

# TPO-薄层UHPC轻型组合桥面层间温度应力研究

李嘉<sup>1†</sup>, 陈卫<sup>1,2</sup>, 王万鹏<sup>1,3</sup>, 赵昭<sup>1</sup>

(1.湖南大学 土木工程学院,湖南长沙 410082;2.广西交通设计集团有限公司,广西 南宁 530029;  
3.上海市政工程设计研究总院(集团)有限公司,上海 200092)

**摘要:**为掌握轻型组合桥面温度应力变化规律,避免TPO-UHPC层间受力破坏,采用应变片法和超声波法分别测定TPO材料的热膨胀系数和弹性模量;利用ABAQUS有限元软件对组合铺装进行层间温度应力研究;对影响TPO-UHPC层间温度应力的主要因素进行参数敏感性分析,探讨热膨胀系数比、TPO厚度、施工温度等对层间温度应力的影响。试验研究表明:TPO热膨胀系数比水泥基材料要大得多,TPO弹性模量随温度升高而减小。仿真计算显示:均匀温度变化下,层间剪应力和法向拉应力随着膨胀系数比和TPO层厚度减小而减小;层间剪切应力相较于法向拉应力在铺装体系中占主导地位;在高温和低温环境下,施工温度对TPO-UHPC层间应力的影响趋势相反,选择合适的TPO厚度及施工温度,可以减小温度应力幅。

**关键词:**桥梁工程;组合桥面;层间温度应力;超高性能混凝土;薄层聚合物混凝土面层;有限元

中图分类号:U416.2

文献标志码:A

## Research on Interface Temperature Stress of TPO-UHPC Lightweight Composite Bridge Decks

LI Jia<sup>1†</sup>, CHEN Wei<sup>1,2</sup>, WANG Wanpeng<sup>1,3</sup>, ZHAO Zhao<sup>1</sup>

(1.College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;  
2.Guangxi Communications Design Group Co Ltd, Nanning 530029, China;

3.Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) Co Ltd, Shanghai 200092, China)

**Abstract:**In order to master the temperature stress variation of lightweight composite bridge decks and to avoid interlaminar failures between TPO-UHPC, the thermal expansion coefficient and elastic modulus of TPO materials were investigated by strain gauge method and ultrasonic method respectively; the interface temperature stresses of the composite pavement system were calculated by using ABAQUS finite element software. The parameter sensitivity analysis was performed on the main factors that affect the interface temperature stress of the pavement system. The effects on interface thermal stress between TPO-UHPC were discussed, referring to thermal expansion coefficient ratio, TPO thickness and construction temperature. The experimental results show that the thermal expansion coefficient of TPO is much larger than that of cement-based materials, and the elastic modulus of TPO decreases with the increase of temperature. The simulation results show that, under the condition of uniform temperature, the interlaminar shear stress and the normal tensile stress decrease with decreasing the expansion coefficient ratio and the thickness of the TPO layer; the interlaminar shear stress plays a more dominant role than the normal tensile stress in

\* 收稿日期:2018-03-19

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51678229), National Natural Science Foundation of China(51678229)

作者简介:李嘉(1962—),女,湖南长沙人,湖南大学教授

† 通讯联系人, E-mail:lijia@hnu.edu.cn

the pavement system. The influences of construction temperature on the interlaminar stress of TPO-UHPC are different for high and low temperature. It is possible to reduce the interface temperature stress amplitude by a suitable construction temperature and TPO thickness.

**Key words:** bridge engineering; composite bridge deck; interface temperature stress; ultra high performance concrete; thin polymer overlay; finite element

正交异性钢桥面存在钢桥面板疲劳开裂和铺装层易损坏等重大难题<sup>[1-2]</sup>。为此,作者所在研究团队致力于“钢桥面-超薄 UHPC-TPO”轻型组合铺装体系研发<sup>[3-5]</sup>。超高性能混凝土 UHPC (Ultra High Performance Concrete) 具有超高强度、超高韧性和超长耐久性等特点,是当今世界上最先进的水泥基材料之一<sup>[6]</sup>。薄层聚合物混凝土面层 TPO (Thin Polymer Overlay) 是以环氧树脂为胶结剂,以坚硬耐磨玄武岩为集料的高效能结构材料。它具有优良的抗滑性、耐磨性以及温度稳定性,与水泥基材料粘结强度高;属于热固性材料,不会出现沥青混凝土的高温车辙问题;其厚度通常在 6~15 mm 范围,使用寿命 15~20 年<sup>[7]</sup>。

