

T 构悬臂施工温度场的测定及对主梁变形的影响与控制

段凯亮¹, 李传习², 张依濛³

(长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114)

摘要:以重庆太洪长江特大桥引桥 120 m+120 m T 形刚构砼箱梁桥为工程背景,通过实测现场温度,采用 Origin 软件,利用最小二乘法拟合得到桥墩和主梁在日照温差下的温度分布模式;采用有限元仿真软件 MIDAS/Civil 分析桥墩和箱梁温度梯度对主梁变形的影响,并实测主梁在同一温度梯度作用下的标高变化,验证仿真模型的正确性和可靠性;针对温度梯度使主梁产生过大变形的问题,在施工立模时以实测温度梯度为基础,通过有限元计算温度梯度作用下主梁的变形并对立模标高进行修正,以精确控制主梁线形,使成桥线形与设计目标吻合。

关键词:桥梁;T 形刚构砼箱梁桥;悬臂施工;温度场;主梁变形

中图分类号:U441

文献标志码:A

文章编号:1671-2668(2020)05-0080-05

大跨度 T 形刚构悬臂节段多,施工周期长,施工中线形受外界因素影响更显著,主梁线形控制难度大。相关研究表明砼箱梁的温度梯度会使桥梁产生变形,在悬臂施工阶段更显著,这种温度变形会直接影响各节段的立模标高,从而使成桥状态线形偏离设计目标;高桥墩在日照温差下,墩顶各方向会产生不可忽视的位移。因此,应选择在日出前后稳定的温度场进行立模标高放样。但为保证连续施工,节省工期,实际施工中在每个梁段预应力张拉后就会进行立模放样。因此,施工中通过对桥墩和箱梁温度的测量得到桥墩和箱梁的温度梯度模式,掌握桥墩和箱梁温度梯度对主梁标高的影响,据此修正立模标高,对线形精确控制必不可少。目前对温度梯度对主梁、桥墩产生的标高、偏位影响越来越重视。但对桥墩温度梯度的影响分析大多针对桥墩施工阶段桥墩本身,对主梁因温度梯度产生的变形分析大部分只考虑箱梁温度场,对桥墩受温度梯度的影响墩顶发生的转角导致主梁发生的变形关注较少。此外,桥梁温度场有着典型的周期性时程特征和不均匀空间特征,主要受结构形式、气候和地理环境的影响,存在明显的桥型间和地域性差异,不同地

域、不同环境下桥梁结构温度场可能存在差异,需现场实测温度场。结合以上情况,该文在实测桥墩和箱梁温度场的基础上,采用 MIDAS/Civil 预测各结构产生的温度变形,根据计算温度变形对立模标高加以修正,从而精确控制桥梁线形。

1 工程背景

太洪长江特大桥引桥跨径布置为 120 m+120 m 变截面砼箱梁 T 形刚构,全长 260 m。箱梁纵向为预应力砼结构,采用左右幅分离的单箱单室箱梁截面,箱梁顶板宽 15.75 m,底板宽 8.25 m,翼缘板悬臂长 3.75 m。墩梁固结处箱梁中心高度 14 m,边跨支座处箱梁中心梁高 4.50 m,梁高以 1.75 次抛物线变化。顶板厚 0.32 m;翼缘板端部厚 0.2 m,根部厚 1.25 m;腹板厚度由 0.90、0.80、0.70、0.60 m 呈 4 个阶段变化,底板厚度按 1.75 次抛物线由 1.80 m 变化到 0.35 m。采用矩形空心墩,尺寸为 12.00 m×8.25 m,壁厚 1 m。

