

文章编号: 1005-0523(2025)02-0054-12



基于结构应力法的钢-UHPC 组合桥面板 RD 节点疲劳性能分析

田 亮^{1,2,3}, 董熠鑫¹, 肖飞知^{2,4}, 赵 健^{2,4}, 樊立龙^{2,4}, 程 斌⁵

(1. 天津城建大学土木工程学院, 天津 300384; 2. 中国铁建大桥工程局集团有限公司, 天津 300300;
3. 清华大学土木工程系, 北京 100084; 4. 天津市装配式桥梁智能建造技术与装备重点实验室, 天津 300300;
5. 上海交通大学船舶海洋与建筑工程学院, 上海 200240)

摘要:超高性能混凝土(UHPC)在桥梁工程中的应用日益广泛,为深入研究钢-UHPC组合桥面板U肋-盖板(RD)节点的疲劳性能,针对模拟轮载作用下的钢桥面板RD节点开展疲劳试验和数值仿真,分析了中心加载工况下试件的疲劳开裂行为和应力分布,并采用结构应力法预测了RD节点的疲劳寿命。基于ABAQUS建立了带UHPC铺层的钢桥面板RD节点三维实体有限元模型,对模型施加荷载提取裂纹萌生处所在截面的节点力和节点力矩,计算得到等效结构应力,利用结构应力法中的主S-N曲线对RD节点疲劳性能进行评估,并与热点应力法和临界距离理论的预测结果进行了对比分析。研究结果表明:在中心加载工况下,RD节点焊缝处受拉应力作用,至焊缝中部拉应力逐渐增大并趋于稳定,疲劳裂纹首先在该易损部位萌生,并沿板厚方向分阶段扩展直至断裂;经UHPC加固之后,RD节点焊缝的端部效应明显减弱,焊缝中部的结构应力值大幅度降低,最大降幅达87.2%,同时UHPC铺层与盖板形成协同受力整体,使得结构应力分布趋于平缓,显著改善了钢桥面板的疲劳受力状态;相比热点应力法和临界距离理论,结构应力法给出的预测结果偏保守且更接近试验值,预测误差仅8%,对于钢-UHPC组合节点,结构应力法的预测值达到无限疲劳寿命。总体而言,结构应力法可以有效地对钢桥面板的疲劳性能进行评估,以较低成本准确预测焊接构件的疲劳寿命并辅助制定检修策略,在钢结构桥梁领域的实用前景广阔。

关键词:正交异性钢桥面板;疲劳寿命;钢-UHPC组合桥面板;结构应力法;主S-N曲线

中图分类号:U443.32

文献标志码:A

本文引用格式:田亮,董熠鑫,肖飞知,等.基于结构应力法的钢-UHPC组合桥面板RD节点疲劳性能分析[J].华东交通大学学报,2025,42(2):54-65.

Fatigue Performance Analysis of RD Welded Joint in Steel-UHPC Composite Bridge Deck Based on Structure Stress Method

Tian Liang^{1,2,3}, Dong Yixin¹, Xiao Feizhi^{2,4}, Zhao Jian^{2,4}, Fan Lilong^{2,4}, Cheng Bin⁵

(1. College of Civil Engineering, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China; 2. CRCC Bridge Engineering Bureau Group Co., Ltd., Tianjin 300300, China; 3. Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 4. Tianjin Key Laboratory of Prefabricated Bridge Intelligent Construction Technology and Equipment, Tianjin 300300, China; 5. School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: The application of UHPC in bridge engineering is becoming increasingly common. In order to further study the fatigue performance of RD welded joints in steel UHPC composite bridge decks, fatigue tests and nu-

收稿日期: 2023-02-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(51708346); 天津市自然科学基金项目(24JCYBJC00850); 中国铁建股份有限公司科研重大专项(2023-A01); 中国铁建大桥局集团有限公司科技创新项目(DQJ-2024-B05); 天津市企业科技特派员项目(22YDTPJC00210)

merical simulations were conducted on RD welded joints of steel bridge decks under simulated wheel loads. The fatigue cracking behavior and stress distribution of specimens under central loading conditions were analyzed, and the fatigue life of RD welded joints was predicted using structure stress method. A 3D solid finite element model of RD welded joints with UHPC overlay was established based on ABAQUS software. Static loads were applied to the model, and node forces and moments at the crack initiation section were extracted to calculate the equivalent structure stress. The fatigue performance of RD welded joints was evaluated using the master S-N curve in the structural stress method, and compared with the predicted results of the hot spot stress method and critical distance theory. The research results indicate that under the central loading condition, the weld seam connecting the cover plate and the U-rib is subjected to tensile stress, and the tensile stress gradually increases and tends to stabilize in the middle of the weld seam. Fatigue cracks first initiate at the vulnerable part and propagate in stages along the thickness direction of the plate until fracture; After being reinforced with UHPC, the end effect of the weld seam in the RD welded joint is significantly reduced, and the structural stress value in the middle of the weld seam is greatly reduced, with a maximum reduction of 87.2%. At the same time, the UHPC layer and the cover plate form a whole to jointly bear the load, making the structure stress distribution tend to be flat, significantly improving the fatigue stress state of the steel bridge deck; Compared with the hot spot stress method and critical distance theory, the prediction results given by the structure stress method are more conservative and closer to the experimental values, with a prediction error of only 8%. For steel-UHPC composite welded joints, the predicted values given by the structure stress method reach infinite fatigue life. Overall, the structure stress method can effectively evaluate the fatigue performance of steel bridge decks, accurately predict the fatigue life of welded components at a lower cost, and assist in formulating maintenance strategies. It has broad practical prospects in the field of steel structure bridges.

Key words: orthotropic steel bridge decks; fatigue life; steel-UHPC composite plate; structural stress method; main S-N curve

Citation format: TIAN L, DONG Y X, XIAO F R, et al. Fatigue performance analysis of RD welded joint in steel-UHPC composite bridge deck based on structure stress method[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2025, 42(2): 54–65.