文献[8]指出,聚合物混凝土与水泥混凝土组合铺装层在界面处产生温度应力,可能引发层间破坏。国内外学者针对桥面铺装温度应力问题开展了相关研究,英国学者 Jones 应用一维模型对钢桥箱梁桥桥面板温度场进行了模拟计算<sup>[9]</sup>; Kennedy 等人在理论分析和实验研究的基础上提出了沿铺装层厚度方向温度分布规律,并估算铺装层温度应力<sup>[10]</sup>; 闵召辉等人利用数值计算将蠕变柔量转换为松弛模量,分析环氧沥青混凝土钢桥面铺装层的温度应力<sup>[11]</sup>; 王言磊等人建立 FRP-混凝土组合桥面的有限元模型,利用有限元软件计算了铺装层在 3 种不利环境温度温差作用下的力学响应和变形特征<sup>[12]</sup>; 于新等人采用现场监测和有限元仿真的方法,对铺装层温度降低情况下的力学响应进行了计算<sup>[13]</sup>。据文献[7]报道,某些采用 TPO 与混凝土组合铺装桥面出现了热不相容问题。

对于 TPO-UHPC 新型铺装结构,无论是铺装结构形式还是铺装材料都与传统的沥青铺装、水泥混凝土铺装不同,因此不仅要研究车辆荷载作用下的力学响应<sup>[3]</sup>,还需要研究薄层 TPO-UHPC 轻型组合桥面层间温度应力问题。

由于 TPO 与 UHPC 热膨胀系数存在差异,环境温度变化将导致两种材料出现变形不一致情况,从

而引起 TPO 与 UHPC 界面处产生附加应力。为了解 TPO 热相关物理力学性能,本文采用应变片法和超声波法分别测定 TPO 材料的热膨胀系数和弹性模量;利用 ABAQUS 有限元软件对组合铺装体系进行温度应力研究,并与理论数值进行比较;对影响 TPO-UHPC 层间温度应力的主要因素进行参数分析,掌握其影响变化规律,为新型铺装体系设计和应用提供技术支持。

## 1 材料参数

### 1.1 TPO 材料参数测试

TPO 由聚氨酯环氧树脂、玄武岩集料组成,其中聚氨酯环氧树脂分为 A、B 两种组分,按质量比 3:1 混合使用,固化后技术性质如表 1 所示;玄武岩集料选用粒径 2.36 mm、1.18 mm 按 1:1 (质量比)混合,级配如表 2 所示。

表 1 聚氨酯环氧树脂固化性质

Tab.1 Properties of cured polyurethane epoxy binders

材料性质	单位	测试值	试验方法
对混凝土的粘附	%	100	ASTM D4541
邵氏硬度(shoreD)	—	46	ASTM D2240
抗压强度	MPa	51.1	ASTM C109
抗拉强度	MPa	18.5	ASTM D638
延伸率	%	65~90	ASTM D638
吸水率	%	<0.5	ASTM D570
屈服强度	MPa	>34.4	ASTM D790

表 2 试验用集料级配

Tab.2 Gradation of aggregate for testing

级配	不同筛孔孔径下的通过率/%			
	4.75 mm	2.36 mm	1.18 mm	0.6 mm
级配上限	100	75	5	1
级配下限	100	30	0	0
合成级配	100	52.5	2.5	0.5

参照《环氧树脂砂浆技术规程》,制作6个40 mm × 40 mm × 160 mm 棱柱形试件,在室内通风环境下放置48 h后拆模.试件如图1所示.

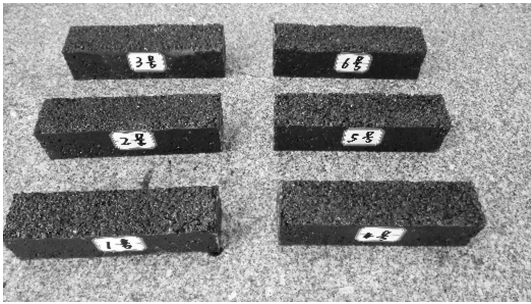


图1 TPO 试件

Fig.1 Specimen of TPO

### 1.1.1 热膨胀系数

参照文献[14],采用电阻应变片法测量 TPO 热膨胀系数.在试件表面中央粘贴 5 mm × 80 mm 电阻应变片作为工作片,在已知膨胀系数的石英玻璃片上粘贴同样的应变片作为补偿片,将工作片和补偿片连接在单臂电桥相邻臂,如图2所示.

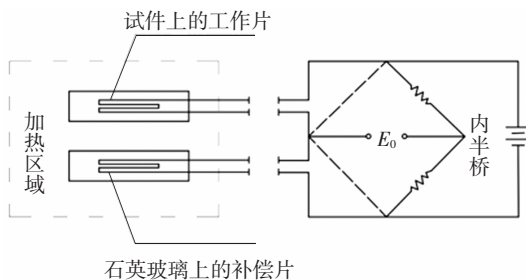


图2 电桥接线图

Fig.2 Bridge connection diagram of strain gauge

两个应变片接成半桥时(见图2),测试材料的膨胀系数可用式(1)表示:

$$\alpha = \frac{\Delta\varepsilon}{\Delta T} + \alpha_c \quad (1)$$

式中: $\Delta T$ 为试验温差; $\Delta\varepsilon$ 为输出应变; $\alpha_c$ 为石英玻璃片膨胀系数, $\alpha_c = 0.54 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ .

