

文章编号:1005-0523(2022)04-0024-08



基于宏应变监测的CFRP板桥梁加固预应力评估理论研究

黄志刚¹,黄卫国²,尹祥³,吴必涛³

(1. 江西省交通工程集团有限公司,江西 南昌 330213; 2. 江西省公路工程检测中心,江西 南昌 330013;
3. 华东交通大学土木建筑学院,江西 南昌 330013)

摘要:为实现对预应力CFRP板桥梁加固初期和后期预应力损失进行快速监测评估,采用新型分布式监测手段,推导了桥梁结构在端锚全粘贴预应力CFRP板加固后的梁底混凝土的长标距应变数值求解方法,并在此基础上提出了静、动态预应力CFRP板的预应力损失监测评估指标;然后通过数值算例,建立了精细化预应力CFRP板加固多片小箱梁的三维数值分析模型,研究不同车辆参数和不同预应力加固水平对上述静、动预应力损失评估方法精度的影响。研究表明:各预应力损失工况下静态预应力损失评估方法误差小于2.0%,动态预应力损失评估方法误差小于2.8%,证明所提方法的准确性和理论可行性,为相关试验研究奠定理论基础。

关键词:预应力CFRP板;桥梁工程;分布式长标距应变;预应力损失评估

中图分类号:U216;TU435

文献标志码:A

本文引用格式:黄志刚,黄卫国,尹祥,等.基于宏应变监测的CFRP板桥梁加固预应力评估理论研究[J].华东交通大学学报,2022,39(4):24-31.

DOI:10.16749/j.cnki.jecjtu.20220727.001

Theoretical Study on Prestress Evaluation of CFRP Slab Bridge Reinforcement Based on Macro-Strain Monitoring

Huang Zhigang¹, Huang Weiguo², Yin Xiang³, Wu Bitao³

(1. Jiangxi Traffic Engineering Group Co., Ltd, Nanchang 330013, Jiangxi, China; 2. Jiangxi highway engineering testing center, Nanchang 330013, China; 3. School of Civil Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract:To quickly monitor and evaluate the prestress loss of Prestressed CFRP plate bridge in the early and late stage of reinforcement, a new distributed monitoring method is adopted to derive the long gauge strain numerical solution method of the concrete at the bottom of the beam after the end anchor is fully bonded with prestressed CFRP plate. On this basis, the prestress loss monitoring and evaluation indexes of static and dynamic prestressed CFRP plate are proposed; Then, through numerical examples, a three-dimensional numerical analysis model of multi piece small box girder strengthened with refined prestressed CFRP plate is established to study the influence of different vehicle parameters and different prestressed reinforcement levels on the accuracy of the static and dynamic prestress loss evaluation method. The results show that the error of static prestress loss evaluation method is less than 2.0%, and the error of dynamic prestress loss evaluation method is less than 2.8%, which proves the accuracy and theoretical feasibility of the proposed method.

Key words: prestressing CFRP plate; bridge engineering; long-gauge strain; evaluation of prestress losses

Citation format: HUANG Z G, HUANG W G, YIN X, et al. Theoretical study on prestress evaluation of CFRP

收稿日期:2021-11-02

基金项目:国家自然科学基金青年基金项目(51808219);江西省交通运输厅科技项目(2020H0009)

slab bridge reinforcement based on macro-strain monitoring[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2022, 39 (4): 24-31.

碳纤维增强材料(CFRP)具有轻质、高强、耐腐蚀、抗疲劳、便于施工等优点,目前已被广泛用于桥梁和各类建筑构件的加固维护中^[1-4]。在实际工程中为克服直接粘贴加固所导致的CFRP板易剥离及强度利用率不高等问题,诸多学者研究并提出了预应力CFRP加固方法,并在国内外得到广泛应用^[5-7]。然而预应力CFRP加固不可避免的会出现预应力损失从而影响加固效果,对此不少学者^[8-9]进行了大量的监测试验,得到了预应力损失机理、损失的大致范围等成果。但其监测方法大多是通过在CFRP板表面粘贴电阻应变片,传统“点式”应变片容易受到CFRP板表面微小裂纹影响,尤其是CFRP板高应力状况下较难获得有效监测数据,不适用于实际工程中长期、大范围的CFRP板应力监测^[10]。

针对上述CFRP板预应力损失监测和评估问题,王珍珍等^[11]应用内嵌光纤光栅(FBG)应变传感器的CFRP板对加固混凝土梁进行短期预应力损失测试。王珍珍,任鹏等^[12-13]将CFRP的强度特性与FBG传感探头相融合,研制出基于拉挤成型工艺的智能CFRP-OFBG复合板。邓朗妮等^[14-15]将CFRP板与光纤光栅相结合研制出具有智能监测性能的CFRP板材,并运用此材料对疲劳损伤下的钢梁和混凝土矩形梁进行加固研究。从上述研究文献中可知,光纤传感器主要代替了传统应变片用于监测CFRP板的应力状况,具有较好的监测效果,但是仍然是一种“点式”的局部监测,难以反映复杂结构承载力状况的变化^[16]。“点式”的光纤传感器进行二次封装可制成长标距应变传感器,将其串联可实现分布式应力监测,实现大跨结构分布式监测。Glisic^[17]研究了嵌入式长标距光纤传感器的受力特点和测试精度,与传统的点式应变传感器相比,长标距传感器可在大跨结构中实现满布或者分布式布置,实现全覆盖监测。吴必涛等^[18-20]通过开展车桥耦合缩尺试验和实桥试验表明长标距应变监测技术在捕捉结构局部损伤和结构纵向应力分布状况监测上有明显优势。

