

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2016.02.001



预应力 CFRP 布及预紧螺栓加固 RC 梁 试验研究

管延华¹, 钱远顺¹, 岳红亚¹, 孙仁娟¹, 纪续², 袁凯², 刘传波²

(1. 山东大学 土建与水利学院, 济南 250061; 2. 济南市公路管理局, 济南 250013)

摘要:为提高碳纤维布加固 RC 结构的效果及其可靠性,提出了预应力碳纤维布与预紧螺栓联合加固技术。结合在役 RC 梁的损伤特点及目前的 RC 梁加固方法,分别采用不同的碳纤维布加固技术对完整梁和破坏梁的抗弯性能进行了对比试验研究。针对目前碳纤维布张拉设备的缺陷,研发了便于现场应用的新型碳纤维布布张拉设备,分析了预应力大小对加固效果的影响。结果表明,预应力碳纤维布及预紧螺栓联合加固技术是一种更可靠的桥梁加固方法,不仅能够提高 RC 梁正截面的抗弯承载能力及正常使用阶段的截面刚度,而且螺栓预紧锚固碳纤维布能够很好地抑制其在混凝土表面的剥离,提高碳纤维布与混凝土表面之间粘结强度,对碳纤维布施加预应力能够充分发挥其高强性能,有效抑制混凝土裂缝开裂和开展。

关键词:预应力 CFRP; 预紧螺栓; 加固技术; 试验研究; 力学行为

中图分类号: TU375.1; U445.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2016)02-0001-10

Experimental analysis on RC beams strengthened with the pre-stressed carbon fiber sheets and pre-screwed bolts

Guan Yanhua¹, Qian Yuanshun¹, Yue Hongya¹, Sun Renjuan¹, Ji Xu², Yuan Kai², Liu Chuanbo²

(1. School of Civil Engineering, Shandong University, Jinan 250061, P. R. China;

2. Jinan Highway Administration, Jinan 250013, P. R. China)

Abstract: To improve the strengthening effect and reliability of concrete structure strengthened with carbon fiber sheets, a new hybrid bonding pre-stressed carbon fiber sheets technique is developed. This technique combines the pre-stressed carbon fiber sheets with mechanical fastening of pre-screwed bolts. In accordance with the fracturing characteristics and the strengthening method of aging RC beam bridges, different carbon fiber sheets strengthening technology were applied on the intact and destructive RC beams. And a series of experiments were conducted to examine and assess the flexural performance of RC beams. Then, a new type of tensioning equipment was invented to meet the need of tensioning carbon fiber sheets in practical engineering. The experiment results show that the hybrid bonding pre-stressed carbon fiber sheets is a more reliable strengthening technique which can not only improve the flexural capacity and the section stiffness of RC beams during normal use stage, but also can increase the cohesive force between carbon fiber sheets and concrete interface. It can make full use of the tensile strength of carbon fiber sheets and can

收稿日期: 2015-08-15

基金项目: 山东省自然科学基金 (ZR2013EEM025); 山东大学自主创新基金 (2012ZD032)

作者简介: 管延华 (1969-), 男, 博士, 主要从事桥梁加固技术研究, (E-mail) guanyanhua@sdu.edu.cn.

Received: 2015-08-15

Foundation item: Natural Science Foundation of Shandong Province (No. ZR2013EEM025); Independent Innovation Fund of Shandong University (No. 2012ZD032)

Author brief: Guan Yanhua (1969-), PhD, main research interest: bridge reinforcement, (E-mail) guanyanhua@sdu.edu.cn.

restrain the opening and developing of the cracks.

Keywords: pre-stressed carbon fiber sheets; pre-screwed bolts; strengthening technology; experimental study; mechanical behavior

非预应力碳纤维复合材料(CFRP)加固技术已被广泛应用于混凝土结构加固中^[1-7],但是鉴于CFRP材料的高强特性,非预应力CFRP加固混凝土结构不能充分发挥碳纤维的高强性能,造成材料的极大浪费。预应力CFRP技术不仅能够克服非预应力CFRP技术的上述缺陷,而且能有效抑制桥梁裂缝的开裂及开展、提高混凝土结构的耐久性,是一种更有效的加固技术^[8-9]。预应力碳纤维复合材料加固通常包括CFRP板和CFRP布两种,而对钢筋混凝土(RC)结构来说,采用预应力CFRP布加固技术是更经济有效的加固方法^[10-13]。由于对CFRP布施加预应力及锚固等工艺相对困难,且张拉后CFRP布对结构粘贴表面的平整度要求极高,施加预应力的CFRP布与混凝土表面的粘贴更加困难,容易发生CFRP布与混凝土界面之间的脆性剥离破坏,从而限制了预应力CFRP布技术加固RC结构的工程应用。为此,针对非预应力CFRP加固技术存在的缺陷及预应力CFRP加固技术存在的问题,结合前期研究的预紧螺栓锚固CFRP技术成果^[14-15],提出了预应力CFRP布及预紧螺栓联合加固新技术,以更好地改善和提高桥梁维修加固效果;研发新型、现场操作可行的CFRP布张拉及锚固设备,并对预应力CFRP布加固RC试验梁的力学行为进行研究,分析RC梁裂缝开展情况,研究其破坏特征,评价其加固效果。

1 联合加固技术

预应力CFRP布及预紧螺栓联合加固技术是通过研发的专用张拉设备对CFRP布施加预应力,然后将其粘贴在加固结构的表面,并采用预紧螺栓锚固粘贴后的预应力CFRP布。研发的预应力张拉设备如图1所示,最大张拉力达50 kN。预紧螺栓锚

