

文章编号:1673-2049(2008)01-0065-05

# 玻璃纤维加固砖柱试验

罗 才 松

(福建工程学院 土木工程系,福建 福州 350007)

**摘要:**进行了 42 个(14 组)玻璃纤维(GFRP)片材全长包裹砖砌体柱和 9 个(3 组)对比砖柱的轴压试验,探讨了 GFRP 片材黏贴层数、试件截面尺寸、砂浆强度及倒角半径等参数对加固效果的影响;在考虑截面有效约束区和非有效约束区的基础上,重点分析了截面尺寸对加固效果的影响。试验结果表明:由于 GFRP 片材的约束作用,延缓了砖柱初始裂缝的出现,加固后试件的极限强度与黏贴层数呈线性关系,采用 GFRP 片材包裹加固砖柱能明显提高轴压极限强度与峰值应变。

**关键词:**玻璃纤维;加固试验;砖砌体柱;轴压极限强度;有效约束区

**中图分类号:**TU522.1

**文献标志码:**A

## Experiment on Brick Masonry Columns Strengthened with GFRP Sheets

LUO Cai-song

(Department of Civil Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350007, Fujian, China)

**Abstract:** Forty-two (fourteen groups) brick masonry columns whole along wrapped by glass fiber reinforced plastic (GFRP) sheets and nine (three groups) brick masonry columns for comparison were tested under axial compression. The influences which were considered to affect the confinement of brick masonry columns were as follows: stick layers of GFRP sheets, sectional size of specimens, strength of mortar, and radius at the corners etc. By considering the effective controlling area and the ineffective controlling area in the column section, author intensively analyzed the influence of sectional size to reinforced result. The experiment results indicate that because of the confined effect of GFRP sheets, the appearance of initial crack is postponed; the ultimate strength of reinforced testing column and stick layers are in linear relation; GFRP sheets can obviously enhance the ultimate axial compression strength and the peak value of brick masonry columns.

**Key words:** GFRP; reinforced test; brick masonry column; ultimate axial compression strength; effective controlling area

## 0 引 言

纤维增强材料(FRP)用于建筑物的加固有 2 个方面的优势:一方面施工简单、快捷,不会减少建筑物的使用空间;另一方面能适应不同的结构形式,而且耐腐蚀性能良好,所以应用愈来愈广泛。大量的试验研究证明<sup>[1-3]</sup>:当混凝土柱外包 FRP 以后,不仅

其承载力得到了很大的提高,同时对改善混凝土柱的变形能力亦能发挥很好的作用。近几年来,各国对 FRP 在砌体工程中的应用进行了大量的试验研究,研究结果表明<sup>[4-5]</sup>:FRP 能明显地改善砌体的抗震、抗剪及抗弯能力。但是,将 FRP 应用在砌体结构加固以提高其轴压性能的试验研究却相对滞后<sup>[6-7]</sup>,因而有必要对 FRP 加固砖砌体柱的轴压性

收稿日期:2007-11-28

基金项目:国家高技术研究发展计划(“八六三”计划)项目(2004AA336010)

作者简介:罗才松(1980-),男,湖北石首人,工学硕士,E-mail:0716jpu@163.com。

能做进一步的试验研究。

1 试验研究

1.1 试件设计与加固方法

根据《砌体基本力学性能试验方法标准》(GBJ 129—90)<sup>[8]</sup>,对采用外形尺寸为 240 mm×115 mm×53 mm 的普通黏土砖砌筑的砖柱,试件的标准尺寸为 240 mm×370 mm×720 mm,高厚比  $\beta$  等于 3。为了研究试件截面尺寸对砌体加固效果的影响,同时又可部分满足试验标准的要求,使试验具有一定的普遍适应性,按照模型试验设计方法<sup>[9]</sup>,采用抗压强度为 23.5 MPa,截面尺寸为 115 mm×55 mm×40 mm 的黏土砖砌筑 3 组约 1/2 的缩尺模型。模型的高度均为 350 mm,长宽比分别为 1.0、1.5、2.0,保证了所有加固试件的高厚比  $\beta$  均等于 3。试件的具体模型见图 1。所有加固试件均采用 GFRP 片材全长包裹加固,为了防止加固试件角部有过大的应力集中,将所有加固试件在转角处进行倒角处理。为了直观其加固效果,每组试件均设置了未包裹 GFRP 片材。试件参数及主要试验结果见表 1。