桥梁上部结构采用挂篮对称悬臂浇筑施工。整个主梁划分成 33 个梁段,其中最短 2.50 m,最长 5.00 m(见图 1)。

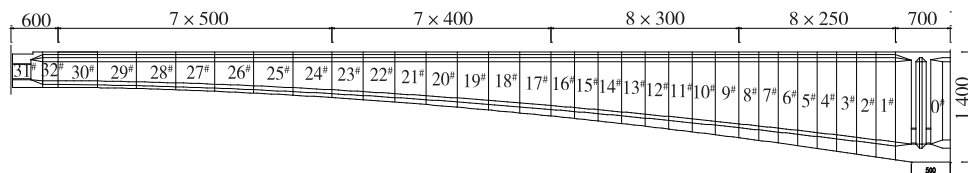


图 1 箱梁节段划分示意图(单位:cm)

2 温度场测定

2.1 测点布置

桥梁是一个纵向长度远大于竖向、横向长度的狭长结构物,若忽略某些局部区域的三维传导性质,可认为桥梁在沿长度方向的温度变化一致。因此,选取一个箱梁断面采集温度。考虑到0#梁段最先浇筑,在0#和1#梁段交界处理置8个温度传感器(见图2)。

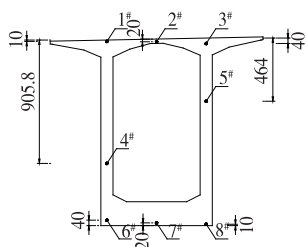


图2 箱梁温度测点布置(单位:cm)

桥墩高40.8 m,考虑到其为狭长结构,选取墩高1/2处断面布置16个温度传感器(见图3)。

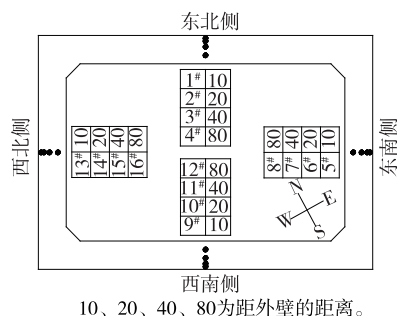
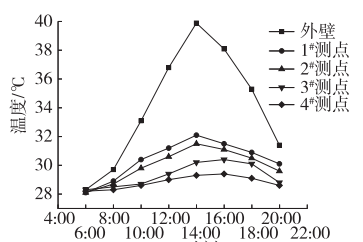
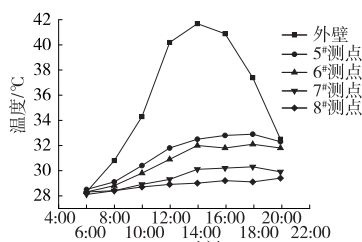


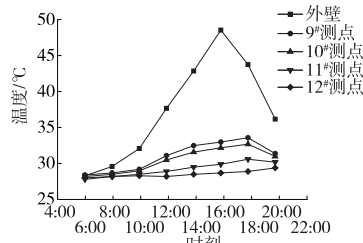
图3 桥墩温度测点布置(单位:cm)



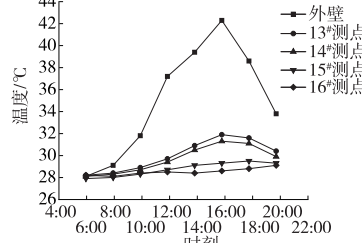
(a) 东北侧墩壁温度



(b) 东南侧墩壁温度



(c) 西南侧墩壁温度



(d) 西北侧墩壁温度

图4 桥墩壁的温度变化

2.2 温度采集与分析

桥梁主体结构施工时间为2018年初—2019年10月。桥梁悬臂长度较小(小50 m)时,其最大挠度在10 mm以内,可忽略不计;悬臂长度较大(大于50 m)时,其最大挠度均大于10 mm,超过JTG/T F50—2011《公路桥涵施工技术规范》的允许值 ± 10 mm。考虑到该桥需分析桥墩和箱梁共同影响下的温度变形,当箱梁施工到第14节段(悬臂长45 m)时开始采集温度。选取天气晴朗、温度较高的一天,从6:00点开始,每隔2 h采集一次,于20:00结束。

