

CFRP 加固钢筋混凝土曲梁的抗弯性能试验研究*

关天发, 袁 鸿

(暨南大学重大工程灾害与控制教育部重点实验室 //
应用力学研究所, 广东 广州 510632)

摘 要: 对碳纤维复合材料加固桥梁后的受弯承载力进行了试验研究。采用 16 个钢筋混凝土曲梁和直梁试件进行三点弯曲试验模拟 CFRP 加固桥梁的抗弯加固, 得到了荷载、挠度和跨中 CFRP 应变, 为 CFRP 加固钢筋混凝土曲梁提供试验数据, 为碳纤维复合材料在桥梁加固中的应用积累经验。

关键词: 碳纤维复合材料; 桥梁加固; 曲梁; 弯曲试验

中图分类号: TU375.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2008) S2-0109-05

现在国外开始大规模使用 FRP 来加固桥梁结构^[1-6], 而我国起步较晚, 我国于 20 世纪 60 年代和 70 年代建起的具有代表性的拱桥和连续梁桥现在大多达到使用年限, 要满足使用要求并继续使用的話, 必须对这些桥梁进行加固, 提高承载力, 以满足现在规范的要求, 所以未来 10 a 将掀起国内桥梁加固的热潮, 而拱桥等一批桥梁将是重点对象。目前的研究工作主要是针对直梁进行的, 针对拱桥、公路立交桥中曲线梁加固后的抗弯性能研究较少。本文对碳纤维复合材料加固桥梁后的受弯承载力进行试验研究, 得到了荷载、挠度和跨中 CFRP 应变。本文的研究为 CFRP 加固钢筋混凝土曲梁提供试验数据, 为碳纤维复合材料在桥梁加固中的应用积累经验。

1 试验方案

根据混凝土结构规范, 制作钢筋混凝土曲梁试件来模拟拱桥、公路立交等曲线梁桥的抗弯性能, 采用 C40 混凝土制作试验试件, 其抗拉和抗压强度分别为 $f_{tk} = 2.39$ MPa 和 $f_{ck} = 26.8$ MPa, 弹性模量 $E_c = 3.25 \times 10^4$ MPa, 使用直径为 8 mm 的二级钢筋, 跨中底部预留 30 mm 空槽, 模拟损伤破坏的初始缺陷。粘贴 CFRP 进行破坏试验以模拟存在初始缺陷的桥梁的抗弯加固性能。

对试验试件进行标号, 分 A、B、C、D 4 组, 分别代表 $R = 4\ 000$ mm, $R = 5\ 000$ mm, $R = 6\ 000$ mm, $R =$ 的不同曲率半径的曲梁和直梁, 试件经过养护池养护 28 d。为了方便加固之后的数据对

比, 各组编号为 11、12 的梁粘贴了一层碳纤维布, 碳纤维布的几何和材料参数是: 长度 $L = 650$ mm, 宽度 $b_p = 80$ mm, 厚度 $t_p = 0.111$ mm, 弹性模量 $E_p = 225$ GPa, 抗拉强度为 4 240 MPa, 伸长率为 1.9%。编号为 15、16 的梁没有粘贴 CFRP, 模拟没有加固的情况。曲率半径为 4 000 mm 的试件如图 1 所示。

在暨南大学重大工程灾害与控制教育部重点实验室进行三点弯曲试验, 采用 10 000 kN 电液伺服压力试验机进行加载。在梁构件加载初始阶段, 梁还处于弹性受力状态, 这时采用荷载控制加载, 以每分钟 1 kN 的步长加载, 然后停止 1 min 时间, 记录数据, 再继续加载。当梁进入塑性受力状态后, 采用位移控制加载, 以每分钟 0.2 mm 的步长加载, 之后停止加载 1 min, 记录数据, 然后继续加载。

试验测试的主要内容是观测控制截面的挠度、梁的承载力、全梁裂缝分布、宽度、方向及混凝土、碳纤维的应变。其中挠度测点布置在跨中。具体的挠度测点和应变测点布置如图 2 所示。

2 试验结果分析

16 个钢筋混凝土曲梁和直梁试件的试验结果如表 1 所示。各组梁的荷载 - 挠度曲线如图 3 - 图 6 所示, 四组曲率半径的钢筋混凝土梁各选一条典型的荷载 - 挠度曲线进行比较如图 7 所示。

