

文章编号: 1000-4750(2016)Suppl-0234-05

运营实桥在线监测系统的建立及数据初步分析

何文朋, 雷家艳

(厦门大学建筑与土木工程学院, 福建, 厦门 361005)

摘 要: 针对实际运营环境及结构受力情况建立了某大型单拱肋中承式钢拱桥的在线监测系统, 并以监测数据为基础, 初步分析了结构的应变、加速度及环境温湿度变化情况, 为同类桥梁结构的受力分析及运营实桥结构在线健康监测系统的实践应用提供参考。

关键词: 单拱面; 中承式钢拱桥; 结构健康监测; 在线监测; 数据分析

中图分类号: U446 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2015.04.S048

THE ESTABLISHMENT OF ONLINE MONITORING SYSTEM FOR TIANYUAN BRIDGE AND PRELIMINARY ANALYSIS OF DATA

HE Wen-peng, LEI Jia-yan

(School of Architecture and Civil Engineering, Xiamen University, Xiamen, Fujian 361005, China)

Abstract: According to the actual operating environment and structural stress condition, the online structural monitoring system is established on a half-through steel arch bridge with single arch face. On the basis of monitoring records, the data of the strain, acceleration, temperature and humidity are preliminarily analyzed. The system establishing practice and test data analysis could provide effective references to structural analysis of similar bridge and practical application of the structural online monitoring system.

Key words: single arch face; half-through steel arch bridge; structural health monitoring; online monitoring; data analysis

随着桥梁工程的不断发展, 目前中老龄桥梁在国内陆路交通网络中占相当的比重, 随着桥龄的增长, 面对环境和气候的作用、日益增加的交通量及重车和超重车过桥数量的不断增加、人为事故等因素, 不少桥梁已出现较为严重的功能退化现象, 运营实桥的运营环境及结构安全监测等问题势必成为今后桥梁工程实践及研究的重要内容。运营桥梁实时在线的健康监测系统^[1-5]能够通过实时监测桥梁的环境温湿度、风荷载及各种运营环境下的结构响应, 对桥梁在特殊气候、交通条件下的桥梁异常运营状况发出预警信号, 为桥梁的维护和管理提供依据, 同时也能够实时掌握桥梁状态变化, 为评价

桥梁的承载能力、使用功能和桥梁的运营安全可靠性的提供数据基础。

1 工程概况及结构特点

厦门天圆大桥全长 1100 m, 主桥结构为单拱面中承式刚性吊杆钢拱桥结构体系, 主桥计算跨径 120 m, 宽 32 m, 主拱矢跨比 1/4.21, 拱轴线采用抛物线, 拱肋平面与水平面垂直, 从主梁中间穿过。主梁两端支承于过渡墩上, 拱梁相交处各设有两个拱上支座, 其余梁段通过吊杆与主拱相连, 吊杆间距为 6 m。主梁采用等截面带翼缘的扁平钢箱梁及正交异性板钢桥面。吊杆采用变截面矩形钢箱吊

收稿日期: 2015-04-28; 修改日期: 2016-01-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(51508486), 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2013121028)

通讯作者: 雷家艳(1978—), 女, 云南人, 助理教授, 博士, 主要从事健康监测与桥梁工程研究(E-mail: lei jiayan@xmu.edu.cn).

作者简介: 何文朋(1991—), 男, 福建人, 硕士生, 主要从事健康监测与桥梁工程研究(E-mail: 651144861@qq.com)

