

文章编号:1001-4888(2018)06-0911-08

## 预应力钢丝绳加固既有 PC 空心板的抗弯性能试验研究<sup>\*</sup>

邓鸣<sup>1,2,3</sup>, 王飞<sup>2</sup>, 王磊<sup>3</sup>, 伍一<sup>3</sup>, 戴理朝<sup>3</sup>, 赵志军<sup>1</sup>

(1. 长沙学院土木工程学院, 长沙 410003; 2. 天津市交通科学研究院, 天津 300074; 3. 长沙理工大学土木与建筑学院, 长沙 410114)

**摘要:** 本文利用预应力钢丝绳对某座既有预应力混凝土(PC)梁桥进行了加固,详细介绍了双层预应力钢丝绳加固的设计原则和施工工艺,对加固前后的PC板梁桥进行了荷载试验,对比了正常使用状态下梁体加固前后的荷载-挠度、裂缝宽度和钢筋应力的变化规律。研究表明:预应力钢丝绳加固能有效降低挠度,抑制裂缝和减小钢筋应变,进而显著提高既有PC桥梁的抗弯承载力。在设计荷载作用下,加固梁的挠度、裂缝宽度以及钢筋应力分别下降了23%、50%和21%。相对于降低挠度和减小钢筋应变而言,该加固方法对于梁底裂缝的控制更具效果。预应力钢丝绳加固梁的整体性能得到提升,抗弯性能满足规范的要求。

**关键词:** 桥梁工程; 预应力混凝土; 加固; 钢丝绳; 承载力

**中图分类号:** U442

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.7520/1001-4888-17-156

### 0 引言

随着我国预应力混凝土桥梁的大量建设,不少桥梁由于年久失修已出现各种病害。尤其是20世纪修建的桥梁,由于设计荷载标准低,承载能力预计不够,已远远不能满足目前的交通需求。采取合理有效的方式对该类桥梁进行加固以满足正常使用要求,对于我国经济的发展尤为重要。

常见的加固方式有主动加固和被动加固。被动加固包括粘贴钢板<sup>[1]</sup>、碳纤维板等,但被动加固的材料只能承担活载的内力;作为主动加固方式,对后加补强材料施加预应力,做成预应力加固体系,可以提高补强材料的利用率,已在桥梁加固中得到广泛应用。预应力钢绞线、钢丝、钢丝绳和纤维增强复合材料(FRP)是最为常见的预应力加固材料。FRP具有耐热、耐腐蚀等优点,在钢筋混凝土桥梁的加固上已经得到广泛使用<sup>[2-7]</sup>,但加固后,梁体截面延性降低,常表现为脆性破坏。预应力钢绞线和钢丝具有良好的延展性、性价比高,同时与混凝土之间具有良好的粘结性能。这些优点使得其在预应力混凝土桥梁上得到应用。郭俊平等<sup>[8]</sup>研究了新型张拉锚固系统下预应力高强钢绞线加固板的抗弯性能。Panfilov等<sup>[9]</sup>利用有限元软件模拟了预应力钢丝对肋梁盖板的加固效果。单成林<sup>[10]</sup>综合使用先张法和后张法使得高强钢丝在砂浆层中建立起预应力,进而对钢筋混凝土板式受弯构件进行了加固。丁亚红等<sup>[11]</sup>利用内嵌预应力螺旋肋钢丝的方法对钢筋混凝土梁的抗弯承载力进行了加固。预应力钢绞线加固由于需要较大的锚板和张拉力,在小型结构加固中难以张拉到合适长度,此外,还需要考虑钢绞线的空间布置等问题,对实际既有桥梁加固时较难实现。

钢丝绳加固可将预应力分散锚固,提高了外加力的可控性。此外,钢丝绳质地相对柔软,可通过张

<sup>\*</sup> 收稿日期:2017-08-03; 修回日期:2017-10-29

基金项目:国家重点基础研究发展计划(“九七三”计划)项目(2015CB057705);长沙市科技计划项目(ZD1601063)

通讯作者:王磊(1979-),男,教授,博士研究生导师。Email: leiwei@hotmail.com

拉较短长度而获得较大的补强力,减少了预应力的损失,可对既有PC桥梁进行有效地加固。Yang等<sup>[12-14]</sup>使用预应力钢丝绳对钢筋混凝土梁和砌体墙结构进行了加固。吴刚等<sup>[15-17]</sup>系统地比较了预应力钢丝绳与粘贴钢板、粘贴碳纤维片及体外预应力等三种常用加固方式的优缺点,提出采用钢丝绳加固受损桥梁的可行性,研究了该加固法的抗弯加固性能。

