

混凝土桥梁应力监测中温度影响的剔除方法

张付林¹, 王银辉², 夏汉庸¹, 李洋³, 叶如¹

(1.宁波市轨道交通集团有限公司, 浙江 宁波 315101; 2.浙江大学宁波理工学院土木建筑工程学院, 浙江 宁波 315100;
3.中铁四局集团有限公司, 安徽 合肥 230023)

摘要: 混凝土实测应变由温度应变、应力应变、收缩徐变应变等组成, 从中获取反映结构受力的应力应变对桥梁受力评价和施工控制具有重要意义。通过分析混凝土应变的组成, 基于混凝土应变和温度的同步连续监测数据, 提出了以温度应变为主的非应力应变剔除方法, 使监测应变能更精确地反映结构的真实受力状态, 并以宁波市轨道交通4号线上跨杭深、萧甬铁路工程跨铁路节点桥为例介绍了该方法, 从而为结构应力分析和施工控制提供了依据。

关键词: 混凝土桥梁; 温度应变; 施工控制; 非应力应变

中图分类号: U446

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2022)07-0052-04

0 引言

随着技术水平的提高, 桥梁跨度不断增大, 且需要经历复杂的成桥过程, 为确保施工过程的安全、顺利, 桥梁施工监控受到工程界的高度重视。应力监测作为确保结构施工安全重要的一环, 显得尤为重要。但由于总应变中包含的非应力应变成分很多^[1,2], 应变实测值难以反映结构的真实应力状态, 从中提取出反映结构真实受力状态的应力应变对施工控制具有重要意义。

目前, 许多学者已针对应变实测值的非应力应变剔除方法进行了研究。李小胜^[3]通过统计方法研究了自由状态下传感器读数随温度变化而变化的规律, 实现了对温度应变的剔除。陈树礼等^[4]根据CEB-FIP(1978)徐变模式, 结合徐变理论建立混凝土徐变的表达式, 实现了对实测应变的徐变应变剔除。江涌等^[5]通过把应力计和无应力计同时埋设于测试点, 利用无应力计所反映出的应变来消除收缩徐变所引起的应变。王卫锋等^[6]通过间接测量的方式确定整体温差、索梁温差和主梁温度梯度对混凝土的影响规律, 以此来确定温度对应变的影响。韩大建等^[7]利用主梁中性轴应力只与斜拉索水平分力有关这一特点, 据此校准中性轴的实测应力并识别徐变系数, 继而求出徐变应变。由此可知, 混凝土非应力应变的剔

除方法较多, 且多数具有较强的理论基础, 实际应用更需一种简单、高效、高精度的处理方法。

鉴于此, 本文在分析实测应变的组成与温度及混凝土收缩徐变对其影响的基础上, 结合实际工程应变监测结果讨论了温度变化对混凝土应变的影响, 提出了根据相邻无施工荷载时段的应变随温度的变化规律推算混凝土浇筑和张拉时段的温度应变的方法。

1 混凝土结构非应力应变剔除方法

1.1 混凝土结构总应变的组成

根据起因不同, 混凝土结构总应变(测度应变) $\varepsilon_{\text{总}}$ 由荷载产生的应力应变 $\varepsilon_{\text{应力}}$ 、混凝土收缩应变 $\varepsilon_{\text{收缩}}$ 、混凝土徐变应变 $\varepsilon_{\text{徐变}}$ 、温度应变 $\varepsilon_{\text{温度}}$ 所组成, 如式(1)。

$$\varepsilon_{\text{总}} = \varepsilon_{\text{应力}} + \varepsilon_{\text{温度}} + \varepsilon_{\text{收缩}} + \varepsilon_{\text{徐变}} \quad (1)$$

对悬臂施工过程的T构而言, 施工过程混凝土应变的监测旨在获得反映结构受力状态的应力应变。混凝土收缩徐变和温度作用下主梁可以发生自由伸缩, 由此产生的应变属于结构的非应力应变。因此, 获得反映结构受力状态的混凝土应力应变, 需要从混凝土总应变中剔除非应力应变。

1.2 混凝土收缩徐变应变及其剔除

混凝土收缩徐变应变的剔除方法主要有理论计算法^[5,8,9]、中性轴法^[7]、增量法^[10]等。理论计算法主要通过现有规范或研究的理论公式对混凝土收缩徐变应变进行计算。中性轴法利用应变测试断面中性轴处应变只与轴力相关的特点, 通过中性轴处的实际应力与实测应变进行徐变系数的计算, 从而获得其余位置

