

大跨度混合梁斜拉桥施工过程温度影响分析

李治仑¹, 陈常松¹, 曾国良²

(1. 长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114; 3. 湖南联智科技股份有限公司)

摘要:为实现对钢箱梁精匹配时温度效应的精准分析和实时修正, 尝试在 BDCMS 程序中简化钢箱梁竖向温度梯度分布, 加快了数据采集和程序计算的速度。以嘉鱼长江公路大桥为例, 对该桥 24 h 施工监控温度观测数据进行分析, 验证了该算法的合理性和准确性, 并分析了误差原因。结果表明: BDCMS 分析钢箱梁精匹配温度影响时, 计算准确且速度快, 可用于现场修正, 提高施工监控效率; 温度沿梁长变化对于斜拉桥钢箱梁精匹配时标高索力影响很小, 可以忽略不计。

关键词:钢—混凝土组合斜拉桥; 施工控制; 温度梯度; 温度梯度; 挠度

1 引言

随着现代斜拉桥跨径不断增加, 斜拉桥结构的柔性进一步增大, 温度对斜拉桥的影响也日益突出。斜拉桥在施工过程中, 大部分构件都暴露在大气中, 在太阳直射、地面反射辐射、空气流动等因素作用下, 加劲梁横截面温度梯度多变, 斜拉桥将产生明显的温度效应。在施工控制中, 为了回避变化太快的温度效应, 普遍在凌晨温度均匀的时候吊梁及精匹配, 此时间段温度均匀, 但是在炎热夏季, 此时索、梁、塔温度场仍然高于设计值, 如何在精匹配时快速计算温度影响有待研究。

Sang-Hyo Kim 等利用数值方法, 研究出钢箱梁温度分布, 并预测出顶底板峰值温度; 杨怡莹研究了主梁温度场效应引起裂缝和起拱引起主梁脱架的安全问题; 李春峰基于布里渊光时域分析技术 (BOTDA), 开展大体积混凝土温度测试研究; Yi Zhou 等利用多重线性叠加法模拟计算出斜拉桥受温度影响的变形效应, 并分析了温度效应与斜拉桥高跨比、边中跨比及材料热膨胀系数的关系; 戴传广等提出了混凝土主梁温度膨胀系数主动修正的方法; 于丽波对公路钢箱梁夏季温度曲线拟合, 研究了钢箱梁温度影响; 李学文等把钢箱梁、混凝土梁、主塔、斜拉索各个截面划分为若干个小截面, 然后计算各个截面的温度影响, 再叠加求出温度对整体的影响。在钢—混凝土组合桥实际施工时, 往往并不能直接进行修正, 因为采集数据大, 计算

过程繁琐且时间长, 往往计算完成以后现场温度场已经变化。可见, 在实际施工过程中, 需要一个更为快速的、简捷的温度效应计算方法。

消除结构温度影响是保证施工质量和安全的前提, 关于斜拉桥在钢箱梁精匹配中温度效应现场实时修正的快捷计算方法研究急需进行。该文结合工程实例, 对钢箱梁精匹配时斜拉桥的温度效应实时修正方法进行研究, 为后续相关研究提供参考和借鉴。

2 理论分析

2.1 计算程序

采用长沙理工大学开发的桥梁设计与施工控制系统 (BDCMS), 该系统的准确性在荆岳长江大桥、荆州长江大桥、九江长江大桥等斜拉桥的施工控制中得以验证, 以下简称该系统为 BDCMS。嘉鱼长江公路大桥计算模型如图 1 所示。

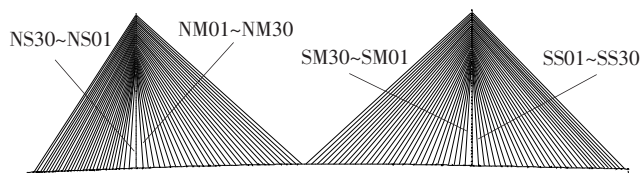


图 1 嘉鱼长江公路大桥 BDCMS 模型图

2.2 计算方法

2.2.1 索塔

温度对于斜拉桥索塔的变形和受力具有较大的影

响,对于横截面为箱形截面的索塔,其截面上温度变化宜采用最高项系数为3的多项式,这样能较好地模拟其分布特点,由于索塔轴线方向的日照强度变化小,所以认为轴线方向温度场是均匀的,索塔温度影响主要考虑索塔江面温度变化和索塔岸面温度变化带来的影响,根据两个塔面温度变化计算索塔变形。

