

预应力聚乙烯布加固 RC 梁抗弯性能试验研究

李建辉, 邓宗才, 杜修力
(北京工业大学 建筑工程学院, 北京 100022)

摘 要: 聚乙烯纤维增强聚合物是一种具有优良延性的新型 FRP(Fiber Reinforced Plastic)复合材料. 试验研究了预应力聚乙烯纤维布加固混凝土梁的抗弯性能, 并与芳纶纤维布和非预应力聚乙烯纤维布加固混凝土梁的抗弯性能进行了对比. 结果表明: 与非加固标准梁、预应力芳纶纤维布加固梁相比, 预应力聚乙烯纤维布加固梁的延性系数分别提高了 4% 和 142%, 即聚乙烯纤维布加固混凝土梁具有优良的延性.

关键词: 纤维增强聚合物; 预应力; 力学性能; 混凝土

中图分类号: TU 375

文献标识码: A

文章编号: 0254-0037(2008)01-0059-06

在土木工程中, 由于各种原因需对已有结构进行加固和维修, FRP 复合材料黏贴加固技术由于具有高的比强度和刚度、耐腐蚀、非磁性、重量轻、施工方便和工期短等优点而备受关注^[1]. 为了充分发挥 FRP 高强度的特点, 提高强度利用率和改善加固效果, 预应力加固是一条有效途径^[2-6].

碳纤维具有高的强度和弹性模量, 但很脆, 被加固梁、柱的破坏为突然破坏. 对于地震地区结构的加固, 不但要提高承载力, 更要改善其延性和耗能, 需要变形性能优越的材料^[7]. 聚乙烯纤维(polyethylene FRP, 简称 PEFPR)材料是继碳纤维、芳纶纤维之后的第 3 种高性能 FRP 材料, 具有较高的弹性模量和强度, 特别是具有良好的变形、抗冲击、抗疲劳性能. 关于高强度聚乙烯布加固结构的研究未见报道. 作者研究了 PEFPR 加固混凝土梁承载力和变形性能, 为结构加固设计与施工提供了试验数据.

1 试验研究

1.1 材料性能

PEFPR 布由宁波大成新材料股份有限公司生产, 抗拉强度为 2 GPa, 弹性模量为 90 GPa, 极限延伸率为 3.2%~4.5%; AFRP 片材为深圳海川实业股份有限公司提供的 AFS-40 型芳纶纤维布, 其名义抗拉强度为 2.06 GPa, 弹性模量为 118 GPa, 设计厚度为 0.193 mm.

1.2 试件设计

试验设计了 5 根矩形截面钢筋混凝土梁. 1 根未加固标准梁, 预应力和非预应力 PEFPR、AFRP 布加固梁各 2 根. 梁长 2.3 m, 宽 120 mm, 高 200 mm, 净跨 2.1 m. 纵向受拉钢筋均为 2 Φ 14 (HRB335), 纵向钢筋配筋率为 1.28%. 箍筋为 Φ 6 的钢筋 (HPB235), 间距 100 mm. 架立筋为 2 Φ 8 钢筋 (HPB235). 试验梁的几何尺寸、配筋及加载方式如图 1 所示. 钢筋的力学性能见表 1. 所有试件的混凝土均按同一配合比制作, 设计等级为

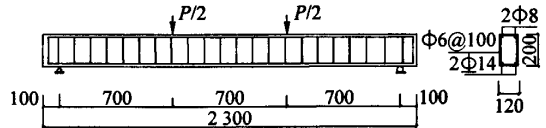


图 1 试件参数与配筋图

Fig. 1 Geometry and reinforcement details for specimens

收稿日期: 2006-10-30.

基金项目: 北京市教委资助项目(KM200610005007); 国家自然科学基金重点资助项目(50678011).

作者简介: 李建辉(1981-), 男, 江西丰城人, 博士生.

C30, 实测立方体强度为 40.4 MPa.