为实现桥梁加固中的CFRP板纵向预应力状况及加固效果快速监测,在原有实桥加固试验监测的

基础上,本文研究了基于分布式长标距应变监测的预应力CFRP板桥梁加固预应力损失快速监测理论方法,为相关监测评估提供理论参考。

1 基于分布式传感技术的桥梁加固预应力损失评估原理

长标距传感器组成构造如图1所示^[18],该传感器主要由两端引线部分和锚固点中间传感器部分组成,套管和耐高温隔离管对光纤布拉格光栅(FBG)起到保护作用并使传感器部分的光栅产生均匀的应变,利用这一原理可测得锚固点内的平均应变,将多个长标距应变传感器串联可实现对结构的分布式监测。

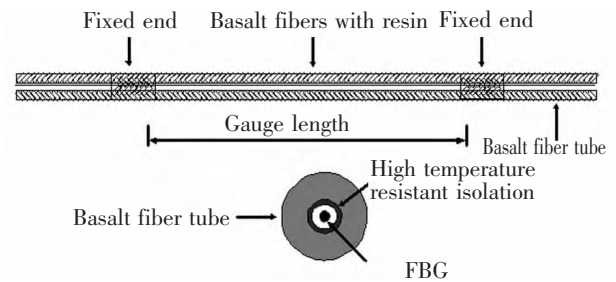


图1 长标距应变传感器结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of long-gauge sensor

预应力CFRP板加固桥梁会导致桥梁出现反拱现象,可以有效地减小车辆荷载下桥梁的应变与挠度,因此可以监测加固前后的桥梁纵向应变变化规律评估桥梁的预应力加固效果,在运营阶段通过长期监测对比,评估预应力CFRP板加固效果的演变规律。传统的应变计由于受标距限制无法实现桥梁纵向应变分布式监测,根据上述监测原理,推导了梁式结构在预应力CFRP板加固后梁底混凝土的长标距应变求解公式及移动车辆荷载作用下的长标距应变对时间 t 的积分值;分别以此作为CFRP板的预应力损失静、动态评估指标。

如图2所示的梁式结构,梁底布置有 i 个长标距应变传感器,其第 i 个传感器中心距离支座 x_i 。CFRP板经张拉后两端锚固于梁底部与桥梁混凝土

共同工作,其张拉力为 F_y ,此时 CFRP 板的预应力 $\sigma_y = F_y / A_{\text{CFRP}}$ 。

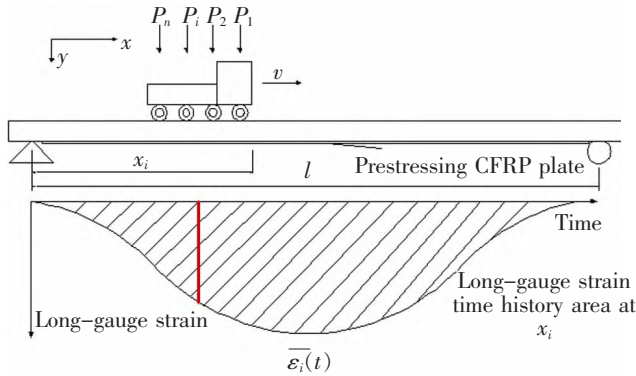


图2 移动车辆荷载下评估原理示意图
Fig.2 Schematic diagram of evaluation principle under moving loads

由预应力 CFRP 加固引起锚固点内侧第 i 个传感器的长标距应变 $\bar{\varepsilon}_{iy}$

$$\bar{\varepsilon}_{iy} = \left(\frac{F_y}{EA} + \frac{My}{EI} \right) = \left(\frac{F_y}{EA} + \frac{My^2}{EI} \right) \quad (1)$$

式中: $E, I, A, l, y, A_{\text{CFRP}}$ 分别为梁式结构的弹性模量,截面对于中和轴的惯性矩,横截面面积,梁的计算长度,中和轴高度和预应力 CFRP 板的横截面面积。当 CFRP 板出现预应力损失,此时相应的张拉力和 CFRP 板预应力记为 F_{ys} 和 σ_{ys} ,出现预应力损失后 CFRP 板面积 A_{CFRP} 不变。则此时第 i 个传感器的长标距应变 $\bar{\varepsilon}_{iys}$

$$\bar{\varepsilon}_{iys} = \left(\frac{F_{ys}}{EA} + \frac{My}{EI} \right) = \left(\frac{F_{ys}}{EA} + \frac{My^2}{EI} \right) \quad (2)$$

将 $\bar{\varepsilon}_{iys}$ 比上 $\bar{\varepsilon}_{iy}$

$$\frac{\bar{\varepsilon}_{iys}}{\bar{\varepsilon}_{iy}} = \frac{F_{ys}}{F_y} = \frac{\sigma_{iys}}{\sigma_{iy}} \quad (3)$$

