

文章编号:1671-8879(2014)03-0092-07

基于新型摩擦滑移隔振装置的 框架模型地震响应

王社良¹, 樊禹江¹, 陈 琪², 杨佳玲³

(1. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 西安市政设计研究院有限公司, 陕西 西安 710065;
3. 西安理工大学 土木建筑工程学院, 陕西 西安 710048)

摘 要:基于二硫化钼这种摩擦滑移材料,设计并制作了 1 种新型摩擦滑移隔震支座,通过对该滑移支座进行相关的摩擦因数试验,获得了该装置摩擦因数计算公式。利用 ABAQUS 有限元分析软件,建立了应用该新型摩擦滑移隔振装置的 5 层试验框架及相应抗震结构的有限元分析模型,并探讨了该抗震与隔震结构模型在 EL Centro 波 3 种地震烈度水平单向输入下的位移和加速度响应的主要规律。研究表明:该新型摩擦滑移装置使得框架模型在隔震层以上仅发生刚体平动且层间位移较小的同时,各层加速度响应较之对应的抗震结构大幅降低,从而有效地改善了该类结构的抗震性能,保护了上部主体结构。

关键词:土木工程;二硫化钼;摩擦滑移;隔震支座;有限元模型;地震响应分析

中图分类号:TU352.12

文献标志码:A

Earthquake response of framework model based on a new type of frictional sliding isolation

WANG She-liang¹, FAN Yu-jiang¹, CHEN Qi², YNAG Jia-ling³

(1. School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, Shaanxi, China; 2. Xi'an Municipal Engineering Design & Research Institute Co Ltd, Xi'an 710065, Shaanxi, China; 3. School of Civil Engineering and Architecture, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, Shaanxi, China)

Abstract: A new type of frictional sliding isolation bearing was designed and produced based on the frictional sliding material-molybdenum disulfide. Friction coefficient test was carried out for the sliding bearing, and friction coefficient formula for the device was obtained. Finite element analysis model for the 5-layer test framework with the new frictional sliding isolation device was established with ABAQUS finite element analysis software. The main laws of displacement and acceleration response for seismic structure and isolation structure model were researched under EL-Centro seismic wave with three intensity levels through horizontal unidirectional input. The results show that only rigid motion is allowed for the part of the structure above isolation layer and the story drift is much smaller, meanwhile, compared with seismic structure, the acceleration

收稿日期:2013-05-06

基金项目:国家自然科学基金项目(51178388,51008245,51108035);陕西省教育厅重点实验室科研计划项目(11JS059,12JS055)

作者简介:王社良(1956-),男,陕西西安人,教授,博士研究生导师,E-mail:wangshel@aliyun.com。

response is significantly reduced, which can effectively improve the seismic performance of the structure and protect the upper part of it. 11 figs, 12 refs.

Key words: civil engineering; molybdenum disulfide; frictional sliding; isolation bearing; finite element model; seismic response analysis

