

文章编号:1671-4229(2015)06-0045-05

# 采用 GFRP 橡胶隔震技术的某砌体结构动力响应分析

吴迪<sup>1,2</sup>, 霍维刚<sup>1</sup>, 周福霖<sup>1</sup>

(1. 广州大学 工程抗震研究中心, 广东 广州 510405; 2. 广州番禺区市桥建筑设计院, 广东 广州 511400)

**摘要:** 由于近年来几次地震对中国大陆村镇房屋造成严重震害, 适合村镇砌体房屋的低造价隔震技术引起广泛关注, 对此开展玻璃纤维增强复合材料(GFRP)隔震技术的研究, 完成 GFRP 橡胶隔震支座的基本力学性能试验研究。隔震支座压剪试验结果显示, GFRP 橡胶隔震支座的滞回性能良好。建立村镇典型砌体结构基础隔震的计算模型, 采用《建筑抗震设计规范》(GB50011-2010)所规定的隔震设计计算方法, 以汶川灾区一座典型砌体结构房屋为对象, 研究地震作用下采用 GFRP 橡胶隔震支座的基础隔震结构的动力响应, 研究结果显示在地震作用下隔震房屋响应的加速度峰值明显减少, 因此, GFRP 隔震技术的隔震和减震效果显著。

**关键词:** 玻璃纤维增强复合材料(GFRP); 基础隔震; 隔震设计; 橡胶隔震支座

**中图分类号:** TU 352.1

**文献标志码:** A

近年我国发生过多次破坏程度较大的地震, 对地震发生后村镇房屋的震害情况进行深入调查和研究发现, 村镇房屋大都破坏比较严重。李英民等<sup>[1]</sup>对绵竹城区砌体结构房屋总体震害情况进行分类描述与总结, 认为绵竹城区房屋中度损伤及严重损伤的房屋占总量的 70% 左右。通过对震中县房屋震害情况调查, 发现砖砌体房屋在四川地震灾区被广泛采用, 所收集到的房屋震害情况主要集中在砌体结构<sup>[2-4]</sup>。该调查分析结论与中国地震局<sup>[5]</sup>关于汶川地震宏观震中和极震区的结论基本一致。震害发生后, 隔震技术已经作为一项推广技术在汶川地震援建项目中得到认可并被广泛推荐, 例如汶川县城某小区的隔震房屋、汶川县第二小学、汶川县幼儿园、汶川县疾病预防控制中心等一大批重大民生工程均采用隔震技术。芦山医院综合楼在芦山地震中表现良好, 除部分墙体出现轻微裂缝, 主体结构以及附属结构(门、窗、吊顶、装饰等)均未被发现有其他损坏, 该楼就因为采用了基础隔震技术, 经受住了芦山地震的严峻考验, 与该楼距离不远的芦山博物馆却遭受了更为严重的地震破坏<sup>[6]</sup>。

适合村镇砌体房屋的低造价隔震技术引起了技术人员和研究者的广泛关注, KELLY<sup>[7]</sup>首先提出纤维(Fiber-Reinforced)代替钢板对目前的夹层橡胶减振垫进行改进的思想, 认为相比于钢板夹层橡胶隔震支座而言,

一方面降低隔震支座的造价, 另一方面减轻隔震支座的质量, 再次减少生产和制作过程的劳动量。PINARBASI 等<sup>[8-9]</sup>根据柔性约束弹性层计算方法, 考虑 KELLY 的橡胶减振垫平面压力假设, 研究纤维约束情况下橡胶隔震支座的轴压和弯曲状态下的特性。通过理论推导认为在轴压和弯曲状态下, 纤维夹层橡胶隔振器与钢板夹层橡胶隔振器在几何和材料特性方面有很大不同。ZHANG 等<sup>[10]</sup>通过实验方法研究 FRP 橡胶隔振器的竖向抗承载能力、弹性模量、剪切模量和阻尼特征, 结果显示该 FRP 橡胶隔振器比传统的橡胶隔振器有更好的耗能能力。彭天波等<sup>[11]</sup>对矩形 FRP 橡胶隔振器水平剪切曲线的非线性特性及其成因进行了研究, 发现 FRP 橡胶隔振器的水平剪切刚度随着剪应变的增加而下降, 具有明显的软化特性。吴迪等<sup>[12]</sup>首先提出使用一种玻璃纤维复合材料板夹层橡胶隔震支座, 其水平方向设置的夹层板包裹在橡胶垫的内部, 夹层板之间为橡胶层, 其特征在于上封板、下封板、橡胶夹层垫体间的夹层板采用玻璃纤维复合材料板, 相对于普通钢板夹层橡胶垫而言, 具有质量较轻、耐候性好、制作简单、安装方便等特点。