收稿日期: 2021-10-15

作者简介: 张付林(1973—), 男, 硕士, 教授级高级工程师, 主要从事城市轨道交通工程管理及施工技术研究工作。

的徐变应变。该方法主要用于应变监测断面轴力可直接或间接测量的结构,如在斜拉桥中通过斜拉索的实测索力进行中性轴应力的计算^[7]。增量法鉴于混凝土浇筑和张拉施工过程往往较短,每道工序过程发生的混凝土收缩徐变可以忽略,将施工前后应变的增量作为结构的应力应变。

1.3 温度应变的剔除方法

温度对应变存在多方面的影响,本文主要从3个方面考虑:振弦式应变计自身的读数随环境温度的变化而变化;混凝土结构与温度计温度膨胀系数不一致导致读数随温度的变化而变化;梯度温度致使的约束温度应变。

1.3.1 环境温度影响

振弦式应变计的工作原理为:当混凝土内部的应力发生变化时,应变计同步感受变形,变形通过前、后端座传递给振弦,转变成振弦应力的变化,从而改变振弦的振动频率。电磁线圈激振振弦并测量其振动频率,频率信号经电缆传输至读数装置,即可测出被测结构物内部的应变量。

根据振弦式应变计工作原理可知,振弦式应变计套筒和钢弦在温度作用下会发生变形。若套筒与钢弦的热膨胀系数不一致,温度的变化必然导致钢弦张力和长度的变化,从而致使钢弦频率发生改变。即使套筒与钢弦的热膨胀系数一致,钢弦的张力虽不随温度的变化而变化,但其长度会随之变化,同样会使钢弦的频率发生改变。

为了去除上述温度对钢弦频率的影响,可以针对埋设前的振弦式应变计读数随温度的变化进行统计分析,得到应变计读数随温度的变化规律,将总应变减去温度影响导致的应变变化,便可剔除温度对应变的影响。

1.3.2 膨胀系数差异影响

振弦式应变计埋入混凝土后,若混凝土和振弦式应变计整体均匀升降温,则振弦式应变传感器读数应反映两部分变形:(1)应变计的外套筒与混凝土一同随温度的自由伸缩变形;(2)钢弦随温度的伸缩变形。设传感器应变读数为 ε_1 ,外套筒与混凝土变形对应的应变为 ε_c ,钢弦变形对应的应变为 ε_s ,故有:

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_c - \varepsilon_s = (\alpha_s - \alpha_c) \Delta t \quad (2)$$

由式(2)可知,振弦式应变计读数变化是因混凝土与钢弦的线膨胀系数不同所导致的,计算时钢弦的线膨胀系数一般可取 $12.2 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ 。混凝土线膨胀系数并非定值且影响因素众多,有研究表明^[11]其与

骨料种类、水泥的用量、水含量和龄期等有关,一般取值范围在 $0.54 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C} \sim 1.42 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$ 之间。

1.3.3 温度梯度影响

桥梁内部温度场是桥梁长期与外部环境热交换的结果,截面温度场沿高度或壁厚往往呈非线性的分布规律,从而使得各纵向纤维相互约束,并因此产生自应变。然而,描述该温度分布较为困难,有用指数函数分析混凝土结构沿壁板厚度方向的温度分布^[12],也有用双曲函数表示一维非线性温度分布,从而增加了混凝土约束温度应变计算的难度。为方便约束温度应变的计算,将截面上温度分布沿梁高方向用一维函数表示^[13]。工程界更多地从避免温度梯度角度出发,选择梁体温度场较为稳定且温度较均匀的凌晨或太阳辐射较小的时刻作为应变监测时间^[5,10]。

1.3.4 基于温度应变同步监测的温度影响剔除方法

综上所述,温度对混凝土总应变的影响大且复杂。为了有效剔除温度应变效应,基于温度对混凝土内应变计读数影响的综合表现为无施工荷载情况下应变计读数随温度的变化而变化,提出根据相邻无施工荷载时段应变随温度的变化规律,推算施工时段温度应变的计算方法。基本原理和假设如下:

