

# 桥面铺装温度对正交异性钢桥面板疲劳的影响

吴 冲<sup>1</sup>, 刘海燕<sup>1</sup>, 张志宏<sup>2</sup>, 孙一鸣<sup>3</sup>

(1. 同济大学 桥梁工程系, 上海 200092; 2. 宁波天意钢桥面铺装技术有限公司, 浙江 宁波 315042;

3. 上海市市政工程设计研究院总院(集团)有限公司, 上海 200092)

**摘要:** 通过带桥面铺装的正交异性钢桥面板足尺模型疲劳试验, 实测了不同桥面铺装温度条件下钢桥面板的受力, 分析了桥面铺装温度对钢桥面板疲劳损伤度的影响。结果表明: 沥青混合料钢桥面铺装刚度随着温度升高迅速降低, 导致铺装层下的正交异性钢桥面板受力迅速增加; 在相同的荷载条件下, 高温(55℃)条件下钢桥面板疲劳损伤度约为常温(10℃)的 21 倍。

**关键词:** 正交异性钢桥面板; 钢桥疲劳试验; 损伤度; 桥面铺装温度

**中图分类号:** U443.3

**文献标志码:** A

## Influence of Pavements Temperature on Fatigue Life of Orthotropic Deck of Steel Bridge

WU Chong<sup>1</sup>, LIU Haiyan<sup>1</sup>, ZHANG Zhihong<sup>2</sup>, SUN Yiming<sup>3</sup>

(1. Department of Bridge Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Tianyi Steel Deck Pavement Technology Co. Ltd., Ningbo 315042, China; 3. Shanghai Municipal Engineering Design Institute(Group) Co. Ltd., Shanghai 200092, China)

**Abstract:** Stresses of the steel bridge deck were measured through fatigue test with full-scale orthotropic deck specimen model under different temperature conditions. The results show that the stiffness of the asphalt mixture reduces quickly with the increasing of temperature, which results in rapid increasing of stresses of orthotropic deck of steel bridge under

the pavement. The fatigue damage of the steel deck of bridge at high temperature (about 55℃) is approximately 21 times that at normal temperature (about 10℃) under the same load conditions.

**Key words:** orthotropic deck steel bridge; fatigue test; fatigue damage; temperature of pavement

正交异性钢桥面板是由纵、横互相垂直的加劲肋连同桥面盖板所组成的共同承受车轮荷载的结构, 以其自重轻、承载能力强和整体性好等优点在国内外大跨度桥梁中得到广泛应用, 如日本的明石海峡大桥、法国的诺曼底大桥和中国的苏通长江大桥等都采用了正交异性钢桥面板的形式<sup>[1]</sup>。但正交异性钢桥面板由于构造复杂、焊缝多、焊接残余应力大等原因, 在车轮荷载反复作用下容易出现疲劳破坏<sup>[2]</sup>。自 1971 年英国 Seven Bridge 首次发现正交异性钢桥面板焊接疲劳裂缝后, 美国的 Bronx-Whitestone Bridge、巴西的 Rio-Niteroi Bridge、荷兰的 Van Brienenoord Bridge、日本的 Kinuura Bridge 以及中国的部分大桥等都相继发现了疲劳裂纹<sup>[3]</sup>, 典型的破坏形式如图 1 所示。经调查统计发现, 正交异性钢桥面板在高温、重载条件容易产生疲劳裂纹。

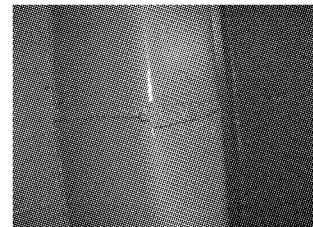
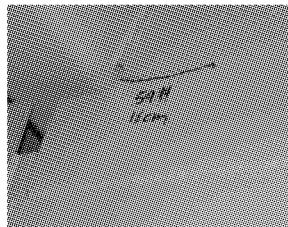
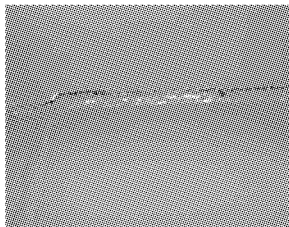


图 1 正交异性钢桥面板疲劳破坏形式

Fig.1 typical fatigue failure mode of orthotropic steel bridge deck

收稿日期: 2012-06-06

基金项目: 国家“九七三”重点基础研究发展规划(2013CB036303); 交通运输部科技项目(2009 318 000 1070)