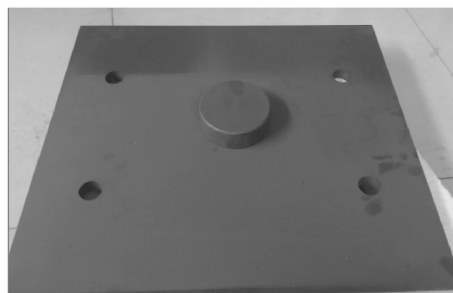
0 引言

近年来,大量橡胶隔震支座不断被应用于工程实际之中,相应的隔震理论有了更为深入的研究。同时伴随着大量新型功能材料的研发,应用此类新材料的隔震支座亦不断涌现。1985 年,楼永林等将石墨膏及树脂薄板应用于多层砌体房屋的隔震层之中,并进行了相关的动力性能试验,并利用所得结果优化了此类隔震层的构造措施^[1];周福霖等对橡胶隔震支座进行了广泛的理论与试验研究,同时进行了相应的振动台试验,从而有效保证了此种隔震技术的安全、可靠性,并在中国实际工程中大量应用,取得了较好的结果^[2-4];2006 年,Fenz 等提出了一种新型双面摩擦摆隔震支座,并对该支座进行了刚度、粘滞阻尼比等相关理论的分析,同时进行了相应的试验研究^[5];2010 年,Soni 等对所提出双面摩擦摆隔震支座的隔震性能进行了相应的试验研究,结果表明该双面摩擦摆隔震支座滞回性能良好,且具有稳定的工作性能^[6]。基于此,本文基于中国科学院兰州物理化学研究所提供的二硫化钼固体润滑涂层材料,设计并制作了一种新型摩擦滑移隔震装置,同时进行了相应的摩擦因数测定试验;最后利用 ABAQUS 有限元软件对所设计的 5 层框架结构模型,分别在未采用及采用该隔振装置 2 种工况下进行了模拟地震响应分析。

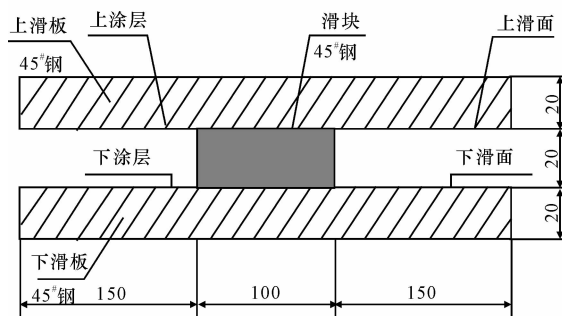
1 新型摩擦滑移隔震支座的构造

在摩擦滑移隔震体系中,地震输入能量由于隔震层的水平滑动而被消耗,仅有极少部分的地震能量传入上部结构之中。但滑移隔震层的摩擦因数不能过小,否则会导致结构在较小扰动下发生滑动,从而影响结构的正常使用^[7-8]。本文所提出的隔震装置分别由上滑板、中间滑块及下滑板组成,同时在滑移板表面涂有二硫化钼固体润滑材料^[9]。新型摩擦滑移装置实物图及相应的构造如图 1 所示。

摩擦滑移的隔震效果主要取决于滑移层的摩擦因数。然而,摩擦滑移是一个高度非线性的运动过程,故而摩擦因数的确定并不单纯决定于所采用的



(a) 下滑板及滑块



(b) 剖面图

单位: mm

图 1 新型摩擦滑移装置的构造设计

Fig. 1 Construction of new frictional sliding isolation device

摩擦材料,而是由接触面积、竖向荷载等条件综合决定的。因此,在进行实际应用该隔振装置进行振动台试验之前,必须进行相应的摩擦因数确定试验。本次摩擦因数测定试验共分 3 组进行。前 2 组为喷涂了二硫化钼润滑剂的滑移隔震支座;第 3 组为加入碳纤维布的滑移隔震支座,与前 2 组进行对比,以验证二硫化钼作为摩擦滑移材料的稳定性。

试验开始后,固定滑移支座的上下盖板,按照预设正向压力,施加竖向荷载。之后开始对滑块进行水平加载直至滑块开始滑动,在此过程中,记录相应的水平荷载与竖向荷载。当滑块开始滑动后,继续加载并保证滑块匀速运动,直至位移计读数为 6 mm 时停止。然后对该摩擦滑移支座进行反向水平加载。每次试验将此加载过程循环 2 次,记录相应的试验数据。下页图 2 为摩擦滑移支座测定摩擦因数试验装置图。

