

环氧沥青铺装对钢桥面板受力影响试验研究

王石磊, 齐法琳, 柯在田, 高 岩

(中国铁道科学研究院集团有限公司基础设施检测研究所, 北京 100081)

摘 要: 某悬索桥钢箱梁采用正交异性钢桥面板, 运行数年后钢桥面板构件连接部位出现了 4 种疲劳裂纹, 为考察新换环氧沥青混凝土铺装对疲劳敏感部位受力影响, 建立了有限元模型, 开展了长达 6 年的现场试验, 试验涵盖原铺装、铺装铲除、新铺装三种状态, 测试了疲劳敏感部位的受力及构件变形规律, 开展了考虑温度影响的疲劳寿命改善效果分析研究。结果表明: 6 年试验期内环氧沥青混凝土铺装与钢桥面板组合受力处于稳定状态, 在低温环境下, 疲劳敏感部位 1~4 应力改善效果分别为 80%、14%、32%、46%; 4 个疲劳敏感部位应力与温度线性关联, 线性速率分别为-4.00、0.64、1.89、1.91; 将实测应力统一至年均温度后, 新铺装对部位 1 疲劳寿命相对改善较大, 约提高了 2.95 倍, 对部位 4 疲劳寿命改善次之, 约提高 1.64 倍, 对于部位 2、3 疲劳寿命改善效果不明显, 高温环境下部位 2、3 开裂可能性仍较大。

关键词: 正交异性钢桥面板; 环氧沥青混凝土铺装; 试验; 温度; 疲劳寿命分析

中图分类号: U443.33

文献标志码: A

doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2019.11.0690

EXPERIMENTAL STUDY ON THE EFFECT OF AN EPOXY ASPHALT CONCRETE PAVEMENT ON AN ORTHOTROPIC STEEL DECK

WANG Shi-lei, QI Fa-lin, KE Zai-tian, GAO Yan

(Infrastructure Inspection Research Institute, China Academy of Railway Sciences Corporation Limited, Beijing 100081, China)

Abstract: The steel orthotropic deck was used in the steel box girder of a suspension bridge. Four types of fatigue cracks were discovered at some connections of the orthotropic deck during service. Subsequently the pavement on the deck was replaced with epoxy asphalt concrete. To analyze the effect of the new pavement on the fatigue sensitive regions, a finite element model was established and field bridge tests were conducted at three states, namely, original pavement, surfacing, and new pavement. The test lasted for 6 years under the new pavement state. The stress and deformation of the fatigue sensitive regions were measured. The fatigue life improvement was analyzed considering the temperature based on the measured data. The results show that the epoxy asphalt concrete pavement was in a stable working state during the test period, that the stress improvement effects in the fatigue sensitive regions 1 to 4 were 80%, 14%, 32%, 46% in a low temperature environment, respectively. The stresses of the four fatigue sensitive regions were linearly correlated with the temperature, and the linear ratios are -4.00, 0.64, 1.89, 1.91, respectively. After normalizing the measured stress by the average annual temperature, the fatigue life was improved by 2.95 times in region 1, and by 1.64 times in region 4. The fatigue lives in regions 2 and 3 were not improved obviously, and the cracking probabilities of regions 2 and 3 were still high in a high temperature environment.

Key words: steel orthotropic deck; epoxy asphalt concrete pavement; field test; temperature; fatigue life analysis

收稿日期: 2019-11-23; 修改日期: 2020-03-08

通讯作者: 王石磊 (1985—), 男, 山东人, 高工, 博士, 主要从事桥梁及隧道工程状态评估及检测技术研究 (E-mail: thilei@qq.com).

作者简介: 齐法琳 (1970—), 男, 山东人, 研究员, 博士, 主要从事桥梁及隧道工程检测技术研究 (E-mail: qifl@rails.cn);

柯在田 (1964—), 男, 湖北人, 研究员, 本科, 博导, 所长, 主要从事铁路基础设施检测技术研究 (E-mail: 13901379391@163.com);

高 岩 (1968—), 男, 河南人, 研究员, 硕士, 博导, 主要从事桥梁及隧道工程状态评估研究 (E-mail: tkygy@126.com).

正交异性钢桥面板 (以下简称“钢桥面板”) 具有自重轻、整体刚度大、施工速度快的特点, 是大跨度桥梁最常使用的桥面形式^[1]。为确保车辆行驶的舒适性和减少车行荷载对钢桥面的冲击, 通常在钢桥面板上设置铺装层, 我国钢桥面板常用铺装形式有改性沥青 SMA、浇注式沥青混凝土和环氧沥青混凝土三种方案^[2]。随着钢桥面板的广泛使用和服役时间的逐渐增加, 该类结构产生了不同程度的疲劳裂纹^[3]。研究表明改进铺装层结构或确保铺装的完整性, 可以减小钢桥面板关键部位的受力, 进而延缓钢桥面板疲劳敏感部位的使用寿命^[4-7]。

国内某悬索桥钢箱梁竣工时桥面铺装采用改性沥青 SMA 方案, 通车运行数年后原有铺装频繁出现推移、车辙、开裂的现象, 钢桥面板 U 肋与面板连接部位、U 肋与横隔板连接部位、U 肋嵌补段出现了大量的疲劳裂纹, 管养部门针对钢桥面板疲劳开裂开展了专项的维修加固处理, 同时将原铺装更换为强度高、耐腐蚀性及疲劳性能好的环氧沥青混凝土铺装^[8]。为考察环氧铺装对钢桥面板关键部位受力改善效果及稳定性能, 笔者开展了长达 6 年的实桥试验研究, 以期为同类工程应用及钢桥面板病害处治提供参考和借鉴。

1 背景桥梁概况

1.1 钢桥面板结构简介

本文背景桥梁为悬索桥, 加劲主梁采用扁平闭合流线型钢箱梁, 桥面宽度为 35.6 m, 按双向六车道设计, 吊索纵向间距 12 m, 桥面系采用钢桥面板结构, 桥面板厚 12 mm, 闭口 U 肋规格为 320 mm×260 mm×8 mm, 横向间距 620 mm。横隔板板厚 8 mm, 纵桥向间距 4 m。钢桥面板细部构造如图 1 所示。

1.2 钢桥面板病害

背景桥梁钢桥面板主要存在以下 4 种类型病害, 分布示意如图 2 所示。

- 1) 部位 1: U 肋与面板连接焊缝位置处裂纹, 裂纹竖向贯穿面板;
- 2) 部位 2: U 肋与横隔板连接部位弧形切口处裂纹, 裂纹沿横隔板母材斜向发展;
- 3) 部位 3: U 肋与横隔板连接竖向焊缝下端部裂纹, 裂纹沿横隔板母材斜向发展;
- 4) 部位 4: U 肋嵌补段现场焊缝位置处裂纹。

