

山区预应力混凝土连续刚构桥结构健康监测设计与实践

董李¹, 邱治强²

1. 青海省交通建设管理有限公司, 青海 西宁 810000

2. 招商局重庆交通科研设计院有限公司, 重庆 400067

DOI:10.61369/ERA.2025070019

摘 要 : 桥梁结构在长期服役后会出现损伤累积和抗力下降, 使其工作性能下降。为确保其安全运营, 应开展桥梁健康监测系统设计, 并对桥梁的挠度、应变等参数进行监测。本文针对某山区预应力混凝土连续刚构桥进行结构健康监测系统设计, 基于该系统对结构挠度及应变数据进行实时监测。并就常用的低通滤波方法处理桥梁应变动态响应信号进行原理介绍和数据处理, 结合低通滤波方法对桥梁应变动态响应信号进行分离处理。对采集数据的分析结果表明, 该桥运营状态良好, 同时表明本设计中构建的结构健康监测系统可用于开展桥梁状态评估, 为桥梁运营管理提供重要依据。

关 键 词 : 连续刚构桥; 健康监测; 低通滤波方法; 桥梁状态评估

Design and Practice of Structural Health Monitoring of Prestressed Concrete Continuous Rigid Frame Bridges in Mountainous Areas

Dong Li¹, Qiu Zhiqiang²

1. Qinghai Transportation Construction Management Co., Ltd., Xining, Qinghai 810000

2. China Merchants Chongqing Communications Technology Research & Design Institute Co., LTD., Chongqing 400067

Abstract : Bridge structures experience damage accumulation and resistance reduction after long term service, which degrades their operational performance. In order to ensure its safe operation, the design of bridge health monitoring system should be carried out and the deflection, strain and other parameters of the bridge should be monitored. In this paper, a structural health monitoring system is designed for a pre-stressed concrete continuous rigid bridge in a mountainous area, based on which the structural deflection and strain data are monitored in real time. It also introduces the principle and data processing of the commonly used low-pass filtering method to process the dynamic response signal of bridge strain, and separates the dynamic response signal of bridge strain by combining the low-pass filtering method. The analysis results of the collected data show that the bridge is in good operating condition, and at the same time, it indicates that the structural health monitoring system constructed in this design can be used to carry out the bridge condition assessment, which provides an important basis for the bridge operation management.

Keywords : continuous rigid bridge; health monitoring; low-pass filtering method; bridge condition assessment

引言

桥梁结构在长期服役后会出现损伤累积和抗力下降, 使其工作性能下降。连续刚构桥可发生主跨跨中下挠过大、箱梁梁体裂缝等病害, 会严重影响结构的正常使用, 甚至造成工程事故^[1]。虎门大桥辅航道桥在经过7年的观测后, 左幅主梁跨中累积下挠达到22.2cm, 右幅主梁跨中累积下挠达到20.7cm^[2]; 湖北黄石长江大桥在经过7年的观测后主梁跨中累计下挠达30.5cm^[3]。同时, 桥梁结构裂缝会引起钢筋锈蚀, 结构外观的破损以及结构功能的削弱甚至丧失^[4]。

近年来, 桥梁结构健康监测系统在国内外广泛应用, 提供对位移、应变等参数的监测, 为评估结构健康状况提供重要数据。桥梁结构健康监测系统通过在桥梁结构的关键部位部署相应的传感器监测节点, 对桥梁的环境荷载、运营荷载、桥梁特征和桥梁响应等参数进行实时监测^[5]。同时, 利用各种数据分析方法, 对监测数据进行智能处理, 从而有效地评估桥梁结构的健康状况^[6]。桥梁结构检测与健康监测技术已经发展并实践了数十年, 对设计寿命为50年或100年的桥梁而言, 结构检测与健康监测技术实践周期占桥梁全寿命周期的比例已相当可观, 能够起到很大的后验作用。从监测内容上, 传感器可包括对变形、位移的测量, 拉索锈蚀的检测, 疲劳监测、温度检

