

考虑沥青路面影响的钢箱梁桥日照温度场数值模拟

谢旭, 张海萍, 肖新辉

(长沙理工大学 土木与建筑学院, 湖南 长沙 410004)

摘要: 为了研究带铺装层的钢箱梁日照温度场分布规律, 开展日照温度作用下受改性沥青玛蹄脂路面影响的钢箱梁温度场数值模拟, 根据传热学和有限元基本理论, 综合考虑辐射、对流、传导等热交换对温度场的影响, 建立某悬索桥有沥青砼铺装层钢箱梁有限元模型, 对该梁段日照温度场进行仿真计算分析, 拟合钢箱梁的竖向温度梯度函数。结果表明, 数值分析结果与实测数据吻合, 铺装层对钢箱梁温度作用具有滞后效应, 利用气象资料及经验公式得到的太阳辐射值对其温度场进行仿真分析可行。

关键词: 桥梁; 日照温度场; 沥青砼铺装层; 钢箱梁; 仿真计算

中图分类号: U442.5

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2017)05-0131-04

日照温度作用是影响钢结构桥梁内力的一种重要作用。JTG D60—2015《公路桥涵设计通用规范》增加了对钢箱梁温度梯度取值的规定, 在大跨度钢箱梁设计中温度梯度取值和温度应力分析主要参考英国 BS5400 规范。随着钢箱梁在大跨度桥梁结构中应用的日益广泛, 对钢箱梁温度场的准确模拟更加迫切。

目前, 砼箱梁温度场研究成果相对较多, 而钢箱梁温度场的研究相对较少。张玉平等通过建立无铺装层钢箱梁有限元模型计算其日照温度场, 分析了吸收率、风速、辐射率对钢箱梁温度分布的影响程度, 在现场实测数据的基础上拟合了钢箱梁日照温度梯度, 并验证了拟合曲线的适用性。缪长青在运营期大跨度钢箱梁结构实测温度场的基础上, 分析了日照作用下钢箱梁温度场的分布特征与变化规律。王高新等基于健康监测系统对温度的监测结果, 对扁平钢箱梁竖向和横向温差进行分析并建立了概率分布模型。吴咏双分析了材料、环境参数及沥青铺装层厚度对箱形组合梁日照温度场的影响。该文以某大跨度悬索桥带沥青砼铺装层的钢箱梁温度场为研究对象, 开展日照温度场数值模拟, 分析温度场的分布规律, 拟合带沥青砼铺装层钢箱梁的竖向温度梯度。

1 温度场的有限元分析理论

1.1 温度场有限元理论

桥梁结构的温度场是一个三维不稳定温度场, 由于钢箱梁沿桥梁纵向的热流可忽略不计, 为简化

计算, 将三维温度场转换为二维温度场。由傅丽叶热传导理论, 二维不稳定热传导方程为:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) = c \rho \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

式中: λ 为钢板的导热系数 [$\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$]; T 为某时刻体内各点的温度; ρ 为钢板容重 (kg/m^3); c 为钢板比热 [$\text{J}/(\text{Kg} \cdot ^\circ\text{C})$]。

温度场计算的实质是热传导方程在特定边界条件和初始条件下的求解。初始条件是在桥梁内部温度开始变化的时刻物体整个区域的温度场分布, 可表示为:

$$T = f(x, y, t) |_{t=0} = \varphi(x, y) \quad (2)$$

温度场四周表面的换热条件称为温度场的边界条件。桥梁结构在自然环境条件变化时其边界面上的热交换状况有与空气的对流换热、辐射换热及吸收太阳辐射能, 其热流遵循如下方程:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = q_s + q_c + q_l \quad (3)$$

式中: $\partial T / \partial n$ 为温度梯度; q_s 为结构表面吸收的太阳总辐射能; q_c 为对流换热热流密度; q_l 为桥梁表面温度与大气环境温度辐射换热。

在已知空气温度、风速及计算得到的太阳辐射强度的前提下, 可采用有限元方法求解式(3)。

1.2 太阳辐射强度

太阳辐射是使钢箱梁升温的重要因素。太阳对地面物体的辐射作用分为太阳直接辐射和散射辐射两类, 直接辐射直接投射到地面上, 散射辐射因通过大气时受到散射而以散射的形式达到地面。垂直于

