

邹爽, 温留汉·黑沙. 浮放文物三维减隔震装置研究[J]. 华南地震, 2018, 38 (2):116-121. [ZOU Shuang, WENLIUHAN·Heisha. Study on 3D Base Isolator for Free-standing Cultural Relics[J]. South China journal of seismology, 2018, 38(2):116-121]

## 浮放文物三维减隔震装置研究

邹爽<sup>1,2</sup>, 温留汉·黑沙<sup>1,2</sup>

((1. 广州大学工程抗震研究中心, 广州 510405; 广东省地震工程与应用技术重点实验室, 广州 510405))

**摘要:** 基于滑移摩擦支座、黏滞阻尼器和复位弹簧的各自力学性能特点, 设计研发出一种新型三维减隔震装置。介绍了该三维减隔震装置的组成构造, 并以馆藏浮放文物为研究对象, 对该三维减隔震装置的力学性能设计参数进行设计。研究表明: 该三维减隔震装置具有构造合理, 传力机制明确等优点, 在水平和竖向都能够具有适宜的隔震刚度和阻尼耗能性能, 并且, 具有良好的震后复位功能和整体稳定性。

**关键词:** 浮放文物; 水平隔震; 竖向减震; 三维隔震; 复位弹簧; 优化设计

**中图分类号:** U442.55 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-8662(2018)02-0116-06

**DOI:** 10.13512/j.hndz.2018.02.017

## Study on 3D Base Isolator for Free-standing Cultural Relics

ZOU Shuang<sup>1,2</sup>, WENLIUHAN·Heisha<sup>1,2</sup>

(1. Earthquake Engineering Research & Test Center, Guangzhou University, Guangzhou 510405, China;

2. Key Laboratory of Earthquake Engineering and Applied Technology in Guangdong Province, Guangzhou 510405, China)

**Abstract:** A novel three-dimensional isolation bearing was proposed, based on respective mechanical characteristic of friction bearing, viscous damper and returning springs. The configuration department was introduced; Taking free-standing cultural relics in the collection as the object of study, the mechanical performance and design parameters of the three-dimensional isolation device are designed. The results show that the proposed three-dimensional isolation bearing has reasonable configuration, explicit mechanical transmission mechanism, suitable isolation stiffness and damping energy performance in horizontal and vertical, good post-earthquake reset function and overall stability.

**Keywords:** Free-standing cultural relics; Horizontal isolation; Vertical shock absorption; Three-dimensional isolation; Returning springs; Optimal design

收稿日期: 2017-12-25

作者简介: 邹爽 (1984-), 女, 博士, 助理研究员, 从事建筑减隔震研究。

E-mail: zoushuang\_2015@163.com.

## 0 前言

馆藏浮放文物具有重要的文化和历史价值,保护意义重大<sup>[1]</sup>。由于在一般情况下,它们以浮放形式为主,因而很容易受到地震破坏。如2008年四川汶川8.0级地震中,至少有216家文物收藏单位的3169件馆藏文物受损;而2013年四川雅安7.0级地震中,259处文物保护单位的349件文物受到不同程度破坏。从文物防震角度讲,我国的现有防震措施以传统的捆、支、粘、卡等形式为主,虽然在一定程度上可减小文物受到的地震作用,但也存在加固效果差、破坏文物,影响外观等问题。建筑减隔震技术的发展,使得减隔震控制技术逐步渗透到博物馆领域,面向馆藏浮放文物的减隔震装置研发越来越受到关注。然而,与国外不断出现的滚轮式、滚轴式、滚珠式、滑轨式等不同形式的隔震装置相比,我国在这方面的相关研究极为匮乏<sup>[2-6]</sup>。

为有效保护馆藏浮放文物,本文在深入调查分析水平减隔震装置、竖向减隔震装置、阻尼器等理论和具体做法的基础上,提出一种具有良好水平和竖向减震效果的新型三维减隔震装置。介绍了该三维减隔震装置的组成构造,并以馆藏浮放文物为研究对象,对该三维减隔震装置的力学性能设计参数进行设计,验证该三维减隔震装置的力学性能和控制效果。同时还进行了减隔震结构抗倾覆稳定性的分析。