1.2 原材料

加固用 GFRP 片材为南京玻璃纤维研究设计院有限责任公司复合材料分公司生产的单向高强 GFRP 片材,配套树脂为南京海拓复合材料有限责

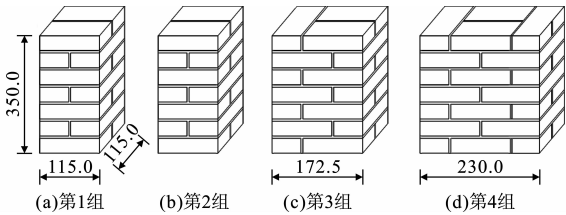


图 1 试件的轴测图(单位:mm)

Fig. 1 Axonometric Side-view Drawing of Specimens (Unit:mm)

任公司生产的 Lica100 型室温固化双组分环氧树脂黏贴剂,材料性能见表 2。

1.3 试验装置与测量方式

试验在 2 000 kN 长柱液压式试验机上进行,试验时将试件放在试验机压板上,采用物理对中使试验机中心线与试件重心重合。在试件的 2 个侧面各布置 1 个电测位移计,试件的位移取二者的算数平均值,所有数据通过 DH3816 静态应变采集仪由计算机自动采集。

2 试验结果与分析

2.1 试件的破坏形态

试件 Z1a、Z2a、Z3a 为未加固砖柱。由于没有横向约束作用,在轴向力作用下,当荷载加载到试件极限荷载的 50%~70%<sup>[10]</sup>时,在竖向灰缝处开始出

表 1 试验参数及主要试验结果

Tab. 1 Test Parameters and Major Test Results

组别	试件编号	砂浆强度/ MPa	截面 长宽比	倒角半径/ mm	包裹层数	极限强度/ MPa	峰值应变	提高幅度/%	
								极限强度	峰值应变
第 1 组	Z1a	2.85	1.0	10	0	12.07	0.008 0	1.000	1.00
	Z1a-1	2.85	1.0	10	1	13.63	0.019 0	1.129	2.38
	Z1a-2	2.85	1.0	10	2	16.92	0.022 3	1.402	2.79
	Z1a-3	2.85	1.0	10	3	25.42	0.037 3	2.106	4.66
	Z1a-5	2.85	1.0	10	5	40.00	0.064 4	3.314	8.05
第 2 组	Z1b-1	2.15	1.0	20	1	16.87	0.025 5	1.398	3.19
	Z1b-2	2.15	1.0	20	2	23.91	0.037 5	1.981	4.69
	Z1b-3	2.15	1.0	20	3	34.69	0.052 9	2.876	6.61
	Z1b-5	2.15	1.0	20	5	44.87	0.062 3	3.717	7.79
第 3 组	Z2a	1.93	1.5	10	0	6.65	0.009 6	1.000	1.00
	Z2a-2	1.93	1.5	10	2	11.90	0.020 2	1.789	2.10
	Z2a-3	1.93	1.5	10	3	17.29	0.048 5	2.600	5.05
	Z2a-5	1.93	1.5	10	5	24.37	0.069 0	3.665	7.19
第 4 组	Z3a	1.98	2.0	10	0	6.21	0.008 8	1.000	1.00
	Z3a-2	1.98	2.0	10	2	11.79	0.018 0	1.899	2.05
	Z3a-3	1.98	2.0	10	3	12.00	0.034 0	1.932	3.86
	Z3a-5	1.98	2.0	10	5	17.81	0.060 4	2.868	6.86

