

# 基于 ANSYS 的不平衡日照混凝土箱梁温度场分布研究

郭风俊

(山西省高速公路集团有限责任公司, 山西 太原 030000)

**摘要:** 混凝土薄壁箱梁温度场受地理位置、风速风向、太阳辐射等多方面因素影响, 而箱梁温度场分布又很大程度上决定了桥梁所受到的温度应力。本文以佳县黄河大桥为背景, 针对左右两侧日照辐射不平衡的箱梁, 通过现有地理资料与有限元软件进行了模拟仿真计算, 最后与实测温度场数据对比, 验证了模拟仿真计算结果的准确性, 得到了各时刻箱梁截面在此种日照下的温度场分布, 并利用有限元模型结果分析确定了此类桥梁薄壁箱梁各构件温度分布规律, 可以为今后此种桥位箱型截面桥梁温度场计算提供参考。

**关键词:** 桥梁工程; 箱型截面; 有限元仿真; 日照辐射; 不平衡温度场

**中图分类号:** U448

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1006-7930(2020)02-0207-06

## Research on temperature field distribution of unbalanced sunshine concrete box girder based on ANSYS

GUO Fengjun

(Shanxi Expressway Group Co. Ltd, Taiyuan 03000, China)

**Abstract:** The temperature field of thin-walled concrete box girder is affected by many factors, such as geographical location, wind speed, wind direction, solar radiation and so on. The temperature field distribution of box girder largely determines the temperature stress of bridge. Based on the background of Jiaxian Yellow River Bridge, this paper simulates and calculates the box girder with unbalanced solar radiation on the left and right sides by using the existing geographic data and finite element software. Finally, the accuracy of the simulation results is verified by comparing with the measured temperature field data. The temperature field distribution of the box girder section under this kind of sunshine at all times is obtained, and the results of finite element model are used. The temperature distribution law of thin-walled box girder components of this kind of bridge is analyzed and determined, which can provide reference for the calculation of temperature field of box section bridge in this kind of bridge location in the future.

**Key words:** bridge engineering; continuous rigid frame; finite element simulation; sunshine radiation; unbalanced temperature field

大跨径预应力混凝土桥梁, 特别是连续刚构桥, 在非线性温度荷载作用下会产生非常大的次内力, 严重影响在役桥梁的耐久性和安全性, 而温度场则是决定温度荷载的先决条件。箱梁温度场会受地理位置、风速风向和太阳辐射等多方面因素影响, 变化较为复杂, 由于现有理论的不完善, 混凝土桥梁结构设计中, 一般采用较为理想的温度分布模型, 导致实测温度应力和温度场分布与原设计存在很大的差异。实测温度场受现场场地及测量条件多方限制, 往往只能反应箱梁截面部分温度场, 而采用有限元模拟温度场可以不受这些因素所限制, 能较为方便快捷的反映出箱

梁温度场。国内外学者已对温度应力及温度场做了大量研究, 取得了非凡成果。彭友松根据太阳物理学研究了桥梁结构与外界环境传热机理, 建立了温度分析模拟计算模型<sup>[3]</sup>。聂玉东研究了混凝土箱梁桥温度效应及温度分布要点, 确定寒冷地区混凝土箱梁温度分布模式<sup>[4]</sup>。向学建等以积石峡黄河大桥为背景, 着重对高原冬季条件下箱梁温度场的边界条件进行了深入研究<sup>[5]</sup>。曾志文等研究了一座混凝土 T 构梁桥温度场及其温度效应, 箱梁温度场会随太阳辐射的空间位置变化而变化<sup>[6]</sup>。薛俊青等通过采集八座城市的太阳辐射数据, 并采用有限元模拟温度场发现夏季考虑太阳辐射之

