

混凝土空心墩壁厚对日照温差分布的影响分析

胡安庆, 任东华

(中铁西南科学研究院有限公司, 四川 成都 610031)

摘要:国内桥梁设计规范仅规定了箱梁的日照温差荷载,但缺乏桥墩的日照温差荷载。为获得混凝土空心墩日照温差荷载并研究混凝土空心墩壁厚对日照温差分布的影响,根据天文学理论光线追踪方法构建了高墩日照分析模型,在模型中考虑了太阳辐射、环境和上部结构遮荫等主要影响因素,并在宜万铁路马水河桥进行了测试验证,同时对混凝土壁厚与日照温差的关系进行了分析。研究表明,空心墩壁厚对桥墩的温差分布影响较大,温差的分布模式不是单一的;混凝土中厚壁墩(30~80 cm),日照温差随壁厚的增加而增大,混凝土厚壁墩(>80 cm)桥墩日照温差不随厚度增加而变化,且内部混凝土温度不受日照的影响;在空心墩的日温差荷载验算过程中,混凝土薄壁墩(≤ 30 cm)直接按《铁路桥规》箱梁日温差荷载取值是合适的,对于中、厚壁(>30 cm)不宜直接采用箱梁的温差荷载。

关键词:混凝土;空心墩;太阳辐射;壁厚;日照温差

中图分类号: U24 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0373(2021)04-0021-07

由于混凝土导热系数较小,在太阳辐射作用下,混凝土结构内部的温度变化明显滞后于表面的温度变化,形成较大的温度梯度^[1-2],而温度梯度引起的温度应力是混凝土裂缝或失效的主要原因^[3]。因此,在对空心高墩大跨度桥梁进行设计时,温度作用效应已成为控制因素之一,由于受山体及桥梁上部结构遮荫等因素的影响桥墩的温差效应更难分析。《公路桥涵设计通用规范》^[4](简称《公路桥规》)和《铁路桥涵混凝土结构设计规范》^[5](简称《铁路桥规》)均对箱梁的梯度温度作用做了相关规定,分别采用折线和幂指数表示温度梯度分布,但关于桥梁日照温差荷载计算,《公路桥规》和《铁路桥规》只局限于箱梁,对桥墩结构没有相应的规定。在桥墩结构的日温差荷载验算过程中,直接采用规范中的日温差作用仍有待商榷。

根据天文学理论光线追踪方法构建了高墩日照分析模型,在模型中考虑了太阳辐射、桥址环境和上部结构遮荫等主要因素,并在宜万铁路马水河桥进行了测试验证分析。根据铁路桥梁空心桥墩壁厚较大的特点,进一步研究了混凝土空心墩壁厚对日照温差分布的影响,为同类桥梁空心墩的日照温差荷载计算分析提供参考。

1 桥墩温度场计算

1.1 桥墩温度场影响因素

结构的温度效应存在太阳辐射的局部性和混凝土结构热传导的不均匀性,一般很难直接根据函数关系求解,只能近似数值模拟求解。桥梁结构受日照作用产生的温度场实质上是一个三维非稳态温度场问题^[6]。一般简化考虑可忽略构件纵向的温度梯度,按平面问题计算,再加上合理的边界条件和初始条件,就可以运用差分法进行求解^[7]。

第3类边界条件^[7]:

收稿日期:2021-07-22 责任编辑:车轩玉 DOI:10.13319/j.cnki.sjztdxxb.20210164

作者简介:胡安庆(1982—),男,高级工程师,研究方向为桥梁检测试验。E-mail:xffish136@163.com

胡安庆,任东华.混凝土空心墩壁厚对日照温差分布的影响分析[J].石家庄铁道大学学报(自然科学版),2021,34(4):21-27.

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial \chi} = \alpha_s I_t + \beta (T_w - T) \quad (1)$$

式中, α_s 为辐射热吸收系数; I_t 为混凝土表面所接受的太阳辐射强度; β 为总热交换系数, 为对流热交换系数与辐射热交换系数之和; T_w 为空气气温; T 为墩外壁温度; χ 为边界外法线方向。

由式(1)可知, 桥墩混凝土表面温度的直接影响因素是日照、气温和热交换。气温测试相对简单, 易收集, 混凝土表面热交换情况与混凝土材料及空气流动情况相关, 可以根据理论经验进行分析; 日照受地理位置、季节、周围山体和上部结构对桥墩的遮荫等因素影响较大, 最为复杂, 需要解决桥墩能否接受到日照和太阳辐射的强度值 2 个问题。为此, 需要了解太阳与地球的相对位置关系, 进而研究高墩表面的日照问题。

