

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2013.04.005

EB-FRP 及 HB-FRP 加固预裂 RC 梁对比试验研究

管延华¹, 朱登元¹, 庄培芝¹, 李红超², 周志东¹

(1. 山东大学 土建与水利学院, 济南 250061; 2. 河南省地矿局第三地质勘察院, 河南 洛阳 471023)

摘要:为验证 FRP-螺栓加固新技术的合理性, 结合现役钢筋混凝土桥梁带裂缝工作的特点, 采用表面粘贴 FRP(EB-FRP)加固技术和 FRP-螺栓混合加固技术(HB-FRP), 分别对不同预裂度的钢筋混凝土简支梁进行抗弯加固, 通过两点对称加载抗弯试验研究加固预裂梁的受力特性和破坏模式, 分析裂缝分布对加固预裂梁的剥离荷载及 FRP 材料利用率的影响。试验结果表明, 与表面粘贴 FRP 加固技术相比较, 采用 FRP-螺栓混合加固的预裂梁, 抗弯极限承载能力提高 30%~44%, 加固后结构的破坏表现为明显的延性, 改善了 FRP 脆性剥离破坏模式; 另外, 钢筋混凝土梁裂缝对 FRP 的剥离荷载、FRP 材料的利用率及梁的破坏模式影响显著。

关键词:FRP; 加固技术; 预裂 RC 梁; 对比性试验

中图分类号:TU375.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2013)04-0027-05

Experimental Analysis of Pre-cracked RC Beams Strengthened with EB-FRP and HB-FRP

Guan Yanhua¹, Zhu Dengyuan¹, Zhuang Peizhi¹, Li Hongchao², Zhou Zhidong¹

(1. School of Civil Engineering, Shandong University, Jinan 250061, P. R. China;

2. The Third Geological Survey Institute, Bureau of Geology and Mineral Resource of Henan Province, Luoyang 471023, Henan, P. R. China)

Abstract: On the basis of the crack characteristics of aging RC beam bridges, the cross-section of RC simple beams with different pre-cracking levels were strengthened by the externally bonded FRP(EB-FRP) and the FRP-bolt hybrid bonding(HB-FRP) respectively to check the strengthening characteristics of HB-FRP. The flexural test with symmetrical loading on two points was conducted to study the mechanical behavior and failure mode of pre-crack beams strengthened with EB-FRP and HB-FRP. The influence of pre-cracking level on the FRP initial debonding load and FRP utilization ratio was assessed respectively. The test results show that the flexural capacity of pre-cracking beam strengthened with HB-FRP can be improved by 30%~44% compared with the one with EB-FRP. The failure mode has been changed from FRP brittleness debonding of beam strengthened with EB-FRP to obvious ductility failure of beam strengthened with HB-FRP. Furthermore, the crack distribution of RC beam has obvious influence on the FRP initial debonding load, the FRP utilization ratio and the failure mode of strengthened pre-crack beams.

Key words: fiber reinforced polymer (FRP); pre-cracked RC beams; strengthening technology; contrast test

收稿日期: 2012-11-12

基金项目: 山东大学自主创新基金 (2012ZD032)

作者简介: 管延华(1969-), 男, 博士生, 主要从事桥梁加固应用技术研究, (E-mail) guanyanhua@sdu.edu.cn.