测、动态称重监测等的技术^[7]。另外，无线传输技术，健康监测动态功耗管理技术以及状态监测可视化及评估辅助技术都属于结构健康监测领域的新技术^[8]；以人工智能和新一代感知手段为代表的信息技术促进桥梁结构检测与健康监测技术的飞速进步，其中主要是以数字图像为代表的外观检查技术、无损检测技术以及一些健康监测的新技术^[9]。

桥梁的主要评估方法有常规综合评估法、层次分析法、专家系统评估方法、缺损状况指标法、基于可靠理论的评估方法及模糊综合评判法^[10]。常规综合评估方法主要采用了加权算术平均、加权几何平均以及两种方法的混合评估方法^[11]。层次分析法是将定性因素定量化，并在一定程度上检验和减少主观影响，是评价趋于科学化的评估方法^[12]。专家系统评估方法主要利用计算机模拟有经验专家的决策机理从而对既有桥梁进行综合评估或直接收集归纳专家意见的评估方法^[13]。缺损状况指标法是陆亚兴等根据桥梁结构特点，引入桥梁缺损状况指数作为综合性指标，建立相应的计算模型进行评估的桥梁评估方法^[14]。基于可靠度理论的评估方法是采用失效概率或可靠性指标来衡量结构的安全水平的桥梁评估方法。模糊综合评判法以模糊数学为基础，应用模糊关系合成的原理，将一些边界不清、不易量化的因素定量化进行评估^[15]。

本文以某连续刚构桥为对象，设计搭建桥梁健康监测系统并采集结构状态数据。结构健康监测系统能有效监测影响桥梁结构的各种作用及其在结构上产生的效应。为实时监控桥梁结构整体行为和智能化评估其状态，根据桥梁结构受力特性，设计桥梁健康监测系统的传感器布点方案。基于桥梁健康监测系统对桥梁结构开展健康监测，采用滤波数据处理方法对监测数据进行处理，剔除长周期温度对于监测数据的影响。依据相关规范，确定相应参数的限值，并将处理后的数据与桥梁的应变限值进行对比，以评级桥梁的运营状态，对桥梁结构状态进行评估。

一、监测对象分析

某连续刚构桥桥型为三跨预应力钢筋混凝土连续刚构桥，跨径组合为85m+150m+85m，边-中跨比为0.57，主梁为单箱双室变截面箱梁。桥型布置如图1所示，跨中断面及支点断面如图2所示。

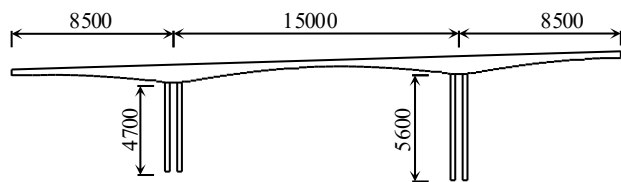


图1 连续刚构桥桥型布置图 (cm)

Fig. 1 Continuous rigid bridge layout (cm)

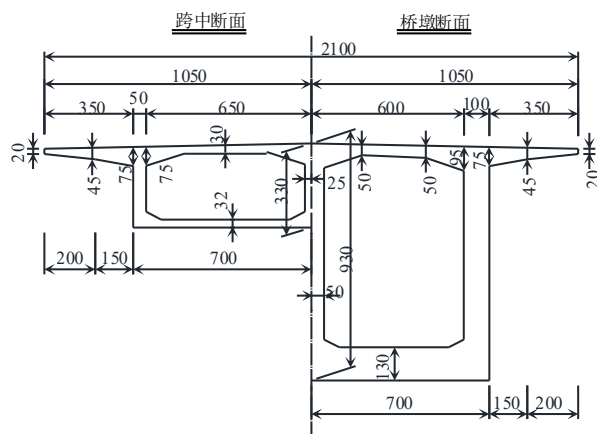


图2 主梁断面尺寸 (cm)

Fig. 2 Main beam section size (cm)

