

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2012.03.011

高原冬季环境下桥梁温度场各参数的确定

向学建¹, 董 军², 刘昊苏², 张劲泉¹, 李万恒¹

(1. 交通运输部公路科学研究院, 北京 100088; 2. 北京建筑工程学院, 北京 100011)

摘要:以青海省海东地区循化县积石峡黄河大桥为工程背景,着重讨论了影响积石峡——黄河大桥箱梁冬季温度场的相关参数,并针对高原地区冬季条件下箱梁温度场的边界条件的确定进行了较为深入的研究。选取积石峡1号黄河大桥作为试验算例,在大量实测数据的基础上,参考当地气象资料,对太阳辐射、对流气温等温度场初始条件与边界条件的施加进行了讨论,并将数值试验结果与实测比较,最终确定相关参数。最后使用所选取的参数,对1号黄河大桥进行了算例检验,数值仿真结果与现场观测结果吻合,表明参数具有较好的精确性和可靠性。研究结果不但为后续研究积石峡2号黄河大桥的温度荷载提供参数依据,也为青藏高原类似桥梁的设计与施工建造提供了重要的参考。

关键词:桥梁工程;连续刚构;温度场;数值模拟;太阳辐射;边界条件

中图分类号:U448.23

文献标识码:A

文章编号:1002-0268(2012)03-0058-06

Determination of Parameters of Temperature Field of Box-girder Bridge in Winter Weather of Plateau

XIANG Xuejian¹, DONG Jun², LIU Haosu², ZHANG Jinquan¹, LI Wanheng¹

(1. Research Institute of Highway, Ministry of Transport, Beijing 100088, China;

2. Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100011, China)

Abstract: With the Jishixia Yellow River bridge located in Xunhua county of the Haidong district of Qinghai Province being the engineering background, some related parameters which affect the wintertime temperature field of the box-girder of Jishixia Yellow River Bridge were discussed, and an in-depth study on determining the boundary condition of the box-girder's temperature field under winter environment in the plateau area was performed. Taken the Jishixia Yellow River Bridge No. 1 for testing example, based on plenty of measured data and local meteorological data, the infliction of initial and boundary conditions like solar radiation, convection temperature, etc. was discussed, and numerical testing result was compared with the measured ones to determine them eventually. Finally, these selected parameters were used to carry on an example testing upon the bridge. The numerical simulation result agrees with the field measured one, which demonstrates that the parameters are accurate and reliable. The research results not only provided parameter basis for the follow-up temperature load research of the Jishixia Yellow River Bridge No. 2, but also provided a significant reference for the design and construction of similar bridges in the Qinghai-Tibet Plateau.

Key words: bridge engineering; continuous rigid frame; temperature field; numerical simulation; solar radiation; boundary condition

收稿日期: 2011-09-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(51178042); 交通运输部西部交通科技项目(2009 318 000 002)

作者简介: 向学建(1970-),男,湖南汉寿人,高级工程师。(xj.xiang@163.com)

0 引言

温度荷载对桥梁结构的影响不容忽视已成为共识, 由温度产生的混凝土箱梁的应力和变形直接影响到混凝土结构的安全性、耐久性和适用性^[1-4]。对温度荷载的研究关键不在系统中如何计算, 而是温度场的模式如何确定。虽然国内外学者已对箱梁温度场和温度应力作了很多的研究, 也取得了不少的成果, 完善了温度场的计算理论。但是在桥梁界, 对箱梁的温度模式的取值方面还没有取得共识, 各国桥梁设计标准规定的温度场的分布规律各不相同, 就连我国的铁路桥规与公路桥规的条文也相距甚远。

为了保证桥梁施工的顺利进行, 就必须要建立适合当地实际情况的温度梯度模式。特别是对于位于西北高原上的桥梁, 目前相关研究较少。西北高原的气温特点是海拔高、空气稀薄、大气尘埃少。水蒸气和二氧化碳等气体含量很低, 大气透明度高, 对日光的漫射、散射均较小, 日照强烈、昼夜温差大, 如果箱梁按现行规范取温度梯度模式和参数, 与实际情况出入较大, 因此, 应通过实桥实测数值对温度场相关参数进行修正。

