文章编号:1005-0523(2023)04-0076-10

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

田 亮[1,2,3],邢守航[1],樊立龙[3],赵 健[3],程 斌[4],赵雪敏[1]

(1. 天津城建大学天津市土木建筑结构防护与加固重点实验室,天津 300384;2. 清华大学土木工程系,北京 100084;3. 中国铁建大桥工程局集团有限公司,天津 300300;4. 上海交通大学船舶海洋与建筑工程学院,上海 200240)

摘要:为深入研究RD(rib-deck)节点的疲劳性能,通过模拟车轮荷载对RD节点实施中心加载,得到了相应热点应力幅下的节点疲劳寿命。采用ABAQUS建立了钢桥面板RD节点的三维实体有限元模型,在有效数值模型的基础上,分别采用热点应力法和临界距离理论对RD节点的疲劳寿命进行了对比分析。研究结果表明:同一精度网格下采用两点外推法和三点外推法得到的热点应力结果比较接近,而采用临界距离理论的点法得到的特征应力则小于线法得到的特征应力;采用国际焊接协会(IIW)推荐的FAT 90曲线得到的评估结果过于保守,而FAT 125曲线的预测结果相对接近试验值。临界距离理论相比热点应力法能得到更准确的预测结果,其中点法和线法得到的预测值与试验值分别相差17%、32%;总体而言,热点应力法和临界距离理论均能得到相对保守的疲劳寿命预测结果,两种方法用于钢桥面板典型焊接节点的疲劳性能评估是可行且偏于安全的,但点法的预测精度更高,且实际应用中也较为便捷。

关键词:正交异性桥面板;疲劳试验;疲劳寿命;热点应力法;临界距离理论

中图分类号:U443.32 **文献标志码**:A

本文引用格式: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.

DOI:10.16749/j.cnki.jecjtu.2023.04.004

Comparative Analysis of Fatigue Life Calculation Methods for Rib-To-Deck Joints in Steel Bridge Decks Under Simulated Wheel Load

Tian Liang[1,2,3], Xing Shouhang[1], Fan Lilong[3], Zhao Jian[3], Cheng Bin[4], Zhao Xuemin[1]

(1. Tianjin Key Laboratory of Civil Structure Protection and Reinforcement, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China; 2. School of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 3. China Railway Construction Bridge Engineering Bureau Group Co., Ltd., Tianjin 300300, China; 4. School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: In order to further study the fatigue performance of RD joint, the RD joint was subjected to central loading by simulating wheel loads, and the fatigue life of RD joint under corresponding hot spot stress range was obtained by conducting fatigue tests. The 3D solid finite element model of RD joint in steel bridge decks was established by using ABAQUS. Based on the effective numerical model, the fatigue life of RD joint was compared and analyzed by using the hot spot stress method and the critical distance theory respectively. The results show that under the same finite element mesh, the hot spot stress results obtained by two-point extrapolation and three-point extrapolation are relatively close, while the characteristic stress obtained by point method using the

收稿日期:2022-11-26

基金项目:国家自然科学基金项目(51708346);国家重点研发计划项目(2016YFB1200602-28,2016YFB1200601-B27);中国铁建股份有限公司科技重大专项(2020-A01);天津市企业科技特派员项目(22YDTPJC00210);天津市科技开发项目(19YDL,SF00030)

critical distance theory is smaller than that obtained by line method. The evaluation results obtained by FAT90 S-N curve recommended by IIW are too conservative, while the prediction results of FAT125 S-N curve are relatively close to the measured value. Compared with the hot spot stress method, the critical distance theory can get more accurate prediction results, in which the prediction errors obtained by the point method and the line method are 17% and 32% respectively. In general, both the hot spot stress method and the critical distance theory can get relatively conservative fatigue life prediction results. Therefore, the two methods are feasible and safe for fatigue behavior evaluation of typical welded joints in steel bridge decks. However, the point method has higher prediction accuracy and is also more convenient in practical application.

Key words: orthotropic steel bridge deck; fatigue test; fatigue life; hot spot stress method; the critical distance theory

Citation format: 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.

正交异性钢桥面板是由纵横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，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。桥面板不仅承受移动荷载还作为主梁的一部分参与受力，提高了结构的使用效率[1-2]。但是，正交异性钢桥面板的各构件之间均是焊接连接，空间焊缝众多，其内部构造细节易出现焊接缺陷，在外部车辆轮载反复作用下钢桥面板易萌生疲劳裂纹，进一步裂纹扩展直至断裂则会引发灾难性事故，造成巨大的经济损失和社会负面影响。U 肋-盖板焊接节点（rib-deck，RD 节点），是正交异性钢桥面板中的典型节点，也是极易出现疲劳开裂的部位。在局部轮载作用下盖板和 U 肋的连接处受力复杂。轮载相对 U 肋的作用位置不同会造成 U 肋两侧弯矩差异，从而诱发疲劳裂纹从焊趾以及焊根处萌生并沿着焊喉以及盖板、U 肋的厚度方向扩展，导致该类型节点出现的裂纹数量众多[3]，潜在危害较大。

目前国内外学者针对正交异性桥面板的疲劳问题已开展了许多研究工作，并取得了一定成果用于指导工程实践。杨永清等[4]，祝志文等[5]研究了荷载不同作用位置下正交异性桥面板构造细节的应力分布，结果表明轮载作用下 RD 节点的应力局部效应显著。姚悦等[6]针对钢桥中易出现疲劳开裂的腹板间隙提出了一种简化的计算模型并研究了其应力特征，结果表明腹板间隙的受力仅与腹板间隙的长度与厚度有关。张清华等[7-8]实现了 RD 节点的裂纹扩展数值模拟并开展试验对模拟结果进行了验证。LIU 等[9]、IQBAL 等[10]通过数值模拟发现采用带焊缝的实体单元模型及国际焊接协会（international institute of welding，IIW）推荐的三点外推计算公式得到的热点应力相对理想。崔闯等[11]，YOKOZEKI 等[12]，周列茅等[13]基于热点应力法对桥面板易受损位置的疲劳性能进行评估，并验证了热点应力法的适用性与准确性。叶星汉等[14]，鞠晓臣[15]通过试验测量与有限元模拟相结合的方法，分析了 U 肋-盖板焊趾处的热点应力，基于热点应力曲线对模型寿命进行预测。ZHU 等[16]建立了适用于正交异性桥面板 U 肋与横隔板开孔端部连接处的热点应力模型。陈卓异等[17]，ZHOU 等[18]采用临界距离理论计算了横隔板弧形开口处的疲劳寿命，同时开展疲劳试验进行了验证。上述学者从不同角度、采用不同的方法对钢桥面板中典型焊接构造细节开展了疲劳性能评估与试验验证。

