

型钢开口肋-UHPC组合桥面板构造细节疲劳性能研究

王志宏¹, 李秉海¹, 黄云^{2*}, 陈阳¹, 付承涛¹, 戴笠¹, 曾鹏罡¹

(1. 中国建筑第五工程局有限公司, 长沙 410004; 2. 华东交通大学土木建筑学院, 南昌 330013)

摘要: 正交异性钢桥面板典型构造细节处的疲劳开裂, 不仅使面板整体疲劳抗力显著降低, 还会严重缩短其服役寿命。文中以某大跨度拱桥的钢箱主梁为研究对象, 该钢箱主梁首次采用了型钢开口肋-UHPC组合桥面板结构; 针对该组合桥面板的典型疲劳易损细节, 分别建立了钢箱梁节段精细化混合单元有限元模型, 基于疲劳加载及分析理论系统探究了疲劳细节的应力特征与疲劳损伤特性, 并对其疲劳寿命进行合理预测。研究结果表明: 纵肋与顶板焊接细节以及纵肋与横隔板焊接细节是决定型钢开口肋-UHPC组合桥面板疲劳性能的两类关键构造细节, 每类焊接细节均具有多种疲劳失效模式, 且不同失效模式下该组合桥面板的应力特征和疲劳特性存在显著差异; 两类焊接细节的疲劳性能分别由顶板焊趾和横隔板焊趾失效位置的疲劳抗力决定; 考虑当交通量增长时, 两类焊接细节针对所有失效模式的疲劳累积损伤均呈显著增大趋势, 且表现出典型的非线性增长特征; 相较而言, 纵肋与横隔板焊接细节的疲劳强度更低, 且其疲劳寿命远低于设计寿命, 在设计使用寿命期内具有更高的疲劳开裂风险, 因此, 宜对其进行改进设计并加强检测维护, 确保其疲劳抗力和使用安全。

关键词: UHPC组合桥面板; 型钢开口肋; 构造细节; 疲劳性能; 疲劳累积损伤; 有限元分析

中图分类号: U443.31, U441⁺.4

文献标志码: A

文章编号: 1671-9379(2026)01-0047-09

DOI: 10.13969/j.jzgjgz.20240815002

Research on Fatigue Performance of Structural Details in Section Steel-UHPC Composite Bridge Decks with Open Ribs

WANG Zhihong¹, LI Binghai¹, HUANG Yun^{2*}, CHEN Yang¹, FU Chengtao¹,
DAI Li¹, ZENG Penggang¹

(1. China Construction Fifth Engineering Division Co., Ltd., Changsha 410004, China; 2. School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

*Corresponding author: civilhy@163.com

Abstract: Fatigue cracking of typical structural details can significantly cause fatigue resistance reduction of orthotropic steel bridge decks (OSDs) and shorten the service life. A hot-rolled section steel - ultra-high performance concrete (UHPC) lightweight composite bridge deck with open ribs (HSD), which was first used in the steel box girder of a long-span arch bridge, was taken as the research object. The refined three-dimensional finite element analysis models with mixed shell and solid elements for steel-box girder segment were established. Fatigue loading and theoretical analysis were conducted to explore the stress distributions and fatigue damage characteristics of typical fatigue-prone

收稿日期: 2024-08-15

基金项目: 国家自然科学基金(52368017), 江西省自然科学基金(20212BAB204011)

作者简介:

王志宏(1970—), 男, 学士, 高级工程师, 主要从事城市道路及桥梁工程建设方面的研究。E-mail: 442999189@qq.com。

通信作者:

黄云(1985—), 男, 博士, 讲师, 主要从事钢结构与钢-混凝土组合结构桥梁方面的研究。E-mail: civilhy@163.com。

details, and to predict the fatigue life. The results indicate that rib-to-deck and rib-to-crossbeam welded joints are two types of critical structural details determining the fatigue performance of HSD. Each type of welded joints has multiple fatigue failure modes, and the stress distributions and fatigue performance of the welded joint corresponding to different failure modes have significant differences. Fatigue properties of the two types of welded joints are determined by the fatigue resistance of toe-deck failure and toe-crossbeam failure, respectively. When traffic growth is taken into account, the fatigue cumulative damage of each fatigue failure mode in the two welded joints increases significantly and exhibits representative nonlinear growth. By contrast, the rib-to-crossbeam welded joint has lower fatigue strength and a shorter fatigue life below the design life. This welded joint has a higher risk of fatigue cracking during the design service life. Therefore, the improvement of local structural details and more inspection and maintenance are needed to ensure the fatigue resistance and service safety of HSD.

Keywords: UHPC composite bridge deck; section steel open rib; structural detail; fatigue performance; fatigue cumulative damage; finite element analysis

正交异性钢桥面板具有轻质高强、施工便捷、经济性较好等突出优点,目前在国内外多种类型的桥梁结构中得到了广泛应用且发展迅速。正交异性钢桥面板作为钢结构及钢-混凝土组合结构桥梁的桥面板主要结构型式,其在运营过程中的服役质量和可靠性是确保桥梁结构安全服役的基本前提。然而,国内外相关应用实践和研究均表明^[1-5]:正交异性钢桥面板的自身构造特征与体系受力机制复杂、焊缝众多且焊接残余应力较高;在上述内在因素,以及随机交通荷载、复杂服役环境等外在因素的共同作用下,该类桥面板典型构造细节的疲劳问题尤为突出,进而大幅降低正交异性钢桥面板的疲劳服役寿命并造成重大的经济损失,已成为制约该类钢桥面板推广应用与技术发展的核心技术难题。系统阐明关键影响因素作用下,钢桥面板典型疲劳易损细节在服役过程中的损伤特性并对其疲劳寿命进行合理预测,可为钢桥面板结构的抗疲劳设计与后期维护修复奠定重要基础。

