

文章编号: 1000-4750(2012)Suppl I-0075-04

悬臂梁支座附近表层嵌入 FRP 筋后性能研究

郑宇宙, 王兴国, 陈红强

(河南理工大学土木工程学院, 河南, 焦作 454003)

摘 要: 对悬臂梁支座附近受弯面和侧面表层嵌入 FRP 筋材后的性能开展了试验研究, 探讨了 FRP 筋类型、试验梁侧面开槽嵌粘方式和初始荷载对悬臂梁性能影响, 分析了试验梁的特征荷载、悬臂端挠度、钢筋和 FRP 筋材的应变。试验结果显示, 内嵌 FRP 筋能够提高悬臂梁的开裂荷载、屈服荷载和极限荷载, 试验梁的极限荷载提高范围为 48.9%~64.2%; 内嵌 FRP 筋有效地抑制悬臂端挠度, 控制了悬臂梁的变形, 持续荷载作用下试验梁加固后特征荷载要比其它无初载作用的加固试验梁略低, 变形略大, 不过, 加固效果仍很明显。由此可见, 悬臂梁采用 FRP 筋嵌粘是一种有效的加固方法。

关键词: 悬臂梁桥; FRP; 内嵌加固; 持续荷载; 承载力

中图分类号: TU378.2; U445.72 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2011.11.S012

BEHAVIOR OF SUPPORT ZONE OF CANTILEVER BEAM EMBEDDED WITH FRP TENDONS

ZHENG Yu-zhou, WANG Xing-guo, CHEN Hong-qiang

(School of Civil Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo, Henan 454003, China)

Abstract: The properties of a cantilever beam embedded FRP tendons at the curved surface and lateral surface was carried out near the support. Impacts of a FRP bar type, the side slotting and embedded sticky mode of the test beams and initial loading on the cantilever beam were discussed. The characteristic loading of the test beams, the deflection of the cantilever end and the strain of steel/FRP tendons were analyzed. The experimental results show that the crack load, yield load and ultimate load of the cantilever beam can be enhanced by embedded FRP tendons. The ultimate load of the test beams increases by 48.9% ~ 64.2%. Deflection of the cantilever end and deformation of the cantilever beam can be effectively controlled by embedded FRP tendons. The characteristic loads of the strengthened beam under sustained loading are lower than that of the beams without initial loading, and the deformation is larger. Thus, it is an effective reinforced method by embedded FRP tendons in the cantilever beam near the support.

Key words: cantilever beam; FRP; embedded reinforcement; sustaining load; bearing capacity

近年来, 纤维增强聚合物材料(Fiber Reinforced Polymer, 以下简称 FRP)因其具有轻质高强、耐腐蚀等优点而被广泛应用于混凝土结构加固, 其中内嵌 FRP 材料加固法有诸如: 不易剥离破坏、抗冲击、耐火等诸多优点而成为研究的热点^[1-4]。目前, 内嵌 FRP 材料加固混凝土梁主要集中于简支梁

研究^[5-8], 然而实际工程中悬臂构件也较多^[9], 悬臂梁表层嵌粘(Near-Surface Mounted, 以下简称 NSM) FRP 材料的研究较少。因此, 本文通过对悬臂梁支座区域附近表层内嵌 FRP 筋, 研究其改善性能。

收稿日期: 2011-05-01; 修改日期: 2012-01-09

基金项目: 河南省科技计划项目(082102240009); 河南省教育厅科研计划项目(2008A560004); 河南理工大学博士基金项目(648258)

通讯作者: 王兴国(1977-), 男, 湖北襄阳人, 副教授, 博士, 主要从事工程结构加固研究(E-mail: paulw@hpu.edu.cn).

作者简介: 郑宇宙(1987-), 男, 山东潍坊人, 硕士生, 主要从事工程结构加固研究(E-mail: universe2009@126.com);

陈红强(1983-), 男, 河南新乡人, 硕士, 主要从事工程结构加固研究(E-mail: chenhq1983@126.com).

