

文章编号: 1673-2049(2011)01-0076-07

新型 CFRP 抗弯加固方法的试验研究

石昌文, 何化南, 董海, 吴智敏

(大连理工大学 海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024)

摘要:为了解决外贴碳纤维增强复合材料(CFRP)加固法中加固构件因发生 CFRP 布剥离而使加固失效的问题,提出了一种新的端部锚固方法,即将 CFRP 布两端缠绕在铁片上,然后用螺栓把铁片固定于混凝土梁的支座处;对采用该方法加固的钢筋混凝土梁进行了三点弯曲试验。结果表明:这种端部锚固方法可以延缓 CFRP 布的剥离,即使 CFRP 布在跨中剥离仍可与梁共同受力,直至 CFRP 布拉断,从而有效地提高 CFRP 的利用率;此外,加固梁表现出良好的延性破坏特征。

关键词:CFRP;端部锚固;混凝土;延性破坏

中图分类号:TU374 **文献标志码:**A

Experiment Research on New Method of Flexural Strengthened with CFRP

SHI Chang-wen, HE Hua-nan, DONG Hai, WU Zhi-min

(State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, Liaoning, China)

Abstract: The concrete members strengthened by external bonded carbon fiber reinforced polymer (CFRP) technique tended to fail by CFRP sheet debonding. In order to solve the problem, authors proposed a new end anchorage method, which made the end of CFRP wrapped in a steel plate, and fixed the steel plate on the reinforced concrete (RC) beam near the support pillar with bolts. Three-point bending tests were carried out on RC beams strengthened by the new end anchorage technique. The results show that this approach can delay the debonding of CFRP, which means even if CFRP debonds in the mid-span, the CFRP and RC beam can still be together by force, and improve the CFRP effect accordingly. Furthermore, the strengthened beams have good ductile failure characteristics.

Key words: carbon fiber reinforced polymer; end anchorage; concrete; ductile failure

0 引言

纤维增强复合材料(FRP)已广泛应用于土木工程中的结构补强和加固,这种材料具有抗拉强度高、质量轻、耐腐蚀、徐变小、便于施工等优点^[1-3]。众多研究发现,用环氧树脂将 FRP 粘贴到混凝土梁表面,可有效地提高混凝土构件的抗弯承载力和刚度^[4-6]。在加载前期,FRP 和混凝土梁可以很好地

协同工作,但随着荷载的增大,FRP 片材出现剥离,从而失去加固效果^[7-8]。FRP 剥离破坏模式可归结为 3 种,即混凝土保护层剥离破坏、FRP 端部界面剥离破坏和 FRP 中间剥离破坏^[9-13]。由于剥离问题的存在,FRP 的强度常无法得到充分利用,致使承载力提高的程度大大削弱,整个构件加固效果进而下降^[14-15]。由此可见,FRP 与混凝土之间的粘结性能是影响其加固效果的主要原因。

收稿日期:2010-12-02

基金项目:“十一五”国家科技支撑计划项目(2006BAJ03A03-09);国家自然科学基金项目(50578025)

作者简介:石昌文(1984-),男,山东菏泽人,工学硕士研究生,E-mail:scw0072010@126.com。

为改善 FRP 与混凝土梁之间的粘结效果,有学者采用了一种表面嵌贴(NSM-FRP)法,即在混凝土表面开槽嵌入树脂后,粘贴 FRP 片材进行加固。Blaschko 等用表面嵌贴法进行了 FRP 加固试验,证实了这种方法与外贴补强法相比,锚固能力更强^[16-18]。但表面嵌贴法需要复杂的表面处理,放置和粘贴 FRP 需要准备合适的槽^[19]。在施工过程中,锯片开槽很可能切断构件钢筋,因此,在开槽技术得不到改进的情况下,表面嵌贴法无法得到广泛应用。