将 TPO 试件和石英片一起放入恒温水浴箱中隔水加热,以每 10  $^\circ\text{C}$ 为间隔,每一温度恒温 2 h,随后采集 TPO 试件应变值,测试结果如表3所示.

将表3数据点绘于图3中,采用数理统计方法,得到  $\Delta\varepsilon/\Delta T = 54.24$ ,如图3所示.

由式(1),得 TPO 膨胀系数: $\alpha = \Delta\varepsilon/\Delta T + \alpha_c = 54.24/^\circ\text{C} + 0.54/^\circ\text{C} = 54.78 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ .

表3 不同温度下 TPO 应变测试结果

Tab.3 Test results of TPO expansion coefficient

温度 $T/^\circ\text{C}$	应变 $\varepsilon/10^{-6}$					
	试件 1	试件 2	试件 3	试件 4	试件 5	试件 6
23.7	0	0	0	0	0	0
30	334	335	342	301	348	332
40	881	915	908	840	892	901
50	1 437	1 419	1 411	1 456	1 398	1 503
60	1 952	1 961	1 960	1 978	1 970	2 008
70	2 480	2 448	2 498	2 520	2 512	2 560

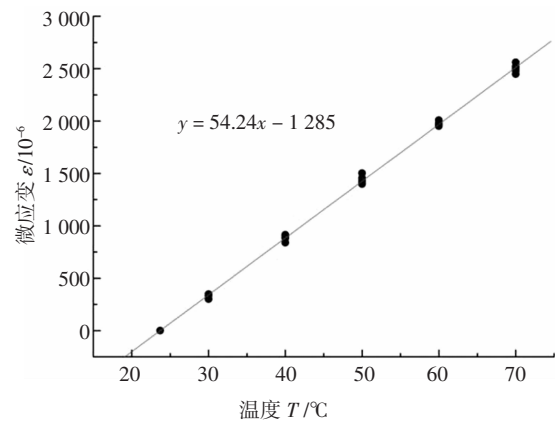


图3 TPO 应变与温度关系

Fig.3 Relationship between strain of TPO and temperature

### 1.1.2 弹性模量

相比传统静压方法测量弹性模量,超声波法具有测试方法简单、测定快捷、试样在测定过程中无破损等优点.本文采用超声波法研究 TPO 材料正常使用温度下弹性模量变化规律.

根据文献 [15],TPO 材料的动弹性模量  $E_d$  可用式(2)表示.

$$E_d = \rho v^2 (1 + \mu)(1 - 2\mu)/(1 - \mu) \quad (2)$$

式中: $\rho$ 为 TPO 的密度,通过表干密度法测得为 2.21  $\text{g}/\text{cm}^3$ ; $\mu$ 为 TPO 泊松比; $v$ 为超声波在 TPO 中传播的纵波波速.

通过超声波法测得的动弹性模量  $E_d$  与常规方法测定的静弹性模量  $E_j$  有非常好的相关性<sup>[15]</sup>:

$$K = E_j/E_d \quad (3)$$

联立式(2)、式(3),即可得到 TPO 不同温度下的静弹性模量:

$$E_j = K\rho v^2 (1 + \mu)(1 - 2\mu)/(1 - \mu) \quad (4)$$

1)测定波速

将试件置于环境箱中,模拟温度从  $-25^\circ\text{C}$ 到 65

℃,测定不同温度下 TPO 超声波波速  $v$ ,测试结果如表 4 所示.

表 4 不同温度下 TPO 波速测定结果

Tab.4 Wave velocities of TPO at different temperature

温度 $T/^\circ\text{C}$	波速 $v/(\text{km}\cdot\text{s}^{-1})$					
	试件 1	试件 2	试件 3	试件 4	试件 5	试件 6
-25	3.150	3.150	3.125	3.150	3.150	3.175
-15	3.101	3.101	3.101	3.101	3.101	3.101
-5	3.030	3.030	3.050	3.050	3.050	3.030
5	2.985	2.985	2.985	2.985	2.985	2.985
15	2.899	2.899	2.920	2.899	2.920	2.899
25	2.817	2.817	2.837	2.817	2.797	2.797
35	2.703	2.685	2.703	2.685	2.703	2.685
45	2.532	2.532	2.516	2.532	2.516	2.532
55	2.299	2.312	2.299	2.299	2.299	2.312
65	2.061	2.051	2.061	2.073	2.051	2.073

2)确定  $K, \mu$

同一试件分别测试其静弹性模量、动弹性模量、泊松比,见图 4、图 5,测试结果如表 5 所示.



