第53卷第1期
2013年1月

大 连 理 工 大 学 学 报
Journal of Dalian University of Technology

Vol. 53, No. 1
Jan. 2013

文章编号：1000-8608(2013)01-0102-06

不同种类 FRP 加固混凝土梁加固效果试验研究

黄丽华*， 李宇婧， 张耀烨， 王清湘

（大连理工大学 建设工程学部 土木工程学院，辽宁 大连 116024）

摘要： 选取6根不同种类的纤维布(FRP)加固的钢筋混凝土试验梁进行研究，分析对比了用玄武岩纤维布(BFRP)、碳纤维布(CFRP)和玻璃纤维布(GFRP)加固的钢筋混凝土梁的不同加固效果，讨论了初始预损伤及不同U形箍筋的布置方式对纤维布加固效果的影响；通过试验梁的开裂荷载、屈服荷载、极限荷载、跨中挠度及纤维布应变等参数，对粘贴纤维布加固钢筋混凝土梁的受弯性能及破坏特征进行了分析. 对比研究结果表明碳纤维布加固梁的承载力和延性提高最大，玄武岩纤维布用于加固的性价比最优，初始预损伤对加固效果影响不大，而沿全梁横向布置U形锚固形式并不能有效发挥纤维布的抗拉性能.

关键词： FRP；钢筋混凝土梁；BFRP；预损伤；U形箍筋

中图分类号： TU375 **文献标志码：** A

0 引 言

目前国内外用于建筑结构加固的纤维布(FRP)主要有碳纤维布(CFRP)、玻璃纤维布(GFRP)和芳纶纤维布(AFRP). 尽管FRP本身具有较高的强度，但混凝土和加固材料之间的黏结问题，导致加固材料通常达不到极限强度而结构已发生破坏，尤其在碳纤维材料加固中更为明显[1-2]. 另一方面，由于常用FRP在高温环境下会丧失承载力，FRP的耐火性能是其在结构加固中应该考虑的重要因素之一[3].

作为一种新型的结构加固材料，玄武岩纤维布(BFRP)与碳纤维、芳纶、超高相对分子质量聚乙烯纤维等其他高科技纤维相比，具有很多独特的优点，如力学性能佳、耐高低温性能好(可在−269～700 ℃连续工作)、绝缘性能好、耐酸耐碱、抗紫外线性能强、吸湿性低、有更好的耐环境性能[4]. 此外，相比其他FRP加固材料，BFRP低廉的价格、高于GFRP的强度、优于CFRP的延性，使其在土木工程中得到更广泛迅速的发展.

本文对不同种类的FRP加固钢筋混凝土矩形梁的加固效果进行试验研究，通过对比分析，重点讨论BFRP对钢筋混凝土梁的加固效果.

1 试验概况

1.1 试验梁及材料

本文中的6根试验梁均为矩形截面适筋梁，试验梁的尺寸、配筋及加载位置见图1. 通过不同层数的BFRP加固钢筋混凝土梁的试验研究发现，梁底面粘贴两层BFRP时，加固材料性价比最优，该结论与文献给出的BFRP加固研究成果一致[5-6]. 本文中的对比试验梁采用了粘贴两层不同种类的纤维布加固方式，研究了纤维布的种类、加载历史，以及U形箍筋的布置方式等因素对加固效果的影响.

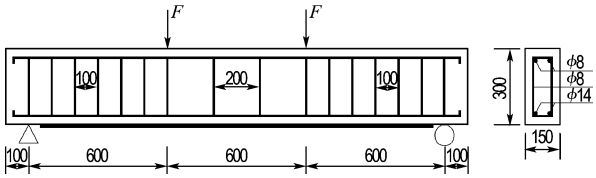


图1 试验梁的尺寸、配筋及加载位置

Fig. 1 Size, stirrup and loading position of test beam

本文中的试验梁混凝土等级为C40，胶结材

收稿日期： 2011-09-16； **修回日期：** 2012-11-26.
基金项目： 国家自然科学基金资助项目(11102033).
作者简介： 黄丽华*(1967-)，女，副教授，E-mail：lhhang@dlut.edu.cn.

料采用 Araldite 结构胶(XH180A 和 XH180B). CFRP、GFRP 和 BFRP 的力学指标详见表 1.

