

新型摩擦滑移隔震模型地震反应分析

马艳¹, 王社良¹, 刘军生^{1,2}, 马予骁¹, 展猛¹

(1. 西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 陕西省建筑科学研究院, 陕西 西安 710082)

摘要: 采用新型固体摩擦滑移材料二硫化钼作为涂层材料, 提出了一种应用于框架结构既能隔震又能消能的新型分离式摩擦滑移隔震系统. 设计制作了1个相似比为1/5的5层钢筋混凝土框架隔震试验模型结构, 同时采用ANSYS有限元分析软件, 建立了该试验模型结构的有限元分析模型, 进行了不同试验工况下模型结构的地震响应分析. 研究表明, 安装新型摩擦滑移隔震装置后, 上部结构的地震响应基本为平动, 加速度、层间相对位移、楼层地震剪力等显著减小, 说明文中采用新型固体摩擦滑移材料二硫化钼作为涂层材料的新摩擦滑移隔震装置能够明显地降低框架结构的地震响应, 隔震效果明显. 另外, 只要确定合理的构造以及实施方案, 这种装置能够满足框架结构的隔震减震要求, 应用实际工程结构.

关键词: 摩擦滑移; 地震响应; 隔震; 框架结构; 隔震装置

中图分类号: TU37

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2014)05-0692-04

目前, 使用最多的结构隔震形式是橡胶垫隔震和摩擦滑移隔震两种形式^[1-2], 而摩擦滑移隔震结构因其相对低廉的造价和简易的施工更受到人们的追捧和研究. 国内外学者对此也进行了一些研究, 李大望等^[3]把滑移隔震结构简化为单自由度体系, 建立了相应的非线性随机微分方程, 等效线性化得到了隔震层的速度、位移联合概率密度. 李宏男等^[4]利用数值积分的计算方法得出了多层砌体房屋高宽比限值的统计值(在实际地震作用下的抗倾覆高宽比). 姚谦峰等^[5]进行了振动台试验, 从多自由度剪切型隔震结构等代模型的振动特性入手, 就基础滑移隔震结构的滑动状态进行了讨论. 熊仲明等^[6]对三层足尺砌体房屋模型的基础隔震进行了试验研究. 鬼头健三郎和山下兴家^[7]提出了在基础与柱脚处相对设置盘状凹面, 再在其间放入球体来支承建筑物的隔震方案. 但常用的摩擦滑移材料聚四氟乙烯存在着冷流性、熔体的粘度很高、附着性差和高温下会分解出有毒气体等问题, 而其他多数元件因材料短缺、价格昂贵或加工工艺复杂, 在工程上的应用并不是很广^[8-9].

针对以上不足, 提出了一种以二硫化钼作为涂层材料的新摩擦滑移隔震体系, 设计制作了一个五层钢筋混凝土框架结构试验模型, 并根据模型建立了ANSYS有限元分析计算模型, 进行了不同试验工况下模型结构的地震响应分析, 为进行振动台试验提供了理论依据, 以期为实际工程提供参考.

1 摩擦滑移隔震结构试验模型设计制作

1.1 相似系数选取

以振动台模拟地震作用, 是如今一种重要的研究抗震的试验方法, 此法可以得到地震作用下结构的动力反应, 故可以此为依据指导设计. 根据本校现有振动台参数, 需要对实际尺寸结构进行缩尺处理. 本试验参考文献[10]推导的一致相似率进行模型设计.

1.2 模型设计

常用于基础隔震体系有很多^[11-13], 文中的隔震装置由上下滑移板及中央滑块组成, 其中滑移板表面使用国内外从未使用过的新型滑移材料固体润滑剂二硫化钼进行处理. 在综合考虑振动台承载能力(30 t)的基础上, 确定模型的缩尺比为1:5, 模型采用欠人工质量模型, 其中 m_p 为603.75 t, m_{op} 为476.58 t; m_m 为4.80 t, 模型底板重量为4.18 t, 模型中活载、非结构构件及人工质量合计为13.05 t. 则模型相似关系如表1所示.

为模拟层间隔震效果, 本试验还制作了结构屋面的一个水箱, 最终确立模型为五层的钢筋混凝土框架结构, 如图1所示.