(1)荷载对于混凝土应变的影响是在短时间内产生的,任何一个加载过程(节段混凝土浇筑、施工荷载改变、预应力张拉等)前后产生的应变变化主要由荷载产生。

(2)对于已经具备一定龄期的混凝土,在较短时间内,收缩徐变的影响是可以忽略不计的。

(3)以每天深夜至凌晨的应变读数作为混凝土应变测试的有效数据,以避免温度梯度的影响。

(4)以一个加载过程为温度影响剔除的计算单元,尽可能回避外界因素的影响,假设温度应变在计算单元内按线性变化,而无加载前提下,应变变化均由温度变化所导致。

由此,设 ε_{1-2} 为加载前1天和加载前2天之间的应变度数差, Δt_{1-2} 为加载前1天和加载前2天之间同一时间的温度差,则两者时间具备以下关系:

$$\varepsilon_{1-2} = \alpha \Delta t_{1-2} \quad (3)$$

式中: α 为本次温度影响剔除计算单元的应变变化率, $\mu\varepsilon / ^\circ\text{C}$ 。

则加载前后剔除温度影响后的应变 ε_p 可由下式计算:

$$\varepsilon_p = \varepsilon_m - \alpha \Delta t \quad (4)$$

式中: ε_m 为加载后应变读数; Δt 为加载后与加载前

1 d 的温度变化值。

对于悬臂施工的预应力混凝土连续梁桥、连续刚构桥等,箱梁悬臂根部是主要的应力监测截面,一般在 0 号块施工段。随着后续梁节段浇筑的推进,混凝土已经具有一定的龄期,短时间内(一般为 1 d),混凝土收缩徐变对应变的影响不再敏感,不会对温度影响的剔除产生明显影响。所以采用本文推荐的方法能够有效剔除温度对应变测试的影响。后面将以一座连续刚构桥梁的部分节段数据为例,阐述本方法的应用效果。

2 工程实例概况

宁波市轨道交通 4 号线上跨杭深、萧甬铁路工程跨铁路节点桥是一座集大跨、小曲率半径、不对称和转体施工于一体的预应力混凝土连续刚构桥,桥位上行线路中心线曲率半径为 350 m,全长 301 m,桥跨布置为(68+138+95)m,如图 1 所示。桥梁上部结构采用悬臂浇筑施工工艺在平行铁路线两侧浇筑,悬臂施工完成后转体合龙施工。桥跨布跨采用不对称布置形式,转体 T 构悬臂长度分别为 50 m(27 号 T 构)和 86 m(28 号 T 构),主梁截面顶板宽 11 m,底板宽 7 m,27 号墩 T 构(小 T 构)主梁梁高 5~9 m(按 1.8 次抛物线变化);28 号墩 T 构(大 T 构)主梁梁高 5~12 m(按 1.8 次抛物线变化)。

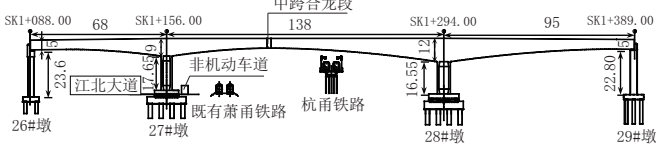


图 1 立面布置图(单位:m)

3 应力监测截面的选择及测点布置

3.1 主梁应变监测

采用悬臂施工工艺的连续刚构桥,T 构悬臂根部是结构受力的关键截面,依托项目选取 27 号墩和 28 号墩 T 构的 1 号块后端(避免墩梁固结刚域效应影响)作为应变监测截面,以 27 号墩为例,如图 2 所示。相应的监测断面布设 8 个应变测点,其中上顶板 5 个、下顶板 3 个,如图 3 所示。

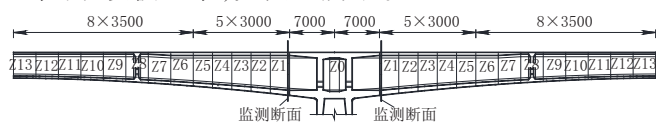


图 2 27 号 T 构应变监测断面(单位:mm)

3.2 主梁温度监测

桥梁温度场对结构的变形和应变有较大的影响,精确测量桥梁结构温度场,对分析桥梁结构的变

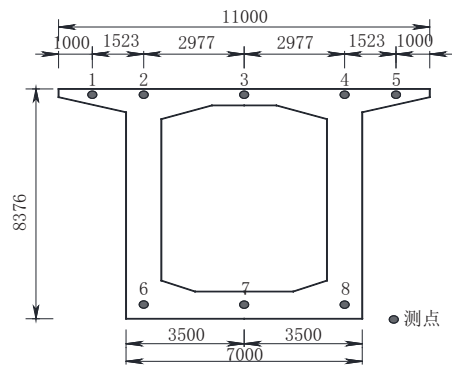


图 3 27 号墩悬臂根部应变测点布置图(单位:mm)

