

文章编号:1673-2049(2007)04-0070-04

碳纤维板加固 RC 梁试验

黄平明, 邹兰林, 王 达

(长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064)

摘要:以11片碳纤维板加固梁模型为基础,分析了在改变碳纤维板黏贴方式、混凝土强度以及构件剪跨比等因素的条件下梁的应力-应变规律,研究了碳纤维板对梁抗弯承载力的影响。试验结果表明碳纤维板对不同加固方案梁的承载力影响程度各不相同:梁端部有良好锚固措施时,其极限承载力显著提高;端部没有锚固措施时,其极限承载力主要与碳纤维板锚固长度有关,锚固长度越长,试件极限承载力提高也越显著;剪跨比相对较大和配筋率相对较小的加固梁极限承载力提高幅度更加显著。

关键词:碳纤维板;钢筋混凝土梁;抗弯加固;极限承载力

中图分类号:TU378.2

文献标志码:A

Experiment of RC Beam Strengthened with CFRP Plates

HUANG Ping-ming, ZOU Lan-lin, WANG Da

(School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

Abstract: Based on the experiment of 11 models of RC beams with CFRP plates, the regularity of stress and strain of beams with different paste formats, concrete intensity and shear-span ratio were studied, and flexural capacities of beams strengthened with CFRP plates were investigated. The experimental results show that ultimate bearing capacities of specimens vary with different strengthened methods; ultimate bearing capacities of RC beams with CFRP plates end anchorage have been strengthened remarkably; the beams have greater capacity with more anchorage length for those without anchorage; ultimate bearing capacities enhance more prominent for those specimens which have high shear-span ratio and low ratio of reinforcement.

Key words: CFRP plate; RC beam; flexural strengthening; ultimate bearing capacity

0 引言

混凝土结构由于设计失误、施工质量差以及荷载等级增加等原因而导致其承载力不足,需要进行加固补强以保证结构的正常使用。传统的加固方法大都存在自重大、抗腐蚀性能差、施工复杂且周期长等缺点^[1]。作为一种新兴的加固材料,碳纤维以其优异的性能一出现就成为土木工程界加固研究的热

点^[2]。对于碳纤维布的加固,各国学者已经做了大量的研究^[3-4],使得碳纤维布在实际工程中得到了广泛的应用。作为碳纤维布的后续产品,碳纤维板是预拉成型的片材,能够以较大截面积供应,在加固施工时可以免除碳纤维布材料复合成型固化阶段,减少了多次重复的空中黏贴工序,利用效率高,施工方便,有着更加广泛的应用前景^[5-10]。但是,目前碳纤维板的应用还比较少,特别在桥梁方面的应用基本

收稿日期:2007-09-07

基金项目:湖北汉宜高速公路沥青加铺工程指挥部项目(HYJP-技-003)

作者简介:黄平明(1965-),男,湖北当阳人,教授,博士生导师,工学博士,E-mail:hpming@vip.sina.com。

还处于起步阶段,而且,实际应用中碳纤维板都是套用碳纤维布和钢板加固的理论,而碳纤维板有其不同于碳纤维布和钢板的独特性,直接套用碳纤维布和钢板加固的理论不能真正反映碳纤维板的加固特性。基于此现状,笔者以碳纤维板作为主要加固材料进行比较系统的试验研究,分析碳纤维板黏贴方式、混凝土强度以及构件剪跨比等因素对加固效果的影响。

1 试验设计

1.1 试件材料

试件采用 C25 和 C35 两种规格的混凝土和 3 种直径的钢筋,实测材料力学性能指标见表 1、2;加固材料采用成都亿通达实业发展有限公司提供的 YTD-CF-120 型碳纤维板和中国科学院大连化学物理研究所研制的 JGN-T 型建筑结构加固胶,其力学性能指标见表 3、4。

表 1 钢筋力学性能指标

Tab. 1 Indexes of Mechanical Properties of Rebars

| 直径/mm | 极限强度/MPa | 屈服强度/MPa | 弹性模量/MPa |
|-------|----------|----------|------------|
| 10.0 | 486.74 | 340.35 | 188 564.58 |
| 8.0 | 454.65 | 322.19 | 224 015.31 |
| 6.8 | 496.18 | 342.38 | 182 939.45 |