利用纤维增强复合材料(Fiber Reinforced Plastic Polymer,简称 FRP)对混凝土构件进行加固维修在实际工程中得到了广泛的认可,其中在桥梁加固工程中表面粘贴 FRP 加固技术(EB-FRP)应用最为广泛^[1-3]。大量试验研究表明^[4-7],粘贴 FRP 加固的梁荷载作用下易发生剥离脆性破坏,使得 FRP 的利用率仅有 15%~35%,FRP 材料的高强性能难以充分发挥。因此,为提高 FRP 材料的利用率,学者们对相应新型加固技术展开了大量的研究^[8-14],其中 FRP 锚钉联合加固技术正受到重视。Wu 等^[15]采用 FRP 锚钉联合加固技术的试验研究表明,锚钉的垂直压力作用对界面黏结强度提高有较大的贡献。据此,山东大学对 FRP 锚钉联合加固技术进行了改进,在 FRP 两侧埋置高强螺栓,将钢板、CFRP 布和混凝土表面粘结在一起,并拧紧螺母对粘界面施加预压力,通过在 CFRP 布和混凝土之间增设的垂直压力,达到约束 CFRP 布、防止其大面积剥离破坏的目的^[16-18]。前期试验结果表明,FRP 螺栓加固技术是一种更有效的混凝土结构加固方法。本文结合在役钢筋混凝土桥梁的损伤特点,对采用 EB-FRP 及 HB-FRP 加固的预裂钢筋混凝土简支梁进行对比性试验研究,据此对 2 种加固技术对带裂缝工作钢筋混凝土简支梁的抗弯加固效果(受力性能、变形特征和破坏模式等)进行对比分析,明确其工作特点。

1 试验概况

1.1 试验梁设计

设计 7 根相同钢筋混凝土梁进行抗弯加载试验,其中 BM1 为完整梁且未加固,作为参照梁;BM2、BM3、BM4 为预裂梁,采用 EB-FRP 加固;BM5、BM6、BM7 为预裂梁,采用 HB-FRP 加固。试验梁尺寸为 150 mm×250 mm×2 700 mm。主筋为 2Φ12,架立钢筋为 2Φ10,采用 HRB335,箍筋为 φ6@100,采用 HPB235,混凝土强度等级 C40。试验梁尺寸与钢筋构造见图 1。

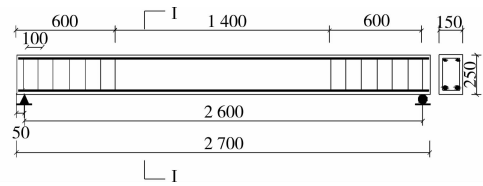


图 1 试验梁尺寸及钢筋构造图

1.2 试验梁制作

采用同一批次的商品混凝土一次性浇筑 7 根试验梁。混凝土到达设计强度以后,选取其中 1 根试验梁(BM1)进行抗弯承载能力试验,确定试验梁的极限抗弯承载力;然后,对其余 6 根试验梁分两组按极限承载力 50%、70%、90%进行加载预裂,测量预裂荷载、裂缝条数及最大裂缝宽度;最后,对 2 组预裂后的梁分别采用 EB-FRP(BM2-1、BM2-2、BM2-3)和 HB-FRP(BM3-1、BM3-2、BM3-3)进行抗弯加固。

EB-FRP 加固采用配套树脂类黏结材料在梁底粘贴两层 60 mm 宽的碳纤维布,其型号为 UT70-30,计算厚度 0.167 mm,抗拉强度 3 430 MPa,弹性模量为 2.35×10^5 MPa,极限伸长率为 1.72%;HB-FRP 加固(加固系统如图 2)除在梁底粘贴两层 60 mm 宽的碳纤维布外,还在梁底用锚固件即钢板和螺栓对碳纤维布进行锚固,锚固间距为 160 mm。其中螺栓采用直径 10 mm 的 45 号钢高强螺栓,用环氧树脂锚固,锚固深度为 50 mm;钢板的尺寸为 120 mm×60 mm×5 mm,采用环氧树脂粘贴钢板于 CFRP 表面,并通过螺母对螺栓施加 10 kN 预紧力。试验梁详细参数见表 1,制作完成 EB-FRP 及 HB-FRP 加固梁如图 3。