由于支座摩擦因数在滑动过程与竖向荷载的大小重要关系^[9],故而在本次摩擦因数测定试验中,

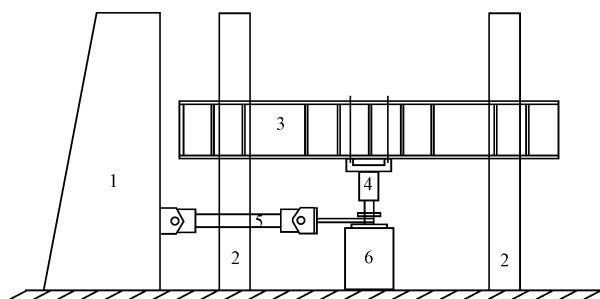


图2 试验装置

Fig. 2 Test device

注:1-反力墙;2-反力架;3-反力梁;4-油压千斤顶;5-伺服作动器;
6-支座

通过改变不同竖向荷载,测定了其摩擦因数的变化规律。图3为3组支座在不同压应力下所测摩擦因数。当上述试验结束后发现,前2组试件涂层材料与滑块磨损较为轻微,几乎完好,而第3组试件(隔震层中加入碳纤维布)虽然在整个试验过程中,所测摩擦因数均大于前2组试件,但在试验结束后发现碳纤维布严重撕裂,破坏严重。

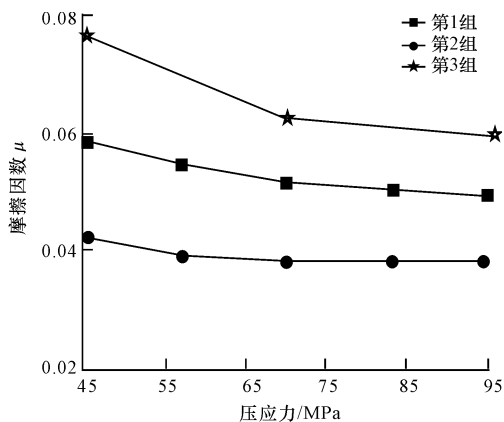


图3 不同压应力作用下材料的摩擦因数

Fig. 3 Friction coefficients of material under different compressive stresses

通过上述试验表明:喷涂了二硫化钼材料的摩擦滑移支座工作性能较为稳定,同时随着加载过程的进行,摩擦对于支座的损害程度较小。最后根据试验所得摩擦因数与竖向荷载 σ 间关系,利用最小二乘法进行公式拟合(如图4所示),所得结果为

$$\mu = 0.04358 + 0.08883e^{-\frac{\sigma}{17.44575}} \quad (1)$$

2 框架结构有限元模型的建立

2.1 振动台试验模型基本概况

本文以后续采用了该新型摩擦滑移隔震支座的5层钢筋混凝土框架模型为研究对象,利用ABAQUS有限元软件分别建立了未采用及采用摩

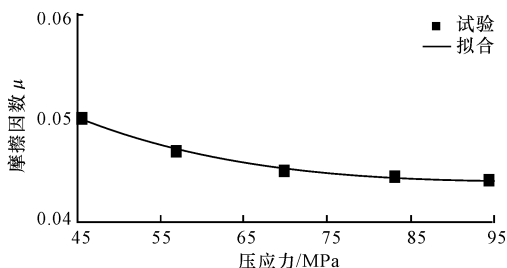


图4 摩擦因数随竖向压应力变化曲线

Fig. 4 Friction coefficient with vertical compressive stress curve

擦滑移隔震支座的5层框架结构模型(缩尺比例为1:5),并对其进行了相应的地震响应分析。其中,该5层混凝土框架模型平面图与剖面图如下页图5所示(注:框架中混凝土块为人工配重,每层4块,在有限元模型中则以荷载的形式施加于模型中)。