表 2 混凝土力学性能指标

Tab. 2 Indexes of Mechanical Properties of Concretes

| 标 号 | 立方体强度/MPa | 轴心抗压强度/MPa | 弹性模量/MPa |
|-----|-----------|------------|----------|
| C25 | 28.23 | 19.76 | 30 100 |
| C35 | 35.89 | 25.12 | 32 000 |

表 3 碳纤维板的力学性能指标

Tab. 3 Indexes of Mechanical Properties of CFRP Plates

| 型 号 | 设计厚度/ mm | 抗拉强度/ MPa | 弹性模量/ MPa | 断裂伸长率/ % |
|------------|-------------|--------------|--------------|-------------|
| YTD-CF-120 | 1.2 | 2 800 | 165 000 | 1.7 |

表 4 加固胶力学性能指标

Tab. 4 Indexes of Mechanical Properties of Adhesive

| 型 号 | 拉伸剪切 强度/MPa | 弹性模量/ MPa | 黏结拉伸 强度/MPa | 压缩强度/ MPa |
|-------|----------------|--------------|----------------|--------------|
| JGN-T | 18 | 2 000 | 3 | 80 |

1.2 试验方案

该试验采取两点对称逐级加载方案,每级加载 5 kN。试验时在跨中和两支点设挠度测点,以观测构件挠度的变化;在跨中截面一侧按 2 cm 间距黏贴应变片,以观测应变沿截面高度分布情况;在跨中截面主拉钢筋和碳纤维板上黏贴应变片,以观测在各级荷载作用下钢筋和碳纤维板的应变,同时在碳纤

维板端部黏贴应变片观测端部应变变化。具体模型尺寸、黏贴方式见图 1。

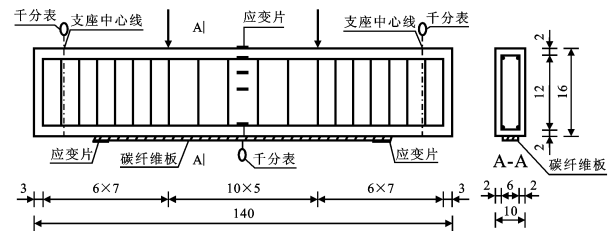


图 1 混凝土梁模型构造(单位:cm)

Fig. 1 Structure of RC Beam Model(Unit:cm)

11 片钢筋混凝土梁编号为 R-1~R-11,其中梁 R-1~R-3 分别为对比梁,梁 R-4~R-11 分别为采取不同加固方案的加固梁,具体加固方案见表 5。

表 5 混凝土梁模型加固方案

Tab. 5 Strengthened Scheme of RC Beam Models

| 梁 编 号 | 混凝土 标号 | 配筋率/ % | 剪跨比 | 锚固措施 | 碳纤维板 长度/cm |
|-------------|-----------|-----------|------|----------|---------------|
| R-1 | C25 | 0.98 | 2.18 | | |
| R-2 | C35 | 0.98 | 2.18 | | |
| R-3 | C25 | 0.79 | 2.18 | | |
| R-4 | C25 | 0.98 | 2.18 | 两端 U 形锚固 | 110 |
| R-5 | C25 | 0.98 | 2.18 | 两端 U 形锚固 | 110 |
| R-6 | C35 | 0.98 | 2.18 | 两端 U 形锚固 | 110 |
| R-7 | C25 | 0.79 | 1.88 | 两端 U 形锚固 | 110 |
| R-8 | C25 | 0.79 | 2.18 | 两端 U 形锚固 | 110 |
| R-9 | C25 | 0.98 | 2.18 | 两端不锚固 | 110 |
| R-10 | C25 | 0.98 | 2.18 | 两端不锚固 | 90 |
| R-11 | C25 | 0.98 | 2.18 | 两端不锚固 | 70 |

1.3 试验过程观测及破坏形态

对比梁 R-1 和 R-2 发生典型的弯曲破坏。当荷载加到 15 kN 时,构件开始出现微裂缝,宽度约为 0.07 mm,随着荷载增加,裂缝条数增多,宽度增大;当荷载达到 45 kN 时,钢筋开始屈服,荷载继续增加,挠度和裂缝快速增大;当荷载加到 56 kN 时,构件发生破坏。