索塔的弯曲变形:

$$\chi = \frac{\alpha}{I_c} \sum_{j=1}^4 \chi^j \quad (1)$$

索塔的轴向变形:

$$\epsilon_0 = \frac{\alpha}{A} \sum_{j=1}^4 \epsilon_0^j \quad (2)$$

式中: α 为材料线膨胀系数; I_c 为截面惯性矩; A 为截面面积; χ^j 、 ϵ_0^j 分别为各塔面的弯曲变形和轴向变形。

2.2.2 斜拉索

斜拉索一般认为是柔性索,不考虑其抗弯刚度。斜拉索传热快,截面小,轴向和断面上的温度分布比较均匀。斜拉索温度场由工厂预制的测温索实测数据代表,其温度变形为:

$$\begin{cases} \epsilon_0 = \alpha T = \alpha \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_i \\ \chi = 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中: T 为测温索段中 n 个温度测点的平均值。

2.2.3 钢箱梁

钢箱梁温度变化会影响斜拉桥的标高及斜拉索索力,其中主要因素是钢箱梁竖向温度分布。钢箱梁精匹配一般选择在22:00—06:00进行,以回避快速变化的温度影响。这段时间温度整体比较均匀,但是梁温还是与设计值不符,因此需要修正。由于顶底板温差很小,因此将钢箱梁断面竖向温度分布按线性分布等效,这样加快了数据采集与计算速度。轴向变形和弯曲变形为:

$$\begin{cases} \epsilon_0 = \alpha [T_2 + (T_1 - T_2)y_{\text{下}}/h] \\ \chi = \frac{T_1 - T_2}{h} \end{cases} \quad (4)$$

式中: T_1 、 T_2 分别为截面上、下缘温度变化值; $y_{\text{下}}$ 为截面下形心距; h 为截面高度; α 为材料线膨胀系数。

2.3 温度变形计算

对于截面上任意温度变化梯度 $T(x, y)$,可计算得到轴向变形和弯曲变形:

$$\epsilon_0 = \frac{\alpha}{A} \iint_A T(x, y) dA \quad (5)$$

$$\chi = \frac{\alpha}{I_c} \iint_A T(x, y)(y - y_c) dA \quad (6)$$

式中: x 为主梁截面横向坐标; y 为梁高方向即竖向坐标。

从而,由温度影响产生的单元荷载为:

$$\{F\}^e = \{N_i \quad Q_i \quad M_i \quad N_j \quad Q_j \quad M_j\}^T = \{-EA\epsilon_0 \quad 0 \quad -EI_c\chi \quad EA\epsilon_0 \quad 0 \quad EI_c\chi\}^T \quad (7)$$

式中: E 为弹性模量; N_i 、 Q_i 、 M_i 、 N_j 、 Q_j 、 M_j 分别为单元首端轴力、末端轴力、剪力和弯矩。

用整体坐标表示杆件单元的等效节点荷载,再将相关单元的节点荷载分别相加,得到节点荷载列向量 F ,然后得到整体刚度方程:

$$K\Delta = F \quad (8)$$

式中: K 为结构整体刚度矩阵; Δ 为结构节点位移向量。

求解刚度方程(8),可得到结构因温度而引起的节点位移和温度应力。

3 工程实例

3.1 工程概况

嘉鱼长江公路大桥为连接湖北省洪湖市和嘉鱼县之间的一座公路斜拉桥,全长4 660 m。主桥采用主跨920 m双塔七跨连续不对称混合梁斜拉桥方案,跨度组合为(70+85+72+73) m+920 m+(330+100) m,主跨北边采用预应力混凝土箱梁,南边和中跨采用钢箱梁,顺桥向标准梁段索距为15 m,拉索按扇形布置,全桥4×30对斜拉索。

