

钢桥面板典型疲劳细节贯穿型疲劳裂纹扩展能力分析

刘文明¹, 胡云耀²

(1. 湖南中大设计院有限公司, 湖南 长沙 410075; 2. 长沙市勘测设计研究院, 湖南 长沙 410007)

摘要: 贯穿型疲劳裂纹对钢桥面板的安全服役构成了严重威胁。以某高速公路斜拉桥钢桥面板为研究对象, 选取纵肋顶板连接部位作为典型疲劳细节, 基于实体有限元软件构建了包含裂纹体子模型的疲劳节段分析有限元模型, 并对贯穿型疲劳裂纹进行了数值模拟分析。计算结果表明: 纵肋顶板连接部位主要受垂直于裂纹面的横向拉应力作用; 贯穿型疲劳裂纹主要表现为张开型疲劳裂纹特征, 裂纹前缘等效应力强度因子峰值接近 $225.0 \text{ N/mm}^{3/2}$, 相比于初始裂纹, 扩展能力显著增强。

关键词: 钢桥; 贯穿型疲劳裂纹; 数值模拟; 等效应力强度因子; 扩展能力

中图分类号: U445.58; TU997

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2026)04-0086-04

Analysis on Penetrating Fatigue Crack Expansion Capability of Typical Fatigue Details in Steel Bridge Decks

LIU Wenming¹, HU Yunyao²

(1. Hunan Zhongda Design Institute Co., Ltd., Changsha 410075, China; 2. Changsha Geotechnical Engineering and Surveying Institute, Changsha 410007, China)

Abstract: Penetrating fatigue cracks pose a serious threat to the safe service of steel bridge decks. Taking the steel bridge deck of an expressway cable-stayed bridge as the research object, selecting the connection part of the longitudinal rib roof as the typical fatigue detail, and based on the solid finite element software, a finite element analysis model of fatigue segment containing a crack body sub-model is established. And the numerical simulation analysis is carried out on the penetrating fatigue cracks. The calculation results show that the connection part of the longitudinal rib roof is mainly subjected to transverse tensile stress perpendicular to the crack surface. The penetrating fatigue cracks mainly exhibit the characteristics of open-type fatigue cracks, and the peak equivalent stress intensity factor at the crack front is close to $225.0 \text{ N/mm}^{3/2}$. Compared with the initial cracks, the expansion capability is significantly enhanced.

Keywords: steel bridge; penetrating fatigue crack; numerical simulation; equivalent stress intensity factor; expansion capability

0 引言

随着工业化、智能化建造的不断发展, 桥梁建造逐渐由传统钢筋和预应力钢筋混凝土结构向钢和钢混结构转变。钢桥在跨径、承载能力、施工方式等方面具有显著优势, 特别是对于特大跨径斜拉桥、悬索桥而言, 钢结构通常是主梁结构的不二之选。21世纪以来, 我国钢桥的应用规模不断加大, 所面临的问题也愈发突出。相比于静力强度、稳定性方面, 疲劳问题是钢桥破坏的主要因素。1971年, 英国大跨径

悬索桥钢箱梁正交异性钢桥面板首次发现了疲劳裂纹; 其后, 欧洲、日本和美国钢桥也陆续出现了一系列疲劳病害。

相关学者对国内早期钢桥面板桥梁疲劳病害进行了统计分析, 发现纵肋顶板连接焊缝疲劳裂纹占比达17.6%^[1]。纵肋顶板连接部位直接受车辆轮载作用, 荷载局部效应较为突出, 该部位一旦形成贯穿型疲劳裂纹, 将直接劣化沥青铺装层, 对钢梁安全性和耐久性构成严重威胁。朱奕瑶^[2]采用单U肋试件, 以试验和理论分析相结合的方法, 对纵肋顶板连接部位失效模式进行了对比分析, 并对其疲劳寿命进行了评估; 江臣等^[3]分析了顶板厚度参数对钢桥疲劳性能的影响; 邹晓琴^[4]通过工艺试验, 揭示了不

收稿日期: 2025-08-08

作者简介: 刘文明(1983—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事桥梁设计及咨询工作。

同制造工艺对纵肋顶板连接部位疲劳性能的影响;张清华等^[5]从钢桥疲劳损伤病害机理出发,探讨了不同疲劳细节加固措施,并对加固体系剩余疲劳寿命进行了阐述;钱媛媛等^[6]采用ANSYS有限元软件,分析了纵肋与横隔板交叉部位贯穿型疲劳裂纹发展规律。从钢桥疲劳相关研究成果发现,对于纵肋顶板连接部位的分析,大多围绕焊缝制造工艺、疲劳寿命评估方法、失效模式分析和加固体系研究等方面,相对缺乏对于贯穿型疲劳裂纹方面的探索^[7-13]。本文基于实际工程案例,采用实体有限元软件,在纵肋顶板连接部位引入贯穿型疲劳裂纹并对其进行了分析研究。相关结果可提高研究人员对于构造细节疲劳性能的全面认识。