正交异性钢桥面板是由纵横向相互垂直的纵肋和横隔板连同桥面板焊接而成的空间结构,相比于混凝土桥面板,正交异性钢桥面板具有自重轻、便于施工、承载能力大以及抗震性能好等突出优势^[1]。在桥梁服役状态下,钢桥面板在承受荷载的同时,自身也作为主梁的部分结构参与受力,这在一定程度上提高了结构的承载效率^[2]。然而,正交异性钢桥面板的盖板、U肋及横隔板等构件之间采用焊接连接,其内部构造细节复杂,空间焊缝众多,容易产生焊接缺陷,并逐渐演变为疲劳敏感源。在实际服役过程中,由于外部车辆荷载的循环作用并耦合内部的焊接缺陷,钢桥面板在其疲劳敏感部位极易萌生疲劳裂纹,随着服役期增长,若不及时采取修复措施,裂纹会持续扩展直至结构断

裂,这将导致灾难性事故的发生,造成严重的经济损失和社会负面影响。为了解决正交异性钢桥面板局部应力过大导致的疲劳开裂问题,实际工程中通常采用桥面铺装法以提高桥面板的力学性能。传统的桥面铺装法一般采取的是沥青铺装层,但沥青本身易受到气候环境条件的影响,对桥面力学性能的提升十分有限,故有学者提出了钢-超高性能混凝土(ultra high performance concrete, UHPC)轻型组合面板结构^[3],通过耐久性、韧性超高的UHPC组合成刚性的桥面系,可以大幅降低局部疲劳应力,有望从根本上解决钢桥面板的疲劳开裂以及铺装层易损坏等难题。

国内外相关学者针对正交异性钢桥面板从不同角度开展了大量理论及试验研究工作,并取得了

丰富的研究成果。杨永清等^[4]、祝志文等^[5]通过有限元分析,根据 Palmgren-Miner 疲劳损伤理论设计了疲劳模型试验,采用雨流计数法研究了钢桥面板在车轮荷载作用下的应力分布特征。结果表明,肋-板(rib-deck, RD)节点在车轮荷载作用下的应力状态主要受局部荷载的影响,局部效应影响显著。在疲劳裂纹扩展方面,白文畅等^[6]采用有限元法建立了3种局部简化模型,研究了钢桥面板 RD 节点焊缝疲劳裂纹的扩展规律,指出当车辆荷载偏离焊缝正上方时,裂纹易从盖板的焊根及焊趾处萌生并沿板厚扩展,以 I 型裂纹为主;张清华等^[7-8]提出了一种三维裂纹扩展模拟方法,并开展疲劳试验对裂纹扩展数值结果进行了验证,实现了不同萌生位置多条裂纹的扩展模拟,研究结果表明 RD 节点焊根处的疲劳裂纹以 I 型裂纹为主且多裂纹扩展特性并不明显。颜攀等^[9]对萌生于 RD 节点的疲劳裂纹进行了数值模拟,分析了扩展过程中的裂纹形态变化,并确定了裂纹的扩展寿命。在 UHPC 桥面铺装加固方面,郭睿等^[10]建立了钢-UHPC 组合桥面板模型,对比分析了带 UHPC 铺装层和不带 UHPC 铺装层桥面板的力学性能。结果表明:组合桥面板的整体刚度相较于非组合桥面板有明显提升,车辆荷载作用下各构件的疲劳应力幅较原方案均降低近一半,纵向加劲肋的应力水平降低了 20%。刘梦麟等^[11]以虎门大桥为工程背景,开展了钢-UHPC 组合桥面板结构的足尺模型试验,发现在对模型加载 200 万次后,没有新裂纹产生,且原先的裂纹没有明显扩展,这表明钢-UHPC 组合桥面板具有优异的抗疲劳性能。

在疲劳性能评估方面,杨海波^[12]建立了钢桥面板 RD 节点有限元模型,分别采用美国 ASME 规范中的结构应力法和欧洲规范 Eurocode3 名义应力法评估了应力幅值与疲劳寿命之间的相关性。结果表明,结构应力法更适用于预测钢桥面板 U 肋焊缝部位的开裂模式以及疲劳寿命,相比名义应力法的评估效果更好。苏有华^[13]建立了钢桥纵向角接节点有限元模型,分别采用实体单元和板壳单元,计算分析了焊缝端部焊趾处的结构应力和等效结构应力分布。结果表明,对于同一纵向角接节点,实体单元模型计算得到的结构应力和等效结构应力最大值略小,而壳单元模型预测的疲劳寿命与疲劳试验结果较为接近。程张^[14]建立了钢桥面板的有限元模型,采用 FE-SAFE 计算得到结构应力,并用

结构应力法评估了钢-混凝土桥面板的疲劳寿命。结果表明,混凝土桥面大幅度降低了疲劳易损部位的应力水平,其中纵肋-盖板焊缝细节在铺设混凝土层后的疲劳寿命预测值远超疲劳极限,可认为在车辆荷载作用下基本不开裂。武奇等^[15]等采用结构应力法对 16Mn 钢十字型焊接接头的疲劳强度试验数据进行了统计分析,确定了焊接接头的结构应力集中系数,研究结果表明结构应力法对于网格划分的敏感性较低。

文献调研显示,目前相关学者已对钢桥面板结构进行了大量的数值仿真和疲劳试验研究,在对其进行疲劳寿命评估时,往往采用名义应力法和热点应力法居多,采用结构应力法进行疲劳性能评估的研究尚不多见。为了更好地评估钢-UHPC 组合桥面板的疲劳性能,本文参考 RD 节点疲劳加载试验^[16],采用 ABAQUS 建立钢桥面板 RD 节点三维实体模型,计算 RD 节点在模拟轮载作用下的结构应力,并分析对比了带 UHPC 铺层与不带 UHPC 铺层两种工况下的应力分布情况。在此基础上计算 RD 节点裂纹扩展截面的等效结构应力,采用结构应力法中的主 S-N 曲线(stress-number, S-N)预测 RD 节点的疲劳寿命,并与疲劳试验数据进行对比验证,相比热点应力法和临界距离理论,结构应力法的预测结果偏保守且更接近试验值。同时,本文还对比分析了普通钢桥面板与钢-UHPC 组合桥面板的结构应力和疲劳寿命,从差异性角度定量分析了 UHPC 铺装层对钢桥面板疲劳性能的提升效果。

1 疲劳寿命评估理论

1.1 疲劳评估方法介绍

焊接是金属结构件的主要连接方式,在工业生产中应用极其普遍。然而,焊接过程中不可避免地会引入焊接缺陷,导致疲劳裂纹往往从焊缝连接部分萌生。焊接结构的疲劳性能长期以来为各国相关学者所关注,如何准确地对焊接结构的疲劳性能进行有效评估也是业界关注的焦点。通常情况下,确定构件疲劳寿命的方法分为试验法和理论分析法两种。毫无疑问,疲劳试验所得结果更接近真实情况,但由于试验成本高昂且操作繁琐,有些情况下开展试验研究很难做到,人们更倾向于寻求一种简便高效的疲劳评估方法。目前,许多学者选择有

