

钢-混凝土双面组合箱梁日照温度场研究

苏靖海, 段树金

(石家庄铁道大学 土木工程学院 河北 石家庄 050043)

摘要: 自然环境中的钢-混凝土双面组合箱梁受到日照作用影响,在梁体内部会产生温度应力。对某地的日气温变化及日照辐射量进行计算;利用有限元软件 ANSYS 进行仿真分析,计算双面组合箱梁截面在日照条件下的温度分布,对比分析正负弯矩区截面温度分布的异同,得到组合梁表面日温度变化规律;选取温差最大时的数值结果进行分析,用多项式拟合沿梁截面高度温度梯度分布。

关键词: 钢-混凝土双面组合箱梁; 太阳辐射; 温度分布; 温度梯度

中图分类号: TU398+.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 2095-0373(2012)02-0006-06

0 引言

钢-混凝土双面连续组合梁是一种新型组合结构,其负弯矩区截面一般由混凝土顶板、钢腹板、混凝土底板以及栓钉组^[1-2],目前应用尚不广泛,也未发现有关双面组合梁温度分布和温度效应方面的研究文献。组合箱梁位于自然环境下,始终与自然界进行着热交换作用,受到不同环境因素的影响,其内部的应力分布也在随之变化,导致梁体产生开裂、冷脆、应力集中等现象,直接影响着桥梁的使用状态,可见温度分布研究对梁体的正常使用与维护作用非常关键。计算某地一天中的气温变化与日照辐射量;通过平面温度场有限元方法计算双面组合箱梁正、负弯矩区截面的温度分布状况;拟合沿梁截面高度温度梯度计算公式。

1 平面温度场的有限元计算与分析

1.1 日气温及太阳辐射强度的计算

某钢-混凝土双面连续组合箱梁桥位于经度为 112.5° 纬度为 28.3° 梁体纵向为正南北方向。选取 7 月 21 日从 6:00 至 18:00 之间的梁体周围温度因素的变化进行研究。当天温度为 25~43.6℃,6:00 至 18:00 的环境温度如表 1。

表 1 不同时刻的环境温度 ℃

| 时间 | 6:00 | 7:00 | 8:00 | 9:00 | 10:00 | 11:00 | 12:00 | 13:00 | 14:00 | 15:00 | 16:00 | 17:00 | 18:00 |
|----|-------|-------|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 温度 | 27.96 | 29.00 | 30.21 | 31.5 | 32.79 | 34.00 | 35.04 | 35.83 | 36.33 | 36.50 | 36.33 | 35.83 | 35.04 |

Elbadry 在 1983 年提出日气温变化近似用正弦函数表示

$$T_a = \frac{1}{2}(T_{\max} - T_{\min}) \sin 15(t - t_0) + \frac{1}{2}(T_{\max} + T_{\min}) \quad (1)$$

式中, T_{\max} 和 T_{\min} 分别为一天之中的最高和最低温度; t_0 为初相位,计算时一般选取 t_0 为 9:00。

太阳辐射由太阳直射辐射、空气散射辐射和地面反射辐射组成。太阳辐射以电磁波形式进入大气层后,一部分被大气层吸收,一部分由于受大气分子、水蒸汽、汽溶胶等的散射后,发散到各个方向,其余部分到达地面,这部分称为太阳直接辐射;被散射的部分中又有一部分从天穹落回地面称为空气散射辐射;

收稿日期: 2011-12-30

作者简介: 苏靖海 男 1987 年出生 硕士研究生

基金项目: 河北省科技支撑计划(09215625D)

太阳直接辐射和大气散射辐射的综合称为总辐射。同时,太阳直接辐射和大气散射辐射有部分被地面反射^[3]。长波辐射(即地面反射)主要是热辐射,其强度比短波辐射小很多,是夜间辐射的主要形式。通过对太阳高度角、赤纬角、太阳时角、太阳方位角等天文参数的计算,得出 6:00 至 18:00 的太阳辐射的变化量^[4]。

组合箱梁不同位置的外表面受到太阳辐射不同的影响。本文模型顶板上表面受到太阳直射和空气散射的影响;腹板外表面受到空气散射和地面反射的影响;翼缘板和底板的下表面主要受到地面反射辐射。如式(2)至式(4)所示。