2.2.1 桥墩温度采集结果与分析

桥墩各测点温度采集结果见图4。由图4可知:日出后各壁板温度显著上升,东南侧外壁在14:00前后达到温度最大值41.7℃,内外温差出现最大值12.8℃;西南侧外壁在16:00左右达到温度峰值48.6℃,内外温差出现最大值19.9℃;东北侧、西北侧墩壁因其与太阳光线的夹角较小,接近平行,太阳垂直照射的面积较小,测点温度变化比东南、西南侧小,基本无异于大气温度的变化。由于太阳东升西落,西侧墩壁的温度上午上升速度慢于东侧,且温度峰值延后东侧2 h左右;靠近西侧的墩壁在上午环境升温后,加上下午日照直射的续力,其温度峰值大于东侧,内外温差也大于东侧。太阳下山后,外壁开始降温,基于砼导热性不良的特点,外部降温速度比内部快,内部出现延后。

2.2.2 箱梁温度采集结果与分析

图5为箱梁温度变化情况。由图5可知:顶板外壁温度因受日照的作用变化明显,于14:00前后

达到峰值 51.5 °C; 由于砼的传导性能差, 顶板内部测点温度变化速率小于顶板外壁温度, 且温度峰值出现时间迟于顶板; 腹板和底板因受顶板的遮阴作用, 且桥梁基本为东西走向, 腹板、底板受日照直接照射的影响较小, 其测点温度变化不大, 里外测点的温差也较小。

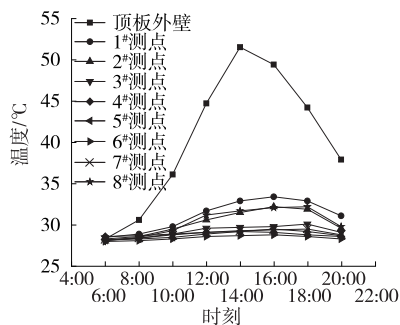


图5 箱梁的温度变化

2.3 温度场拟合

2.3.1 桥墩温度场拟合

选取温差明显的日照温度场数据进行分析, 得到桥墩东南和西南侧壁板在 10:00、12:00、14:00、16:00 时沿壁板厚度的日照温度分布 (见图 6)。由图 6 可知: 在日照作用下, 日照温度场由桥墩外壁至内近似呈指数分布。

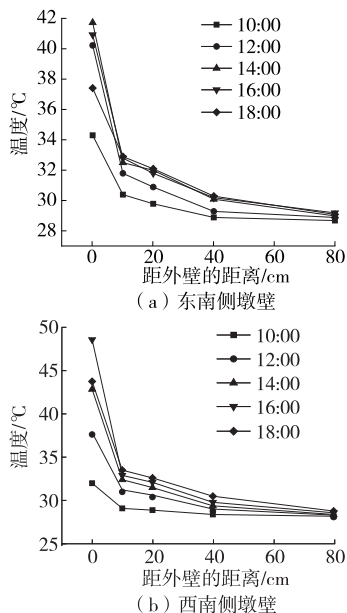


图6 东南、西南侧墩壁沿壁厚的温度分布

令拟合曲线为式(1), 利用 origin 软件, 采用最小二乘法对温度梯度进行回归拟合, 结果见表 1。

$$T = T_0 e^{\alpha x} \quad (1)$$

式中: T 为计算点处与内壁 0.8 m 处的温差(°C);

T_0 为内外壁温差(°C); α 为指数系数; x 为距桥墩外壁的距离(cm)。

表1 桥墩温度梯度拟合结果

时刻	$T_0 / ^\circ\text{C}$		α	
	东南侧墩壁	西南侧墩壁	东南侧墩壁	西南侧墩壁
10:00	5.41	3.60	-0.11	-0.14
12:00	10.85	8.94	-0.13	-0.11
14:00	11.79	13.55	-0.12	-0.12
16:00	10.99	18.74	-0.11	-0.16
18:00	7.85	13.73	-0.06	-0.10

