

Study on Temperature Characteristics of Steel Bridge Deck Pavement Structure

Fuyan Chen¹, Fucui Pei², Zhansheng Lin², Zhiye Su², Dongming Li³, Xiaowei Han³, Qiwen Zhou⁴,
Runzhi Jia⁴

¹School of Civil Engineering, Shandong Jiaotong University, 250357, China

²Shandong Road & Bridge Group Co., Ltd., 250000, China

³Beijing Municipal Construction Group Co., Ltd., 102400, China

⁴Sinochem Transportation Construction Group Co., Ltd., 250100, China

Abstract: The research of steel deck Gussasphalt Concrete (GA) temperature characteristics of pavement structure, construction of asphalt rheological parameters and the establishment of the steel box girder finite element transient heat transfer model of sub model technology, analysis of the most unfavorable under the temperature load loading layer on the stress distribution of steel box beam, calculates the temperature change characteristic, the influence of different the wind speed on the temperature field of casting steel bridge. The calculation results show that pouring asphalt after pouring the edge of the Von Mises shows the maximum stress, vertical stress mainly acts on the bridge deck, and the diaphragm is mainly responsible for the transverse stress, and with the increase of wind speed, the cooling rate of asphalt mixture increases significantly, when the wind speed is 1m/s the pouring type asphalt cooling speed is relatively slow, wind speed 3m/s when cooling is obviously improved.

Keywords: Cast asphalt; Sub model; Temperature variation characteristics

钢桥面铺装结构的温度特性分析

陈富艳¹, 裴福才², 林占胜², 苏志晔², 李明东³, 韩晓伟³, 周岐文⁴, 贾润枝⁴

¹山东交通学院, 交通土建工程学院, 济南, 250357, 中国

²山东省路桥集团有限公司, 济南, 250000, 中国

³北京市政建集团有限责任公司, 北京, 102400, 中国

⁴中化学交通建设集团有限公司, 济南, 250100, 中国

摘要: 研究钢桥面浇注式沥青混凝土(GA)铺装结构的温度特性, 构建沥青流变参数并结合子模型技术建立钢箱梁瞬态传热有限元模型, 分析最不利温度荷载下铺装层的应力分布情况, 计算了钢箱梁的温变特性, 同时研究了不同风速对钢桥桥面浇筑温度场的影响。计算结果表明: 浇筑沥青后, 浇筑边缘的 Von Mises 应力最大, 表明桥面板承担了纵向应力作用, 而横隔板起到分担横向应力的作用, 同时随着风速增大, 沥青混合料降温速率显著增大, 风速为 1m/s 时浇筑式沥青降温速度较为缓慢, 风速 3m/s 时候降温有明显提高。

关键词: 浇注式沥青; 子模型; 温变特性

1 引言

随着桥梁计算分析软件的成熟, 桥梁结构的设计更加合理化, 大跨径桥梁发展迅速, 对于大跨径桥梁主梁截面形式一般采用钢箱梁结构, 桥面铺装层一般是沥青混凝土构成, 施工时候都是高温摊铺, 如浇注式沥青混凝土(GA)的摊铺温度最高可以达 220°C 以上^[1]。国内外研究现状表明针对沥青混凝土摊铺温度对钢箱梁作用影响的研究相对较少, 比重较多的研究集中在环境温度改变后对结构特性的影响研究^[2]。

有学者采用理论分析、数值模拟加模型试验相结合的手段建立沥青黏结层材料的本构关系模型^[3], 以及文献^[4]应用动力学模型分析桥梁局部振动效应, 文献^[5]通过构建系统参数方程及理论加经验结合方法改善温度对桥梁影响系统的缺陷国内学者对桥梁结构的温度效应进行了不少研究^[6], 其中就沥青施工的摊铺温度对桥梁的影响等有众多的成果介绍^[7], 但并未涉及到钢箱梁结构的沥青摊铺层流变模型, 也未考虑摊铺速度和风速耦合作用影响规律, 笔者针对国内外钢箱梁温

