

文章编号:1009-3087(2013)02-0056-06

BFRP 加固砌体结构试验研究

王继兵¹,周德源²,雷真²

(1. 郑州航空工业管理学院 土木建筑工程学院,河南 郑州 450015;2. 同济大学 土木工程学院,上海 200092)

摘要:通过对8片砌体墙进行模拟地震作用下的预损伤试验和加固后的低周反复试验,研究玄武岩纤维(BFRP)加固砌体结构的抗震性能。分析了加固前后墙体的受力特点、滞回特性、耗能能力等变化规律,以及损伤对加固效果的影响,并根据试验结果提出了计算公式,计算值与试验值吻合良好。研究表明:玄武岩纤维加固可以有效延缓墙体裂缝发展,提高砖墙变形和承载能力,增加结构整体性,同时结构抗震性能得到显著改善,值得在灾后恢复重建阶段大力推广。

关键词:玄武岩纤维;加固;滞回特性;抗震性能;砌体

中图分类号:TU317

文献标志码:A

Experimental Studies on Masonry Structures Reinforced by BFRP

WANG Ji-bing¹, ZHOU De-yuan², LEI Zhen²

(1. Dept. of Civil Eng., Zhengzhou Inst. of Aeronautical Industry Management, Zhengzhou 450015, China;

2. College of Civil Eng., Tongji Univ., Shanghai 200092, China)

Abstract: Based on the test of eight masonry walls under low cycle reversed loading, the seismic performances of strengthened unreinforced masonry walls by BFRP were analyzed from multi-angle, mainly including the hysteretic curve, energy dissipation capability and damage. Then the design formula of the BFRP strengthened damaged and non-damaged masonry walls was given, and the results showed that the theoretical values are in good agreement with the experimental results. The experimental results showed that the BFRP strengthening technique can effectively postponed the development of cracks, increase the capacity of deformation and load-carrying, and the masonry walls' integrity and energy dissipation properties can also gain a significant improvement.

Key words: BFRP; reinforcement; hysteretic property; seismic performance; masonry

砌体结构由于其自身优点,自20世纪50年代以来,在中国住宅和民用建筑中得到广泛使用。据统计,中国1995年以前的住宅建筑,95%以上是砌体结构^[1]。多次震害表明,砌体结构在地震荷载作用下破坏程度较其他结构类型更为严重^[2],近年来地震活动比较活跃,2008年汶川特大地震以及2010年玉树地震,都给人民的生命财产带来巨大损失。而且,中国现有砌体结构建筑大多是2000年以前建造,这些建筑由于年久失修、设计或施工差错、自然灾害、建筑物进行改建和扩建等因素,使砌体结构产生开裂损伤,不满足现行抗震设防要求,为了减少地震作用带来的损失,均需对其进行加固修复。

与传统加固方法相比,FRP加固技术具有轻质、高强、施工速度快以及占据使用空间少等优点,近年来在砌体结构加固中得到推广使用^[3]。BFRP在性价比方面远优于CFRP,耐腐蚀及耐久性等方面优于GFRP,原材料储量丰富,制造成本低,使其在结构加固领域逐渐被重视^[4-5]。目前,BFRP在结构加固应用研究主要针对混凝土结构^[5-11],在砌体结构加固中的应用鲜有报道。

1 试验设计

1.1 试件设计

设计砌体墙8片,1片为未加固对比试件,3片直接加固,4片损伤修复后加固。试验采用M5.0混合砂浆,MU10的普通黏土砖,墙厚240mm,尺寸见图1,地梁及加载梁混凝土强度等级为C25,所采用的玄武岩纤维布性能指标见表1。

收稿日期:2012-08-27

基金项目:国家科技支撑计划资助项目(2009BAJ28B02)

