

预应力碳纤维布加固效果试验研究

李永东^{1,2}

(1. 山西省公路局, 太原 030006; 2. 桥梁工程防灾减灾山西省重点实验室, 太原 030006)

摘要:通过预应力碳纤维布加固试验梁试验,模拟预应力混凝土旧桥加固方法,试验过程采用分级加载方式,对试验梁加固前后各级荷载作用下控制截面的应变、位移和裂缝宽度进行详细加载测试。试验结果表明,预应力碳纤维布加固方法兼具体外预应力和普通碳纤维布两种主、被动加固方法的优点,能够有效降低开裂结构控制截面的应变、挠度和裂缝宽度,提高结构刚度和耐久性,延长桥梁使用寿命。

关键词:预应力碳纤维布;体外预应力;碳纤维布;抗弯刚度

中图分类号:TB115

文献标志码:A

引言

预应力碳纤维布是在碳纤维布上预先施加预应力,然后将其用结构胶与主梁下缘受拉区粘贴在一起,这是一种主、被动结合的加固方法,既能够给损伤构件主动施加预应力,改善结构的受力状态和病害程度,同时还具有被动加固中粘贴片材与主梁紧密粘贴、实现变形协调、抑制裂缝开展的优点,是最近几年才开始应用的一种新的加固方法。为了深入研究预应力碳纤维布材料

的加固效果,本次试验制作多片无粘结预应力混凝土试验梁,试验梁长、宽、高分别为 8000 mm、300 mm、500 mm,采用 C50 混凝土浇筑,预应力钢绞线采用 ϕ j15.24 高强度低松弛钢绞线;预应力碳纤维布共为 8 层,每层规格为:长 \times 宽 \times 厚为 7000 mm \times 200 mm \times 1.4 mm,粘贴位置沿梁底轴线对称布置(图 1)。试验梁主要测试预应力碳纤维布加固前后试验梁控制截面应变、位移和裂缝宽度变化规律^[1-3]。

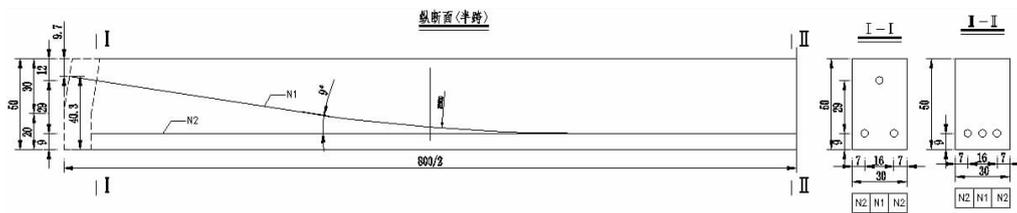


图 1 试验梁制作

1 试验方案及测点布置

1.1 试验方案

加固前试验方案: N_2^1 δ HJ 钢绞线的张拉控制应力

为 $0.275f_{yk}$ (张拉力为 71.61 kN), N_1^1 HJ 钢绞线的张拉控制应力为 $0.55f_{yk}$ (张拉力为 143.22 kN),记录各级荷载作用下结构的应变、位移及裂缝宽度变化情况,作为加固前结构的受力状态。

收稿日期:2015-05-24

基金项目:山西省交通厅项目(2013-1-06)

作者简介:李永东(1968-),女,山西静乐人,高级工程师,主要从事公路、桥梁设计方面的研究,(E-mail) gljjsc@126.com

加固后试验方案: $N_2^I \delta$ HJ 钢绞线的张拉控制应力为 $0.275f_{yk}$ (张拉力为 71.61 kN), $N_1^I \delta$ HJ 钢绞线的张拉控制应力为 $0.55f_{yk}$ (张拉力为 143.22 kN), 预应力碳纤维布的张拉力为 143.22 kN, 即采用预应力碳纤维布加固后该梁的有效预加力大小与体外束、预应力碳纤维板加固方案基本相同, 并在碳纤维布与主梁固结后进行加载试验, 记录各级荷载作用下结构的应变及位移变化情况^[4-11]。

