

文章编号: 1000-5013(2007)02-0182-06

GFRP 加固带壁柱砖墙平面外受荷性能试验

王全凤, 陈 凡, 黄奕辉, 杨勇新, 黄群贤

(华侨大学 土木工程学院, 福建 泉州 362021)

摘要: 通过两批试件(7个试件)9次试验,研究玻璃纤维复合材料(GFRP)加固带壁柱砖墙的平面外受荷性能.由试验结果分析可知,采用GFRP对带壁柱砖墙进行加固,可以有效地提高砖墙的平面外抗弯能力和延性.即可以提高砖墙的极限承载力.对于刚度较大的带壁柱墙体,当GFRP加固量达到一定程度,其平面外抗弯承载能力得到较大的提高,而平面外方向的抗剪承载能力提高有限,导致试件的平面外受荷能力由其抗剪承载能力控制.采用不对称加固,会导致墙体的裂缝开展不对称,从而使得墙体刚度不对称,墙体出现附加扭转,减弱GFRP对墙体抗弯承载能力的加固效果.

关键词: 玻璃纤维复合材料; 加固; 砖墙; 平面外

中图分类号: TU 360.2

文献标识码: A

砌体结构是最古老的建筑结构之一^[1],其材料来源广泛、造价低廉、结构形式简单,被广泛地应用到大量的民用和工业建筑中.目前,许多仍在使用的砌体建筑,由于结构老化等原因,需要重新对其进行检测评估和加固.在众多的加固方法中,纤维复合材料(FRP)复合材料加固技术以其简便的施工工艺及优良的加固效果,得到土木工程界的普遍赞同^[2-3].有关FRP复合材料加固砌体平面外受荷性能的试验研究还比较少,国内基本没有开展,而国外的虽对FRP加固矩形砌体墙进行了一定的研究^[4-7],但研究对象单一,均为单纯的矩形砌体墙.本文的试验研究对象为带壁柱的砖墙,研究用GFRP加固带壁柱砖墙平面外的受荷性能,分析GFRP加固带壁柱砖墙的工作机理和加固效果,为工程应用提供理论支持和技术保障,并为今后FRP加固规程、规范中的砌体部分提供参考和建议.

1 试验设计

1.1 试件设计

1.1.1 设计参数 影响GFRP加固带壁柱砖墙平面外受荷承载力的因素,主要有竖向压力、GFRP的加固量、GFRP布的粘贴方式、砂浆的强度等级、墙体的高厚比和GFRP的锚固情况.对各参数的选取情况有如下6点.(1) 竖向压力.在选取竖向荷载 P 时,主要考虑了轴向压力对抗弯承载力的影响.竖向压力越大,试件的抗弯能力越强,同时砌体的抗剪承载力也得到提高.因此,试验的竖向荷载 P 取55 kN和10 kN两种.(2) GFRP的加固量. GFRP的加固量对砌体墙面外抗弯承载力有着重要的影响.根据抗弯的要求,确定GFRP的加固数量(厚度、间距).加固量引用钢筋混凝土梁的配筋率 ρ_g 表示,有

$$\rho_g = \frac{A_g}{A_w} \times 100\% = \frac{t_g \cdot b_g}{A_q} \times 100\%. \quad (1)$$

式中, t_g 表示GFRP的厚度, b_g 为粘贴于试件上GFRP布的总宽度, A_w 为试验墙的横截面面积, A_q 为粘贴于试件上GFRP布的总截面面积.(3) 砂浆强度等级与砖强度等级.对需要加固的墙体来讲,墙体已经受到了不同程度的损伤,况且还需考虑到墙体所处的不利环境、低利用率等不利因素,实际上,墙体的强度是比较低的.考虑到市场上没有低强度的砌块,本试验也采用MU10的普通标准粘土砖.砂浆强

收稿日期: 2006-08-18

作者简介: 王全凤(1945-),男,教授,博士生导师,主要从事土木工程的研究. E-mail: qfwang@hqu.edu.cn.