作者简介:王继兵(1978—),男,讲师,博士。研究方向:结构抗震与加固。E-mail:mfwj@163.com

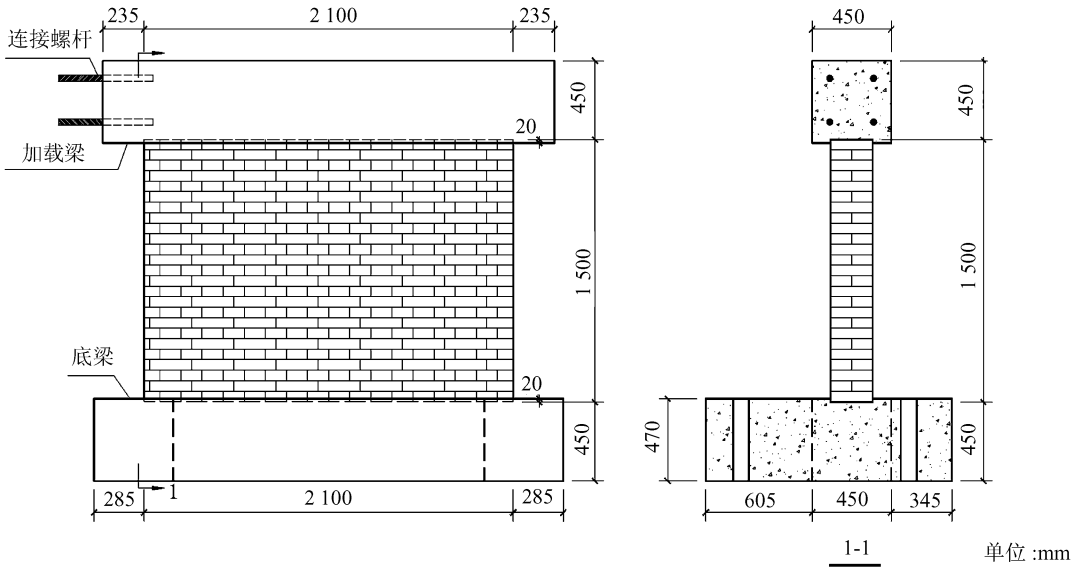


图1 试件尺寸

Fig. 1 Specimen size

表1 玄武岩纤维布材料性能

Tab. 1 Material properties of BFRP

弹性模量/GPa	抗拉强度/MPa	计算厚度/mm	单位面积质量/(g · m ⁻²)	伸长率/%
105	2303	0.121	341	2.18

各试件详细参数见表2。压应力由竖向千斤顶直接施加,损伤位移为外加水平推力达到墙片极限

承载力(严重破坏)^[12-13],与加载梁相连的水平往复作动器最大位移。

表2 试件明细表

Tab. 2 Details of specimens

试件编号	W1	RW2	RW3	RW4	RW5	RW6	RW7	RW8
加固形式	不加固	粘贴2层	粘贴1层	粘贴2层	粘贴2层	粘贴1层	粘贴2层	粘贴2层
布幅宽/mm	—	150	200	200	200	200	200	150
竖向压应力/MPa	0.6	0.6	0.6	0.6	0.8	0.6	0.6	0.6
损伤水平位移/mm	—	—	—	—	10	10	10	10

1.2 加固方案

预损伤试件先在试验装置上进行损伤加载试验,模拟实际结构在地震荷载作用下受到的损伤,然后用玄武岩纤维布加固修复,主要加固修复步骤为:1)在拟粘贴纤维布的区域将试件基面打磨平整,去掉表面疏松层,将浮灰清除干净,对开裂墙体裂缝进行封堵,并预留灌浆口;2)对封堵后的墙体裂缝用压力机进行灌浆,局部缺陷采用环氧砂浆进行修整;3)待灌浆材料凝固后对墙体不平整表面进行打磨,在需要贴纤维布的部位进行定位放线,并在表面均匀饱满的涂抹一层底胶;4)待底层胶凝固后,均匀涂抹一层饱满的粘结剂,将裁剪好的纤维布粘贴上,压实、排气、养护,待粘结剂完全固化后,进行试验。采用双面对称混合加固,斜向纤维布粘贴在内层,见表2,外层粘贴1层150 mm宽水平纤维布,沿

墙高等宽粘贴5道,如图2所示。

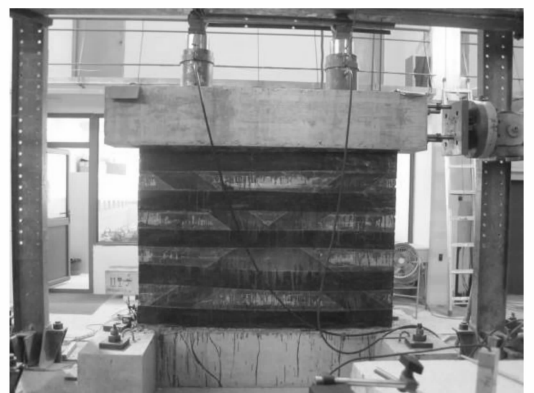


图2 加固方式

Fig. 2 Reinforcement approach

1.3 加载制度

为了模拟竖向及水平荷载作用下墙体的实际受

力状态,试验采用墙顶加载方案,墙底施加固定约束,即墙顶通过加载梁施加竖向荷载和水平荷载,墙底由底梁锚固。墙体由加载梁顶部2个液压千斤顶同步施加竖向荷载,千斤顶和反力架之间设置有可水平滑动的滚轴,以实现加载过程中只允许梁端有水平移动和转动而限制其竖向位移。如图3所示。