(a) 机械锚固件 (b) FRP-螺栓加固的试验梁

图 2 HB-FRP 加固技术示意图

表 1 试验梁详细参数

试验梁编号	极限承载能力/kN	预裂荷载/kN	预裂度/%	裂缝条数	最大裂缝宽度/mm	加固方式	锚固钢板间距/mm	预紧力/kN
BM1	98.00							
BM2-1		49.01	50	34	0.41	EB-FRP		
BM2-2		69.65	71	44	2.08	EB-FRP		
BM2-3		81.17	83	46	2.00	EB-FRP		
BM3-1		49.96	51	34	0.33	HB-FRP	160	10
BM3-2		69.81	71	35	0.80	HB-FRP	160	10
BM3-3		89.32	91	50	1.32	HB-FRP	160	10

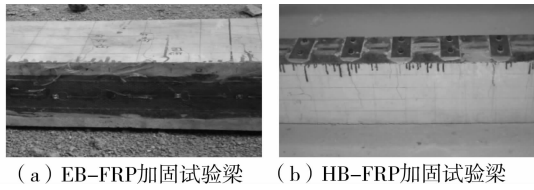


图 3 加固预裂梁完成图

采集仪自动采集。

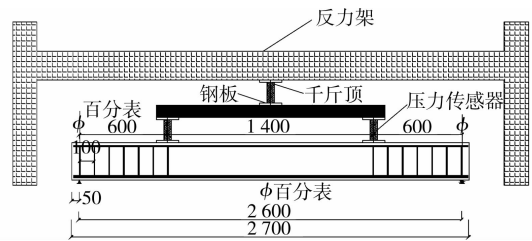


图 4 模型加载装置示意图

1.3 试验设计

抗弯试验采用两点对称加载方式(图 4)。采用手动千斤顶,通过锚索测力计(BGK4 900/1 000 kN)控制加载的大小,荷载大小通过 DT615 自动记录,并用相应的程序计算出荷载值。试验梁的挠度通过安装的百分表测量,梁的底部粘贴应变片测量各级荷载作用下的拉应变,试验应变及挠度数据由 DTS602 数据

2 试验结果及分析

抗弯试验测得各试验梁极限荷载、相应跨中挠度与 FRP 应变结果如表 2 所示。

表 2 试验梁检测结果

试验梁编号	加固方式	预裂度/%	裂缝条数	最大裂缝宽度/mm	极限荷载/kN	跨中挠度/mm	FRP 应变/ 10^{-6} mm	破坏形式
BM2-1	EB-FRP	50	34	0.41	117.19	21.95	7 272	FRP 剥离
BM2-2	EB-FRP	71	44	2.08	88.96	23.67	8 447	FRP 剥离
BM2-3	EB-FRP	83	46	2.00	95.82	14.16	5 036	FRP 剥离
BM3-1	HB-FRP	51	34	0.33	152.78	40.89	12 288	RC 梁剪压破坏
BM3-2	HB-FRP	71	35	0.80	128.30	43.14		FRP 部分断裂
BM3-3	HB-FRP	91	50	1.32	138.05	46.23		FRP 部分断裂