## 1 新型三维减隔震装置概要

本文提出一种新型三维减隔震装置,具体构造如图1所示。该新型三维减隔震装置主要由水平隔震支座和竖向减震支座两部分组成。水平隔震支座采用滑移隔震技术,利用聚四氟乙烯板与不锈钢的摩擦降低支座的水平刚度,减小地震能量输入。同时,为了克服摩擦滑移隔震后缺乏复位功能的不足,在水平方向并联水平复位弹簧。竖向减震支座通过黏滞阻尼器提供阻尼,竖向复位弹簧提供竖向刚度,达到降低结构的竖向地震响应的目的。该新型三维减震装置除了具有减隔震功能之外,还可满足水平任意方向的滑动位移要求,可适应任意方向的转角要求,具有良好的转动能力。

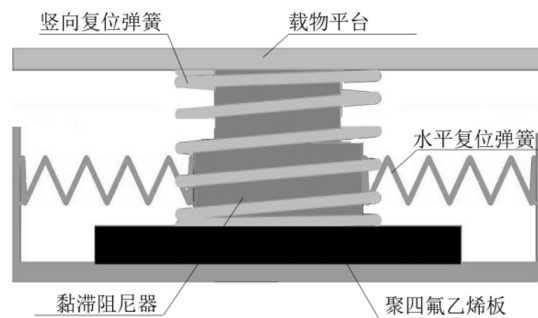


图1 新型三维减隔震装置构造详图

Fig.1 Detail of new type of three-dimensional seismic isolation device

## 2 分析概要

### 2.1 分析模型

分析对象为直接浮放于地板之上的文物。该浮搁文物的结构布置,侧向刚度及质量等均匀对称,属于规则结构。文物高0.5m,宽0.2m,与地板之间的摩擦系数设定为0.4。将该文物浮放于本文提出的新型三维减隔震装置上构成三维减隔震体系,其力学模型如图2所示。

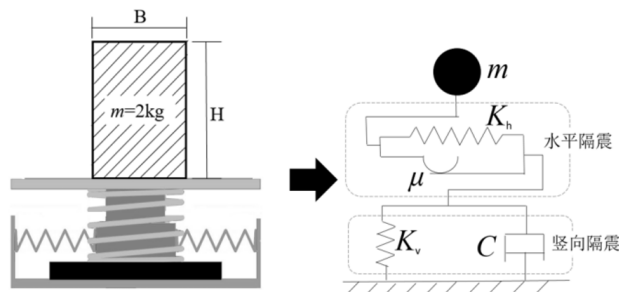


图2 三维减震体系力学分析模型

Fig.2 Mechanical analysis model of three-dimensional seismic isolation system

### 2.2 输入地震动

设计中考虑的地震波如图3所示。输入地震波采用了3条实测地震波和4条模拟地震波。将各地震波加速度峰值分别标准化为200 gal、400 gal、600 gal作为多遇地震、设防地震和罕遇地震来考虑。本文接下来的分析中对多遇地震、设防地震和罕遇地震中所有地震波进行时程反应分析,只将多遇地震、设防地震和罕遇地震作用时浮放文物的最大响应作为评价对象。时程反应分析采用Newmark- $\beta$ 法中 $\beta=1/4$ 的平均加速度法。按照我国新修订的建筑抗震设计规范中的规定,竖向设计谱值取为水平向的65.0%。