目前许多学者采用热点应力法对 RD 节点的疲劳寿命预测时仅采用 FAT90 曲线作为一条通用的热点应力 S-N 曲线，且将临界距离理论用于该节点疲劳性能评估的研究还比较少。本文建立了对应 RD 节点的三维实体有限元模型，分析确定节点在模拟轮载作用下的应力分布，并与试验值进行对比。在此基础上基于热点应力法与临界距离理论确定了试件评估点疲劳寿命，最后将预测结果与试验结果进行对比分析验证不同评估方法的适用性。

1 疲劳寿命预测方法

焊接构件的疲劳寿命一直以来就是值得关注的问题,可以通过试验法和理论分析法来确定。疲劳试验得到的结果无疑更接近实际情况,但受制于高昂的试验成本和繁琐的试验操作,人们更倾向寻找一种简便有效的疲劳评估方法。目前,采用基于有限元的数值分析方法预测构件的疲劳寿命越来越普遍。根据本文的研究主题,这里重点介绍热点应力法和临界距离理论。

1.1 热点应力法

热点应力法(hot spot stress method,HSSM)考虑了焊接细节处的应力集中效应,认为疲劳破坏是由细节处的应力集中导致的。一般来说,在焊趾附近的局部应力由膜应力、弯曲应力和非线性应力峰值3部分组成。由于非线性应力峰值受焊缝几何形状的影响,而焊接过程中很难保证焊缝形貌的尺寸一致性,这使得非线性应力峰值在热点位置难以统一定义[19]。因此,热点应力法剔除了焊缝缺口处的非线性应力峰值,仅考虑由膜应力和弯曲应力组成的结构应力,将其定义为热点应力 σ_{hs}。采用焊趾处的热点应力作为表征量,这样对于相同焊接细节的构件都能够通过一条热点应力S-N曲线评估不同焊接接头的疲劳强度。

由于焊缝缺口效应的影响,导致焊趾附近的应力梯度很大,必须采用表面外推法来确定焊趾处的热点应力值。在对热点应力进行外推时,外推点需位于焊趾缺口影响区以外,但是距离也不宜太远,应能够捕捉到焊接细节的几何应力集中效应。构件焊缝处分为a型热点和b型热点。对于本文中的RD节点,盖板与U肋连接处属于a型热点,其外推距离主要受板厚 t 的影响,热点应力外推示意图如图1所示。针对a型热点,国际焊接协会(IIW)推荐了两点线性外推和三点二次外推公式用于计算热点应力 σ_{hs},表达式如下

两点外推:$\sigma_{hs}=1.67\sigma_{0.4t}-0.67\sigma_{1.0t}$ (1)

三点外推:$\sigma_{hs}=2.52\sigma_{0.4t}-2.24\sigma_{0.9t}+0.72\sigma_{1.4t}$ (2)

式中:t 为板厚,mm;σ_{hs} 为由两点外推与三点外推求解的热点应力,MPa;$\sigma_{0.4t}$,$\sigma_{0.9t}$,$\sigma_{1.0t}$,$\sigma_{1.4t}$ 分别表示距离焊趾0.4倍,0.9倍,1.0倍,1.4倍板厚处的应力值,MPa。

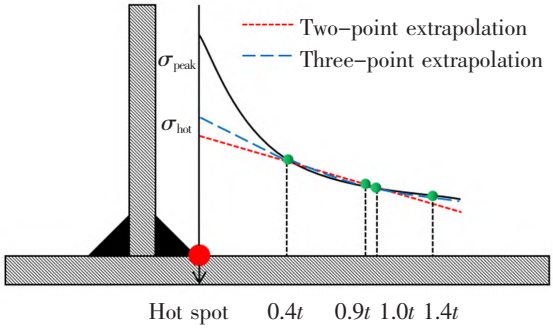

图1 热点应力外推示意图

Fig.1 Diagram of hot spot stress extrapolation

1.2 临界距离理论

临界距离理论(theory of critical distance,TCD)是由爱尔兰学者Taylor[20]在总结前期有关缺口根部应力分布的研究成果上提出的,是一类疲劳评估方法的统称。该类方法的共同特征是将缺口附近的平均应力作为影响材料疲劳失效的关键因素。由于焊接过程中存在气孔和夹渣,会不可避免地造成焊缝存在初始缺陷,因此可认为在构件的焊趾附近存在缺口。临界距离理论的核心思想是将距离缺口根部一定距离的某一点应力或者某一段距离内的平均应力作为特征应力,以该特征应力作为评估构件疲劳性能的特征量。在临界距离理论中,临界距离参数 L_0 的确定十分关键,既可以由试验确定,也可以由Haddad给出的短裂纹公式计算得到,表达式如下

$$L_0=\frac{1}{\pi}\left(\frac{\Delta K_{th}}{\Delta\sigma_f}\right)^2 \tag{3}$$

式中:L_0 为临界距离参数;ΔK_{th} 为材料的疲劳裂纹扩展门槛值,MPa·m$^{1/2}$;$\Delta\sigma_f$ 为材料的疲劳极限应力幅,MPa。