顶板上表面

$$I = I_m \sin h + I_d \quad (2)$$

腹板外表面

$$I = I_d/2 + \rho^* (I_m + I_d) / 2 \quad (3)$$

翼缘板下表面和底板外表面

$$I = I_f = \rho^* (I_m + I_d) \quad (4)$$

式中, I_m 、 I_d 、 I_f 分别为斜面受到的太阳直射、空气散射和地面反射强度; ρ^* 为地面反射系数,一般取 0.2。

箱梁截面不同位置所受太阳辐射量如表 2 所示。

| | | | | | | | W/m ² |
|-------|---------|-------|---------|---------|---------|------------|------------------|
| 时间 | 直射量 | 散射量 | 总辐射量 | 水平面直射量 | 顶板辐射量 | 翼板下侧和底板辐射量 | 腹板辐射量 |
| 6:00 | 269.9 | 64.8 | 334.6 | 44.7 | 109.4 | 66.9 | 65.8 |
| 7:00 | 661.1 | 91.7 | 752.8 | 250.6 | 342.3 | 150.6 | 121.1 |
| 8:00 | 839.7 | 100.5 | 940.2 | 485.4 | 585.9 | 188.0 | 144.3 |
| 9:00 | 931.7 | 103.9 | 1 035.6 | 697.8 | 801.7 | 207.1 | 155.5 |
| 10:00 | 981.8 | 105.3 | 1 087.1 | 864.1 | 969.4 | 217.4 | 161.4 |
| 11:00 | 1 007.3 | 105.8 | 1 113.1 | 969.5 | 1 075.3 | 222.6 | 164.2 |
| 12:00 | 1 015.2 | 105.9 | 1 121.1 | 1 005.6 | 1 111.6 | 224.2 | 165.1 |
| 13:00 | 1 007.3 | 105.8 | 1 113.1 | 969.5 | 1 075.3 | 222.6 | 164.2 |
| 14:00 | 981.8 | 105.3 | 1 087.1 | 864.1 | 969.4 | 217.4 | 161.4 |
| 15:00 | 931.7 | 103.9 | 1 035.6 | 697.8 | 801.7 | 207.1 | 155.5 |
| 16:00 | 839.7 | 100.5 | 940.2 | 485.4 | 585.9 | 188.0 | 144.3 |
| 17:00 | 661.1 | 91.7 | 752.8 | 250.6 | 342.3 | 150.6 | 121.1 |
| 18:00 | 269.9 | 64.8 | 334.6 | 44.7 | 109.4 | 66.9 | 65.8 |

1.2 组合梁截面的温度分布

采用 ANSYS10.0 中的 PLANE55 进行瞬态热分析。PLANE55 为二维热实体四节点单元,具有热传导能力,可用于平面或者轴对称环单元。

为了解决箱内热源问题,将箱内空气作为一种物质,根据实际空气情况,赋予材料属性后,加入到模型中,并假定箱内空气没有流动且与外界空气隔绝,即与外界没有热交换。空气密度为 1.177 4 kg/m³,导热系数为 0.023 W/(m·K),比热容为 1.4 J/(g·K)。

阴影长度与太阳方位、组合梁方位和顶板的外伸悬臂板长度有关。钢腹板大部分时间位于阴影中,所以忽略钢梁受到的太阳直射辐射作用。

考虑热传导、太阳辐射、热对流对组合箱梁的影响,对组合箱梁的不同位置施加不同的温度荷载。温度从 6:00 至 18:00 不断变化,是一个连续过程,故加载方式采用斜坡荷载。采用完全法进行计算,共分为 13 个荷载步,每个荷载步的长度为 1 h,每个荷载步又分为 120 个荷载子步。

假设 6:00 时,模型处于一个均布温度场中,其大小与外界温度相同,为表 1 中的计算初始值为 27.96 ℃。风速为 2 m/s,可得混凝土表面与钢梁表面综合换热系数 $h_{zh} = 18.5$ W/(m²·K), $h_{zg} = 18.1$ W/(m²·K)。

通过 ANSYS 计算可以得到 6:00 至 18:00 的温度分布变化情况,12:00 和 14:00 时负弯矩区截面温度分布如图 1 所示,由此可知:

