

初始缺陷角度对钢桥面纵肋顶板焊缝 应力强度因子影响分析

赵辛玮

[上海城建城市运营(集团)有限公司, 上海市 200023]

摘要: 初始缺陷在钢桥面板工厂焊接加工时难以避免,是影响钢桥面疲劳性能的重要内在因素。为研究初始缺陷角度对纵肋顶板焊缝疲劳开裂的影响,建立了包含典型初始缺陷工况条件下的有限元模型,分析得到了裂纹前缘应力强度因子。计算结果表明:竖向初始缺陷状态下的裂纹扩展能力最强;初始缺陷从竖向偏转至 45° 过程中,偏转角越大,张开型应力强度因子越小,滑开型和撕开型应力强度因子越大。断裂参数数值计算方法与分析结果可为相关钢桥面构造抗疲劳分析提供参考。

关键词: 初始缺陷;纵肋顶板焊缝;疲劳开裂;数值分析;应力强度因子

中图分类号: U441.42

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2024)04-0257-04

0 引言

随着交通建设工业化、自动化和智能化的不断发展,传统混凝土结构桥梁施工上开始向装配率高的预制构件、生产效率高的智慧梁场迈进,设计上也进行了钢结构、组合结构、高性能混凝土材料等探索与尝试。目前,在设计方面无论是大跨还是常规中小跨径桥梁,适应低碳智能建造的钢桥应用占比在逐年增加,安全环保意识也逐年提升。相比于传统混凝土结构桥梁,钢桥强度高、施工速度快;但另一方面,后期养护成本高,不同板件焊接处应力集中程度高,反复轮载作用下,在大流量、重车比例相对较高的高速公路桥梁上易产生疲劳破坏。

钢桥面板在钢桥建设中扮演着不可替代的角色,在梁场可以完成钢梁节段的拼装,然后,将节段梁运输至工地,通过机械吊装与既有纵、横桥向钢梁节段进行焊接连接形成全桥。近年来,由于纵肋间连接焊接施工难度大,易发生疲劳破坏,该细节已逐渐被栓接连接所代替。因此,除该细节外钢桥面板基本为焊接结构,焊缝质量是疲劳研究中的重要组成部分。张清华等探讨了钢桥面板疲劳细节裂纹分类、疲劳研究方法和疲劳失效机理。研究表明纵肋顶板焊缝疲劳裂纹占比为18.9%^[1]。赵毅等分析了纵肋顶板

焊缝产生疲劳裂纹的内外部因素并对其未来发展方向进行了展望^[2]。吴晓东和朱金柱分析了不同结构参数组合下的钢桥典型细节裂纹扩展规律^[3]。张华等探讨了钢桥制造理念、焊缝优化改进措施和内焊技术及先进检测设备^[4]。唐琨等通过引入多裂纹形式对纵肋顶板焊缝疲劳性能进行了深入研究^[5]。目前关于纵肋顶板初始缺陷的研究思路多种多样,但总体关注裂纹扩展规律和疲劳寿命,对于初始缺陷本身特征的研究较少。

本文通过分析不同初始缺陷角度对纵肋顶板焊缝应力强度因子的影响,为钢桥面焊接构造抗疲劳性能相关后续研究提供参考。

1 分析对象

纵肋顶板焊缝多分布在横隔板节段内,大多数钢桥通常采用单面熔透焊连接,熔透率不小于75%,焊接工艺主要包括埋弧焊和气体保护焊两种形式,焊接电流稳定,焊缝外观成型质量较好。钢结构出厂前,必须完成焊缝焊接缺陷的检测,由于钢桥面板焊缝分布广,抽检的焊缝质量往往不能准确代表全桥焊缝,因此初始缺陷基本不可避免。相关文献研究表明^[6]:面状缺陷疲劳效应比体状缺陷差,断裂力学分析时大多将初始缺陷简化为面状形式。因此,现所分析的初始缺陷为面状形式。纵肋顶板焊缝示意如图1所示。

收稿日期: 2023-05-15

作者简介: 赵辛玮(1986—),男,博士,工程师,从事道路基础设施运维工作。

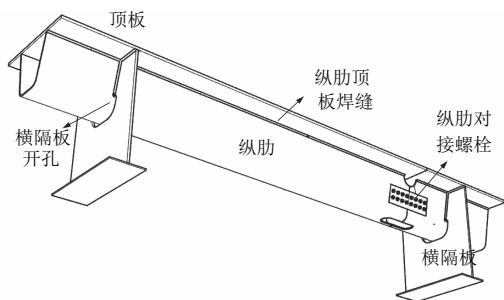


图1 纵肋顶板焊缝示意图

2 初始缺陷

面状初始缺陷主要包括两类:半圆形和半椭圆形。半椭圆形裂纹呈扁平状,裂纹前缘曲率随长轴方向变化速度快,在确保计算精度的前提下,对裂纹前缘单元要求较高。关于钢桥面板典型焊接细节的断裂数值模拟,两类面状初始缺陷应用均较多,此处为计算方便,参考相关文献[6,7],取半圆形形式,半径 $R=0.5\text{ mm}$ 。纵肋顶板焊缝疲劳失效主要产生于焊根位置,因而此次分析主要计算焊根部位的应力强度因子。考虑到初始缺陷通常沿顶板厚度方向分布,结合焊根受力特点,取7种不同角度的初始缺陷进行分析,初始缺陷示意图如图2所示。其中,裂纹1至裂纹7依次相差 15° ,裂纹4为竖向初始缺陷,裂纹7为偏向焊缝方向的裂纹。