根据式(3)在已知 σ_y 和 $\bar{\varepsilon}_{iy}$ 的情况下,第 i 个传感器的长标距应变可作为预应力损失的静态评估指标,评估 x_i 位置 CFRP 板的预应力损失的纵向分布情况,静态评估指标用于加固过程中预应力损失监测。

针对加固后桥梁运营阶段的预应力损失监测,需研究桥梁加固后不中断交通情况下的 CFRP 板预应力损失评估指标。本文基于动态长标距应变时程分布评估加固后桥梁的整体受力状况,桥梁底 x_i 处应变影响线 $f_i(x)$ 为^[21]

$$\begin{cases} f_i(x) = \frac{(l-x_i)yx}{EI} & 0 \leq x \leq x_i \\ f_i(x) = \frac{x_i y}{EI} \left(1 - \frac{x}{l} \right) & x_i \leq x \leq l \end{cases} \quad (4)$$

当车速为 v 的车辆通过桥梁时,第 j 个车轴的轴重为 $P_j (j=1 \sim n)$,车轮 j 与第一个车轮的距离记为 $d_j (j=1 \sim n)$,则移动车辆荷载作用下第 i 个传感器的长标距应变响应可表示成

$$\bar{\varepsilon}_{ic}(x) = \sum_{j=1}^n P_j f_i(x-d_j) \quad (5)$$

将车荷载产生的长标距应变沿梁跨径方向的积分为

$$\int_0^{l+d_n} \bar{\varepsilon}_{ic}(x) dx = \sum_{j=1}^n P_j \int_0^{l+d_n} f_i(x-d_j) dx = \sum_{j=1}^n P_j \int_0^l f_i(x) dx \quad (6)$$

则车荷载产生的长标距应变沿梁跨径方向的积分为

$$\int_0^{l+d_n} \bar{\varepsilon}_{ic}(x) dx = \sum_{j=1}^n P_j \int_0^{l+d_n} f_i(x-d_j) dx = \sum_{j=1}^n P_j \int_0^l f_i(x) dx \quad (7)$$

代入 $f_i(x)$ 和 $t = (l+d_n)/v$ 至上述方程得车辆荷载下第 i 个传感器的长标距应变对时间 t 的积分值 S_{ic}

$$\int_0^{l+d_n} \bar{\varepsilon}_{ic}(x) dx = v S_{ic} = \frac{(l-x_i)yx_i \sum_{j=1}^n P_j}{2EI} \quad (8)$$

对于由预应力加固引起的第 i 个传感器的长标距应变对时间 t 的积分值 S_{iy}

$$S_{iy} = \int_0^t \bar{\varepsilon}_{iy} dt = \left(\frac{F_y}{EA} + \frac{F_y y^2}{EI} \right) t \quad (9)$$

车辆荷载作用下,预应力 CFRP 板加固桥梁第 i 个传感器的长标距应变对时间 t 的积分值 S_i

$$S_i = S_{iy} + S_{ic} = \frac{(l-x_i)yx_i \sum_{j=1}^n P_j}{2EIv} - \left(\frac{F_y}{EA} + \frac{F_y y^2}{EI} \right) \frac{(l-d_n)}{v} \quad (10)$$

当 CFRP 板出现预应力损失,此时第 i 个传感器的长标距应变对时间 t 的积分值为 S_{is} ,车辆经过的速度为 v_s ,轴重为 P_{js} ,则 S_{is} 为

$$\begin{aligned} S_{is} = S_{iy} + S_{is} = & \frac{(l-x_i)yx_i \sum_{j=1}^n P_{js}}{2EIv_s} \\ & - \left(\frac{F_{ys}}{EA} + \frac{F_{ys} y^2}{EI} \right) \frac{(l-d_n)}{v_s} \end{aligned} \quad (11)$$

最后将式(10)和式(11)化简得到移动车辆荷载作用下 σ_{ys} 和 σ_y 的比值,如式(12)所示

$$\frac{\sum_{k=1}^n P_{is} + vS_i \sum_{k=1}^n P_i - vS_i \sum_{k=1}^n P_i}{\sum_{k=1}^n P_i} = \frac{\varepsilon_{iys}}{\varepsilon_{iy}} = \frac{F_{iys}}{F_{iy}} = \frac{\sigma_{iys}}{\sigma_{iy}} \quad (12)$$

根据式(12)在已知 σ 预和 S_i 和相应车辆荷载参数的情况下,可以任意已知车速和轴重的试验车行驶通过加固桥梁引起的 S_{is} 为动态评估指标,评估相应 x_i 处预应力 CFRP 板的预应力损失,从而评估桥加固效果。