表 2 材料性能  
Tab. 2 Material Performances

材料类型	名义厚度/ mm	实测抗拉 强度/MPa	弹性模量/ GPa	实测断裂 伸长率/%
纤维布	0.169	2 113.00	80.0	2.21
黏贴剂		41.10	3 068.4	

现初始裂缝,随着荷载的继续增加,竖向裂缝逐渐开展,并形成贯通裂缝,从而将砖柱分成几个独立的细长小砖柱,并因失稳或压碎而破坏。

采用 GFRP 片材加固的砖柱,在加载初期,由于砖柱所受轴向压应力较小,相应的横向应变也较小,GFRP 片材的应变发展缓慢,所起的约束作用很小,砖柱的变形与未加固砖柱基本一致,当达到加固试件极限荷载的 70%~80%时,试件的横向应变开始迅速增加,相应地,GFRP 片材的横向拉应变也开始迅速增加,这可以认为是砖柱开始出现初始裂缝,但由于 GFRP 片材的约束作用,延缓了初始裂缝的出现。随着荷载的继续增加,GFRP 片材的应变进一步加快,局部(一般在竖向灰缝处)GFRP 片材颜色开始改变,并出现“啪啪”的爆裂声。最后,当压应力达到峰值应力时,GFRP 片材在竖向灰缝处或截面转角处被胀裂或拉断。加固试件的极限强度与峰值应变较未加固试件均有不同程度的提高。

2.2 黏贴层数与极限强度的关系

图 2 为在自身材料强度、截面尺寸与倒角半径一定的条件下,不同黏贴层数与加固后试件极限强度关系。由图 2 可知,黏贴层数与加固后试件的极限强度存在很好的线性关系。

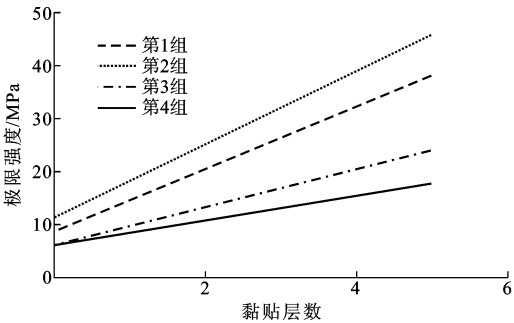


图 2 黏贴层数与极限强度关系

Fig. 2 Relations Between Stick Layers and Ultimate Strengths

2.3 倒角半径对极限强度的影响

虽然对所有加固试件的截面转角处都进行了倒角处理,但角部 GFRP 片材依然出现不同程度的应力集中,导致许多试件 GFRP 片材的断裂位置都在角部。通过比较图 2 中第 1 组与第 2 组 2 条曲线的相对位置关系可知,倒角半径为 20 mm 的第 2 组试

件的曲线总在倒角半径为 10 mm 的第 1 组曲线之上,这说明倒角半径对加固效果存在一定影响<sup>[11-12]</sup>。倒角半径太小,FRP 布在该处的应力过于集中;倒角半径太大,对原结构损伤又太大。故而,对被加固试件需要进行倒角处理,倒角范围的大小可根据工程实际需要加以确定。

2.4 截面尺寸对极限强度的影响

图 3 为不同截面尺寸下黏贴层数与极限强度关系。由图 3 中 3 条曲线所处的相对位置关系来看,长宽比为 2.0 的居最下方,其次是长宽比为 1.5 的,最上面是长宽比为 1.0 的,也就是说被加固试件截面的长宽比越小,或者说试件的截面尺寸越小,加固的效果越明显。

