

桥梁应变监测技术及应变数据解耦研究

张弛¹, 高震², 薛丽³

(1.基础设施安全监测与评估国家地方联合工程研究中心, 江西 南昌 330052;

2.山东科技大学 土木工程与建筑学院; 3.江西交通职业技术学院 路桥工程系)

摘要: 为了得到温度作用下桥梁主梁的应变变化, 基于振弦式应变计所采集的应变原始数据, 通过滑动平均的方法进行数据解耦。首先, 在上海市吴淞大桥主跨四等分截面安装振弦式应变计, 实时监测主梁的应变变化, 得到1个月内的原始数据; 其次, 提取温度升高时段的应变数据, 采用二次滑动平均法进行数据解耦; 最后, 通过回归分析, 比较滑动平均前后应变和温度的1阶线性拟合判定系数, 证明二次滑动平均法可提取由于车辆荷载导致的桥梁主梁应变变化。

关键词: 桥梁; 应变; 吴淞大桥; 数据解耦; 滑动平均

桥梁应变是衡量桥梁性能和损伤识别的重要指标, 目前常用的桥梁应变监测方法包括应变片、光纤光栅法、导电膜法、振弦式应变计等。振弦式应变计由于构造简单、性能稳定, 故而得到了广泛的应用。在以往的桥梁健康监测数据分析中, 加速度往往是被高频使用的数据类型, 而应变数据多用于分析结构的应变水平以及开裂情况。桥梁监测系统所采集的应变值可表

示为荷载、温度、混凝土收缩以及混凝土徐变叠加或耦合的结果。应变反映了结构在荷载作用下的局部受力状态, 是结构安全最为重要的度量指标之一。该文通过在上海吴淞大桥主跨四等分截面布设振弦式应变计, 实时监控桥梁主梁的受力状况, 并采用滑动平均法对采集到的应变数据进行解耦。

4.4 综合比选结论

根据以上造价、施工、受力等方面的分析对比, 钢结构现场连接方案各有利弊, 应根据项目情况进行综合比选。

在满足钢结构安装精度的前提下, 栓接方案可采用工厂制孔, 现场安装, 将使现场工作量大为降低、现场工程质量更加可控, 施工更加便捷, 结合对已完成的3个典型类比工程项目考察调研情况, 为了实现示范工程的“现场施工更快捷, 工程质量更加可控, 现场工作量尽量减少, 现场管理前场尽量后场化”的目标, 在投资预算相对充足、保通和施工质量要求较高的市政项目中推荐采用等强度连接顶板焊接、腹板及底板栓接方案。

5 结语

以路泽太高架快速路示范工程钢板组合梁桥钢结

构现场拼接方案为研究对象, 列举了不同的现场连接方案, 详细给出了不同连接的设计过程, 进行了造价、施工、受力的对比, 最后根据示范工程的总体要求, 推荐了等强度连接顶板焊接、腹板及底板栓接方案。

参考文献:

- [1] 交公路发[2016]115号.关于推进公路钢结构桥梁建设的指导意见[Z], 2016.
- [2] 周荣锋.推进公路钢结构桥梁建设正逢其时——《关于推进公路钢结构桥梁建设的指导意见》政策解读[Z], 2016.
- [3] 邵长宇.梁式组合结构桥梁[M].北京:建筑工业出版社, 2015.
- [4] 吴冲.现代钢桥[M].北京:人民交通出版社, 2006.
- [5] 翟宏峰, 毛英杰.钢结构现场连接方式优缺点比较[J].城市建设理论研究:电子版, 2012(20).
- [6] JGJ 82-2011 钢结构高强螺栓连接技术规程[S].
- [7] GB 50017-2003 钢结构设计规范[S].

