

文章编号:1671-6833(2007)03-0012-04

## 碳纤维布加固带侧门洞墙片试验与计算分析

卢会芳<sup>1</sup>, 李建粉<sup>2</sup>, 孙成访<sup>3</sup>, 彭少民<sup>4</sup>

(1. 河南大学 土木建筑学院, 河南 开封 475001; 2. 长庆油田 第四采油厂工程项目管理室, 陕西 靖边 718500; 3. 东莞理工学院 城市学院, 广东 东莞 523106; 4. 武汉理工大学 土木工程与建筑学院, 湖北 武汉 430070)

**摘要:**为研究碳纤维布对低强度砖砌体墙片的加固效果,采用1个对比试件,2个加固试件,进行碳纤维布加固低强度有构造柱带侧门洞墙片在低周期往复荷载作用下的抗震性能试验,对加固后墙片的破坏形态、变形性能、耗能能力及承载力作了全面分析,结果表明碳纤维布用于低强度砖砌体墙片的抗震加固是有效的,并探讨了碳纤维布加固有构造柱带侧门洞墙片时的受力机理,分析加固后墙片的抗剪承载力,提出简化计算公式,可为加固工程的设计提供参考。

**关键词:**碳纤维布; 砖墙; 抗震加固; 抗剪承载力

**中图分类号:** TU 377 **文献标识码:** A

### 0 引言

近几年来,碳纤维布加固技术在砌体结构领域的应用已经开始引起人们的关注。一些试验表明<sup>[1-2]</sup>,碳纤维布加固技术能有效提高砌体墙的抗震性能和抗剪承载力。但是,对于一些建造较早、强度较低的砖砌体结构,利用碳纤维布进行加固的效果也很值得探讨。作者主要研究碳纤维布对强度较低砖墙的加固效果,对采用砖砌体结构较多的古建筑物的修复与加固具有重要意义。

### 1 试验概况

试验共制作了3片有构造柱带侧门洞墙片,其中墙片的高宽比为0.722,具体尺寸及配筋见图1。试件设计采用MU7.5黏土砖,M2.5混合砂浆,顶梁和底梁混凝土的设计强度等级为C20。

本次有构造柱带侧门洞墙片的抗震加固试验共采用2种加固方案,其中W2采用双面“卅”型粘贴碳纤维布,幅宽150 mm,W3采用双面“卅”+“X”型粘贴碳纤维布,幅宽150 mm,W1不加固,为对比试件。具体加固方案及部分测点编号见图2,加固时所用的碳纤维布性能指标见表1,所用结构胶的性能指标见表2。

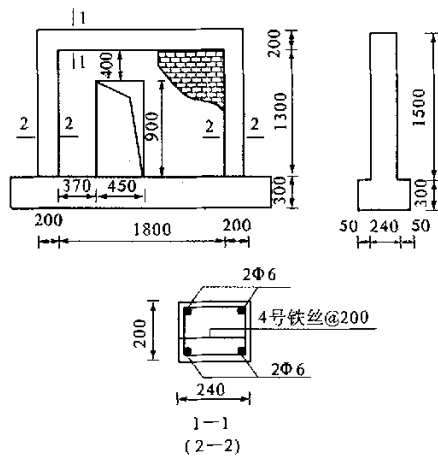


图1 试件尺寸及配筋图

Fig. 1 Dimensions and reinforced bars of walls

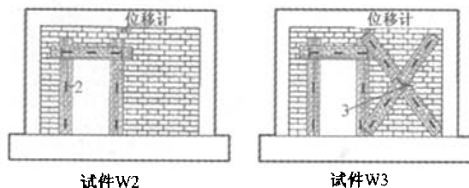


图2 加固方案及测点布置图

Fig. 2 Strengthening scheme and the tested point collocation

收稿日期:2007-03-25;修订日期:2007-06-09

基金项目:武汉市建设委重点项目(20031g0093)

作者简介:卢会芳(1980-),女,河南周口人,河南大学助教,硕士,主要从事结构工程方面的研究。

表1 碳纤维布性能指标  
Tab.1 Behavior of CFS

计算厚度	抗拉强度	弹性模量	断裂伸长率
/mm	/MPa	/MPa	/%
0.111	3 515	$3.0 \times 10^5$	1.6

表2 结构胶的性能指标  
Tab.2 Behavior of structural adhesive MPa

名称	拉伸剪切强度	拉伸强度	抗折强度	粘结正拉强度
基底胶	——	——	——	2.75
找平胶	11.00	33.51	45.64	3.42
浸渍胶	11.00	31.15	42.10	2.97

按照文献[5]中的加载方法,在此次试验中,墙体垂直荷载在试验前按0.6 MPa一次加足.试验正式开始前,首先施加40 kN水平荷载,反复推拉2次,以检查仪器运转情况.正式加载时,采用逐级加载方法,开裂前按荷载控制,每级按20 kN递增,每级循环1次;开裂后按位移控制,每级循环2次,每级增加1Δ<sub>c</sub>(墙片的开裂位移);达到极限荷载后,继续按位移控制,每级增加2Δ<sub>c</sub>,直至墙片丧失承载能力.