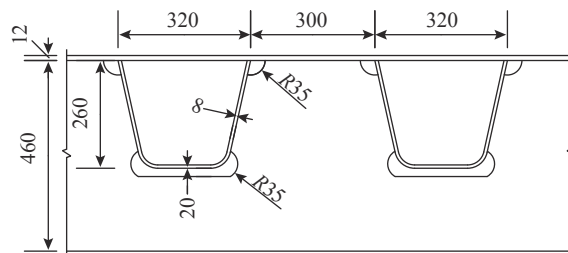


图 1 钢桥面板细部构造 /mm

Fig. 1 Configuration of steel orthotropic deck

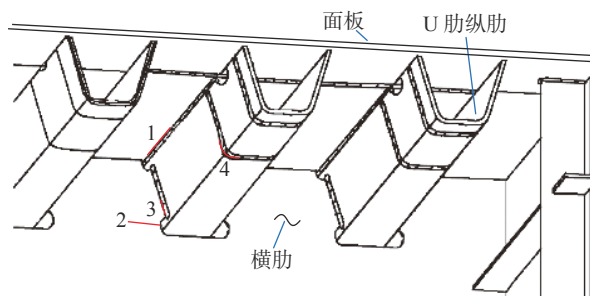


图 2 背景桥梁钢桥面板病害分布

Fig. 2 Fatigue crack layout of orthotropic steel deck

1.3 环氧沥青混凝土铺装

铺装设计厚度 70 mm, 结构组成为: 35 mm 环氧沥青混凝土 (EA10)+粘结层+35 mm 环氧沥青混凝土 (EA10)+防水粘结层, 结构如图 3 所示。

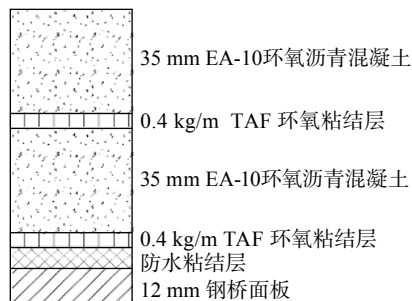


图 3 环氧沥青混凝土铺装方案

Fig. 3 Structure of epoxy asphalt concrete pavement

2 试验方案

为分析环氧沥青混凝土铺装对钢桥面板局部应力和变形的改善效果, 在不同铺装状态 (原铺装、铺装铲除后、新铺装) 及不同环境 (低温、高温) 下开展现场试验, 并基于新铺装的材料特征建立了有限元仿真计算模型, 对比实测与理论计算结果, 研究测试部位受力特点和规律。

2.1 有限元仿真模型

有限元模型忽略第一体系的影响, 模型横桥向宽 6200 mm, 包含 10 道 U 肋, 为横向测试区域的 5 倍, 纵桥向长 16000 mm, 覆盖 4 道横肋间距,

为纵向测试区域 8 倍, 测试区域、模型计算区域、半幅钢箱梁断面布置如图 4 所示。采用 ABAQUS 建立钢桥面板计算模型, 单元采用 C3D8R 型 8 节点缩减积分实体单元, 对试验重点关注部位进行了单元细分, 网格尺寸按应变计敏感栅长进行控制, 部位 1 单元尺寸约为 2 mm, 部位 2 单元、3 单元尺寸约为 3 mm, 部位 4 单元尺寸约为 5 mm。模型边界条件按四边简支考虑, 约束桥面板及横肋四周对应节点的 x 、 y 、 z 方向位移。桥面铺装与钢板间采用界面耦合进行约束, 不考虑材料非线性及界面滑移的影响。有限元模型如图 5 所示。环氧沥青混凝土弹性模量与温度相关, 结合背景桥梁当地平均温度, 确定铺装层的弹性模量为 3000 MPa, 泊松比为 0.25^[9-10]; 钢材弹性模量为 210 GPa, 泊松比为 0.3。

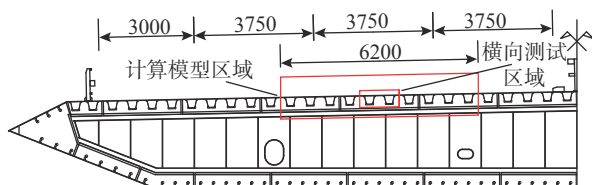


图 4 测试及计算区域横桥向布置 /mm
Fig. 4 Transverse layout of test and calculation area

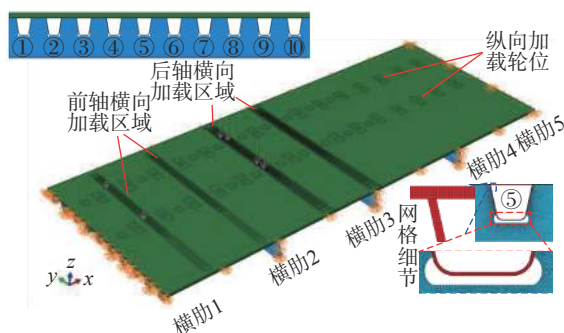
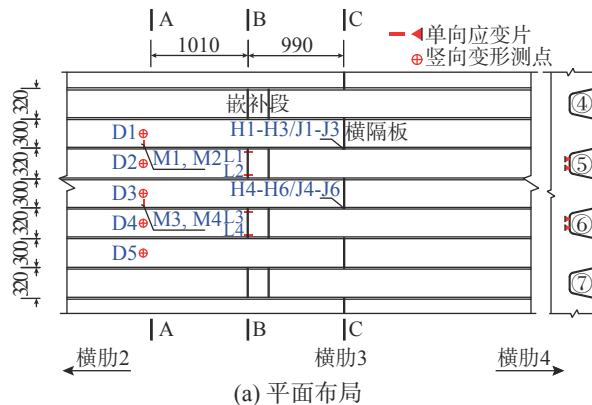


图 5 有限元模型
Fig. 5 Finite element model

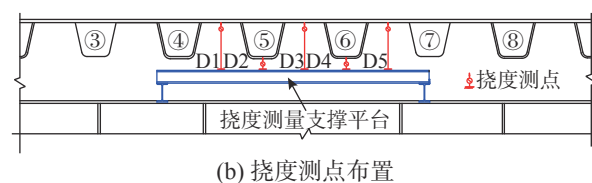
2.2 测点布置

背景桥梁钢桥面板 4 种类型病害空间分布零散, 测试区域选择前进行了现场调查, 保证测试区域前后 2 道横肋及横向 6 道 U 肋 (1 个车道) 范围内均未出现疲劳裂纹, 以避免病害影响测试结果、有利于实测与有限元计算结果比较。

