

引文格式:王佐才,赵玺,王均义,等.钢-PPUC组合正交异性钢桥面板疲劳性能[J].建筑科学与工程学报,2024,41(5):131-141.  
WANG Zuocai, ZHAO Xi, WANG Junyi, et al. Fatigue performance of steel-PPUC composite orthotropic steel bridge deck[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2024, 41(5): 131-141.

DOI:10.19815/j.jace.2023.01022

## 钢-PPUC组合正交异性钢桥面板疲劳性能

王佐才<sup>1,2</sup>, 赵玺<sup>1</sup>, 王均义<sup>3</sup>, 王东晖<sup>4</sup>

(1. 合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 合肥工业大学 土木工程防灾减灾  
安徽省工程技术研究中心, 安徽 合肥 230009; 3. 宁波路宝科技实业集团有限公司, 浙江 宁波 315800;  
4. 中铁大桥勘测设计院集团有限公司, 湖北 武汉 430056)

**摘要:**为有效解决传统钢桥面病害,提出了钢-聚酯型聚氨酯(钢-PPUC)混凝土组合桥面板结构,开展了正交异性钢桥面板的疲劳性能研究。以马鞍山公铁两用大桥为工程背景,建立局部有限元模型,采用热点应力法获得车轮荷载作用下钢桥面易疲劳开裂部位的应力响应,基于疲劳应力幅进行疲劳强度评估。考虑不同温度、不同铺装层厚度和不同结构形式条件下 PPUC 铺装层对正交异性钢桥面板疲劳性能的影响。结果表明:高弹性模量的 PPUC 铺装层对正交异性钢桥面板典型疲劳细节处的应力具有明显的改善作用;顶板与纵肋连接部位疲劳细节应力幅降幅最大,顶板与纵肋连接处桥面板细节、纵肋与横隔板连接处纵肋细节和纵肋对接焊缝细节均满足抗疲劳开裂要求;不同温度作用下的弹性模量变化对典型疲劳细节等效应力幅的影响是非线性的,铺装层厚度变化对典型疲劳细节等效应力幅的影响是近似线性的;为兼顾正交异性钢桥面板受力性能和行车舒适性两方面要求,提出了单层和双层复合型 PPUC 结构形式,计算得到 2 种结构形式对各疲劳细节应力幅最大降幅为 21%~56%,最小降幅为 8%~36%,为钢-PPUC 组合桥面板抗疲劳设计提供理论依据。

**关键词:**聚酯型聚氨酯混凝土;疲劳性能;热点应力法;正交异性钢桥面板;疲劳强度评估

中图分类号: TU391

文献标志码: A

文章编号: 1673-2049(2024)05-0131-11

## Fatigue performance of steel-PPUC composite orthotropic steel bridge deck

WANG Zuocai<sup>1,2</sup>, ZHAO Xi<sup>1</sup>, WANG Junyi<sup>3</sup>, WANG Donghui<sup>4</sup>

(1. College of Civil Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, Anhui, China;  
2. Anhui Engineering Research Center for Civil Engineering Disaster Prevention and Mitigation,  
Hefei University of Technology, Hefei 230009, Anhui, China; 3. Ningbo Road Technology  
Industrial Group Co., Ltd, Ningbo 315800, Zhejiang, China; 4. China Railway Major  
Bridge Reconnaissance & Design Institute Co., Ltd., Wuhan 430056, Hubei, China)

**Abstract:** In order to effectively solve the diseases of traditional steel bridge deck, the steel-polyester polyurethane concrete (steel-PPUC) composite bridge deck was proposed, and the fatigue performance of the orthotropic steel bridge deck was studied. The local finite element model was established based on Ma'an Shan dual-purpose highway and railway bridge. The hot spot stress method was used to obtain the stress response of the steel bridge deck which was

prone to fatigue cracking under the wheel load. The fatigue strength was evaluated based on the fatigue stress amplitude. The influence of PPUC pavement on the fatigue performance of orthotropic steel bridge deck was considered under the conditions of different temperatures, different pavement thicknesses and different structural forms. The results show that the PPUC pavement with high elastic modulus can significantly improve the stress of typical fatigue details of orthotropic steel bridge deck. The stress amplitude of the fatigue details at the connection between the top plate and the longitudinal rib is the largest. The details of the bridge deck at the connection between the top plate and the longitudinal rib, the longitudinal rib at the connection between the longitudinal rib and the diaphragm, and the butt weld of the longitudinal rib all meet the requirements of anti-fatigue cracking. The influence of elastic modulus change caused by different temperatures on the equivalent stress amplitude of typical fatigue details is nonlinear, and the influence of pavement thickness changes on the equivalent stress amplitude of typical fatigue details is linear. In order to meet the requirement of the mechanical performance of orthotropic steel bridge deck and the driving comfort, single-layer and double-layer composite PPUC structures are proposed. The maximum reduction of the stress amplitude of each fatigue detail of the two structures is calculated to be 21%-56%, and the minimum reduction is 8%-36%, which provides a theoretical basis for the anti-fatigue design of steel-PPUC composite bridge deck.

**Key words:** polyester polyurethane concrete; fatigue performance; hot spot stress method; orthotropic steel bridge deck; fatigue strength evaluation

**Author resume:** WANG Zuocai(1982-), male, PhD, professor, E-mail: wangzuocai@hfut.edu.cn.

0 引言

正交异性钢桥面板凭借轻型结构优势,经过 70 多年不断发展,逐渐满足大跨度桥梁对承载能力和经济效益的双重要求。正交异性钢桥面板的用钢量少,承受面荷载能力强,但在桥梁设计中主要承受局部荷载,由此产生的面外变形通常受到焊接约束影响,再加上各个构件的应力历程影响线短,会产生非常明显的应力集中效应,因此极易遭受疲劳损伤<sup>[1-4]</sup>。传统钢桥面大多采用沥青混凝土铺装体系,在长期使用和运营过程中,其面层容易出现裂缝、坑槽、车辙、推移等病害,经常未到设计使用年限便需要进行局部或大面积翻修。

近年来,对正交异性组合钢桥面开展了深入的研究。李少鹏<sup>[5]</sup>建立了包含传统沥青混凝土铺装层、改性聚合物砂浆铺装层和改性聚合物混凝土铺装层在内的正交异性板有限元模型,比较不同铺装层作用下的应力应变规律,同时采用名义应力法计算了 4 种典型疲劳细节的应力历程,得出磷酸镁水泥(MPC)聚合物混凝土铺装能够有效降低铺装层表面最大拉应变和正交异性钢桥面板构造细节的疲劳应力幅。丁楠等<sup>[6]</sup>采用热点应力法,选取 2 种超