目前开展玻璃纤维增强复合材料(GFRP)隔震技术的研究具有实际意义, 但是需要特别注意的是, 虽然国内外学者对于普通橡胶隔震结构在地震作用下的隔震机理已经有所认识, 但由于砌体隔震结构从降低造价的

收稿日期: 2015-06-23; 修回日期: 2015-08-19

**基金项目:** 国家重点基础研究发展计划资助项目(2012CB723304); 国家自然科学基金高铁联合基金重点资助项目(U1334209); 国家自然科学基金资助项目(51108105 和 91315301-07); 广州市和番禺区珠江科技新星专项资助项目(2013-专15-6.05 和 2012J2200027); 亚热带建筑科学国家重点实验室自主研究课题项目(2012ZC26)及住房和城乡建设部科学技术计划资助项目(K2201219)

**作者简介:** 吴迪(1978-), 男, 副研究员, 博士. E-mail: 11795234@qq.com

角度出发,将 GFRP 橡胶隔震支座直接设置于砌体结构底层的圈梁和基础梁之间,支座布置也取消了上下连接板和连接螺栓,而我国《建筑抗震设计规范》<sup>[13]</sup>中的隔震设计缺乏针对 GFRP 橡胶隔震建筑设计计算和相应构造措施的条款和说明,因此,本文针对 GFRP 橡胶隔震支座的基础隔震结构的动力响应展开进一步研究。

## 1 GFRP 橡胶隔震支座的水平力学性能试验研究

村镇砌体结构房屋通用的墙体厚度为 240 mm,故采用横截面形状为正方形、边长为 240 mm 的隔震支座,不设置上下连接板。GFRP 橡胶隔震支座由橡胶夹层垫体和 GFRP 夹层加劲板组成,由 GFRP 夹层板对橡胶提供约束,GFRP 夹层板之间为橡胶层。本研究根据村镇砌体结构房屋隔震设计的要求制作 3 个 GFRP 橡胶隔震支座,编号为 GFRP-1002、GFRP-1003、GFRP-1004。采用广州大学电液伺服压剪试验系统进行压剪试验,该设备竖向最大压力加载为 10 000 kN,竖向最大位移行程为 430 mm,水平最大荷载为  $\pm 500$  kN,水平位移最大为  $\pm 200$  mm,竖向加载采用力控制,水平向加载采用位移控制,输入波形可采用正弦波、方波、三角波等,水平加载频率最大可达 0.05 Hz。GFRP 橡胶隔震支座水平性能试验采用 3 圈加载法,为保证第 3 圈试验曲线的完整性,实际试验进行完整的 4 圈试验,支座水平刚度选取第 3 圈的力-位移曲线进行计算。根据 GFRP 橡胶隔震支座的水平和竖向力学性能试验结果报告,对支座力学特性进行分析和研究,此外还对 GFRP 橡胶隔震支座水平刚度-竖向压应力的相关性规律进行实验研究。其中所采用的某隔震支座压剪性能实验情况见图 1。



图 1 GFRP 橡胶隔震支座的压剪变形实验

Fig. 1 Compression-shear deformation experiment of GFRP rubber seismic isolator

根据《橡胶支座》国家标准<sup>[14]</sup>中关于橡胶隔震支座力学性能试验方法,确定橡胶隔震支座的水平刚度和阻尼比的计算式:

$$K_h = \frac{Q_1 - Q_2}{X_1 - X_2} \quad (1)$$

$$h_{eq} = \frac{2\Delta W}{\pi K_h (X_1 - X_2)^2} \quad (2)$$

式中, $Q_1$  为最大剪力, $Q_2$  为最小剪力, $X_1$  最大位移, $X_2$  最小位移。通过以上实验所得 GFRP 橡胶隔震支座水平剪切性能的试验结果,根据橡胶隔震支座剪切性能计算公式(1)和(2),计算得到常温条件下竖向荷载(2.5 MPa)时 GFRP 橡胶隔震支座的水平刚度  $0.43 \text{ kN} \cdot \text{mm}^{-1}$ ,取支座阻尼比 5%。当隔震支座承受竖向荷载 2.5 MPa 时,剪切应变( $\gamma = \pm 100\%$ )实验和公式计算模拟的水平力-位移滞回曲线,见图 2。