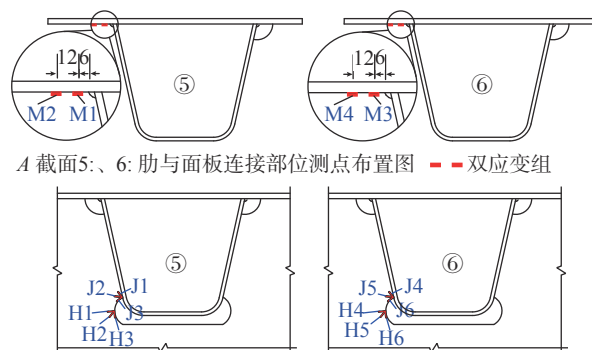
试验选择纵肋与面板连接部位、纵肋与横隔板连接部位进行局部应力测试, 纵向设置了 A-A、B-B、C-C 三道测试断面。A-A 测试断面兼做钢桥面板变形测试断面。测点布局如图 6 所示。



(a) 平面布局



(b) 挠度测点布置



(c) 连接部位测点布置详图

图 6 试验测点布局 /mm

Fig. 6 Distribution of testing points

钢结构应力选用中航电测电阻应变计测量, 其中 U 肋嵌补段纵向应力选用敏感栅长 5 mm 的 BE120-5AA 型单向应变计, 横隔板处局部应力选用 45° 夹角敏感栅长 3 mm 的 BE120-3CA 型三向应变计, U 肋与面板连接部位局部应力参考热点应力法^[11]选用敏感栅长 2 mm 的 BE120-2GD 型双组应变计。每次试验前均对各应变计防护及绝缘状况进行检查, 确保测试结果的可靠, 图 6 中所示测点为经验证和分析在 6 年周期内均稳定的测点, 其他过程中受到破坏或绝缘状况不佳的测点未含在本文之列。钢桥面板变形采用千分表测量。部分测点安装状况如图 7 所示。

2.3 试验加载

试验加载采用双轴货车, 加载重量充分考虑超载车辆的影响, 前轴重为 90 kN, 后轴重 320 kN (加载轮)。加载车轴距及车轮触地面积布局如图 8(a)

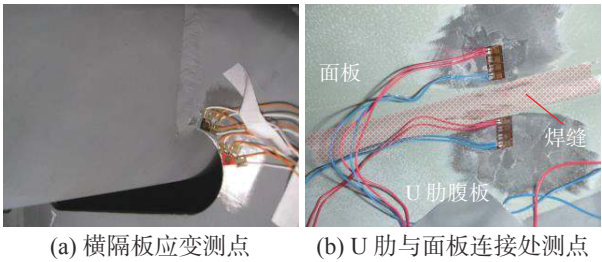


图 7 测点现状安装状况

Fig. 7 Installation condition of measuring points

所示，基于影响面的思路进行计算和加载，横桥向设置 37 条加载线，如图 8(b) 之 T1~T37，纵桥向设置 15 个加载轮位，如图 8(c) 之 L1~L15，受试验时间限制，结合加载位置与测试部位的关系，选取典型计算工况进行实桥加载。现场试验组织状况如图 9 所示。

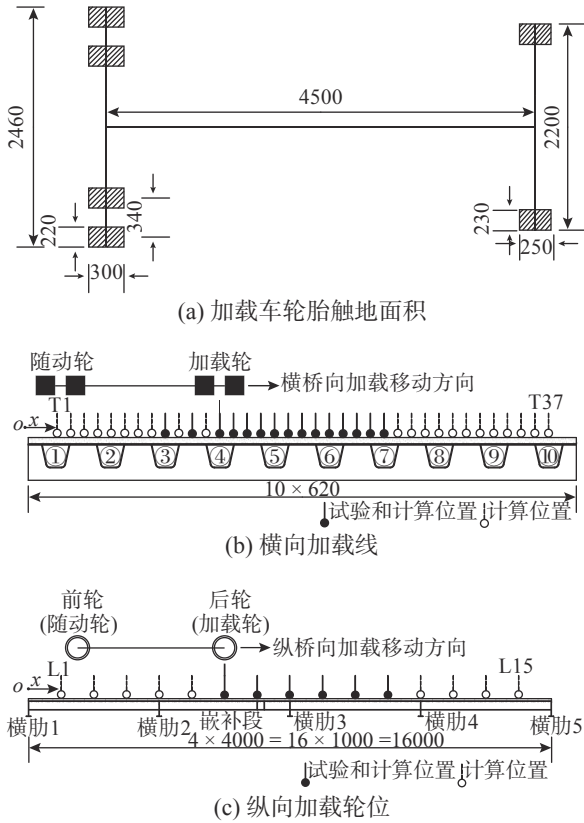


图 8 试验加载控制 /mm
Fig. 8 Loading procedures

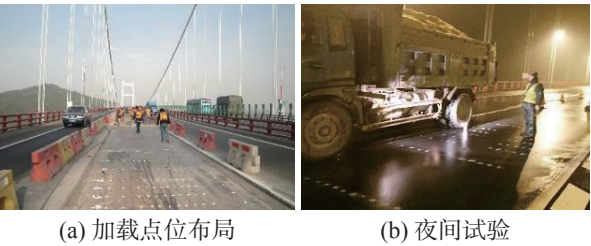


图 9 现场试验照片
Fig. 9 Field test photos

2.4 试验工况

实桥试验共计进行了 7 次，时间跨度为 6 年。试验工况安排见表 1。

表 1 试验工况安排
Table 1 Arrangement of field test

试验代号	铺装状态	试验时间	温度/(℃)	加载车重量/kg	
				前轴	后轴
原-10-12	原铺装	2010-12-05	17.1	10500	33200
除-10-12	铲除后	2010-12-10	16.0	11100	32100
新-11-01	新铺装	2011-01-07	14.6	10800	33600
新-11-08	新铺装	2011-08-09	31.4	9400	31900
新-12-01	新铺装	2012-01-06	8.3	9300	33800
新-12-06	新铺装	2012-06-26	29.4	9800	31700
新-16-01	新铺装	2016-01-16	12.1	8700	30800

为减少环境对试验结果的影响，试验均在凌晨 0:00~3:00 时间段及交通封闭条件下开展。历次试验确保测点位置、加载车辆及点位的统一。试验数据按实际车辆后轴重与计算轴重 320 kN 的比值进行线性换算后再进行对比分析。