杆,吊杆轴线与桥轴线成 45° 夹角。吊杆上端通过连接板与拱肋耳板铰接,下端采用螺栓与主梁锚接。大桥全景如图 1。

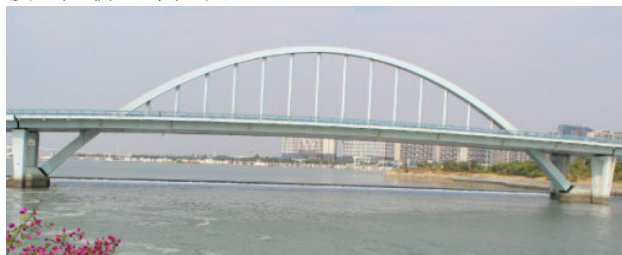


图 1 天圆大桥实景图

Fig.1 Picture of Tianyuan bridge

大桥的单肋拱面位于桥面中央,桥面行车视野开阔,全钢主结构具有强度高、自重轻等优点。由于主梁仅在轴线位置通过吊杆支承方式与单片拱肋连接,拱肋的侧向刚度、抗扭刚度非常有限,主桥结构的稳定性问题较为突出^[6-8],且该桥位于内海湾口,极端风速下的风致稳定性也是桥梁运营安全性的重要影响因素。大桥拱肋和主梁之间采用钢箱形吊杆连接,由于桥头跳车等因素增大的振动效应使短吊杆所受拉力卸载效应明显,应力变化较为复杂,且应力幅值的较大变化也使短吊杆的疲劳问题更加突出。

另外,天圆大桥的主梁采用扁平单箱单室钢箱梁,具有整体性好、强度高、自重轻、工厂化程度高等优点,箱梁采用流线形的外形设计,抗风性能和抗扭刚度得到一定程度的改善。但主梁顶板宽 32.2 m,底板宽 23.92 m,其宽跨比为 0.268,相关工程实践经验及研究表明,大宽跨比钢箱梁的剪力滞问题较为突出。仅在轴线上支承的宽桥梁面主梁与横截面上采用双支承点(或多支承点)的情况相比较,主梁的竖向抗弯刚度、抗扭刚度严重减小,在车辆偏载、风荷载、地震荷载等作用下结构的振动效应将十分明显。

2 运营实桥在线监测系统的构成

2.1 监测系统的构成及监测项目

大型桥梁结构健康监测系统具有实时性、自动化、集成化和网络化的特点。监测系统^[9-10]通常包括传感器子系统、数据采集及传输子系统、安全性评定子系统、数据管理子系统等。基于天圆大桥的结构特点及运营环境监测的需要,该桥的结构健康监测监测系统监测项目包括有:1) 结构主要构件的环境监测:温度、湿度;2) 变形监测:主梁位移;3) 交

通状况荷载监控:摄像监控、车载动态称重系统;4) 关键控制截面的动应变:拱肋、主梁应变等;5) 吊杆应变监测:代表性吊杆应变;6) 全桥动力响应及振动特性监测:主梁与拱肋横竖向加速度响应。传感器类别与数量见表 1。

全桥监测系统共布设了 3 台数据采集箱,1#与 2#采集箱用于应变数据采集,3#采集箱用于加速度数据采集;摄像机、动态称重系统与 GPS 数据分别通过有线传输至数据采集箱处;全部数据皆由光纤网络传输至监控中心主控计算机处进行存储与处理。数据的远程监控则通过 VPN 拨号进入网络完成数据实时同步查看,远程控制计算机还可以完成统计数据分析、后处理、安全预警等功能。系统构成图如图 2 所示。

表 1 传感器类别与数量

Table 1 Sensor type and quantity

监测项目内容	传感器名称	单位	数量
主梁及拱肋内部空气温、湿度	温湿度计	个	4
交通状况	摄像头	个	6
车辆动态称重系统	—	车道	6
主梁位移	GPS	个	3
吊杆、主梁与拱肋应变	动应变传感器	个	78
梁部、拱肋振动	加速度传感器	个	30