正交异性钢桥面板自身的构造型式,是影响其典型疲劳易损部位应力幅值与疲劳抗力的关键性内因。针对传统正交异性钢桥面板典型构造细节的疲劳开裂问题,国内外研究学者从结构整体和局部几何构造角度,对该类桥面板开展了大量疲劳试验研究和数值分析,提出了一系列较为合理的解决方案和技术措施。FU等^[6]、KAINUMA等^[7]结合足尺试件的疲劳试验和数值分析研究了熔透率对正交异性钢桥面板焊接细节疲劳性能的影响,结果表明:增大焊缝熔透率可在一定程度上减缓疲劳裂纹扩展从而提高焊接细节的疲劳抗力。HENG等^[8]、LUO等^[9]通过引入铆边纵肋构造型式以改善纵肋与顶板焊接细节的疲劳性能,疲劳试验与数值分析结果均表明,该构造型式可有效提升顶板焊趾部位的疲劳强度,但对顶板焊根部位疲劳性能的改善效果相对有限。张清华等^[10]、LIU等^[11]、黄云^[12]针对纵肋与顶板新型双面焊焊接构造细节的疲劳失效模式、疲劳损伤特性和疲劳寿命开展了系统研究,结果表明:新型双面焊焊接构造细节可有效根除顶板焊根部位的类裂纹缺

陷,且其疲劳抗力显著优于传统单面焊及铆边纵肋焊接细节的疲劳抗力。LIU等^[13]在正交异性钢桥面板中引入了U形大纵肋结构,并对其疲劳性能开展了深入研究,结果表明:采用U形大纵肋结构能够减少纵肋与顶板间的焊缝数量,并能有效提升该焊接细节的疲劳性能。ZHU等^[14-15]、朋茜等^[16]、TAI等^[17]通过在纵肋内设置内隔板或肋板、优化横隔板的开孔形式、改变纵肋形式等多种解决方案以提升纵肋与横隔板焊接细节的疲劳性能,相关研究表明上述改进措施可在不同程度上提升该焊接细节的疲劳抗力,从而延长其疲劳寿命。目前已取得的研究成果系统揭示了传统钢桥面板结构及局部构造对典型构造细节疲劳抗力的影响,为提升该类桥面板的疲劳性能提供了重要科学依据,但受传统钢桥面板固有构造特性的制约,其在全寿命服役周期内仍面临显著的疲劳开裂风险。

针对传统钢桥面板结构自身构造特性导致的疲劳抗力不足问题,相关研究指出研发长寿命高性能组合桥面板结构是从根本上提升钢桥面板体系疲劳抗力的有效途径。目前国内外研究学者针对正交异性组合桥面板面临的关键问题,开展了相关研究,相继提出了多种类型的结构,包括正交异性钢-高性能组合桥面板与钢-UHPC轻型组合桥面板结构。上述组合桥面板结构基本上保留了传统钢桥面板结构的典型疲劳构造细节,且仅在一定程度上降低了其疲劳应力幅值,SHAO等^[18]、孙璇等^[19]在此基础上对其构造进行了革新和优化,提出了一种型钢开口肋-UHPC组合桥面板,且该结构已成功应用于某大桥工程。此处针对该大桥所采用的型钢开口肋-UHPC组合桥面板的疲劳问题,从应力特征、疲劳损伤特性和疲劳寿命预测三个方面深入研究其典型构造细节的疲劳性能,以期该类组合桥面板结构的抗疲劳设计提供合理参考。

1 型钢开口肋钢桥面板结构

1.1 新型桥面板结构的提出

传统正交异性钢桥面板是目前钢结构桥梁中最常用

的桥面板构造型式,其采用U形闭口加劲纵肋构造与沥青混凝土铺装方案,在结构体系、制造工艺、重载交通等多重因素耦合作用下,易引发疲劳开裂与铺装层损坏两类型病害。国内外广泛应用传统正交异性钢桥面板的桥梁,在服役初期即出现不同程度的显著疲劳开裂问题,相关研究则指出^[1-5]:传统钢桥面板结构存在多个典型疲劳易损细节,每个细节均具有多种疲劳失效模式且其疲劳抗力差异较大;构造细节疲劳抗力不足和广泛采用的沥青混凝土铺装层耐久性较低是上述两类病害频发的根本性内因。

对正交异性钢桥面板疲劳开裂问题认识的深化、先进制造工艺的革新与高性能材料的应用,为解决传统正交异性钢桥面板的两类病害问题提供了有效途径:研究者采用剪力键将钢桥面板与超高性能混凝土(简称UHPC)结构层相连,形成协同受力的组合桥面板结构,经改造后的组合桥面板结构其局部刚度显著提高且构造细节应力幅值大幅降低,从而有效提升了钢桥面板结构的疲劳抗力、减少了桥面铺装层病害。但受前述组合桥面板固有构造特性的制约,其采用闭口加劲肋的设计方案仍存在构造复杂、焊缝密集、局部焊接作业难度大等问题。研究者针对上述问题进行系统优化和深入研究,提出了一种型钢开口肋-UHPC组合桥面板结构:该结构采用热轧倒置T型钢作为纵向加劲肋,横隔板上部为横向T型钢,纵横向热轧型钢通过翼缘间横与焊缝相连接,钢桥面顶板则通过剪力连接件与密配筋UHPC结构层形成组合桥面板结构。将新型组合桥面板的连接焊缝置于低应力区,型钢母材则置于高应力区,且该新型连接构造有效规避了纵肋与横隔板连接部位焊接作业及横隔板弧形开孔带来的疲劳问题,提升了施工便捷性,其具体构造如图1所示。