1 试验设计

1.1 试验梁的设计与制作

本试验中的试验梁均设计为矩形截面，其混凝土设计强度为 C30，截面尺寸为： $b \times h = 150\text{mm} \times 250\text{mm}$ ，梁长 3200mm，侧跨净跨为 2000mm，悬臂长为 1000mm。其配筋为：受力主筋采用 $2\phi 14$ 的 HRB335 级钢筋，架立筋也为 $2\phi 14$ 的 HRB335 级钢筋；箍筋为 $\phi 8$ 的 HPB235 级钢筋，间距 100mm，关于试验梁的尺寸和配筋设计方案如图 1 所示。

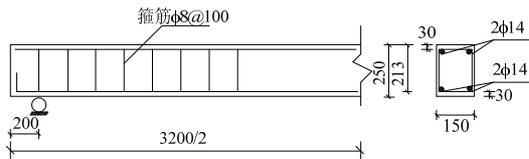


图 1 试验梁的尺寸和配筋示意 /mm

Fig.1 The size of the experimental beams and reinforcement schemes

1.2 加固试验方案

本试验加固材料采用玄武岩纤维(Basalt Fiber Re-reinforced Polymer, 以下简称 BFRP)筋与碳纤维(Carbon Fiber Reinforced Polymer, 以下简称 CFRP)筋,在悬臂端负弯矩区嵌入 1200mm 长的 FRP 筋进行抗弯加固,粘结材料采用环氧树脂胶粘剂。由于悬臂梁悬臂端受剪切作用影响较大,故部分试验梁在其侧面开槽内嵌 BFRP 筋进行抗剪加固,在悬臂端支座处(负弯矩区)梁体两侧内嵌 250mm 长的 BFRP 筋。本文通过不同 FRP 筋类型、是否进行抗剪加固及不同的加固量和是否施加初始荷载等试验参数对悬臂梁支座附近弯、剪性能进行试验研究,具体方案如表 1。

表 1 加固试件一览表

Table 1 The list of reinforcement specimens

梁号	支座附近梁受拉区域	加固材料	支座附近梁侧面	加固材料	加固前的荷载状况
CN1	悬臂端切割 $20 \times 25\text{mm}$ 沟槽	$\phi 10$ 螺纹 BFRP 筋材	—	—	0
CN2	悬臂端切割 $20 \times 25\text{mm}$ 沟槽	$\phi 9$ 光圆 CFRP 筋材	支座附近梁两侧竖向各切割 10 个与梁同高的 $20 \times 25\text{mm}$ 槽,槽间距 100mm	螺纹 BFRP 筋材	0
CN3	悬臂端切割 $20 \times 25\text{mm}$ 沟槽	$\phi 10$ 螺纹 BFRP 筋材	负弯矩区梁两侧竖向各切割 4 个与梁同高的 $20 \times 25\text{mm}$ 槽,槽间距 150mm	螺纹 BFRP 筋材	0
CN4	悬臂端切割 $20 \times 25\text{mm}$ 沟槽	$\phi 9$ 光圆 CFRP 筋材	负弯矩区梁两侧竖向各切割 4 个与梁同高的 $20 \times 25\text{mm}$ 槽,槽间距 150mm	螺纹 BFRP 筋材	$0.4M_y$

注： M_y 为同尺寸未加固梁的屈服荷载计算值。

1.3 测点布置与加载方案

悬臂端支座处受拉钢筋和 FRP 上均粘贴应变片,如图 2 所示。试验梁荷载通过手动千斤顶、分配梁和反力架提供集中荷载得以实现。加载通过分级的方式对试验梁施加荷载,在加载前进行预加载,使得试验梁的各个部位结合密实。具体的测点布置和加载方案如图 2 所示。

