

基于光纤光栅感测技术的桥梁挂篮施工期应力应变监测方法

包 斌¹, 司海宝^{1,2}

(1. 安徽工业大学 建筑工程学院, 安徽 马鞍山 243032; 2. 南京水利科学研究院, 南京 210029)

摘要: 针对桥梁内部应力与应变传统监测技术耐久性差、测量繁琐等技术不足, 提出1种基于光纤光栅感测技术的桥梁挂篮施工结构健康监测方法。以跨常合高速分离式立交桥为研究对象, 选取施工期活载作用下桥梁受力最不利截面, 在桥墩处起步梁段的箱梁顶板、底板与腹板中心线交汇点植入光纤传感器监测其应力、应变, 分析起步梁段箱梁在挂篮施工期的应力、应变的变化规律, 评估桥梁挂篮施工期的内部结构健康状态。结果表明: 提出的方法可用于监测桥梁内部受力变化, 起步梁段顶板应力、应变增长主要受预应力张拉影响, 底板应力、应变增大主要受混凝土浇筑影响; 中跨合拢段箱梁浇筑后, 中跨梁段不再呈现上拉下压现象; 顶板应力、应变均在边跨合拢段前一个梁段预应力张拉后达到峰值, 底板应力在边跨合拢段前一个梁段浇筑后达到峰值, 而底板应变在边跨合拢段预应力张拉后达到峰值。建议桥梁挂篮施工过程中, 应重点监测边跨合拢前一个梁段施工至施工结束这几个阶段的应力、应变变化。

关键词: 应力应变; 挂篮施工; 光纤光栅; 感测技术; 桥梁; 结构健康监测; 施工监测

中图分类号: U 446.2 **文献标志码:** A **doi:** 10.12415/j.issn.1671-7872.23174



A Stress and Strain Monitoring Method for Bridge Cantilever Construction Based on Fiber Bragg Grating Sensing Technology

BAO Bin¹, SI Haibao^{1,2}

(1. School of Architectural Engineering, Anhui University of Technology, Maanshan 243032, China; 2. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract: In view of the shortcomings of traditional monitoring techniques for internal stress and strain in bridges, such as poor durability and cumbersome measurement, a structural health monitoring method of bridge hanging basket construction based on fiber grating sensing technology was proposed. Taking the cross-Changhe expressway separation interchange bridge as the research case, the most unfavorable cross section of the bridge under live load during construction was selected, and optical fiber sensors were implanted at the intersection points of the top plate, bottom plate and web center line of the initial girder section at the bridge pier to monitor its stress and strain. The stress and strain changes of the starting beam section during the construction period of the hanging basket were analyzed, and the internal structural health status of bridge hanging basket during construction period was evaluated. The results show that the proposed method can be used to monitor changes in internal stress of bridges. The stress and strain growth of the top plate of the starting beam section are mainly affected by the prestress and tension, while the stress and strain growth of the bottom plate are mainly affected by the concrete pouring. After the box girder of the

收稿日期: 2023-12-03

基金项目: 土石坝破坏机理与防控技术重点实验室开放基金(YK9150020)

作者简介: 包斌(1998—), 男, 安徽芜湖人, 硕士生, 主要研究方向为桥梁工程监测。

通信作者: 司海宝(1974—), 男, 安徽安庆人, 博士, 副教授, 主要研究方向为桥梁工程监测、岩土工程。

引文格式: 包斌, 司海宝. 基于光纤光栅感测技术的桥梁挂篮施工期应力应变监测方法[J]. 安徽工业大学学报(自然科学版), 2024, 41(5):545-551.

middle span closed section is poured, the middle span beam section no longer presents the phenomenon of pulling up and pressing down. The stress and strain of the top plate reach their peak values after prestressing the beam section in front of the edge span closing section, while the stress of the bottom plate reaches its peak value after pouring the beam section in front of the edge span closing section. The strain of the bottom plate reaches its peak value after prestressing the side span closing section. It is suggested that during the construction of bridge hanging basket, the stress and strain changes of the beam segment before the closure of the side span should be monitored during the construction period until the end of the construction.

