

文章编号: 1000-4750(2008)06-0051-09

# CFRP 加固砌体结构的力学性能分析

\*周新刚<sup>1,2</sup>, 韦昌芹<sup>2</sup>, 叶列平<sup>1</sup>

(1. 清华大学土木系, 北京 100084; 2. 烟台大学土木工程学院, 烟台 264005)

**摘 要:** 在分析碳纤维加固的砖砌体在水平周期反复荷载作用下试验结果的基础上, 研究了碳纤维加固砖砌体的约束及抗倒塌机理; 建立了墙体侧向位移与碳纤维应变、碳纤维应变与墙体抗震剪切强度的关系; 讨论了不同加固方式、碳纤维面积百分率等在墙体不同受力阶段对墙体抗剪承载能力和变形性能的作用与影响; 提出了计算碳纤维加固墙体承载能力和变形的计算方法。计算方法考虑了不同粘贴碳纤维角度、碳纤维面积百分率等对墙体承载能力和变形性能的影响; 推导了最优粘贴加固角; 提出了改进的粘贴加固方法以提高加固效果。

**关键词:** 砌体结构加固; 受力性能; 试验研究; 碳纤维; 抗倒塌

**中图分类号:** TU365 **文献标识码:** A

## MECHANICAL BEHAVIOR OF MASONRY WALLS STRENGTHENED WITH CFRP

\*ZHOU Xin-gang<sup>1,2</sup>, WEI Chang-qin<sup>2</sup>, YE Lie-ping<sup>1</sup>

(1. Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. School of Civil Engineering, Yantai University, Yantai 264005, China)

**Abstract:** Based on experimental results of masonry walls subjected to low-cycle repeated lateral loads, this paper analyzes the strengthening and restraining effects of CFRP in preventing the collapse of cracked masonry walls. Two factors that influence the loading capacity and deformation behavior of walls are investigated: CFRP bonding way and the CFRP reinforcement ratio. Experimental results show that the shear capacity of masonry wall depends on CFRP strain, which, furtherly depends on the wall's lateral deformation. With different wall's lateral deformation, the strengthening effect of CFRP is different. A simplified method to estimate loading and deformation capacity of masonry walls strengthening with CFRP is proposed in this paper, which is valid for different CFRP bonding angle and different bonding way. The optimum CFRP bonding angle is discussed and an improved CFRP bonding way is suggested.

**Key words:** masonry structural strengthening; mechanical behavior; experimental study; CFRP reinforcement; collapse prevention

作者在论文<sup>[1]</sup>中介绍了竖向和斜向粘贴碳纤维片材加固普通粘土砖墙体在水平周期反复荷载作用下的试验结果、加固机理, 分析了不同加固方法对墙体性能的影响, 提出了计算加固墙体极限承载

能力的简化计算方法。简化计算方法的出发点是按照主拉应力理论, 考虑碳纤维对墙体产生的正应力对墙体抗震剪切强度的影响。公式中碳纤维的应力根据实验实测结果求出, 没有从理论上建立碳纤维

收稿日期: 2007-12-12; 修改日期: 2008-05-04

基金项目: 山东省“十五”科技攻关项目(032090103)

作者简介: \*周新刚(1963—), 男, 山东荣成人, 教授, 博士生, 院长, 中国力学学会结构工程专业委员会委员, 从事结构工程研究

(E-mail: ytuzhou@126.com);

韦昌芹(1980—), 女, 山东菏泽人, 硕士生, 主要从事混凝土结构加固研究(E-mail: weichangqin@126.com);

叶列平(1960—), 男, 浙江温州人, 教授, 博士, 博导, 主要从事混凝土结构、组合结构及工程结构加固研究

(E-mail: ylp@tsinghua.edu.cn).

应力与墙体位移的关系。本文将在已有研究的基础上<sup>[2-10]</sup>, 进一步分析碳纤维加固墙体的约束机理、不同阶段的受力性能等问题, 建立墙体侧向位移与碳纤维应变(应力)、碳纤维应变(应力)与墙体抗震剪切强度之间的关系, 研究不同粘贴碳纤维角度、碳纤维面积百分率等对墙体承载能力和变形性能的影响, 提出最优粘贴角及改进的加固方法等。

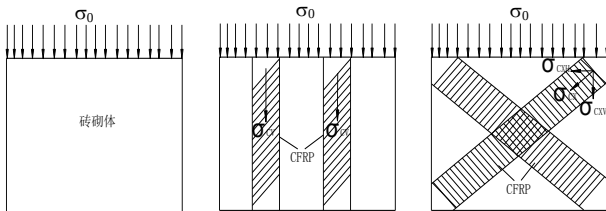
## 1 水平和竖向荷载作用下加固墙体的开裂剪切强度

在水平和竖向荷载作用下, 墙体的开裂符合主拉应力破坏准则。当墙体中某点的主拉应力达到墙体的抗剪强度时, 墙体就会开裂。墙体的抗震剪切强度为:

$$f_v = \sqrt{1 + \frac{\sigma_y}{f_{v0}}} f_{v0} \quad (1)$$

式中:  $f_v$  为有正应力作用时墙体剪切强度;  $f_{v0}$  为无正应力作用时墙体的齿缝剪切强度;  $\sigma_y$  为墙体的竖向压应力。

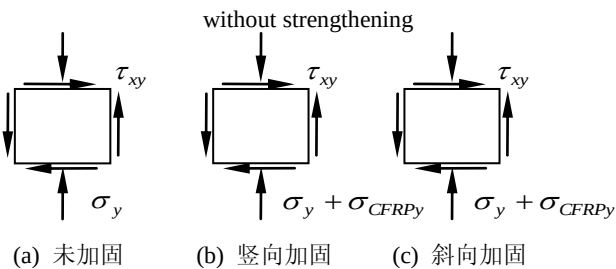
在被加固的墙体中, 见图 1、图 2。当墙体产生水平位移时, 墙体上粘贴的碳纤维条会受拉伸长对墙体产生正应力, 提高墙体的抗震剪切强度。随着墙体水平侧移的增大, CFRP 的受拉变形增大, CFRP 对墙体的竖向作用也逐渐增大, 墙体的剪切强度会逐渐提高。所不同的是, 对于斜向加固的情况, CFRP 的粘贴方向与墙体的水平方向成