目前,临界距离理论已经发展有“点法”、“线法”、“面法”和“体法”等几种方法,这几种方法在构件的疲劳寿命预测中均得到了应用,其主要区别在于求解等效平均应力的方式不同。其中“点法”和“线法”因其简单易算成为最常用的计算平均应力的方法,应用也较为普遍,两种方法求解示意图如图2所示。“点法(point method,PM)”是将距离缺口一定距离处($L_0/2$)的某一点应力作为构件的特征应力;“线法(line method,LM)”则是将距缺口一定距离内($2L_0$)面积的平均应力作为构件的特征应力。这两种方法的计算公式分别如下

点法　$$\sigma_{av}=\sigma_1\left(r=\frac{L_0}{2},\theta=0\right)\tag{4}$$

线法　$$\sigma_{av}=\frac{1}{2L_0}\int_0^{2L_0}\sigma_1(r,\theta=0)\mathrm{d}r\tag{5}$$

式中：σ_{av} 为点法与线法求解的特征应力，MPa；σ_1 为缺口附近的最大主应力，MPa；L_0 为材料的临界距离参数；r 和 θ 为裂纹尖端的极坐标轴。

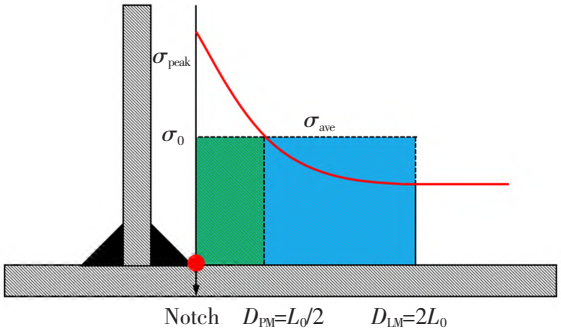

图 2　点法与线法示意图

Fig.2　Diagram of point method and line method

2　试验过程

2.1　节点试件

本文共设计加工了 6 个 RD 节点试件，材质为 Q345qD 钢。RD 节点中的盖板长 1 000 mm，宽 400 mm，厚 16 mm；U 肋外侧开口 300 mm，宽度 400 mm，壁厚 8 mm。U 肋与盖板之间采用熔透率为 80%的连续角焊缝，焊角高度 8 mm，焊接方式为 CO_2 气体保护焊。节点试件构造尺寸如图 3 所示。为便于简支加载，盖板两端焊接有圆钢，圆钢中心距盖板端部 50 mm。

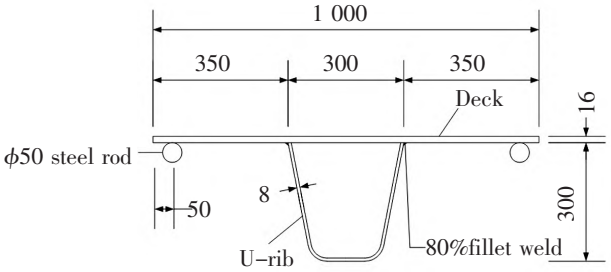

图 3　RD 节点构造尺寸（单位：mm）

Fig.3　Structural dimensions of RD joint (Unit: mm)

2.2　试验加载

RD 节点采用中心加载，荷载中心位于 U 肋上部中心部位。试件在简支边界下进行加载，通过限制圆钢的位移实现试件的简支约束，试件在竖向和横向的位移受到约束，但释放试件端部的转动自由度。

试验在上海交通大学工程结构试验中心进行，制作刚性短柱作为试件的支座以及分配荷载，短柱高 350 mm，由 H 型钢和钢板焊接而成。其中 2 个短柱作为刚性块与作动器连接，4 个短柱通过螺栓与刚性底板连接。为了合理地模拟车辆轮胎以及桥面铺装层，在刚性块与盖板之间放置 250 mm×250 mm ×50 mm 的橡胶垫，用于将荷载均匀扩散传递至盖板顶面，加载装置如图 4 所示。

试件加载包括静力加载和疲劳加载。采用单调分级静力加载制度，加载步长 5 kN 分 4 级加载。静力加载的目的在于测量热点区域的应力/应变分布，采用梯度应变片采集应变数据，通过线性外推得到焊趾附近的热点应变。由于静力加载在弹性范围内，热点应力的实测值可根据热点应变换算得到。参考 IIW 规范，本文将热点应力值放大 1.1 倍以考虑材料泊松比的影响。静力加载完成后进行疲劳加载，施加的疲劳荷载幅由热点应力数据及目标热点应力幅确定。疲劳加载热点应力幅控制在材料屈服强度的 0.8 倍以下，疲劳荷载应力比 R=0.1，加载频率为 3~4 Hz。疲劳试验主要测量节点的疲劳寿命、裂纹扩展长度、裂纹深度以及面外刚度等数据。其中疲劳寿命通过人工观测，并对照疲劳试验机的荷载循环次数进行记录。

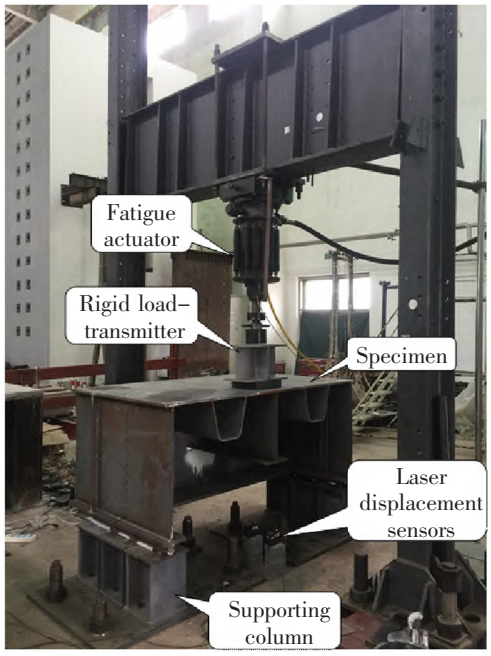

图 4　RD 试件加载装置

Fig.4　Loading device of RD specimen

3 有限元建模

3.1 模型参数

基于通用有限元软件 ABAQUS 建立 RD 节点的三维模型，模型的尺寸与实际试件尺寸一致。U肋与盖板的连接焊缝长度为 400 mm，为简化起见，将焊缝外轮廓处理为半径 8 mm 的圆弧。

