floor accelerations

位置	$PGA=0.2g$	$PGA=0.4g$	$PGA=0.6g$
地面	0.32 (E2波)	0.63 (E2波)	0.96 (E2波)
二层	0.27 (E1波)	0.53 (E1波)	0.99 (E3波)
三层	0.33 (E3波)	0.62 (E1波)	1.11 (E3波)
四层	0.45 (E1波)	0.81 (E3波)	1.37 (E3波)

单位: g

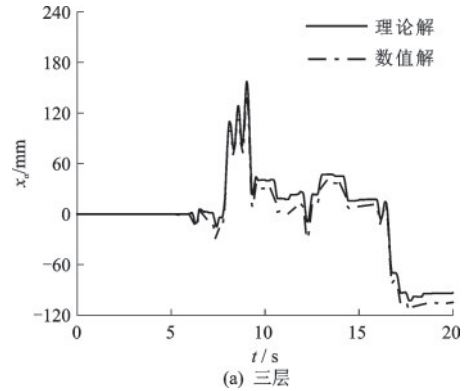
4 文物纯滑移响应分析

4.1 滑移时程的理论解与有限元模拟结果对比

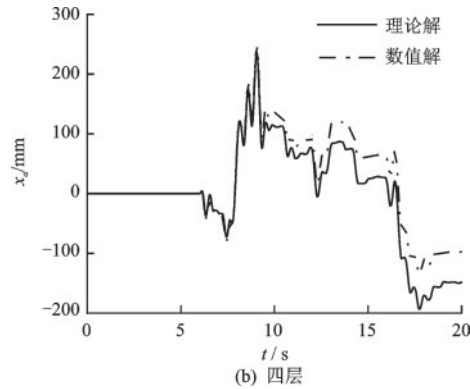
以结构受到 $PGA=0.6g$ 的E1波作用时,位于三层和四层的S-10展柜中的纯滑移文物(图3(a))为例,对比有限元模拟与理论运动方程所得结果,验证浮放文物纯滑移有限元模型的正确性。由图6所示滑移时程 $x_a(t)$ 的对比结果可以看出,二者吻合良好。

4.2 E1波下四层S-10展柜中文物的纯滑移响应

以结构受到E1波作用时位于四层的S-10展柜中的纯滑移文物为例,该文物受到的展柜台面加速度 $\ddot{x}_s(t)$ 和滑移时程 $x_a(t)$ 如图7所示。可以看出:
 (1) 文物滑移出现在 $\ddot{x}_s(t) > \mu g = 0.2g$ 的持时内;
 (2) $PGA=0.4g$ 时,6.10 s时文物开始滑移,17.7 s时文物结束滑移,8.90 s时文物的滑移量最大,为107 mm;
 (3) $PGA=0.6g$ 时,5.96 s时文物开始滑移,并持续至激励结束,9.04 s时文物的滑移量最大,为252 mm;
 (4) 随着激励幅值的增大,最大滑移量增大,滑移持时增加,发生滑移的时刻略有提前,最大滑移量出现的时刻略有后延。

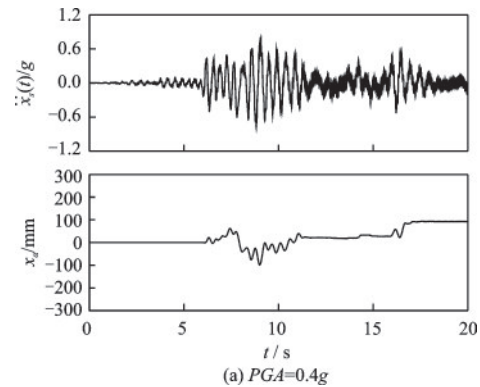


(a) 三层

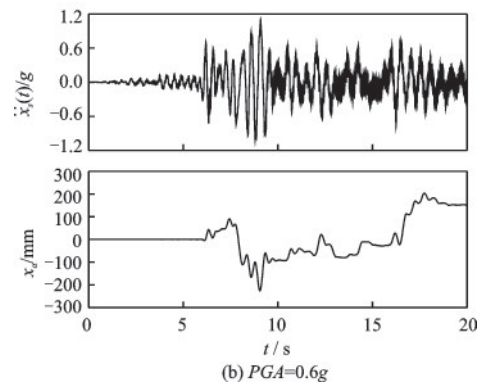


(b) 四层

图6 有限元模拟和理论运动方程所得文物滑移时程对比
 Fig.6 Comparisons of the sliding displacement time histories between finite element simulation and equation of motion