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863)项目子项目(2001AA336010)

©1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

度 f_2 选用 M2.5 和 M7.5 两种水泥砂浆。(4) 墙体尺寸. 墙体的尺寸也是决定墙体抗弯承载力的重要因素. 由于试验为带壁柱的砖墙, 壁柱的尺寸既要能反应出其对墙体的影响, 又不能过分干扰墙体本身的研究, 并且要考虑试验的具体的可操作性和砌体模数的选择. 所以, 壁柱截面的尺寸选取 240 mm × 240 mm, 布置在墙体的中间, 模拟常见砌体结构中的纵墙体系、窗间墙体系, 以及某些跨度较大的横墙体系. 横向的长度, 主要考虑到壁柱存在以及砌块的尺寸模数, 而高度要考虑到使砌体出现弯曲破坏, 因此, 试件的具体尺寸(高×宽×厚) 选为 1 800 mm × 960 mm × 240 mm, 如图 1 所示.(5) GFRP 的粘贴方式. GFRP 的粘贴方式主要是沿试验墙受拉方向粘贴, 所不同的是试件的加固量. 试验试件的具体加固形式, 如图 2 所示.(6) GFRP 与墙体的锚固情况. GFRP 与墙体的锚固效果将决定砌体的破坏模式.

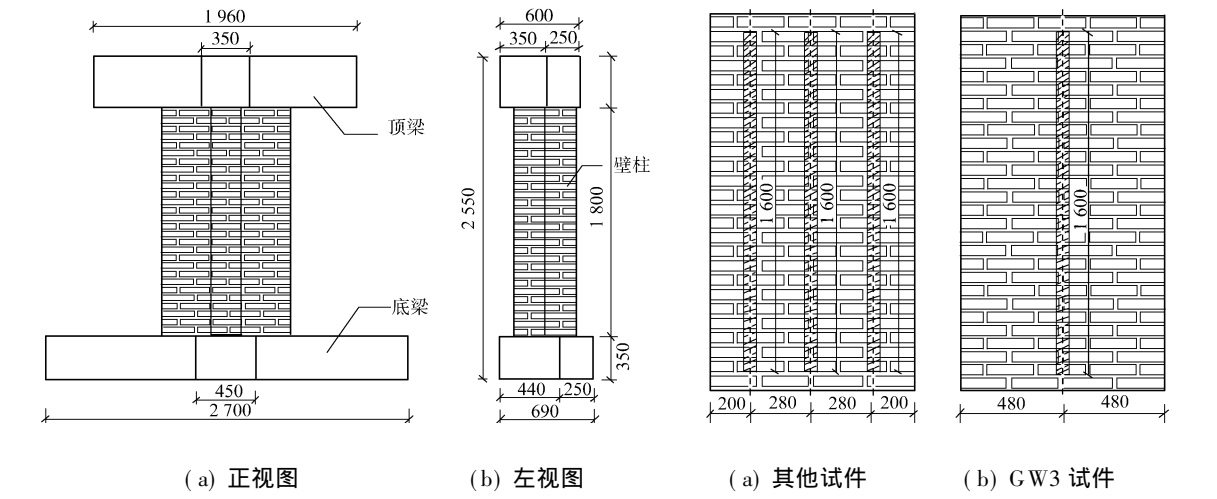


图 1 试验墙尺寸

图 2 试验试件的加固形式

Fig. 1 Dimension of specimen

Fig. 2 Strengthening types of specimens

破坏模式预计有以下 4 种形式. (a) GFRP 被拉坏. 表示充分发挥 GFRP 的抗拉能力. (b) GFRP 剥离破坏. 因为砖砌体的抗拉强度不够. (c) 受压区被压碎. 由于 GFRP 加固量比较大, 且在 GFRP 与墙体之间的粘结强度得到保证的情况下, 才有可能出现的破坏模式. 因此试验中应采用有效的锚固措施, 避免出现剥离破坏. (d) 砖墙发生剪切破坏. 主要是因为带壁柱砌体墙本身刚度较大, 再加上 GFRP 加固量足够大, 使得砖墙的抗弯能力大于其抗剪能力, 最后砌体墙在平面外荷载作用下先发生剪切破坏.

综合上面的分析, 本试验主要考虑竖向荷载 P , GFRP 的加固量、砂浆强度 f_2 这 3 个主要影响因素. 将试验试件分为两批进行试验, 主要影响因素的取值, 如表 1 所示. 表中, n 为单面墙体的 CFRP 条数.