1 数值仿真参数确定

1.1 工程概况

积石峡黄河大桥是位于循化县清水乡和孟达乡境内年在建的一座预应力混凝土连续刚构桥, 如图1所示。大桥跨径为(65+105+60)m。主桥上部为箱梁采用单箱单室, 纵、竖向预应力体系。桥宽8.5 m, 箱梁根部梁高5.8 m,, 跨中梁高2.3 m, 箱梁顶板宽8.5 m, 底板宽5.5 m, 翼缘板悬臂长为1.5 m。箱梁高度从距墩中心3.5 m处到跨中合龙段处按1.8次抛物线变化, 除墩顶0号块设2个厚150 cm的横隔板及边跨端部设厚120 cm的横隔板外, 其余部位均不设横隔板。本文模拟温度场选取箱梁中跨12号块某一平面, 长度为4 m, 顶板厚度为0.28 m, 腹板厚度为0.4 m, 底板厚度0.30 m。此平面翼缘长度为1.5 m, 梁高2.4 m, 腹板高度为1.6 m。全桥采用C50混凝土, 悬臂浇筑。结构形式如图2所示, 材料属性相关参数列于表1。

表1 混凝土材料的某些属性参数

Tab.1 Some physical property parameters of concrete material

材料	密度/(kg·m ⁻³)	热传导系数	比热/(kJ·℃)
C50 混凝土	2 600	3. 00	0. 96



图1 积石峡黄河大桥1号桥
Fig.1 Jishixia Yellow River Bridge No. 1

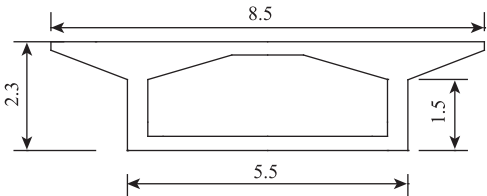


图2 12#块箱梁示意图 (单位: m)
Fig.2 Schematic diagram of box-girder
No.12 of the bridge (unit: m)

1.2 太阳辐射参数确定^[5-10]

1.2.1 太阳直接辐射强度 I_m

太阳每天的直接辐射强度都不尽相同, 其强度值符合正弦变化规律, 引入太阳常数 I_0 , 其意义为日地距离为平均日地距离时(约在春、秋分前后), 在大气层上界垂直于太阳辐射表面上的太阳辐射强度, $I_0=1\ 353\ W/m^2$ 。一年中的其他日期的 I_0 值可按下式计算:

$$I_0 = 1\ 353 + 44\sin\left[\frac{360(89 + D)}{365}\right]。 \tag{1}$$

本文提及的试验安排在2010年12月18日, 经式(1)计算, 最终确定当天, 太阳常数 I_0 为 $1\ 396.5\ W/m^2$ 。太阳直接辐射强度 I_m 与太阳高度角 h 、当地的地理纬度、太阳赤纬角、太阳时角、地方太阳时及当地的地理纬度有关, 现将计算过程列述于表2、3。