(1) 由于有混凝土翼板的遮挡,腹板无法接收到太阳直接辐射,只有空气散射辐射和地面反射辐射,

所以东西两腹板所受温度荷载基本相同。由于钢腹板导热系数较大,所以不同时刻的钢腹板温度分布较均匀。

(2) 一天之中太阳直射量、空气散射量、总辐射量最大时刻均为 12:00,而一天中温度最高时刻是 15:00。根据温度分布图可知在 14:00 组合梁负弯矩区截面的最大温度为 55.42 °C,说明箱梁的温度取决于两者的共同作用。

(3) 混凝土内外表面温差相对较大。尤其是混凝土顶板,由于太阳直射量变化的范围很大,对混凝土表面温度的影响相当明显。混凝土的导热系数较小,厚度相对较大,导致混凝土顶板上下表面温度分布不均匀,由此会导致较大的温度梯度。混凝土底板只受到空气散射辐射和地面反射辐射的影响,所以温度变化不如混凝土顶板剧烈,温度梯度也较小。

(4) 箱梁混凝土板内表面温度明显滞后于外表面混凝土的温度,即混凝土板温度场变化规律的时间滞后性。一天中混凝土内外表面达到最高温度的时间也是不同的。

12:00 和 14:00 时正弯矩区截面温度分布如图 2 所示,与负弯矩区非常相似;主要不同之处在于正弯矩区钢底板温度分布较均匀,而负弯矩区混凝土底板有明显的温度梯度。