太阳直接辐射方向的平面上的直接辐射强度为:

$$I_{DN} = I_0 \frac{\sinh}{\sinh + (1 - p)/p} \quad (4)$$

$$\sinh = \cos\phi \cos\delta \cos\omega + \sin\phi \sin\delta \quad (5)$$

式中: I_0 为太阳常数, 为 $1\,353\text{ W/m}^2$; h 为太阳高度角; p 为大气透明度系数; ϕ 为当地的地理纬度; δ 为太阳赤纬角水平面的天空散射辐射强度。

$$I_{DH} = 0.5 I_0 \sinh \frac{1 - p^m}{1 - 1.4 \ln p} \quad (6)$$

当倾斜面与水平面呈 θ 角时, 倾斜面的天空散射辐射强度为:

$$I_{D\theta} = I_{DH} (0.5 + 0.5 \cos\theta) \quad (7)$$

由于缺少桥址处太阳辐射强度的气象资料, 按式(4)~(7)计算箱梁各边界的太阳辐射强度, 结果见表1。

表1 钢箱梁各边界各时刻太阳辐射强度 I

时刻	太阳辐射强度 $I/$ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$)		时刻	太阳辐射强度 $I/$ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$)	
	铺装层	底板		铺装层	底板
6:00	12	0	13:00	986	101
7:00	95	8	14:00	951	98
8:00	291	28	15:00	852	87
9:00	508	51	16:00	697	71
10:00	695	71	17:00	503	50
11:00	851	87	18:00	293	28
12:00	950	98			

2 日照温度场模拟方法

基本的热量传递方式有热传导、热对流和热辐射3种, 将3种荷载等效为对流来代替, 对流换热系数计算公式为:

$$h_r = c_s \epsilon [(T^* + T_a)^2 - (T^* + T_s)^2] (2T^* + T_s + T_a) \quad (8)$$

$$h = h_r + h_c \quad (9)$$

由于 ANSYS 只能以最后施加的面荷载进行计算, 太阳辐射强度不能以热流密度来施加, 而应把太阳辐射引起的热流密度换算成温度荷载的形式。计算方法为:

$$T_{sa} = T_a + \alpha_t I / h \quad (10)$$

日照温度场模拟方法的计算步骤: 1) 由桥址处风速按文献[2]中给出的固体在空气中的换热系数进行线性插值, 得到各时刻箱梁外表面对流换热系数。由式(8)、式(9)计算得到各时刻各边界面的综合换热系数 h ; 2) 由式(4)~(7)计算得到各时刻各边界面受太阳辐射值; 3) 由式(10)计算得到各边界面的综合温度; 4) 将综合换热系数和综合温度输入有限元模型进行瞬态温度场分析。

3 工程实例

3.1 工程背景

某大跨度悬索桥的主梁采用钢箱梁, 全桥共分65个梁段, 标准长度为12.8 m, 主梁高2.7 m, 顶板厚16 mm, 底板厚10 mm, 桥面铺装层65 mm(35 mm 改性沥青玛蹄脂碎石 SMA-10+30 mm 浇筑式沥青砼 GA-10)。在主梁跨中位置布置15个结构温度监测点, 分别用 T1~T15 表示; 沥青铺装层表面布置 T16、T17、T18 3个温度测点(见图1)。