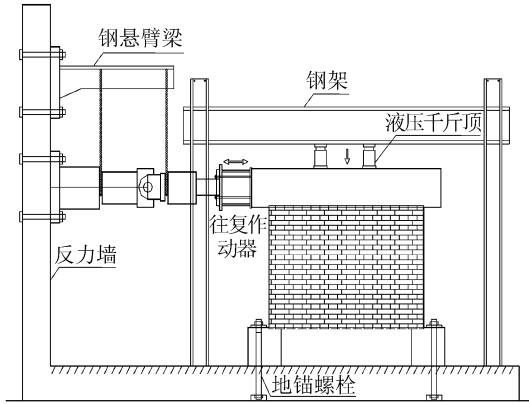


图3 加载装置

Fig.3 Loading system

竖向荷载由千斤顶一次性施加,水平荷载的施加采用荷载与变形双重控制方法^[14]。试件开裂前采用荷载控制并分级加载,接近开裂荷载前减小级差加载,开裂后采用变形控制,并以开裂时试件顶部

最大水平位移为基数,以位移增量2 mm进行递增,荷载加载每级循环1次,位移加载每级循环3次,当荷载下降到极限荷载的85%以内或滞回环出现明显不稳定状态,试验结束。

2 试验现象及结果分析

主要试验现象见表3,试验得到的滞回曲线、荷载-位移骨架曲线及耗能曲线分别如图4、5及6所示,损伤加固和未损伤加固抗震性能试验结果对比如表4所示。

由滞回曲线可知,试件W1在加载初期(开裂之前),刚度基本保持不变,近似呈线弹性状态。开裂之后,滞回环出现捏拢现象,墙顶荷载上升速率变缓,且随着加载位移的增大而愈加明显。由于墙体开裂、滑移,滞回环变为反S形,并逐渐向水平轴倾斜。顶部位移为4 mm时墙顶荷载达到峰值,之后,随着位移增加,刚度急剧下降,在W1的骨架曲线中未出现明显的屈服平台,表现出脆性特性;相比W1,加固试件滞回曲线比较饱满,加载级数明显增加,具有更好的耗能能力。加固试件滞回环的正反2个方向上,分别存在一个较明显的捏拢点。在正反向加载过程中,砖墙破坏程度不同,滞回曲线呈现出不对称。

表3 试验现象

Tab.3 Test phenomena

试件编号	开裂之前	开裂至极限状态	极限状态至破坏阶段
W1	$P < 180 \text{ kN}$ 墙体水平位移较小	$180 < P < 260 \text{ kN}$, $P_{cr} = 180 \text{ kN}$ 交叉贯通斜裂缝	$P_u = 260 \text{ kN}$ 剪压破坏,最宽裂缝为15 mm
RW2	$P < 200 \text{ kN}$ 墙体水平位移较小	$200 < P < 406 \text{ kN}$, $P_{cr} = 200 \text{ kN}$ 端部没粘贴BFRP区域先压碎	$P_u = 406 \text{ kN}$, 剪压破坏
RW3	$P < 200 \text{ kN}$ 墙体水平位移较小	$200 < P < 375 \text{ kN}$, $P_{cr} = 200 \text{ kN}$ 墙底4~5皮砖高度,出现水平裂缝	$P_u = 375 \text{ kN}$, 剪摩破坏
RW4	$P < 190 \text{ kN}$ 墙体水平位移较小	$190 < P < 419 \text{ kN}$, $P_{cr} = 190 \text{ kN}$ 墙底4~5皮砖高度,出现水平裂缝	$P_u = 419 \text{ kN}$, 剪摩破坏
RW5	$P < 180 \text{ kN}$ 墙体水平位移较小	$180 < P < 361 \text{ kN}$, $P_{cr} = 180 \text{ kN}$ 底部原损伤修复处砖块压碎	$P_u = 361 \text{ kN}$, 剪摩破坏 底部第5皮砖高度砖块压碎鼓出
RW6	$P < 190 \text{ kN}$ 墙体水平位移较小	$190 < P < 350 \text{ kN}$, $P_{cr} = 190 \text{ kN}$ 端部没粘贴BFRP区域首先开裂	$P_u = 350 \text{ kN}$, 剪摩破坏
RW7	$P < 190 \text{ kN}$ 墙体水平位移较小	$190 < P < 373 \text{ kN}$, $P_{cr} = 190 \text{ kN}$ 墙体与底梁连接处首先出现裂缝	$P_u = 373 \text{ kN}$, 剪摩破坏 底部砖块大部压碎鼓出,面外倾斜
RW8	$P < 190 \text{ kN}$ 墙体水平位移较小	$190 < P < 322 \text{ kN}$, $P_{cr} = 190 \text{ kN}$ 墙底4~5皮砖高度,出现水平裂缝	$P_u = 322 \text{ kN}$, 剪摩破坏

