

DOI :10.3876/j.issn.1000-1980.2012.04.002

复合内嵌碳纤维筋和预应力螺旋肋钢筋 加固混凝土梁试验

任振华^{1 2}, 曾宪桃¹, 刘汉龙², 周丰峻³

(1. 湖南工程学院建筑工程学院, 湖南 湘潭 411104; 2. 河海大学土木与交通学院, 江苏 南京 210098;
3. 总参工程兵科研四所, 北京 100850)

摘要: 对高强度的螺旋肋钢筋施加预应力, 将螺旋肋钢筋和非预应力的碳纤维筋用不同的组合方式嵌入混凝土梁受拉区混凝土保护层中进行弯曲试验。结果表明: 内嵌 2 根螺旋肋钢筋和 1 根碳纤维筋(BF1P2 梁) 或内嵌 1 根螺旋肋钢筋和 2 根碳纤维筋(BF2P1 梁), 且对螺旋肋钢筋施加的预应力水平分别为其极限强度的 30%、45% 和 60%, 加固混凝土梁的极限承载能力、刚度及抗裂性能均有显著改善。与对比梁相比, BF1P2 梁的开裂荷载提高了 86.70% ~ 133.33%, 屈服荷载提高了 32.25% ~ 72.04%, 极限荷载提高了 72.73% ~ 90.00%; BF2P1 梁的开裂荷载、屈服荷载和极限荷载则分别提高了 50.00% ~ 133.33%, 50.54% ~ 136.56% 和 72.20% ~ 173.60%; BF2P1 梁的加固效果优于 BF1P2 梁, 且对螺旋肋钢筋施加预应力的水平为 45% 时, 混凝土梁的加固效果最佳。

关键词: 碳纤维筋; 预应力螺旋肋钢筋; 混凝土梁; 弯曲试验

中图分类号: TU375.4 文献标志码: A 文章编号: 1000-1980(2012)04-0370-06

Experiment of RC beams strengthened with near-surface mounted carbon fiber reinforced plastic bar and pre-stressed helical rib rebar

REN Zhenhua^{1 2}, ZENG Xiantao¹, LIU Hanlong², ZHOU Fengjun³

(1. Department of Building Engineering, Hunan Institute of Engineering, Xiangtan 411104, China;

2. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

3. The Fourth Engineer Scientific Research Institute of the Headquarters of the General Staff, Beijing 100850, China)

Abstract: According to different combinations of carbon fiber reinforced plastic (CFRP) and pre-stressed helical rib rebar (HRR), grooves were opened in the concrete cover of the tensile region in the concrete beams. CFRP and pre-stressed HRR were inserted in the grooves and then filled with resin. The bending test results show that the limit bearing capacity, rigidity, and crack resistance of the beams strengthened with near-surface mounted two HRRs and one CFRP (BF1P2) bar or with one HRR and two CFRP (BF2P1) bars, in which HRR was pre-stressed to 30%, 45%, and 60% of its limit strength, were improved significantly. In comparison with the un-reinforced beams, for the BF1P2 beams the crack loads increased by 86.70% to 133.33%, the yield loads increased by 32.25% to 72.04%, and the limit bearing capacities increased by 72.73% to 90.00%; and for the BF2P1 beams the crack loads increased by 50.00% to 133.33%, the yield loads increased by 50.54% to 136.56%, and the limit bearing capacities increased by 72.20% to 173.60%. The reinforcing result of BF2P1 was better than that of BF1P2. The beam strengthened with HRR that was pre-stressed to 45% of the limit strength was the best.

Key words: carbon fiber reinforced plastic; pre-stressed helical rib rebar; concrete beam; bending test

就加固方式而言, 纤维增强塑料(FRP)加固混凝土结构技术通常有外贴 FRP 加固混凝土构件、外贴预应

收稿日期: 2011-06-28

基金项目: 湖南省教育厅优秀青年项目(11B033); 中国工程院公共安全咨询项目(116001); 湖南省科技计划项目(2010GK3198)