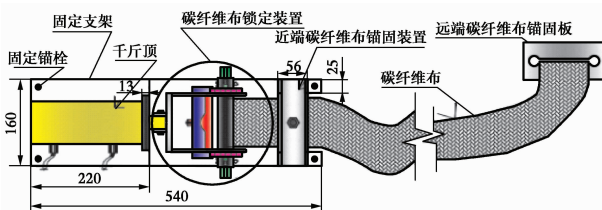


图1 CFRP布张拉设备示意图(单位:mm)

Fig. 1 Tensioning equipment schematic diagram

固装置如图2所示。

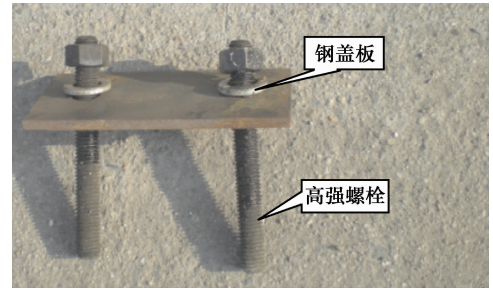


图2 预紧螺栓锚固装置

Fig. 2 Pre-screwed bolts fastener

2 试验设计

试验制作钢筋混凝土梁6根,截面尺寸为300 mm×400 mm,梁全长为6 000 mm。梁纵向主筋为2Φ18,箍筋为(8@100,架立钢筋为2Φ12,箍筋采用R235,架立钢筋和纵向主筋采用HRB335,试验梁的混凝土强度等级按C40设计。试验梁详细尺寸与钢筋构造见图3,单位为mm。

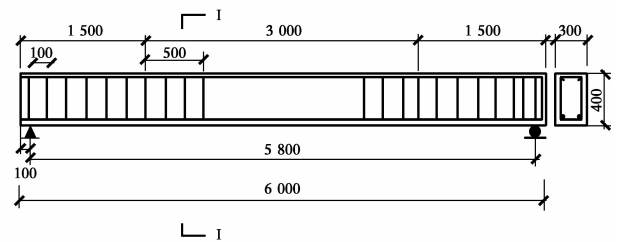


图3 试验梁钢筋构造图

Fig. 3 Configuration and reinforcement details for beam specimens

试验加载反力装置如图4所示。采用两点对称分级加载,试验测量内容包括施加荷载的大小、荷载作用下试验梁挠度大小以及裂缝宽度。施加荷载通过千斤顶下的2个压力传感器测得,挠度通过安装在支点和跨中的3个百分表测量,裂缝宽度采用F800裂缝综合测试仪测量。

6根试验梁中,1根作为参照梁(BM1),其余分为2组。第1组对完整RC混凝土梁进行加固,共5根。其中,BM2-1采用非预应力CFRP布及预紧螺栓加固(简称HB-CFRP),预紧螺栓锚固间距为60 cm;BM3、BM4、BM5-1采用预应力CFRP加固

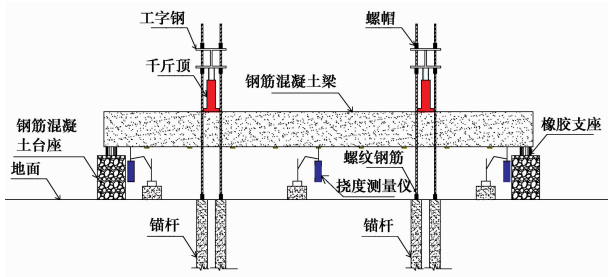


图 4 两点对称加载装置示意图

Fig. 4 Schematic representation of test set-up for specimens

(仅在端部锚固 CFRP, 简称 PRE-CFRP), 各梁施加的预应力分别为 10、14、18 kN; BM6-1 采用预应力 CFRP 布及预紧螺栓联合加固 (简称 HB-PRECFRP), CFRP 施加预应力为 18 kN, 预紧螺栓锚固间距为 60 cm。第 2 组试验梁为 BM2-1、BM5-1、BM6-1 加载破坏后的梁, 通过对其进行修复和裂缝化学灌浆处理, 并采用与之相同的加固技术及加固参数进行加固, 编号为 BM2-2, BM5-2、BM6-2。所有加固试验梁均采用 2 层 CFRP 布, 锚固螺栓直径 12 mm, 锚固深度 7 cm, 螺栓预紧力 20 kN, 钢盖板尺寸为 150 mm×70 mm×5 mm。

3 试验梁制作

相同环境条件下浇筑 6 根钢筋混凝土试验梁, 养护 28 d 后对其中 5 根试验梁采用不同的方法加固。

用磨光机将加固试验梁的梁底进行打磨, 除去梁底表面的水泥浮浆, 使梁底面平整且露出混凝土石子; 根据各梁加固设计要求放线, 标定出锚固螺栓的孔位, 采用 14 mm 的钻头钻孔至设计深度, 用专用毛刷及空压机清孔后, 在孔中注入锚固用建筑结构胶至 2/3 孔深处进行螺栓埋置, 并清理多余的结构胶, 埋置过程中应保证螺栓的垂直, 结构胶未固化前, 禁止螺栓随便碰撞摆动, 以免影响螺栓锚固质量及钢盖板的安装。