2.2 有限元模型的建立

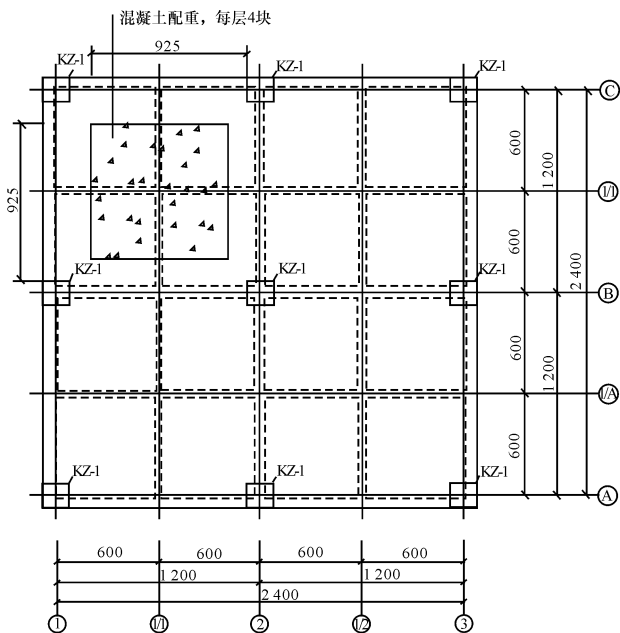
由于实际滑移摩擦结构的复杂性,为简化计算,假定模型中梁、板、柱等构件在整个加载过程中始终处于线弹性状态,且弹性模量采用等效弹模(混凝土弹模与钢筋等效弹模之和)。框架柱、梁、节点及楼板之间的相互连接均采用绑扎方式。其中,梁、柱节点采用ABAQUS中所提供的线性梁B3单元进行建模,该单元允许在发生剪切变形的同时考虑轴向应变^[10];楼板采用Standard模块中S4R单元,而基础板及结构底板采用实体单元C3D8以便建立摩擦接触对,从而方便实现隔震层的模拟;最后利用ABAQUS中的摩擦模型在模型基础板顶面(主控表面)与底板底面(从属表面)建立相应的接触对以模拟隔震层的摩擦滑移^[11],同时在实际计算时将隔震层摩擦因数设为0.05。利用该种方式建立的摩擦隔震层,能够较好地考虑两接触面间所传递的切向应力和法向应力。利用ABAQUS建立5层框架振动台模型的抗震和隔震有限元模型如下页图6、图7所示。

3 结构地震反应分析

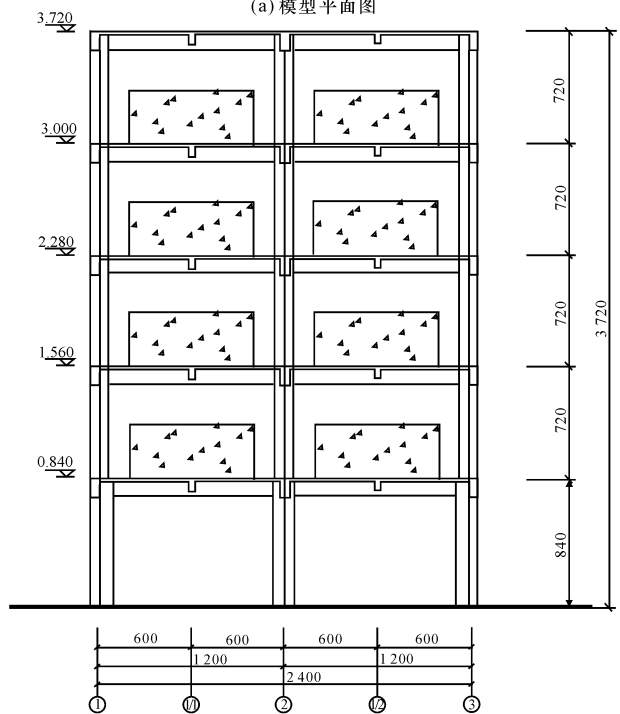
根据中国《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2008)中对于时程分析法进行结构计算的要求:将EL-Centro地震波加速度峰值分别在7、8、9度3种不同烈度下调幅为220、400、620 Gal(10^{-2} m/s^2)之后,对所建立的模型进行水平单向输入^[12]。

3.1 结构位移响应分析

对EL-Centro波不同烈度作用下抗震、隔震2种结构各层的位移响应进行分析,探讨了2种结构



(a) 模型平面图



(b) 模型剖面图

单位: mm

图5 模型平面图与剖面图

Fig. 5 Plane and section of framework model

各层最大位移、层间位移及位移时程响应的变化规律。所得结果如下页图8、图9所示。

由上述对2种结构分别在EL-Centro波不同烈度作用下的位移响应分析可得如下结论。

(1)对于抗震结构而言,其各层位移最大地震响应随烈度提高不断增大,其中各烈度地震作用下顶层位移最大,在9度时顶层最大位移为9.86 mm,而7度时仅为3.5 mm。抗震结构的层间位移则呈