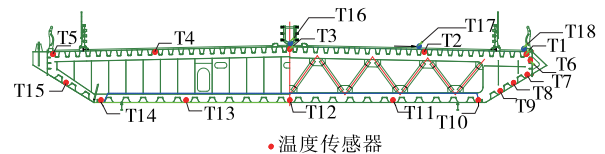


图1 钢箱梁温度测点布置

2014年8月4日6:00—18:00 桥址处环境温度及风速见表2。

3.2 计算模型

采用 ANSYS 对沥青砼铺装层钢箱梁温度场进

表2 桥址处各时刻实测风速及温度

时刻	梁外温度/ $^{\circ}\text{C}$	梁内温度/ $^{\circ}\text{C}$	风速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	时刻	梁外温度/ $^{\circ}\text{C}$	梁内温度/ $^{\circ}\text{C}$	风速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
6:00	26.6	30.7	0.1	13:00	34.0	41.1	2.8
7:00	26.8	29.9	0.4	14:00	34.6	43.5	1.4
8:00	27.3	29.4	0.5	15:00	35.6	44.4	2.8
9:00	28.2	30.2	0.3	16:00	35.8	45.0	2.2
10:00	30.1	31.7	2.0	17:00	36.2	45.4	0.8
11:00	31.5	33.8	3.2	18:00	35.6	45.4	0.2
12:00	32.9	37.6	2.6				

行仿真分析。根据历史气象数据,8 月为该桥所在地区一年中较热的时间段,故计算时间选为 2014 年 8 月 4 日 6:00—18:00。以三维热壳单元 Shell57 模拟薄壁钢板,以具有 3 个方向热传导能力的三维实体单元 Solid70 模拟沥青砼桥面铺装层,材料的物理参数见表 3。

表 3 材料的物理参数

材料	密度 $\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	比热 $c / [\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}]$	导热系数 $k / [\text{W} \cdot (\text{m} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}]$	吸收率 α	辐射率 ϵ
钢材	7 854	434	60.5	0.82	0.60
SMA-10	2 400	957	1.31	0.95	0.95
GA-10	2 050	1 179	1.34	—	0.95

文献[10]采用风速变化的热交换系数的日变化曲线和内插法求得对应风速的换热系数。考虑到防护栏和防护网等设施的阻拦作用,这里将桥面风速按 0.75 折减系数对实测风速进行折减,计算得到综合换热系数(见表 4)。各边界面不同时刻的综合气温见表 5。

表 4 箱梁各边界综合换热系数

时刻	综合换热系数 $h / [\text{W} \cdot (\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})^{-1}]$		时刻	综合换热系数 $h / [\text{W} \cdot (\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})^{-1}]$	
	桥面	其他		桥面	其他
6:00	12.4	9.8	13:00	20.4	20.4
7:00	13.3	10.9	14:00	19.8	14.9
8:00	13.6	11.4	15:00	16.3	20.4
9:00	13.6	10.6	16:00	16.8	18.0
10:00	18.0	17.3	17:00	14.5	12.5
11:00	19.8	22.0	18:00	12.7	10.2
12:00	21.6	19.6			

注:其他是指钢箱梁腹板和底板。

表 5 各边界面不同时刻的综合气温

时刻	综合气温/ $^\circ\text{C}$		时刻	综合气温/ $^\circ\text{C}$	
	铺装层	底板		铺装层	底板
6:00	27.4	26.6	13:00	75.1	38.1
7:00	32.8	27.4	14:00	75.4	38.7
8:00	45.5	29.3	15:00	80.1	40.4
9:00	59.5	31.9	16:00	71.0	39.5
10:00	62.9	33.5	17:00	65.7	39.5
11:00	68.0	35.1	18:00	55.2	37.9
12:00	70.4	36.6			

选择一段 12.8 m×14.8 m 钢箱梁,按实际尺寸建立有限元模型(见图 2)。将热辐射、对流、太阳辐射强度均用对流代替进行施加,即将综合气温 t 、综合换热系数 h 分别施加在钢箱梁节段模型上。分成 13 个荷载步施加温度荷载,荷载步之间的温度荷载和换热系数使用 Table 数组定义进行计算。

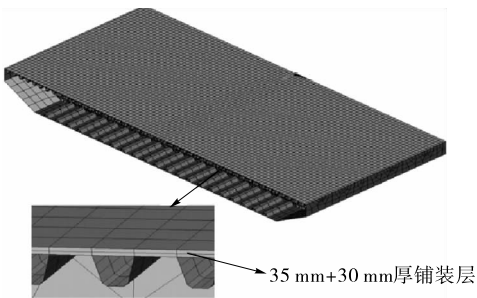


图 2 钢箱梁有限元模型

3.3 日照温度场分析结果

图 3 为 17:00 时箱梁的温度场分布。为验证有限元分析的精确性,将测点 T1、T3、T4、T5、T8、T11、T15 的实测值与计算值进行比较,结果见图 4。