(a) 未加固 (b) 竖向加固 (c) 斜向加固

图 1 加固前后砌体受力示意图

Fig.1 The scheme of masonry walls with or



(a) 未加固 (b) 竖向加固 (c) 斜向加固

图 2 墙体应力分析图

Fig.2 Stress analysis figure of walls

一定角度  $\alpha$  ( $\alpha < 90^\circ$ ), 因而 CFRP 的应力会在竖向和水平两个方向产生分量, 其中竖向分量会对墙体产生竖向压力, 而水平分量会对墙体产生水平方向的约束作用。

### 1.1 竖向粘贴 CFRP 加固砖墙体的开裂剪切强度

无论采用何种粘贴加固方法, 加载初期墙体都处于弹性阶段, 墙体在水平方向的变形和纤维片的作用都很小, 纤维片对墙体的作用就很小。随着墙体侧向变形的增加, 纤维片对墙体的作用逐渐增加。不同的加固方法, 由于墙体侧移在纤维中产生的应力不同, 纤维对墙体的作用及计算方法也不同。

竖向粘贴时, 墙体的高度  $h_m$  等于碳纤维布的长度  $l_{cf}$ , 见图 3。

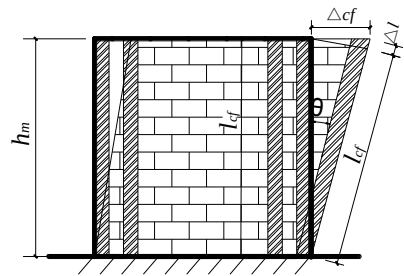


图 3 竖向加固墙体变形示意图

Fig.3 Lateral deformation of wall with vertically bonded CFRP

设墙体开裂时的顶点水平侧移为  $\Delta_{cf}$ , 水平剪切角为  $\theta$ , 每条 CFRP 布的伸长量为  $\Delta_l$ 。设  $\varepsilon_{cf}$  为竖向加固墙体开裂时 CFRP 的应变:

$$\varepsilon_{cf} = \frac{\Delta_l}{l_{cf}} = \frac{\sqrt{\Delta_{cf}^2 + l_{cf}^2} - l_{cf}}{l_{cf}} = \sqrt{1 + \left(\frac{\Delta_{cf}}{h_m}\right)^2} - 1 \quad (2)$$

按照泰勒级数展开式化简公式(2), 得碳纤维的应变与墙体的顶点位移和水平剪切角的关系为:

$$\varepsilon_{cf} \approx \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta_{cf}}{h_m}\right)^2 = \frac{1}{2} \theta^2 \quad (3)$$

由图 4 可见, 在相同墙体位移剪切角下, 不同测点的应变基本相同, 说明 CFRP 的应变只与墙体的侧向位移有关。不同测点应变变化规律基本相同, 且与理论公式吻合良好, 说明公式(3)反映了 CFRP 应变随墙体侧向变形之间的关系, 每条 CFRP 布的长度相等, 应变也相等, 且与墙体水平剪切角的平方成正比关系。由于 CFRP 在受力过程中一直处于弹性状态, 因此纤维应力  $\sigma_{cf}$  也与墙体水平剪切角的平方成正比关系:

$$\sigma_{cf} = E_{cf} \varepsilon_{cf} \approx \frac{1}{2} E_{cf} \left( \frac{\Delta_{cf}}{h_m} \right)^2 = \beta_h f_{cf} \quad (4)$$

式中:  $E_{cf}$  为碳纤维的弹性模量;  $f_{cf}$  为碳纤维的抗拉强度;  $\beta_h$  为强度利用系数。

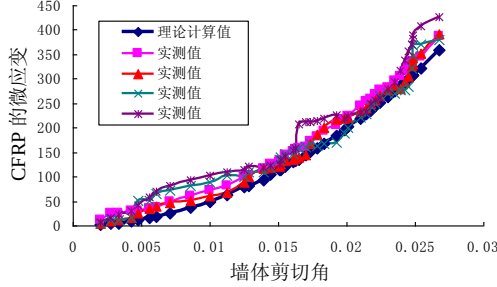


图4 竖向加固 CFRP 的应变与水平剪切角的关系

Fig.4 Curve of vertically bonded CFRP strain and lateral shear angle

设 CFRP 受拉在墙体横截面上产生的压应力为

$\sigma_{cfy}$ :

$$\sigma_{cfy} = \frac{N_{cfy}}{s \cdot t_m} = \frac{2n \cdot E_{cf} \cdot \varepsilon_{cf} \cdot \delta_{cf} \cdot W_{cf}}{s \cdot t_m} = \left( \frac{2n \cdot \delta_{cf} \cdot W_{cf}}{s \cdot t_m} \right) \cdot (E_{cf} \varepsilon_{cf}) = \rho_{cf} \cdot (\beta_h f_{cf}) \quad (5)$$

式中:  $n$  为粘贴碳纤维的层数;  $\delta_{cf}$  为单层碳纤维的厚度;  $W_{cf}$  为纤维条的宽度;  $s$  为纤维条的间距;  $t_m$  墙体横截面厚度; 2 表示墙两侧粘贴纤维;  $\rho_{cf}$  为碳纤维布的面积百分率。

将式(4)代入式(5)得:

$$\sigma_{cfy} = \frac{1}{2} \rho_{cf} E_{cf} \left( \frac{\Delta_{cf}}{h_m} \right)^2 = \rho_{cf} \cdot \beta_h f_{cf} \quad (6)$$

竖向粘贴 CFRP 的砌体构件, 其水平剪切强度  $f_v$  可在式(1)的基础上进行修正, 即:

$$f_v = \sqrt{1 + \frac{\sigma_y}{f_{v0}}} f_{v0} = \sqrt{1 + \frac{\sigma_{y0} + \sigma_{cfy}}{f_{v0}}} f_{v0} = \sqrt{1 + \frac{\sigma_{y0} + \sigma_{cf} \beta_h f_{cf}}{f_{v0}}} f_{v0} \quad (7)$$