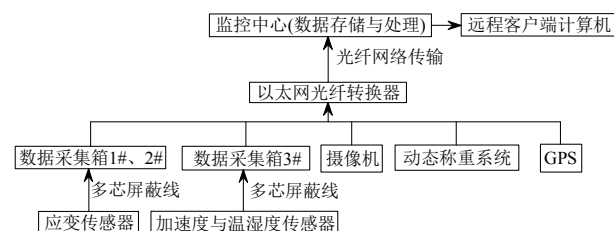


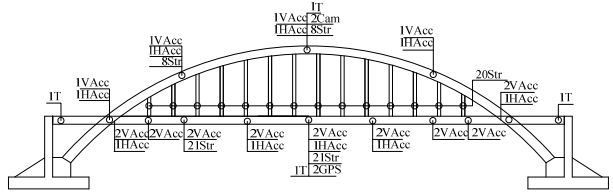
图 2 系统构成图

Fig.2 System structure

2.2 测点布置

根据前期有限元计算结果和天圆大桥结构特点,结合该桥管养部门定期的静动载试验要求,在大桥关键截面布设的测点如图 3 所示。大桥 14 根吊杆的箱体内壁布设了 20 个应变传感器;拱顶与拱肋 1/4 跨两个截面处各布置了 8 个应变传感器;主梁跨中和 1/4 跨两个截面处各布置 21 个应变测点。基于全面掌握大桥振动特性的目的,加速度测点布置沿箱梁纵向均布设横、竖向传感器,在拱肋上选取主梁拱肋交接处、1/4 跨截面、拱顶与 3/4 跨截面处各布置 1 个横、竖向加速度传感器。环境监测系统包括温度与湿度监测,在拱顶截面,主梁两端与跨中截面处共布设 8 个温湿度传感器。具体测

点布置方案见图 3。



注：VAcc 为竖向加速度测点；HAcc 为横向加速度测点；Str 为应变测点；T 为温湿度测点；GPS 为 GPS 站点；Cam 为摄像机位置

图 3 天圆大桥测点布置图

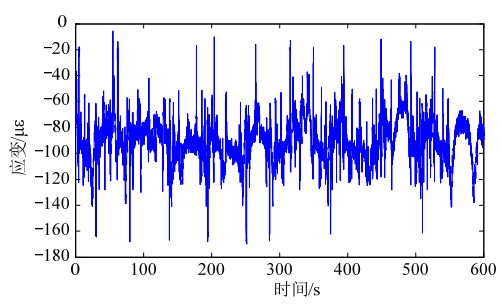
Fig.3 Measuring point arrangement

天圆大桥共设有 6 处视频监控点。左右行车道各布置前后两台摄像机，监视记录来往车辆情况；主梁底板位置布置一台视频监控器，监视桥下船只通行情况；电箱处布置一台视频监控器，监控电箱闸阀状态。GPS 测点布置于主梁跨中两侧各一个，桥附近陆地上设置基站点，可监测桥面变形与沉降。动态称重系统布置于引桥路基段，左右各三个，车道路面下均有称重传感器。通过摄像机与动态称重系统协同工作可进行车载与车流的记录，监测交通状况。

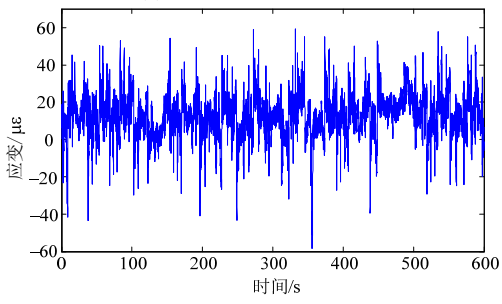
3 监测数据的初步分析

3.1 结构响应监测数据分析

应变监测数据以主梁跨中截面 7 号测点与拱顶截面 1 号测点为例，截取 2014 年 11 月 1 日 18:30~18:40 十分钟的监测数据，测点动应变时程图如图 4 所示。主梁跨中截面 7 号测点应变最大值