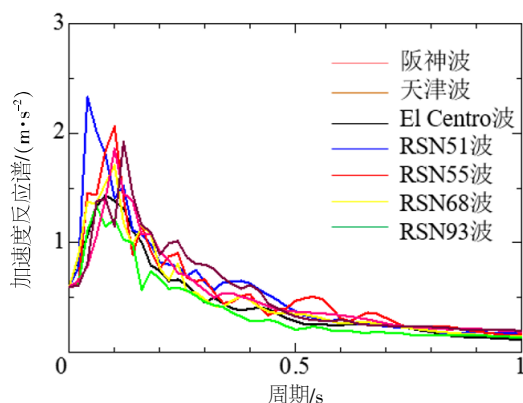


图3 模拟地震波加速度反应谱

Fig.3 Simulated seismic wave acceleration response spectrum

### 3 新型三维减隔震装置的参数设计

由于新型三维减隔震装置在水平和竖直方向上分别发挥减隔震作用,两个方向上的性能参数不耦合,互不影响。所以,本文中分别对新型三维减隔震装置的水平隔震支座部分和竖向减震支座部分的性能参数进行设计,并探讨该减隔震装置力学性能和减隔震效果。

#### 3.1 水平性能参数设计

新型三维减隔震装置的水平隔震部分由聚四氟乙烯平板滑移支座和水平复位弹簧组成。滑移支座产生滑移,摩擦系数对支座的水平隔震性能有直接影响。水平复位弹簧的布置提供水平刚度和回复力,实现滑移后自动复位。水平刚度对隔震性能有重要影响,水平刚度越小,越有利于支座的隔震,但是随刚度的减小,浮放文物与支座的相对位移也将增大。因此,合理的摩擦系数和水平刚度既能保证最大限度的耗散地震输入能量又能够实现震后复位的功能。

##### 3.1.1 参数设计

如上所述,新型三维减隔震装置的水平隔震支座部分包含摩擦系数 $\mu$ 和水平复位弹簧刚度 $K_h$ 两个性能参数。水平隔震支座的力学模型如图4所示。摩擦滑移机构采用以刚塑性为特征的恢复力模型,聚四氟乙烯板与不锈钢板之间的相对滑移产生摩擦力,摩擦力理想化为库伦摩擦力。只要存在运动,摩擦力大小就为常数,其方向与滑移速度方向相反。隔震装置的摩擦力 $F=\mu f$ , $f$ 为摩擦接触面的正压力。水平复位弹簧采用线性模型。

针对于图4所示的水平隔震支座力学模型,探讨其参数优化设计问题。该设计中水平隔震支

座作为设防地震作用时,控制浮放文物的安全装置来考虑。本文采用序列二次规划(Sequential Quadratic Programming, SQP)方法对新型三维隔震装置中水平隔震支座部分的参数进行优化设计。SQP是求解静态受限最优化问题的最优方法之一,在非线性规划中已得到了广泛的应用。与其它优化算法相比,其最突出的优点是收敛性好,计算效率高,边界搜索能力强。

(1) 优化参数:设定如图4所示的水平隔震支座的摩擦系数 $\mu$ 和水平复位弹簧刚度 $K_h$ 为设计参数。

(2) 目标函数:设计目标是在满足设计条件的水平隔震支座各参数组合中,求得使浮放于隔震装置上的文物最大响应加速度 $A_{\max}$ 最小化的性能参数解。

(3) 约束条件:设防地震作用情况下,将浮放文物的最大位移 $D_{\max}$ 控制在0.15 m以内。隔震层的残余位移最大值 $L_{\max}$ 控制在0.05 m范围。

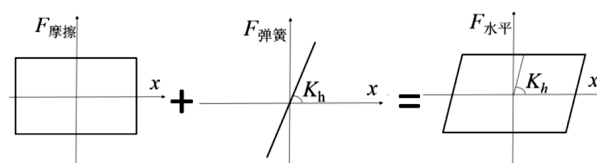


图4 水平隔震装置力学模型

Fig.4 Mechanical model of horizontal isolation device

##### 3.1.2 结果分析

(1) 最优解。在水平隔震支座性能参数可行域内能够搜索到满足约束条件的最优解,如表1所示。

表1 支座性能参数最优解

Table 1 Optimized design variables

摩擦系数 $\mu$	$K_h$ (N/m)
0.088	5.0

(2) 浮放文物水平方向最大地震响应。表2所示为假定文物不发生倾覆破坏的前提下,当多遇地震、设防地震和罕遇地震仅沿水平方向作用时,浮放文物在没有安装新型三维减隔震装置(以下称无支座)和安装了新型三维减隔震装置(以下称有支座)2种情况下,浮放文物的各最大响应值。图5所示为上所述各情况下,浮放文物最大响应位移和最大响应加速度的变化情况。