## 1.2 斜向粘贴 CFRP 加固砖墙体的开裂剪切强度

如图 5 所示, 等间距斜向粘贴的每条碳纤维布长度不等。设第  $i$  条碳纤维布的长度为  $l_{cfi}$ , 在垂直方向的投影值为  $h_i$ , 任意条碳纤维布与墙体水平方向的夹角为  $\alpha$ , 第  $i$  条 CFRP 布顶点对应的墙体水平侧移为  $\Delta_i$ , 第  $i$  条 CFRP 布的伸长量为  $\Delta_{li}$ , 则:

$$\Delta_{li} = \Delta_i \cdot \cos(\alpha - \theta) =$$

$$\frac{\Delta_{cf}}{h_m} \cdot h_i \cdot \cos(\alpha - \theta) \approx \theta \cdot h_i \cdot \cos \alpha \quad (8)$$

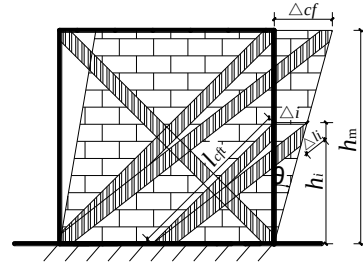


图5 斜向加固墙体变形示意图

Fig.5 Lateral deformation with "X" bonded CFRP

设  $\varepsilon_{cf\beta i}$  为斜向加固墙体开裂时第  $i$  条碳纤维

布的应变:

$$\varepsilon_{cf\beta i} = \frac{\Delta_{li}}{l_{cfi}} \approx \left( \frac{\Delta_{cf}}{h_m} \cdot h_i \cdot \cos \alpha \right) / l_{cfi} = \theta \cdot \cos \alpha \cdot \sin \alpha \quad (9)$$

因此, 每条斜向 CFRP 的应变也相等, 且与墙体的水平剪切角成正比关系。碳纤维应力与墙体水平剪切角的关系为:

$$\sigma_{cf\beta i} = E_{cf} \varepsilon_{cf\beta i} = E_{cf} \frac{\Delta_{cf}}{h_m} \cdot \cos \alpha \cdot \sin \alpha = E_{cf} \theta \cdot \cos \alpha \cdot \sin \alpha \quad (10)$$

根据应力分析, 斜向加固时, CFRP 不仅使墙体在  $y$  方向的应力增加了  $\sigma_{cf\beta y}$ , 而且也为墙体提供了横向约束, 在  $x$  方向产生应力  $\sigma_{cf\beta x}$ 。斜向加固墙体属于双向受压情况下的受剪。由主拉应力强度理论可得墙体的主拉应力为:

$$\sigma_1 = -\frac{\rho_{cf} \sigma_{cf\beta x} + \rho_{cf} \sigma_{cf\beta y} + \sigma_{y0}}{2} + \sqrt{\left( \frac{\sigma_{y0} + \rho_{cf} \sigma_{cf\beta y} - \rho_{cf} \sigma_{cf\beta x}}{2} \right)^2 + (\tau_{xy} + \rho_{cf} \sigma_{cf\beta x})^2} \quad (11)$$

当碳纤维的粘贴方向与水平方向的夹角为  $\alpha = 45^\circ$  时,  $\sigma_{cf\beta x}$  和  $\sigma_{cf\beta y}$  的大小相等:

$$\sigma_{cf\beta x} = \sigma_{cf\beta y} = \sigma_{cf\beta i} \sin \alpha = E_{cf} \frac{\Delta_{cf}}{h_m} \cos \alpha \sin^2 \alpha = \frac{\sqrt{2}}{4} E_{cf} \frac{\Delta_{cf}}{h_m} = \beta_c f_{cf} \quad (12)$$

整理得斜向 CFRP 加固砖砌体的抗剪强度  $f_v$  为:

$$f_v = \sqrt{\left(f_{v0} + \rho_{cf} \beta_c f_{cf} + \frac{\sigma_{y0}}{2}\right)^2 - \left(\frac{\sigma_{y0}}{2}\right)^2} - \rho_{cf} \beta_c f_{cf} \quad (13)$$

### 1.3 不同加固方法对开裂剪切强度的影响分析

研究表明<sup>[1]</sup>, 改变碳纤维的加固面积百分率, 对墙体的开裂剪切强度影响不大。因为墙体开裂时, 水平侧移很小, 碳纤维的应变也很小, 纤维对墙体约束产生的竖向正应力相对于墙体的正应力很小。墙体的开裂剪切强度主要取决于砂浆的强度和所承受的由重力荷载产生的正应力。开裂剪切强度随砂浆强度和正应力的增加较快。但在不同碳纤维加固面积百分率情况下, 开裂剪切强度随砂浆强度和正应力变化的规律基本相同。图 6 为开裂剪切强度随正应力的变化情况。

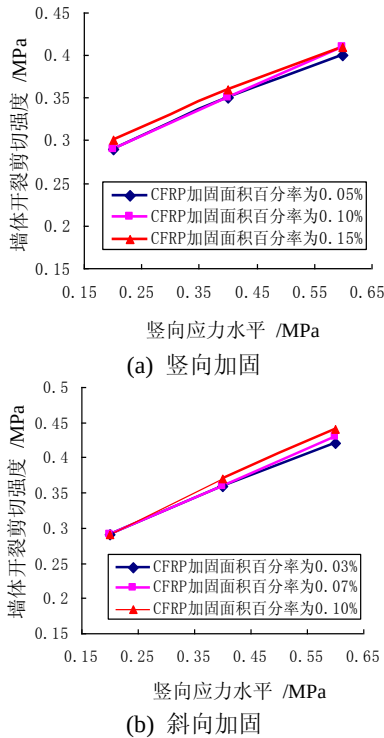


图 6 砂浆强度相同、碳纤维加固面积百分率不同情况下, 开裂剪切强度与竖向应力之间的关系

Fig.6 Curves of cracked shear strength and vertical stress with same mortar strength and different CFRP reinforcement ratio