锚固螺栓的建筑结构胶完全固化后, 依次进行各试验梁的 CFRP 布加固。

对于试验梁 BM2-1, 按照表面粘贴的要求, 在梁底粘贴 2 层 CFRP 布, 当纤维表面浸渍树脂指触干燥后, 立即在螺栓锚固处涂抹建筑结构胶粘贴钢盖板, 按设计预紧力拧紧螺母并清理盖板周围多余的结构胶, 至此完成非预应力 CFRP 布及预紧螺栓加固试验梁的制作。

对于预应力 CFRP 布加固的试验梁 BM3、

BM4、BM5-1, 按照粘贴 CFRP 布的要求, 对梁底混凝土表面进行处理后, 在试验梁的一端固定张拉设备, 将配好的结构胶均匀涂抹于混凝土表面, 立即在梁的另一端采用自锁锚固钢板固定 CFRP 布 (如图 5 所示), 然后进行 CFRP 布张拉, 达到设计张拉力后, 通过张拉设备的锚固装置将 CFRP 布锚固于混凝土表面 (如图 6 所示), 用专用滚筒顺纤维方向多次滚压, 排除气泡使浸渍树脂充分浸透碳纤维布。重复上述过程张拉粘贴第 2 层 CFRP 布, 完成预应力 CFRP 布加固试验梁的制作。



图 5 CFRP 钢板端部锚固

Fig. 5 CFRP anchoring with steel plate

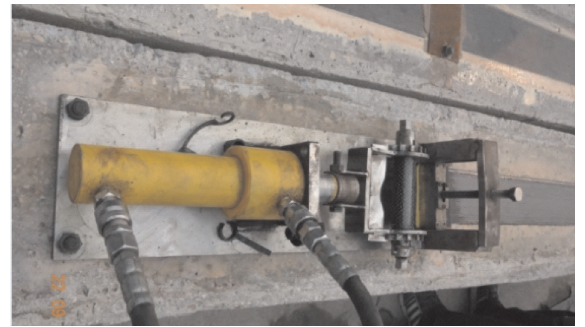


图 6 张拉设备张拉 CFRP

Fig. 6 CFRP tensoning with tensoning equipment

对于试验梁 BM6-1, 重复预应力 CFRP 布加固试验梁的制作过程, 然后与试验梁 BM2-1 一样每隔 60 cm 粘贴钢盖板并进行预紧螺栓锚固, 完成预应力 CFRP 布及预紧螺栓联合加固试验梁的制作, 如图 7 所示。



图 7 HB-PRECFRP 加固的试验梁

Fig. 7 Test beam strengthened with HB-PRECFRP

对于加载破坏后的试验梁 BM2-1、BM5-1、BM6-1 采用结构胶修复破损混凝土,并对混凝土梁裂缝进行压力化学灌浆处理,如图 8 所示。最后分别按照相应试验梁 BM2-1、BM5-1、BM6-1 的加固方法和加固参数对其加固,完成破坏后修复试验梁的加固。

各试验梁的加固参数如表 1 所示。



图 8 破坏试验梁的修复及压力灌浆

Fig. 8 Restoration and pressure grouting of failure beams

表 1 试验梁基本参数

Table 1 Description of experimental beams

试验梁编号	试验梁状态	加固方式	CFRP 层数	CFRP 宽度/mm	每层 CFRP 施加预应力/kN	锚固间距/mm	螺栓直径/mm	钢盖板尺寸	螺栓预紧力/kN
BM1	完整梁			100				150 mm×70 mm×5 mm	20
BM2-1	完整梁	HB-CFRP	2	100		600	12	150 mm×70 mm×5 mm	20
BM3	完整梁	PRE-CFRP	2	100	10		12	150 mm×70 mm×5 mm	20
BM4	完整梁	PRE-CFRP	2	100	14		12	150 mm×70 mm×5 mm	20
BM5-1	完整梁	PRE-CFRP	2	100	18		12	150 mm×70 mm×5 mm	20
BM6-1	完整梁	HB-PRECFRP	2	100	18	600	12	150 mm×70 mm×5 mm	20
BM2-2	破坏梁	HB-CFRP	2	100		600	12	150 mm×70 mm×5 mm	20
BM5-2	破坏梁	PRE-CFRP	2	100	18		12	150 mm×70 mm×5 mm	20
BM6-2	破坏梁	BH-PRECFRP	2	100	18	600	12	150 mm×70 mm×5 mm	20

4 试验材料及基本力学性能

试验梁的混凝土设计强度等级为 C40,实测混凝土立方体平均抗压强度为 41.3 MPa。试验梁所用钢筋均进行了抽样试验,基本力学性能均符合要求。CFRP 采用大连智鑫建筑新技术工程有限公司生产的碳纤维布,理论厚度为 0.167 mm,抗拉强度为 3 614 MPa,弹性模量为 2.43×10^5 MPa,极限伸长率为 1.71%。粘贴 CFRP 布采用配套智鑫牌 JGN 型碳纤维胶,锚固螺栓、粘贴钢板以及裂缝压力化学灌浆分别采用智鑫牌 JGN 型建筑结构胶及裂缝灌注胶。

5 试验过程及结果

BM1 作为参照梁,加载到 20 kN 时,试验梁跨中开始出现微裂缝;加载到 32 kN 时,跨中和加载点下方均出现数条分布均匀的垂直裂缝;继续加载到 43 kN 时,裂缝沿梁高向上发展,宽度不断加大并伴有新裂缝出现,裂缝宽度达 1.65 mm;继续施加荷载