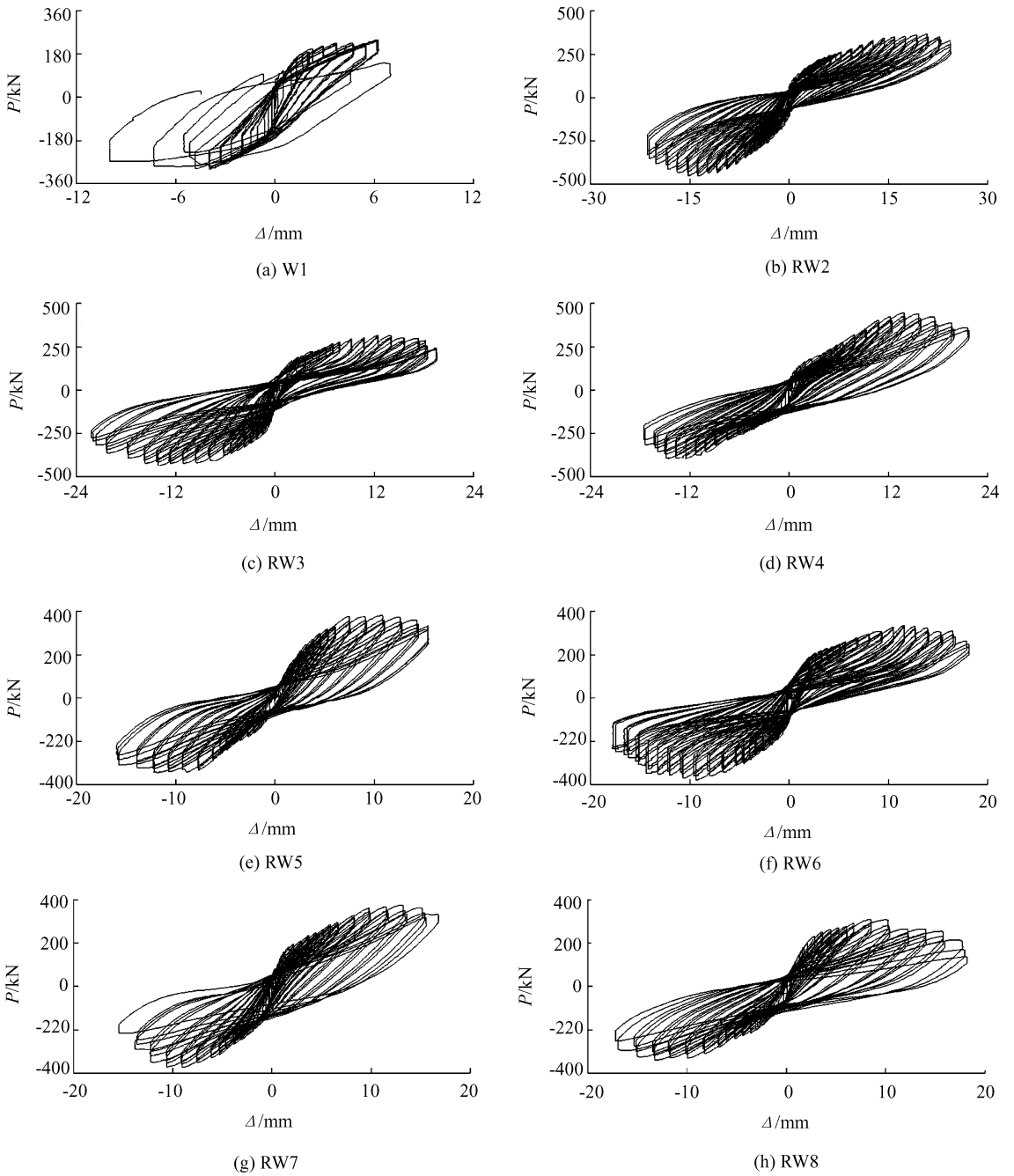


图4 荷载-位移滞回曲线

Fig. 4 Load-displacement hysteretic curves

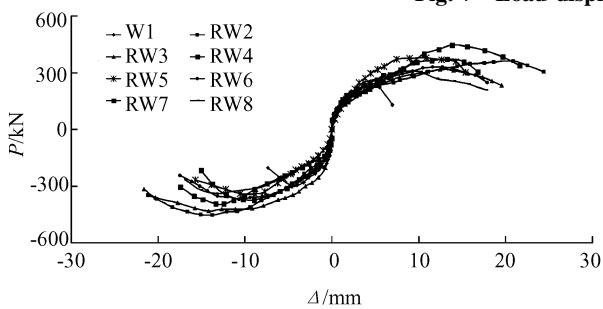


Fig. 5 Load-displacement skeleton curves

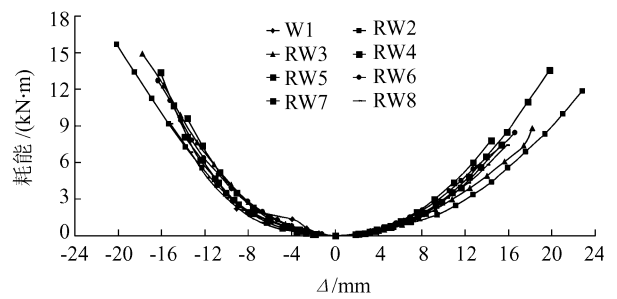


Fig. 6 Accumulated energy dissipation

表4 试验结果对比
Tab.4 Comparison of test results

试件 编号	开裂荷载		开裂位移		极限荷载		极限位移		延性系数	
	试验值/kN	提高/%	试验值/mm	提高/%	试验值/kN	提高/%	试验值/mm	提高/%	试验值	提高/%
W1	180	—	1.1	—	260	—	6.1	—	5.5	—
RW2	200	11.1	2.9	163.6	406	56.2	22.1	262.3	7.6	38.2
RW3	200	11.1	2.2	100.0	375	44.2	19.0	211.5	8.6	56.4
RW4	190	5.6	2.7	145.5	419	61.2	18.3	200.0	6.8	23.6
RW5	180	0.0	2.6	136.4	361	38.8	14.5	137.7	5.6	1.8
RW6	190	5.6	1.9	75.7	350	34.6	15.8	159.0	8.3	50.9