试验中, 实测竖向 CFRP 加固墙体的开裂水平位移为 4.98mm, 斜向 CFRP 加固墙体的开裂水平位移为 4.63mm。竖向加固墙体上碳纤维的计算应力只有 1.32MPa, 斜向加固碳纤维的应力稍大, 也只有 262MPa, 此时在墙体中产生的正应力只有 0.09 MPa, 而竖向应力为 0.643MPa。因此, 碳纤维

对提高墙体的开裂剪切强度基本没有作用。实验和计算结果对比也证明了这一点。试验墙体竖向加固和斜向加固的计算开裂抗剪承载能力分别为 105kN、116kN, 而试验实测值分别为 100kN、115kN。计算结果表明, 理论计算结果与实验结果符合良好。

## 2 固墙体的极限剪切强度

对于未加固墙体, 在达到最大承载能力状态时, 由于砌体已经开裂, 墙体的剪切强度主要由水平缝的剪切摩擦强度决定, 此时砌体的极限承载能力满足剪摩理论, 即:

$$f_v = f_{v0} + \mu \sigma_y = f_{v0} + 0.4 \sigma_y \quad (14)$$

### 2.1 向粘贴 CFRP 加固的墙体

对于竖向粘贴 CFRP 加固的墙体, 墙体的极限剪切强度有所增加, 增加程度取决于 CFRP 作用的发挥程度。在这种情况下, CFRP 对墙体产生的应力只有竖向应力, 因此可直接对式(14)中的  $\sigma_y$  进行修正, 得到竖向粘贴 CFRP 加固墙体的极限抗剪强度表达式如下:

$$f_v = f_{v0} + 0.4 \sigma_y = f_{v0} + 0.4 (\sigma_{y0} + \rho_{cf} \sigma_{cfy}) = f_{v0} + 0.4 (\sigma_{y0} + \rho_{cf} \cdot \beta_h f_{cf}) \quad (15)$$

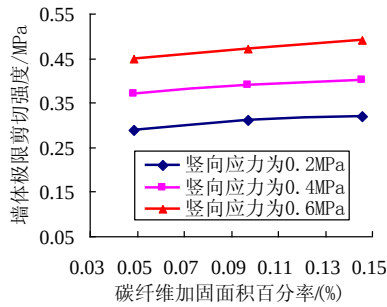
### 2.2 向粘贴 CFRP 的墙体

对于斜向粘贴 CFRP 加固的墙体, 墙体的极限剪切强度也会增加。所不同的是 CFRP 对墙体产生的应力既有竖向应力又有水平应力, 而对墙体剪切摩擦强度产生作用的只有竖向应力分量。因此, 在对式(14)中的  $\sigma_y$  进行修正时, 只需在原有竖向恒荷载产生的竖向应力上增加碳纤维布产生的竖向应力分量即可。

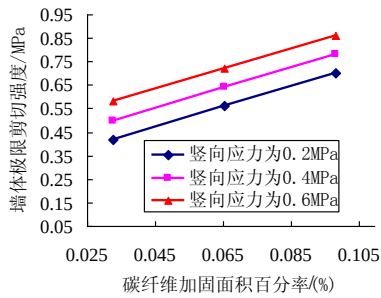
### 2.3 纤维加固对墙体极限承载能力的影响

图 7—图 10 分别为计算的墙体极限剪切强度随墙体材料强度、正应力以及 CFRP 面积百分率变化的变化规律。图 7、图 8 表明: 改变碳纤维的面积百分率, 对墙体的极限剪切强度有明显影响, 特别是对于斜向加固的情况。图 9、图 10 表明: 在不同纤维加固面积百分率情况下, 墙体的极限剪切强度随砂浆强度和墙体正应力都有明显增长, 增长规律基本相同。所不同的是, 斜向加固的情况下, CFRP 的作用更为明显。综上所述, 竖向碳纤维加固的墙体, 碳纤维对墙体的开裂剪切强度及极限剪切承载能力的影响均不大。斜向碳纤维加固的墙体, 虽然

碳纤维对提高墙体开裂剪切强度的作用不大,但能明显提高墙体的极限剪切强度。



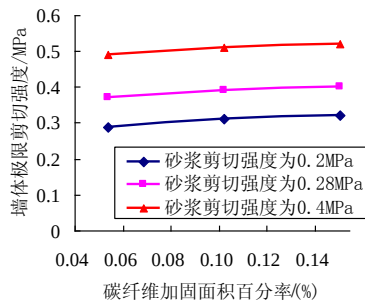
(a) 竖向加固



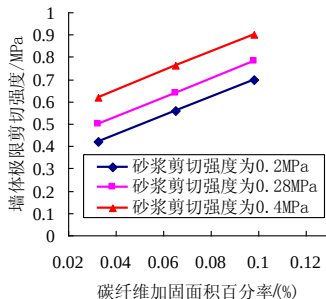
(b) 斜向加固

图7 竖向应力不同,砂浆强度相同情况下,墙体剪切极限强度与碳纤维加固面积百分率之间的关系

Fig.7 Curves of ultimate shear strength and reinforcement ratio with same mortar strength and different vertical stress



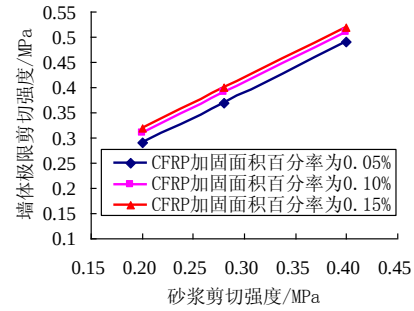
(a) 竖向加固



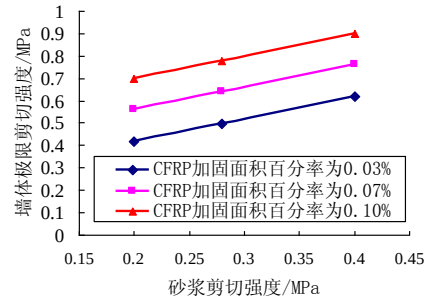
(b) 斜向加固

图8 竖向应力相同,砂浆强度不同情况下,墙体极限剪切强度与碳纤维加固面积百分率之间的关系

Fig.8 Curves of ultimate shear strength and reinforcement ratio with same vertical stress and different mortar strength