1.1.2 试件的设计与制作 (1) 顶梁和底梁的制作. 试验试件顶梁和底梁的混凝土抗压强度分别设计为 C60

表 1 试件参数汇总表						
Tab. 1 Parameters of specimens						
批号	编号	f_2	n	$\rho_g / (\%)$	b_g / mm	P / kN
第 1 批	BW1	M2.5	—	—	—	55
	GW1	M2.5	3	0.017 6	100	55
	GW2	M2.5	3	0.008 8	50	55
	GW3	M2.5	1	0.004 4	75	55
第 2 批	BW2	M7.5	—	—	—	10
	GW4	M7.5	3	0.005 3	30	10
	GW5	M7.5	3	0.008 8	50	10

和 C40. 为了使压梁和底梁满足构件所需要的强度和刚度要求, 压梁和底梁的具体尺寸如图 1 所示. 顶梁和底梁的具体配筋略. 此外, 为防止试验过程中墙体出现滑移, 墙体与顶梁和压梁之间采用 M10 砂浆粘结, 必要时再掺入一些增强粘结性能的结构胶. (2) 墙体的制作. 为了避免材料差异和施工质量产生的影响, 尽可能保证墙体的同一性, 以取得试验结果的可信度. 墙体的砌筑采用较严格的砌筑工序——分皮流水作业, 即同一皮试件只有一名泥工砌筑, 而且每一组墙体试件的同一高度用同一次拌合的砂浆. 砌完所有试件同一高度的一皮砖后, 再进行下一皮的砌筑, 而不是砌完一个试件后就砌下一个试件. 这种方法可以使每一次拌出的砂浆有同等的机会分布在各片墙体上, 从而保证了墙体试件之间的同一性. 试验墙体具体的制作方法和养护, 严格按照建筑砌体工程施工工艺标准的要求完成. (3) 材料性能. 考虑到砌体本身的离散性, 为了得到较准确的砂浆强度, 试件砌筑前, 还进行了系统的砂浆配合比的

试验和研究,保证了试验的砂浆强度与设计值的吻合.粘土砖设计强度为 MU 10,实测为 14.1 MPa, M2.5 混合砂浆 28 d 的平均抗压强度为 2.8 MPa, M5.0 混合砂浆 28 d 的平均抗压强度为 9.4 MPa. 本文试验采用的加固 GFRP 是由南京彤天科技实业有限公司提供的高强 GFRP 布,型号为 EGF430. 为了能准确了解加固后的各项性能,本文特别按纤维增强复合材料片材(FRP 片材)力学性能测试方法中的单向纤维增强复合材料片材拉伸性能试验方法的规定^[8],对加固用的 GFRP 复合材料的性能进行试验测定. 粘结 GFRP 用的环氧树脂的质量也是尤为重要的,必须用 FRP 复合材料专用的结构胶,其基本条件要符合现有规程的要求^[8]. 本文试验所采用的结构胶的所有指标均符合要求. (4) GFRP 加固砖墙的施工过程. 与 FRP 加固混凝土的工法类似, GFRP 加固砌体结构的工法大体分为以下几个步骤: 施工准备→砌体表面处理→配制并涂刷底层树脂→配制找平树脂并修复部分不平位置→配制粘贴树脂并粘贴 FRP 布条带→GFRP 布构造处理→表面防护. 具体的施工步骤略.

1.2 试验加载方案

本试验是研究用 GFRP 加固带壁柱砌体墙的平面外受荷性能,同时考虑轴压力对试件承载力的影响. 因此,需要通过水平加载装置提供平面外水平推力,以及竖向加载装置提供轴压力. 本试验的整体试验装置,如图 3 所示.