第一作者: 吴 冲(1962—), 男, 教授, 工学博士, 博士生导师, 主要研究方向为钢桥与组合结构桥梁. E-mail: cwu@tongji.edu.cn

国内外许多学者都对正交异性钢桥面板的疲劳性能进行试验和理论研究. 英国运输和道路研究试验所 TRRL 的 Cuninghame 等根据 Severn 桥中出现的疲劳裂缝进行了钢桥面板的疲劳细节的试验研究<sup>[4]</sup>; 在 20 世纪 90 年代初, 欧洲煤钢联合体 EGKS 专门对正交异性钢桥面板的疲劳寿命进行了理论和实验研究, 这次研究对桥面板与纵肋连接、纵肋和横肋的连接和纵肋接头三种疲劳细节进行了强度实验, 并采用有限元和实验的结果对比分析得出这三种疲劳细节的强度<sup>[5]</sup>. 美国 P A Tsakopoulos 和里海大学的 J W Fisher 教授以纽约州的 Williamsburg 桥和 Bronx-Whitestone 桥的桥面板的改造工程为背景对钢桥面板的疲劳性能进行了详细研究<sup>[6]</sup>; 中国的童乐为、王春生等也对正交异性钢桥面板进行了分析研究<sup>[7-9]</sup>. 但目前不同温度条件下带桥面铺装的正交异性钢桥面板受力研究不多见.

中国大多数地区为亚热带季风和温带季风气候, 夏季高温多雨, 据调查显示, 夏季高温季节钢桥面铺装表面温度高达 67℃, 钢桥面板本身也能达到 55℃. 正交异性钢桥面铺装多为沥青混合料, 其材性会随着温度的升高发生软化<sup>[10-11]</sup>, 从而导致钢桥面板的应力增加. 本文以辽河滨海公路大桥为背景, 通过足尺模型试验研究了不同温度条件下带铺装层的钢桥面板的受力情况.

## 1 桥面铺装动态模量与温度的关系

对于承受车辆动态荷载、具有粘弹塑性的沥青混凝土桥面铺装, 动态模量能更好地反映其受力特性. 目前, 国外先进的沥青路面结构设计方法基本都采用动态模量作为路面结构设计的基本参

数<sup>[12-13]</sup>.

江苏省交科院参照 AASHTO TP-62 试验方法, 利用 Superpave 简单性能试验机测定了不同温度、不同加载频率下 RA05 混合料的动态模量(图 2). RA05 混合料的弹性随着温度的升高迅速降低, 同时, 动态模量会随着加载频率的降低而减小.

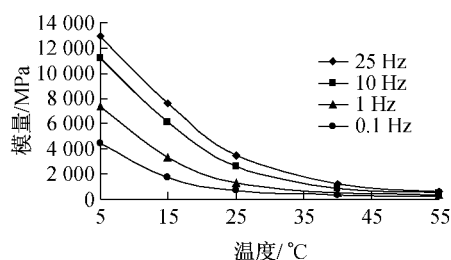


图2 RA05 混合料动态弹性模量

Fig.2 Dynamic modulus of RA05 mixture

## 2 试验模型与试验方法

### 2.1 试验模型

带桥面铺装的正交异性钢桥面板足尺试验模型如图 3 和图 4 所示, 桥面板构造以及铺装厚度与实桥完全相同. 桥面顶板厚度为 16 mm, U 肋上开口宽 300 mm, 下宽 170 mm, 高 300 mm, U 肋间距 600 mm, 厚度为 8 mm, 横隔板厚度 10 mm, 横隔板间距为 3.75 m, 侧腹板厚 16 mm. 整个试验模型长为 8.0 m, 宽度为 1.7 m, 高 0.75 m. 桥面铺装厚度为 60 mm, 为了对比不同铺装使用性能, 试验模型的其中一跨采用树脂沥青组合体系钢桥面铺装(ERS), 另一跨采用浇注式沥青混凝土铺装结构(GA+SMA), 本文只研究不同温度条件下钢桥面板的受力性能, 不对铺装使用性能做详细研究.