高性能混凝土(UHPC)层厚度研究轻型组合桥面板的疲劳性能,得出 60 mm 厚 UHPC 层比 45 mm 厚 UHPC 层的正交异性板钢桥面板疲劳细节的应力幅降幅大。Qin 等<sup>[7]</sup>基于传统沥青混凝土铺装层和钢-UHPC 铺装层作用下正交异性板的应力监测数据进行研究,结果表明,UHPC 层能够有效降低各疲劳细节的应力幅并延长疲劳寿命,在桥梁检测维护中应注意 U 肋对接焊缝处细节,其最大应力幅超过常幅疲劳极限的 40%。因此,从铺装层材料性质和复合桥面板结构角度出发,探究铺装层对正交异性钢桥面板关键连接部位抗疲劳性能的作用至关重要<sup>[8-10]</sup>。

为了有效解决钢结构疲劳开裂和铺装层易损的钢桥面病害,提出了一种“不含沥青”的 100% 聚合物混凝土——聚酯型聚氨酯混凝土<sup>[11]</sup> (Polyester Polyurethane Concrete,PPUC),因其具有较好的力学性能、耐久性能以及抗疲劳性能,在钢桥面铺装中获得了较为广泛的关注。徐斌等<sup>[12]</sup>对比了聚酯型聚氨酯混凝土和沥青马蹄脂碎石混凝土(SMA)两种铺装结构的力学特性,研究结果表明,聚酯型聚氨酯混凝土由于具有高弹性模量,其抵抗横向拉应力和纵向剪切的能力比 SMA 更强,有利于延长路面

使用寿命,且铺装层表面最大弯沉比 SMA 更小,更能适应桥面的变形。目前针对钢-UHPC 复合结构的疲劳性能研究已经较为深入,但关于钢-PPUC 组合桥面板抗疲劳设计的研究成果还比较少。本文采用基于热点应力法的正交异性钢桥面板疲劳评估方法,以马鞍山公铁两用大桥为工程背景建立有限元模型,选取 6 种典型疲劳细节,进行钢-PPUC 组合桥面板体系的疲劳分析,并从铺装层自身参数出发,研究不同温度、不同厚度和不同结构形式对正交异性钢桥面板疲劳性能的影响。提出合理的钢-PPUC 组合桥面板结构设计方法,在考虑行车舒适性的同时最大化提高 PPUC 铺装层对正交异性钢桥面板的局部刚度贡献,保证正交异性钢桥面板的疲劳应力幅满足疲劳强度要求。

## 1 PPUC 与钢-PPUC 组合桥面板

### 1.1 PPUC 材料

钢-PPUC 组合桥面板的铺装层为 PPUC,PPUC 由聚酯型聚氨酯结合料和符合级配要求的集料在常温下均匀搅拌而成,胶石比为 15%,所用原材料主要包括:①集料,公称粒径为 0.075~9.5

mm,表观密度为  $2.4\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ,吸水率为 0.24%,PPUC 集料的级配要求见表 1,其中粗集料选用连续级配的天然砾石和机制砂,粒径范围为 4.75~9.5 mm,细集料采用连续级配的天然河砂,粒径范围为 0~4.75 mm,以中砂为主;②聚酯型聚氨酯结合料,由异氰酸酯、多元醇等多组热固性高分子材料按比例混合而成,25℃固化后拉伸强度为 16 MPa,吸水率为 0.2%;③助剂,包括甲苯二异氰酸酯、乙酸乙酯等添加剂。

### 1.2 钢-PPUC 组合桥面板

钢-PPUC 组合桥面板将具有高弹性模量、高黏结强度和优异耐久性能的 PPUC 材料引入正交异性钢桥面板组合结构中,其构造如图 1 所示。与常见的钢-UHPC 组合桥面板结构相比,正交异性钢桥面板主要有以下优特点:①PPUC 铺装层无需配筋就能提供高抗拉强度和高韧性,无钢筋锈蚀造成的结构开裂和破坏;②PPUC 铺装层与正交异性钢桥面板之间仅需通过聚酯型聚氨酯防水黏结剂即可组合成整体,不用依靠剪力连接件,避免了栓钉与钢桥面板焊接处二者受力耦合对组合结构抗弯承载力和疲劳性能的影响。

表 1 PPUC 集料级配要求

Table 1 Aggregate grading requirements of PPUC

筛孔尺寸/mm	9.5	4.75	2.36	0.6	0.3	0.15	0.075
通过率/%	100	60~88	41~72	15~50	6~22	3~10	0~6

展开疲劳计算和强度评估:疲劳细节 1,顶板与 U 肋连接处顶板细节;疲劳细节 2,顶板与 U 肋连接处 U 肋细节;疲劳细节 3,U 肋与横隔板连接处 U 肋细节;疲劳细节 4,U 肋与横隔板连接处横隔板细节;疲劳细节 5,横隔板弧形切口细节;疲劳细节 6,两横隔板跨中 U 肋对接焊缝细节。目前应用最广泛的热点应力法为表面外推法,通过获取焊趾外侧一定距离的两点或三点的结构应力进行插值计算的方式,近似确定疲劳细节处的热点应力。

### 2.2 疲劳强度评估

基于热点应力法的疲劳强度评估通过计算疲劳细节处的热点应力,采取对应疲劳细节的应力幅-应力循环次数(S-N)评定曲线,来验证其是否满足疲劳强度要求。国际焊接协会(IIW)<sup>[13]</sup>对于通过热点应力法评估的焊缝类疲劳细节,只提供了 FAT100 和 FAT90 两条 S-N 评定曲线。当焊接细节热点应力通过  $0.5t$ 、 $1.5t$ ( $t$  为焊趾处板厚)两点线性外推方式确定时,采用 FAT90 作为热点应力的 S-N 曲线<sup>[14]</sup>。横隔板弧形切口位置疲劳细节并非焊接细