RW7	190	5.6	1.9	75.7	373	43.5	14.8	142.6	7.8	41.8
RW8	190	5.6	2.6	136.4	322	23.8	15.1	147.5	5.8	5.5

从骨架曲线可以看出:在位移为0~2 mm时,骨架曲线基本呈直线,其中RW2与W1无明显差异,而RW3~RW6骨架曲线斜率因损伤和修复程度不同而仍存在一定差异。开裂后,砖墙与纤维共同受力,加固试件极限承载力较W1明显提高。达到极限荷载之后,玄武岩纤维为主要受力构件,加固试件出现明显屈服,刚度下降缓慢,RW3~RW6极限位移较RW2要小。

从耗能曲线可以看出:加载初期,墙体为弹性受力,正负向荷载作用下墙体变形比较对称,因此各试件的累计耗能基本对称。加载后期,正负向荷载作用下,墙体进入弹塑性变形阶段,卸载后墙体有较大的残余变形,各试件的损伤程度略有不同,对应墙顶荷载-位移响应不对称,因此累计耗能呈不对称状态。

3 玄武岩纤维加固墙体受剪承载力计算

未加固砌体按照抗震规范进行计算,加固后墙体的抗剪承载力由砌体抗剪承载力和BFRP提高承载力组成^[15],如式(1)所示:

$$V_u = (1 + \lambda_e) \zeta_N f_v A + \alpha m n b_f t_f E_f \varepsilon_{efx} \cos \theta + \sum_{i=1}^n \alpha m n b_f t_f E_f \varepsilon_{efh} \quad (1)$$