2.3.2 箱梁温度场拟合

10:00、12:00、14:00、16:00、18:00 时箱梁沿竖向高度的日照温度分布见图 7。由图 7 可知: 由顶板外壁深入腹板约 0.6 m 范围内受日照温差的影响最大, 其次为底板外壁深入 0.4 m 范围内。腹板位置竖向温差不超过 1 °C, 可认为二者温度一致。

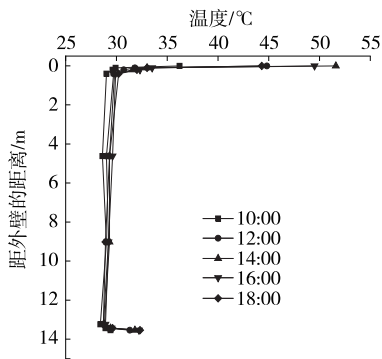


图7 箱梁沿竖向高度的温度分布

按式(1)拟合顶板外壁向下深入 0.6 m、底板外壁向上深入 0.4 m 范围内的温差, 结果见表 2。

表2 箱梁温度梯度拟合结果

时刻	$T_0 / ^\circ\text{C}$		α	
	顶板 0~0.6 m 段	底板 0~0.4 m 段	顶板 0~0.6 m 段	底板 0~0.4 m 段
10:00	7.10	0.33	-20.65	4.62
12:00	14.94	0.04	-19.61	14.19
14:00	21.46	0.05	-19.09	13.86
16:00	19.19	0.04	-16.38	14.65
18:00	13.83	0.10	-15.41	11.95

3 有限元模型建立与实测挠度

3.1 主梁温变挠度实测值

于 6:00 和 16:00 对箱梁顶面标高进行实测。为减少其他偶然因素的影响, 提高测量数据的可靠

性,将测量范围定为 14[#]、13[#]、12[#] 梁段,每个梁段测 3 个点。基于保证 2 次测量为同一位置的目的,在每个梁段前端同一横断面的顶板位置预埋 3 个钢筋头作为测点,布置位置见图 8。

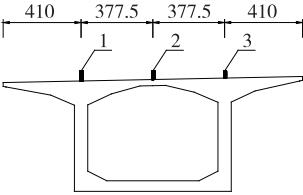


图 8 箱梁标高测点布置(单位:cm)

选取精度高的 NA2 水准仪,测量时避开塔吊施工、主梁受重物冲击等不利时刻,在 6:00—16:00 时段箱梁上没有较大临时荷载增减、挂篮移动和预应力张拉时进行标高测量,测量结果见表 3。

表 3 箱梁标高测量结果

梁段号	距 0 [#] 段中心距离/m	测点平均标高/m		挠度实测值/mm
		6:00	16:00	
12	-39	278.945	271.945	-7
13	-42	278.982	268.982	-10
14	-45	279.013	267.013	-12
12	39	278.176	280.176	2
13	42	278.152	281.152	3
14	45	278.151	280.151	2

注:距 0[#] 段中心距离中,“+”为小里程方向,“-”为大里程方向。下同。

相关研究表明,结构在整体温升与温降作用下会引起截面变形,但主要是顺桥向位移且数值极小,是由体系温差作用下砼结构纵向收缩所致,而结构在竖向的变形较小。因此,可忽略整体温度对箱梁竖向标高的影响,基本可认为箱梁于 6:00—16:00 时段产生的竖向挠度变形是由桥墩和箱梁的温度梯度作用所致。

3.2 主梁温变效应分析有限元模型

悬臂施工阶段箱梁属于静定结构,在某个特定的时刻某点的变形并不依赖梁段是否存在,也就是说只需建立一个最大悬臂状态的计算模型即可。因此,采用 MIDAS/Civil 建立 T 构施工过程中最大悬臂模型(见图 9)。