到 65 kN 时,试验梁达到极限承载能力而破坏,跨中最大挠度为 70.39 mm。BM1 受弯破坏情况如图 9 所示。



图 9 参照梁 BM1 的破坏形式

Fig. 9 Failure mode of reference specimen BM1

试验梁 BM2-1 加载至 21 kN 时,梁底跨中附件开始出现微小裂缝;继续加载到 43 kN 时,加载点和跨中裂缝不断扩展,宽度达 0.86 mm;加载到 88 kN 时,梁下出现微弱的“啪啪”声,此时 CFRP 布开始局部剥离;当荷载施加到 100 kN 时,发现右侧加载点下梁底 CFRP 布剥离;继续加载至 110 kN,右侧剥离区域出现较大的响声,发现剥离区部分碳纤维布

发生断裂, BM2-1 梁破坏, 无法继续承受荷载。试验梁的极限荷载为 110 kN, 跨中最大挠度为 93.85 mm, BM2-1 破坏形式如图 10 所示。



图 10 HB-CFRP 加固 BM2-1 的破坏形式
Fig. 10 Failure mode of test beam BM2-1

“啪啪”声, CFRP 布开始发生局部剥离, 裂缝不断增多增大, 挠度加大; 到荷载施加到 120 kN 时, 加载点下部 CFRP 布发生断裂破坏, 跨中最大挠度为 97.49 mm, BM6-1 破坏形式如图 12 所示。



图 12 HB-PRECFRP 加固梁 BM6-1 的破坏形式
Fig. 12 Failure mode of test beam BM6-1

试验梁 BM3、BM4、BM5-1 分别加载到 32、36、43 kN 时, 梁底跨中及加载点附件开始出现微小裂缝; 当加载到 43 kN 时, 测量 BM3、BM4、BM5-1 裂缝开展宽度分别为 0.84、0.7、0.22 mm; 试验梁 BM3、BM4 荷载施加到 76 kN 时, 加载点下出现微弱的“啪啪”声, CFRP 布开始局部剥离, 同样的现象对 BM5-1 试验梁出现在 81 kN; BM3、BM4、BM5-1 分别加载到 100、104、110 kN 时, CFRP 布在张拉锚固端发生滑移、剥离破坏, 且 BM5-1 在加载点下部伴随 CFRP 布的局部断裂, 破坏时跨中最大挠度分别为 92.42、94.24、82.23 mm, 破坏形式如图 11 所示。



(a) CFRP 滑移及剥离



(b) CFRP 局部断裂

图 11 PRE-CFRP 加固梁的破坏形式
Fig. 11 Failure mode of beam strengthened with PRE-CFRP

试验梁 BM6-1 荷载施加到 43 kN 时, 试验梁底部出现微小裂缝; 荷载增加到 90 kN 时, 出现微弱的

观察试验梁 BM2-2、BM5-2、BM6-2 的加载过程, 其破坏形式分别与试验梁 BM2-1、BM5-1、BM6-1 相似, 极限承载力分别为 100、110、110 kN, 跨中最大挠度分别为 85.24、105.68、85.27 mm。试验结果汇总见表 2。

表 2 试验结果

Table 2 Test results of test beams

试验梁编号	开裂荷载/kN	CFRP 剥离荷载/kN	极限荷载/kN	跨中最大挠度/mm	破坏形式
BM1	20		65	70.39	受弯破坏
BM2-1	21	88	110	93.85	CFRP 局部断裂
BM3	32	76	100	92.42	CFRP 滑移剥离
BM4	36	76	104	94.24	CFRP 滑移剥离
BM5-1	43	81	110	82.23	CFRP 滑移剥离 局部断裂
BM6-1	43	90	120	97.49	CFRP 局部断裂
BM2-2	23	86	100	85.24	CFRP 局部断裂
BM5-2	32	80	110	105.68	CFRP 滑移剥离 局部断裂
BM6-2	32	88	110	85.27	CFRP 局部断裂

6 试验结果分析

6.1 试验梁开裂荷载及裂缝开展分析

根据试验结果表 2 及图 13 可以看出, 预应力 CFRP 布加固梁的开裂荷载比未加固的梁 BM1 和非预应力加固梁 BM2-1、BM2-2 均有不同程度的提高, 且施加的预应力越大, 开裂荷载提高越明显(如 BM5-1、BM6-1 的开裂荷载比 BM1 提高 2.15 倍), 而非预应力 CFRP 布及螺栓加固梁 BM2-1、BM2-2

与未加固梁 BM1 开裂荷载基本相等。可见,对 CFRP 布施加预应力能有效抑制混凝土梁的开裂。

施加预应力大小相等的梁(BM5-1 与 BM6-1, 或 BM5-2 与 BM6-2),虽然其锚固方式不同,但其开裂荷载基本相等,可见,预紧螺栓锚固 CFRP 布的加固方式对加固梁的开裂荷载没有影响。此外,对于施加相同的预应力,加固完整梁(BM5-1、BM6-1)的开裂荷载比加固破坏梁(BM5-2、BM6-2)大 34%,说明加固梁的开裂荷载不仅与预应力大小有关,而且梁加固前承载破坏状况对加固后梁的开裂荷载有影响。

