

# 双向纤维布约束加固钢筋混凝土柱的 FRP 锚钉设计方法研究

高 鹏<sup>1,2</sup>, 袁大明<sup>1</sup>, 王田宇<sup>1</sup>, 陈道政<sup>1,2</sup>

(1. 合肥工业大学 土木与水利学院, 安徽 合肥 230009; 2. 中国地震局工程力学研究所地震工程与工程振动重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150086)

**摘要:** 改造工程中既有钢筋混凝土框架结构抗震等级提高, 常使柱产生弯剪压复合加固的需求。使用双向纤维布约束钢筋混凝土柱, 采用 FRP 锚钉给予布中纵向纤维较好的锚固, 使得布中的两向纤维丝可同时受拉。基于已有相关研究, 提出了双向纤维布约束加固钢筋混凝土柱底 FRP 锚钉设计制作方法, 并进行了加固柱的拟静力推覆试验验证。结果表明: 使用 FRP 锚钉后有效避免纤维布在端部破坏, 提高了纵向纤维应变水平, 使得约束加固柱的变形能力、抗弯和抗剪承载力同时提高。

**关键词:** 双向纤维布; 约束; 钢筋混凝土柱; FRP 锚钉; 设计方法

中图分类号: TU375.3

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2022)02-0278-06

## Study on design method of FRP anchor in RC columns confined with bidirectional FRP sheets

GAO Peng<sup>1,2</sup>, YUAN Daming<sup>2</sup>, WANG Tianyu<sup>2</sup>, CHEN Daozheng<sup>2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;

2. China Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Haerbin 150086, China)

**Abstract:** In retrofitting the existing reinforced concrete (RC) frame structures, the improvement of seismic grade often leads to the demand of composite strengthening of flexural and shear capacities for columns. The reinforced concrete columns can be confined with bidirectional fibers reinforced polymers (FRP) sheets, and the longitudinal fibers in the sheets can be better anchored by FRP anchors, so that the FRP sheets can be tensioned in two directions. Based on the relevant research, the design and fabrication method of FRP anchors used for the RC columns confined with bi-directional FRP in the plastic hinge area were proposed, and then the pseudo-static force pushover test of the reinforced column was carried out. The results showed that the FRP anchors effectively improved the working strain of longitudinal fiber; and the seismic deformation, flexural and shear capacity of columns were simultaneously improved.

**Key words:** bidirectional FRP sheets; confinement; reinforced concrete column; FRP anchor; design method

改造工程中建筑功能更新会使钢筋混凝土 (Reinforced Concrete, RC) 框架结构抗震等级提高<sup>[1]</sup>, 框架柱会出现弯剪压复合加固需求。纤维复合材料 (Fiber Reinforced Polymer, FRP) 具有轻质、高强和耐久等显著优点, 被广泛地应用于加固工程中<sup>[2-5]</sup>。其中双向纤维布是指按两个垂直方向交织而成的纤维织物, 且具有相同的力学性能<sup>[6-7]</sup>。FRP 与混凝土表面的粘结性是影响其材料力学性能的关键因素, 纤维布在端部剥离会限制加固构件的应用<sup>[8-9]</sup>。而 FRP 锚钉能起到良好的锚

固作用, 锚钉由纤维丝或纤维布卷制成的, 用环氧树脂固化, 一端植入到待加固的结构中, 另一端展开纤维丝成扇面状与 FRP 布粘结<sup>[10-11]</sup>。

本文提出了应用于双向 FRP 布约束加固 RC 柱的 FRP 锚钉设计方法, 并通过锚钉制作、构件加固和加载试验验证该锚钉的有效性。新型的锚固方法既保证了纤维布整体性, 又有效避免纤维布在柱端部位置的应力集中和剥离破坏情况, 发挥了双向布约束柱的抗弯抗剪加固作用。

## 1 FRP 锚钉

FRP 锚钉是由纤维丝或纤维布卷制成的, 主要由三部分构成, 如图 1 所示: (1) 扇面是由丝束部分展开成扇形与 FRP 粘结; (2) 主杆是由布材卷制成螺纹杆状并用环氧树脂固化浸透固化形成硬棒; (3) 固定销安装于主杆两端用于固定主杆形状。FRP 锚钉主杆在底座中的长度即定义为锚钉埋置深度  $h$ , 扇面展开宽度为  $w$ , 扇面纤维丝长度  $L$ , 扇面展开角度的一半定义为  $\alpha$ 。