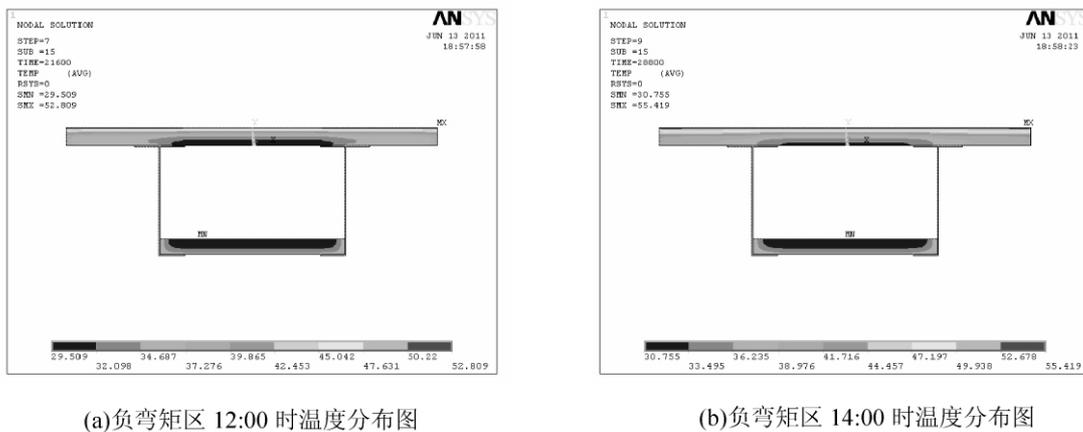


图 1 负弯矩区温度分布云图

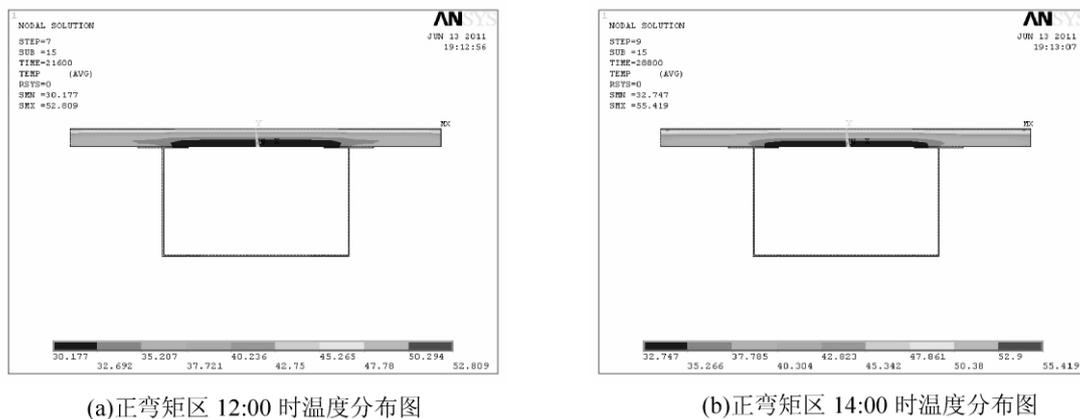


图 2 正弯矩区温度分布云图

1.3 温度变化规律

应用 ANSYS10.0 软件提取不同节点在不同时刻的温度值,从而得到组合梁在不同时刻的温度变化规律。

选取混凝土顶板中间位置(即 $x = 0$ 处)上下表面的两点进行分析。混凝土顶板受到太阳直射辐射的影响温度变化较大,如图 3 和图 4 所示。正负弯矩区混凝土顶板上表面变化幅度较大,在 14:00 达到最高温度 54.18 °C。由于混凝土板下表面没有太阳辐射的作用,其温度仅靠混凝土板热传递和箱内空气对混凝土表面的热对流,温度变化缓慢,且相对滞后,温度单调上升,在 18:00 负弯矩区达到最高温度 38.36

℃, 正弯矩区的最高温度为 38.37 ℃。混凝土顶板最高温差均出现在 13:00, 负弯矩区差值为 22.28 ℃, 正弯矩区差值为 22.27 ℃。由此可知, 正负弯矩区的混凝土顶板的温度变化基本相同。空气导热系数很小, 所以混凝土底板的的存在对混凝土顶板整体的温度分布影响不大。

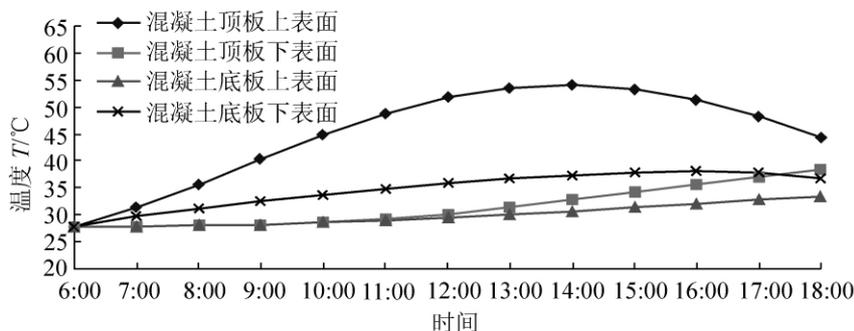


图3 负弯矩区混凝土板温度对比

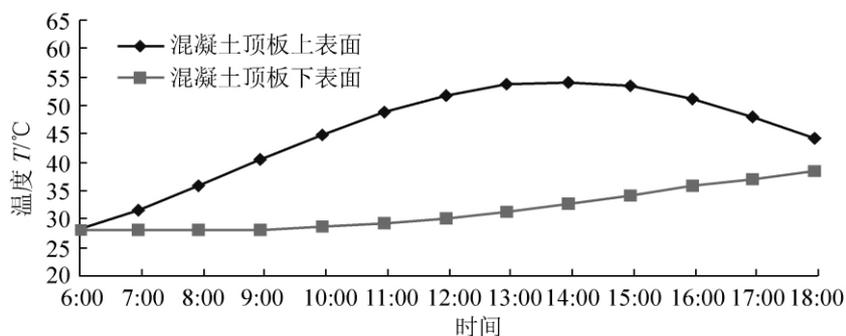


图4 正弯矩区混凝土板温度对比

混凝土底板由于只受到空气散射辐射与大地反射辐射的影响。相对于混凝土顶板而言, 其温度变化速率小, 变化范围也较小, 温度分布较均匀。选取混凝土底板中间位置(即 $x = 0$ 处)上下表面的两点进行分析。混凝土底板下表面在 16:00 达到最高温度 38.04 ℃。与混凝土顶板下表面相同, 混凝土底板上表面温度变化规律也是单调上升, 在 18:00 达到最大温度 33.35 ℃。

钢腹板材料导热系数较大, 厚度较小, 所以其内外温度分布较均匀, 温度差距不大, 可以忽略不计。

2 温度梯度曲线的确定

选取混凝土顶、底板中间位置(即 $x = 0$ 处)和钢腹板外侧轴线的节点温度进行分析。以混凝土顶板下表面为坐标原点, y 向上为正, 向下为负。

负弯矩区竖向温度分布如图 5 所示。混凝土顶板所受到的辐射变化幅度较大, 环境影响明显, 上表面温度最高; 沿高度方向, 温度逐渐降低, 温度梯度逐渐减小。当高度大于 0.1 m 时, 温度变化相对剧烈; 当高度小于 0.1 m 时, 温度变化相对稳定。钢腹板中, 与混凝土板相接触部位的温度较低, 温度最低点位于 $y = 0$ m 处, 钢腹板最大温差为 4.93 ℃。混凝土底板下表面温度最高, 随高度增加, 温度逐渐降低, 温度梯度逐渐减小, 最大温差为 6.67 ℃, 远小于混凝土顶板。