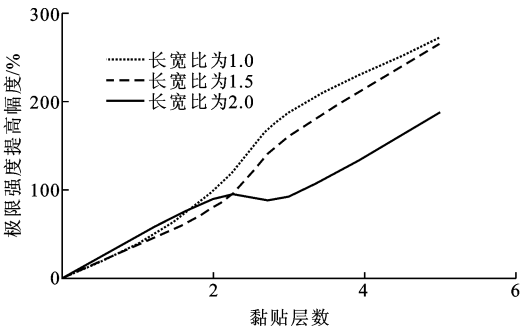


图 3 不同截面尺寸下黏贴层数与极限强度关系

Fig. 3 Relations Between Stick Layers and Ultimate Strengths at Different Sectional Sizes

大量试验研究表明:FRP 包裹混凝土柱的约束机理同箍筋约束混凝土的机理是相同的,二者对混凝土的约束作用存在有效约束区与非有效约束区。根据文献[2],将 FRP 约束混凝土的作用机理引申到 FRP 约束砖柱中来,特做如下假定:① GFRP 片材不直接承担竖向荷载,只承受水平方向的拉应力;② GFRP 片材与砖柱之间黏结状况是完好的,不存在相对变形。

图 4 为 GFRP 片材包裹加固矩形截面砖柱。其中  $r$  为截面角部倒角半径, $b$  为截面长度, $h$  为截面宽度, $t_F$  为所黏贴 GFRP 片材的厚度,不计倒角的面积损失,截面面积为

$$A_m = bh \tag{1}$$

假定有效约束区与非有效约束区的交界线为一标准抛物线,抛物线焦点在截面边长中点,则非有效约束区面积为

$$A_n = \frac{(b-2r)^2 + (h-2r)^2}{3} \tag{2}$$

有效约束面积区面积为

$$A_e = A_m - A_n \tag{3}$$

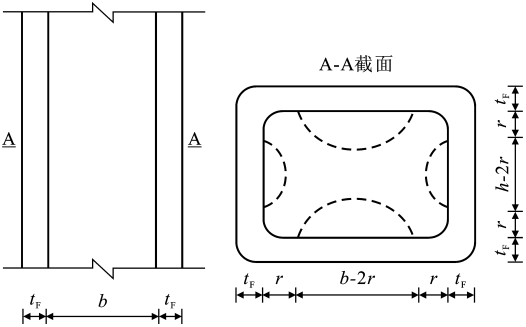


图 4 GFRP 片材加固矩形截面砖柱

Fig. 4 Rectangular Sectional Brick Masonry Column Strengthened with GFRP Sheets

对不同截面尺寸试件,根据式(1)~(3)计算各自的有效约束区面积与非有效约束区面积,计算结果见表 3。由表 3 可知,当长宽比变大时,有效约束区面积占总面积的比率则相应减少。图 5 为有效约束区面积与加固后极限强度提高幅度关系。当加固量较小(黏贴 2 层)时,有效约束区面积所占比率的改变对加固后试件极限强度的影响并不大,但随着加固层数的增加,即黏贴 3 层与 5 层时,随着有效约束区面积所占比率的增加,加固后试件极限强度的提高幅度亦相应的增加,且近似为线性变化,这与图 2 中黏贴层数与极限强度之间的线性关系是相一致的。

表 3 约束区面积计算结果

Tab. 3 Computing Results of Controlling Area

截面长宽比	非有效约束区 面积/mm <sup>2</sup>	有效约束区 面积/mm <sup>2</sup>	有效约束区面积 所占比率/%
1.0	6 017	7 208	54.5
1.5	10 760	9 077	45.8
2.0	17 708	8 742	33.1

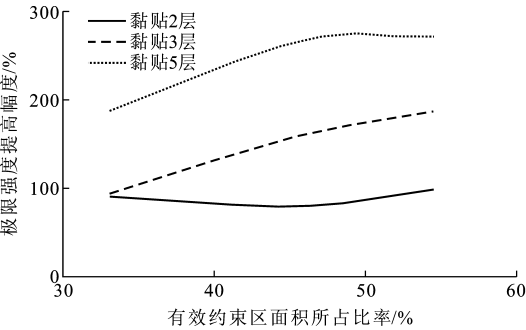


图 5 有效约束区面积与极限强度提高幅度关系

Fig. 5 Relations Between Effective Controlling Areas and Increasing Rates of Ultimate Strength