1.2 太阳光线追踪

太阳与地球的相对位置关系由太阳赤纬 δ 和时角 ω 来确定。太阳赤纬确定了地球绕太阳公转的相对位置, 时角确定了地球自转的位置关系^[8]。

$$\delta = 23.45 \sin \left(360 \times \frac{284+n}{365} \right) \quad (2)$$

式中, δ 为太阳赤纬; n 为年序日。

$$\omega = 15(t-12) \quad 0 \leq t < 24 \quad (3)$$

式中, ω 为时角; t 为真太阳时。太阳高度角是太阳入射光线与地平面的夹角。在地平坐标系中, 太阳高度角 h 的计算式为

$$\sin h = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos t \quad 90^\circ \geq h \geq 0^\circ \quad (4)$$

太阳方位角 γ 的计算式为

$$\sin \gamma = \frac{\cos \delta \sin \omega}{\cos h} \quad (5)$$

1.3 太阳辐射强度

太阳辐射采用美国供暖、制冷和空气调节工程师协会推荐的 ASHRAE 晴空模型^[9]。在山区桥梁计算分析中需要研究桥墩温度场的连续变化过程, 所以选用的计算系数是根据我国太阳辐射强度拟合得到的随年序日连续变化的系数。

根据 ASHRAE 晴空模型, 建筑物接收的太阳辐射由直射辐射、天空散射辐射和反射辐射组成。晴天地球表面的太阳辐射强度值^[9]

$$I_{ND} = \frac{A}{\exp(B/\sin h)} C_N \quad (6)$$

式中, I_{ND} 为垂直入射直射太阳辐射强度; A 为大气质量为零时的太阳辐射强度; B 为大气的消光系数; h 为太阳高度角; C_N 为大气清洁度。

入射到非垂直表面的太阳总辐射为^[6]

$$I_t = [\max(\cos \phi, 0) + CF_{us}(\sin h + C)] I_{ND} \quad (7)$$

对于垂直表面, ASHRAE 晴空模型考虑了太阳周围比较明亮的天空区域, 计算公式为^[9]

$$I_t = \left[\max(\cos \phi, 0) + \frac{I_{dv}}{I_{dH}} C + \rho_g (\sin h + C) \right] I_{ND} \quad (8)$$

式中, ϕ 为入射角, 即太阳光线与平面法线间的夹角; C 为水平面上散射辐射与垂直入射直射辐射的比值; F_{us} 是表面与天空之间的角系数; ρ_g 为地面或水平面的反射率; I_t 为总辐射强度; 系数 A 、 B 和 C 的取值可参考文献^[8]计算。

虽然计算太阳直接辐射有较好的理论基础, 但太阳辐射受云量、空气污染等因素的影响, 该计算方法的近似程度较大。对于重要的大型结构物, 最好的方法是进行气象观测, 实测太阳辐射强度值, 但该项工作投入较大, 且时间较长, 可以到就近的气象台站获取。

1.4 遮荫分析

遮荫可降低高墩的温差荷载, 对于高墩桥梁多是建造在深山峡谷中, 需要考虑环境对高墩日照的遮挡情况。高墩的遮荫效果有 2 方面因素, 一个是周围山体, 另一个是上部结构。

桥,位于湖北省恩施自治州建始县,跨度为 116 m+116 m,墩高 108 m,矩形空心截面,壁厚 2~4 m,桥墩壁面编号 1~4 号,见图 4。

主要计算参数取值为:纬度 30.5° ,经度 109.7° ,桥梁为东西走向东偏北 7° ,当地的大气清洁度根据桥址当地实际情况估算取为 0.9,混凝土吸收率和导热系数 λ 根据试验取 0.65、2.32 W/(m·K),采用常风速 1 m/s 计算总热交换系数^[7]。

