

# 温度变化对大厚度沥青混凝土铺装层 钢混结合桥力学性能的影响研究

赵 健<sup>1</sup>, Belytsky I. YU.<sup>1</sup>, 李姝征<sup>2</sup>, Lapin A. V.<sup>1</sup>

(1. 太平洋国立大学 土木工程系, 俄罗斯 哈巴罗夫斯克 901071;

2. 太平洋国立大学 经济管理系, 俄罗斯 哈巴罗夫斯克 901071)

**摘要:**以俄罗斯南萨哈林岛路易斯桥为研究对象,对处于温差大地区服役多年的小跨径钢混结合桥进行了荷载试验和有限元模拟,结果表明在沥青混凝土铺装层厚度较大时,沥青混凝土铺装层的温度由季节温度的变化而改变,从而影响主梁的力学性能。研究发现-5℃时试验荷载作用的实测数据与有限元模拟值误差很小;在相同荷载作用下,沥青混凝土铺装层温度由-24℃升高到+23℃时,主梁竖向位移增大了48.6%,上翼缘压应力增大了275%,下翼缘拉应力增大了25.4%。根据试验可以判断,在夏季温度最高时,桥梁承载能力最低,其研究方法和结果具有一定的参考价值。

**关键词:**沥青混凝土铺装层;钢混结合桥;季节温度;弹性模量;力学性能

**中图分类号:**U446;U443.33 **文献标志码:**A **文章编号:**2095-0373(2015)03-0007-06

## 0 引言

沥青混凝土对温度变化十分敏感,它的弹性模量随着温度变化而改变<sup>[1]</sup>。然而沥青混凝土在公路桥梁铺装结构的运用十分广泛,在大厚度沥青混凝土铺装层的情况下,沥青混凝土的强度则是影响桥梁力学性能的主要因素之一。本文以俄罗斯联邦东部的南萨哈林地区的路易斯河桥为研究主体,对厚度为240 mm的沥青混凝土铺装层的钢混结合桥进行了荷载试验与力学性能研究。文献[2]已经对钢混结合桥的温度效应进行了研究,其影响远小于汽车荷载直接作用,所以本文只在考虑季节温度变化的情况下对该桥挠度的变化及主梁的力学行为进行了理论分析,为合理改造和设计带有大厚度沥青混凝土铺装层的中小跨径桥梁提供了参考依据。

## 1 弹性模量与温度的关系

沥青混凝土可视为根据温度变化的弹性材料,它的使用性能会随着温度的变化有很大波动。其中表现较为明显的性能参数则是它的弹性模量。在文献[3]中对于沥青混凝土路面反算模量进行了大量研究,并提出沥青混凝土模量与温度的关系式(1)和温度修正系数公式(2)。

$$E = 11\ 035 \times e^{-0.028\ 87T} \quad (1)$$

式中, $T$ 为温度; $e$ 为自然系数。

温度修正系数可表示为

$$K = e^{-0.028\ 8(20-T)} \quad (2)$$

式中, $K$ 为温度修正系数; $T$ 为实测温度。

根据公式可以得知,沥青混凝土的弹性模量随着温度的升高而减小,相反温度越低,弹性模量值

收稿日期:2014-05-26 责任编辑:车轩玉 DOI:10.13319/j.cnki.sjztdxxbzb.2015.03.02

作者简介:赵健(1985-),男,助教,博士研究生,主要从事桥梁结构、既有桥梁改造、桥梁动力学的研究。E-mail: bridge.PUN@yandex.ru

赵健, Belytsky I. YU., 李姝征, 等. 温度变化对大厚度沥青混凝土铺装层钢混结合桥力学性能的影响研究[J]. 石家庄铁道大学学报:自然科学版, 2015, 28(3): 7-12.