模型中桥墩和箱梁的温度梯度模式选取 16:00

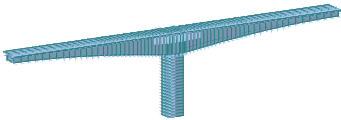


图 9 T 构最大悬臂状态三维视图

时拟合的温度梯度曲线,箱梁、桥墩东南和西南侧壁的温度梯度分别为:

$$T=\begin{cases}19.19e^{-16.38x},0\leq x\leq 0.6\\0,0.6<x<h-0.4\\0.04e^{14.65(x-h+0.4)},h-0.4\leq x\leq h\end{cases}\tag{2}$$

式中: x 为距箱梁顶板外壁的距离(m); h 为箱梁截面高度(m)。

$$T=10.99e^{-0.11x},0\leq x\leq 80\tag{3}$$

$$T=18.74e^{-0.16x},0\leq x\leq 80\tag{4}$$

式中: x 为距桥墩外壁的距离(cm)。

在桥墩和箱梁温度梯度共同作用下主梁产生的挠度理论值见表 4。由表 4 可知:在桥墩温度梯度作用下墩顶出现转动位移,使主梁发生竖向位移,最

表 4 温度梯度作用下挠度理论值

梁段号	距 0 [#] 段中心距离/m	挠度理论值/mm	梁段号	距 0 [#] 段中心距离/m	挠度理论值/mm
0	-7.0	-1	0	7.0	1
1	-9.5	-1	1	9.5	1
2	-12.0	-2	2	12.0	2
3	-14.5	-2	3	14.5	2
4	-17.0	-3	4	17.0	2
5	-19.5	-3	5	19.5	2
6	-22.0	-4	6	22.0	3
7	-24.5	-4	7	24.5	3
8	-27.0	-5	8	27.0	3
9	-30.0	-6	9	30.0	3
10	-33.0	-6	10	33.0	3
11	-36.0	-7	11	36.0	3
12	-39.0	-8	12	39.0	3
13	-42.0	-9	13	42.0	3
14	-45.0	-10	14	45.0	3
15	-48.0	-11	15	48.0	3
16	-51.0	-12	16	51.0	3
17	-55.0	-13	17	55.0	3
18	-59.0	-15	18	59.0	2
19	-63.0	-16	19	63.0	2
20	-67.0	-18	20	67.0	1
21	-71.0	-20	21	71.0	0
22	-75.0	-22	22	75.0	-1
23	-79.0	-24	23	79.0	-2
24	-84.0	-27	24	84.0	-3
25	-89.0	-30	25	89.0	-5
26	-94.0	-34	26	94.0	-7
27	-99.0	-37	27	99.0	-10
28	-104.0	-42	28	104.0	-13
29	-109.0	-46	29	109.0	-16

大为 ± 15 mm;在箱梁温度梯度作用下,主梁两侧出现向下的竖向变形,最大值为 -31 mm;在桥墩和箱梁温度梯度共同作用下,主梁发生的竖向位移最大值为 -46 mm,远超出立模放样误差范围(一般情况下允许误差值为 ± 5 mm,个别情况下允许误差极限值为 ± 8 mm),说明温度梯度产生的挠度影响在施工放样中不可忽略,需根据温度梯度产生的挠度影响对立模标高进行修正。

3.3 主梁温变效应挠度理论值与实测值对比

为了验证计算模型和拟合温度梯度的正确性,将主梁温变效应挠度理论值与实测值进行对比,结果见表5。

表5 挠度理论值与实测值对比

梁段号	距0#段中心距离/m	挠度实测值/mm	挠度理论值/mm	误差/mm
12	-39	-7	-8	1
13	-42	-10	-9	-1
14	-45	-12	-10	-2
12	39	2	3	-1
13	42	3	3	0
14	45	2	3	-1