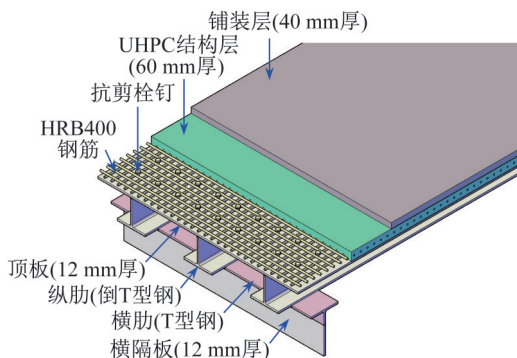


图1 型钢开口肋组合桥面板结构

Fig. 1 Composite bridge decks with section steel open ribs

1.2 典型疲劳易损细节

既有桥梁中传统正交异性钢桥面板的疲劳开裂主要集中于焊缝局部及因板件开孔、结构几何突变等导致应

力集中效应显著的高应力区域。根据国内外大量正交异性钢桥面板的疲劳开裂案例,目前广泛采用的现代正交异性钢桥面板其典型疲劳易损细节主要包括纵肋与顶板焊接细节、纵肋与横隔板交叉焊接细节及纵肋现场对接焊接细节三类,且每类构造细节均包含多种疲劳失效模式。其中,前两类构造细节发生疲劳开裂的案例,占现代正交异性钢桥面板发生疲劳开裂案例总数的90%以上,其疲劳抗力对该钢桥面板的疲劳性能具有控制作用。相较于传统正交异性钢桥面板,型钢开口肋-UHPC组合桥面板对纵横肋构造形式和节点连接方式进行了革新;然而,该结构中型钢开口纵肋与顶板、纵横肋间均采用焊接连接,焊缝的存在使得局部应力集中区域仍面临较大的疲劳开裂风险。通过对型钢开口肋-UHPC组合桥面板及其受力特性进行深入分析,发现该组合桥面板主要存在纵肋与顶板焊接细节、纵肋与横隔板焊接细节两类型典型的疲劳易损细节,如图2所示。

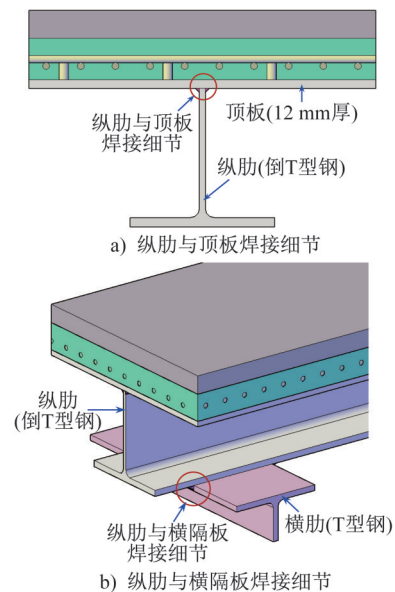


图2 典型疲劳易损细节

Fig. 2 Typical fatigue-prone welded details

2 理论分析模型

2.1 仿真分析模型

某大跨度拱桥采用Y形连续钢构-拱组合体系,其主跨钢梁选用单箱三室截面整体式钢箱鱼腹梁,设计梁高为3.5 m,其标准横断面布置如图3所示。钢箱主梁采用型号为Q355C的钢材,桥面板采用上述的型钢开口肋-UHPC组合桥面板结构,顶板和腹板厚度分别为12 mm、20 mm,底板和横隔梁的厚度均为12 mm,横隔梁间距为3 m,吊索间距为6 m;顶板纵向加劲肋采用TN200×200倒T形热轧型钢,布置间距为0.5 m,横肋采用TW100×200热轧型钢与下部箱梁横隔板焊接连接,箱梁底板和腹板加劲肋均采用U形肋。

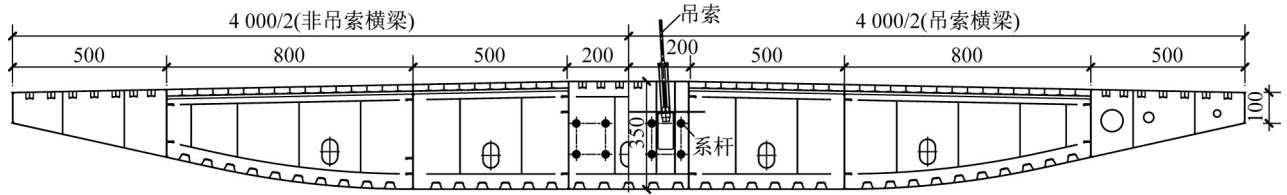


图3 钢箱梁横断面图(单位:cm)

Fig. 3 Cross section of the steel box girder (unit: cm)

针对型钢开口肋-UHPC组合桥面板典型构造细节,采用大型通用有限元软件ANSYS分别建立了以梁段跨中部位为中心、长24 m的梁段三维有限元仿真分析模型,对两类典型疲劳易损细节的受力特性进行分析。理论分析模型中所有构件参数及构造尺寸均与实桥保持一致,相关材料性能参数如表1所示。为较为精确地模拟该组合桥面板疲劳易损部位的局部应力特性与疲劳应力幅值,两类疲劳细节所在局部区域均采用实体模型真实模拟其焊缝几何构造,其余区域则建立板壳模型并采用SHELL63单元模拟;局部实体模型和UHPC结构层采用SOLID45单元模拟;UHPC结构层与顶板间通过节点耦合方式进行连接,不考虑二者间的相对滑移;纵向与横向型钢翼缘板接触面采用接触单元CONTA173与TARGE170单元模拟,以模拟实桥结构中二者间的接触承压和受拉脱空效应。所建立的有限元仿真分析模型以及两类焊接细节的典型疲劳失效模式如图4所示(仅示出1/2,为便于表述局部细节部位,此处未示出UHPC结构层)。考虑到现代正交异性钢桥面板结构中焊缝熔透率较高,因而位于焊喉部位的疲劳开裂较少,此处仅考虑焊趾和焊根部位的疲劳开裂。

表1 结构材料性能参数

Table 1 Performance parameters of structural materials

材料	弹性模量/MPa	泊松比	容重/(kN·m ⁻³)
Q355C 钢材	2.06×10 ⁵	0.31	78.5
UHPC	4.97×10 ⁴	0.20	28.0

