

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2024.104



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



热沥青摊铺下钢-混凝土组合梁的温度分布规律

张玉平¹, 储永豪¹, 姜嘉萍¹, 唐鑫¹, 马庾刚²

(1. 长沙理工大学土木工程学院, 长沙 410114; 2. 上海交通建设总承包有限公司, 上海 200120)

摘 要: 热沥青摊铺在桥梁结构中引起的温度变化是一个瞬态现象, 准确监测具有一定难度。为探明热沥青摊铺下桥梁结构的温度分布规律, 对钢-混凝土组合梁热沥青摊铺阶段的温度场进行研究。首先, 通过采集热沥青摊铺下钢-混凝土组合梁温度场的实测数据, 分析此过程中钢-混凝土组合梁的温度分布特性; 然后, 利用有限元软件建立热沥青摊铺时钢-混凝土组合梁温度场模型, 利用实测值验证有限元模型的准确性, 并对热沥青摊铺阶段的组合梁温度场进行参数分析; 最后, 基于参数分析结果, 提出热沥青摊铺下钢-混凝土组合梁的竖向温差预测公式, 并利用已有文献验证其适用性。结果表明: 热沥青摊铺对钢-混凝土组合梁影响的深度主要在 0.5 m 以内, 并形成较大的竖向温度梯度; 竖向温差模式可近似用指数函数描述, 横向温差模式可近似用正弦函数描述; 竖向最大温差主要与梁体初始温度 T_0 、中面层厚度 d 以及沥青拌合料温度 T_s 有关。提出的竖向温差预测公式的计算结果与已有研究相符。

关键词: 桥梁工程; 热沥青摊铺; 钢-混凝土组合梁; 温度梯度; 温差预测公式

中图分类号: U448.38 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2026)05-0225-12

Temperature distribution patterns of steel-concrete composite beams under hot asphalt paving

ZHANG Yuping¹, CHU Yonghao¹, JIANG Jiaping¹, TANG Xin¹, MA Yugang²

(1. School of Civil Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, P. R. China;

2. Shanghai Traffic Construction General Contracting Co., Ltd., Shanghai 200120, P. R. China)

Abstract: Temperature fluctuations caused by hot asphalt paving on bridge structures represent a transient process that is challenging for precise monitoring. To elucidate the temperature distribution patterns of bridge structures under hot asphalt paving, a study of the temperature field during the hot asphalt paving stage of steel-concrete composite beams was conducted. Firstly, by collecting empirical data on the temperature field of steel-concrete composite beams under hot asphalt paving, the temperature distribution characteristics of the steel-concrete composite beams during this process were analyzed. Subsequently, a temperature field model of the steel-concrete composite beam during hot asphalt paving was established using finite element (FE) software. The accuracy of the FE model was validated using measured data. Parametric analysis of the composite beam's temperature field during the hot asphalt paving stage was conducted. Finally, based on the results of the

收稿日期: 2024-07-22

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973计划)(2015CB057702); 国家自然科学基金(52078059)

作者简介: 张玉平(1976-), 男, 博士, 教授, 主要从事桥梁结构研究, E-mail: zyp5032@163.com。

Received: 2024-07-22

Foundation items: National Key Basic Research and Development Program (973 Program) (No. 2015CB057702); National Natural Science Foundation of China (No. 52078059)

Author brief: ZHANG Yuping (1976-), PhD, professor, main research interest: bridge structures, E-mail: zyp5032@163.com.

parametric analysis, a prediction formula for the vertical temperature difference of the steel-concrete composite beam under hot asphalt paving was proposed. Its applicability was validated using existing literature. Results indicated that the influential depth of asphalt high-temperature paving on steel-concrete composite beams mainly occurred within a range of 0.5 m and formed a large vertical temperature gradient. The vertical temperature difference pattern can be approximated by an exponential function, while the horizontal temperature difference pattern can be approximated by a sine function. The maximum vertical temperature difference is mainly influenced by the initial temperature of the beam T_0 , the thickness of the intermediate layer d , and the temperature of the asphalt mixture T_s . The calculated results from the proposed model are consistent with existing research, providing a reference for studying the temperature distribution of steel-concrete composite beams during asphalt hot-mix paving.

Keywords: bridge engineering; hot asphalt paving; steel-concrete composite beams; temperature gradient; temperature difference prediction equation

桥梁结构经常受到温度作用的影响,温度作用的主要来源是由太阳辐射引起的环境效应^[1-3]。温度作用常常造成桥梁结构开裂^[4-5],在某些特殊情况下,其影响甚至超过恒载和活载,成为第一控制因素^[6]。因此,为评估桥梁结构的温度响应,必须准确确定桥梁结构的温度分布和变化。

钢-混组合梁具有重量轻、工厂化程度高等优点,在大跨度桥梁中得到广泛应用^[7-10],但作为室外结构,其不可避免地承受由太阳辐射引起的环境温度作用。钢材和混凝土的热工性能差异显著,受外界因素影响,结构内部会形成非均匀温度分布。Huang等^[11]以波形钢腹板组合梁为研究对象,对其日照温度场分布特点开展实验研究,揭示了波形钢腹板组合梁日照非均匀温度场的分布规律和时变特性。Fan等^[12]对一组钢-混凝土组合梁试件进行了参数可控的室内烘烤灯辐射试验,观察和分析了试样在加热和冷却过程中的温度时程和分布规律。上述研究均通过长期实测方法对组合结构桥梁进行研究,试验周期长,成本高。有学者^[13-14]基于桥位附近气象站的历史气象数据,对箱梁的温度场进行模拟,最后对桥梁施工阶段的温度作用控制提出了相关意见。在此基础上,樊健生等^[15]提出基于可靠度理论与MATLAB的钢-混凝土组合梁设计温度荷载模型,实现了任意地区钢-混凝土组合梁温度场的精确计算。上述学者对太阳辐射引起的箱梁日照温度场做了充分研究。而相比太阳辐射,热沥青摊铺是桥梁热作用的另一个重要来源,因此,对于热沥青摊铺引起的温度场问题需进一步研究和探讨。

事实上,在对大跨度桥梁进行桥面铺装时,沥

青混合料的到场温度一般可达140℃以上^[16-17],而沥青混凝土是直接摊铺在桥面板上,因此,热沥青摊铺下箱梁结构的温度场不可忽略^[18]。刘其伟等^[19]、He等^[20]对混凝土箱梁热沥青摊铺时的温度场进行了实测,分析了沥青摊铺施工温度的分布规律,同时对试验桥的温差分布曲线进行拟合。在此基础上,又有学者^[21-23]研究了钢箱梁热沥青摊铺时的温度场,其中Liu等^[23]通过实测和数值模拟的方法研究了钢箱梁在浇筑式沥青混凝土铺设过程中的温度分布,并采用子模型和特征屈曲分析方法对浇筑式沥青混凝土铺设过程中U形肋的稳定性进行了评估。目前关于组合梁热沥青摊铺热效应的研究还比较有限,陈晓强等^[24]通过沥青摊铺期间温度场的实桥测试结果总结出了沥青高温摊铺下组合梁的温度场分布规律。孙金等^[25]利用ANSYS软件对热沥青摊铺下的组合梁进行了热分析,拟合得到热沥青摊铺下组合梁的竖向最大温差计算公式。中国规范尚未对桥梁结构在热沥青摊铺时的温度场作出规定,当前,钢-混凝土组合梁在热沥青摊铺下的温度场研究也尚未得到充分关注,但了解桥梁在热沥青摊铺过程中的温度分布规律对保证桥梁结构的安全性和使用寿命具有重要意义。因此,有必要对钢-混组合箱梁在热沥青摊铺下的温度场进行深入研究,以指导工程实践并确保桥梁的可靠性和耐久性。