形和受力具有重要意义。其中,测量应变测点处的温度,对扣除桥梁结构的温度应变尤为重要。为此,采用携带温度测量功能的应变传感器进行温度测量。为获知应变监测时刻的结构温度应变,温度测量和应变测量采用连续同步监测。

3.3 主梁应变监测成果分析

在消除温度以外其他因素的影响时,采取如下措施:

- (1)初读时间选择在所理设节段预应力张拉前。
- (2)充分考虑应变滞后,原则上各施工阶段完成 4 h 后进行读数。
- (3)进行应变计埋设节段混凝土弹性模量的测试和修正,其弹性模量实测值为 3.71×10^4 MPa。
- (4)采取增量法剔除混凝土收缩徐变的影响。

图 4 为 28 号墩边跨侧 2 号测点应变传感器温度和应变的时程曲线。其中,在 12 月 17 日和 25 日分别进行了 4# 节段混凝土的浇筑和预应力的张拉,曲线特征点 A~F 及 A'~F' 的数值见表 1。

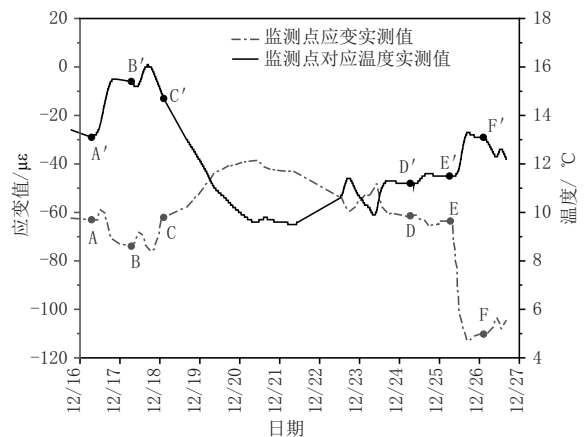


图 4 28 号墩边跨侧顶板 2 号测点传感器温度和应变的时程曲线图

由图 4 可以看出,应变监测位置结构处于受压状态,预应力张拉会使截面压应变明显增大,应变监测值随温度的变化而变化,甚至在无施工荷载作用下随温度变化可达到 $24 \mu\epsilon$ 。此外,应变随温度的变化具

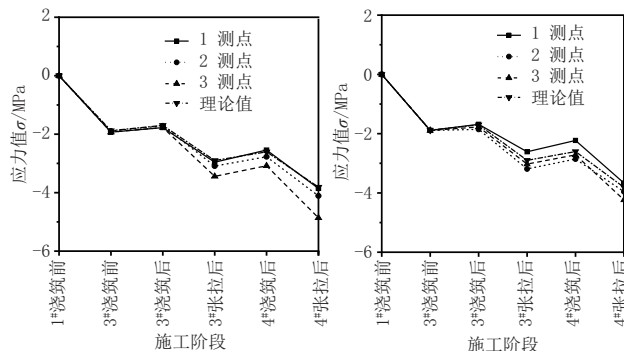
有一定的周期性,监测压应变随温度的升高而增大。

表1为该测点的两个温度应变剔除计算单元的计算过程。图4的应变变化涉及2个温度应变剔除的计算单元,A-B-C为混凝土浇筑阶段(B-C经历了混凝土浇筑加载),D-E-F为预应力张拉阶段(E-F经历了预应力张拉加载)。根据A-B、D-E之间的应变差和温度差,可以得到温度升高导致的应变值的改变率 α 分别为 $-4.74 \mu\epsilon/^\circ\text{C}$ 和 $-6.67 \mu\epsilon/^\circ\text{C}$ 。由此外延推算B-C、E-F之间由于温度影响应予以剔除的应变分别为 $3.3 \mu\epsilon$ 和 $-10.7 \mu\epsilon$ 。通过温度影响剔除后的应变改变与加载引起的理论计算应变值非常接近。