(a) $PGA=0.4g$



(b) $PGA=0.6g$

图7 展柜台面加速度及文物滑移时程

Fig.7 Showcase acceleration and artifact sliding displacement time histories

4.3 各工况下文物的最大滑移量对比

当 $PGA=0.4g$ 时,位于不同楼层的四种展柜中文物的最大滑移量(MSD)对比如图8所示。可以看出:不同地震波下S-10展柜中文物的MSD均为最大;S-20、S-30、ST展柜中文物的MSD与S-10展柜中文物的MSD比值分别为0.76~0.88,0.75~0.81,0.74~0.80,表明展柜频率为20 Hz及以上时,展柜频率的改变对文物的MSD基本无影响,可认为展柜为刚体。此外,不同楼层波下S-10展柜中文物的MSD最不利值见表3。可以看出:文物的MSD最不利值随楼层的升高而增大,且E1波下出现最不利工况居多。

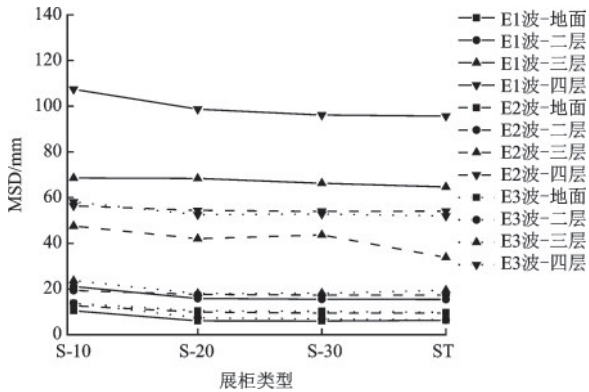


图8 $PGA=0.4g$ 时不同展柜中文物的最大滑移量对比
Fig.8 Comparisons of maximum sliding displacements of the artifacts in different showcases in the case of $PGA=0.4g$

表3 文物的最大滑移量最不利值

Table 3 The most unfavorable value of the maximum sliding displacements of the artifacts

单位: mm			
位置	$PGA=0.2g$	$PGA=0.4g$	$PGA=0.6g$
地面	0	14 (E2波)	61 (E1波)
二层	2 (E1波)	21 (E1波)	90 (E3波)
三层	12 (E1波)	69 (E1波)	163 (E3波)
四层	34 (E1波)	107 (E1波)	252 (E1波)

4.4 不同高宽比和摩擦系数下文物的滑移量

若文物尺寸由 $b \times h=200 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 变为 $150 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$,但摩擦系数0.2保持不变,此时文物仍发生纯滑移运动,并且其在各条波下的滑移量与原尺寸文物相同。原因为虽然文物的宽高比由2变为0.5,但是均大于摩擦系数0.2,仍然满足发生纯滑移的条件,滑移量与宽高比无关。

若文物尺寸保持 $b \times h=200 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 不变,摩擦系数变为0.35,此时文物的最大滑移量最不利值见表4,可以看出随着摩擦系数的增大,文物的最大滑移量减小。

表4 文物的最大滑移量最不利值

Table 4 The most unfavorable value of the maximum sliding displacements of the artifacts

单位: mm			
位置	$PGA=0.2g$	$PGA=0.4g$	$PGA=0.6g$
地面	0	10 (E2波)	23 (E1波)
二层	0	13 (E1波)	45 (E3波)
三层	0	32 (E1波)	82 (E3波)
四层	18 (E1波)	61 (E1波)	164 (E1波)