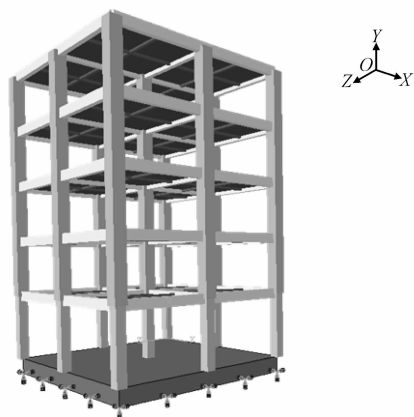


图6 抗震有限元模型

Fig. 6 Finite element model of seismic structure

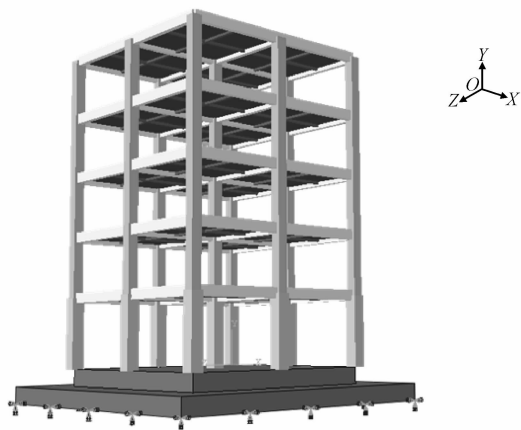


图7 隔震有限元模型

Fig. 7 Finite element model of isolation structure

现出典型的剪切变形特点,即随着楼层的增加而不断减小。

(2)对于隔震结构而言,各烈度下最大位移依然发生于顶层且随着烈度的增加而不断增加,其值分别达到了19.55、55.65、144.93 mm,但此时层间位移则不再表现为剪切变形的特征,此时最大层间位移主要发生在隔震层,其值分别达到18.728、54.905、144.228 mm,相较于抗震结构在该层的位移,明显增大。而上部结构的层间位移很小,且随烈度的增大变化不大,以第1层的层间位移为例,其层间位移分别为0.356、0.332、0.330 mm,分别为抗震结构的24.45%、12.54%、8%(抗震结构首层层间位移分别为1.456、2.648、4.104 mm)。

