

# 温度效应对大跨径 PC 斜拉桥主梁标高控制的影响研究

陈老伍<sup>1</sup>, 刘国坤<sup>2</sup>, 张定马<sup>1</sup>

(1. 中国公路工程咨询集团有限公司路桥设计所, 湖北 武汉 430008; 2. 湖南省交通科学研究院有限公司)

**摘要:**在大跨度混凝土斜拉桥施工控制中,影响其控制精度的参数相当多,温度变化对桥梁标高的影响最大,为研究温度对混凝土斜拉桥主梁标高控制的影响与对策,以某大跨径混凝土斜拉桥为工程背景,通过实测温度数据采用数值分析方法计算出主梁的轴向温度应变及曲率,代入有限元计算程序中,计算出温度对主梁标高的影响量,对比实测 24 h 内主梁标高随大气温度的变化,验证该方法的可行性。总结主梁顶板、中腹板、底板各测点的温度变化及主塔沿壁厚方向各温度测点的变化规律,对主梁及主塔温度测点进行优化,为数值分析方法中主梁及主塔截面网格优化提出建议。研究表明:采用数值分析方法计算温度对主梁标高的影响是可行的;对混凝土斜拉桥主梁、主塔温度测点进行优化,既能提高数值分析方法的计算效率又能简化测点布置。

**关键词:**施工控制; 温度; 标高; 数值分析方法

在大跨度混凝土斜拉桥施工控制中,影响其控制精度的因素相当多,相较于其他结构参数,桥梁线形易受温度变化影响。大跨度混凝土斜拉桥的主梁施工大多都经历严寒酷暑,无法回避季节温差对主梁标高的影响,而一天之中影响日照温度的因素又有很多。相关文献资料表明,混凝土是热的不良导体,一天内日照效应仅对距混凝土外表面 40 cm 左右深度范围内影响较大,且混凝土热传导与结构表面距离呈正相关,滞后性较为明显。混凝土结构内部温度场的分布规律随外部因素的影响及自身结构特点表现得极为复杂,所以,总结主梁顶板、中腹板、底板各测点的温度变化及主塔沿壁厚方向各温度测点的变化规律,对主梁及主塔温度测点进行优化,为数值分析方法中主梁及主塔截面网格的优化提出建议,既能提高数值分析方法的计算效率又能简化测点布置。

Stephenson 最早对温度应力的研究从考虑结构一般的气温作用进入到考虑日照温差影响;刘兴法、管敏鑫等依据实测温度数据对 Stephenson 的温度分布指数函数模型进行优化,温差基数及指数系数的确定可依据实测温度数据进行回归分析得到;1989 年 Clark JH 提出可将箱梁温度场简化为二维温度模型进行计算,取得了较好的效果;刘来君依托实际工程对温度应力进行了分析研究;颜东煌在研究温度对混凝土

土斜拉桥施工控制的影响及其修正方法方面有其独到的见解和处理方式,并在一系列特大斜拉桥施工控制中取得了非常不错的效果;葛耀军提出的混凝土斜拉桥温度场二维差分计算方法在甬江大桥中得到了验证。

该文在已有研究的基础上,以赤石特大桥为工程背景,根据实测温度场计算主梁的轴向应变和曲率、索塔轴向应变和曲率、索的轴向应变和曲率对主梁立模标高的影响,并根据实测标高数据验证该数值分析方法的正确性;通过总结主梁顶板、中腹板、底板各测点的温度变化及主塔沿壁厚方向各温度测点的变化规律,对主梁及主塔温度测点进行优化,以提高数值分析方法的计算效率并简化测点布置。

## 1 温度影响的计算方法

根据平截面变形假定,依照截面总应力为 0 以及中心轴力矩平衡,求出轴向应变  $\epsilon_0$  与曲率  $\chi$ :

$$\epsilon_0 = \frac{\alpha}{A} \iint T(x, y) dx dy \quad (1)$$

$$\chi = \frac{\alpha}{I_x} \iint T(x, y) (y - y_c) dx dy \quad (2)$$

式中:  $\alpha$  为材料线膨胀系数;  $A$  为梁段截面面积;  $y_c$  为截面形心竖坐标;  $I_x$  为截面对  $x$  轴的惯性矩;  $T(x, y)$