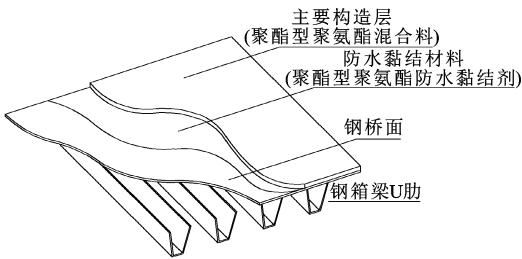


图 1 钢-PPUC 组合桥面板

Fig. 1 Steel-PPUC composite bridge deck

## 2 基于热点应力法的疲劳强度评估

### 2.1 热点应力法

热点是疲劳断裂的起源部分,具有优良焊接品质的焊接构件的热点通常出现在焊趾处,其结构应力在焊趾处的峰值被称为热点应力。在有限元分析中,通常选取一定的插值方法避开焊趾缺口处的峰值应力,这是因为结构本身存在的几何不连续性使得缺口附近应力分布呈现非线性特征。

本文选取 6 种典型疲劳细节,基于热点应力法



PPUC 与钢板的黏结强度超过 6 MPa,可认为竖向铺装层与钢板变形一致,忽略铺装层与钢板之间的拉拔脱层效应,将顶板与铺装层底设置为绑定约束。桥面板靠近箱梁中心线一侧采用横桥向对称约束,桥面板远离箱梁中心线一侧约束所有平动自由度和绕横桥向的转动自由度,横隔板底部全部固接。根据圣维南原理,由于本桥选取的典型疲劳细节距离实桥边界较远,可认为有限元模型应力输出结果不受边界条件影响。

### 3.3 典型疲劳细节表面外推公式

应用表面外推法对疲劳细节 1~6 进行分析,典型疲劳细节和应力提取方向如图 6 所示,其中  $S_1$  为最大主应力。对焊缝附近网格进行精细化划分,在满足热点应力外推插值的同时最大化提高有限元模型求解精度。根据 IIW 标准,焊接细节 1、2、3、6 属于 a、c 型热点,选择  $0.5t$ 、 $1.5t$  的两点线性外推方法,外推公式为  $\sigma_{\text{hot}} = 1.5\sigma_{0.5t} - 0.5\sigma_{1.5t}$ ,其中  $\sigma_{\text{hot}}$  为热点应力,  $\sigma_{0.5t}$ 、 $\sigma_{1.5t}$  分别为距离弧形切口边缘 0.5 倍和 1.5 倍横隔板板厚的应力值,最小网格尺寸分别设置为 4、2、1、1 mm。焊接细节 4 属于 b 型热点,采用三点二次外推(插值点取 4、8、12 mm)方法<sup>[19]</sup>,外推公式为  $\sigma_{\text{hot}} = 3\sigma_4 - 3\sigma_8 + \sigma_{12}$ ,其中  $\sigma_4$ 、 $\sigma_8$ 、 $\sigma_{12}$  分别为距离弧形切口边缘 4、8、12 mm 处的应力值,最小网格尺寸为 1 mm。细节 5 并非焊接细节,通过分析距离弧形切口边缘应力响应峰值点 0~18 mm 处的第三主应力值变化规律得出,距离切口边缘 0~6 mm 范围内的应力值呈非线性下降规律,6~18 mm 范围内的应力值下降速率逐渐变缓,近似线性变化,因此把细节 5 当作特殊热点,采取  $0.5t$ 、 $1.5t$  ( $t$  取横隔板板厚,  $t=12$  mm) 的两点线性外推方法,避开由于应力集中导致的非线性应力,最小网格尺寸为 1 mm。

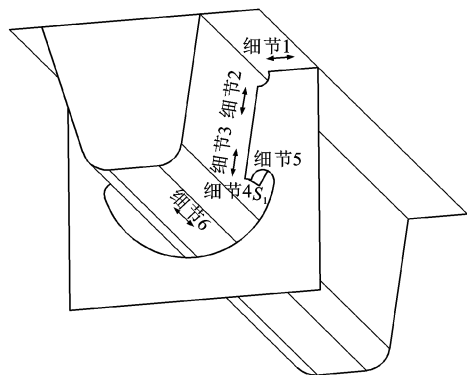


图 6 典型疲劳细节及应力提取方向

Fig. 6 Typical fatigue details and stress extraction direction

### 3.4 疲劳荷载及加载方式

疲劳荷载采用《公路钢结构桥梁设计规范》(JTG D64—2015)<sup>[20]</sup>中的疲劳荷载模型Ⅲ,如图 7 所示。钢桥面板疲劳细节应力分布具有明显的局部效应。标准疲劳车的前、后轴相距 6 m,远大于正交异性钢桥面板各开裂模式的纵向影响线长度<sup>[21-22]</sup>,可忽略车队以及单车前后双联轴之间的叠加效应,疲劳车加载只考虑后轴(120 kN+120 kN)。车轮着地面积为  $0.6 \text{ m} \times 0.2 \text{ m}$ ,考虑铺装层的作用取扩散角为  $45^\circ$ ,疲劳设计状态下冲击系数为 15%。疲劳车在横桥向按如图 8(a)所示的正 U 肋、骑 U 肋和 U 肋间 3 种方式进行加载,分别记为横向 1、横向 2、横向 3;纵桥向按如图 8(b)所示从前轮在 2<sup>#</sup>、3<sup>#</sup> 隔板跨中处( $z=-2 \text{ m}$ )移动双联轴载至后轮在 3<sup>#</sup>、4<sup>#</sup> 隔板跨中处( $z=3.2 \text{ m}$ )。通过对纵向加载区域网格大小和纵向加载步长对应力结果的影响研究<sup>[23]</sup>得到,要想获取比较精确的应力值输出,有限元模型纵桥向网格尺寸和加载步大小均不应大于 100 mm。故纵桥向首先设置工况间距为  $L/10$  ( $L$  为横隔板间距,  $L=400 \text{ mm}$ ),计算疲劳细节应力,对应力极值处的轮载步长加密到 100 mm,获得更精确的结构应力响应。通过设置横桥向 3 种加载方式和纵桥向局部加密荷载步方式组成的不同加载工况,可以确定最不利细节位置和最不利细节加载位置。对于疲劳细节 1、2、6,纵桥向每隔 100 mm 设置一个典型观测截面,即纵桥向最大网格尺寸设置为 100 mm,其中疲劳细节 1、2 在距离 3<sup>#</sup> 和 4<sup>#</sup> 隔板两侧 100 mm 之间要增设观测截面。疲劳细节 3、4、5 在纵桥向可直接选取 3<sup>#</sup> 隔板和 4<sup>#</sup> 隔板位置为典型观测截面进行分析。