后实测与理论吻合较好。

综上所述,对于大跨度连续刚构桥箱梁温度场,一般认为影响箱梁温度场的主要因素-太阳辐射是理想均匀散布在梁体两侧的,由于我国地处北半球,对近东西向走向的桥梁,其温度场并非均匀分布在箱梁两侧,而是一侧箱梁腹板会受到远多于另一侧腹板的太阳辐射,我们将这种温度场定义为不平衡日照温度场,国内外对于此种日照辐射非常不均匀的桥梁温度场研究较为匮乏。本文以东西走向的佳县黄河大桥为依托工程,对该桥跨中截面温度场进行了实测,并用现有地理资料与有限元软件 ANSYS 结合模拟出该桥跨中截面温度场,最后与实测温度场比较验证,分析了这类箱梁温度场分布特点,为今后此类桥梁提供了温度荷载计算依据。

## 1 温度场理论与边界条件

基于温度场导热微分方程的实体有限元软件分析温度场时,在第三类边界条件下可以表达为下式。

$$\lambda(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2}) = \rho c \frac{\partial t}{\partial \tau} \quad (1)$$

式中: $\lambda$  为导热系数, $c$  为材料比热容, $\rho$  为材料

密度, $\tau$  为时间。

箱梁外结构面在受到太阳辐射的同时,还与周围热空气进行对流换热,因此箱梁外部边界条件可以由下式表示:

$$\lambda \frac{\partial t}{\partial n} - \epsilon q + (t - t_a)(h_c + h_a) = 0 \quad (2)$$

箱梁内结构面不受到太阳辐射,但是内表面间会有辐射换热,并且与周围热空气存在对流换热,因此其边界条件可以写为下式:

$$\lambda \frac{\partial t}{\partial n} + (t - t_a)(h_c + h_a) = 0 \quad (3)$$

式中: $n$  为边界面外法线方向, $q$  为投射到边界面上的总的太阳辐射强度, $h_c$  为对流换热系数, $h_r$  为辐射换热系数, $t_a$  为外边界面周围空气的温度, $\epsilon$  混凝土表面太阳热辐射吸收系数,则  $h_c + h_a$  为综合换热系数。根据此公式(3)中推导式可计算不同时刻箱梁不同结构面综合换热系数如表1所示。

## 2 依托桥梁温度测点布置

临县黄河大桥是连接太佳高速公路和陕西省榆佳高速公路的特大桥梁,右线桥梁全长 1 551.322 m,左线桥梁全长 1 641.61 m,桥面宽度

表1 箱梁不同结构面综合换热系数

Tab. 1 Comprehensive heat transfer coefficients of box girders with different structural planes

时间	综合换热系数				
	箱内	顶板	底板	腹板(南侧)	腹板(北侧)
6:00	11.35	19.39	19.27	19.28	18.89
7:00	11.35	19.41	19.29	19.32	18.91
8:00	11.35	19.46	19.31	19.35	18.94
9:00	11.35	19.55	19.35	19.41	18.97
10:00	11.35	19.77	19.38	19.47	19.05
11:00	11.35	20.05	19.42	19.58	19.09
12:00	11.35	20.18	19.46	19.68	19.14
13:00	11.35	20.27	19.50	19.77	19.18
14:00	11.35	20.35	19.54	19.24	19.20
15:00	11.35	20.38	19.58	19.23	19.20
16:00	11.35	20.33	19.55	19.19	19.16
17:00	11.35	20.24	19.51	19.13	19.10
18:00	11.35	20.04	19.46	19.05	19.03
19:00	11.35	19.84	19.41	18.99	18.98
20:00	11.35	19.75	19.35	18.95	18.95

为 13 m，主桥上部结构采用 80+4×150+80 预应力混凝土连续刚构桥，主桥下部结构采用双薄壁墩群桩基础。主梁截面采用单箱单室截面，跨中截面梁高 3.75 m，箱梁顶板宽度 30 cm，腹板厚度 55 cm，底板宽度 30 cm。

桥梁所处地理位置大约在东经 110°29′，北纬 38°02′，桥梁大致接近东西走向，因此导致南侧腹板白天均有太阳照射，而北侧腹板仅在日出时间受到日照辐射。根据佳县气象局提供的 1969 年至 2009 年连续 41 年的观测资料，桥位处一月份平均气温最低位−12.2℃(1993 年)，七月份平均气温最高为 26.9℃(2005 年)；年极端最低气温−24.4℃(2002 年)，年极端最高气温 42.1℃(2005 年)。