为温度梯度分布函数。

$T(x, y)$  无法形成具体准确的函数形式,可采用数值求和近似对上述两式进行计算,针对全截面进行网格划分,以积分求和计算  $\epsilon_0$  和  $\chi$  值。

$$\epsilon_0 = \frac{\alpha}{A} \sum_{i=1}^n \Delta T_i b_i \Delta y_i = \alpha \sum_{i=1}^n \Delta T_i \frac{b_i \Delta y_i}{A} = \alpha \sum_{i=1}^n \Delta T_i c_i \tag{3}$$

$$\chi_y = \frac{\alpha}{I_x} \sum_{i=1}^n \Delta T_i b_i (y_i - y_c) \Delta y_i = \alpha \sum_{i=1}^n \Delta T_i \cdot \frac{b_i (y_i - y_c) \Delta y_i}{I_x} = \alpha \sum_{i=1}^n \Delta T_i d_i \tag{4}$$

假定每个温度测点周围的温度场是均匀分布的,全箱梁截面则可依据温度测点划分为多个网格,  $b_i \Delta y_i$  为划分的每个网格面积,  $\Delta T_i$  为网格内实测温度与设计基准温度差值,  $y_i$  为所划网格形心竖坐标;  $c_i, d_i$  为温度系数。该文结合工程实例阐述该方法。

某大跨径混凝土斜拉桥,主桥为跨径  $(165 + 3 \times 380 + 165)$  m 的四塔预应力混凝土双索面半漂浮体系,大桥宽 28 m,单塔设置 23 对斜拉索,主梁为单箱四室,桥型布置图见图 1。

2 主梁、主塔截面温度场及测点优化

一般而言,为获取箱梁温度场的准确分布,需在箱梁截面多个位置布设温度测点,温度测点与网格应做到一一对应,如图 2 所示,会造成数据处理繁杂及造价过高。根据现场测试数据发现,在某些关键部位布设测点即可推算出箱梁温度场,即可满足工程精度要求。

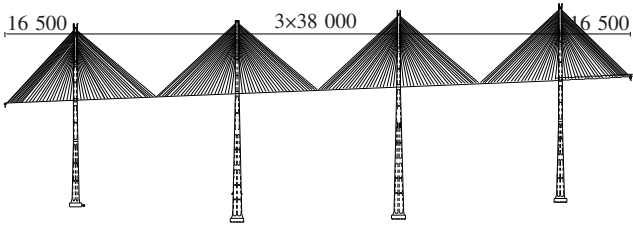


图 1 赤石特大桥桥型布置图(单位:cm)

现场主梁截面温度测点布置见图 3。

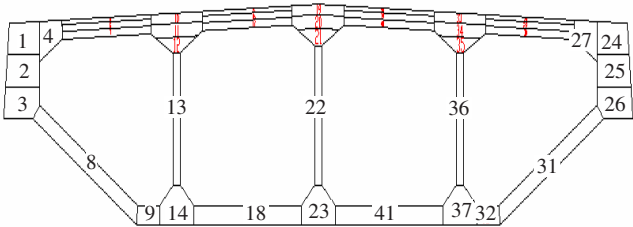


图 2 优化后主梁标准断面温度网格编号划分

夏季温度变化较大,也是主梁施工高峰期,对标高影响非常大,故以夏季为例,分析赤石特大桥主梁顶板、中腹板、底板各测点的温度变化及主塔沿壁厚方向各温度测点的变化规律,以证明对主梁、主塔温度测点的优化是合理可行的。选取 2014 年 8 月 24 日(持续晴天中的一天)为代表进行实测温度数据分析,箱梁内部测点布置图见图 2,依据温度测点对主梁截面进行网格划分如图 3 所示。

各温度测点的时程曲线如图 4~6 所示。

由图 4 可知:主梁顶板范围内各测点在 08:00 左右太阳出来后,温度迅速上升,顶板内最外侧测点 12 (测点编号见图 2),在 07:00 左右达最小值  $27.7^{\circ}\text{C}$ ,