表 1　各种 FRP 的力学指标

Tab. 1　Mechanical properties of various FRP

材料	抗拉强度 f_f/MPa	弹性模量 E_f/GPa	厚度 t_f/mm	延伸率/%
CFRP	3 400	230	0.167	1.5
GFRP	1 615	93	0.177	2.4
BFRP	2 000	90	0.107	2.0

1.2　FRP 加固形式

FRP 粘贴于梁底面两支座之间，宽度和长度分别为 100 mm 和 1 700 mm. 加固梁 B-2B-a、B-2B-b 和 B-2B-c 均为粘贴两层 BFRP 的钢筋混凝土加固梁，其中 B-2B-b 为有初始预损伤梁，B-2B-c 为沿全梁均匀布置 U 形箍筋锚固梁(图 2(a)). 加固梁 B-2C 和 B-2G 分别为粘贴两层 CFRP 和 GFRP 的加固梁. 除梁 B-2B-c 外，其余梁均采用在距纤维布端部 280 mm 范围内布置 3 个 U 形箍筋的锚固方式，U 形箍筋宽度为 60 mm，间距为 50 mm，具体布置见图 2(b).

粘贴纤维布时，将钢筋混凝土梁粘贴面打磨至骨料，用钢丝刷除去粘贴面粉尘再用酒精擦洗，充分干燥后涂刷结构胶粘贴纤维布，用刮板刮平纤维布表面使胶充分浸润.

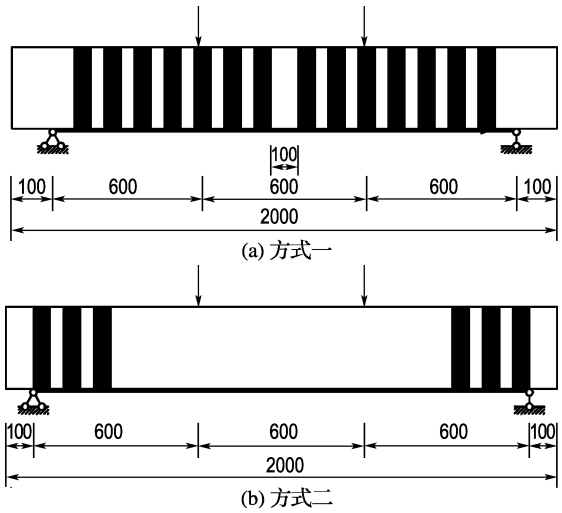


图 2　U 形箍筋的两种锚固方式

Fig. 2　Two types of U-stirrup anchorage

1.3　加载及数据采集

试验在 YAW-10000F 型液压试验机上完成，采用每级 5 kN 电脑控制加载至极限状态. 对有预损伤的梁 B-2B-c，实施二次加载，即首先加载至极限荷载的 50%～60%，卸载后粘贴纤维布加固，重新加载至极限状态. 试验中采集的数据包括：试验梁跨中、加载点和支座处的位移，试验梁底部纵筋应变，加固梁底面 FRP 应变，试验梁跨中截面混凝土应变沿梁高的变化规律以及试验梁各级荷载下裂缝发展情况等.

2　试验结果分析

2.1　承载力分析

试验测得各梁的承载力见表 2. 与未加固梁 B-1 比较可知，FRP 加固梁的开裂荷载、屈服荷载和极限荷载均有不同程度的提高，其中开裂荷载提高 20%～38%，屈服荷载提高 4%～24%，极限荷载提高 13%～25%.

表 2　各梁的承载力试验值

Tab. 2　Test results of each beam′s bearing capacity

梁编号	加固方式	开裂荷载/kN	屈服荷载/kN	极限荷载/kN
B-1	对比梁	39	124	157
B-2B-a	BFRP 两端锚固	54	151	186
B-2B-b	BFRP 预损伤梁	—	154	192
B-2B-c	BFRP 全梁锚固	47	139	177
B-2C	CFRP 两端锚固	50	151	196
B-2G	GFRP 两端锚固	49	129	189

2.1.1　不同种类 FRP 加固梁承载力对比　试验结果表明，加固梁均发生 FRP 与混凝土胶界面剥离破坏. 梁 B-2B-a 和梁 B-2C 的开裂荷载分别为 54 kN 和 50 kN，屈服荷载均为 151 kN，梁 B-2C 的极限荷载比梁 B-2B-a 高 5%. 玻璃纤维布加固梁 B-2G 的开裂荷载为 49 kN，屈服荷载较其他加固形式低 15%，极限荷载与梁 B-2B-a 基本持平. 由此可见，不同种类纤维布加固梁的开裂荷载基本相同，加固梁的屈服荷载提高有限，极限荷载提高较大. 碳纤维布加固梁的屈服荷载和极限荷载较高，加固效果最好. 玻璃纤维布加固效果不如玄

武岩纤维布，玄武岩纤维布加固的性价比最高，故此材料可以在工程应用中加以推广. 各种纤维布加固梁的承载力比较如图 3 所示.