另一种混凝土抗弯加固方法是机械紧固(MF-FRP)法,这种方法采用机械连接加固方式,用一种特殊的“枪”把钉子穿过 FRP 打入混凝土,使 FRP 片材和混凝土更好地协同工作。与外贴补强法相比,这种方法不需要表面处理、粘合剂或熟练工人。试验结果表明,机械紧固法加固能显著提高梁的承载能力,并较好地保持了混凝土梁的延性^[20-21]。然而这种方法只适用于抗剪能力很强的特殊 FRP 片材,一般的 FRP 材料很容易发生剪切破坏,即使抗剪能力强的 FRP 材料仍然存在着劈裂并且使用寿命较短等缺点。Spadea 等进行了外部粘贴 FRP 试验,在 FRP 的两端和梁跨范围内安装 U 型铁板。结果表明,这种方法可以有效提高粘结性能和延性^[22-23]。Teng 等^[24-25]采用 FRP 做成 U 型箍沿着梁长布置,可以有效延缓纤维布的剥离,但仍存在纤维布剥离问题。Wu 等^[26]提出一种复合粘结技术,这种技术利用一种新型锚固件(锚固件由 1 块铁板和 2 个锚钉组成)对外贴纤维布进行锚固。结果表明,粘贴 2 层和 4 层并采用该技术锚固的 CFRP 布均被拉断,而采用相同锚固方式并粘贴 6 层 CFRP 布的梁发生剥离破坏。尽管采用这种技术可满足 2 层和 4 层 CFRP 布被拉断,但是大量使用锚钉对混凝土梁有一定损伤,并且施工复杂,打入锚钉很容易对纵向受拉钢筋造成损害,不宜推广使用。

由于 FRP 和混凝土的剥离破坏,限制了纤维材料的充分利用,且很多施工工艺受到限制。有的试验采取特殊的加固方式,但是施工特别复杂并且费用昂贵,不能应用于实际工程^[27-32],因而在改善 FRP 和混凝土之间的粘结性能及提高 FRP 利用率上,仍需要进行大量研究工作。本文中笔者综合上述加固方法的优缺点,提出了一种改进的加固方法,即用环氧树脂浸湿 FRP 条,把纤维布两端缠绕在铁片上,然后用螺杆把铁片固定于混凝土梁。这种方法施工简单,可应用于各种 FRP 材料。

1 试验概况

1.1 试验梁配筋及尺寸

试验梁共 6 根,其中 2 根长度为 1 900 mm,另外 4 根长度为 2 700 mm,均为矩形截面钢筋混凝土梁,截面尺寸均为 150 mm×200 mm。纵向受拉配筋有 2 种形式:在梁底部配有 1 根直径 10 mm 的 II 级钢筋和在梁底部配有 2 根直径 10 mm 的 II 级钢筋。试验梁的截面尺寸和配筋情况见图 1。加固方案及加固端细节见图 2、3。

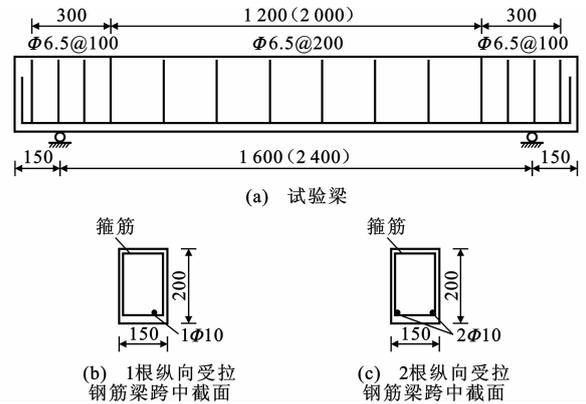


图 1 试验梁尺寸及配筋(单位:mm)

Fig. 1 Dimensions and Reinforcement of Test Beams (Unit:mm)

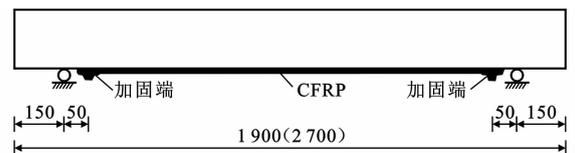


图 2 加固方案(单位:mm)

Fig. 2 Strengthened Scheme (Unit:mm)

1.2 材料性能

混凝土强度等级为 C20,混凝土立方体抗压强度为 31.9 MPa,轴心抗压强度为 27.2 MPa,弹性模量 $E_c=27.4$ GPa。

CFRP 布极限抗拉强度 $f_{frp}=2 535$ MPa,受拉弹性模量 $E_f=213$ GPa,极限拉应变为 0.012 1。试验梁的 CFRP 参数如表 1 所示。