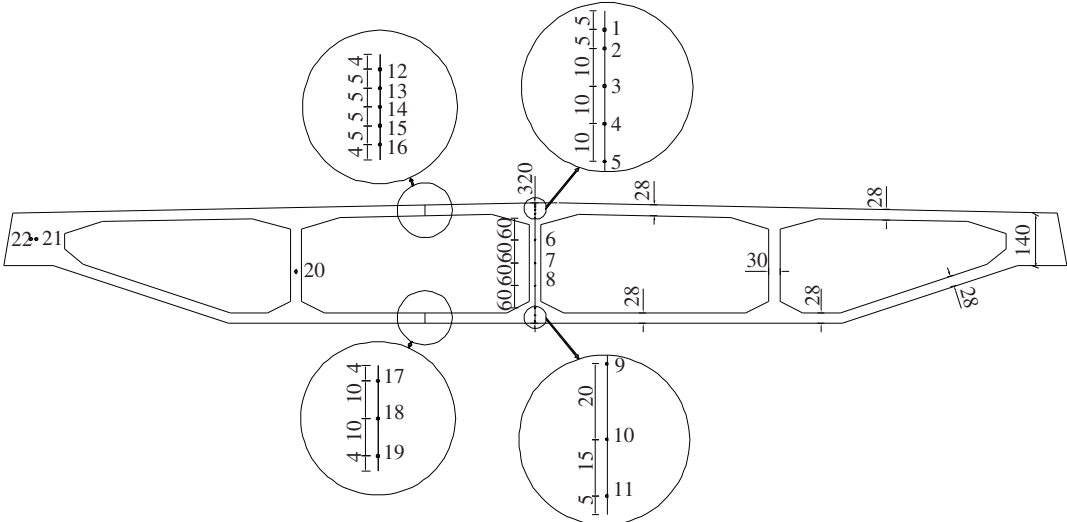


图 3 主梁断面实际温度测点布置图(单位:cm)

15:00 达最大值 41.7℃,在日照时间内距顶板外表面越近的测点温度越高,日出前及日落后时间段内,顶板各测点温度值较为接近。顶板网格编号 15(网格编号见图 3)取测点 12 温度值(该点温度变化最快),网格编号 16 取温度测点 13、14 平均值,网格编号 17 取温度测点 15、16 平均值(测点 15、16 温度变化规律一致且滞后性不明显)。

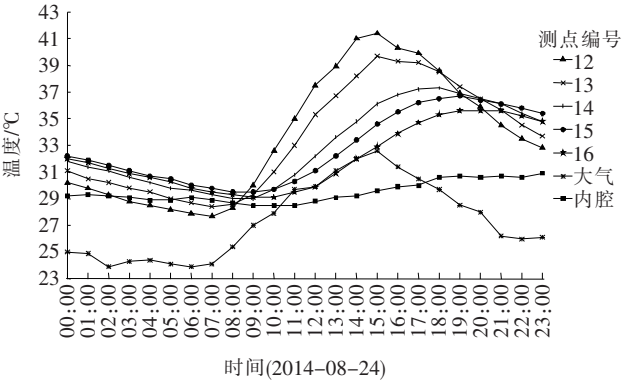


图 4 箱梁顶板各测点 24 h 温度时程曲线

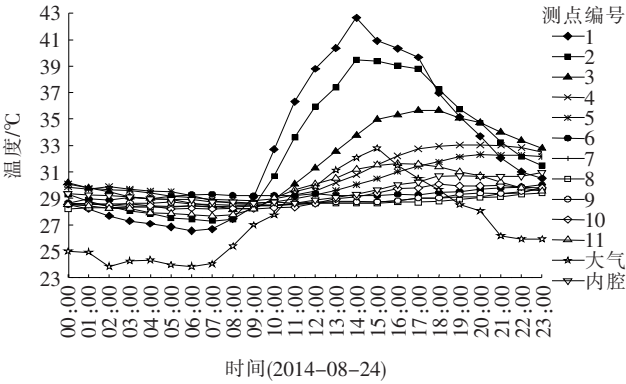


图 5 箱梁中腹板各测点 24 h 温度时程曲线

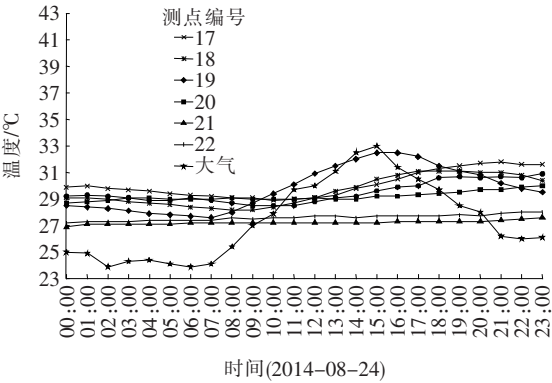


图 6 箱梁底板及风嘴各测点 24 h 温度时程曲线

由图 5~6 可知:一天内,中腹板上缘 40 cm 范围内的测点(1、2、3、4、5)温度曲线波动明显,而中间部分测点(6、7、8)的温度变化不大,下缘部分测点(9、10、11)温度均较为接近;故网格编号 19 取温度测点 1、2