2.2 疲劳荷载加载

明确疲劳荷载最不利加载位置是研究正交异性钢桥面板疲劳易损构造细节性能的重要基础。钢桥面板构造细节的疲劳开裂属于轮载往复作用下的局部受力行为,根据《公路钢结构桥梁设计规范》(JTG D64—2015)^[20],该类钢桥面板的疲劳易损构造细节应力分析采用规范推荐的车辆荷载模型Ⅲ进行加载,其相关参数如图5所示。既有研究表明^[21]:此类结构中两类典型疲劳易损构造细节的局部应力集中效应显著,不同于疲劳失效模式下的横向与纵向应力影响线呈现短影响线特征,且应力值均处于材料弹性阶段;为提高计算效率,可采用单侧双轮筒

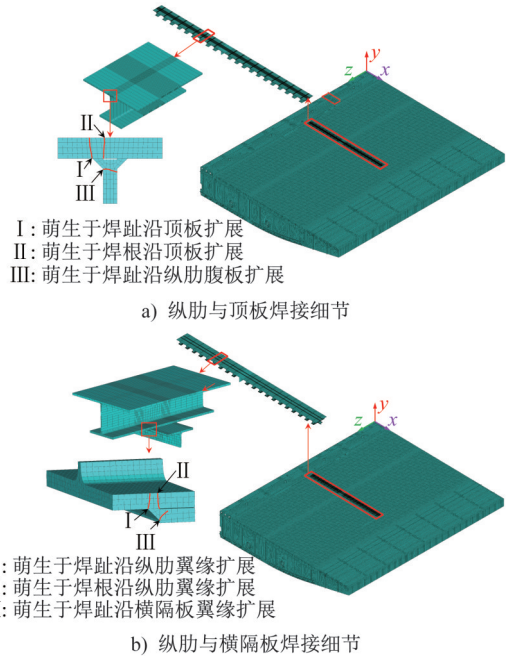


图4 三维有限元仿真分析模型

Fig. 4 Three-dimensional finite element analysis models

化加载方案,疲劳易损部位的应力响应则可通过将前后轮单独作用下的应力值进行线性叠加计算得到。根据疲劳车辆荷载模型和上述加载方法,确定了型钢开口肋-UHPC组合桥面板的两类疲劳细节相应于不同疲劳失效模式的横向最不利加载位置,分别如图6和表2所示(表中坐标可根据图4或图6所示坐标系确定)。固定横向加载位置,结合车辆在车道内的横向位置分布特征,通过纵向移动加载方式,即可获得两类疲劳易损构造细节在疲劳车辆荷载作用下的纵向应力历程。此处仅给出横向最不利位置加载时两类细节的应力历程。

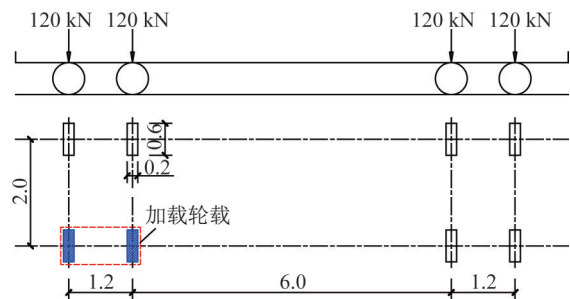


图5 疲劳车辆荷载模型(单位:m)

Fig. 5 Fatigue vehicle load model (unit: m)

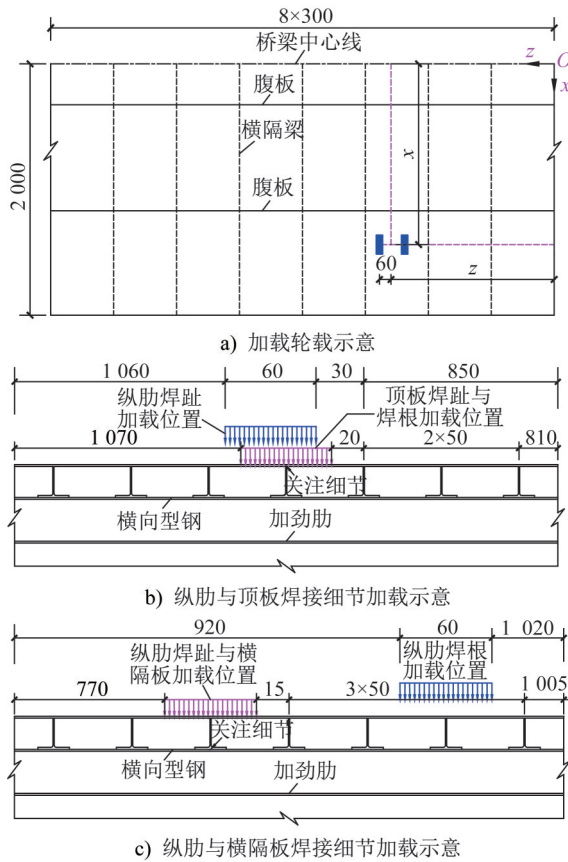


图6 疲劳车辆荷载加载示意(单位: cm)

Fig. 6 Schematic load of fatigue vehicle load (unit: cm)

表2 疲劳荷载加载位置

Table 2 Fatigue loading locations

疲劳细节	疲劳失效位置	加载位置(x,z)/m
纵肋顶板 焊接细节	顶板焊趾	(11.0, 10.5)
	顶板焊根	(11.0, 10.5)
	纵肋焊趾	(10.9, 9.5)
纵肋横隔板 焊接细节	纵肋焊趾	(8.0, 12.5)
	纵肋焊根	(9.5, 12.0)
	横隔板焊趾	(8.0, 12.5)

3 构造细节疲劳性能

3.1 焊接细节应力特征

根据所建立的钢箱梁三维梁段有限元仿真分析模型和表2所示的两类疲劳细节最不利加载位置,在纵向和横向影响线范围内分别对两类疲劳细节进行移动加载,其中横向和纵向单个加载工况的移动距离分别设为5 cm、10 cm。基于ANSYS建立的有限元模型开展计算分析,同时编写结果提取程序,提取两类典型焊接细节在不同疲劳失效位置下的名义应力值,进而明确其疲劳易损部位的局部应力变化特性,分别如图7和图8所示。