1.2 测点布置

跨中截面上下缘埋置钢弦式应变计; 并在 L/4、L/2、

3L/4 等位置处安装位移计, 其中预埋钢筋应力测试仪通过长沙金码记忆温度型钢筋应变计采集, 位移通过 TDS530 数据采集仪自动记录。加载方式: 试验过程中通过千斤顶逐级加载, 千斤顶与反力架之间放置测力环控制试验弯矩大小及加载级数。

2 预应力碳纤维布加固前后主梁应变静载试验结果

由预应力碳纤维布加固前后各级试验荷载作用下跨中截面的应力测试结果(表 1、图 2)可知:

表 1 预应力碳纤维布加固前后 2# 梁跨中截面应变测试结果

| 试验工况 试验荷载 /kN·m | 受力状态 | 加固前上缘 应变/ $\mu\epsilon$ | 加固后上缘应变 | | 加固前下缘 应变/ $\mu\epsilon$ | 加固后下缘应变 | | |
|-----------------------|----------------|----------------------------|---------------------------|------------|----------------------------|---------------------------|------------|--|
| | | | 应变测试 结果/ $\mu\epsilon$ | 降低幅度 /% | | 应变测试 结果/ $\mu\epsilon$ | 降低幅度 /% | |
| 18.8 | $M_j < M_{消压}$ | -24 | -21 | -12.5 | 6.2 | 4.5 | -27.4 | |
| 56.3 | | -86 | -75 | -12.8 | 18.0 | 12.5 | -30.6 | |
| 93.8 | | -160 | -138 | -13.8 | 32.5 | 22.6 | -30.5 | |
| 131.3 | | -235 | -205 | -12.8 | 41.6 | 33.1 | -20.4 | |
| 140.6 | | -256 | -223 | -12.9 | 44.5 | 37.6 | -15.5 | |
| 150.0 | $M_{消压} < M_j$ | -275 | -242 | -12.0 | 47.4 | 40.6 | -14.3 | |
| 168.8 | | -309 | -275 | -11.0 | 54.4 | 44.5 | -18.2 | |
| 196.9 | | -360 | -330 | -8.3 | 68.8 | 49.5 | -28.1 | |
| 215.6 | | -392 | -366 | -6.6 | 81.4 | 53.3 | -34.5 | |
| 234.4 | | -422 | -398 | -5.7 | 95.9 | 58.5 | -39.0 | |
| 262.5 | | -467 | -444 | -4.9 | 117.5 | 69.6 | -40.8 | |
| 281.3 | | -497 | -473 | -4.8 | 133.5 | 78.5 | -41.2 | |
| 300.0 | | -529 | -509 | -3.8 | 149.3 | 91.1 | -39.0 | |
| 318.8 | | -557 | -533 | -4.3 | 166.4 | 100.3 | -39.7 | |
| 337.5 | | -585 | -560 | -4.3 | 182.5 | 113.1 | -38.0 | |
| 平均降低幅度/% | | | | -8.5 | | | -32.3 | |