笔者对钢-混凝土组合梁热沥青摊铺下的温度场开展研究。首先,通过采集热沥青摊铺下组合梁温度场的实测数据,分析热沥青摊铺阶段组合梁的温度分布规律;其次,建立热沥青摊铺时组合梁的有限元温度场模型,利用实测值验证有限元模型的

准确性,并对热沥青摊铺阶段的组合梁温度场进行参数分析;最后,基于参数分析结果,提出热沥青摊铺下组合梁的竖向温差预测公式,并利用已有文献验证其适用性。

1 桥梁概况和现场监测

1.1 依托工程概况

依托工程为广东江门市银洲湖特大斜拉桥,位于 113.03°E、22.46°N,海拔约 100 m,东西走向,立面布置如图 1 所示。中跨采用钢-混凝土组合梁,为

PK 分离双箱形式,如图 2 所示,其中桥面铺装采用 100 mm 的沥青混凝土,钢梁梁身采用银灰色涂装,桥面全宽为 36.3 m。

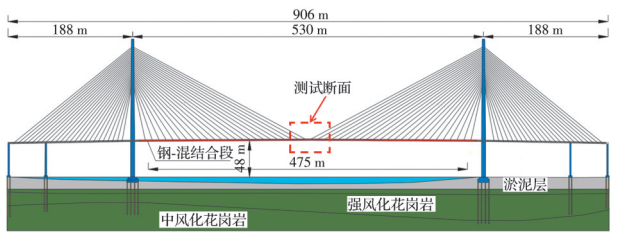


图 1 桥梁立面布置图
Fig. 1 Bridge elevation arrangement

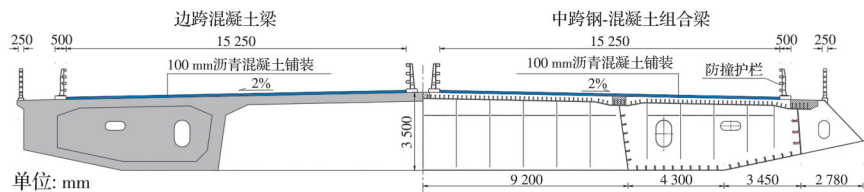


图 2 主梁横断面
Fig. 2 Cross section of main beam

1.2 传感器布置

测试断面设置在桥梁跨中位置,测点布置如图 3 所示。由图 3 可知,混凝土板内采用埋入式温度传感器(测点 A1~A13),传感器的接线通过钢丝与钢筋绑扎,以确保浇筑过程中位置固定。钢梁内采用磁吸式温度传感器(测点 B1~B20),传感器直接吸附于钢梁表面,以监测钢梁的温度变化。温度传感器布置情况如表 1 所示。此外,在钢梁箱室内和箱室外共布置了 3 个气温测点(测点 C1 和测点 C2 为箱室内气温测点;测点 C3 为箱室外气温测点)。温度传感器由长沙焯隆科技有限公司提供,测量范围

为-25~125℃,分辨率为 0.25℃,灵敏度为 0.5℃,测试精度为±0.5℃。温度传感器采样时间设置为 10 min。

表 1 温度传感器布置表		
Table 1 Temperature sensor distribution table		
测点编号	测点位置	温度传感器种类
B1~B20	钢梁	磁吸式
A1~A13	混凝土板	埋入式
C1、C2	箱室内	埋入式
C3	箱室外	埋入式

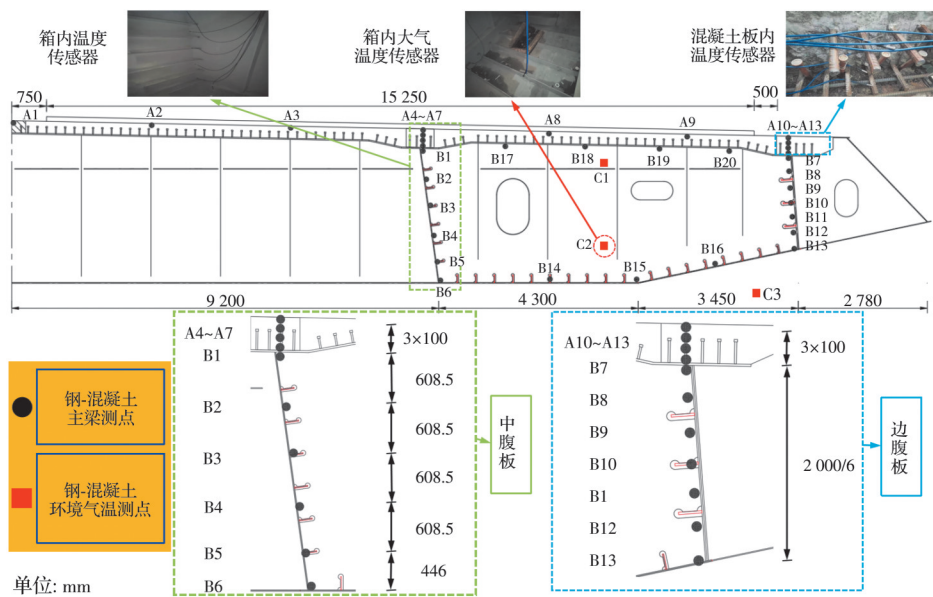


图 3 测点布置图
Fig. 3 Measuring points layout diagram

2 实测结果

2.1 实测结果分析

热沥青摊铺分两次进行,第1次先摊铺中面层(厚度为 60 mm),从 2022-11-28 凌晨 0:00 开始,4:00 摊铺到测试断面,中午 12:00 结束;第2次摊铺上面层(厚度为 40 mm),从 2022-11-29 日凌晨 0:00 开始,到中午 12:00 结束。摊铺中面层时的温度作用远大于摊铺上面层时^[19],因此,只对摊铺中面层时钢-混凝土组合梁的温度特性进行分析。查询历史气象数据可知,广东江门市 2022-11-28 日的气温为 23~29℃。由图 3 可知,边腹板处的混凝土板表面没有摊铺热沥青,在分析此过程组合梁竖向温度分布时,边腹板将被忽略。

根据摊铺中面层时的实测温度数据,可绘制出测试断面沿高度方向和混凝土板横向的温度时程变化曲线,如图 4 所示。由图 4 可知,组合梁在摊铺热沥青中面层时的温度场变化规律。

2.1.1 测点温度变化

热沥青摊铺完成后,组合梁沿高度方向不同深度处的测点能达到的最高温度明显不同,且与深度成反比。图 4(a)所示为组合梁沿中腹板高度方向的温度时程变化。由图 4(a)可知,混凝土板表面往下 10 cm 深度处的测点 A4 温度最高,为 49.75℃(6:00);往下 20 cm 深度处的测点 A5 达到的最高温度为 36.25℃(16:20);往下 30 cm 深度处的测点 A6 达到的最高温度为 34.625℃(16:29);往下 40 cm 深度处的测点 A7 达到的最高温度为 31.5℃(16:33)。而钢梁中腹板上测点 B1 达到的最高温度仅 32.75℃(17:20)。表明在热沥青摊铺过程中温差主要集中在混凝土板内,钢梁上的温度变化不大。在热沥青摊铺过程中,当产生的热量沿着混凝土板的方向向下传播时,表现出明显的衰减和波动。

