## Acta Materiae Compositae Sinica

第 35 卷 第3期 3 月 2018 年 No. 3

March

2018

**DOI:** 10. 13801/j. cnki. fhclxb. 20170613. 002

# U 形 CFRP 条带混锚加固混凝土梁抗剪试验

周朝阳\*1. 刘君1. 许东1,2

(1. 中南大学 土木工程学院,长沙 410075; 2. 广州地铁设计研究院有限公司,广州 510010)

摘 要: 为解决纯粘贴 U 形纤维增强聚合物基复合材料(FRP)加固钢筋混凝土梁中 FRP 端部容易发生剥离破 坏等问题,自主研发了对纤维布条带端部进行自锁锚因的方法和锚板,提出了端锚与粘贴并用的混锚 U 形条带抗 剪加固方法。通过2根未加固梁、1根纯粘贴和*Z*根混错 U形碳纤维增强聚合物基复合材料(CFRP)带抗剪加固 梁的对比试验,证实了混锚抗剪加固的有效性、混锚能够对纤维带端部进行可靠锚固,阻止端部剥离破坏的发 生,实现纤维拉断破坏,大幅度提高材料强度利用率。混锚加固在抑制混凝土梁斜裂缝开展、延缓箍筋屈服、提 高箍筋和 CFRP 的极限应变以及提高抗弱承载力等多个方面的表现均明显优于纯粘贴加固。

关键词: CFRP 条带; 混锚c, 疣剪加固; 自锁锚板; 混凝土梁

中图分类号: TU375, TU312

文献标志码:

1000-3850(20)8)03-0714-08

Vol. 35

## Shear tests on reinforced concrete beams strengthened with hybrid-anchored CFRP U-sheets

ZHOU Chaoyang\*1, LIU Jun1, XV Peng1, 2

(1. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, China;

2. Guangzhou metro design and research incurrence co. Ltd, Guangzhou 510010, China)

In order to prevent the premature end-decording of externally bonded fiber reinforced polymer (ARR) composite used for shear strengthening of reinføreed concrete (RC) beams, a novel self-locking anchorage for FRP sheet was developed and a hybrid-anchoring method for FRP U-sheet was proposed, which was bonding the FRP to the surfaces of a beam and anchoring the FRP ends by anchor plates. Five specimens were tested what the feasibility of the new method, including two control specimen, one specimen strengthened by externally bonded (EB) U-sheets of carbon fiber reinforced polymer(CFRP) and two specimens strengthened by hybrid-anchored U-sheets. The results show that hybrid anchorage can shift the end-debonding of CFRP to the property failure and greatly improve the fiber-strength utilization. It performs much better than the conventional method of externally bonding in the aspects of restraining the propagation of the diagonal crack, improving the strain behavior of steel stirrups and CFRP, and increasing the shear capacity of RC beam.

Keywords: CFRP sheet; hybrid-anchorage; shear strengthening; belf-locking anchor plate; reinforced concrete heam

土木工程结构中受弯构件量大面广,常有钢筋 混凝土梁由于承载能力不足需要进行加固和修复 弯曲破坏和剪切破坏是其两种主要破坏形式。相比 弯曲破坏而言,剪切破坏具有明显脆性,往往突然发 生,破坏前几乎没有征兆,后果更加严重。因此,当 混凝土梁抗剪承载力不足,或抗弯加固后梁的抗剪

**承载力小于抗弯承载力时,就需要进行抗剪加固**[1]。

纤维增强聚合物基复合材料(FRP)具有轻质、 高强、耐腐蚀等特点,纤维布等片材用于对混凝土 梁进行抗剪加固时,还有施工方便的显著优点,因 而常受青睐[2]。迄今为止,国内外学者对纯粘贴 FRP 抗剪加固混凝土梁进行了大量的研究,各国制

收稿日期: 2017-03-14; 录用日期: 2017-05-28; 网络出版时间: 2017-06-13 11:56

网络出版地址: https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20170613.002

基金项目: 国家自然科学基金(51378507; 50778176)

通讯作者:周朝阳,博士,教授,博士生导师,研究方向为土木工程结构的加固或改造 E-mail: cyzhou@csu. edu. cn

引用格式:周朝阳,刘君,许芃. U形 CFRP 条带混锚加固混凝土梁抗剪试验[J]. 复合材料学报,2018,35(3):714-721.