作者简介: 任振华(1981—), 女, 河南焦作人, 讲师, 博士研究生, 主要从事建筑结构评估及维修加固研究。E-mail: zhren81@163.com

力 FRP 加固混凝土构件、内嵌 FRP 加固混凝土构件、内嵌预应力 FRP 加固混凝土构件等^[1-8]。以往的试验研究表明,内嵌碳纤维筋加固混凝土梁虽能明显提高混凝土梁的抗弯极限承载力^[9],但由于碳纤维筋强度高,而胶黏剂的强度和混凝土的强度相对较低,三者强度不协调,导致碳纤维筋强度得不到充分发挥。为克服上述缺点,并考虑碳纤维增强塑料筋施加预应力锚具目前还不完善的特定情况,本文采取先对高强度的螺旋肋钢筋施加预应力,然后将螺旋肋钢筋和非预应力的碳纤维筋同时嵌入到混凝土梁受拉区混凝土保护层中,对其进行弯曲试验,以分析其承载力^[10-14]。这样充分利用了螺旋肋钢筋的高强度,同时解决了碳纤维筋不易张锚的难题,在梁反拱的情况下,加固梁在受力过程中碳纤维筋的应变幅值会加大,从而也间接加大了碳纤维筋强度的利用率,既保证了被加固梁在使用阶段的适用性,延缓裂缝的开裂,又使梁在屈曲后具有足够的延展性。

1 试验材料

试验中采用的碳纤维筋是南京华浩复合材料有限公司提供的碳纤维筋材,其成型工艺是将进口日本东丽碳纤维丝浸渍于专用树脂基体后在光电热一体的高速聚合装置内受热固化,经牵引连续拉挤成型,其直径为 7.00 mm,抗拉强度为 2 764 MPa,拉伸弹性模量为 110.8 GPa。试验中采用的螺旋肋钢筋是河南省向阳预应力钢丝有限公司提供的低松弛螺旋肋预应力钢丝,直径为 7.00 mm,抗拉强度为 1 570 MPa。螺旋肋钢筋锚固性能优良,强度高,有良好的握裹力及较好的连接性能。

结构胶黏剂选用中国科学院大连物理化学研究所生产的 JGN-T 型碳纤维环氧树脂类建筑结构胶。JGN-T 型建筑结构胶属 A 级胶,在(25±2)℃ 的检测条件下,其轴心抗拉强度为 47.1 MPa,抗拉弹性模量为 3 800 MPa,拉伸断裂伸长率为 2.4%,抗压强度为 78.8 MPa,弯曲强度为 66.9 MPa。

试验梁所用钢筋选用 $\varnothing 8$ 圆筋和 14 钢筋。 $\varnothing 8$ 圆筋的屈服强度为 325 MPa,极限强度为 490 MPa,伸长率为 23%; 14 钢筋的屈服强度为 378 MPa,极限强度为 556 MPa,伸长率为 54%,试验中选取的混凝土强度等级为 C30,其立方体抗压强度平均值为 40.73 MPa。

2 试验方案

试验梁的截面为 150 mm×300 mm×2 400 mm 矩形,梁的跨高比为 8.0,计算跨度为 2 100 mm,梁底部的受拉纵筋选用 2 14,架立筋选用 2 $\varnothing 8$,布置 $\varnothing 8@150$ 和 $\varnothing 8@100$ 的箍筋进行抗剪,纵筋的净保护层厚度为 30 mm,架立筋的净保护层厚度为 25 mm,混凝土梁的有效高度为 263 mm。共浇筑 7 根混凝土梁,其中对比梁(DB 梁)1 根,加固梁 6 根。梁的截面及配筋情况如图 1 所示。将试验梁分 3 组:第 1 组为未加固的对比梁;



图 1 开槽位置和梁截面及配筋示意图(单位:mm)

Fig. 1 Sketch map of groove location, beam section, reinforcement (units:mm)

第2组为在混凝土梁受拉区保护层中沿梁轴向开3条槽,中间槽内嵌1根预应力螺旋肋钢筋,两边槽内嵌2根非预应力碳纤维筋,编号为BF2P1,对螺旋肋钢筋施加的预应力水平为其极限强度的30%、45%、60%;第3组在两边槽内嵌2根预应力螺旋肋钢筋,中间槽内嵌1根非预应力碳纤维筋,编号为BF1P2,对螺旋肋钢筋施加的预应力水平为其极限强度的30%、45%、60%。梁底开槽情况及预应力螺旋肋钢筋和碳纤维筋嵌入情况如图2所示。