为了得出该桥梁的典型日照下温度作用,即可能发生的最不利日照温度场分布,在取得环境地形资料的基础上,还就近到建始县气象站查阅了当地 30 a(1990 年—2020 年)的气象资料,重点收集气温、日较差和日照辐射值,并在现场观测高墩的遮荫和温度情况,见图 5(以下均为该截面分析结果),以关键部位的温度测点进行验证。通过日照模型,可以得到桥墩全年的理论日照情况,分析出桥墩各个壁面最不利温差出现日期,但是由于天气的不确定性,控制日期并不一定会出现最不利温差,而是在控制日期前后 1、2 个月都有可能真实出现最不利温差情况,称为典型气象日(典型日)。典型日具有日辐射总量大、气温日较差大、风速小的特征。据收集到的气象资料得知:1993 年 1 月 31 日,当日最高气温 18.0°C ,最低气温 -1.8°C ,日较差 19.8°C ,且为晴天,日照 8.1 h,选为冬季典型日;2019 年 6 月 30 日,当日最高气温 32.1°C ,最低气温 22.0°C ,日较差 10.1°C ,且为晴天,日照 10 h,选为夏季典型日。

2.2 理论模型验证

2.2.1 日照强度理论与实际比较

将冬季和夏季典型日的太阳辐射值(垂直辐射)与模型计算结果比较,见图 6。对比发现理论模拟得到晴天的日照强度,在晴朗日期与气象站实测的辐射强度值具有相似的趋势,但由于受大气透明度、云量等因素影响,实测结果一般小于理论结果。

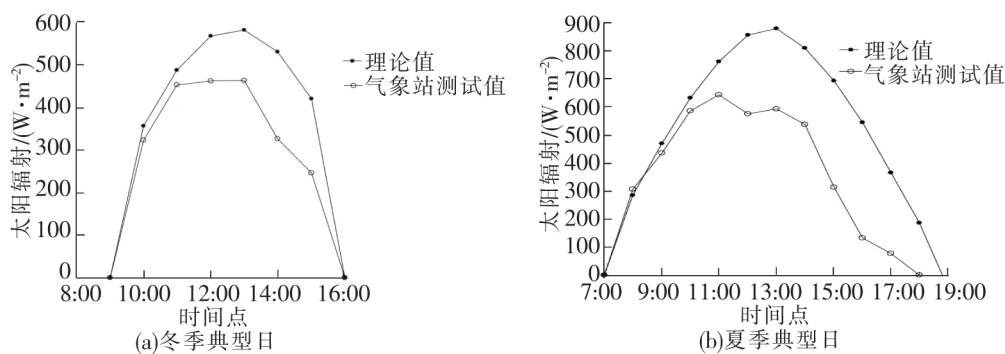


图 6 太阳垂直辐射强度理论值与实测值

根据转换理论将垂直辐射强度分解到桥墩 4 个壁面上,各壁面辐射情况见图 7。太阳东升西落,早上、中午和下午分别照射 2、4、3 号壁面,桥墩 1 号壁面朝北面不受日照,理论计算结果与实际吻合,并且根据建立的桥墩日照模型得到了桥墩遮荫情况,现场测量遮荫效果与理论模型计算也相符,见图 8。

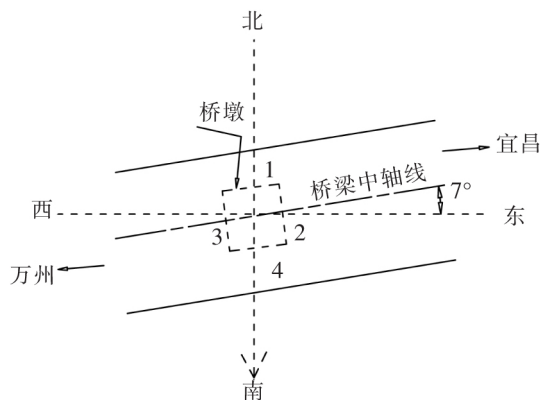


图 4 马水河桥走向

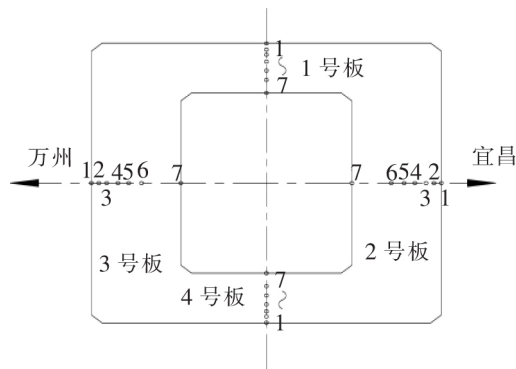


图 5 桥墩温度测点(95 m 高截面)