表2 太阳的某些直接辐射强度参数

Tab.2 Some parameters of directly solar radiation intensity

地理纬度 $\Phi/(^\circ)$	太阳赤纬角 $\delta/(^\circ)$	大气透明度系数 P_1
35. 84	-20. 11	0. 8

注: 由于冬季太阳直射南半球, 故太阳赤纬角为负值; 青海循化县海拔2 300 m, 属于青藏高原, 介于其空气常年较为稀薄, 故选取大气透明度系数为0. 8。

表 3 太阳直接辐射强度计算

Tab. 3 Calculation of directly solar radiation intensity

北京时间	当地视太阳时 S_d/h	太阳时角 $\omega/(^{\circ})$	太阳高度角 $\sinh$	太阳直接辐射强度 $I_m/(W \cdot m^{-2})$
6:00	4.83	-107.54		
7:00	5.83	-92.54		
8:00	6.83	-77.54	-0.04	
9:00	7.83	-62.54	0.15	523.51
10:00	8.83	-47.54	0.31	776.09
11:00	9.83	-32.54	0.44	890.91
12:00	10.83	-17.54	0.52	945.79
13:00	11.83	-2.54	0.56	965.08
14:00	12.83	12.46	0.54	955.73
15:00	13.83	27.46	0.47	914.46
16:00	14.83	42.46	0.36	824.56
17:00	15.83	57.46	0.21	634.77
18:00	16.83	72.46	0.03	142.21
19:00	17.83	87.46	-0.17	
20:00	18.83	102.46		
21:00	19.83	117.46		
22:00	20.83	132.46		

注：当地经度为 102.46°；6:00、7:00、20:00、21:00、22:00 由于太阳时角绝对值大于 90°，故略去此处辐射值；8:00 太阳高度角接近临界位置，故此时近似按无辐射进行计算，辐射时长为 9:00—18:00。

1.2.2 斜面上的太阳直接辐射强度 I_a

积石峡黄河大桥 1 号桥为西南—东北走向，与南北经线的夹角为 52°，应考虑斜面太阳直射问题。本桥位 T 型箱梁结构，翼缘在太阳光照射下回产生阴影，阴影主要集中在腹板处。

分析全桥的太阳辐射情况，分为以下几项：（1）顶板，顶板在太阳辐射作用下无阴影面积，故主要受太阳直接辐射作用（因反射、散射较直接辐射较小，故略去此部分）。（2）腹板，由于本桥为斜向桥，故桥梁东南腹板处受到的阳光直射时间较西北侧腹板长，在某一时刻进行转换，当阳光直射腹板时，直射面主要受到太阳辐射作用，阴影处受反射和散射作用。（3）底板，底板几乎不接受阳光直射，主要以散射为主。具体位置布置参见图 3。

斜面上的太阳直接辐射 I_{β} 与斜面与水平面的夹角 β 、斜面外法线的方位角 φ_n 、太阳方位角 φ_s 。其中，顶板和底板与水平面的夹角近似为 0°，腹板与水平面夹角为 90°。天文学规定：方位角从南方出发向西为正号，向东为负号，所以东南腹板的方位角



图 3 桥位图

Fig. 3 Position diagram of the bridge

为 142°，西北腹板的方位角为 -38°。斜面上的太阳直接辐射强度 I_a 的计算过程列述于表 4。

表 4 各部分太阳直接辐射强度

Tab. 4 Calculation of directly solar radiation intensity for different components

北京 时间	太阳方位 角 $\sin\varphi_s$	$\cos\theta$ 顶板	$\cos\theta$ 腹板	$I_m/$ ($W \cdot$ m^{-2})	I_{β} 顶板/ ($W \cdot$ m^{-2})	I_{β} 东南 腹板/ ($W \cdot$ m^{-2})	I_{β} 西北 腹板/ ($W \cdot$ m^{-2})
9	-0.84	0.93	-0.93	523.51	78.48	488.12	-488.12
10	-0.73	0.94	-0.94	776.09	242.71	728.42	-728.42
11	-0.56	0.90	-0.90	890.91	392.48	798.08	-798.08
12	-0.33	0.81	-0.81	945.79	496.18	763.20	-763.20
13	-0.05	0.68	-0.68	965.08	539.73	654.38	-654.38
14	0.24	0.52	-0.52	955.73	518.08	494.99	-494.99
15	0.49	0.34	-0.34	914.46	433.69	308.59	-308.59
16	0.68	0.15	-0.15	824.56	297.20	122.84	-122.84
17	0.81	-0.03	0.03	634.77	132.24	-22.02	22.02
18	0.90	-0.20	0.20	142.21	4.03	-28.58	28.58

经计算发现，东南腹板接受太阳直接辐射的时间为 9:00~16:00，相反西北腹板受太阳直接辐射只有 17:00、18:00 2 个小时且辐射量较小。另外，上午腹板所受辐射较顶面较低，其主要原因为试验当天为冬季，太阳入射角度较低，所以竖直平面的接收辐射量较顶面要高许多，但两者到下午日落时又接近相同。