备注: 1. 2# 梁加固前钢绞线张拉控制应力等级为 $0.55f_{yk}$, 消压弯矩为 $140.7 \text{ kN}\cdot\text{m}$ 。

2. “+”表示拉应力(变), “-”表示压应力(变)。

3. 限于篇幅, 本表对与试验规律关系不大的数据进行删节。

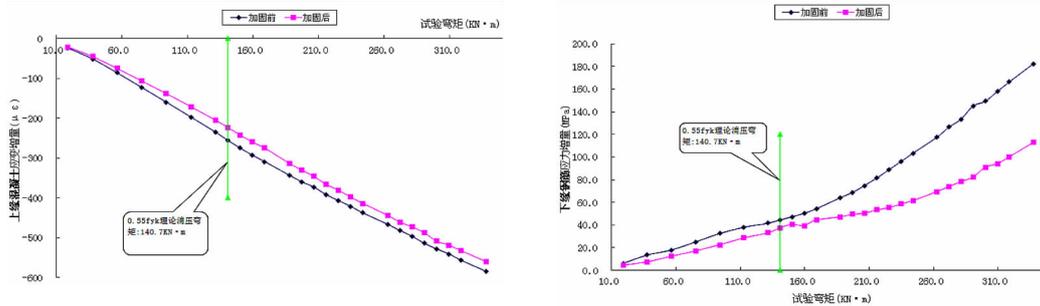


图 2 预应力碳纤维布加固前后弯矩 L/2 上、下缘钢筋应力(变)增量曲线

(1) 预应力碳纤维布加固后跨中截面上缘混凝土应变比加固前平均降低约 8.5%, 下缘钢筋应力比加固前平均降低约 32.3%, 下缘钢筋应力降低幅度比上缘混凝土更为明显。

(2) 从各测点加固前后应变(应力)降低幅度变化

规律知, 除部分测点外, 上缘混凝土应力降低幅度在截面消压前变化不大, 在截面消压后开始逐渐变小; 下缘钢筋应力降低幅度在截面消压前总体上呈略微下降趋势, 在截面达到消压状态以后, 下缘受拉区钢筋应力降低幅度开始逐渐明显增大。表明采用在受拉区粘贴预

应力碳纤维布加固方法,当截面消压后,被动粘贴碳纤维布的约束作用对改善受拉区钢筋应力状态的效果明显高于受压区混凝土。

3 预应力碳纤维布加固前后主梁挠度静载试验结果

由预应力碳纤维布加固前后各级试验荷载作用下试验梁位移测试结果(表2、图3)可知:预应力碳纤维布加固后各测点位移比加固前有明显降低,控制截面挠度比加固前平均降低16.6%~31.9%,表明采用该方法加

固后结构的整体刚度有明显提高。

4 预应力碳纤维布加固前后主梁裂缝宽度试验结果

由预应力碳纤维布加固前后试验梁跨中截面下缘裂缝宽度测试结果(表3、图4)可知:预应力碳纤维布加固后跨中截面下缘裂缝宽度比加固前降低约28.2%,表明主、被动兼顾的预应力碳纤维布加固方法在约束开裂截面裂缝开展方面效果较为明显。

表2 预应力碳纤维布加固前后主梁挠度试验结果

| 测点位置 试验弯矩 (kN·m) | 受力状态 | L/4 | | | L/2 | | | |
|------------------------|----------------|--------------|--------------|------------|--------------|--------------|------------|--|
| | | 加固前挠度 /mm | 加固后挠度 /mm | 降低幅度 /% | 加固前挠度 /mm | 加固后挠度 /mm | 降低幅度 /% | |
| 18.8 | $M_j < M_{消压}$ | -0.22 | -0.20 | -9.1 | -0.42 | -0.39 | -7.1 | |
| 56.3 | | -0.95 | -0.80 | -15.8 | -1.75 | -1.35 | -22.9 | |
| 93.8 | | -1.80 | -1.52 | -15.6 | -3.70 | -2.08 | -43.8 | |
| 131.3 | | -3.12 | -2.41 | -22.8 | -5.94 | -3.37 | -43.3 | |
| 140.6 | | -3.01 | -2.66 | -11.6 | -6.61 | -3.78 | -42.8 | |
| 150.0 | $M_{消压} < M_j$ | -3.88 | -2.93 | -24.5 | -7.24 | -3.83 | -47.1 | |
| 168.8 | | -4.56 | -3.46 | -24.1 | -8.38 | -4.81 | -42.6 | |
| 196.9 | | -5.63 | -4.29 | -23.8 | -10.13 | -6.13 | -39.5 | |
| 215.6 | | -6.23 | -4.78 | -23.3 | -11.34 | -7.58 | -33.2 | |
| 234.4 | | -6.77 | -5.42 | -19.9 | -12.41 | -8.79 | -29.2 | |
| 262.5 | | -7.43 | -6.31 | -15.1 | -14.15 | -10.60 | -25.1 | |
| 281.3 | | -8.02 | -6.92 | -13.7 | -15.45 | -11.24 | -27.2 | |
| 300.0 | | -8.70 | -7.67 | -11.8 | -16.53 | -12.15 | -26.5 | |
| 318.8 | | -9.59 | -8.12 | -15.3 | -17.77 | -13.32 | -25.0 | |
| 337.5 | | -9.81 | -8.63 | -12.0 | -18.89 | -16.08 | -14.9 | |
| 平均降低幅度/% | | | | | -16.6 | | -31.9 | |

