

混凝土斜拉桥施工控制中温度对主梁标高的影响

刘国坤, 颜东煌, 涂光亚

(长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114)

摘 要:为研究温度对主梁标高的影响,采用基于实测温度场的数值分析方法,研究索、塔、梁温度轴向应变和曲率等相关参数对主梁标高的敏感性,并分析主要天气条件(持续晴天、阴雨天、昼夜温差大、季节变换)下,温度对主梁标高的影响。结果表明:采用基于实测温度场的数值分析方法能快速、精准地计算温度场对主梁标高的影响;由于斜拉索的牵制作用导致主梁温度曲率变化对主梁标高的影响较小;对于混凝土斜拉桥,凌晨温差很小时,主塔及主梁曲率对主梁标高影响较小,斜拉索、主塔和主梁温度轴向应变对标高影响显著;塔壁中间测点温度可视为全截面平均温度计算主塔轴向应变;仅考虑索、塔、梁轴向温度应变对主梁标高的影响与温度总影响量较为接近,可用于快速评估温度对主梁标高的影响;夏季持续晴天、阴雨天,甚至秋季昼夜温差大的持续晴天天气条件下,日出前凌晨温度场均较为均匀,能较为有效地避免温度影响,但由于索温偏低导致主梁标高略偏高,日出后由于索温升温快使标高快速下降,但在日出后日照强度不大的 1~2 h 内,标高降幅有限且更接近理想状态,此时的温度场也能为施工控制提供便利;夏秋转变季节,气温突降时凌晨温度场更为复杂,施工时温度场的影响难以避免。

关键词:桥梁工程;混凝土斜拉桥;数值分析;温度;施工控制;主梁标高

中图分类号:U446.2

文献标志码:A

Effect of temperature on main beam elevation in construction control of concrete cable-stayed bridge

LIU Guo-kun, YAN Dong-huang, TU Guang-ya

(School of Civil Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, Hunan, China)

Abstract: In order to study the influences of temperature on main beam elevation, a numerical analysis method based on measured temperature field was adopted in this paper to study the sensitivity of relative parameters on main beam elevation, such as axial strain and curvature of cables, towers and girders. Moreover, temperature effect on main beam elevation was analyzed under main weather conditions (continuous sunny days, rainy days, large temperature differences between day and night and seasonal change). The results show that the numerical analysis method based on measured temperature field can quickly and accurately calculate the influence of temperature field on main beam elevation. Due to the containment effect of stay cables, the

收稿日期:2017-05-24

基金项目:国家重点基础研究发展规划(“九七三”计划)项目(2015CB057706);国家自然科学基金项目(51678068,51678070)

作者简介:刘国坤(1988-),男,湖南益阳人,工学博士研究生,E-mail:1425541054@qq.com。

通讯作者:颜东煌(1961-),男,湖南娄底人,教授,博士研究生导师,E-mail:yandonghuang@126.com。

temperature curvature changes of main beam have low influence on its elevation. When the temperature difference is very small during the wee hours, the influence of curvature of main towers and beam on main beam elevation is also small for concrete cable-stayed bridges. The axial strain affected by temperature of stay cables, main towers and main beam has significant influence on main beam elevation. Temperature of measuring point in the middle wall of main towers can be roughly regarded as the average temperature of the whole section to calculate the axial strain of main tower. Considering only the influence of axial temperature strain of cable, tower and beam on main beam elevation is close to the total temperature effect, which can be used to quickly evaluate the temperature effect on main beam elevation. On continuous sunny or rainy days in summer and continuous sunny days with large temperature differences between day and night in autumn, it is effective to avoid the temperature influence because of uniform temperature filed before sunrise. Main beam elevation is slightly high due to low cable temperature at this time, and goes down quickly with cable temperature growing rapidly after sunrise. Within 1 to 2 h after sunrise, as the sunshine intensity is not strong, the decreasing amplitude of elevation is limited and closer to the ideal state. At this time, the temperature filed is convenient for construction control. When summer turns into autumn, temperature drops sharply at wee hours and the temperature filed, which has a worse influence on construction control than usual and can hardly be avoided, becomes complicated. 2 tabs, 7 figs, 20 refs.