5 文物纯摇摆响应分析

5.1 摇摆时程的理论解与有限元模拟结果对比

以结构受到 $PGA=0.4g$ 的E1波作用时,位于2层和3层的S-10展柜中的纯摇摆文物(图3(b))为例,对比有限元模拟与理论运动方程所得结果,验证浮放文物纯摇摆模型的正确性。由图9所示摇摆

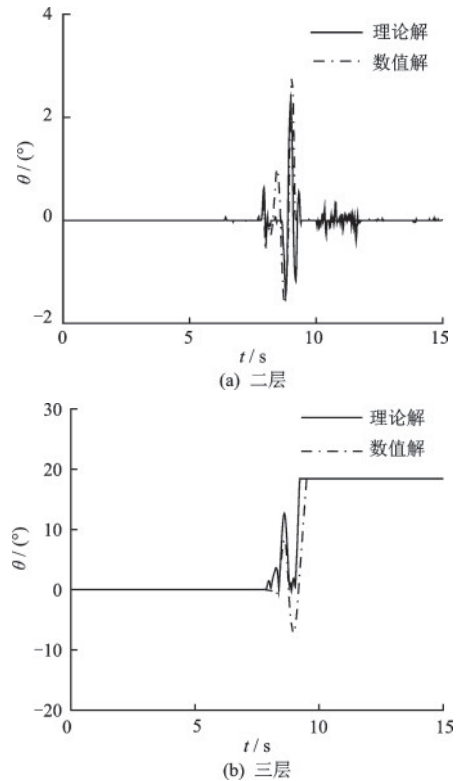


图9 有限元模拟和理论解所得文物纯摇摆角时程对比
Fig.9 Comparisons of the rocking response of the artifact between finite element simulation and equation of motion

角时程的对比结果,可以看出二者吻合良好,并且位于3层的文物最大摇摆角达到静态倾覆角 18.43° ,发生倾覆。

5.2 E1波下四层S-30展柜中文物的纯摇摆响应

以结构受到E1波作用时,位于四层的S-10展柜中的纯摇摆文物为例,其摇摆角时程如图10所示。可以看出:(1) $PGA=0.2g$ 时,最大摇摆角很小,为 2.9° ;(2) $PGA=0.4g$ 时,6.13s时展柜台面加速度为 $0.34g$,文物开始摇摆;10.90s时文物停止摇摆;但16.40s时展柜台面加速度为 $0.35g$,文物再次发生摇摆,并紧接着在16.68s时发生倾覆,此时展柜台面加速度为 $0.36g$;文物从开始摇摆到发生倾覆的时间间隔非常短。

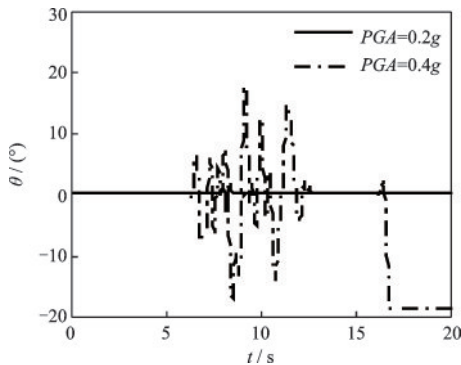


图10 文物摇摆角时程

Fig.10 Rocking angle time histories of the artifact

5.3 各工况下文物的最大摇摆角对比

以不同地震波下位于地面的不同展柜中的纯摇摆文物为例,其最大摇摆角(MRA)对比如图11所示。可以看出:(1)当 $PGA=0.2g$ 时,各工况下文物均处于静

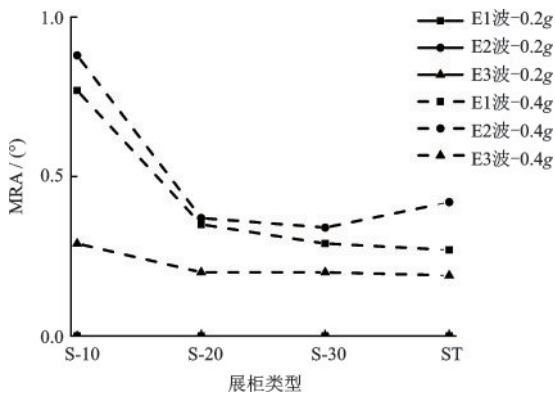


图11 不同展柜中文物的最大摇摆角对比

Fig.11 Comparisons of the maximum rocking angles of artifacts in different showcases