度场现有研究的不足的情况,拟建立沥青摊铺层流变模型,同时对GA沥青摊铺过程中钢箱梁温度应力场进行分析,并计算了摊铺速度和风速大小对沥青铺装层温度的影响规律。

2 工程概况

沌口长江公路大桥主桥跨径布置为100+275+760+275+100m,全长1510m,为双塔双索面半漂浮体系斜拉桥。主通航孔由760m的主跨跨越,副通航孔由北岸侧275m的边跨跨越。沌口长江公路大桥主梁全长采用PK断面钢箱梁,箱梁总宽46m(含风嘴),中心线处梁高4.0m,顶面设2.5%的人字形横坡。PK断面钢箱梁由两个流线型扁平边箱、箱间顶板及横隔

板组成。扁平边箱宽13.49m,净间距14.75m。

首先建立沌口长江大桥全桥有限元模型,如下图所示。提取关键截面内力用于局部模型的计算分析。

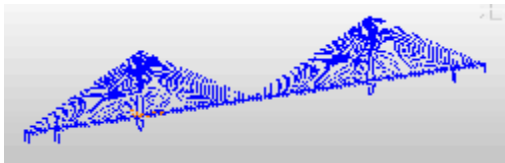


图1. 全桥有限元模型

3 有限元模型数值参数

3.1 沥青流变参数

铺装层沥青的变形分析可应用一个三参数方程(公式中考虑了应力 q 、时间 t 、以及温度 T 的影响)来表示,公式如下:

$$e_{cr} = f(T, q, t)$$

分析铺装层沥青的变形时,作者考虑用Bailey-Norton规律^[8],那么可以得到时间硬化蠕变模型的表达式如下:

$$e_{cr} = C_1 q^{C_2} t^{C_3}$$

以上公式中: C_1 、 C_2 、 C_3 代表温度参数, q 代表应力大小;这里需要做一个假定,即考虑 q 不随时间 t 变化,那么可以得到以下公式:

$$e_{cr} = \frac{\partial e_{cr}}{\partial t} = C_1 C_3 q^{C_2} t^{C_3-1} \text{ 其中, 令}$$

$$A = C_1 C_3$$

$$m = C_2$$

$$n = C_3 - 1$$

则有 $e = Aq^m t^n$

在这里, A 、 m 、 n 代表蠕变参数,而 e 表示为应变速率,受应力和温度的影响。采用多元线性回归方法对该参数进行分析,构建浇注式沥青(GA)非线性蠕变参数,由参考文献[9],作者仅考虑大于40℃时的温度状态。

4 温度场分析

浇注式沥青混合料浇筑温度在220℃~240℃间,混合料的温度可传递给钢桥面板、U肋、横隔板、纵腹板等,引起各桥面系构造物温度变形。由于各桥面系构造物之间通过焊接连接在一起,有一定的约束作用,构造物之间会产生一定的集中应力。

在有限元模拟分析环节,作者结合工程实际考虑浇注式沥青混合料分多幅施工,每幅按照5m宽度进行施工,摊铺速为 $v=3.0\text{m}/\text{min}$,同时考虑了初始浇筑温度为最不利温度240℃,以此来计算桥面系构造物随着温度的变化趋势,其内部应力及变形的变化情况。

4.1 钢箱梁瞬态传热计算

基于全桥有限元模型,提取最不利节段建立三维钢箱梁节段模型,尺寸选择纵向12m,横向全宽的钢箱梁节段,边界条件的约束方式是采用绝热方式。

将最不利温度荷载施加于箱梁段,作者把钢箱梁划分为浇筑区,浇筑边缘区及无影响区,为了精确模拟浇筑沥青的施工过程,先将12m浇筑层均分12段,然后将铺装层单元Kill,之后设12个step,假设摊铺速度为 $v=3.0\text{m}/\text{min}$,逐段激活单元,当完成一步后,铺装向前摊铺一段,以此模拟移动热源向前传递温度的整个施工过程。