ZHOU Chaoyang, LIU Jun, XU Peng. Shear tests on reinforced concrete beams strengthened with hybrid-anchored CFRP U-sheets [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2018, 35(3): 714-721 (in Chinese).

定的相关技术标准都有这一内容<sup>[3-4]</sup>。虽然纯粘贴方法简便易行,但若不能形成封闭环形(实际工程中大多如此),极易在纤维应力水平尚低时,就发生因端部剥离而导致的剪切破坏。大量试验结果表明,几乎所有的侧面粘贴和绝大多数 U 型粘贴FRP 抗剪加固梁都发生这种破坏<sup>[1,5]</sup>。因此,如何防治 FRP 端部剥离以提高加固效率是该研究领域亟需解决的问题。

近年来,各国学者以U型FRP条带为主,积 极探索了防治剥离的锚固技术,并取得了不少有溢 的进展,采取的措施包括:(1)纤维钉头摊铺法,即 将纤维布卷成杆状后,通过注胶局部插风梁面预钻 的孔中,再把外露部分的纤维丝摊舖成为扇形,粘 贴在 FRP 外表面。该方法能够延缓或阻止 FRP 的 剥离,进而提高抗剪承载; 但纤维钉被拉断或 拔出的现象时有发生。而且通常需要穿过 FRP, 这会造成 FRP 周部断开或弯折,降低平均强度。 (2)卷杆嵌入法<sup>©</sup>即预先在 T 形梁翼缘靠阴角处开 凿纵槽, 再用环氧胶将 FRP 端部缠绕在圆杆上并 嵌入到槽内, 待胶固化就固定了。该方法也能延缓 FRP 的剥离<sup>[8]</sup>,甚至实现拉断破坏<sup>[9]</sup>,但现场开槽〇 作业难度较大,对原结构的局部损坏也较大。(3) 跨条带压板法,即使用穿钉锚固的带孔金属(或 FRP)板垂直压在 FRP 条带上,以增大接触面上的 粘结力和摩擦力。该方法对剥离控制有一定效 果[10],但往往不能完全避免 (RR) 端部的切向滑 移,很难实现拉断破坏。加强 FRP 片材锚固的其 他方法可参考文献[11-12]。

综上所述,虽然已有锚固方法能够在一定程度 上提高 FRP 的强度利用率和加固构件的抗剪承载 力,但要么操作不便,要么效果欠佳,无法令人满 意。因此,更高效实用的锚固方法仍有待开发研究。(

本文研发了一种自锁锚板以实现以下多个的:彻底防止 FRP 端部的法向和切向剥离破坏,延缓 FRP 中部的剥离;在 FRP 中部完全剥离后,仍可作为有效传力机制,使 FRP 和混凝土梁协同工作;适用于不同截面类型的加固构件,并能够方便地应用于实际工程。抗剪加固时,锚板将 U形 FRP 条带两端自锁并通过植入混凝土的锚栓固定在梁两侧,同时条带沿全长与梁表面有效粘贴,实现混合锚固。为了验证该方法的有效性,分别对 2根未加固、1根纯粘贴 U型加固和 2根混锚 U型加固的混凝土梁进行了抗剪试验研究。

#### 1 混锚系统

图 1 为混锚 FRP 抗剪加固混凝土梁截面示意图。与纯粘方法相比,混锚系统除了 FRP 条带和胶粘剂,还包括自锁锚板(每侧 1 块)和植筋螺杆(每侧 2 根)。

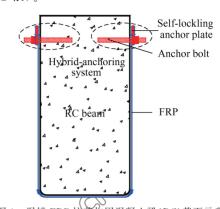


图 1 混锚 FRP 抗剪加固混凝土梁(RC)截面示意图

Fig. 1 Shear strengthening of reinforced concrete(RC) beam with hybrid-anchored FRP

## 1.1 自锁锚板

图 2 为自锁锚板示意图,自锁锚板中部开缝,一般采用金属制作而成,加工精度较高。柔性条带绕结自锁方法[13-14] 如图 2(b)所示。该端锚技术是摩擦力学原理的巧妙利用,自锁锚板不同天其它锚具的显著特征如下:(1)不用(也不排斥)粘胶即可很方便地通过自锁获得越拉越紧的锚固效果;(2)通常所需厚度可以薄至几个毫米,故对加固构件外观影响很小;(3)十分紧凑,无需拼装。1 块锚板每侧只开 1 个孔即可,有利于防止多孔锚固对梁体造成局部损伤过大。