1.2.3 太阳散射辐射和地面反射辐射

太阳辐射通过大气时遇到空气分子、尘粒、云滴等质点时，都要发生散射。但散射并不像吸收那样把辐射能转变为热能，而只是改变辐射方向，使太阳辐射以质点为中心向四面八方传播开来。经过散射之后，有一部分太阳辐射就到不了地面。散射辐射与壁面的方位无关，主要与太阳高度角、大气浑浊度，以及壁面的倾角有关。

理想大气中的散射辐射的水平分量 H_0 可按贝拉格公式计算：

$$H_0 = \frac{1}{2}(I_0 - I_m) \sinh, \tag{2}$$

将此数值作为水平面的散射辐射强度 H_0 , 则任意立面所受到的散射辐射强度 H_β 为:

$$H_\beta = H_0(1 + \cos\beta)/2。 \tag{3}$$

桥梁底板表面会受到地面反射辐射的影响, 对于与地面倾斜的接收面, 反射辐射强度 R_β 为:

$$R_\beta = \rho^*(I_m + H_0)(1 - \cos\beta)/2, \tag{4}$$

式中, ρ^* 为地面反射系数, 因此桥桥下为水面, 故取 0.2。散射与反射理论计算数值参见表 5。

表 5 散射与反射数值 (单位: $W \cdot m^{-2}$)

Tab. 5 Calculation values of light of reflection and interface scattering (unit: $W \cdot m^{-2}$)

北京时间	底面散射强度 H_β	腹板散射强度 H_β	反射辐射强度 R_β
9:00	65.44	32.72	58.90
10:00	97.01	48.51	87.31
11:00	111.36	55.68	100.23
12:00	118.22	59.11	106.40
13:00	120.64	60.32	108.57
14:00	119.47	59.73	107.52
15:00	114.31	57.15	102.88
16:00	103.07	51.54	92.76
17:00	79.35	39.67	71.41
18:00	17.78	8.89	16.00

1.2.4 腹板阴影部分的长度计算

积石峡黄河大桥 1 号桥翼缘宽度 1.5 m, 由于翼缘的遮挡作用, 太阳直射顶板时部分腹板处于阴影状态, 根据几何公式, 阴影部分的长度 l_s 为:

$$l_s = l_c \tanh \big/ \left[\sin (90^\circ + \varphi_n - \varphi_s) \sin \beta - \cos \beta \tanh \right]。 \tag{4}$$

经式 (4) 计算, 将桥梁东南、西北两侧腹板的计算值列述于表 6。

表 6 桥梁腹板阴影长度

Tab. 6 Shadow length of web of the bridge

北京时间	东南腹板/m	西北腹板/m
9:00	0	0.24
10:00	0	0.50
11:00	0	0.74
12:00	0	0.98
13:00	0	1.24
14:00	0	1.57
15:00	0	2.11
16:00	0	3.63
17:00	0.901	0
18:00	0.21	0

通过此表可以看出, 9:00 ~ 13:00 东南腹板属于受阳光直射状态, 西南腹板 17:00 ~ 18:00 处于阳光

直射状态, 结果可以与表 3 结果相互对应, 两表共同阐述了阳光在腹板直射的过程。

1.2.5 太阳辐射边界条件的最终确定

通过以上几部分的计算, 按照时间顺序, 将各部分的辐射量做相应计算, 使其达到与真实辐射相近。计算结果见表 7。

表 7 太阳辐射强度 (单位: $W \cdot m^{-2}$)

Tab. 7 Solar radiation intensities (unit: $W \cdot m^{-2}$)

北京时间	顶板	东南腹板	西北腹板	底板
9:00	78.48	488.12	91.61	65.44
10:00	242.71	728.42	135.82	97.01
11:00	392.48	798.08	155.91	111.36
12:00	496.18	763.20	165.51	118.22
13:00	539.73	654.38	168.89	120.64
14:00	518.08	494.99	167.25	119.47
15:00	433.69	308.59	160.03	114.31
16:00	297.20	122.84	144.30	103.07
17:00	132.24	111.09	133.10	79.35
18:00	4.03	24.89	53.47	17.78