## 4 荷载试验

为了了解沥青混凝土温度变化对桥梁实际的服役状态的影响,采用现场试验和有限元模拟的方法对该桥进行评估。对桥梁进行静荷载加载,利用应力张量感应仪进行实测,并与有限元模拟结果相对比。

### 4.1 传感器布局

采用太平洋国立大学桥梁与地基基础教研室的应力张量感应仪“SENSOR-MS”对该桥跨中位置进行实测,传感器分别布局在荷载下方主梁的上翼缘与下翼缘底部,用来收集当车辆荷载作用于跨中位置所产生的应力以及挠度变化的相关数据。

### 4.2 静荷载加载

荷载试验采用两辆总重为 22 t 的 ISUZUCYZ51K 型号的卡车对桥梁进行加载。加载位置考虑车辆通行的可能性的 3 种情况。第一种情况为卡车停靠在距离左侧保险杠 1 m 处的位置,第二种情况停置于距离保险杠 3.05 m 的位置。第三种情况停置距离右侧保险杠 1.39 m 的位置。轴重分布如图 2、图 3 所示。前轴重 4.64 t,后轴重 A8.68 t,后轴重 B8.68 t,总重 22 t。

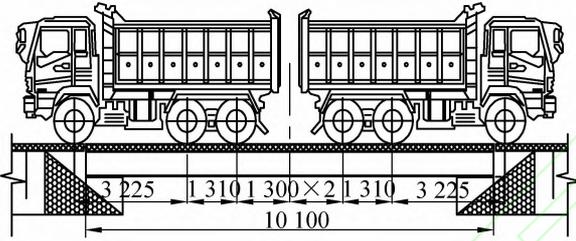


图2 桥面加载位置(单位:mm)

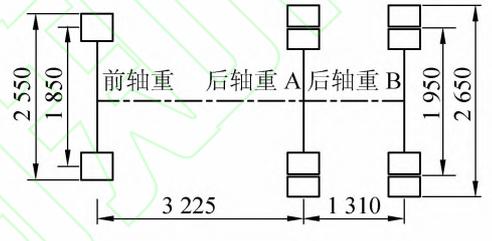


图3 轮重距离(单位:mm)

## 5 有限元模型

### 5.1 模型概述

有限元模型采用空间桥梁结构分析有限元软件 MIDAS/CIVIL 建立。将全桥离散为 124 856 个单元,共 149 214 个节点。为提高模型的准确性,对全桥的结构细节进行模拟<sup>[6]</sup>,其中主梁为薄壁钢结构,故采用板壳单元模拟。横纵向连接及支架采用杆单元模拟,沥青混凝土铺装层和钢筋混凝土板采用实体单元模拟。材料特性及型号如表 1。

### 5.2 荷载的力学特性

汽车轮重荷载与桥梁沥青混凝土铺装的接触面并非弹性理论中的圆形均布荷载<sup>[7]</sup>,所以在有限元模型中可以利用矩形来模拟轮胎与桥面接触,避免采用传统的节点荷载加载,以免造成局部应力较大,可以更真实的反映出临时荷载作用后桥梁的状态,效果较为明显。采用按面积等效理想的标准接触面为延桥面轴向 0.2 m、宽度 0.6 m 的矩形,接触面积为 0.12 m<sup>2</sup>。

### 5.3 时变参数

计算参数的选取主要针对当地季节温度的条件变化对沥青混凝土弹性模量影响的 3 个时间,即冬季 1 月、3 月和夏季 7 月的沥青混凝土铺装层的温度。沥青混凝土的温度与相对的试验实测弹性模量如表 2 所示。

表 1 有限元模型相关参数

材料单元	型号	材料特性	
		弹性模量/MPa	泊松比
钢材	# 55	$2.1 \times 10^5$	0.3
混凝土	B25.5	$2.9 \times 10^4$	0.2
沥青混凝土	—	根据表 2	0.3

表 2 沥青混凝土铺装层的试验实测值

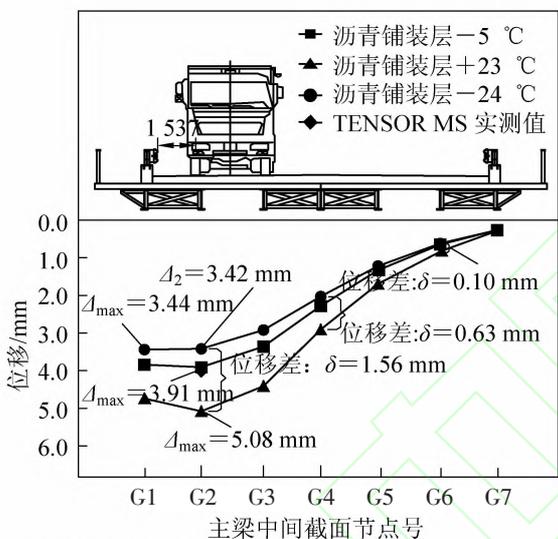
温度/°C	-24	-5	+23
试验实测模量/MPa	2 940	1 800	620