3.2 温度场测试

钢—混凝土混合梁的温度测试,包括对索塔温度、斜拉索温度、钢箱梁温度和混凝土梁温度的测试。嘉鱼长江公路大桥温度测试采用瑞士产多功能红外线点温计和事先预埋的温度传感器。钢箱梁以点温计为主,梁顶和梁底温度选取下游外腹板、下游中腹板、中央分隔带、上游中腹板以及上游外腹板5个固定截面位置测试。斜拉索温度测试使用工厂预制的与实际索材料相同的测温索测试,测温索长2 m,在其中心截面埋入温度传感器。索塔温度选取洪湖侧10#塔下游中塔柱作为温度测试断面,在该断面沿臂厚方向布置4条测线,每条测线设置11个温度测点。在混凝土梁每个测试断面上,埋置温度传感器,测量包括腹板、顶板、底板和斜底板的温度。嘉鱼长江公路大桥北岸NZ28和南岸SZ29钢箱梁精匹配完成后,对南北岸同时进行了24 h温度观测,钢箱梁顶底板温差、索温、塔温、混凝土梁温如图2所示。

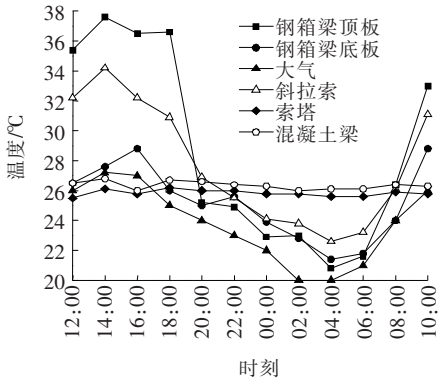


图 2 24 h 斜拉桥实测温度场—时间变化图

从图 2 可以看出:混合梁斜拉桥各结构内的温度基本上都比大气温度高,而且其整体变化趋势和大气温度整体变化趋势相同,但都比大气温度变化滞后。在所有结构中,钢箱梁对温度变化最敏感,其次是斜拉索,然后是混凝土梁,最后是主塔。在 00:00—06:00,梁、索、塔温度场最均匀,此时温度变化最慢,温度效应快速计算后可以实时修正。

3.3 温度影响的实测效应分析

3.3.1 南北岸索力的温度修正

通过建立嘉鱼长江公路大桥的 BDCMS 模型,可以查看每个工况的索力和标高。在每个梁段精匹配时,根据实测温度场数据,计算温度场对标高索力的影响值,BDCMS 程序计算温度影响时间为 15~20 min,计算完成后可以用于现场修正。以 24 h 实测温度场的数据为例,计算南北岸前 3 对索索力和温度影响理论值,结果如图 3、4 所示。

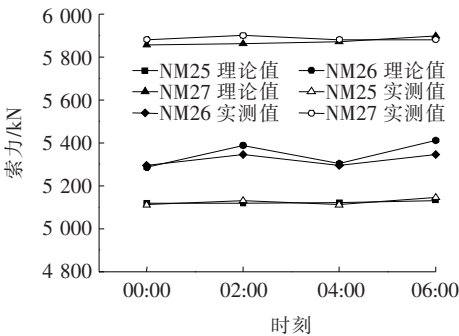


图 3 北岸索力受温度影响变化图

由图 3、4 可以看出:南北岸前 3 对索计入实测索、梁、塔温度场影响后的理论值与实测值十分接近,偏差相对较大的是 06:00 的温度场,这是因为相对 00:00—04:00 的温度场,06:00 的温度场没有那么均匀,导致计算结果与实际值有偏差,其中最大误差出现

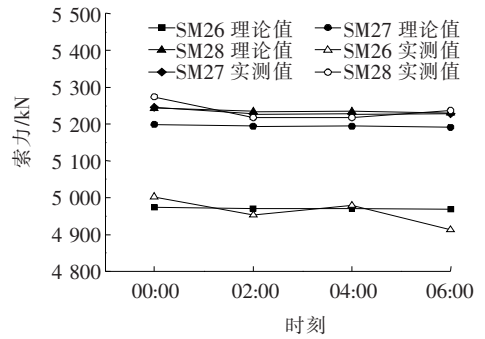


图 4 南岸索力受温度影响变化图

在南岸 SM26 索,在 06:00 温度场下,计算值为 4 969 kN,实测值为 4 913 kN,误差在 1%以内。因此 BDCMS 计算温度对索力的影响合理,且误差在允许范围。