图 4(b)所示为钢-混凝土组合梁沿边腹板高度方向的温度时程变化。由图 4(b)可知,该高度方向上的最大温度值未超过 32℃。这是因为沿边腹板高度方向的混凝土顶板表面设有护栏底座,阻隔了其热沥青的直接接触。因此,在图 4(b)中,所有测点的温度变化并不显著,关于组合梁竖向温度的研究均基于沿中腹板高度方向(图 4(a))的测点数据。

图 5 所示为沿钢-混凝土组合梁中腹板高度方向不同时刻的竖向温度变化曲线。由图 5 可知,热沥青摊铺引起的竖向温度梯度呈明显非线性分布,最大温差出现在 6:00,达 24.25℃。混凝土板顶部 0.5 m 内的测点出现显著温度波动,而超过该深度

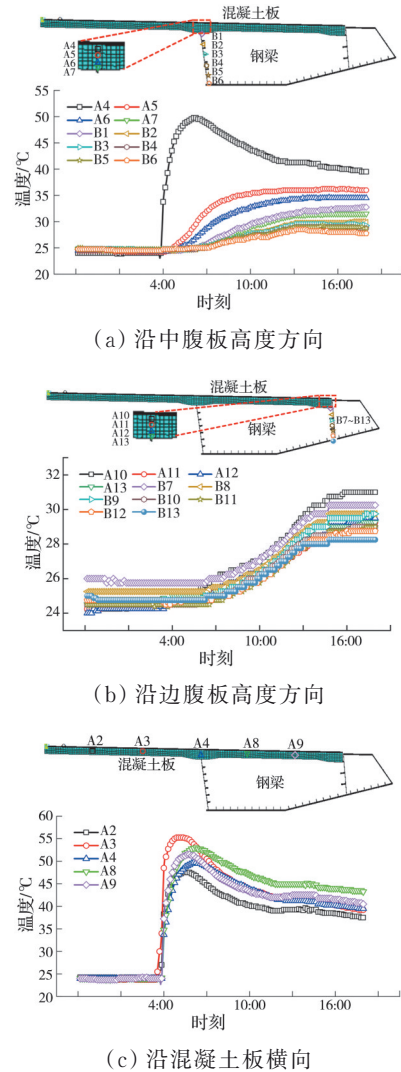


图 4 测点实测温度时程变化曲线

Fig. 4 Time-history variation of measured temperature at measuring points

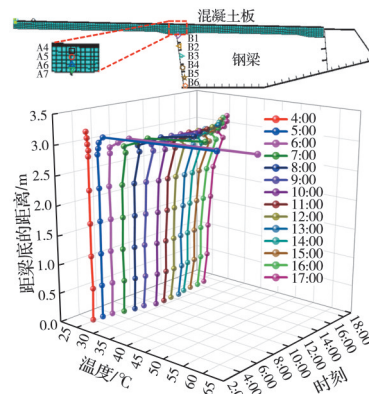


图 5 测试断面各主要时刻的中腹板竖向温度变化曲线

Fig. 5 Vertical temperature variation curves of the test section at each main moment for middle web

的测点在整个观测期内温度相对稳定。表明热沥青铺设对组合梁的最大影响深度约 0.5 m。值得注意的是,竖向温差主要位于混凝土桥面内,沿钢梁高度方向变化较小,且温度变化连续。组合梁腹板

方向的第1个测点位于距离混凝土表面10 cm处,因此,对于最大竖向温差研究适用于混凝土表面10 cm以下区域。

2.1.2 热沥青摊铺对结构温度的影响

由图4(a)可知,热沥青摊铺对钢梁温度的影响相对较小,测点B2~B6达到的最高温度分别为30℃(17:07)、29.5℃(14:05)、29℃(14:17)、29.25℃(16:19)和28.5℃(14:06)。相比混凝土板内竖向测点,混凝土板内横向测点之间的温差相对较小。因此,横向温差不能作为研究的重点。此外,施工现场使用了两台摊铺机进行热沥青摊铺,靠近桥梁中心线的内侧先进行施工,因此,测试断面内侧先发生热传导,内侧测点的温度先达到极值。

2.1.3 温度变化率和热应力

桥梁结构温度应力的直接由其前后不同时刻的温差决定,结构某一时刻温度变化的大小称为温度变化率(简称变温速率)^[26-27]。温度变化速率越大,表示其温差越大,温度应力也越大,桥梁结构也越不安全^[15, 28]。由图4(c)可知,测点A3的升温速率最大,凌晨4:10左右,测点温度为24℃,到凌晨5:00左右,测点温度变为55.25℃,变温速率约0.63℃/min,桥梁正常使用状态下,该变温速率相对较大,因此,在热沥青摊铺完成的前1 h内要注意,混凝土板可能出现温度裂缝。需要注意的是,虽然较大的变温速率增加了裂缝的风险,但是否出现裂缝还需结合其他数据进行综合分析。因此,在未来研究中,应结合现场监测数据、材料性能测试结果以及历史施工记录进行综合评估,以确保分析的严谨性与合理性。

2.1.4 冷却阶段分析

组合梁各测点冷却阶段持续的时间明显长于升温阶段(图4),其中测点A4冷却阶段持续时间最长,约11 h。由图4(a)可知,各测点温度变化的普遍规律为:随着测试深度的增加,可达到的最高温度和温升速率均下降。

2.2 断面温差分布

温差拟合曲线描述了热沥青摊铺过程中钢-混凝土组合梁的温度分布模式。这些曲线不仅捕捉了温度在结构内部的传播特性,而且为预测不同环境条件和施工参数下桥梁结构的温度响应提供了定量工具。通过精确拟合实测数据,温差曲线能够预测在特定施工条件下可能出现的温度变化,从而为桥梁设计和施工提供科学依据。

2.2.1 竖向温差

在6:00出现了竖向最大温差值,可推断此刻为沥青摊铺时组合梁温度场竖向最不利时刻。规定

钢梁底板为原点,中腹板上各测点与原点距离为竖向坐标值,列出此刻各测点的温度及其与整个摊铺阶段最低温度的差值,如表2所示。2022-11-28最不利时刻(6:00)的竖向最不利温差及拟合曲线如图6所示。由图6可知,组合梁截面竖向温差拟合曲线的表达式为

$$y = -57.97e^{-0.72\Delta T_v} + 3.11 \quad (1)$$

式中: y 为竖向坐标,m; ΔT_v 为竖向温差,℃。由图6可知,该拟合曲线的决定系数 $R^2=0.976\ 16$,表明该拟合曲线的精度满足要求,可以用来描述热沥青摊铺下组合梁的竖向温差模式。

表2 最不利时刻竖向各测点的温度与最大温差

Table 2 Temperature and maximum temperature difference of vertical measuring points at the most unfavorable time

测点	竖向坐标/m	最不利温度/℃	温差/℃
A4	3.20	49.75	25.75
A5	3.10	36.25	12.00
A6	3.00	34.63	10.38
A7	2.90	31.50	7.00
B1	2.80	32.75	8.25
B2	2.15	30.00	5.50
B3	1.55	29.50	5.00
B4	1.05	29.00	4.50
B5	0.45	29.25	4.50
B6	0	28.50	4.00

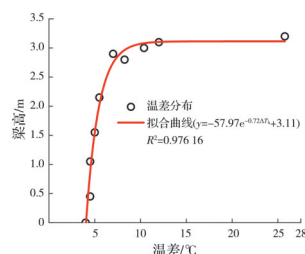


图6 实测竖向最不利温差及其拟合曲线

Fig. 6 Measured most unfavorable vertical temperature difference and its fitting curve