为验证有限元结果正确性，于 2018 年 7 月 17 日进行了该桥跨中截面箱梁内外温度场实测，温度场测点布置如图 1 所示。

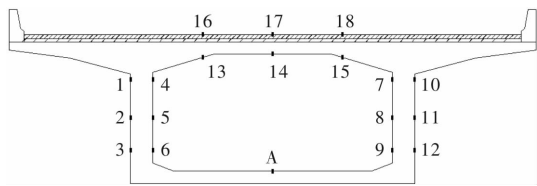


图 1 箱梁温度场测点布置图

Fig. 1 Layout of measuring points for temperature field of box girder

3 基于 ANSYS 温度模拟

3.1 模型参数选取

根据参考文献《高原冬季环境下桥梁温度场各

参数确定》中相关混凝土热力学参数的推荐，选择混凝土导热系数为 3.5 W/(m·℃)，比热取 950 J/(kg·℃)，根据以往混凝土重度经验取值，重度取 25 kN/m。考虑到临县黄河大桥已建成多年，根据文献(3)中相关参数的推荐，因此混凝土太阳辐射吸收系数在 0.5~0.7 中取较小值 0.5，实测温度场当日平均风速为 2 m/s。根据文献《混凝土桥梁结构日照温度效应理论及应用研究》中推导出关于日照辐射的计算公式，计算箱梁不同时间不同结构面所受太阳辐射值，结果见表 2，北侧腹板因为桥位原因仅日出时刻受到了太阳辐射，但因太阳高度角较低，且日照辐射值较低，故不予考虑。

3.2 有限元模型建立

Ansysis 程序在进行受热分析时主要分为瞬态传热和稳态传热，瞬态传热用于分析热参数在系统温度场随时间变化时的变化，稳态传热用于分析稳定热荷载引起的热参数的变化。混凝土桥梁结构与外界热交换主要分为太阳辐射、辐射换热和对流换热三种类型，如果完全考虑三种热交换，难度很大且边界条件添加困难，且影响夏季箱梁温度场最主要的因素为太阳辐射，故有限元模型采取太阳辐射按热流密度的方式直接加在箱梁表面，箱内温度场采用对流换热的方式，而无太阳辐射的腹板截面将采用与空气作用热对流进行添加。

采用有限元软件 Ansys 进行温度场分析时，由于需要模拟箱梁同一截面处温度场，经考虑本文选取建立三维实体单元 solid70 进行分析，避免

表 2 箱梁不同结构面所受太阳辐射计算值

Tab. 2 Calculations of solar radiation on different structural planes of box girders

时间	太阳辐射/W·m <sup>-2</sup>			
	顶板	底板	腹板(南侧)	腹板(北侧)
6: 00	38.421	7.684	32.712	0.000
7: 00	155.734	31.147	223.060	0.000
8: 00	329.840	65.968	529.758	0.000
9: 00	511.840	102.368	601.919	0.000
10: 00	671.684	134.337	783.315	0.000
11: 00	790.620	158.124	882.129	0.000
12: 00	856.848	171.370	652.233	0.000
13: 00	864.285	172.857	912.063	0.000
14: 00	812.263	162.453	835.127	0.000
15: 00	705.515	141.103	735.554	0.000
16: 00	554.363	110.873	726.845	0.000
17: 00	375.615	75.123	432.069	0.000
18: 00	195.794	39.159	365.279	0.000
19: 00	59.529	11.906	77.528	0.000
20: 00	0.000	0.000 00	0.000	0.000