试件材质为桥梁专用钢 Q345qD，在 ABAQUS 中定义钢材弹性模量为 206 GPa，泊松比为 0.3。采用 8 节点六面体线性非协调单元 C3D8I 划分网格，由于盖板与 U 肋的焊接连接处为重点关注区域，故对该区域的网格局部加密，以提高热点应力的计算精度。有限元模型中的边界及加载条件与试验保持一致，在盖板上布置加载板作为橡胶垫，其尺寸和位置与试验相同，橡胶垫与盖板之间定义法向接触关系。根据静力加载条件，在橡胶垫上表面施加 1 kN 荷载，并合理定义材料属性来模拟车辆轮载作用。模型同样为简支边界，将约束设置在距离盖板端部 50 mm 的下表面，一端限制其竖向及横向位移，另一端仅限制其竖向位移，同时释放两端绕 Z 轴的转动自由度。模型的荷载施加及边界如图 5 所示。

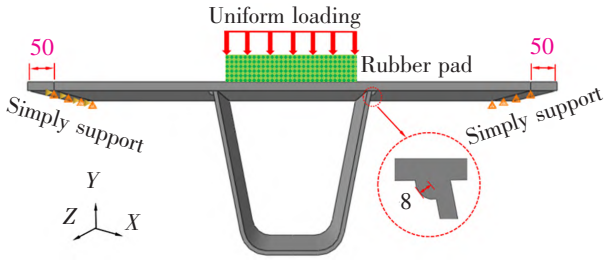

图 5 模型荷载及边界(单位:mm)

Fig.5 Loading and boundary conditions of FE model (Unit:mm)

3.2 网格敏感性

在正式开展有限元分析之前，需要进行网格敏感性分析以确定合适的网格密度。由于构件焊缝处的几何不连续，会导致在焊趾附近存在应力奇异现象，这意味着即使网格不断加密，该处的应力也难以收敛。因此，为了得到准确的热点应力分布，需要确定合理的网格密度，将模型中网格加密区的网格尺寸设定为 4 类，包括：3.2 mm ($0.2t$)、1.6 mm ($0.1t$)、0.8 mm ($0.05t$) 和 0.4 mm ($0.025t$)，盖板厚度 t= 16 mm。由于中心加载工况下模型的应力基本呈对称分布，为提高计算效率，仅将模型一侧的焊缝区域进行加密并设置合理的网格过渡区，模型网格划分如图 6 所示。

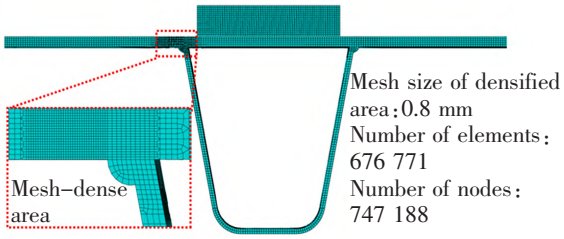

图 6 模型网格划分及加密区

Fig.6 Mesh division and densified area of FE model

本模型中焊趾附近的最大主应力与焊缝横向应力基本相等，且与焊缝垂直方向的夹角小于 45°，根据国际焊接学会 IIW 推荐可以提取最大主应力进行后续的热点应力计算，并以此开展疲劳寿命评估。为统一起见，不同网格密度下的模型均从 U 肋-盖板中部焊趾处的起始点开始，沿着应力梯度最大的方向提取盖板下表面的最大主应力，以 0.8 mm 网格为例确定的应力提取路径如图 7 所示。

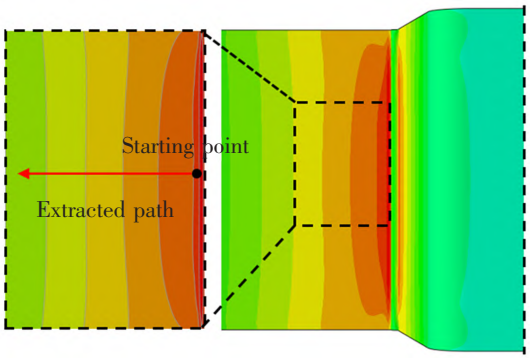

图 7 应力提取路径

Fig.7 The extracted path for stress

为方便计算，采用两点外推法计算焊趾附近的热点应力。按照图 7 所示的应力提取路径，提取距离起始点 $0.4t$ 和 $1.0t$ 处的最大主应力值进行两点线性外推，不同网格尺寸下所得热点应力值如表 1 所示。

表 1 不同网格尺寸下热点应力

Tab.1 Hot spot stress under different mesh sizes

MPa

Mesh size	Stress at starting point	Stress at $0.4t$	Stress at $1.0t$	Hot spot stress
3.2 mm	10.62	8.64	8.32	8.85
1.6 mm	13.28	8.69	8.35	8.92
0.8 mm	16.69	8.72	8.39	8.94
0.4 mm	20.40	8.75	8.41	8.98

由表 1 可知，随着加密区网格尺寸减小，焊趾附近起始点处的应力不断增大，这反映出焊缝附近的缺口效应，但提取路径上 0.4t 和 1.0t 处的应力以及通过这两点外推确定的热点应力已趋于稳定，这表明所选取的应力外推路径较好地避开了焊缝缺口效应。0.4 mm 网格下外推得到的热点应力值为 8.98 MPa，仅比 3.2 mm 网格下确定的热点应力值大 1.5%。不同网格尺寸下的热点应力相差不大，因此可认为网格已经收敛，满足热点应力的计算精度要求。但考虑到后文临界距离理论的应用，为保证对比模型一致，本文选用加密区网格尺寸为 0.4 mm的计算模型。