2 试验结果及分析

试件设计参数及试验结果汇总于表3.

表3 试验结果汇总  
Tab.3 The experimental results

试件 编号	实测砖块 抗压强度 /MPa	实测砂浆 抗压强度 /MPa	加载方式	开裂荷载		开裂位移		极限荷载	
				$P_c$ /kN		$\Delta c$ /mm		$P_u$ /kN	
				试验值	提高率/%	试验值	提高率/%	试验值	提高率/%
W1	6.53	1.922	推(+)	140	—	0.9	—	200	—
			拉(-)	140	—	0.9	—	196	—
W2	6.53	1.922	推(+)	160	14.3	1.5	66.7	213.3	6.65
			拉(-)	160	14.3	1.3	44.4	223.3	13.9
W3	6.53	1.922	推(+)	200	42.9	1.7	88.9	250	25
			拉(-)	200	42.9	1.3	44.4	266.7	36.1

2.1 试件的破坏形态

试验表明,在低周期往复荷载作用下,所有墙片均发生剪切破坏.其破坏时的裂缝如图3所示.

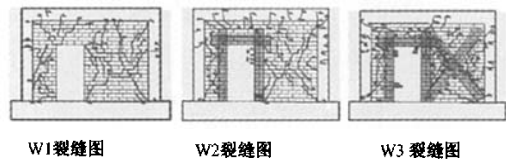


图3 墙片裂缝图

Fig.3 Wall's crack shape

2.2 开裂荷载和极限荷载

由表3可以看出,碳纤维布对有构造柱带侧门洞墙片的加固效果比较好,推迟了构件的开裂,提高构件的承载力.W2墙片的开裂荷载提高14.3%,极限荷载在正向加载时提高了6.65%,反向加载时提高13.9%;W3墙片的开裂荷载提高42.9%,极限荷载在正向加载时提高25%,反向加载时提高36.1%.

2.3 变形性能和耗能能力

各试件的滞回曲线和骨架曲线如图4所示. 万方数据

从图4可以看出,加固后墙片的变形能力有很大提高,并且加固后墙片的滞回环相对饱满,而滞回环所包围的面积反应了墙片在地震作用下的能量耗散能力,说明碳纤维布加固后墙片的耗能能力明显增强.根据文献[5]中试件能量耗散系数的计算公式,可以得出墙片在极限荷载那一循环的能量耗散系数:W1为0.79,W2为0.86,W3为0.87,其中W2提高8.9%,W3提高10.1%.

2.4 碳纤维布应变分析

在墙片上取2个受力有代表性的应变测点来分析碳纤维布在加载过程中的受力情况,它们的编号如图2所示.2<sup>#</sup>应变测点和3<sup>#</sup>应变测点的荷载—应变曲线如图5所示,图中水平荷载正值代表水平推力,负值代表水平拉力,应变正值代表拉应变,负值代表压应变.由2个应变测点的荷载—应变曲线可以看出:在加荷初期,由于墙片的变形较小,碳纤维布的应变值也很小,荷载—应变曲线基本呈线性发展.当墙片接近开裂和开裂后,碳纤维布的应变值明显增大,荷载—应变曲线发生转折.

### 3 计算分析

#### 3.1 加固后墙片抗剪承载力分析

从墙片加固后承载力的提高可以看出,墙片在正向加载时的极限承载力小于其在反向加载时的极限承载力,而对于未加固墙片,双向的极限承载力基本上是一样的,这主要是因为门洞上方的横向碳纤维布条在正向加载时的应变值小于其在

反向加载时的应变值.对于门洞两侧的竖向碳纤维布条,从其上应变值的变化分析认为,两个竖向碳纤维布条和两侧的构造柱一起,使门洞两侧的墙片均处于有构造柱状态,即竖向碳纤维布条对门洞两侧墙片的作用类似于构造柱,所以只把它当作一种抗震构造加固措施,而不在计算公式中体现.W3墙片加固后抗剪承载力的计算简图如图6所示.