2.2.2 横向温差

规定6:00为最不利时刻,以热沥青摊铺区域与桥梁中心线最近的位置为原点,混凝土板上各测点距原点的距离为横向坐标值,列出此刻各测点的温度及与其相对应的整个摊铺阶段最低温度的温差,如表3所示。2022-11-28最不利时刻(6:00)的横向最不利温差及拟合曲线如图7所示。由图7可知,组合梁截面横向温差拟合曲线的表达式为

$$\Delta T_h = 27.90 + 5.01 \sin\left(\frac{x - 4.40}{3.11} \pi\right) \quad (2)$$

式中: ΔT_h 为横向温差,℃; x 为横向坐标,m。由图7可知,该拟合曲线的决定系数 $R^2=0.988\ 71$,表明该拟合曲线的精度满足要求,可以用来描述热沥青摊

铺下组合梁的横向温差模式。

表3 最不利时刻横向各测点的温度与最大温差

Table 3 Temperature and maximum temperature difference of transverse measuring points at the most unfavorable time

测点	横向坐标/m	最不利温度/℃	温差/℃
A2	2.25	47.50	23.38
A3	5.25	55.13	31.50
A4	8.05	49.75	25.75
A8	10.80	53.00	29.00
A9	13.80	51.50	27.50

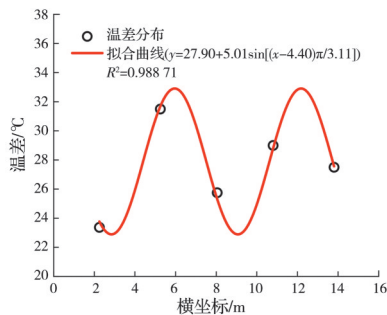


图7 实测横向最不利温差及其拟合曲线

Fig. 7 Measured most unfavorable transverse temperature difference and its fitting curve

2.2.3 温差公式适用范围

温差拟合式(1)、式(2)用以描述热沥青摊铺过程中钢-混凝土组合梁的竖向和横向温差分布模式,适用于热沥青摊铺过程中沥青温度和摊铺速度相对稳定条件下具有类似几何和材料特性的钢-混凝土组合梁结构。然而,其可能不适用于动态变化的环境,如太阳辐射强度快速变化,公式的适用性可能受限。

在实际施工中,摊铺机的使用数量和施工顺序对温度分布有显著影响。靠近桥梁中心线的内侧区域先进行摊铺,会先受到热影响,导致温度上升较快。然而,提出的温差公式假设了摊铺机均匀分布和连续作业,在实际应用中,如果施工条件发生变化,如摊铺机的数量、速度或作业方式发生变化,可能需要对公式进行调整或重新校准。

3 数值热分析

3.1 温度场理论

3.1.1 热分析理论背景

组合梁内部的温度场可以用Fourier热传导偏微分方程来描述^[29],对于没有内部热源的组合梁,热传导偏微分方程可以表示为

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (3)$$

式中: ρ 为材料的密度, kg/m^3 ; c 为材料的比热容,

$\text{J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$; k 为材料的导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$; x, y, z 分别为所求温度场对应的空间坐标, m ; t 为时刻; T 为 t 时刻对应空间坐标的温度, $^\circ\text{C}$ 。组合梁与周围环境进行热交换,则式(3)的热边界条件可表示为

$$k \frac{\partial T}{\partial n} + q_s + q_c + q_r = 0 \quad (4)$$

式中: n 为结构表面的法线方向; q_s 、 q_c 和 q_r 分别为太阳辐射、对流换热和辐射换热的热流密度, W/m^2 。

3.1.2 太阳辐射

太阳辐射包括直接辐射、散射辐射和地面反射辐射。太阳辐射在组合梁表面引起的热流密度可表示为^[30]

$$q_s = \alpha \left[I_a \frac{\cos \theta}{\sin H} + I_b \left(\frac{1 + \cos \varphi}{2} \right) + \rho (I_a + I_b) \left(\frac{1 - \cos \varphi}{2} \right) \right] \quad (5)$$

式中: α 为太阳辐射吸收率; I_a 和 I_b 分别为直接辐射和散射辐射, W/m^2 ; θ 为太阳入射角, $(^\circ)$; H 为太阳高度角, $(^\circ)$; φ 为倾斜角, $(^\circ)$ 。太阳与结构的相对位置如图8所示。

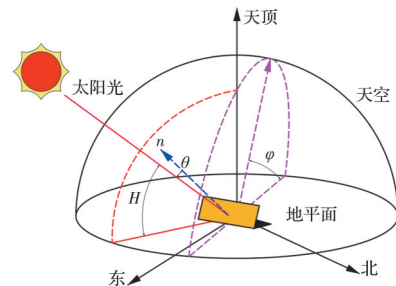


图8 太阳与结构的相对位置

Fig. 8 Relative position of the sun and the structure

3.1.3 对流换热

结构表面与大气的对流换热可按式(6)计算,式中对流换热系数 h_c 主要与结构表面的风速有关,对于组合梁结构,可按式(7)计算^[31-32]。

$$q_c = h_c \cdot A \cdot (T_f - T_a) \quad (6)$$

$$\begin{cases} h_{cin} = 3.5 \\ h_{ctop} = 4.67 + 3.83v \\ h_{cbot} = 2.17 + 3.83v \\ h_{cweb} = 3.67 + 3.83v \end{cases} \quad (7)$$

式中: h_c 为对流换热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$; A 为结构表面与空气的接触面积, m^2 ; T_f 为结构表面的温度, $^\circ\text{C}$; T_a 为大气温度, $^\circ\text{C}$; h_{cin} 、 h_{ctop} 、 h_{cbot} 、 h_{cweb} 分别为组合梁内部、顶、底板和外侧腹板的对流换热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$; v 为风速, m/s 。

3.1.4 辐射换热

太阳能以辐射的形式传递给结构的过程称为

辐射换热,根据 Stefan-boltzman 辐射定律^[33],桥梁结构的辐射换热可按式(8)计算,其中辐射换热系数 h_r 受环境的影响较小,可按式(9)计算。

$$q_r = h_r \cdot A \cdot (T_f - T_a)$$

(8)

$$h_r = \epsilon [4.8 + 0.075(T_a - 5)]$$

(9)

式中: h_r 为辐射换热系数, $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$; ϵ 为材料的辐射率。

3.1.5 有限元传热理论

钢-混凝土组合梁与外界环境进行热交换时,其温度常会受到气象因素的影响。在进行有限元热分析时,常常考虑将气象数据转换为综合大气温度和综合换热系数(见式(10)、式(11)),以更准确地描述气象因素对桥梁结构温度场的影响^[34]。

$$T_{sa} = T_a + \frac{\alpha I}{h_c + h_r}$$

(10)

$$h = h_c + h_r$$

(11)

式中: T_{sa} 为综合大气温度, $^\circ C$; h 为综合换热系数,

$W/(m^2 \cdot ^\circ C)$; I 为太阳辐射强度, W/m^2 。

3.2 边界条件描述

采用有限元软件进行数值模拟时,组合梁截面温度变化可分为两个阶段:热沥青摊铺前和摊铺后。摊铺前,混凝土板表面与外界环境直接进行换热;摊铺后,由于热沥青的覆盖,混凝土板进行内部传热,热沥青表面与外界环境直接进行换热。为验证有限元计算方法的准确性,与热沥青摊铺时钢-混凝土组合梁的现场实测温度进行比较分析。