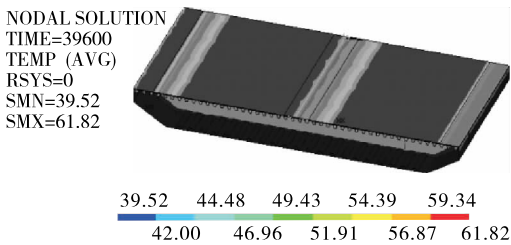


图 3 箱梁温度场分布云图(单位: $^\circ\text{C}$)

由图 4 可知:钢箱梁顶板、腹板、底板不同测点的计算值和实测值差值最大不超过 2.3 $^\circ\text{C}$,变化趋势基本一致。说明利用气象资料及相关计算数据对带沥青砼铺装层扁平钢箱梁进行日照温度场仿真分析能得到满足工程应用的结果。

提取不同时间温度场分布,白天主要时刻箱梁横截面 1/4 处竖向温度分布见图 5,沥青砼铺装层表面 T16、T17、T18 处温度时程曲线见图 6。

由图 4~6 可知:1) 在日照作用下,白天铺装层的温度变化较大,达 37.8 $^\circ\text{C}$;相对于顶板,底板和腹板的温度变化相对较小,且较缓慢。2) 箱梁结构竖向温差最大为 16.8 $^\circ\text{C}$,大约在 17:00 时出现。3) 在防护栏等设施的遮挡作用下,铺装层横向出现温差,