二、桥梁结构健康监测系统设计

(一) 结构健康监测系统架构

结构健康监测系统主要包括三个部分，含桥位现场部分、数据中心部分以及客户端。由于桥梁现场无供电及数据连线的硬件条件，健康监测系统采用太阳能电池板方式供电，通过移动无线网络将监测数据传回数据中心，再由用户从数据中心实时调取监测数据，实现远程获取结构响应数据，定期完成桥梁结构性能的评定工作。桥梁健康监测系统架构如图3所示。

按照“经济性、适用性、有效性”的原则，本文主要针对结构设计中起控制作用的截面和关键部位进行监测。通过理论计算并结合经验合理选择测点的数量，可以简化数据的采集和后处理工作，有利于把握桥梁结构的局部或整体状态。桥梁健康监测的传感器子系统主要包括应变传感器及位移传感，本节主要展示了桥梁各监测内容的点位布置。

(二) 应变测点设计

应变是判断结构安全最直接的指标，通过应变监测数据分析所得到的动应力可以反映桥梁的主要受力情况。方案选取桥梁关键截面，对连续刚构桥的半跨进行应变测点布置，每20分钟对桥梁应变进行监测。

本次应变监测采用智能弦式数码应变计监测实时应变。连续刚构桥共设置4个监测断面，分别在边跨跨中(B-B截面)、桥墩截面(C-C截面)、主跨1/4处截面(D-D截面)和主跨跨中截面(E-E截面)的顶板和底板分别安装智能弦式数码应变计(应避免箱梁梗腋处)，在桥墩截面可根据需求省略底板的应变传感器。安装位置如图4和图5所示，现场实物如图6所示。各应变传感器均沿桥梁纵向方向布置。

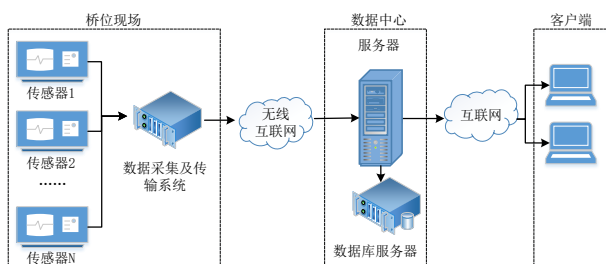


图3 桥梁健康监测系统架构

Fig. 3 Bridge Health Monitoring System Architecture

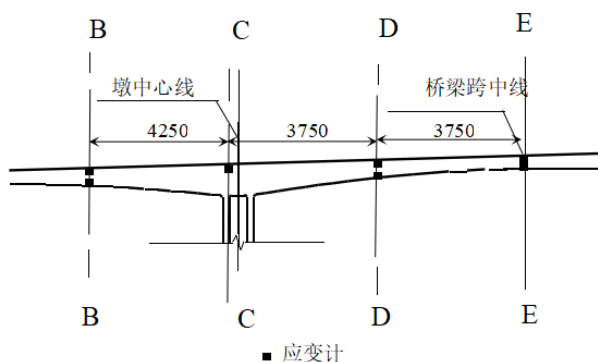


图4 应变传感器立面布置示意图 (cm)

Fig. 4 Schematic arrangement of strain sensor elevation (cm)

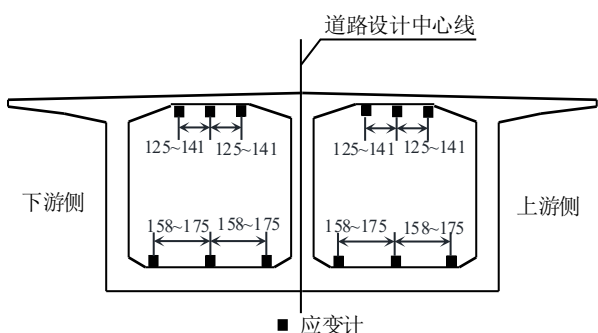


图5 应变传感器断面布置示意图 (cm)

Fig. 5 Schematic layout of strain sensor section (cm)



图6 应变传感器现场实物图

Fig. 6 Strain Sensor Field Diagram

(三) 挠度测点设计

连续刚构桥在车辆荷载作用下的挠度表征了桥梁的变形能力, 结构变形是结构状态改变最灵敏与最精准的反应, 因此对结构变形进行监测能够更准确地把握结构内力状态的变化, 故对桥