对比梁 R-3 配筋率较小,发生少筋梁脆性破坏。当加载到 10 kN 时,构件即出现裂缝,而且裂缝宽度发展较快;当加载到 25 kN 时钢筋屈服,荷载达到 28 kN 时构件破坏。

加固梁 R-4 和 R-5 在荷载加到 20 kN 时出现裂缝,随后裂缝逐渐增多,但宽度保持比较细小,裂缝发展缓慢。随着荷载增加,碳纤维板受拉绷紧而发出声响,当加载到 80 kN 时钢筋屈服,随后应变增加较快,当继续加载到 90 kN 时应变增加又趋于缓和,荷载达到 100 kN 时,碳纤维板出现部分纤维拉断,

受压区混凝土也相继出现压碎现象。随后荷载继续增加,加固梁完全破坏,破坏时可以看见两端锚固区碳纤维板被拉产生滑移,其破坏模式如图2(a)、(b)所示。

加固梁 R-6 在荷载达到15 kN时出现裂缝,荷载达到100 kN时发生碳纤维板被拉断而破坏。破坏时裂缝沿梁纵向均匀分布,碳纤维板端部锚固区有被拉滑移的现象,而且锚固用的碳纤维布也被拉剥离,如图 2(c)所示。

加固梁 R-7 在荷载加到10 kN时出现裂缝,加载到35 kN时,钢筋屈服,应变快速增加,随着荷载继续增加,应变增加又开始变缓;当加载到50 kN时,碳纤维板在裂缝处发生剥离,最后发生剥离破坏,破坏模式如图 2(d)所示。

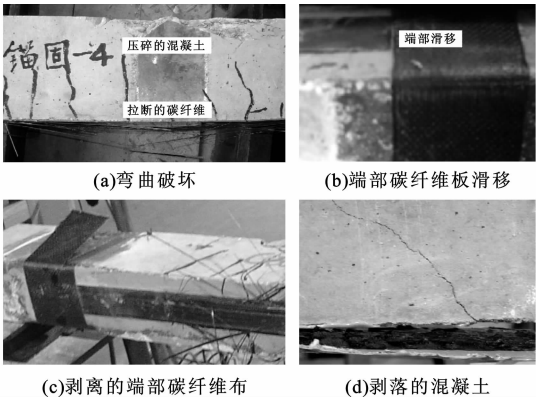


图 2 构件破坏模式

Fig. 2 Failure Modes of Members

加固梁 R-8 在荷载加到 10 kN 时出现裂缝,75 kN时发生弯曲破坏。在加载过程中,随着荷载增大,碳纤维板受拉绷紧而发出声响,随后出现部分纤维被拉断,跨中出现 1 条较宽裂缝,随后碳纤维板在裂缝处剥落,混凝土裂缝急剧发展,破坏时受压区混凝土被压碎。

加固梁 R-9 在 15 kN 荷载作用下出现裂缝,荷载加到 60 kN 时,右端碳纤维板突然剥离,图 3 显示右端碳纤维板应力逐渐降为 0。随着碳纤维板剥离到加载截面处,试验梁也在加载截面处被竖直剪断而破坏。

加固梁 R-10 在15 kN荷载作用下出现裂缝,荷载加到35 kN时碳纤维板两端同时开始剥离破坏,图 4 显示两端碳纤维板应力快速下降,直至荷载加到50 kN时,构件完全破坏。