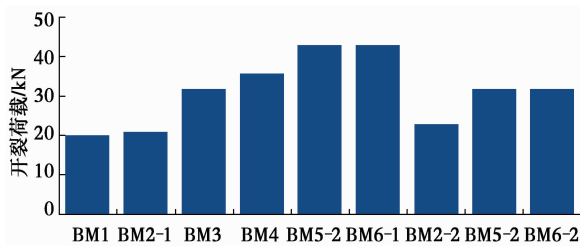


图 13 试验梁开裂荷载柱状图

Fig. 13 Histogram of test beam cracking load

观察 BM1 和 BM2-1 加载过程中裂缝开展情况,其开裂荷载虽基本相等(大约 20 kN 左右),但是,当加载到 32 kN 时, BM1 裂缝宽度为 0.8 mm,而 BM2 宽度为 0.64 mm;加载到 43 kN 时, BM1 裂缝宽度为 1.65 mm, BM2-1 宽度为 0.86 mm,其裂缝开展宽度仅为 BM1 的 55%。说明预紧螺栓锚固 CFRP 布能够有效抑制 RC 梁裂缝宽度的发展。

比较加固方式相同、施加预应力大小不同的试验梁 BM3、BM4、BM5-1 的裂缝开展可知,施加预应力的大小对裂缝的开展具有明显的影响。当加载到 43 kN 时, BM3、BM4、BM5-1 裂缝开展宽度分别为 0.84、0.7、0.22 mm,与参照梁 BM1 相比, BM3、BM4、BM5-1 裂缝宽度分别减小了 49%、58%、87%。可见, CFRP 布施加预应力越大,相同荷载作用下加固梁裂缝开展宽度越小。

6.2 加固试验梁界面剥离荷载分析

CFRP 布与混凝土界面的剥离荷载为加载试验过程中梁底开始出现微弱的“啪啪”声并伴有 CFRP 布的局部剥离时测量的加载值。根据试验结果表 3 及图 14 可以看出,预紧螺栓联合加固的试验梁 BM2-1、BM2-2(CFRP 布不施加预应力)和 BM6-1、BM6-2(CFRP 布施加预应力),其剥离荷载明显高于仅端部锚固的预应力 CFRP 布加固试验梁(BM3、

BM4、BM5-1、BM5-2),说明预紧螺栓锚固措施能够有效抑制 CFRP 布的剥离;观察 BM3、BM4、BM5-1 可以看出,施加较大的预应力的试验梁 BM5-1 剥离荷载略有提高,说明施加预应力的大小对界面的剥离荷载有影响;因此,预应力 CFRP 布及预紧螺栓联合加固技术能够有效抑制 CFRP 布与混凝土界面的剥离,提高界面粘结强度。

另外,比较 BM2-2 与 BM2-1、BM5-2 与 BM5-1、BM6-2 与 BM6-1 三组试验梁的剥离荷载可以看出,每组试验梁的剥离荷载几乎相等,说明试验梁以前承载破坏状况对修复后加固梁的界面剥离荷载没有影响。

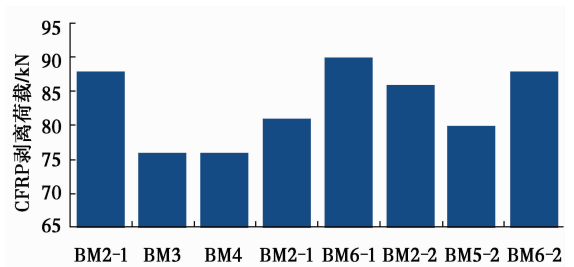


图 14 试验梁剥离荷载柱状图

Fig. 14 Histogram of test beam debonding load

6.3 试验梁极限能力分析

根据试验结果表 3 可以看出,加固试验梁的承载能力比参照梁 BM1 均有提高,但提高的幅度有所不同。其中,预应力 CFRP 布及预紧螺栓联合加固的完整试验梁 BM6-1 极限荷载提高 85%,非预应力 CFRP 布及预紧螺栓加固的完整试验梁 BM2-1 极限荷载提高 69%,仅端部锚固的不同预应力 CFRP 布完整试验梁 BM3、BM4、BM5-1 极限荷载分别提高 54%、60%、69%;对于加固的破坏梁来说,非预应力 CFRP 布及预紧螺栓加固的破坏试验梁 BM2-2 极限荷载提高 54%,仅端部锚固的预应力 CFRP 布破坏试验梁 BM5-2 极限荷载均提高 69%,预应力 CFRP 布及预紧螺栓联合加固的破坏试验梁 BM6-2 极限荷载提高 69%。可见,预应力 CFRP 布及预紧螺栓联合加固技术能够极大的提高加固梁的极限承载能力;CFRP 施加预应力的大小对提高加固梁承载能力有贡献;对加载破坏后重新修复加固的试验梁,其极限承载能力基本等于或略低于相应加固完整梁的极限承载能力。

从加固试验梁的破坏形式看,对于仅端部锚固的预应力 CFRP 布加固试验梁,当施加预应力较小

时(BM3、BM4),极限破坏表现为 CFRP 布的剥离和滑移(见图 11(a)),当施加预应力较大时(BM5-1、BM5-2),极限破坏表现为 CFRP 布的剥离、滑移和局部断裂(见图 11(b));预紧螺栓锚固的试验梁(包括预应力和非预应力加固的梁),极限破坏时均表现为 CFRP 布的局部剥离及断裂(见图 10 及图 12)。因此,预紧螺栓锚固 CFRP 布能够有效防止 CFRP 的完全剥离脆性破坏,有助于 CFRP 强度的利用。另外,对 CFRP 布施加较大的预应力也有利于其高性能的充分发挥。

6.4 试验梁荷载变形特征分析

试验梁的荷载-跨中挠度曲线如图 15 所示。

从图 15(a)可以看出,参照梁 BM1 符合钢筋混凝土适筋梁的弹塑性破坏特征,其在加载过程中分为 3 个工作阶段:第 1 阶段为混凝土开裂以前的未裂阶段;第 2 阶段为混凝土开裂后至钢筋屈服前的