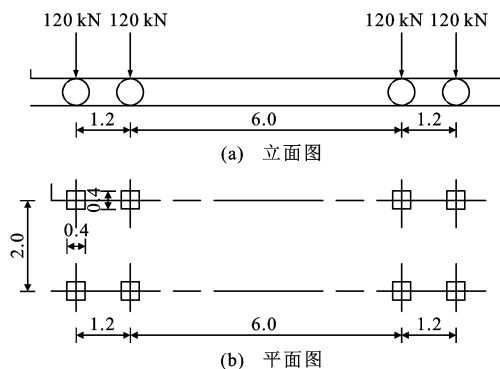


图 7 疲劳荷载模型Ⅲ(单位:m)

Fig. 7 Fatigue load model III (unit:m)

### 3.5 疲劳强度结果分析

将纯钢板作为对照组,确定最不利细节位置,得到疲劳细节在最不利加载位置处的应力云图,如图

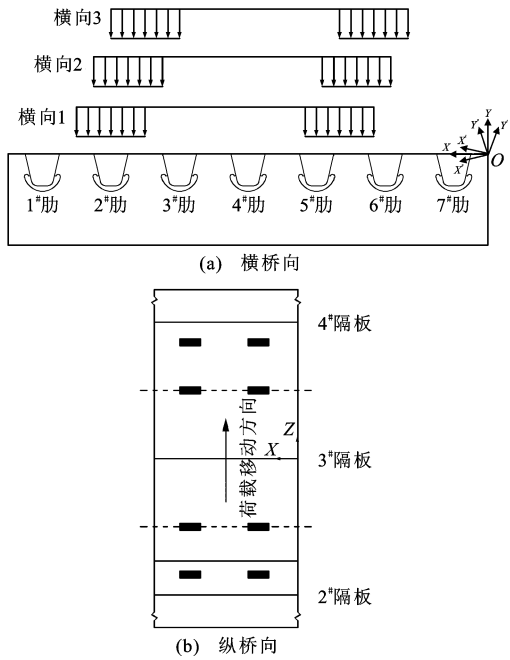


图 8 疲劳车加载位置

Fig. 8 Loading position of fatigue vehicle

9 所示,按最不利横向加载位置沿纵桥向加载,得到疲劳细节在最不利位置处的应力历程,如图 10 所示。通过雨流计数法获得各疲劳细节应力幅,结果如表 2 所示。在 PPUC 铺装层作用下,疲劳细节处应力集中影响范围要比纯钢板时小,且最大应力有

不同程度的改善。各疲劳细节受力特点有所不同,疲劳细节 1、2 为横隔板处顶板与 U 肋连接部位,该处桥面板承受较大的弯矩作用,从而产生横向弯曲应力;U 肋在面外弯矩作用下会发生面外变形,但由于受到桥面板的约束会引起附加次内力,从而产生沿 U 肋腹板方向的竖向应力。疲劳细节 3、4 为 U 肋与横隔板连接部位,均受拉,但横隔板一侧热点应力明显大于 U 肋一侧热点应力,主要原因是横隔板对 U 肋的支撑使车轮荷载下 U 肋腹板的扭转变形明显减小,避免了高应力,而 U 肋对横隔板的横向刚度贡献明显不足。疲劳细节 5 为横隔板弧形切口位置构造细节,在车轮荷载下切口边缘区域会呈现显著的压应力集中,但还不足以抵消横隔板和纵肋在焊接过程中在横隔板靠近纵肋一侧的切口处产生的残余拉应力,叠加后表现为拉应力最终导致疲劳开裂。疲劳细节 6 为 U 肋对接部位,主要承受顺桥向主拉应力。

疲劳细节应力历程具有很强的局限性,其中疲劳细节 4 最为明显,疲劳车通过产生 3 次应力循环。疲劳细节 1、2、3、6 的应力历程曲线呈现对称性,在双联轴加载下产生 2 次应力循环,影响范围不超过 2 个横隔板间距,当前轮靠近目标疲劳细节时会产生一个峰值应力,当疲劳车移动到双联轴中心线与