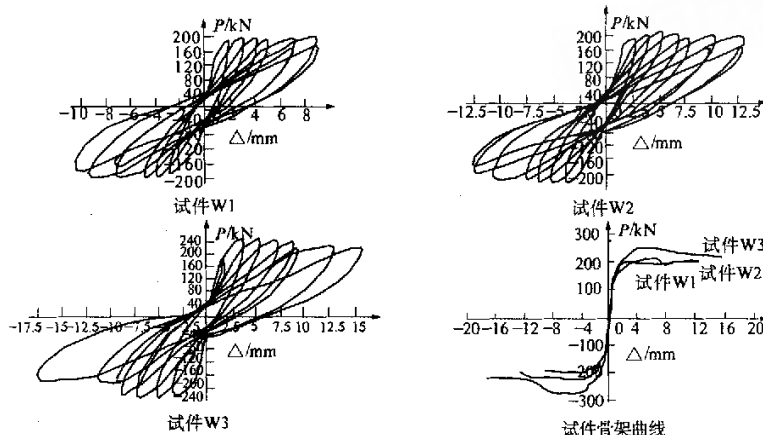


图4 试件滞回曲线图和骨架曲线

Fig. 4 Walls' hysteresis curves and force-displacement curves

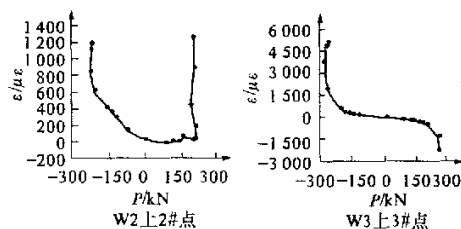


图5 W2的2#点和W3的3#点荷载—应变曲线图

Fig. 5 The load—strain curves of the two point of wall2 and the three point of wall3

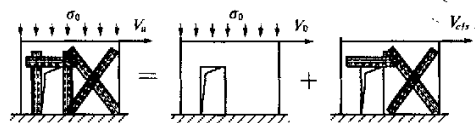


图6 碳纤维布加固W3墙片承载力计算简图

Fig. 6 The bearing capacity calculating sketch of wall3 strengthened by CFS

根据叠加原理  $V_u = V_0 + V_{cf}$  (1)

式中:  $V_u$  为碳纤维布加固后墙片的抗剪承载力;  $V_0$  为墙片未加固时的抗剪承载力;  $V_{cf}$  为加固墙片中碳纤维布所承担的极限剪力.

由于碳纤维布的主要作用是抗拉,所以尽管在试验中碳纤维布的压应变值也很大,但对抗剪的贡献很小,所以计算碳纤维布所承担的剪力时

万方数据

仅考虑它的受拉作用.计算碳纤维布所承担剪力时的受力图如图7所示.

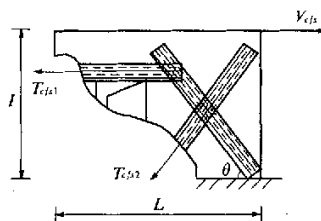


图7 碳纤维布受力图

Fig. 7 The bearing capacity sketch of CFS

由平衡条件得:  $V_{cf} = T_{cf1} + T_{cf2} \cos \theta$ , 即

$$V_{cf} = n \alpha_{cf} E t \int_0^b \varepsilon(x)_1 db + n \alpha_{cf} \cos \theta E t \int_0^b \varepsilon(x)_2 db$$

式中:  $n$  为碳纤维布的粘贴层数;  $\alpha_{cf}$  为碳纤维布抗剪承载力影响系数;  $\theta$  为“X”型碳纤维布条与墙片水平方向的夹角;  $E$  为碳纤维布弹性模量;  $\varepsilon(x)$  为碳纤维布沿布宽在不同位置上的拉应变,且  $\varepsilon(x) \leq [\varepsilon_{cf}]$ , 其中  $[\varepsilon_{cf}]$  为碳纤维布的允许拉应变;  $b$  为碳纤维布的幅宽;  $t$  为碳纤维布的计算厚度.