Keywords: stress and strain; hanging basket construction; fiber optic grating sensing technology; health monitoring of structures

挂篮施工作为桥梁建设的1项重要技术,因具有移动自由、安全高效等特点而被广泛用于桥梁施工中。桥梁挂篮施工的质量及稳定运行的关键参数是桥梁结构的承载能力^[1-3]。实时在线监测施工期桥梁结构的承载能力,不仅是监测桥梁结构内力、消除安全隐患的有效途径,而且是获取桥梁实际工作状态的唯一方法^[4-6]。传统的实时在线监测方法为电阻监测技术,其利用电阻信号感测桥梁结构体的受力与变形,但受限于环境与信号的影响,易引发工程事故或数据失真^[7-8],存在耐久性差、测量繁琐等不足。光纤光栅感测技术以光信号为媒介,具有适应性强、耐久性能好、测量便捷等优点^[9],可有效克服传统电阻监测技术的弊端^[10-12]。因此,将光纤光栅感测技术用于桥梁挂篮施工期间结构健康监测,对于保障桥梁安全施工具有重要意义。

目前,关于光纤光栅感测技术在桥梁应力与应变监测方面的应用已引起学者广泛关注。为了解桥梁运行状态与评估桥梁健康状况,张欣等^[13]利用长标距光纤应变传感器实时监测桥梁的动态应变响应;Anastasopoulos等^[14]在钢拱桥上安装80个光纤光栅应变传感器,监测其运营期1a内应变的变化;Ye等^[15]使用分布式和离散光纤传感器系统测得铁路桥上4根预应力混凝土梁的应变与温度,得到混凝土梁的预应力损失情况;王建霞等^[16]基于长标距光纤光栅,通过在龙尾港大桥布设光纤传感器,监测其运营期2个月内的应变变化,结果表明钢丝绳加固法和粘贴玄武岩纤维布加固方法对桥梁梁体性能有提升效果;Biondi等^[17]应用分布式光纤传感器监测萨尔蒙瀑布大桥运营期3a内应变变化。综上所述,光纤光栅感测技术在桥梁结构健康监测中潜力巨大,但是目前研究侧重于光纤光栅感测技术在桥梁竣工与运营期的结构健康监测,关于其在桥梁挂篮施工期间的监测应用研究较少。鉴于此,以跨常合(常州-合肥)高速分离式立交桥为研究对象,在桥梁挂篮施工期的桥梁关键部位植入光纤传感器,监测分析其在挂篮施工期应力应变的变化规律,以期对挂篮施

工期桥梁结构的稳定性评估提供数据参考。

1 工程概况

跨常合高速分离式立交桥位于马鞍山市博望区丹阳镇百峰村,为跨越常合高速而设,桥梁挂篮施工期为2022年2—10月。路线位于K18+480处且与S24常合高速交叉,交叉角度55°,与路线交叉处的常合高速路基宽33.5m,中央分隔带宽2m,双向六车道,沥青混凝土路面,设计行驶速度为100km/h。

桥跨径布置:6×35m+(45+80+45)m,桥梁全长386m,斜桥正做,左右幅错孔布置;主桥跨径布置为(45+80+45)m,为变截面预应力混凝土现浇连续箱梁单跨跨越高速,采用挂篮施工工艺;引桥采用预应力混凝土先简支后连续箱梁。墩台轴线与法线交角0°,桥面宽2×12m。桥平面位于R=1460m的右偏圆曲线上,桥面横坡为单向2%,纵断面纵坡2.96%,墩台径向布置。引桥通过调整梁长及箱梁悬臂尺寸来拟合曲线平面线形。混桥位处工程地质为粉质黏土、角砾土、凝灰岩等,桥位区无特殊性岩土,墩台桩基础均按端承桩设计。