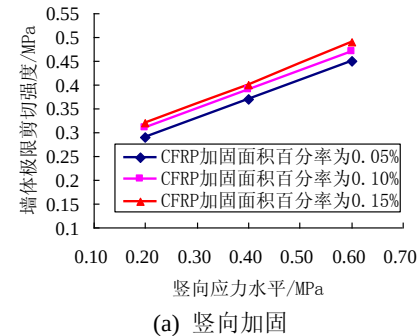
(a) 竖向加固



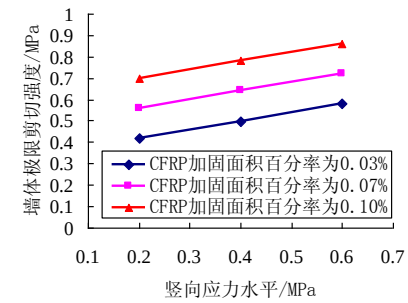
(b) 斜向加固

图9 竖向应力相同,碳纤维加固面积百分率不同,墙体极限抗剪强度与砂浆剪切强度之间的关系

Fig.9 Curves of ultimate shear strength and mortar strength with same vertical stress and different reinforcement ratio



(a) 竖向加固



(b) 斜向加固

图10 砂浆强度相同,碳纤维加固面积百分率不同情况下,墙体极限抗剪强度与竖向应力之间的关系

Fig.10 Curves of ultimate shear strength and vertical stress with same mortar strength and different reinforcement ratio

### 3 加固墙体的变形

#### 3.1 加固墙体的开裂位移

在墙体开裂前,墙体的变形基本为弹性变形,

纤维片的实测应变很小,对墙体的约束作用可以忽略。因此,墙体的刚度取决于墙体的弹性弯曲和剪切变形:

$$K_m = \frac{E_m t_m}{\left(\frac{h_m}{b_m}\right) \left[ \left(\frac{h_m}{b_m}\right)^2 + 3 \right]} \quad (16)$$

则墙体的开裂位移  $\Delta_{cr}$  为:

$$\Delta_{cr} = \frac{f_v A_m}{K_m} = \frac{f_v b_m t_m}{E_m t_m / \{ (h_m / b_m) [(h_m / b_m)^2 + 3] \}} = \frac{f_v}{E_m} \cdot h_m \left[ \left(\frac{h_m}{b_m}\right)^2 + 3 \right] \quad (17)$$

式中:  $K_m$  为墙体的侧移刚度;  $E_m$  为墙体的弹性模量;  $b_m$  为墙体的宽度;  $A_m$  为砌体墙横截面面积; 其它符号意义同前。

根据 GB 50003-2001《砌体结构设计规范》,墙体的弹性模量可以表示为:

$$E_m = 368 f_m^{3/2} \quad (18)$$

将公式(18)代入公式(17),得墙体的理论侧向开裂位移为:

$$\Delta_{cr} = \frac{f_v}{368 f_m^{3/2}} \cdot h_m \left[ \left(\frac{h_m}{b_m}\right)^2 + 3 \right] \quad (19)$$

式中,  $f_m$  为墙体的抗压强度。

### 3.2 加固墙体开裂时 CFRP 应变

将公式(19)分别代入公式(3)和公式(9)得竖向和斜向粘贴 CFRP 加固墙体,墙体开裂时 CFRP 应变的计算公式:

$$\begin{cases} \varepsilon_{cf} = \frac{f_v^2}{270848 f_m^3} \cdot \left[ \left(\frac{h_m}{b_m}\right)^2 + 3 \right]^2 & \text{竖向} \\ \varepsilon_{cf\beta} = \frac{f_v}{368 f_m^{3/2}} \cdot \left[ \left(\frac{h_m}{b_m}\right)^2 + 3 \right] \cdot \cos \alpha \cdot \sin \alpha & \text{斜向} \end{cases} \quad (20)$$

### 3.3 加固墙体的极限侧向位移

在碳纤维加固的情况下,假设墙体均匀,每片 CFRP 均匀受力,CFRP 与墙体的锚固强度足够,则 CFRP 拉断时的位移即是墙体的极限位移。

#### 3.3.1 竖向粘贴 CFRP 加固的墙体

对于竖向粘贴 CFRP 的情况,CFRP 的应变与墙体的极限层间剪切角满足公式(3)的关系。因此,竖向 CFRP 加固墙体的理论极限顶点侧移为:

$$\Delta_{uf} = h_m \sqrt{2 \varepsilon_{uf}} \quad (21)$$

#### 3.3.2 斜向粘贴 CFRP 加固的墙体

对于斜向粘贴 CFRP 的情况,根据公式(9),墙体的理论极限顶点位移为:

$$\Delta_{uf\beta} = \frac{h_m}{\sin \alpha \cos \alpha} \varepsilon_{uf\beta} \quad (22)$$

式中,  $\alpha$  为 CFRP 片材与墙体水平方向的夹角。当  $\alpha = 45^\circ$  时,墙体的理论极限顶点位移为  $2h_m \varepsilon_{uf\beta}$ 。

公式(21)、公式(22)中,碳纤维的应变为纤维拉断时的极限应变。

## 4 理论与试验结果分析比较

### 4.1 加固墙体的承载能力

试验中,由竖向恒荷载产生的墙体正应力为  $\sigma_{y0} = 0.643 \text{ MPa}$ ,竖向粘贴 CFRP 的面积百分率为:

$$\rho_{cf} = \frac{2n \cdot w_{cf} \cdot \delta_{cf}}{s \cdot t_m} = 0.0463\%$$

斜向粘贴 CFRP 的面积百分率为:

$$\rho_{cf} = \frac{2n \cdot w_{cf} \cdot \delta_{cf}}{(s / \sin \alpha) \cdot t_m} = 0.0327\%$$