(a) 主梁跨中 7 号测点



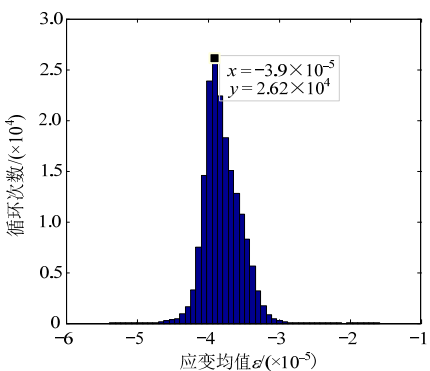
(b) 拱顶截面 1 号测点

图 4 动应变时程图

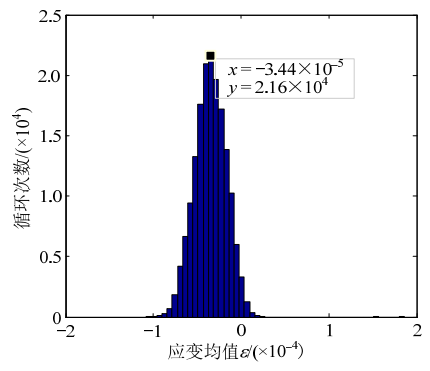
Fig.4 Dynamic strain time-history curve

为 $-6\mu\epsilon$ ，最小值为 $-170\mu\epsilon$ ；拱顶截面测点 1 号测点应变最大值为 $59.3\mu\epsilon$ ，最小值为 $-58.3\mu\epsilon$ 。

分别提取主梁 1/4 跨截面顶板 14 个应变测点与拱顶截面 8 个应变测点于 2014 年 11 月 1 日 00:00~03:00 凌晨时段与 17:00~20:00 晚高峰时段的数据进行雨流计数法统计处理。雨流计数法根据载荷历程可得到全部的载荷循环，分别计算出其全循环的幅值与均值，并可根据这些均值或幅值得到不同区间内所具有的频次，得到其频次直方图即出现概率图，如图 5 所示。选取频次即出现概率最大的应变区间均值作为主梁与拱顶截面上应变代表值，其应变测点布置图与应变代表值连线分布情况如图 6 与图 7 所示。



(a) 主梁 1/4 截面 8 号测点晚高峰



(b) 拱顶截面 6 号测点晚高峰

图 5 应变均值区间频次直方图

Fig.5 Frequency histogram of strain mean value

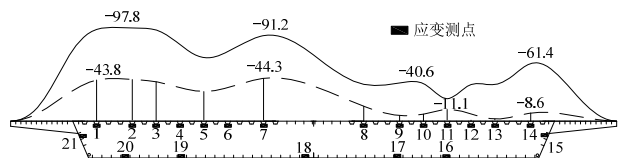


图 6 主梁 1/4 跨截面应变测点布置图与应变分布情况

Fig.6 Strain distribution on girder cross section at 1/4 span

结果表明，天圆大桥大宽跨比单箱单室主梁截面上两个时段应变起伏显著，其剪力滞效应十分明显；单面拱肋同时承受弯矩与轴力作用，在车多且

重的晚高峰时段相比凌晨时段底板受压更为严重,顶板受拉减轻,表明其弯矩效应晚高峰时段更为突出,拱肋疲劳损伤需要引起关注,对其进一步的分析 and 研究对桥梁设计计算理论具有良好的实践检验。

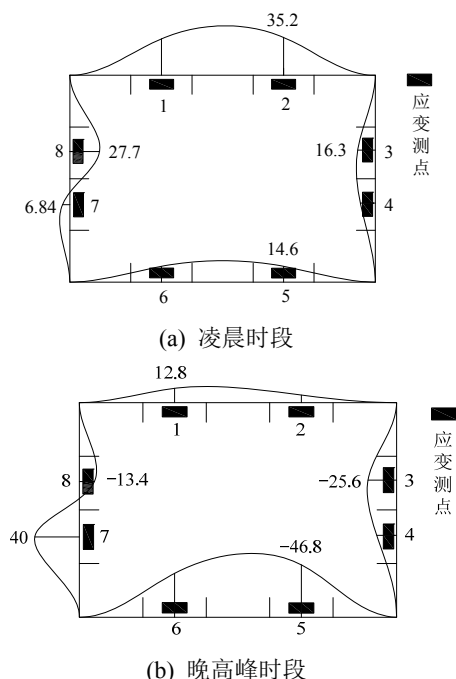
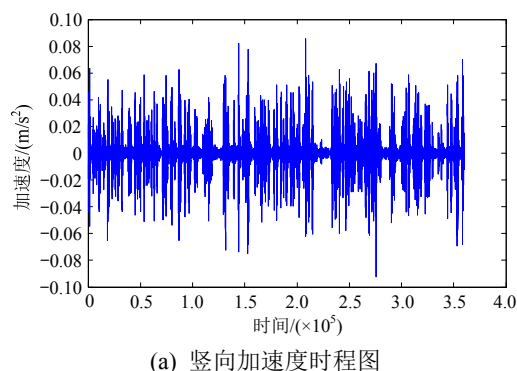