## 6 试验结果与分析

### 6.1 对竖向位移影响

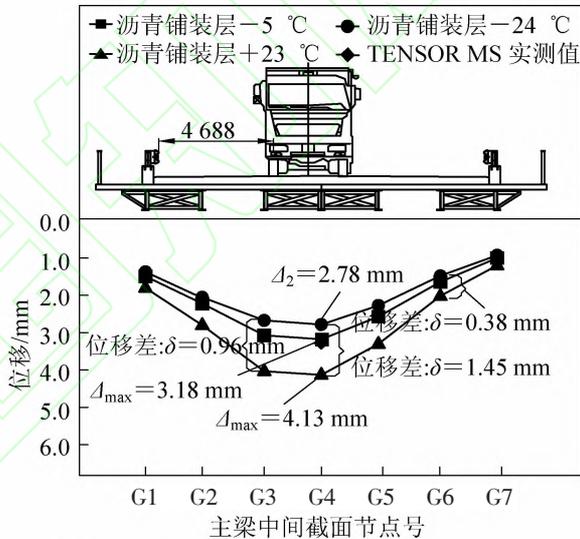
桥面沥青混凝土铺装层的温度随季节气温和太阳辐射等因素变化而改变,同时弹性模量也随之发生相对的变化。通过对沥青混凝土 1 月、3 月和 7 月的近似的温度值做模拟计算,当沥青混凝土层温度分别为  $-24\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$  和  $+23\text{ }^{\circ}\text{C}$  的情况下临时荷载作用的位移结果如图 4~图 6 所示。

由图 4~图 6 可知,1 月份到 7 月份钢混结合桥的沥青铺装层随着温度的升高导致主梁在荷载作用下的竖向位移增大。在 7 月时,主梁竖向位移最大。其中当沥青混凝土铺装层平均温度由  $-24\text{ }^{\circ}\text{C}$  升高到  $+23\text{ }^{\circ}\text{C}$  时,第一加载方案 G2 点由 3.42 mm 增加到 5.08 mm,主梁最大拉应力  $\sigma_{x1} = 41.6\text{ MPa}$ ; 第二加载方案 G4 点由 2.78 mm 增加到 4.13 mm,主梁最大拉应力  $\sigma_{x2} = 34.8\text{ MPa}$ ; 第三加载方案 G6 点由 3.31 mm 增加到 4.92 mm,主梁最大拉应力为  $\sigma_{x3} = 40.6\text{ MPa}$ 。1 月到 7 月由于温度升高,汽车荷载作用在该桥的竖向位移均增大大约 48.6%。



中间截面点 G2 的位移和应力值

- ◆  $\Delta = 4.10\text{ mm}$ ;  $\sigma_{xx} = 37.2\text{ MPa}$     ▲  $\Delta = 3.91\text{ mm}$ ;  $\sigma_{xx} = 36.5\text{ MPa}$
- $\Delta = 3.42\text{ mm}$ ;  $\sigma_{xx} = 33.7\text{ MPa}$     ★  $\Delta = 5.08\text{ mm}$ ;  $\sigma_{xx} = 41.6\text{ MPa}$



中间截面点 G4 的位移和应力值

- ◆  $\Delta = 3.30\text{ mm}$ ;  $\sigma_{xx} = 31.5\text{ MPa}$     ▲  $\Delta = 3.18\text{ mm}$ ;  $\sigma_{xx} = 30.0\text{ MPa}$
- $\Delta = 2.78\text{ mm}$ ;  $\sigma_{xx} = 27.6\text{ MPa}$     ★  $\Delta = 4.13\text{ mm}$ ;  $\sigma_{xx} = 34.8\text{ MPa}$