(a) Anchor plate

(b) Wrapping method of FRP

图 2 自锁锚板

Fig. 2 Self-locking anchor plate

#### 1.2 施工工艺

混锚抗剪加固施工主要分为以下 3 个步骤: (1)定位植筋,根据加固方案及原梁配筋图,放线确定纤维带位置及锚杆植入位置,钻孔并对孔洞内壁灰渣进行吹洗,随后向孔洞注胶并快速植入锚杆,注意保证锚杆垂直于混凝土基面;(2)梁面处理,对梁表面纤维带经过处,按规范要求修圆阳角,清除劣化混凝土,直至完全露出结构新面,清理干净并保持干燥;(3)部件装配,根据加固方案计算纤维条带下料长度,裁剪后涂抹浸渍胶,将条带

两端绕结在开缝板上,再用螺母安装在加固梁侧面,最后微调条带长度并压胶。

## 2 试验方法

#### 2.1 试件设计

试验梁采用矩形截面,尺寸和配筋均相同,如图 3 所示,梁全长为 3.2 m,截面宽度 b=250 mm,高度 h=500 mm,有效高度  $h_0=443$  mm。为尽量减少混凝土强度离散性的影响,采用"一梁二用"试验方案,即梁中部为箍筋加密段,两端为抗剪试验段,两次试验时 2 个支座之间均包含箍筋加密段,

但抗剪试验段不同,跨中施加单点集中荷载。跨度 L=2 m,集中荷载作用点到支座距离 a=1 m,剪 跨比  $\lambda=2.26$ 。受压和受拉钢筋分别采用 2 根直径 25 mm 和 6 根直径 28 mm 的 HRB400 热轧带肋钢筋,以保证剪切破坏先于弯曲破坏发生。加密区箍筋为双肢直径 10 mm、间距 50 mm 的 HRB400 热轧带肋钢筋。抗剪试验段分有腹筋和无腹筋两种,和腹筋试件的箍筋采用 3 根双肢直径为 6.5 mm、间距为 300 mm 的 HPB235 热轧圆钢,编号分别为 S1、S2 和 S3,配箍率  $\rho_{sv}=0.088\%$ 。

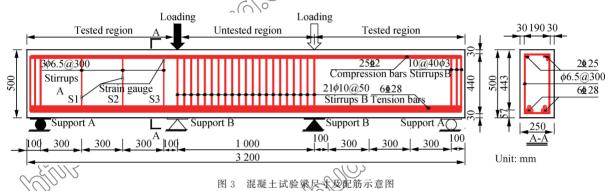


Fig. 3 Details of experimental concrete beams

#### 2.2 材料性能

试验梁采用商品混凝土制作,其中水泥、砂、碎石和水的含量分别为 1 kg、1.23 kg、2.48 kg 和 0.44 kg。混凝土梁和立方块在同等条件下自然养护,前期通过覆盖、浇水等措施进行保湿,梁试验时龄期至少 2 个月,实测立方体抗压强度平均值  $f_{cu}$ =39.6 MPa。各型号钢筋的材料性能参数如表 1 所示。碳纤维增强聚合物基复合材料(CFRP)布采用 Sigmatax 产品,厚度  $t_{frp}$ =0.167 mm,弹性模量  $E_{frp}$ =2.30×10<sup>5</sup> MPa,实测抗拉强度值  $f_{frp}$ =3 319 MPa。

表 1 CFRP 钢筋材性能参数
Table 1 Properties of CFRP reinforcements

Steel bars	Sectional area $A_{ m s}/{ m mm}^2$	Elastic modulus $E_{ m s}/{ m GPa}$	Yield strength $f_{ m yt}/{ m MPa}$	Ultimate strength $f_{ m uk}/{ m MPa}$
Stirrup A	33. 2	210	372.2	509.5
Stirrup B	78.5	210	505.1	606.1
Compression bar	490.9	200	464.5	606.6
Tension bar	615.8	200	475.8	654.9