1 主导失效模式

钢桥面板疲劳性能受焊接工艺、几何构型、外部荷载等多重因素影响,因此具有多失效模式特点。对于纵肋顶板连接部位而言,疲劳失效模式分别为焊根起裂顶板扩展模式(裂纹Ⅰ)、焊趾起裂顶板扩展模式(裂纹Ⅱ)、焊根起裂焊喉扩展模式(裂纹Ⅲ)、焊趾起裂纵肋扩展模式(裂纹Ⅳ)这4类(见图1)。

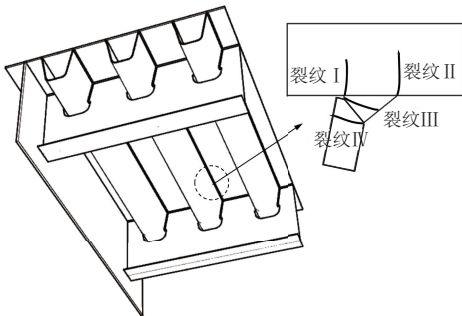


图1 纵肋顶板连接部位疲劳失效模式

研究表明^[1],纵肋顶板连接部位疲劳开裂中裂纹Ⅰ占比最多,疲劳损伤最大,是该疲劳细节主导疲劳失效模式。此外,纵肋顶板连接焊缝在焊接过程中,容易在焊根处引入焊瘤、气孔、夹杂等焊接缺陷,焊接缺陷的存在使该细节应力集中更为显著,带来了裂纹扩展的潜在风险。本文所分析的纵肋顶板连接部位贯穿型疲劳裂纹主要针对主导疲劳失效模式(裂纹Ⅰ)而开展。

2 工程背景

某高速公路按照双向8车道设计,设计速度为120 km/h,控制性工程为跨径600 m级特大跨径斜拉桥,桥面板采用正交异性钢桥面板结构。由于钢桥

面板疲劳问题为局部问题,参考相关文献^[1,14-16],为真实反映顶板、纵肋、横肋及其联合作用受力情况,横向取5个纵肋、纵向取4个横肋进行构造细节的疲劳效应数值模拟分析。节段几何模型中顶板、横肋厚度分别为16、14 mm;纵肋高度和厚度分别为8、300 mm;横肋高度为700 mm;钢桥面板钢材强度等级为Q345qD。选取第2跨跨中处中间纵肋一侧纵肋顶板连接部位为关注位置,按照《公路钢结构桥梁设计规范》(JTG D64—2015)中标准疲劳车尺寸进行加载,轮载大小和轴距与上述规范保持一致。

节段几何模型和加载位置示意图见图2。

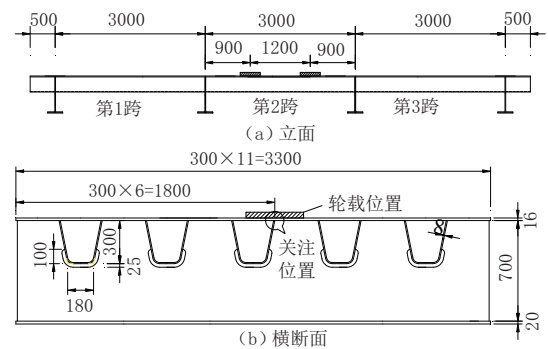


图2 节段几何模型和加载位置示意图(单位:mm)

3 贯穿型疲劳裂纹

钢桥面板裂纹扩展具有一定的规律性,相关文献研究表明^[1,6]:初始裂纹形状为半椭圆形或半圆形;扩展过程中的形状与半椭圆形基本相似。结合裂纹扩展规律,贯穿型疲劳裂纹深度方向取22 mm,1/2长度方向取44 mm,形状为半椭圆形。为对比扩展能力,将初始裂纹简化为半圆形,半径为0.5 mm^[8]。疲劳裂纹示意图见图3。

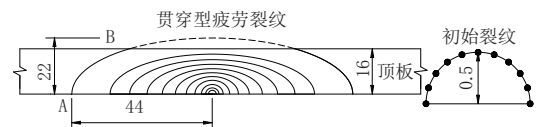


图3 疲劳裂纹示意图(单位:mm)

4 有限元模型

根据所选取的节段几何模型在钢箱梁中所处的位置,对钢桥面板进行XYZ向(横桥向、竖桥向和纵桥向)约束,具体如下:

对横桥向两侧顶板进行X方向约束,对于所有横肋的底板进行Y方向约束,对于纵桥向一侧的顶板和纵肋进行Z方向约束,以模拟周围梁段对于模型的支承作用,且保证模型纵桥向具有自由度。