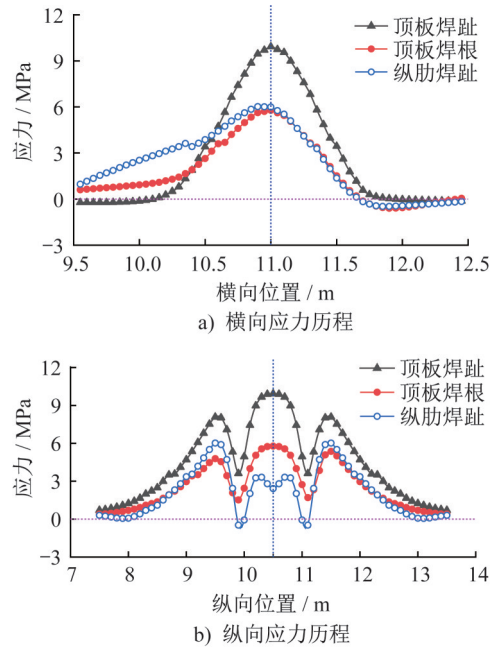


图7 纵肋与顶板焊接细节应力历程

Fig. 7 Stress history of the rib-to-deck welded detail

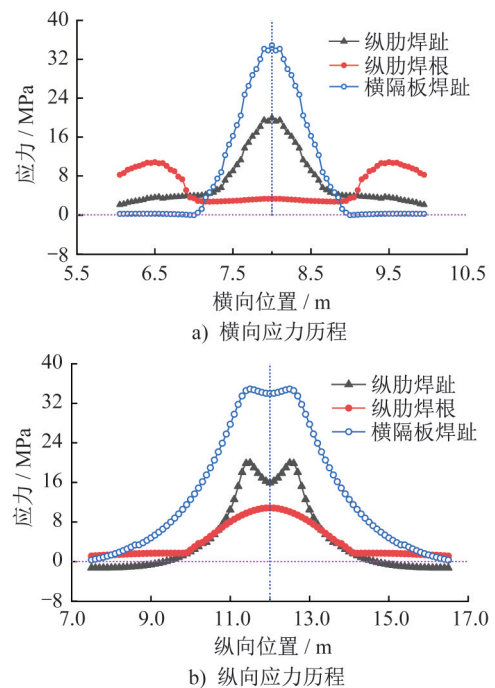


图8 纵肋与横隔板焊接细节应力历程

Fig. 8 Stress history of the rib-to-crossbeam welded detail

纵肋与顶板及纵肋与横隔板两类疲劳易损细节的应力变化特性研究表明:(1)纵肋与顶板焊接细节各疲劳失效位置的受力主要以横向拉应力为主,而纵肋与横隔板三种疲劳失效位置的受力则主要以纵向拉应力为主;(2)两类焊接细节的横向与纵向应力历程总体变化特征存在显著差异,且同一类焊接细节在不同疲劳失效位置下的应力历程亦呈现明显分化。且两类焊接细节的主压

应力极值均相对较小,相较而言纵肋与横隔板焊接细节的正应力极值最大,表明其在相同荷载作用下受力更为不利;(3)除局部位置外,在不同疲劳失效位置下纵肋与顶板焊接细节的应力历程变化规律基本一致,其中当疲劳失效位置为顶板焊趾时,该焊接细节的正应力极值较大,顶板焊趾因此成为该类焊接细节的受力控制部位;(4)纵肋与横隔板焊接细节中,纵肋焊根部位的横向应力历程及应力极值均与其余两个疲劳失效部位存在较大差异;在三种疲劳失效位置中,横隔板焊趾部位的正应力极值显著高于其余两个部位的正应力极值,故横隔板焊趾是该焊接细节受力最为薄弱的部位。

3.2 疲劳损伤特性

针对正交异性钢桥面板结构的疲劳评估问题,目前国内相关规范推荐的确定疲劳评估方法主要包括名义应力法、热点应力法、断裂力学法等。考虑到各类评估方法对于新型焊接细节及其疲劳失效模式的适用性,此处根据我国规范采用名义应力法对型钢开口肋-UHPC组合桥面板的疲劳性能进行评估,纵肋与顶板焊接细节以及纵肋与横隔板焊接细节对应的疲劳强度等级分别为70 MPa、55 MPa,其疲劳强度评估曲线的相关参数如表3所示。基于疲劳加载确定的图7、图8所示两类典型焊接细节在不同疲劳失效位置下的应力历程,通过MATLAB编写专用雨流计数法程序,提取各应力历程对应的变幅疲劳应力幅值,结合线性疲劳累积损伤理论^[22],依据疲劳损伤等效原则,可将两类焊接细节的变幅疲劳问题等效转化为常幅疲劳问题开展分析:

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

式中: $\Delta\sigma_e$ 为疲劳等效应力幅; $\Delta\sigma_i$ 和 n_i 分别为变幅疲劳应力幅及其加载次数; $\sum n_i$ 为等效应力幅加载次数; m 为疲劳强度曲线对应段的反斜率。根据式(1),计算出一辆标准疲劳车通过时两类焊接细节在不同疲劳失效位置下的等效应力幅值如表4所示。

表3 疲劳强度评估曲线相关参数

Table 3 Relevant parameters of fatigue strength curves

疲劳强度等级/MPa	m_1 $N \leq 5 \times 10^6$	m_2 $N > 5 \times 10^6$	常幅疲劳极限/MPa	疲劳强度截止限/MPa
55			40.5	22.3
70	3.0	5.0	51.6	28.3

注:表中 m_1 和 m_2 分别表示疲劳强度曲线中常幅疲劳极限以上和以下部分直线段的反斜率; N 为疲劳加载次数。

基于分析结果可知:(1)相较于纵肋与顶板焊接细节,纵肋与横隔板焊接细节的等效应力幅值相对较大,因

表4 焊接细节等效应力幅值

Table 4 Equivalent stress amplitudes of the welded details

疲劳细节	失效位置	等效应力幅值/MPa
纵肋顶板焊接细节	顶板焊趾	6.9
	顶板焊根	4.4
	纵肋焊趾	4.8
纵肋横隔板焊接细节	纵肋焊趾	14.8
	纵肋焊根	6.7
	横隔板焊趾	27.4