本文利用预应力钢丝绳对某座既有后张混凝土空心板梁桥进行了加固,详细介绍了该加固方法的实施步骤,并对加固前后的空心板进行了荷载试验。通过对正常使用状态下的荷载-挠度、裂缝宽度和钢筋应力进行比较,明确了预应力钢丝绳对既有PC桥梁的加固效果。

## 1 试验过程

### 1.1 试验板梁

以某立交工程已运营20年的后张预应力混凝土空心板梁桥为研究对象,对预应力钢丝绳的加固效果进行研究。桥梁全长为204.95m,由10孔20m的空心板组成。桥宽为17.5m,按4车道设计,横断面由14块板组成,板梁之间的联结采用混凝土企口缝构造。设计荷载等级为汽车-超20级,挂车-120。主梁和桥墩分别采用C50和C30混凝土浇筑而成,桥面磨损层为中粒式沥青混凝土,桥面铺装层为C30防水混凝土。

该梁桥长期承受较大的车辆荷载,同时由于混凝土收缩徐变和预应力筋的施工放张工艺等的影响,桥梁铰缝处破坏严重,梁体跨中附近出现横向裂缝,间距约30~50cm,最大裂缝宽度0.08mm。该桥评定为危桥,进行拆除处理。为研究既有板梁的力学性能及预应力钢丝绳的加固效果,在对原桥进行拆除时,从中选取1片中部位置的空心板进行荷载试验。该预应力混凝土空心板跨径为19.94m,梁体为工厂预制生产,混凝土及钢筋材料特性见表1。试验板计算跨径为19.28m,横截面宽1.24m、高0.9m。内部预应力钢绞线7束 $\phi 15.2\text{mm}$ ,采用后张法施工,锚具为OVM15-7。试验梁的详细尺寸见图1。

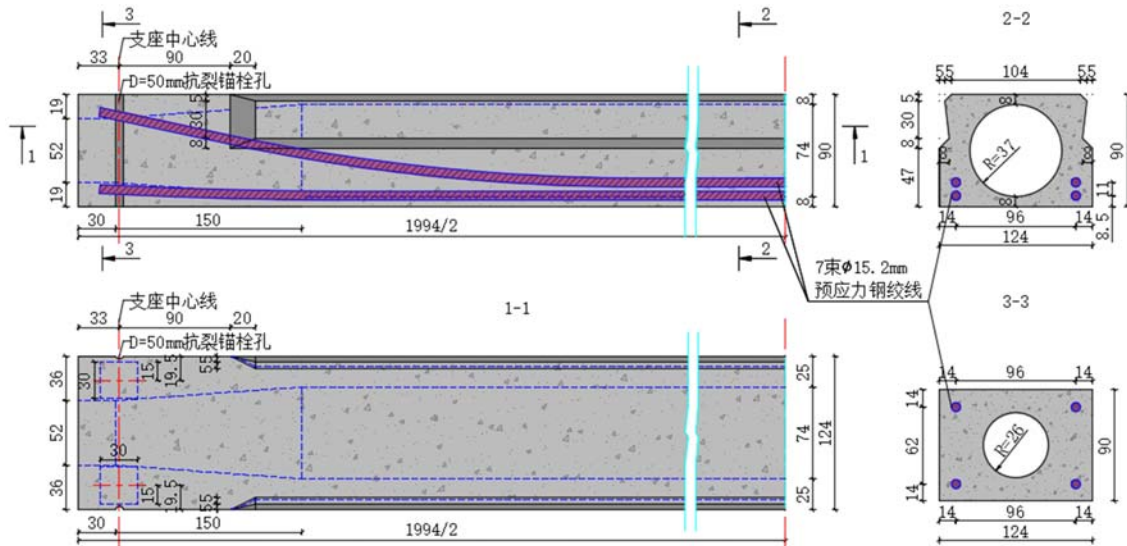


图1 空心板构造图(单位:cm)

Fig. 1 Details of plate-girder(unit: mm)

表1 材料特性

Tab. 1 Material characteristics

梁体材料	弹性模量/MPa	单根截面积/mm <sup>2</sup>	抗拉强度标准值/MPa	抗压强度设计值/MPa
C50 混凝土	$3.45 \times 10^4$	—	2.65	22.4
钢筋 $\phi 12$	$2 \times 10^5$	113.1	335	280
钢绞线	$1.95 \times 10^5$	139	1860	390