平均值,网格编号 20 取温度测点 3、4 平均值,网格编号 21 取测点 5 温度值,网格编号 22 取温度测点 6、7、8 温度平均值,网格编号 23 取温度测点 9、10、11 温度平均值;底板测点 24 h 内的最大温度变幅在 14:00 左右仅为 4℃左右,其他时间点各测点温度很接近,远小于顶板温度变幅,这是由于底板(斜腹板)所受日照影响相对较小的缘故。故底板及斜腹板网格编号 3、8、9、26、31、32、41 均取实际温度测点 17、18、19 平均值。

索塔箱形断面的温度场分布规律符合二维分布特点,其沿轴线方向温度场变化也较为缓慢,根据温度测点对主塔横截面进行网格划分如图 7、8 所示。

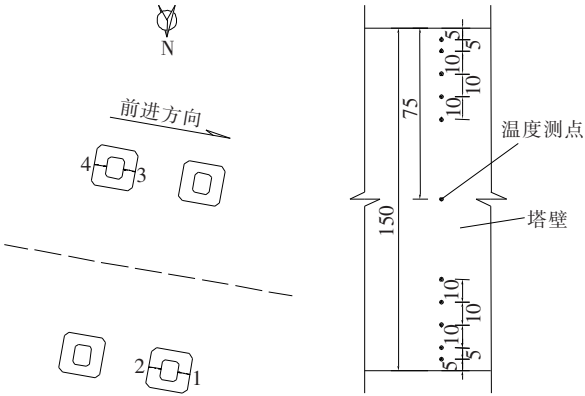


图 7 主塔温度测点布置图(单位:cm)

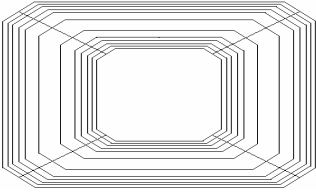


图 8 优化后主塔截面网格划分图

根据截面几何特性可求出每个主塔温度测点所对应的温度系数,则可得主塔的轴向变形  $\epsilon_0$  和弯曲变形  $\chi$ ,主塔截面网格划分优化原则同主梁截面网格划分相同,不再一一阐述。

选取 2014 年 9 月 2 日(持续晴天中的一天)主塔截面实测温度场数据进行分析。箱梁内部各测点的温度时程曲线见图 9。

由图 9 可知:日照出来后,距主塔壁板外表面 20 cm 的混凝土温度变化较为剧烈,20~40 cm 的温差变化趋于平缓,大于 40 cm 的混凝土温度则基本不随时间而变化。故在采用数值分析方法进行网格划分时,对距壁板外表面小于 20 cm 的网格进行细化,20~40 cm 可以少划分网格,距离大于 40 cm 时,网格可以粗略划分。

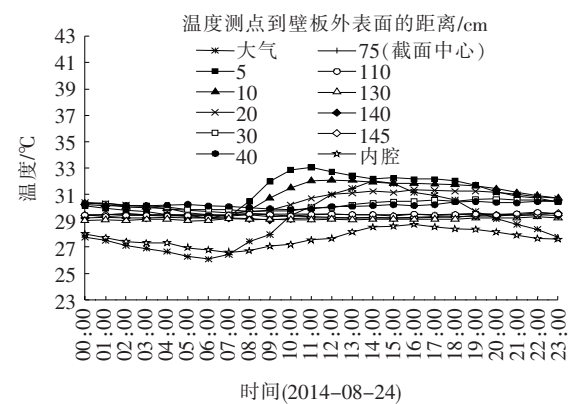


图9 主塔截面各测点24 h温度时程曲线

7<sup>#</sup>、8<sup>#</sup>塔主梁温度测试截面分别布置在汝城侧(中跨侧)5<sup>#</sup>梁段上和郴州侧(边跨侧)3<sup>#</sup>梁段上。根据实际温度测点(图3)对主梁截面进行网格划分,温度沿箱梁两侧主肋实心段高度方向变化幅度很小,划分为3层,网格编号1、4、24、27取顶板范围内温度测点平均值,网格编号2、25均取温度测点21、22平均值;顶板温度变化较大划分为3层,网格编号15取测点12温度值,网格编号16取温度测点13、14平均值,网格编号17取温度测点15、16平均值;边腹板及中腹板网格编号10、19、33均取温度测点1、2平均值,网格编号11、20、34取温度测点3、4平均值,网格编号12、21、35取测点5温度值,网格编号13、22、36取温度测点6、7、8温度平均值,网格编号14、23、37取温度测点9、10、11平均值。底板、斜腹板温度及实心段下侧和主梁下侧大气温度较为接近,故划分为1层网格,网格编号3、8、9、18、26、31、32、41均取实际温度测点17、18、19平均值。