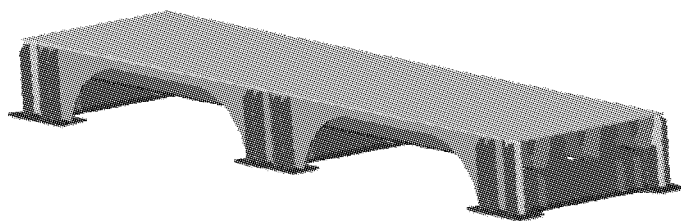


图3 疲劳试验模型

Fig.3 Structure model of the fatigue test

### 2.2 加载及数据采集设备

实验采用南非 MLS(加速加载机)测试系统责任有限公司生产的 MLS66 加载设备(加速加载机), 如图 5 所示, MLS66 是一个足尺铺面加速加载车, 它可以模拟真实轮载作用到桥面铺面结构上. 该加

载车由刚性主框架、6 组轮架及内部配置的双轮胎(305/70 R22.5)组成, 轮架在垂直环形导轨中运行. 当轨道运行到底部时, 轮架上的轮胎与铺装表面接触施压, 最大双轮胎荷载为 7.5 t. 轮架的最大速度可达到  $6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 加载速度为  $6000 \text{ 次} \cdot \text{h}^{-1}$ .

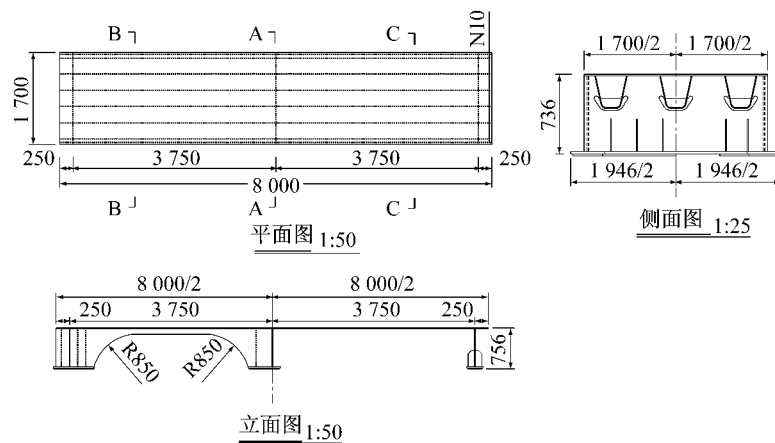


图 4 模型试件图(单位:mm)

Fig.4 Detail of the specimen(unit:mm)

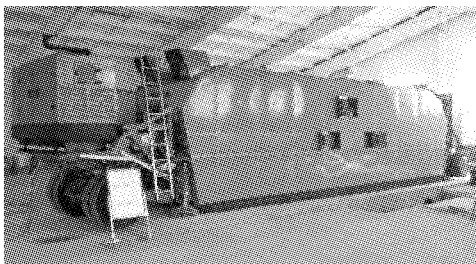


图 5 MLS66 加速加载设备

Fig.5 Accelerated loading equipment(MLS66)

采用静态采集和动态采集两种方式测试应变. 两跨跨中处桥面板应变用东华动态应变测试系统 DH5920 测试,其余部位的应变用东华静态测试系统 DH3815 测试,应变测试装置如图 6 所示.

### 2.3 试验测点布置

本文只研究树脂沥青组合体系钢桥面铺装 (ERS) 下正交异性钢桥面板的受力情况,因此,在这里只给出了铺装为 ERS 桥面板跨中位置应变片布置图,如图 7 所示,顺桥向和横桥向各 3 个应变片,