3.2.1 初始条件

规定 2022-11-28 日凌晨 4:00 的组合梁实测温度为计算模型的初始温度。通过引入太阳辐射、对流换热、辐射换热等条件计算组合梁瞬态温度场,得到沥青覆盖瞬间的初始温度场。事实上,在沥青高温摊铺作用影响下,结构同时也受到了太阳辐射的影响,组合梁与周围环境的热交换过程如图 9 所示。

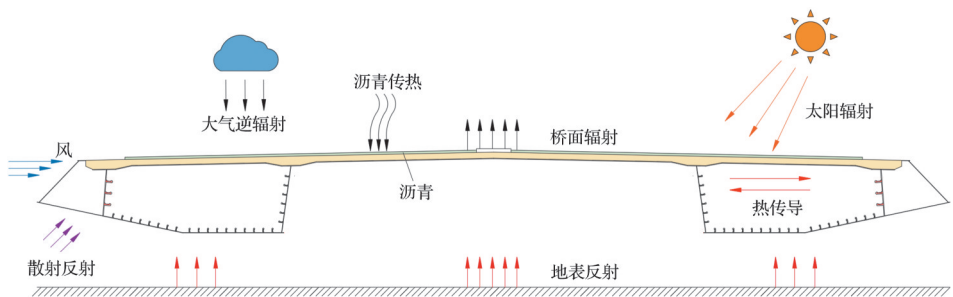


图 9 组合梁热交换示意图
Fig. 9 Heat exchange diagram of composite beam

3.2.2 气象参数

通过实测及气象站收集了 2022-11-28(0:00—12:00)桥址处的环境气象参数,包括太阳辐射 I 、风速 v 、大气温度 T_a 及箱内气温 T_b ,如表 4 所示。由表 4 可知,由于测试时间设定在冬季,此时太阳辐射不强烈,气温变化不大,风速也很小。

3.2.3 沥青拌合料温度

根据现场实测,沥青热拌合料摊铺时的初始温度为 $158\text{ }^\circ C$ 。摊铺完成后,沥青的温度随着时间的变化逐渐降低。为准确模拟热沥青摊铺下组合梁的温度场,根据 Newton 冷却定律^[35],得到随时间变化的沥青温度,计算式为

$$\frac{dT_s}{dt} = -k(T_s - T_a)$$

(12)

式中: dT_s/dt 为沥青温度的变化速率, $^\circ C/h$; k 为冷却系数, $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$; T_s 为沥青的温度, $^\circ C$; T_a 为大气温度, $^\circ C$ 。根据式(10)可计算出沥青摊铺完成后各时刻的温度,如表 5 所示。

表 4 环境气象参数

Table 4 Environmental meteorological parameters				
时刻	大气 温度/ $^\circ C$	箱内 气温/ $^\circ C$	太阳辐射/ (MJ/m^2)	风速/ (m/s)
0:00	24.8	24.7	0	1.1
1:00	24.3	24.7	0	0.5
2:00	24.0	24.6	0	1.0
3:00	24.3	24.5	0	1.2
4:00	25.0	24.5	0	0.7
5:00	25.0	24.5	0	0.9
6:00	24.8	24.9	0	0.8
7:00	24.8	24.3	0.16	0.2
8:00	25.8	25.9	0.72	1.1
9:00	26.0	26.9	1.28	1.5
10:00	26.3	27.6	1.76	3.8
11:00	25.8	28.3	2.00	4.9
12:00	27.0	29.0	2.08	5.1

3.3 有限元模型的建立

3.3.1 热分析模型中边界条件的实现

在自然环境中,钢-混凝土组合梁共有 3 种基本

表 5 沥青温度变化历程

Table 5 Time-history temperature change of asphalt

时间	大气温度 $T_a/^\circ\text{C}$	沥青温度 $T_s/^\circ\text{C}$
4:00	25.0	158.0
5:00	25.0	98.0
6:00	24.8	93.7
7:00	24.8	88.2
8:00	25.8	76.3
9:00	26.0	59.1
10:00	26.3	55.4
11:00	25.8	47.3
12:00	27.0	45.5

换热方式,包括热传导、热对流和热辐射,3种基本换热方式共同决定组合梁的温度变化。组合梁日照温度场的热模拟是一个涉及多参数输入的过程,该过程与3种基本传热方式紧密相关。图10所示为建立钢-混凝土组合梁热分析模型的详细过程,通过收集桥址处的气象数据,计算出各热通量,最后代入热分析模型进行求解。

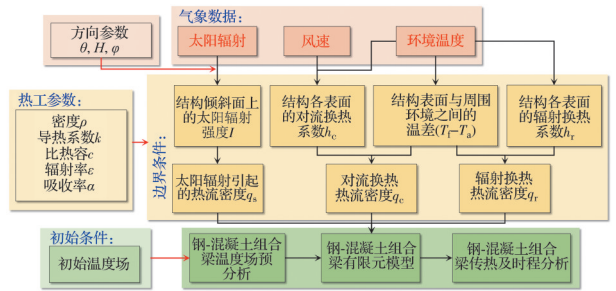


图 10 组合梁的日照温度场数值计算流程

Fig. 10 Numerical calculation process for solar radiation temperature field of composite beams

3.3.2 材料参数及初始设定

材料参数的取值直接影响钢-混凝土组合梁日照温度场有限元模拟的精确性。在钢-混凝土组合梁热分析模型中,共涉及5种材料参数,包括密度、比热容、导热系数、辐射吸收率以及发射率。在桥梁结构温度场的热模拟中,混凝土密度的取值一般为 $2\,200\sim 2\,600\text{ kg/m}^3$,混凝土比热容的取值一般为 $750\sim 1\,200\text{ J/(kg}\cdot^\circ\text{C)}$,混凝土导热系数的取值一般为 $1.5\sim 3.75\text{ W/(m}\cdot^\circ\text{C)}$ ^[36]。钢材表面的吸收率和发射率与其涂装颜色有很大关系^[37],对于白色涂装的钢材,表面吸收率和发射率可能分别低至0.26和0.4;对于深色涂装的钢材,表面吸收率和发射率可能分别达0.81和0.9。根据现场实测及之前的研究^[38-39],钢-混组合梁各材料的热工参数如表6所示。

采用ANSYS软件^[40]对2022-11-28沥青摊铺时组合梁温度场进行热传导分析,建立温度场有限元

表 6 材料热工参数

Table 6 Thermal parameters of materials

材料	密度 $\rho/(\text{kg/m}^3)$	比热容 $c/(\text{J/(kg}\cdot^\circ\text{C)})$	导热系数 $k/(\text{W/(m}\cdot^\circ\text{C)})$	吸收率 率 α	辐射率 率 ϵ
混凝土	2 500	840	3.3	0.55	0.88
钢材	7 850	480	58.2	0.82	0.60
铺装层	2 400	1 000	2.05	0.95	0.97
空气	1.225	1 007	0.026		

模型,如图11所示。其中混凝土板和沥青混凝土铺装层均采用Solid 70单元模拟,钢梁采用Shell 157单元模拟。为使各界面处温度与热流密度连续,铺装层底面与混凝土板顶面、混凝土板底面与钢梁顶面的界面相互关系采用“约束方程”进行模拟,满足热传导第4类边界条件的要求^[44]。