由表 1 和图 3 中 A 组梁的试验结果可以看出, CFRP 加固钢筋混凝土曲梁比无加固钢筋混凝土曲梁的抗弯承载力提高 55% 左右, CFRP 加固的钢筋

* 收稿日期: 2008 - 09 - 03

基金项目: 广东省高校《工程结构故障诊断》科研型重点实验室建设资金资助项目

作者简介: 关天发 (1983 年生), 男, 硕士研究生; 通讯联系人: 袁鸿; E-mail: tyuanhong@jnu.edu.cn

混凝土曲梁的刚度增加不明显，CFRP加固的钢筋混凝土曲梁的屈服阶段曲线波动幅度较大。相对CFRP加固的直梁来说其屈服阶段较短。试验表明，CFRP能有效抑制裂缝的开展，CFRP剥离破坏发生在混凝土与树脂界面层。

从梁 A15和梁 A16的弯曲试验数据，可以看到这两根梁试件的试验数据曲线基本一致，整个试验曲线分为 4 个阶段，第 1 个阶段试验仪器存在初始位移误差，荷载增加不明显。第 2 个阶段进入正常的弹性受力阶段，荷载随位移增加而显著增大。第 3 个阶段钢筋混凝土曲梁达到屈服荷载之后，荷载并没有随着位移增大而上升，一直维持在屈服荷载附近，曲线形成一个水平台阶。第 4 个阶段是钢筋混凝土曲梁完全进入塑性受力阶段，荷载开始慢慢下降，裂缝宽度越来越大，直到破坏。总体上来说，A 组未加固的钢筋混凝土控制曲梁的弯曲屈服荷载为 28 kN 左右，对应的跨中挠度大概为 4 mm 左右。而梁 A11 和 A12 的弯曲试验数据曲线则可以分为 5 个阶段：第 1 阶段 CFRP 还没有进入共同受力，荷载全部由钢筋混凝土曲梁承受，同时试验仪器存在初始位移误差。第 2 阶段 CFRP 开始进入

受力阶段，跟钢筋混凝土曲梁协调变形，共同受力，可以看出由于 CFRP 进入工作状态之后，提升了钢筋混凝土梁的强度。第 3 阶段为加固曲梁达到屈服荷载之后，随着位移增加，荷载并没有增加，CFRP 与混凝土界面达到了局部剥离强度，CFRP 开始剥离，剥离发生之后，CFRP 不再和混凝土曲梁协调变形，因而荷载出现一个下降阶段，随着位移增加，CFRP 应变增大，荷载再次上升到屈服荷载水平附近，CFRP 与混凝土界面的剥离应力再次达到局部剥离强度，CFRP 再次剥离，反复进行这个过程，形成一条震荡曲线，直到剥离裂缝发展到端部，CFRP 完全剥离破坏。第 4 个阶段是 CFRP 剥落，荷载下降阶段，这个阶段混凝土梁的弯曲裂缝宽度迅速增大，可以看出 CFRP 对裂缝开展有较好的限抑制作用。第 5 个阶段是钢筋混凝土曲梁恢复到无加固情况下的塑性受力阶段，荷载不随位移变化，稳定在 30 kN 左右。最后荷载慢慢下降到混凝土曲梁的破坏阶段。A 组 CFRP 加固钢筋混凝土曲梁的屈服荷载为 44.6 kN 左右，对应挠度为 5 mm 左右。CFRP 加固钢筋混凝土曲梁比无加固钢筋混凝土曲梁的抗弯承载力提高 55% 左右。