梁关键截面进行变形监测是有必要的。

压差式水准仪通常有规定量程以保证测量的精确性, 而山区连续刚构桥一般存在明显的纵坡, 在设计相应的测点时应根据仪器量程对监测系统进行分段。对于山区连续刚构桥, 由于地形高差较大, 桥梁存在比较明显的纵坡。量程较大的水准仪精度较低, 无法满足监测要求。为保证对连续刚构桥挠度监测的精确性, 测点设计时可以水准仪的量程为依据, 对测点进行分段设计。方案的主梁挠度监测依据水准仪的量程分为了三段监测, 并将边跨、中跨分为三套系统进行桥梁挠度监测, 并选取边跨跨中断面、支点断面、中跨跨中断面、中跨四分点断面、及桥墩进行桥梁竖向挠度监测, 每套系统的仪器连接如图7所示。根据不同系统及水准仪的量程可确定水准仪安装位移及相应的安装上限和下限, 点位布置示意图如图8所示, 现场实物如图9所示。

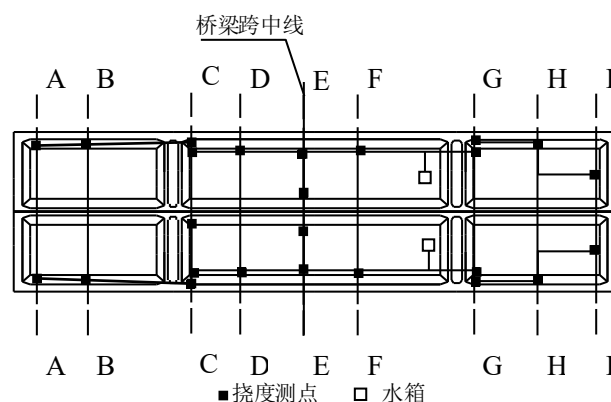


图7 压差式水准仪挠度测点分段示意图

Fig. 7 Differential Pressure Level Deflection Measuring Point Segmentation Diagram

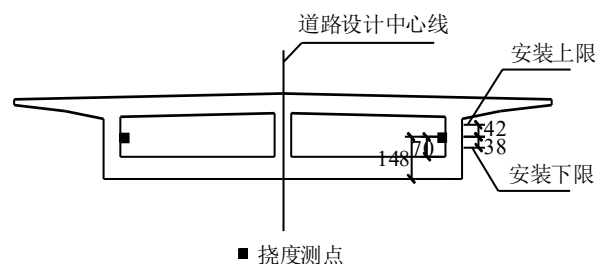


图8 压差式水准仪挠度测点点位示意图 (cm)

Fig. 8 Differential Pressure Level Deflection Measuring Points Schematic Diagram



图9 压差式挠度计现场实物图

Fig. 9 Differential Pressure Deflection Gauge Field Physical Drawing

三、监测数据分析与结构评价

(一) 数据处理原理

通过桥梁结构健康监测系統获得的应变数据记录了各种外部荷载引起的应变响应,包括车辆荷载冲击、温度、基础沉降等。其中,汽车荷载引起的结构响应直接反映了桥梁的刚度和工作状态。为了精准地获取这一响应,必须从总应变数据中剔除其他因素的影响,如温度和基础变位。对于温度,需将其转换为等效应变并进行补偿;对于基础沉降,需参考位移数据以确定沉降量,并找到应变补偿量。经上述数据处理后,方可得到由汽车荷载引起的结构响应。

为了简化上述过程,本文采用巴特沃斯滤波器进行汽车荷载效应筛选。该方法中,高通滤波器允许高于特定频率的信号通过,此时低于该截止频率的信号则被滤除。根据温度等因素引起的应变频率(如温度引起的应变频率通常较低,周期接近一天)来设定滤波器的截止频率,进行滤波处理,剩余的数据信号部分就是由汽车荷载引起的响应。通过这种方式,可有效评估桥梁结构在车辆荷载作用下的响应是否正常。