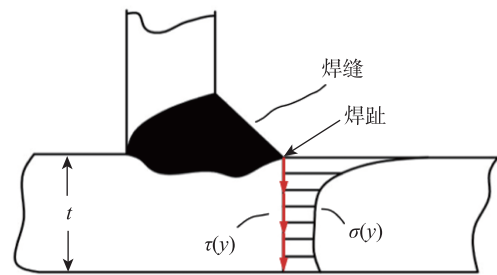
限元数值分析方法预测构件的疲劳寿命。这些方法主要可以归纳为三类:基于应力-寿命曲线的评估方法,基于连续介质损伤力学的评估方法,基于断裂力学的评估方法。其中基于应力-寿命的评估方法又包含名义应力法,热点应力法,结构应力法等。传统的名义应力法,在评估时依赖大量的焊接接头疲劳试验,对于几何形状不规则的焊缝,由于规范中未定义其S-N曲线或疲劳等级,此时使用名义应力法很难求解;而对于热点应力法,在计算时的精度依赖于网格,需要花费大量的时间用于精细化网格划分,且插值的计算方法有很多种,不同的插值方式可能导致不同的热点应力结果;至于缺口应力法,在评估时同样需要在焊缝处划分精细化网格,同时也存在焊缝缺口半径假设值与实际值不一致等问题,这在一定程度上限制了其实际应用。

1.2 结构应力法

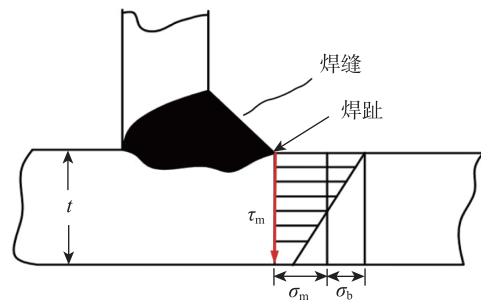
鉴于热点应力法与名义应力法在焊接构件疲劳性能评估时所面临的局限性,美国ASME标准针对以上问题提出了一种全新方法,即结构应力法(structure stress method, SSM)。该方法由Dong^[17]基于断裂力学原理和大量焊接疲劳试验提出,可准确高效地计算焊缝的疲劳寿命。与前文所提到的名义应力法和热点应力法不同的是,结构应力法考虑了应力的集中效应、荷载模式、板厚等因素综合作用的影响,可有效地规避疲劳寿命评估时所遇到的应力奇异和S-N曲线选择受限的问题,相对准确地计算空间任意形状焊缝的疲劳寿命。此外,由于结构应力法是基于力的平衡原理计算应力的,所以在外力确定后,在同一条焊线上无论划分多少个单元,产生多少个节点力,合力最终都将与外力平衡,故相比热点应力法,结构应力法具备良好的网格不敏感性,对有限元网格的类型和质量要求都较低,这无疑会给结构应力的计算带来便利。

为了规避名义应力法和热点应力法在进行疲劳评估时的局限性,同时进一步验证结构应力法的适用性,本文选择结构应力法作为钢-UHPC组合桥面板的疲劳评估方法。结构应力法的计算步骤为:首先选取裂纹初始萌生点以及裂纹扩展方向共同所在的截面,称作假象平面,之后通过假象平面将其中一侧结构取为隔离体,从而将结构内部的应力

暴露出来,并利用两侧隔离体力的平衡原理计算结构应力。焊接接头疲劳破坏的形式主要分为两类:第一,裂纹从焊根处萌生,之后沿焊喉方向扩展;第二,裂纹由焊趾处萌生,之后沿板厚方向扩展。前一类焊根疲劳破坏问题可通过改善焊接工艺解决,而焊趾处的疲劳破坏较为普遍,本文主要研究后一类破坏形式。在第二类破坏形式中,应力在焊趾处沿着板厚方向呈现出非线性的分布状态,如图1所示。 $\tau(y)$ 和 $\sigma(y)$ 分别为在弯矩作用下产生的剪应力和正应力; t 为板厚,mm; x, y 分别为水平方向和垂直方向;将图1(a)的应力线性化处理之后,正应力分量 $\sigma(y)$ 可被简化为膜应力 σ_m 和弯曲应力 σ_b 之和;对于切向应力分量 $\tau(y)$ 可被简化为竖向剪切应力 τ_m 。在大多数情况下 τ_m 对于疲劳裂纹的扩展影响较小,故在计算时常忽略其影响^[13]。



(a) 焊趾附近厚度方向的应力分布



(b) 线性化应力分布

图1 焊接接头厚度方向上结构应力的定义

Fig. 1 Definition of structural stress in the thickness direction of welded joint

在实际计算中,对于三维实体,结构应力可根据力的平衡原理通过节点力求得。膜正应力分量 σ_m 和弯曲应力分量 σ_b 组成结构应力,二者分别由作用在其板厚截面上的轴向线力单元体 f_x 和线力矩单元体 m_x 所引起,根据材料力学中梁的基本公式来计算结构应力 σ_s 。

两端圆钢的位移,实现试件简支边界的施加,试件在水平和竖直两个方向的自由度为0,同时释放盖板边缘的转动自由度。

H型钢和钢板焊接形成刚性短柱作为试件支座,高度为350 mm。选取其中2个短柱用于连接刚性块和作动器,剩余4个短柱用螺栓与刚性底板锚固连接。将橡胶垫置于刚性块与盖板之间用以模拟轮胎荷载,橡胶垫尺寸为250 mm×250 mm×50 mm。加载装置如图4所示。

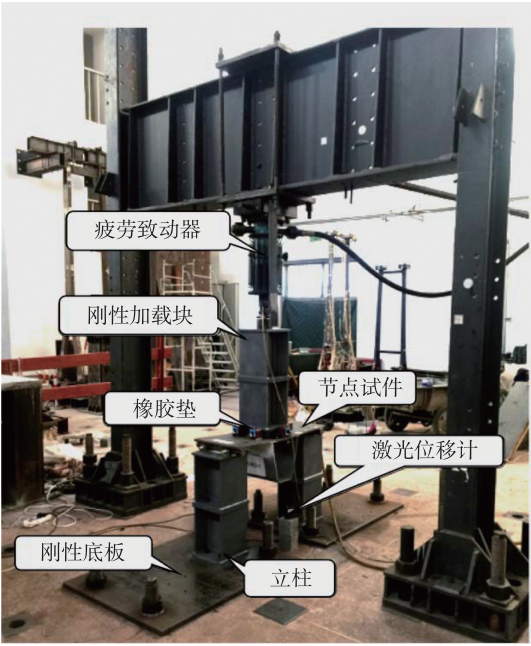


图4 RD试件加载装置
Fig. 4 Loading device for RD specimen

试件加载由静力和疲劳加载两部分组成。静力加载通过梯度应变片采集应变数据,再由线性外推的方式得到焊趾附近的热点应变,将热点应变转变为热点应力值,之后再进行疲劳加载,疲劳荷载幅由测得的热点应力及目标热点应力来确定。疲劳试验主要目的是获取节点的疲劳寿命等数据。疲劳试验数据如表2所示。 ΔF 为荷载幅; N_0 为裂纹初始萌生时的疲劳寿命, N_1 为裂纹贯穿U肋壁厚时的疲劳