### 1.2 试验设计及加载

为研究既有板梁正常使用状态下的结构性能和预应力钢丝绳的加固效果,本文试验加载设计共分为三个阶段:首先,对试验梁加载至控制荷载;其次,使用预应力钢丝绳对试验梁进行加固;最后,对加固梁再次加载至相同的控制荷载。本试验通过对同一片梁加固前后的结构性能进行对比,从而研究预应力钢丝绳的加固效果。本试验设计了一套新的静力加载系统<sup>[18]</sup>。试验过程中利用混凝土作为配重,通过液压千斤顶施加荷载。由于反力架下净空高度较大,千斤顶行程有限,故在分配梁上安置混凝土垫块以满足施力要求。分配梁将千斤顶作用的反力分解成两个竖向荷载传递到钢板上,钢板由于自身的宽度进一步将竖向荷载作用面扩大,避免应力过度集中而使混凝土局部压碎,钢板中心相距 1.1m。静力加载如图 2 所示。

本文主要研究板梁的正常使用极限状态。根据设计图纸,按汽车-超 20 级和挂车-120 活载,并将桥面铺装折算到试验梁上,通过跨中弯矩等效原则,计算得到千斤顶加载值为 354kN,因此将 354kN 定为试验梁的设计荷载。加固前的试验表明,本试验梁加载到 480kN 后,其挠度与正常使用荷载作用下挠度限值 1/600 跨径基本一致,且在卸载后挠度、应力及裂缝宽度均能基本回到初始状态,表明试验梁处于弹性工作状态,为保证加固前后试验梁没有过多损伤累积,仍具有相似的承载力,本试验的控制荷载选取为 480kN。

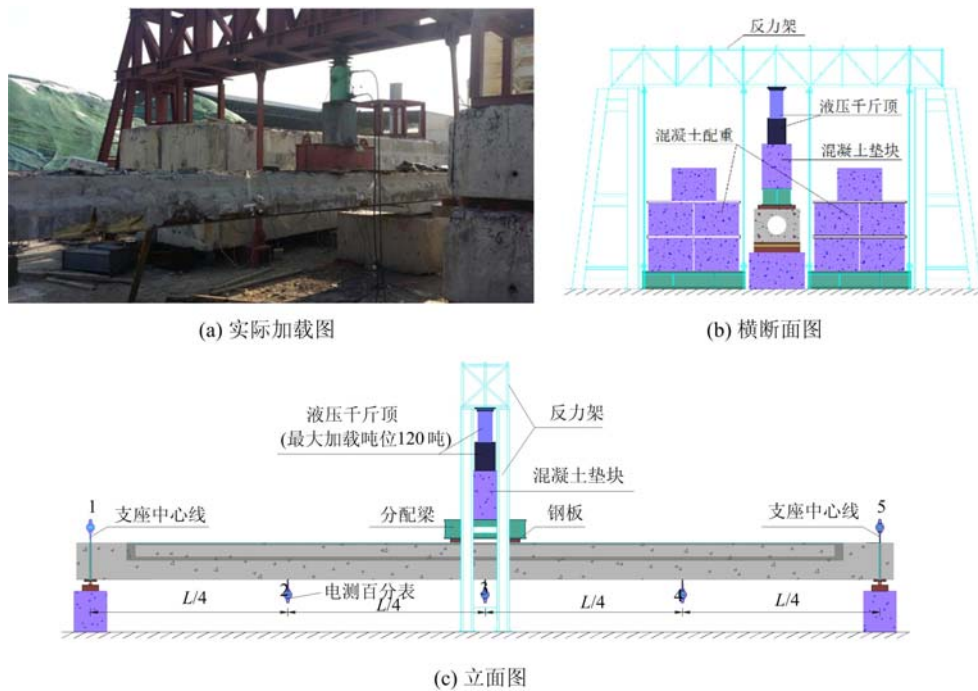


图 2 静力加载

Fig. 2 Loading test device

加载过程中对梁的挠度、裂缝宽度和钢筋应变进行测量。板底共布置 5 个挠度测点,如图 2(c)所示。裂缝则采用精确度为 0.01mm 的百分表进行测量,将百分表和一块表面光滑的木块分别粘贴于裂缝两侧,百分表的触头顶在木块上,通过百分表数据的变化来显示裂缝宽度的变化。加载过程中对钢筋的应变进行测量。加载前,在钢筋应变测点凿开露出主筋,使用精度为  $1\mu\epsilon$  的钢筋应变计记录每个加载阶段的钢筋应变。本试验中主要测定板底外侧纵向钢筋的应变,考虑到主筋开凿位置过多造成破坏过大,对板的实际承载力产生一定影响,故在两侧各选一个位置布置测点。测点 S1、S2 分别距板中心线 120cm 和 50cm,如图 3 所示。