FRP 锚钉在混凝土中的四种典型破坏模式如图 2 所示, 包含: 根部断裂破坏, 见图 2(a); 混凝土锥形破坏, 见图 2(b); 主杆拔出破坏, 见图 2(c) 和扇面粘结破坏, 见图 2(d)。以下通过对各相关失效模式分析, 提出 FRP 锚钉在双向 FRP 约束 RC 柱中的设计方法, 确定锚钉的承载力、尺寸和构造等。

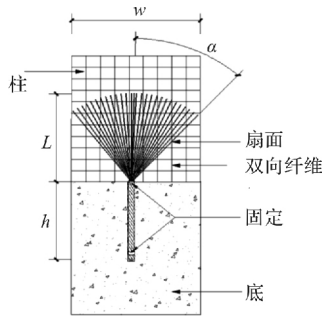


图 1 FRP 锚钉示意图

Fig. 1 Schematic diagram of FRP anchor

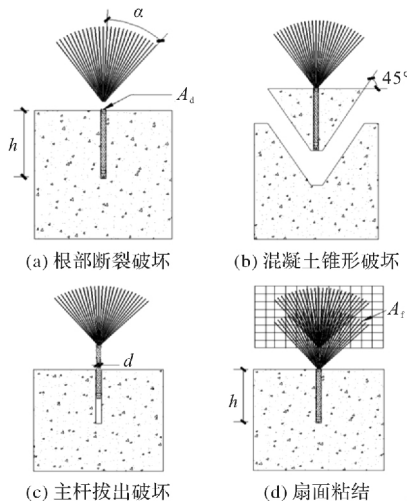


图 2 FRP 锚钉破坏模式

Fig. 2 Failure modes of FRP anchors

## 2 FRP 锚钉设计方法

### 2.1 设计步骤

#### 2.1.1 单个锚钉承载力

框架等级升高后, 柱端弯矩系数放大不同会

造成的加固前后柱端设计弯矩值差异。首先根据既有柱的相关信息, 计算出所需纵向和环向纤维布的用量。最后根据底座宽度和钢筋分布情况拟定 FRP 锚钉的个数, 确定单个 FRP 锚钉传递的拉力。根据纤维布的断裂应变  $\epsilon_f$ 、弹性模量  $E_f$  和纵向纤维丝面积  $A_p$ , 计算出双向布所能传递的最大拉力  $F$ , 来确定单个锚钉提供的最大拉力  $N_a$ , 如下所示。

$$N_a = F/m = \frac{1}{m} E_f \epsilon_f A_p \quad (1)$$

式中:  $m$  为 FRP 锚钉个数。

参考 JGJ145-2013《混凝土结构后锚固技术规范》<sup>[12]</sup>, 在地震作用下锚钉承载力设计值  $N_d$  按下式计算。

$$N_d = k N_a / \gamma_{RE} \quad (2)$$

式中:  $\gamma_{RE}$  为锚固承载力抗震调整系数, 取 1.0。  $k$  为地震作用下锚固承载力降低系数, 根据锚固中混凝土破坏和混合破坏形态取 0.7。

#### 2.1.2 主杆截面积

当锚钉的锚固深度较大时, 锚钉所承担的拉力大于主杆纤维的极限强度, 主杆将沿轴向被拉断破坏, 如图 2(a) 所示。Castillo 等<sup>[13]</sup> 由试验得出单个锚钉纤维根部断裂的计算模型, 对其进行修正后, 并代入(2)式的地震作用下的单个锚钉拉力, 则锚钉主杆截面积  $A_d$  可按下式计算。

$$A_d = \left[ \frac{N_d}{3.1 E_a \epsilon_a 10^{-3} \left( \frac{90 - \alpha}{80} \right)} \right]^{1.61} \quad (3)$$