3.2 结构加速度响应分析

对EL-Centro波不同烈度水准下抗震、隔震2种结构各层的加速度响应进行分析,探讨了2种结

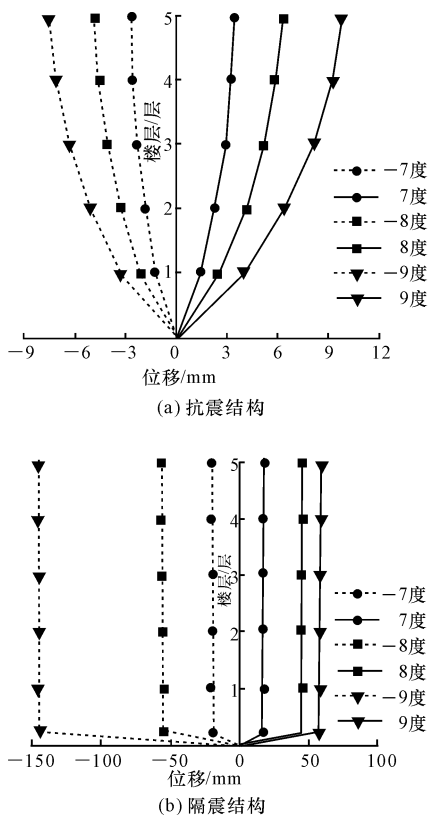


图 8 EL-Centro 波下各层最大位移响应包络

Fig. 8 Envelope of maximum structure displacement response under EL-Centro wave

构各层最大加速度以及加速度时程响应的变化规律。所得结果如下页图 10、图 11 所示。

由上述 2 种结构在 EL-Centro 波下不同烈度下的结构加速度响应分析可得以下结论。

(1)对于抗震结构各楼层最大加速度响应随着地震烈度的提高明显增大,其中结构顶层最大加速度分别为 4.019 、 7.308 、 11.328 m/s^2 ,9 度时约为 7 度时的 2.8 倍;并且随着楼层的增加,其值亦在不断增大,其中,在 9 度罕遇地震作用下各层最大加速度分别为 6.338 、 7.883 、 9.329 、 10.595 、 11.328 m/s^2 ,顶层最大加速度约为 1 层的 1.8 倍。同时由下页图 10 可得:在 1 层与 2 层处,最大加速值出现突变点,其原因在于 1、2 层柱截面变化而导致了楼层刚度发生了较大的变化。

(2)对于隔震结构,各层最大加速度响应相较于抗震结构而言明显减小,以顶层最大加速度为例,其不同烈度下分别为 1.673 、 1.926 、 2.04 m/s^2 ,仅为抗震结构的 41.6%、26.4%、18.0%;同时随着烈度的增加,加速度响应却增加不大,表明隔震效果越好。对于隔震结构,其上部结构各层最大加速度响应亦随着楼层的增加不断增大,但增大的幅度很小,

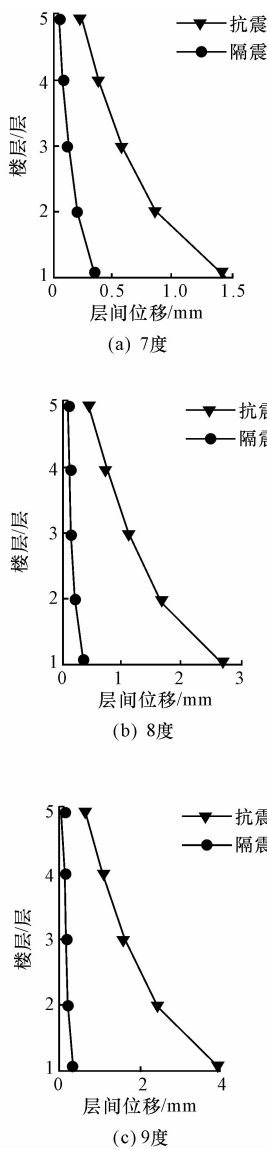


图 9 EL-Centro 波下结构层间位移包络

Fig. 9 Envelope of story drift response under EL-Centro wave 以 9 度各层最大加速度为例,其值分别为 1.699 (模型底板)、 1.111 、 1.303 、 1.550 、 1.858 、 1.667 m/s^2 ,顶层加速度仅为 1 层的 1.5 倍。而由图 10 可发现,由于柱截面的变化而导致楼层刚度变化所造成的加速度突变现象。

(3)由图 11 所示 EL-Centro 波下 2 种结构顶层加速度时程曲线可知,新型隔震装置能够有效降低结构的地震加速度响应,并且随着烈度的增加,上部结构加速度响应增加幅度却并不明显,表明隔震效果越好。