图7 拱顶截面应变测点布置图与应变分布情况

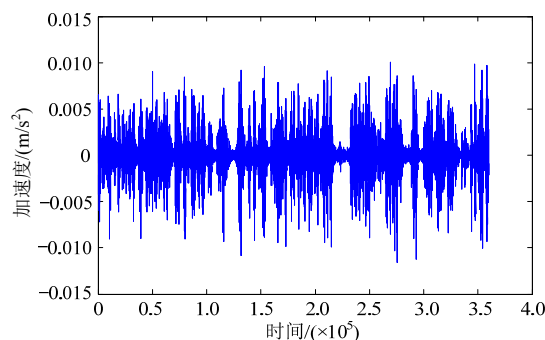
Fig.7 Strain distribution on girder cross section at the arch rib

3.2 动力加速度监测

全桥共布置 30 个加速度测点进行实时监测。主梁跨中截面竖向加速度传感器于 2014 年 10 月 21 日 18:00~19:00 一小时内对应的加速度时程图如图 8(a)所示,该测点竖向加速度最大峰值为 0.0855 m/s^2 。主梁跨中同一截面处横向加速度传感器于同一时段的加速度时程图如图 8(b)所示,该点加速度峰值为 0.0101 m/s^2 ,与同一截面位置处竖向加速度测点相比较,竖向加速度与横向加速度时程图的起伏时间点有较好的同步率,表明车辆荷载引起主梁竖向振动的同时伴随主梁的横向振动,主梁横向振动显著,突显出大桥侧向稳定性问题。



(a) 竖向加速度时程图



(b) 横向加速度时程图

图8 主梁跨中测点加速度

Fig.8 Acceleration time-history curve in mid-span

3.3 温湿度监测数据分析

温湿度数据分析截取自 2014 年 10 月 21 日的监测数据。主梁跨中截面与拱肋截面一天中温湿度变化曲线图如图 9 所示。主梁跨中截面与拱顶截面湿度昼夜变化幅度约为 24%;拱顶截面温度昼夜变化幅度约为 13°C ,主梁跨中截面约为 9°C ,同一时段中主梁与拱肋测点温差可达到 3°C 以上,并与一天中有两次交错点。

大跨度钢桥^[5],由于钢材的导热性能好,对温度变化比较敏感,大桥在一天中有更为明显的结构整体温度变化,则会产生更大的变形。在一天温度变化中,拱肋由于热胀冷缩效应受拱座基础的约束,其纵向变形受到限制,而主梁两端简支于过渡墩上,其纵向变形几乎没有受到限制。在相同的温差下,两者纵向位移不一致,桥面的变位相对突出,使各吊杆端产生纵向相对位移,吊杆两端产生弯曲变形和剪切变形,特别对于短吊杆处纵向变位最大,弯曲变形程度最大,受力情况最为不利,在温度循环作用与桥头跳车等因素共同作用下,大桥短吊杆处最易产生疲劳破坏。