4.2 温度测点分布

截面竖向布置10个温度测点,分别位于铺面、钢板沿厚度方向三等分点部位及U肋沿竖向四等分点部位,其中钢板下测点与U肋上测点重合。截面横向布置20个温度测点,主要分布在浇筑边缘附近-0.5m~1m范围内。

选取铺装层表面、浇筑区域钢板表面、浇筑边缘及未浇筑区域钢板表面的关键测点进行计算数据分析,计算结果如下图所示。分析浇筑沥青对钢梁引起的温度场变化规律。

由应力云图可以看出,初始摊铺的时候钢桥面板温度较高达到220℃,随着摊铺过程的进行,温度会

逐步降低，当计算荷载步达到 7200s 左右时候，桥面 摊铺中心最高温度 106 度。

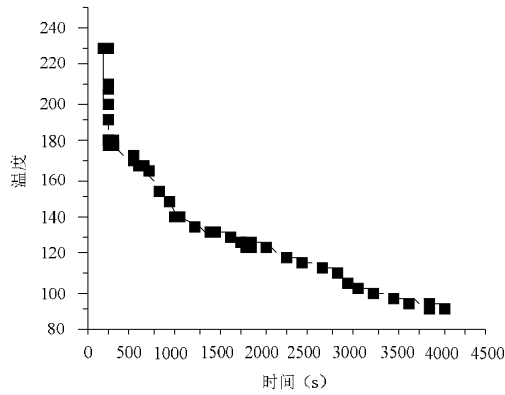


图 6. 铺装层表面温度随时间变化

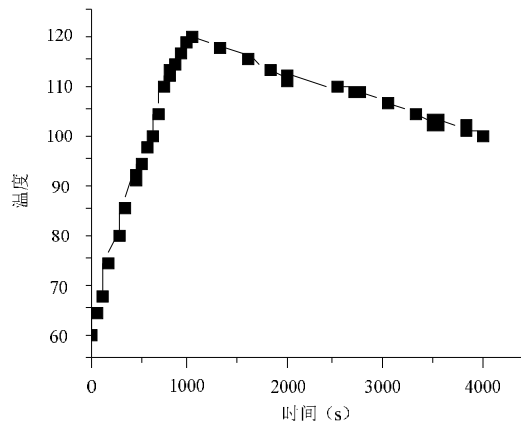


图 7. 浇筑区钢板测点温度变化

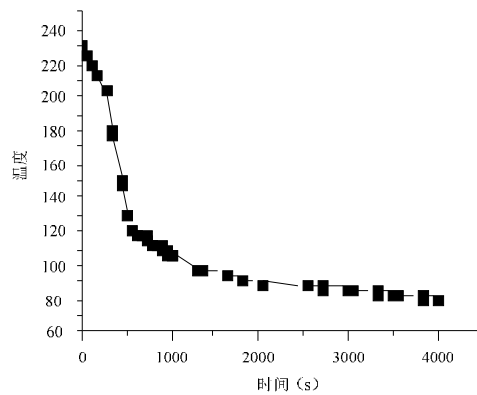


图 8. 浇筑边缘区域测点温度变化

4.3 钢箱梁温度特性分析

4.3.1 钢箱梁温度变形特性

下图为沥青浇筑过程中桥面板所产生的位移云图，其中跨中竖向变形最为明显，峰值达到 0.0096 m，斜拉索作用位置的竖向最大挠度仅为 0.0005 m，同时，从下图的曲线还可以看出钢桥面的横向最大位移为 0.004 m，属于向外侧膨胀的趋势。

4.3.2 钢箱梁总体应力响应

考虑钢箱梁最不利温度荷载影响，对其浇筑问题进行探究，从计算结果看出，沥青浇筑区产生的最大 Von Mises 应力发生在浇筑区域的边缘位置，说明桥面板主要承担了纵向应力，横隔板的作用是分担横向应力。