由式(3)和(4)可以看出: $c_i$ 、 $d_i$ 只与截面特性和网格划分有关,故把 $c_i$ 、 $d_i$ 定义为温度测点的温度系数,网格划分后即可求出所有温度系数,得出 $\epsilon_0$ 和 $\chi$ 。

表2 理论计算各时刻温度对主梁21<sup>#</sup>块标高影响

时刻	大气温度/℃	主梁轴向应变	主梁曲率	拉索轴向应变	主塔轴向应变	主塔曲率	理论标高影响量/mm	相对07:00标高差值/mm
07:00	25.0	$1.23 \times 10^{-4}$	$4.65 \times 10^{-6}$	$9.96 \times 10^{-5}$	$1.03 \times 10^{-4}$	$2.06 \times 10^{-6}$	6.4	0
10:30	27.7	$1.37 \times 10^{-4}$	$1.42 \times 10^{-5}$	$1.52 \times 10^{-4}$	$1.08 \times 10^{-4}$	$5.05 \times 10^{-6}$	-7.7	-14.1
14:30	31.7	$1.57 \times 10^{-4}$	$2.34 \times 10^{-5}$	$1.81 \times 10^{-4}$	$1.11 \times 10^{-4}$	$2.83 \times 10^{-6}$	-37.2	-43.6
19:00	30.0	$1.54 \times 10^{-4}$	$1.95 \times 10^{-5}$	$1.70 \times 10^{-4}$	$1.15 \times 10^{-4}$	$2.49 \times 10^{-7}$	-23	-29.4
22:30	27.6	$1.43 \times 10^{-4}$	$1.23 \times 10^{-5}$	$1.33 \times 10^{-4}$	$1.12 \times 10^{-4}$	$6.38 \times 10^{-7}$	-6.1	-12.5
次日01:50	24.4	$1.35 \times 10^{-4}$	$8.55 \times 10^{-6}$	$1.13 \times 10^{-4}$	$1.07 \times 10^{-4}$	$1.77 \times 10^{-6}$	10	3.6

由表1可知:晴天时单独考虑温度影响,主梁标高变化快,14:30相对早上07:00,标高变化幅度为-45 mm,晚上22:30,标高在温度影响下的变幅达到了一14 mm。由上可知:在进行关键工况施工控制时,为了保证

此种网格划分只需计算顶板网格编号15、16、17,腹板网格编号19、20、21、22、23,底板网格编号18,两侧主肋实心段网格编号1、2共11个温度系数即可,很大程度上提高了数值分析方法的计算效率。

对于斜拉索,一般不考虑其抗弯刚度,可认为温度在其断面和轴向上的分布是较为均匀的,索温元件埋置在7<sup>#</sup>塔中跨侧6<sup>#</sup>拉索内,其温度变形为:

$$\epsilon_0 = \alpha \cdot \bar{T} = \alpha \cdot \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_i \tag{5}$$

$$\chi = 0 \tag{6}$$

3 对数值分析方法网格优化的验证

2014年9月2、3号晴天,7<sup>#</sup>塔21<sup>#</sup>块浇筑完混凝土后现场无任何操作,日出为07:30左右,实测21<sup>#</sup>块主梁标高随温度的变化如表1所示;进行数值分析计算时,取设计基准温度为20℃,混凝土线膨胀系数 $\alpha$ 取 $1.0 \times 10^{-5}$ ,斜拉索线膨胀系数取 $1.2 \times 10^{-5}$ ,根据式(3)~(6)即可得出梁、塔、索单元各时刻的轴向应变和曲率,把单元轴向应变和曲率作为温度荷载参数代入程序中,采用有限元的方法算出温度荷载对斜拉桥各梁段标高的影响量(表2)。

表1 实测主梁21<sup>#</sup>块标高随温度的变化

时刻	大气温度/℃	相对07:00标高差值/mm	时刻	大气温度/℃	相对07:00标高差值/mm
07:00	25.0	0	19:00	30.0	-25
10:30	27.7	-25	22:30	27.6	-14
14:30	31.7	-45	次日01:50	24.4	5

桥面线形精度,需要考虑温度影响下的结果。从表2可以看出:14:30相对07:00,标高变化为-43.6 mm,和实测值仅相差1.4 mm;在上午10:45测试完毕后,比较07:00时的监测结果,标高差值为-25 mm,与理论