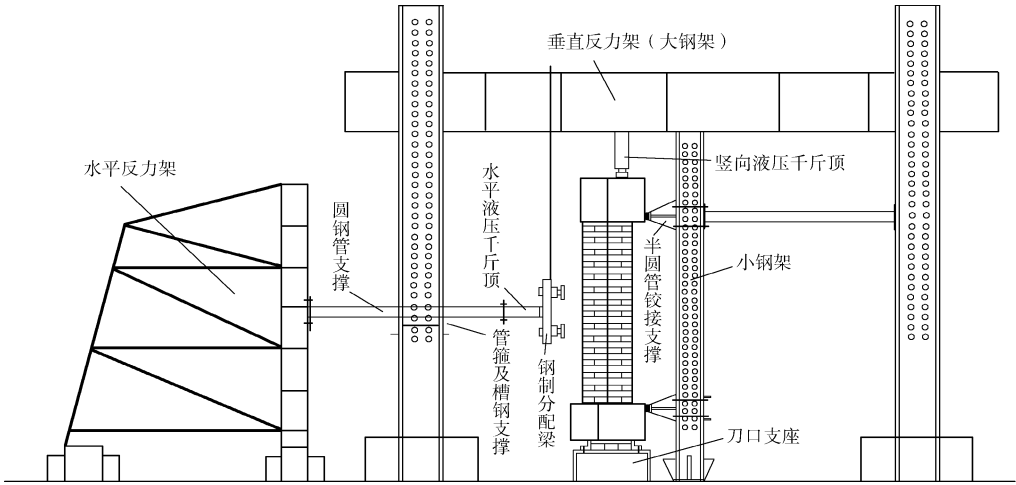


图 3 试验装置示意图

Fig. 3 Setup of the experiment

1.2.1 水平加载方案 本试验的研究对象是带壁柱的砖墙,参考国外的试验方案,试验通过液压千斤顶来提供平面外水平荷载. 荷载作用于带壁柱砖墙的壁柱面上,并通过钢制分配梁将荷载分为两个水平方向的作用力. 每个作用点由一个 20 kN 的传感器和加载板组成通过螺栓与钢制分配梁联结而成,如图 4 所示. 由图 4 可知,两个荷载作用点以墙体中线为轴,对称地作用于试验墙的壁柱面上,两个作用点的间距为 380 mm. 试验墙体在两个平面外水平荷载作用下,将发生弯曲变形. 在两个加载点之间有一段 380 mm 的纯弯段,可用来研究试验墙体在弯矩作用下的变形情况和破坏机理.

1.2.2 竖向加载方案 竖向荷载是影响试验墙抗弯强度的一个非常重要的因素,同时它也是影响试验墙抗剪强度的

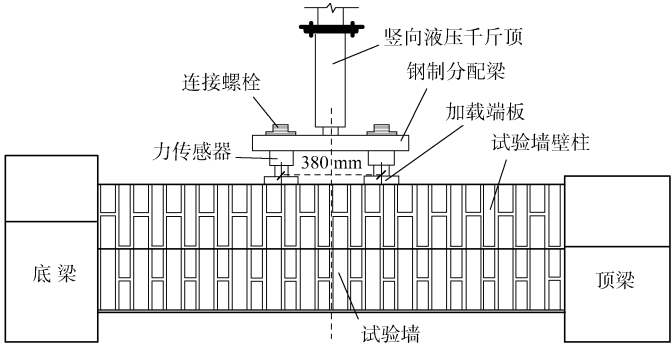


图 4 水平加载详图(顺时针旋转 90°)

Fig. 4 Horizontal loading setup (rotated 90° counter clockwise)

的重要因素之一. 在实际工程中,墙体的正压力较大,容易发生倒塌. 根据对实际工程的调查,一般工程上墙体所受到的实际轴压比 θ_0/f_m 都小于 0.25. 为了不脱离实际现状,又尽可能反映墙体受力较不利情况下的加固效果,试验竖向荷载取 10 kN 和 55 kN 两种. 本试验的试件截面为 T 型截面,试验墙的截

面面积 A 为 0.288 m^2 . 为了保证千斤顶施加的是轴向力, 应使液压千斤顶的球铰触头的中心与墙体的形心重合.

1.2.3 整体加载顺序和加载制度 首先, 加竖向荷载. 根据所设计的竖向荷载, 由稳压油泵将竖向液压千斤顶压力值升至所设计的竖向荷载大小, 并稳住竖向压力. 其次, 加水平荷载. 水平荷载采用拟静力单调加载, 并采用力和位移混合控制的加载制度. 即在加载初期, 以力的大小来控制加载, 当试件达到屈服状态时, 改为位移控制, 直到试件破坏.

1.3 试验量测方案

试验需量测的试验数据, 有水平荷载、竖向荷载、墙体上关键点的应变、GFRP 布上关键点的应变、墙体上特定高度的水平位移等. 相应的量测仪器和装置, 有拉-压力传感器、电子秤、应变片、电子位移计、DH3816(静态应变测试系统)和电脑等. 试验的量测方案由荷载量测系统、位移量测系统和应变量测系统 3 个量测系统组成.