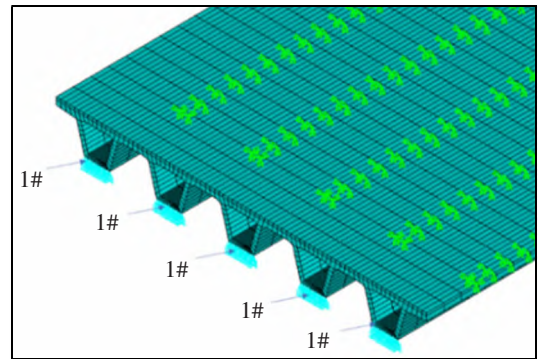
2 桥梁加固数值模型的建立及验证

本文以前期研究中的小箱梁桥实桥加固试验为工程背景^[9],进一步研究预应力损失对 CFRP 板加固效果的影响及上述静、动态预应力损失评估方法的正确性与可行性。该桥由 5 片小箱梁拼装而成,全桥宽 14.9 m,长 35 m。所用 CFRP 板长 26.6 m,截面尺寸 50 mm×3 mm,并安装长标距 FBG 应变传感器,监测张拉过程中 CFRP 板的应变变化。

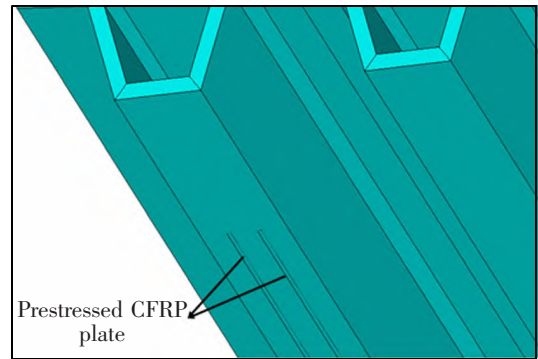
试验中预应力加固方法如下:① 定位 CFRP 板的锚固端和张拉端,并对相应位置进行清理打磨;② 在定位相应位置进行钻孔、植筋、安装锚固块;③ 安装 CFRP 板,采用分级形式张拉(即张拉控制力的 10%、20%、50%、75%、100%),每级张拉完成后持续数分钟再进行下一级张拉;④ 张拉完成后通过锚固块锚固,并对 CFRP 板与混凝土之间的缝隙涂抹结构胶,使其协同工作。

为准确模拟上述加固过程,建立分析模型如图 3(a)所示,其中混凝土箱梁采用 SOLID65 实体单元,预应力 CFRP 板采用 SHELL181 壳单元,支座采用 COMBIN14 弹簧单元模拟。模型中混凝土的弹性模量,泊松比和质量密度分别为 3.25×10^{10} Pa, 0.166 7 和 $2\,500$ kg/m³。预应力 CFRP 板的弹性模量,泊松比,线膨胀系数分别为 1.63×10^{11} Pa, 0.17, 3.2×10^{-5} , 预应力 CFRP 板位于箱梁中线左右各 15 cm,如图 3(b)所示。

根据上述实际加固方法本文采用的数值模拟加固方法如下:① 在每一片梁的相应位置布置 SHELL181 单元模拟 CFRP 板;② 将 CFRP 板端部的 SHELL181 单元节点与相应位置混凝土 SOLID65



(a) Small box bridge model and number



(b) The bottom position of prestressed CFRP plate

图3 箱梁桥截面编号和预应力 CFRP 板的位置
Fig.3 Section number of box girder bridge and location of prestressed CFRP plates

单元节点进行全自由度耦合,达到模拟锚固块的目的;③ 将中间段 SHELL181 和 SOLID65 进行横向和竖向耦合,沿桥梁纵向自由度释放,使其协同工作;④ 对 5 片梁的 CFRP 板施加温度场模拟预应力张拉过程,计算预应力对应的温度变化值 $\Delta T = F/(E\alpha) = 375$,其中 F 为应力, E 为弹性模量, α 为线膨胀系数。

模拟三轴车辆荷载,轮对横向轴距 1.8 m,加载到梁 5 上,三轴前后间距分别为 2.3 m 和 4.7 m。 P_1, P_2, P_3 的大小依次分别为 $2.846 \times 10^4, 6.661 \times 10^4, 6.661 \times 10^4$ N,施加在梁 5# 对应车道位置。假设箱梁桥底板的中间位置装有分布式长标距传感器,两端传感器距离支座 0.7 m,传感器长 $l_m = 1.4$ m,编号 1~24,具体传感器位置如图 4 所示。

为了验证本文数值模拟桥梁加固方法的正确性,与相同实桥加固试验进行对比,其中 100% 预应力为 1 200 MPa,为 CFRP 板极限强度的 50%。如图 5(a)所示,实际测得 5 级张拉过程中 CFRP 板应变依次为 1 073, 2 017, 3 821, 6 001, 7 498 $\mu\varepsilon$,其中

