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,许芃^{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)

关键词: CFRP条带;混锚,抚剪加固;自锁锚板;混凝土梁

中图分类号: TU375, TU315, TU315, 文献标志码: A 文章编号: 1000-3855(2048)03-0714-08

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

ZHOU Chaoyang^{*1}, LIU Jun¹, XO Peng^{1, 2}

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

2. Guangzhou metro design and research institute Co. Ltd, Guangzhou 510010, China)

Abstract: In order to prevent the premature end-debonding of externally bonded fiber reinforced polymer (FRP) composite used for shear strengthening of reinforced 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 to and a 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 rupture 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, self-locking anchor plate; reinforced concrete beam

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¹¹。 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

基金项目: 国家自然科学基金 (51378507; 50778176)

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

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^[3-4]。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^[1,5]。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,并取得了不少有益 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,通过注胶局部插入梁面预钻 的孔中,再把外露部分的纤维丝摊铺减为扇形,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,并行但纤维钉被拉断或 拔出的现象时有发生。而且通常需要穿过 FRP, 这会造成 FRP 局部脚开或弯折,降低平均强度。 (2)卷杆嵌入法。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^[8],甚至实现拉断破坏^[9],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 FRR 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。₂

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)。





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。



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键, 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, 有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 $\rho_{sy}=0.088\%$ 。



2.2 材料性能

试验梁采用商品混凝土制作,其中水梁、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、浇水等撬淹进行保湿,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 $t_{trp}=0.167$ mm,弹性模量 $E_{trp}=2.30\times10^5$ MPa,实测抗拉强度值 $f_{trp}=3319$ 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 _s /GPa	Yield strength f _{yt} /MPa	Ultimate strength f _{uk} /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 (R₀d₂)、未加固有腹筋梁(Rd₂)、纯粘贴加固有腹 筋梁(Rd₂B₁₂₁-70)、混锚加固无腹筋梁(Rd₂H₂₁₁-70)和混锚加固有腹筋梁(Rd₂H₄, 30),加固指标 详见表 2。试件编号中,"R₀d₂发示无腹筋混凝土 梁;"Rd₂"表示有腹筋混凝 中梁;"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 CFRP 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 承,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

Specimens	Method	CFRP sheets				
		$n_{\rm frp} imes w_{\rm frp} @ s_{\rm frp}$	$ ho_{ m frp}/10^{-4}$	$h_{ m frp}/ m mm$		
Rd_2B_{121} -70	В	$1 \times 100@150$	8.91	430		
$Rd_2 H_{211}$ -70	Н	$2 \times 50@150$	8.91	430		
$R_0d_2H_{211}70$	Н	$2 \times 50@150$	8.91	430		

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

试验梁 Rd₂B₁₂₁-70、R₀d₂H₂₁₁-70 和 Rd₂H₂₁₁-70 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。



2.4 测试

各加固梁 CFRP 与梁表面均为有粘结,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 Rd₂ 和 R₀d₂: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,Rd₂ 受压区混凝土最终发生局部压碎,R₀d₂ 受压区混凝土虽未出现压碎现象,但其支座处纵新 发生锚固破坏。Rd₂ 和 R₀d₂ 的破坏形态如图 5~a) 和图 5(d)所示。

纯粘贴加固梁 Rd₂B₁₂₁-70: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)。试验梁 Rd₂B₁₂₁-70 呈现由 CFRP 剥离所引起的剪正破坏形态。

混锚加固试验梁: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 型式和角度略有不同;加载后期,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 CFRP 条带突然 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,基本丧失承载能力。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 H211-70 和 Rod2 H211-70 均 呈现由 CFRP 拉断所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

滚。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 R₀b₂和 Rb₂ 刚度退化较快,加固能延缓试件刚度 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 R₀d₂ H₂₁₁-70 表现明显优于纯粘贴加固梁 R₀d₂ H₂₁₁-70。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 Rd₂ B₁₂₁-70 的抗 剪承载为591 kN,提升率为16.34%;混锚加固梁