2 Ansys 分析模型的建立

2.1 模型简化

本工程采用大型有限元分析软件 Ansys 进行温度场模拟与计算。由于我们需要的是箱梁二维温度场, 所以我们首先对模型进行简化。

本文采用以平面单元代替实体单元的做法, 用 1 个箱梁剖面模拟全桥辐射, 通过观察这一平面温度的变化来确定二维温度场。模型参见图 4。

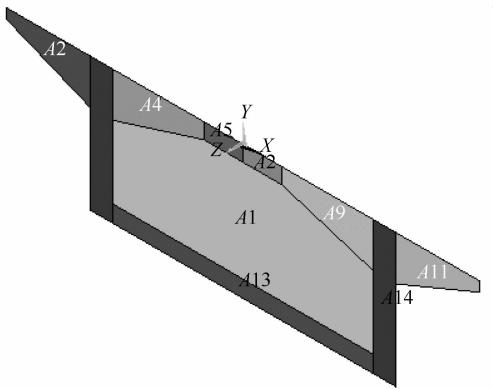


图 4 Ansys 分析计算模型

Fig. 4 Geometrical model based on Ansys software

2.2 Ansys 程序下边界条件的实现^[9]

Ansys 热分析基于能量守恒原理的热平衡方程, 用有限元法计算各节点的温度, 并到处其他热物理参数。包括热传导、热对流及热辐射 3 种热传递方式。在 Ansys 程序中热分析主要分为稳态传热和瞬态传热, 问题传热用于分析稳定的热载荷引起的温

度、热梯度、热流率、热流密度等参数。瞬态分析用于计算一个系统随时间变化的温度场及其他热参数。

本文所进行的空间温度场分析为瞬态分析,在计算时间内外界温度、太阳辐射强度都是随时间变化的,因此在利用 Ansys 分析温度场时,将分析类型定为瞬态分析,并在不同边界上施加随时间变化的外界温度和太阳辐射强度。

箱梁与外界发生热交换主要是通过对流、吸收太阳辐射能量和热辐射 3 种形式。热辐射式以电磁波的方式来传递热量,它不需要任何介质。箱梁温度场分析中的热辐射换热发生在边界混凝土与周围空气之间以及箱内壁板之间。若按 Ansys 中对热辐射的规定,需将外界空气也作为一种物质引入,对其进行网格划分和定义属性等。由于在白天时段,热辐射与太阳辐射相比,对箱梁温度场的影响较小,且箱梁周围的空气是流动的,顶板外表、底板外表和箱内的温度不一致,从而辐射能力也各不相同,如果完全考虑难度很大,而且约束条件太多精度不一定能保证,所以在建立模型时仅考虑表面单元的太阳辐射和对流对温度影响。

模拟计算温度场时最重要的是边界条件的施加。在 Ansys 中,可用于热分析的单元有 40 余种,本工程根据建模需要选取二维实体单元 PLANE77 建立截面模型。Ansys 可施加多种边界条件和初始条件,共有温度、热流率、热流密度、对流、辐射、生热率等,因此把太阳直接辐射和散射辐射以热流密度的荷载形式施加,但当热流密度与对流同时施加在同一外表面时 Ansys 仅能读取最后施加的面荷载进行计算,为避免 Ansys 只读 1 种荷载,计算时采用了表面效应单元 SURF151,它利用实体表面的节点形成单元,并且直接覆盖在实体单元表面,可用于多种荷载和表面效应的应用。

根据以上想法,选择二维温度单元 PLANE77,定义材料性能参数、导热系数、密度和比热,并选择模型 1 周轮廓线赋予其 SURF151 单元属性,使其成为表面效应单元。网格划分时以 1 cm 为长度并全部采用四边形单元进行映射网格划分,在接近桥面温度梯度变化较大的地方采用较密网格。为保证模型计算精度,取 1 h 为步长,每一步共计 500 子步。模型建立完成以后根据上述计算结果取凌晨 6:00 起始时间,设定模型计算时间为 6:00 ~ 23:00,共计 18 步,并打开自动步长,以优化时间步长。