止状态;(2)当 $PGA=0.4g$ 时,各工况下文物均发生小幅摇摆,且S-10展柜中文物的最大摇摆角最大。

此外,在不同地震波作用下,位于不同楼层的不同展柜中的纯摇摆文物的最大摇摆角均出现在S-10展柜中,其最不利值见表5。可以看出:楼层越高,文物的最大摇摆角越大,引起倾覆的地震波条数越多。

表5 文物的最大摇摆角最不利值

Table 5 The most unfavorable value of the maximum rocking angle of artifact

位置	单位:($^\circ$)	
	$PGA=0.2g$	$PGA=0.4g$
地面	0	0.9 (E2波)
二层	0	2.3 (E1波)
三层	0	倾覆 (E1、E2波)
四层	8.2 (E3波)	倾覆 (E1-E3波)

5.4 不同摩擦系数下的摇摆角

若文物与展柜台面的摩擦系数由0.99降至0.85时,该纯摇摆文物仍然发生纯摇摆响应,且各条波下的摇摆角与原摩擦系数下相同。原因为摩擦系数0.99和0.85均大于文物的宽高比0.33,且均大于输入加速度除以 g ,因此均发生纯摇摆响应,此时摇摆角与摩擦系数无关。

6 文物滑移-摇摆响应分析

为保证浮放文物发生摇摆,摩擦系数需足够大,即满足式(4);当浮放文物所受外部激励产生的力矩大于重力产生的力矩,则发生摇摆,即满足式(5);并且当浮放文物所受外部激励同时大于摩擦力时,则发生滑移,即满足式(2)。上述三个条件同时满足时,文物发生滑移-摇摆运动。

6.1 E1波下四层S-10展柜中文物的滑移-摇摆响应

以结构在E1波作用下,位于四层的S-10展柜中的滑移-摇摆文物(图3(c))为例,其滑移量和摇摆角时程如图12所示。可以看出:(1) $PGA=0.2g$ 时,7.23s时激励加速度超过文物发生滑移和摇摆的加速度限值,文物同时开始滑移和摇摆;10.02s时文物的摇摆角最大,为 7.8° ,此时文物的滑移量为2mm;10.80s时文物的滑移量最大,为9mm,此时文物的摇摆角为 0.5° ;(2) $PGA=0.4g$ 时,6.13s

时文物开始滑移和摇摆;16.66 s时文物发生倾覆,倾覆前文物的最大滑移量为16 mm;(3) $PGA=0.6g$ 时,6.12 s时文物开始滑移和摇摆;7.10 s时文物发生倾覆,倾覆前文物的最大滑移量为43 mm;且文物从开始摇摆至倾覆的时间间隔非常短。

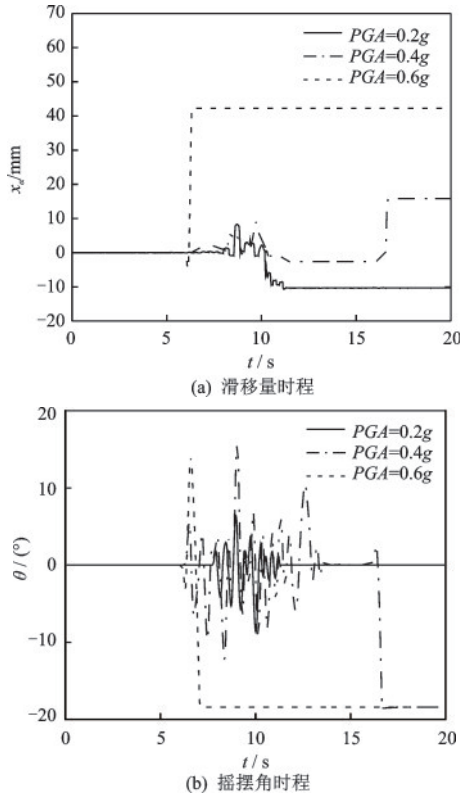


图12 文物的滑移量和摇摆角时程
Fig.12 Sliding displacement and rocking angle time histories of the artifact