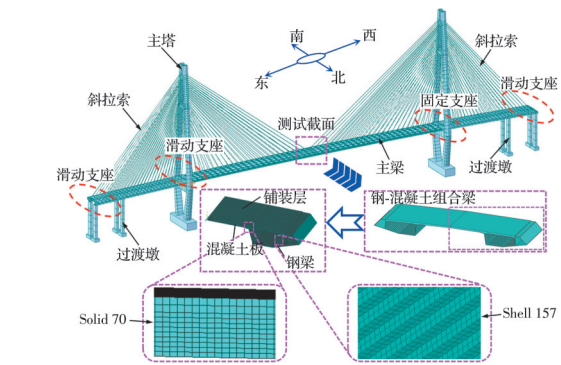


图 11 有限元模型

Fig. 11 Finite element model

桥梁温度场的瞬态热传导与时间有关,时间步选择过大可能错过温度峰值,时间步选择过小可能造成计算时间过长。因此,选择适当的时间步至关重要。数值测试表明,将时间步设置为1 h可以获得良好的分析结果。

3.3.3 有限元模型验证

将温度场有限元计算结果与实测数据进行对比,如图12和图13所示。由图12和图13可知,二者变化趋势基本一致,平均误差不超过 $0.53\text{ }^\circ\text{C}$ 。表

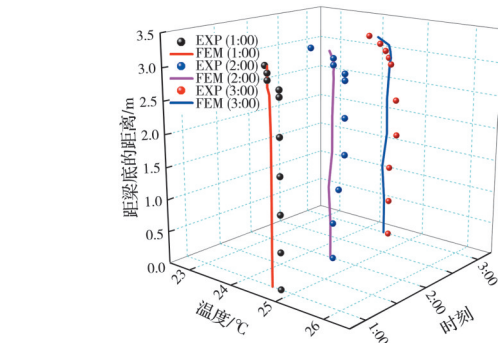


图 12 沥青摊铺前测点实测值与计算值沿高度方向变化对比
Fig. 12 Comparison of measured values and calculated values along the height direction before asphalt paving

明计算值与实测值吻合较好,建立的钢-混凝土组合梁热分析模型具有可靠性。图 14 所示为沥青摊铺过程中组合梁不同时刻的温度分布云图。由图 14 可知,沥青摊铺前,混凝土桥面板和钢梁的温度分布较为均匀;沥青摊铺完成 7 h 之内,混凝土板的温度远大于钢梁。组合梁竖向温差主要集中在混凝土板桥面内,而钢梁上的竖向温差较小。

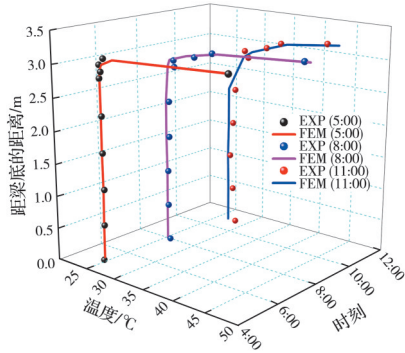


图 13 沥青摊铺后测点实测值与计算值沿高度方向变化对比
Fig. 13 Comparison of measured values and calculated values along the height direction after asphalt paving

3.4 参数热分析

组合梁热分析的影响因素包括太阳辐射强度、大气温度、铺装层厚度、沥青拌合料的温度、梁体初始温度及材料热参数等。其中沥青摊铺的时间设置在冬季凌晨,太阳辐射强度和大气温度变化不大,比热容、密度和导热系数等均为材料特性,离散性不大。建议删除基于前述验证的组合梁温度场有限元模型,参考文献[20],选取梁体初始温度 T_0 、铺装层中面层厚度 d 和沥青拌合料温度 T_s 作为沥青高温摊铺时组合梁温度场的关键影响因素进行参数热分析。各参数取值为 $T_0=24.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $d=60\text{ mm}$ 、 $T_s=158\text{ }^{\circ}\text{C}$,由沥青高温摊铺引起的组合梁梁体竖向最大温差 $\Delta T=24.25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

图 15 所示为热沥青摊铺时组合梁温度场不同参数分析下的拟合曲线。图 15(a)给出了梁体初始温度 T_0 对温度场的影响,其在参数分析中从 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 变化到 $45\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。由图 15(a)可知,梁体初始温度 T_0 与梁体竖向最大温差 ΔT 呈正弦函数变化关系。图 15(b)给出了铺装层中面层厚度 d 对温度场的影响,其在

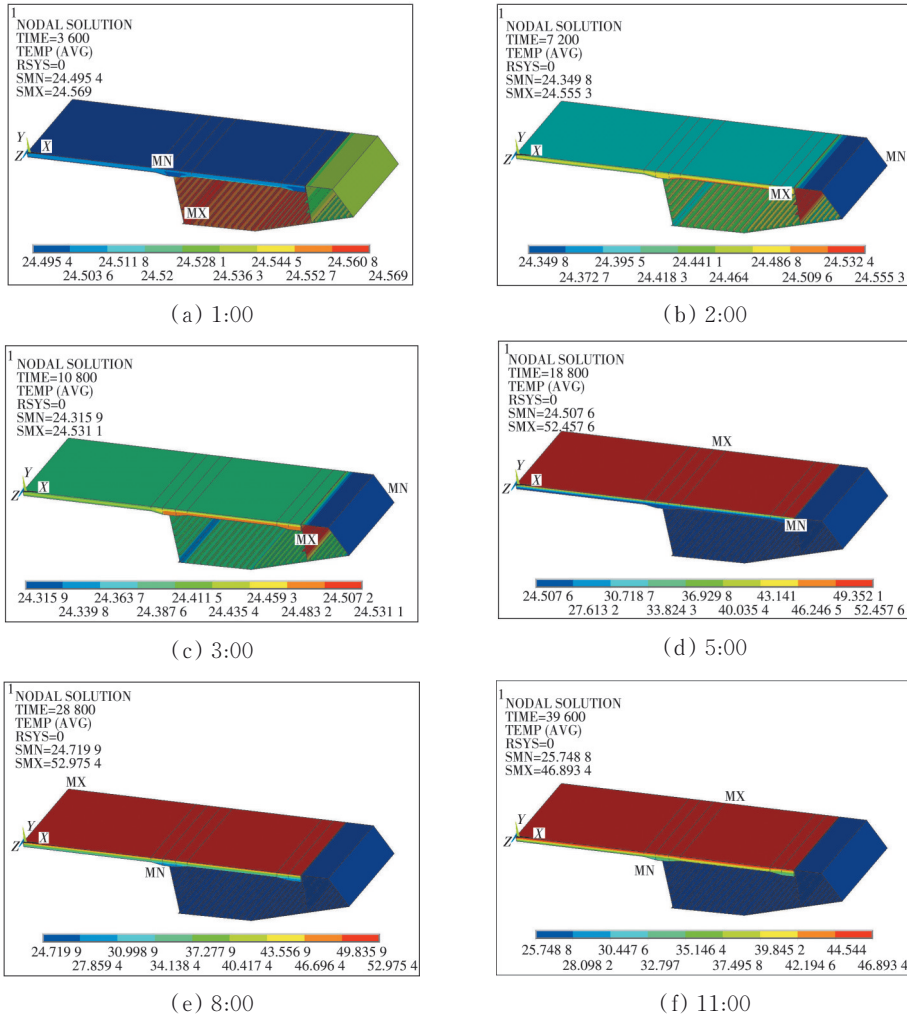
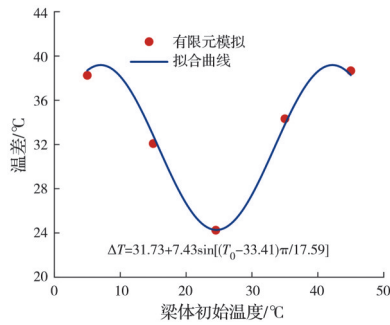
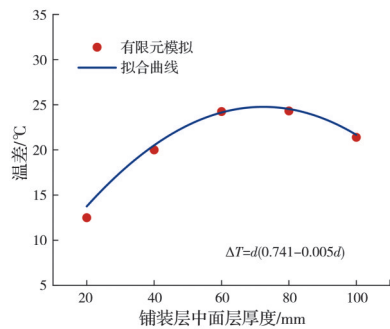