采用二维单元模拟时,截面表面只能施加单一荷载。模型梁体节段长度选取为跨中合龙段长度4 m,有限元计算模型见图2。

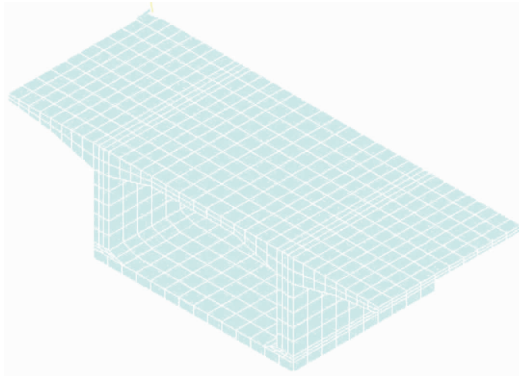


图2 有限元计算模型示意图

Fig. 2 Schematic diagram of finite element calculation model

### 3.3 温度场规律与分析结果对比

考虑临县黄河大桥当日日照时间后,模型分析计算时间选择为6:00~20:00,经计算分析后得到梁体在各时间点的温度云图,选取部分时刻梁体温度云图如图3所示。

为验证有限元模拟仿真结果的准确性,提取模型箱梁顶板、左腹板(未受到太阳辐射)、右腹板3个部件中部测点位置的温度时程曲线以及南北侧腹板外表与内表面温度时程曲线,并与实测结果对比,结果图4所示。