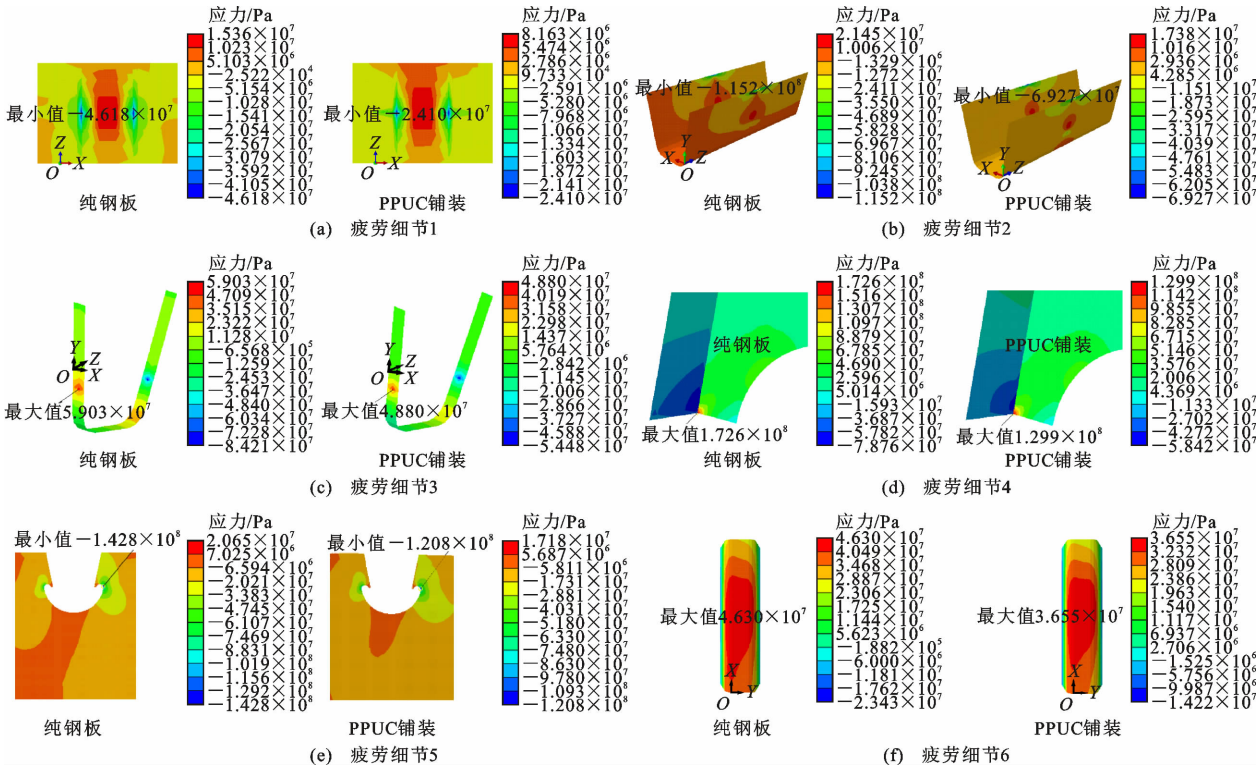


图 9 最不利加载位置处的疲劳细节应力云图

Fig. 9 Stress nephograms of fatigue details at the most unfavorable loading position

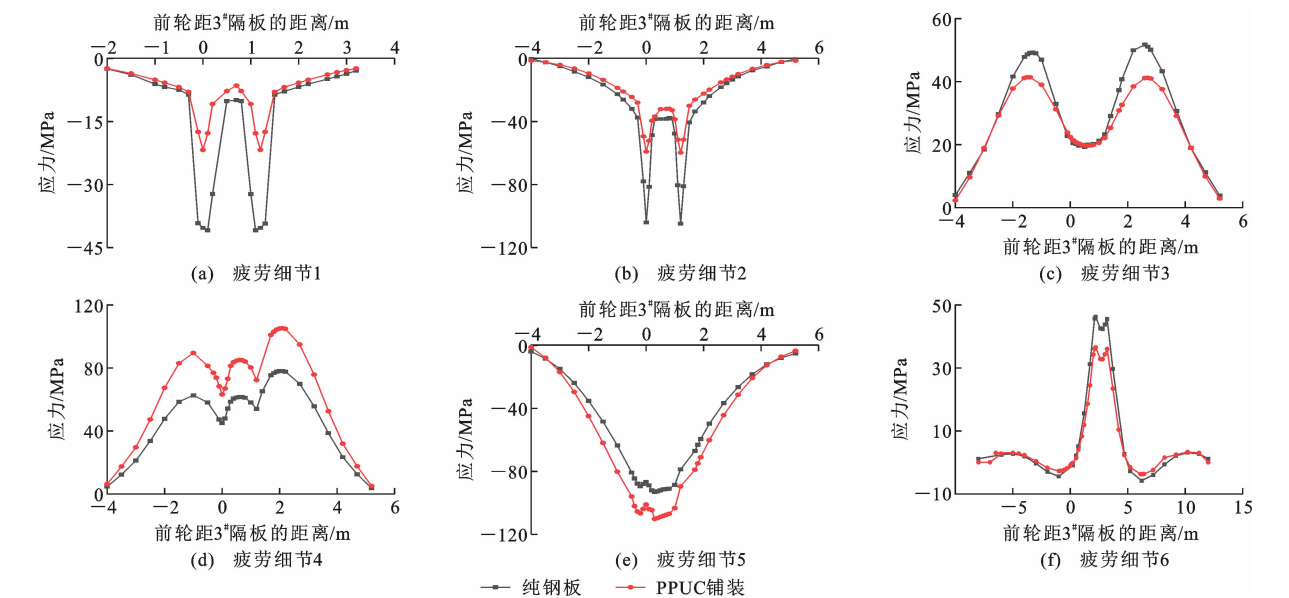


图 10 疲劳细节应力历程

Fig. 10 Stress history of fatigue details

表 2 疲劳细节应力幅

Table 2 Stress amplitude of fatigue details

疲劳细节	1	2	3	4	5	6
应力方向	$S_x$	$S_y', S_y''$	$S_y', S_y''$	$S_1$	$S_1$	$S_z$
纯钢板最大应力幅/MPa	40.90	104.62	51.71	105.26	110.22	50.05
钢-PPUC 最大应力幅/MPa	21.80	59.70	41.38	78.07	93.19	39.53
应力幅降幅/%	46.7	42.9	20.0	25.8	15.5	21.0
横向最不利加载方式	横向 1	横向 1	横向 2	横向 2	横向 2	横向 3

U 肋和桥面板相交处重合时会呈现一个低谷,疲劳车继续向前移动到后轮刚刚离开目标疲劳细节时,再次产生一个峰值应力。由于疲劳细节 5 因焊接产生的残余拉应力不易测得,偏保守地选择轮载作用下的压应力进行疲劳强度评估,因此疲劳应力历程曲线没有较为明显的规律。

疲劳细节 1、2 的疲劳应力幅降幅最大,分别为 46.7%和 42.9%。PPUC 铺装层能够提供较大的弯曲刚度,其与桥面板直接接触,形成组合受力体系,对横向刚度贡献较大,因此能够有效降低板内应力。对于疲劳细节 1~4 和疲劳细节 6,疲劳强度评估依据 FAT90 对应的  $S-N$  曲线;对于疲劳细节 5,疲劳强度评估依据 FAT125 对应的  $S-N$  曲线。按照常幅疲劳设计准则进行疲劳强度评估,在 40 mm PPUC 铺装层作用下,疲劳细节 1、3、6 的最大应力幅均低于对应常幅疲劳极限,其中疲劳细节 1 的最大应力幅低于其疲劳极限,说明这 3 种疲劳细节不会因为轮载作用引发的局部应力集中效应产生疲劳损伤,满足抗疲劳开裂要求。疲劳细节 2、4、5 的最大应力幅介于常幅疲劳极限和对应疲劳强度等级之

间,从钢桥面构造细节方面考虑,可以通过进一步优化设计来延长使用寿命,如适当增大横隔板厚度或加密横隔板布置来提高疲劳抗力,对于横隔板疲劳细节还可通过调整横隔板切口相对高度来改善其疲劳寿命。