表 1 试验梁的 CFRP 参数

Tab. 1 CFRP Parameters of Test Beams

梁编号	纵向受拉钢筋	净跨/mm	CFRP 布宽度/mm	加固方案
L16-0	1 Φ 10	1 600		不贴 CFRP 布
L16-1	1 Φ 10	1 600	50	1 层 CFRP 布加锚固
L24-1-0	1 Φ 10	2 400		不贴 CFRP 布
L24-1-1	1 Φ 10	2 400	50	1 层 CFRP 布加锚固
L24-2-0	2 Φ 10	2 400		不贴 CFRP 布
L24-2-1	2 Φ 10	2 400	50	1 层 CFRP 布加锚固

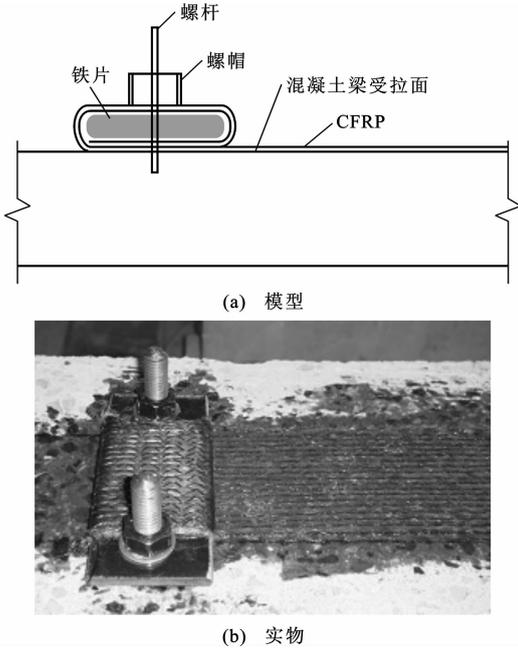


图3 加固端细节

Fig. 3 Details of Strengthened Plate-end

1.3 螺杆拉拔试验

用于固定铁片的螺杆是加固系统中非常重要的部分,试验中预埋的螺杆要承受拉力和剪力,在满足抗剪要求下抗拉能力成为后期加载试验的关键,因此,加载过程中螺杆处的混凝土不能发生任何破坏。

该试验选用直径为 8 mm 的碳钢 4.8 级螺杆及配套螺帽。螺孔深度分 6 组,深度分别为 10、20、30、40、50、60 mm。对 6 组螺杆进行拉拔试验,试验结果如表 2 所示。试件破坏形式有混凝土锥形破坏[图 4(a)]和螺杆拉断[图 4(b)]。

表 2 螺杆拉拔试验结果

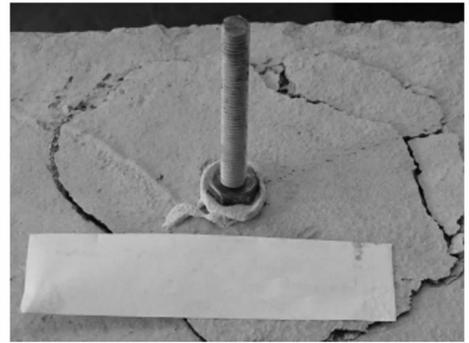
Tab. 2 Results of Screws in Pull-out Tests

组号	螺孔深度/mm	扭矩/(N·m)	试验现象
1	10	10.5	螺杆完好,混凝土锥形破坏
2	20	22.1	螺杆完好,混凝土锥形破坏
3	30	31.1	螺杆完好,混凝土锥形破坏
4	40	39.3	螺杆拉断,混凝土没有破坏
5	50	40.5	螺杆拉断,混凝土没有破坏
6	60	40.8	螺杆拉断,混凝土没有破坏

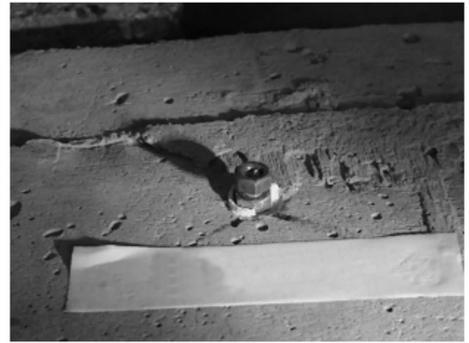
由表 2 可知,螺孔深度为 40、50、60 mm 的螺杆拉断,混凝土没有发生破坏。选择螺孔深度为 50 mm。