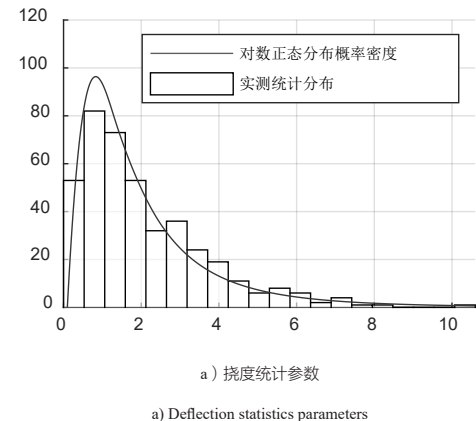
巴特沃斯滤波器由 Butterworth 于 1930 年提出,并逐渐发展成为一种数字 IIR 滤波器的一种设计方法。巴特沃斯滤波器幅频响应需要满足的关系如式所示:

$$\left| H(j\Omega) \right|^2 = \frac{1}{1 + \varepsilon^2 \left(\frac{\Omega}{\Omega_c} \right)^{2N}} \quad (1)$$

式中, Ω 、 Ω_c 、 N 分别表示频率、转折频率、系统阶数。巴特沃斯的滤波器的阶数越高,通带和阻带特性越好,通带和阻带过渡越快,通带内部平坦性越好^[16]。

(二) 挠度变化

本文对该连续刚构桥进行为期 42 天的桥梁应变及桥梁挠度的监测,并采用低通滤波的方式对监测数据进行处理,剔除长周期温度对于监测数据的影响。同时,依据《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》,确定相应参数的限值,进行桥梁的结构分析及评价。



根据《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》条例 6.5.3,桥梁挠度不超过 $L/600$,其中边跨限值为 142mm,中跨限

值为 250mm。通过将低通滤波法对监测得到的桥梁应变数据进行处理,剔除长周期温度对于监测数据的影响,并将处理后的数据与桥梁的挠度限值进行对比,以评价桥梁的运营状态。

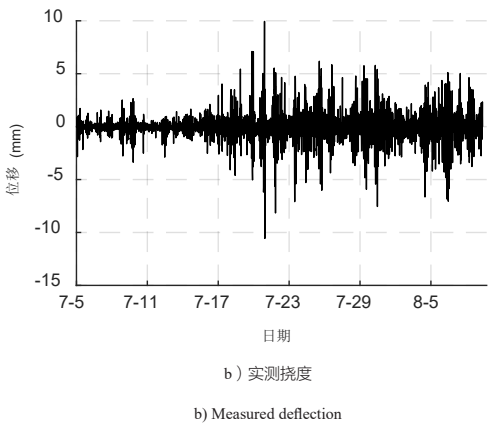


Fig. 10 Deflection changes during mid-span monitoring of side spans and statistical parameters

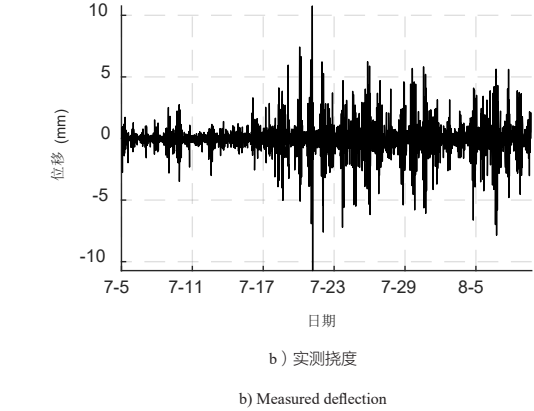
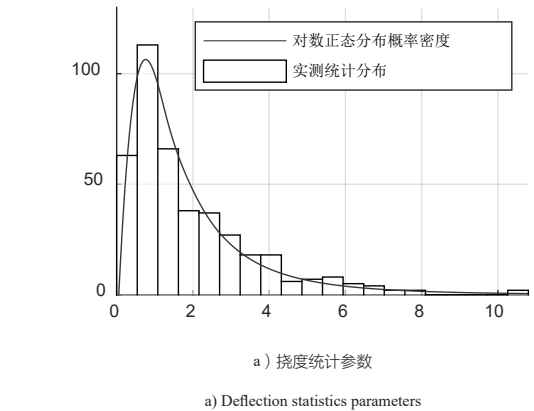