1.3.1 荷载量测系统 荷载量测系统由拉-压力传感器、电子秤、DH3816(静态应变测试系统)和电脑组成, 包括水平荷载量测和竖向荷载量测两项内容. 水平荷载的数据通过拉-压力传感器和 DH3816(静态应变测试系统)采集, 并导入电脑中便于分析和观察; 竖向荷载的数据通过拉-压力传感器和电子秤量测, 并由电子秤直接显示便于试验过程进行调控.

1.3.2 位移量测系统 位移量测系统由电子位移计、DH3816(静态应变测试系统)和电脑组成. 试验主要对试验墙的顶端、中部和底端位移进行量测, 位移数据通过电子位移计和 DH3816(静态应变测试系统)采集, 并导入电脑中便于对试验试件的跨中挠度进行分析和监控.

1.3.3 应变量测系统 应变量测系统由应变片、DH3816(静态应变测试系统)和电脑组成. 试验所用的应变片均为铂基应变片, 且有两种标距. 标距为 60 mm 的应变片用于量测墙体表面的应变; 标距为 10 mm 的应变片用于量测粘贴于墙面上的单向 GFRP 布表面的应变. 试验过程中, 墙体和 GFRP 布上关键点处的应变由应变片量测, 再通过 DH3816(静态应变测试系统)来采集数据, 并导入电脑, 便于对墙体裂缝开展和布上应变发展进行分析和监控.

2 试件的破坏情况分析和汇总

试验根据竖向荷载、GFRP 的加固量、砂浆强度这 3 个主要影响因素, 将试验试件分为两批进行试验. 两批试件的砌筑砂浆设计强度不同, 分别为 M2.5 和 M7.5; 两批试件试验过程中施加的竖向荷载大小不同, 分别为 55 kN 和 10 kN . 其中, 第 1 批试件的加固量较大, 故加固试件均发生剪切破坏; 第 2 批试件的加固量较小, 且竖向荷载较小, 故加固试件均发生弯曲破坏.

2.1 试验试件的破坏情况分析

2.1.1 第 1 批试件的破坏情况分析 本批试验试件的最后破坏模式以剪切破坏为主, 只有对比试件 BW1 为弯曲破坏, 如图 5 所示. (1) 对比试件 BW1. 第 1 批试件的对比试件 BW1 是未加固的试件, 本批试件的砌筑砂浆强度较低, 施加的竖向荷载较大. 由于对比试件 BW1 砌筑砂浆的强度较低, 使得砖砌体的抗弯能力有限, 试件的破坏形态为弯曲破坏, 具体破坏照片如图 5 所示. (2) 加固试件 GBW1, GW1, GW2 和 GW3. 第 1 批试件的其他加固试件 GBW1, GW1, GW2 和 GW3, 由于 GFRP 的加固量较大, 试件的抗弯性能得到极大的提高. GFRP 抗弯加固对试件抗剪能力的提高很有限, 且刀口支座的附加弯矩较大, 使得第 1 批试件中加固试件的最终破坏形态以剪切破坏为主. 各加固试件的具体破坏照片, 如图 6(a)~(d) 所示.

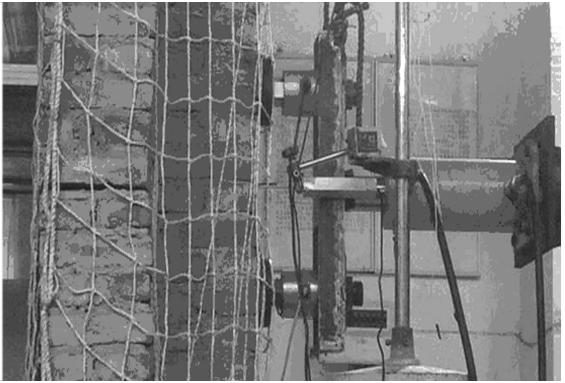


图 5 对比试件 BW1 弯曲破坏照片
Fig.5 Bending failure photo of comparison specimen BW1

2.1.2 第 2 批试件的破坏情况分析 试验第 2 批试件的砌筑砂浆强度较高,施加的竖向荷载较小,且加固试件的 GFRP 加固量较小,使得本批试件的所有试验均为弯曲破坏. 各试件的具体破坏照片,如图 6(e)~ (h) 所示.