裂缝阶段;第 3 阶段为钢筋开始屈服至截面破坏的破坏阶段。

观察图 15(b)~(k),根据 CFRP 布加固试验梁的总体刚度变化,其荷载-挠度曲线分为 4 个阶段:第 1 阶段为混凝土开裂以前的未裂阶段;第 2 阶段为混凝土开裂后至钢筋屈服前的裂缝阶段;第 3 阶段为钢筋开始屈服至 CFRP 布开始剥离阶段;第 4 阶段为 CFRP 布初始剥离至试验梁截面破坏的破坏阶段。

可见,CFRP 布加固的试验梁与参照梁的受力特征明显不同,钢筋混凝土参照梁 BM1 的受力特征近似认为理想弹塑性,而 CFRP 布加固的钢筋混凝土试验梁的具有屈服后强化的弹塑性受力特征。CFRP 布加固试验梁屈服时的荷载高于参照梁,且增大预应力及采用预紧螺栓锚固 CFRP 布时,其屈服荷载显著提高。

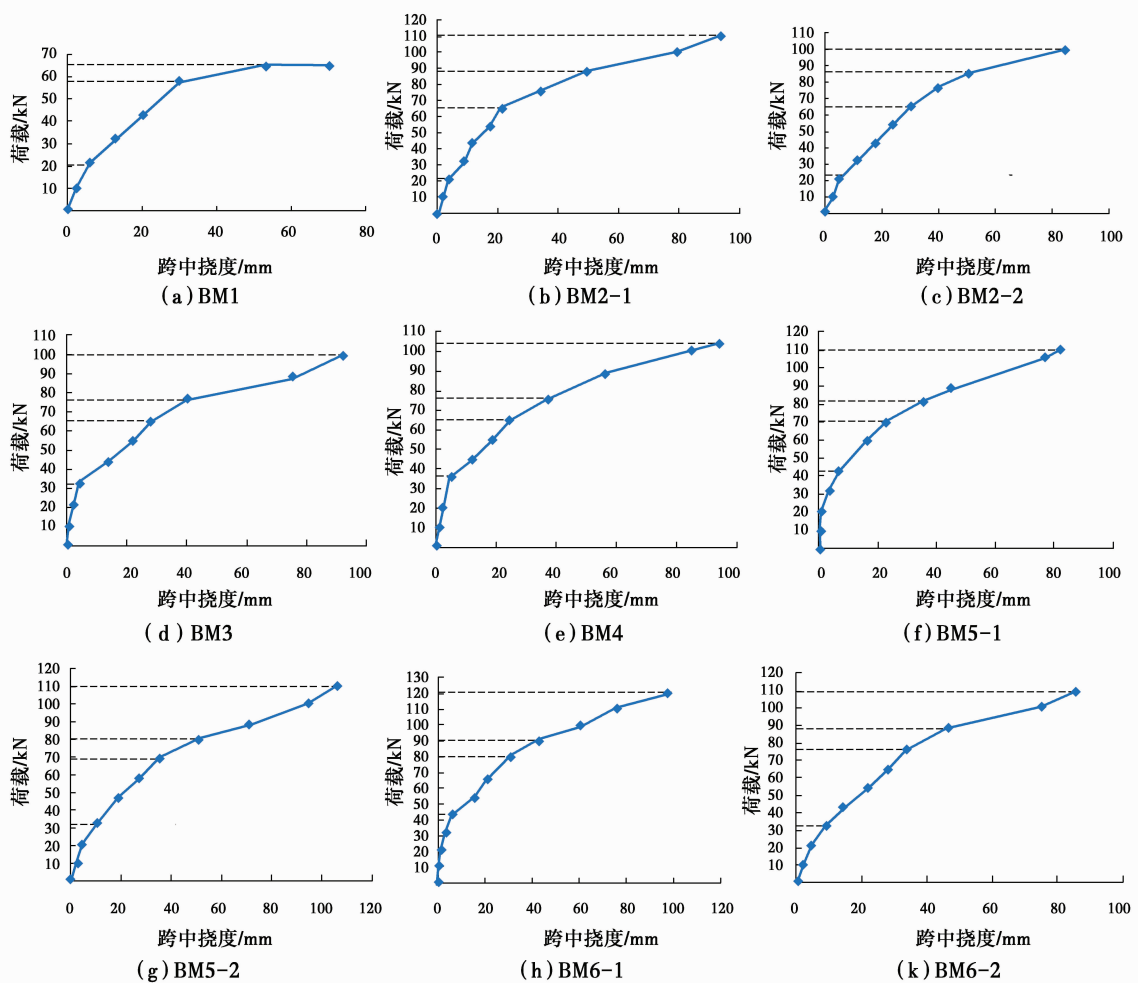


图 15 试验梁弯矩-跨中挠度曲线

Fig. 15 Moment-midspan deflection of test beams

7 试验梁的刚度分析

对于钢筋混凝土简支梁,荷载效应 M 与跨中截面挠度 f 的近似计算公式为^[16]

$$f = \frac{5}{48} \cdot \frac{Ml^2}{B} \quad (1)$$

根据荷载-跨中挠度曲线图 15,考虑到加固梁施加预应力产生的上挠度的影响,采用式(1)分析计算试验梁各工作阶段的等效截面的抗弯刚度 B 如表 3 所示。

表 3 试验工作阶段刚度
Table 3 Test beams rigidity

试验梁 编号	试验梁各工作阶段刚度 $B(\text{kN} \cdot \text{m}^2)$			
	1	2	3	4
BM1	18 548	12 138	2 269	
BM2-1	27 504	16 611	9 824	5 967
BM2-2	19 359	11 909	9 417	5 755
BM3	38 347	17 985	10 191	5 503
BM4	38 399	19 353	11 315	6 220
BM5-1	41 120	19 450	12 610	7 551
BM5-2	15 780	10 902	8 505	5 403
BM6-1	45 164	18 775	11 427	7 015
BM6-2	18 316	13 184	10 009	6 385