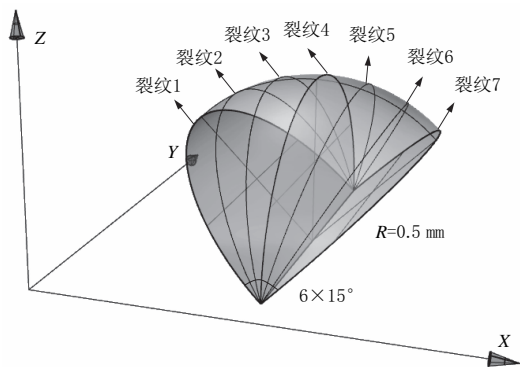


图2 初始缺陷示意图

3 数值分析有限元模型

3.1 工程背景

钢桥疲劳分析与全桥整体静力分析尺度上存在明显差异。疲劳分析偏向于局部,主要关注受轮载影响范围内的足尺节段,其余区域建模时可不予考虑[6,7]。现以文献[8]中某高速公路过江通道斜拉桥钢桥面板为工程背景,基于前述原则确定其节段足尺几何模型。疲劳荷载根据《公路钢结构桥梁设计规范》(JTG D64—2015)采用计算模型Ⅲ进行加载[9]。由于标准疲劳车纵桥向长度较长(整车最前轮和最

后轮距离 $8\,400\text{ mm}$),大于相邻隔板间距,横桥向长度为 $2\,000\text{ mm}$,相邻前后轮距离 $1\,200\text{ mm}$,可布置在一个横隔板节间内。再就纵肋顶板焊缝疲劳应力影响面分布情况而言,轮载主要受单侧前后轮的影响。相应单轮加载面积为 200 mm (纵桥向) $\times$ 600 mm (横桥向),按照最不利荷载布置并考虑3倍的超载系数,得到工程背景节段足尺几何构造尺寸与加载方案如图3所示,其中关注细节位于跨中截面1#纵肋处。

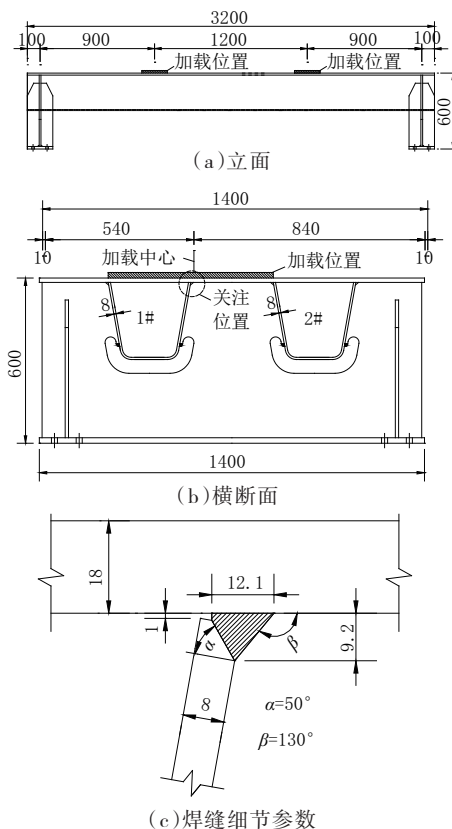


图3 工程背景节段足尺几何构造尺寸与加载方案图(单位:mm)

3.2 应力强度因子

根据裂纹的力学特征,疲劳开裂存在三种基本形式:张开型、滑开型和撕开型,对应应力强度因子分别为 K_I 、 K_{II} 、 K_{III} ,相应数值可通过相互作用积分原理求解[6]。

轮载作用下的纵肋顶板焊缝受力复杂,疲劳开裂多呈现为复合开裂状态,等效应力强度因子 K_{eff} 通常由三种基本开裂形式下的应力强度因子计算得到,见式(1)。等效应力强度因子越大,裂纹扩展能力越强。

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

3.3 数值分析有限元模型

针对所关注的纵肋顶板焊缝疲劳细节,初始缺

陷裂纹前缘采用15节点楔形奇异单元模拟,关注位置焊缝区域采用20节点六面体实体单元模拟,其余区域采用8节点六面体实体单元模拟。利用ANSYS有限元软件将各板件和焊缝进行单元离散化,其中焊缝局部网格做适当加密处理,本文所建立的数值分析有限元模型如图4所示。