实际建模时,对于纵肋顶板连接部位分析关注

位置的网格进行细化处理,网格尺寸控制在2 mm以内,单元采用solid95;非关注区域采用solid45单元。参考相关文献^[6],为求解裂尖单元应力强度因子,采用楔形体单元对裂尖单元进行模拟。

本文所建立的有限元模型见图4。

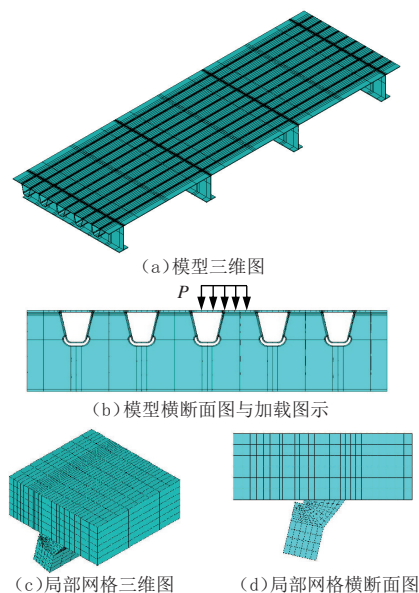


图4 有限元模型

5 计算结果

5.1 应力分析

钢桥面板纵肋顶板连接部位直接承受轮载作用,应力分布较为复杂。结合桥面板纵横向受力差异,此处分别提取纵肋顶板连接部位局部关注位置的横桥向和纵桥向应力进行分析,其应力分布见图5。

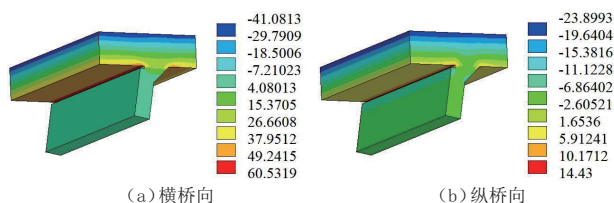


图5 应力分布(单位:MPa)

计算结果表明:(1)纵肋顶板连接部位最大横向拉应力和纵向拉应力均位于焊根处,分析结果与该疲劳细节主导疲劳失效模式相呼应;(2)纵肋顶板连接部位最大横向拉应力和纵向拉应力分别为60.5、14.4 MPa,两者差距较大,表明该疲劳细节主要受横桥向应力作用,这与疲劳裂纹沿纵桥向扩展特征相符。根据应力分布情况,远离焊根和焊趾处,应力梯度降低较快,在进行构造细节设计时,应优化设计参数和严控焊接工艺,以降低应力集中程度。

5.2 应力强度因子分析

等效应力强度因子 K_{eff} 是判断疲劳裂纹扩展能力的关键参数,其数值越大,扩展能力越强。 K_{eff} 的基本形式包括 K_I (张开型应力强度因子)、 K_{II} (滑开型应力强度因子)和 K_{III} (撕开型应力强度因子),参考相关文献^[6], K_{eff} 的表达式为:

$$K_{\text{eff}} = \sqrt{K_I^2 + K_{II}^2 + \frac{K_{III}^2}{1 - \nu}} \quad (1)$$

式中: ν 为泊松比,钢材取0.3。

为便于对比分析,将裂纹前缘曲线沿路径进行归一化处理,即设裂纹全长为单位1,其中,初始裂纹为半圆形曲线,贯穿型裂纹为图3中的AB曲线。计算得到的初始裂纹和贯穿型裂纹前缘应力强度因子变化曲线如图6、图7所示,其中,对于图6而言,横坐标为裂纹前缘至裂纹一端的长度与裂纹前缘总长度之比;对于图7而言,横坐标为裂纹前缘至裂纹端点A的长度与裂纹AB总长度之比。