由表 3 可以看出,CFRP 布加固完整试验梁在第 1 及第 2 工作阶段的刚度比相应参照梁 BM1 均有提高:在第 1 阶段,即混凝土开裂以前的未裂阶段,BM2-1、BM3、BM4、BM5-1、BM6-1 的刚度比参照梁 BM1 提高了大约 48%、106%、107%、121%、143%,在第 2 阶段,即混凝土开裂后至钢筋屈服前的裂缝阶段,BM2-1、BM3、BM4、BM5-1、BM6-1 的刚度比参照梁 BM1 提高了大约 36%、47%、58%、59%、54%,预应力越大,加固梁的刚度提高越大,说明施加预应力,对加固梁钢筋屈服以前的正常使用工作阶段的刚度影响显著;在第 3 阶段,即钢筋开始屈服至 CFRP 布开始剥离阶段,除 BM5-1 试验梁刚度略高于参照梁 BM1 在第 2 阶段的刚度外,其余均都低于参照梁 BM1 在第 2 阶段的刚度;加固试验梁在最后工作阶段的刚度都略高于参照梁 BM1 在最后阶段的刚度,且随预应力增大,试验梁截面刚度也略有提高。

另外,对比 BM2-1 与 BM2-2、BM5-1 与 BM5-2、BM6-1 与 BM6-2 三组试验梁各工作阶段的刚度可以看出,对于破坏后修复再重新加固的试验梁,其刚度基本能够达到参照梁 BM1 的刚度,但远远达不到相应的加固完整梁的刚度水平。

8 加固试验梁承载力安全储备分析

根据《混凝土结构设计规范》^[17] 确定参照梁 BM1 设计承载力为 $54 \text{ kN} \cdot \text{m}$,其他加固梁的设计承载力为 $82 \text{ kN} \cdot \text{m}$,各试验梁的实际极限承载力试验结果见表 2,用式(2)计算承载力储备指标^[18],如表 4 所示。

$$K_F = \frac{F_u}{F_d} \quad (2)$$

式中: K_F 承载力储备指标; F_u 结构的极限承载力; F_d 结构设计承载力。

表 4 试验梁的承载力储备指标
Table 4 Safety indices of test beams

试验梁 编号	极限弯矩/ ($\text{kN} \cdot \text{m}$)	极限荷 载/ kN	设计弯矩/ ($\text{kN} \cdot \text{m}$)	设计荷 载/ kN	承载力 储备指标 K_F
BM1	91	65	54	39	1.69
BM2-1	154	110	82	59	1.88
BM3	140	100	82	59	1.71
BM4	146	104	82	59	1.78
BM5-1	154	110	82	59	1.88
BM6-1	168	120	82	59	2.05
BM2-2	140	100	82	59	1.71
BM5-2	154	110	82	59	1.88
BM6-2	154	110	82	59	1.88

由表 4 可以看出,试验梁承载力储备指标均大于 1.5,满足结构设计承载力安全储备要求^[18]。预应力 CFRP 布及预紧螺栓联合加固的试验梁承载力安全储备最大,且由于 CFRP 布加固试验梁具有屈服后强化的弹塑性受力特征(图 15),因此,所有加固试验梁的承载力安全储备都高于近似理想弹塑性特征的参照梁 BM1。此外,增大预应力,加固试验梁的承载力安全储备也有所提高。

9 结 论

针对预应力 CFRP 布及预紧螺栓联合加固技

术,采用自行研发的 CFRP 布张拉设备及螺栓锚固装置对试验梁进行加固,通过加载对比试验,分别研究采用不同预应力及不同锚固方式加固的完整试验梁及破坏后修复试验梁的承载性状。由试验结果分析,可得到如下结论:

1) 预应力 CFRP 布加固 RC 梁能够有效抑制裂缝的开裂和开展;预紧螺栓锚固 CFRP 布虽不能提高加固 RC 梁的开裂荷载,但能够抑制裂缝的开展。因此,预应力 CFRP 布及预紧螺栓联合加固技术对提高 RC 梁耐久性非常有利。

2) 预应力 CFRP 布及预紧螺栓联合加固技术能够有效抑制 CFRP 与混凝土界面的剥离,提高界面粘结强度。

3) 预紧螺栓锚固 CFRP 布能够有效防止 CFRP 的完全剥离脆性破坏,有助于 CFRP 强度的利用;对 CFRP 布施加较大的预应力有利于其高强性能的充分发挥。因此,预应力 CFRP 布及预紧螺栓联合加固是一种更可靠的技术,能够极大地提高加固梁的极限承载能力,使加固 RC 梁具有较大的承载能力安全储备。