Key words: bridge engineering; concrete cable-stayed bridge; numerical analysis; temperature; construction control; main beam elevation

0 引言

温度作为一种作用,桥梁设计中要考虑其最大效应,但是在施工控制中,温度作用是一种干扰,需尽量回避或修正^[1-2],因此,研究温度影响规律,探索温度影响最小的施工时机对于施工控制至关重要^[3-5]。在大跨度混凝土斜拉桥施工控制中,主梁的标高控制尤为关键,而影响主梁标高的因素非常多,相比于结构其他参数的影响,温度变化的影响最大也最复杂。温度变化可分为季节温差及日照温差。季节温差影响较小,施工中较易控制。日照温差的影响较大,且较为复杂,其随季节和天气的不同而变化,与结构所处纬度、桥轴线方位角、太阳辐射强度、风速等也密切相关。在斜拉桥施工控制中,一般选取一天中结构内温度场最稳定且相对均匀的日出前(如夏季 0:00~6:00)时段进行关键工况(主梁立模、斜拉索控制张拉)的控制。但是由于天气和结构的复杂性,日出前时段温度场有时并不均匀,特别是索与梁、塔之间的温差,此时索温最低,有可能对主梁标高影响更大。因此,研究主要天气条件(持续晴天、阴雨天、昼夜温差大、季节变换)下温度对主梁标高的影响,对提高这类桥梁的施工控制精度具有重要意义。

Stephenson 最早考虑到日照辐射对温度应力的影响,认为混凝土结构沿壁板厚度方向的温度分布可以用指数函数表示,之后刘兴法等依据实测温度数据对其指数函数进行了优化^[6];Clark 指出箱梁截面温度分布与近几天的气温相关,并采用简易的二维模型分析结构温度场^[7];刘来君等结合试验研究了温度应力的计算及分析^[8];颜东煌等研究了温度对混凝土斜拉桥施工控制的影响及其修正方法,并在一系列特大斜拉桥施工控制应用中取得了不错的效果^[9-10];葛耀君等以甬江大桥温度场为研究对象,提出混凝土斜拉桥温度场二维差分计算方法^[11];王解军等研究了混凝土箱梁桥施工控制的温度效应,指出箱梁顶、底板竖向温差较大,横向温差较小^[12];李克银等以云阳长江大桥为背景,分析了结构体内温度场的规律,表明日照温差对主梁的线形影响较大^[13]。综上,目前关于温度对施工影响研究较多,但对各类天气条件下温度对主梁标高的影响研究相对较少,尤其是施工控制中常采取日出前时段进行关键工况的控制,其是否对所有天气条件都适用等问题值得深入研究。

本文以赤石特大斜拉桥为工程背景,研究温度对主梁标高的参数敏感性,快速、有效地评估温度对主梁标高的影响;总结主要天气条件下各时段温度

场对主梁标高的影响,研究施工控制中常选择日出前时段回避温度影响对于各类天气条件的适应性,探求其他时段是否也能为关键工况的控制提供便利,以正确辨识及修正实测标高数据。

1 温度影响的计算方法

温度作用对单元梁段的整体变形产生 2 种效应:用温度轴向应变 ϵ_0 表示单元的轴向伸长或缩短;用曲率 χ 表示单元的弯曲变形。可根据平截面假定,依据截面上应力总和为 0 和对截面中性轴的力矩为 0 的条件,求出温度轴向应变 ϵ_0 与曲率 χ ^[14]

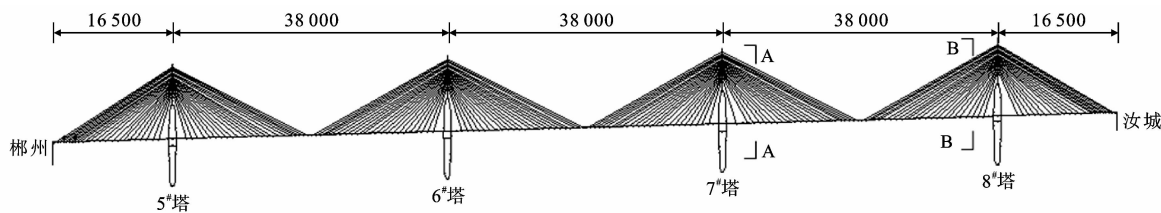
$$\epsilon_0 = \frac{\alpha}{A} \iint T(x, y) dx dy \quad (1)$$