3 试验分析

3.1 U 肋与面板连接部位受力分析

U 肋与面板连接部位 (部位 1) 典型测点应力与横向加载线的关系如图 10 所示，试验加载轮位作用下应力实测与理论计算变化规律一致，试验荷

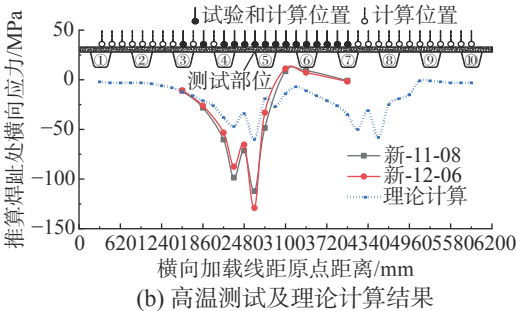
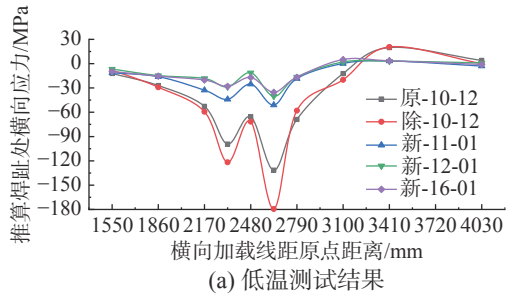


图 10 M1、M2 测点推算焊趾处应力结果
Fig. 10 Calculated stress of weld toe by M1&M2

载控制轮中心位于测试部位正上方时应力达到峰值,测试部位受加载线横向位置影响较大,横向影响区域约为2道U肋中心距(640 mm),由于控制轮双胎影响,同一横向影响区内,应力存在双峰的现象,因考虑了左、右侧轮同时加载,未试验加载的计算轮位与试验轮位作用下的应力变化规律存在重演现象。相对于无铺装状态,铺装对测试部位应力均存在改善,新铺装状态下测试部位受力与温度有强关联性。

3.2 U肋与横隔板连接处受力分析

对平面应力状态下的45°应变花测点,按照式

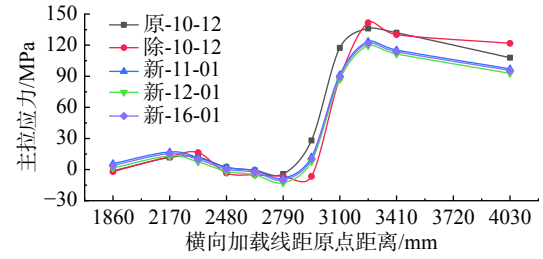
(1)算出最大主应力、剪应力^[12]。

$$\begin{aligned}\sigma_1 &= \frac{E}{2} \left\{ \frac{\varepsilon_0 + \varepsilon_{90}}{1 - \mu} + \frac{1}{1 + \mu} \sqrt{(\varepsilon_0 - \varepsilon_{90})^2 + [2\varepsilon_{45} - (\varepsilon_0 + \varepsilon_{90})]^2} \right\}, \\ \sigma_2 &= \frac{E}{2} \left\{ \frac{\varepsilon_0 + \varepsilon_{90}}{1 - \mu} - \frac{1}{1 + \mu} \sqrt{(\varepsilon_0 - \varepsilon_{90})^2 + [2\varepsilon_{45} - (\varepsilon_0 + \varepsilon_{90})]^2} \right\}, \\ \tau_{\max} &= \frac{E}{2(1 + \mu)} \sqrt{(\varepsilon_0 - \varepsilon_{90})^2 + [2\varepsilon_{45} - (\varepsilon_0 + \varepsilon_{90})]^2} \quad (1)\end{aligned}$$

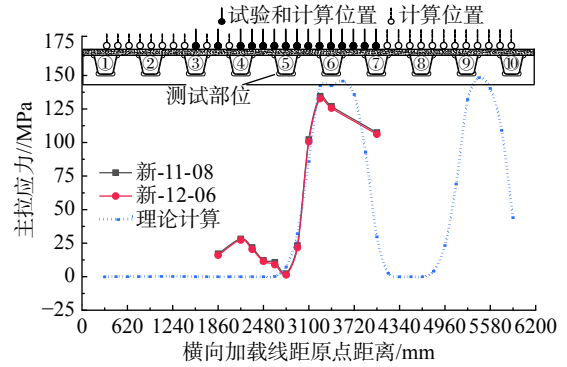
式中: E 为钢材弹性模量; σ_1 为主拉应力; σ_2 为主压应力; $\tau_{\max}$ 为剪应力; μ 为钢材泊松比; ε_0 、 ε_{45} 、 ε_{90} 为三向应变测试结果。

横隔板弧形切口处(部位2)及横隔板与U肋连接竖向焊缝下端(部位3)典型测点主拉应力与横向加载线关系如图11所示。当荷载沿测试横肋横桥向移动时,计算及实测结果均表明当试验荷载控制轮中心作用于测试部位正上方时该部位主拉应力较小,远离该部位一个纵肋间距后主拉应力达到峰值,主拉应力实测与理论计算变化规律相近,计算主拉应力横向影响范围为2道U肋间距(1240 mm),存在不同的是理论计算的主拉应力横向梯度更大,即主拉应力实测横向影响范围大于理论计算结果,实际结构受力更为不利,因单元网格尺寸已按照应变计敏感栅长进行精细化设置,网格划分影响可以忽略,实测与理论计算的偏差体现了钢桥面板连接部位局部受力行为的复杂性和仿真计算的有限性。

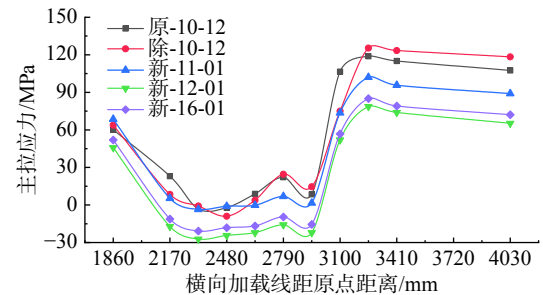
部位2及部位3典型测点主拉应力与纵向加载轮位关系如图12所示。当荷载沿纵桥向移动时,计算及实测结果均表明当试验荷载控制轮中心作用于测试部位对应横肋时主拉应力达到峰值,说明测试部位以承受横隔板面内受力为主,