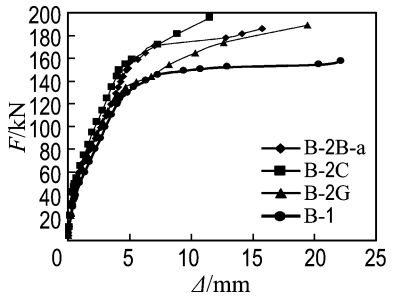


图 3 各种 FRP 加固梁承载力比较

Fig. 3 Comparison of bearing capacity of various FRP strengthened beams

2.1.2 预损伤及锚固对加固的影响 与对比梁 B-1 相比有初始预损伤的玄武岩纤维布加固梁 B-2B-b 的承载力提高 22%，相对于无损伤的加固梁 B-2B-a，屈服荷载基本不变，极限荷载略微提高，如图 4 所示. 该试验结果说明当发生 FRP 与混凝土胶界面剥离破坏时，FRP 对有初始损伤梁的加固效果更明显，初始损伤对 FRP 加固梁承载力的提高影响不大.

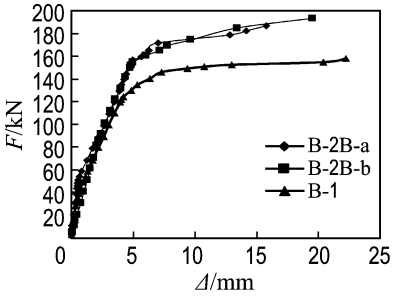


图 4 预损伤对加固梁承载力的影响

Fig. 4 Effect of pre-damage on beam′s bearing capacity

2.1.3 锚固对加固梁承载力的影响 试验中不同 FRP 加固的钢筋混凝土梁均发生了 FRP 与混凝土胶界面剥离破坏，为避免 FRP 过早剥离，充分发挥纤维布的抗拉性能，试验梁 B-2B-c 采用了沿全长均匀包裹 U 形箍筋锚固方式，试验结果如图 5 所示，该梁的极限荷载相对于未加固梁 B-1 提高了 12.7%，而与采用两端锚固形式的梁 B-2B-a 相比，屈服荷载下降了 8%，极限荷载降低了 5%. 试验数据说明沿全梁布置 U 形箍筋的锚固方式可以阻止剥离破坏的产生，但加固梁的承载力提高幅度却有所下降，BFRP 材料的利用率降低.

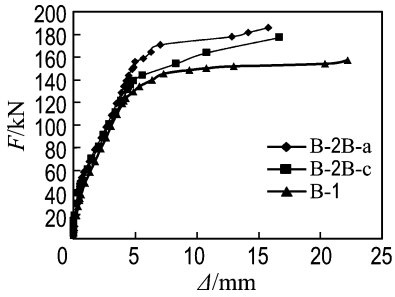


图 5 锚固对加固梁承载力的影响

Fig. 5 Effect of anchorage on beam′s bearing capacity

2.2 刚度及延性分析

2.2.1 各加固梁的挠度及延性分析 相对于对比梁 B-1，各加固梁的挠度发展均很缓慢，降低了 13%～48%，即 FRP 加固提高了混凝土梁的刚度. 对比梁 B-1 在钢筋屈服时，跨中挠度约为 4.6 mm，最终破坏时，跨中挠度可达 36 mm. 而加固梁在钢筋屈服时的最大位移与未加固梁基本一致，但梁破坏时的最大位移不到 20 mm.

FRP 对混凝土裂缝的开展起到明显抑制作用，对比不同纤维布加固梁的荷载挠度曲线（图 6）可知，在相同荷载等级下，CFRP 加固梁挠度最小，BFRP 加固梁次之，GFRP 加固梁的挠度最大. 当钢筋屈服后，随着荷载的进一步增加，梁的挠度发展迅速，FRP 对裂缝的抑制作用更加明显，加固梁的刚度得到显著提高.