3.3.2 南北岸标高的温度修正

与计算索力的温度影响一样,通过建立嘉鱼长江公路大桥的 BDCMS 模型,可以查看每个工况的索力和标高。然后利用 24 h 的温度观测数据,计算实测温度场下的标高温度影响理论值,结果如图 5、6 所示。

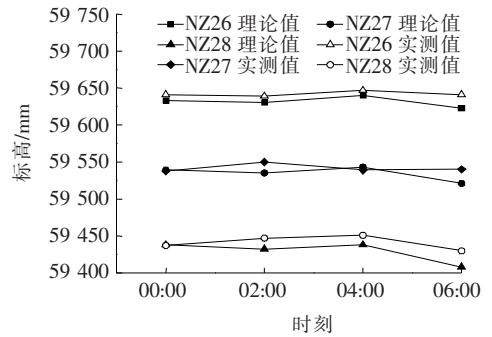


图 5 北岸标高受温度影响变化图

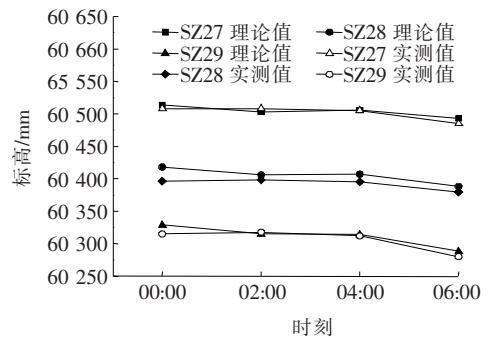


图 6 南岸标高受温度影响变化图

从图 5、6 可以看出:用线性温度分布模拟出的温度荷载计算标高理论值与标高实测值的变化规律基本吻合,实测值与计算值差值较小,在 00:00—04:00 的温度场中,计算值与实测值十分接近,误差在 1%以内。实际施工中可用于施工监控。

3.4 索力和标高温度影响计算值和实测值差异原因分析

由前文可知,不管是标高还是索力,温度影响的计算值和实测值都有一点误差,引起这部分误差的原因是钢箱梁的平均温度的取值不够精确,实际测试梁温时在悬臂梁中间梁段测试梁顶、梁底温度,但是温度沿梁长方向会有不同的变化,如果直接取中间值为平均值的话,就会出现图中的误差。因此,为了计算这一部分误差的影响,在温度变化激烈的白天,沿长度方向每隔5段梁测试一次箱梁梁顶和梁底的温度,并根据实测值计算最大梁温变化影响。实测值如图7、8所示。

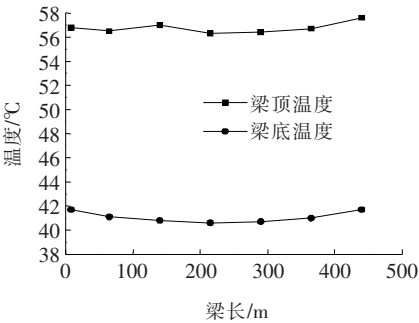


图7 北岸索力温度—梁长变化图

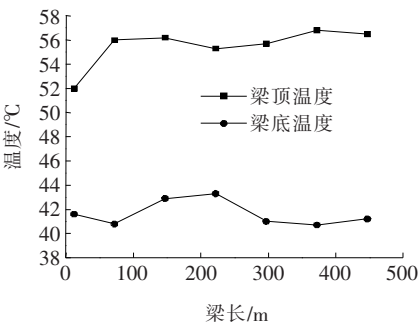


图8 南岸索力温度—梁长变化图

由图7、8可以看出:梁顶温度和梁底温度沿钢箱梁长度方向基本上呈线性变化,而晚上温度会更均匀,梁顶温度和梁底温度沿钢箱梁纵向的变化会更小。根据图中数据,可以拟合出白天钢箱梁纵向温度变化最激烈时的变化率。北岸梁顶纵向温度变化率 $k_1=0.0011$,北岸梁底纵向温度变化率 $k_2=-0.0001$;南岸梁顶纵向温度变化率 $k_3=0.0018$,南岸梁底纵向温度变化率 $k_4=-0.0016$ 。将这些钢箱梁纵向温度的变化率视为凌晨精匹配时钢箱梁温度纵向的变化率来计算,可以得到钢箱梁温度沿纵向变化时产生的最大影响,而实际影响比计算值小。再根据凌晨精匹配时温度场的数据就可以分别计算南北岸梁顶温度和梁底温度纵向变化规律。以02:00的实测数据为例,计算