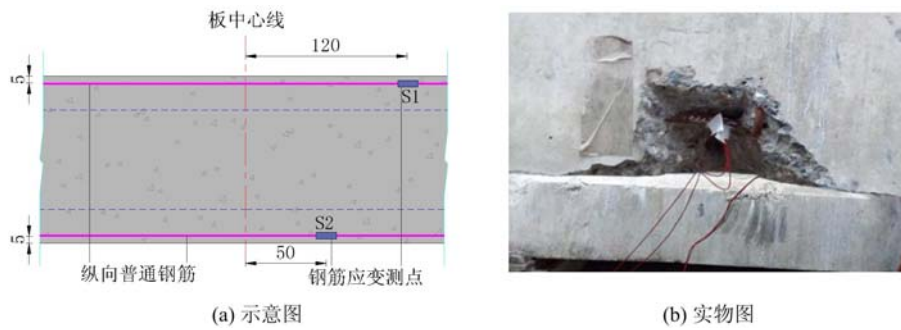


图 3 钢筋应变测点(单位:cm)

Fig. 3 Location of strain gauges (unit: cm)

## 2 施工工艺

考虑到桥梁在恒载状态下处于安全状态,本次钢丝绳加固设计张拉力为抵消活载(汽车-超 20 级和挂车-120)产生的弯矩,且加固后梁底压应力不超过混凝土抗压强度。本试验采用  $1 \times 19$  单股镀锌钢丝绳进行加固,钢丝绳公称直径为 5.5mm,截面面积为  $18.06 \text{mm}^2$ ,抗拉强度标准值  $f_{pk}$  为 1560MPa,根据《预应力高强钢丝绳加固混凝土结构技术规程》<sup>[19]</sup> 规定,体外预应力控制张拉应力值范围为  $0.4 \sim 0.65 f_{pk}$ ,本次试验取中间值  $0.5 f_{pk}$ 。钢丝绳用量为 70 根,每根钢丝绳排布间距为 3cm,按上下两层布置,每层分别张拉 35 根,提高的承载力约为  $986 \text{kN} \cdot \text{m}$ ,与活载效应  $1018 \text{kN}$  基本一致。加固后,不考虑梁底开裂及预应力损失情况,梁底最大压应力为 12.3MPa,小于 C50 混凝土抗压强度。双层钢丝绳的间距应尽可能小,以充分发挥钢丝绳的加固效果;同时,考虑到锚头构造以及施工的可操作性,本文将钢丝绳的两层间距取为 15mm。具体流程如下:

### (1) 端部槽口的开凿

根据设计,确定两端设置端部锚具的中心线位置,在中心线处沿跨度方向凿出宽度约 10cm 的端部槽口,深度以暴露出梁内部的既有纵筋、并能牢固焊接端部锚具即可。

### (2) 端部锚具的制作及固定

钢丝绳锚具及锚板采用 Q235 钢材铸造,承压强度 280MPa,设计锚具如图 4 所示。为确保预应力钢丝绳张拉与锚固的方便,锚具外侧为开口形式,开口上宽 3mm,开口下宽 4mm,开口深度 10mm,锚具长度根据板梁截面宽度确定。实施焊接前,应预先对板梁中凿出的既有纵筋表面进行除锈等清洁处理,确保端部锚具与既有纵筋焊接可靠。

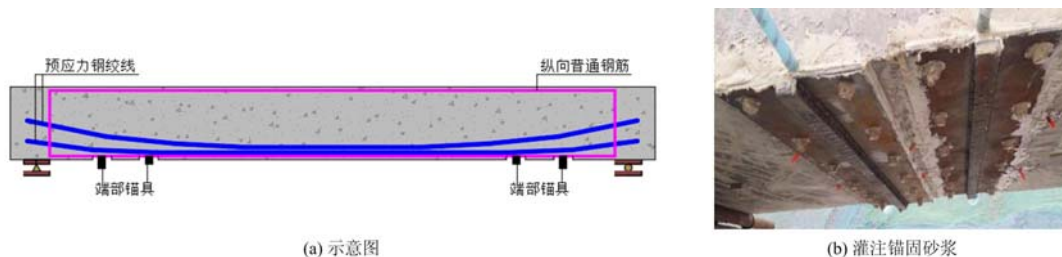


图 4 锚板安装

Fig. 4 Arrangement of anchorage plate

端部锚具焊接在板梁既有纵筋后,灌注锚固砂浆对端部槽口修补、加强。锚固砂浆为高强度、固化时间短、微膨胀、粘结性能好的环氧树脂砂浆,其 28 天龄期粘结强度需大于  $2.5 \text{MPa}$ <sup>[19]</sup>。灌注前将周围混凝土表面凿毛、清除浮渣、冲洗干净,灌注后保持砂浆面与加固构件底面齐平。