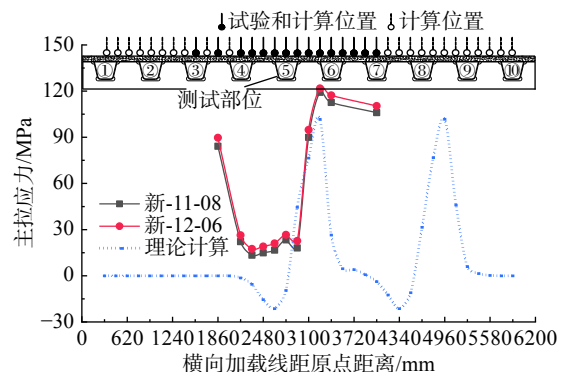
(a) H1~H3测点低温测试结果



(b) H1~H3测点高温及理论计算结果



(c) J1~J3测点低温测试结果



(d) J1~J3测点高温测试及理论计算结果

图11 典型测点主拉应力与横向加载位置关系

Fig. 11 Principal tensile stress with transverse loading line

主拉应力实测与理论计算变化规律一致,计算测试部位主拉应力纵向影响范围为2道横肋间距(8000 mm)。

相对无铺装状态,铺装对测试部位应力均存在一定改善,新铺装状态下,测试部位受力与高低温环境有弱关联性。

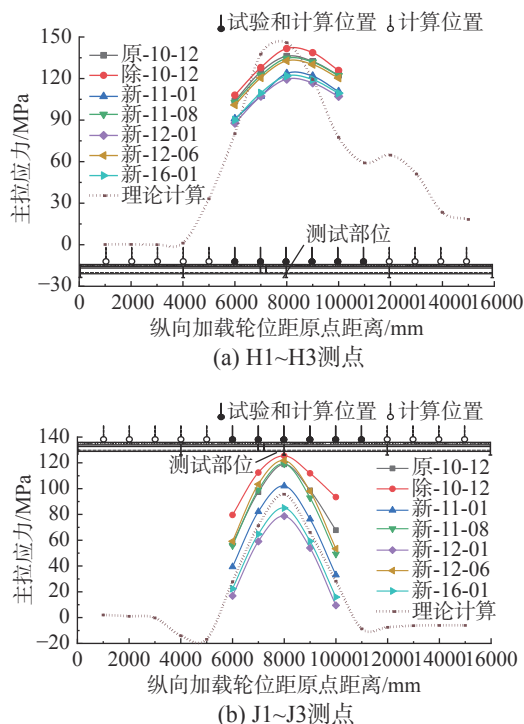


图 12 典型测点主拉应力与纵向加载轮位关系
Fig. 12 Principal tensile stress with longitudinal loading wheel position

3.3 U 肋嵌补段受力分析

U 肋嵌补段 (部位 4) 典型测点应力与横向加载线的关系如图 13 所示。试验加载轮位作用下测试部位应力实测与理论计算变化规律一致, 应力横向影响区域约为 4 道 U 肋间距 (2480 mm)。当试验荷载控制轮中心位于测点所处的纵肋顶部时受力最为不利, 因考虑了左、右侧轮同时加载, 未试验加载的计算轮位与试验轮位作用下的应力变化规律存在重演现象, 因应力横向影响区域大于车宽, 左、右轮作用存在叠合区间。相对无铺装状态, 铺装对测试部位应力均存在改善, 新铺装状态下, 测试部位受力与高低温环境有强关联性。

3.4 钢桥面板变形分析

钢桥面板典型测点 (D3) 挠度与横向加载线的关系如图 14 所示。试验加载轮位作用下测试部位应力实测与理论计算变化规律一致, 挠度横向影响区域约为 4 道 U 肋间距 (2480 mm)。当控制轮中心位于面板测点临近 U 肋腹板顶部时面板变形达到峰值, 受加载轮双胎净距的影响, 当控制轮中心位于面板测点顶部时面板变形有所回落。因考虑了左、右侧轮同时加载, 未试验加载的计算轮位与试验轮位作用下的变形变化规律存在重演现象, 因变形横向影响区域大于车宽, 左、右轮

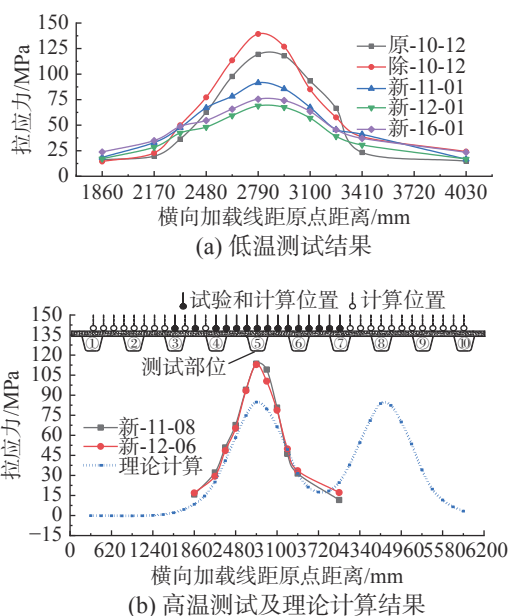


图 13 L1、L2 测点平均应力测试结果
Fig. 13 Average stresses of L1 and L2

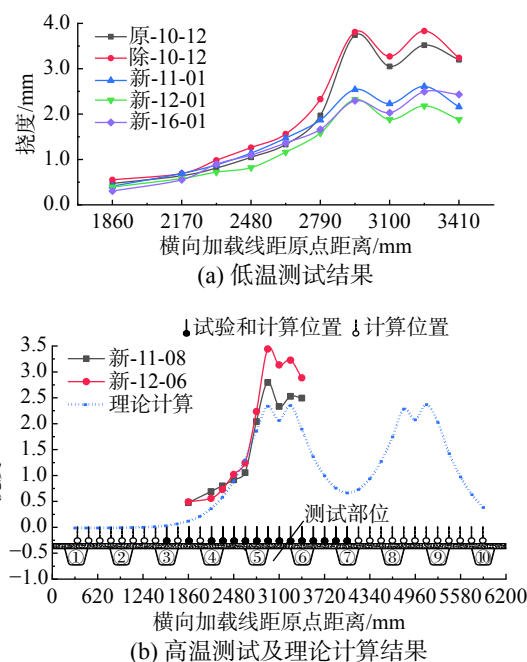


图 14 典型测点挠度测试结果
Fig. 14 Measured deflection at typical measuring points

作用存在叠合区间。结果表明相对无铺装状态, 铺装对测试部位变形均存在一定改善, 面板变形与高低温环境有强关联性。

3.5 结果对比分析

对比实测与理论计算结果可知, 最不利试验荷载作用下理论计算结果与新铺装完成时 (新-11-01) 实测结果相近, 具体分布见表 2。

不同测试部位历次试验不利值见表 3, 相对无

铺装状态不同试验条件下钢桥面板受力及变形改善效果见表4。

表2 实测与理论计算结果对比
Table 2 Measured and theoretical calculation results

分项	应力/MPa				变形/mm	
	部位1	部位2	部位3	部位4	D2	D3
实测	-51.10	123.60	102.00	91.50	2.44	2.61
理论	-60.00	145.80	101.80	84.80	2.27	2.35
实测/理论	0.85	0.85	1.00	1.08	1.07	1.11