图2 梁底开槽及嵌筋情况(单位:mm)
Fig. 2 Groove location and reinforcement (units:mm)

3 试验方法

3.1 预应力螺旋肋钢筋的固定和张拉

如图3所示,将试验梁置于张拉台座中间,调整好位置,把螺旋肋钢筋放置于槽中(距离槽底约1/3处);安装锚具,然后对螺旋肋钢筋进行张拉,达到要求的预应力大小。图4为加固后的成品梁。

在试验梁槽中充填树脂固化,完成后进行放张。放张时采用静态应变仪测量放张前后预应力螺旋肋钢筋端部及跨中的应变损失,同时用百分表测量梁的跨中反拱情况。放张完成后,在相应槽中嵌入碳纤维筋材,并在槽中填好树脂,约24h后,可将加固梁上试验台进行测试。



图3 预应力施加方法
Fig. 3 Method of pre-stressing



图4 加固后的试件
Fig. 4 Strengthened specimens

3.2 量测及加载

混凝土梁的应变、钢筋应变及螺旋肋钢筋应变用电阻应变片测量,混凝土梁的挠度用位移计测量,应变数据采集使用XL-20101B5数字静态应变仪进行自动采集。试验梁的加载方案如图5所示。试验的基本内容为:(a)在纵向受拉钢筋上布置钢筋应变片测量受拉钢筋;(b)在跨中受压区混凝土顶面、侧面布置混凝土应变片,测量受压区混凝土的极限压应变和沿梁高的应变分布;(c)在碳纤维筋、螺旋肋钢筋上布置应变片,以测量筋材在加载过程中的受力情况;(d)在试验梁的跨中、分载梁支座底部、梁支座处分别布置位移计,用于测量跨中挠度和支座沉降度;(e)使用显微测量仪来观察试验过程中构件的裂缝开展情况,并记录开裂荷载,标注裂缝的分布位置、荷载级别。



图5 试验梁加载及仪表布置(单位:mm)
Fig. 5 Instrumentation used for test beams (units:mm)

4 试验结果分析

4.1 试验梁的破坏模式

内嵌碳纤维筋加固混凝土梁界面黏结性能试验中所出现的破坏模式有以下几种:碳纤维筋被拉断,碳纤维筋黏结材料界面破坏,碳纤维筋被拔出,黏结材料层发生劈裂破坏,混凝土发生劈裂破坏,黏结材料-混凝土界面破坏。在保证不发生剪切破坏的前提下,加固梁主要发生以下破坏形式:(a)受拉钢筋屈服后,受压区混凝土破坏,而螺旋肋钢筋和碳纤维筋未屈服。(b)受拉钢筋屈服后,螺旋肋钢筋和碳纤维筋均被拉断,受压区混凝土未破坏。(c)黏结破坏,包括螺旋肋钢筋与胶黏剂界面发生破坏,螺旋肋钢筋被拔出,碳纤维筋与胶黏剂界面发生破坏,碳纤维筋被拔出,胶黏剂材料层发生剪拉错层劈裂破坏,胶黏剂与混凝土界面发生破坏;内嵌槽槽边混凝土发生劈裂破坏。(d)黏结剥离破坏。由于梁中剪切斜裂缝和弯曲裂缝张开引起黏结界面应力超过界面黏结强度而产生剥离破坏。对于剪切斜裂缝张开引起的界面剥离破坏可通过提高梁的受剪承载力加以避免,对于弯曲裂缝张开引起界面剥离需要通过计算,采用预应力加固后,使螺旋肋钢筋的强度得到充分发挥而避免这种剥离破坏模式。BF1P2-60(60 指施加的预应力水平为其极限强度的 60%,30、45 的含义依此类推)梁由于弯曲裂缝张开而引起局部剥离破坏。从试验梁破坏时的挠度、裂缝开裂情况看,以上破坏形式为延性破坏。梁体在破坏前,底部混凝土剥落且伴随较大响声,其破坏前是有明显预兆的。由于对螺旋肋钢筋施加了预应力,且螺旋肋钢筋有良好的锚固性能及握裹力,试验中发现加固混凝土梁的破坏模式基本上是第一种破坏形式。