#### 2.3 加固方案

试件共有 5 个梁段,包括未加固无腹筋梁  $(R_0 d_2)$ 、未加固有腹筋梁  $(Rd_2)$ 、纯粘贴加固有腹

筋梁(Rd<sub>2</sub>B<sub>121</sub>-70)、混锚加固无腹筋梁(Rd<sub>2</sub>H<sub>211</sub>-70)和混锚加固有腹筋梁(Rd<sub>2</sub>H<sub>2</sub>)、加固指标详见表 2。试件编号中,"R<sub>0</sub>d<sub>2</sub>发示无腹筋混凝土梁;"Rd<sub>2</sub>"表示有腹筋混凝上梁;"B"表示纯粘贴加固;"H"表示混锚加固;"H"或"B"右下标的三个数字分别表示 CFRP 的层数、宽度(以 50 mm 为单位)和中对中间距(以 150 mm 为单位);"-70"表示试件中(CRP 锚固点或粘贴边缘到试验梁上边缘的距离为70 mm。混锚加固中,由于锚板尺寸的要求,CFRP 布置方式如果采用 1×100@150 mm,其所需安装空间有点冲突,因此改为 2×50@150 mm,若比 1×100@150 mm 粘贴加固效果好,更能凸显其优势。

表 2 混凝土试验梁抗剪加固参数

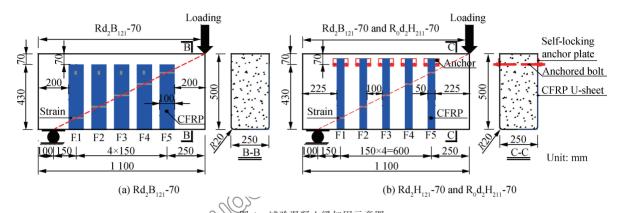
Table 2 Shear strengthening parameters of experimental concrete beams

$\begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	Specimens	Method	CFRP sheets					
$Rd_2H_{211}$ -70 H 2×50@150 8.91 430	Specimens		$n_{\mathrm{frp}} \times w_{\mathrm{frp}}@s_{\mathrm{frp}}$	$ ho_{ m frp}/10^{-4}$	$h_{\mathrm{frp}}/\mathrm{mm}$			
	Rd <sub>2</sub> B <sub>121</sub> -70	В	$1 \times 100@150$	8.91	430			
D 1 II 70 II 0\/50@150 0.01 400	$Rd_2 H_{211}$ -70	Н	$2 \times 50@150$	8.91	430			
$R_0 d_2 H_{211} = 70$ H $2 \times 50 \times 150$ 8. 91 430	$R_0 d_2 H_{211}$ -70	Н	$2 \times 50@150$	8.91	430			

Notes:  $n_{\text{frp}}$ —Numbers of CFRP;  $w_{\text{frp}}$ —Width of CFRP;  $s_{\text{frp}}$ —Spacing of CFRP;  $h_{\text{frp}}$ —Height of CFRP.

试验梁  $Rd_2B_{121}$ -70、 $R_0d_2H_{211}$ -70 和  $Rd_2H_{211}$ -70 加固示意图分别如图 4(a)和图 4(b)所示。混锚加

固梁植筋锚杆均采用直径为 10 mm 的 8.8 级高强螺杆, 植筋深度均为 80 mm。



Strengthening schemes of experimental concrete beams

#### 2.4 测 试

各加固梁 CFRP 与菜表面均为有粘结,各条带表面约在与荷载 这座连线交点高度处布置有 3~5个竖向应变片。以测试 CFRP 的应变值。加固梁箍筋 S1、S2 和 S3 各肢侧面同样在与荷载-支座连线交点高度处布置有应变片,以测试箍筋的应变值。 支座 A、B 处和梁跨中分别布置千分表和百分表以测得位移,了解试验梁挠度的变化。同时在分级加载过程中,着重观察斜裂缝的产生、发展等现象,并测量主斜裂缝的宽度和角度。

#### 3 结果与分析

#### 3.1 试验现象

未加固梁 Rd<sub>2</sub> 和 R<sub>0</sub>d<sub>2</sub>: 加载初期,梁底最先出现数条竖向裂缝,并逐渐扩展为弯剪斜裂缝;加载中期,梁腹下部陆续出现多条腹剪斜裂缝,并逐渐形成主斜裂缝;加载后期,主斜裂缝逐渐延伸至加载点,Rd<sub>2</sub> 受压区混凝土最终发生局部压碎,R<sub>0</sub>d<sub>2</sub> 受压区混凝土虽未出现压碎现象,但其支座处纵筋发生锚固破坏。Rd<sub>2</sub> 和 R<sub>0</sub>d<sub>2</sub> 的破坏形态如图 5~a 和图 5(d)所示。