图 4 波速测试  
Fig.4 Wave speed test

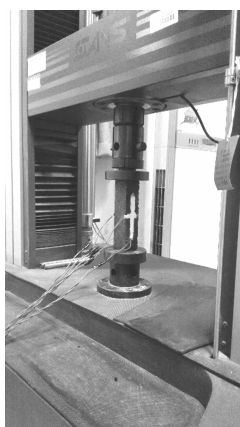


图 5 静弹性模量及泊松比测试  
Fig.5 Elastic modulus and Poisson's ratio test

表 5 TPO 测试结果汇总表

Tab.5 Summary of TPO test results

温度 $T/^\circ\text{C}$	静弹性模量	动弹性模量	$K=E_j/E_d$	泊松比
	$E_j/\text{GPa}$	$E_d/\text{GPa}$		
15	6.88	12.59	0.55	0.34
25	6.50	11.81	0.55	0.32
35	5.90	10.83	0.54	0.33
平均值	—	—	0.55	0.33

初步研究表明,TPO 动弹性模量与其静弹性模量有良好的相关性, $K$  值变化很小(见表 5),因而验

证了文献[15]的正确性.

3)静弹性模量  $E_j$

由表 5,取  $K = 0.55, \mu = 0.33$ .基于表 4 及式(4),可得到 TPO 弹性模量随温度的变化规律,见图 6.

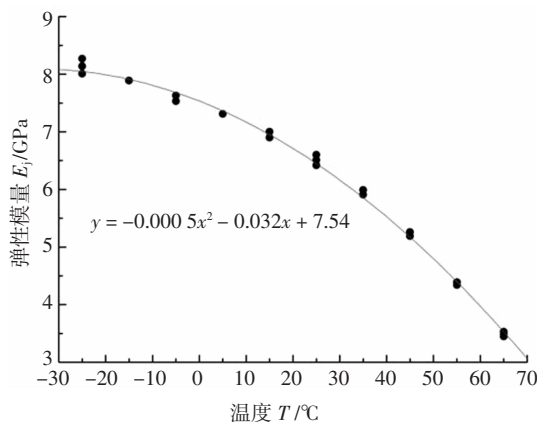


图 6 TPO 静弹性模量与温度关系

Fig.6 Relationship between static elastic modulus of TPO and temperature

从而可得,TPO 静弹性模量  $E_j$  与温度  $t$  的近似关系:

$$E_j = -0.0005t^2 - 0.032t + 7.54 \quad (5)$$

1.2 UHPC 材料参数

1.2.1 弹性模量

在正常工况下,UHPC 受拉和受压时均表现为线弹性.UHPC 材料弹性模量通常在 40~60 GPa,本文参考文献[16],取 UHPC 弹性模量为 42.6 GPa.

1.2.2 热膨胀系数

相比普通混凝土,UHPC 水泥含量较高,粗集料含量低或不含,故其热膨胀系数高于普通混凝土.UHPC 膨胀系数取值参见表 6.

表 6 UHPC 材料热膨胀系数汇总

Tab.6 Summary of thermal expansion coefficients for UHPC

参考文献	[17]	[18]	[19]	[20]
热膨胀系数/ $(10^{-6}\cdot^\circ\text{C}^{-1})$	14.7~15.6	13.6~14.8	12	11

1.2.3 泊松比

国内外文献表明,UHPC 的泊松比在 0.18~0.21 之间,见表 7.

表 7 UHPC 材料泊松比汇总

Tab.7 Summary of UHPC Poisson's ratio

参考文献	[17]	[18]	[20]	[21]
泊松比	0.18	0.21	0.20	0.19

本文参考法国 UHPC 设计规程 AFGC<sup>[20]</sup>,UHPC 热膨胀系数取  $11 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ,泊松比取 0.20.

## 2 TPO-UHPC 层间温度应力分析

“钢桥面-超薄 UHPC-TPO”轻型组合桥面体系中,UHPC 厚度为 35 ~ 50 mm,TPO 厚度为 6 ~ 10 mm,如此薄层结构竖向温度梯度很小,温度梯度所产生的翘曲应力可以忽略不计,故本文只考虑均匀温度变化下 TPO-UHPC 层间产生的内应力.

TPO 与 UHPC 线膨胀系数相差较大,在层间粘结作用下其变形将受到约束,由于 TPO 层的弹性模量和体积都远小于 UHPC 层,且两者牢固粘结在一起,TPO 层变形可看做 UHPC 层变形.相较于 TPO 层膨胀系数  $5.478 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ ,UHPC 层与钢桥面板的膨胀系数相差很小,分别为  $1.1 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$  和  $1.2 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ ,均匀温度作用下,钢桥面板对 UHPC 的温度变形的影响可忽略不计.假设 TPO 为各向同性弹性材料,其温度应力可简化表述为:

$$\sigma_{\text{TPO}} = \sigma_x = \sigma_y = -\frac{E(\alpha_{\text{TPO}} - \alpha_{\text{UHPC}})\Delta T}{(1 - \mu)} \quad (6)$$

式中: $\alpha_{\text{TPO}}$ 、 $\alpha_{\text{UHPC}}$  分别为 TPO、UHPC 材料膨胀系数; $\Delta T$  为温度变化幅度; $E$  为 TPO 材料弹性模量; $\mu$  为 TPO 泊松比.