### (3) 钢丝绳下料及挤压锚头的挤压

由于采用的端部锚具类似于镦头锚具,预应力钢丝绳的下料长度要求较为严格,下料长度根据两端端部锚具的间距及预应力钢丝绳的工作应力计算确定。挤压锚头为铝合金双孔套筒式,钢丝绳在端部

折成双股后穿入挤压锚头内孔。由专门设计的挤压模具、挤压机械对挤压锚头进行强力挤压,使挤压锚头与钢丝绳挤压成一体。

#### (4) 预应力钢丝绳的张拉与锚固

预应力钢丝绳的一端直接穿入端部锚具的开口,另一端通过张拉器进行张拉。采用对称张拉的原则,以防结构产生扭转、侧弯。张拉时从两侧向中间对称前进,钢丝绳布置如图5所示。

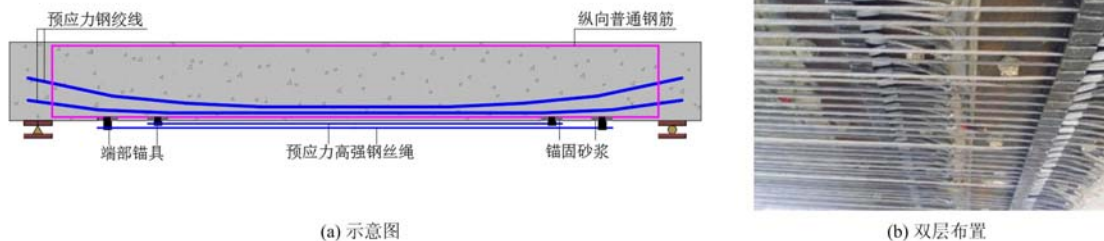


图5 钢丝绳张拉

Fig. 5 Stretching of steel wire ropes

为方便对加载过程中裂缝及应变等数据的采集,本文未对梁底进行砂浆防护等后期处理。在实际桥梁加固中,为加强锚固效果和确保钢丝绳在工作环境下的耐久性,须对端部及底部浇注砂浆进行保护。端部砂浆采用强度高、硬化快的环氧树脂砂浆;底部防护砂浆采用聚合物砂浆,具有较好的延性,不易出现横向裂缝。在砂浆完成以后,涂刷与梁体颜色协调的防水涂料,以达到耐久性要求和美观效果。

### 3 试验结果及讨论

#### 3.1 荷载-挠度曲线对比

为研究预应力钢丝绳加固对试验梁抗弯刚度的提升效果,本文对加固前后试验梁的荷载-挠度曲线进行了对比。根据跨中竖向位移及支座沉降量计算得到板加固前后的跨中实际挠度,荷载-挠度曲线如图6所示,其中,理论值为未加固、不考虑损伤梁体的理论计算结果。

由图6可知,挠度随荷载的增加而增大,且曲率随着荷载的增加逐渐降低。当荷载值在50kN以内时,加固前的试验值与理论值相差不大。随着荷载的增加,两者之间的差异逐渐增大。混凝土开裂前,试验梁的抗弯刚度主要由混凝土来提供,随着荷载的增加,混凝土开裂后,试验梁的刚度由钢丝绳和混凝土共同承担,从而导致加固前后试验梁的荷载-挠度曲线逐渐产生差异。

各级荷载作用下,加固前的跨中挠度均大于设计值,这表明试验梁在多年服役期内已出现损伤,随着荷载的继续增大,损伤的影响导致试验梁的下挠越来越明显,刚度随着荷载增大而降低。设计荷载(354kN)作用下,加固试验梁的跨中挠度较损伤梁的挠度降低了约23%,较理论值提升了约12%。梁的刚度大于损伤梁的刚度和理论值,这表明钢丝绳加固可以有效地提升试验梁的刚度。

#### 3.2 裂缝宽度对比

预应力钢丝绳加固对板底裂缝的影响表现在裂缝宽度、裂缝长度和新生裂缝数量三个方面。加固完成后,观察板底裂缝发现,由于钢丝绳的预应力补强作用,原混凝土板因底部预加荷载的作用而受压,已产生的横向裂缝宽度明显减小,部分微裂缝闭合至观察不到的状态。整个加载过程中,原有裂缝长度几乎不再延伸,最大裂缝长度达到1/2梁高位置也不再向上发展。加载至480kN,板底裂缝数量仅发现