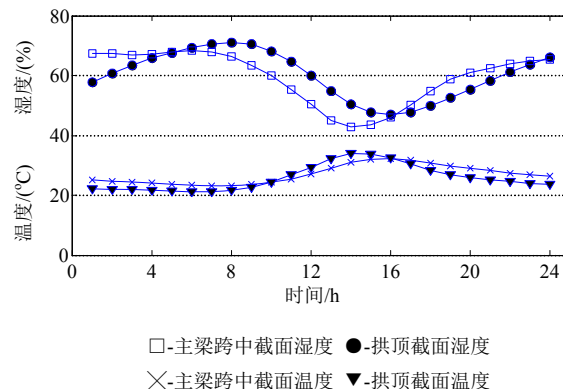


图9 一天温湿度变化曲线

Fig.9 The curves of temperature and humidity during one day

4 结论

天圆大桥健康监测系统由结构响应监测、环境监测、视频监控、GPS 监测与动态称重等多模块系统组成,实现了数据自动采集、传输、存储、远程监控与预警等功能,可对天圆大桥进行较为全面且实时在线的健康监测。同时,该桥健康监测系统的建立也是公路管养部门提高桥梁管理和养护水平的新探索和新实践。该桥的监测系统对于单拱面拱桥的侧向稳定性问题、大宽跨比钢箱梁的剪力滞问题、短吊杆的受力及振动疲劳问题与结构整体的动力稳定性等问题的深入研究,能够提供有效切实的数据基础。

参考文献:

- [1] 宗周红, 孙建林, 徐立群, 等. 下白石大桥健康监测系统的设计与研究[J]. 铁道学报, 2009, 31(5): 65—71.
Zong Zhouhong, Sun Jianling, Xu Liqun, et al. Design and study of structural health monitoring system of Xiabaishi bridge [J]. Journal of the China Railway Society, 2009, 31(5): 65—71. (in Chinese)
- [2] 李惠, 欧进萍. 斜拉桥结构健康监测系统的设计与实现系统设计(I)-系统设计[J]. 土木工程学报, 2006, 39(4): 39—44.
Li Hui, Ou Jinping. Design and implementation of health monitoring systems for cable-stayed bridges (II)- design [J]. China Civil Engineering Journal, 2006, 39(4): 39—44. (in Chinese)
- [3] 李惠, 欧进萍. 斜拉桥结构健康监测系统的设计与实现系统实现(II)-系统实现[J]. 土木工程学报, 2006, 39(4): 45—53.
Li Hui, Ou Jinping. Design and implementation of health monitoring systems for cable-stayed bridges (II)-implementations [J]. China Civil Engineering Journal, 2006, 39(4): 45—53. (in Chinese)
- [4] 李爱群, 缪长青, 李兆霞, 等. 润扬长江大桥结构健康监测系统研究[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2003, 33(5): 544—548.
Li Aiqun, Miao Changqing, Li Zhaoxia, et al. Health monitoring system for the Runyang Yangtze River Bridge [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2003, 33(5): 544—548. (in Chinese)
- [5] Ko J M, Ni Y Q. Technology developments in structural health monitoring of large-scale bridges [J]. Engineering Structures, 2005, 27(12): 1715—1725.
- [6] 孔庆凯. 大跨中承式拱桥短吊杆结构行为研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2003.
Kong Qingkai. Structural behavior study on short suspenders of half through arch bridges with large span [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2003. (in Chinese)
- [7] 林力成. 大跨度拱桥稳定性研究[D]. 陕西: 长安大学, 2006.
Li Licheng. Study on stability of long span arch bridge [D]. Shaanxi: Chang'an University, 2006. (in Chinese)
- [8] 项海帆, 刘光栋. 拱结构的稳定与振动[M]. 北京: 人民交通出版社, 1991: 1—11.
Xiang Haifan, Liu Guangdong. Stability and vibration of arch structure [M]. Beijing: China Communications Press, 1991: 1—11. (in Chinese)
- [9] 余波, 邱洪兴, 王浩, 等. 苏通大桥结构健康监测系统设计[J]. 地震工程与工程振动, 2009, 29(4): 170—177.
Yu Bo, Qiu Hongxing, Wang Hao, et al. Health monitoring system for Sutong Yangtze River Bridge [J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2009, 29(4): 170—177. (in Chinese)
- [10] 周文松, 李惠, 欧进萍, 等. 大型桥梁健康监测系统的信息采集子系统设计方法[J]. 公路交通科技, 2006, 23(3): 83—87.
Zhou Wensong, Li Hui, Ou Jinping, et al. Design method of data acquisition system of health monitoring systems for long span bridges [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2006, 23(3): 83—87. (in Chinese)