由表5可知:12#、13#、14#梁段因温度效应发生的实际挠度与计算理论值基本吻合,误差在 ± 2 mm之内,计算模型和拟合温度梯度正确、可靠。

4 立模标高温度的修正

4.1 立模标高温度的修正方法

根据上述分析,桥墩和箱梁温度梯度作用下箱梁产生的竖向挠度较大,不可忽略,在施工立模放样时应考虑温度梯度的影响并对立模标高进行修正,以保证成桥线形与设计目标吻合。因现场调模通常需2~3 h,给温度采集、有限元计算温度梯度作用下主梁挠度值提供了充足的时间,基于实测温度场,有限元计算温度梯度对主梁挠度的影响值进行立模标高修正的方法可行。修正程序为施工方在立模2 h前通知监控方→施工方根据理论立模标高 h_i 进行粗调→监控方实测温度数据,拟合温度梯度→监控方根据拟合温度梯度得到修正值 Δh_i →施工方根据修正值 Δh_i 精调模板标高→监控方复测验收。立模标高修正公式如下:

$$H_i = h_i + \Delta h_i \quad (5)$$

式中: H_i 为第 i 个梁段修正后的立模标高; h_i 为第 i 个梁段计算理论立模标高; Δh_i 为第 i 个梁段因温

度梯度产生的挠度值,以向上为正、向下为负,可在现场测得温度梯度的基础上,利用MIDAS/Civil软件计算得到。

4.2 线形控制成果

太洪长江特大桥引桥120 m+120 m T形刚构施工中,采取上述修正程序和式(5)进行立模标高修正。该桥合龙贯通后,对全桥主梁的桥面标高进行通测,实测标高数据与该阶段理论标高数据对比见图10。根据《公路桥涵施工技术规范》,悬臂浇筑预应力砼梁桥施工顶面的高程允许最大偏差为 $\pm l/5000$,该桥 $l=120$ m,允许最大偏差为 ± 24 mm。通测240个点的标高数据中,与该阶段理论偏差超过 ± 24 mm的点有7个点,合格率达97%,成桥线形控制良好。

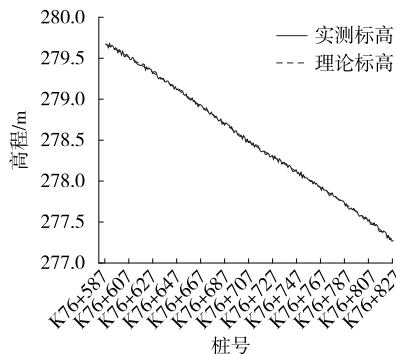


图10 成桥标高数据对比

5 结语

(1) 在悬臂施工中,随着梁段的生长,箱梁温度梯度作用下主梁产生的变形较大,不可忽略,立模时应考虑其影响。

(2) 桥墩受日照温差的影响,在墩梁固结处产生转动位移,使主梁一侧抬升、另一侧降低,主梁因此产生的位移最大超过10 mm,对桥墩温度梯度对主梁产生的竖向挠度的影响应予以重视。

(3) 针对悬臂施工中温度梯度使主梁产生较大变形的问题,现场监控中应在实测温度梯度的基础上计算温度梯度作用下变形值对立模标高进行修正,保证线形的精确控制,同时节约工期。

参考文献:

- [1] 王毅,叶见曙.混凝土箱梁悬臂施工中温度梯度对标高影响的分析与控制[J].公路交通科技,2009,26(8):89-93+98.

(下转第88页)

4 结论

运用 MIDAS/FEA 建立有限元模型分析铰缝开裂对桥梁跨中截面荷载横向分布的影响,并应用数据回归得到加载板的横向分布系数随铰缝开裂长度呈指数式增长,得到加载板两侧铰缝开裂长度超过 $0.615L$ 时,桥梁已出现单板受力特征,此时结构处于不安全状态,应尽早进行维修加固。

参考文献:

- [1] 冷艳玲,张劲泉,程寿山,等.装配式混凝土空心板梁桥单板受力问题的数值解析[J].公路交通科技,2013,30(5):63-66.
- [2] 冷艳玲.装配式空心板梁桥铰缝开裂及整体化加固研究[D].北京:交通运输部公路科学研究院,2012.