收稿日期:2018-06-25(修改稿)

作者简介:张弛,男,硕士,E-mail:hhzhangchi@163.com

1 吴淞大桥工程背景

上海吴淞大桥地处上海市宝山区,是连接上海市逸仙路和同济路的主干通道。吴淞大桥主桥为(55+90+55) m 的三孔预应力混凝土箱形连续梁桥,桥面总宽约40 m,分左右两幅。主桥箱梁采用三向预应力体系,纵向预应力筋采用低松弛高强度预应力钢绞线,标准强度为 1 860 MPa,竖向预应力筋和横向预应力筋采用预应力碳素钢丝,标准强度均为 1 600 MPa。

吴淞大桥于 1992 年通车,在长达 20 多年的服役期中,桥面交通量急剧增长,日车流量目前已达 12 万辆次,而该桥的设计日车流量仅为 4 万辆次,不仅如此,通过吴淞大桥的车辆中重载货车的比例较大,尤其是集装箱卡车甚为频繁,日积月累的超负荷运行对桥梁性能造成了不可逆的损害。2015 年 7 月,吴淞大桥的引桥段出现了一个长约 1.5 m、宽约 0.4 m 的窟窿。宝山区市政工程管理署在发现该问题后立即采取了桥面限行措施,随后对吴淞大桥进行长达 11 个月的大修,在大修的同时也安装了桥梁健康监测系统,其中包括桥梁应变监测子系统。

2 应变监测技术及监测子系统

2.1 应变测点布置

根据 JT/T 1037—2016《公路桥梁结构安全监测系统技术规程》中 5.2.3 及 5.3.3 条的规定,结构局部响应对关键构件应变进行监测,测点宜选择受力较大或影响结构整体安全的关键构件、截面和部位。根据吴淞大桥的结构特点,在主跨四等分截面分别布置了应变传感器,其中西箱梁 YB3 截面应变测点布置情况如图 1 所示。

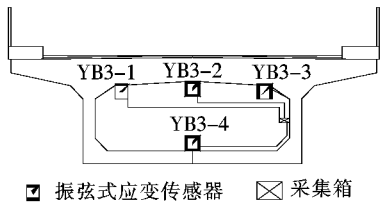


图 1 西箱梁 YB3 截面应变测点布置示意图

测点 YB3-1、YB3-2、YB3-3 和 YB3-4 安装位置分别位于西箱梁 1/4 跨截面箱内顶板上游侧、顶板中部、顶板下游侧以及底板中部。现场的组网以及信号传输采用振弦传感器——多通道振弦采集仪——

DTU 模块——云平台的方式。

2.2 应变监测传感器

振弦式应变计主要由左右安装支座、线圈和钢弦组成,其内部结构如图 2 所示,当应变计安装到结构表面后,其左右支座可随结构发生变形。一旦支座发生变化,便可带动钢弦发生伸长或缩短,并使钢弦受力发生变化,从而改变弦的固有频率。测量时先对钢弦进行激振,并将感应信号进行滤波、放大、整形后采集,通过测量感应信号脉冲周期,即可测得弦的振动频率,经过换算即可得到被测结构的应变量。表 1 为振弦式应变计的主要技术指标。

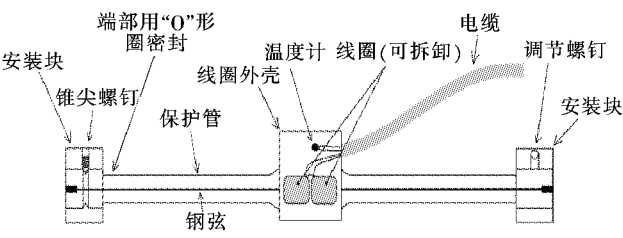


图 2 应变计内部结构

表 1 振弦式应变计技术指标

指标		单位	测试值
尺寸	标距 L	mm	100
参数	外形尺寸(长×宽×高)	mm×mm×mm	174×26×38
量程	拉伸	$\mu\epsilon$	1 500
	压缩	$\mu\epsilon$	1 500
	分辨率	FS	$\pm 0.2\%$
	温度测量范围	$^{\circ}\text{C}$	$-20\sim 70$
	耐水压	MPa	≥ 0.2
	绝缘电阻	M Ω	≥ 50

振弦式应变计变量计算公式为:

$$\epsilon = K(f_i^2 - f_0^2) + K_T(T_i - T_0)$$
 (1)