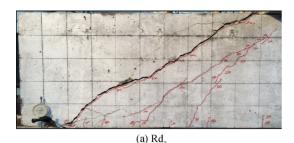
纯粘贴加固梁 Rd<sub>2</sub>B<sub>121</sub>-70: 加载初期和中期的 现象与未加固梁类似。当荷载增大到一定程度后, 新的斜裂缝基本不再出现, 主斜裂缝逐渐加宽并向 加载点和支座处延伸, 各条带主斜裂缝穿过处先后 出现局部脱胶现象; 加载后期, 主斜裂缝延伸至加载点, 条带 F5 首先发生端部剥离。荷载增加到峰值时, F4 端部也发生剥离(如图 5(b) 左所示), 受压区混凝土随即出现竖向分层和局部压酥的现象。

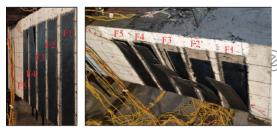
此后荷载急剧下降,其余 3 根条带迅速剥离(如图 5(b)右所示)。 武 梁 Rd<sub>2</sub>B<sub>121</sub>-70 呈现由 CFRP 剥离所引起的**身**国破坏形态。

混論加固试验梁: 加载初期和中期的现象与纯粘贴加固梁相近。但不同混锚加固试件的主斜裂缝 均延伸 至加载点,受压区混凝土出现不同程度的剥落和压 酥现象。极限荷载时,各试件多数 CFR 聚带突然相继被拉断,随即混凝土梁体发出较大的断裂响声,荷载读数骤降,基本丧失 数能力。在整个破坏过程中,CFRP的拉断与混凝土梁的破坏几乎同时发生。混锚加固梁 Rd H<sub>211</sub>-70 和 R<sub>0</sub> d<sub>2</sub> H<sub>211</sub>-70 均 呈现由 CFRP 拉断则引起的支座处受拉纵筋的锚 固破坏,如图 5(e)所示。

## 3.2 混凝土梁荷载-挠度曲线

及为各试验梁的荷载-挠度曲线。可知,加载前期,各试件荷载-挠度曲线基本以相同的斜率线性增长,这说明抗剪加固对混凝土梁初始刚度无明显影响。初始斜裂缝出现时,各试件曲线斜率明显减小;主斜裂缝出现后,曲线逐渐趋于平缓,说明各梁的刚度在不断退化。对比而言,未加固梁Rob2和Rb2刚度的退化,这间接说明CFRP条带能够抑制主斜裂缝的发展,从而延缓加固梁后期刚度的退化。但参数不同加固梁的延缓作用不尽相同,例如,混锚加固梁Rod2H211-70表现明显优于纯粘贴加固梁Rod2B121-70。表3给出各试验梁的抗剪承载力和承载力提升率。其中,纯粘贴加固梁Rd2B121-70的抗剪承载为591kN,提升率为16.34%;混锚加固梁





(b)  $Rd_{2}B_{12}$ -70



(c)  $Rd_{2}B_{211}$ -70



 $(d) R_0 d_2$ 



(e)  $R_0 d_2 H_{211}$ -70

图 5 混凝土试验梁破坏形态示意图

Fig. 5 Failure modes of experimental concrete beams

 $Rd_2H_{211}$ -70 和  $R_0d_2H_{211}$ -70 的抗剪承载力分别为 963 kN 和 689 kN,提升率分别为 89.57%和 48.17%。