1.4 加固端制作

锚固端是整个加固系统至关重要的部分,它直接关系到整个试验的成功与否,因此锚固端的制作过程要求非常严格,详细过程如下:



(a) 混凝土锥形破坏



(b) 螺杆拉断

图 4 拉拔试验试件破坏形式

Fig. 4 Failure Modes of Specimens in Pull-out Tests

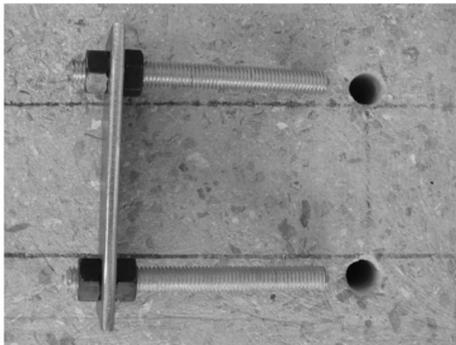
(1)去浮浆。用砂轮打磨整平并去掉梁底浮浆。
(2)钻孔。在距支座轴线 50 mm 处钻直径为 8 mm 的孔,孔深度为 50 mm,并清理干净。

(3)调整装置。把要插入的螺杆清理干净,按图 5(a)把需要的铁片、螺杆和螺帽组装在一起,防止在螺孔中注胶后插入的螺杆倾斜,导致胶凝固后铁片无法和螺杆对应上。选择合适的木板垫在铁片下面,有利于装置校正以及在养护期间避免螺杆发生倾斜,并且可以防止注胶后铁片和胶粘结在一起,如图 5(b)所示。

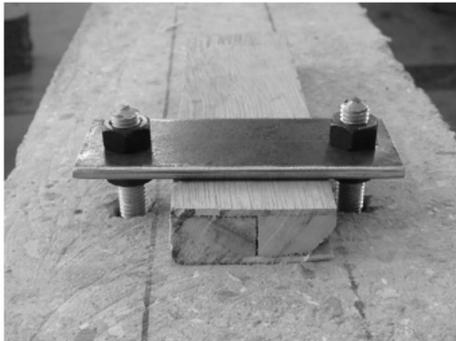
(4)注胶。把预先准备好的高强胶注入螺孔,快速把螺杆插入螺孔并保持装置不受扰动。待高强胶注入 12 h 后完全凝固,除去螺杆上的螺帽和贴片并清理多余的高强胶。

(5)准备 CFRP 布。CFRP 布宽度为 50 mm,按要求剪好纤维布,在 CFRP 布两端面,用透明胶布粘上,再用 502 胶把 CFRP 布和铁片粘结在一起,易于 CFRP 布的缠绕。用准备好的胶浸刷 CFRP 布并缠好 CFRP 布,铁片上面粘贴纤维布 2 层,底部 3 层,如图 5(c)所示。

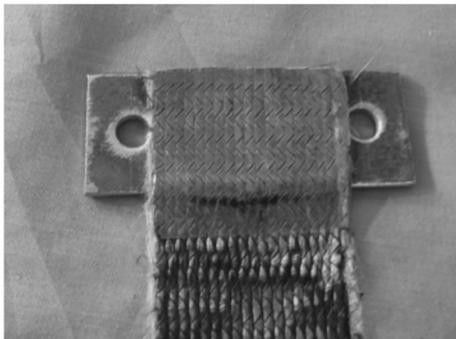
(6)组装。把准备好的 CFRP 布安装在螺杆上,用扭矩扳手施加 15 N·m 的扭矩,如图 5(d)所示。CFRP 布在正常情况下养护 7 d。



(a) 装配螺孔和螺杆



(b) 放置木板



(c) 粘贴CFRP布



(d) 施加扭矩

图 5 加固端的制作过程

Fig. 5 Production Process of Strengthened Plate-end

1.5 试验过程

试验采用三点弯曲加载方式,加载装置如图 6 所示。试验梁放在 2 个铰支座上,荷载采用型号为 BLR-1、抗压量程为 100 kN 的荷载传感器测量。跨中挠度采用型号为 YHD-100、量程为 100 mm 的位