而具有更高的疲劳失效概率;(2)两类焊接细节在各疲劳失效位置下等效应力幅值对比结果:就纵肋与横隔板焊接细节而言,当失效位置为横隔板焊趾与纵肋焊趾时,其对应的等效应力幅值显著高于其余失效位置的等效应力幅值,分别为27.4 MPa、14.8 MPa,表明上述两部位易发生疲劳失效且对型钢开口肋-UHPC组合桥面板的疲劳强度具有控制作用;(3)纵肋与顶板焊接细节中,当失效位置为顶板焊趾时,其等效应力幅值较大(6.9 MPa),该类焊接细节的疲劳抗力主要由该疲劳易损部位控制;两类焊接细节中,焊根部位的等效应力幅值均小于焊趾部位的等效应力幅值,表明在保证焊缝熔透率质量和焊接工艺规范的前提下,其焊根部位的疲劳强度相对较高。

交通量是影响正交异性钢桥面板焊接细节疲劳损伤的关键性外因。通过对具有相似城市区位特征且具备实测交通量数据的同类桥梁开展系统调研与数据分析,确定该城市桥梁单侧车道的日均标准疲劳车交通量约为650辆,考虑到地区社会经济水平的发展及汽车保有量的逐年增长,此处疲劳评估中年均交通量按线性增长考虑且交通量增长系数设为 α ,则大桥服役 n 年后两类焊接细节所承受的应力循环累积数和疲劳累积损伤可分别表示为:

$$N_t = \sum_{i=1}^{365} N_d n \left[1 + \frac{(n-1)\alpha}{2} \right] \quad (2)$$

$$D = \frac{S_e^m N_t}{\Delta\sigma_D^m N_D} \quad (3)$$

式中: N_t 为服役 n 年时焊接细节所承受的等效应力幅加载次数; N_d 为日等效应力幅作用次数; n 为服役年限; α 为交通量增长系数,此处根据交通量预测考虑交通量增长分别为0、0.2%、0.5%、1.0%; $\Delta\sigma_D$ 和 N_D 分别为疲劳强度曲线($S-N$ 曲线)的常幅疲劳极限和相应的作用次数。结合所确定的两类焊接细节等效应力幅值,可分别计算服役过程中两类焊接细节的疲劳损伤度量值,相应的疲劳累积损伤时变规律分别如图9和图10所示。

上述研究表明:(1)无论是否考虑交通量增长,纵肋与横隔板焊接细节的疲劳累积损伤量值均显著高于纵肋

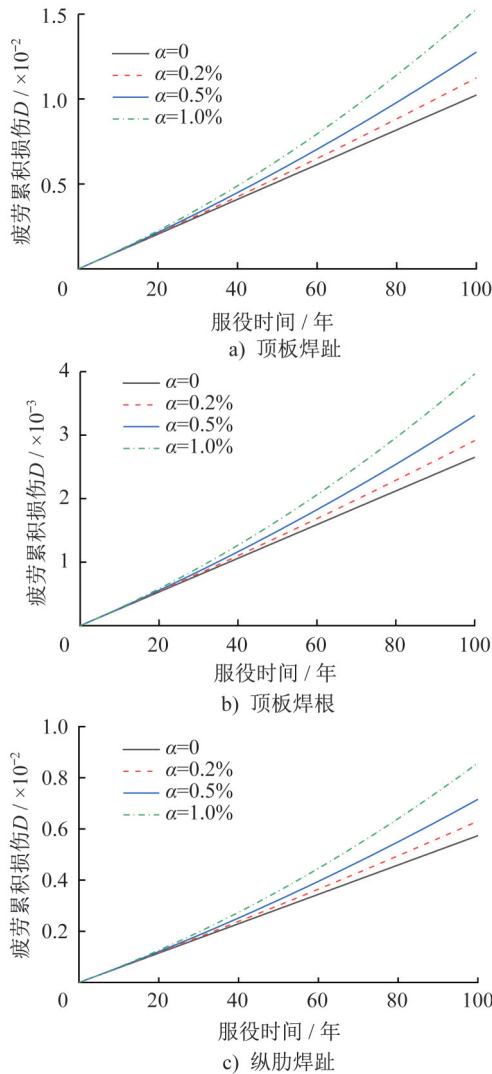


图9 纵肋与顶板焊接细节疲劳累积损伤
Fig. 9 Fatigue cumulative damage of rib-to-deck welded detail

与顶板焊接细节的相应值,表明纵肋与横隔板焊接细节的疲劳强度更低,型钢开口肋-UHPC组合桥面板结构的疲劳性能主要由该细节的疲劳抗力所决定;(2) 两类焊接细节在各疲劳失效位置下,对于纵肋与横隔板焊接细节中,失效位置为横隔板焊趾时其服役年限约为81年~93年(相应于交通量增长率分别为1.0%、0.5%)即达到疲劳累积损伤的临界值1,其疲劳损伤时变规律表明该失效部位在两类焊接细节中具有更高的疲劳开裂风险;(3) 纵肋与顶板焊接细节的疲劳性能主要由疲劳累积损伤增长较快的顶板焊趾失效位置所控制,但在设计服役期内,该焊接细节对应三种失效位置的疲劳累积损伤均显著低于损伤临界值,因此其在设计服役期内发生疲劳失效的概率相对较低;(4) 考虑交通量增长时,两类焊接细节中各疲劳失效部位的疲劳累积损伤均显著增大,且呈现典型的非线性增长特征;其中,等效应力幅值较大的部位,其非线性增长的时变规律更为显著。