表 1 钢筋力学性能

Table 1 Mechanical properties of steel bars

规格	屈服强度/MPa	峰值强度/MPa	延伸率/%	弹性模量/GPa
Φ 6	467	531	6	204
Φ 8	299	436	21	206
Φ 14	420	632	20	202

1.3 加固方案

非预应力 AFRP 布加固梁的梁端黏贴 2 道 100 mm 宽的 AFRP 布 U 形箍, 其间距为 100 mm, 层数为 1 层, 以防止纵向 AFRP 布在梁端发生早期脱黏破坏, 如图 2 所示. 预应力纤维布加固梁的工艺是: 先在纤维布的两端安装锚具, 在梁上安装永久固定支架, 然后打磨梁底混凝土、涂刷底胶, 底胶硬化后将纤维布固定端锚具与梁上的固定支架连接, 在梁底涂刷黏结树脂胶, 将纤维布的张拉端锚具安装到固定支架上, 以梁上固定支架为反力架对纤维布进行张拉, 达到张拉控制应力后将张拉端锚具固定在支架上, 在纤维布外侧再次涂刷黏结树脂胶, 使其与梁底混凝土充分黏结, 最后进行黏结树脂胶养护, 如图 3 所示. 试验梁的编号及加固参数见表 2, 表中 B0 为标准梁, AB0 指非预应力 AFRP 布加固梁, AB45 指预应力水平 45% 的 AFRP 布加固梁, PEB0 指非预应力 PEFRP 布加固梁, PEB39 指预应力水平 39% 的 PEFRP 布加固梁.

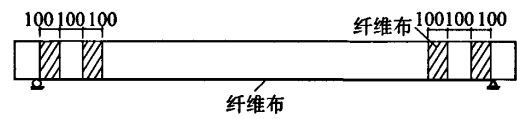


图 2 非预应力 AFRP 布加固方案

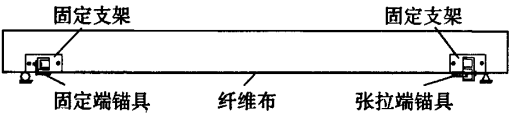


图 3 预应力 FRP 布加固方案

Fig.2 Strengthening beam using non-prestressed AFRP sheets

Fig.3 Strengthening beam using prestressed FRP sheets

表 2 试验梁加固参数

Table 2 Details of test beams

试件编号	加固状况	片材层数	片材宽度/mm	张拉控制应力/MPa	数量	U 形箍
B0	未加固	—	—	—	1	—
AB0	非预应力	2	100	0	1	有
AB45	预应力	2	100	925(45% 抗拉强度)	1	无
PEB0	非预应力	1	100	0	1	无
PEB39	预应力	2	100	778(39% 抗拉强度)	1	无

1.4 观测内容

试验观测主要内容有: 1) 混凝土梁的破坏形态; 2) 混凝土梁承载力; 3) 混凝土梁的竖向挠度, 在 2 个支座处、跨中共安装 3 个位移计以测量试件的挠度. 试验数据使用 IMP 数据采集系统采集, 人工测绘裂缝.

2 试验结果及分析

2.1 破坏形态

标准梁 B0 是典型的适筋梁破坏梁. AB0 破坏形态为: 首先受压区混凝土压碎, 然后纤维布局部剥离.

梁 AB45 破坏时,受压区混凝土没有破坏,纤维布突然断裂,AFRP 布巨大的应变能急剧释放出来,断裂处混凝土被扯碎形成一个很大的缺口,暴露出受拉纵筋,如图 4(a)所示. 梁 PEB0 破坏时,首先受压区混凝土压碎,试件承载力下降,底部环氧树脂胶逐步发生断裂,纤维片材在树脂胶断裂面处被拉长,如图 4(b)所示,最终梁因受压区混凝土被压碎而失效;梁 PEB39 破坏时,纤维片材在环氧树脂断裂面处拉长,最终梁因受压区混凝土被压碎而失效,与非预应力加固梁相比,裂缝明显增多. 将试验过程中记录的各个试件的每级加载与裂缝长度的关系及梁最终破坏形态绘制于图 5.