2 监测方法的设计与验证

2.1 监测点的选取及施工工况

选取施工期活载作用下桥梁受力最不利截面进行应力应变监测,即选取桥墩处起步梁段左右各2个截面,共4个截面,传感器布置截面如图1。监测点位于箱梁顶板/底板与腹板中心线交汇点,传感器点位布置见图2,每个测点布设光纤光栅应变计、光纤光栅应力计和光纤光栅温度计各1支,其中截面I与截面IV、截面II与截面III对称分布,共布置60支传感器。根据挂篮施工工艺,以起步梁段0#块箱梁浇筑为工况1,1#块箱梁浇筑为工况2,1#块锚索预应力张拉为工况3。以此类推,以中跨合拢段12#箱梁浇筑为工况26,中跨合拢段12#箱梁锚索预应力张拉为工况27,共27个工况,具体工况见表1。

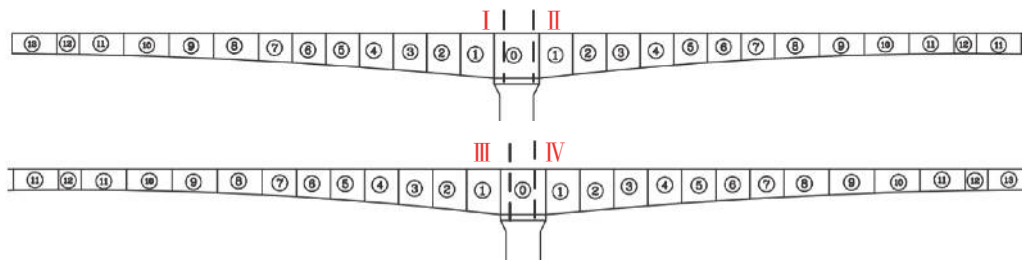


图1 传感器布置截面

Fig. 1 Sensor placement sections

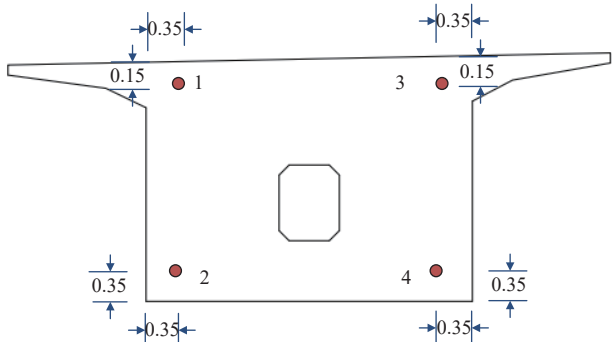


图2 截面传感器点位布置

Fig. 2 Sensor placement at section points

单位:m

Unit:m

表 1 施工工况

Tab. 1 Construction condition

工况编号	工况说明
1	0#块箱梁浇筑
2	1#块箱梁浇筑
3	1#块锚索预应力张拉
4	2#块箱梁浇筑
5	2#块锚索预应力张拉
6	3#块箱梁浇筑
7	3#块锚索预应力张拉
8	4#块箱梁浇筑
9	4#块锚索预应力张拉
10	5#块箱梁浇筑
11	5#块锚索预应力张拉
12	6#块箱梁浇筑
13	6#块锚索预应力张拉
14	7#块箱梁浇筑
15	7#块锚索预应力张拉
16	8#块箱梁浇筑
17	8#块锚索预应力张拉
18	9#块箱梁浇筑
19	9#块锚索预应力张拉
20	10#块箱梁浇筑
21	10#块锚索预应力张拉
22	11#, 13#块箱梁浇筑
23	11#块锚索预应力张拉
24	边跨12#块箱梁浇筑
25	边跨13#块锚索预应力张拉
26	中跨合拢段12#块箱梁浇筑
27	中跨合拢段12#块锚索预应力张拉