寿命, N_2 为裂纹贯穿盖板板厚时的疲劳寿命, N_3 为试件失效时的疲劳寿命。

3 有限元建模

3.1 模型尺寸

基于ABAQUS建立RD节点三维模型,模型尺寸与试验试件尺寸一致。为简化计算,将RD节点的角焊缝按半径为8 mm的圆弧处理。RD节点三维模型如图5所示。

3.2 UHPC铺层加固

将UHPC与钢桥面板形成受力整体,以充分发挥UHPC材料的高强度和高耐久性等优势,铺层厚度设定为50 mm。UHPC铺层加固施工过程包括施工准备、栓钉焊接、模板支撑、钢筋网布置、UHPC浇筑养护等5个阶段,加固流程如图6所示。

实际加固过程中,UHPC层和盖板是通过栓钉连接在一起的。由于试验加载在弹性范围内,铺装层和盖板之间连接稳定,未出现明显的相对滑移,为了尽可能真实模拟UHPC层和盖板的接触情况,同时减少计算量,采用ABAQUS中的Tie接触命令将UHPC层和盖板绑定在一起,使其成为一个共同受力的整体,接触关系见图7。

3.3 边界条件

RD焊接节点采用桥梁专用钢Q345qD,在ABAQUS材料属性模块设置其弹性模量为206 GPa,泊松比为0.3。有限元模型的边界、荷载条件与实际试验一致,同样采用橡胶垫模拟轮胎作用,建立刚性板置于橡胶垫之上以模拟试验机加载器,在刚性板上设定参考点并与之建立耦合关系,通过参考点施加竖向荷载10 kN。

模型的边界条件均为简支约束,约束设置于盖板下表面距离两端部各50 mm的圆钢处。其中一端竖向及水平位移被约束住,另一端仅限制竖向位移,沿 z 方向的转动自由度被释放。刚性板和橡胶垫只在 y 方向产生位移,其余方向的位移均约束。模型边界条件如图8所示。

表2 疲劳试验数据
Tab.2 Fatigue test data

试件编号	加载方式	$\Delta F/\text{kN}$	$N_0/\text{次}$	$N_1/\text{次}$	$N_2/\text{次}$	$N_3/\text{次}$
H-RD-1	中心加载	20.02	782 325	1 213 900	1 271 497	1 283 508
H-RD-2	中心加载	24.94	354 321	—	—	—
H-RD-3	中心加载	20.01	797 970	1 003 974	1 005 864	1 008 690

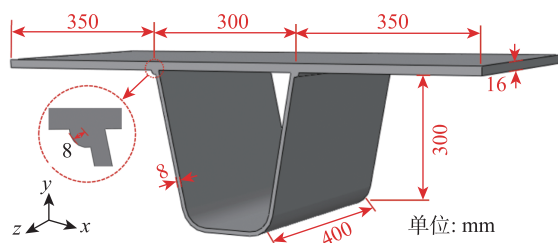


图5 RD节点三维模型
Fig. 5 3D model of RD welded joint

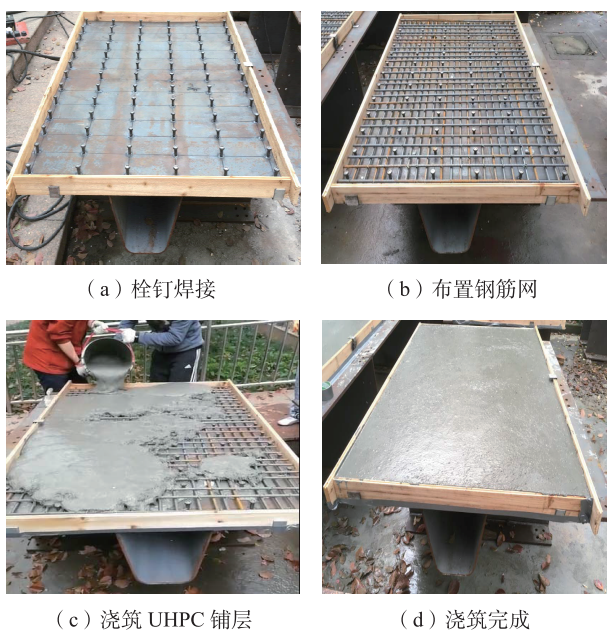


图6 UHPC铺层加固施工过程
Fig. 6 Manufacturing procedures of UHPC reinforced specimens

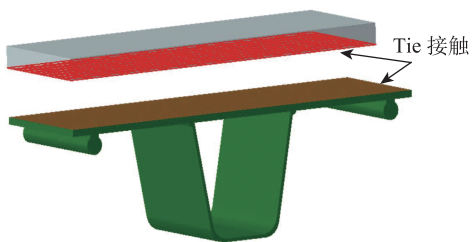


图7 UHPC层和盖板接触定义
Fig. 7 Definition of contact between UHPC layer and deck

3.4 单元类型及网格划分

RD节点的钢板以及UHPC铺层均使用实体单元建模,其中UHPC层和刚性加载板采用8节点六面体线性减缩积分单元C3D8R,该单元具有较好的数值稳定性和收敛性,即使网格出现扭曲变形,对分析的精度影响也不大,且计算效率高;RD节点采

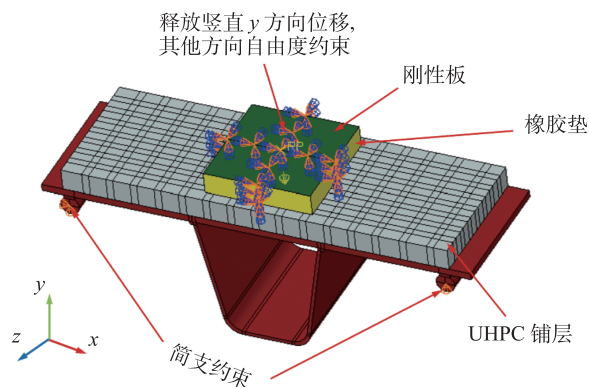


图8 带UHPC铺层的RD模型边界条件
Fig. 8 Boundary conditions of RD model with UHPC overlay

用8节点六面体线性非协调单元C3D8I,该单元能有效解决剪切自锁问题,在弯曲问题中,厚度方向上仅需较少单元,就可得到与二次单元相当的结果,应力求解精度较高。

武奇等^[15]采用结构应力法对不同焊接接头的疲劳试验数据进行了分析,得到了焊接接头的结构应力集中系数。在不同网格尺寸下,接头的结构应力集中系数变化不大,表明结构应力法具有网格不敏感性。可以使用较粗糙网格进行模型前处理,从而给整个疲劳评估工作带来便利。为了提高计算效率并兼顾结构应力的求解精度,对RD节点焊缝附近的网格进行了加密,网格尺寸为4 mm,其他非关键区域的网格尺寸放宽至8 mm,盖板厚度方面划分4层网格,各网格的长宽比小于1:3,网格模型如图9所示。