网格尺寸为 0.4 mm 模型提取路径上的应力分布如图 8 所示。由图 8 可知，距离焊趾较远区域的应力基本呈线性分布且趋于稳定，而接近焊趾区域的应力值突然增大，这是由于 U 肋–盖板连接焊缝处的几何不连续引起的。为了避开焊缝缺口效应，应尽可能将应力外推的起始点设置在距离焊趾 5 mm 之外的区域。应力 s 与焊趾距离 d 按指数函数进行曲线拟合，得到

$$s=8.52+11.4\ e^{-1.1d} \tag{6}$$

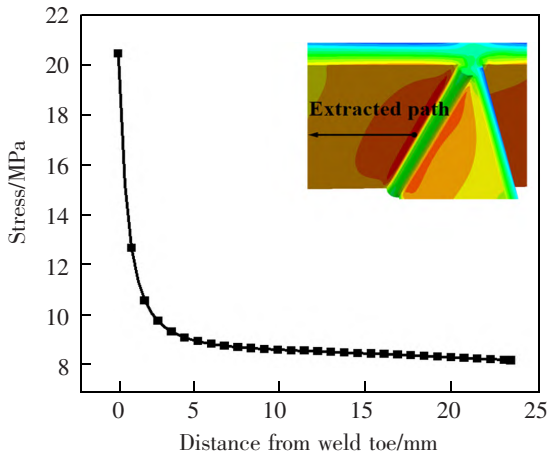

图 8　提取路径上的应力

Fig.8　Stress on the extracted path

3.3　模型验证

将第 2 节试验所得试验数据用于验证所建有限元模型的有效性，在 RD 节点焊缝附近合适位置布置若干测点，现选取 3 个测点的实测应力值与数值模拟值进行对比。3 个测点包括：盖板中线焊趾处 M1、距盖板中线 100 mm 处 S1、U 肋中线焊趾处 M2，测点布置如图 9 所示。三个测点应力的实测值与模拟值对比结果如图 10 所示。整体上来看，无论是实测值还是模拟值，各测点的应力基本呈线性变化规律，这表明所选取的测点处于合理的应力外推区。应力实测值略大于模拟值，这可能是由于有限元模型的加载及边界条件与试验不完全一致所导致，但两者最大误差仅为 6%，模拟值与实测值基本吻合。这表明本文所建立的有限元模型是有效的，可用于后续基于热点应力和临界距离理论的疲劳寿命预测。

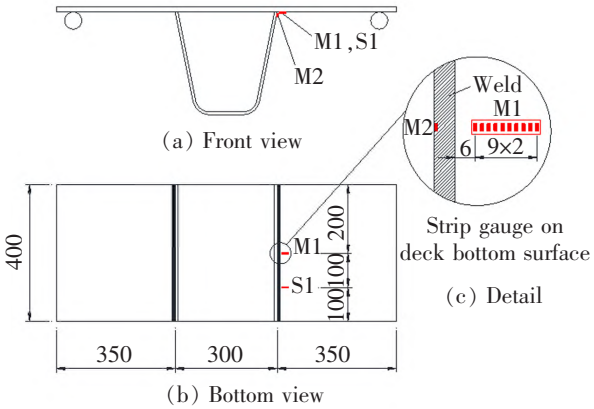

图 9　RD 试件测点布置（单位：mm）

Fig.9　Arrangement of measuring points for RD specimen (Unit: mm)

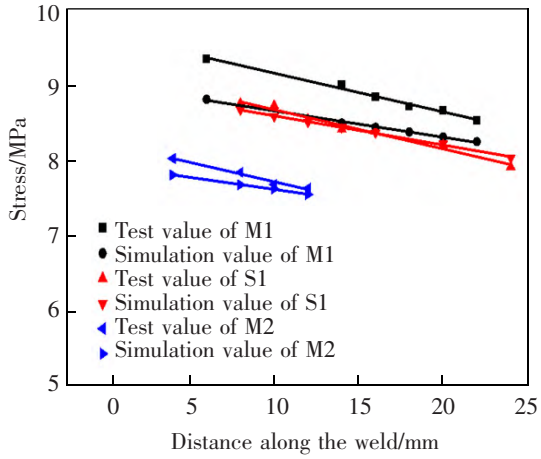

图 10　各测点应力实测值与模拟值对比

Fig.10　Comparison of measured stress values and simulated stress values at each measuring point

4　疲劳寿命预测

首先确定RD 节点在模拟轮载作用下易发生疲劳开裂的位置，并以该疲劳易损位置作为特征点来评估 RD 节点的疲劳寿命。在第 2 节试验中，疲劳荷载的施加原则是将焊趾附近的热点应力幅控制在材料屈服强度的 0.8 倍以下，应力比 R= 0.1。由于试

验加载和有限元分析均是线弹性的,结合第2节静力加载试验结果,在有限元模型中施加 ΔP= 21 kN 的压力来模拟轮载作用。采用加密区网格尺寸为0.4 mm 的模型开展计算,该工况下焊趾附近网格加密区的应力分布如图11所示。

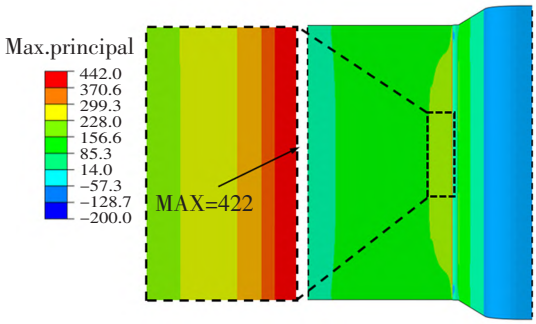

图11 模拟轮载下焊趾附近应力分布(单位:MPa)

Fig.11 Stress distribution near weld toe under simulated wheel load(Unit:MPa)