式中:  $\alpha$  为锚钉扇面展开角度的一半。

#### 2.1.3 埋置深度

当混凝土抗拉强度低于锚钉主杆受拉承载力以及混凝土与锚钉之间的界面粘结强度时, 会发生混凝土锥形破坏<sup>[14]</sup>, 特征是以锚钉位置为中心, 沿着 45° 左右的倾斜角度, 混凝土包裹主杆呈倒锥形被拉出, 如图 2(b) 所示。在 Kim 等<sup>[15]</sup> 锥形破坏计算模型基础上, 可得修正后的主杆埋置深度  $h$ 。

$$h = \left[ \frac{N_d}{\beta \sqrt{f_c}} \right]^{\frac{2}{3}} \quad (4)$$

式中:  $f_c$  为混凝土的抗压强度设计值;  $\beta$  为单锚锥形破坏下影响系数, 取 9.68。

#### 2.1.4 群锚破坏验算

当多个锚钉共同安装使用, 其间距小于  $3h$  时, 需要按式(5)<sup>[12]</sup> 进行群锚验算, 即  $N_d$  应小于群锚锥形破坏受拉承载力  $N_c$ 。

$$N_c = N_d \frac{A_n}{9h^2} \varphi_s \quad (5)$$

式中:  $A_n$  为群锚受拉时混凝土锥体破坏投影面积, 参照 JGJ145-2013《混凝土结构后锚固技术规程》中 6.1.5 节;  $\varphi_s$  为群锚影响系数, 参照其 6.1.6-8 节。

### 2.1.5 开孔直径

如图 2(c) 所示主杆拔出破坏是指锚钉的锚固荷载承载力大于纤维与混凝土内表面的粘结力, 导致主杆在混凝土浅层剥离破坏。根据 Castillo<sup>[16]</sup> 提出的锚钉拔出破坏模型, 变形后得到底座开孔直径  $d_0$  计算值。

$$d_0 = \begin{cases} \frac{N_d}{4.62\pi h}, & f_c < 20 \text{ MPa} \\ \frac{N_d}{9.07\pi h}, & f_c \geq 20 \text{ MPa} \end{cases} \quad (6)$$

为了便于安装, 实际开孔直径一般应比计算值  $d_0$  略大 2~5 mm。

### 2.1.6 扇面面积

锚钉扇面粘结破坏是指扇面纤维与所粘贴的 FRP 纤维布表面之间发生滑移和剥离, 如图 2(d) 所示。锚钉承载力应大于扇面与 FRP 间的粘结力, 根据 Castillo<sup>[16]</sup> 的扇面粘结破坏模型得到扇面面积  $A_f$  计算式如下。

$$A_f = \frac{N_d}{0.35V_{sb}} \quad (7)$$

式中:  $V_{sb}$  为环氧树脂的剪切粘结强度, 无试验值时取为 5 MPa。之后由扇面面积换算扇丝长度  $L$ 。

## 2.2 设计流程

FRP 锚钉设计流程如下: 首先, 由相关尺寸构造确定锚钉数量  $m$ , 根据 FRP 布纵向拉力  $F$  和式(1)确定计算单个锚钉静力承载力  $N_a$ , 根据式(2)计算抗震承载力设计值  $N_d$ ; 随后由柱宽的几何条件确定初始扇面角度  $\alpha$ , 根据式(3)计算锚钉杆的截面面积  $A_d$  和直径  $d$ ; 之后根据式(4)计算 FRP 锚钉主杆埋置长度  $h$ , 并根据式(5)进行群锚验算; 再后, 由式(6)计算基底开孔直径  $d_0$ ; 最后, 由式(7)计算锚钉扇面面积  $A_f$  和扇丝长度  $L$ 。

## 3 试验验证

### 3.1 试件设计

为验证约束加固柱抗震性能提高和锚钉锚固效果, 设计 3 个方形柱试件。其中, C 为未加固的对比柱, B1 和 B1A 为采用一层双向纤维布约束加固的钢筋混凝土柱, 但 B1A 在布端部采用 FRP 锚钉对纵向纤维进行锚固。柱尺寸为 300 mm × 300 mm × 1 300 mm, 底座尺寸为 300 mm × 500 mm × 1 700 mm, 混凝土强度均为 C30, 纵筋强度等级为 HRB400, 直径 28 mm; 箍筋强度等级为

HRB335, 直径 6 mm。如图 3 所示, 试验采用玄武岩双向纤维布, 其弹性模量为 87.0 GPa, 抗拉强度为 1 740.0 MPa, 厚度为 0.12 mm, 延伸率 2.0%。试验所用粘结剂抗拉强度为 48.5 MPa, 弹性模量为 3 200.0 MPa。