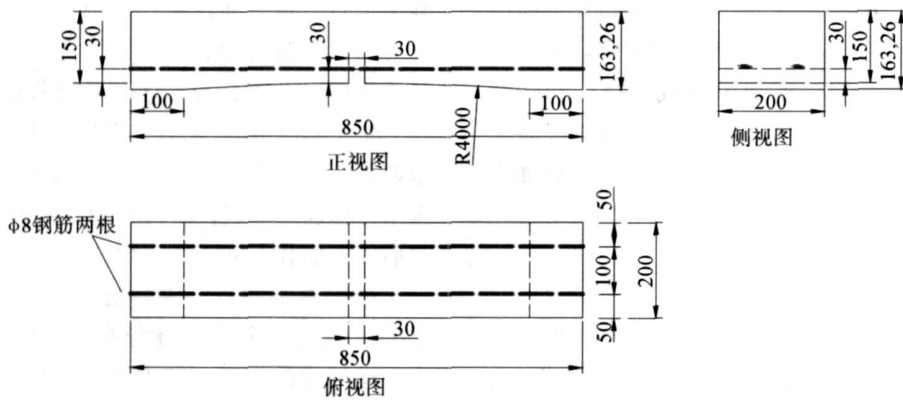


图 1 钢筋混凝土曲梁试件
Fig. 1 Specimen of RC curved beam

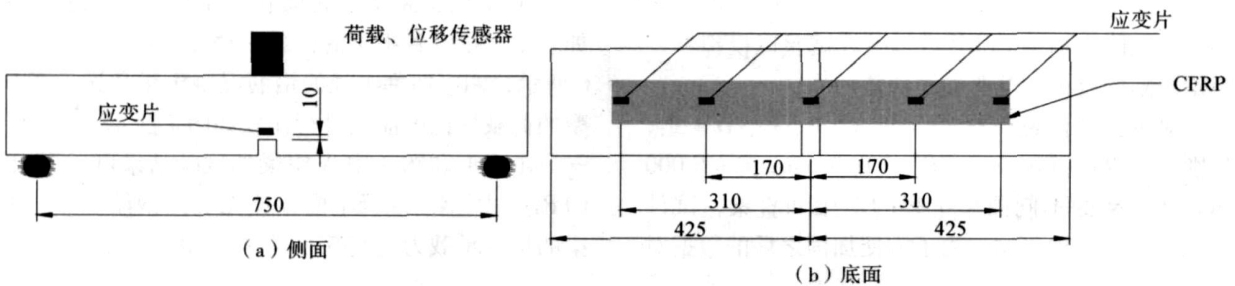


图 2 实验装置测点布置
Fig. 2 Experimental set-up and measurement

表 1 钢筋混凝土曲梁抗弯试验结果

Tab. 1 Experimental results of bending of RC curved beams

梁编号	屈服荷载 /kN	对应挠度 /mm	屈服荷载提高幅度 /%	跨中 CFRP最大应变 / μ	CFRP破坏形式	混凝土梁破坏模式
A - 11	44.8	6.4	57.2	10476	剥离 ¹⁾	延性破坏
A - 12	44.4	4.69	55.8	9037	剥离	延性破坏
A - 15	27.9	4.62	/	/	/	延性破坏
A - 16	29.1	3.41	/	/	/	延性破坏
B - 11	37.6	4.69	35.3	4551	剥离	延性破坏
B - 12	40.7	3.05	46.4	3262	剥离	延性破坏
B - 15	28.5	2.73	/	/	/	延性破坏
B - 16	27.1	3.88	/	/	/	延性破坏
C - 11	41.4	2.84	34.9	7687	剥离	延性破坏
C - 12	45.1	4.90	46.9	6788	剥离	延性破坏
C - 15	33.5	2.53	/	/	/	延性破坏
C - 16	27.9	2.21	/	/	/	延性破坏
D - 11	44.8	6.40	71.6	10202	剥离	延性破坏
D - 12	47.8	3.73	83.1	6711	剥离	延性破坏
D - 15	25.1	2.19	/	/	/	延性破坏
D - 16	27.1	2.29	/	/	/	延性破坏