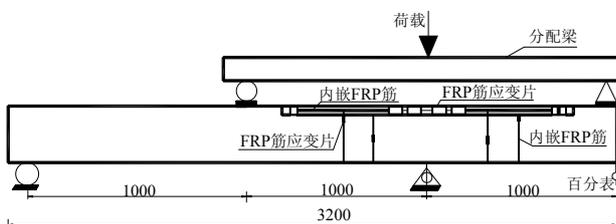


图 2 测点布置与加载示意 /mm

Fig.2 Schemes of measuring-point arrangement and loading pathway

2 试验结果

悬臂梁内嵌 FRP 筋加固后,由于 FRP-混凝土

间粘结性能较佳,并未发生剥离破坏,试验梁的破坏模式均为混凝土受压破坏;且试验梁通过加固后,其承载力得以提高,裂缝开展和变形得以控制。

2.1 承载力分析

表 2 为各试验梁开裂荷载、屈服荷载、极限荷载的实测值。由于未进行基准梁对比试验,通过理论计算提供未加固基准梁 RB 的承载力数据,其计算开裂荷载、屈服荷载和极限荷载分别为 7.64kN、21.67kN 和 22.8kN。与未加固基准梁 RB 相比,梁 CN1、梁 CN2、梁 CN3 和梁 CN4 的屈服荷载分别提高了 22.3%、24.6%、15.4%和 6.2%,极限荷载分别提高了 64.2%、53.2%、64.2%和 48.9%,但开裂荷载则并未与屈服荷载、极限荷载表现的相同,梁 CN1 显示提高了 4.7%,而梁 CN2、梁 CN3 则分别降低了 14.9%、1.8%。梁 CN2、梁 CN3 均为侧面开槽内嵌 FRP 筋进行弯剪加固的试验梁,由此可见侧面开槽可能会对试验梁的混凝土造成损伤,影响其开裂荷载,并且也将对试验梁屈服荷载、极限荷

载产生细微的影响，从而掩饰了 BFRP 筋与 CFRP 筋加固效果的差别；而通过梁 CN3、梁 CN4 承载力相比，二次受力梁 CN4 在持续荷载作用下加固后承载力的增幅效果有所降低，但通过总体比较，内嵌 FRP 筋加固悬臂梁能够有效的提高其承载力。

表 2 试验梁特征荷载 /kN

Table 2 The load characteristics of experimental beams

梁号	开裂荷载 N'_{cr}	屈服荷载 N'_y	极限荷载 N'_u
CN1	8	26.5	37.5
CN2	6.5	27	34
CN3	7.5	25	37.5
CN4	7.5	23	35.5

2.2 变形分析

图 3 所示为各试验梁的悬臂端荷载-挠度曲线对比图。在钢筋屈服前相同荷载作用下，梁 CN2、梁 CN3 悬臂端挠度大于梁 CN1 的挠度，并且梁 CN2 大于梁 CN3 的挠度。由于梁 CN2、梁 CN3 为侧面开槽进行弯剪加固的试验梁，梁 CN2 侧面抗剪加固量大于梁 CN3，其侧面开槽将会削弱试验梁的刚度，进而影响试验梁的挠度，而且随着开槽数目的增加对挠度的影响也将越明显，由此可见，悬臂梁在进行弯剪加固时，其侧面开槽数目将会影响其悬臂端挠度。而梁 CN4 在钢筋屈服前挠度也较大于梁 CN3，所以在进行加固时，应尽量卸除梁体上的荷载。