(b) Rd₂B₁₂₁-70



(c) Rd₂B₂₁₁-70







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





Rd₂H₂₁₁-70 和 R₀d₂H₂₁₁-70 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





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 Rd₂,加固梁 Rd₂B₁₂₁-70 和 Rd₂H₂₁₁-70 主斜裂缝倾 角、 剂减小了 3° 和 4° ;相比 R₀d₂,加固梁 R₀d₂H₂₁₁-70 的主斜裂缝倾角增大了 7° 。

图 7 为各试验梁主斜裂缝最大宽度随标载变化 的趋势。可见,对比梁 Rd_2 和 R_0d_2 的主斜裂缝规 律基本相同。相比对比梁,加固梁 均能够明显抑制 主斜裂缝宽度的扩展,减小同级荷载时的最大裂缝 宽度,进而提高构件的抗要承载能力。此外,虽然 Rd_2B_{121} -70 和 Rd_2H_{2} 70 在 500 kN 之前裂缝宽度 的扩展基本相同,但在 500 kN 之前裂缝宽度 的扩展基本相同,但在 500 kN 之后 Rd_2H_{211} -70 抑 制主斜裂缝加展的效果明显优于 Rd_2B_{121} -70,充分 体现了混简加固方法的优势。



Table 3 Experimental results of concrete beams							
Specimens	Strengthening method	Degree of main diagonal crack θ/(°)	Load of main diagonal crack P _{mc} /kN	Increment of $P_{\rm mc}$ $\xi_1/\%$	Ultimate load Pu/kN	Increment of P_u $\xi_2/\%$	Failure mode
Rd_2		33	332	_	508	_	S
Rd_2B_{121} -70	В	30	394	18.67	591	16.34	S, DB
$Rd_2 H_{211}$ -70	Н	29	400	20.48	963	89.57	X, R
R_0d_2		22	320		465		Х
$R_0 d_2 H_{211}$ -70	Н	29	342	6.88)	689	48.17	X, R

表 3 混凝土梁试验结果 able 3 Experimental results of concrete bean

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

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 Rd₂各值也基本相同。例如,纯粘贴加圈C 梁 Rd2 B121-70 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 Rd₂ 的 S1、S2 和 S3 最大应变值 2 99次 从 4 974 με 和1 043 µe; 而且 S3(Rd2)和 S3(Rd2B121-70)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 Rd₂H₂₁₁-70 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 Rd₂B₁₂₁-70 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 Rd₂H₂₁₁-70 和 R₀d₂H₂₁₁-70 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。



Specimen	ο F1 ε ₁	F2 ε ₂	F3 ε ₃	F4 ε ₄	F5 ε ₅	Effective strain ε _{fe} /με	Increment of ε_{fe} ξ_3
Rd2B121-70	1353	2297	2212	855	0	1343	_
Rd ₂ H ₂₁₁ -70	2489	6562	6927	6214	4237	5286	3.93
$R_0d_2H_{211}70$	3747	4642	6597	5966	3727	4876	3.63
Notes: Effective strain $\varepsilon_{fe} = Sum$ of strains ($\varepsilon_{fe} : \varepsilon_{fe}$) number of							

straps; $\xi_3 = \epsilon_{fe} (Rd_2 H_{211} - 70 \text{ or } R_0 d_2 H_{211} - 70) (Rd_2 B_{121} - 70).$

3.6 对比分析

纯粘贴加固梁 RC 101-70 和混锚加固梁 Rd₂H₂₁₁-70 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 维带的拉斯破坏,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、 远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



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





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:

- 發棉光, 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 sprengthened RC structure[M]. LI R G, TENG J G, GUOL, Translate. Beijing: China Architecture & Building Press, 2005 (in Chinese).

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): 0.7 (in Chinese).

American Concrete Institute. Guide for the design and construction 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. Archorage of surface mounted FRP reinforcement[J]. Concrete International: Design and Construction, 1999 (2010): 49-54.

- [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.
- [12] GRELLE S V, SNEED L H. Review of anchorage systems 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.

Https/ Attack 20,000, edul, en

ZHOU C Y, ZHOU A L. ZHOU X T. Device and method of anchorage with parallel roots for flexible sheet material: China, ZL2010105 06638[P]. 2012-01-25 (in Chinese).