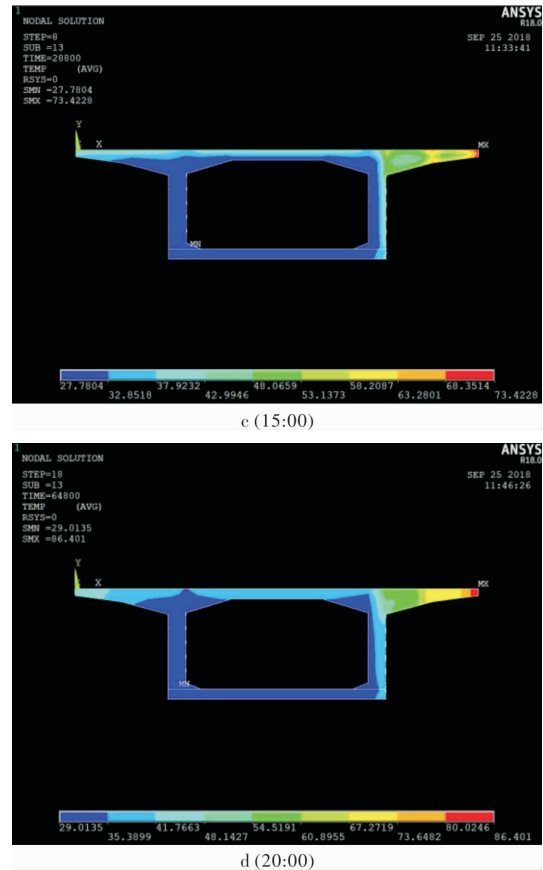


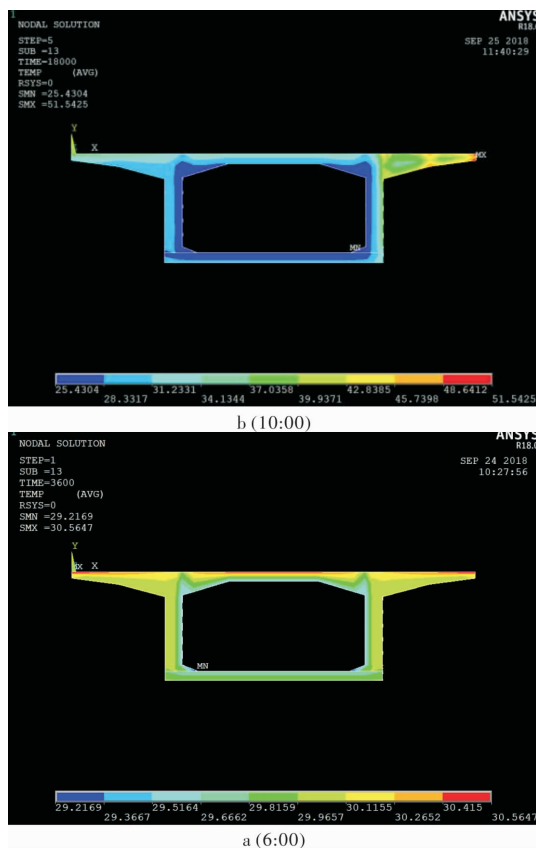
图3 部分时刻温度云图

Fig. 3 Partial temperature cloud

### 3.4 温度场数据分析

通过对临县黄河大桥温度场实测值与理论值对比可以得到,总体上有限元模拟温度场与实测温度场较为接近,各时刻相差最大不超过 $2^{\circ}\text{C}$ ,可以认为本文采取的方法、边界条件以及各参数取值对于计算薄壁箱梁温度场具有较高的准确性,另外可以证明影响箱梁截面温度场的关键因素为太阳辐射的直接辐射,且因此作用南侧腹板与顶板升温速度也远高于未受到阳光直射的底板与北侧腹板。

图4表明,桥梁横向箱梁温度场在6:00时,各实测值会与理论值均有一定误差,这种误差会在8:00~15:00这一段箱梁表面温度场数值剧烈上升期间减小,最终理论值会与实测值相接近;箱梁顶板处和南侧腹板由于受到太阳辐射直接作用,表面温度在15:00左右达到峰值,最高可以达到 $48^{\circ}\text{C}$ ,而北侧腹板由于除6:00以外均无阳光直接作用,因此表面温度最高值仅为 $33^{\circ}\text{C}$ ,南侧腹板与北侧腹板表面温度差值相差 $15^{\circ}\text{C}$ ;箱梁温度场数值达到峰值后,在16:00~20:00期间各表面温度将缓慢下降,此时理论值与实测值误差会进一步扩大;通过表2与图4比较可以看出,太阳辐射均是在13:00达到顶峰,但箱梁表面温



度在 15:00 才会达到最高值, 笔者认为这可能是混凝土在受热流作用时, 会表现出一定的迟滞性, 这种因受热而产生的迟滞性可能会达到 1~2 个小时, 之后会因为日照辐射的不足而开始降温。

图 3 与图 4 表明, 由于大跨径连续刚构桥箱室内空间密闭几乎不与外界热源进行热能交换, 因此箱内始终保持在一个远低于外表面的温度值, 这就会使南侧腹板外表面在最高峰时, 该侧腹板内外表面存在非线性温度差, 这无疑将会产生非常大的温度应力, 如图 4(d) 所示, 因为太阳辐射作用, 南侧腹板最高峰内外温度差为  $15^{\circ}\text{C}$ , 而北侧最高峰温度差仅为  $3^{\circ}\text{C}$ , 因此若采用以往理想的温度场分布计算该类型桥梁, 势必会导致计算出