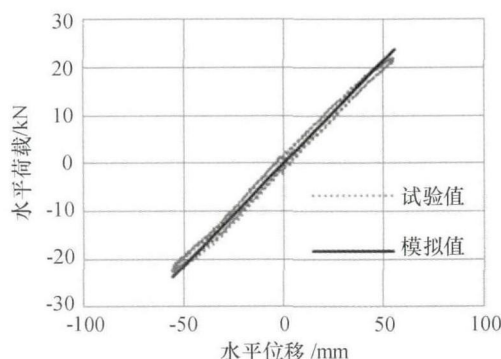


图 2 GFRP 橡胶隔震支座的水平力-位移滞回曲线

Fig. 2 Hysteretic horizontal force-deflection curve of GFRP rubber seismic isolator

## 2 采用 GFRP 橡胶隔震技术的砌体结构房屋地震反应研究

以汶川地震灾区已建成的某栋砌体结构基础隔震房屋为算例,对隔震结构进行有限元建模,并进行地震时程响应计算。该栋房屋为地震灾区某典型砌体结构隔震住宅,抗震设防分类为丙类建筑,安全等级为二级,砌体质量控制等级为 B 级。本工程的结构总层数为 7 层,第 1 层楼层高为 4.2 m,2~6 层楼层高为 3.9 m,结构平面布置的形状为矩形。该栋隔震房屋设计按照《建筑抗震设计规范》、《叠层橡胶支座隔震技术规程》、《橡胶支座 第 3 部分:建筑隔震橡胶支座》进行,计算所用的钢筋混凝土柱、梁、楼板及屋面均采用现浇,构件采用的混凝土标号为 C30,结构的基础为独立基础;钢筋混凝土中的受力纵筋采用 HRB335,其中箍筋采用 HRB235,结构的隔震层高度为 1.5 m,楼层及屋面采用现浇钢筋混凝土楼板,基础为冲孔灌注桩,房屋荷载均按《建筑结构荷载规范》GB50009-2001(2006 年版)的规定取值。由于《建筑抗震设计规范》对 GFRP 橡胶隔震支

座的设计参数未作规定,因此本文根据支座压剪实验结果,支座压应力设计值采用2.5 MPa.

该房屋所在地区的抗震设防烈度为Ⅷ度,设计基本地震加速度为0.2 g,设计地震分组属于第一组,所处场地属于Ⅱ类,场地特征周期为0.35 s. 为了选择合适的地震波进行隔震结构的非线性时程分析,根据《建筑抗震设计规范》(GB50011-2010)中5.0.1设计基准期超越概率2%~3%地震动水准相对应的地震影响系数曲线,采用美国太平洋地震工程研究中心(PEER)NGA Database地震动数据库的地震资料,选择地震记录的范围:震级范围为4~9级,震中距包括远场、中场和近场. 根据规范规定应按建筑场地类别和设计地震分组选用7组地震加速度时程曲线,包括实际强震记录和人工模拟的地震时程,其中,实际强震记录的数量不应少于总数的2/3,多组时程曲线的平均地震影响系数曲线应与振型分解反应谱法所采用的地震影响系数曲线在统计意义上相符. 根据规范提供的地震影响系数曲线得到罕遇地震水准下目标概率一致反应谱(UHRS),按照目标反应谱对所选择的地震波进行修正,该修正过程预设的最大误差为10%;图3列出了罕遇地震下我国规范的地震动加速度反应谱以及本文采用加速度反应谱的平均值对比. 根据《建筑抗震设计规范》中隔震结构设计的基本方法,按照水平地震作用的计算分析步骤,研究罕遇地震情况下GFRP橡胶隔震房屋的地震动响应.