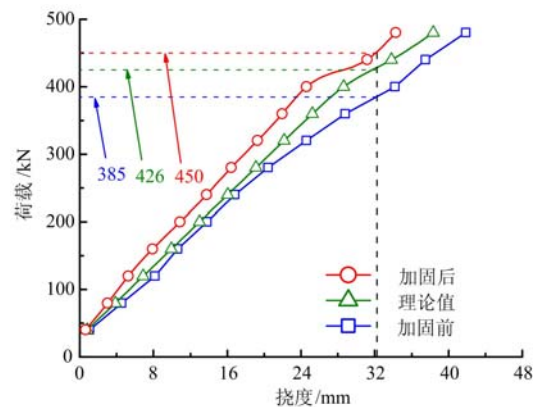


图6 跨中挠度对比图

Fig. 6 Load-deflection response in 1/2 span

新增了4条裂缝。

加载过程中,各级荷载作用下加固梁的裂缝宽度较损伤梁的裂缝要小。随着荷载的增加,裂缝逐渐由板底向两侧延伸,梁体两侧裂缝分布较为对称。为描述钢丝绳加固对荷载裂缝的抑制作用,选取加载过程中的最大裂缝进行分析,如图7所示。

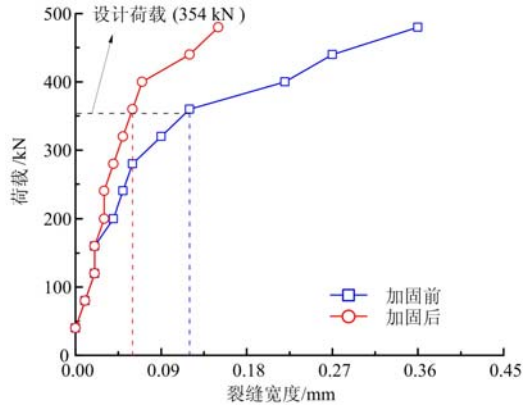


图7 荷载-裂缝宽度曲线对比图

Fig. 7 Load and crack width

在荷载小于150kN时,梁体加固前后的最大裂缝发展情况基本一致,此阶段钢丝绳并未完全参与受力,外部荷载主要由混凝土承担。随着荷载的增加,裂缝的出现导致混凝土退出工作状态,钢丝绳开始发挥作用,对裂缝的扩展产生抑制作用。加固梁的裂缝发展速率较损伤梁的裂缝发展速率要低,且最终裂缝宽度控制在较小的范围内。设计荷载作用下,加固梁和损伤梁的裂缝宽度分别为0.06 mm和0.12 mm。预应力钢丝绳加固措施可以对裂缝宽度的开展起到延缓作用,并能有效抑制裂缝宽度。

### 3.3 钢筋应力对比

本试验采用钢筋应力反映试验梁的受力状态,钢筋应力由测量得到的钢筋应变换算而来。图8给出了梁体加固前后钢筋应力随荷载的变化规律。

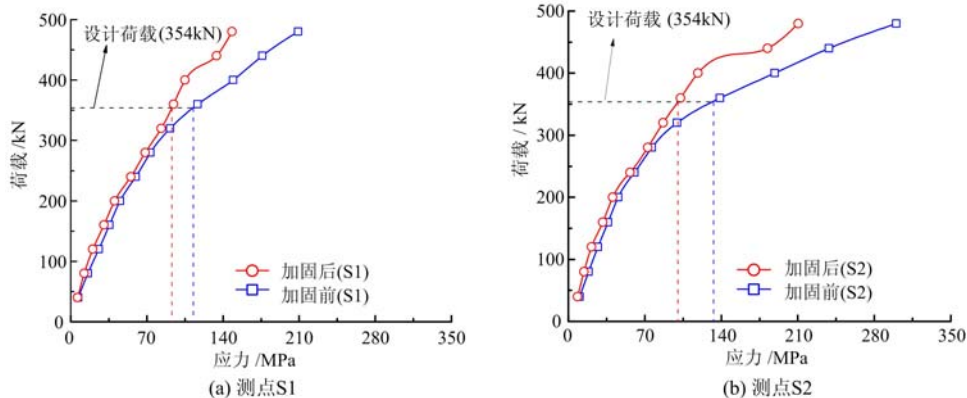


图8 荷载-钢筋应力曲线对比图

Fig. 8 Load and steel stress

由图8可知,尽管不同位置处钢筋承担的应力大小并不一样,但应力的增长趋势大体一致。荷载小于300kN时,加固前后的钢筋受力基本一致;随着荷载的增加,加固前后的钢筋应变差异逐渐增大。梁体施加预应力钢丝绳后,相同荷载作用下梁内钢筋的应力明显降低,承载力增大。设计荷载作用下,加固前后测点S1的应力值分别为112.8 MPa和92.9 MPa,测点S2的应力值为132.9 MPa和100.4 MPa,加固后的平均钢筋应变较加固前降低了21%。预应力钢丝绳可以有效地减小梁内的钢筋应力。