3 温度场数值计算结果及分析

3.1 Ansys 程序数值分析结果及对比

在上述边界条件下,将各边界条件赋予单元及节点。经 Ansys 计算后,获得相应时刻的温度云图,9:00 ~ 18:00 温度云图参见图 5。

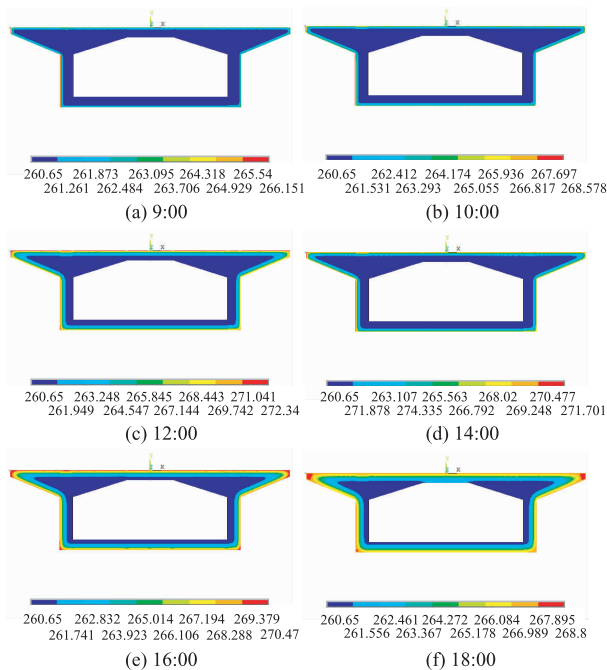


图 5 箱梁温度分布图

Fig. 5 Temperature distribution of a box-girder

根据 Ansys 计算结果,提取顶板、底板、东南腹板、西南腹板 4 个部位的相应监测点计算数据,并与积石峡黄河大桥 1 号桥的实测数据进行对比,数值对比见图 6。

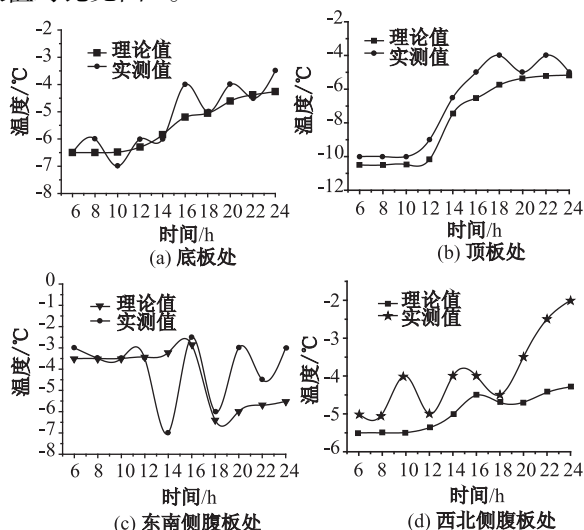


图 6 温度实测值与理论值对比

Fig. 6 Comparison of temperatures between measured value and simulated value

3.2 数值分析及误差分析

通过对积石峡黄河大桥1号桥实测数值与理论计算值得对比得出,在高原冬季环境下,对流传热与辐射传热所占比例基本相同。本文所采纳的边界条件参数与实际接近,基本满足温度场拟合要求。从图6可以看出,底板处由于不受太阳辐射的影响温度变化较少,但依然处于升温过程,特别是在14:00~16:00期间升温幅度最大;顶板由于直接接受太阳辐射,在11:00太阳辐射角及强度达到一定程度时迅速升温,并在14:00候接近最大值,18:00日落之后太阳趋于平稳;东南腹板及西北腹板由于在日出时直接接受太阳辐射,故开始的温度略高于其他部分,但由于翼缘遮挡,在14:00太阳辐射达到最大时升温幅度并不大,特别是东南腹板,在16:00全部进入阴面之后,因无太阳辐射作用温度迅速降低,而西北腹板此时会首太阳辐射作用,温度会升高,但因辐射强度降低,升温幅度不大。