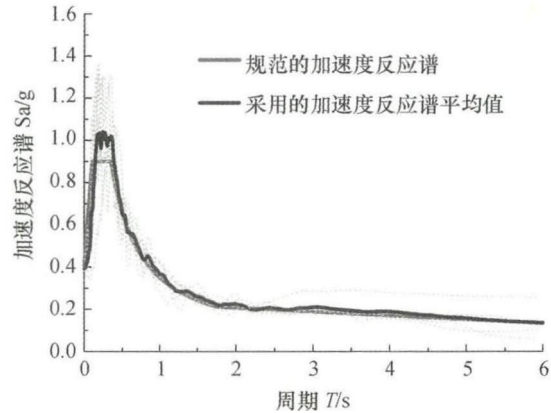


图3 规范和所采用平均加速度反应谱值对比  
Fig. 3 Comparison of code acceleration response spectrum and being adopted

根据以上隔震房屋的基本设计参数,采用通用有限元软件SAP2000建立该GFRP橡胶隔震房屋的简化有限元模型,其中GFRP橡胶隔震支座单元采用rubber isolate单元,结构的总重量17 124.2 kN,支座压应力设计值2.5 MPa,采用121个GFRP橡胶隔震支座,隔震层的总水平刚度为52.03 kN·mm<sup>-1</sup>,对简化模型进行水平地震动力时程分析,以此研究罕遇地震作用下采用GFRP橡胶隔震支座房屋的动力响应. 计算获得输入7条天然地震波和采用GFRP隔震技术后结构响应加速度峰值比较见表1.

表1 输入地震波和隔震后结构响应加速度峰值比较

地震记录	天然波1	天然波2	天然波3	天然波4	天然波5	天然波6	天然波7
隔震结构响应与输入地震波加速度峰值之比/%	64	53	63	41	85	64	68

采用天然波6(San Fernando地震波)和隔震结构响应的加速度时程比较见图4,其加速度反应谱对比见图5.

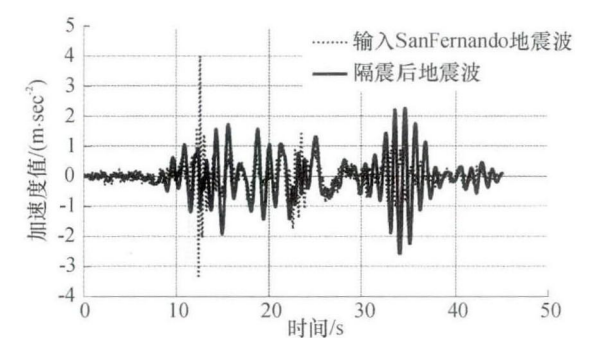


图4 输入天然波6(San Fernando地震波)和隔震结构响应的加速度时程对比  
Fig. 4 Comparison of acceleration time history of natural seismic wave 6<sup>th</sup> (San Fernando seismic wave) input and structure response with isolation technique

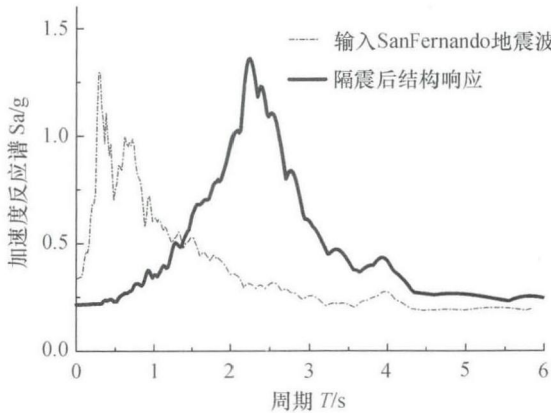


图5 输入天然波6(San Fernando地震波)和隔震结构响应的加速度反应谱对比  
Fig. 5 Comparison of acceleration response spectrum of natural seismic wave 6<sup>th</sup> (San Fernando seismic wave) input and structure response with isolation technique

由图 4 可知,在天然波 6(San Fernando 地震波)作用下,采用 GFRP 隔震技术后隔震层以上结构的加速度峰值响应平均降低了 37%,有效降低了地震动的能量输入,减小了地震产生的结构底部剪力.由图 5 可知,除上部结构高频响应明显降低以外,隔震后加速度反应谱的低频部分谱值比输入地震波反应谱的谱值有所增加,但由于砌体结构自振频率较高,因此反应谱的低频谱值对砌体结构影响较小.

采用所选的 7 组地震加速度时程对隔震结构进行有限元动力时程分析,计算得到输入地震波和隔震后结构响应的平均加速度反应谱比较见图 6,由图 6 中加速度反应谱谱值的对比可知,采用 GFRP 橡胶隔震之后,隔震层以上砌体结构的加速度反应谱谱值在高频部分有较大幅度降低,低频部分有所放大.