### 2.1 有限元计算模型

以润扬长江公路大桥南汊桥为计算原型,建立新型组合钢桥面体系有限元计算模型,如图 7 所示.其中横桥向取半截面宽 16.45 m,纵桥向取一个标准梁段 16.1 m,包括 5 块横隔板.

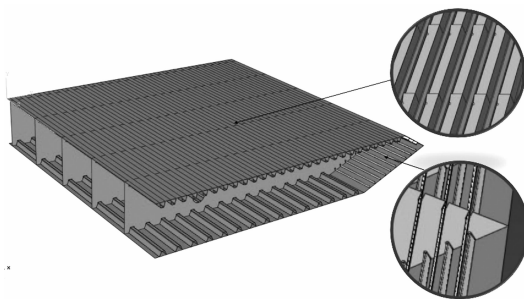


图 7 有限元模型

Fig.7 Finite element model

采用如下计算假定:各层为连续、均匀、各向同性的弹性体,各层层间竖向、水平位移均连续.钢箱梁部分采用壳单元 S4R 模拟,UHPC 层和 TPO 层均采用实体单元 C3D8R 模拟,UHPC 层与钢箱梁的顶面完全连接,TPO 层与 UHPC 层完全连接.为节约计

算资源,钢箱梁取半幅,在横桥向跨中位置采用对称约束.材料物理学参数如表 8 所示.

表 8 材料物理学参数

Tab.8 Material physical and mechanical parameters

项目	数值	项目	数值
顶板厚	14 mm	梯形肋厚	8 mm
横隔板间距	3 220 mm	梯形肋间距	600 mm
横隔板厚	8 mm	纵隔板厚	16 mm
横隔板厚(有吊杆)	10 mm	腹板厚	24 mm
钢板弹性模量	206 GPa	UHPC 弹性模量	42.6 GPa
钢板膨胀系数	$12 \times 10^{-6}$	UHPC 膨胀系数	$11 \times 10^{-6}$
钢板泊松比	0.30	TPO 泊松比	0.33
TPO 膨胀系数	$54.78 \times 10^{-6}$	UHPC 泊松比	0.20
UHPC 厚度	35 mm	TPO 厚度	10 mm

取桥面铺装施工温度为  $20^{\circ}\text{C}$ ,不同温度下 TPO 温度应力仿真计算结果如表 9 所示.

### 2.2 有限元模型验证

依据式(6),可得到不同温度下 TPO 温度应力估算值,见表 9.

表 9 TPO 温度应力计算结果

Tab.9 The calculation results of TPO temperature stress

温度/ $^{\circ}\text{C}$	$\Delta T/^{\circ}\text{C}$	$E/\text{GPa}$	计算值/MPa	模拟值/MPa	误差/%
-5	-25	7.69	12.56	12.10	3.7
5	-15	7.36	7.21	7.01	2.8
15	-5	6.95	2.27	2.21	2.6
25	5	6.43	-2.10	-2.08	1.0
35	15	5.81	-5.69	-5.71	0.4
45	25	5.10	-8.33	-8.36	0.4

注:拉应力为正值,压应力为负值

由表 9 可知,TPO 温度应力模拟值与理论值非常接近,最大误差为 3.7%,表明有限元模型准确有效.需要说明的是简化公式(6)是建立在钢桥面与 UHPC 膨胀系数十分相近的基础上,可视为“钢桥面-超薄 UHPC”铺装结构初步设计的估算公式.相比之下,有限元模型能够准确定义材料属性,模拟多种层间接触状态、不同边界条件、不规则几何形状等,从而更好地反映铺装层的实际工况,可用于实桥温度应力的精细化设计计算.

### 2.3 TPO-UHPC 层间温度应力计算与分析

对于 TPO-UHPC 复合铺装结构,当环境温度变

化时, 由于 TPO 与 UHPC 的膨胀系数相差较大, 两种材料的变形将会出现差异, 在 TPO 与 UHPC 的界面处产生附加应力. 本文采用有限元方法, 分析 TPO-UHPC 界面温度应力大小及分布特征, 提取层间剪应力和法向拉应力, 探讨温度变化对组合铺装带来的不利影响.

根据润扬长江大桥地理位置和《公路桥涵设计通用规范》(以下简称《桥规》)规定, 环境温度分别取最高、最低温度为 46 °C、-9 °C, 考虑施工温度为 20 °C. TPO-UHPC 层间剪应力和层间法向拉应力应力峰值结果见表 10.

表 10 层间温度应力峰值结果

Tab.10 Results of peak interface temperature stress

温度 T/°C	层间最大剪应力/MPa	最大法向拉应力/MPa
-9	2.85	1.09
5	1.03	0.29
25	0.31	0.09
46	1.83	0.77

从表 10 可知, 负温环境产生较大的层间应力, 如 -9 °C 条件下, TPO-UHPC 界面最大剪切应力为 2.85 MPa, 法向拉应力为 1.09 MPa, 层间温度应力需要引起重视.