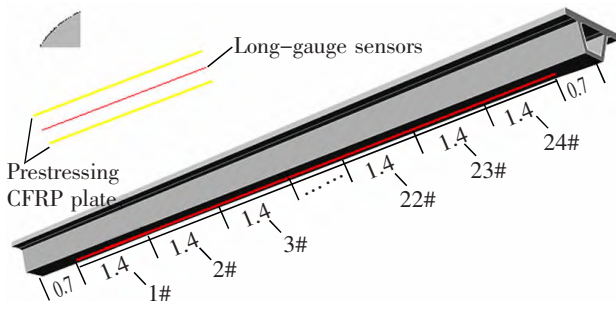
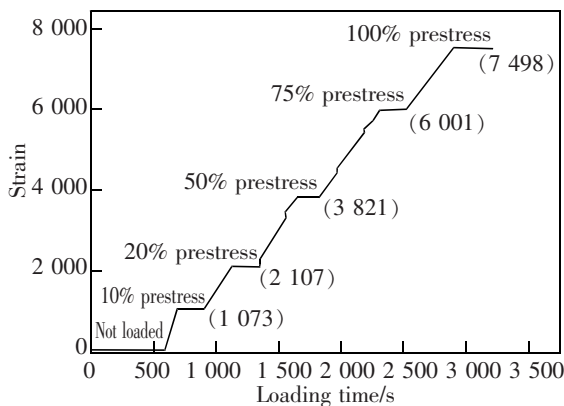


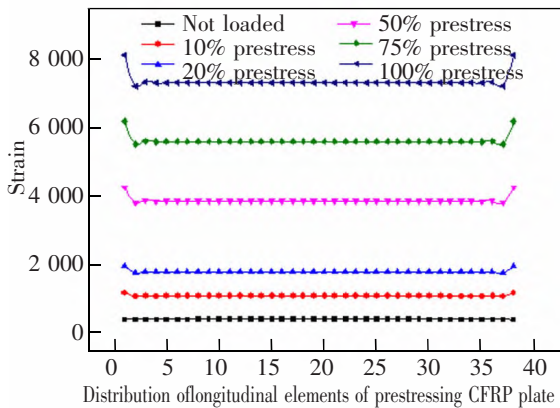
图4 长标距传感器位置示意图(单位:m)

Fig.4 Schematic diagram of long-gauge sensor position (Unit:m)

$\mu\epsilon$ 为微应变, $1 \mu\epsilon = (\Delta/L) \times 10^6$, 试验结果证明了长标距 FBG 传感器在高应力状况下的良好监测性能^[2]。数值模拟中 CFRP 板应变均匀分布, 5 级张拉过程应变依次为 1 092, 1 784, 3 848, 5 572, 7 300 $\mu\epsilon$, 如图 5(b) 所示; 模拟结果和实测结果较为接近, 证明本文模拟桥梁加固方法的正确性, 为后续研究打下基础。



(a) Time-history diagram of measured CFRP plate



(b) Longitudinal strain distribution of CFRP plate along bridge under different loading levels

图5 实测 CFRP 板应变和数值模拟 CFRP 板应变对比
Fig.5 Comparison of measured CFRP plate strain and simulated CFRP plate strain

3 基于分布式长标距应变监测的预应力 CFRP 加固效果监测理论验证

3.1 预应力 CFRP 板桥梁加固及跑车试验模拟

在上述验证模型基础上, 设计了 5 种预应力张拉加固工况和一组未施加预应力的对照工况, 分析不同预应力水平对 CFRP 板加固桥梁效果的影响。其中 100% 预应力工况为 1 200 MPa, 其余为 20%、40%、60%、80% 的张拉预应力, 采用的三轴车辆模型, 其轮对横向轴距 1.8 m, 三轴前后间距分别为 2.3 m 和 4.7 m。轴重 P_1, P_2, P_3 的大小依次分别为 $2.846 \times 10^4, 6.6619 \times 10^4, 6.6619 \times 10^4$ N。实际高速公路车辆行驶车速通常为 80~120 km/h, 本文模拟车速为 110 km/h。不同张拉预应力工况下梁 5 跨中 12 号传感器的长标距应变时程曲线如图 6 所示。

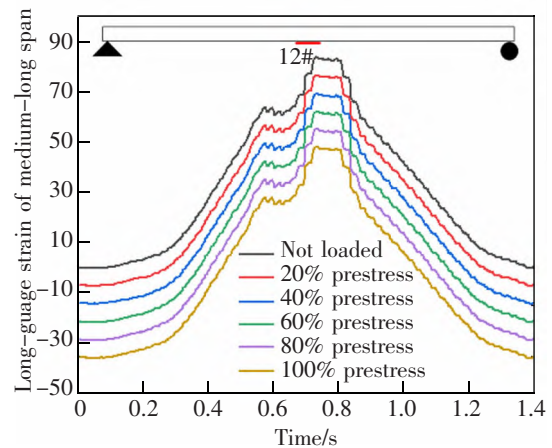


图6 加固桥梁跨中 12 号传感器长标距应变时程曲线

Fig.6 Long-gauge strain time-history curve of medium-long span

从结果可知, 随着 CFRP 板张拉预应力的增加, 跨中 12 号传感器长标距应变峰值整体减小, 各工况下长标距应变的值从小到大依次为 49.5, 56.6, 63.9, 71.2, 78.4, 85.9 $\mu\epsilon$, 相比与未施加预应力, 满载预应力下的最大应变减小 36.4 $\mu\epsilon$ 左右, 出现明显反拱效应, 说明加固效果明显。通过分析不同工况下梁 5 跨中 12 号传感器长标距应变时程曲线可知: 预应力 CFRP 板加固桥梁后车辆荷载下桥梁的长标距应变时程曲线有明显的变化, 不同加固预应力水平之间界限明显且幅值呈现规律增加的特征。但是仅从应变数值上无法定量评估 CFRP 板的应力及损失状况, 本文采用下面 2 种指标分别进行动、静态的预应力评估。