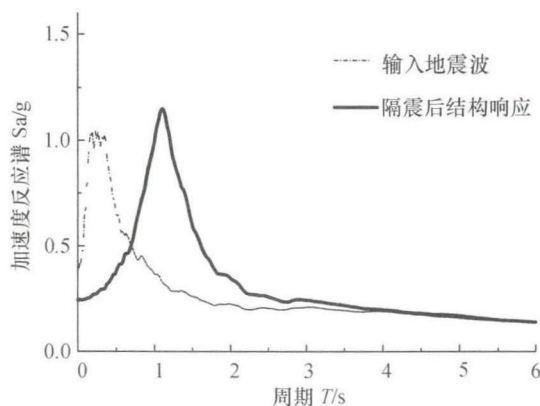


图 6 输入地震波和隔震结构响应的平均加速度反应谱对比  
Fig. 6 Comparison of average acceleration response spectrum of seismic wave input and response with isolation technique

### 3 结 论

本文对新型 GFRP 橡胶隔震支座水平力学性能进行了实验研究,实验中支座上下未设连接板,并且与结构无任何锚固措施,通过对隔震支座压剪试验结果的研究显示,GFRP 橡胶隔震支座的滞回性能良好,当支座的竖向荷载处于合理范围内时,支座设置在基础圈梁之间不设置上下连接板也可以提供良好的隔震作用.根据 GFRP 橡胶隔震支座的压剪试验结果,建立了 GFRP 橡胶隔震支座的力学计算模型,该力学计算模型能够较好地模拟支座的水平力-位移滞回曲线.

根据隔震房屋的结构基本设计参数,利用通用有限元软件 SAP2000 建立了 GFRP 橡胶隔震房屋的简化有限元模型,计算得到罕遇地震情况下 GFRP 隔震房屋的动力时程响应.研究结果显示,采用 GFRP 橡胶隔震技术后砌体结构的响应比输入地震波的加速度峰值平均降低了 37%,隔震房屋在地震作用下的响应明显减少,GFRP 橡胶隔震支座有效降低了结构的地震动能量输入.同时,在长周期部分,隔震结构的加速度反应谱比输入地震波的谱值有所增加,主要是由于在隔震结构自振周期处输入地震波的加速度反应谱的谱值被放大,而本工程采用的 GFRP 橡胶隔震支座阻尼较小,结构阻尼消耗和吸收地震动能量有限.但是,该反应谱在低频部分谱值的放大效应并没有对反应谱的高频部分产生影响,也未增加隔震层以上砌体结构的加速度响应.以上研究结果说明,采用 GFRP 橡胶隔震能够提高砌体结构的抗震性能,GFRP 橡胶隔震技术可做为灾区砌体结构的一种有效的低造价隔震措施.

### 参考文献:

- [1] 李英民,韩军,刘立平,等.“5·12”汶川地震砌体结构房屋震害调查与分析[J].西安建筑科技大学学报,2009,41(5):613-618.  
LI Y M, HAN J, LIU L P, et al. Investigation and analysis of masonry building damage caused by the 5·12 Wenchuan earthquake, Sichuan Province[J]. J Xi'an Univ Arch Tech, 2009,41(5):613-618.
- [2] 任晓崧,吕西林.5.12 四川汶川地震后青川房屋震害调查与初步分析[R].汶川地震建筑震害调查与灾后重建分析报告,2008.  
REN X S, LU X L. Investigation of building damage and analysis report of reconstruction after disaster caused by the 5·12 Wenchuan earthquake, Sichuan Province[R]. Investigation of building damage and analysis report of reconstruction after disaster caused by Wenchuan earthquake,2008.
- [3] 熊立红,杜修力,陆鸣,等.5·12 汶川地震中多层房屋典型震害规律研究[J].北京工业大学学报,2008,34(11):1166-1172.  
XIONG L H, DU X L, LU M, et al. Damage of multistory buildings during the 2008 Wenchuan earthquake[J]. J Beijing Univ Tech, 2008,34(11):1166-1172.
- [4] 吴迪,熊焱,崔杰,等.汶川 8.0 级地震中汶川县城房屋震害及其加固情况分析[J].地震研究,2010,33(2):216-221.  
WU D, XIONG Y, CUI J, et al. The analysis of building damage and reinforce in Wenchuan County caused by the May 12,