式中: ϵ 为采集时刻相对初始时刻的应变量($\mu\epsilon$); K 为振弦式应变计标定系数($\mu\epsilon/\text{Hz}^2$); f_i 为振弦式应变计采集时刻的输出频率(Hz); f_0 为振弦式应变计初始时刻的输出频率(Hz); K_T 为振弦式应变计温度修正系数($\mu\epsilon/^{\circ}\text{C}$); T_i 为振弦式应变计采集时刻的温度($^{\circ}\text{C}$); T_0 为振弦式应变计初始时刻的温度($^{\circ}\text{C}$)。

需要特别说明的是,由于在安装振弦式应变计时桥梁已经发生既有变形,故将传感器安装初始时刻的应变值设为 0,后续采集到的数据表示为应变的变化量,“+”、“-”分别代表采集时刻应变较初始时刻有受拉、受压趋势。

3 监测数据分析

3.1 部分监测结果

图 3 为西箱梁 YB3-1~4 测点在 2017 年 9 月 1 日—10 月 1 日所采集的应变数据时程曲线。

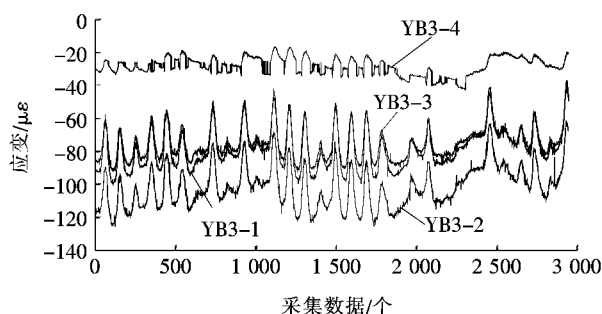


图 3 吴淞大桥 YB3 截面应变数据时程曲线

表 2 为吴淞大桥应变监测子系统 YB3-1~4 测点在 2017 年 9 月 1 日—10 月 1 日采集数据的统计情况。

表 2 表明:在吴淞大桥应变监测子系统运营过程

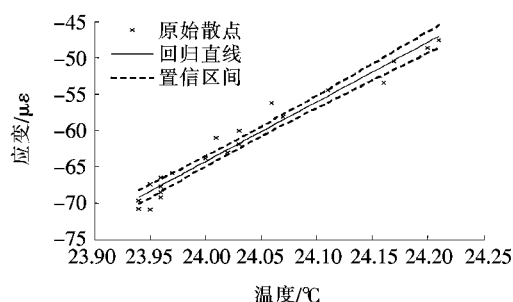
表 2 应变监测采集频次统计

测点	统计时段	理论次数	实际次数	实际采集粒度/min
YB3-1	9 月 1 日—10 月 1 日	2 976	2 943	15.168
YB3-2	9 月 1 日—10 月 1 日	2 976	2 942	15.173
YB3-3	9 月 1 日—10 月 1 日	2 976	2 941	15.179
YB3-4	9 月 1 日—10 月 1 日	2 976	2 942	15.173
均值	—	2 976	2 942	15.173

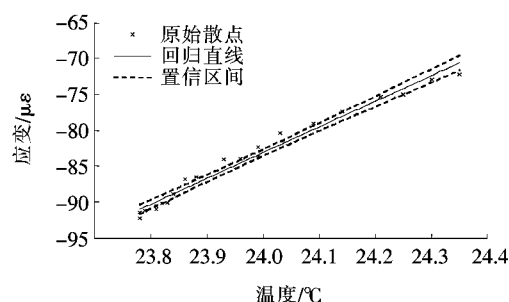
中,测点 YB3-1~4 的实际采集次数略小于理论采集次数,平均采集粒度为 15.173 min,与预设采集粒度 15.000 min 的误差仅为 1.15%,说明采用振弦式应变计、采集设备和安心云平台组网方式的应变自动化监测子系统数据连续性良好,能够适应桥梁复杂的运营环境。

3.2 温度效应

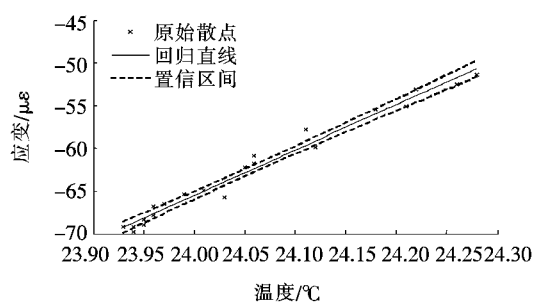
取吴淞大桥应变监测子系统西箱梁 YB3 截面 1~4 测点在 10 月 1 日 07:00—12:00 所采集的数据,进行回归分析,结果如图 4 所示。