2.2 传感器的埋设安装

光纤光栅应变计适用于测量结构内部应变, 自带温度光栅补偿, 具有灵敏度高、稳定性好的特点, 将其直接绑扎在受力筋上, 监测桥梁轴向变形, 如图 3(a)。光纤光栅应力计适用于测量监测结构内部应力, 具有无变径、长期稳定性好的特点, 采用现场焊接的方法将其安装于钢筋骨架, 如图 3(b)。桥梁挂篮施工期间主要应力与变形多发生在桥梁轴线方向, 因此安装的光纤光栅应变计和应力计轴向应与桥梁轴向一致。



(a) 光纤光栅应变计



(b) 光纤光栅应力计

图3 光纤光栅传感器布置

Fig. 3 Layout of fiber bragg grating sensors

为消除测量点的温度变化对桥梁结构体应力的影响, 需在测量点同时安装光纤光栅温度计监测温度变化。温度计的布置方式与应变计一致, 且与应力计串联。光纤光栅传感器与引线用光纤熔接机连接, 连接处采用光纤热熔管保护, 因光纤光栅传感器

相对脆弱,加装不锈钢套管。为避免光纤传感器在混凝土浇筑及振捣过程中遭到损毁,将传感器固定在桥梁主筋正下方以提高成活率。传感器采用并联方式从两端引线引出,引线沿钢筋绑扎,扎带扎牢,过弯处以大于5 cm左右的弯曲半径引出,在钢筋笼出口处将引线套上保护软管,避免施工期间桥面操作破坏。光纤光栅传感器布设完毕后,利用多芯通信光缆、集成盒以及冗余光纤引线串联连接线路,连接至监测站内光纤光栅解调仪,实现监测数据的自动采集。本研究施工过程中安装的60支光纤传感器全部成活,表明该安装方法有效合理。

2.3 应变应力的计算

当温度或应力发生改变时,光纤产生轴向应变,光波周期变大,同时光纤芯层和包层半径变小。由于光弹性效应影响光纤折射率,进而引起光波波长偏移^[18-19]。利用应变与光栅波长偏移量的线性关系,通过计算反演得到被测结构体的应变 ε ,如式(1)。

$$\varepsilon = K_{\varepsilon} [(\lambda_{\varepsilon} - \lambda_{\varepsilon_0}) + (\lambda_{\varepsilon t} - \lambda_{\varepsilon t_0})] \quad (1)$$

式中: K_{ε} 为应变与波长变化量的比例系数; $K_{\varepsilon t}$ 为波长变化量的温补系数; λ_{ε} 为应变波长的测量值; λ_{ε_0} 为应变波长的初始测量值; $\lambda_{\varepsilon t}$ 为温补波长的测量值; $\lambda_{\varepsilon t_0}$ 为温补波长的初始测量值。

为消除温度对桥梁结构体应力应变监测的影响,需监测结构体的温度变化,通过式(2)计算温度。

$$t = K_t (\lambda_t - \lambda_{t_0}) + t_0 \quad (2)$$

式中: K_t 为温度与波长变化量的比例系数; λ_t 为温度

波长的测量值; λ_{t_0} 为温度光栅的初始波长,统一标定 $t_0=20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

考虑温度的影响,光纤光栅钢筋应力计轴力 F 的计算如式(3)。

$$F = K_F [(\lambda_F - \lambda_{F_0}) - K_{tF} (t - t_{F_0})] \quad (3)$$

式中: K_F 为应力与波长变化量的比例系数; K_{tF} 为波长变化量的温补系数; λ_F 为应力波长的测量值; λ_{F_0} 为应力波长的初始测量值; t 为测量 λ_F 时的环境温度; t_{F_0} 为测量 λ_{F_0} 时的环境温度。

由式(2),(3)可获得测点处应力 σ 计算公式:

$$\sigma = K_F \{(\lambda_F - \lambda_{F_0}) - K_{tF} [K_t (\lambda_t - \lambda_{t_0}) + t_0 - t_{F_0}]\} / A \quad (4)$$