表1 模型相似比

Tab.1 Model similarity ratio	
物理量	相似比
长度	$l_r = 0.2$
弹性模量	$E_r = 1$
等效密度	$\bar{\rho}_r = \frac{m_m + m_a + m_{om}}{l_r^3(m_p + m_{op})} = 2.55$
应力	$\sigma_r = 0.61$
时间	$t_r = l_r \sqrt{\bar{\rho}_r} = 0.32$
变位	$r_r = l_r = 0.2$
速度	$v_r = \sqrt{l_r / \bar{\rho}_r} = 0.63$
加速度	$a_r = 1 / (l_r \bar{\rho}_r) = 1.97$
频率	$\omega_r = \sqrt{l_r / \bar{\rho}_r} / l_r = 3.14$

收稿日期: 2013-10-23

修改稿日期: 2014-09-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(51178388); 陕西省教育厅重点实验室科研计划项目(11JS059, 12JS055); 重点实验室访问学者项目(12JS056)

作者简介: 马艳(1981-), 女, 博士研究生, 主要从事结构滑移隔震研究. E-mail: ziyeeaa@sina.com

2 ANSYS 有限元分析模型建立

2.1 模型概况

本模型是五层钢筋混凝土框架结构,其主要组成部分包括梁、柱、楼板、混凝土配重,以及模拟层间滑移隔震时需要加在屋面上的水箱.为了对比隔震体系与抗震体系对地震的动力反应,本文拟建立四个模型分两对进行对比.第一对为抗震模型与基础滑移隔震模型(如图2所示),第二对为有水箱的抗震模型与层间滑移隔震模型.两种模型的区别仅在于水箱下部是否加隔震层.

在建立模型时,对该对模型做了如下假定:

- (1) 上部水箱在振动时作为线弹性体考虑;
- (2) 水箱与主体结构之间的摩擦力恒定,并符合库仑定律;
- (3) 模拟时只考虑水平地震作用.

2.2 构件单元的选取

梁、柱选用 3D 线性有限应变梁 BEAM188 单元,楼板选用 4 节点弹性壳 SHELL63 壳单元,结构底板、模拟振动台平台板、屋面水箱选用 3D 加筋混凝土实体 SOLID65 单元,基础隔震层与层间隔震选用 3D8 节点面接触 TARGE170 单元和 3D 目标 CANTA174 单元.

2.3 地震波选取

根据文献[14]中地震波的选择原则,本文选用三条强震波 EL-Centro 波(NS 向)、阪神波(NS 向)以及宁河波(NS 向).

3 基础抗震结构与基础摩擦滑移隔震结构的动力响应对比

以上述两种结构的有限元分析模型,分别计算其在地震作用下的动力响应,以 EL-Centro 波、阪神波及宁河波,加速度峰分别取 220 GAL、400 GAL、620 GAL.摩擦滑移隔震时摩擦系数取 $\mu=0.05$,对节点加速度、总位移、层间位移比以及各层柱底剪力进行对比.

3.1 加速度对比分析

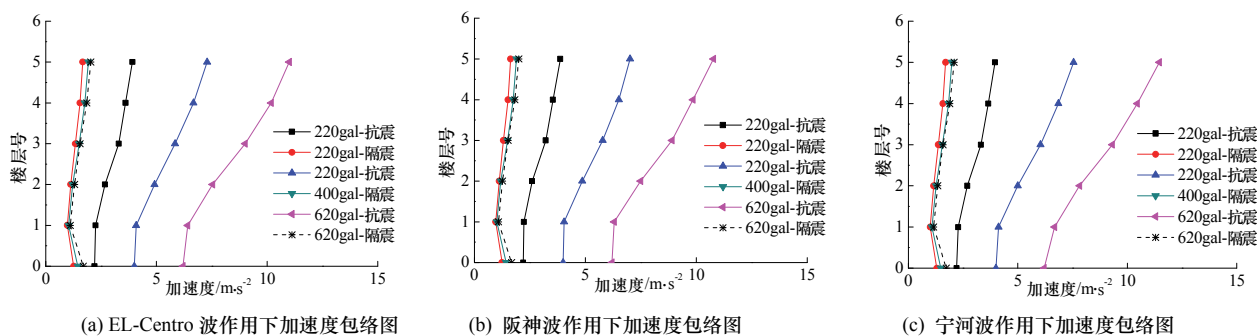


图3 不同地震波不同烈度作用下加速度对比图

Fig.3 Acceleration contrast figure under different seismic intensity action

由图3可以看出,隔震结构对比抗震结构能有效地降低地震作用时结构内各层的加速度.具体来说就是抗震结构对地震加速度有放大效果(放大系数大于1),而隔震结构对地震加速度有缩小的效果(放大系数小于1).抗震结构的加速度峰值从底到顶逐渐增加,结构顶层加速度峰值大约为地震加速度峰值的1.75倍至1.85倍,并且地震烈度越大其放大系数呈上升趋势;而隔震结构的加速度放大系数虽然也随层数上升,但是上升趋势缓慢,并且在相同地震波下地震烈度越大时隔震结构的放大系数越小,也就是说隔震效果越好.