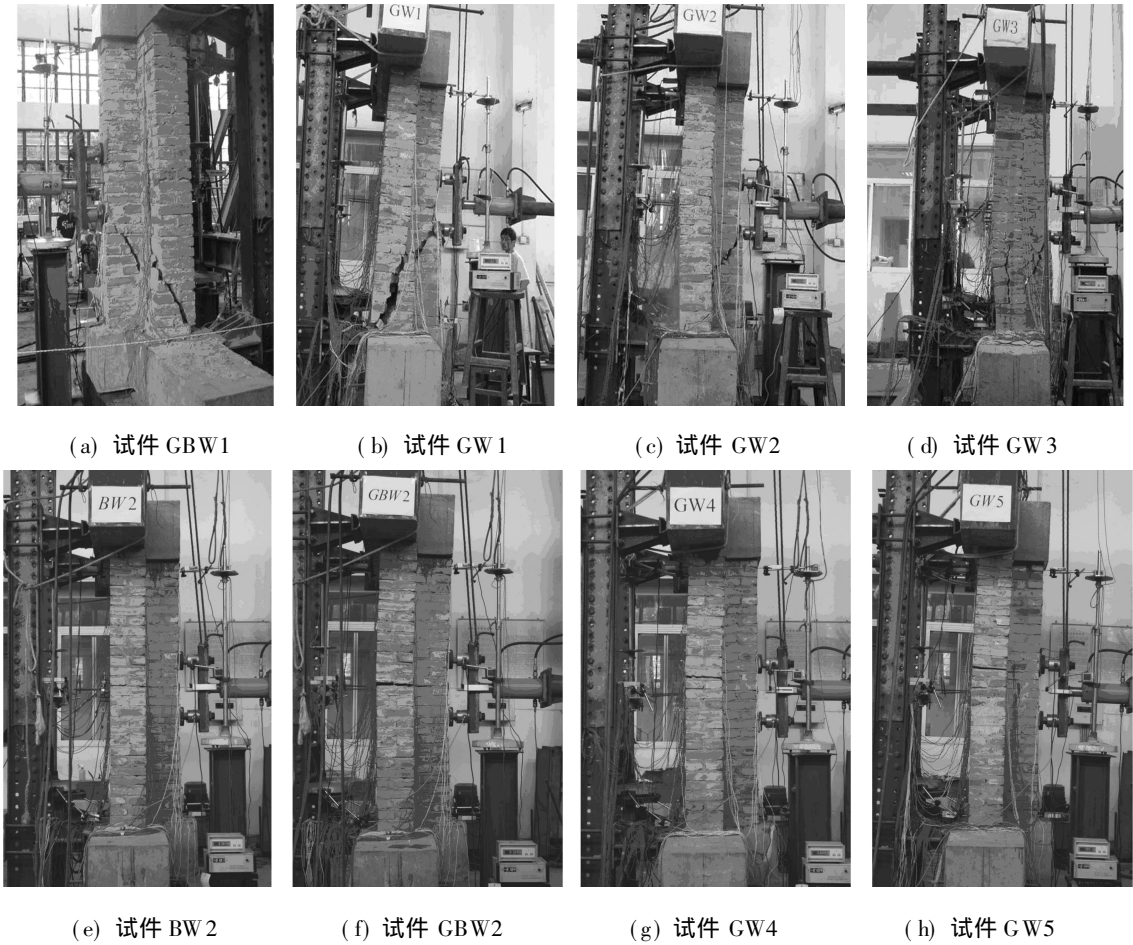


图 6 试件破坏情况照片

Fig. 6 Photos of specimen failure

2.2 试验试件的破坏情况汇总

本文试验第 1 批试件除对比试件发生弯曲破坏外,其他加固试件均为剪切破坏;第 2 批试验试件均发生弯曲破坏. 各试件的破坏情况,如表 2 所示. 表中, GBW1 为未加固墙 BW1 试验后进行加固,加固方式与 GW1 一样; GBW2 为未加固墙 BW2 试验后进行加固,加固方式与 GW4 一样; F_u 为极限承载力, φ 为承载力提高值, d_u 为极限位移值, η 为位移提高值.