6.2 各工况下文物的最大滑移量和摇摆角对比

以结构在不同地震波作用下位于地面的不同展柜中的滑移-摇摆文物为例, $PGA=0.2g$ 时,E1、E2和E3波下文物均处于静止状态; $PGA=0.4g$ 时,仅E2波下S-10展柜中的文物发生了滑移和少量摇摆,其余工况中文物的滑移和摇摆不明显; $PGA=0.6g$ 时,其最大滑移量(若文物发生倾覆,则取倾覆前最大滑移量)和最大摇摆角对比如图13所示,可以看出:E1波下S-10展柜和S-20展柜中的文物发生滑移和倾覆,其余展柜中文物发生滑移和摇摆;E2和E3波下各展柜中文物均发生滑移和摇摆。

不同地震波作用下位于不同楼层的不同展柜中的滑移-摇摆文物的最不利工况均出现在S-10展柜中,对应的最大滑移量与最大摇摆角最不利值见

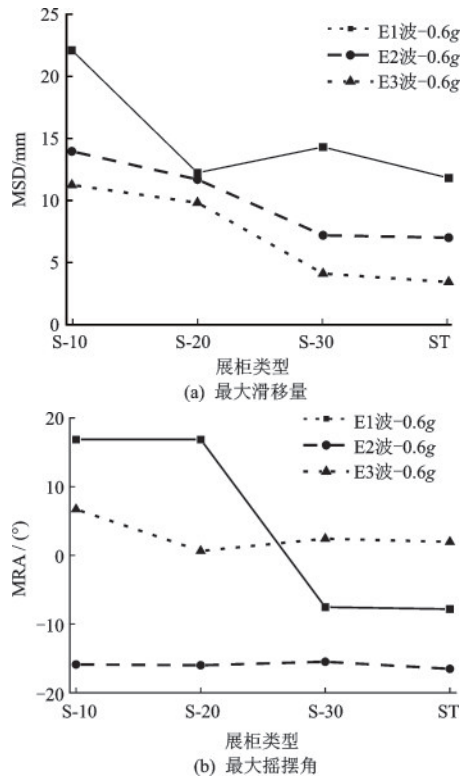


图13 不同展柜中文物最大摇摆角和最大滑移量对比
Fig.13 Comparisons of the maximum sliding displacements and rocking angles of the artifacts in different showcases

表6和表7。与表4和表5相比:(1) $PGA=0.2g$ 时,四层展柜中纯摇摆文物的最大摇摆角为 8.2° ,纯滑移文物的最大滑移量为18 mm,而滑移-摇摆文物的最大摇摆角为 7.9° ,最大滑移量为11 mm;(2) $PGA=0.4g$ 时,二层展柜中纯摇摆文物的最大摇摆角为 2.3° ,纯滑移文物的最大滑移量为13 mm,而滑移-摇摆文物的最大摇摆角为 1.9° ,最大滑移量为8 mm;(3) 上述结果表明:当受到的激励相同时,与文物在相同宽高比下的纯摇摆和在相同摩擦系数下的纯滑移运动相比,由于能量的耗散,文物的滑移-摇摆运动可以降低相应的最大摇摆角和最大滑移量。

表6 文物的最大摇摆角最不利值
Table 6 The most unfavorable value of the maximum rocking angle of artifact