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

式中: α 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 为截面抗弯惯性矩; $T(x, y)$ 为截面温度梯度, x, y 分别为任意截面位置。

由于温度梯度在截面内的分布 $T(x, y)$ 难以用一个函数式精确表达,故考虑用数值求和的方法来近似计算以上 2 个公式^[15],对截面进行网格划分后,通过求和来代替计算 ϵ_0 和 χ 值,即

$$\epsilon_0 = \frac{\alpha}{A} \sum_{i=1}^n \Delta T_i b_i \Delta y_i = \alpha \sum_{i=1}^n \Delta T_i \frac{b_i \Delta y_i}{A} \quad (3)$$



单位: cm

图 1 桥型布置

Fig. 1 Layout of bridge

赤石特大桥 7#、8# 塔主梁温度测试截面分别布置在 5# 梁段汝城侧(A-A 断面)和 3# 梁段郴州侧(B-B 断面),其温度测点布置见下页图 2(a),温度计采用 JMT-36C 电阻式温度传感器,温度采集模块为 JMW-64RT,每小时自动采集各测点温度。

该桥采用钢绞线斜拉索,索温元件埋置在 7# 塔中跨侧 6# 拉索截面中心位置,见图 2(b)。

索塔箱形断面温度场由于受桥位的影响而呈现平面内二维分布的特点,另外可认为沿轴线方向温度场分布是均匀或缓慢变化的^[9]。日照作用下,截面外表面温度升高较快,而内部温度变化较小,为了充分测试其温度场,在靠近混凝土外表面区域温度测点布置相对密集。主塔温度测试截面选在靠近桥

$$\chi = \frac{\alpha}{I_x} \sum_{i=1}^n \Delta T_i b_i (y_i - y_c) \Delta y_i = \alpha \sum_{i=1}^n \Delta T_i \frac{b_i \Delta y_i (y_i - y_c)}{I_x} \quad (4)$$

式中: i 为划分网格数量, $i=1, 2, \dots, n$; $b_i, \Delta y_i$ 分别为划分网格的宽度和高度; ΔT_i 为网格内实测温度与设计基准温度差值。

对于斜拉索,一般不考虑其抗弯刚度,沿长度方向的温度分布较为均匀,其温度变形为

$$\epsilon_0 = \alpha \bar{T} = \alpha \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_i \quad (5)$$

$$\chi = 0 \quad (6)$$

式中: \bar{T} 为加权平均温度。

2 温度对主梁标高的参数敏感性分析

2.1 工程概况

赤石特大桥为跨径(165+3×380+165)m 的四塔预应力混凝土双索面斜拉桥,桥轴线方位角为 100°,边塔塔梁支承、中塔塔梁固结,桥梁全宽 28 m,主桥各塔均布置 23 对斜拉索,主梁采用单箱四室箱形断面,桥型布置见图 1。

斜拉桥主梁悬臂施工中可把混凝土箱梁作为狭长结构,认为主梁在纵向上的温度分布一致^[16-17]。

面人洞位置的中塔柱上,如图 2(c)所示。

为验证理论计算方法的正确性,选取 2014 年 9 月 2、3 日(晴天),7# 塔 21# 块(汝城侧)浇筑完混凝土后,此时现场无任何操作,日出时间在 7:30 左右,实测主梁 21# 块(最大悬臂状态共 23 个梁段)标高随温度的变化,测点位置在斜拉索正前方距悬臂端 15 cm 处,大气温度为各时刻桥位处所测实际温度。依据测点温度分布特点对梁、塔截面进行网格划分。

依据实测温度数据,由式(3)~式(6)计算出梁、塔、索单元各时刻温度轴向应变 ϵ_0 与曲率 χ ,设计基准温度为 20 °C,混凝土、斜拉索线膨胀系数分别取 1.0×10^{-5} 和 1.2×10^{-5} ,将温度轴向应变 ϵ_0 和曲率 χ 作为温度参数,代入有限元程序 BDCMS^[18] 中,计