2.1 试验梁破坏形式

试验梁的破坏形式表现为 FRP 与混凝土界面

剥离破坏、斜截面剪压破坏及 FRP 断裂破坏,如图 5 所示。

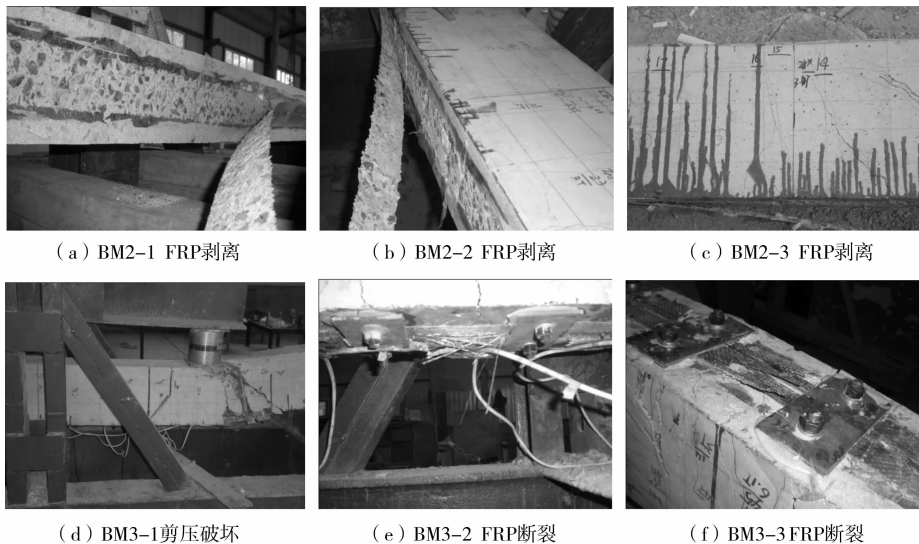


图 5 试验梁的破坏形式

采用 EB-FRP 法加固的 3 根预裂梁的破坏形式相似,即随着荷载的增加,试验梁原有裂缝继续沿梁高方向开展延伸,新裂缝不断出现,当加载达到极限荷载时,FRP 在混凝土表面突然剥离。但各试验梁

裂缝分布特征不同,致使 FRP 初始剥离的位置存在差别。预裂度较小的试验梁(BM2-1 预裂度为 50%),梁底部主要分布垂直微小裂缝,加载破坏时,FRP 剥离从跨中裂缝向梁端进行;预裂度较大的试

验梁 (BM2-2 预裂度为 71%、BM2-3 预裂度为 83%),除梁底部纯弯段分布有垂直裂缝外,梁端斜弯段存在显著的斜裂缝,裂缝宽度较大,加载破坏时,FRP 剥离从梁端斜裂缝向跨中快速发展。

采用 HB-FRP 法加固的预裂梁的破坏形式与采用 EB-FRP 法加固的预裂梁的破坏形式存在显著不同。虽然随荷载的增大,试验梁原有裂缝仍在发展,新裂缝也不断出现,锚固钢板之间的 FRP 也发生局部剥离,但由于预紧螺栓的锚固作用,有效的限制了 FRP 片材的整体自由变形,试验梁达到极限破坏时,锚固钢板下的 FRP 和混凝土基本没有发生剥离,保证了 FRP 和钢筋混凝土梁的协调工作,有效提高了 FRP 材料的利用率和预裂梁抗弯承载能力。最终试验梁呈现斜截面剪压破坏(BM3-1)或锚固钢板之间的 FRP 断裂破坏(BM3-2、BM3-3)。同时 HB-FRP 加固的预裂梁的破坏形式也不尽相同,究其原因主要是由于试验梁预裂度的不同,致使其裂缝分布的特征存在差异。BM3-1 预裂度为 51%,梁底部主要分布垂直微小裂缝,宽度较小,梁的整体刚度较大,试验梁在 HB-FRP 法加固后,其正截面抗弯能力较强,最终因试验梁斜截面强度不足而造成梁体斜截面剪压破坏。对于预裂度为 71%、91%的 BM3-2、BM3-3,预裂时梁底加载点附近出现宽度较大的垂直裂缝和斜裂缝,试验加载时,该处裂缝继续开展并向上延伸(见图 6),致使 FRP 所承受拉力急剧增大,最终导致该处的 FRP 部分被拉断。



图 6 试验梁加载裂缝开展图

此外,加固后试验梁 FRP 与混凝土之间发生初始剥离时的荷载如图 7 所示。由图可知:对于预裂度相近的试验梁,2 种加固方法的粘结界面初始剥离荷载基本相同;随试验梁预裂度的增大,粘结界面初始剥离荷载减小。可见,梁体裂缝对 FRP 的剥离具有明显的促进作用。