由表2和图5可知,首先,无支座的情况下,

文物的最大响应加速度不随着输入地震动幅值的增大而变化;而有支座的情况下,虽然文物的最大响应加速度随着输入地震动加速度幅值的增大而增大,但增加的幅度非常小。其次,有支座的浮放文物最大响应加速度在多遇地震、设防地震、罕遇地震作用时,分别被控制在无支座情况下浮放文物最大响应加速度值的 50.0%、62.6%、78.3%以内。因此,对于本文分析的文物而言,浮放比固接更有利于文物抗震,而浮放于新型三维

减隔震装置比浮放于地板的隔震效果更好。

其次,浮放文物的响应位移均随着输入地震动的增大而增加。有支座的情况下,文物的最大响应位移要大于无支座情况下浮放文物的最大响应位移。但是,在有支座的情况下,文物的震后残余变形很小,而无支座的情况下,文物的震后残余变形达到 0.193 mm。由此可知,合理的设计摩擦系数和复位弹簧的刚度,可以有效地实现水平隔震支座震后复位的功能。

表 2 浮放文物最大响应值

Table 2 Maximum response of free-standing cultural relic

状态	多遇地震			设防地震			罕遇地震		
	$D_{\max}/\text{m}$	$A_{\max}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$	$L_{\max}/\text{m}$	$D_{\max}/\text{m}$	$A_{\max}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$	$L_{\max}/\text{m}$	$D_{\max}/\text{m}$	$A_{\max}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$	$L_{\max}/\text{m}$
输入地震动	—	2.00	—	—	4.00	—	—	6.00	—
无支座	0.018	1.98	0.014	0.076	1.98	0.068	0.204	1.98	0.193
有支座	0.052	0.99	0.019	0.150	1.24	0.024	0.273	1.55	0.032
与无支座的比值	—	50.0%	—	—	62.6%	—	—	78.3%	—

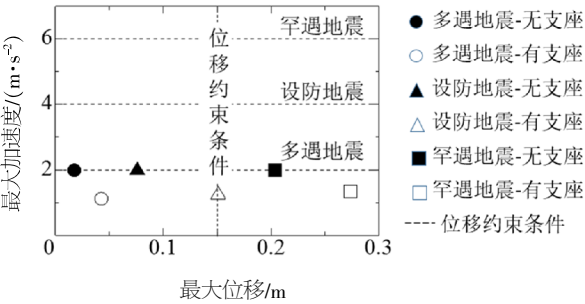


图 5 最大响应值

Fig.5 Maximum response

(3) 时程曲线与滞回曲线。图 6、图 7 所示为设防地震作用时,浮放文物的位移和加速度的时程曲线以及摩擦力的滞回曲线。由图 6 可知,首先,当浮放文物受到的惯性力达到各自摩擦起滑力时,有无支座两种情况下,浮放文物均相对与地面产生滑动位移。但是,由于文物与地板之间的摩擦系数较大,滑动后文物并没有回复到原来位置,而是停留在某一位移处,左右晃动。而有支座的情况,浮放文物相对于地面的残余变形很小。水平复位弹簧的震后复位功能得以验证。其次,对于摩擦滑移隔震而言,摩擦系数大,文物受到的水平惯性力也相应的增大(图 7)。而对于浮搁在地板上,且与地板之间没有约束的文物而言,惯性力越大,就越容易导致倾覆危险的发生。因此,合理设计摩擦系数和水平复位弹簧的刚度,既能够发挥滑移隔震作用,降低文物响应加速度,