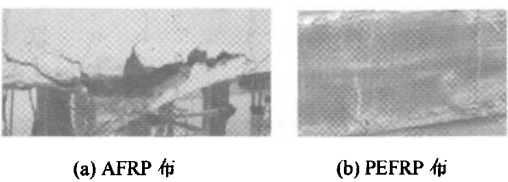


图 4 预应力 FRP 布破坏形态图
Fig.4 Failure configuration of prestressed FRP sheets

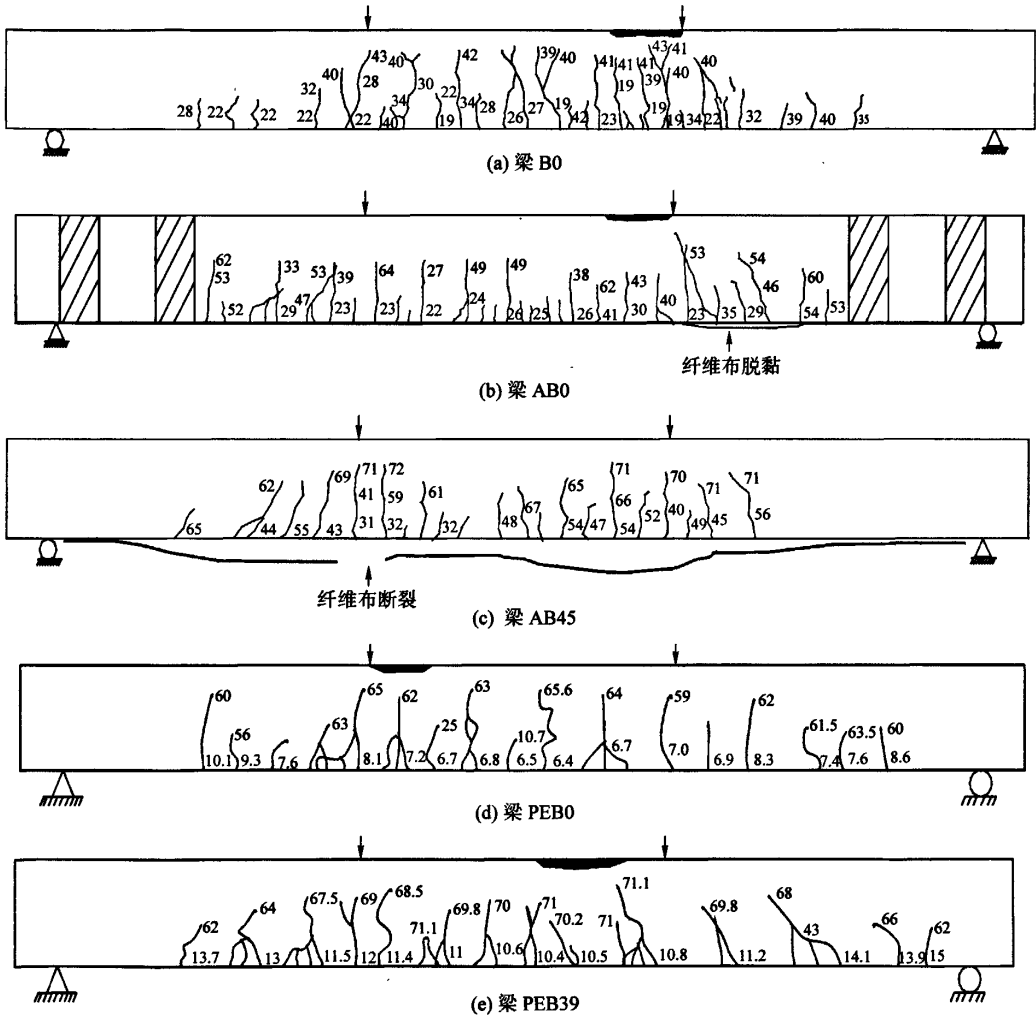


图 5 梁破坏形态图
Fig.5 Failure configuration of specimens

2.2 承载力与变形值

试验结果列于表 3 中,表中极限状态指试件破坏(或试验结束)时的状态.