2.2 荷载-挠度曲线

根据图 8 所示荷载-跨中挠度曲线可知,试验梁的受力状态基本相同,可分为 3 个工作阶段:1)第 1 阶段,从开始到曲线的第 1 个转折点,该阶段梁体受

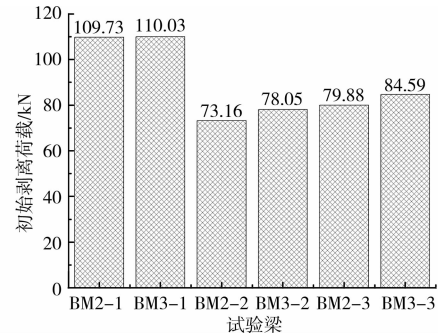


图 7 初始剥离荷载对比图

拉侧裂缝开展较小,各试验梁处于整体工作阶段,荷载-挠度曲线的斜率较大且相近,即抗弯刚度基本相同;由于外贴 FRP 离中性轴最远,且其延伸率较小,因此其承担较大拉力;2)第 2 阶段,随荷载增加,FRP 所承担拉力增大,所需 FRP 与混凝土表面的层间粘结力增大,同时因梁体受拉侧裂缝加剧发展,FRP 开始剥离,梁体的整体抗弯能力降低;不同 FRP 黏贴方式下,FRP 退出工作的极限荷载明显不同,采用钢板螺栓联合锚固后 FRP 的利用率得到显著提高 (M3-1、BM3-2、BM3-3 承受的极限荷载比 BM2-1、BM2-2、BM2-3 承受的极限荷载分别提高 30%、44%、44%);3)第 3 阶段:对于 EB-FRP 加固后试验梁,当 FRP 与混凝土间界面剪应力峰值达到其界面粘结强度极限时,继续加载会导致试验梁挠度急剧增大,梁体破坏时预兆不明显,具有一定脆性破坏特性;HB-FRP 加固技术中,通过胶体、钢板、螺栓的联合锚固,能够大幅提高粘结截面剪应力容许值,因此加固后梁体的极限抗弯承载力显著增大,破坏时梁体挠曲变形较大,利于及时发现、补强,增大了加固后结构物的延性。

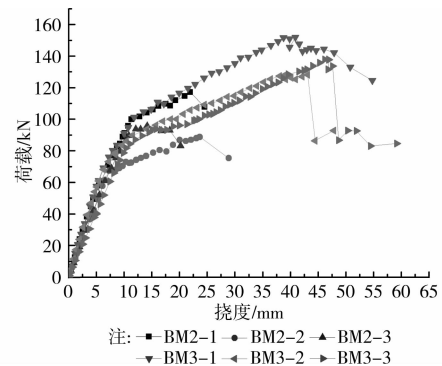


图 8 跨中荷载-挠度曲线

从图 9 可以看出:HB-FRP 加固的试验梁 FRP 的利用率部分达到 100% (试验中 FRP 表现为断裂),EB-FRP 加固的试验梁 FRP 的利用率最大仅为 49%,可见前者加固后试验梁的 FRP 利用率明显

高于后者。同时,对 HB-FRP 加固的试验梁,预裂度越大,FRP 的利用率越大;而对 EB-FRP 加固的试验梁,预裂度越大,FRP 的利用率越小(对预裂度为 83% 的试验梁 BM2-3,其 FRP 的平均利用率仅为 21%)。可见,HB-FRP 较 EB-FRP 是一种更为有效的预裂钢筋混凝土梁加固方式,能够充分发挥 FRP 材料的高强性能,有效避免混凝土裂缝导致的 FRP 剥离破坏。