保证结构的整体稳定性,又能够克服普通滑移隔震支座残余变形大的缺点。

3.2 竖向性能参数设计

3.2.1 参数设计

新型三维减隔震装置的竖向力学性能由竖向放置的黏滞阻尼器和竖向复位弹簧的力学性能决定。黏滞阻尼器的力学模型可表示为:

$$F=CV^\alpha \tag{1}$$

式中,  $F$  为黏滞阻尼器输出的阻尼力;  $C$  为黏滞阻尼器阻尼系数,是由计算分析确定的常数;  $V$  为黏滞阻尼器活塞的运动速度;  $\alpha$  为阻尼指数,本文中假定阻尼器为速度线性相关(即阻尼指数  $\alpha=1$ )。并采用以下步骤确定黏滞阻尼器的阻尼系数  $C$  和竖向弹簧刚度  $K_V$ 。

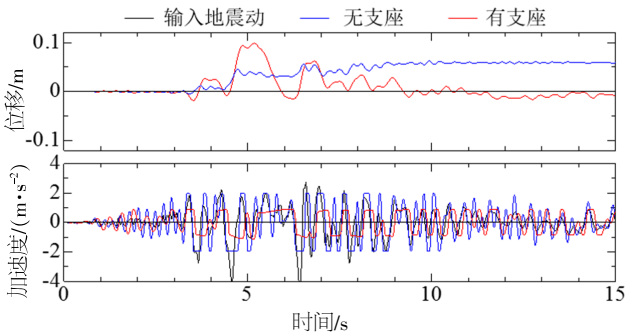
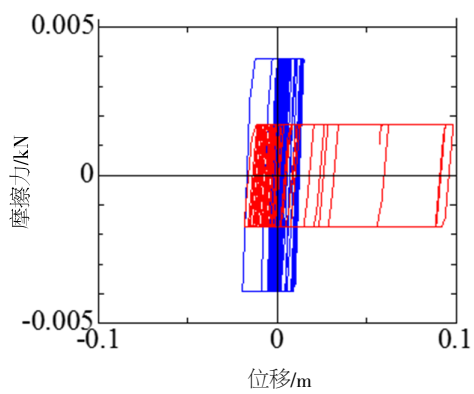
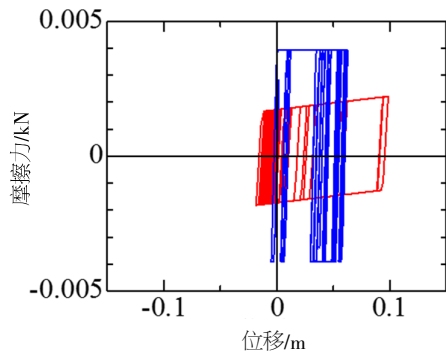


图 6 时程曲线(阪神波, 设防地震)

Fig.6 Response time history



(a) 摩擦力滞回曲线



(b) 惯性力滞回曲线

图7 滞回曲线(阪神波, 设防地震)

Fig.7 Hysteresis loops of the isolated story and the Friction damper

(1) 设定结构预期减震目标, 估算结构所需的附加阻尼比。取黏滞阻尼器附加给新型三维减隔震体系的有效阻尼比  $h$  为 20%。

$$h=\frac{C_0}{2\sqrt{km}} \tag{2}$$

式(2)中,  $k$  为竖向弹簧刚度;  $m$  为浮放文物的质量;  $C_0$  为线性阻尼系数。

(2) 根据结构所需的附加阻尼比估算线性阻尼系数  $C_0$ 。

(3) 根据实际计算的阻尼力、浮放文物的位移和加速度响应情况, 调整阻尼系数和弹簧刚度, 使得黏滞阻尼器和复位弹簧充分发挥各自的作用。最终选取黏滞阻尼器的线性阻尼系数为 0.013 Ns/m, 竖向弹簧刚度为 0.5 N/m。