4.2 主要试验结果

混凝土梁的主要试验结果如表 1 所示。由表 1 可知,碳纤维筋、螺旋肋钢筋与胶层之间未发生剥离破坏,只有 BF1P2-60 发生了混凝土局部剥离破坏。与对比梁相比,加固梁的开裂弯矩和极限弯矩的提高都非常明显。施加了预应力的加固梁(BF2P1 系列梁和 BF1P2 系列梁)的开裂荷载、屈服荷载、极限荷载提高也都非常明显。BF1P2 梁的开裂荷载提高了 86.70%~133.33%,屈服荷载提高了 32.25%~72.04%,极限荷载提高了 72.73%~90.00%;BF2P1 梁的开裂荷载提高了 50.00%~133.33%,屈服荷载提高了 50.54%~136.56%,极限荷载提高了 72.20%~173.60%。从表 1 中还可看出,荷载提高率并不随预应力的增加而增加,也不随施加预应力材料的多少而增减。经比较,对 BF2P1 系列梁施加的预应力水平为 45%时,加固效果最好。

表 1 加固梁试验结果
Table 1 Test results of strengthened beams

编号	开裂荷载 N_{cr}/kN	屈服荷载 N_y/kN	极限荷载 N_u/kN	极限弯矩/($\text{kN}\cdot\text{m}$)		M'_u/M_u	梁的破坏模式
				试验值 M'_u	计算值 M_u		
DB	30	93	110	38.50	28.06	1.37	弯曲破坏,混凝土被压坏
BF2P1-30	45	180	297	103.95	113.36	0.92	混凝土被压坏,钢筋未断,弯曲破坏
BF2P1-45	60	200	301	105.35	118.51	0.89	混凝土被压坏,2 根 CFRP 钢筋断,弯曲破坏
BF2P1-60	70	220	293	102.55	103.26	0.99	混凝土被压坏,钢筋未断,弯曲破坏
BF1P2-30	56	123	209	73.15	78.15	0.94	混凝土被压坏,钢筋未断,弯曲破坏
BF1P2-45	65	140	202	70.70	76.43	0.93	混凝土被压坏,钢筋未断,弯曲破坏
BF1P2-60	70	160	190	66.50	76.10	0.87	混凝土局部剥离,钢筋未断,弯曲破坏

4.3 试验梁的变形分析

图 6 为 DB 梁和各系列梁的跨中挠度-荷载曲线。由图 6 可以看出,用内嵌碳纤维筋和预应力螺旋肋钢筋加固混凝土梁能够大幅度提高梁的荷载。由于对螺旋肋钢筋施加了预应力,放张时会使梁产生一定的反拱,所以加载过程中,一部分荷载首先作为消压荷载作用于梁上,因此延迟了裂缝开裂。随着初始预应力的增加,与同一系列梁相比,BF2P1-30 梁和 BF1P2-30 梁的开裂荷载、屈服荷载较小;BF2P1-45 梁和 BF1P2-45 梁、BF2P1-60 梁和 BF1P2-60 梁的开裂荷载基本相同,但屈服荷载和极限荷载差别较大。在同一预应力水平下,BF2P1 系列梁的挠度比 BF1P2 系列梁的挠度要小,说明 BF2P1 系列梁的刚度比 BF1P2 系列梁的刚度大;在同一荷载作用下,BF2P1 系列梁跨中挠度大小顺序为 $f_{45} < f_{30} < f_{60}$,BF1P2 系列梁跨中挠度大小顺序也为

$f_{45} < f_{30} < f_{60}$ 。说明在同一加固量下施加预应力水平为45%时为最佳且刚度也最大;在同一荷载作用下,BF2P1系列梁和BF1P2系列梁的挠度大小顺序为 $f_{BF2P1-45} < f_{BF1P2-45} < f_{BF2P1-30} < f_{BF2P1-60} < f_{BF1P2-30} < f_{BF1P2-60}$,说明在同一加固量下BF2P1-45梁为最佳组合。以上说明,施加预应力的大小和施加合适的预应力材料的根数可以有效地抑制挠度的发展。施加预应力的梁的跨中挠度对比梁的跨中挠度发展慢,说明施加预应力能更有效地提高加固梁的刚度。