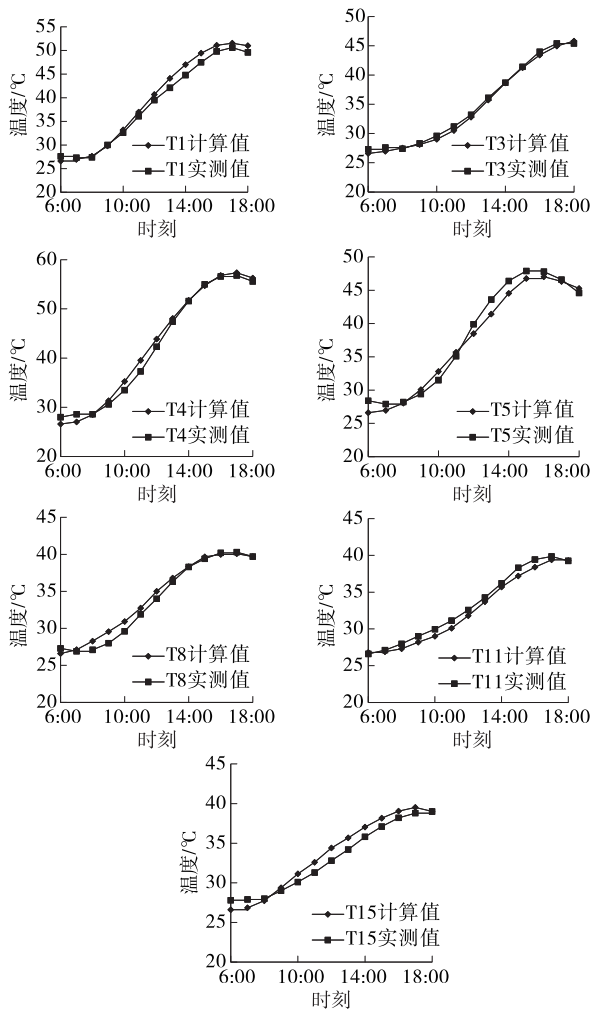


图4 各时刻实测温度与计算温度比较

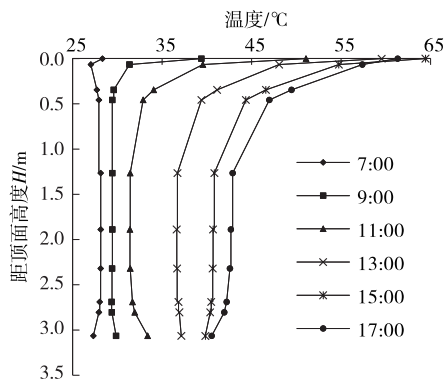


图5 箱梁截面竖向温度分布曲线

最大为 17.1°C , 大约在 16:00 时出现, 钢箱梁顶板横向最大温差为 13.5°C 。4) 沥青砼的导热性能差, 铺装层顶面与钢箱梁顶面温差在 12:00 时最大, 达 11.6°C , 铺装层温度在 15:00 时左右达到峰值, 钢箱梁顶面在 17:00 时左右达到峰值, 表现出明显的滞后性。

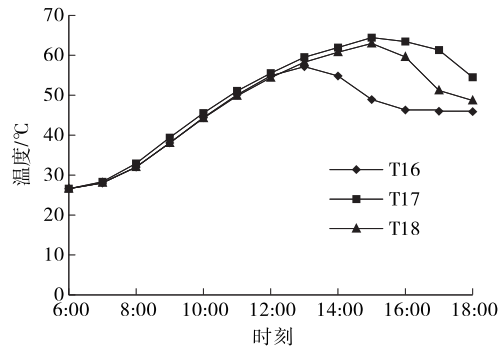


图6 铺装层顶面不同节点温度时程曲线

3.4 温度梯度拟合

根据钢材的导热性能, 在距离顶板 1 m 范围内日照温度场沿梁高方向的分布基本符合指数分布, 在距离顶板 1 m 范围以外近似服从线性分布。因此, 距钢箱梁顶板 1 m 范围内按式 (11) 拟合竖向温度梯度模式, 1 m 范围以外按线性拟合。

$$T_H = (T_1 - T_2)e^{(-aH)} + T_2 \quad (11)$$

式中: T_1 、 T_2 为日照温度梯度计算温度基数; a 为日照温度梯度计算参数。

根据最小二乘法原理, 利用 MATLAB 对当天 17:00 时的温度梯度进行拟合, 得到 $T_1 = 16.8^{\circ}\text{C}$ 、 $T_2 = 2.04^{\circ}\text{C}$ 、 $a = 2.95$ 。拟合曲线和计算数据对比见图 7。

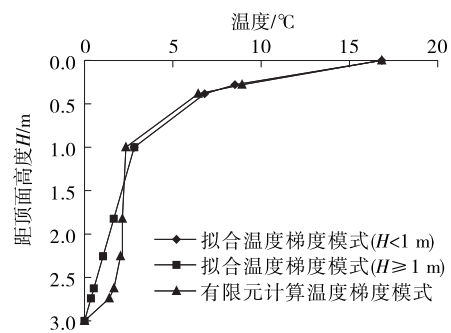


图7 拟合与计算竖向温度梯度对比

JTG D60—2015《公路桥涵设计通用规范》规定了 50、100 mm 厚沥青砼铺装层的竖向日照正温差, 65 mm 厚铺装层的竖向正温差按线性内插的方法得到, 为 18.2°C , 略大于文中的 16.8°C 。

4 结论

(1) 基于实测温度的有限元数值分析结果与实测数据吻合, 铺装层对钢箱梁温度作用具有滞后效应, 利用气象资料及经验公式得到的太阳辐射值对

(下转第 182 页)

表7 基准值下各参数的敏感度因子

参数	基准值	敏感度因子	参数	基准值	敏感度因子
R	1 m	0.034 9	Q	C20	0.154 1
C	9°	0.033 8	B	4 m	0.109 6
H	25 cm	1.581 0			

因素是初期支护厚度,其敏感度高达1.581;其次分别是初期支护强度、锚杆长度、空洞径向长度、两空洞环向间距。因此,在隧道施工质量控制中需重点控制初期支护厚度和强度。