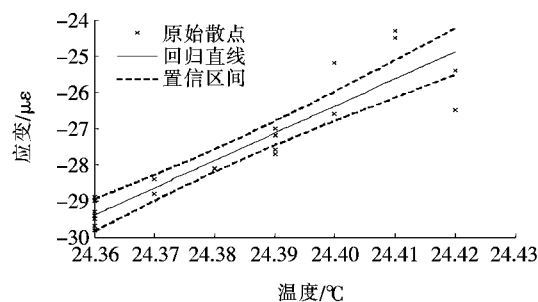
(a) YB3-1



(b) YB3-2



(c) YB3-3



(d) YB3-4

图 4 西箱梁 YB3 截面应变数据散点与回归直线图

图 4 中分别给出了同一截面 4 个测点的 1 阶线性回归曲线,表 3 为拟合参数统计表,其中判定系数 (R^2) 代表了估计的回归方程对原数据拟合优度的度量,判定系数越大,则代表回归直线与各观测值越接近,回归直线的拟合优度越好。以西箱梁 YB3-2 测

点为例,说明判定系数的物理意义,在该测点应变值的变差中,有 97.9% 可以由温度与应变之间的线性关系来解释,或者说,应变取值的变化中,有 97.9% 是由温度决定的。可见温度和箱梁应变有着较强的线性关系。对回归参数进行显著性检验,得表 3 中的 Sig. F,

各测点数据的显著性检验的 F 值均远小于显著性水平 $\alpha(0.05)$, 表明各测点应变与温度之间有显著的线性关系。

表 3 拟合参数统计

测点编号	斜率	截距	R^2	Sig. F
YB3-1	81.908	-2 030.1	0.962 9	4.74E-15
YB3-2	35.875	-944.1	0.978 7	2.45E-17
YB3-3	52.942	-1 336.1	0.978 1	3.15E-17
YB3-4	75.255	-1 862.6	0.856 0	1.60E-09

表 3 中测点 YB3-1~3 的判定系数均集中在 0.97 附近, 而测点 YB3-4 的判定系数仅为 0.856 0, 与上述 3 个测点相差较远, 说明环境温度对箱梁上翼缘的影响程度高于下翼缘。根据测点布置图, 测点 YB3-1、YB3-2 和 YB3-3 均布设在箱梁顶板处, 而测点 YB3-4 布设在箱梁底板处。吴淞大桥日常运营皆暴露在自然环境中, 白天桥面受到强烈的热辐射, 长时间的日照使得顶板温度迅速上升, 而底板几乎不受阳光直接照射, 其温度上升幅度较小, 故顶板处 3 个测点受温度影响更大, 表现在数据统计特征上: 顶板测点数据和温度的判定系数要显著大于底板。

3.3 应变数据解耦

桥梁应变监测结果表明: 应变数据一般由以下几类效应叠加或耦合: ① 长期变化趋势: 反映结构应变持续上升或下降的趋势, 一般由混凝土徐变和收缩引起; ② 周期性变化: 反映结构应变在一段时间内的周期变化, 一般由温度或者周期性变化的车辆荷载引起; ③ 随机变化: 一般由偶然突发变化(战争、自然灾害)和随机变化(风荷载、短时车辆荷载)引起。运营期结构物的应变变化通常是上述 3 种或部分效应的叠加, 由于吴淞大桥建成通车已超过 20 年, 混凝土收缩徐变影响可忽略不计。假定随机应变主要由车辆荷载产生, 风荷载产生的应变也可忽略不计。所以除去其他影响因素外, 认为吴淞大桥主梁应变的变化主要取决于温度和车辆荷载的作用。在上述 3 种应变变化中, 随机变化速率显然要大于长期变化和周期变化速率, 根据变化速率的不同, 采用滑动平均法(Moving Average Method, MAM)进行趋势预测和解耦车辆荷载, 设一样本容量为 M 的应变时序为 x_1, x_2, \dots, x_M , 正整数 $N < M$, 则 k 时点的一次滑动平均值为:

$$\bar{x}_{T,k}^{(1)} = \frac{x_{k-N+1} + \dots + x_{k-1} + x_k}{N} = \frac{1}{N} \sum_{i=k-N+1}^k x_i \quad (2)$$