在14:00以后,随着箱梁内部温度的升高,箱梁各部位温度逐渐高于理论值,并在夜间有上升趋势,笔者认为这主要是由于在高原冬季环境条件下,箱梁混凝土内部受辐射升温的影响,水化热反应加剧,产生大量热量,促使混凝土内部温度提高,从而导致夜间温度有上升趋势。另外,顶板、腹板的初始温度较理论温度要高,主要原因是前一天的水化热在6:00还没有消耗完,箱内的温度较箱外要高一点。

4 结论与建议

通过对积石峡黄河大桥1号桥温度场的数值模拟计算,基本可以确定高原冬季环境条件下的温度场各参数值。冬季高原环境下太阳辐射有别于规范中温度场测试时间下的辐射强度,且本文测试时间接近于太阳最低赤纬角,箱梁温度实测数据与参数模拟计算的数据相似程度较高,故可将其作为青海地区冬季温度场参数的参考。高原冬季环境下应重视水化热产生的温度升高,避免因温度的升高而产生裂缝,建议在模拟高原冬季环境时,模型考虑添加水化热效应。

参考文献:

References:

- [1] LI D N, MAES M A, DILGER W H. Evaluation of Temperature Data of Confederation Bridge: Thermal Loading and Movement at Expansion Joint [C] //

Proceedings of the 2008 Structure Congress. Alberta, Canada: ASCE, 314-324.

- [2] 赵虹,李鑫,田仲初. 混凝土II型梁的水化热温度场研究[J]. 公路工程, 2009(4): 157-160.
ZHAO Hong, LI Xin, TIAN Zhongchu. Investigation on the Temperature Field of II-Girder Concrete Hydration Heat [J]. Highway Engineering, 2009(4): 157-160.
- [3] 王鹏,刘孝辉,陈骑彪,等. 水化热对斜拉桥混凝土主塔早期开裂影响研究[J]. 公路交通技术, 2009(5): 83-89.
WANG Peng, LIU Xiaohui, CHEN Qibiao, et al. Investigation for Influences of Hydration Heat on Early Cracking of Concrete Main Tower of Cable Stayed Bridge [J]. Technology of Highway and Transport, 2009(5): 83-89.
- [4] 刘兵伟. 思贤窖特大桥承台大体积混凝土施工控制[J]. 石家庄铁道大学学报: 自然科学版, 2011(1): 53-57.
LIU Bingwei. Construction Control of Massive Concrete for Pile Caps of Sixianjiao Super-large Bridge [J]. Journal of Shijiazhuang Tiedao University: Natural Science Edition, 2011(1): 53-57.
- [5] 张岗,贺拴海,周勇军,等. PC箱梁墩顶块水化热温度冲击模型及空间仿真[J]. 辽宁工程技术大学学报: 自然科学版, 2010(1): 87-90.
ZHANG Gang, HE Shuanhai, ZHOU Yongjun, et al. Space Simulation and Hydration Heat Attack Model for Pier-on Mass of PC Box Girder [J]. Journal of Liaoning Technical University: Natural Science Edition, 2010: 87-90.
- [6] 王解军,李辉,卢二侠. 大体积混凝土桥墩水化热温度场的数值分析[J]. 中南林业科技大学学报: 自然科学版, 2007, 27(1): 124-225.
WANG Jiejun, LI Hui, LU Erxia. Numerical Analysis of Hydrated Heat Temperature Field of Massive Volume Concrete Pier [J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2007, 27(1): 124-225.
- [7] 张亮亮,陈天地,袁政强. 桥墩混凝土的水化热温度分析[J]. 公路, 2007(9): 66-70.
ZHANG Liangliang, CHEN Tiandi, YUAN Zhengqiang. Analysis of Hydration Temperature of Bridge Pier Concrete [J]. Highway, 2007(9): 66-70.
- [8] 张岗,贺拴海,宋一凡. 混凝土箱梁水化热温度损伤安全评价模型研究[J]. 安全与环境学报, 2007, 7(4): 143-147.