1) 剥离表示沿跨中裂缝向端部剥离

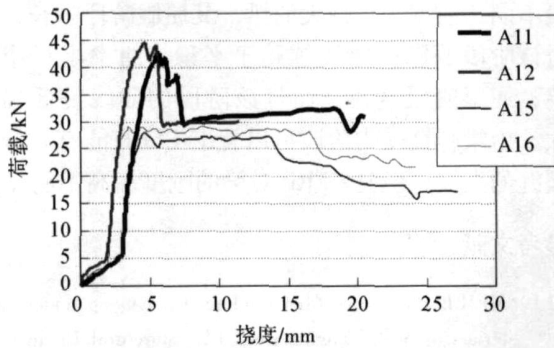


图3 A组梁荷载-挠度曲线图

Fig. 3 Load-displacement curves of beam series A

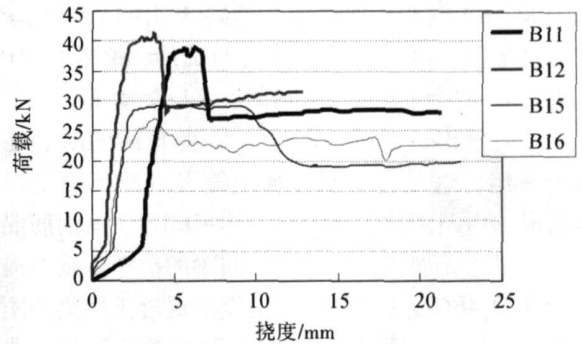


图4 B组梁荷载-挠度曲线图

Fig. 4 Load-displacement curves of beam series B

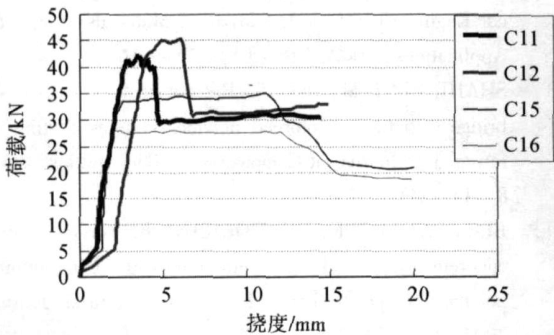


图5 C组梁荷载-挠度曲线图

Fig. 5 Load-displacement curves of beam series C

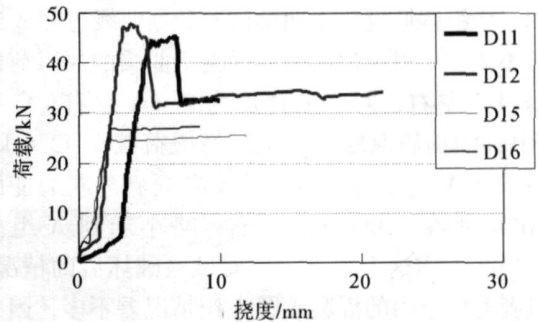


图6 D组梁荷载-挠度曲线图

Fig. 6 Load-displacement curves of beam series D

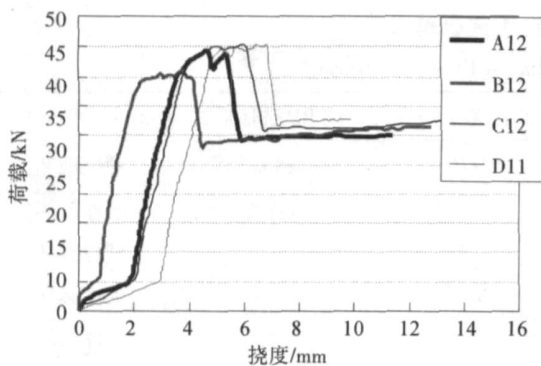


图 7 四组曲率半径的钢筋混凝土梁的
荷载 - 挠度曲线比较图

Fig. 7 Comparison of Load-displacement
curves for different beam series

由图 4 可以看出 B 组无加固钢筋混凝土曲梁和 A 组无加固钢筋混凝土曲梁的弯曲试验数据曲线相差不大。B 组无加固钢筋混凝土曲梁的屈服荷载为 28 kN 左右, 对应的挠度为 4 mm 左右。B 组 CFRP 加固钢筋混凝土曲梁弯曲试验的变化趋势和过程也基本上和 A 组曲梁的一致, 但是 B 组的屈服荷载在 40 kN 左右, 比 A 组略有下降, 从表 1 和试验过程可以发现, 反映界面断裂能的 CFRP 应变在 4 000 μ 左右, 远远没有达到 A 组的 9 000 μ 左右这个值, 再看试验破坏后的试件, A 组 CFRP 剥离之后拉出较多混凝土粘附在 CFRP 上面, 而 B 组剥离后拉出的混凝土较少, 显然 B 组的断裂能低于 A 组, 这是由于制作环境等多方面不确定因素造成。由图 4 和表 1 可以看出 CFRP 加固钢筋混凝土曲梁比无加固钢筋混凝土曲梁的抗弯承载力提高 35% 和 46%, CFRP 加固的钢筋混凝土曲梁的刚度略有增加但不明显, CFRP 加固的钢筋混凝土曲梁的屈服阶段曲线波动幅度较 A 组平缓。屈服阶段相对 CFRP 加固的直梁来说比较短。从试验情况来看, CFRP 有效抑制了裂缝的开展。由图 5 可以看出, C 组钢筋混凝土曲梁试验数据曲线也和 A 组相差不大。C 组无加固钢筋混凝土曲梁的屈服荷载为 28 kN 左右, 对应的挠度为 2 mm 左右。C 组 CFRP 加固钢筋混凝土曲梁的屈服荷载在 43.6 kN 左右, 比 A 组略有增加, 反映界面剥离断裂能的 CFRP 应变在 7 000 μ 左右, 略小于到 A 组的 9 000 μ 左右这个强度, 再看试验破坏后的情况, C 组剥离后拉出的混凝土跟 A 组情况差不多, 因此 C 组的剥离断裂能跟 A 组相差不大。CFRP 加固钢筋混凝土曲梁比无加固钢筋混凝土曲梁的抗弯承载力分别提高 35% 和 47%, CFRP 加固的钢筋混凝土曲梁的刚度增加不明显, CFRP 加固的钢筋混凝土