#### 3.3 混凝土梁斜裂缝扩展

表 3 给出了各加固梁主斜裂缝倾度和荷载及斜

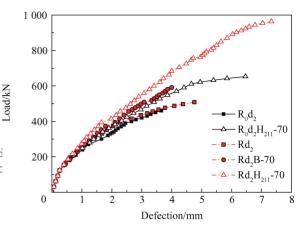


图 6 混凝土试验梁荷载-挠度曲线

Fig. 6 Load-defection curves of experimental concrete beams

裂缝荷载提升率。可见、纯粘贴和混锚加固梁都能够不同程度地提高试验梁的主斜裂缝荷载,提升幅度为 6.88% 。但是,各加固梁在改变主斜裂缝倾角为面并无明显的变化规律。例如,相比  $Rd_2$ ,加固梁  $Rd_2$ B<sub>121</sub>-70 和  $Rd_2$ H<sub>211</sub>-70 主斜裂缝倾角,别减小了 3°和 4°;相比  $R_0$ d<sub>2</sub>,加固梁  $R_0$ d<sub>2</sub> H<sub>211</sub>-70 的主斜裂缝倾角增大了 7°。

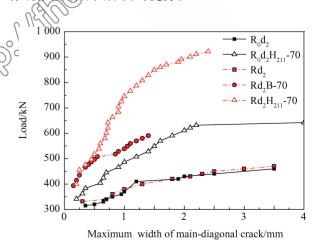


图 7 混凝土试验梁主斜裂缝最大宽度曲线

Fig. 7 Maximum width curves of main-diagonal crack of experimental concrete beams

表 3	混凝	十沙	计验	结	耳
1X J	/EK. /XE	ᅩᆓ	ᄴᆒ	==	7

Table 3 Experimental results of concrete beams

Specimens	Strengthening method	Degree of main diagonal crack θ/(°)	Load of main diagonal crack $P_{ m mc}/{ m kN}$	Increment of $P_{ m mc}$ $\xi_1/\%$	Ultimate load $P_{ m u}/{ m kN}$	Increment of $P_{\mathrm{u}}$ $\boldsymbol{\xi}_2  /  \! \! \%$	Failure mode
$Rd_2$	_	33	332	_	508	_	S
$Rd_2B_{121}$ -70	В	30	394	18.67	591	16.34	S, DB
$Rd_2H_{211}$ -70	Н	29	400	20.48	963	89.57	X, R
$R_0d_2$	_	22	320		465	_	X
R <sub>0</sub> d <sub>2</sub> H <sub>211</sub> -70	Н	29	342	(.89)	689	48.17	X, R

Notes:  $\xi_1 = (P_{\text{mc}}(\text{strengthened beam}) - P_{\text{mc}}(\text{control beam}))/P_{\text{mc}}(\text{control beam}); \xi_2 = (P_{\text{u}}(\text{strengthened beam}) - P_{\text{u}}(\text{control beam}))/P_{\text{u}}(\text{control beam}); S—\text{Shear-compression failure of beam}; X—\text{Anchoring failure of longitudinal steel reinforcement of beam}; DB—\text{Debonding failure of CFRP}; R—\text{Rupture failure of CFRP}.$ 

## 3.4 混凝土梁箍筋 CFRP 应变

图 8(a)、图 8(b)和图 8(c)分别给出有腹筋试 验梁箍筋 S1、S2 和 S3 的荷载-应要曲线。可见,各 箍筋应变值在主斜裂缝形成之前基本为 0, 在主斜 裂缝形成之后几乎同时迅速增长。加固能不同程度 地延缓箍筋的屈服、并提高箍筋的极限强度利用 率,甚至出现箍筋的拉断破坏。对比而言,纯粘贴 加固梁延缓箍筋的作用效果最差, 其各箍筋应变曲 线与对比梁均较为接近,而且其各箍筋最大应变值 与对比梁 Rd。各值也基本相同。例如,纯粘贴加固C 梁 Rd<sub>2</sub>B<sub>121</sub>-70 的 S1、S2 和 S3 最大应变值分别为 2 888 με、3 677 με 和 1 145 με, 均接近天对比梁 Rd。的 S1、S2 和 S3 最大应变值 2 99 λκ \4 974 με 和1 043 με; 而且 S3(Rd<sub>2</sub>)和 S3(Rd<sub>2</sub>B<sub>121</sub>-70)应变 值均未能达到箍筋的屈服应变 1861 με。混锚加固 梁则能明显延缓各箍筋屈服〉提高各箍筋的最大应 变值, 使其均接近或超过屈服应变值。例如, 混锚 加固梁 Rd<sub>2</sub>H<sub>211</sub>-70 的 S1、S2 和 S3 最大应变值分 别为 4 942 με、7 933 με 和 1 567 με, 远高于对比梁 Rd2 和纯粘贴加固梁 Rd2 B121-70 中各箍筋的最大应 变值。