需要说明: λ_e 为考虑本试验中水平纤维布环绕

粘贴增大系数,由式(2)计算,但在实际工程中水平纤维布很难实现环箍约束效果, λ_e 取0即可。

$$\lambda_e = v_d \lambda_{FS} \quad (2)$$

式中, $v_d = \bar{\varepsilon} / \varepsilon_u$, $\lambda_{FS} = \frac{A_f l_f}{L h s_f} \times \frac{f_f}{f_m}$, $\zeta_N = \frac{1}{1.2} \times$

$$\sqrt{1 + 0.45 \frac{\sigma}{f_v}} f_v = f_{v0} \sqrt{1 + \frac{\sigma}{f_{v0}}} \quad (3)$$

式(1)~(3)中: $\bar{\varepsilon}$ 为实测纤维布拉应变; ε_u 为纤维布极限拉应变;依据试验分析 v_d 取0.3; A_f 、 l_f 、 f_f 分别为单条水平纤维布条带面积、周长和抗拉强度; L 、 h 、 H 、 A 分别为砖墙宽度、厚度、高度和水平截面面积; s_f 为水平纤维布条带中心间距; f_m 为砌体抗压强度平均值; f_{v0} 为竖向压应力为0时砌体抗剪强度; α 为纤维布有效层加固系数,单层取1.0,双层取0.9; m 为加固面数; E_f 、 t_f 、 b_f 和 n 分别为纤维布弹性模量、厚度、宽度和层数; ε_{efx} 、 ε_{efh} 分别为斜向纤维布和水平纤维布有效拉应变; θ 为纤维布受力方向与墙体水平向夹角; $\sigma = \sigma_0 + \Delta \sigma_0$, σ_0 为竖向压应力, $\Delta \sigma_0 = \alpha_x m n b_f t_f E_f \varepsilon_{efx} \sin \theta / A$ 。

由式(1)计算得出的值与试验值对比见表5。其中,损伤加固墙体在加固之前墙体已经达到严重破坏状态,虽然经过修复,但承载力已经有所下降,考虑到施工差异、结构安全储备以及实际工程中应

表5 承载力计算值与试验值对比

Tab.5 Comparison of calculated and test values of bearing capacities

试件编号	$V_{u,c}$ /kN	$V_{u,exp}$ /kN	$V_{u,c} : V_{u,exp}$	试件编号	$V_{u,c}$ /kN	$V_{u,exp}$ /kN	$V_{u,c} : V_{u,exp}$
W1	266	260	1.022	RW5	329	361	0.913
RW2	342	406	0.842	RW6	288	350	0.821
RW3	347	375	0.924	RW7	296	373	0.793
RW4	355	419	0.846	RW8	285	322	0.882

用的可行性,参考本次试验数据统计分析,取砌体部分折减系数为0.8进行折减。需要说明: $V_{u,c}$ 为理论计算值, $V_{u,exp}$ 为试验值。

4 结 论

通过8片砌体砖墙试件的低周反复荷载试验,研究了玄武岩纤维加固砌体砖墙的抗震性能,得出如下主要结论。

1) 加载初期,玄武岩纤维与砖墙能够很好的协同受力,并且在砖墙开裂后承担了部分水平荷载,降低了砖墙的应力水平。加载后期,由于砖墙开裂错动,玄武岩纤维与砖墙剥离破坏比较严重,影响了BFRP加固效果的进一步发挥。

2) 玄武岩纤维加固提高了砌体砖墙的极限承载力和极限位移。与未加固试件相比,损伤后加固试件和未损伤加固试件极限荷载平均提高了35.1%和53.7%,极限位移均值分别提高了146.7%和224.6%。

3) 玄武岩纤维混合加固能够显著提高砖墙抗震性能,在灾后恢复重建阶段采用BFRP加固可以取得较好社会和经济效益。

参考文献:

- [1] Wei Changqin, Zhou Xingang. Experimental study on masonry walls strengthened with CFRP[J]. Engineering Mechanics, 2006, 23(S2): 150 - 154. [韦昌芹, 周新刚. CFRP 加固砌体结构的试验研究[J]. 工程力学, 2006, 23(S2): 150 - 154.]
- [2] Lin Lei, Ye Lieping. Experimental investigation on masonry wall strengthened with FRP[J]. Building Structure, 2005, 35(3): 21 - 27. [林磊, 叶列平. FRP 加固砖砌体墙的试验研究与分析[J]. 建筑结构, 2005, 35(3): 21 - 27.]
- [3] Lu Yiyan, Huang Yinshen, Zhang Haojun, et al. New progress in the study of the technology of reinforcement with fiber reinforced plastics[J]. China Railway Science, 2006, 27(3): 34 - 42. [卢亦炎, 黄银桑, 张号军, 等. FRP 加固技术研究新进展[J]. 中国铁道科学, 2006, 27(3): 34 - 42.]
- [4] Ouyang Lijun. Experimental and theoretic study of reinforced concrete members strengthened with BFRP and CFRP[D]. Shanghai: Tongji University, 2011. [欧阳利君. 玄武岩纤维与碳纤维加固混凝土结构构件试验与理论研究[D]. 上海: 同济大学, 2011.]
- [5] Hu Xianqi, Shen Tunian. The applications of the CBF in war industry & civil fields[J]. Hi-tech Fiber & Application, 2005, 30(6): 7 - 13. [胡显奇, 申屠年. 连续玄武岩纤维在军工及民用领域的应用[J]. 高科技纤维与应用, 2005, 30(6): 7 - 13.]
- [6] Wu Gang, Gu Dongsheng, Wu Zhishen, et al. Comparative

- study on seismic performance of circular concrete columns strengthened with BFRP and CFRP composites[J]. Industrial Construction, 2007, 37(6): 19 - 23. [吴刚, 顾冬生, 吴智深. 玄武岩纤维与碳纤维加固混凝土圆形柱抗震性能比较研究[J]. 工业建筑, 2007, 37(6): 19 - 23.]
- [7] Gong Binwen, Zhao Jingjing, Jin Wenxin. Performance comparison of dual-way concrete slab strengthened with flaky basalt and carbon fiber[J]. Building Construction, 2007, 29(6): 440 - 442. [龚斌文, 赵晶晶, 金文鑫. 玄武岩与碳纤维片材加固混凝土双向板的性能比较[J]. 建筑施工, 2007, 29(6): 440 - 442.]
- [8] Cheng Li. Investigation of BFRP-reinforced pre-damaged concrete beam-column joints under reversed cyclic loading[D]. Shanghai: Tongji University, 2008. [程莉. 玄武岩纤维加固震损混凝土框架节点抗震性能试验研究[D]. 上海: 同济大学, 2008.]
- [9] Ouyang Yu, Wang Peng, Li Xiang. Experimental study on flexural RC beams strengthened with BFRP sheets[J]. Building Structure, 2008, 38(11): 74 - 77. [欧阳煜, 王鹏, 李翔. 玄武岩纤维布加固钢筋混凝土梁受弯试验研究[J]. 建筑结构, 2008, 38(11): 74 - 77.]
- [10] Li Zhiqiang, Ma Jiansuo, Li Yanfang, et al. Experimentally investigation of concrete beams with basalt fiber reinforced sheet[J]. Architecture Technology, 2010, 41(3): 248 - 250. [李志强, 麻建锁, 李艳芳, 等. 玄武岩纤维布加固钢筋混凝土梁抗剪承载力试验研究[J]. 建筑技术, 2010, 41(3): 248 - 250.]
- [11] Sun Yanying, Liu Yilin, Hu Haitao. Experimental study on reinforced concrete beams strengthened with BFRP[J]. Journal of Qingdao Technological University, 2010, 31(1): 29 - 32. [孙衍英, 刘伊琳, 胡海涛. 玄武岩纤维布加固钢筋混凝土梁受力性能的研究[J]. 青岛理工大学学报, 2010, 31(1): 29 - 32.]
- [12] ElGawady M A, Lestuzzi P, Badoux M. Static cyclic response of masonry walls repaired fiber-reinforced polymers[J]. Journal of Composites for Construction, ASCE, 2007, 11(1): 50 - 61.
- [13] Luccioni B, Rougier V C. In-plane retrofitting of masonry panels with fiber reinforced composite materials[J]. Construction and Building Materials, 2011, 25(4): 1772 - 1788.
- [14] 中国建筑科学研究院. JGJ 101—96 建筑抗震试验方法规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997.
- [15] Wang Jibing. Research on seismic behaviors of seismically damaged masonry wall repaired by external BFRP[D]. Shanghai: Tongji University, 2012. [王继兵. 玄武岩纤维加固震损伤砌体墙抗震性能研究[D]. 上海: 同济大学, 2012.]