单位:($^\circ$)			
位置	$PGA=0.2g$	$PGA=0.4g$	$PGA=0.6g$
地面	0	0.7 (E1波)	倾覆 (E1波)
二层	0	1.9 (E1波)	倾覆 (E1、E3波)
三层	0	倾覆 (E1、E3波)	倾覆 (E1-E3波)
四层	7.9(E2波)	倾覆 (E1-E3波)	倾覆 (E1-E3波)

表7 文物的最大滑移量最不利值

Table 7 The most unfavorable value of the maximum sliding displacement of the artifact

单位:mm			
位置	PGA=0.2g	PGA=0.4g	PGA=0.6g
地面	0	8 (E2波)	14 (E1波)
二层	0	8 (E1波)	19 (E1、E3波)
三层	0	21 (E1、E3波)	29 (E1-E3波)
四层	11 (E2波)	28 (E1-E3波)	43 (E1-E3波)

6.3 不同宽高比和摩擦系数下文物的滑移-摇摆响应对比

将文物的尺寸由 $b \times h = 150 \text{ mm} \times 450 \text{ mm}$ 变为 $150 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$, 即宽高比由 $1/3$ 变为 $1/2$, 摩擦系数由 0.35 变为 0.55 , 此时文物仍发生滑移-摇摆运动。不同地震波作用下位于不同楼层的不同展柜中的滑移-摇摆文物的最不利工况均出现在 S-10 展柜中, 文物的最大滑移量与最大摇摆角的最不利值见表 8 和表 9。与表 6 和表 7 相比, 此时文物的最大摇摆角和最大滑移量均减小, 表明随着宽高比和摩擦系数的增大, 文物的滑移-摇摆响应减小。

表8 文物最大摇摆角的最不利工况

Table 8 The most unfavorable value of the maximum rocking angle of artifact

单位:(°)			
位置	PGA=0.2g	PGA=0.4g	PGA=0.6g
地面	0	0	13.6 (E1波)
二层	0	0	18.0 (E3波)
三层	0	3.4 (E1波)	倾覆 (E3波)
四层	0	倾覆 (E3波)	倾覆 (E1-E3波)

表9 文物最大滑移量的最不利工况

Table 9 The most unfavorable value of the maximum sliding displacement of the artifact

单位:mm			
位置	PGA=0.2g	PGA=0.4g	PGA=0.6g
地面	0	0	9 (E1波)
二层	0	0	17 (E3波)
三层	0	12 (E1波)	21 (E3波)
四层	0	17 (E3波)	40 (E1-E3波)

7 结论

本文基于所选定的博物馆-展柜-文物系统、地

震波、文物尺寸和摩擦系数, 分析了不同楼层位置和展柜频率对浮放文物的纯滑移、纯摇摆及滑移-摇摆响应的影响, 所得结论如下:

(1) 各种运动状态文物的最不利情况均出现在 10 Hz 展柜中, 而 20 Hz、30 Hz 和刚体的展柜中文物的滑移量和摇摆角比较接近。

(2) 随着楼层的升高, 各种运动状态文物的最大滑移量和最大摇摆角均增大。

(3) 随着激励幅值的增大, 文物的最大滑移量增大, 滑移持时增加, 发生滑移的起始时刻略有提前, 最大滑移量发生的时刻略有后延; 若文物发生倾覆, 则会从开始摇摆快速过渡到倾覆。

(4) 当摩擦系数小于文物的宽高比时, 文物的刚体运动模式仅限于滑移; 反之, 当输入加速度峰值仅大于宽高比与重力加速度的乘积时, 文物的刚体运动模式为纯摇摆, 而当输入加速度峰值同时大于静摩擦系数与重力加速度的乘积时, 文物的刚体运动模式为滑移-摇摆。

(5) 当文物发生滑移-摇摆运动时, 最大滑移量和最大摇摆角均相对于相同摩擦系数下的纯滑移和相同宽高比下的纯摇摆运动有所减小, 且随着文物宽高比和摩擦系数的增大, 文物的滑移-摇摆响应减小。

参考文献:

[1] 巩梦婷, 韦荃, 冯萍莉, 等. 5.12 汶川地震中四川可移动文物及其建筑受损情况调查[J]. 文物保护与考古科学, 2016, 28(2): 40-47.
Gong M T, Wei Q, Feng P L, et al. Survey on the damaged levels of the movable cultural relics and buildings during the 5.12 Wenchuan Earthquake in Sichuan Province[J]. Sciences of Conservation and Archeology, 2016, 28(2): 40-47. (in Chinese)

[2] Shenton H W. Criteria for initiation of slide, rock, slide-rock rigid-body modes[J]. Journal of Engineering Mechanics, 1996, 122(7): 690-693.