盖板底面以及U肋外侧面的焊趾附近均受拉应力,但盖板底面焊趾处的拉应力更大。试验也证明疲劳裂纹往往首先从盖板与U肋的连接焊缝处萌生,分阶段扩展直至断裂,RD节点的疲劳开裂过程如图12所示。结合疲劳试验和数值模拟分析,本文认为试件的疲劳寿命由盖板底面焊趾附近的热点应力幅控制,因此以该位置的热点应力来作为评估整个试件疲劳寿命的依据。盖板底面焊趾附近沿着焊缝方向的最大主应力分布如图13所示,由图可知,应力在距离两边缘100 mm的范围内,从0迅速增加到较大值,这反映出焊缝的边缘效应;而在焊缝的中间部位(100 ~ 300 mm)应力基本维持在一个稳定的数值,应力值上下浮动不超过5.5 MPa,这表明焊缝中部的残余应力已经处于准稳态。为方便与试验结果进行对比,选取盖板跨中焊趾处的评估点(接近测点M1,见图13),进一步计算该位置的疲劳寿命,以该评估点的疲劳寿命来表征整个RD

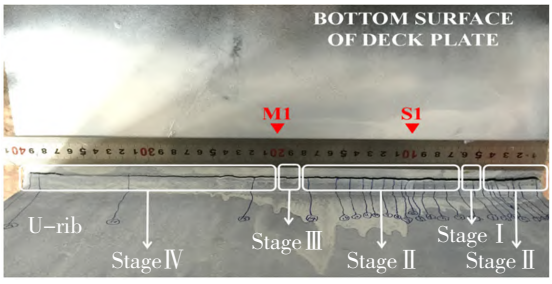

图12 RD节点疲劳开裂过程

Fig.12 Fatigue cracking process of RD joint

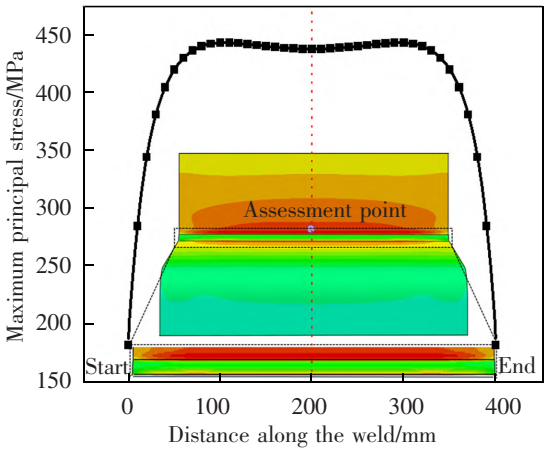

图13 沿焊缝最大主应力分布

Fig.13 Distribution of max principal stress along the weld

试件的疲劳寿命。

热点应力法与临界距离理论两种评估方法各有优劣。热点应力法仅适用于焊接构件的焊趾部位,而临界距离理论适用于所有含缺口的构件。在适用性上,热点应力法采用一条S-N曲线就可以表示不同类型焊接接头的疲劳强度,而临界距离理论在评估不同结构时需要分别确定对应材料的S-N曲线。在应力提取方面,a型热点的外推位置仅与构件厚度相关,而临界距离理论则需要确定对应材料的临界距离参数 L_0。下面分别采用热点应力法和临界距离理论对RD试件的疲劳寿命进行评估并对评估结果进行对比。

4.1 热点应力法预测

采用热点应力法评估RD节点的疲劳寿命,提取靠近评估点焊趾附近处外推点的应力值分别为187.23,181.05,180.07,175.82 MPa,外推点应力分布如图14所示。采用两点外推和三点外推法得到节点跨中评估点的热点应力幅分别为192.03,192.88 MPa,热点应力外推结果如图15所示。由图15可知,采用三点外推法得到的热点应力值大于两点外推法得到的结果,但两者相差不大。

评估点的热点应力幅经线性外推确定之后,需引入一条合适的S-N曲线用于预测试件的疲劳寿命。国际焊接协会(IIW)提供了3条热点应力S-N曲线(FAT90、FAT100、FAT125)用于疲劳寿命预测。

在双对数坐标系下,IIW推荐的3条热点应力S-N曲线如图16所示。m表示不同循环次数下的材料S-N曲线指数,3条曲线互相平行,当荷载循环次数不超过 10^7 次时,m_1 为3;当循环次数超过