Fig. 11 Deflection changes and statistical parameters during mid-span mid-monitoring period

表1 挠度最大最小值 (mm)

Table 1 Maximum and minimum values of deflection (mm)

断面	左幅挠度		右幅挠度		设计 限值
	最大值	最小值	最大值	最小值	
边跨跨中	22.3	-169.3	30.6	0.7	142
中跨跨中	23.4	-167.6	34.4	-1.3	250

图 10 及图 11 表明，边跨跨中挠度及中跨跨中挠度测点总体无趋势性的变化，监测值有一定波动，波动区间为-10mm~10mm。由表 1 的比较可知桥梁的监测值均未超过限值。监测结果表明，连续刚构桥边跨及中跨在该监测期内未出现超过设计限值的结构变形。

(三) 顺桥向应变

根据《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》条例 3.1.4，C55 混凝土的抗拉强度设计值 1.89MPa，则桥梁的应变限值为 $53.2 \mu \epsilon$ 。通过将低通滤波法对监测得到的桥梁应变数据进行处理，剔除长周期温度对于监测数据的影响，并将处理后的数据与桥梁的应变限值进行对比，以评级桥梁的运营状态。

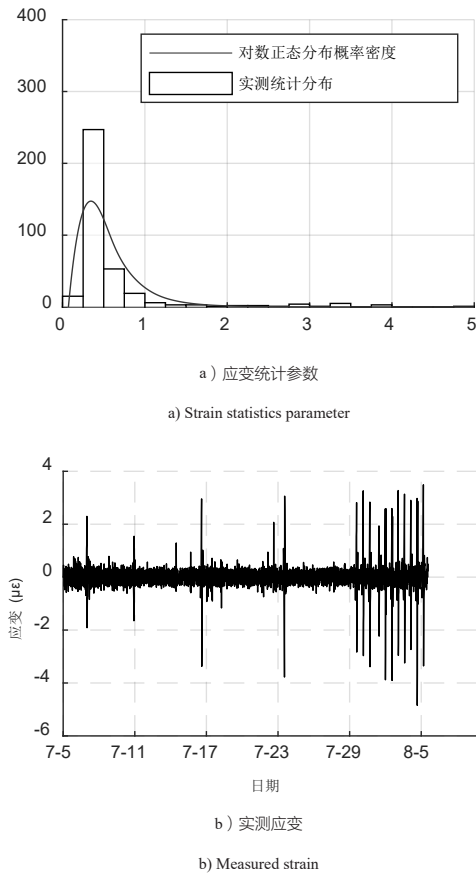


图 12 中跨跨中顺桥向应变及统计参数分析
Fig. 12 Analysis of mid-span transverse strains and statistical parameters

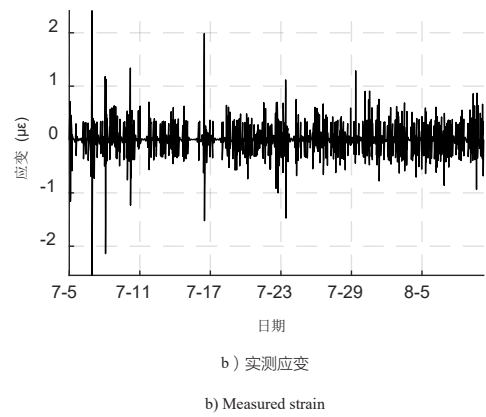
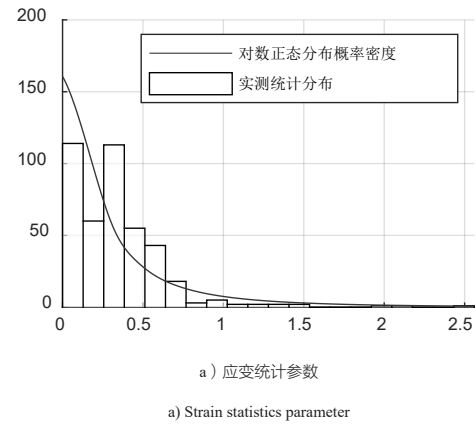