表 3 承载力与挠度试验结果

Tab.3 Experimental results of load and deflection for specimens

试件 编号	开裂		屈服		峰值		极限	
	跨中挠度/mm	荷载/kN	跨中挠度/mm	荷载/kN	跨中挠度/mm	荷载/kN	跨中挠度/mm	荷载/kN
B0	0.73	6.51	8.84	51.12	36.29	57.64	38.32	56.94
AB0	0.87	14.80	9.88	62.78	34.14	86.40	36.93	85.26
AB45	2.28	17.60	11.69	81.90	21.25	95.02	21.70	92.37
PEB0	1.03	6.64	10.26	57.30	36.46	65.58	42.01	63.24
PEB39	0.59	10.32	8.53	59.32	32.93	71.06	38.38	68.50

2.2.1 承载力

由表 3 可知:1) 与标准梁 B0 相比,预应力 PEFRP 加固梁 PEB39 的开裂、屈服、峰值荷载分别提高了 59%、16% 和 23%。2) 与 AFRP 加固梁相比,非预应力 PEFRP 加固梁 PEB0 开裂、屈服、峰值荷载相比 AB0 梁分别降低了 55%、9% 和 24%;预应力 PEFRP 加固梁 PEB39 的开裂、屈服、峰值荷载比 AB45 梁分别降低了 41%、28% 和 25%。3) 与非预应力 PEFRP 加固梁 PEB0 相比,预应力 PEFRP 加固梁 PEB39 的开裂、屈服、峰值荷载分别提高了 55%、4% 和 8%。

从试验结果来看:1) 预应力 PEFRP 能显著提高混凝土的承载力。2) PEFRP 加固梁的承载力显著小于 AFRP 加固梁,这主要与 PEFRP 布的弹性模量明显低于 AFRP 布有关。3) 预应力 PEFRP 加固梁与非预应力 PEFRP 加固梁相比,开裂荷载有了明显提高。

2.2.2 挠度

由表 3 可知:1) 与标准梁 B0 相比,非预应力 PEFRP 加固梁 PEB0 的开裂、屈服、峰值、极限荷载相应挠度分别提高了 41%、16%、0.5% 和 10%。2) 与 AFRP 加固梁相比,非预应力 PEFRP 加固梁 PEB0 开裂、屈服、峰值、极限荷载相应挠度相比 AB0 梁分别增大了 18%、4%、7% 和 14%;预应力 PEFRP 加固梁 PEB39 的开裂、屈服相应挠度相比 AB45 梁分别减小了 74%、27%,但峰值、极限荷载相应挠度分别增大了 55% 和 77%。3) 与非预应力 PEFRP 加固梁 PEB0 相比,预应力 PEFRP 加固梁 PEB39 的开裂、屈服、峰值、极限荷载相应挠度分别减小了 43%、17%、10% 和 9%。

结果表明:1) 非预应力 PEFRP 加固梁的挠度明显大于标准梁。2) PEFRP 加固梁的极限挠度明显大于 AFRP 加固梁。3) 预应力 PEFRP 加固梁的开裂、屈服挠度明显小于非预应力 PEFRP 加固梁,而极限挠度降低幅度减小。