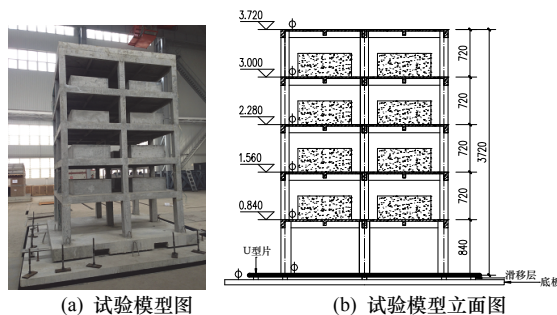


图1 试验模型图

Fig.1 test model figure

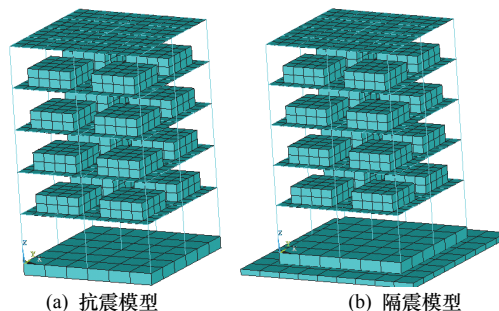


图2 抗震模型与隔震模型

Fig.2 Seismic model and isolation model

3.2 位移响应对比分析

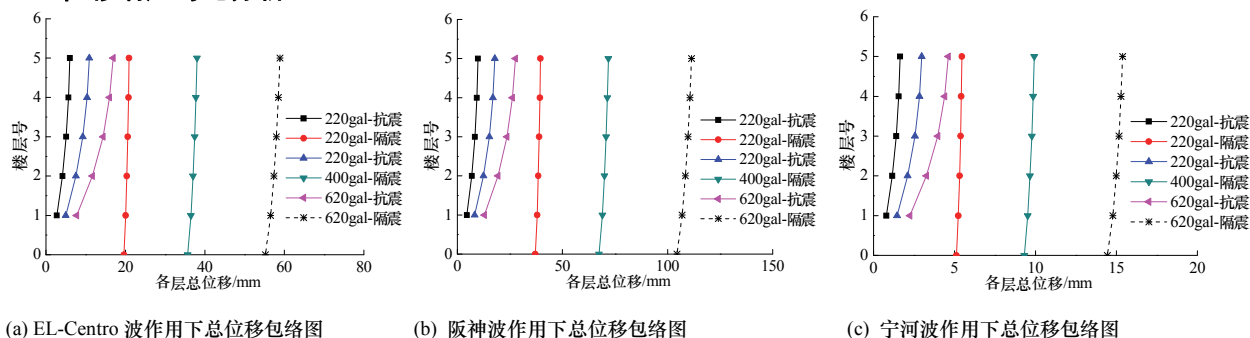


图4 不同地震波不同烈度作用下总位移对比图

Fig.4 Total displacement contrast figure under different seismic intensity action

从图4对比可得,基础固结的抗震结构在地震波下各层的总位移由下到上递增,顶层位移最大,表现出传统抗震结构的剪切变形特征;基础摩擦滑移的隔震结构,在一层处滑移量较大,但其滑移主要是隔震层的滑移,并且上部结构变形很小,位移量都偏小;除一层外,其他层位移量隔震结构约为抗震结构的3到4倍,地震烈度越大这一倍数越低.在不同烈度的同一地震波作用下,两种结构的位移变化趋势一致,都是随着烈度增加各层的总位移量增加.但增加幅度有所不同,抗震结构的位移增长量较大,而隔震结构的位移增长量平滑稳定.