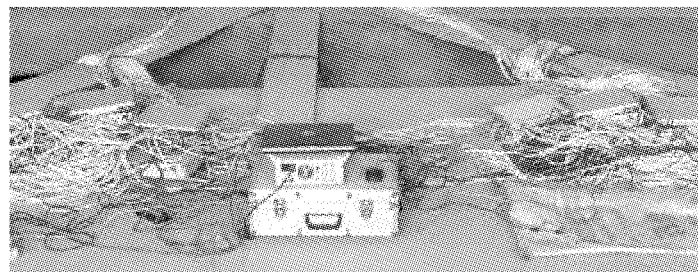


图 6 应变采集设备

Fig.6 Strain collection devices

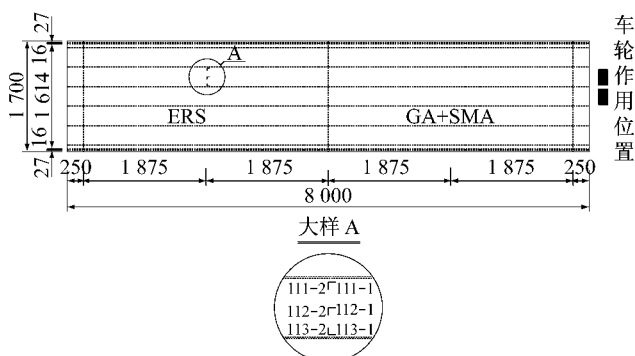


图 7 试验测点布置图(单位:mm)

Fig.7 Layout of test measuring point(unit:mm)

共 6 个应变片,其中 111-1、112-1 和 113-1 用于测试顺桥向应变,111-2、112-2 和 113-2 用于测试横向应

变. 111 和 113 为靠近 U 肋与桥面板焊接位置,112 为两个 U 肋中间位置.

### 2.4 试验加载方案

本次疲劳试验一共加载了 250 万次,其中 0~50 万次双轮试验荷载为 50 kN,50 万次以后试验荷载为 75 kN,试验加载方案见表 1,本次试验详细研究了温度和水对桥面铺装以及钢桥面板受力的影响,但本文只讨论温度对钢桥面桥面板受力的影响,温度的施加方式采用外接电热板将铺装加热到需要温度,然后用试验机自带的保温系统维持恒定温度. 由于 170 万次以前温度补偿片损坏,因此 170 万次以前所测得的加温时的应变是不准确的,170 万次以后,重新布置了温度补偿片.

表 1 试验加载方案

Tab.1 Loading program of the fatigue test

	次数/万次													
	0~50	50~73.5	73.5~90	90~100	100~110	110~120	120~130	130~146.5	146.5~150	150~160	160~170	170~230	230~240	240~250
荷载/kN	50	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75
加水	否	否	是	否	否	否	否	是	否	否	否	否	否	否
温度	室温 (约 10℃)	室温 (约 10℃)	室温 (约 10℃)	40℃	40℃	55℃	室温 (约 10℃)	室温 (约 10℃)	室温 (约 10℃)	40℃	40℃	室温	40℃	55℃

### 3 试验结果及分析

#### 3.1 不同温度下钢桥面板的应力对比

沥青混合料是温度敏感性材料,材料的弹性模量会随着温度的增加而减小,从而会影响钢桥面板的受力状态.本节对比研究了不同温度条件下钢桥面板的受力情况,实验 170~230 万次的钢桥面板动态采集是在室温下进行的,230~240 万次加温到 40

℃,240~250 万次加温到 55℃.图 8—13 为各测点不同温度条件下 10 s 内的应力历程对比,从图中可以看出,在室温条件下,钢桥面板的应力最小,当加温到 40℃时,桥面板的应力急剧增加,当加温到 55℃时,铺装进一步软化,钢桥面板的应力继续增加.据此可以推断,在夏季高温季节,正交异性钢桥面板的受力比冬季寒冷季节高出许多,钢桥面板的疲劳损伤主要是在夏季高温季节积累的.

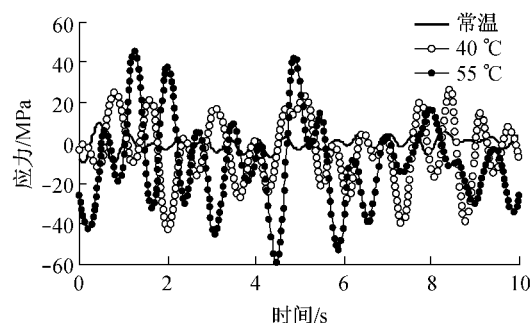


图 8 U 肋与桥面板焊接位置纵向应力(111-1)

Fig.8 Longitudinal stress at the welding position of U-rib and top deck(111-1)

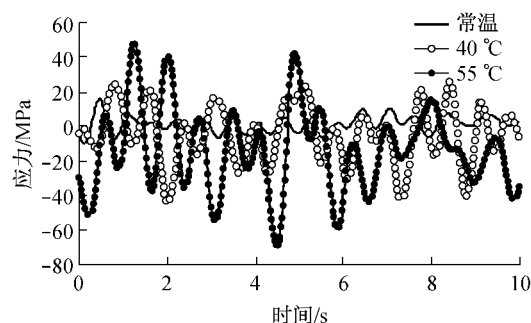


图 9 U 肋与桥面板焊接位置横向应力(111-2)