图 4 卡车靠保险杠 1 m 处加载位移模拟值

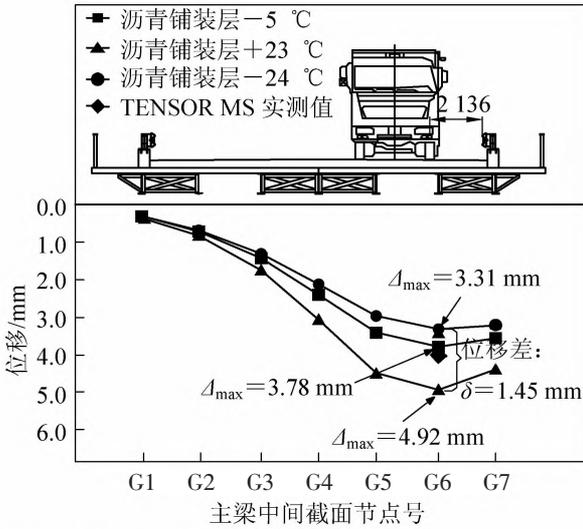
图 5 卡车靠保险杠 3.05 m 处加载位移模拟值

### 6.2 对截面组合中性轴影响

在车辆荷载作用下,由图 7~图 9 明显可以看出,组合截面中性轴的位置在试验荷载和不同季节温度的作用下产生了相应的变化。以加载方案 2 图 8 为例,沥青混凝土铺装层温度为  $+23\text{ }^{\circ}\text{C}$  时,该截面的组合中性轴距离下翼缘位置 421 mm,当温度为  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$  时,组合中性轴位于 468 mm 处,而温度为  $-24\text{ }^{\circ}\text{C}$  时组合中性轴位置升高到了 496 mm 处。由此可见,在组合截面尺寸不变的情况下,沥青混凝土铺装层温度越高,组合中性轴到下翼缘的距离越小,相反温度越低,距离越大。该桥组合中性轴到下翼缘的距离  $y$  可以用公式(5)表示

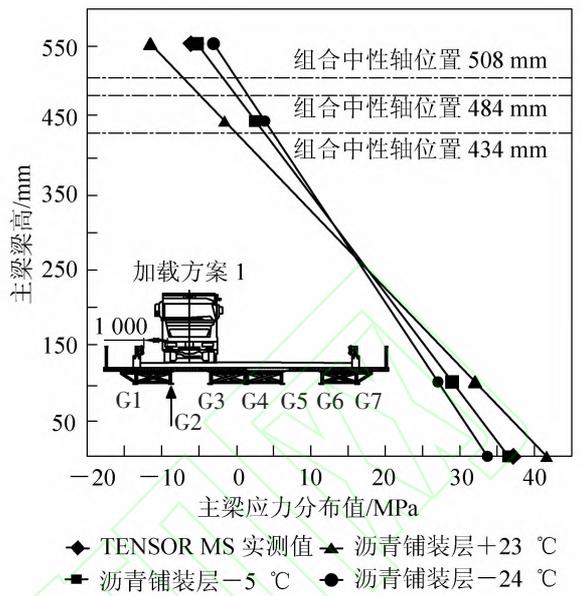
$$y = \frac{A_s \cdot y_s + \frac{A_{c^*} \cdot y_{c^*}}{\alpha_{E^*}}}{A_s + \frac{A_{c^*}}{\alpha_{E^*}}} \quad (5)$$

式中,  $A_{c^*}$  为钢筋混凝土板与沥青混凝土的折合面积;  $y_{c^*}$  为下翼缘到钢筋混凝土板与沥青混凝土铺装层的距离;  $y_s$  为钢梁下翼缘到形心的距离;  $A_s$  为钢梁截面面积;  $\alpha_{E^*}$  为弹性模量比值,  $\alpha_{E^*} = \frac{E_s}{E_{c^*}} < \alpha_E = \frac{E_s}{E_c}$ ,  $E_{c^*}$  为混凝土板与沥青混凝土折合模量,  $E_s$  为钢梁弹性模量,  $E_c$  为混凝土弹性模量。