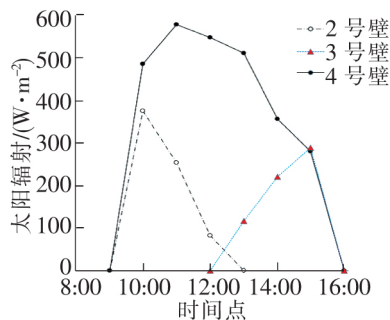


图7 各壁面辐射强度(夏季典型日)



图8 山体遮荫情况(夏季典型日 10:00)

2.2.2 夏季典型日桥墩温度

在夏季典型日,考虑遮荫,根据收集到的夏季典型日气象资料,理论推算计算出桥墩外壁的温度演变情况,与实测值基本一致,见图9、图10。

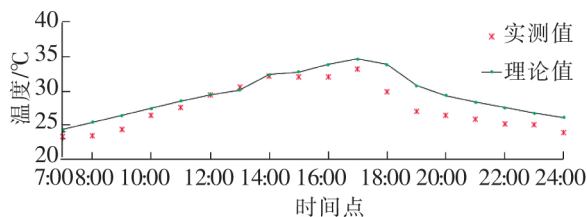


图9 1号壁面温度变化图(夏季典型日)

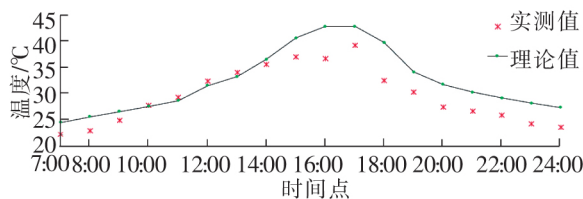


图10 4号壁面温度变化图(夏季典型日)

2.2.3 冬季典型日桥墩温度

由于现场时间有限,并未能在冬季典型日采集到桥墩温度数据,但是可以根据日照及气温等边界条件,利用 Ansys 软件可以计算桥梁的温度场^[10]。将 Ansys 软件和自编软件两者计算结果进行比较。

2种计算方法计算冬季典型日墩身4个外壁面温度24h的变化情况,见图11、图12,均得到13:00时在墩身4号壁板上出现最高温度,此时混凝土内外温差最大。进一步查看该时刻温度沿壁厚的分布情况(图13),可得2种方法计算出的温度分布曲线也十分接近。

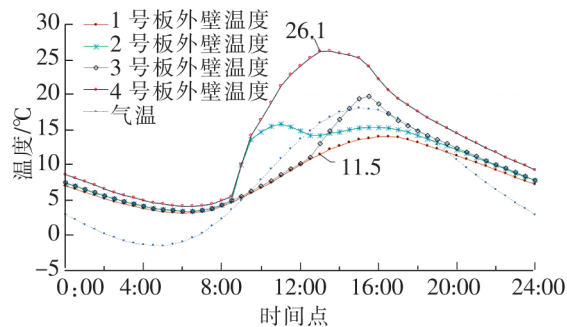


图11 桥墩壁面的温度-时间变化曲线(自编软件)

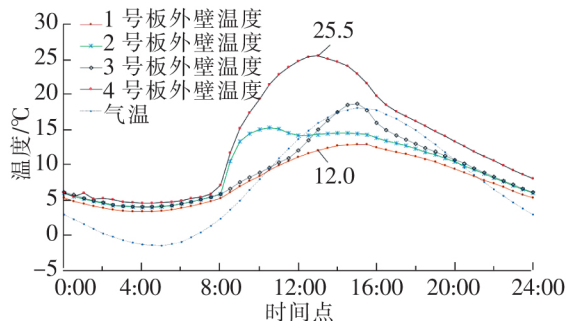


图12 桥墩壁面的温度-时间变化曲线(Ansys软件)

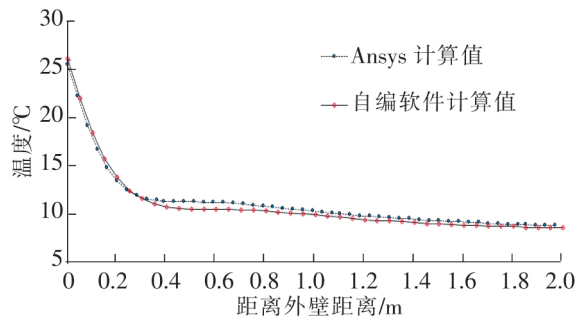


图13 4号壁面温度分布(冬季典型日最大温差)