试验采用位移加载控制方法, 在柱端施加低周往复水平荷载, 直至加载到试件承载力下降到峰值荷载 85% 时停止试验。加载过程中, 水平荷载直接由作动器上的力传感器采集, 水平位移由“与加载点位于同一水平面”的位移计采集。在柱的两侧表面沿轴向方向布置 4 个电阻式应变片, 用来测量塑性铰区纵向纤维布的应变变化情况, 如图 4 所示。

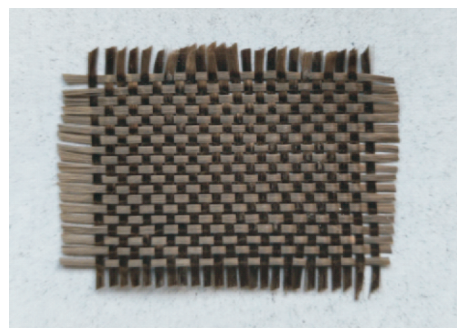


图 3 双向纤维布

Fig. 3 Bidirectional FRP sheets

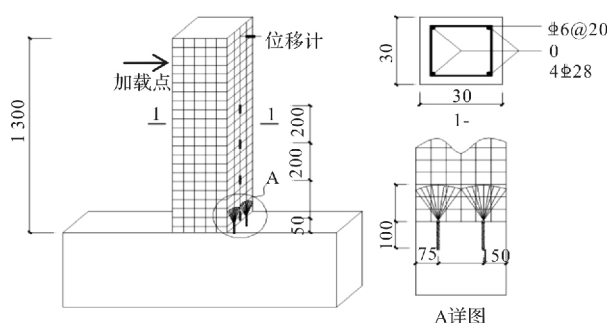


图 4 试件示意图

Fig. 4 Sketch of specimen

### 3.2 锚钉设计与实施

柱 C 设计预期为剪切破坏, 柱 B1 和 B1A 为弯剪破坏。为实现破坏模式转变, 对柱 B1 和 B1A 采取一层双向布全约束加固。但在柱 B1A 底座两侧各布置 2 个 FRP 锚钉, 间距 150 mm, 边距 75 mm。

根据第 2 节方法, 各项参数取值有纤维布断裂应变  $\varepsilon_f = 0.02$ , 纵向纤维丝面积  $A_p = 36 \text{ mm}^2$ , 混凝土抗压强度设计值  $f_c = 20.1 \text{ MPa}$ , 群锚影响系数  $\varphi_s = 1.0$ , 群锚锥体破坏投影面积  $A_n = 112 500 \text{ mm}^2$ 。由式(1)计算出单个锚钉静力承载力  $N_a = 31.3 \text{ kN}$ 。由式(2)算出锚钉抗震承载力设计值  $N_d$

=21.9 kN. 然后由柱宽几何条件确定初始扇面角度  $\alpha=30^\circ$ , 将  $N_d$  和  $\alpha$  代入式(3)得锚钉主杆截面积  $A_d \geq 32.8 \text{ mm}^2$ , 取  $A_d = 55.0 \text{ mm}^2$ ; 将  $N_a$  代入式(4)得主杆埋置深度  $h \geq 63.2 \text{ mm}$ , 取  $h = 100.0 \text{ mm}$ ; 再通过式(5)验算群锚锥形破坏受拉承载力  $N_c =$

27.4>21.9 kN, 满足条件. 然后将  $N_d$  和  $h$  代入式(6)得底座开孔直径  $d_0 \geq 7.7 \text{ mm}$ , 取  $d_0 = 13.0 \text{ mm}$ ; 最后通过式(7)得扇面面积  $A_f \geq 10\,440 \text{ mm}^2$ , 取  $A_f = 11\,775 \text{ mm}^2$ , 扇丝长度  $L = 150 \text{ mm}$ . 最终确定 FRP 锚钉尺寸如图 4 所示, 具体参数如表 1.

表 1 FRP 锚钉计算尺寸  
Tab. 1 Calculation of FRP anchor

单个锚钉 承载力 $N_a/\text{kN}$	群锚承载力 $N_c/\text{kN}$	扇面展开 角度 $\alpha/(\text{^\circ})$	主杆截面积 $A_d/\text{mm}^2$	埋置深度 $h/\text{mm}$	开孔直径 $d_0/\text{mm}$	扇面面积 $A_f/\text{mm}^2$	扇丝长度 $L/\text{mm}$
21.9	27.4	30.0	55.0	100.0	13.0	11 775.0	150.0

制作过程中首先将纤维布按尺寸裁剪, 把主杆纤维编织成麻花状绳, 并在杆两端采用固定销. 随后将主杆浸泡环氧树脂, 在树脂固化 24 h 后对杆长进行裁剪. 最后, 对于扇面部分的纤维布拆解为丝状. 制作完成的锚钉如图 5 所示.