采用预应力钢丝绳加固后,PC梁的裂缝宽度、跨中挠度、钢筋应变分别降低了50%、23%和21%。相对于抑制挠度和钢筋应变而言,预应力钢丝绳加固对裂缝宽度的控制最为明显。预应力钢丝绳加固可以显著地提高PC梁的承载力。

## 4 结论

本文利用预应力钢丝绳对某座服役PC梁桥进行了加固,详细介绍了该加固方法的施工工艺,对加固前后的空心板进行了荷载试验。得到以下结论:

- (1) 对空心板梁采用钢丝绳加固在实践工艺上可行,且施工方便,成本较低。
- (2) 预应力钢丝绳加固后试验梁的整体性能得到提升,加固梁的抗弯性能满足正常使用要求。

(3) 在设计荷载作用下, 加固梁的裂缝宽度、挠度以及钢筋应力分别下降了50%、23%和21%。相对于抑制挠度和钢筋应变而言, 预应力钢丝绳加固对裂缝宽度的控制最为明显。

(4) 本文主要研究了正常使用状态下预应力钢丝绳对既有PC桥梁的加固效果。实际应用中, 预应力钢丝绳的加固长期效果有待进一步研究。

#### 参考文献:

- [1] 彭卫兵, 潘若丹, 谢波, 等. 桥梁结构薄弱部位识别理论及极限承载力计算方法[J]. 中国公路学报, 2014, 27(9):66-73 (PENG Weibin, PAN Ruodan, XIE Bo, et al. Recognition theory for weak parts of bridge structure and calculation method for ultimate bearing capacity[J]. China Journal of Highway and Transport, 2014, 27(9): 66-73 (in Chinese))
- [2] Hui Peng, Jianren Zhang, Cai C S, et al. An experimental study on reinforced concrete beams strengthened with prestressed near surface mounted CFRP strips[J]. Engineering Structures, 2014, 79:222-233.
- [3] Mohammadali R, Ines C, Joaquim B. Influence of prestress level on NSM CFRP laminates for the flexural strengthening of RC beam[J]. Composite Structures, 2014, 116:489-500.
- [4] Oudah F, El-Hacha R. A new ductility model of reinforced concrete beams strengthened using fiber reinforcement [J]. Composite: Part B: Engineering, 2012, 43(8):3338-3347.
- [5] 郑愚, 李春红. 侧向约束 GFRP 筋混凝土板内压缩薄膜效应的研究[J]. 工程力学, 2014, 31(6):203-211 (ZHENG Yu, LI Chunhong. Investigation of compressive membrane action in laterally restrained GFRP reinforced concreted slabs[J]. Engineering Mechanics, 2014, 31(6):203-211 (in Chinese))
- [6] 彭晖, 王浩, 付俊俊, 等. 冻融循环下预应力 CFRP 板加固钢筋混凝土梁的耐久性研究[J]. 实验力学, 2014, 29(3):344-352 (PENG Hui, WANG Hao, FU Junjun, et al. Durability study of reinforced concrete beam strengthened with prestressed CFRP plate under freeze-thaw cycling[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2014, 29(3):344-352 (in Chinese))
- [7] 秦丽辉, 李岩, 王宗林, 等. BFRP 加固损伤混凝土梁挠度计算方法[J]. 交通运输工程学报, 2014, 14(6):18-26 (QIN Lihui, LI Yan, WANG Zonglin, et al. Deflection calculating method of damaged concrete beams strengthened with BFRP[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2014, 14(6): 18-26 (in Chinese))
- [8] 郭俊平, 邓宗才, 林劲松, 等. 预应力高强度钢绞线网加固钢筋混凝土板的试验研究[J]. 土木工程学报, 2012, 45(5):84-92 (GUO Junping, DENG Zongcai, LIN Jinsong, et al. Experimental study of reinforced concrete slabs strengthened with prestressed high strength steel wire mesh[J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(5):84-92 (in Chinese))
- [9] Panfilov D A, Pischulev A A. The analysis of slab and beam floor with pre-stressed wire rope reinforcement[J]. Procedia Engineering, 2015, 111:626-631.
- [10] 单成林. 综合施加预应力法加固钢筋混凝土板桥理论及试验[J]. 中国公路学报, 2013, 26(1):67-73 (SHAN Chenglin. Theory and experiment of reinforced concrete slab bridges reinforced by comprehensive method of post-tensioned and pre-tensioned prestressing[J]. China Journal of Highway and Transport, 2013, 26(1):67-73 (in Chinese))
- [11] 丁亚红, 刘丽娜. 表层内嵌预应力螺旋肋钢丝加固混凝土梁变形性能理论分析[J]. 工程力学, 2013, 30(4):191-197 (DING Yahong, LIU Lina. Study on deformability of concrete beams strengthened with prestressed mounted helical rib steel wire near surface[J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(4):191-197 (in Chinese))
- [12] Yang K H, Joo D B, Sim J I, et al. In-plane seismic performance of unreinforced masonry walls strengthened with unbonded prestressed wire rope units[J]. Engineering Structures, 2012, 45:449-459.
- [13] Yang K H, Byun H Y, Ashour A F. Shear strengthening of continuous reinforced concrete T-beams using wire rope units[J]. Engineering Structures, 2009, 31:1154-1165.
- [14] Kim S Y, Yang K H, Byun H Y. Tests of reinforced concrete beams strengthened with wire rope units[J]. Engineering Structures, 2007, 29:2711-2722.
- [15] 吴刚, 蒋剑彪, 吴智深, 等. 一种主动式抗弯加固新方法—预应力高强度钢丝绳加固技术[J]. 建筑结构, 2012, 37(增刊):17-20 (WU Gang, JIANG Jianbiao, WU Zhishen, et al. A new flexural strengthening method-