Fig.9 Horizontal stress at the welding position of U-rib and top deck(111-2)

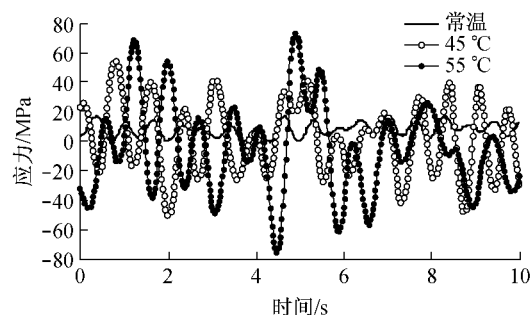


图 10 两 U 肋中间位置桥面板纵向应力(112-1)

Fig.10 Longitudinal stress of top deck between two U-rib(112-1)

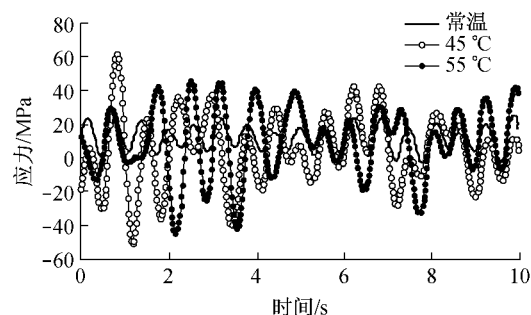


图 11 两 U 肋中间位置桥面板横向应力(112-2)

Fig.11 Horizontal stress of top deck between two U-rib(112-2)

#### 3.2 不同温度条件钢桥面板损伤分析

##### 3.2.1 疲劳细节及 S-N 曲线

U 肋与桥面顶板焊接位置顶板沿着焊缝疲劳开裂是正交异性钢桥面板的一种典型疲劳破坏形式

(图 14),其主要是由局部轮压作用下焊缝位置桥面顶板横向正应力产生的,本文以该疲劳细节(测点 113-2)作为研究对象分析不同温度条件下桥面板的疲劳损伤情况.

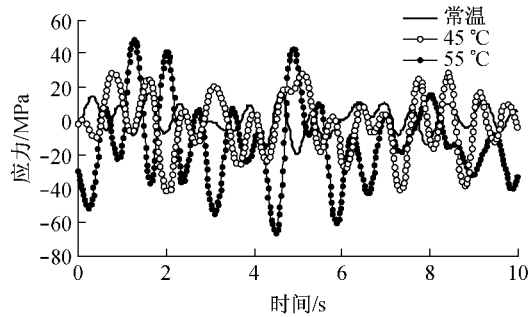


图12 U肋与桥面板焊接位置纵向应力(113-1)

Fig.12 Longitudinal stress at the welding position of U-rib and top deck(113-1)

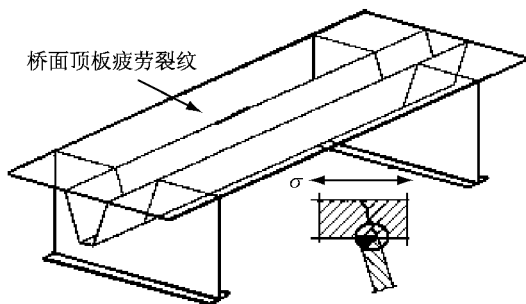


图14 U肋与桥面顶板焊接位置桥面顶板疲劳细节

Fig.14 Fatigue detail of top deck at the welding position of U-rib and top deck

U肋与桥面顶板焊接位置顶板沿着焊缝疲劳破坏细节的疲劳强度曲线(S-N曲线)采用文献[4]中推荐的S-N曲线,表达式如下:

$$\log N = 11.89 - 2.855 \lg \Delta \sigma \quad (1)$$

### 3.2.2 损伤度分析

钢桥面板的疲劳损伤度根据测点113-2动采应力计算分析,车轮加载轮压为75 kN,加载频率为6 000转·h<sup>-1</sup>,由于车轮加载速度和轴重都是确定的,因此可以认为加载过程是一个平稳过程,数据分析时每加载10万次取其中的1 min所采集的应变数据作为样本进行分析计算,图15—17为各加载阶段1 min的应力历程,试验中170~230万次为常温条件下进行加载,230~240万次为40 °C条件下加载,240~250万次为55 °C条件下加载。