式中: $1 \leq N \leq k \leq M$, $\bar{x}_{T,k}^{(1)}$ 为第 k 时点的一次滑动平均值, 而二次滑动平均的计算公式为:

$$\bar{x}_{T,k}^{(2)} = \frac{\bar{x}_{T,k}^{(1)} + \bar{x}_{T,k-1}^{(1)} + \dots + \bar{x}_{T,k-N+1}^{(1)}}{N} \quad (3)$$

式(3)即是将式(2)的结果再进行一次滑动平均。

滑动平均是一种简单的预测方法, 当应变监测数据存在线性趋势时, 常采用二次滑动平均法。将趋势项应变记为 x_T , 而车辆荷载产生的应变可记作 $x - x_T$ 。以西箱梁 YB3-2 测点所采集数据为例进行数据解耦, 对原始数据进行滑动平均, 窗口数 N 分别取为 4、5、6、7、8、9 和 10, 然后将滑动平均后的应变数据和温度进行 1 阶拟合, 得到不同窗口数条件下的判定系数, 如表 4 所示。

表 4 不同窗口数下 1 阶拟合判定系数

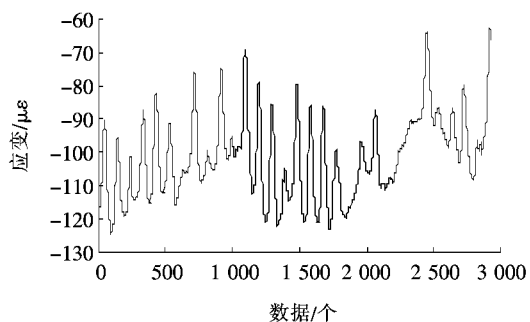
窗口数	判定系数 R^2	提高比率/%
4	0.992 2	1.38
5	0.993 3	1.49
6	0.994 6	1.62
7	0.995 1	1.68
8	0.994 9	1.66
9	0.994 0	1.56
10	0.992 3	1.39

据表 4, 采用二次滑动平均处理后的数据, 与温度进行 1 阶拟合后, 其判定系数均有一定提高(大于不经数据解耦所计算出的判定系数 0.978 7), 而且随着窗口数的增大, 判定系数呈现先增大后减小的趋势, 在 $N=7$ 时, 判定系数最大(0.995 1)。故而选择窗口数 $N=7$ 对 YB3-2 测点在 9 月 1 日—10 月 1 日的所有数据进行解耦, 结果如图 5 所示。

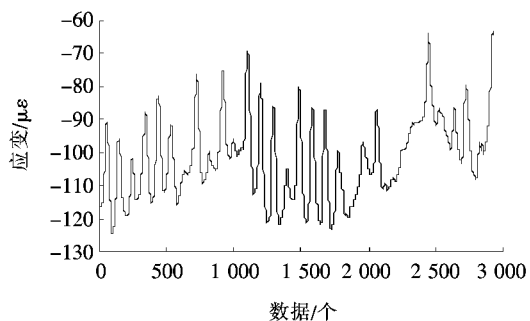
据图 5, 采用一次滑动平均和二次滑动平均所得的应变趋势时程曲线基本相同, 这说明采用二次滑动平均即可将应变数据中的趋势项提取出来。根据图 5(b)、(c), 温度引起的西箱梁 YB3 截面上翼缘应变变化范围约为 $60 \mu\epsilon$, 而车辆荷载引起的上翼缘应变变化范围约为 $30 \mu\epsilon$ 。

由此可得, 对于吴淞大桥混凝土梁应力应变变化, 温度次内力和车辆荷载对桥梁关键截面的应变变化影响具有相近的数量级, 其中局部峰值由车辆荷载产生, 见图 5(c), 趋势项变化由温度次内产生, 见图 5(b), 车辆荷载引起的结构内力小于温度作用产生的内力。