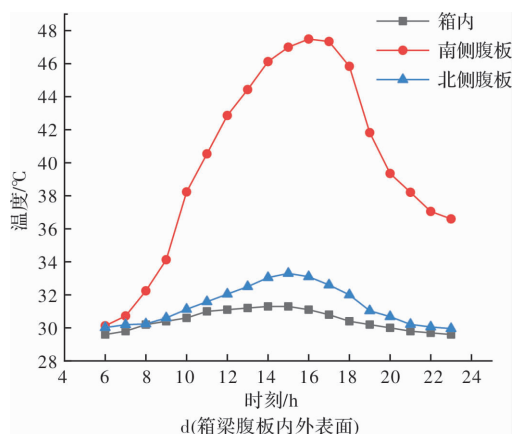


图 4 理论值与实测值对比图

Fig. 4 Contrast chart between theoretical value and measured value

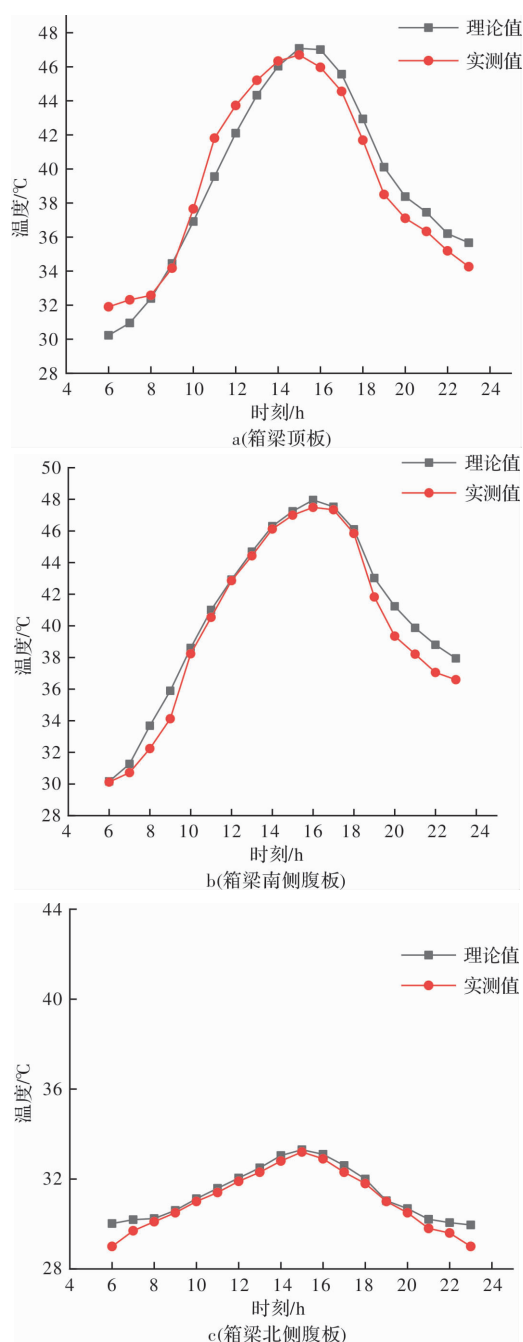
的温度应力与实际相差过大, 影响到该类型桥梁的寿命与耐久性。

## 4 结论

通过有限元数值模拟出临县黄河大桥温度场理论值并与实测值对比后可知, 误差均小于工程可接受的范围内, 可以认为利用地理位置计算出气象参数并进行数值模拟仿真计算的结果是完全可行的。东西走向桥梁温度场有别于规范所规定横向温度梯度分布, 且本文所分析模拟的温度场数值与实测值吻合度较高, 因此可以为今后关于此类型桥梁温度场、温度荷载计算提供参考。在利用太阳辐射计算薄壁箱梁温度场时, 应考虑到太阳辐射与桥梁温度场之间的时间迟滞性, 并且在计算此类型桥梁温度应力时, 应着重考虑受日照直射的一侧腹板的温度荷载, 在这种温度场作用下箱梁腹板内外侧温差将十分巨大, 很有可能引起箱梁腹板开裂, 而导致一系列病害问题的发生。

## 参考文献 References

- [1] 邵旭东. 桥梁工程[M]. 4版. 北京:人民交通出版社, 2016.  
SHAO Xudong. Bridge engineering [M]. 4th ed. Beijing: People's Communications Press, 2016.
- [2] 范立础. 高等桥梁理论[M]. 2版. 北京:人民交通出版社, 2015.  
FAN lichu. Advanced bridge theory [M]. 2nd ed. Beijing: People's Communications Press, 2015.
- [3] 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, 2007.  
PENG Yousong. Theory and application of sunshine