通过雨流计数法对应力历程进行计数处理,可以得到相应的应力幅频值谱,然后采用Miner累积损伤准则计算不同温度条件下桥面板的损伤度,计算分析结果见表2。从分析结果可以看出,常温条件下加载60万次钢桥面板的损伤度为0.002 677,高温条件下20万次桥面板产生的损伤度为

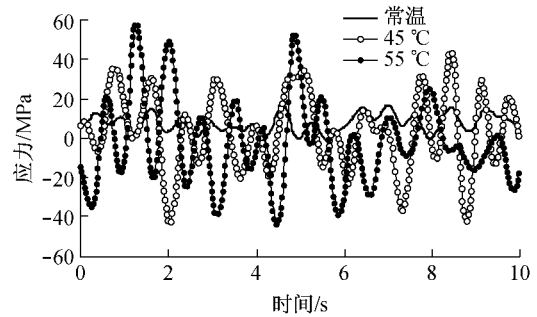


图13 U肋与桥面板焊接位置横向应力(113-2)

Fig.13 Horizontal stress at the welding position of U-rib and top deck(113-2)

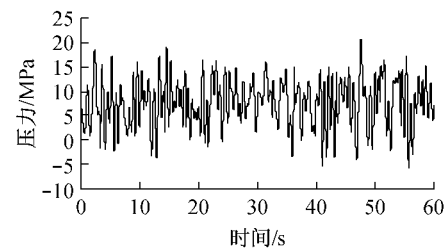


图15 170~230万次常温加载1 min应力历程

Fig.15 Stress history for one minute between 1.7 million and 2.3 million loaded at room temperature

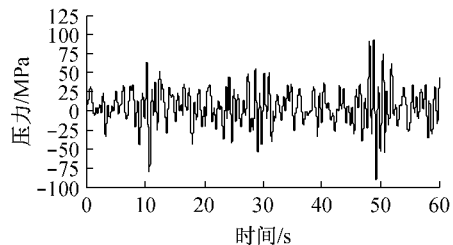


图16 230~240万次40 °C加载1 min应力历程

Fig.16 Stress history for one minute between 2.3 million and 2.4 million loaded with temperature of 40 °C

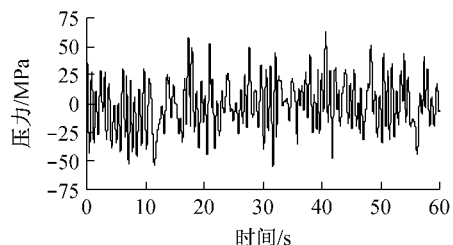


图17 240~250万次55 °C加载1 min应力历程

Fig.17 Stress history for one minute between 2.4 million and 2.5 million loaded with temperature of 55 °C

0.018 811,换言之,相同的车辆荷载情况下,高温环境下钢桥面板产生的疲劳损伤是常温条件下的21倍。

表 2 不同温度条件下钢桥面板的损伤度

Tab.2 Fatigue damage of the steel bridge deck under different temperature conditions

温度条件	加载过程/万次	损伤度/ $10^{-7} \text{ min}^{-1}$	各加载阶段 10 万次总损伤度	总损伤度
常温(约 $10^{\circ}\text{C}$ )	170~180	5.12	0.000 512 212	常温 60 万次 损伤度: 0.002 677
	180~190	8.94	0.000 894 118	
	190~200	4.17	0.000 417 402	
	200~210	3.91	0.000 390 937	
	210~220	3.34	0.000 333 641	
	220~230	1.29	0.000 128 589	
40 $^{\circ}\text{C}$	230~240	90.6	0.009 059 016	高温 20 万次损 伤度:0.018 811
55 $^{\circ}\text{C}$	240~250	97.5	0.009 752 356	

## 4 结 论

本文通过正交异性钢桥面板足尺模型疲劳试验研究了不同铺装层温度条件下钢桥面板的受力情况,主要得到以下结论:

(1) 沥青混合料钢桥面铺装刚度会随着温度的升高而迅速降低,会导致在铺装层温度高的条件下钢桥面板的受力要比温度低时高;