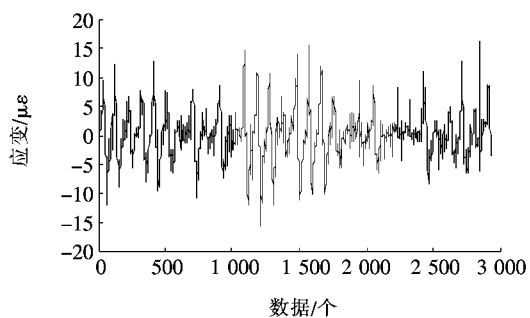
根据德国 Rüsch 所建议的混凝土受压应力—应变数学模型,将传感器所测得的应变数据换算成应力,得到吴淞大桥 9 月份 YB3—2 测点所对应的应力均值为 -1.406 N/mm^2 ,而为了评估车辆荷载引起的应力变化占混凝土总应力的水平,计算得到车辆荷载引起的应力极值为 $0.227 0 \text{ N/mm}^2$,最终可得车辆荷载引起的应力占箱梁总应力水平的 16.14%。



(a) 一次滑动平均应变趋势项



(b) 二次滑动平均应变趋势项



(c) 车辆荷载应变

图 5 西箱梁 YB3—2 应变解耦数据

4 结论

(1) 由振弦式应变计、多通道采集仪和安心云平

台等组成的吴淞大桥应变监测子系统工作稳定性良好,实际采集粒度和预设粒度的误差仅为 1.15%,可有效保证监测数据的实时连续。

(2) 通过比较西箱梁 YB3 截面 YB3—1~4 测点应变数据和温度 1 阶拟合的判定系数,上翼缘测点判定系数要显著大于下翼缘,说明环境温度对箱梁上翼缘的影响程度大于下翼缘。

(3) 采用滑动平均法提取应变趋势项和解耦车辆荷载,当窗口数 $N=7$ 时判定系数的提高比率最大,达 1.68%,选择窗口数 $N=7$ 对 YB3—2 测点在 9 月 1 日—10 月 1 日的所有数据进行解耦,表明温度引起的西箱梁 YB3 截面上翼缘应变变化范围约为 $60 \mu\epsilon$,而车辆荷载引起的上翼缘应变变化范围约为 $30 \mu\epsilon$,车辆荷载引起的结构内力小于温度作用产生的内力。将振弦式应变计所测得的应变值换算成应力,最终得到车辆荷载引起的应力占箱梁总应力水平的 16.14%。

参考文献:

- [1] 孙丽,张博.基于 FBG 传感器的三维空间应变监测[J].沈阳建筑大学学报:自然科学版,2015(6).
- [2] Frieden J, Cugnoni J, Botsis J, et al. High-Speed Internal Strain Measurements in Composite Structures under Dynamic Load Using Embedded FBG Sensors[J]. Composite Structures, 2010, 92(8):1 905—1 912.
- [3] 程永春,张禹维,焦峪波,等.基于导电膜的桥梁应变及裂缝监测试验[J].吉林大学学报:工学版,2016(5).
- [4] 张向东,柴源,刘佳琦.振弦式应变计在箱型梁桥中的测试技术[J].辽宁工程技术大学学报:自然科学版,2015(1).
- [5] Loyola B R, Saponara V L, Loh K J. In Situ Strain Monitoring of Fiber-Reinforced Polymers Using Embedded Piezoresistive Nanocomposites[J]. Journal of Materials Science, 2010, 45(24):6 786—6 798.
- [6] 周毅,孙利民,闵志华.斜拉桥主梁应变监测数据分析[J].振动与冲击,2011(4).
- [7] JT/T 1037—2016 公路桥梁结构安全监测系统技术规范[S].
- [8] 陈夏春,陈德伟.多元线性回归在桥梁应变监测温度效应分析中的应用[J].结构工程师,2011(2).
- [9] 李惠,鲍跃全,李顺龙,等.结构健康监测数据科学与工程[M].北京:科学出版社,2016.