3.3 层间位移对比分析

由图5可以看出,地震烈度变化时,传统抗震结构的层间位移变化量较大,而基础滑移结构的层间位移在地震烈度增加时变化很小.从图中的变化量对比可以看出,相同条件下使用基础滑移隔震结构比基础固结的抗震结构层间滑移量大幅减少,减少量达15%~40%.有时用抗震结构设计的建筑物不满足规范对层间位移的要求,使用滑移隔震结构时就很容易达到要求.说明基础滑移隔震结构隔震效果良好,实用性强,在某些情况下使用抗震结构无法按规范完成设计时可以起到很好的效果.

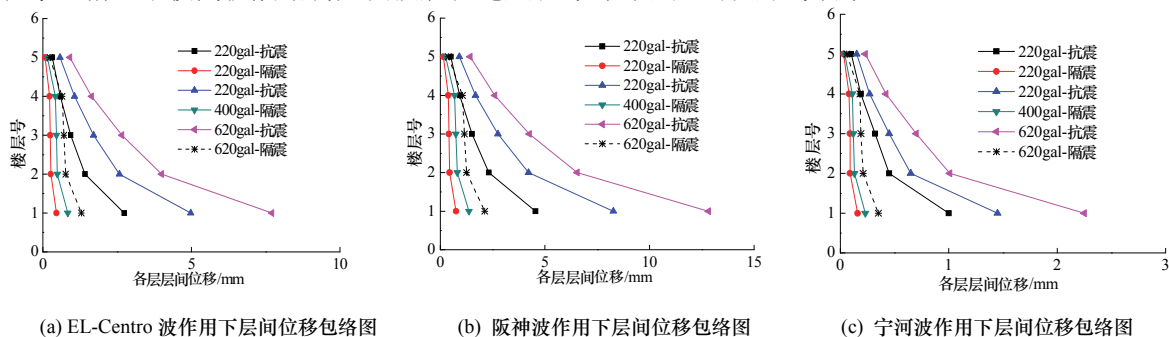


图5 不同地震波不同烈度作用下层间位移对比图

Fig.5 Displacement contrast figure under different seismic intensity action

3.4 层间剪力对比分析

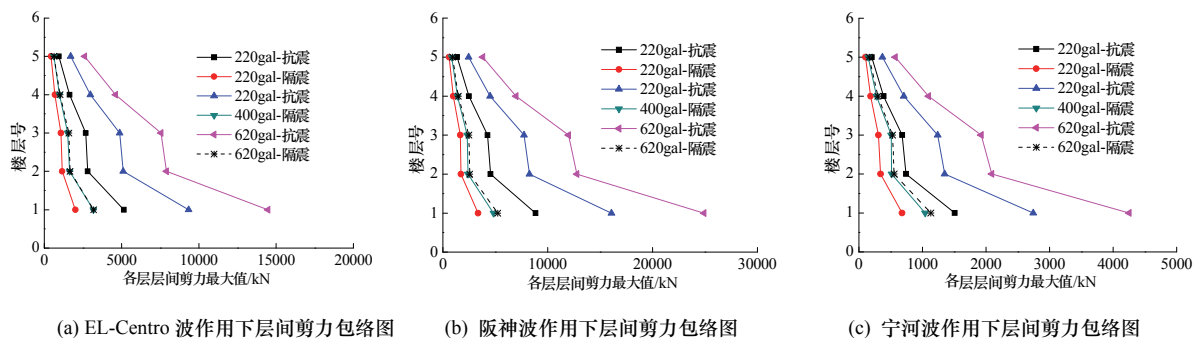


图6 不同地震波不同烈度作用下层间剪力对比图

Fig.6 Shear force contrast figure under different seismic intensity action

从图6中可以得出:结构所受剪力随地震烈度的增强而加大,越靠近底部结构所受剪力越大.相比传统基础固结的抗震结构,基础摩擦滑移隔震结构可以减少结构各层所受剪力,减少量达20%~50%.相同条件下地震烈度越大,隔震结构所能减少的剪力越多,但是在不同烈度的地震作用下隔震结构中结构顶部受到

的剪力值变化不大.如阪神波这种大震时,就比宁河波这样较安全的地震波情况下使用隔震结构的效果要好.

4 结论

(1) 隔震结构的加速度放大系数随层数上升,但趋势缓慢,且在相同地震波下地震烈度越大隔震结构的放大系数越小;隔震结构在一层处滑移量较大,但其滑移主要是隔震层的滑移,并且上部结构变形小,位移量均偏小,隔震结构的位移增长量平滑稳定;

(2) 使用基础滑移隔震结构可有效的减少层间位移角,相同条件下使用基础滑移隔震结构比基础固结的抗震结构层间滑移量大幅减少,减少量达15%~40%;

(3) 相比传统基础固结的抗震结构,使用隔震结构可以有效地降低层间剪力,减少量达20%~50%;

(4) 二硫化钼作为一种新型固体摩擦滑移涂层材料,可应用于摩擦滑移隔震系统中,且隔震效果明显,可供实际工程应用参考.