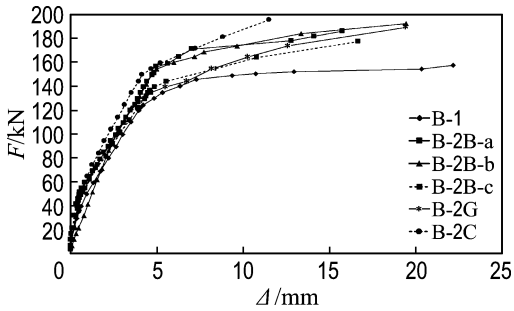


图 6 不同纤维布加固梁的荷载-挠度曲线对比

Fig. 6 Comparison of load-deflection curves of various FRP strengthened beams

有初始预损伤的梁 B-2B-b，在首次加载至 80 kN之前，相同荷载下的挠度较加固梁 B-2B-a

大. 加固前的初始裂缝在加固后继续扩展，二次受力加固梁的裂缝数和裂缝高度均超过一次受力的加固梁. 随着荷载的进一步增加，在纵筋屈服以前，其受力性能与无初始预损伤加固梁并无明显差别.

受拉区混凝土开裂以前，沿梁全长均匀布置 U 形箍筋的加固梁 B-2B-c 跨中挠度与加固梁 B-2B-a 基本相同；混凝土开裂以后，加载至接近屈服时，因加固梁 B-2B-c 底部 BFRP 受力不均匀现象愈发显著而削减了其抑制梁变形的能力，使得加固梁 B-2B-c 挠度较 B-2B-a 增大 10%.

由表 3 的延性指数可以看出，加固梁的承载力和抗弯刚度提高的同时，其延性有所降低. 其中 CFRP 加固梁的延性指数最低，其次是 BFRP 加固梁，而 GFRP 加固梁的延性指数最高. 有初始预损伤的加固梁原有裂缝的存在使其挠度发展较快，梁底纤维布受力更为充分，故二次受力加固梁的延性指数高于无初始预损伤的加固梁.

表 3　试验梁的延性指数

Tab. 3　Ductility of test beams

梁编号	屈服挠度 Δ_y/mm	极限挠度 Δ_u/mm	延性指数 Δ_u/Δ_y
B-1	4.22	22.18	5.3
B-2B-a	4.87	15.76	3.2
B-2B-b	4.27	18.73	4.4
B-2B-c	5.18	17.01	3.3
B-2C	4.34	11.53	2.7
B-2G	4.33	19.44	4.5

2.2.2　FRP 纤维布应变分析　图 7 为有初始预损伤的加固梁 B-2B-b 和无损伤加固梁 B-2B-a 底面 BFRP 纵向线应变的变化趋势. 可以看出，有损伤的加固梁 B-2B-b 底面 BFRP 应变值较无损伤加固梁 B-2B-a 高很多，说明 BFRP 对有损伤梁的加固效果好于无损伤加固梁，BFRP 利用率更高.

图 8 为沿梁长均匀布置 U 形箍筋锚固的加固梁 B-2B-c 和端部锚固 U 形箍筋加固梁 B-2B-a 在接近破坏时，梁底 BFRP 纵向线应变的变化趋势. 加固梁 B-2B-c 底面 BFRP 应变最大值达到 $14\ 610\times10^{-6}$，最小值为 $2\ 400\times10^{-6}$，应变变化幅值为 $12\ 210\times10^{-6}$；而加固梁 B-2B-a 底面 BFRP 最大应变值为 $10\ 330\times10^{-6}$，最小值为 $8\ 660\times10^{-6}$，应变变化幅值为 $1\ 670\times10^{-6}$. 对比可知，沿加固梁全长均匀布置 U 形箍筋虽避免了纤维布过早发生剥离，但 U 形箍筋限制了纤维布纵向拉力的传递，使得加固梁底面纤维布受力极不均匀，应变变化幅度大，局部纤维布因受力过大提前发生破坏，纤维布强度得不到充分利用，降低了 BFRP 的加固效果.