加固梁 R-11 在荷载加到10 kN时出现裂缝,荷载加到38 kN时一端发生碳纤维板黏结破坏。碳纤维板剥离时,将碳纤维板与钢筋之间的混凝土块剥

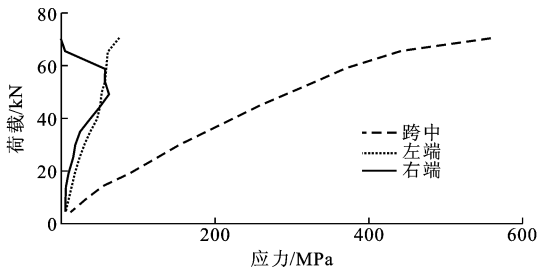


图 3 梁 R-9 碳纤维板荷载-应力曲线

Fig. 3 Load and Stress Curves of CFRP Plates of Beam R-9

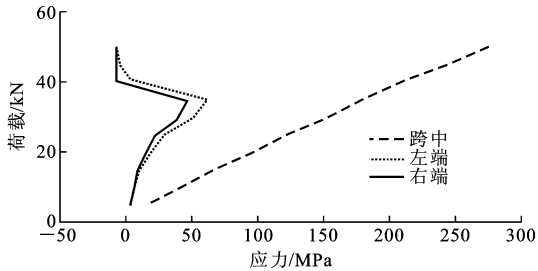


图 4 梁 R-10 碳纤维板荷载-应力曲线

Fig. 4 Load and Stress Curves of CFRP Plates of Beam R-10

离下来。

2 试验结果分析

梁 R-1~R-11 试验主要观测值见表 6。由表 6 可知,端部有良好锚固措施的加固梁的极限承载力

表 6 试验结果

Tab. 6 Experimental Results

| 梁 编号 | 极限荷载 | | 破坏特征 |
|---------|--------|--------|---------------------------|
| | 试验值/kN | 提高幅度/% | |
| R-1 | 56 | | 钢筋屈服后,混凝土压碎 |
| R-2 | 56 | | 钢筋屈服后,混凝土压碎 |
| R-3 | 28 | | 钢筋屈服后,立即发生少筋梁脆性破坏 |
| R-4 | 102 | 82.1 | 碳纤维板拉断,混凝土压碎,端部碳纤维板滑移 |
| R-5 | 101 | 80.3 | 碳纤维板拉断,混凝土压碎,端部碳纤维板滑移 |
| R-6 | 102 | 80.3 | 碳纤维板拉断,端部锚固脱落 |
| R-7 | 50 | 78.6 | 碳纤维板剥离,在锚固区碳纤维板被拉滑移 |
| R-8 | 75 | 167.8 | 钢筋屈服后,碳纤维板拉断,混凝土压碎,发生剥离破坏 |
| R-9 | 75 | 33.9 | 一端碳纤维板剥落,构件垂直剪断 |
| R-10 | 50 | -10.7 | 两端碳纤维板同时剥落,发生剥离破坏 |
| R-11 | 38 | -32.1 | 一端碳纤维板剥落,并拉下保护层混凝土 |

得到了较大幅度的提高。其主要原因是锚固措施使得碳纤维板高强抗拉性能得以发挥:一方面,碳纤维板作为高强度的结构材料本身直接协同钢筋参与受力,提高构件承载力;另一方面,碳纤维板作为功能性材料控制裂缝开展,改善裂缝分布,维持梁的整体性,间接改善了梁的受力特性,从而提高了梁的承载力,图 5(a)也直观地显示加固梁承载力远远高于对比梁。而没有锚固措施的加固梁都发生碳纤维板剥离破坏,其承载力提高离散性较大,这主要还与有效锚固长度有关。对于有足够锚固长度的加固构件,剥离出现较晚且缓慢进行,加固构件承载力有一定的提高;对于锚固长度不够的构件,剥离出现较早且

呈现脆性破坏,剥离在瞬间完成。在碳纤维板发生剥离的瞬间出现荷载转移,原来由碳纤维板承受的荷载突然转移到混凝土构件上,混凝土构件本身突然受此瞬间冲击力而破坏,出现负效应。从图 5(b)可以看出,梁 R-9 承载力有所提高,而梁 R-10 和 R-11 都出现承载力降低现象。剪跨比对构件的影响与锚固长度一致,剪跨比越小,相应的锚固长度也越短,承载力也越低,即加固对剪跨比大的构件承载力提高更加显著,如图 5(c)所示。该试验中混凝土强度对加固效果影响较小,主要是由于所有构件破坏都由碳纤维板控制,所以混凝土强度的影响没有完全反映出来。由图 5(d)可以直观地看出,加固对低配筋率构件承载力提高更加显著,但构件本身的承载能力并不高。