#### 4 PPUC 铺装层参数对钢桥疲劳性能的影响

为研究 PPUC 铺装层对正交异性钢桥面板疲劳特性的影响规律,通过设置不同铺装层参数组合,获取对应铺装层方案下 6 种典型疲劳细节的应力历程。通过雨流计数法和对发散-收敛波的处理,进一步提取出了变幅循环应力,记录对应循环次数,根据 Miner 线性累积损伤准则计算等效应力幅  $\Delta\sigma_e$ ,计算公式为

$$\Delta\sigma_e = \left[ \frac{\sum n_i (\Delta\sigma_i)^m}{\sum n_i} \right]^{\frac{1}{m}} \tag{2}$$

式中: $n_i$  为第  $i$  级应力幅作用的次数; $\Delta\sigma_i$  为第  $i$  级应力幅; $m$  为应力幅曲线斜率参数,根据第 2.2 节疲

劳评定 S-N 曲线选择。

4.1 铺装层温度的影响

反映铺装层对正交异性钢桥面板刚度贡献的材料参数为弹性模量,而铺装层温度变化会直接影响铺装层弹性模量变化<sup>[24]</sup>。PPUC 虽为热固性材料,但高温状态仍存在软化现象,随着温度升高,PPUC 的弹性模量降低,从而导致钢板承受更大的应力,所以有必要研究在不同温度作用下弹性模量的变化对正交异性钢桥面板疲劳细节应力幅的影响。设置 4 种试验温度条件,铺装层厚度统一取 40 mm,并假设铺装层温度与环境温度变化保持一致。分别得到在上述 4 种铺装层温度对应弹性模量下 6 种典型疲劳细节的等效应力幅,结果见表 3,分析可知:

(1)随着 PPUC 铺装层温度降低,各疲劳细节的等效应力幅有不同程度的减小。温度降低对 U 肋与横隔板、顶板相交处连接焊缝的疲劳应力的改善效果最为理想,疲劳细节 1、2、4 在 0℃时的等效应力幅降幅相比 60℃分别降低了 37%、24%和 19%。

(2)疲劳细节 1、2 的等效应力幅对铺装层弹性模量的敏感度较高,说明不同温度下铺装层与正交异性板刚度的重新组合对于直接承受车轮荷载作用的钢桥顶板的疲劳性能影响最大。

(3)不同温度作用下引起的铺装层弹性模量变化对典型疲劳细节等效应力幅的影响是非线性的。高温环境下桥面板应力受弹性模量变化影响显著,随着温度降低弹性模量快速增加,等效应力幅不断降低且降幅逐渐变小;低温环境下,弹性模量增加对应力幅的降低作用较小,应力随弹性模量近似呈线性变化。

(4)桥面铺装在通车运营期间,铺装层温度跟随环境温度变化可能存在一定的滞后性<sup>[25]</sup>,特别在夏季,桥面铺装长时间保持高温工作状态,当环境温度降低时,铺装层温度可能在短时间内居高不下,因此相应改善效果较理论推算值可能会有所降低。

4.2 铺装层厚度的影响

为研究铺装层厚度变化对正交异性钢桥面板疲劳细节应力幅的影响规律,在 20~50 mm 厚度范围中选取 4 种铺装层厚度,铺装层弹性模量统一保持 16 000 MPa,得到 6 种典型疲劳细节在 4 种铺装层厚度下的等效应力幅变化规律,结果见表 4,分析可知:

(1)随着铺装层厚度的增加,钢桥面板在车轮荷载作用下,各疲劳细节的等效应力幅有不同程度的降低。疲劳细节 1、2 处的应力响应最为敏感,在铺装层厚度为 50 mm 时相比 20 mm 的降低幅度分别为 42%和 34%,说明增加铺装层厚度对正交异性钢桥面板疲劳性能有明显的改善作用,特别是对于钢桥顶板和 U 肋连接焊缝细节的影响显著。

(2)等效应力幅随厚度增加均匀减小,因此不同铺装层厚度变化对典型疲劳细节等效应力幅的影响是线性的。

4.3 铺装层结构形式的影响

为综合考虑受力性能和行车舒适性问题,针对钢-PPUC 组合桥面板设计提出单层和双层 2 种结构形式,单层结构形式见图 11,构造层厚度为 20~50 mm;双层复合型结构形式见图 12,采用刚度较大的聚酯型聚氨酯混合料(20~30 mm)与正交异性钢桥面板组成整体协同受力,然后在刚性铺装层上

表 3 不同温度下疲劳细节等效应力幅对比  
Table 3 Comparison of equivalent stress amplitudes of fatigue details under different temperatures

温度/℃	不同疲劳细节的等效应力幅/MPa					
	疲劳细节 1	疲劳细节 2	疲劳细节 3	疲劳细节 4	疲劳细节 5	疲劳细节 6
60(3 000 MPa)	31.22	62.55	41.28	65.50	83.91	36.14
40(5 000 MPa)	26.99	57.49	39.04	62.58	81.74	34.69
15(8 000 MPa)	23.88	52.74	37.28	58.87	78.32	33.26
0(16 000 MPa)	19.58	47.67	36.30	53.40	73.97	30.49

表 4 不同铺装层厚度下疲劳细节等效应力幅对比  
Table 4 Comparison of equivalent stress amplitude of fatigue details under different pavement thicknesses

铺装层厚度/mm	不同疲劳细节的等效应力幅/MPa					
	疲劳细节 1	疲劳细节 2	疲劳细节 3	疲劳细节 4	疲劳细节 5	疲劳细节 6
20	28.20	62.23	41.90	67.23	83.22	36.29
30	23.84	54.03	38.03	60.52	79.14	33.30
40	19.58	47.67	36.30	53.40	73.97	30.49
50	16.22	41.36	34.19	48.08	68.80	27.84

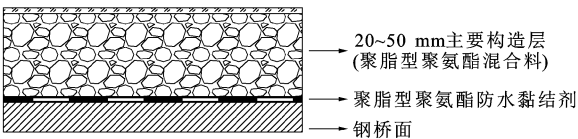


图 11 单层结构

Fig. 11 Single-layer structure

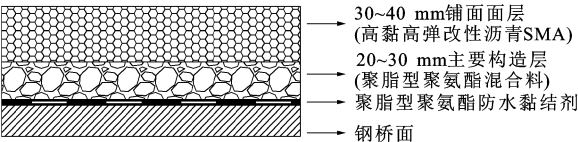


图 12 双层复合型结构

Fig. 12 Double-layer composite structure

表 5 不同结构形式下各疲劳细节等效应力幅对比

Table 5 Comparison of equivalent stress amplitude of fatigue details under different structural forms