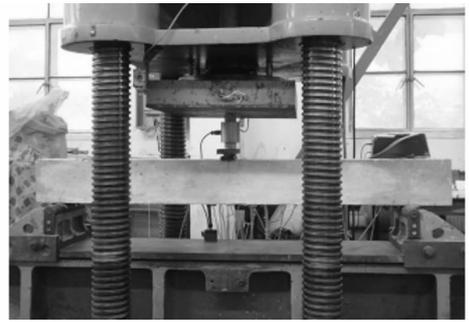


图 6 加载装置

Fig. 6 Loading Device

移传感器测量。在跨中 CFRP 布上粘贴 1 个应变片。压力机为液压式压力试验机,型号为 YES-500,其量程为 5 MN。

荷载采用分级加载,从出现裂缝开始每 2 kN 记录 1 次裂缝扩展情况。加载过程中,观察 CFRP 布剥离过程及锚固端是否完好,并随时记录试验现象,用 IMC 采集系统实时采集数据。

2 试验结果分析

加载前期 CFRP 布和梁能够协同工作。随着荷载的增大,加载点两边形成 2 条主裂缝,如图 7 所示。当荷载增大到 20 kN 时,纤维布开始出现噼啪声,随即在其中一条主裂缝对应的梁底 CFRP 布处开始出现剥离。随着荷载的继续增大,另一条主裂缝对应的梁底 CFRP 布开始出现剥离,或者这条主裂缝对应的梁底 CFRP 布出现剥离后沿梁长方向剥离扩展。扩展一段距离后,荷载稍微下降,但剥离继续扩展至锚固端。随后荷载继续增大,已经出现的剥离开始在锚固端扩展,最后形成锚固端范围内的纤维布全部剥离。此时依靠两端的锚固约束,CFRP 布可以继续承载,最后 CFRP 布被拉断。