- [3] 王砚桐.高等级公路中“单板受力”现象及原因分析[J].公路交通技术,2004(4):29-32.
- [4] 交通部专家委员会.公路桥涵通用图 装配式钢筋混凝土简支板桥上部构造(1 m 板宽)[M].北京:人民交通出版社,2006.
- [5] 赵慧.预应力砼空心板现场静载试验研究[J].公路与汽运,2019(2):125-127.
- [6] 赵曼,王新敏,赵雅克.板梁桥“单板受力”的数值分析[J].中国安全科学学报,2004,14(11):25-29.
- [7] 李鹏程,周广利,渠广镇,等.装配式空心板桥铰缝破坏原因分析[J].公路与汽运,2018(6):138-141.
- [8] 陈冠,殷新锋,刘扬.静载作用下桥梁结构受力分析[J].公路与汽运,2018(2):144-148.

收稿日期:2019-04-17

(上接第 54 页)

- [4] SETHY B P,PATRA C R,SIVAKUGAN N,etal. Application of ANN and ANFIS for predicting the ultimate bearing capacity of eccentrically loaded rectangular foundations[J].International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering,2017,35(3):4-17.
- [5] 李震,默杨,任连伟,等.临坡条形基础下地基极限承载力多因素影响规律的数值分析[J].水利水电技术,2018,49(7):37-44.
- [6] 尹鑫,周海祚,郑刚.地震作用下临近边坡的条形基础

极限承载力研究[J].岩土工程学报,2017,39(增刊2):95-98.

- [7] 江杰,陈骏,肖萌,等.南宁软岩地基大直径灌注桩极限承载力预测[J].长江科学院院报,2017,34(12):73-77+83.
- [8] 黄诗渊,王俊杰,康凯,等.“边坡-地基”的边坡失稳极限荷载与地基极限承载力研究[J].中国科技论文,2018,13(1):12-16+22.

收稿日期:2019-11-19

(上接第 84 页)

- [2] 伏亚锋,闫忠斌.刚构桥施工监控成桥线形温度因素控制分析[J].公路交通科技(应用技术版),2019(4):174-177.
- [3] 罗书舟,张谢东.窄幅大跨连续梁桥线形控制研究[J].公路与汽运,2019(3):128-131.
- [4] 高大峰,董旭,陈凯旋,等.预应力混凝土连续箱梁桥温度效应研究[J].公路工程,2016,41(2):80-83.
- [5] 田仲初,曹少辉,张恒,等.温度对空心薄壁高墩垂直度的影响分析[J].公路与汽运,2010(5):125-128.
- [6] 陈建平,戴桂华,李德建.西水大桥日照温度对斜交高墩施工线形影响及其控制方法研究[J].公路工程,2013,38(5):13-17+66.
- [7] 戴公连,唐宇,刘勇,等.高铁圆端形空心高墩日照温度场数值分析[J].桥梁建设,2016,46(6):67-72.
- [8] 刘永健,刘江,张宁.桥梁结构日照温度作用研究综述

[J].土木工程学报,2019,52(5):59-78.

- [9] 中交公路规划设计院.公路桥涵设计通用规范:JTG D60-2004[S].北京:人民交通出版社,2004.
- [10] 郑羽,王宗林,高庆飞,等.大跨连续箱梁桥施工期温度场测定及其影响分析[J].科学技术与工程,2012,12(22):5672-5675+5684.
- [11] 林强.连续梁桥悬臂现浇施工关键技术与控制方法研究[D].南京:东南大学,2016.
- [12] 包世军,梁权,阚磊,等.PC 连续梁桥悬臂现浇施工控制温度效应研究[J].现代交通技术,2017,14(2):21-25.
- [13] 中交第一公路工程局有限公司.公路桥涵施工技术规范:JTG/T F50-2011[S].北京:人民交通出版社,2011.

收稿日期:2019-12-11