4 疲劳寿命评估

4.1 疲劳破坏及主应力分布

应用结构应力法进行疲劳评估时,首先需要明

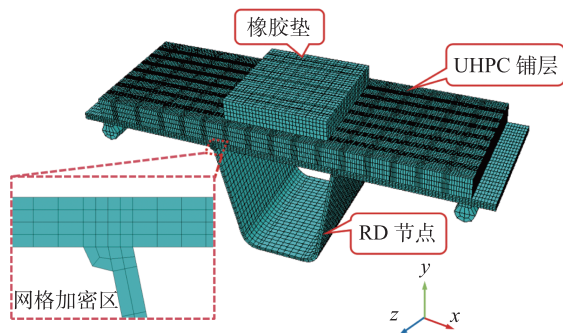


图9 带UHPC铺层的RD节点网格模型
Fig. 9 Mesh model of RD welded joint with UHPC overlay

确RD节点在轮载作用下的裂纹萌生及扩展位置,这可通过疲劳试验以及最大热点应力点判断,之后将该裂纹萌生点沿裂纹扩展方向所在的截面视为“假象平面”,提取假象平面内所有节点的节点力,用于结构应力的计算。由于试验加载和有限元分析均在线弹性范围内,在有限元模型中施加单位压力 $\Delta P=1$ kN来模拟轮载作用,对于其他加载工况,只需要对单位荷载下的结构应力进行等比缩放即可确定。本节将计算 $\Delta P=20.02$ kN中心加载工况下试件的疲劳寿命,并与疲劳试验数据进行对比。

疲劳试验证明裂纹首先会在RD节点焊缝处萌生,沿板厚以及焊缝方向,分阶段扩展直至断裂,因此将该裂纹萌生位置所在的平面视为假象平面。

板底部焊趾附近沿焊缝方向最大主应力分布如图10所示。可以看出,带UHPC铺层与不带UHPC铺层的RD节点最大主应力呈现较大的差异,UHPC铺层可极大降低焊趾附近的主拉应力。铺装UHPC层之前,沿焊缝的应力分布端部效应明显,即焊缝端部的应力变化剧烈,在距离焊缝两端75 mm范围内,应力以较快速度增长到最大值,在焊缝中部区域保持稳定,约120 MPa;而铺装UHPC层之后,应力大幅度降低,且端部效应不明显,应力变化平缓,最大值约20 MPa,降幅达83.3%,这表明UHPC层与盖板形成了整体受力体系,能够更好地传递上部车辆荷载,这对于改善钢桥面板的疲劳受力状态大有好处。

4.2 结构应力法预测

结构应力法评估焊接构件疲劳寿命的基础是

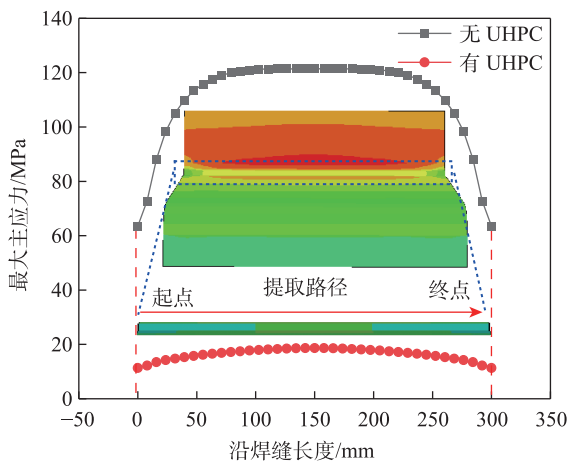


图10 RD节点沿焊缝的最大主应力分布

Fig. 10 Maximum principal stress distribution of RD welded joint along the weld seam

计算其斜面应力。根据RD节点的疲劳破坏状态,选择焊趾附近疲劳裂纹所在的截面为假象平面,沿该平面分离出隔离体,并采用ABAQUS后处理中的Free Body Cut命令查看截面的内力,假象平面处的节点力便暴露出来,如图11所示。

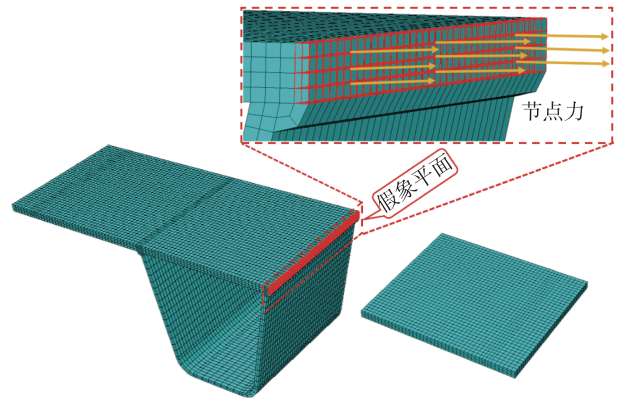
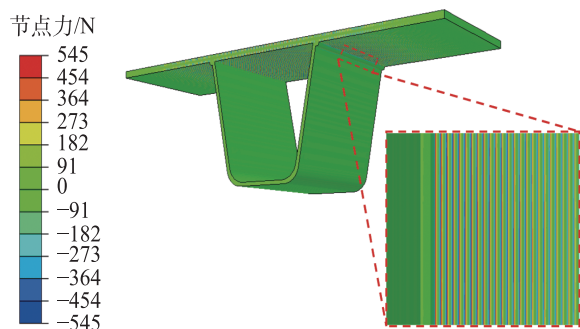


图11 假象平面及节点力

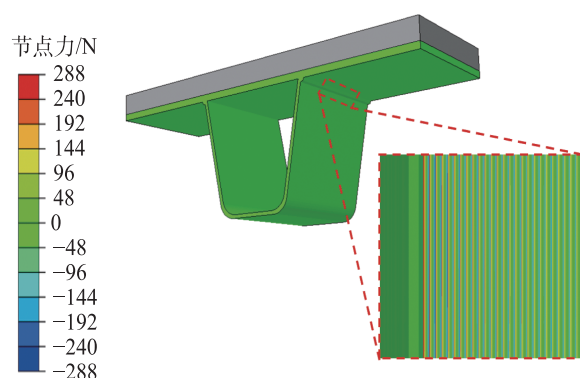
Fig. 11 False plane and nodal force

确定假象平面之后,将实体模型沿该截面切开进行隔离体分析,提取假象平面内的单元节点力,利用功能等效原理计算出膜应力与弯曲应力,模拟试验工况下焊趾附近节点力分布云图如图12所示,可以看出,带UHPC层与不带UHPC层的RD节点焊趾处节点力分布趋势类似,但在数值上差异较大,铺装UHPC层之后,最大节点力降低约47.2%。需要注意的是,由于结构应力法是基于节点力平衡原理计算结构应力的,故在输出计算结果时,应注意关闭平均单元节点输出,否则输出的节点力在数值上为0。提取沿焊缝处的单元节点力,绘制曲线如图13所示,可以看出,与主应力的分布状态类似,在UHPC铺层加固之后,沿焊缝处的节点力数值显著降低,且节点力的分布趋势更加均匀。