表3 不同测试部位历次试验不利值统计
Table 3 Statistics of critical measurements of corresponding regions

试验工况	应力/MPa				挠度/mm	
	部位1	部位2	部位3	部位4	面板	U肋
原-10-12	-132	136	119	119	3.1	3.3
除-10-12	-179	142	125	139	3.2	3.6
新-11-01	-51	124	102	91	2.5	2.5
新-11-08	-112	135	119	114	3.2	2.9
新-12-01	-40	120	79	69	2.2	2.3
新-12-06	-129	133	122	113	3.0	3.3
新-16-01	-35	122	85	75	2.4	2.5

表4 应力及变形改善效果
Table 4 Stress and deflection improvement effects

试验工况	应力改善效果/(%)				变形改善效果/(%)	
	部位1	部位2	部位3	部位4	面板	U肋
原-10-12	27	4	5	14	6	8
新-11-01	71	13	19	34	23	30
新-11-08	37	5	5	18	1	21
新-12-01	78	16	37	51	33	36
新-12-06	28	6	3	19	8	10
新-16-01	80	14	32	46	27	31

1) 从应力值看, 钢桥面板4个疲劳敏感区域在试验荷载作用下承受较大的应力, 原铺装状态下测试部位应力绝对值为119 MPa~136 MPa, 铺装铲除后为125 MPa~179 MPa, 新铺装高温环境下为113 MPa~133 MPa。

2) 从新铺装改善效果看, 在低温环境下, 铺装运营6年后, 疲劳敏感部位1~4应力改善效果分别为80%、14%、32%、46%, 面板变形改善27%, U肋变形改善31%, 新铺装改善效果优于相近环境下原有铺装的改善效果。

3) 4个疲劳敏感部位实测应力随环境温度的变化关系如图15所示, 各部位应力与环境温度存在线性关联, 随温度变化的速率 k 值差异较大 ($k_1=-$

-4.00 , $k_2=0.64$, $k_3=1.89$, $k_4=1.91$)。疲劳敏感部位应力与温度线性关联的特点与文献[13—14]基于钢桥面板的监测结果所揭露的现象一致。

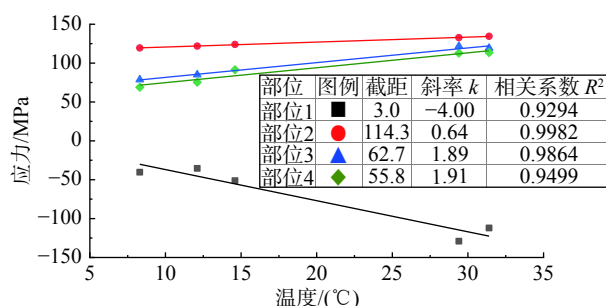


图15 疲劳敏感部位实测应力与温度关系
Fig. 15 Stress of sensitive regions of fatigue crack with temperature

4 考虑温度的疲劳寿命改善效果分析

4.1 桥梁整体温度环境

为考察背景桥梁所处自然温度环境, 从当地气象部门获取了一整年365 d的实测结果作为分析样本, 数据来源于桥址附近3 km气象部门布设的观测站记录。一年期整点温度时程如图16所示。

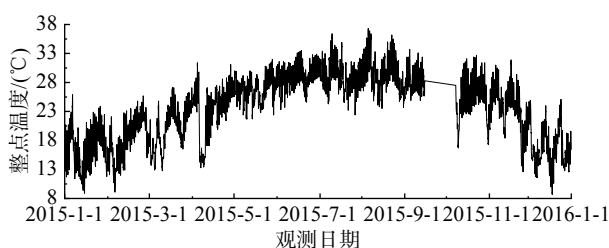


图16 一年整点温度记录
Fig. 16 Hourly temperature record of one whole year

由4个疲劳敏感部位实测应力与温度存在线性关联, 为修正温度对应力的影响, 特将历次测试结果修正至年均温度。为获取某时间区段内平均温度, 采用复化梯形求积公式(2)^[15]求得温度沿时程的积分。

$$T_n = \sum_{k=0}^{n-1} \frac{h_k}{2} [f(x_k) + f(x_{k+1})] \quad (2)$$

式中: T_n 为积分值; n 为积分点数目, 可按逐月或逐年取值; h_k 为积分步长, 取为1h; $f(x_k)$ 为 k 时刻温度值; $f(x_{k+1})$ 为 $k+1$ 时刻温度值, 平均温度为 T_n 除以 n 。按照本方法求得年均温度为23.7 °C。

4.2 疲劳寿命改善效果分析方法

国内外规范中桥梁钢结构抗疲劳设计均是着眼于细节构造, 对易发生疲劳破坏的细节构造进

行分类疲劳评定,不同细节构造类别对应不同的 $\Delta\sigma$ - N 曲线^[16]。 $\Delta\sigma$ - N 曲线方程式一般在双对标坐标中表示,如下式:

$$\lg N = A - m \lg \Delta\sigma \pm C \quad (3)$$

式中: N 为对应 $\Delta\sigma$ 作用下的疲劳循环次数,即疲劳寿命; $\Delta\sigma/\text{MPa}$ 为外加应力幅; A 为曲线的截距; m 为曲线斜率,日本规范中取值为 3,中国及欧洲规范分段考虑,分别为 3 和 5,如图 17 所示^[1]; C 为循环次数的统计偏差。

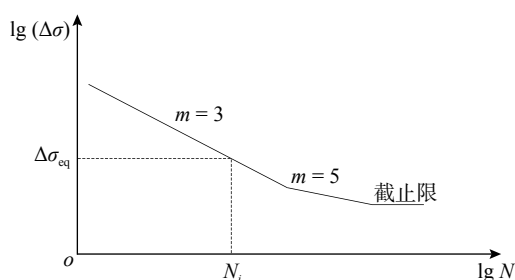


图 17 细节构造 $\Delta\sigma$ - N 曲线特点

Fig. 17 Typical $\Delta\sigma$ - N curve for a fatigue vulnerable location

$$\lg N_1 = A - m \lg \Delta\sigma_1 \pm C \quad (4)$$

$$\lg N_2 = A - m \lg \Delta\sigma_2 \pm C \quad (5)$$

式 (4) 和式 (5) 分别为某评定部位在应力幅 $\Delta\sigma_1$ 及应力幅 $\Delta\sigma_2$ 作用下其疲劳寿命 N_1 及 N_2 的求解公式,将式 (4) 减去式 (5) 可得:

$$\lg\left(\frac{N_2}{N_1}\right) = -m \lg\left(\frac{\Delta\sigma_1}{\Delta\sigma_2}\right) \quad (6)$$