2.4 单独考虑斜拉索轴向应变与同时考虑索、塔、梁轴向应变对主梁 21# 块标高影响

图 5 为单独考虑斜拉索轴向应变与同时考虑索、塔、梁轴向应变对主梁 21# 块标高影响。由图 5 可知:斜拉索轴向应变对主梁标高影响在 6:00 左右最小,约为 -15 mm,在 14:00 左右达最大值,为 -52.6 mm,一天内的变化也较大。因此,在考虑温度对主梁标高影响时,索温是需要重点考虑的因素之一;索、塔、梁轴向应变对主梁标高影响量在 14:00 左右达到峰值,约为 -20 mm,在 22:00 左右基本无影响。主梁标高影响量变化幅度较大,最大幅值 33 mm,与考虑索、塔、梁温度场对标高影响相近。

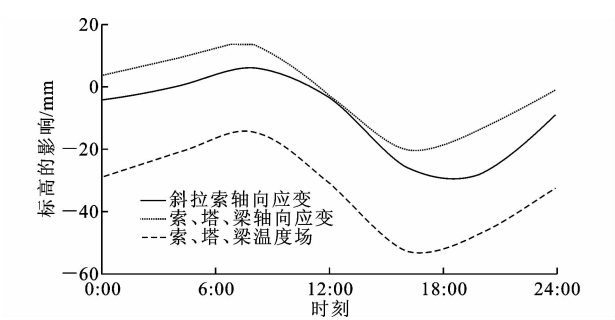


图 5 单独考虑斜拉索轴向应变与同时考虑索、塔、梁轴向应变对主梁 21# 块标高影响

Fig. 5 Effects of axial strain considered with stay cable only or stay cable, main tower and main beam simultaneously on elevation of main beam 21#

上述各参数的敏感性分析如表 2 所示。由表 2 可知:凌晨时段主梁、主塔曲率对主梁标高的影响较小;而斜拉索、主梁、主塔轴向应变对主梁标高的影响显著,斜拉索轴向应变对主梁标高影响幅度较大,主梁次之,主塔轴向应变对主梁标高影响的波动幅度非常小;其索、塔、梁轴向应变与同时考虑索、塔、梁温度场的主梁标高影响量及波动幅度均较为接近,可以用于粗略评估温度对主梁标高的影响。

表 2 不同参数对主梁标高的影响

Tab. 2 Effects of different factors on main beam elevation

影响因素	标高影响最大		标高影响最小	
	时刻	数值/mm	时刻	数值/mm
索、塔、梁温度场	17:00	-28.0	6:00	6.4
主梁轴向应变	17:00	26.7	6:00	22.0
主梁曲率	14:00	-14.5	22:00	-8.1
主塔轴向应变	17:00	17.8	6:00	16.6
主塔曲率	14:00	9.3	22:00	-3.9
斜拉索轴向应变	14:00	-52.6	6:00	-14.4
索、塔、梁轴向应变	14:00	-20.1	6:00	13.4

3 主要天气条件下凌晨温度场对主梁标高的影响

赤石特大桥所处经度为 113.2°,纬度为 25.5°,靠近广东省,属山区地形,气候与广东内陆地区相似,主梁施工期间主要天气状况为:持续晴天、持续阴雨天、昼夜温差较大及天气突变状况。根据实测各时刻温度场,计算该区域常见的 4 种天气条件下的温度场变化规律,见下页图 6,分析温度对凌晨施工时主梁标高的影响规律,为施工控制提供参考。

3.1 持续晴天

图 6(a)为夏季连续晴天温度对主梁标高的影响。由图 6(a)可知:索梁温差变化和大气温度变化趋势非常相似,凌晨时段温度对标高影响相对较小,但由于日照强度的影响,导致标高略微偏低,6:00 左右温度对标高基本无影响,此时温差和体系温差达到均衡,故在日照强度不大的 1~2 h 内,标高降幅有限,此时的温度场有利于施工控制,此施工时段往往被大家忽视;由于钢绞线斜拉索受套筒及自身温度场的影响,导致拉索温度随大气温度的变化存在明显的滞后性。