根据节点力向量和节点力矩向量计算焊缝截面处的轴向线力和线力矩,从而确定膜应力和弯曲应力,进而由公式1确定结构应力。带UHPC铺层和不带UHPC铺层的试件沿焊线处的结构应力曲线如图14所示,可以看出,沿焊线方向的结构应力呈对称分布,且均为拉应力。拉应力从焊缝一端先增大至稳定状态,至焊缝另一端逐渐减小,焊缝中部的结构应力基本保持稳定,这与沿焊缝的主应力分布类似。铺装UHPC层之后,焊趾附近的结构应力值大幅度降低,相比UHPC铺装之前,焊缝中部



(a) 加装 UHPC 铺层前焊趾附近节点力



(b) 加装 UHPC 铺层之后焊趾附近节点力

图 12 模拟轮载作用下焊趾附近节点力分布
Fig. 12 Distribution of nodal forces near the weld toe under simulated wheel load

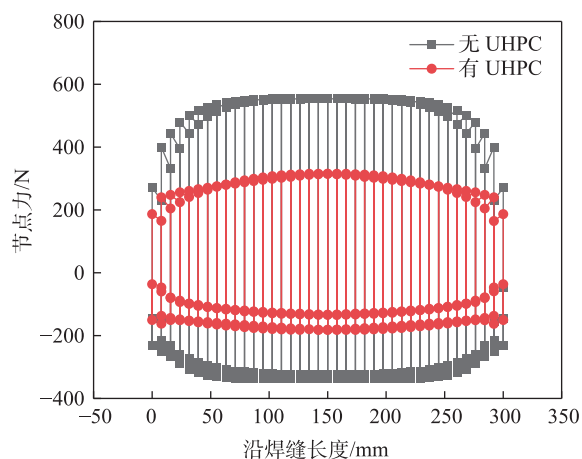


图 13 模拟轮载作用下焊趾附近节点力曲线
Fig. 13 Node force curves near the weld toe under simulated wheel load

的结构应力降幅达 87.2%, 且曲线分布趋于平缓。

主 S-N 曲线给出了疲劳寿命与等效结构应力之间的关系, 要使用结构应力法进行疲劳评估, 必

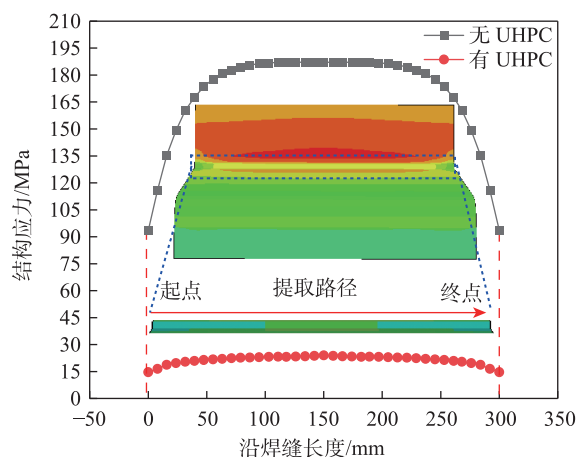


图 14 沿焊线的结构应力分布

Fig. 14 Structure stress distribution along the welding line

须将其转化为等效结构应力。根据式(3)计算得出 $\Delta P=20.02$ kN 时的等效结构应力, 绘制成曲线如图 15 所示, 由图可看出, 等效结构应力和结构应力的分布规律相同, 仅在数值上存在差异, 均是在焊缝中部平缓而在端部变化较大, UHPC 铺层极大降低了应力值且使得应力分布状态更加均匀。根据疲劳寿命与等效结构应力之间的关系式(见式(6))可求得 RD 节点的疲劳寿命, 计算结果如表 3 所示。

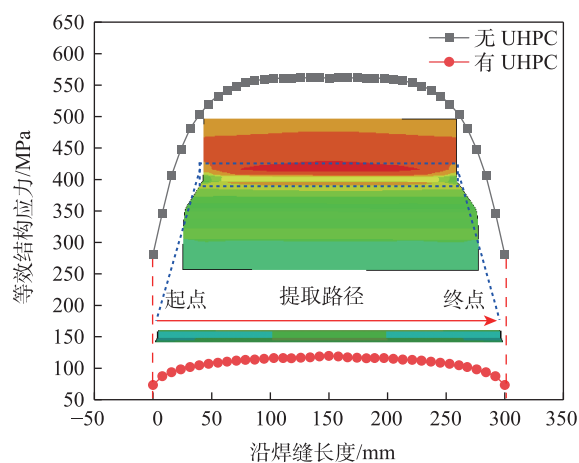


图 15 沿焊线的等效结构应力分布

Fig. 15 Equivalent structure stress distribution at welding line

叶星汉等^[19]开展的疲劳试验得出无 UHPC 铺层 RD 节点的裂纹萌生寿命 $N_0=782\ 325$ 次。由表 3 给出的计算数据可知, 在 $+2\sigma$, $+3\sigma$ 统计模式下的预测寿命分别为 2 228 643, 3095 858 次, 相比试验值要大; 而在 -2σ , -3σ 统计模式下的预测寿命分别为 231 024, 421 779 次, 相比试验值要小。上述统计模

表3 结构应力法计算的疲劳寿命
Tab.3 Fatigue life calculated by structural stress method

模拟工况	统计模式	$\Delta\sigma_s/\text{MPa}$	$\Delta S_{eq}/\text{MPa}$	$N_0/\text{次}$
无UHPC	均值	78.21	268.27	719 788
有UHPC	均值	7.31	18.71	2 987 811 851
无UHPC	+2 σ	78.21	268.27	2 228 643
有UHPC	+2 σ	7.31	18.71	9 280 025 360
无UHPC	+3 σ	78.21	268.27	3 095 858
有UHPC	+3 σ	7.31	18.71	12 891 091 776
无UHPC	-2 σ	78.21	268.27	231 024
有UHPC	-2 σ	7.31	18.71	961 981 288
无UHPC	-3 σ	78.21	268.27	421 779
有UHPC	-3 σ	7.31	18.71	545 844 395