图 14 不同时间温度分布云图
Fig. 14 Temperature distribution cloud diagrams at different times

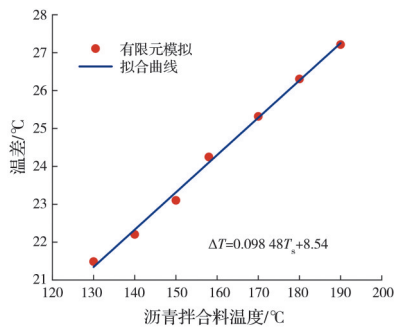
参数分析中从 20 mm 变化到 100 mm。由图 15(b)可知,铺装层中面层厚度 d 与梁体温差 ΔT 符合二次函数变化关系。图 15(c)给出了沥青拌合料的温度 T_s 对温度场的影响,其在参数分析中从 130 °C 变化到 190 °C。由图 15(c)可知,沥青拌合料的温度 T_s 与梁体竖向最大温差 ΔT 呈线性变化关系,沥青拌合料的温度越大,梁体竖向最大温差也越大。



(a) 梁体初始温度 T_0 的参数分析



(b) 铺装层中面层厚度 d 的参数分析



(c) 沥青拌和料温度 T_s 的参数分析

图 15 参数分析及拟合曲线

Fig. 15 Parameter analysis and fitting curves

4 竖向温差预测公式

4.1 温差预测公式

选取出现最大温差的最不利时刻(6:00),根据参数分析结果,由沥青高温摊铺引起的组合梁竖向最大温差 ΔT 可表示为

$$\Delta T = 7.43 \sin [(T_0 - 33.41) \cdot \pi / 17.59] + d \cdot (0.741 - 0.005d) + 0.09848T_s - 17.63 \quad (13)$$

式中: ΔT 为由沥青高温摊铺引起的组合梁竖向最

大温差, °C; T_0 为组合梁的初始温度, °C; d 为铺装层中面层的厚度, mm; T_s 为沥青拌和料的温度, °C。

4.2 温差预测公式的适用性

为验证沥青高温摊铺下组合梁竖向温差预测公式的适用性,利用文献[24-25]中的研究数据进行了验证,验证结果如表 6 所示。由表 6 可见,预测温差和实测温差相差不大,表明提出的组合梁竖向温差预测公式具有可靠性。但值得注意的是,沿高度方向的第 1 个测点距混凝土板表面 10 cm,因此,提出的温差预测公式有一定局限性。

表 6 竖向温差预测值与实测值的比较

Table 6 Comparison of predicted and measured vertical temperature difference

数据来源	梁体初始温度 $T_0/^\circ\text{C}$	中面层厚度 d/mm	沥青拌和料温 度 $T_s/^\circ\text{C}$	预测 温差 $\Delta T_1/^\circ\text{C}$	文献 温差 $\Delta T_2/^\circ\text{C}$	预测/ 文献
本文依托工程	24.5	60	158	23.40	24.25	1.06
文献[24]	20.0	60	140	23.29	19.50	1.19
文献[25]	22.0	50	150	21.43	24.28	0.883

5 结论

研究了钢-混凝土组合梁在热沥青摊铺下的温度场,通过实测温度数据和有限元数值模拟分析了摊铺过程中钢-混凝土组合梁的温度分布规律,得出以下结论:

1)热沥青摊铺对钢-混凝土组合梁的最大影响深度约 50 cm,且测点深度与记录的最高温度值成反比。距混凝土桥面板表面最近的测点在凌晨 5:00 记录到最高温度值 55.25 °C。因此,建议在摊铺结束前密切监控混凝土板的温度状况,以预防温度裂缝的发生。

2)在热沥青摊铺过程中,钢-混凝土组合梁截面沿梁高度方向的温度梯度呈非线性分布。温差主要集中在混凝土板内,而钢梁内的温度分布相对均匀。由于温度分布的滞后效应,截面高度方向的最大温差(24.25 °C)出现在摊铺后 120 min(6:00)。

3)分析了热沥青摊铺下钢-混凝土组合梁的温差分布模式,结果表明,竖向温差分布模式可由指数函数来描述,横向温差分布模式可由正弦函数来描述。这对于施工期间的温度控制和长期的性能评估具有重要意义。

4)竖向最大温差主要与梁体初始温度 T_0 、中面层厚度 d 以及热沥青拌和料的温度 T_s 有关。通过参数热分析提出的竖向温差预测公式计算结果与已有文献数据吻合较好。