通过夏季典型日期的日照遮荫情况对比和现场温度测试,冬季典型日理论计算结果与 Ansys 软件计算结果比较,表明采用构造的桥墩日照模型来分析桥墩的温度场是正确有效的。

3 空心墩壁厚对温差分布的影响分析

为了解不同壁厚桥墩在温差分布上的差异,进行拓展研究。具体分析方法是:仍然采用冬季典型日

的温度和日照外界条件^[11],采用不同壁厚(壁厚由 20 cm 至 200 cm 逐渐增厚)的桥墩模型进行计算分析。研究发现由于桥墩壁厚不同,3 号壁板上的最大温差值和最大温差出现时间均有所不同,不同壁厚下的分析结果见图 14、图 15。

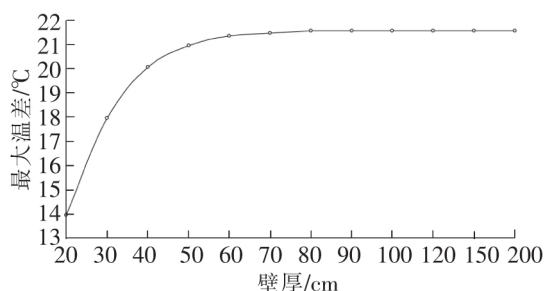


图 14 壁厚与最大温差值的关系

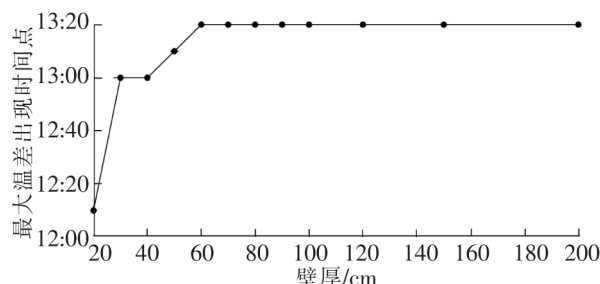


图 15 壁厚与最大温差出现时间

将计算结果按《铁路桥规》的曲线分别对不同壁厚的最大温差分布进行拟合,结果见表 1。

表 1 不同壁厚的最大温差、出现时间和分布

桥墩壁厚/cm	最大温差/°C	出现时间	温度分布拟合曲线
20	13.9	12:10	$13.9e^{-10.5x}$
30	18.0	13:00	$18e^{-7.8x}$
40	20.0	13:00	$20e^{-6.8x}$
50	20.9	13:10	$20.9e^{-6.0x}$
60	21.3	13:20	$21.3e^{-5.8x}$
70	21.4	13:20	$21.4e^{-5.8x}$
80	21.5	13:20	$21.5e^{-5.5x}$
90	21.5	13:20	$21.5e^{-5.5x}$
100	21.5	13:20	$21.5e^{-5.5x}$
120	21.5	13:20	$21.5e^{-5.5x}$
150	21.5	13:20	$21.5e^{-5.5x}$
200	21.5	13:20	$21.5e^{-5.5x}$

由图 14、图 15 和表 1 可以看出,最大温差随壁厚的增加而增大,其出现时间也随壁厚的增加而延后,且均在壁厚大于 80 cm 后趋于稳定,温差分布曲线拟合值 a 的绝对值随壁厚增加逐渐变小,说明温差分布曲线逐渐趋于缓和。

混凝土导热系数小,热传递滞后,且日照时长有限。当厚壁墩(壁厚 >80 cm)混凝土表面温度达到最高时,混凝土内部温度仍然没有变化,此时混凝土内外温差最大。然而对于薄壁墩(壁厚 <30 cm)的情况却不同,薄壁墩面在受太阳辐射时热量能传入混凝土内部,内部温度也随外温的升高而升高,当混凝土表面温度达到最高时刻内外温差却不是最大,因此不同壁厚最大温差的出现时间也不同。壁厚 30~80 cm 混凝土的最大温差和出现最大温差的时间都随壁厚的变化而变化,温差分布曲线也随之变化。

根据得出的规律,考虑日照温差的因素,可以将混凝土壁厚进行简单的划分,见表 2。

表 2 桥墩壁厚的划分

壁厚/cm	≤ 30	30~80	≥ 80
名称	薄壁	中厚壁	厚壁

由以上分析可知,壁厚对空心墩的温差分布有较大影响,不同壁厚温差的分布模式不是单一的。根据表 1 的拟合结果,可知 30 cm 的薄壁板温差分布拟合得出 a 的值为 7.8,这与《铁路桥规》中的箱梁日温差分布吻合。由此可见,《铁路桥规》只局限于壁厚不大的箱梁,并未充分考虑厚壁对温差分布的影响。