式下疲劳寿命预测值与试验值之间的误差较大,难以给出较好的疲劳寿命评估结果。而在均值统计模式下,结构应力法给出的预测值为 $N_{\text{Mean}}=719\,788$ 次,预测结果接近试验值且偏保守,相对误差仅8%,显示出很高的预测精度。当考虑UHPC铺层加固之后,无论哪种统计模式下,RD节点的疲劳寿命预测值均大幅度提高,达到无限疲劳寿命,表明在该疲劳荷载幅下,UHPC铺层加固后的RD焊接节点不会开裂。这是由于UHPC层使得节点的结构应力幅大幅降低,有效地提高了钢桥面板的疲劳耐久性。

将单位荷载1 kN作用下的等效结构应力幅 $\Delta S_{eq-unit}=13.4\text{ MPa}$,在线弹性体系下,其他荷载作用下的等效结构应力幅可等比例缩放确定。根据表2给出的疲劳试验数据,计算出其余两种加载工况所对应的等效结构应力幅值,如表4所示。

表4 不同荷载作用下等效结构应力幅
Tab. 4 Equivalent structure stress amplitude under different loads

试件编号	加载方式	$\Delta F/\text{kN}$	$N_0/\text{次}$	$\Delta S_{eq-unit}/\text{MPa}$	$\Delta S_{eq}/\text{MPa}$
H-RD-1	中心加载	20.02	782 325	13.4	268.268
H-RD-2	中心加载	24.94	354 321	13.4	334.196
H-RD-3	中心加载	20.01	797 970	13.4	268.134

表2给出了中心加载工况、3种不同荷载作用下的疲劳试验数据,其中裂纹萌生时对应的疲劳寿命记作 N_0 。将裂纹萌生寿命 N_0 ,连同表4中不同荷载幅对应的等效结构应力幅 ΔS_{eq} 绘制到主S-N曲线中,如图16所示。可以看出,各数据点均落在主S-N曲线附近的置信区间内,且位于中值曲线偏上方,这表明在同样的应力幅下,主S-N曲线给出的

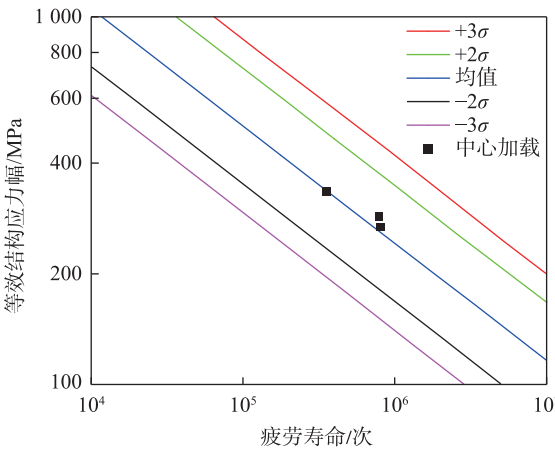


图16 试验数据与主S-N曲线对比
Fig. 16 Comparison between experimental data and main S-N curve

疲劳寿命预测值小于试验值,说明结构应力法进行疲劳寿命评估结果可靠且偏于保守。

图17为不同评估方法预测的疲劳寿命对比,其中FAT125、FAT100和FAT90为热点应力法提供的3条不同等级的热点应力S-N曲线。将结构应力法计算的RD试件疲劳寿命(均值统计模式),与疲劳试验值、热点应力法,以及临界距离理论(点法、线法)的预测值^[20]进行对比可发现,采用结构应力法计算出的疲劳寿命结果偏保守,这对于钢桥面板的安全服役和定期检修有利。相比热点应力法和临界距离理论,结构应力法的预测结果更接近试验值,误差仅8%,预测精度更高。充分证明

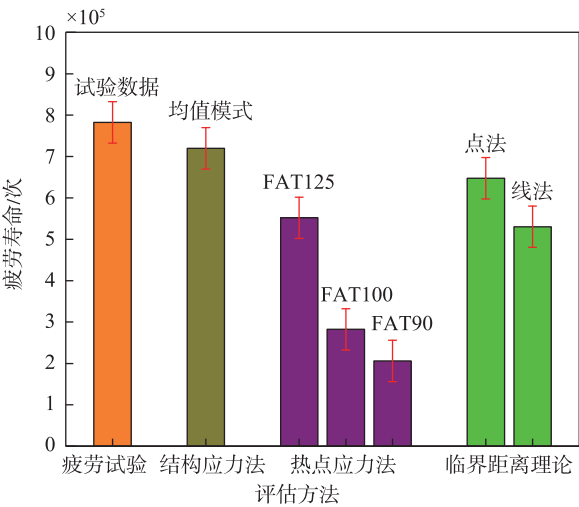


图17 不同评估方法确定的疲劳寿命对比
Fig. 17 Comparison of fatigue life predicted by different evaluation methods

结构应力法在焊接结构的疲劳性能评估方面具有独特优势。

5 结论

本文针对模拟轮载作用下的钢桥面板RD节点开展疲劳试验和数值模拟,研究了中心加载工况下试件的疲劳开裂行为和结构应力分布,并基于结构应力法对RD节点的疲劳寿命进行了评估,得到如下结论。

1) 中心加载工况下,RD节点外侧连接焊缝处受拉应力作用,焊缝端部的拉应力变化较大,至焊缝中部应力值增大并趋于稳定,疲劳裂纹首先在RD节点焊缝处萌生,并沿板厚以及焊缝方向,分阶段扩展直至断裂。

2) UHPC铺层可以显著减弱试件焊缝的端部效应,大幅度降低焊缝中部的结构应力,最大降幅达87.2%,同时UHPC层与盖板协同受力,使得结构应力分布趋于平缓,极大地改善了钢桥面板的疲劳受力状态,延长了疲劳寿命。

3) 相比热点应力法和临界距离理论,结构应力法在中值统计模式下得到的疲劳寿命预测值更接近试验值,预测误差仅8%,而在 $\pm 2\sigma$ 、 $\pm 3\sigma$ 统计模式下给出的预测误差较大,将导致偏危险或过于保守的疲劳设计。对于钢-UHPC组合节点,结构应力法给出的预测值均达到无限疲劳寿命。

4) 结构应力法具有良好的网格不敏感性,主S-N曲线选用方便可靠,对于各类焊接节点能以较低的成本得到较好的预测结果,在钢结构桥梁的疲劳性能评估方面具有广阔应用前景,未来应在该方面加大探索力度。