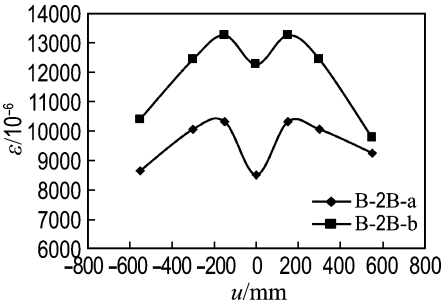


图 7　初始预损伤对 FRP 应变的影响

Fig. 7　Effect of pre-damage on FRP′s strain

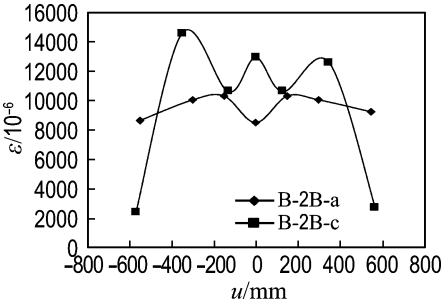


图 8　锚固方式对 FRP 应变的影响

Fig. 8　Effect of anchorage on FRP′s strain

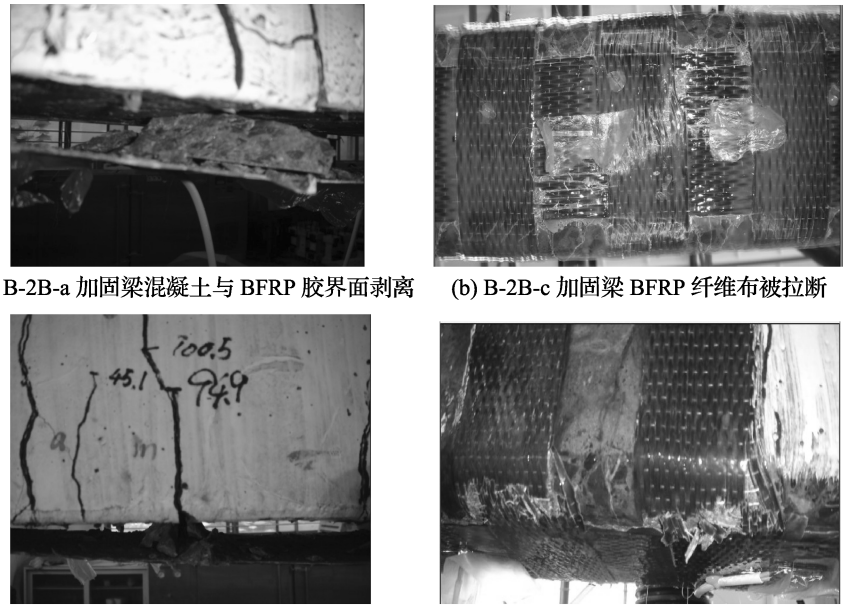
2.3　裂缝形态及破坏形式分析

2.3.1　裂缝形态分析　试验梁在纯弯段内均出现明显的弯曲裂缝，随着荷载的增加，纤维布抑制裂缝开展. 在加载过程中，加固梁较对比梁裂缝发展缓慢、数量多、间距小且宽度小. 加载至极限荷载的 70%左右，纤维布能有效抑制裂缝继续开展，裂缝宽度基本保持稳定，裂缝高度不再上升；继续加载，原裂缝旁出现一些细小裂纹即从属裂缝. 主裂缝、从属裂缝及梁底形成三角形. 加固梁屈服以前，相同荷载下，加固梁 B-2C 对裂缝的抑制作用比加固梁 B-2B-a 和 B-2G 明显，裂缝数量最少，高度最小；加固梁 B-2B-c 较加固梁 B-2B-a 裂缝数量多. 随着荷载的继续增加，加固梁 B-2G 裂缝发展比 B-2B-a 加固梁快，故首先屈服. 从加

固梁的开裂及裂缝扩展形态分析可知，CFRP 加固效果最好，BFRP 较 GFRP 对裂缝抑制作用大，对抗弯加固更有利.

预损伤加固梁 B-2B-b 二次受力至初次加载终值之前，原有裂缝扩展，无新裂缝出现；至屈服荷载之前，裂缝数量较加固梁 B-2B-a 多，高度大；至极限荷载，两者裂缝数量近乎一致. 说明初始预损伤梁修复后加固与无损伤加固梁差别不大.

2.3.2 *破坏形态分析* 对比梁 B-1 属于典型的适筋梁破坏模式，钢筋屈服后混凝土被压碎. 除加固梁 B-2B-c 以外，其余加固梁在加载至极限荷载时，均发生跨中混凝土胶界面剥离破坏. 其中碳纤维布加固梁 B-2C 在达到极限荷载时一侧 U 形碳纤维布被拉断；全梁 U 形箍筋锚固的玄武岩纤维布加固梁 B-2B-c，没有发生混凝土胶界面剥离破坏，在钢筋屈服后，随着荷载不断增加至极限荷载，跨中截面玄武岩纤维布被拉断. 各试验梁破坏形态如图 9 所示.