参考文献 References

- [1] 周福霖. 隔震、消能减震和结构控制技术的发展和运用(上)[J]. 世界地震工程, 1989(4): 16-20.
ZHOU Fulin. Development and applications of the isolation, energy dissipation and structure control technology(I)[J]. World Earthquake Engineering, 1989(4): 16-20.
- [2] 周锡元. 工程结构的隔震、减震和振动控制研究与应用[C]// 第五届全国地震工程会议论文集(1). 北京: 中国地震学会, 1998: 10-12.
ZHOU Xiyuan. Research and application of the Isolation, shock and vibration control of structure[C]// Proceedings of the fifth national conference on earthquake engineering(1). Beijing: Seismological Society of China, 1998: 10-12.
- [3] 王建强, 姚谦峰, 李大望. 基础滑移隔震结构双向地震反应分析[J]. 振动与冲击, 2005, 24(4): 84-88, 141-142.
WANG Jianqiang, YAO Qianfeng, LI Dawang. Bi-directional seismic response analysis of sliding base-isolated structure[J]. Journal of Vibration and Shock, 2005, 24(4): 84-88, 141-142.
- [4] 李宏男, 王苏岩, 贾俊辉. 基础滑移隔震砌体房屋抗倾覆高宽比限值[C]//第六届全国结构工程学术会议论文集(第三卷). 北京: 工程力学期刊社, 1997: 132-135.
LI Hongnan, WANG Suyan, JIA Junhui. Sliding base-isolated masonry anti-overturning limit values of height to width ratio[C]// Proceedings of the sixth national conference on structural engineering(Vol. 3). Beijing: Engineering Mechanics Press, 1997: 132-135.
- [5] 姚谦峰, 袁泉. 小高层密肋壁板轻框结构模型振动台试验研究[J]. 建筑结构学报, 2003, 24(1): 59-63.
YAO Qianfeng, QUAN Quan. Study on shaking table test of a 1/10 scale high-rise multi-rib wall plate slab lightweight frame model[J]. Journal of Building Structures, 2003, 24(1): 59-63.
- [6] 熊仲明. 基础滑移隔震房屋的计算研究[J]. 土木工程学报, 1995, 28(5): 21-30.
XIONG Zhongming. Study on calculation of sliding base-isolated houses[J]. China Civil Engineering Journal, 1995, 28(5): 21-30.
- [7] 叶列平. 隔震结构入门[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
YE Lieping. Getting started with isolated structure[M]. Beijing: Science Press, 1998.
- [8] 胡聿贤. 地震工程学[M]. 北京: 地震出版社, 1988.
HU Yixian. Earthquake engineering[M]. Beijing: Seismological Press, 1988.
- [9] 周福霖. 工程结构减震控制[M]. 北京: 地震出版社, 1997.
ZHOU Fulin. Engineering structure damping control[M]. Beijing: Seismological Press, 1997.
- [10] 张敏政. 地震模拟试验中相似律应用的若干问题[J]. 地震工程与工程振动, 1997, 17(2): 52-58.
ZHANG Minzheng. The several problems of the application of law of similitude in earthquake simulation test[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1997, 17(2): 52-58.
- [11] 李宏男, 李忠献, 祁皑, 等. 结构振动与控制[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005.
LI Hongnan, LI Zhongxian, QI Ai, et al. Structure vibration and control[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2005.
- [12] KELLY J M. A seismic base isolation: review and bibliography[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 1986, 5(3): 202-216.
- [13] 李杰, 李国强. 地震工程学导论[M]. 北京: 地震出版社, 1992.
LI Jie, LI Guoqiang. Introduction to earthquake engineering[M]. Beijing: Seismological Press, 1992.
- [14] 王亚勇, 程民宪, 刘小弟. 结构抗震时程分析法输入地震记录的选择方法及其应用[J]. 建筑结构, 1992(5): 3-7.
WANG Yayong, CHENG Minxian, LIU Xiaodi. Structure seismic time history analysis of the choice of input seismic record method and its application[J]. Building Structures, 1992(5): 3-7.