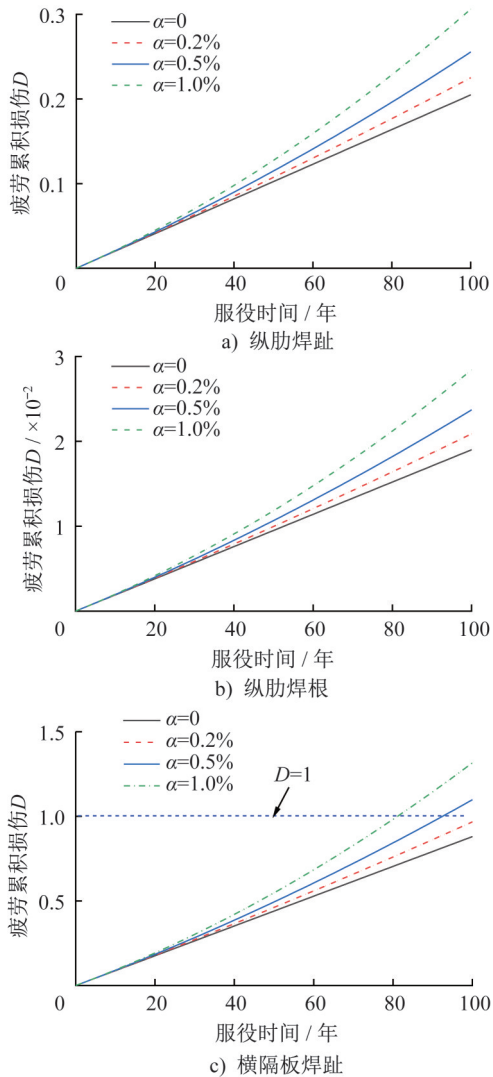


图10 纵肋与横隔板焊接细节疲劳累积损伤
Fig. 10 Fatigue cumulative damage of rib-to-crossbeam welded detail

3.3 疲劳寿命评估

正交异性钢桥面板结构的疲劳抗力由多个典型疲劳易损细节共同决定,其中纵肋与顶板焊接细节及纵肋与横隔板交叉构造细节的疲劳性能对该钢桥面板结构的服役寿命具有控制作用。对于型钢开口肋-UHPC组合桥面板结构而言,其疲劳寿命主要由上述两类焊接细节(纵肋与顶板、纵肋与横隔板)的疲劳性能所决定。根据上述对两类焊接细节的应力幅值及疲劳损伤特性分析可知,纵肋与顶板焊接细节及纵肋与横隔板焊接细节的疲劳抗力分别由顶板焊趾、横隔板焊趾部位的疲劳失效所控制,故针对型钢开口肋-UHPC组合桥面板服役后,两类焊接细节的上述疲劳失效部位开展剩余疲劳寿命时变特性评估,结果如图11所示(不考虑交通量增长时两类细节的疲劳寿命均远超过设计使用寿命,此处仅列出考虑交通量增长的评估结果)。

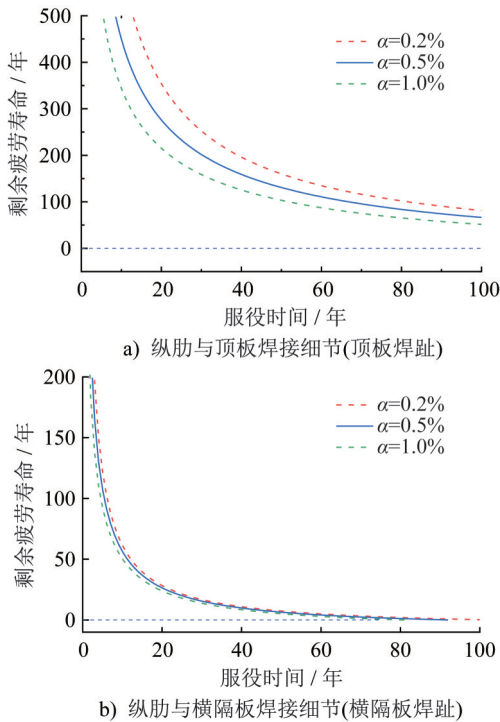


图 11 焊接细节疲劳寿命评估

Fig. 11 Fatigue life assessment of welded details

焊接细节疲劳寿命评估结果表明:(1)在0~1%的交通量增长率工况下,纵肋与顶板焊接细节顶板焊趾失效位置、纵肋与横隔板焊接细节横隔板焊趾失效位置的疲劳寿命均超过200年,二者对比可知,达到相同服役年限时,纵肋与横隔板焊接细节横隔板焊趾失效位置下的剩余疲劳寿命更短,这表明该失效部位具有更低的疲劳寿命;(2)考虑交通量增长后,两类焊接细节的疲劳寿命均明显降低且剩余疲劳寿命时变规律呈现显著的非线性特征;年交通量增长率越大,其对两类焊接细节服役早期剩余疲劳寿命的影响更为突出;(3)在1%年交通增长率条件下,纵肋与顶板焊接细节的顶板焊趾失效部位服役至设计基准期100年时,剩余疲劳寿命约为50年;而纵肋与横隔板焊接细节的横隔板焊趾失效部位疲劳寿命约为81年。因此,纵肋与横隔板焊接细节在设计服役期内面临较高的疲劳开裂风险,需重点强化其运营阶段的检测与维护;(4)从结构自身而言,针对纵肋与横隔板焊接细节疲劳抗力较低的问题,在深入探究主要构件参数影响规律的基础上,提出合理的构件参数取值及其匹配组合是提升该焊接细节疲劳性能的有效途径。

4 结论

(1)纵肋与顶板焊接细节及纵肋与横隔板焊接细节是决定型钢开口肋-UHPC组合桥面板疲劳性能的关键构造细节。相较而言,纵肋与横隔板焊接细节的疲劳强度更低,其疲劳性能对于该类组合桥面板结构的疲劳抗

力具有控制作用。

(2)两类焊接细节均具有多种疲劳失效模式,且不同失效模式下其应力特征和疲劳损伤特性均存在显著差异;纵肋与顶板焊接细节的疲劳抗力主要由顶板焊趾部位的疲劳强度所决定;而纵肋与横隔板焊接细节的横隔板焊趾部位具有更高的疲劳开裂风险。