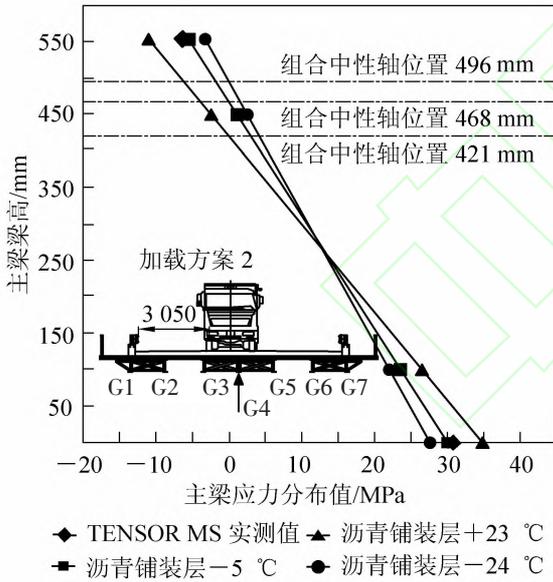
中间截面点 G2 的位移和应力值  
 ◆  $\Delta=3.91$  mm;  $\sigma_{xx}=37.5$  MPa    ▲  $\Delta=3.78$  mm;  $\sigma_{xx}=35.5$  MPa  
 ●  $\Delta=3.31$  mm;  $\sigma_{xx}=32.8$  MPa    ▼  $\Delta=4.92$  mm;  $\sigma_{xx}=40.6$  MPa

图 6 卡车靠保险杠 1.39 m 处加载位移模拟值



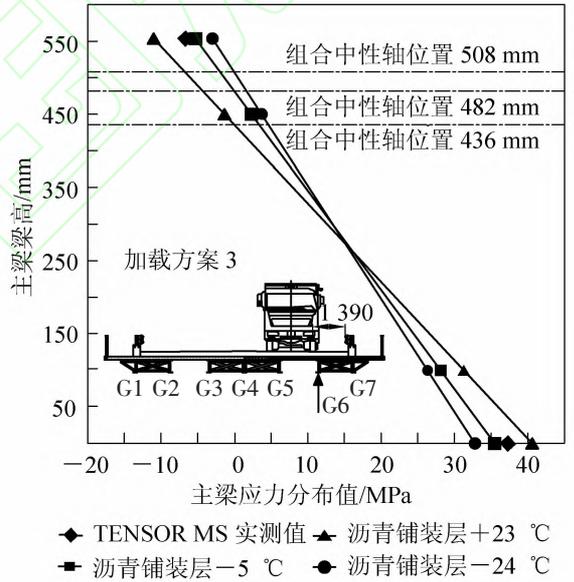
◆ TENSOR MS 实测值    ▲ 沥青铺装层+23 °C  
 ■ 沥青铺装层-5 °C    ● 沥青铺装层-24 °C

图 7 加载方案 1 主梁应力分布值



◆ TENSOR MS 实测值    ▲ 沥青铺装层+23 °C  
 ■ 沥青铺装层-5 °C    ● 沥青铺装层-24 °C

图 8 加载方案 2 主梁应力分布值



◆ TENSOR MS 实测值    ▲ 沥青铺装层+23 °C  
 ■ 沥青铺装层-5 °C    ● 沥青铺装层-24 °C

图 9 加载方案 3 主梁应力分布值

### 6.3 对应力影响

主梁应力在 1 月到 7 月的沥青混凝土温度变化,截面组合中性轴发生变化,应力也随之变化,通过计算分析可得到以下结果:

第一加载方案:当温度为 -24 °C 时拉应力值为 34.0 MPa、压应力为 -2.8 MPa,当温度为 +23 °C 时拉应力值为 42.1 MPa、压应力为 -10.5 MPa,分别增大了 23.8% 和 275%;

第二加载方案:当温度为 -24 °C 时拉应力值为 27.6 MPa、压应力为 -3.2 MPa,当温度为 +23 °C 时拉应力值为 34.8 MPa、压应力为 -11.0 MPa,分别增大了 26.1% 和 243.8%;

第三加载方案:当温度为 -24 °C 时拉应力值为 32.8 MPa、压应力为 -2.98 MPa,当温度为 +23 °C 时拉应力值为 40.6 MPa、压应力为 -11.0 MPa,分别增大了 23.8% 和 269.1%。