曲梁的屈服阶段曲线波动幅度平缓, 接近 CFRP 加固的钢筋混凝土直梁。

图 6 和表 1 给出了 CFRP 加固钢筋混凝土直梁的弯曲试验结果, 对比曲梁的结果, 可以看出, 荷载 - 挠度曲线的总体情况和趋势都和曲梁类似, 加固效果更加理想, 承载力提高更多。

图 7 选出最具代表性的 A12, B12, C12, D11 梁进行比较, 除了 B12 荷载水平较低, 其他各组屈服荷载都在 40 kN 以上, 在相同条件下, 各种曲率的曲梁采用 CFRP 加固的荷载水平基本相同, 不同的是曲率半径不同的梁, 其屈服阶段不同, 由图 7 看出, 曲率半径越大的梁, 其屈服阶段越长, 同时该阶段的震荡曲线较为平稳。曲率半径小的梁, 屈服阶段越短, 而该阶段的曲线震荡幅度大。

3 小 结

同等条件下, 曲率半径不同的钢筋混凝土梁用 CFRP 加固后承载力水平是相差不多的, 即接近直梁。其破坏模式为中部弯曲裂缝引起的界面剥离破坏, CFRP 加固钢筋混凝土曲梁的受弯承载力计算公式可以参照 CFRP 加固钢筋混凝土直梁受弯承载力计算公式。但不同曲率半径的混凝土梁的屈服阶段不同, 曲率半径越大的梁, 其屈服阶段越长, 同时该阶段的震荡曲线越趋于平稳。曲率半径小的梁, 屈服阶段越短, 而且该阶段的曲线震荡幅度大。由梁弹性受力阶段可以看出 CFRP 能有效抑制裂缝的发展, 但是 CFRP 对梁的刚度提高不明显。

参考文献:

- [1] MEIER U. Carbon fiber reinforced polymer. Modern materials in bridge engineering[J]. Structural Engineering International, 1982(2): 7 - 12
- [2] ARDU N IM, NAPOLITANO P, GOTTARDO R. Strengthening of casilina bridge with carbon fibre reinforced polymer sheets[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part L-Journal of Materials-Design and Applications, 2002, 216 (L3): 157 - 165.
- [3] SHAHROOZ B M, BOY S. Retrofit of a three-span slab bridge with fiber reinforced polymer systems-Testing and rating[J]. Journal of Composites for Construction, 2004, 8 (3): 241 - 247.
- [4] EL-SALAKAW Y E, BENMOKRANE B. Serviceability of concrete bridge deck slabs reinforced with fiber-reinforced polymer composite bars [J]. ACI Structural Journal, 2004, 101 (5): 727 - 736
- [5] REED M W, BARNES R W, SCHNDLER A K, et al. Fiber-reinforced polymer strengthening of concrete bridges that remain open to traffic [J]. ACI Structural Journal, 2005, 102 (6): 823 - 831.

- [6] CHAALLAL O, SHAHAW Y M, HASSAN M. CFRP repair and strengthening of structurally deficient piles: Design issues and field application[J]. Journal of Composites for Construction, 2006, 10 (1): 26 - 34

Experimental Study on Bending Properties of RC Curved Beam Strengthened with CFRP

GUAN Tian-fa, YUAN Hong

(MOE Key Lab of Disaster Forecast and Control in Engineering,
Institute of Applied Mechanics, Jinan University, Guangzhou 510632, China)

Abstract: Sixteen reinforced concrete curved and plane beams specimen strengthened with CFRP were test in three points bending in the paper. Load, deflection and CFRP strain in mid-span are obtained. The experimental data of RC curved beam strengthened with CFRP are provided and practical experience is accumulated on the application of CFRP in bridge strengthening.

Key words: CFRP; bridge strengthening; curved beam; bending test

www.cnki.net