结构形式	不同疲劳细节的等效应力幅/MPa					
	疲劳细节 1	疲劳细节 2	疲劳细节 3	疲劳细节 4	疲劳细节 5	疲劳细节 6
纯钢板	36.63	92.83	45.57	73.41	87.49	39.45
方案 1:20 mmPPUC+30 mmSMA	26.53	59.76	39.20	61.89	80.32	34.68
方案 2:20 mmPPUC+40 mmSMA	24.72	55.80	37.98	58.77	78.82	33.51
方案 3:30 mmPPUC+30 mmSMA	22.23	51.66	37.15	55.54	76.72	32.06
方案 4:30 mmPPUC+40 mmSMA	20.63	48.85	36.05	53.45	74.74	31.06
方案 5:50 mmPPUC	16.22	41.36	34.19	48.08	68.80	27.84

幅降幅为 36~55%，疲劳细节 3 的应力幅降幅为 14%~25%，疲劳细节 4 的应力幅降幅为 16%~35%，疲劳细节 5 的应力幅降幅为 8%~21%，疲劳细节 6 的应力幅降幅为 12%~29%。可以发现，PPUC 双层结构对疲劳细节 1、2 处的应力改善最为明显。

(2)方案 5 对各疲劳细节等效应力幅的影响相比前 4 种方案更为显著，主要是因为该铺装层方案下钢-PPUC 组合桥面板的整体刚度得到了明显提升。

(3)在进行正交异性钢桥面板抗疲劳设计时，高弹性模量的 PPUC 对正交异性钢桥面板疲劳细节位置的应力具有明显的改善作用。从材料性能发挥层面上讲，钢-PPUC 组合桥面板将刚度较大的聚脂型聚氨酯混合料作为永久性构造层，其与钢板组合受力大大提高了对正交异性钢桥面板的刚度贡献，而作为铺面面层的高弹改性沥青 SMA 铺装层仅仅作为磨耗层，主要发挥其稳定的耐磨性能，增加行车舒适性，从而减少桥面铺装层材料费用和后续维修支出。从受力层面上讲，相对刚度更大的 PPUC 铺装层不仅可以提高自身的耐久性，减小铺装层最大拉应力和最大剪切应变，同时还能有效减小正交异性钢桥面板疲劳细节处的应力幅，减缓疲劳裂纹的

铺筑一层高黏高弹改性沥青 SMA(30~40 mm)作为磨耗层来提高行车舒适性。根据单层和复合型 PPUC 两种结构形式设置 5 种钢-PPUC 组合桥面板的组成方案,分析不同铺装层方案下疲劳细节等效应力幅的变化情况,得到不同铺装层方案组合对桥面板疲劳性能的影响规律。PPUC 和改性沥青 SMA 的弹性模量分别取 16 000 MPa 和 1 400 MPa。分别计算得到纯钢板和上述 5 种铺装层方案下 6 种典型疲劳细节的等效应力幅,结果见表 5,分析可知:

(1)相比于纯钢板,5 种铺装层方案下疲劳细节 1 的应力幅降幅为 28%~56%，疲劳细节 2 的应力

萌生,提高桥面板整体抗疲劳性能。因此在进行钢-PPUC 组合桥面板抗疲劳设计时,须综合考量疲劳应力幅降幅和行车舒适性两大目标,在遵循刚度搭配最优原则下选择最合理的铺装层参数,避免应力集中和疲劳损伤。

5 结 语

(1)采用 PPUC 铺装层的典型疲劳易开裂部位应力集中程度和最大应力幅相比纯钢板有不同程度的降低,对顶板和纵肋连接部位改善作用最为明显,顶板处和 U 肋处疲劳细节最大应力幅降幅分别达到 46.7%和 42.9%;对纵肋和横隔板部位相关疲劳细节最大应力幅也有一定程度的改善,降幅为 15.5%~25.8%。

(2)按照常幅疲劳设计准则进行验算,顶板和 U 肋连接处顶板细节、U 肋与横隔板连接处 U 肋细节和 U 肋对接焊缝细节这 3 种疲劳细节均无损伤作用且不会产生疲劳开裂;对于顶板和 U 肋连接处 U 肋细节、U 肋与横隔板连接处横隔板细节和横隔板弧形切口细节,可通过优化钢桥面构造细节设计的方法来改善疲劳寿命。

(3)不同温度作用下引起的 PPUC 铺装层弹性模量变化对典型疲劳细节等效应力幅的影响是非线

性的,随着铺装层温度从 60 ℃降低到 0 ℃,弹性模量增加,等效应力幅减小趋势逐渐变缓,各疲劳细节等效应力幅降幅为 12%~37%。

(4)不同 PPUC 铺装层厚度变化对典型疲劳细节等效应力幅的影响是近似线性的。随着铺装层厚度从 20 mm 增大到 50 mm,等效应力幅均匀减小,各疲劳细节等效应力幅降幅为 17%~42%。

(5)高弹性模量的 PPUC 铺装层对正交异性钢桥面板典型疲劳细节处的应力具有明显的改善作用。单层和双层复合型 PPUC 两种结构形式对各疲劳细节等效应力幅最大降幅为 21%~56%,最小降幅为 8%~36%。

(6)本文针对聚酯型聚氨酯混凝土铺装结构疲劳性能进行了数值模拟研究,后续可与实桥监测数据相结合,通过疲劳细节应力谱进一步估算其疲劳寿命。

参考文献:

References:

[ 1 ] 郑凯锋,冯霄暘,衡俊霖,等. 钢桥 2020 年度研究进展[J]. 土木与环境工程学报(中英文),2021,43(增 1): 53-69.  
ZHENG Kaifeng, FENG Xiaoyang, HENG Junlin, et al. Research progress of steel bridge in 2020[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2021,43(S1):53-69.

[ 2 ] 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, 39.  
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):14-30,39.

[ 3 ] WANG X D, MIAO C Q, YANG M, et al. Fatigue performance of orthotropic steel decks in super-wide steel box girder considering transverse distribution of vehicle load[J]. Structural Durability & Health Monitoring,2021,15(4):299-316.

[ 4 ] ZHU Z W, XIANG Z, LI J P, et al. Fatigue behavior of orthotropic bridge decks with two types of cutout geometry based on field monitoring and FEM analysis [J]. Engineering Structures,2020,209:109926.