2.5 砌体自身材料强度对极限强度的影响

图 6、7 分别为不同加固层数的材料自身强度与加固试件强度关系。由图 6 可知:随着被加固试件强度的增加,虽然相同加固层数的加固试件极限强

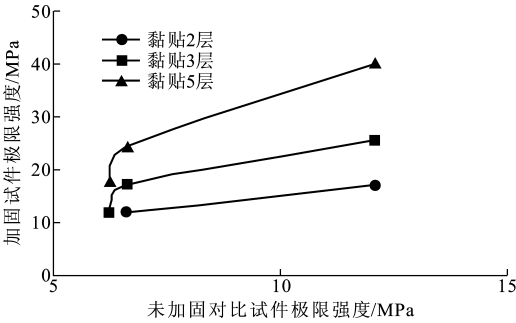


图 6 对比试件强度与加固后极限强度关系

Fig. 6 Relations Between Contrasting Strengths and Ultimate Strengths of Reinforced Specimens

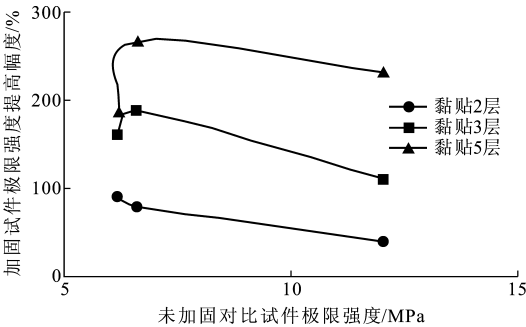


图 7 不同对比试件强度与加固试件极限强度提高幅度关系

Fig. 7 Relations Between Different Contrasting Specimens and Increasing Rates of Reinforced Specimens

度都有不同程度的增加,但其不再是线性关系。由图 7 可知:当加固量相同时(黏贴层数相同),随着被加固试件自身强度的增加,加固试件极限强度提高的幅度并没有相应增加,黏贴 2 层的被加固试件随自身强度增加而降低;黏贴 3 层与 5 层的被加固试件,在强度为 6.65 MPa 处出现了极大值,即对于不同的加固层数,被加固试件的加固效果与被加固试件自身的强度有直接的关系,特定的自身强度,对应着特定的加固量,这样才能使加固取得最佳的性能效果与经济效益。

3 结 语

(1)采用 GFRP 片材加固的砖柱,延缓了初始裂缝的出现,加固试件的极限强度与峰值应变较未加固试件均有不同程度的提高。

(2)采用 GFRP 片材包裹加固砖柱时,为防止应力过度集中,截面转角处需进行倒角处理;同时,GFRP 片材的黏贴层数与加固后试件的极限强度呈线性关系。

(3)在加固量较小时,即黏贴层数较小时(不大于 2 层),截面尺寸对加固效果的影响较小;当黏贴

层数较大时(大于2层),截面尺寸越大,有效约束区面积所占总面积的比率则随之降低,GFRP片材对砖柱的约束效果将相应减小。

(4)材料的自身强度特性影响着GFRP片材加固砖柱的加固效果,要取得材料性能与经济的双重效益,工程设计人员在选择加固方法时要根据实际情况综合考虑,具体问题具体分析。