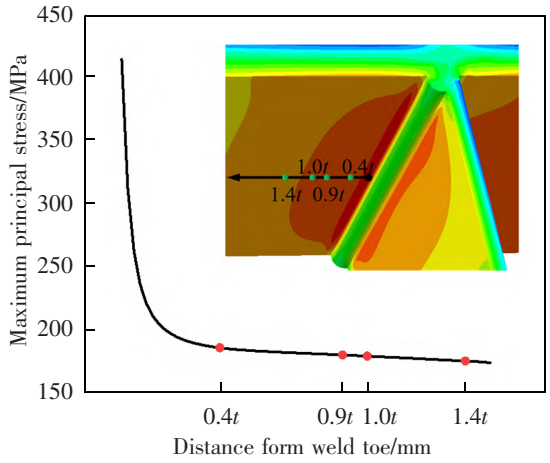

图 14　外推点最大主应力

Fig.14　Max principal stress at extrapolation points

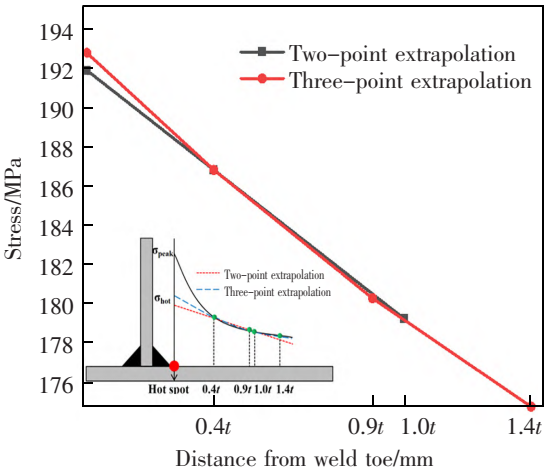

图 15　热点应力外推结果（t=16 mm）

Fig.15　Extrapolation results for hot spot stress（t=16 mm）

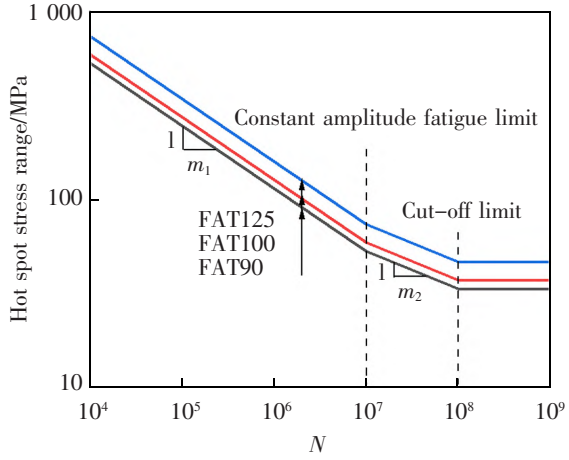

图 16　热点应力 S-N 曲线

Fig.16　Hot spot stress S-N curves

10^7 次时，m_2 为 5。10^7 次循环对应材料的常幅疲劳极限，10^8 次循环对应材料的截止限。本文分别采用 3 条推荐热点应力 S-N 曲线评估 RD 试件的疲劳寿命。

在上述热点应力 S-N 曲线中，疲劳寿命 N 与热点应力幅 $\Delta\sigma$ 有如下关系式

$$\log N=\log A-m\log\Delta\sigma \tag{7}$$

式中：$\Delta\sigma$ 为热点应力幅，MPa；N 表示特定应力幅下的荷载循环次数；$\log A$ 为 S-N 曲线在荷载循环次数 N 轴上的截距。

评估点的热点应力幅已经确定，将两点外推和三点外推得到的热点应力幅 192.03、192.88 MPa 代入式(7)，计算得到 3 条热点应力 S-N 曲线下的荷载循环次数 N，如表 2 所示。

表 2　热点应力法计算结果

Tab.2　Calculation results obtained by hot spot stress method

Extrapolation methods	Hot spot stress/MPa	N_{FAT90}	N_{FAT100}	N_{FAT125}
Two-point extrapolation	192.03	206 012	282 418	551 941
Three-point extrapolation	192.88	203 300	278 700	544 676

与试验记录的中心加载下 RD 节点开裂时的循环次数 N_0=782 325 相比，采用 3 组热点应力 S-N 曲线得到的结果均相对保守，这表明 IIW 推荐的 3 组曲线均可用于 RD 节点的疲劳性能评估。相比而言，FAT90 曲线的预测结果过于保守，与试验值相差也最大，而 FAT125 曲线的预测结果与试验值比较接近，这里取基于两点外推所得的疲劳寿命 N_{FAT125} = 551 941 作为 RD 试件的疲劳寿命。

4.2　临界距离法预测

采用临界距离理论确定焊趾附近特征应力的前提是得到其临界距离参数 L_0，根据式(3)临界距离的定义，主要是确定材料的疲劳裂纹扩展门槛值 ΔK_{th} 和疲劳极限应力幅 $\Delta\sigma_f$。相关学者对桥梁用钢 Q345qD 开展了不同荷载比下的疲劳试验，拟合得到如下表达式

$$\Delta K_{th}=11.54(1-0.365R) \tag{8}$$

式中：ΔK_{th} 为疲劳裂纹扩展门槛值，MPa·$m^{1/2}$；R 为应力比。将应力比 R=0.1 代入上式，得到用于本文的 ΔK_{th}=11.12 MPa·$m^{1/2}$。

按照《公路钢结构桥梁设计规范》(JTG D64—2015)中相关规定，$\Delta\sigma_f$ 取正交异性钢桥面板盖板与闭口加劲肋焊接细节处的常幅疲劳极限 70 MPa。将

ΔK_{th} 和 $\Delta\sigma_f$ 代入式(3)可得该模型的临界距离 L_0 近似为 8.0 mm。从 RD 节点跨中焊趾处沿着最大应力梯度方向提取特征应力，特征应力的确定如图 17 所示。按照点法提取特征应力为 194.3 MPa，按照线法提取特征应力为 198.4 MPa。可见通过临界距离理论的点法得到的特征应力稍小于线法得到的特征应力，且点法在实际应用中更为便捷。

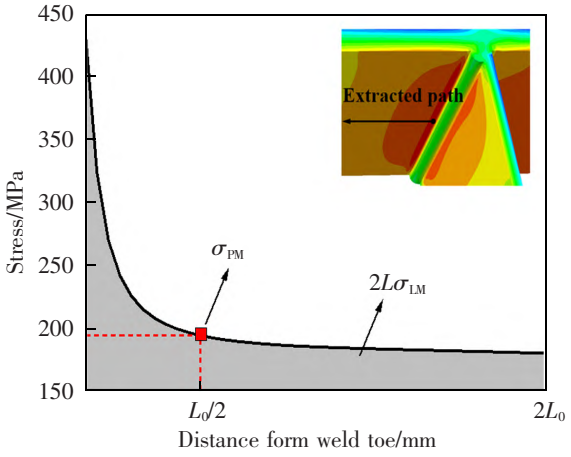

图 17 特征应力的确定

Fig.17 The determination for characteristic stress

采用临界距离理论得到特征应力之后，须确定一条该材料的 S-N 曲线进行疲劳寿命预测。相关学者在应力比 R=0.1 的条件下开展了不同应力水平下的疲劳试验，拟合得到了桥梁钢 Q345qD 的 S-N 曲线，置信度为 99%时 S-N 曲线表达式为

$$\lg N=27.650-9.543\ \lg\Delta\sigma \tag{9}$$

将基于点法和线法得到的焊趾附近的特征应力代入式(9)，求得疲劳寿命分别为 647 298、530 347 次。

通过热点应力法和临界距离理论计算得到 RD 试件的疲劳寿命，将其与试验记录的裂纹萌生时的荷载循环次数 N_0=782 325 进行对比，如图 18 所示。由图 18 可知，热点应力法和临界距离理论预测的疲劳寿命均小于试验值。造成这种误差的原因有很多，首先疲劳试验本身就具有分散性，且数值模型未考虑试验中存在的摩擦与滑移等因素；其次热点应力法忽略了板厚方向应力对构件疲劳强度的影响，且材料的临界距离参数也与实际值未完全一致，从而导致了理论预测值与疲劳试验值之间存在一定误差。其中 FAT90 曲线的预测值最小，与试验值相差最大，将导致过于保守的疲劳设计，这是由于 FAT90 曲线适用于手工角焊缝，焊接质量相比自动角焊缝要差一些；而 FAT 125 曲线的预测值相对接近试验值，两者相差 29%；临界距离理论相比热点应力法能得到更准确的预测结果，其中点法与线法得到预测值与试验值分别相差 17%、32%。