文献[19]、[20]中分别对荆州长江公路大桥、武汉长江二桥的平行钢丝斜拉索中心温度进行了晴天 24 h 观测,发现 16:00 左右,索内温度达到最大且比大气温度高 10 ℃左右,在 19:00 至次日日出前,平行钢丝斜拉索中心温度与大气温度基本平衡。可知,15:00 以后,大气温度开始下降,但斜拉索中心温度仍维持在峰值 1~2 h 后才开始下降,斜拉索中心与大气的温差在 18:00 时达到最大,为 6 ℃左右,从 18:00 到次日 8:00,两者的温差逐渐减小。由此可见,钢绞线斜拉索与平行钢丝斜拉索相比,其温度随大气温度变化存在一定的差异性。

3.2 持续阴雨天

图 6(b)为持续阴雨天气(偶尔有短暂日照)下,温度对主梁标高的影响。由图 6(b)可知:2014 年 8 月 14 日全天持续阴雨天气,温度对标高的影响基本可以忽略;但在 15~17 日下午出现短暂日照,该时段温度对主梁标高的影响急剧下降,最大影响量达到 -54 mm。

3.3 昼夜温差较大

图 6(c)为秋季昼夜温差较大天气(持续晴天,白天大气温度最高达到 30 ℃,晚上 18 ℃左右)情况下温度变化对主梁标高的影响。由图 6(c)可知:索梁温差在凌晨时较小,且为负值,索温偏低,该时段温度对主梁标高的影响量为 -12~5 mm,总体影响量不大,

可认为能避免温度影响,但 6:00 左右其影响反而相对最大,这可能是由于索梁温差达到最小导致。

3.4 天气突变

图 6(d)为夏秋季转变时节主梁标高受温度影响。2014 年 9 月 18 日为晴天,19、20 日为阴天,降温达 8℃,21 日气温回升,此天气突变状况下,主梁标高随温度变化相当复杂。由图 6(d)可以看出:索梁整体呈负温差,在凌晨时段温度对标高影响反而更大,最大达到 32 mm;19、20 日为阴天,在下午时段温度影响反而很小,随索温上升导致索梁温差减小而标高回落;21 日在偶尔出现日照时段,标高急剧下降。

在这种突然降温的复杂天气条件下,凌晨温度影响反而更大,主要是由于天气突变时,索温随大气温度下降迅速,而主梁为混凝土结构,其轴向温度变化明显滞后于索温,这导致较大的索梁温差,其在凌晨时段更突出,导致主梁标高偏高。实际上作为厚壁结构的主塔混凝土温度变化更缓慢,存在更为明显的滞后性,索塔温差也是影响主梁标高的主要因素。选取裸塔施工期间 2014 年 2 月 3~17 日天气骤然降温时,主塔截面温度随大气温度的变化规律来说明这一现象,如下页图 7,每天在凌晨 0:00 和中午 12:00 各测 1 次,共 15 d 测得 30 个,时刻编号为 0~30。

由图 7 可知:距塔壁外表面距离 $D=40\text{ cm}$ 以内的测点,温度在天气突然降温一开始就有明显的下降,随着时间推移而减缓,直至与大气温度平衡;而与塔壁外表面距离大于 40 cm 的测点,在骤降温后的 2~3 d 内温度还存在一定程度的上升,然后才以较缓慢的速度下降,表现出明显的滞后性。梁截面加权平均温度与距塔壁外表面 75 cm 测点温度基本相同,故可在计算温度对主梁标高的影响时,将塔壁中间测点温度视为全截面平均温度,计算主塔温度轴向应变。

4 结 语

(1)基于实测温度场的主梁标高数值计算方法较为简易且精度较高,可用于施工控制中分析温度对标高影响。

(2)凌晨时段,主梁及主塔曲率对标高影响较小;塔壁中间测点温度可视为全截面平均温度计算主塔轴向应变;仅考虑索、塔、梁温度轴向应变可用于近似评估温度对主梁标高的影响。

(3)在夏季持续晴天、阴雨天,甚至秋季昼夜温差大的持续晴天天气条件下,日出前温度场均能较有效地避免温度影响,但由于索温偏低导致主梁标高略偏高,日出后由于索温升温快,标高快速下降,但在日出时日照强度不大的 1~2 h 内,标高降幅有