参考文献

- [1] Zhu Y, Sun D Q, Guo H, et al. Fine analysis for non-uniform temperature field and effect of railway truss suspension bridge under solar radiation[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2023, 210: 108098.
- [2] Liu C, Xiao J C, Ma K J, et al. Experimental and numerical investigation on the temperature field and effects of a large-span gymnasium under solar radiation[J]. Applied Thermal Engineering, 2023, 225: 120169.
- [3] 肖林, 蔡俊宇, 杨妍秋, 等. 桥梁温度作用与效应 2020 年度研究进展[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2021, 43(增刊1): 167-174.
- Xiao L, Cai J Y, Yang Y Q, et al. State-of-the-art review of bridge thermal action and effects in 2020[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2021, 43(S1): 167-174. (in Chinese)
- [4] Branco F A, Mendes P A. Thermal actions for concrete bridge design[J]. Journal of Structural Engineering, 1993, 119(8): 2313-2331.
- [5] Emanuel J H, Hulsey J L. Temperature distributions in composite bridges[J]. Journal of the Structural Division, 1978, 104(1): 65-78.
- [6] Luo J, Huang M S, Lei Y Z. Temperature effect on vibration properties and vibration-based damage identification of bridge structures: a literature review[J]. Buildings, 2022, 12(8): 1209.
- [7] Ding J Z, Li Y, Xing W L, et al. Mechanical properties and engineering application of single-span steel-concrete double-sided composite beams[J]. Journal of Building Engineering, 2021, 40: 102644.
- [8] Liang Y, Zhao C X, Luo J, et al. Flexural performances of steel-concrete composite section of self-anchored suspension bridge: experimental and theoretical research[J]. Structures, 2023, 56: 105047.
- [9] Li Y, Lai Y P, Lu G, et al. Innovative design of long-span steel-concrete composite bridge using multi-material topology optimization[J]. Engineering Structures, 2022, 269: 114838.
- [10] Qin S Q, Yu L H, Zhang J B, et al. Fatigue assessment of steel-UHPC composite deck with a thin polymer overlay in a long-span suspension bridge under static and random traffic loads[J]. International Journal of Fatigue, 2023, 168: 107409.
- [11] Huang S J, Cai C Z, He X H, et al. Experimental and numerical investigation on the non-uniform temperature distribution of steel beams with corrugated web under solar radiation[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2022, 191: 107174.
- [12] Fan J S, Liu Y F, Liu C. Experiment study and refined modeling of temperature field of steel-concrete composite beam bridges[J]. Engineering Structures, 2021, 240: 112350.
- [13] Lu H L, Hao J, Zhong J W, et al. Analysis of sunshine temperature field of steel box girder based on monitoring data[J]. Advances in Civil Engineering, 2020, 2020(3): 1-10.
- [14] Saad S, Nasia A, Bashir R, et al. Numerical study on the effect of climate parameters on the extreme thermal gradients in concrete box girders[J]. Journal of Bridge Engineering, 2023, 28(10): 04023069.
- [15] 樊健生, 刘诚, 刘宇飞. 钢-混凝土组合梁桥温度场与温度效应研究综述[J]. 中国公路学报, 2020, 33(4): 1-13.
- Fan J S, Liu C, Liu Y F. Review of temperature distribution and temperature effects of steel-concrete composite girder bridges in China[J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, 33(4): 1-13. (in Chinese)
- [16] Roberts F L, Mohammad L N, Wang L B. History of hot mix asphalt mixture design in the United States[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2002, 14(4): 279-293.
- [17] Hand A J, Martin A E, Sebaaly P E, et al. Evaluating field performance: case study including hot mix asphalt performance-related specifications[J]. Journal of Transportation Engineering, 2004, 130(2): 251-260.
- [18] 王达, 邵育新, 谭本坤, 等. 铺装层温度效应影响下钢桥面板焊接细节的疲劳性能[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2026, 48(02): 199-211.
- Wang D, Shao Y X, Tan B K, et al. Fatigue properties of welded details in steel bridge deck under temperature variation of pavement layer[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2026, 48(2): 199-211. (in Chinese)
- [19] 刘其伟, 朱俊, 唐蓓华, 等. 沥青高温摊铺时钢筋混凝土箱梁的温度分布试验[J]. 中国公路学报, 2007, 20(4): 96-100.
- Liu Q W, Zhu J, Tang B H, et al. Experiment on temperature distribution of reinforced concrete box girder under asphalt high temperature paving[J]. China Journal of Highway and Transport, 2007, 20(4): 96-100. (in Chinese)
- [20] He Z Q, Ma Z, Zhang S X, et al. Temperature gradients and stress distributions in concrete box-girder bridges during hot-mix asphalt paving[J]. Structures, 2021, 33: 1954-1966.
- [21] Liu Y, Qian Z D, Hu H Z. Thermal field characteristic analysis of steel bridge deck during high-temperature asphalt pavement paving[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2016, 20(7): 2811-2821.
- [22] 沈锐利, 杜明峰, 蒋雨旻. 双箱单室钢箱梁摊铺沥青混凝土时的温度荷载模式[J]. 铁道建筑, 2019, 59(4): 38-43.

- Shen R L, Du M F, Jiang Y Q. Study on temperature load pattern in double-box single-cell steel box girder during asphalt concrete paving at high temperature[J]. *Railway Engineering*, 2019, 59(4): 38-43. (in Chinese)
- [23] Liu Y, Qian Z D, Hu J, et al. Temperature behavior and stability analysis of orthotropic steel bridge deck during gussasphalt pavement paving[J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2018, 23(1): 04017117.
- [24] 陈晓强, 刘其伟. 钢-混凝土组合箱梁桥沥青摊铺温度场的试验与理论对比分析[J]. *铁道科学与工程学报*, 2009, 6(5): 5-10.
- Chen X Q, Liu Q W. Temperature experiment and analysis of steel-concrete composite girder bridge caused by asphalt paving[J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2009, 6(5): 5-10. (in Chinese)
- [25] 孙金, 冯小青, 唐焱, 等. 高温沥青摊铺时钢-混凝土叠合梁桥温度场有限元分析[J]. *中外公路*, 2018, 38(3): 216-221.
- Sun J, Feng X Q, Tang Y, et al. Finite element analysis on temperature field of steel-concrete composite girder bridge under high temperature asphalt paving[J]. *Journal of China & Foreign Highway*, 2018, 38(3): 216-221. (in Chinese)
- [26] Liu H, Han J, Parsons R L. Effects of seasonal temperature change-induced abutment movements on backfill surface settlements behind integral bridge abutments-Numerical analysis[J]. *Computers and Geotechnics*, 2022, 149: 104884.
- [27] Li J X, Yi T H, Qu C X, et al. Early warning for abnormal cable forces of cable-stayed bridges considering structural temperature changes[J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2023, 28(2): 04022137.
- [28] Kim H S, Choi H N, Lim T H. Development of beam elements for nonlinear analysis of reinforced concrete frames subjected to fire[J]. *Structures*, 2024, 62: 106229.
- [29] Li X K, Zhao S D, Qu W Z. Localized Fourier collocation method for 2D transient heat conduction problems[J]. *Applied Mathematics Letters*, 2025, 160: 109331.
- [30] Cai C Z, Huang S J, He X H, et al. Investigation of concrete box girder positive temperature gradient patterns considering different climatic regions[J]. *Structures*, 2022, 35: 591-607.
- [31] Dogonchi A S, Ganji D D. Convection-radiation heat transfer study of moving fin with temperature-dependent thermal conductivity, heat transfer coefficient and heat generation[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2016, 103: 705-712.
- [32] Lv C, Li Y P, Wang G J, et al. An efficient method for estimating time-varying convective heat transfer coefficient based on boundary condition transfer technique[J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2023, 144: 106787.
- [33] Blevin W R, Brown W J. A precise measurement of the stefan-Boltzmann constant[J]. *Metrologia*, 1971, 7(1): 15-29.
- [34] 李思阳, 张玉平, 李传习, 等. 日照扁平钢箱梁二维温度场的解析解[J]. *土木工程学报*, 2023, 56(11): 64-77.
- Li S Y, Zhang Y P, Li C X, et al. Analytical solution of two-dimensional temperature field of flat steel box girder under sunlight[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2023, 56(11): 64-77. (in Chinese)
- [35] Guicciardini N. Isaac Newton, *Philosophiae naturalis principia mathematica*, first edition (1687) [M]// *Landmark Writings in Western Mathematics 1640-1940*. Amsterdam: Elsevier, 2005: 59-87.
- [36] 张宸瑜. 钢板组合梁桥日照非均匀温度场及温度效应研究[D]. 西安: 长安大学, 2021.
- Zhang C Y. Study on sunshine non-uniform temperature field and temperature effect of steel plate composite beam bridge[D]. Xi'an: Chang'an University, 2021. (in Chinese)
- [37] Liu H B, Chen Z H, Chen B B, et al. Studies on the temperature distribution of steel plates with different paints under solar radiation[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2014, 71(1): 342-354.
- [38] Wei X C, Liu Y F, Song S Y, et al. Overall deformation of steel-concrete-steel immersed structures during construction stage considering temperature effect [J]. *Structures*, 2022, 46: 1055-1066.
- [39] Zhang Y P, Chu Y H, He J, et al. Prediction of temperature zoning for steel-concrete composite beams based on meteorological parameters in China[J]. *Structures*, 2024, 61: 105982.
- [40] Thompson M K, Thompson J M. Interacting with ansys [M]// *ANSYS Mechanical APDL for Finite Element Analysis*. Amsterdam: Elsevier, 2017: 11-30.
- [41] Galiullina G R, Vachagina E K, Khalitova G R. Heat transfer of non-Newtonian liquid flows in convergent-divergent channels with fourth-kind thermal boundary conditions[J]. *Thermophysics and Aeromechanics*, 2010, 17(1): 83-89.