3 结 语

(1)在有足够锚固的前提下,黏贴碳纤维板能够显著提高构件的抗弯能力。

(2)在无锚固措施的情况下,加固梁都发生碳纤维板剥离破坏,破坏时碳纤维板还处于低应力状态而造成材料浪费,同时,因为此类破坏是脆性的、突发的,危害性比较大,在实际工程中应采取必要的锚固措施避免其发生。实际锚固有困难时应尽量保证足够的锚固长度,延缓剥离破坏出现,锚固长度越长,加固效果越好。

(3)混凝土强度对承载力影响不明显。

(4)碳纤维板加固对低配筋率构件极限承载力提高幅度更大,但构件本身承载能力并不高。

参考文献:

References:

[1] CECS 146:2003,碳纤维片材加固混凝土结构技术规范[S].
CECS 146: 2003, Technology Specification of RC Structure Strengthened with CFRP Sheets[S].
[2] 黄慧明,易伟建. 粘贴碳纤维片材加固钢筋混凝土梁正截面承载力试验研究[J]. 湖南大学学报:自然科学版,2001,28(增1):121-126.
HUANG Hui-ming, YI Wei-jian. Experiment Study About Flexural Behavior of RC Beams Strengthened with CFRP Laminates[J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2001, 28(S1): 121-126.

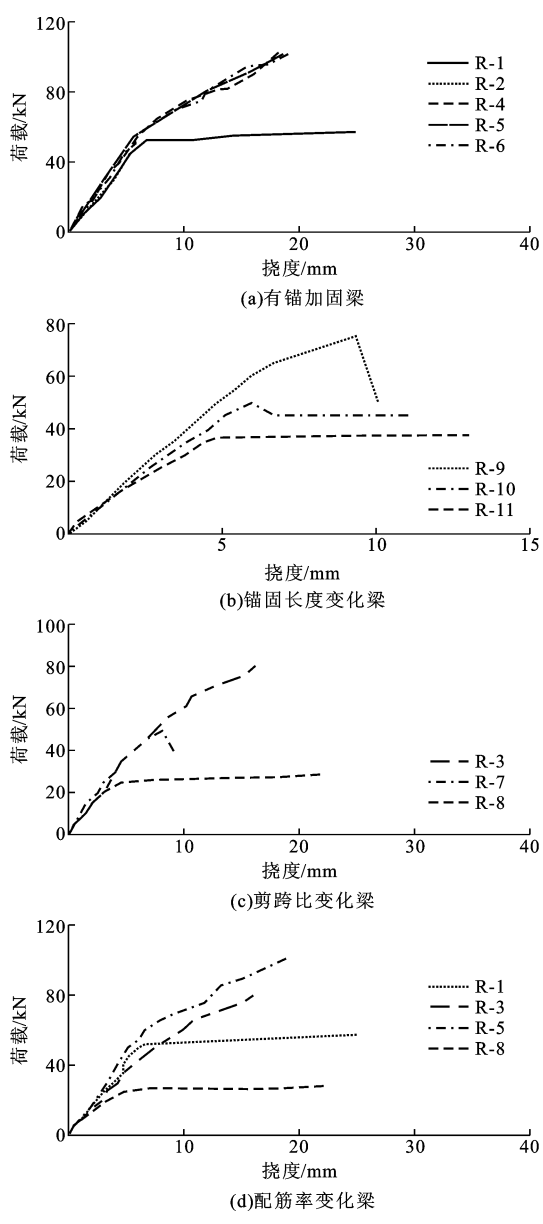


图 5 梁荷载-挠度曲线

Fig. 5 Load and Deflection Curves of Beams

Press, 2004.

- [5] 何雄君, 范立础, 李丽平, 等. 大型桥梁施工预测控制系统研究[J]. 中国公路学报, 2006, 19(1): 53-57.
HE Xiong-jun, FAN Li-chu, LI Li-ping, et al. Study of Prediction Control System for Construction of Bridges with Long Spans[J]. China Journal of Highway and Transport, 2006, 19(1): 53-57.
- [6] 刘小燕, 颜东煌, 张 峰, 等. 预应力高强混凝土梁极限承载力分析[J]. 中国公路学报, 2006, 19(1): 58-61.
LIU Xiao-yan, YAN Dong-huang, ZHANG Feng, et al. Ultimate Load Analysis of Prestressed High-strength Concrete Beam [J]. China Journal of Highway and Transport, 2006, 19(1): 58-61.
- [7] 吴建营, 李 杰. 混凝土弹塑性损伤本构关系统一模型

[J]. 建筑科学与工程学报, 2005, 22(4): 15-21.