式中 A 为光纤截面面积。

2.4 监测方法的验证

为验证所提监测方法的合理性,基于ABAQUS分析软件建立桥梁有限元分析模型,以“单元生死法”模拟桥梁挂篮施工工艺,以“降温法”模拟锚索预应力张拉,得到箱梁浇筑和锚索预应力张拉过程的应力分布。截面I顶板和底板应力模拟计算值与本文监测系统的实测值如图4。由图4可看出:应力实测值与计算值变化趋势一致性较好,整个挂篮施工期实测应力比计算值偏大,但最大平均差值小于7.0%,这是因为数值模拟计算未考虑挂篮自身重力荷载,导致模拟值偏小。综合计算值与实测值的结果表明,基于光纤感测技术的桥梁应变监测方法可用于监测桥梁内部受力变化,且能在挂篮施工期间实时监测桥梁的内部应力变化。

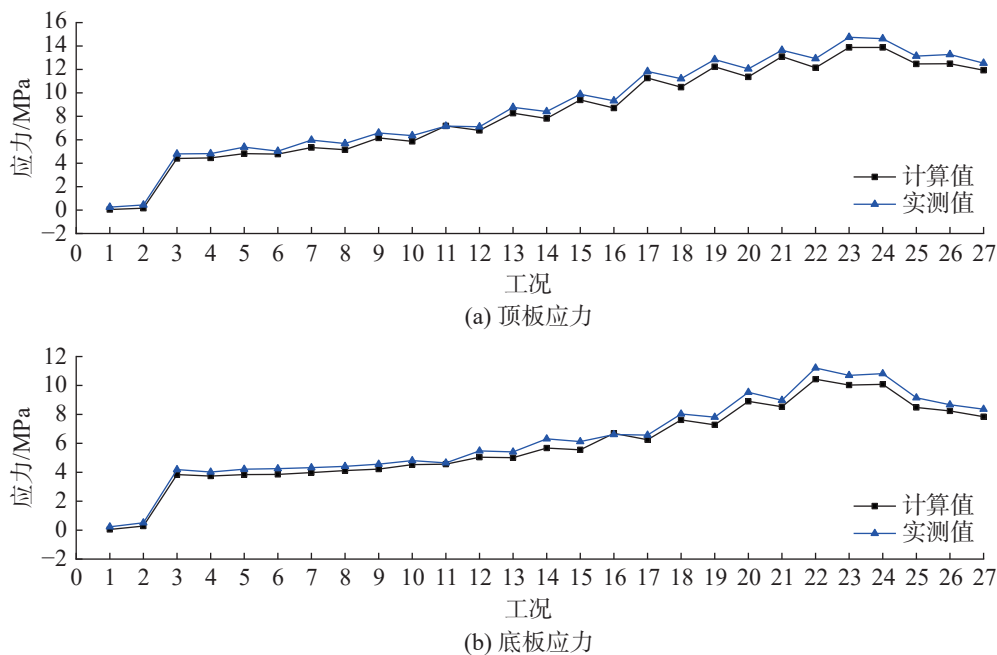


图4 实测与计算应力结果对比

Fig. 4 Comparison of measured and calculated stress results

3 监测结果与分析

截面 I, II 与截面 III, IV 对称分布,因此选取截面 I 与 II 为典型截面,分析桥梁挂篮施工过程中桥梁内部的应力、应变变化情况。

3.1 桥梁结构内部应力

挂篮施工期不同工况下桥梁监测截面 I, II 内部应力变化如图 5。由图 5 可看出:截面 I 顶板应力在施工阶段起步梁段 0#块(工况 1)和 1#块(工况 2)逐渐增大;随后顶板应力在锚索预应力张拉施工期(工况 3, 5, 7, ..., 23)增大,在箱梁块浇筑施工期(工况 4, 6, 8, ..., 24)减小,表明梁段处于上拉下压状态时,顶板应力变化主要受到锚索预应力张拉影响;截面 I 顶板应力在 11#块箱梁预应力张拉(工况 23)后达到峰值 14.75 MPa,在 1#块箱梁预应力张拉施工阶段(工况 3)增幅最大,增幅占峰值的 29.5%,在边跨 13#块箱梁预应力张拉阶段降幅最大(工况 25),降幅占峰值的 10.1%。