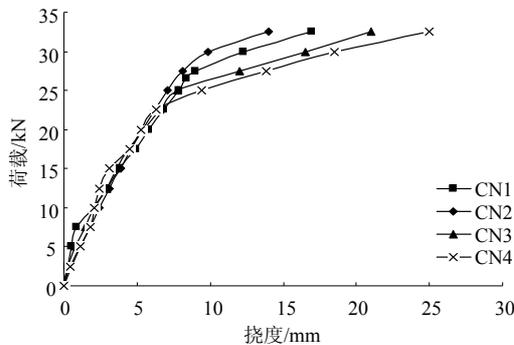


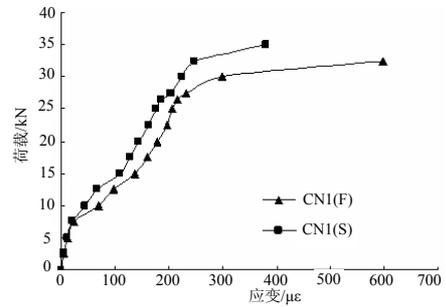
图 3 悬臂端荷载-挠度曲线

Fig.3 Load-deflection curves of cantilever beam end

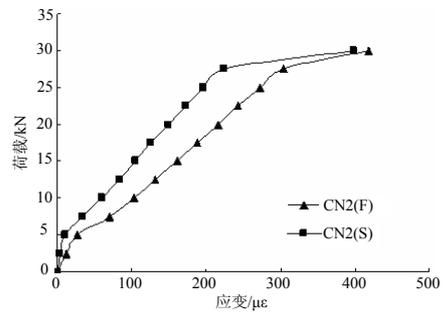
2.3 悬臂端 FRP 与钢筋的应变分析

图 4 为各试验梁悬臂支座处受拉面嵌粘的 FRP 筋与钢筋荷载-应变曲线对比，图 4 中 F 代表为 FRP，S 代表为钢筋。梁 CN2、梁 CN3 和梁 CN4 与梁 CN1 有所不同，因为梁 CN2、梁 CN3 和梁 CN4 是同时进行弯剪加固的试验梁，由于侧面内嵌抗剪 FRP 筋与梁体表层内嵌抗弯 FRP 筋形成桁架-拱模型^[10]，从而约束抗剪 FRP 筋之间的混凝土受力，进而影响钢筋的受力，内嵌抗弯 FRP 筋参与更多抗弯工作，

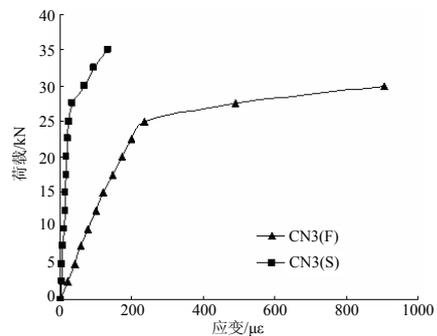
分担了更多的应力。由图 4 可见，侧面内嵌 FRP 加固会对抗弯加固效果产生部分影响，从总体来看，悬臂梁受拉区及支座附近侧面嵌粘 FRP 效果较好，改善了相应性能。



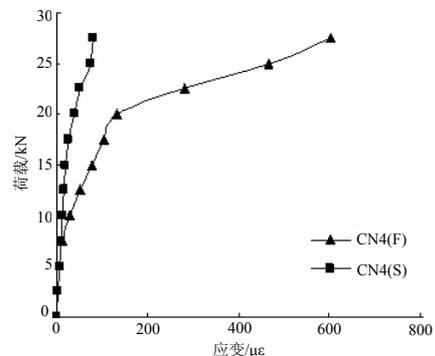
(a) CN1 试验梁



(b) CN2 试验梁



(c) CN3 试验梁



(d) CN4 试验梁

图 4 悬臂端 FRP 筋与钢筋荷载-应变曲线

Fig.4 The load-strain curves of FRP/steel bars

由图 4 可看出，四根加固梁，无论是采用 BFRP 筋材，还是采用 CFRP 筋材进行加固，内嵌 FRP 筋

材在荷载加载过程中,都能很好地发挥 FRP 筋材的性能,曲线主要分 3 个阶段:1) 试验梁开始加载到混凝土开裂阶段;2) 混凝土开裂后到钢筋屈服阶段;3) 钢筋屈服到试验梁极限破坏阶段。这 3 个阶段和钢筋应变曲线特征是一致的。混凝土开裂前为弹性阶段且承载力主要由混凝土承担,所以 FRP 筋的应变曲线呈直线且应变值较小;第 2 阶段,混凝土开裂后,混凝土开裂退出工作,承载力由钢筋与内嵌 FRP 筋承担,内嵌 FRP 筋分担了钢筋部分应力,所以 FRP 筋的应变变化比较大;第 3 阶段,钢筋屈服后,承载力变成了主要由内嵌 FRP 筋承担,因此在此阶段 FRP 筋的应变值较大。由此可见,内嵌 FRP 筋对悬臂梁抗弯性能的提高效果较佳。

3 结 论

(1) 通过承载力分析,内嵌 BFRP 筋、CFRP 筋能够提高悬臂梁支座附近的开裂荷载、屈服荷载和极限荷载,尤其对于极限荷载影响较为明显,试验梁的极限荷载提高了 53.2%~64.2%,其中 BFRP 筋、CFRP 筋由于试验梁的破坏模式均为混凝土受压破坏其加固效果并无较大差别,内嵌 FRP 筋加固悬臂梁支座附近区域对其承载力提高是有效的。