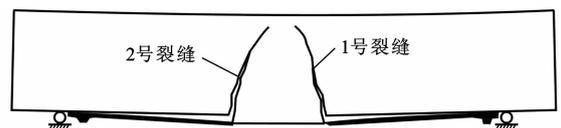


图 7 CFRP 剥离后梁的变形

Fig. 7 Beam Deformation After CFRP Debonding

加固梁的破坏现象基本相同,下面对试验所得的荷载-跨中挠度曲线和梁破坏形式 2 个方面进行分析。

2.1 荷载-跨中挠度曲线

试验共得到 3 组荷载-跨中挠度曲线,每一组均包括加固梁和参考梁 2 条曲线,如图 8 所示。

从图 8 可以看出,曲线的走势基本相同。加固

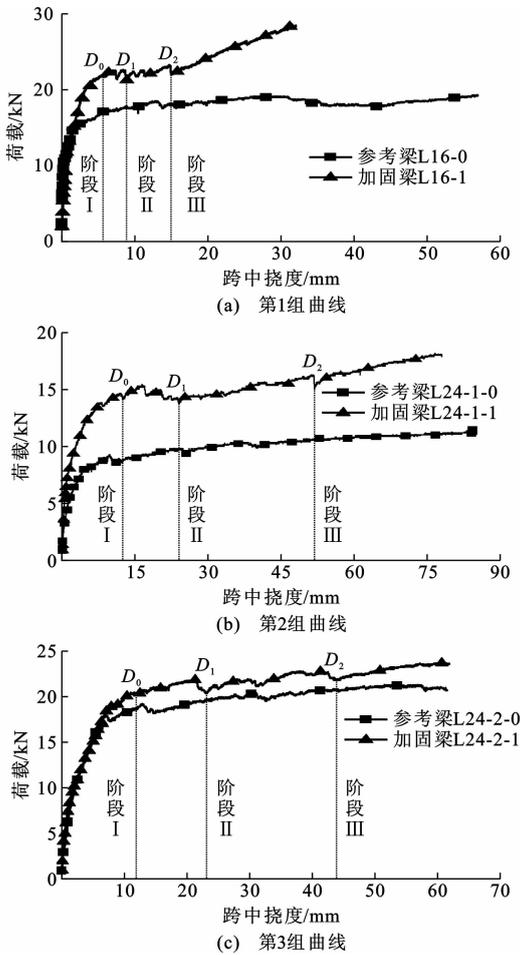


图8 荷载-跨中挠度曲线

Fig. 8 Relations of Loads and Mid-span Deflections

梁的荷载-跨中挠度曲线可分为3个特征点 D_0 、 D_1 、 D_2 ，3个阶段分别为阶段 I、阶段 II、阶段 III。通过试验可知， D_0 点 CFRP 布开始剥离，从开始加载到此点为阶段 I，即未剥离阶段。通过曲线可以看出，此阶段由于粘贴 CFRP 布，荷载明显增大。

D_1 点为第 1 条主裂缝对应梁底 CFRP 布剥离至加固端的点，此时另一边没有剥离或者已经有剥离，当荷载继续增大，这一边纤维布开始剥离或者已出现的剥离开始扩展，此时对应 D_2 点。从 D_1 点到 D_2 点为阶段 II，此阶段为从开始剥离到梁底 CFRP 布完全剥离阶段，而剥离阶段荷载没有大的增加。

从 D_2 点到剩余曲线部分为阶段 III，此阶段 CFRP 布已经全部剥离，仅靠两边锚固使荷载继续增大直至纤维布被拉断。

D_1 点时刻梁底 CFRP 布一端已全部剥离，如果在 CFRP 布两端没有加固，加固系统已经失效，并且荷载-跨中挠度曲线急剧下降。由于存在锚固，CFRP 布在锚固端范围内可以全部剥离，且即使剥

离，仍可以依靠端部锚固而使 CFRP 布得到充分利用，同时承载力明显增大。

2.2 破坏形式

该试验纤维布的破坏形式包括剥离和拉断 2 种。纤维布首先剥离至锚固端，然后依靠端部锚固纤维布而最终被拉断，图 9 为加固梁的破坏形式。



(a) 加固梁 L16-1



(b) 加固梁 L24-1-1



(c) 加固梁 L24-2-1

图9 加固梁的破坏形式

Fig. 9 Failure Modes of Strengthened Beams

图 9(a)、(b) 为加固梁的纤维布破坏形式，均为 CFRP 布在锚固端处被拉断；图 9(c) 中加固梁的 CFRP 布在端部呈现松散状拉断。上述 3 根加固梁的锚固端完好，并且 CFRP 布最终都被拉断，材料得到充分利用。表 3 为加固梁的试验结果。

由表 3 可知，加固梁的极限承载力得到明显增加，并且梁破坏时延性得到很大提高，最大荷载对应的挠度是 D_1 点处挠度的 2~3 倍以上。所提出的新型 CFRP 抗弯加固是一种非常具有应用价值的加固方法。

表 3 加固梁的试验结果

Tab. 3 Test Results of Strengthened Beams

梁编号	极限承载力/kN	CFRP 极限应变/ 10^{-3}	极限弯矩/(kN·m)	D_1 点时跨中挠度/mm	最大荷载时跨中挠度/mm	试验现象
L16-0	18.40		7.36			
L16-1	28.39	11.2	11.36	8.9	31.9	CFRP 布被拉断
L24-1-0	11.02		6.61			
L24-1-1	18.03	11.6	10.82	24.1	76.5	CFRP 布被拉断
L24-2-0	21.20		12.72			
L24-2-1	23.47	10.9	14.08	23.1	61.5	CFRP 布被拉断

3 结 语

(1)在新型 CFRP 端部锚固方法中,由于锚固端对 CFRP 的锚固作用,延缓了 CFRP 的剥离,即使剥离仍可依靠端部锚固而使 CFRP 被拉断,从而有效地提高了梁的承载力。

(2)新型 CFRP 抗弯加固方法试验中,CFRP 虽然剥离,但最终被拉断,为 CFRP 能得到充分利用提供了一个简单有效的方法。

(3)由加固梁的荷载-跨中挠度曲线可知,与直接粘贴 CFRP 相比,加固梁破坏时跨中挠度明显增加,且曲线中有明显的“屈服”过程,因此加固梁的破坏属于延性破坏。

参考文献:

References:

[1] HOLLAWAY L C, LEEMING M B. Strengthening of Reinforced Concrete Structures: Using Externally Bonded FRP Composites in Structural and Civil Engineering [M]. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 1999.