3.2 基于长标距应变静态指标的 CFRP 预应力损失监测

首先对预应力 CFRP 板加固阶段进行应力监测,采用本文推导的静态评估指标,为验证静态预应力损失评估方法的正确性,根据之前学者研究的预应力损失范围^[8-9],设置了 4 种预应力损失工况和无预应力损失工况,在原有施加预应力的基础上分别减少 10%,15%,20%,25%的张拉预应力来模拟 4 种预应力损失工况。加固完成后,提取每种工况下 6~20 号传感器的长标距应变如图 7 所示。

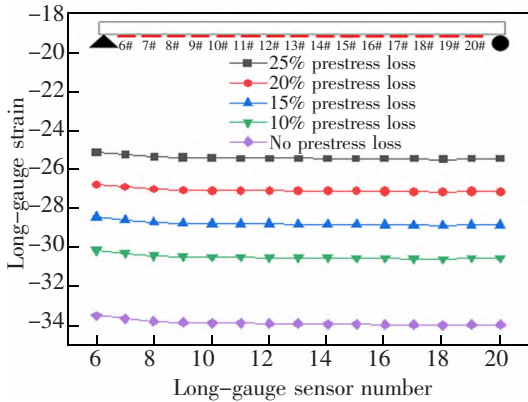


图 7 不同工况下长标距应变

Fig.7 Long-gauge strain under different working conditions

从图 7 可知,各工况锚固点内的长标距应变基本为定值,从小到大依次为-36.2,-33.2,-31.1,-29.2,-27.3 $\mu\epsilon$,说明长标距应变值较为稳定,将上述静态长标距应变评估指标代入公式(3)得到预应力评估结果,并与设计值的损失预应力对比,对比结果如图 8 所示。4 种预应力损失工况下,评估值与实际值基本接近,评估结果误差在 2.0%

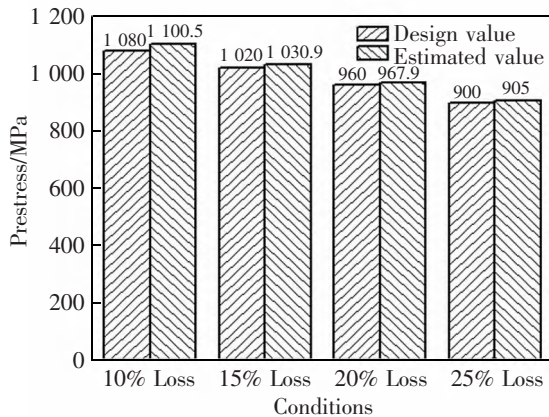


图 8 预应力设计值与评估值对比

Fig.8 Prestress comparison of design value with estimated value

内,说明基于长标距应变的 CFRP 板静态预应力评估指标具有较高的精度,可以满足工程监测要求,静态评估指标适合用于加固施工过程中的预应力评估。

3.3 基于长标距应变动态指标的 CFRP 预应力损失监测

对于运营过程中的预应力评估则可以采用移动车辆荷载的动态评估指标进行,在上节设置的应力损失工况中添加随机车辆荷载,对 CFRP 板进行动态预应力损失评估。具体工况参数取值见表 1 ($P_j, j=1\sim 3$),表中车速范围为 15~30 m/s,轴重范围为 0.5~0.7 P_j 。进行随机车辆荷载下 CFRP 板桥梁加固动力时程分析,分别提取各工况下 6~20 号传感器的长标距应变时程,然后对时间 t 的积分值,求取 CFRP 板预应力动态评估指标,评估结果如图 9 所示。

表 1 动态监测工况

Tab.1 Dynamic monitoring conditions

Conditions	No loss	10% Loss	15% Loss	20% Loss	25% Loss
Randomspeed/(m/s)	30	20	15	30	25
Axle load/N	P_j	$0.6P_j$	$0.5P_j$	P_j	$0.7P_j$
Degin value/MPa	1 200	1 080	1 020	960	900

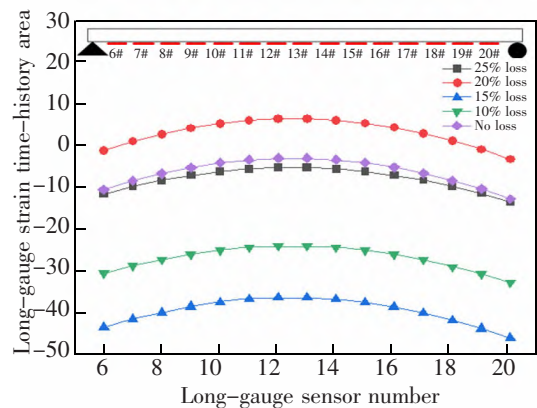


图 9 不同工况下分布式长标距应变对时间 t 的积分值

Fig.9 Long-gauge strain time-history area under different working conditions

图 9 横坐标为长标距传感器编号,纵坐标为各个传感器监测数据计算出的动态评估值。从图 9 中可知各工况下的长标距应变对时间 t 的积分值

呈二次抛物线分布,与式(10)相吻合,式(10)为一元二次函数。以其中12号传感器监测数据为例,通过式(10)计算的预应力未损失,损失10%,15%,20%,25%工况下动态评估值分别为-3.07,-24.43,-38.78,6.48,5.42 $\mu\epsilon\cdot s$ 。将上述动态评估指标代入式(11)即可求得CFRP板预应力评估结果,并与设计值的损失预应力对比,具体如图10所示。从图10中可知,评估值与实际值之间的误差较小,4种预应力损失工况下预应力实际值与评估值的误差在2.8%内,说明了本文的动态评估指标的可靠性,动态评估指标主要适用于运营阶段的CFRP板预应力监测评估。