贴好后, 将扇面纤维丝分散到纤维布表面上, 再刷一层环氧树脂. 对于双层布约束加固柱时则将锚钉扇面粘贴在两层布之间. 锚钉安装完成如图 6 所示.



图 5 锚钉成品  
Fig. 5 Anchor product

安装锚钉时, 首先在底座上标识出主杆位置并钻孔, 注入达到孔深一半高度的环氧树脂, 将锚钉主杆插入孔洞内. 之后再用环氧树脂填满, 控制孔洞内树脂密实无气泡. 最后在柱上纤维布



图 6 锚钉安装  
Fig. 6 Anchor installation

3.3 试验现象

未加固的对比柱 C 在加载初期柱下部出现裂缝; 随荷载增加, 裂缝逐渐增多并延伸; 当临近极限荷载时, 主斜裂缝沿柱高度从中部位置贯穿. C 的剪切破坏形态如图 7(a)所示.

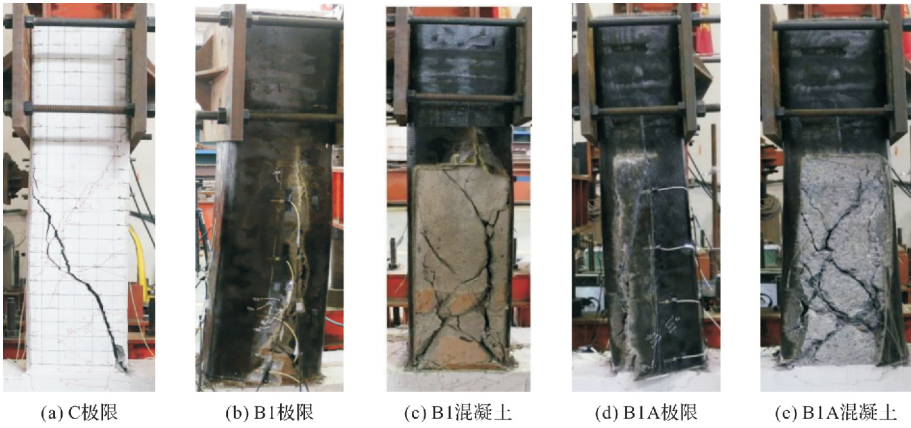


图 7 柱典型破坏形态  
Fig. 7 Typical failure mode of column

双向布约束柱 B1 在加载后不久在底部出现纤维布轻微撕裂; 极限状态时, 出现纤维布裂缝迅

速扩展和贯通, 最终破坏形态如图 7(b). 加载停止后, 剥开纤维布可见柱混凝土有较长的剪切裂



缝贯通,同时塑性铰区混凝土有压碎现象,柱的弯剪破坏形态如图7(c).有锚钉的双向布约束柱B1A在极限状态时,纤维布从柱底向上拉裂,柱承载力迅速下降,最终破坏形态如图7(d).剥开纤维布后发现,柱底有水平弯曲裂缝和交叉斜向剪切裂缝,但混凝土压碎现象较明显,如图7(e).在B1A加载至水平位移值10 mm时,FRP锚钉仍保持完整状态如图8(a)所示;随加载位移增加,

柱表面纤维布逐步出现裂纹,锚钉周围混凝土也开始出现裂缝.当加载位移为40 mm时,柱内纵筋和箍筋先后屈服,柱底部混凝土压碎现象明显,主杆的部分纤维丝开始断裂,锚钉承载力达最大值,如图8(b)所示.之后构件承载力迅速下降,继续加载柱端水平位移至50 mm时,柱底部的纤维布和锚钉均完全断裂,如图8(c)所示.