- temperature effect on concrete bridge structure [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2007.
- [4] 聂玉东. 寒区大跨径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 Yudong. Analysis of temperature field and temperature effect of long-span concrete box girder bridge in cold region[D]. Harbin: Harbin University of technology, 2013.
- [5] 向学建, 董军, 刘昊苏, 等. 高原冬季环境下桥梁温度场各参数的确定[J]. 公路交通科技, 2012, 29(3): 58-63, 85.
- XIANG Xuejian, DONG Jun, LIU Haosu, et al. Determination of bridge temperature field parameters under plateau winter environment [J]. Highway transportation technology, 2012, 29(3): 58-63, 85.
- [6] 曾志文, 刁飞, 王波. 混凝土 T 构组合桥梁温度场和温度效应研究[J]. 华东公路, 2017(3): 8-11.
- ZENG Zhiwen, DIAO Fei, WANG Bo. Study on temperature field and temperature effect of concrete T-shaped composite bridge [J]. East China highway, 2017(3): 8-11.
- [7] 薛俊青, 林健辉, Bruno Briseghella, 等. 太阳辐射对福建省桥梁截面温度场的影响研究[J/OL]. 福州大学学报(自然科学版): 1-8 [2018-09-09].
- XUE Junqing, LIN Jianhui, BRUNO BRISEGHELLA, et al. Study on the influence of solar radiation on the temperature field of bridge section in Fujian Province [J / OL]. Journal of Fuzhou University (NATURAL SCIENCE EDITION): 1-8 [2018-09-09].
- [8] 顾斌, 陈志坚, 陈欣迪. 基于气象参数的混凝土箱梁日照温度场仿真分析[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2012, 42(5): 950-955.
- GU bin, CHEN Zhijian, CHEN Xindi. Simulation analysis of sunshine temperature field of concrete box girder based on meteorological parameters [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2012, 42(5): 950-955.
- [9] 方志, 汪剑. 大跨预应力混凝土连续箱梁桥日照温差效应[J]. 中国公路学报, 2007(1): 62-67.
- FANG Zhi, WANG Jian. Sunshine temperature difference effect of long span prestressed concrete continuous box girder bridge [J]. Journal of China highway, 2007(1): 62-67.
- [10] 王新敏. ANSYS 工程结构数值分析[M]. 北京: 人民交通出版社, 2007.
- WANG Xinmin. Numerical analysis of ANSYS engineering structure [M]. Beijing: People's Communications Press, 2007.
- [11] LARSSON O, THELANDERSSON S. Estimating extreme values of thermal gradients in concrete structures. [J] Materials and Structures, 2011, 44(8): 1491-1500.
- [12] 沈聪, 高培伟, 张辉. 钢箱梁大桥桥面铺装温度场有限元分析研究[J]. 公路工程, 2018, 43(3): 21-25.
- SHEN Cong, GAO Peiwei, ZHANG Hui. Finite element analysis of temperature field of steel box girder bridge deck pavement [J]. Highway engineering, 2018, 43(3): 21-25.
- [13] 沈典栋, 王解军. 连续刚构桥箱形墩与箱梁温度场实测研究[J]. 公路工程, 2011, 36(4): 52-55.
- SHEN Diandong, WANG Jiejun. Study on temperature field of box pier and box girder of continuous rigid frame bridge[J]. Highway Engineering, 2011, 36(4): 52-55.
- [14] 朱宇锋, 王解军. 大跨径连续刚构桥箱梁温度场测试与温度效应分析[J]. 公路工程, 2010, 35(3): 58-62.
- ZHU Yufeng, WANG Jiejun. Temperature field test and temperature effect analysis of box girder of long-span continuous rigid frame bridge [J]. Highway Engineering, 2010, 35(3): 58-62.
- [15] 陈黎阳. 早龄期混凝土箱梁温度场分析[J]. 公路交通科技, 2018, 35(10): 50-55.
- CHEN Liyang. Temperature field analysis of early age concrete box girder [J]. Highway transportation technology, 2018, 35(10): 50-55.
- [16] 任翔, 何青, 佟阳, 等. 混凝土桥塔温度场和空间应力场分析[J]. 郑州大学学报(工学版), 2011, 32(2): 62-65.
- REN Xiang, HE Qing, TONG Yang, et al. Analysis of temperature field and spatial stress field of concrete bridge tower [J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Edition), 2011, 32(2): 62-65.
- [17] 朱秋菊, 韩菊红, 乐金朝. 闸墩施工期温度应力仿真分析[J]. 郑州大学学报(工学版), 2005(1): 47-49, 53.
- ZHU Qiuju, HAN Juhong, LE Jinchao. Simulation analysis of temperature stress during pier construction [J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Edition), 2005(1): 47-49, 53.

(编辑 桂智刚)