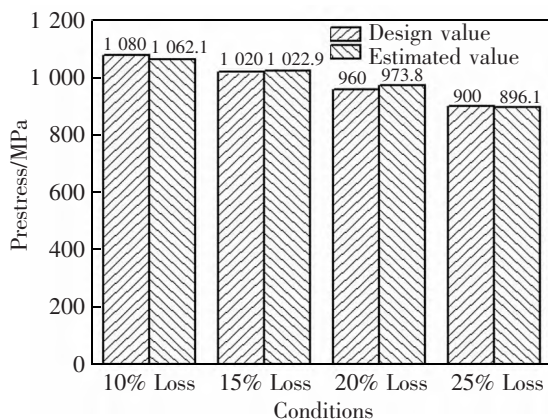


图10 预应力设计值与评估值对比

Fig.10 Prestress comparison of design value with estimated value

4 结论

本文根据试验数据验证了三维有限元分析模型,在此基础上分别进行静、动态试验工况的预应力损失评估,对所提的基于分布式长标距应变监测的桥梁加固效果评估方法进行了验证,主要结论如下。

1) 基于长标距应变传感器的分布式特性,针对桥梁加固初期的预应力损失提出了CFRP板预应力损失静态评估指标。研究表明各预应力损失工况下该方法误差均在2.0%内,表明该静态监测评估方法的理论可行性和准确性。

2) 针对加固后桥梁运营期间的预应力损失评估提出动态评估指标。该指标基于长标距应变对时间 t 的积分值,可在不中断交通的条件下评估预应力CFRP板的预应力损失。研究表明不同车速轴重工况下该方法误差均在2.8%内,表明了该方法的理论可行性,为下一步试验验证奠定基础。

参考文献:

- [1] MU K A, RAI G L. Performance of reinforced concrete beams externally prestressed with fiber composites[J]. Construction & Building Materials, 2009, 23(2): 822-828.
- [2] BENNITZ A, SCHMIDT J W, NILIMAA J, et al. Reinforced concrete T-beams externally prestressed with unbonded carbon fiber-reinforced polymer tendons[J]. Aci Structural Journal, 2012, 109(4): 536-537.
- [3] 李粒琿, 王志宇, 张宁. 碳纤维复合材料(CFRP)粘贴层数对开孔钢板疲劳寿命影响的试验研究[J]. 工程科学与技术, 2017, 49(S1): 226-233.
LI L H, WANG Z Y, ZHANG N. Experimental study on the effect of carbon fiber composite (CFRP) bonding layers on the fatigue life of perforated steel plate[J]. Engineering Science and Technology, 2017, 49(S1): 226-233.
- [4] 林于东, 宗周红, 张美珍, 等. 预应力CFRP板加固RC和PPC梁抗弯性能试验[J]. 中国公路学报, 2013, 26(4): 109-118.
LIN Y D, ZONG Z H, ZHANG M Z, et al. Flexural performance test of RC and PPC beams strengthened with prestressed CFRP plates[J]. China Journal of Highway and Transport, 2013, 26(4): 109-118.
- [5] 范向前, 刘决丁, 胡少伟, 等. 不同加载速率下CFRP加固混凝土梁动态力学性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2020, 41(7): 201-206.
FAN X Q, LIU J D, HU S W, et al. Experimental study on dynamic mechanical properties of concrete beams strengthened with CFRP at different loading rates[J]. Journal of Building Structures, 2020, 41(7): 201-206.
- [6] 潘勇, 夏叶飞, 张红雷, 等. 预应力CFRP板在公路桥梁加固中的应用[J]. 中外公路, 2017, 37(2): 116-120.
PAN Y, XIA Y F, ZHANG H L, et al. Application of Prestressed CFRP plates in highway bridge reinforcement [J]. Journal of China and Foreign Highway, 2017, 37(2): 116-120.
- [7] 张宝静, 尚守平. 变黏结预应力CFRP板加固受弯构件试验研究[J]. 公路交通科技, 2018, 35(11): 61-68.
ZHANG B J, SHANG S P. Experimental study on flexural member strengthened with variable bonded prestressed CFRP plates[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2018, 35(11): 61-68.
- [8] 郭馨艳, 钟明, 解金辉, 等. 先张预应力CFL加固RC梁预应力损失的实验研究[J]. 实验力学, 2016, 31(2): 141-148.
GUO X Y, ZHONG M, JIE J H, et al. Experimental study of pre-stress loss of RC beam strengthened by pre-tensioned pre-stressing CFL[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2016, 31(2): 141-148.
- [9] 黄金林, 黄培彦, 郑小红. 预应力碳纤维板加固钢筋混凝土梁预应力损失试验研究[J]. 建筑结构学报, 2015, 36(1): 85-91.
HUANG J L, HUANG P Y, ZHENG X H. Experimental study of prestress losses of RC beams strengthened with