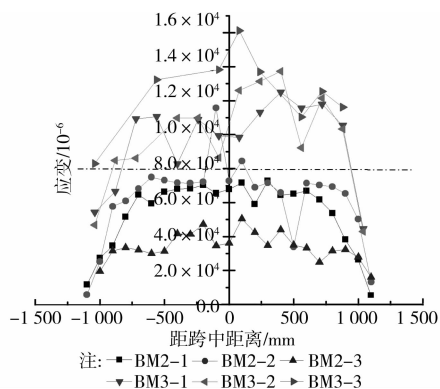


图9 极限荷载(表2)时FRP应变分布曲线

3 结论

根据 EB-FRP 及 HB-FRP 加固预裂简支梁的对比性试验研究,得出以下结论:

1) 较 EB-FRP 加固技术,HB-FRP 加固技术是一种更有效的预裂梁加固方式,不仅能够显著提高预裂梁的极限承载能力,而且能够改善预裂梁的破坏模式,显著提高预裂梁破坏时的延性特征。

2) 由于螺栓对钢板下 FRP 预紧锚固作用及层间胶体的粘结作用,HB-FRP 加固预裂梁能够有效阻止锚固钢板下 FRP 的剥离,显著提高 FRP 和结构物间的层间抗剪能力,因此 FRP 的利用率得到显著提高,利于 FRP 材料高强性能的发挥。

3) 裂缝的发展程度和分布特征对于 FRP 加固后钢筋混凝土结构物的抗弯承载能力和受弯破坏形式具有显著影响,为提高 FRP 的利用率,建议进行加固设计时对原有裂缝进行适当处理。

参考文献:

[1] 滕锦光,陈建飞,S T 史密斯,等. FRP 加固混凝土结构[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2006.
 [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 L P, Feng P. Applications and development of fiber-reinforced polymer in engineering structures [J]. China Civil Engineering Journal, 2006, 39(3): 24-36.

[3] JTG/T J22—2008 公路桥梁加固设计规范[S]. 北京:人民交通出版社,2008.
 [4] Fahsi B, Benrahou K H, Krouer B, et al. Analytical analysis of interfacial stresses in FRP-RC hybrid beams with time-dependent deformations of RC beam [J]. Acta Mechanica Solida Sinica, 2011, 24(6): 519-526.
 [5] Rahimi H, Hutchinson A. Concrete beams strengthened with externally bonded FRP strips [J]. Journal of Composites for Construction, ASCE, 2000, 4(2): 65-74.
 [6] Nguyen D M, Chan T K, Cheong H K. Brittle failure and bond development length of CFRP-concrete beams [J]. Journal of Composites for Construction, ASCE, 2001, 5(1): 12-17.
 [7] Wang Z Y, Wu Y F, He W. A numerical model for hybrid-bond FRP strengthened beams[C]//第四届海峡两岸结构与岩土工程学术研讨会论文集, 2007: 503-517.
 [8] 徐涛,唐春安,张永彬,等. FRP-混凝土界面剥离破坏过程并行数值模拟[J]. 固体力学学报, 2011, 32(1): 88-94.
 Xu T, Tang C A, Zhang Y B, et al. Parallel simulation of FRP-concrete debonding failure process [J]. Chinese Journal of Solid Mechanics, 2011, 32(1): 88-94.
 [9] Lamanna A J, Bankl L C, Scott D W. Flexural strengthening of RC beams by mechanically attaching FRP strips [J]. ASCE Journal of Composites for Construction, 2004, 8(3): 203-210.
 [10] Bank L C, Arora D. Analysis of RC beams strengthened with mechanically fastened FRP (MF-FRP) strips [J]. Composite Structures, 2007, 79: 180-191.
 [11] Ekenel M, Rizzo A, Myers J J, et al. Flexural fatigue behavior of reinforced concrete beams strengthened with FRP fabric and precured laminate systems [J]. ASCE Journal of Composite for Construction, 2006, 10(5): 433-442.
 [12] Grace N F. Improved anchoring system for CFRP strips [J]. Concrete International ACI, 2001, 23(10): 55-60.
 [13] 张普,朱虹,孟少平,等. 混杂 FRP-混凝土 T 形组合梁受弯性能试验研究[J]. 东南大学学报:自然科学版, 2010, 40(3): 548-553.
 Zhang P, Zhu H, Meng S P, et al. Experimental study on bending performances of hybrid FRP-concrete composite T-beams [J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2010, 40(3): 548-553.
 [14] 刘涛,桂钰,王兆清. FRP 抗弯加固方法的研究进展[J]. 山东建筑大学学报, 2009, 24(4): 356-361.