[2] 叶列平,冯 鹏. FRP 在工程结构中的应用与发展 [J]. 土木工程学报, 2006, 39(3): 24-36.
YE Lie-ping, FENG Peng. Applications and Development of Fiber-reinforced Polymer in Engineering Structures [J]. China Civil Engineering Journal, 2006, 39(3): 24-36.

[3] TENG J G, CHEN J F, SMITH S T, et al. FRP Strengthened RC Structures [M]. Chichester: John Wiley & Sons, 2002.

[4] RITCHIE P A, THOMAS D A, LU L W, et al. External Reinforcement of Concrete Beams Using Fiber Reinforced Plastics [J]. Structural Journal, 1991, 88 (4): 490-500.

[5] FANNING P J, KELLY O. Ultimate Response of RC Beams Strengthened with CFRP Plates [J]. Journal of Composites for Construction, 2001, 5(2): 122-127.

[6] 陈小兵, 颜子涵, 岳清瑞. 碳纤维材料加固钢筋混凝土梁的试验研究 [J]. 工业建筑, 1998, 28(11): 6-10.
CHEN Xiao-bing, YAN Zi-han, YUE Qing-rui. External Reinforcement of Concrete Beams Using Carbon Fibre Reinforced Plastics [J]. Industrial Construction, 1998, 28(11): 6-10.

[7] SAADATMANESH H, EHSANI M R. Application of Fibre Composites in Civil Engineering [C]//ASCE. Proceedings of the 7th ASCE Structures Congress. New York: ASCE, 1989: 526-535.

[8] SHARIF A, AL-SULAIMANI G J, BASUNBUL I A, et al. Strengthening of Initially Loaded Reinforced Concrete Beams Using FRP Plates [J]. Structural Journal, 1994, 91(2): 160-168.

[9] BUYUKOZTURK O, HEARING B. Failure Behavior of Precracked Concrete Beams Retrofitted with FRP [J]. Journal of Composites for Construction, 1998, 2 (3): 138-144.

[10] SEBASTIAN W M. Significance of Midspan Debonding Failure in FRP-plated Concrete Beams [J]. Journal of Structural Engineering, 2001, 27(7): 792-798.

[11] TRIANTAFILLOU T C. Guidelines for the Dimensioning of Reinforced Concrete Elements Strengthened with Sika Carbondur/Sikawrap [R]. Patras: University of Patras, 1999.

[12] FIB Bulletin 14, Externally Bonded FRP Reinforcement for RC Structures [S].

[13] 柯志贵, 黄丽华. FRP 受弯加固钢筋混凝土梁破坏形式研究综述 [J]. 山西建筑, 2009, 35(4): 79-81.
KE Zhi-gui, HUANG Li-hua. The Research Review About Damaging Form of FRP Bending Reinforced Steel Concrete Beam [J]. Shanxi Architecture, 2009, 35(4): 79-81.

[14] NANNI A. Concrete Repair with Externally Bonded FRP Reinforcement [J]. Concrete International, 1995, 17(6): 22-26.

[15] SAADATMANESH H, EHSANI M R. RC Beams Strengthened with GFRP Plates. I; Experimental Study [J]. Journal of Structural Engineering, 1991,