A 钢箱梁各结构应力响应特征

① 钢桥面板浇筑温度应力

计算结果可以看出，钢桥面主要受纵向应力影响，且沥青浇筑边缘处应力最大，往浇筑中心是呈现递减趋势，而向斜拉索方向进行递减，纵向应力的 3 个峰值均位于横隔板正上方，最大纵向压应力为 202Mpa，最大纵向拉应力为 121Mpa，浇筑界面中心纵向压应力为 97Mpa。浇筑边缘应力较为复杂，跨中及 1/4 截面的纵向应力在浇筑边缘变化较大。

② U 肋浇筑温度应力

U 肋在沥青浇筑过程中的受力状态因横向位置的不同而变化，主要受力特点是上缘受压，下缘受拉，在浇筑区内的全肋与半肋的受力特点基本相同，由有限元计算得到下缘拉应力 60.2Mpa，上缘压应力 53Mpa。

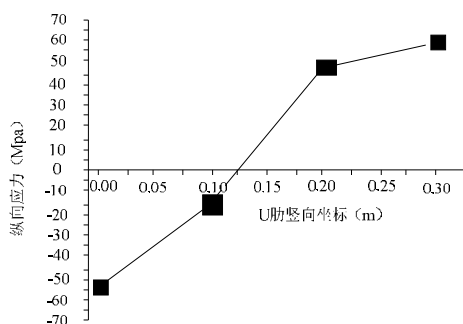


图 9. 跨中截面 U 肋纵向应力分布

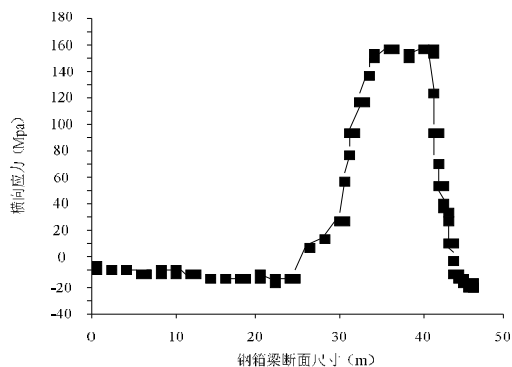


图 10. 横隔板横向应力分布

③横隔板浇筑温度应力

由上图的计算结果可知斜拉索周围的横隔板受力最为不利,同时,横隔板承受的荷载主要是横向应力的影响,而由温度引起的横隔板横向拉应力最大值160Mpa发生在浇筑中心区域。且最大的横向压应力为23.1Mpa。

4.4 摊铺速度对钢桥面板温度场的影响分析

根据施工规范要求:摊铺速度应控制在6m/min以内,若速度过快沥青混凝土受振捣、振动强度不够会影响路面平整度。基于规范要求,有限元模拟浇筑式沥青的浇筑速度分别为2.5m/min、3m/min、3.5m/min、4m/min、5m/min、6m/min。计算不同摊铺速度下,跨中截面浇筑中心下方的钢桥面板温度-时间曲线。

从上图14可以分析出,随着摊铺速度的增加,钢桥面板的温度场分布是逐步增加的,6m/min的摊铺速度下,钢桥面的温度场变化最大,最高温度达166度,当摊铺速度为2.5m/min~3m/min时候,钢桥面的温度趋于稳定和平衡,所以建议摊铺速度为2.5~3m/min为宜。

4.5 不同风速对钢桥桥面浇筑温度场的影响

风速是会影响钢桥桥面浇筑温度场的环境因素,风速直接影响结构与大气之间的对流热交换作用,有限元数值模拟通过改变对流换热系数,模拟不同风速下的浇筑施工过程,研究风速对钢桥桥面浇筑温度场的影响。