结果如下:北岸梁顶温度—梁长变化规律为 $y_1=0.0011x+22.7637$,北岸梁底温度—梁长变化规律为 $y_2=-0.0001x+22.8215$;南岸梁顶温度—梁长变化规律为 $y_3=0.0018x+20.6004$,南岸梁底温度—梁长变化规律为 $y_4=-0.0016x+24.1552$ 。其中, y_i 为温度值, x_i 为塔端悬臂端的距离。通过Excel可以计算出南北岸每片钢箱梁考虑纵向温度变化之后的温度值,结果如表1所示。

表1 北塔、南塔部分钢箱梁温度纵向修正数据

钢箱梁 编号	修正梁 顶温 度/°C	理论梁 顶温 度/°C	修正梁 底温 度/°C	理论梁 底温 度/°C	悬臂 端梁 长/m
NZ1	22.8	23.0	22.8	22.8	7.8
NZ5	22.8	23.0	22.8	22.8	64.8
NZ10	22.9	23.0	22.8	22.8	139.8
NZ15	23.0	23.0	22.8	22.8	214.8
NZ20	23.1	23.0	22.8	22.8	289.8
NZ25	23.2	23.0	22.8	22.8	364.8
NZ30	23.2	23.0	22.8	22.8	439.8
SZ1	20.6	21.0	24.1	23.8	12
SZ5	20.7	21.0	24.0	23.8	72
SZ10	20.9	21.0	23.9	23.8	147
SZ15	21.0	21.0	23.8	23.8	222
SZ20	21.1	21.0	23.7	23.8	297
SZ25	21.3	21.0	23.6	23.8	372
SZ30	21.4	21.0	23.4	23.8	447

图9~12为考虑梁温纵向变化影响南、北岸每片钢箱梁标高及索力变化情况。

从图9~12可以看出:考虑最不利梁温沿梁长变化情况会让计算值与实测值更加接近,偏差十分微小,考虑在精匹配时温度沿梁长方向的变化率低于晴朗白天的变化率,因此实际偏差会更小。由于实际施工中实测梁温沿长度变化会耗费很多时间,并且与不考虑梁温沿长度变化的理论值相比差别很小,因此为了实时修正温度影响,梁温沿长度方向变化可忽略不计。