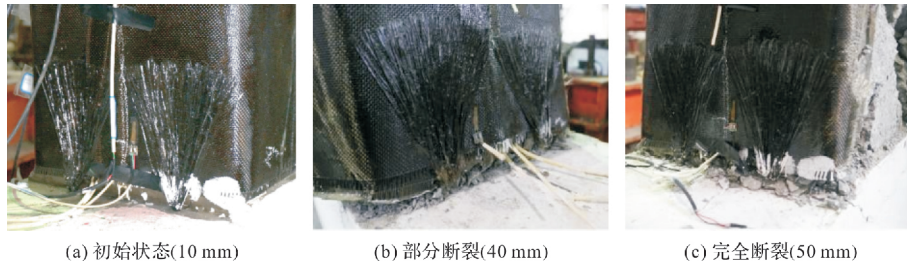


图8 FRP锚钉典型破坏过程

Fig. 8 Typical failure process of FRP anchor

### 3.4 试验结果分析

各试件荷载-位移滞回曲线如图9所示,其中横坐标为作动器施加的水平荷载,纵坐标为其加载点的水平位移.柱C滞回曲线显现出明显的“捏缩”现象,呈现出反S形.可以观察到箍筋最先屈服,随后荷载达到峰值后,构件迅速破坏,延性较差,显现为典型的剪切破坏.但柱B1和B1A采用双向布加固后,柱中均出现纵筋和箍筋的先后屈服,是典型的弯剪破坏,加固柱的极限位移和峰值荷载较C均有不同程度的增长,滞回曲线形状更加饱满,耗能能力提升,可见使用双向纤维布加固能明显提高RC柱抗震性能.其中使用FRP锚钉的柱B1A峰值荷载较柱B1提升12.2%,这说明FRP锚钉能约束双向布中纵向纤维,使其能和纵筋共同承担拉力,进一步提高构件的抗弯承载力.

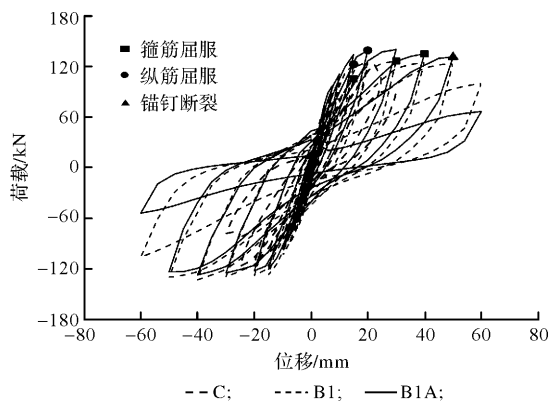


图9 荷载-位移曲线

Fig. 9 Load-displacement curve

柱B1和B1A的纵向纤维应变如图10所示,其中横坐标为应变片高度,纵坐标为每个应变片在正负向加载循环中应变峰值的绝对值,应变片位置见图4.可见无锚固柱B1的纵向纤维应变没有充分发挥,经FRP锚钉锚固后的B1A,在距柱底250 mm和450 mm高度的纵向纤维应变有明显提高,说明使用锚钉实现对纵向纤维的有效锚固,充分发挥其抗拉强度.

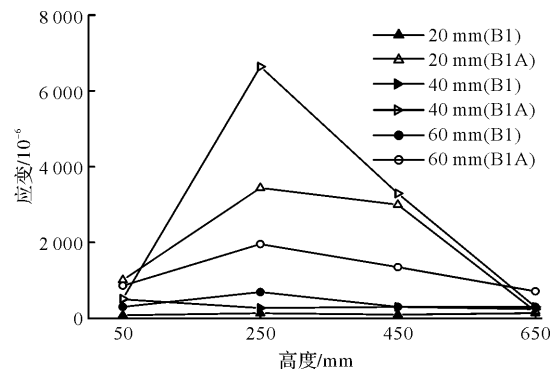


图10 塑性铰区内纵向纤维应变图

Fig. 10 Strain of longitudinal fiber in plastic hinge region

## 4 结论

本文根据现有改造工程中钢筋混凝土框架结构柱出现的弯剪压复合加固需求,提出了一种FRP锚钉锚固双向纤维布约束加固钢筋混凝土柱抗震性能的方法,结论如下:

(1)根据已有的加固和后锚固理论,提出用于双向纤维布约束加固柱的锚钉设计方法,包含计算锚钉主杆截面、埋置深度、孔径和扇面面积等;

之后提出完整的FRP锚钉设计、制作和安装方法;

(2)最后通过柱的推覆加载试验验证了锚钉锚固和双向布加固效果.与对比柱相比,加固柱的滞回曲线包络面积饱满,耗能能力增强,极限位移和承载力均有较大提高.而使用锚钉能有效约束双向布中纵向纤维,发挥纤维强度,进一步提高构件抗弯承载力.