根据文中分析推导的理论计算公式,计算得竖向加固和斜向加固砌体开裂时的抗剪承载力分别为 105 kN、116 kN,而试验实测值分别为 100 kN、115 kN,误差分别为 5%和 0.8%;极限抗剪承载力分别为 135 kN、183 kN,试验实测值分别为 120 kN、165 kN,误差分别为 11%和 9.8%。理论计算值与试验实测值吻合比较好。

### 4.2 加固墙体的极限变形能力

对于斜向加固的墙体,CFRP 的受拉方向与墙体的斜裂缝垂直,而且随着斜裂缝的发生、发展,CFRP 受拉比较均匀。当达到承载能力极限状态时,墙体的顶点水平位移为 19 mm,此时 CFRP 布的应力为  $\sigma_{cf\beta} = \beta f_{cf} / \sin \alpha = 1074.1 \times \sqrt{2} = 1519 \text{ MPa}$ ,已经达到设计强度的 50%以上。墙体达极限承载能力后,裂缝开展迅速,CFRP 的应力应变也增加较快,比较容易充分发挥作用。但由于斜向加固对墙体根部弯曲效应约束的程度较低,根部首先发生弯曲破坏,所以极限位移较小。

对于竖向加固的墙体,CFRP 受拉方向与墙体的斜裂缝约成  $45^\circ$ ,因此,CFRP 布的应变较小。试验中,当达到承载能力极限状态时,墙体的顶点水平位移为 25 mm,但 CFRP 布的应力却非常小,仅



仅为 33.3MPa, 约为其设计强度的 1%左右。墙体开裂后, CFRP 的应变随裂缝开展增长也比较慢, 必须有较大的顶点位移才能使 CFRP 的应力达到设计强度。当纤维由于墙体水平位移而拉断时, 竖向加固墙体的理论极限位移为 237mm。但是, 一般来讲, 砌体结构的块材强度远远低于 CFRP 布和结构胶的强度, CFRP 加固墙体在水平侧移不太大的情况下, 会因砌体块材内部的撕裂而与 CFRP 分离, 造成砌体的突然破坏。因此, 竖向加固方案中, 墙体达到极限位移时 CFRP 的作用一般不能得到充分发挥。

## 5 不同碳纤维粘贴方向对加固墙体抗震性能的影响

根据上文的理论计算公式, 可以计算出不同墙体位移剪切角情况下, 不同粘贴方向碳纤维的应变。不同粘贴角度 CFRP 的应变不同, CFRP 对墙体产生的正应力也不同。当粘贴角度为  $45^\circ$  时最有效, 当粘贴角度为  $90^\circ$ , 即竖向粘贴时, 纤维的应变以及对墙体约束产生的正应力最小, 因此对提高墙体开裂及极限承载能力的作用很小。

值得注意和有趣的是, 从纤维的应变变化规律看, 当粘贴角度为  $45^\circ$  时, 纤维的应变最大, 见图 11。但纤维对墙体约束在墙体上产生的正应力最大时, 纤维的粘贴方向为  $60^\circ$ , 见图 12。这主要是因为尽管  $45^\circ$  时纤维的应力最大, 但纤维应力的竖向分量并不是最大的。

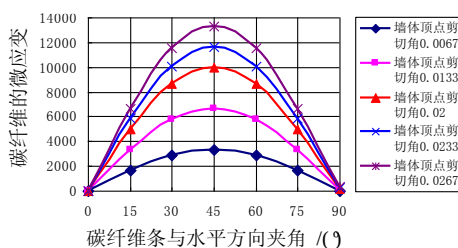


图 11 不同粘贴方向的碳纤维应变变化

Fig.11 Curves of CFRP strain with different bond angle

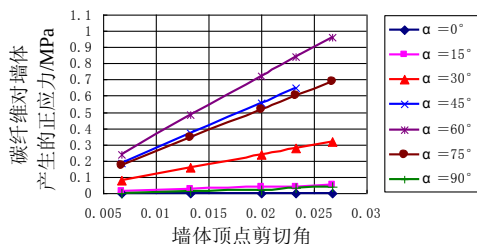


图 12 不同粘贴方向对墙体产生的正应力

Fig.12 Curves of stress with different bond angle

综上所述, 以  $\alpha = 45^\circ$  为粘贴方向分界线, 分界线两侧碳纤维的应变对称分布。在  $0^\circ \leq \alpha \leq 45^\circ$  范围内, 碳纤维条与水平方向夹角越大, 碳纤维的应变增加速度越快, 碳纤维断裂时对应的墙体极限相对位移就会越小。在  $45^\circ < \alpha \leq 90^\circ$  范围内, 碳纤维条与水平方向夹角越大, 碳纤维的应变增加速度越慢, 碳纤维断裂时对应的墙体水平剪切角就越大,  $\alpha = 0^\circ$  和  $\alpha = 90^\circ$  方向粘贴碳纤维加固墙体对应的墙体极限剪切角最大。即要保证竖向粘贴时, 碳纤维能充分发挥作用, 必须使墙体有足够的侧向变形。当  $0^\circ \leq \alpha \leq 60^\circ$  时, 碳纤维对墙体产生的正应力随碳纤维条与水平方向夹角的增大而增大, 当  $60^\circ < \alpha \leq 90^\circ$  时, 碳纤维对墙体产生的正应力随碳纤维条与水平方向夹角的增大而减小,  $\alpha = 0^\circ$  和  $\alpha = 90^\circ$  方向粘贴的碳纤维对墙体产生的正应力最小。由于正应力是影响墙体抗震剪切强度的最主要的因素, 因此墙体的剪切强度的变化与墙体正应力的规律相同,  $\alpha = 60^\circ$  方向粘贴碳纤维加固的墙体抗震剪切强度最大, 见图 13,  $\alpha = 45^\circ$  方向粘贴碳纤维加固的墙体抗震剪切强度次之。当  $0^\circ \leq \alpha \leq 60^\circ$  时, 墙体的抗震剪切强度随碳纤维条与水平方向夹角的增大而增大, 当  $60^\circ < \alpha \leq 90^\circ$  时, 墙体的抗震剪切强度随碳纤维条与水平方向夹角的增大而减小,  $\alpha = 0^\circ$  和  $\alpha = 90^\circ$  方向粘贴碳纤维加固的墙体抗震剪切强度最小, 见图 14。