正弯矩区的混凝土顶板的温度分布规律与负弯矩区混凝土顶板基本相同, 如图 6 所示。由于底板为钢板, 钢腹板的温度分布相对均匀, 温度最低点位于 $y = 0$ m 处, 最大温差为 6.76 ℃。但是从 $y = -0.735$ m 到 $y = -1.8$ m 之间的最大温差只有 1.855 ℃。

对实际工程的计算和研究, 往往采用最不利荷载对结构或者构件进行加载分析。采取温度分布最不均匀的时刻 13:00 进行分析和计算。通过对截面竖向温差分布进行分析, 提取数据, 并采用 MATLAB 软件对温度梯度进行函数拟合。选择拟合的函数类型为多项式函数, 混凝土顶板与混凝土底板采用二次多项式函数, 钢腹板采用四次多项式函数。其温度梯度函数如下:

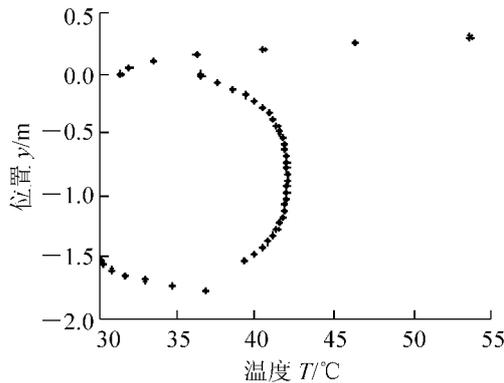


图 5 负弯矩区竖向温度分布

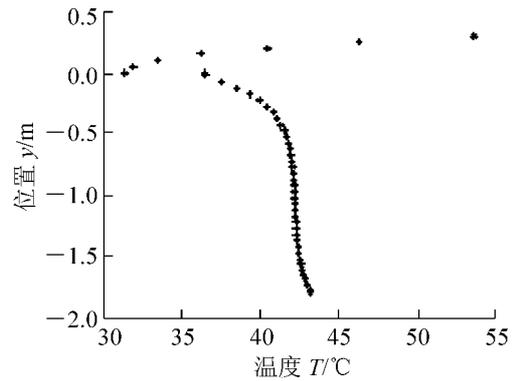


图 6 正弯矩区竖向温度分布

负弯矩区

$$\begin{cases} \text{混凝土顶板: } T_y = 0.1530 - 10.2379y + 278.5762y^2 \\ \text{钢腹板: } T_y = 4.7645 - 23.5609y - 36.7356y^2 - 26.8410y^3 - 7.861y^4 \\ \text{混凝土底板: } T_y = 263.8866 + 345.8542y + 112.7931y^2 \end{cases} \quad (5)$$

正弯矩区

$$\begin{cases} \text{混凝土顶板: } T_y = 0.1525 - 10.2857y + 278.6571y^2 \\ \text{钢腹板: } T_y = 4.8770 - 21.0431y - 27.1069y^2 - 14.7432y^3 - 2.7752y^4 \end{cases} \quad (6)$$