4 结 语

(1)基于新型滑移层固体润滑剂材料——二硫化钼,设计制作了 2 组喷涂二硫化钼及 1 组碳纤

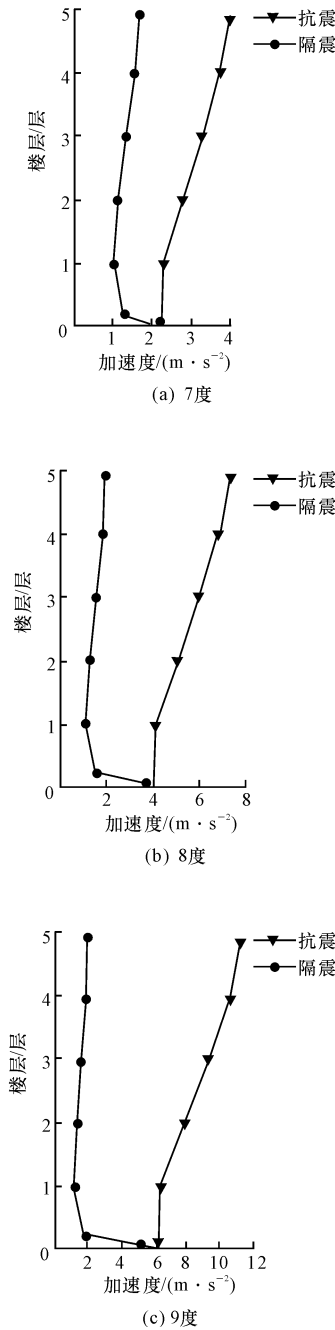


图 10 EL-Centro 波下各层最大加速度响应包络
Fig. 10 Envelope of maximum structure acceleration response under EL-Centro wave

维布摩擦滑移隔振支座,并进行了摩擦因数测定的对比试验。试验结果表明:二硫化钼能够持续稳定的工作,适于工程结构的应用。利用试验所得摩擦因数与竖向荷载间的关系,拟合了相应的计算公式。

(2)利用 ABAQUS 有限元软件分别建立了抗震与隔震 5 层框架模型,并施加水平单向 3 种不同烈度水准下的 EL-Centro 地震波,由计算结果可知:设置有新型摩擦滑移隔震装置的框架结构模型较之

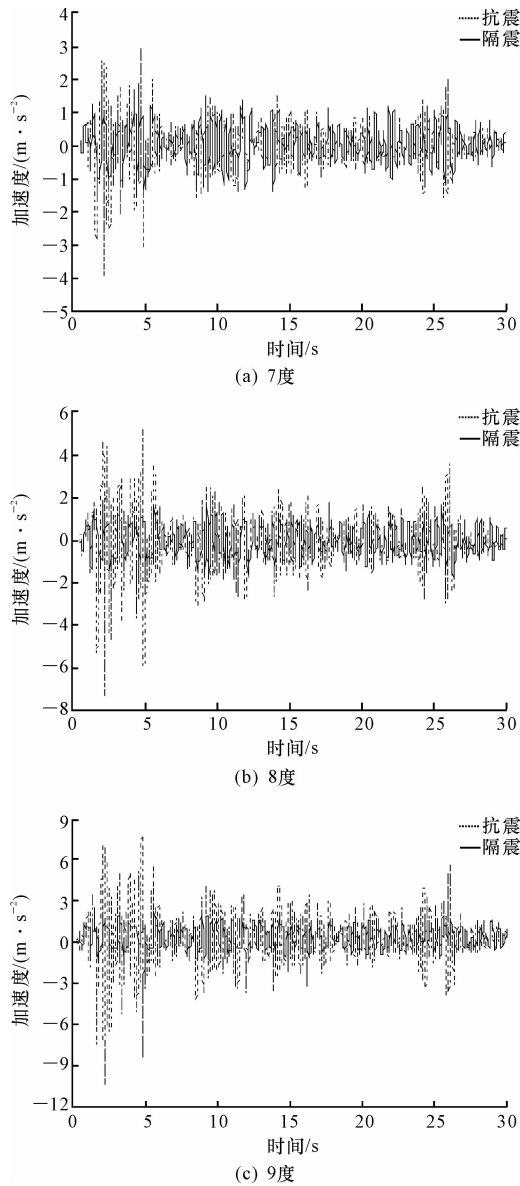


图 11 EL-Centro 波下顶层加速度时程
Fig. 11 Time acceleration response of top-layer under EL-Centro wave

抗震结构,结构地震响应明显减弱。其中,隔震结构最大位移仅发生在隔震层,而上部结构层间位移较小,几乎可以认为仅发生刚体平动;而加速度响应较之抗震结构降低更为明显,以顶层加速度为例平均降低了 28.7%,并且上部结构各层加速度响应随着烈度的增加,基本保持不变,即随着烈度的增加,隔震效果越好。