当梁截面受拉边缘达到其极限拉应变时,混凝土梁产生第一条裂缝,此时的裂缝宽度定义为开裂时的裂缝宽度,定义加固梁破坏前的最大裂缝宽度为破坏



图6 加固梁跨中挠度曲线

时的裂缝最大宽度。表2列出了各试验梁破坏时的情况,包括开裂时的裂缝宽度、长度和裂缝条数。所有试验梁都是以适筋梁的破坏而告终,没有出现滑移和黏结失效现象。与对比梁相比,加固梁裂缝出现得较晚,对比梁在荷载加至30kN左右出现裂缝,而加固梁在荷载加至60kN左右时才出现裂缝,这说明用内嵌碳纤维筋和预应力螺旋肋钢筋复合加固混凝土梁,不但能大幅提高开裂荷载,还能控制裂缝发展。BF2P1系列梁破坏时的裂缝宽度为1.3~1.7mm,BF1P2系列梁破坏时的裂缝宽度为1~2mm,而且BF2P1-45梁只有1条长度为5mm的裂缝。从表2还可看出,BF2P1系列梁比BF1P2系列梁的裂缝宽度小,长度短,开裂条数也少。

Fig. 6 Mid-span force vs. deflection curves of strengthened beams

表2 各试验梁的裂缝分布

Table 2 Crack distributions of test beams

编号	开裂弯矩/ (kN·m)	开裂时裂缝 宽度/mm	开裂时裂缝 长度/mm	开裂时 裂缝条数	极限弯矩/ (kN·m)	破坏时裂缝 最大宽度/mm
DB	10.50	0.01	20	2	38.50	2.8
BF2P1-30	15.75	0.01	12	2	103.95	1.7
BF2P1-45	21.00	0.04	5	1	105.35	1.4
BF2P1-60	24.50	0.01	13	1	102.55	1.3
BF1P2-30	19.60	0.05	10	3	73.15	1.0
BF1P2-45	22.75	0.02	10	3	70.70	2.0
BF1P2-60	24.50	0.03	12	1	66.50	1.2

5 结 论

- a. 与对比梁相比,内嵌1根或2根螺旋肋钢筋加固的混凝土梁,其极限承载能力提高了20%~39.5%;内嵌碳纤维筋加固的混凝土梁,其极限承载能力提高了50%~70%^[12]。与使用某一单一材料进行加固相比,用复合内嵌碳纤维筋和预应力螺旋肋钢筋加固混凝土梁是一种更有效的加固方法,具有广阔的发展前途。
- b. 采用复合碳纤维筋和预应力螺旋肋钢筋加固混凝土梁,能显著提高混凝土梁的开裂荷载、屈服荷载和极限荷载。与对比梁相比,BF2P1系列梁的开裂荷载提高了50.00%~133.33%,屈服荷载提高了50.54%~136.56%,极限荷载提高了72.20%~173.60%;BF1P2系列梁的开裂荷载提高了86.70%~133.33%,屈服荷载提高了32.25%~72.04%,极限荷载提高了72.73%~90.00%。
- c. 在相同预应力水平下,BF2P1系列梁比BF1P2系列梁的挠度小、刚度大,屈服能力和极限破坏能力也高。
- d. 采用复合碳纤维筋和预应力螺旋肋钢筋加固混凝土梁可以延迟裂缝的出现,在一定的预应力水平范围内,预应力越大,加固梁的变形越小。
- e. 由试验分析的结果看,BF2P1系列梁的加固效果优于BF1P2系列梁,且对螺旋肋钢筋施加的预应力水平为45%时,混凝土梁的加固效果最佳。对加固材料施加的预应力并不是越大越好,施加预应力的加固