#### 3.5 CFRP 应变

在各级加载状态中,加固梁 CFRP 条带的应变值均以平均应变为准。图 9 以条带 F3 为例给出各试验梁 CFRP 的荷载-应变曲线。可见,各 CFRP 应变值变化规律均与箍筋类似,在主斜裂缝形成之前基本为 0,而在主斜裂缝形成之后开始迅速增长。表 4 给出各加固梁极限荷载时对应的 CFRP 最大应变值。各加固梁 CFRP 最大应变值均呈现试验区中间大和两端小的变化规律。纯粘贴加固梁 Rd<sub>2</sub>B<sub>121</sub>-70 的 F4 和 F5 由于发生端部剥离使其最终应变接近或等于 0。对比而言,混锚加固梁

 $Rd_2H_{211}$ -70 和  $R_0d_2H_{211}$ -70 的有效应变均明显大于 纯粘贴加固梁的有效应变,分别是纯粘贴加固梁的 3.93 和 3.63 倍。

表 OFRP 条带最大应变 Table Maximum strains of CFRP straps

Specimen	Γ1 ε <sub>1</sub>	F2 $\epsilon_2$	F3 ε <sub>3</sub>				$\begin{array}{l} Increment \\ of \ \epsilon_{fe} \\ \xi_3 \end{array}$
Rd <sub>2</sub> B <sub>121</sub> -70		2297	2212	855	0		_
$Rd_2 H_{211}$ -70 $R_0 d_2 H_{211}$ -70						4	3. 93 3. 63
Notes: Effect	ive str	ain ε <sub>fe</sub>	= Sun	n of st	rains	(1)	number of

## 3.6 对比分析

纯粘贴加固梁 Rc 121-70 和混锚加固梁 Rd<sub>2</sub>H<sub>211</sub>-70 仅 CFRP 锚固方式不同,但试验结果差别较大,对比可见。混锚加固能够改变传统纯粘贴加固中 CFRP 条带的端部剥离破坏模式,并实现纤维带的拟断破坏,提高了纤维的极限应变和强度利用率。此外,在抑制斜裂缝产生和主斜裂缝加宽、延缓梁开裂后刚度退化、延缓箍筋屈服以及提高箍筋极限应变等多个方面,混锚加固方法均明显优于纯粘贴加固方法。最终,混锚加固方法大幅度提高了加固梁的抗剪承载力,其提升率 89.57%远高于纯粘贴加固的 16.34%。

## 4 结 论

- (1)介绍了一种对碳纤维增强聚合物基复合材料(CFRP)条带端部进行自锁锚固的锚板,并提出相应的混凝土梁混锚 U 形条带抗剪加固方法,即在条带与梁面有效粘贴的同时,将其两端通过自锁锚板和植筋锚栓加强锚固。
  - (2) 相比纯粘贴抗剪加固而言,自锁混锚加固

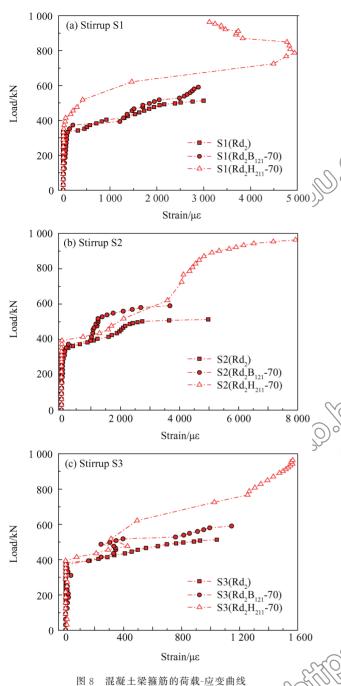


Fig. 8 Load-strain curves of strips of concrete beams

在抑制加固梁主斜裂缝的形成及扩展、抑制梁刚度 的退化、延缓箍筋的屈服和提高箍筋的极限应变等 多个方面表现更优。

- (3) 混锚抗剪加固能够对纤维带进行可靠锚固,避免了端部剥离,中部剥离不再意味着最终破坏,拉断破坏得以发生,大幅度提高了纤维带强度利用率,其有效应变约为纯粘贴加固时的4倍左右。
  - (4) 自锁混锚加固能显著提高混凝土梁的抗剪