截面 I 底板应力在施工前期(工况 1, 2, 3, 5,

6, ..., 10)增大;后在箱梁块浇筑施工期(工况 12, 14, 16, ..., 24)增大,在预应力锚索应力张拉施工期(工况 11, 13, 15, ..., 25)减小,表明梁段处于上拉下压状态时,底板应力变化主要受到箱梁自重影响;底板应力在 11#块箱梁浇筑(工况 22)后达到峰值 11.21 MPa;在 1#块箱梁预应力张拉施工阶段增幅最大,增幅占峰值的 32.8%,边跨 13#块箱梁预应力张拉阶段降幅最大,降幅占峰值的 14.9%。

截面 II 与截面 I 在前 23 个工况是对称施工的,其应力的变化规律与截面 I 相同。截面 II 顶板在施工后期(工况 24, 25, 26)应力变化趋势与截面 I 相反,底板在施工后期(工况 24, 25)应力变化趋势与截面 I 相反,这是由于边跨 12#块箱梁浇筑阶段(工况 24)两侧梁段受力不一致导致的。当中跨合拢段 12#块箱梁浇筑(工况 26)后,截面 II 应力减小,截面 I 顶板应力增大、底板应力减小,表明结构体应力发生应力重分布,中跨梁段不再呈现上拉下压。

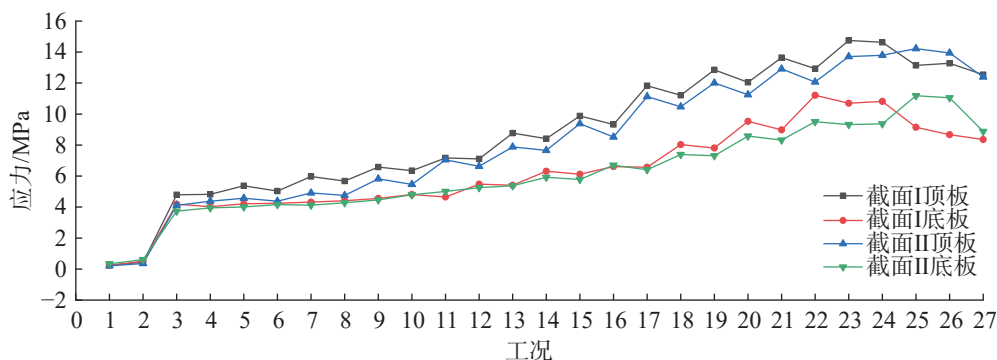


图5 截面 I, II 应力分布

Fig. 5 Stress distribution of section I, II

3.2 桥梁结构内部应变

挂篮施工期不同工况下桥梁监测截面 I, II 内部的应变变化如图 6。由图 6 可看出:截面 I 顶板应变在施工前期增大(工况 1, 2, 3, 4),随后在锚索预应力张拉施工期(工况 7, 9, 11, ..., 23)增大,在箱梁块浇筑施工期(工况 8, 10, 12, ..., 24)减小;在 11#块箱梁浇筑后监测应变达到峰值 482.7×10^{-6} ,在 1#块箱梁预应力张拉施工阶段增幅最大,增幅占峰值的 30.6%。截面 I 底板应变在施工前期增大(工况 1, 2, 3),随后在锚索预应力张拉施工期(工况 9, 11, 13, ..., 23)增大,在箱梁块浇筑施工期(工况 10, 12, 14, ..., 24)减小;在 11#块箱梁锚索预应力张拉后监测应变达到峰值 392.7×10^{-6} ,在 1#块箱梁预应力张拉施工阶段增幅最大,增幅占峰值