上式中,  $\varepsilon(x)$  为碳纤维布沿布宽方向的拉应变函数,如将它按变量计算,会使计算变得复杂,

不便于设计使用,为简化计算,假定应变沿布宽方向是均匀的,即得简化的  $V_{cf}$  计算公式

$$V_{cf} = n\alpha_{cf}E\varepsilon_1tb + n\alpha_{cf}E\varepsilon_2tb\cos\theta \quad (2)$$

本试验中,在计算未加固墙片的抗剪承载力  $V_0$  时选用抗震规范的主拉应力公式。所以加固后墙片的抗剪承载力公式如下:

$$V_u = \frac{\zeta_n f_v A}{\gamma_{RE}} + n\alpha_{cf}E\varepsilon_1tb + n\alpha_{cf}E\varepsilon_2tb\cos\theta \quad (3)$$

### 3.2 加固后墙片抗剪承载力计算

对于未加固墙片的抗剪承载力,这里不再进行计算,下面计算墙片加固后,其上碳纤维布所承担的极限剪力。

根据式(2),由于碳纤维布是双面粘贴,  $n = 2$ ;  $\alpha_{cf}$  则与砖块强度、砂浆强度、墙片砌筑质量、碳纤维布粘贴质量及端部是否锚固等因素有关,需要大量的试验数据来确定,笔者在计算中暂取为 1.0。碳纤维布的弹性模量  $E = 3.0 \times 10^5$  MPa, 计算厚度  $t = 0.111$  mm, 宽度  $b = 150$  mm;  $\theta$  与宽墙肢本身的尺寸有关,根据实际墙片的尺寸计算得  $\cos\theta = 0.602$ 。根据试验中实测碳纤维布应变值,试件 W3 的  $\varepsilon_1$  取为  $900 \mu\varepsilon$ ,  $\varepsilon_2$  取为  $5000 \mu\varepsilon$ , 最后计算得:

$$V_{cf} = 2 \times 1.0 \times 3.0 \times 1.0^5 \times 0.0009 \times 0.111 \times 150 + 2 \times 1.0 \times 3.0 \times 10^5 \times 0.005 \times 0.111 \times 150 \times 0.602 = 39.06 \text{ kN}$$

### 3.3 加固后墙片抗剪承载力计算值与试验值比较

W3 墙片计算值与试验值的比较见表 4,  $V_u$ 。

的计算值与试验值基本吻合。

表 4 计算值与试验值的比较

Tab. 4 The contrast of the calculating value and the tested value

试件 编号	$V_{0t}$ 试验 值/kN	$V_{cf}$ 计算 值/kN	$V_u = V_{0t}$ + $V_{cf}$ 计算值/kN	$V_{ut}$ 试验 值/kN	$\frac{V_{ut}}{V_u}$
W1	196	—	196	196	1.000
W3	196	39.06	235.06	266.7	1.135

## 4 结论

(1) 碳纤维布加固能有效改善强度较低的有构造柱带侧门洞墙片的抗震性能,提高其抗剪承载力。

(2) 提出碳纤维布加固有构造柱带侧门洞墙片的简化抗剪承载力计算公式,计算结果与试验结果基本吻合。

## 参考文献:

- [1] 赵 彤,张晨军,谢 剑,等.碳纤维布用于砖砌体抗震加固的试验研究[J].地震工程与震动控制,2001,21(2),89-95.
- [2] 张祥顺,谷 倩,彭少民. CFRP 对砖墙抗震加固对比试验研究与计算分析[J].世界地震工程,2003,19(1),77-82.
- [3] 孔 琴,刘立新.碳纤维布加固钢筋混凝土梁受弯性能的试验研究[J].郑州大学学报(工学版),2004,25(4),24-28.
- [4] GB50003-2001,砌体结构设计规范[S].
- [5] JGJ101-96,建筑抗震实验方法规程[S].

## Experimental Study and Analysis on Calculation of Brick Wall with a Side Door Strengthened with Carbon Fiber Sheet

LU Hui-fang<sup>1</sup>, LI Jian-fen<sup>2</sup>, SUN Cheng-fang<sup>3</sup>, PENG Shao-min<sup>4</sup>

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Henan University, Kaifeng 475001, China; 2. The Project Office of the Fourth Oil Extraction Factory of Changqing Oilfield, Jingbian 718500, China; 3. City college of Dongguan University of Technology, Dongguan 523106, China; 4. College of Civil Engineering and Architecture, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

**Abstract:** In order to study the effect in using carbon fiber sheet (CFS) to strengthen low strength masonry, the seismic reinforcement experiment of low strength brick wall with constructional columns and a side door by carbon fiber sheet is done under lower cycle reversal loads based on one contrastive wall and two strengthened walls. The strengthened brick wall's failure shape, deformation, energy consumption and load bearing capacity are generally analyzed, and the results show that the strengthening effect is obvious. Then CFS's bearing capacity and the wall's shearing capacity are analyzed, and the simplified calculating formula is presented, which provides the reference for the design.

**Key words:** carbon fiber sheet; brick wall; antiseismic reinforcement; shearing capacity