4.5.1 不同风速对钢桥桥面温度场影响规律研究

作者给出的模型中,风速给温度场带来的影响可以应用对流传热表面传热系数 h_r 来表示。

$$h_r \approx 2.6(\sqrt{T_s - T_a} + 1.54v)$$

当面风速为1、2、3、5m/s时的 h_r 值分别为16.61 (W/K.m²)、19.53 (W/K.m²)、24.60 (W/K.m²)、27.54 (W/K.m²)时温度场变化的情况,论文中计算不同风速影响下,跨中截面浇筑中心下方的钢桥面板温度-时间曲线以及U肋上、下测点温差-时间关系曲线,如下图所示。

从上图可以分析出钢桥面板温度场变化情况,其中钢桥面板的最高温度和U肋上、下测点的最大温差均随着风速的增大而减小,并且风速在1m/s~2m/s之间

变化时,对钢桥桥面温度场的影响更为明显。也就是说风速增大的话,对温度场影响将会逐步降低,因此在不影响施工操作的前提下,可尽量选择风速较大浇筑施工。

4.5.2 风速对浇注式沥青混合料温度的影响

研究不同风速对浇筑式沥青混合料温度的影响,有限元计算中考虑风速为1m/s、2m/s、3m/s、5m/s时对浇注式沥青混合料温度的分布规律情况。计算结果如下图所示。

随着风速增大,沥青混合料降温速率显著增大。当风速为1m/s时候,浇筑式沥青降温速度较为缓慢,从随着风速的持续增长达到3m/s时候降温有明显提高,当风速达到5m/s温度下降速率最大,且变化幅度大下降速率变化相当显著。

5 结论

浇注式沥青混合料浇筑温度在220℃~240℃间,混合料的温度可传递给钢桥面板、U肋、横隔板、纵腹板等,引起各桥面系构造物温度变形,此时钢桥桥面层间产生的剪应力可能会造成粘结层的初始损伤,现在提出几点建议:

钢桥面板的温度场分布是逐步增加的,6m/min的摊铺速度下,钢桥面的温度场变化最大,最高温度达166度,当摊铺速度为2.5m/min~3m/min时候,钢桥面的温度趋于稳定和平衡,所以建议摊铺速度为2.5~3m/min为宜。

随着风速增大,沥青混合料降温速率显著增大。当风速为1m/s时候,浇筑式沥青降温速度较为缓慢,当风速的持续增长达到3m/s时候降温有明显提高,当风速达到5m/s温度下降速率最大,且变化幅度大下降速率变化相当显著。

在不影响施工质量的前提下,选择太阳辐射强度较小、风速较大的天气施工,可以在一定程度上改善浇筑温度效应。

致谢

国家自然科学基金(51508261/E080505);山东省高校科技计划项目(No.J16LG60)。

参考文献

- [1] Shanmugam N.E. Strength of axially loaded orthotropic plates.

-
- Journal of Structure Engineering. 1987, 113(2).
- [2] Gunther G.H., Bild S., Sedlacek G. Durabilidy of asphaltic pavements on orthotropic decks of steel bridges. Construct. Steel Research. 1987.
- [3] 钱振东, 刘冀. 整桥-温度-重载耦合作用下钢桥面黏结层力学分析. 东南大学学报:自然科学版. 2012, 42(4), 729-733.
- [4] 孙君, 李爱群, 丁幼亮. 润扬长江大桥钢箱梁的温度分布监测与分析. 公路交通科技. 2009, 26(8), 94-98.
- [5] 吴建良, 孙立军. 路面非周期一维温度场的傅里叶级数解. 中国公路学报. 2012, 25(1), 29-34.
- [6] 康海贵, 郑元励, 蔡迎春, 等. 实测沥青路面温度场分布规律的回归分析. 中国公路学报. 2007, 20(6), 13-18.
- [7] 蔡仕强. 大跨径钢箱梁斜拉桥温度效应研究. 西安:长安大学. 2010.
- [8] 姜东. 随机车辆荷载作用下大跨悬索桥振动响应研究. 中国科技论文. 2013, 8(11), 1131-1137.