的 35.4%。

截面 II 与截面 I 在前 23 个工况是对称施工的,其应变的变化规律与截面 I 基本相同。由于边跨 12#块箱梁浇筑阶段(工况 24)两侧梁段受力不一致,截面 II 顶板在施工后期(工况 24, 25, 26)应变变化趋势与截面 I 相反,底板在施工后期(工况 24, 25, 26)应变变化趋势与截面 I 相反。截面 II 顶板应变在边跨 13#块锚索预应力张拉阶段达到峰值 482.1×10^{-6} ,底板应变在 11#块箱梁浇筑阶段达到峰值 375.8×10^{-6} 。

当中跨合拢段 12#块箱梁浇筑后,结构体应力发生重分布,中跨梁段不再呈现上拉下压现象。截面 I 顶板、截面 II 底板应变增大,截面 I 底板、截面 II 顶板应变减小。

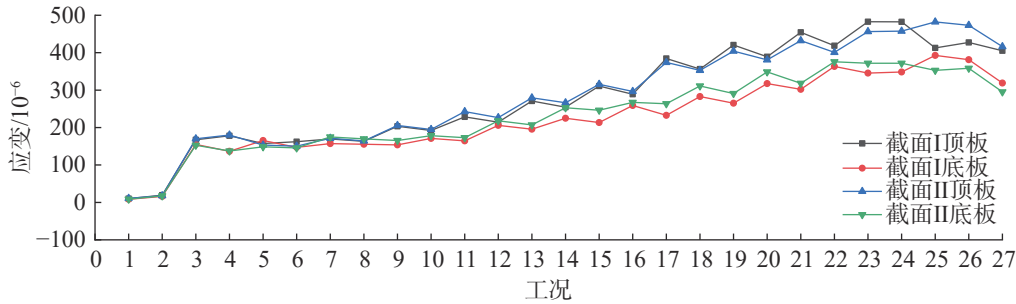


图6 截面 I, II 应变分布

Fig. 6 Strain distribution of section I, II

综上,桥梁挂篮施工过程中,起步梁段顶板应力、应变大于底板,这是因为顶板应力、应变增大主要受预应力张拉影响,底板应力、应变增大主要受混凝土浇筑影响。因此,预应力张拉阶段应注意临时器材堆载位置,避免集中堆载;相似桥梁挂篮施工过程中应重点关注边跨合拢前一个梁段施工至施工结束这几个阶段的应力、应变变化,严密监测桥梁内部受力变形情况,且在预应力张拉时,按顺序对称张拉锚索,避免两侧应力差过大。

4 结论

以跨常合高速分离式立交桥为研究对象,设计1种基于光纤光栅感测技术的桥梁挂篮施工结构健康监测方法,监测分析施工工况对起步梁段应力、应变的影响,得到以下主要结论:

1) 起步梁段顶板应力应变增大主要受预应力张拉影响,底板应力应变增大主要受混凝土浇筑影响;在中跨合拢段箱梁浇筑前,中跨梁段呈现上拉下压现象,当中跨合拢段箱梁浇筑后,中跨梁段不再呈现上拉下压现象。

2) 起步梁段顶板应力在边跨合拢段前一个梁段预应力张拉后达到峰值,底板应力在边跨合拢段前一个梁段浇筑后达到峰值;起步梁段顶板应变也在边跨合拢段前一个梁段预应力张拉后达到峰值,底板应变在边跨合拢段预应力张拉后达到峰值。

3) 桥梁挂篮施工过程中,应重点监测边跨合拢前一个梁段施工至施工结束这几个阶段的应力应变变化,严密监测桥梁内部受力变形情况,且在预应力张拉时,按顺序对称张拉锚索,避免两侧应力差过大。

参考文献:

[1] 赵锐. 跨海大桥悬臂浇筑施工菱形挂篮施工力学特性

与施工技术[J]. 水利水电技术(中英文), 2021, 52(2): 89-99.