[ 5 ] 李少鹏. MPC 聚合物材料在钢桥面铺装中的应用研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2017.  
LI Shaopeng. A study on the application of modified polymer composite (MPC) in the overlay of steel bridges[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology,

2017.

[ 6 ] 丁 楠,邵旭东. 轻型组合桥面板的疲劳性能研究[J]. 土木工程学报,2015,48(1):74-81.  
DING Nan, SHAO Xudong. Study on fatigue performance of light-weighted composite bridge deck[J]. China Civil Engineering Journal,2015,48(1):74-81.

[ 7 ] QIN S Q, ZHANG J B, HUANG C L, et al. Fatigue performance evaluation of steel-UHPC composite orthotropic deck in a long-span cable-stayed bridge under in-service traffic [J]. Engineering Structures, 2022,254:113875.

[ 8 ] SU L, WANG S L, GAO Y, et al. In situ experimental study on the behavior of UHPC composite orthotropic steel bridge deck[J]. Materials,2020,13(1):253.

[ 9 ] ABDELBASET H, CHENG B, TIAN L, et al. Enhancing fatigue resistance of rib-to-floorbeam welded connections in orthotropic steel bridge decks by using UHPC layer: an experimental study[J]. Structures, 2022,36:153-167.

[10] SHI Z C, SU Q T, KAVOURA F, et al. Fatigue behavior evaluation of full-scale OSD-UHPC composite bridge deck system[J]. Engineering Structures,2023, 275:115179.

[11] 徐 斌,徐 速,吕建华,等. 聚合物混凝土发展及桥梁工程应用研究[J]. 混凝土世界,2021(10):89-92.  
XU Bin, XU Su, LYU Jianhua, et al. Research on the development and application of polymer concrete in bridge engineering[J]. China Concrete,2021(10):89-92.

[12] 徐 斌,王仁贵,徐 速,等. ECO 改性聚氨酯混凝土铺装层力学仿真分析[J]. 公路,2022,67(12):131-135.  
XU Bin, WANG Rengui, XU Su, et al. Mechanical simulation analysis of ECO modified polyurethane concrete pavement[J]. Highway, 2022, 67(12):131-135.

[13] IIW Fatigue Recommendations: XIII-2460-13/XV-1440-13[S]. Paris:International Institute of Welding, 2013.

[14] 周列茅,马海峰,宣寿通,等. 基于热点应力法的正交异性钢桥面板疲劳分析及验算[J]. 结构工程师, 2021,37(6):10-17.  
ZHOU Liemao, MA Haifeng, XUAN Shoutong, et al. Fatigue analysis and assessment of orthotropic steel bridge deck based on hot spot stress method [J]. Structural Engineers,2021,37(6):10-17.

[15] 向 泽. 正交异性钢桥面板横隔板弧形切口的疲劳性能研究[D]. 长沙:湖南大学,2016.

- XIANG Ze. Fatigue performance research of diaphragm cutout on orthotropic steel bridge decks[D]. Changsha: Hunan University, 2016.
- [16] 童乐为,沈祖炎,陈忠延. 正交异性钢桥面板疲劳验算时的结构分析[J]. 上海力学, 1998, 19(3): 204-212.
- TONG Lewei, SHEN Zuyan, CHEN Zhongyan. Structural analysis for fatigue assessment of orthotropic steel bridge decks[J]. Chinese Quarterly of Mechanics, 1998, 19(3): 204-212.
- [17] 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): 16-21, 70.
- TONG Lewei, SHEN Zuyan. Fatigue assessment of orthotropic steel bridge decks[J]. China Civil Engineering Journal, 2000, 33(3): 16-21, 70.
- [18] 雷建华,徐 斌,何旭辉. 改性聚氨酯混凝土受压性能及本构关系研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2023, 20(1): 278-288.
- LEI Jianhua, XU Bin, HE Xuhui. Research on compressive properties and constitutive relation of modified polyurethane concrete[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2023, 20(1): 278-288.
- [19] ZHU Z W, XIANG Z, ZHOU Y E. Fatigue behavior of orthotropic steel bridge stiffened with ultra-high performance concrete layer[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2019, 157: 132-142.
- [20] 公路钢结构桥梁设计规范: JTG D64—2015[S]. 北京: 人民交通出版社, 2015.
- Specifications for design of highway steel bridge: JTG D64—2015[S]. Beijing: China Communications Press, 2015.
- [21] 郭 凯, 张晓亮, 周 宇, 等. 开口纵肋钢桥面板疲劳性能研究[J]. 工业建筑, 2021, 51(11): 106-111, 120.
- GUO Kai, ZHANG Xiaoliang, ZHOU Yu, et al. Research on fatigue performances of steel bridge decks with open-shaped longitudinal ribs[J]. Industrial Construction, 2021, 51(11): 106-111, 120.
- [22] 邵旭东, 曲宛桐, 曹君辉, 等. 带大 U 肋的轻型组合桥面板基本力学性能[J]. 中国公路学报, 2018, 31(8): 94-103.
- SHAO Xudong, QU Wantong, CAO Junhui, et al. Fundamental mechanical performance of lightweight composite bridge deck with large U-ribs[J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31(8): 94-103.
- [23] 陈孔生. 钢桥面板系统的疲劳受力行为及 UHPC 铺装层影响研究[D]. 福州: 福州大学, 2018.
- CHEN Kongsheng. Study on the fatigue behavior of steel deck system and influence of UHPC pavement [D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2018.
- [24] 李丽娟, 崔 闯, 卜一之, 等. 铺装层对正交异性钢桥面板疲劳性能影响效应研究[J]. 世界桥梁, 2016, 44(5): 48-52.
- LI Lijuan, CUI Chuang, BU Yizhi, et al. Study of influential effects of pavement on fatigue performance of orthotropic steel deck plate[J]. World Bridges, 2016, 44(5): 48-52.
- [25] 王石磊, 齐法琳, 柯在田, 等. 环氧沥青铺装对钢桥面板受力影响试验研究[J]. 工程力学, 2020, 37(10): 145-154.
- WANG Shilei, QI Falin, KE Zaitian, et al. Experimental study on the effect of an epoxy asphalt concrete pavement on an orthotropic steel deck[J]. Engineering Mechanics, 2020, 37(10): 145-154.