图 13 墩顶顺桥向应变及统计参数分析
Fig. 13 Analysis of paraxial strains at the top of the pier and statistical parameters

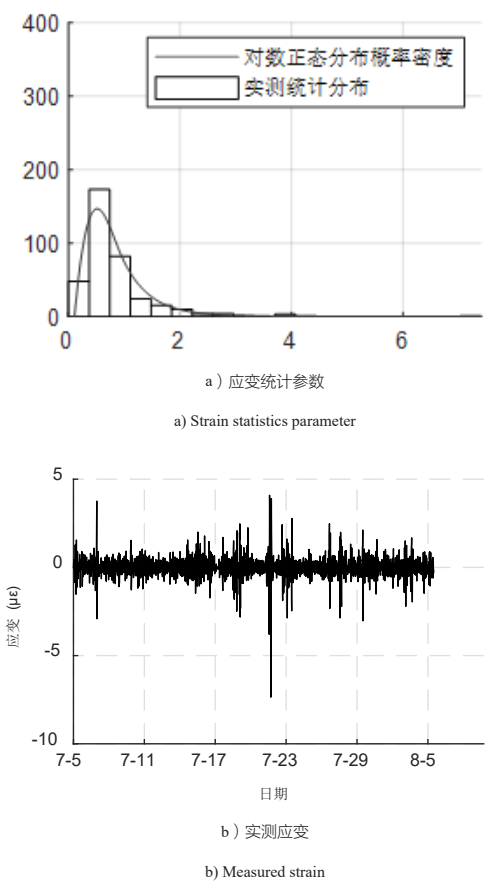


图 14 边跨跨中顺桥向应变及统计参数分析
Fig. 14 Analysis of transverse strains in side spans and statistical parameters

表 2 顺桥向应变均值及均方差
Table 2 Mean values and mean square deviation of strain in the direction of the bridge
表 2 顺桥向应变均值及均方差
Table 2 Mean values and mean square deviation of strain in the direction of the bridge

断面	位置	左幅		右幅	
		均值 (10- $4 \mu \epsilon$)	均方差 ($\mu \epsilon$)	均值 (10- $4 \mu \epsilon$)	均方差 ($\mu \epsilon$)
中跨跨中	底板	1.988	1.495	7.297	1.288
		4.749	1.149	5.290	1.412

中跨跨中	底板	1.863	1.264	8.263	0.999
	顶板	-9.554	1.326	-4.703	0.589
		3.085	1.596	1.299	0.968
墩顶	顶板	6.911	1.017	-0.906	1.219
		0.241	1.064	-5.419	1.385
		1.387	1.144	0.826	1.313
边跨跨中	顶板	0.519	0.347	-1.158	1.349
		10.250	1.532	-8.751	2.558
		3.656	1.392	2.465	0.825
	底板	-0.927	1.256	1.906	1.155
		1.441	0.988	2.823	0.508
		1.879	0.367	2.559	0.52
		10.220	1.18	2.602	0.537

图 12、图 13 及图 14 表明，中跨跨中、墩顶及边跨跨中的应变测点总体监测值无趋势性的变化，监测值有一定波动，波动区间为 $-10\mu\epsilon\sim5\mu\epsilon$ ，均值及均方差如表 2 所示。监测结果表明，中跨跨中、墩顶及边跨跨中均小于材料抗拉强度设计值。

四、结论

本文针对某山区连续刚构桥的运营过程，开展结构健康监测系统设计，对该桥关键截面的应变及挠度进行实时监测，并介绍桥梁健康监测系统的 workflows，完成了为期 42 天对该桥应变、挠度等参数的监测，并通过数据传输系统将所监测到的数据进行处理及分析，从而完成对整座桥梁的健康监测。