4 结论

对于钢箱梁精匹配关键控制工况,索、梁、塔温度场对于斜拉桥结构的影响是相互耦合的,要精确分析

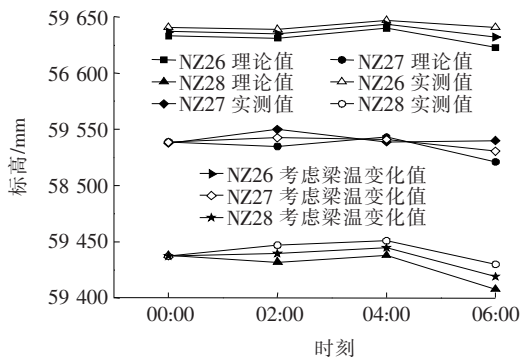


图 9 北岸考虑梁温纵向变化影响标高变化图

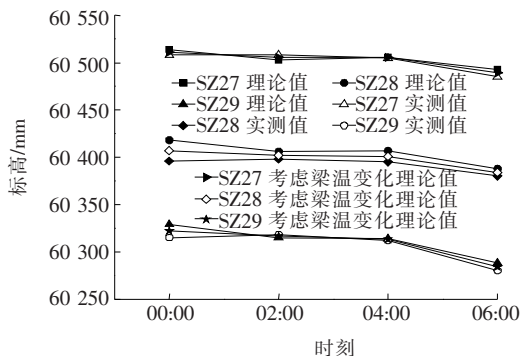


图 10 南岸考虑梁温纵向变化影响标高变化图

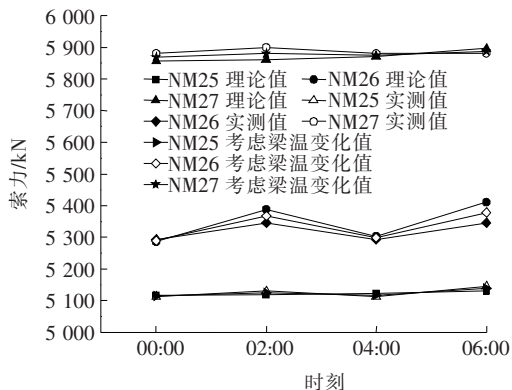


图 11 北岸考虑梁温纵向变化影响索力变化图

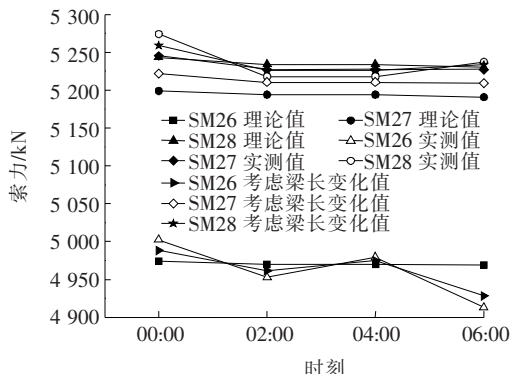


图 12 南岸考虑梁温纵向变化影响索力变化图

只能通过建模计算。通过该文研究,得出以下结论:

(1) BDCMS 作为专门分析斜拉桥设计与施工控制的程序,能准确快速地计算温度影响,比其他同类型计算软件更有优势。

(2) 在钢箱梁精匹配工况,钢箱梁竖向温度分布可以用线性分布代替,此计算方法速度快,并且其合理性在嘉鱼长江公路大桥施工监控中得到验证。

(3) 在梁段精匹配过程中,梁温沿长度方向的变化影响在精确度允许范围内,可以忽略不计。

参考文献:

- [1] 陈彦江,王力波,李勇. 钢—混凝土组合桥温度场及温度效应研究[J]. 公路交通科技, 2014(11).
- [2] Sang-Hyo Kim, Se-Jun Park, Jiaxu Wu, et al. Temperature Variation in Steel Box Girders of Cable-Stayed Bridges during Construction[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2015, 112: 80-92.
- [3] 杨怡莹,孙全胜. 独塔非对称斜拉桥 π 梁温度监控及受力分析[J]. 中外公路, 2019(3).
- [4] 李春峰,何文勇,罗勇,等. 基于 BOTDA 光纤传感技术的大体积混凝土温度测试研究[J]. 中外公路, 2019(1).
- [5] Yi Zhou, Limin Sun. Insights into Temperature Effects on Structural Deformation of a Cable-Stayed Bridge Based on Structural Health Monitoring [J]. Structural Health Monitoring, 2019, 18(3): 778-791.
- [6] 戴传广,李慧成,时亮,等. 中央索面斜拉桥施工过程温度影响研究[J]. 公路, 2017(6).
- [7] 于丽波,董浩,朱季,等. 钢箱梁桥温度梯度模式拟合研究[J]. 中外公路, 2017(1).
- [8] 李学文,蔡杰,涂光亚. 混合梁斜拉桥施工过程中温度变化对斜拉索索力的影响[J]. 公路与汽运, 2012(1).
- [9] 孙建渊,尹成章. 大跨度部分斜拉桥施工控制温度效应影响研究[J]. 城市道桥与防洪, 2014(9).
- [10] Jixin Yang, Mingchao Yang. Analysis of Temperature Effect on Cable-Stayed Bridge at Construction Stage [J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 178: 2 204-2 208.
- [11] 阴存欣. 钢—混组合梁温度及收缩效应分析的电算方法[J]. 中国公路学报, 2014(11).
- [12] 丁幼亮,王晓晶,王高新,等. 珠江黄埔大桥钢箱梁温度长期监测与分析[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2012(5).
- [13] 颜东煌,陈常松,涂光亚. 混凝土斜拉桥施工控制温度影响及其现场修正[J]. 中国公路学报, 2006(4).
- [14] 刘来君,刘世臣. 大跨径斜拉桥悬拼施工控制中温度影响的研究[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2013(4).