## 参考文献:

## References:

- [1] 赵彤,谢剑,戴自强.碳纤维布约束混凝土应力-应变全曲线的试验研究[J].建筑结构,2000,30(7):40-43.  
ZHAO Tong, XIE Jian, DAI Zi-qiang. Research on Compressive Stress-strain Relationship of Concrete Confined with Continuous CFS[J]. Building Structure, 2000, 30(7): 40-43.
- [2] 欧阳煜,黄奕辉,钱在兹,等.玻璃纤维(GFRP)片材约束混凝土的受力性能分析[J].土木工程学报,2004,37(3):26-34.  
OUYANG Yu, HUANG Yi-hui, QIAN Zai-zi, et al. Analysis of Flexural Behavior of Concrete Beam Restrained with Glass Fiber Reinforced Plastic Sheet[J]. China Civil Engineering Journal, 2004, 37(3): 26-34.
- [3] 卢亦焱,史健勇,赵国藩.玻璃纤维布约束轴心受压混凝土方形柱承载力计算研究[J].工程力学,2004,21(4):22-27.  
LU Yi-yan, SHI Jian-yong, ZHAO Guo-fan. Study of Axial Bearing Capacity of Square Concrete Columns Confined with Carbon Fiber Reinforced Plastic[J]. Engineering Mechanics, 2004, 21(4): 22-27.
- [4] 王欣,陆洲导,吕西林.碳纤维技术在砌体结构抗震加固中的试验研究[J].工业建筑,2003,33(9):11-13.  
WANG Xin, LU Zhou-dao, LU Xi-lin. An Investigation of the Aseismic Behavior of Masonry Structure Strengthened by Carbon Fiber Reinforced Plastics[J]. Industrial Construction, 2003, 33(9): 11-13.
- [5] 赵彤,张晨军,谢剑,等.碳纤维布加固修复砖砌体的研究与工程实践[J].地震工程与工程振动,2001,21(2):89-95.  
ZHAO Tong, ZHANG Chen-jun, XIE Jian, et al. Ex-

- perimental Study on Seismic Reinforcement of Brick Masonry Walls with Continuous Carbon Fiber Sheet[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2001, 21(2): 89-95.
- [6] 刘新强. FRP加固砌体基本力学性能研究[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2005.  
LIU Xin-qiang. Studies on Basic Mechanics Properties of Brick Masonry Reinforced with FRP[D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2005.
- [7] 田水,彭少民,谷倩.碳纤维加固实心粘土砖偏心受压柱的试验研究[J].砖瓦,2005,32(10):3-6.  
TIAN Shui, PENG Shao-min, GU Qian. Experiment Research on Eccentrically Loaded Brick Columns Strengthened by CFRP[J]. Brick and Tile, 2005, 32(10): 3-6.
- [8] GBJ 129—90,砌体基本力学性能试验方法标准[S].  
GBJ 129—90, Standard of Basic Mechanical Properties and Experimental Methods of Masonry[S].
- [9] 姚振钢,刘祖华.建筑结构试验[M].上海:同济大学出版社,2004.  
YAO Zhen-gang, LIU Zu-hua. Test on the Building Structure[M]. Shanghai: Tongji University Press, 2004.
- [10] 施楚贤.砌体结构理论与设计[M].北京:中国建筑工业出版社,2003.  
SHI Chu-xian. Theory and Design of Masonry Building[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2003.
- [11] 潘景龙,王雨光,来文汇.混凝土柱截面形状对纤维包裹加固效果的影响[J].工业建筑,2001,31(6):17-19.  
PAN Jing-long, WANG Yu-guang, LAI Wen-hui. Effect of Sectional Shape of Concrete Column on the Bearing Capacity of Short Columns Wrapped with FRP[J]. Industrial Construction, 2001, 31(6): 17-19.
- [12] 薛伟辰,王晓辉.有黏结预应力CFRP筋混凝土梁试验及非线性分析[J].中国公路学报,2007,20(4):41-47.  
XUE Wei-chen, WANG Xiao-hui. Experiment and Nonlinear Analysis of Concrete Beams with Bonded Prestressing CFRP Tendons[J]. China Journal of Highway and Transport, 2007, 20(4): 41-47.