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 Q H, BU Y Z, LI Q. Review on fatigue problems of orthotropic steel bridge deck[J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30(3): 14-30.
- [2] 王春生,翟慕赛,王雨竹. 钢桥疲劳研究进展[J]. 交通运输工程学报, 2024, 24(1): 9-42.
WANG C S, ZHAI M S, WANG Y Z. Research progresses on fatigue in steel bridges[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2024, 24(1): 9-42.
- [3] 邵旭东,樊伟,黄政宇. 超高性能混凝土在结构中的应用[J]. 土木工程学报, 2021, 54(1): 1-13.
SHAO X D, FAN W, HUANG Z Y. Application of ultra-high-performance concrete in engineering structures[J]. China Civil Engineering Journal, 2021, 54(1): 1-13.
- [4] 杨永清,程楚云,张勇,等. 车辆荷载对正交异性钢桥面疲劳细节应力影响研究[J]. 公路交通科技, 2019, 36(11): 50-58.
YANG Y Q, CHENG C Y, ZHANG Y, et al. Study on influence of vehicle loads on fatigue detail stress of orthotropic steel bridge deck[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2019, 36(11): 50-58.
- [5] 祝志文,李健朋,钟国琛,等. 基于现场试验和有限元的纵肋-面板双面焊构造细节应力行为研究[J]. 中国公路学报, 2022, 35(6): 36-48.
ZHU Z W, LI J P, ZHONG G C, et al. Stress behavior of both-side welded rib-to-deck details based on field tests and finite element analysis[J]. China Journal of Highway and Transport, 2022, 35(6): 36-48.
- [6] 白文畅,袁周致远,吉伯海,等. 钢桥面板顶板-U肋焊缝裂纹萌生特征及扩展规律[J]. 华东交通大学学报, 2024, 41(1): 20-29.
BAI W C, YUAN Z Z Y, JI B H, et al. Study on crack initiation characteristics and propagation laws of U rib-to-deck weld joint of orthotropic steel bridge decks[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2024, 41(1): 20-29.
- [7] 张清华,金正凯,刘益铭,等. 钢桥面板纵肋与顶板焊接细节疲劳裂纹扩展三维模拟方法[J]. 中国公路学报, 2018, 31(1): 57-66.
ZHANG Q H, JIN Z K, LIU Y M, et al. 3-D simulation method for fatigue crack propagation in rib-to-deck welded joints of orthotropic steel bridge deck[J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31(1): 57-66.
- [8] 张清华,郭亚文,李俊,等. 钢桥面板纵肋双面焊构造疲劳裂纹扩展特性研究[J]. 中国公路学报, 2019, 32(7): 49-56.
ZHANG Q H, GUO Y W, LI J, et al. Fatigue crack propagation characteristics of double-sided welded joints between steel bridge decks and longitudinal ribs[J]. China Journal of Highway and Transport, 2019, 32(7): 49-56.
- [9] 颜攀,刘嘉. 正交异性钢桥面板肋-板处裂纹扩展特性研究[J]. 建材世界, 2019, 40(6): 51-54.
YAN P, LIU J. Study on the properties of crack propagation for rib-to-deck welded joints of steel bridge deck[J].

- The World of Building Materials, 2019, 40(6): 51-54.
- [10] 郭睿, 肖汝诚, 屈兵. 钢-UHPC组合桥面性能研究与参数分析[J]. 中国科技论文在线精品论文, 2015, 8(14): 1476-1482.
- GUO R, XIAO R C, QU B. Mechanical properties research and parameter analysis on steel-UHPC composite bridge deck[J]. Highlights of Sciencepaper Online, 2015, 8(14): 1476-1482.
- [11] 刘梦麟, 邵旭东, 张哲, 等. 正交异性钢板-超薄RPC组合桥面板结构的抗弯疲劳性能试验[J]. 公路交通科技, 2012, 29(10): 46-53.
- LIU M L, SHAO X D, ZHANG Z, et al. Experiment on flexural fatigue performance of composite deck system composed of orthotropic steel deck and ultra-thin RPC layer[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2012, 29(10): 46-53.
- [12] 杨海波. 基于结构应力法的正交异性桥面板疲劳性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.
- YANG H B. Fatigue performance of orthotropic bridge decks based on traction structural stress method[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2021.
- [13] 苏有华. 基于主S-N曲线法的典型钢桥焊接节点疲劳寿命评估[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2014.
- SU Y H. Fatigue life assessment of typical welded joints in steel bridges using master S-N curve method[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2014.
- [14] 程张. 基于Abaqus和Fe-safe平台的正交异性钢桥面板疲劳寿命分析[D]. 西安: 长安大学, 2021.
- CHENG Z. Study on fatigue life of orthotropic steel deck based on Abaqus and Fe-safe[D]. Xi'an: Chang'an University, 2021.
- [15] 武奇, 邱惠清, 王伟生. 基于结构应力的焊接接头疲劳分析[J]. 焊接学报, 2009, 30(3): 101-105.
- WU Q, QIU H Q, WANG W S H. Fatigue analysis of welded joints by method of structural stress[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2009, 30(3): 101-105.
- [16] CHENG B, YE X, CAO X, et al. Experimental study on fatigue failure of rib-to-deck welded connections in orthotropic steel bridge decks[J]. International Journal of Fatigue, 2017, 103: 157-167.
- [17] DONG P. A structural stress definition and numerical implementation for fatigue analysis of welded joints[J]. International Journal of Fatigue, 2001, 23(10): 865-876.
- [18] 李明高, 刘东亮, 丁彦闯, 等. 基于等效结构应力的焊接结构疲劳寿命评估[J]. 现代制造工程, 2013(5): 118-121.
- LI M G, LIU D L, DING Y C, et al. Fatigue life assessment of welded structure based on equivalent structural stress[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2013(5): 118-121.
- [19] 叶星汉, 曹一山, 曹星儿, 等. 正交异性钢桥面板U肋-盖板焊接节点的疲劳性能试验[J]. 公路交通科技, 2017, 34(9): 68-75.
- YE X H, CAO Y S, CAO X E, et al. Fatigue test on U-rib-to-deck connections in orthotropic steel bridge decks[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2017, 34(9): 68-75.
- [20] 田亮, 邢守航, 樊立龙, 等. 模拟轮载作用下钢桥面板RD节点疲劳寿命计算方法对比分析[J]. 华东交通大学学报, 2023, 40(4): 76-85.
- TIAN L, XING S H, FAN L L, et al. Comparative analysis of fatigue life calculation methods for rib-to-deck joints in steel bridge decks under simulated wheel load[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2023, 40(4): 76-85.



通信作者: 田亮(1984—), 男, 副教授, 博士, 研究方向为高性能钢桥结构、钢桥疲劳与断裂。E-mail: sjtu_tl@126.com。

(责任编辑: 姜红贵)