材料的数量也不是越多越好。

参考文献：

- [1] 曾宪桃. 粘贴玻璃钢板加固混凝土梁动静载行为研究及其徐变特性分析[D]. 成都: 西南交通大学, 1998.
- [2] 王兴国, 徐平, 丁亚红, 等. 预应力 CFRP 片材加固 RC 梁荷载-挠度分析[J]. 玻璃钢/复合材料, 2010(3): 7-11. (WANG Xingguo, XU Ping, DING Yahong, et al. Load-capacity analysis of RC beams strenthened with prestress CFRP Laminate[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2010(3): 7-11. (in Chinese))
- [3] 姚谏, 朱晓旭, 周延阳. 混凝土表层嵌贴 CFRP 板条的黏结承载力[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2008, 42(1): 34-38. (YAO Jian, ZHU Xiaoxu, ZHOU Yanyang. The bond load of near-surface mounted CFRP plates[J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2008, 42(1): 34-38. (in Chinese))
- [4] 王兴国, 张春生, 王文华, 等. 预应力 CFRP 板加固混凝土桥梁研究与应用[J]. 玻璃钢/复合材料, 2009(4): 83-85. (WANG Xingguo, ZHANG Chunsheng, WANG Wenhua, et al. Study and application of large-scale concrete beams strengthened with CFRP laminate[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2009(4): 83-85. (in Chinese))
- [5] REN Zhenhua, ZENG Xiantao. Quasi-plane-hypothesis of strain coordination for RC beam strengthened with external-bonded or near-surface mounted carbon fiber reinforced plastic strip[J]. Advanced Materials Research, 2011, 255-260: 54-58.
- [6] REN Zhenhua, ZENG Xiantao, LIU Hanlong. Research on RC beams strengthened with near-surface mounted helical rib bar[J]. Applied Mechanics and Materials, 2011, 90-93: 1757-1760.
- [7] ZENG Xiantao, REN Zhenhua. Quasi-plane-hypothesis of strain coordination for RC beam strengthened with near-surface mounted carbon fiber reinforced plastic bar or helical rib bar[J]. Advanced Materials Research, 2011, 243-249: 541-545.
- [8] 曾宪桃. 表层内嵌碳纤维增强塑料板条混凝土梁弯剪性能研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2007.
- [9] 曾宪桃, 段敬民, 丁亚红. 内嵌预应力碳纤维增强塑料筋混凝土梁正截面承载力计算[J]. 工程力学, 2006, 23(增刊 2): 112-116. (ZENG Xiantao, DUAN Jingmin, DING Yahong. Calculation on method for bending capacity of concrete beams strengthened with pre-stressed near surface mounted carbon fiber reinforced plastic bar[J]. Engineering mechanics, 2006, 23(Sup2): 112-116. (in Chinese))
- [10] 薛伟辰, 曾磊, 谭圆. 预应力 CFRP 板加固混凝土梁设计理论研究[J]. 建筑结构学报, 2008, 29(4): 127-133. (XUE Weichen, ZENG Lei, TAN Yuan. Studies on design theories of concrete beams strengthened with prestressed CFRP plates[J]. Journal of Building Structures, 2008, 29(4): 127-133. (in Chinese))
- [11] 丁亚红. 内嵌预应力筋材加固混凝土梁弯曲性能研究[D]. 焦作: 河南理工大学, 2009.
- [12] 任振华. 内嵌 CFRP 筋预应力螺旋肋钢筋复合加固混凝土梁抗弯试验研究[D]. 焦作: 河南理工大学, 2009.
- [13] 曾宪桃, 任振华, 赵晋, 等. 表层内嵌桁架螺旋肋筋加固混凝土梁抗弯试验研究[J]. 土木工程学报, 2010, 43(1): 64-69. (ZENG Xiantao, REN Zhenhua, Zhao Jin, et al. Experiment of bend performances of RC beams strengthened with near-surface mounted truss helical rib rebars[J]. China Civil Engineering Journal, 2010, 43(1): 64-69. (in Chinese))
- [14] 彭晖, 尚守平, 刘兴彦. 预应力碳纤维片材张放后端部黏结应力分析[J]. 交通科学与工程, 2009, 25(2): 66-70. (PENG Hui, SHANG Shouping, LIU xingyan. Analysis of bond extremities interfacial stress of prestressed CFRP laminate after releasing[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2009, 25(2): 66-70. (in Chinese))