备注:1.2#梁加固前钢绞线张拉控制应力等级为0.55fyk,消压弯矩为140.7 kN·m。

2.“-”表示下挠,“+”表示上挠。

3.限于篇幅,本表对与试验规律关系不大的数据进行删节。

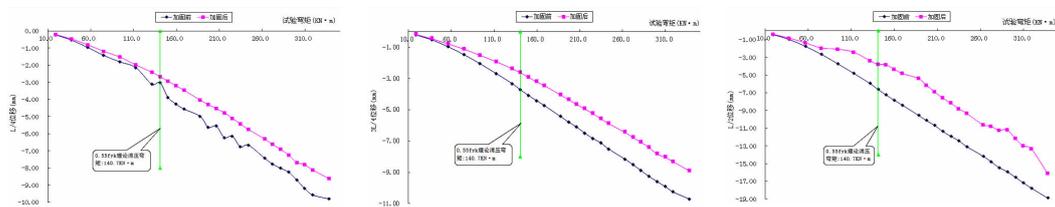


图3 预应力碳布加固前后弯矩与主梁断面挠度增量曲线

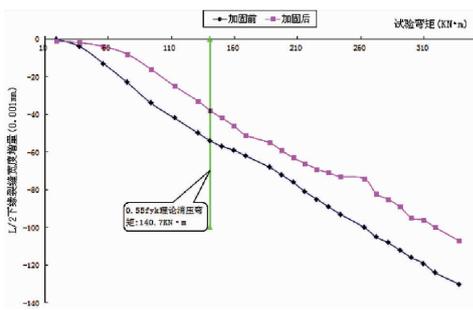


图4 预应力碳布加固前后弯矩与主梁跨中截面裂缝宽降低幅度曲线

5 结束语

预应力碳纤维布加固法是一种主、被动结合的加固方法,既能够给损伤构件主动施加预应力,改善结构的受力状态和病害程度,同时还具有被动加固中粘贴片材与主梁紧密粘贴、实现变形协调、抑制裂缝开展的优点,能够显著提高主梁刚度,降低主梁控制截面应力、挠度和裂缝宽度,而且被动粘贴碳纤维布的约束作用对改善受拉区钢筋应力状态的效果明显高于受压区混凝土。