4) CFRP 布加固的钢筋混凝土试验梁的荷载-跨中挠度曲线具有屈服后强化的弹塑性受力特征,且增大预应力及采用预紧螺栓锚固 CFRP 布时,其屈服荷载显著提高。

5) CFRP 布加固的 RC 梁,在受拉钢筋屈服以前的工作阶段,其刚度提高显著,在 CFRP 布开始剥离以后,其刚度显著降低;增大预应力,加固梁的刚度提高。

6) 对于破坏后修复再重新加固的试验梁,其刚度基本能够达到原完整梁的刚度,其极限承载能力基本等于或略低于相应加固完整梁的极限承载能力;试验梁以前承载破坏状况对修复后加固梁的界面剥离荷载没有影响,但对加固后梁的开裂荷载有影响。

参考文献:

- [1] 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 L P, FENG P. Applications and development of fiber-reinforced polymer in engineering structures [J]. China Civil Engineering Journal, 2006, 39(3):24-36. (in Chinese)
- [2] 岳清瑞. 我国碳纤维(CFRP)加固修复技术研究应用现

状与展望[J]. 工业建筑, 2000, 30(10):23-26.

- YUE Q R. Present status of research and application of strengthening and repairing technology with carbon fibre reinforced plastics (CFRP) and its outlook in China [J]. Industrial Construction, 2000, 30(10):23-26. (in Chinese)
- [3] SASAHARA H, KIKUMA T, KOYASU R, et al. Surface grinding of carbon fiber reinforced plastic (CFRP) with an internal coolant supplied through grinding wheel [J]. Precision Engineering, 2014, 10(38):775-782.
- [4] LEE H, OHSAWA I, TAKAHASHI J. Effect of plasma surface treatment of recycled carbon fiber on carbon fiber-reinforced plastics (CFRP) interfacial properties [J]. Applied Surface Science, 2015, 328:241-246.
- [5] 汪胜义. 碳纤维复合材料(CFRP)在桥梁工程中的应用及前景[J]. 重庆交通学院学报, 2005, 24(1):30-32.
WANG S Y. The application and future of carbon fiber reinforced polymer in bridge structure [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University, 2005, 24(1):30-32. (in Chinese)
- [6] 李松辉,赵国藩,王松根. 粘贴碳纤维布加固钢筋混凝土预裂梁试验研究[J]. 土木工程学报, 2005, 28(10):88-92.
LI S H, ZHAO G F, WANG S G. Experimental study on pre-cracked RC beams strengthened with CFRP [J]. China Civil Engineering Journal, 2005, 28(10):88-92. (in Chinese)
- [7] YUN Y C, WU Y. F, TANG W C. Performance of FRP bonding systems under fatigue loading [J]. Engineering Structures, 2008, 30(11):3129-3140.
- [8] ALAM M I, FAWZIA S, LIU X M. Effect of bond length on the behaviour of CFRP strengthened concrete-filled steel tubes under transverse impact [J]. Composite Structures, 2015, 132:898-911.
- [9] BURNINGHAM C A, PANTELIDES C P, REAVELEY L D. Repair of reinforced concrete deep beams using post-tensioned CFRP rods [J]. Composite Structures, 2015, 125:256-265.
- [10] SOBUE H R, AHMED E, SUTAN N M, et al. Bending and time-dependent responses of RC beams strengthened with bonded carbon fiber composite laminates [J]. Construction and Building Materials, 2015, 29(4):597-611.
- [11] TAHSIRI H, SEDEHI O, KHALOO A, et al.

- Experimental study of RC jacketed and CFRP strengthened RC beams [J]. *Construction and Building Materials*, 2015, 95 (10): 476-485.
- [12] 杨勇新,李庆伟. 预应力碳纤维布加固混凝土结构技术 [M]. 北京:化学工业出版社,2010.
- YANG Y X, LI Q W. Technology of strengthening concrete structures with carbon fiber reinforced polymer sheets [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2010. (in Chinese).
- [13] 李凤兰,侯维玲,肖文,等. 预应力 CFRP 加固锈蚀钢筋混凝土梁试验研究[J]. *工程抗震与加固改造*, 2013, 35(3): 90-96.
- LI F L, HOU W L, XIAO W, et al. Experiment study on corroded reinforced concrete beams strengthened with prestressed CFRP sheets [J]. *Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting*, 2013, 35(3): 90-96. (in Chinese).
- [14] GUAN Y H, JIANG B S, SONG X G. Experimental study and numerical simulation on bonding behavior of the new HB-FRP strengthening technology [J]. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 2012, 26(2):220-227.
- [15] 管延华,蒋斌松,宋修广. FRP-螺栓联合加固梁抗弯试验研究[J]. *中国矿业大学学报*,2011, 40(2):202-206.
- GUAN Y H, JIANG B S, SONG X G. Experimental study of flexural capacity on RC beams strengthened with hybrid bonding of FRP [J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2011, 40(2):202-206. (in Chinese)
- [16] 邵旭东. 桥梁工程[M]. 北京:人民交通出版社,2014.
- SHAO X D. Bridge Engineering [M]. Beijing: China Communications Press, 2014. (in Chinese)
- [17] 中华人民共和国住房和城乡建设部:混凝土结构设计规范:GB 50010—2010[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2010.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for design of concrete structure:GB 50010—2010[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010.
- [18] 叶列平,冯鹏,林旭川,等. 配置 FRP 的结构构件的安全储备指标及分析[J]. *土木工程学报*,2009, 42(9): 21-31.
- YE L P, FENG P, LIN X C, et al. Analysis of safety margin indices for structural member with FRP [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2009, 42(9):21-31(in Chinese).

(编辑 胡英奎)