[3] 赵子翔, 苏小卒. 摇摆结构刚体模型研究综述[J]. 工程力学, 2019, 36(9): 12-24.
Zhao Z X, Su X Z. Literature review of researches on rigid body mode of rocking structure[J]. Engineering Mechanics, 2019, 36(9): 12-24. (in Chinese)

[4] Younis C J, Tadjbakhsh I G. Response of sliding rigid structure to base excitation[J]. Journal of Engineering Mechanics, 1984, 110(3): 417-432.

- [5] Scalia A, Sumbatyan M A. Slide rotation of rigid bodies subjected to a horizontal ground motion[J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 1996, 25(10): 1139-1149.
- [6] 于建军. 博物馆结构-文物陈列系统的防震性能研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2017.
Yu J J. Study on the quakeproof performance of the museum structure and cultural relics display system[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2017. (in Chinese)
- [7] 刘汉泉, 曲哲. 建筑内部物品滑移破坏易脆性分析中的楼面运动强度指标[J]. *世界地震工程*, 2020, 36(2): 85-91.
Liu H Q, Qu Z. An intensity measure of floor motions for seismic fragility analysis of sliding contents in buildings[J]. *World Earthquake Engineering*, 2020, 36(2): 85-91. (in Chinese)
- [8] 黄宝锋, 华夏, 卢文胜. 浮放花瓶动力反应机理与振动台试验研究[J]. *工程力学*, 2020, 37(8): 112-122.
Huang B F, Hua X, Lu W S. Seismic response behavior and shaking table tests on freestanding vase[J]. *Engineering Mechanics*, 2020, 37(8): 112-122. (in Chinese)
- [9] Arredondo C, Jaimes M A, Reinoso E. A simplified model to evaluate the dynamic rocking behavior of irregular free-standing rigid bodies calibrated with experimental shaking-table tests[J]. *Journal of Earthquake Engineering*, 2019, 23(1): 46-71.
- [10] 杨维国, 王亚, 刘佩, 等. 基于振动测试的博物馆储藏柜动力特性分析与数值模拟[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2018, 26(3): 572-584.
Yang W G, Wang Y, Liu P, et al. Dynamic characteristics analysis and numerical simulation of the storage cabinet based on vibration test[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2018, 26(3): 572-584. (in Chinese)
- [11] 周乾, 闫维明, 纪金豹. 基于陈列柜边界条件的馆藏文物地震滑移响应试验[J]. *世界地震工程*, 2013, 35(2): 220-225.
Zhou Q, Yan W M, Ji J B. Experiments on slide response of museum cultural relics under earthquakes considering various showcase boundary conditions[J]. *China Earthquake Journal*, 2013, 35(2): 220-225. (in Chinese)
- [12] Cosenza E, Di Sarno L, Maddaloni G, et al. Shake table tests for the seismic fragility evaluation of hospital rooms[J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2015, 44(1): 23-40.
- [13] Jaimes M A, Candia G. Seismic risk of sliding ground-mounted rigid equipment[J]. *Engineering Structures*, 2020, 204: 110066.
- [14] Petrone C, Di Sarno L, Magliulo G, et al. Numerical modelling and fragility assessment of typical freestanding building contents[J]. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 2017, 15: 1609-1633.
- [15] Liu P, Li Z H, Yang W G. Seismic fragility analysis of sliding artifacts in nonlinear artifact-showcase-museum systems[J]. *Structural Engineering & Mechanics*, 2021, 78(3): 333-350.

(本文责编:周小潭)