- Gao Z X, Yang W. Reliability analysis of reinforced concrete beams strengthened with CFRP sheet [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2011, 33(6): 36-43.
- [12] Bambach M R, Jama H H, Elchalakani M. Axial capacity and design of thin-walled steel SHS strengthened with CFRP [J]. Thin-Walled Structures, 2009, 47(10): 1112-1121.
- [13] Al-Rousan R, Issa M. Fatigue performance of reinforced concrete beams strengthened with CFRP sheets [J]. Construction and Building Materials, 2011, 25(8): 3520-3529.
- [14] Haedir J, Zhao X L. Design of CFRP-strengthened steel CHS tubular beams [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2012, 72: 203-218.
- [15] Silvestre N, Young B, Camotim D. Non-linear behaviour and load-carrying capacity of CFRP-strengthened lipped channel steel columns [J]. Engineering Structures, 2008, 30(10): 2613-2630.
- [16] Zhao X L, Al-Mahaidi R. Web buckling of lightsteel beams strengthened with CFRP subjected to end-bearing forces [J]. Thin-Walled Structures, 2009, 47(10): 1029-1036.
- [17] Firmo J P, Correia J R, França P. Fire behaviour of reinforced concrete beams strengthened with CFRP laminates: Protection systems with insulation of the anchorage zones [J]. Composites Part B: Engineering, 2012, 43(3): 1545-1556.
- [18] American Concrete Institute. ACI 440. 2R-02 Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures [R]. Detroit, USA: American Concrete Institute, 2002.
- [19] DL/T 5154—2002 架空送电线路杆塔结构设计技术规范[S]. 北京: 中国电力出版社, 2002.
- [20] 蔡四维, 蔡敏. 混凝土的损伤断裂[M]. 北京: 人民交通出版社, 2000.

(编辑 王秀玲)

(上接第 31 页)

- Liu T, Gui Y, Wang Z Q. Development review on flexural strengthening by FRP [J]. Journal of Shandong Jianzhu University, 2009, 24(4): 356-361.
- [15] Wu Y F, Huang Y. Hybrid bonding of FRP to reinforced concrete structures [J]. ASCE Journal of Composites for Construction, 2008, 12(3): 266-273.
- [16] 管延华, 苗海涛, 宋修广. FRP-螺栓联合加固技术锚固参数的研究[J]. 山东大学学报: 工学版, 2010, 40(3): 128-132.
- Guan Y H, Miao H T, Song X G. Study of the anchoring parameter for the hybrid bonding of FRP [J]. Journal of Shandong University: Engineering Science, 2010, 40(3): 128-132.
- [17] 张峰, 牛平霞, 李树忱, 等. FRP-螺栓联合加固 RC 梁粘
- 结性能试验研究[J]. 土木建筑与环境工程, 2010, 32(6): 7-13.
- Zhang F, Niu P X, Li S C, et al. Experimental analysis on bonding behavior of hybrid-bonding of FRP [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2010, 32(6): 7-13.
- [18] 管延华, 蒋斌松, 宋修广. FRP-螺栓联合加固 RC 梁抗弯试验研究[J]. 中国矿业大学学报, 2011, 40(2): 202-206.
- Guan Y H, Jiang B S, Song X G. Experimental study of flexural capacity on RC beams strengthened with hybrid bonding of FRP [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2011, 40(2): 202-206.

(编辑 王秀玲)