(3)利用 ABAQUS 有限元软件对所设计的 5 层混凝土框架模型进行了水平单向地震作用下的结构反应分析,未能对该模型进行水平双向及竖向地震响应分析,此方面仍需进一步研究。但该分析方法较为全面地验证了该新型滑移装置的有效性,并

能够为该隔震系统的工程应用提供必要的理论参考。

参考文献:

References:

- [1] 楼永林,王敏权. 多层砖房底部滑移减震研究[J]. 建筑结构学报,1994,15(1):24-31.
LOU Yong-lin, WANG Min-quan. The bottom slip damping research of multilayer brick[J]. Journal of Building Structures,1994,15(1):24-31. (in Chinese)
- [2] 周福霖,谭平,冼巧玲,等. 房屋隔震体系的研究与应用(英文)[J]. 建筑科学与工程学报,2006,23(2):1-8.
ZHOU Fu-lin, TAN Ping, XIAN Qiao-ling, et al. Research and application of seismic isolation system for building structures[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering,2006,23(2):1-8. (in Chinese)
- [3] 张文芳,李爱群,程文灏,等. 建筑物滑移隔震研究现状及新进展[J]. 东南大学学报,1997,27(增1):45-50.
ZHANG Wen-fang, LI Ai-qun, CHENG Wen-rang, et al. Present situation and new development of sliding isolation of building vibration[J]. Journal of Southeast University,1997,27(S1):45-50. (in Chinese)
- [4] 曾德民. 橡胶隔震支座的刚度特征与隔震建筑的性能试验研究[D]. 北京:中国建筑科学研究院,2007.
ZENG De-min. Test and analysis on performance of rubber bearing and seismically isolated building[D]. Beijing:China Academy of Building Research,2007. (in Chinese)
- [5] Fenz D M, Constantinos M C. Behaviour of the double concave friction pendulum bearing[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics,2006,35(11):1403-1424.
- [6] Soni D P, Mistry B B, Panchal V R. Seismic response of the double variable frequency pendulum isolator[J]. Structural Control and Health Monitoring,2011,18(4):450-470.
- [7] 黄伟,丰定国. 大开间砖混结构滑移隔震试验研究[J]. 工业建筑,2005,35(12):47-50.
HUANG Wei, FENG Ding-guo. Test and research on sliding and shock insulation of large bay reinforced concrete and brick construction[J]. Industrial Construction,2005,35(12):47-50. (in Chinese)
- [8] 熊仲明,王清敏,丰定国,等. 基础滑移隔震房屋滑移位移的简化计算[J]. 西安建筑科技大学学报:自然科学版,1998,30(3):301-303.
XIONG Zhong-ming, WANG Qing-min, FENG Ding-guo, et al. Simplified calculation of sliding displacement on structure building with sliding base isolation[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology: Natural Science Edition,1998,30(3):301-303. (in Chinese)
- [9] 陈琪. 新型滑移隔震试验框架模型结构设计与分析[D]. 西安:西安建筑科技大学,2012.
CHEN Qi. Application and research of a new kind of sliding isolation technology using in buildings[D]. Xi'an, Xi'an University of Architecture and Technology,2012. (in Chinese)
- [10] 庄茁,张帆,岑松,等. ABAQUS非线性有限元分析与实例[M]. 北京:科学出版社,2005.
ZHUANG Zhuo, ZHANG Fan, CEN Song, et al. Abaqus nonlinear finite element analysis and examples[M]. Beijing:Science Press,2005. (in Chinese)
- [11] 石亦平,周玉蓉. ABAQUS有限元分析实例详解[M]. 北京:机械工业出版社,2006.
SHI Yi-ping, ZHOU Yu-rong. Abaqus finite element analysis and example explanation[M]. Beijing:Mechanical Industry Press,2006. (in Chinese)
- [12] GB 50011—2008,建筑抗震设计规范[S].
GB 50011—2008, Seismic design code[S]. (in Chinese)