### 6.4 实测结果

通过 3 月 15 日的现场加载试验,实测沥青混凝土温度为 -5 °C 时,实测位移和应力的结果与有限元

软件的模拟结果非常接近,位移值最大误差为 6.0%,应力值最大误差为 5.6%。

## 7 结论与建议

(1)在 3 月南萨哈林岛实测该桥沥青混凝土铺装层温度为  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$  时,现场加载试验与有限元模拟值基本相符,同时也验证了模型的精度,由此可以认为该模型可以基本反映出桥梁的真实力学性能以及服役状态。

(2)根据试验荷载加载的结果可以看出,在 1 月和 7 月气候温度的影响下,该桥的主梁挠度增大了 48.6%,组合中性轴也随着温度发生变化从而改变了主梁应力,上翼缘压应力最大增大了 275%,下翼缘拉应力最大增大了 25.4%。由此可知在季节变化和太阳辐射对该桥沥青混凝土铺装层温度的影响下,该桥的力学性能会受到很大的影响。

(3)在 7 月时,沥青混凝土铺装层温度最高,竖向位移与应力值相对较大,而在 1 月时,温度最低,竖向位移和应力值最小,说明,夏季温度最高时该桥承载能力最小。

在季节温差较大的地区设计中小跨径的钢混结合桥时,由于沥青混凝土铺装层的弹性模量随季节和太阳辐射等因素的变化而改变,波动较大,基于沥青混凝土的这一不稳定因素,建议不以沥青混凝土作为桥梁的承重结构设计,或者减小沥青混凝土铺装层的厚度,以确保桥梁的力学性能不受沥青混凝土铺装层的影响,避免出现承载能力下降而导致事故发生。

## 参 考 文 献

- [1]胡浩,马磊,王静.温度非均匀分布对沥青混凝土路面结构的影响分析[J].公路,2010(7):101-104.
- [2]苏靖海,段树金.钢-混凝土双面组合箱梁日照温度效应研究[J]石家庄铁道大学学报:自然科学版,2013,26(4):11-14.
- [3]康海贵,郑元勋,蔡迎春,等.基于 FWD 的沥青路面弯沉及反算模量的温度修正[J].中外公路,2007(6):43-46.
- [4]严作人.层状路面温度分析[D].上海:同济大学,1982.
- [5]赵健,Belytsky I YU,Lapin A V.俄罗斯南萨哈林岛路易斯河桥的检测与承载能力评估报告[R].哈巴罗夫斯克:太平洋国立大学,2013.
- [6]赵健,Belytsky I Y,Yastrua V G.一种轻质钢桥的动力特性研究[J].石家庄铁道大学学报:自然科学版,2014,27(1):9-13.
- [7]胡小弟.轻型货车轮胎接地压力分布实测[J].公路交通科技,2005,22(8):1-7.

## Research on Influence of Mechanical Steel-concrete Bridges Based on Temperature Change on Large Asphalt Concrete Pavement Layer Thickness

Zhao Jian<sup>1</sup>, Belytsky I. YU.<sup>1</sup>, Li Shuzheng<sup>2</sup>, Lapin A. V.<sup>1</sup>

(1. Department of Civil Engineering, Pacific National University, Khabarovsk 901071, Russia

2. Department of Economic Management Pacific National University, Khabarovsk 901071, Russia)

**Abstract:** Loading tests were conducted based on Bridge of Luis on the Sakhalin Island of Russia, in order to investigate the structural behavior of an old small steel-concrete bridge with large asphalt concrete pavement layer thickness, which had been in service for many years in cold region of Sakhalin, Russia. Only a little difference was found between FEA and measurement values at  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ . When the asphalt concrete pavement temperature changed from  $-24\text{ }^{\circ}\text{C}$  to  $+23\text{ }^{\circ}\text{C}$ , the main beam vertical displacement increased 48.6%, stress on the flange increased 275% and lower flange tensile stress increased 25.4%. The result of this paper has certain theoretical meaning and application value in engineering practice.

**Key words:** asphalt concrete pavement; steel-concrete bridge; seasonal temperature; elastic modulus; mechanical properties