3.2.2 结果分析

表 3 所示为当多遇地震、设防地震和罕遇地震仅沿竖直方向作用时, 浮放文物在无支座和有支座 2 种情况下, 浮放文物的各最大响应值。图 8 所示为上所述各情况下, 隔震层最大响应位移和文物最大响应加速度的变化情况。

由表 3 和图 8 可知, 在多遇地震、设防地震以及罕遇地震作用时, 三维减隔震体系的竖向加速度均控制在地面输入加速度的 46.2%以内。竖向减震支座起到良好的减震效果。

表 3 浮放文物最大响应值

Table 3 Maximum response of free-standing cultural relic

状态	多遇地震		设防地震		罕遇地震	
	$D_{\max}/\text{m}$	$A_{\max}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$	$D_{\max}/\text{m}$	$A_{\max}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$	$D_{\max}/\text{m}$	$A_{\max}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$
输入地震动	—	1.30	—	2.60	—	3.90
有支座	0.029	0.60	0.058	1.20	0.087	1.80
与输入加速度的比值	—	46.2%	—	46.2%	—	46.2%

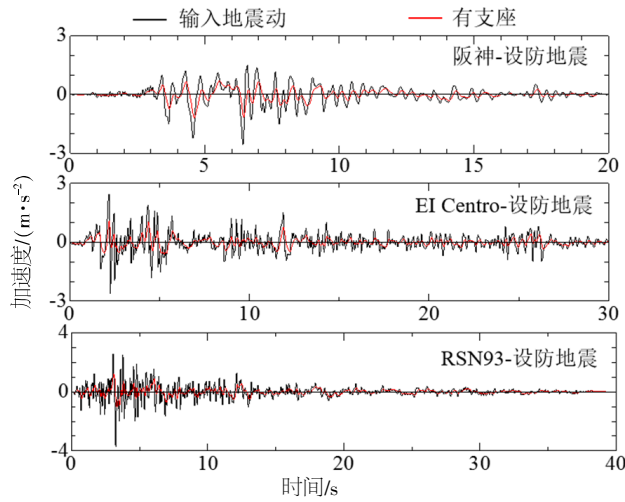


图8 加速度时程曲线

Fig.8 Acceleration time history curves

由表 3 和图 9 可知, 隔震层竖向最大位移在多遇地震时不超过 3 mm, 设防地震作用时不超过 6 mm, 罕遇地震作用时不超过 9 mm, 且均无竖向残余变形。据此可以为三维减隔震支座的尺寸设计提供理论依据。

4 抗倾覆稳定性分析

馆藏文物浮搁在地板上, 文物与地板之间没有竖向约束, 在地震中依靠自身的有效重量来提供抗倾覆力矩, 但当自身的重力稳定力矩不能满足要求时, 地震作用会导致倾覆危险的发生。结构在地震中发生倾倒是一个不但与地面运动的各种特性有关, 而且同结构本身的约束条件、高宽

比及尺寸大小等因素有关的极为复杂的动力反应过程。然而根据地震时的结构最大水平惯性力所产生的倾覆力矩只要不大于结构的总抗倾覆力矩的这个充分条件(式子 2 所示),就不会发生倾覆问题。尽管这种充分条件对于结构是否发生地震倾覆的判断是很保守,但在当前关于地震倾覆的动力反应判断尚未问世的情况下,它是绝对安全和可靠的。

$$ma \frac{H}{2} \leq mg \frac{B}{2} \quad (3)$$

式(3)中,  $H$  为浮放文物的总高度,  $B$  为浮放文物底部长度。将安装了新型减隔震支座情况下浮放文物的水平向最大响应加速度带结构整体抗倾覆稳定性分析公式 2 可知,多遇地震、设防地震和罕遇地震作用时,本文中的分析对象均不会发生倾覆破坏(如表 4 所示)。

表 4 倾覆验算

Table 4 Overturning checking

地震级别	水平峰值加速度/( $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ )	$maH/2$	$mgB/2$	倾覆判断
多遇地震	0.994	0.497		不倾覆
设防地震	1.239	0.620	1.960	不倾覆
罕遇地震	1.545	0.773		不倾覆