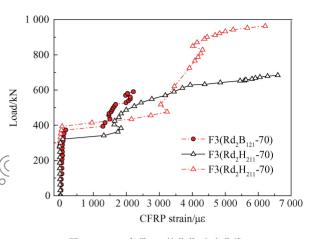


图 9 CFRP 条带 F3 的荷载-应变曲线 Fig. 9 Load-strain curves of CFRP strap F3

承载力,最大提升率达 89.57%,远高于纯粘贴加固的 16.34%,充分证实了自锁混锚抗剪加固方法的有效性。

## 参考文献

像锦光, 陈建飞, S. T. 史密斯, 等. FRP 加固混凝土结构 [M]. 李荣, 滕锦光, 顾磊, 译. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005.

TENG J G, CHEN J F, SMITH S T, et al. FRP trengthened RC structure M. LI R G, TENG J G, GVOL, Translate. Beijing: China Architecture & Builling Press, 2005 (in Chinese).

[2] 周朝阳, 谭磊, 程小念. **FR** 说剪加固钢筋混凝土梁研究综述[J], 建筑科学与工程学报, 2011, 28(2): 1-7.

ZHOU C Y, TAXD, CHENG X N. Review of research on reinforced concrete beams shear-strengthening with FRP[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2011, 28(2): 4.7 (in Ohinese).

Struction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures: ACI440. 2R—08[S]. Farmington Hills, MI: American Concrete Institute, 2008.

[4] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 纤维增强复合材料建设工程应用技术规范: GB 50608—2010[S]. 北京: 中国计划出版社, 2011.

Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical code for infrastructure application of FRP composites: GB 50608—2010 [S]. Beijing: China Planning Press, 2011 (in Chinese).

5] 冯鹏,陆新征,叶列平.纤维增强复合材料建设工程应用技术[M].北京:中国建筑工业出版社,2011.

FENG P, LU X Z, YE L P. Application of fiber reinforced polymer in construction: Experiment, theory and methodology[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011

(in Chinese).

- [6] KIM S J, SMITH S T. Pullout strength models for FRP anchors in uncracked concrete [J]. Journal of Composites for Construction, 2010, 14(4): 406-414.
- [7] ZHANG H W, SMITH S T, KIM S J. Optimisation of carbon and glass FRP anchor design[J]. Construction and Building Materials, 2010, 32: 1-12.
- [8] MICELLI F, ANNAIAH R H, NANNI A. Strengthening of short shear span reinforced concrete T joists with fiber reinforced plastic composites[J]. Journal of Composites for Construction, 2002, 6(4): 264-271.
- [9] KHALIFA A, ALKHRDAJI T, NANNI A, et al. And age of surface mounted FRP reinforcement[J]. (Increte International: Design and Construction, 1999 (1996): 49-54.
- [10] CERONIF, PECCE M, MATTHYS of al. Debonding strength and anchorage devices (Greinforced concrete elements strengthened with FRE sheets[J]. Composites: Part B, 2008, 39: 429-441.

[11] KALFAT R, AL-MAHAIDI R, SMITH S. Anchorage devices used to improve the performance of reinforced concrete beams retrofitted with FRP composites: A-state-of-the-art review[J]. Journal of Composites for Construction, 2013, 17 (1): 14-33.

GRELLE S V, SNEED L H. Review of anchorage systems

「12 □

- for externally bonded FRP laminates[J]. International Journal of Concrete Structures and Materials, 2013, 7(1): 17-33. 周朝阳,周奥利,周欣涛. 柔性片状材料绕杆自锁的方法:中国, ZL201010269384[P]. 2012-11-21. ZHOU C Y, ZHOU A L, ZHOU X T. Method for self-locking flexible flaky material by turnstile: China, ZL201010269384[P]. 2012-11-21 (in Chinese).
- [14] 周朝阳,周奥利,周欣涛. 柔性片状材料平行杆式锚固装置及方法:中国,ZL2010105166838[P]. 2012-01-25.
  ZHOU CY, ZHOU AL, ZHOU XT. Device and method of anchorage with paraPel roots for flexible sheet material: China, ZL2010105166838[P]. 2012-01-25 (in Chinese).

With of the state of the state