### 3 层间温度应力影响因素分析

为了进一步研究组合铺装体系 TPO-UHPC 层间温度应力特性, 选取上下层膨胀系数比、TPO 厚度以及施工温度等设计参数, 分析组合铺装层间温度应力变化规律, 掌握相关设计参数的影响特征.

#### 3.1 膨胀系数比

由于 TPO 与 UHPC 膨胀系数存在差异, 温度升降作用导致上下层胀缩变形不一致, 从而可能出现层间破坏. 钢桥面专用 UHPC 热膨胀系数为  $11 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ , TPO 与 UHPC 膨胀系数比对铺装层间力学性能的影响如图 8 所示.

由图 8 可见, 1) TPO-UHPC 层间剪应力、法向拉应力均随着膨胀系数比的增加而增大, 且呈线性增长趋势; 2) 对比高温环境, 低温条件下的膨胀系数比对层间应力值影响更大; 3) 剪应力增幅较法向拉应力更明显, 层间剪应力起主导作用; 与文献[8]研究结果一致.

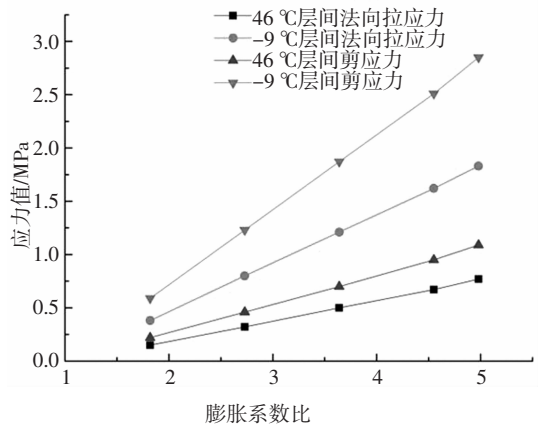


图 8 不同膨胀系数比对层间温度应力影响

Fig.8 Effects of different expansion coefficients ratio on interface temperature stress

通过以上分析可以得出, 较小的膨胀系数比 TPO 能显著降低铺装层层间应力水平, 膨胀系数比由 5 降到 2.7 时, 低温时最大层间剪应力由 2.85 MPa 降低至 1.23 MPa, 降幅为 56.8%; 法向拉应力由 1.09 MPa 降低 0.46 MPa, 降幅为 57.8%. TPO 热膨胀系数与固化剂类型、胶砂比等有很大的关系, 所以在实际应用中, 应选择合适的固化剂类型, 调配聚合物含量, 使其尽量和 UHPC 膨胀系数相匹配, TPO 膨胀系数  $\alpha$  宜小于等于  $35 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ , 以减小温度应力.

#### 3.2 施工温度

不同的施工温度将影响 TPO-UHPC 层间温度应力大小. 层间温度应力变化规律如图 9 所示.

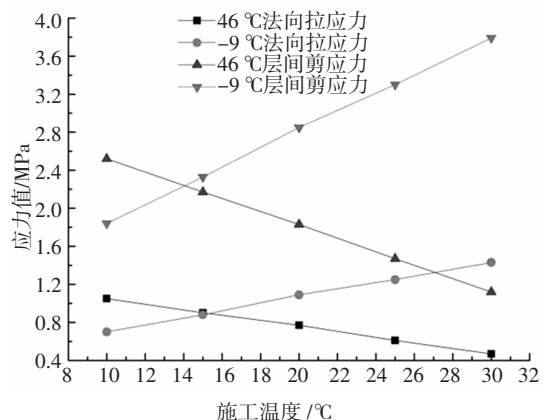


图 9 不同施工温度对层间温度应力影响

Fig.9 Effects of different construction temperature on interface temperature stress

由图 9 可知: 1) 在降温作用下, 层间应力随着施工温度的增大而呈线性增大; 2) 在升温作用下,

层间应力随着施工温度的增大而呈线性减小。

通过以上分析可知,对层间剪应力和法向拉应力而言,升温 and 降温作用下的影响呈相反趋势,所以存在一个最佳温度,使应力大小在升温和降温时都处在相对较低的水平.以润扬长江大桥为例,当施工温度在 14~16 °C 之间时,层间剪应力和法向拉应力峰值均处在较低水平.建议实际工程中,选择合适的施工温度,以降低附加温度应力带来的不利影响.