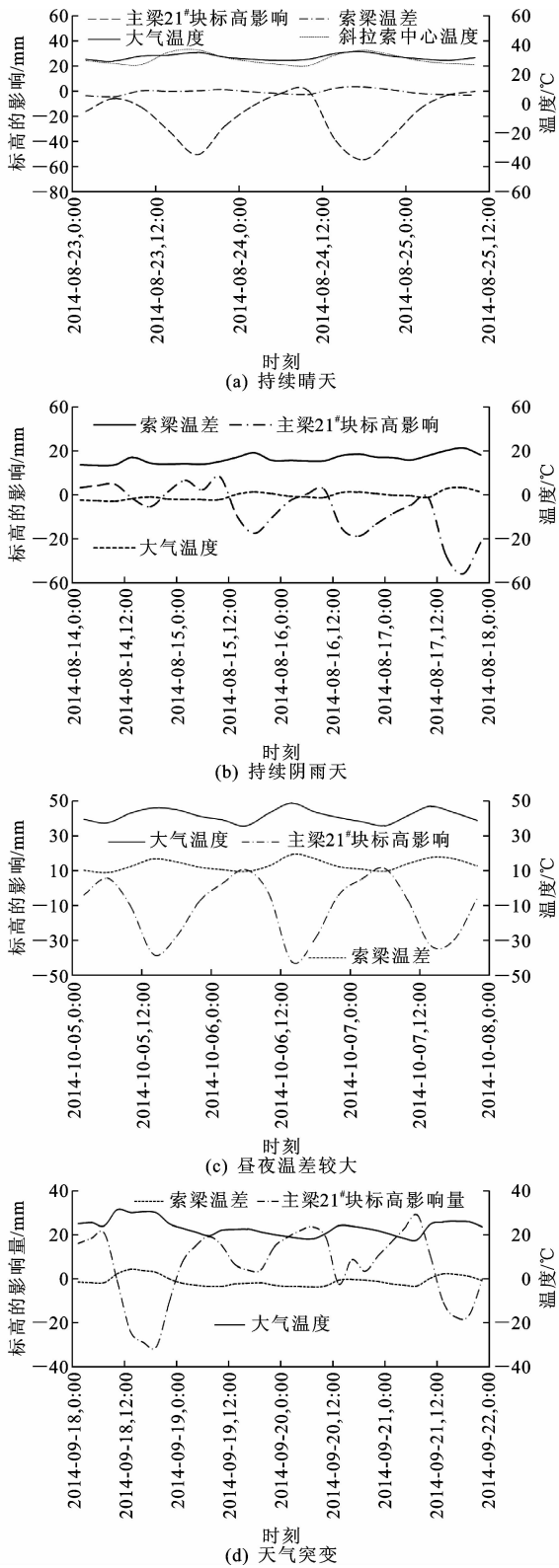


图 6 温度变化对主梁 21# 块标高影响时程
Fig. 6 Time-variant influence of temperature on elevation of main beam 21#

限且更接近理想状态,此时的温度场也利于施工。

(4)夏秋转变季节天气突降温时,索、塔、梁温度场变化非常复杂,索温变化快,而梁温特别是塔温变

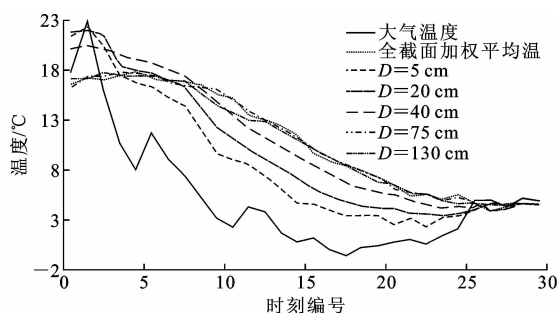


图7 西侧塔壁各测点温度时程曲线

Fig. 7 Time-temperature curve of each measuring point on west side of tower wall

化慢,导致凌晨温度对主梁标高影响更大,难以找到避免温度影响的时段,因此在施工控制中对天气突变时应特别注意。

(5)对于不同桥型、不同地域在各类天气条件下的温度对主梁标高的影响还需要进一步归纳总结,以指导实际施工。

参考文献:

References:

- [1] 徐君兰. 大跨度桥梁施工控制[M]. 2版. 北京:人民交通出版社,2007.
XU Jun-lan. Large span bridge construction control [M]. 2nd ed. Beijing: China Communications Press, 2007.
- [2] 张运波. 薄壁空心高墩的温度效应及其对稳定性影响的研究[D]. 北京:中国铁道科学研究院,2011.
ZHANG Yun-bo. Studies on temperature effects and its influence on stability for high pier with thin-walled hollow sections[D]. Beijing: China Academy of Railway Science, 2011.
- [3] 聂玉东. 寒区大跨度混凝土箱梁桥温度场及温度效应分析[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2013.
NIE Yu-dong. Analysis of temperature field and temperature effect for long span concrete box girder bridges in cold regions[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013.
- [4] 彭友松. 混凝土桥梁结构日照温度效应理论及应用研究[D]. 成都:西南交通大学,2000.
PENG You-song. Studies on theory of solar radiation thermal effects on concrete bridges with application [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2000.
- [5] 郭棋武,方志,裴炳志,等. 混凝土斜拉桥的温度效应分析[J]. 中国公路学报,2002,15(2):48-51.
GUO Qi-wu, FANG Zhi, PEI Bing-zhi, et al. Temperature effect analysis of concrete cable-stayed bridge [J]. China Journal of Highway and Transport, 2002, 15(2): 48-51.

- [6] 刘兴法. 混凝土桥梁的温度分布[J]. 铁道工程学报, 1985, 2(1): 107-111.
LIU Xing-fa. Temperature distribution of concrete bridge[J]. Journal of Railway Engineering Society, 1985, 2(1): 107-111.
- [7] CLARK J H. Evaluation of thermal stresses in a concrete box girder bridge[D]. Seattle: University of Washington, 1989.
- [8] 刘来君. 大跨径桥梁施工控制温度荷载[J]. 长安大学学报:自然科学版,2003,23(2):61-63,87.
LIU Lai-jun. Temperature load of construction controlling for long-span bridge[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2003, 23(2): 61-63, 87.
- [9] 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,2006,19(4):71-76.
YAN Dong-huang, CHEN Chang-song, TU Guang-ya. Temperature influence and its field correction during construction control of concrete cable-stayed bridge[J]. China Journal of Highway and Transport, 2006, 19(4): 71-76.
- [10] 应国刚,颜东煌. 桥梁施工控制中结构温度场短期预测方法[J]. 长沙交通学院学报,2002,18(4):60-63.
YING Guo-gang, YAN Dong-huang. The research of temperature field short-term forecast in the construction control of bridge[J]. Journal of Changsha Communications University, 2002, 18(4): 60-63.
- [11] 葛耀君,翟东,张国泉. 混凝土斜拉桥温度场的试验研究[J]. 中国公路学报,1996,9(2):76-83.
GE Yao-jun, ZHAI Dong, ZHANG Guo-quan. Temperature gradient test and research of RC cable-stayed bridges[J]. China Journal of Highway and Transport, 1996, 9(2): 76-83.
- [12] 王解军,李全林,卢向华. 混凝土箱梁桥施工控制的温度效应[J]. 公路,2003(1):129-131.
WANG Jie-jun, LI Quan-lin, LU Xiang-hua. Temperature effect of construction control for concrete box girder bridge[J]. Highway, 2003(1): 129-131.
- [13] 李克银,吉小军. 斜拉桥施工控制中的温度影响分析[J]. 铁道工程学报,2006,23(5):59-62,103.
LI Ke-yin, JI Xiao-jun. Analysis of temperature effect on control of construction of cable stayed bridge[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2006, 23(5): 59-62, 103.
- [14] 邵旭东,顾安邦. 桥梁工程[M]. 2版. 北京:人民交通出版社,2007.
SHAO Xu-dong, GU An-bang. Bridge engineering[M]. 2nd ed. Beijing: China Communications Press, 2007.
- [15] 颜东煌,涂光亚,陈常松,等. 肋板式主梁温度场的数值计算方法[J]. 中外公路,2002,22(2):45-48.