WU Jian-ying, LI Jie. Unified Elasto-plastic Damage Constitutive Relations Model for Concrete[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2005, 22(4): 15-21.

- [8] 王元清, 张 勇, 石永久, 等. 吊索与钢管混凝土拱桥新型节点承载性能分析[J]. 建筑科学与工程学报, 2005, 22(3): 55-58.

WANG Yuan-qing, ZHANG Yong, SHI Yong-jiu, et al. Analysis of Load Capacity of New-style Joints Between Cable and Concrete-filled Steel Tube Arch Bridge[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2005, 22(3): 55-58.

(上接第 73 页)

- [3] 彭亚萍, 徐新生, 刘增夕, 等. 碳纤维板加固钢筋混凝土梁的工程应用[J]. 建筑科学, 2002, 18(5): 29-31.
PENG Ya-ping, XU Xin-sheng, LIU Zeng-xi, et al. The Application of Carbon Fiber Laminate in Strengthening Concrete Beams[J]. Building Science, 2002, 18(5): 29-31.
- [4] GARDENT H N, HOLLAWAY L C. An Experimental Study of the Influence of Plate End Anchorage of Carbon Fiber Composite Plates Used to Strengthen Reinforced Concrete Beams [J]. Composite Structures, 1998, 42(2): 175-188.
- [5] 彭亚萍, 黄博生, 刘增夕, 等. 碳纤维板加固钢筋混凝土梁的现场实荷加载试验[J]. 工业建筑, 2003, 33(7): 74-76.
PENG Ya-ping, HUANG Bo-sheng, LIU Zeng-xi, et al. Real Heaped Load Tests of Reinforced Concrete Beams Strengthened with CFRP-laminate[J]. Industrial Construction, 2003, 33(7): 74-76.
- [6] 孙晓燕, 黄承逵. 外贴纤维布加固超载后钢筋混凝土桥梁构件抗弯性能试验[J]. 中国公路学报, 2006, 19(4): 82-87.
SUN Xiao-yan, HUANG Cheng-kui. Test on Flexural Performance of RC Bridge Member After Overload Reinforced with Externally Bonded FRP [J]. China Journal of Highway and Transport, 2006, 19(4): 82-87.
- [7] 袁旭斌, 贺拴海, 宋一凡. 粘贴纤维布加固 RC 梁的受

弯裂缝计算方法[J]. 中国公路学报, 2006, 19(3): 54-58.

YUAN Xu-bin, HE Shuan-hai, SONG Yi-fan. Calculation Method on Bending Crack in RC Beams Strengthened with FRP [J]. China Journal of Highway and Transport, 2006, 19(3): 54-58.

- [8] 袁旭斌, 赵小星, 宋一凡, 等. 卸载与不卸载的 RC 梁桥粘贴碳纤维布加固计算[J]. 中国公路学报, 2005, 18(1): 69-72.

YUAN Xu-bin, ZHAO Xiao-xing, SONG Yi-fan, et al. Research on Rehabilitation with CFRP Laminates of RC Beam Bridges Under Loading and Unloading Case[J]. China Journal of Highway and Transport, 2005, 18(1): 69-72.

- [9] 朱皓明, 周期源, 高轩能, 等. 粘钢加固 RC 梁的正截面承载力[J]. 建筑科学与工程学报, 2006, 23(3): 54-60.

ZHU Hao-ming, ZHOU Qi-yuan, GAO Xuan-neng, et al. Normal Section Bearing Capacity of RC Beams Strengthened by Bonded Steel Plates [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2006, 23(3): 54-60.

- [10] 贺拴海, 任 伟. 纤维增强塑料加固混凝土结构研究 [J]. 建筑科学与工程学报, 2005, 22(3): 20-24.

HE Shuan-hai, REN Wei. Research on Reinforced Concrete Structure with FRP [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2005, 22(3): 20-24.