### 3.3 TPO 厚度

TPO 一般厚度为 6~15 mm,选取 6、8、10、12、14 mm 5 种铺装层厚度分别建立有限元模型,层间温度应力变化规律如图 10 所示。

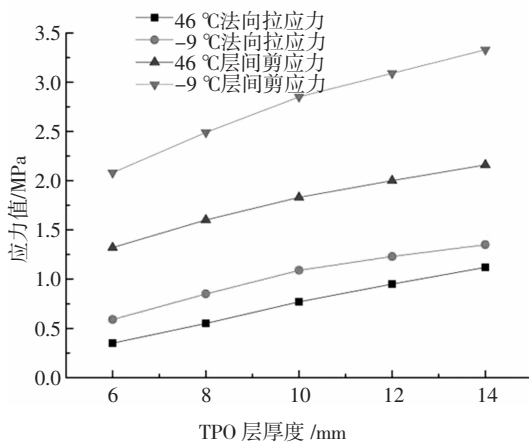


图 10 不同 TPO 厚度对层间温度应力影响

Fig.10 Effects of different thickness of TPO pavement on interface temperature stress

由图 10 看出,1)TPO-UHPC 层间剪应力、法向拉应力均随 TPO 层厚度增加而增大;2)在 10 mm 前增长趋势较大,10 mm 之后增长趋势放缓。

通过以上分析可知,减小 TPO 铺装层厚度能有效减小层间温度应力.如 TPO 从 14 mm 逐渐减小到 8 mm,低温时最大层间剪应力由 3.33 MPa 降低至 2.08 MPa,降幅为 37.5%;法向拉应力由 1.35 MPa 降低至 0.59 MPa,降幅为 56.3%。TPO 主要起磨耗层作用,本文建议厚度设计为 6~10 mm。

施工温度、TPO 厚度对 TPO-UHPC 层间应力的综合影响如图 11 所示.由图可知:1)最大层间剪应力和最大法向拉应力随两个因素的变化规律是一致的;2)均匀温度变化下最大层间应力随 TPO 厚度的减小而显著减小;3)施工温度从 10 °C 上升至 30 °C 时,最大层间应力先减小后增大,在 15 °C 时达到最小值。

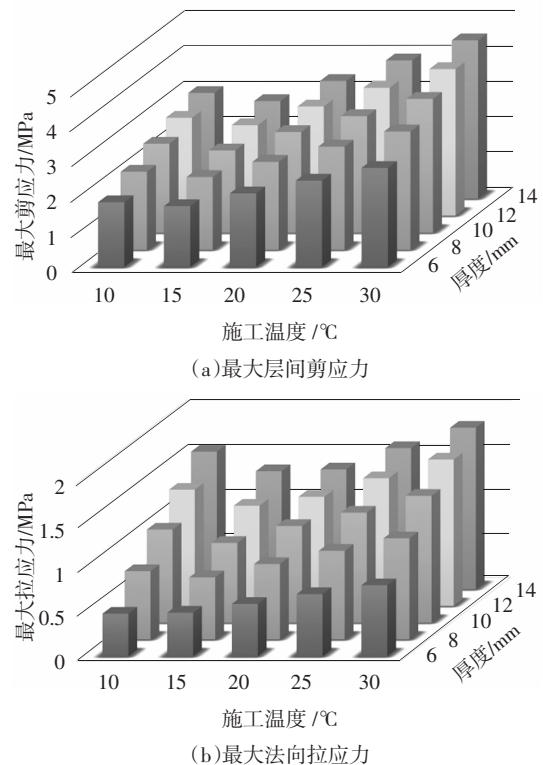


图 11 施工温度及 TPO 厚度对最大层间应力影响

Fig.11 Effect of construction temperature and TPO thickness on maximum interfacial stress

## 4 结论

1)参数实验表明:TPO 材料热膨胀系数通常比水泥基材料要大得多,本次试验 TPO 热膨胀系数为  $54.78 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ;TPO 弹性模量随温度升高而减小,TPO 弹性模量与温度关系可近似表示为: $E_t = -0.0005t^2 - 0.032t + 7.54$ 。

2)在均匀温度变化下,层间剪应力和法向拉应力随着膨胀系数比和 TPO 层厚度减小而减小.建议选择合适的固化剂,控制 TPO 膨胀系数  $\alpha$  小于等于  $35 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ,降低 TPO-UHPC 层间温度应力;TPO 主要起磨耗层作用,设计厚度宜为 6~10 mm。

3)在高温和低温环境下,施工温度对温度应力的影响趋势相反.应选择合适的施工温度,南方地区 TPO 施工温度宜为 15 °C 左右。

4)在均匀温度变化下,层间剪切应力相较于法向拉应力在铺装体系中占主导地位.因此,需要对 UHPC 表面进行糙化处理,UHPC 表面构造深度宜为 0.4~0.55 mm。