表 2 试件破坏情况汇总表

Tab. 2 Failures of specimens

批号	编号	F_u/kN	$\varphi/(\%)$	d_u/mm	$\eta/(\%)$	墙体破坏形态
第 1 批	BW1	43.72	—	6.72	—	弯曲破坏
	GBW1	87.71	1.01	14.77	1.200	剪切破坏
	GW1	95.62	1.19	11.82	0.076	剪切破坏
	GW2	83.92	0.92	8.90	0.320	剪切破坏伴随 GFRP 局部剥离
	GW3	77.62	0.78	9.68	0.440	剪切破坏伴随弯曲破坏
第 2 批	BW2	27.10	—	3.04	—	弯曲破坏
	GBW2	47.18	0.74	4.10	0.350	弯曲破坏
	GW4	39.09	0.44	3.71	0.220	弯曲破坏
	GW5	54.85	1.02	5.58	0.840	弯曲破坏

3 结束语

通过对 GFRP 加固带壁柱砖墙平面外受荷性能试验研究和分析,本文可得到以下 5 个结论. (1) 对于兼有竖向荷载作用的平面外受荷砖墙,其实际受力情况较复杂,墙体开裂后,墙体的中和轴发生偏移,使墙体上部的竖向荷载产生对抗弯有利的弯矩,计算时应考虑. (2) 采用 GFRP 加固带壁柱砖墙,可以有效地提高砖墙的抗弯承载能力. (3) 采用 GFRP 对受损试件进

行加固,也可以有效地提高其抗弯承载能力。(4) 对于刚度较大的带壁柱墙体,当 GFRP 加固量达到一定程度,其平面外抗弯承载能力得到较大的提高,而平面外方向的抗剪承载能力提高有限,导致试件的平面外受荷能力由其抗剪承载能力控制。(5) 若采用不对称加固,会导致墙体的裂缝开展不对称,从而使得墙体刚度不对称,使墙体出现附加扭转,减弱 GFRP 对墙体抗弯承载能力的加固效果,故应采用均匀的对称加固。

参考文献:

[1] 丁大均. 砌体结构[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997.

[2] 岳清瑞. 纤维增强塑料(FRP)在土木工程结构中的应用技术的进展[C]// 第二届全国土木工程用纤维增强复合材料(FRP)应用技术学术交流会议论文集. 北京: 清华大学出版社, 2002: 18-22.

[3] 冯 鹏, 叶列平. FRP 结构和 FRP 组合结构在结构工程中的应用与发展[C]// 第二届全国土木工程用纤维增强复合材料(FRP)应用技术学术交流会议论文集. 北京: 清华大学出版社, 2002: 51-63.

[4] Velazquez Dimas J I, Ehsani M R. Modeling out of plane behavior of URM walls retrofitted with fiber composites [J]. Compos Constr, 2000, 4(4): 172-181.

[5] AIBERT M L, ELWI A E, CHENG J J R. Strengthening of unreinforced masonry walls using FRPs[J]. Compos Constr, 2001, 5(2): 76-84.

[6] HAMILTON H R III, DOLAN C W. Flexural capacity of glass FRP strengthened concrete masonry walls[J]. Compos Constr, 2001, 5(3): 170-178.

[7] TAN K H, PATOARY M K H. Strengthening of masonry walls against out of plane loads using fiber reinforced polymer reinforcement[J]. Compos Constr, 2004, 8(1): 170-178.

[8] 中国工程建设标准化协会. CECS 146: 2003 碳纤维片材加固修复混凝土结构技术规程[S]. 北京: 中国计划出版社, 2003: 5-7.

Experimental Research on Out-of Plane Performance Capacity
of GFRP Strengthened Brick Walls with Pilaster

WANG Quan-feng, CHEN Fan, HUANG Yi-hui,
YANG Yong-xin, HUANG Qun-xian

(College of Civil Engineering, Huaqiao University, Quanzhou 362021, China)

Abstract: It's carried out the experimental research on out-of plane capacity of GFRP (glass fiber reinforced polymers) strengthened brick walls with pilaster, by two batch specimens (seven brick wall specimens) for 9 times. The experimental results indicate: GFRP strengthening can effectively increase the out-of plane flexural capacity and ductility of brick walls, namely, improving the ultimate load carrying capacity. For larger stiffness brick walls with pilaster, when increasing the quantity of GFRP to a certain degree, the out of plane flexural capacity of the brick walls increases obviously, but the increment of out of plane shear capacity is limited, thus the out of plane capacity of the specimens is controlled by the out of plane shear capacity. When adopting the unsymmetrical strengthening, both crack distribution and stiffness of the wall are unsymmetrical, thus an additional torsion occurs, the GFRP strengthening effect of the wall flexural capacity reduces.

Keywords: GFRP; strengthening; brick walls; out of plane

(责任编辑: 黄仲一)