[2] 靳会武, 周春华, 陈占明. 镇山大桥 44 m 宽桥面挂篮施工技术[J]. 公路, 2019, 64(11):147-152.

[3] 张清川. 连续梁桥挂篮反力预压设计与结构受力分析[J]. 铁道建筑, 2019, 59(10):45-49.

[4] ALAMANDALA S, PRASAD R L N S, PANCHARATHI R K, et al. Study on bridge weigh in motion (BWIM) system for measuring the vehicle parameters based on strain measurement using FBG sensors[J]. *Optical Fiber Technology*, 2021, 61:102440.

[5] TOCHAEI E N, FANG Z, TAYLOR T, et al. Structural monitoring and remaining fatigue life estimation of typical welded crack details in the Manhattan bridge[J]. *Engineering Structures*, 2021, 231:111760.

[6] GIANTI M S, PRASETYO E, WIJAYA A D, et al. Vibration measurement of mathematical pendulum based on macrobending-fiber optic sensor as a model of bridge structural health monitoring[J]. *Procedia Engineering*, 2017, 170:430-434.

[7] 徐祎恬, 吴静红, 唐柏鉴, 等. 基于弱反射布拉格光栅技术的海上钢管桩变形监测研究[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(11):183-192.

[8] 陈考奎, 李院峰, 周次明, 等. 基于弱光纤布拉格光栅阵列的桥梁应变测量[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(7):87-96.

[9] 何斌, 徐剑飞, 何宁, 等. 分布式光纤传感技术在高面板堆石坝内部变形监测中的应用[J]. *岩土工程学报*, 2023, 45(3):627-633.

[10] BUTLER L J, GIBBONS N, HE P, et al. Evaluating the early-age behaviour of full-scale prestressed concrete beams using distributed and discrete fibre optic sensors[J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 126:894-912.

[11] MISHRA S, SHARAN P, SAARA K. Real time

- implementation of fiber bragg grating sensor in monitoring flat wheel detection for railways[J]. [Engineering Failure Analysis](#), 2022, 138:106376.
- [12] CINITHA A, SAMPATH V, KESAVAN K. Strain monitoring of low carbon steel in a corrosive environment using fiber bragg technology[J]. [Construction and Building Materials](#), 2019, 217:265–272.
- [13] 张欣, 樊锋, 林宏磊, 等. 基于长标距光纤应变传感器的桥梁挠度识别技术研究 [J]. [建筑结构](#), 2022, 52(S2): 1932–1937.
- [14] ANASTASOPOULOS D, DE ROECK G, RERNDERS E P B. One-year operational modal analysis of a steel bridge from high-resolution macrostrain monitoring: influence of temperature vs. retrofitting[J]. [Mechanical Systems and Signal Processing](#), 2021, 161:107951.
- [15] YE C, BUTLER L J, ELSHAFIE M Z E B, et al. Evaluating prestress losses in a prestressed concrete girder railway bridge using distributed and discrete fibre optic sensors[J]. [Construction and Building Materials](#), 2020, 247:118518.
- [16] 王建霞, 杨美群, 张友华, 等. 基于长标距光纤光栅的龙尾港大桥加固监测研究 [J]. [公路](#), 2020, 65(11):110–117.
- [17] BIONDI A M, GUO X, WU R, et al. Smart textile embedded with distributed fiber optic sensors for railway bridge long term monitoring[J]. [Optical Fiber Technology](#), 2023, 80:103382.
- [18] RODRIGUES C, CAVADAS F, FÉLIX C, et al. FBG based strain monitoring in the rehabilitation of a centenary metallic bridge[J]. [Engineering Structures](#), 2012, 44:281–290.
- [19] DI PALMA P, LEONE M, RUSSO M, et al. Bonding quality monitoring of carbon fiber reinforced plastics bonded structures by fiber bragg gratings[J]. [Optics & Laser Technology](#), 2023, 161:109119.

责任编辑: 闫芳芳