5 结语

本文提出了一种新型三维减隔震装置。并以一浮放于新型三维减隔震装置上的文物为分析对象,对该新型三维减隔震装置的性能参数进行设计,探讨了新型三维减隔震装置的力学性能和控制效果,研究结果表明:

(1) 具有适当性能参数的新型三维减隔震装置,能够有效降低结构地震反应。浮放于新型减隔震装置上的文物的水平加速度在多遇地震、设防地震、罕遇地震作用时分别可控制在地面输入水平加速度的 50.0%、30.0%、25%以内。竖向加速度在多遇地震、设防地震、罕遇地震作用时均可控制在地面输入加速度的 46.0%以内。

(2) 合理地设计新型三维减隔震装置的力学性能参数,能够克服各组成部分的不足,取长补短,充分发挥各组成部分的减隔震作用,降低浮放文物的地震响应。

(3) 隔震结构抗倾覆稳定性分析结果表明,该新型三维减隔震体系整体抗倾覆稳定性良好,

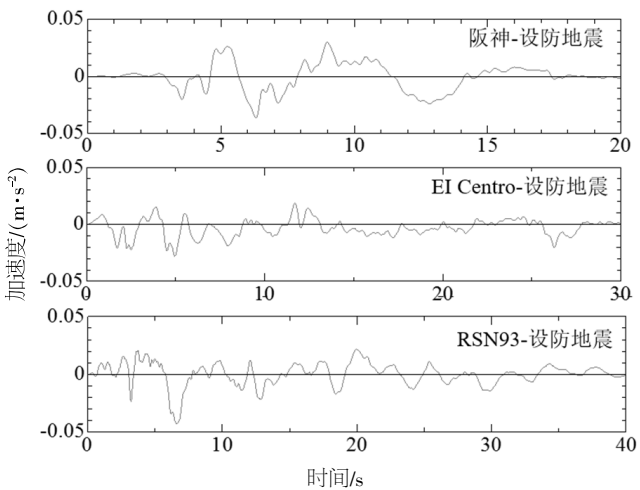


图 9 位移时程曲线

Fig.9 Displacement time history curves

该隔震装置可有效保护浮放结构在多遇地震、设防地震以及罕遇地震作用下的安全。

(4) 理论分析结果表明,该装置具有很好的减隔震效果,因而具有很好的应用前景。后续工作将通过开展系列试验,以对本减隔震装置的效果进一步验证及完善。

参考文献:

[1] 孟庆利. 博物馆展陈浮放文物隔震装置研发[C]. 北京:全国结构减震控制学术会议,2015.

[2] 吴来明,王忠良,高华平. 博物馆文物的仿真保护研究(1)—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.

[3] 钮泽蓁. 陈列文物抗震措施试验研究[J]. 工程抗震,1992(2):27-31.

[4] 周乾. 汶川地震可移动文物灾害研究[J]. 文物保护与考古科学,2010,22(3):36-43.

[5] 周乾,闫维明,纪金豹. 馆藏浮放文物隔震装置的开发与应用[J]. 防灾减灾工程学报,2013,22(20):147-154.

[6] 周乾,闫维明,周锡元. 我国博物馆陈列文物仿真技术现状研究[J]. 灾害学,2010,2(B10):201-206.

[7] 贾俊峰,欧进萍,刘明,等. 新型三维隔震装置力学性能试验研究[J]. 土木建筑与环境工程,2012,34(1):29-34.

[8] 肖华宁. 浮放设备三维减隔震装置研究 [D]. 中国地震局工程力学研究所,2008.

[9] 李雄彦,薛素铎. 摩擦-碟簧三维复合隔震支座的性能试验研究[J]. 世界地震工程,2011,27(3):1-7.

[10] 周乾,闫维明,关宏志. 平行连杆单摆式文物隔震装置性能分析[J]. 水利与建筑学报,2014,12(1):26-29.