3 结论

(1) 空洞的出现改变了围岩及隧道的受力,使空洞附近的应力较集中,且主要为拉应力,会给隧道支护结构带来不利影响。

(2) 随着空洞之间距离的减少,隧道结构的应力有较大增长,增长较大的区域均在空洞附近,这主要是因为在地震荷载作用下空洞处没有围岩的约束,可随着地震波动向空洞方向变形,从而使空洞及其附近的拉应力增大。

(3) 初期支护厚度和强度越小,各监测点的最大主应力越大,且增幅较大;锚杆长度的影响有限。

(4) 空洞、锚杆长度、初期支护强度和厚度变化等因素均对隧道动力特性有较大影响,应在施工中注意避免,如果出现要及时处理。

(5) 几种质量缺陷参数中,对隧道结构动力响应敏感性最大的为初期支护厚度,其次是初期支护

强度、锚杆长度、空洞径向长度、两空洞环向间距。施工质量控制时要严格控制初期支护厚度。

参考文献:

- [1] 洪开荣.我国隧道及地下工程发展现状与展望[J].隧道建设,2015(2).
- [2] 宋瑞刚,张顶立.“接触问题”引起的隧道病害分析[J].中国地质灾害与防治学报,2004,15(4).
- [3] 张成平,冯岗,张旭,等.衬砌背后双空洞影响下隧道结构的安全状态分析[J].岩土工程学报,2015,37(3).
- [4] 余健,何川,汪波,等.衬砌背后空洞对隧道结构承载力影响的模型试验研究[J].公路交通科技,2008,25(1).
- [5] 蒋玉波.衬砌后空洞对隧道动力稳定性影响规律研究[D].徐州:中国矿业大学,2015.
- [6] 陈明奎.强震作用下拱顶背后空洞对隧道结构稳定性影响分析[D].成都:西南交通大学,2015.
- [7] 应国刚.衬砌背后空洞对隧道结构体系安全性的影响机理研究[D].北京:北京交通大学,2016.
- [8] 凌同华,谢伟华,周凯,等.基于敏感性分析的浅埋偏压隧道支护参数优化[J].交通科学与工程,2016,32(3).
- [9] 朱正国,耿亚帅,武杰,等.地震作用下隧道衬砌背后空洞影响机制研究[J].铁道工程学报,2015(9).
- [10] 章光,朱维申.参数敏感性分析与试验方案优化[J].岩土力学,1993,14(1).
- [11] JTG D70—2004,公路隧道设计规范[S].
- [12] 余辉,王吉庆,肖钦.基于地质雷达的隧道工程衬砌无损检测及应用[J].公路与汽运,2015(3).

收稿日期:2017-03-15

(上接第134页)

其温度场进行仿真分析可行。

(2) 由于防护栏等设施的遮挡使横桥向出现了温差,且数值较大,在计算温度效应时有必要考虑横桥向的温度梯度。

(3) 所建立的数值模型可用于预测整个梁段内所有节点的温度数据。

参考文献:

- [1] BS 5400—7:1978, Teel, concrete and composite bridges, part2: specifications for loads[S].
- [2] JTG D60—2015, 公路桥涵设计通用规范[S].
- [3] Miao C Q, Shi C H. Temperature gradient and its effect on flat steel box girder of long-span suspension bridge [J]. Science China Technological Sciences, 2013, 56(8).
- [4] 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.

- [5] 顾斌,陈志坚,陈欣迪,等.温度作用对带铺装层钢桥面板疲劳效应的影响研究[J].工程力学,2016,33(5).
- [6] 张玉萍,杨宁,李传习.无铺装层钢箱梁日照温度场分析[J].工程力学,2011,28(6).
- [7] 缪长青,史长华.大跨悬索桥扁平钢箱梁温度梯度与温度影响研究[J].中国科学:技术科学,2013(10).
- [8] 王高新,丁幼亮,王晓晶,等.苏通大桥扁平钢箱梁温度场长期监测与统计分析[J].公路交通科技,2014,31(2).
- [9] 吴咏双.日照条件下公路箱形组合梁桥温度场与温度应力分析[D].成都:西南交通大学,2015.
- [10] 曹九林.沥青路面温度场及应力场的数值模拟研究[D].重庆:重庆交通大学,2012.

收稿日期:2017-03-20