进一步数学计算可得:

$$\frac{N_2}{N_1} = \left(\frac{\Delta\sigma_1}{\Delta\sigma_2}\right)^m \quad (7)$$

由式 (7) 可推算两种不同应力幅状态下的寿命比值,由此可见两种不同应力幅状态下的疲劳寿命相对改善效果主要由所采纳的 $\Delta\sigma$ - N 曲线斜率 m 及对应的应力幅值有关,与具体构造细节的 $\Delta\sigma$ - N 曲线方程已无直接联系。

由于正交异性钢桥面板的疲劳敏感部位应力梯度较大,名义应力取值位置不同会导致疲劳评估结果即可能出现较大差异,部分学者结合足尺模型试验提出了热点应力法、切口应力法、结构应力法用于提高钢桥面板疲劳性能评估的准确性^[17-21],虽然存在诸如之上的不同应力计算方法,但最终疲劳寿命评估时仍回归至线性累积损伤模型之上,且在高应力水平所采纳的 $\Delta\sigma$ - N 曲线斜率 m 大多仍取值 3,本文以两种铺装状态下的

应力实测结果基于式 (7) 对疲劳改善效果进行分析,式 (7) 中状态 1 表示原铺装状态,状态 2 表示新铺装状态。当结构处于线弹性状态、同一考察部位不同测试状态下应力纵横向影响范围及规律保持一致时,可以认为在荷载特征保持不变时应力峰值之比 (σ_1/σ_2) 与应力幅之比 ($\Delta\sigma_1/\Delta\sigma_2$) 一致,即可以将考察部位的实测应力峰值带入式 (7) 进行疲劳寿命相对改善效果评估。

4.3 疲劳寿命相对改善效果

基于图 15 中各部位实测应力与温度的关系,按年均温度对实测应力进行修正,代入式 (7) 计算铺装更换前后 4 个疲劳敏感部位寿命相对改善效果,结果见表 5。相对原铺装状态,新铺装对部位 1 疲劳寿命改善较大,约提高了 2.95 倍,对部位 4 疲劳寿命改善次之,约提高 1.64 倍,对于部位 2、3 疲劳寿命改善效果不明显。

表 5 新铺装对疲劳敏感部位寿命相对改善效果
Table 5 Relative fatigue life improvement of sensitive regions with new pavement

考察部位	1	2	3	4
$\Delta\sigma_1/\text{MPa}$	-132	136	119	119
$\Delta\sigma_2/\text{MPa}$	-92	129	108	101
$(\Delta\sigma_1/\Delta\sigma_2)^m$	2.95	1.17	1.35	1.64

需要说明的是本文背景桥梁历次实桥试验均于测试当日夜间 0:00~3:00 区间开展,此时间段内环境温度较为稳定,且环境温度与铺装温度相对一致,而桥面铺装在运营使用过程中其温度与自然环境温度变化存在一定的滞后性和非线性,尤其在夏季铺装长期处于高温工作状态,其温度要明显高于环境温度,相应改善效果较表 5 中的理论推算值偏低。

5 结论

为考察环氧沥青混凝土铺装对正交异性钢桥面板受力影响,对某悬索桥钢箱梁建立了有限元模型,开展了长达 6 年的现场试验,试验涵盖原铺装、铺装铲除、新铺装三种状态,测试了疲劳敏感部位受力及构件变形规律,开展了考虑温度影响的疲劳寿命改善效果分析研究,结果表明:

(1) 背景桥梁钢桥面板 4 个疲劳敏感部位受力规律及随温度变化的趋势 6 年来未发生明显改变,说明环氧沥青混凝土铺装与钢桥面板间组合

受力处于稳定状态。

(2) 在低温环境下, 铺装运营 6 年后, 疲劳敏感部位 1~4 应力改善效果分别为 80%、14%、32%、46%, 面板变形改善 27%, U 肋变形改善 31%。

(3) 4 个疲劳敏感部位实测应力与温度存在线性关联, 应力随温度变化的速率 k 值差异较大 ($k_1=-4.00$, $k_2=0.64$, $k_3=1.89$, $k_4=1.91$)。

(4) 部位 1、4 应力及钢桥面板变形影响范围及变化规律的实测与理论计算结果吻合较好, 部位 2、3 应力实测与理论计算存在轻微偏差, 仅通过有限元计算开展疲劳分析存在局限性。

(5) 将实测应力统一至年均温度后, 相对于原铺装, 新铺装对部位 1 疲劳寿命改善较大, 约提高了 2.95 倍, 对部位 4 疲劳寿命改善次之, 约提高 1.64 倍, 对于部位 2、3 疲劳寿命改善效果不明显, 高温环境下部位 2、3 开裂可能性仍较大。

参考文献:

- [1] 张清华, 卜一之, 李乔. 正交异性钢桥面板疲劳问题的研究进展[J]. *中国公路学报*, 2017, 30(3): 14—30.
Zhang Qinghua, Bu Yizhi, Li Qiao. Review on fatigue problems of orthotropic steel bridge deck [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2017, 30(3): 14—30. (in Chinese)
- [2] 张肖宁, 张顺先, 徐伟, 等. 基于使用性能的钢桥面铺装环氧沥青混凝土设计[J]. *华南理工大学学报(自然科学版)*, 2012, 40(7): 1—7.
Zhang Xiaoning, Zhang Shunxian, Xu Wei, et al. Application performance-based design of epoxy asphalt concrete applied to steel bridge deck pavement [J]. *Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition)*, 2012, 40(7): 1—7. (in Chinese)
- [3] 曾志斌. 正交异性钢桥面板典型疲劳裂纹分类及其原因分析[J]. *钢结构*, 2011, 26(2): 9—15.
Zeng Zhibin. Classification and cause analysis of typical fatigue cracks in orthotropic steel bridge deck [J]. *Steel Construction*, 2011, 26(2): 9—15. (in Chinese)
- [4] 曾志斌. 正交异性钢桥面板疲劳裂纹的维修加固方法[J]. *钢结构*, 2013, 28(4): 20—24.
Zeng Zhibin. Repair and reinforcement methods of fatigue cracks in orthotropic steel bridge deck [J]. *Steel Construction*, 2013, 28(4): 20—24. (in Chinese)
- [5] 张勇, 高岩, 王石磊. 桥面铺装改造对正交异性钢桥面板受力性能的影响[J]. *桥梁建设*, 2016, 46(4): 55—60.
Zhang Yong, Gao Yan, Wang Shilei. Effect of deck pavement retrofitting on mechanical properties of orthotropic steel deck [J]. *Bridge Construction*, 2016, 46(4): 55—60. (in Chinese)
- [6] Wang Shilei, Ke Zaitian, Gao Yan, et al. Long-term in situ performance investigation of orthotropic steel bridge deck strengthened by SPS and RPC solutions [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2019, 24(6): 04019054.
- [7] Su Li, Wang Shilei, Gao Yan, et al. In situ experimental study on the behavior of UHPC composite orthotropic steel bridge deck [J]. *Materials*, 2020, 13(1): 253.
- [8] 张顺先, 张肖宁, 徐伟, 等. 基于冲击韧性的钢桥面铺装环氧沥青混凝土疲劳性能设计研究[J]. *振动与冲击*, 2013, 32(23): 1—5.
Zhang Shunxian, Zhang Xiaoning, Xu wei, et al. Epoxy asphalt concrete fatigue performance design for a steel bridge deck pavement based on impact toughness [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2013, 32(23): 1—5. (in Chinese)
- [9] 马林, 黄雷, 代希华, 等. 正交异性钢桥面环氧沥青铺装层疲劳耐久极限研究[J]. *桥梁建设*, 2019, 49(4): 29—34.
Ma Lin, Huang Lei, Dai Xihua, et al. Study on fatigue durability of epoxy asphalt pavement on orthotropic steel bridge deck [J]. *Bridge Construction*, 2019, 49(4): 29—34. (in Chinese)
- [10] 李梦琪, 张锋, 冯德成, 等. 车桥耦合下钢桥面沥青铺装层动力响应研究[J]. *工程力学*, 2019, 36(12): 177—187.
Li Mengqi, Zhang Feng, Feng Decheng, et al. Dynamic response of steel deck asphalt pavement considering vehicle-bridge coupling effect [J]. *Engineering Mechanics*, 2019, 36(12): 177—187. (in Chinese)
- [11] 蒲黔辉, 高立强, 刘振标, 等. 基于热点应力法的正交异性钢桥面板疲劳验算[J]. *西南交通大学学报*, 2013, 48(3): 395—401.
Pu Qianhui, Gao Liqiang, Liu Zhenbiao, et al. Fatigue assessment of orthotropic steel bridge deck based on hot spot stress method [J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2013, 48(3): 395—401. (in Chinese)
- [12] 孙训方, 方孝淑, 关来泰. 材料力学(II) [M]. 第4版. 北京: 高等教育出版社, 2002.
Sun Xunfang, Fang Shuxiao, Guan Laitai. *Mechanics of materials (II)* [M]. 4th ed. Beijing: Higher Education Press, 2002. (in Chinese)
- [13] 宋永生, 丁幼亮, 王晓晶, 等. 运营状态下悬索桥钢桥面

- 板疲劳效应监测与分析[J]. 工程力学, 2013, 30(11): 94 — 100.
- Song Yongsheng, Ding Youliang, Wang Xiaojing, et al. Monitoring and analysis of fatigue effects on steel deck of a suspension bridge in working conditions [J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(11): 94 — 100. (in Chinese)
- [14] 王高新, 丁幼亮, 宋永生, 等. 温度作用对带铺装层钢桥面板疲劳效应的影响研究[J]. 工程力学, 2016, 33(5): 115 — 123.
- Wang Gaoxin, Ding Youliang, Song Yongsheng, et al. Influence of temperature action on the fatigue effect of steel deck with pavement [J]. Engineering Mechanics, 2016, 33(5): 115 — 123. (in Chinese)
- [15] 李庆扬, 王能超. 数值分析[M]. 第5版. 北京: 清华大学出版社, 2008.
- Li Qingyang, Wang Nengchao. Numerical analysis [M]. 5th ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2008. (in Chinese)
- [16] 朱太勇, 周广东, 张欢, 等. 钢箱梁正交异性桥面板疲劳评估全空间 $S-N$ 曲线研究[J]. 工程力学, 2017, 34(11): 210 — 217.
- Zhu Taiyong, Zhou Guangdong, Zhang Huan, et al. A full range $S-N$ curve for fatigue evaluation of orthotropic bridge decks in steel box-girders [J]. Engineering Mechanics, 2017, 34(11): 210 — 217. (in Chinese)
- [17] 张清华, 李俊, 郭亚文, 等. 正交异性钢桥面板结构体系的疲劳破坏模式和抗力评估[J]. 土木工程学报, 2019, 52(1): 71 — 81.
- Zhang Qinghua, Li Jun, Guo Yawen, et al. Fatigue failure modes and resistance evaluation of orthotropic steel bridge deck structural system [J]. China Civil Engineering Journal, 2019, 52(1): 71 — 81. (in Chinese)
- [18] 黄云, 张清华, 郭亚文, 等. 钢桥面板纵肋与横隔板焊接细节表面缺陷及疲劳效应研究[J]. 工程力学, 2019, 36(3): 203 — 213.
- Huang Yun, Zhang Qinghua, Guo Yawen, et al. Research on surface defects and fatigue effects at rib-to-crossbeam welded joints of orthotropic steel bridge decks [J]. Engineering Mechanics, 2019, 36(3): 203 — 213. (in Chinese)
- [19] 崔闯, 刘益铭, 廖贵星, 等. 正交异性钢桥面板焊接接头疲劳评估方法[J]. 西南交通大学学报, 2015, 50(6): 1011 — 1017.
- Cui Chuang, Liu Yiming, Liao Guixing, et al. Fatigue evaluation approach of weld joints on steel orthotropic bridge deck [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2015, 50(6): 1011 — 1017. (in Chinese)
- [20] 杨雅斌, 石广玉. 正交异性钢桥面板肋-面板焊缝疲劳验算的应力分析模型评估[J]. 工程力学, 2019, 36(增刊 1): 98 — 105.
- Yang Yabin, Shi Guangyu. Evaluation of finite element analysis models for fatigue stress at rib-to-deck welded joints of orthotropic steel deck [J]. Engineering Mechanics, 2019, 36(Suppl 1): 98 — 105. (in Chinese)
- [21] 李俊, 张清华, 袁道云, 等. 基于等效结构应力法的正交异性钢桥面板体系疲劳抗力评估[J]. 中国公路学报, 2018, 31(12): 134 — 143.
- Li Jun, Zhang Qinghua, Yuan Daoyun, et al. Fatigue resistance evaluation for structural system of orthotropic steel bridge deck based on equivalent structural stress [J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31(12): 134 — 143. (in Chinese)