根据拟合正负弯矩区截面竖向温度梯度函数,可以得到温度梯度曲线,如图 7 和图 8 所示。

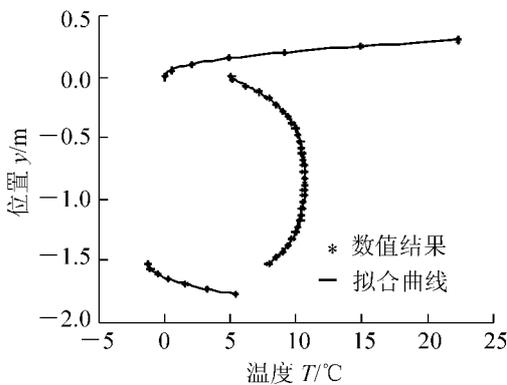


图 7 负弯矩区竖向温度梯度曲线

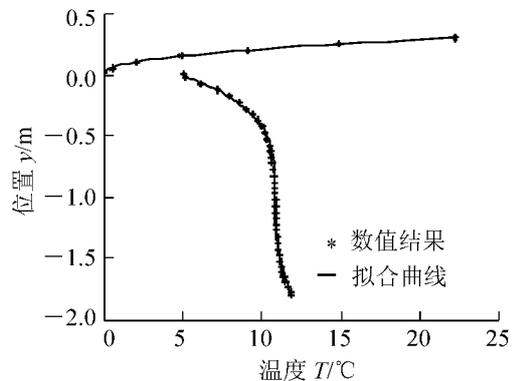


图 8 正弯矩区竖向温度梯度曲线

3 结束语

计算得到了某地不同时刻太阳的直射辐射强度、散射辐射强度和地面反射辐射强度;分析得到了日照条件下双面组合梁正负弯矩区截面的温度分布和组合梁表面日温度变化规律,正负弯矩区的混凝土顶板温度分布基本相同,负弯矩区混凝土底板的温度梯度明显小于混凝土顶板;用多项式函数拟合沿梁截面高度温度梯度的数值分析结果,吻合良好。双面组合梁日照温度效应的计算与研究将另文给出。

参 考 文 献

- [1]段树金,霍军会,周庆东.钢-混凝土双面组合梁极限承载力计算方法研究[J].石家庄铁道学院学报,2007,20(4):1-5.
- [2]Reiner Saul. Bridges with double composite action[J]. Structural Engineering International, 1996(1):32-36.
- [3]宋存牛.层状路面结构体非线性温度场研究概况[J].公路,2005(1):49-53.
- [4]潘永杰.混凝土桥梁温度场仿真分析[D].石家庄:石家庄铁道学院土木工程分院,2007.

(下转第 80 页)

地区 ≥ 600 人/ km^2 , 人均 GDP 东部地区 $\geq 60\ 000$ 元, 中部地区 $\geq 35\ 000$ 元, 西部地区 $\geq 25\ 000$ 元。城际铁路作为区域内大运量快速轨道客运系统, 在直接为旅客提供服务、满足旅客出行需求的同时, 还具有优化区域路网结构、拉动地区经济发展、推动区域一体化进程、改善用地形态、节能减排等一系列巨大的社会效益。城际铁路的规划建设在参考建设条件指标的同时, 也应当综合考虑实际情况和需求预测, 做出合理的分析。

参 考 文 献

- [1]徐浪. 描述统计学[M]. 成都: 西南财经大学出版社, 2001.
 [2]韩兆洲, 赵滨. 数理统计学和社会经济统计学的比较[J]. 统计与决策, 2007, 235(4): 127-128.
 [3]本书编委会. 铁路建设项目经济评价方法与参数及案例实务全书[M]. 北京: 中国建设出版社, 2006.
 [4]国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2004—2009.
 [5]国家统计局. 中国城市统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2004—2009.

Research on Prerequisite to Investment in Inter-city Railway Based on Financial Analysis

Luo Xia , Lv Ming

(School of Transportation & Logistics , Southwest Jiaotong University , Chengdu 610031 , China)

Abstract: The purpose of this paper is to study the prerequisite to investment in inter-city railway. The author uses a statistic analysis method based on descriptive statistics to summarize a number of socio-economic indexes in the district along the 26 inter-city railways built or under construction in China , and then explores reference indexes that effect on inter-city railway construction condition by Cluster Analysis. Finally , the author puts forward a recommended prerequisite to investment inter-city railway , expressed in intensity of population and GDP per capita.

Key words: inter-city railway; construction condition; cluster analysis; descriptive statistics

(责任编辑 刘宪福)

(上接第 10 页)

Study of Temperature Field of Double Steel-concrete Composite Box Girder by Solar Radiation

Su Jinghai , Duan Shujin

(School of Civil Engineering , Shijiazhuang Tiedao University , Shijiazhuang 050043 , China)

Abstract: Temperature stresses will occur in the double steel-concrete composite box girder due to the sunshine. In this paper , the local temperature and the solar radiation intensity are deduced. The temperature field under the sunlight is simulated for both positive and negative moment zone section of the three span continuous double steel-concrete composite box girder by the software ANSYS. The temperature gradient curves along the section height are fitted by polynomial equations based on the numerical data of the maximum temperature difference with a good agreement.

Key words: double steel-concrete composite box girder; solar radiation; temperature distribution; temperature gradient

(责任编辑 车轩玉)