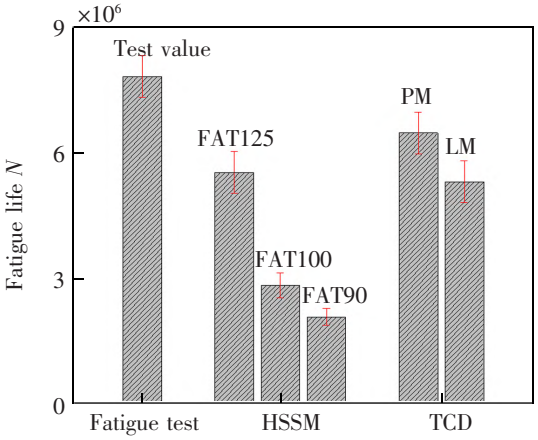

图 18 不同方法确定的疲劳寿命对比

Fig.18 Comparison of fatigue life obtained by different methods

5 结论

1）同一网格密度下，采用 IIW 推荐的两点及三点表面外推法得到的热点应力比较接近，而采用临界距离理论的点法得到的特征应力则小于线法得到的特征应力；

2）IIW 推荐的 FAT90 曲线得到的疲劳寿命预测结果过于保守，而 FAT125 曲线的预测值相对接近试验值，两者相差 29%；临界距离理论相比热点应力法的预测精度更高，点法和线法的预测结果受临界距离参数 L_0 的影响显著，其中点法得到的疲劳寿命预测值与试验值相差 17%，而线法的预测误差达 32%；

3）临界距离理论和热点应力法均可得到偏保守的疲劳寿命预测结果，两种方法用于钢桥面板典型焊接节点的疲劳性能评估是可行且偏于安全的，其中点法的预测效果更好且便于实际工程应用，但总体来看，这两种方法的预测精度均有待进一步提高。

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，冯亚成. 正交异性钢桥面板的疲劳研究综述[J]. 钢结构，2009，24(9)：10-13.
WANG C S，FENG Y C. Review of fatigue research for orthotropic steel bridge decks[J]. Steel Construction，2009，24

(9)：10–13.
[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 Z B. Classification and reasons of typical fatigue cracks in orthotropic steel bridge deck[J]. Steel Construction，2011，26(2)：9–15.
[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 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] 姚悦，吉伯海，高玉强，等. 钢板梁桥腹板间隙变形及力学特征[J]. 华东交通大学学报，2022，39(2)：35–44.
YAO Y，JI B H，GAO Y Q，et al. Deformation and stress characteristics of web gap in steel plate girder bridge[J]. Journal of East China Jiaotong University，2022，39(2)：35–44.
[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. 3D 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] LIU R，JI B H，WANG M，et al. Numerical evaluation of Toe–Deck fatigue in orthotropic steel bridge deck[J]. American Society of Civil Engineers，2015，29(6)：04014180.
[10] IQBAL N，FANG H，NASEEM A，et al. A numerical evaluation of structural hot–spot stress methods in rib–to–deck joint of orthotropic steel deck[J]. Applied Sciences，2020，10：6924.
[11] 崔闯，卜一之，张清华. 正交异性钢桥面板焊缝疲劳性能评估方法[J]. 中国公路学报，2015，28(7)：52–57.
CUI C，BU Y Z，ZHANG Q H. Fatigue property assessment method for weld joint in orthotropic steel bridge deck[J]. China Journal of Highway and Transport，2015，28(7)：52–57.
[12] YOKOZEKI K，MIKI C. Fatigue assessment of various types of longitudinal–to–transverse rib connection in orthotropic steel decks[J]. Welding in the World：2017，61：539–550.
[13] 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 L M，MA H F，XUAN S T，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.
[14] 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 deck[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development，2017，34(9)：68–75.
[15] 鞠晓臣. U 肋–面板全熔透焊接接头疲劳性能试验[J]. 中国公路学报，2019，32(11)：176–183.
JU X C. Experimental study on fatigue performance of penetration welded joints of U–shaped rib–plate[J]. China Journal of Highway and Transport，2019，32(11)：176–183.
[16] ZHU Z W，LI J P，HUANG Y，et al. Hot–spot stress models of cutout detail on orthotropic steel bridge decks[J]. Journal of Constructional Steel Research，2021，183：106762.
[17] 陈卓异，杨宇，李传习，等. 基于临界距离理论的弧形切口疲劳寿命研究[J]. 钢结构，2021，36(10)：1–6.
CHEN Z Y，YANG Y，LI C X，et al. Fatigue life study for floorbeam cutout using the theory of critical distances[J]. Steel Construction，2021，36(10)：1–6.
[18] ZHOU H，WEN J，WANG Z，et al. Fatigue crack initiation prediction of cope hole details in orthotropic steel deck using the theory of critical distances [J]. Fatigue&Fracture of Engineering Materials&Structures，2016(9)：1051–1066.
[19] 姜磊，刘永健，龙辛，等. 基于热点应力法的矩形钢管混凝土组合桁梁桥节点疲劳评估[J]. 交通运输工程学报，2020，20(6)：104–116.
JIANG L，LIU Y J，LONG X，et al. Fatigue assessment of joints in concrete–filled rectangular hollow section composite truss bridges based on hot spot stress method[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering，2020，20(6)：104–116.
[20] TAYLOR D. The theory of critical distances：A new perspective in fracture mechanics[M]. Amsterdam：Elsevier，2007.



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

(责任编辑：吴海燕)