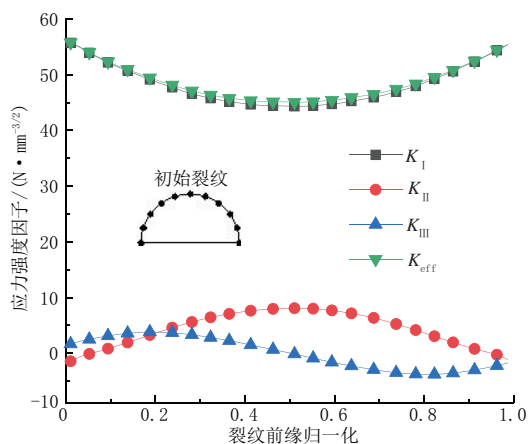


图6 初始裂纹前缘应力强度因子变化曲线

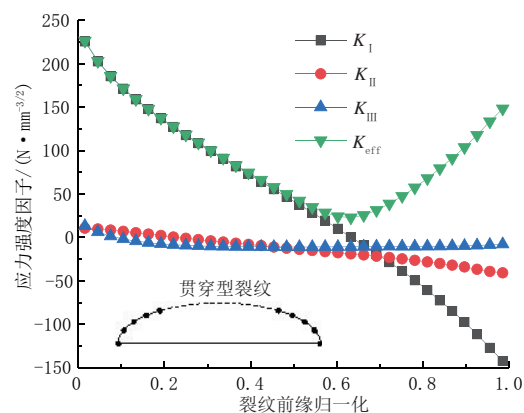


图7 贯穿型裂纹前缘应力强度因子变化曲线

计算结果表明:(1)初始裂纹和贯穿型裂纹前缘 K_{II} 和 K_{III} 数值较小,等效应力强度因子数值与I型应力强度因子较为接近,因此,纵肋顶板连接部位主导疲劳失效模式下的疲劳裂纹特征主要表现为张开型

特征;(2)贯穿型裂纹在两端处(即A和B)的等效应力强度因子均较大,最大值位于顶板底面裂纹前缘处,其数值为 $225.0\text{ N/mm}^{3/2}$,相比于初始裂纹等效应力强度因子最大值 $55.7\text{ N/mm}^{3/2}$,贯穿型裂纹扩展能力显著增强。

6 结 语

(1)纵肋顶板连接部位疲劳应力以横桥向应力为主,主导疲劳失效模式具有显著的张开型疲劳裂纹特征。

(2)纵肋顶板连接部位贯穿型疲劳裂纹在顶板两端贯穿处的等效应力强度因子均较大,最大值为初始裂纹等效应力强度因子的4倍,裂纹扩展能力明显增强。后期管养时应采取有效加固措施,避免该裂纹形成长大裂纹。

参考文献:

[1] 张清华. 钢桥面板疲劳问题:理论方法与工程应用[M]. 北京:科学出版社,2024.
 [2] 朱奕瑶. 正交异性钢桥面板U肋顶板焊缝疲劳失效模式及寿命评估[D]. 天津:天津大学,2023.
 [3] 江臣,苏庆田,郭赵元,等. 顶板厚度对组合桥面板U肋与顶板构造疲劳性能的影响[J]. 结构工程师,2023,39(4):26-34.

[4] 邹晓琴. 正交异性钢桥面板U肋顶板全熔透焊缝制造工艺与疲劳性能研究[J]. 公路,2024,69(9):72-78.
 [5] 张清华,李俊,崔闯,等. 钢桥面板疲劳开裂加固处治关键问题研究进展[J]. 中国公路学报,2024,37(5):246-266.
 [6] 钱媛媛,郭云锋. 钢桥面板纵肋围焊处贯穿型疲劳裂纹数值模拟分析[J]. 公路与汽运,2023(6):106-108.
 [7] 张华,张清华,宋神友,等. 正交异性钢桥面板制造技术发展现状综述[J]. 钢结构(中英文),2022,37(4):1-13.
 [8] 高锦纯. 钢桥面板横隔板新型开孔构造细节疲劳寿命评估[J]. 城市道桥与防洪,2025(5):92-95.
 [9] 苟文忠,苏晨,韩帅,等. 基于结构应力法的正交异性钢桥面板疲劳寿命预测分析研究[J]. 公路,2024,69(9):149-158.
 [10] 卢海林,周佳锋,郝静,等. 基于应变场强法的钢桥面板顶板-纵肋焊接节点疲劳寿命预测[J]. 材料导报,2024,38(增刊1):504-508.
 [11] 袁周致远,吉伯海,夏良辰. 钢桥面板顶板-U肋焊缝疲劳失效研究综述[J]. 交通科学与工程,2025,41(2):11-19.
 [12] 陈金州,冯鹏程,郭福宽,等. 在役正交异性桥面板U肋内焊加固参数的研究[J]. 公路,2025,70(4):135-140.
 [13] 姜旭,吕志林,强旭红,等. Fe-SMA主动加固钢桥面横隔板弧形切口疲劳裂纹实桥应用研究[J]. 桥梁建设,2024,54(3):54-60.
 [14] 邓斌. 铺装层对钢桥面板纵肋连接细节疲劳性能的影响[J]. 广东公路交通,2023,49(5):28-31;37.
 [15] 黄雯,刘德泉. 轮载形式对钢桥面板疲劳应力的影响分析[J]. 西部交通科技,2025(3):150-151;186.
 [16] 周北石. 不同初始裂纹角度对钢桥面板围焊细节疲劳性能的影响研究[J]. 西部交通科技,2025(1):180-182.

《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

官方网址:<http://www.csdqyfh.com> 电话:021-55008850 联系邮箱:roadbridgeflood@163.com