- prestress FRP[J]. Journal of Building Structures, 2015, 36(1):85-91.
- [10] 陈适之. 基于长标距FBG的中小跨桥梁损伤识别与评估研究[D]. 南京:东南大学, 2019.
CHEN S Z. Research on damage identification and assessment of medium and small span bridges based on long gauge FBG[D]. Nanjing:Southeast University, 2019.
- [11] 王珍珍,周智,王佳钰. 预应力碳纤维复材板加固桥梁短期预应力损失监测[J]. 工业建筑, 2019, 49(4):180-186.
WANG Z Z, ZHOU Z, WANG J Y. Short-term prestress loss monitoring for post-tensioned CFRP laminated strengthened bridge[J]. Industrial Construction, 2019, 49(4):180-186.
- [12] 周智,王珍珍,任鹏,等. 预应力OFBG-CFRP智能板加固RC梁试验研究及荷载效应分析[J]. 建筑结构学报, 2016, 37(S1):268-276.
ZHOU Z, WANG Z Z, REN P, et al. Experimental investigation and loading effect on reinforced concrete beam strengthened with prestressed OFBG-CFRP smart plates[J]. Journal of Building Structures, 2016, 37(S1):268-276.
- [13] 王珍珍,任鹏,程鸿伟,等. 新型加固用智能碳纤维板及感知性能试验[J]. 中国测试, 2016, 42(3):113-117.
WANG Z Z, REN P, CHENG H W, et al. New smart carbon fiber reinforced polymer plate for strengthening and its sensing performance test[J]. China Measurement & Test, 2016, 42(3):113-117.
- [14] 邓朗妮,梁静远,廖羚,等. 基于光纤光栅的预应力碳纤维板加固钢梁抗弯性能试验研究[J]. 广西科技大学学报, 2015, 26(2):73-77.
DENG L N, LIANG J Y, LIAO L, et al. Flexural performance experimental study on steel beam strengthened with prestressed CFRP plate based on optical fiber bragg grating[J]. Journal of Guangxi University of Science and Technology, 2015, 26(2):73-77.
- [15] 邓朗妮,罗日生,钱香国,等. 智能碳纤维板嵌入式加固矩形截面钢筋混凝土梁试验研究[J]. 建筑结构, 2019, 49(3):92-97.
DENG L N, LUO R S, QIAN X G, et al. Experimental study on intelligent carbon fiber plate embedded reinforced concrete beam with rectangular section[J]. Building Structure, 2019, 49(3):92-97.
- [16] CALDERON P A, GLISIC B. Influence of mechanical and geometrical properties of embedded long-gauge strain sensors on the accuracy of strain measurement[J]. Measurement Science Technology, 2012, 23(6):065604.
- [17] GLISIC B. Influence of the gauge length on the accuracy of long-gauge sensors employed in monitoring of prismatic beams[J]. Measurement Science Technology, 2011, 22(3):035206.
- [18] WU B T, WU G, YANG C Q. Parametric study of a rapid bridge assessment method using distributed macro-strain influence envelope line[J]. Mechanical systems and signal processing, 2018, 120:642-663.
- [19] WU B T, WU G, YANG C Q. Damage identification method for continuous girder bridges based on spatially-distributed long-gauge strain sensing under moving loads[J]. Mechanical systems and signal processing, 2018, 104:415-435.
- [20] 贾永峰,邱婷,宋庆辉,等. 基于光纤传感技术的大跨连续刚构桥施工阶段张拉预应力监测[J]. 华东交通大学学报, 2018, 35(2):24-31.
JIA Y F, QIU T, SONG Q H, et al. Monitoring of tension and prestress during construction of long-span continuous rigid frame bridge based on optical fiber sensing technology[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2018, 35(2):24-31.
- [21] 邵佳妮. 预应力CFRP板加固梁桥的效果监测与研究[D]. 南京:东南大学, 2016.
SHAO J N. research on the reinforcing effect monitoring of concrete bridges strengthened with prestressed CFRP plates[D]. Nanjing:Southeast University, 2016.
- [22] 潘勇,赵飞,杨才干. 基于分布式长标距FBG传感器的新沭河大桥加固效果监测研究[J]. 市政技术, 2016, 34(2):169-172.
PAN Y, ZHAO F, YANG C Q. Study on reinforcement effect monitoring of Xinshu River Bridge based on distributed long gauge FBG sensor[J]. Municipal technology, 2016, 34(2):169-172.



第一作者:黄志刚(1984—),男,高级工程师,硕士,研究方向为桥梁健康监测,安全评估与桥梁施工控制。E-mail:383613037@qq.com。



通信作者:吴必涛(1986—),男,副教授,博士,硕士研究生导师,研究方向为桥梁结构健康监测,桥梁检测与加固评估,列车环境振动。E-mail:wubitao@ecjtu.edu.cn。

(责任编辑:姜红贵)