表 3 预应力碳纤维布加固前后主梁 L/2 下缘裂缝宽度测试结果

| 试验工况 试验弯矩 /kN·m | 受力 状态 | 预应力碳 纤维布 加固前 | | 预应力碳纤 维布加固后 | | |
|-----------------------|-----------------------|-------------------------|-------------------------|----------------|--|--|
| | | 裂缝宽 度增量 /0.001 mm | 裂缝宽 度增量 /0.001 mm | 降低幅度 /% | | |
| 18.8 | $M_j < M_{\text{消压}}$ | -0 | -1 | — | | |
| 56.3 | | -13 | -4 | -69.2 | | |
| 93.8 | | -34 | -16 | -52.9 | | |
| 131.3 | | -50 | -33 | -34.0 | | |
| 140.6 | | -54 | -38 | -29.6 | | |
| 150.0 | | -57 | -42 | -26.3 | | |
| 168.8 | | -62 | -51 | -17.7 | | |
| 196.9 | | -72 | -59 | -18.1 | | |
| 215.6 | | -81 | -66 | -18.5 | | |
| 234.4 | | -89 | -71 | -20.2 | | |
| 262.5 | $M_{\text{消压}} < M_j$ | -100 | -74 | -26.0 | | |
| 281.3 | | -108 | -85 | -21.3 | | |
| 300.0 | | -116 | -95 | -18.1 | | |
| 318.8 | | -124 | -100 | -19.4 | | |
| 337.5 | | -130 | -107 | -17.7 | | |
| 平均降低幅度/% | | | | -28.2 | | |

备注:1. $2^{\#}$ 梁加固前钢丝线张拉控制应力等级为 $0.55f_{yk}$, 消压弯矩为 $140.7 \text{ kN} \cdot \text{m}$ 。

2. “-”表示裂缝宽度变大值,“+”表示裂缝宽度变小值。

3. 限于篇幅,本表对与试验规律关系不大的数据进行删节。

参考文献:

- [1] 项海帆.高等桥梁结构理论[M].北京:人民交通出版社,2001.
- [2] 过镇海.钢筋混凝土原理和分析[M].北京:清华大学出版社,1982.

- [3] 贺拴海,赵小星,宋一凡.具有初始荷载的钢筋混凝土梁桥粘贴碳纤维布加固试验研究[J].土木工程学报,2005,38(3):70-76.
- [4] 崔军,贺拴海,宋一凡,等.基于裂缝特征的钢筋混凝土板式结构评估研究[J].中国公路学报,2001,14(2):58-60.
- [5] 代汉超,石雪飞,阮欣.基于改进响应面的桥梁抗弯刚度修正[J].中南大学学报:自然科学版,2014,45(7):2387-2393.
- [6] 公路桥梁加固设计规范,JTG/T J22-2008[S].
- [7] 毛敏,郭文龙,吕立宁.体外预应力加固简支 T 梁桥提载效果分析[J].山西交通科技,2014(5):60-62.
- [8] 韩之江,王易阳,吕立宁.桥梁墩柱损伤动力测试分析及评价[J].四川理工学院学报:自然科学版,2013,26(1):51-54.
- [9] 秦卫红,冯鹏,施凯捷,等.玻璃纤维加固梁柱结构抗连续倒塌性能数值分析[J].同济大学学报:自然科学版,2014,11(11):1647-1653.
- [10] 郝海霞,张建仁,高勇,等.表层嵌贴 CFRP-混凝土界面粘结性能简化分析[J].中国公路学报,2015,28(4):52-59.
- [11] 刘明选.空心板梁桥铰缝病害分析和维修方法研究[J].四川理工学院学报:自然科学版,2014,27(4):65-68.

The Experimental Study of Prestressed Carbon Fiber Cloth Strengthening Effect

LI Yongdong^{1,2}

(1. Shanxi Provincial Highway Bureau, Taiyuan 030006, China; 2. Key Laboratory of Bridge Engineering Disaster Prevention and Mitigation in Shanxi, Taiyuan 030006, China)

Abstract: Through the prestressed carbon fiber cloth strengthening test beam experiment, the strengthening methods of prestressed concrete old bridge are simulated. During the experiment, the hierarchical loading method is used, which carried out a detailed load test of strain, displacement and crack width of the control section under various loads before and after the test beam reinforcement. The test results show that the prestressed carbon fiber cloth strengthening methods have both the advantages of active and passive reinforcement methods of external prestressed and common carbon fiber cloth. The method can effectively reduce the strain, deflection and crack width of the cracking structure control section, and improve the structural rigidity and durability, prolong the service life of the bridge.

Key words: prestressed carbon fiber cloth; external prestressed; flexural rigidity