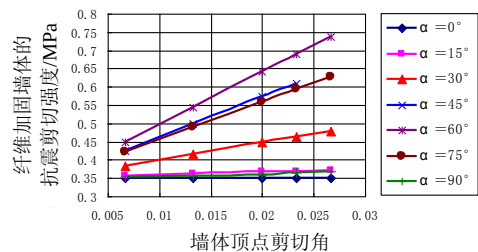


图 13 不同粘贴方向加固墙体的抗震剪切强度

Fig.13 Curves of shear strength with different bond angle

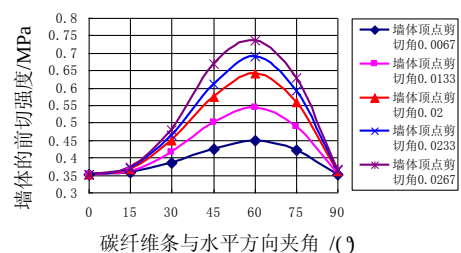


图 14 抗震剪切强度随角度变化关系

Fig.14 Curves of shear strength with different bond angle

由此可以推断: 当  $45^\circ \leq \alpha \leq 75^\circ$  时, 碳纤维对

墙体的抗震剪切强度提高作用明显,其中以 $\alpha = 60^\circ$ 时提高效果最佳, $\alpha = 45^\circ$ 时次之,而 $\alpha = 0^\circ$ 和 $\alpha = 90^\circ$ 时效果最差。当 $0^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ$ 和 $60^\circ < \alpha \leq 90^\circ$ 时,碳纤维对墙体变形能力的提高程度明显,其中 $\alpha = 0^\circ$ 和 $\alpha = 90^\circ$ 时提高效果最佳,而 $\alpha = 45^\circ$ 时效果最差。这个结论与试验结果吻合,即斜向加固对墙体的抗震承载能力提高明显,而竖向加固对墙体变形能力提高明显。

## 6 加固前后的受力机理分析

图 15 给出了墙体开裂、破坏分析示意图。当墙体刚开裂时,墙体的变形还比较小,尽管在反复力的作用下,墙体内部已有裂缝,但墙体还能保持整体变形,见图 15(a)。

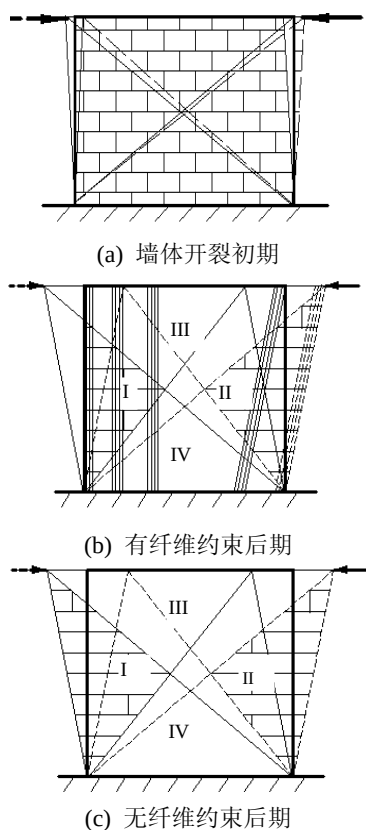


图 15 墙体开裂、破坏原理分析示意图

Fig.15 Scheme figures of wall crack and collapse

墙体开裂后,在对角斜裂缝的分割下,墙体被分成四个三角形块体,在没有其它约束的情况下,见图 15(c),块体 I、块体 II 在反复荷载的作用下,其水平侧移逐渐增大,并有向两侧脱落的趋势。中间块体 III、块体 IV 由于两侧块体的侧移,其中间部位的压应力逐渐增大,最后导致两侧局部脱落,中间压碎而破坏。

采用 CFRP 对墙体进行加固约束时,如图 15(b)

所示,墙体开裂之后,纤维不仅可以限制裂缝的开展,还可以约束两侧的块体 I、块体 II 不能向外脱落,从而保证在反复水平荷载作用下墙体变形的整体性,提高墙体在反复荷载作用下的变形能力和抗倒塌能力,达到提高砌体抗震性能的目的。

## 7 碳纤维加固墙体方式的改进

以上分析表明,无论采用哪种形式的 CFRP 加固方案( $0^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$ ),均能提高砌体的抗震性能,但不同加固形式对砌体抗震性能的提高效果也不同。从抗震承载能力方面看,当 CFRP 条与水平方向的夹角在 $45^\circ \leq \alpha \leq 75^\circ$ 范围时,碳纤维对墙体的抗震剪切强度提高作用明显,其中以 $\alpha = 60^\circ$ 时提高效果最佳,当 $\alpha = 45^\circ$ 时次之,而 $\alpha = 0^\circ$ 和 $\alpha = 90^\circ$ 时效果最差。从整体性能和抗倒塌能力上来讲,当 CFRP 条与水平方向的夹角在 $0^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ$ 和 $60^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$ 范围时,碳纤维对墙体变形能力的提高程度明显,其中 $\alpha = 0^\circ$ 和 $\alpha = 90^\circ$ 时提高效果最佳,而 $\alpha = 45^\circ$ 时效果最差。