(3)交通量是影响该类组合桥面板构造细节疲劳性能的关键因素。随着年交通量的增长,两类焊接细节对应各失效模式的疲劳累积损伤均显著增大,且呈现典型的非线性增长特征;其中,交通量增长对等效应力幅值较大的疲劳失效模式的影响更为显著。

(4)在所考虑的年交通增长率条件下,纵肋与顶板焊接细节的顶板焊趾部位其疲劳寿命相对较长,而纵肋与横隔板焊接细节的横隔板焊趾部位其疲劳寿命则低于设计使用寿命,宜改进设计并加强检测与维护,确保其运营期内的疲劳抗力。

参考文献:

- [1] 《中国公路学报》编辑部.中国桥梁工程学术研究综述·2021[J].中国公路学报,2021,34(2):1-97.DOI:10.19721/j.cnki.1001-7372.2021.02.001.
Editorial Department of China Journal of Highway and Transport. Review on China's bridge engineering research: 2021 [J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, 34(2): 1-97. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2021.02.001. (in Chinese)
- [2] CONNOR R J. Manual for design, construction, and maintenance of orthotropic steel deck bridges[R]. Washington: Department of Transportation Federal Highway Administration, 2012.
- [3] 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.DOI:10.19721/j.cnki.1001-7372.2017.03.002.
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. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2017.03.002. (in Chinese)
- [4] WOLCHUK R. Lessons from weld cracks in orthotropic decks on three European bridges [J]. Journal of Structural Engineering, 1990, 116(1): 75-84. DOI: 10.1061/(asce)0733-9445(1990)116:1(75).
- [5] DE JONG F B P. Renovation techniques for fatigue cracked orthotropic steel bridge decks [D]. Delft: Technische Universiteit Delft, 2007.
- [6] FU Z Q, JI B H, ZHANG C Y, et al. Fatigue performance of roof and U-rib weld of orthotropic steel bridge deck with different penetration rates [J]. Journal of Bridge Engineering, 2017, 22(6): 04017016. DOI: 10.1061/(ASCE)be.1943-5592.0001036.

- [7] KAINUMA S, YANG M Y, JEONG Y S, et al. Experimental investigation for structural parameter effects on fatigue behavior of rib-to-deck welded joints in orthotropic steel decks [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2017, 79: 520-537. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2017.04.028.
- [8] HENG J L, ZHENG K F, GOU C, et al. Fatigue performance of rib-to-deck joints in orthotropic steel decks with thickened edge U-ribs [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2017, 22(9): 04017059. DOI: 10.1061/(ASCE)be.1943-5592.0001095.
- [9] LUO P J, ZHANG Q H, BAO Y, et al. Fatigue performance of welded joint between thickened-edge U-rib and deck in orthotropic steel deck [J]. *Engineering Structures*, 2019, 181: 699-710. DOI: 10.1016/j.engstruct.2018.10.030.
- [10] 张清华, 李俊, 袁道云, 等. 高疲劳抗力钢桥面板的疲劳问题 I: 模型试验 [J]. *中国公路学报*, 2021, 34(3): 124-135. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2021.03.008.
ZHANG Qinghua, LI Jun, YUAN Daoyun, et al. Fatigue performance of high fatigue resistance orthotropic steel bridge deck I: Model test [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2021, 34(3): 124-135. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2021.03.008. (in Chinese)
- [11] LIU Y, CHEN F H, LU N W, et al. Fatigue performance of rib-to-deck double-side welded joints in orthotropic steel decks [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2019, 105: 127-142. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2019.07.015.
- [12] 黄云. 基于概率断裂力学的钢桥面板构造细节疲劳可靠度研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2019.
HUANG Yun. Research on fatigue reliability of structural details in orthotropic steel decks based on probabilistic fracture mechanics [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2019. (in Chinese)
- [13] LIU Y M, ZHANG Q H, MENG W N, et al. Transverse fatigue behaviour of steel-UHPC composite deck with large-size U-ribs [J]. *Engineering Structures*, 2019, 180: 388-399. DOI: 10.1016/j.engstruct.2018.11.057.
- [14] 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. DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.109926.
- [15] ZHU A Z, LI M, ZHU H P, et al. Fatigue behaviour of orthotropic steel bridge decks with inner bulkheads [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2018, 146: 63-75. DOI: 10.1016/j.jcsr.2018.03.016.
- [16] 朋茜, 周绪红, 狄瑾, 等. 钢桥面板纵肋与横隔板连接位置疲劳损伤特征 [J]. *中国公路学报*, 2018, 31(11): 78-90. DOI: 10.3969/j.issn.1001-7372.2018.11.009.
PENG Xi, ZHOU Xuhong, DI Jin, et al. Fatigue damage characteristics of rib-to-diaphragm joints in orthotropic steel deck [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2018, 31(11): 78-90. DOI: 10.3969/j.issn.1001-7372.2018.11.009. (in Chinese)
- [17] TAI M, ARIMA Y, SHIMOZATO T. Fatigue strength enhancement by structural modification of transverse to longitudinal rib connections in orthotropic steel decks with open ribs [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2020, 117: 104954. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2020.104954.
- [18] SHAO X D, YI D T, 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. DOI: 10.1061/(ASCE)be.1943-5592.0000348.
- [19] 孙璇, 邵旭东, 邹德强. 型钢开口肋-UHPC 轻型组合桥面新结构静力与疲劳性能 [J]. *中国公路学报*, 2024, 37(4): 252-262. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2024.04.020.
SUN Xuan, SHAO Xudong, ZOU Deqiang. Research on static and fatigue properties of new structure of section steel-UHPC lightweight composite deck with open rib [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2024, 37(4): 252-262. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2024.04.020. (in Chinese)
- [20] JTG D64—2015. 公路钢结构桥梁设计规范 [S].
JTG D64—2015 Specifications for design of highway steel bridge [S]. (in Chinese)
- [21] 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, 223. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2017.12.0973.
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, 223. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2017.12.0973. (in Chinese)
- [22] MINER M A. Cumulative Damage in Fatigue [J]. *Journal of Applied Mechanics*, 1945, 12(3): 159-64. DOI: 10.1115/1.4009458.