- 117(11):3417-3433.
- [16] BLASCHKO M, ZILCH K. Rehabilitation of Concrete Structures with Strips Glued into Slits[C]//ICCM. Proceeding of the 12th International Conference on Composite Materials. Paris:ICCM, 1999:1-10.
- [17] DE LORENZIS L, NANNI A. Shear Strengthening of Reinforced Concrete Beams with Near-surface Mounted Fibre Reinforced Polymer Rods [J]. Structural Journal, 2001, 98(1): 60-68.
- [18] HASSAN T, RIZKALLA S. Investigation of Bond in Concrete Structures Strengthened with Near Surface Mounted Carbon Fiber Reinforced Polymer Strips[J]. Journal of Composites for Construction, 2003, 7(3): 248-257.
- [19] GALAL K, MOFIDI A. Strengthening RC Beams in Flexure Using New Hybrid FRP Sheet/Ductile Anchor System[J]. Journal of Composites for Construction, 2009, 13(3): 217-255.
- [20] LAMANNA A J, BANK L C, SCOTT D W. Flexural Strengthening of Reinforced Concrete Beams Using Fasteners and Fiber-reinforced Polymer Strips [J]. Structural Journal, 2001, 98(3): 368-376.
- [21] LAMANNA A J, BANK L C, SCOTT D W. Flexural Strengthening of Reinforced Concrete Beams by Mechanically Attaching Fiber-reinforced Polymer Strips [J]. Journal of Composites for Construction, 2004, 8(3): 203-210.
- [22] SPADEA G, BENCARDINO F, SWAMY R N. Structural Behavior of Composite RC Beams with Externally Bonded CFRP[J]. Journal of Composites for Construction, 1998, 2(3): 132-137.
- [23] GARDEN H N, HOLLOWAY L C. An Experimental Study of the Influence of Plate End Anchorage of Carbon Fiber Composite Plates Used to Strengthen Reinforced Concrete Beams [J]. Composite Structures, 1998, 42(2): 175-188.
- [24] TENG J G, CHENG J F, SMITH S T, et al. Behavior and Strength of FRP-strengthened RC Structures: a State-of-the-art Review[J]. Structure Building, 2003, 156(3): 334-335.
- [25] TENG J G, LAM L, CHAN W, et al. Retrofitting of Deficient RC Cantilever Slabs Using GFRP Strips[J]. Journal of Composites for Construction, 2000, 4(2): 75-84.
- [26] WU Y F, HUANG Y. Hybrid Bonding of FRP to Reinforced Concrete Structures[J]. Journal of Composites for Construction, 2008, 12(3): 266-273.
- [27] 卓 静, 李唐宁, 章庆学, 等. 波形齿夹具锚与碳纤维布 U 形箍锚固作用的对比试验[J]. 建筑结构, 2006, 36(3): 22-24.
- ZHUO Jing, LI Tang-ning, ZHANG Qing-xue, et al. Comparative Experiment on Beams Strengthened with Carbon Fiber Sheets Anchored by Wave-shaped-gear-grip Anchorage and by Carbon Fiber Sheet U-ferrule [J]. Building Structure, 2006, 36(3): 22-24.
- [28] 薛伟辰, 钱 卫. 部分预应力 CFRP 筋混凝土梁疲劳性能研究[J]. 中国公路学报, 2008, 21(2): 43-48.
- XUE Wei-chen, QIAN Wei. Study of Fatigue Behaviors of Partially Prestressed Concrete Beams with CFRP Tendons [J]. China Journal of Highway and Transport, 2008, 21(2): 43-48.
- [29] 方 志, 李红芳, 彭 波. 体外 CFRP 预应力钢筋混凝土梁的受力性能[J]. 中国公路学报, 2008, 21(3): 40-47.
- FANG Zhi, LI Hong-fang, PENG Bo. Mechanical Behaviors of Concrete Beam of External Prestressed CFRP Tendons [J]. China Journal of Highway and Transport, 2008, 21(3): 40-47.
- [30] 王 步, 刘伯权, 王 溥. 碳纤维布抗震加固混凝土 T 型节点试验[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2008, 28(2): 69-74.
- WANG Bu, LIU Bo-quan, WANG Pu. Tests on Reinforced Concrete T-joints Strengthened with Carbon-fiber-reinforced-plastic (CFRP) Sheets to Seismic Resistance [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2008, 28(2): 69-74.
- [31] 程永春, 李春良, 刘寒冰, 等. 碳纤维与混凝土界面粘结应力计算方法[J]. 交通运输工程学报, 2007, 7(2): 46-49.
- CHENG Yong-chun, LI Chun-liang, LIU Han-bing, et al. Computation Method of Interfacial Stresses Between CFRP and Concrete [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2007, 7(2): 46-49.
- [32] 邬晓光, 张柳煜, 郝 毅, 等. 碳纤维加固钢筋混凝土梁的受弯全过程分析[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2008, 28(2): 53-57.
- WU Xiao-guang, ZHANG Liu-yu, HAO Yi, et al. Flexural-tensile Strength of Concrete Beams in Complete Course of Reinforcement with Carbon-fiber-reinforced-polymer (CFRP) [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2008, 28(2): 53-57.