(2) 内嵌 FRP 筋对悬臂梁的挠度有较好的抑制作用。侧面开槽嵌粘 BFRP 筋加固混凝土梁,会对悬臂梁的刚度产生影响,进行悬臂梁受拉面、梁侧面嵌粘加固的试验梁挠度值大于未进行梁侧面嵌粘加固的试验梁,且随着侧面嵌粘 FRP 加固量的增加,其影响的效果越明显。

(3) 内嵌 FRP 筋能够很好的分担钢筋的应力,进而提高悬臂梁的承载力,但同时进行侧面开槽嵌粘加固的试验梁,由于侧面嵌粘 FRP 筋的约束作用,对试验梁的受拉面加固产生了一定影响,对其承载力的提高产生了一定削弱效果。

(4) 持续荷载作用下嵌粘 FRP 筋加固梁的承载力小于无初载作用的试验梁,悬臂端挠度大于无初载作用加固梁。由此可见,钢筋混凝土梁加固时,如果不卸除荷载进行加固,将会削弱加固效果,建议在进行加固前尽量卸除荷载。

参考文献:

- [1] 李荣, 腾锦光, 岳清瑞. FRP 材料加固混凝土结构应用的新领域——嵌入式(NSM)加固法[J]. 工业建筑, 2004, 34(4): 5—10.
Li Rong, Teng Jinguang, Yue Qingrui. A new technique
- for strengthening concrete structures —— near-surface mounted FRP reinforcement [J]. Industrial Construction, 2004, 34(4): 5—10. (in Chinese)
- [2] 王韬, 姚谏. 表层嵌贴 FRP 加固 RC 梁新技术[J]. 科技通报, 2005, 21(6): 735—740.
Wang Tao, Yao Jian. New technology of strengthening of RC beams with near surface mounted FRP [J]. Bulletin of Science and Technology, 2005, 21(6): 735—740. (in Chinese)
- [3] 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.
Liu Tao, Gui Yu, Wang Zhaoqing. Development review on flexural strengthening by FRP [J]. Journal of Shandong Jianzhu University, 2009, 24(4): 356—361. (in Chinese)
- [4] 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 Lieping, Feng Peng. Applications and development of fiber-reinforced polymer in engineering structures [J]. China Civil Engineering Journal, 2006, 39(3): 24—36. (in Chinese)
- [5] 贺学军, 周朝阳, 徐玲. 内嵌 CFRP 板条加固混凝土梁的抗弯性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2008, 41(12): 14—20.
He Xuejun, Zhou Chaoyang, Xu Ling. Experimental study on the flexural behavior of reinforced concrete beams strengthened with near-surface mounted CFRP laminates [J]. China Civil Engineering Journal, 2008, 41(12): 14—20. (in Chinese)
- [6] 袁宽绯, 姚谏. 钢筋混凝土梁表层嵌贴 CFRP 板抗弯承载力研究[J]. 工业建筑, 2006, 36(10): 104—106.
Yuan Nifei, Yao Jian. Study on the flexural capacity of RC beams strengthened with near surface mounted CFRP plates [J]. Industrial Construction, 2006, 36(10): 104—106. (in Chinese)
- [7] 王天稳, 常勇. CFRP 布 NSM 加固砼梁的抗弯性能试验研究[J]. 武汉理工大学学报, 2009, 31(2): 111—115.
Wang Tianwen, Chang Yong. Experimental research on the flexural behavior of RC beams strengthened by NSM CFRP sheets [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2009, 31(2): 111—115. (in Chinese)
- [8] Ha Gee-Joo, Kim Yun-Yong, Cho Chang-Geun. Groove and embedding techniques using CFRP trapezoidal bars or strengthening of concrete structures [J]. Engineering Structures, 2008, 30(4): 1067—1078.
- [9] 白宝鸿, 刘昌明, 张玉娥. 悬臂梁桥水毁后的修复与测试技术[J]. 石家庄铁道学院学报, 1999, 12(1): 19—22.
Bai Baohong, Liu Changming, Zhang Yu'e. The technique on repairing and testing cantilever bridge destroyed by the flood [J]. Journal of Shijiazhuang Railway Institute, 1999, 12(1): 19—22. (in Chinese)
- [10] 江见鲸, 李杰, 金伟良. 高等混凝土结构理论[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006: 124—146.
Jiang Jianjing, Li Jie, Jin Weiliang. Advanced theory of concrete structures [M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2006: 124—146. (in Chinese)