## 参考文献

- [1] 黄卫.大跨径桥梁钢桥面铺装设计[J].土木工程学报,2007,40(9):65—77.  
HUANG W.Design of deck pavement for long-span steel bridges [J]. China Civil Engineering Journal,2007,40(9):65—77. (In Chinese)
- [2] WALTER R,OLESEN J F,STANG H,*et al.*Analysis of an orthotropic deck stiffened with a cement-based overlay[J].Journal of Bridge Engineering,2007,12(3):350—363.
- [3] SHAO X D,YI D D,HUANG Z Y,*et al.*Basic performance of the composite deck system composed of orthotropic steel deck and ultrathin RPC layer[J]. Journal of Bridge Engineering,2013,18(5):417—428.
- [4] 李嘉,冯啸天,邵旭东,等.正交异性钢桥面-RPC薄层组合铺装体系研究[J].湖南大学学报(自然科学版),2012,39(12):7—12.  
LI J,FENG X T,SHAO X D,*et al.*Research on composite paving system with orthotropic steel bridge deck and thin RPC layer[J]. Journal of Hunan University(Natural Sciences),2012,39(12):7—12.(In Chinese)
- [5] 李嘉,杨波,邵旭东,等.钢桥面-薄层 CRRPC 组合结构栓钉连接件抗剪疲劳性能研究[J].土木工程学报,2016,49(6):67—75.  
LI J,YANG B,SHAO X D,*et al.*Research on shear fatigue of studs for composite deck system of steel slab and thin CRRPC layer[J]. China Civil Engineering Journal,2016,49(6):67—75.(In Chinese)
- [6] RICHARD P,CHEYREZY M.Composition of reactive powder concretes[J].Cement and Concrete Research,1995,25(7):1501—1511.
- [7] DAVID W F,DAVID W W.Long-term performance of polymer concrete for bridge decks [R]. Washington DC:Transportation Research Board,2011:1—64.
- [8] CHOI D U,FOWLER D W,WHEAT D L.Thermally-induced interface stresses in polymer concrete-Portland cement concrete composite beams[C]//Second International RILEM Symposium on Adhesion between Polymers and Concrete. Dresden: Rilem Publications Sarl,1999:67—81.
- [9] JONES M R.Calculated deck plate temperatures for a steel box bridge[J].Bridge Decks,1977,78:1—10.
- [10] KENNEDY J B,SOLIMAN M H.Temperature distribution in composite bridges[J].Journal of Structural Engineering,1987,113(3):475—482.
- [11] 闵召辉,黄卫,王晓.环氧沥青混凝土钢桥面铺装层温度应力研究[J].公路交通科技,2003,20(4):12—15.  
MIN Z H,HUANG W,WANG X.On thermal stress of steel-deck pavement of epoxy asphalt concrete [J]. Journal of Highway & Transportation Research & Development,2003,20(4):12—15. (In Chinese)
- [12] 王言磊,郝庆多,欧进萍.FRP-混凝土组合桥面结构热应力分析[J].玻璃钢/复合材料,2011(5):49—52.  
WANG Y L,HAO Q D,OU J P.Thermal stress analysis of hybrid FRP-concrete bridge superstructure[J].Fiber Reinforced Plastics/Composites,2011(5):49—52. (In Chinese)
- [13] 于新,刘云,吴建涛.混凝土箱梁桥沥青混凝土铺装层温度应力分析[J].北京交通大学学报,2011,35(4):99—106.  
YU X,LIU Y,WU J T.Thermal stress analysis of asphalt concrete pavement on concrete box girder bridge[J].Journal of Beijing Jiaotong University,2011,35(4):99—106. (In Chinese)
- [14] 张国梁,李松.用应变片测量水泥混凝土热膨胀系数的试验方法[J].城市道桥与防洪,2012,2(2):112—115.  
ZHANG G L,LI S.Test method of strain gauge to measure thermal expansion coefficient of cement concrete [J]. Urban Roads Bridges & Flood Control,2012,2(2):112—115. (In Chinese)
- [15] 吕毅刚,韩伟威,吕健鸣,等.基于暴露试验的桥梁混凝土长期弹性模量试验研究[J].公路交通科技,2016,33(5):79—84.  
LÜ Y G,HAN W W,LÜ J M,*et al.* Experimental study on long-term elastic modulus of bridge concrete based on exposure experiment [J]. Journal of Highway & Transportation Research & Development,2016,33(5):79—84. (In Chinese)
- [16] 邵旭东,方恒,李文光.钢-超薄 UHPC 组合桥面板界面抗剪性能研究[J].湖南大学学报(自然科学版),2016,43(5):44—51.  
SHAO X D,FANG H,LI W G.Research on the interfacial shear resistant performance of the composite deck system composed of orthotropic deck and ultra-thin uhpc layer[J].Journal of Hunan University(Natural Sciences),2016,43(5):44—51. (In Chinese)
- [17] GRAYBEAL B.Material property characterization of ultra-high performance concrete [R]. Mclean:Federal Highway Administration,2006:116—117.
- [18] AHLBORN T M,*et al.*Durability and strength characterization of ultra-high performance concrete under variable curing regimes[C]//FEHLING E,SCHMIDT M,*et al.*Proceedings of the Second International Symposium on Ultra High Performance Concrete.Kassel: Kassel University Press,2008:197—204.
- [19] BEHLOUL M.Fire resistance of ductal ultra-high performance concrete[C]// Proceedings of the First Fib Congress.Osaka,Japan,2002:421—430.
- [20] AFGC Ultra high performance fiber-reinforced concrete[S].Paris, France:Interim Recommendations,AFGC-SETRA Working Group,2002:40—56.
- [21] BONNEAU O.Mechanical properties and durability of two industrial reactive powder concretes [J]. ACI Materials Journal,1997,94(4):286—290.