- strengthening RC beams with prestressed steel wire[J]. *Building Structure*, 2012, 37(suppl):17–20 (in Chinese))
- [16] 吴刚, 魏洋, 吴智深, 等. 常用加固方法的比较以及预应力高强钢丝绳加固(P-SWR)新技术的优势[J]. *建筑结构*, 2012, 37(增刊):21–24 (WU Gang, WEI Yang, WU Zhishen, et al. Comparison of existing flexural strengthening methods and a new strengthening technique of prestressed high strength steel wire rope[J]. *Building Structure*, 2012, 37(suppl):21–24 (in Chinese))
- [17] 吴刚, 郑士暄, 田野, 等. 预应力高强钢丝绳在桥梁加固中的应用[J]. *建筑结构*, 2012, 37(增刊):25–27 (WU Gang, ZHENG Shixuan, TIAN Ye, et al. Application of strengthening technique of prestressed high-strength steel wire rope in bridge engineering[J]. *Building Structure*, 2012, 37(suppl):25–27 (in Chinese))
- [18] 闫燕红, 孙运国, 邓鸣, 等. 一种利用废旧梁体为配重的组装式反力架加载装置[P]. 中国专利:CN205642989U, 2016-10-12.
- [19] 中华人民共和国住房和城乡建设部. JGJ/T325–2014 预应力高强钢丝绳加固混凝土结构技术规程[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2014.

## Experimental study of flexural behavior of existing PC hollow slab strengthened by prestressed steel wire rope

DENG Ming<sup>1,2,3</sup>, WANG Fei<sup>2</sup>, WANG Lei<sup>3</sup>, WU Yi<sup>3</sup>, DAI Li-zhao<sup>3</sup>, ZHAO Zhi-jun<sup>1</sup>

(1. College of Civil Engineering, Changsha University, Changsha 410003, China; 2. Tianjin Transportation Research Institute, Tianjin 300074, China; 3. School of Civil Engineering & Architecture, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

**Abstract:** An existing prestressed concrete bridge was strengthened by prestressed steel wire rope (PSWR). The design principle and construction technology of double-layer prestressed steel wire rope reinforcement are introduced in detail in this paper. Load experiment of the PC-slab girder bridge before and after reinforcement was carried out, and the variation pattern of load-deflection, crack width and reinforcement stress of the beam before and after strengthening was compared under normal condition. Static loading experimental results indicate that PSWR enhances the overall performance of girder by decreasing deflection, crack width, and steel stress. The strengthening effects of PSWR on structural behavior are also discussed, such as deflection, crack width and steel stress. The deflection, crack width and steel stress under the design load decrease 23%, 50% and 21%, respectively, using PSWR strengthening. PSWR has the significant restraint effect on crack width than that on deflection and steel stress. The girder strengthened with PSWR can satisfy the serviceability.

**Keywords:** bridge engineering; prestressed concrete; strengthen; steel wire ropes; capacity