1. 桥梁结构健康监测系统主要包括桥位现场部分、数据中心部分以及客户端。现场部分的传感器进行数据的监测，并通过移动无线网络将监测数据传回数据中心，再由用户从数据中心实时调取监测数据，进行监测数据分析，定期完成桥梁结构性能的评定工作。

2. 监测系统采用智能弦式数码应变计监测实时应变，采用压差式水准仪进行挠度监测。方案选取了桥梁关键截面的顶板及底板设置应变计，即边跨跨中、桥墩截面、主跨跨中截面和主跨 1/4 处截面。对于压差式水准仪，山区连续刚构桥的地形高差较大，桥梁存在比较明显的纵坡。挠度测点设计时以水准仪的量程为依据，将边跨、中跨分为三套系统进行桥梁挠度监测。方案选取边跨跨中断面、支点断面、中跨跨中断面、中跨四分点断面、及桥墩进行桥梁竖向挠度监测，并依据水准仪的量程进行测点安装上下限的确定。

3. 收集健康监测系统收集的应变及挠度数据，通过采用低通滤波的方式对监测得到的数据进行处理，并依据《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》对桥梁的结构进行分析，以评价桥梁在运营期间的结构状态。从监测数据及相应统计参数分析，该连续刚构桥在监测期内应变小于抗拉设计强度，挠度变形小于设计变形。桥梁在该监测期内结构状态安全，能够满足运营阶段的正常使用需求。

参考文献

[1] 卓斌. 大跨连续刚构桥典型力学问题分析 [D]. 湖南大学, 2016.

[2] 杨志平, 朱桂新, 李卫. 预应力混凝土连续刚构桥挠度长期观测 [J]. 公路, 2004,(08):285-9.

[3] 詹建辉, 陈卉. 特大跨度连续刚构主梁下挠及箱梁裂缝成因分析 [C]// 湖北省公路学会自然科学优秀学术论文汇编 (2008 年——2013 年). 湖北省交通规划设计院, 2014:169-172.

[4] 杨虎城. 预应力混凝土连续刚构桥裂缝分析及加固研究 [D]. 长安大学, 2015.

[5] 蔡建辉. 跨海预应力混凝土连续刚构桥健康监测与养护评价技术. 福建省, 宁德市福宁高速公路有限公司, 2016-05-26.

[6] 熊涛. 基于健康监测系统的连续刚构桥模态识别技术研究 [J]. 山西建筑, 2016,42(03):172-3.

[7] 石鹏程. 大跨径预应力混凝土连续刚构桥健康监测评估系统研究 [D]. 重庆交通大学, 2009.

[8] 周桂兰, 徐恺奇. 大跨径桥梁结构健康监测技术现状与发展 [J]. 公路交通科技 (应用技术版), 2019,15(04):168-9.

[9] 樊健生, 刘宇飞. 在役桥梁检测、健康监测技术现状与时空融合诊断体系研究 [J]. 市政技术, 2022,40(08):1-11+40.

[10] 孙磊. 大跨径连续刚构桥梁健康监测与评估系统 [D]. 长安大学, 2009.

[11] 贺拴海, 宋一凡, 赵小星, et al. 钢筋混凝土梁式结构裂缝特征与损伤评估方法试验研究 [J]. 土木工程学报, 2003,(02):6-9.

[12] 陈晶, 陈棉, 李娜. 基于模糊层次分析法的沙盘模拟实践教学评价研究 [J]. 项目管理技术, 2024,22(01):62-6.

[13] 倪源城. 美学在桥梁设计中的应用与评价 [D]. 沈阳建筑大学, 2015.

[14] 陆亚兴, 殷建军, 姚祖康, 徐奔, 朱惠君. 桥梁缺损状况评价方法 [J]. 中国公路学报, 1996,(03):57-63.

[15] 陈力, 杨方柳, 冯彬, et al. 基于模糊综合评判的油库毁伤评估方法 [J]. 东南大学学报 (自然科学版), 2023,53(05):794-802.

[16] 刘源源. 巴特沃斯滤波器及单锁相环关键问题研究 [D]. 华中科技大学, 2016.