从竖向加固( $\alpha = 90^\circ$ )和斜向加固( $\alpha = 45^\circ$ )的试验现象也可以看出,竖向加固对砌体根部的弯曲效应起到良好的约束作用,对砌体变形性能的提高效果更佳。斜向加固方案对砌体根部的弯曲效应几乎不起约束作用,对砌体变形性能的提高效果不如竖向加固好。由此可以得出结论:对于高宽比较大的构件,如果仅仅从提高砌体的整体性能和抗倒塌能力方面来提高砌体的抗震性能,可以采用竖向加固和水平加固相结合的方法,如图所示 16。其中,竖向 CFRP 主要用来约束墙体根部的弯曲效应,水平方向 CFRP 主要用来提高砌体的整体变形性能和抗倒塌能力。如果既要提高砌体的抗震承载能力,又要提高其变形性能,可以采用竖向加固和斜向加固相结合的加固方案,如图所示 17。其中,竖向 CFRP 主要用来约束墙体根部的弯曲效应,斜向 CFRP 主要用以提高砌体的抗震承载能力,而 CFRP 与水平方向的夹角可以根据具体情况来定。

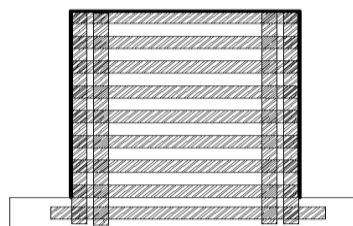


图 16 竖向与水平加固方案

Fig.16 Vertical and horizontal strength



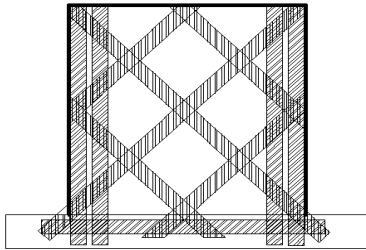


图 17 竖向与斜向加固方案

Fig.17 Vertical and horizontal strength

## 8 结论

碳纤维加固砖墙体的作用主要是在墙体开裂、达到极限承载能力的后期阶段。墙体开裂之前,碳纤维的应变较小,对提高墙体开裂强度的作用甚微。墙体开裂之后,碳纤维的应变迅速增加,对裂缝的发展起到较好的约束作用,对墙体的承载能力与变形性能有较明显的影响。但影响程度取决于碳纤维的粘贴方法与构造。

竖向碳纤维加固方案( $\alpha = 90^\circ$ )和水平加固方案( $\alpha = 0^\circ$ )对墙体的整体性能和抗倒塌能力的提高效果最佳,斜向碳纤维加固方案( $\alpha = 45^\circ$ )对墙体整体性能和抗倒塌能力的提高效果较差。( $\alpha = 60^\circ$ )方向粘贴的碳纤维加固方案对墙体的承载能力提高效果最佳,斜向碳纤维加固方案( $\alpha = 45^\circ$ )对墙体的承载能力提高效果仅次于 $\alpha = 60^\circ$ 方向粘贴方案,竖向碳纤维加固方案( $\alpha = 90^\circ$ )和水平加固方案( $\alpha = 0^\circ$ )对墙体承载能力的提高效果最差。竖向加固方案中 CFRP 对墙体根部的弯曲效应具有良好的约束效果,斜向碳纤维加固方案对砌体的弯曲变形的约束能力较差。

对于高宽比较大的构件,如果仅仅从提高砌体的整体性能和抗倒塌能力方面来提高砌体的抗震性能,可以采用竖向加固和水平加固相结合的方法。其中,竖向 CFRP 主要用来约束墙体根部的弯曲效应,水平方向 CFRP 主要用来提高砌体的整体变形性能和抗倒塌能力。如果既要提高砌体的抗震承载能力,又要提高其变形性能,可以采用竖向加固和斜向加固相结合的加固方案。其中,竖向 CFRP 主要用来约束墙体根部的弯曲效应,斜向 CFRP 主要用来提高砌体的抗震承载能力,而 CFRP 与水平

方向的夹角可以根据具体情况来定。

### 参考文献:

- [1] Wei Changqin, Zhou Xingang, Ye Lieping. Experimental study of masonry walls strengthened with CFRP [J]. Structural Engineering and Mechanics, 2007, 25(6): 675—690.
- [2] Ehsani M R, Saadatmanesh H, Abdelghany I H. Flexural behavior of masonry walls strengthened with composite fabrics [C]. ACI International Symposium on FRP Reinforcement for Concrete Structures. Detroit: American Concrete Institute, 1993: 497—507.
- [3] Ehsani M R. Strengthening of earthquake-damaged masonry structures with composite materials [C]. Non-metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures. Paris Rilem: International Union of Laboratories and Exverts in Construction Materials, System and Structures, 1995: 680—687.
- [4] Gilstrap J M, Dolan C W. Out of plane bending of FRP-reinforced masonry walls [J]. Composites Science and Technology, 1998, 58(8): 1277—1284.
- [5] Hamilton H R, Holberg A, Caspersen J. Strengthening concrete masonry with fiber reinforced polymers [C]. Fourth International Symposium on Fiber Reinforced Polymer (FRP) for Reinforced Concrete Structures. Baltimore, Maryland: American Concrete Institute, 1999: 1103—1115.
- [6] Velazquez Dimas J I, Ehsani M R. Modeling out-of plane behavior of URM walls retrofitted with fiber composites [J]. Journal of Composites for Construction, 2000, 4(4): 172—181.
- [7] Albert M L, Elwi A E, Cheng J J R. Strengthening of unreinforced masonry walls using FRPs [J]. Journal of Composites for Construction, 2001, 5(2): 76—84.
- [8] Hamilton H R, Dolan C W. Flexural capacity of glass FRP strengthened concrete masonry walls [J]. Journal of Composites for Construction, 2001, 5(3): 170—178.
- [9] Hamoush S A, McGinley M W, Mlakar P. Out-of plane strengthening of masonry walls with enforced composites [J]. Journal of Composites for Construction, 2001, 5(3): 139—145.
- [10] Tumialan J G, Morbin A, Micelli F, Nanni A. Flexural strengthening of URM walls with FRP laminates [C]. Third International Conference on Composites in Infrastructur. San Francisco, CA: American Concrete Institute, 2002.