(2) 在相同的荷载条件下,铺装层温度在高温( $55^{\circ}\text{C}$ )条件下钢桥面板疲劳损伤度约为常温( $10^{\circ}\text{C}$ )的 21 倍,正交异性钢桥面板的疲劳损伤主要是在夏季高温季节产生的。

### 参考文献:

- [1] 钱冬生. 关于正交异性钢桥面板的疲劳——对英国在加固其塞文桥时所做研究的评价[J]. 桥梁建设, 1996(2): 8.  
QIAN Dongsheng. On fatigue of steel orthotropic deck Structure—Comments on researches for strengthening the Severn Crossing in UK [J]. Bridge Construction, 1996(2): 8.
- [2] 吴冲. 现代钢桥[M]. 北京: 人民交通出版社, 2006.  
WU Chong. Modern steel bridge [M]. Beijing: China Communications Press, 2006.
- [3] 吴冲, 丁文俊, 张磊. 虎门大桥钢桥面板疲劳损伤现状调查与主要影响因素分析研究[R]. 上海: 同济大学桥梁工程系, 2008.  
WU Chong, DING Wenjun, ZHANG Lei. Survey and analysis of fatigue damage on steel bridge decks of humen bridge[R]. Shanghai: Department of Bridge Engineering of Tongji University, 2008.
- [4] 丁文俊. 正交异性钢桥面板顶板细节疲劳寿命研究[D]. 上海: 同济大学桥梁工程系, 2009.  
DING Wenjun. Study on the fatigue life of deck detail in orthotropic steel deck [D]. Shanghai: Department of Bridge Engineering of Tongji University, 2009.
- [5] 陈忠延. 正交异性钢桥面板疲劳强度的研究[J]. 结构工程师, 1994(4): 26.  
CHEN Zhongyan. Study on fatigue strength of orthotropic steel bridge deck[J]. Structural Engineers, 1994(4): 26.
- [6] Battista R C, Pfeila M S, Eliane M L. Carvalhob fatigue life estimates for a slender orthotropic steel deck[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2008(64): 134.
- [7] 童乐为, 沈祖炎. 钢桥面板纵肋现场对焊接头的疲劳性能[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 1998, 26(2): 130.  
TONG Lewei, SHEN Zuyan. Fatigue behavior of field-butt-welded rib joints in orthotropic steel bridge decks[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 1998, 26(2): 130.
- [8] 童乐为, 沈祖炎. 正交异性钢桥面板疲劳验算[J]. 土木工程学报, 2000, 33(3): 16.  
TONG Lewei, SHEN Zuyan. Fatigue assessment of orthotropic steel bridge deck[J]. China Civil Engineering Journal, 2000, 33(3): 16.
- [9] 王春生, 冯亚成. 正交异性钢桥面板疲劳研究综述[J]. 钢结构, 2008, 11: 47.  
WANG Chunsheng, FENG Yacheng. Review of fatigue research for orthotropic steel bridge decks[J]. Steel Structure, 2008, 11: 47.
- [10] 陈磊磊. 环氧沥青混合料动态参数试验研究[D]. 南京: 东南大学道路工程系, 2009.  
CHEN Leilei. Experimental study on dynamic parameters of epoxy asphalt mixture [D]. Nanjing: Department of Road Engineering of Southeast University, 2009.
- [11] 何昌轩, 樊英华, 郑晓光. 沥青混合料动态模量试验研究[J]. 重庆交通大学学报: 自然科学版, 2010, 29(4): 555.  
HE Changxuan, FAN Yinghua, ZHENG Xiaoguang. Test study on dynamic modulus of asphalt mixture [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University: Natural Science, 2010, 29(4): 555.
- [12] 胡霞光, 李德超, 田莉. 沥青混合料动态模量研究进展[J]. 中外公路, 2007, 27(1): 132.  
HU Xiaguang, LI Dechao, TIAN Li. Study progress of dynamic modulus of asphalt mixture [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2007, 27(1): 132.
- [13] 周刚, 肖丽, 张颖, 等. 沥青混凝土动态模量试验研究[J]. 青海交通科技, 2010(增刊): 68.  
ZHOU Gang, XIAO Li, ZHANG Ying, et al. Test study on dynamic modulus of asphalt mixture [J]. Journal of Qinghai Transportation Engineering, 2010(Supplement): 68.