- 2008 earthquake[J]. J Seism Res, 2010, 33(2): 216-221.
- [5] 中国地震局震灾应急救援司. 汶川 8.0 级地震烈度分布图[EB/OL]. [2008-08-29]. 北京: 中国地震局, 2008. [http://www.cea.gov.cn/manage/html/8a8587881632fa5c0116674a018300cf/\\_content/08\\_08/29/1219979564089.html](http://www.cea.gov.cn/manage/html/8a8587881632fa5c0116674a018300cf/_content/08_08/29/1219979564089.html). Seismic disaster rescue department. Intensity distribution map in Wenchuan Ms 8.0 Earthquake[EB/OL]. [2008-08-29]. Beijing: China Seismological Bureau, 2008. [http://www.cea.gov.cn/manage/html/8a8587881632fa5c0116674a018300cf/\\_content/08\\_08/29/1219979564089.html](http://www.cea.gov.cn/manage/html/8a8587881632fa5c0116674a018300cf/_content/08_08/29/1219979564089.html).
- [6] 徐超, 陈波, 李小军, 等. 芦山 MS7.0 地震建筑结构震害特征[J]. 地震学报, 2013, 35(5): 749-758. XU C, CHEN B, LI X J, et al. Seismic performance characteristics and damage of buildings in Lushan Ms 7.0 earthquake[J]. Acta Seism Sin, 2013, 35(5): 749-758.
- [7] KELLY J M. Analysis of fiber-reinforced elastomeric isolator[J]. J Seism Earth Engin, 1999, 2(1): 19-34.
- [8] PINARBASI S, MENGİ Y, AKYUZ U. Compressive and bending behavior of strip-shaped fiber-reinforced elastomeric bearings[C]//The 14th WCEE. Beijing, China, 2008: 1-8.
- [9] PINARBASI S, MENGİ Y. Elastic layers bonded to flexible reinforcements[J]. Int J Solids Struct, 2008, 45(3): 794-820.
- [10] ZHANG H, PENG T B, LI J Z, et al. Experimental study of FRP rubber bearing[J]. Adv Mat Res, 2010, 168(1): 1621-1624.
- [11] 彭天波, 张华, 李建中, 等. FRP 橡胶隔振器水平剪切特性的初步研究[J]. 振动与冲击, 2009(5): 128-130. PENG T B, ZHANG H, LI J Z, et al. Pilot study on the horizontal shear behavior of FRP rubber isolators[J]. J Vibrat Shock, 2009, 28(5): 128-130.
- [12] 吴迪, 谭平, 熊焱, 等. 一种玻璃纤维复合材料板夹层橡胶隔震垫[P]. 中国专利: 101736830 B, 2011-08-03. WU D, TAN P, XIONG Y, et al. A laminated isolating rubber bearings with glass fiber reinforced composites[P]: Chinese Patent: 101736830 B, 2011-08-03.
- [13] GB50011-2010 建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010. China Academy of Building Research, GB50011-2010, Code for seismic design of building[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010.
- [14] GBT20688.1-2007, 橡胶支座 第1部分: 隔震橡胶支座试验方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007. GBT20688.1-2007, Rubber bearings Part 1: Seismic-protection isolators test methods[S]. Beijing: Standards Press of China, 2007.

## Research on dynamic response analysis of a masonry structure using GFRP rubber seismic isolation technique

WU Di<sup>1,2</sup>, HUO Wei-gang<sup>1</sup>, ZHOU Fu-lin<sup>1</sup>

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

2. Guangzhou Panyu District Shiqiao Building Design Institute, Guangzhou 511400, China)

**Abstract:** Since rural houses were seriously damaged after several earthquakes in China in recent years, the low-cost isolation technique used in rural house has attracted extensive attention. To this point, the glass fiber reinforced polymer (GFRP) isolation technique has been studied. By experimental study on the basic mechanical properties of GFRP rubber seismic isolator, the research showed that GFRP isolator with the good hysteretic behavior was obtained. The calculation model of typical masonry structure with base seismic isolation was established. The isolation design and calculation method of Chinese Code for Seismic Design of Buildings (GB50011-2010) has been adopted in this research. A typical base-isolated masonry structure which was built in disaster area has been studied as an example. The dynamic response of the masonry structure using GFRP rubber seismic isolator under earthquake action has been studied. Results suggest that the peak seismic response acceleration of the isolated structure was decreased significantly under the rare earthquake. Therefore, the isolation effect and shock absorption of the new system with GFRP isolation technique is remarkable.

**Key words:** glass fiber reinforced polymer (GFRP); base isolation; isolation design; rubber isolation bearing

【责任编辑: 周 全】