表1 温度应变消除计算过程

加载阶段	混凝土浇筑 B-C			预应力张拉 E-F		
特征点	A(A')	B(B')	C(C')	D(D')	E(E')	F(F')
时间(月-日,时:分)	12-16, 06:50	12-17, 06:50	12-18, 02:20	12-24, 06:30	12-25, 06:30	12-26, 06:30
应变读数值/ $\mu\epsilon$	-63.0	-73.9	-62.0	-61.5	-63.5	-110.3
温度值/ $^\circ\text{C}$	13.1	15.4	14.7	11.2	11.5	13.1
应变改变量/ $\mu\epsilon$	-10.9	+11.9	-2	-2	-46.8	
温度改变值/ $^\circ\text{C}$	+2.3	-0.7	+0.3	+0.3	+1.6	
$\alpha/(\mu\epsilon \cdot ^\circ\text{C}^{-1})$		-4.74			-6.67	
加载前后温度应变剔除值/ $\mu\epsilon$			+3.3			-10.7
加载引起的应变变化值/ $\mu\epsilon$			+8.6			-36.1
理论计算应变变化值/ $\mu\epsilon$			+7.95			-32

采用同样方法可以得到各传感器的应变增量值和应变增量累计值,如图5所示(因篇幅关系,本文仅列第3、4节段数据)。



(a)边跨侧顶板应力监测结果 (b)中跨侧顶板应力监测结果

图5 非应力应变剔除后的混凝土应力监测结果

由图5可以看出,悬臂施工阶段连续刚构桥截面应力随施工阶段不断变化。经过非应力应变剔除后,监测应力值与理论应力值较为接近,使得混凝土应力监测数据能较好反映结构实际受力状态,对结

构安全的施工监测具有重要的意义。

4 结论

应力监测是预应力混凝土连续梁桥施工控制的一种有效手段。它能弥补设计计算中参数选择不合理或某些因素无法考虑的不足,使桥梁的施工和运行更加安全。正确分析和处理现场实测数据,是获得准确可靠的应力监测结果的重要保证。本文从混凝土的总应变组成出发,针对温度应变的剔除,提出了相邻时间温度应变推算的方法,并得到以下结论:

(1)混凝土应变监测受温度、混凝土收缩徐变以及其他因素的影响较大。其中,温度影响下的非应力应变尤其明显,必须对监测数据进行非应力应变影响的剔除,方能与结构理论计算结果进行对比,以保证对结构安全监测的有效性。

(2)本文提出了利用相邻无施工荷载时段的应变随温度的变化规律推算混凝土浇筑和张拉时段的温度应变的方法,获得的应力应变与理论值误差较小,具有较高的精度。

(3)由于温度对传感器本身和混凝土都会产生较敏感的非应力应变影响,采用带温度读数的应变传感器或同位置埋设温度和应变传感器,且采用同步连续测读的方法,对消除温度影响具有重要的作用。

参考文献:

- [1] 刘喜辉,陈水生,夏种康.大跨度预应力混凝土连续梁桥施工应力监测[J].工程建设,2006(1):46-50.
- [2] 叶方谦,余利华.大跨度预应力混凝土桥施工应力监测[J].交通科技,2004(4):1-4.
- [3] 李小红.桥梁监控应变传感器数据处理中应注意的问题[J].建筑科学,2011,27(S2):74-79.
- [4] 陈树礼,苏木标,张文学.混凝土连续梁桥施工阶段应力监测研究[J].石家庄铁道学院学报,2004(3):38-42.
- [5] 江涌,李兴华,秦顺全.宁波招宝山大桥重建工程温度监测和施工应力监测[J].桥梁建设,2001(3):57-60.
- [6] 王卫锋,徐郁峰,韩大建,等.崖门大桥施工中的应力及温度测量[J].桥梁建设,2003(1):31-34.
- [7] 韩大建,徐郁峰,王卫锋,等.大跨度混凝土斜拉桥主梁应力监测中徐变应变的分离[J].桥梁建设,2003(1):55-58.
- [8] 王莹峰.桥梁施工监控中实测应力计算方法及MALAB实现[J].交通科技与经济,2015,17(6):117-121.
- [9] 王砺文.松花江特大桥应力监控[J].铁道标准设计,2009(4):56-58.
- [10] 陈峰.预应力混凝土连续梁桥施工应力监控及分析[J].工程与建设,2015,29(5):710-712.
- [11] 吴跃红,曾世东.振弦式应变计测试混凝土线膨胀系数的研究[J].交通标准化,2014,42(23):78-81.
- [12] 项海帆.高等桥梁结构理论[M].北京:人民交通出版社,2001.
- [13] 陈常松,颜东煌,陈政清,等.混凝土振弦式应变计测试技术研究[J].中国公路学报,2004(1):33-37.