4 结语

桥梁的温度及其效应对桥梁结构的影响不容忽视,在大跨度桥梁的建设中,设计、施工控制需要做到精细化,桥梁的温度效应分析必不可少。采用“光线追踪算法”建立了高墩太阳辐射分析模型,研究了混

混凝土空心墩壁厚对日照温差分布的影响,得出以下结论:

- (1)壁厚对空心墩的温差分布有较大影响,温差的分布模式不是单一的。
- (2)混凝土中厚壁墩(30~80 cm),日照温差随壁厚的增加而增加;混凝土厚壁墩(>80 cm)桥墩日照温差不随厚度增加而变化,内部混凝土温度基本不受单日照的影响。
- (3)空心墩的日温差荷载验算,对于混凝土薄壁墩(≤ 30 cm)直接按《铁路桥规》箱梁日温差荷载取值是合适的,但对于中、厚壁(>30 cm)不宜直接采用。

参 考 文 献

- [1]盛兴旺,郑严煌,郑纬奇,等. 基于实时阴影技术的混凝土箱梁竖向温度梯度模式[J]. 华南理工大学学报(自然科学版),2019,48(10):40-47.
- [2]陈彦江,王力波,李勇. 钢-混凝土组合梁桥温度场及温度效应研究[J]. 公路交通科技,2014,31(11):85-91.
- [3]王军文,姚彦强,苏木标. 大跨度箱梁桥温度与混凝土收缩徐变耦合效应分析[J]. 石家庄铁道大学学报(自然科学版),2017,30(3):1-7.
- [4]中华人民共和国交通运输部. JTG D60—2015 公路桥涵设计通用规范[S]. 北京:人民交通出版社,2015.
- [5]国家铁路局. TB 10092—2017 铁路桥涵混凝土结构设计规范[S]. 北京:中国铁道出版社,2016.
- [6]顾斌,高望,谢甫哲,等. 基于历史气象参数的桥梁结构日照温度作用代表值研究[J]. 公路交通科技,2019,36(12):79-86,93.
- [7]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.
- [8]王金平,王军,冯伟,等. 槽式太阳能跟踪控制系统的研制及应用[J]. 农业工程学报,2015,31(2):45-52.
- [9]麦奎斯顿,帕克,斯皮特勒. 供暖、通风及空气调节[M]. 北京:化学工业出版社,2005.
- [10]张振国,鲍海荣,张谦,等. 高速铁路桥梁空心薄壁高墩日照温度效应研究[J]. 现代交通技术,2021,18(2):46-52.
- [11]朱丽杰. 壁厚对双肢薄壁墩温度场及温差效应的影响分析[J]. 工程建设与设计,2016(4):88-90.

Effect of Concrete Hollow Pier Wall Thickness on the Temperature Difference Distribution of Sunlight

Hu Anqing, Ren Donghua

(China Railway Southwest Research Institute, Chengdu 610031, China)

Abstract: The domestic bridge design specification only specifies the temperature difference load of the box girder from sunlight, but lacks of the temperature difference on the bridge pier. In order to obtain the temperature difference load of the concrete hollow pier and the effect of concrete hollow pier wall thickness on the temperature difference distribution, the sunlight analysis model of high pier was constructed according to the astronomical theory light tracking method, where the main factors of the sun radiation, the environment and the upper structure shade are considered. The test validation is performed in the Yi Wan Railway Mashuihe Bridge, and the relationship between the concrete wall thickness and the temperature difference of the sunlight is further analyzed. The results show that the influence of the hollow pier thickness on the temperature difference distribution is large, the distribution mode of the temperature difference is not single. For the concrete pier with the wall thickness of 30~80 cm, the sunlight temperature difference increases with the increase of the wall thickness. When the wall thickness of the concrete pier is above 80 cm, the temperature difference of the pier changed little with the increase in thickness, and the internal concrete temperature is not affected by the sunlight. For the hollow pier daily temperature difference load verification, the concrete hollow pier with the wall thickness less than 30 cm can directly use the value of temperature difference specified in 'Code for Design on Railway Bridge and Culvert'. For the other concrete hollow pier with the wall thickness above 30 cm, the temperature difference should not directly use the values in the code.

Key words: concrete; hollow pier; solar radiation; sunlight temperature difference