2.2.3 荷载-挠度曲线

各试件的荷载-挠度曲线见图 6 所示。

由图 6 可知,对于加固梁,在荷载较小时,其截面弯矩主要由受压区混凝土和受拉钢筋及 FRP 布共同承担,FRP 布的加固效果并未明显发挥出来;加固梁的跨中挠度和标准梁基本相同,即二者初始刚度基本相同。随着荷载的增加,受拉区混凝土开裂、退出工作后,拉力由 FRP 布和梁底纵筋共同承担,FRP 布的加固作用开始明显显示出来,从而导致在相同荷载情况下,FRP 加固梁的跨中挠度相对标准梁减小。由于 PEFRP 布的弹性模量小于 AFRP 布,AFRP 加固梁跨中挠度小于 PEFRP 加固梁,即 AFRP 加固梁刚度大于 PEFRP 加固梁。

2.2.4 延性

对于混凝土构件,延性系数的定义迄今没有统一的定论,常用位移延性系数表征延性^[8]。位移延性系

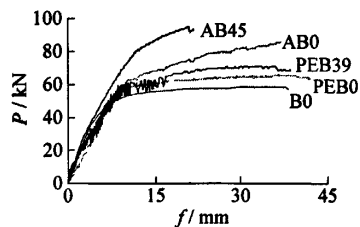


图 6 荷载-挠度曲线

Fig.6 Load-deflection curves of specimens

数 $\mu = \delta_u / \delta_y$, 其中 δ_u 为极限挠度、 δ_y 为屈服挠度。延性系数结果列于表 4。

表 4 延性系数
Tab. 4 Ductile indices

试件编号	B0	AB0	AB45	PEB0	PEB39
μ	4.33	3.74	1.86	4.09	4.50

由表 4 可知: 1) 与标准梁相比, 非预应力 PEFRP 加固梁 PEB0 延性系数降低了 6%, 而预应力 PEFRP 布加固梁 PEB39 延性系数提高了 4%。2) 与 AFRP 加固梁相比, 非预应力 PEFRP 加固梁 PEB0 延性系数比 AB0 梁提高了 9%; 预应力 PEFRP 加固梁 PEB39 延性系数相比 AB45 梁提高了 142%, 表明 PEFRP 加固梁的延性显著优于 AFRP 加固梁。3) 与非预应力 PEFRP 加固梁 PEB0 相比, 预应力 PEFRP 加固梁 PEB39 延性系数提高了 10%, 由于预应力提高了梁的初始刚度, 使 PEB39 梁的屈服挠度降低, 但由于 PEFRP 布优良的延性, 使 PEB39 梁在加载后期仍具有较大的挠度。

3 结论

1) 预应力聚乙烯纤维布能明显提高混凝土承载力, 但提高幅度小于芳纶纤维布, 这与聚乙烯纤维布弹性模量明显小于芳纶纤维布有关。

2) 预应力技术能明显提高混凝土梁使用荷载下的刚度。预应力聚乙烯纤维布加固混凝土梁的承载力比非预应力聚乙烯纤维布加固梁有较大提高, 但相应开裂、屈服挠度明显减小, 而极限挠度略降低。

3) 预应力聚乙烯纤维布加固梁延性系数相比标准梁、预应力芳纶纤维布加固梁分别提高约 4% 和 142%, 表明聚乙烯纤维布加固混凝土梁具有优良的延性。

参考文献:

- [1] 邓宗才. 碳纤维布增强钢筋混凝土梁抗弯力学性能研究[J]. 中国公路学报, 2001, 14(2): 45-51.
DENG Zong-cai. Flexural strengthening of reinforced concrete beams with externally bonded composite laminates [J]. China Journal of Highway and Transport, 2001, 14(2): 45-51. (in Chinese)
- [2] TRIANTAFILLOU T C, DESKOVIC N. Innovative prestressing with FRP sheets: mechanics of short-term behaviors [J]. Journal of Engineering Mechanics, 1991, 117(7): 1652-1672.
- [3] EIHACKA R, WIGHT R G, GREEN M F. Innovative system for prestressing fiber-reinforced polymer sheets [J]. ACI Structural Journal, 2003, 100(3): 305-313.
- [4] TRIANTAFILOU T C, DESKOVIC N, DEURING M. Strengthening concrete structures with prestressed fiber reinforced plastic sheets [J]. ACI Structure Journal, 1992, 89(3): 235-244.
- [5] 张建伟, 邓宗才, 杜修力, 等. 芳纶纤维布加固钢筋混凝土梁的抗弯性能[J]. 特种结构, 2005, 22(4): 90-92.
ZHANG Jian-wei, DENG Zong-cai, DU Xiu-li, et al. Flexural properties of reinforced concrete beams with externally bonded AFRP sheets [J]. Special Structures, 2005, 22(4): 90-92. (in Chinese)
- [6] 张建伟, 杜修力, 邓宗才, 等. 预应力芳纶纤维布加固混凝土梁的受弯性能研究[J]. 建筑结构学报, 2006, 27(5): 101-109.
ZHANG Jian-wei, DU Xiu-li, DENG Zong-cai, et al. Study on flexural performance of RC beams strengthened with prestressed AFRP sheets [J]. Journal of Building Structures, 2006, 27(5): 101-109. (in Chinese)
- [7] 吴智深, 岩下健太郎, 牛赫东, 等. PBO 纤维片材预应力外粘结加固集成新技术[J]. 中国工程科学, 2005, 7(9): 18-24.
WU Zhi-shen, IWASHITA Kentaro, NIU He-dong, et al. Study on strengthening technique with prestressed PBO fiber sheets [J]. Engineering Science, 2005, 7(9): 18-24. (in Chinese)
- [8] 王文伟, 盛波, 李果. 玻璃纤维布加固的钢筋混凝土梁延性分析[J]. 东南大学学报, 2005, 35(4): 569-573.
WANG Wen-wei, SHENG Bo, LI Guo. Analysis of ductility of reinforced concrete beams strengthened with GFRP sheets [J]. Journal of Southeast University, 2005, 35(4): 569-573. (in Chinese)

Experimental Study on Flexural Performance of RC Beams Strengthened with Prestressed Polyethylene FRP Sheets

LI Jian-hui, DENG Zong-cai, DU Xiu-li

(College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China)

Abstract: Polyethylene fiber reinforced plastic (PEFRP) is a new composite material with good ductility. Based on an experimental study, the flexural performance of the beams strengthened with prestressed PEFRP sheets are compared with that of the beams strengthened with aramid FRP (AFRP) sheets and non-prestressed PEFRP sheets. Results show that the ductile index of the beam strengthened with prestressed PEFRP sheets is respectively about 4% and 142% larger than that of the beam non-strengthened and the beam strengthened with prestressed AFRP sheets, which indicates that the RC beam strengthened with PEFRP sheets possesses good ductility.

Key words: fiber reinforced plastics; prestressed; mechanical properties; concrete

(上接第 36 页)

Improvement and Application on Response Surface Methodology in Shape Optimization

SUI Yun-kang, ZHANG Xuan, YU Hui-ping

(Numerical Simulation Center for Engineering, College of Mechanical Engineering and Applied Electronics Technology Beijing University of Technology, Beijing 100022, China)

Abstract: Based on Response Surface Methodology (RSM), the objective function and constraint conditions are approximately explicit to overcome difficulty of sensitivity analysis, the Sequential Quadratic Programming (SQP) model was formed to find optimal shape under displacement and stress constraints. An improved response surface with exact value on the design point is constructed, which eliminates the intrinsic inaccuracy of response surface. The constraint response surface, combined with improved experiment design method, was constructed through few times structure analysis. A second-order evaluation function was set up for each constraint condition. Rational move limits for each design variable were calculated in terms of the relative errors between constraint response surfaces and evaluation functions. The optimization strategy formed with less computation and higher precision. Examples are given to show the efficiency and stability of this optimization strategy.

Key words: optimization; response surface methodology; sensitivity analysis