(a) B-2B-a 加固梁混凝土与 BFRP 胶界面剥离 (b) B-2B-c 加固梁 BFRP 纤维布被拉断

(c) B-2G 加固梁混凝土与 GFRP 胶界面剥离 (d) B-2C 加固梁 U 形箍筋拉断

图 9 各试验梁的破坏形态

Fig. 9 The failure modes of various specimens

3 结 论

(1) 梁底粘贴纤维布加固钢筋混凝土梁可有效提高梁的承载力，限制裂缝发展，提高梁的刚度. 虽然受弯构件的延性有所降低，但一般仍可满足要求.

(2)不同纤维布加固效果对比可知，碳纤维布加固梁承载力最高、延性最低，玻璃纤维布加固梁延性较好但屈服荷载提高不显著. 相比之下，玄武岩纤维布加固梁承载力得到有效提高且延性好，加之玄武岩纤维布是绿色环保材料，经济适用，故在实际应用中可加以推广.

(3)试验结果表明，在纤维布端部加 U 形箍筋的锚固方式优于沿全梁加 U 形箍筋的锚固方式. 沿全梁均匀布置 U 形箍筋虽避免了混凝土与胶界面间的剥离破坏，但由于 U 形箍筋使梁底面纵向纤维布受力不均匀，局部受力过大，导致局部纤维布过早断裂，影响了 BFRP 的整体加固性能.

(4)BFRP 对有初始预损伤的梁进行加固时，能够更有效发挥 BFRP 材料的抗拉性能，提高了材料利用率和加固梁的延性.

(5)由试验中加固梁的破坏可知，在粘贴纤维布过程中，正确的施工方法和合适的胶结材料是影响混凝土梁抗弯加固的重要因素，合理的施工过程是避免加固梁过早产生剥离破坏的必要条件.

参考文献：

[1] Lee Y T, Lee J H, Hwang H S, *et al*. Performance of concrete structures retrofitted with fiber reinforced polymers [J]. **Journal of the Korea Concrete Institute**, 2002, **14**(4):89-96.

[2] Hong G H, Shin Y S. Structural performance evaluation of reinforced concrete beams with externally bonded FRP sheets [J]. **Journal of the Korea Concrete Institute**, 2003, **15**(1):78-86.

[3] Lee H S. Fire resistance property of RC structure members strengthened with fiber sheet [J]. **Journal of the Korea Concrete Institute**, 2002, **14**(2):45-50.

[4] 胡显奇,申屠年. 连续玄武岩纤维在军工及民用领域的应用[J]. 高科技纤维与应用, 2005, **30**(6): 7-13.
HU Xian-qi, SHEN Tu-nian. The applications of the CBF in war industry & civil fields [J]. **Hi-tech Fiber & Application**, 2005, **30** (6): 7-13. (in Chinese)

[5] Sim J, Park C, Moon D Y. Characteristics of basalt fiber as a strengthening material for concrete structures [J]. **Composites: Part B, Engineering**, 2005, **36**:504-512.

[6] 欧阳利军,丁　斌,陆洲导. 玄武岩纤维及其在建筑结构加固中的应用研究进展[J]. 玻璃钢/复合材料, 2010, **27**(2):1-5.
OUYANG Li-jun, DING Bin, LU Zhou-dao. BFRP and its application review in structural strengthening [J]. **Fiber Reinforced Plastics/Composites**, 2010, **27**(2):1-5. (in Chinese)

Test research on strengthening effects of various FRP on RC beams

HUANG Li-hua*, LI Yu-jing, ZHANG Yao-ye, WANG Qing-xiang

(School of Civil Engineering, Faculty of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: Test results of six reinforced concrete (RC) beams strengthened with various fiber reinforced polymer (FRP) are discussed. The strengthening effects of basalt fiber reinforced polymer (BFRP), carbon fiber reinforced polymer (CFRP) and glass fiber reinforced polymer (GFRP) are compared; the pre-damage and arrangement of U-stirrup anchorage on the strengthening effects are analyzed. The flexural behavior and failure modes of the beams bonded with various FRP are investigated through the experimental data, such as cracking load, yielding load, ultimate load, mid-span deflection and FRP strain. Comparative results show the bearing capacity and ductility of beam strengthened with CFRP are improved to the greatest extent; while the cost performance of BFRP in strengthening is superior to the others. There is little influence of pre-damage on strengthening, and the anchorage along the beam inversely affects the effects of FRP on strengthened beam.

Key words: FRP; RC beam; BFRP; pre-damage; U-stirrup