## 参考文献 References

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑抗震设计规范: GB50011-2010, [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.  
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic China. Code for seismic design of buildings: GB50011-2010, [S]. Beijing: China Building Industry Press, 2016.
- [2] 陈绪军, 李华锋, 朱晓娥. FRP片材加固的钢筋混凝土梁短期刚度试验与理论研究[J]. 建筑结构学报, 2018, 9(1): 146-152.  
CHEN Xujun, LI Huafeng, ZHU Xiaoe. Experimental and theoretical research on short-term stiffness of reinforced concrete beams strengthened with FRP sheets[J]. Journal of Building Structures, 2018, 39(1): 146-152.
- [3] SMITH S T, ZHANG H, WANG Z. Influence of FRP anchors on the strength and ductility of FRP strengthened RC slabs[J]. Construction and Building Materials, 2013, 49: 998-1012.
- [4] MONALDO E, NERILLI F, VAIRO G. Basalt-based fiber reinforced materials and structural applications in civil engineering [J]. Composites Structures, 2019, 214: 74-94.
- [5] 高鹏, 黄镜淳, 周安, 等. 玄武岩纤维布和碳纤维布加固高强混凝土柱轴压性能试验研究[J]. 工业建筑, 2019, 49(9): 139-144, 160.  
GAO Peng, HUANG Jingting, ZHOU An, et al. Experimental research on axial compression of high-strength concrete column strengthened with BFRP and CFRP[J]. Industrial Construction, 2019, 49(9): 139-144, 160.
- [6] 李龙, 段跃新, 李超, 等. 双轴向经编织物 T700/BMI6421 复合材料力学性能[J]. 复合材料学报, 2011, 28(6): 92-97.  
LI Long, DUAN Yuexin, LI Chao, et al. Mechanical properties of bi-axial warp knitted fabric T700/BMI6421 composites [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2011, 28(6): 92-97.
- [7] 黄镜淳, 周安, 詹炳根, 等. 玄武岩纤维布的力学性能和强度利用率研究[J]. 工业建筑, 2019, 49(3): 1-5.  
HUANG Jingting, ZHOU An, ZHAN Binggen, et al. Research on mechanical properties and strength efficiency of basalt fiber fabric-reinforced epoxy composites[J]. Industrial Construction, 2019, 49(3): 1-5.
- [8] BISCAIA H C, SILVA M, CHASTRE C, et al. Factors influencing the performance of externally bonded reinforcement systems of GFRP-to-concrete interfaces [J]. Materials and Structures, 2015, 48(9): 2961-2981.
- [9] BARBIERI G, BIOLZI L, BOCCIARELLI M, et al. Size and shape effect in the pull-out of FRP reinforcement from concrete[J]. Composite Structures, 2016, 143: 395-417.
- [10] FLORES I, Gómez, J F, Llauredó P V, et al. Evaluation through a finite element simulation of the performance of FRP anchors for externally bonded reinforcements[J]. Composite Structures, 2021, 267: 113919.
- [11] CASTILLO E, GRIFFITH M, INGHAM J. Seismic behavior of RC columns flexurally strengthened with FRP sheets and FRP anchors [J]. Composite Structures, 2018, 203: 382-395.
- [12] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构后锚固技术规程: JGJ145-2013, [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.  
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic China. Technical specification for post-installed fastenings in concrete structures: JGJ145-2013, [S]. Beijing: China Building Industry Press, 2013.
- [13] CASTILLO E, GRIFFITH M, INGHAM J. Straight FRP anchors exhibiting fiber rupture failure mode[J]. Composite Structures, 2019, 207(1): 612-624.
- [14] OZBAKKALOGLU T, SAATCIOGLU M. Tensile behavior of FRP anchors in concrete [J]. Journal of Composites for Construction, 2009, 13(2): 82-92.
- [15] KIM S, SMITH S. Pullout strength models for FRP anchors in uncracked concrete[J]. Journal of Composites for Construction, 2010, 14(4): 406-414.
- [16] CASTILLO E, KANITKAR R, SMITH S T. Design approach for FRP spike anchors in FRP-strengthened RC structures[J]. Journal of Composites for Construction, 2019, 214(2): 23-33.

(编辑 沈 波)