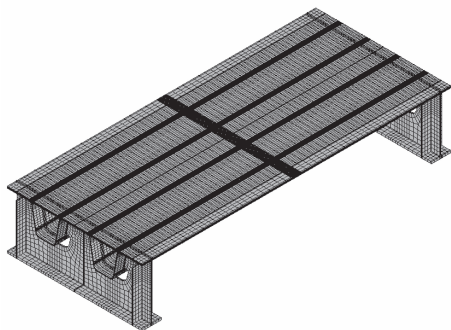


图4 数值分析有限元模型

4 结果分析

按照图2所示7种不同初始缺陷工况,在关注位置焊根处分别引入初始缺陷,为保证计算精度,将裂纹前缘楔形奇异单元尺寸控制在0.05 mm以内。将裂纹前缘路径长度进行归一化处理,裂纹两端分别为0和1,裂纹中心处为0.5,分别计算得到不同初始缺陷工况条件下的三种基本开裂形式的应力强度因子变化曲线和等效应力强度因子变化曲线如图5和图6所示。

计算结果表明:(1)三种基本开裂模式应力强度因子数值与初始缺陷角度密切相关。就张开型开裂模式而言,裂纹5状态下 K_I 整体水平最高,略高于裂纹4;裂纹1状态下 K_I 整体水平最低(低于裂纹7状态下 K_I),表明同等偏转角度下,偏向焊缝方向的裂纹对于张开型开裂模式更为不利。就滑开型开裂模式而言,裂纹5状态下,裂纹受平行于沿初始缺陷角度方向的剪应力较小, K_{II} 整体水平最低,其数值接近于0,同等偏转角度下,背离焊缝方向的裂纹对于滑开型开裂模式更为不利。就撕开型开裂模式而言,不同初始缺陷角度下 K_{III} 数值相对于裂纹中心处均呈反对称状态,裂纹4状态下, K_{III} 整体水平最低。初始缺陷偏转角度越大, K_{III} 整体水平越高。(2)从三种基本开裂模式应力强度因子数值来看,纵肋顶板焊缝在标准疲劳车轮载作用下整体处于复合开裂状态。其中,相对于竖向初始缺陷而言,当初始缺陷偏转角度不超过15度时, K_{II} 和 K_{III} 数值占比相对较小,该焊缝开裂主要以I型开裂为主,当初始缺陷偏转角度大于15度时,三维裂纹特征愈加明显。(3)从等

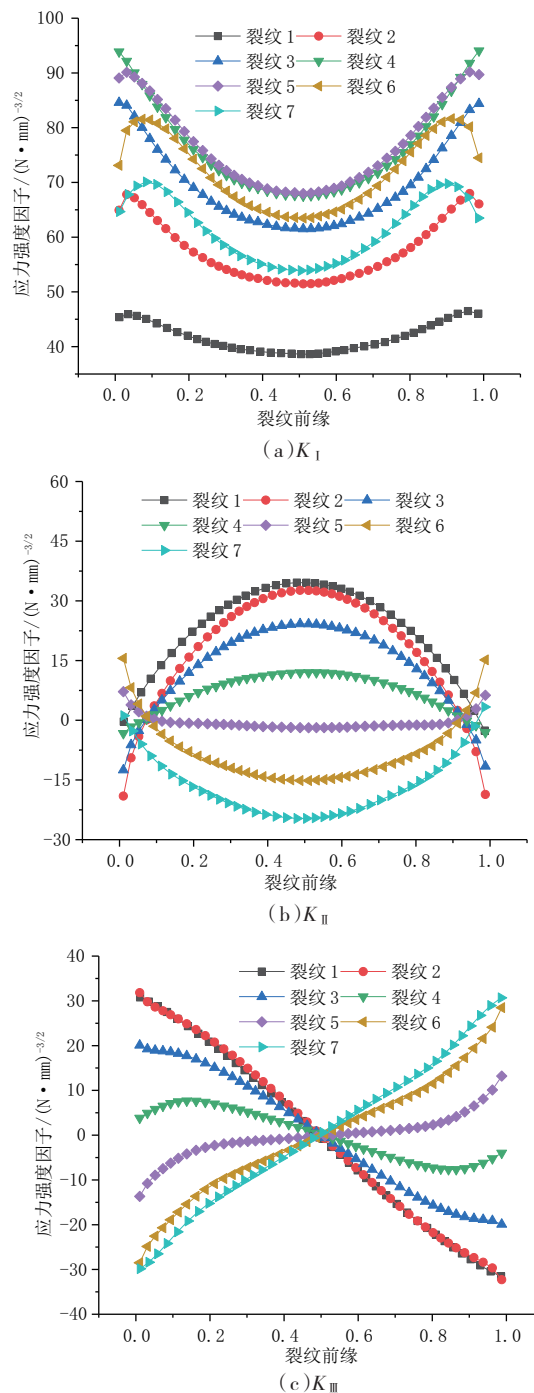


图5 三种基本开裂形式应力强度因子变化曲线图

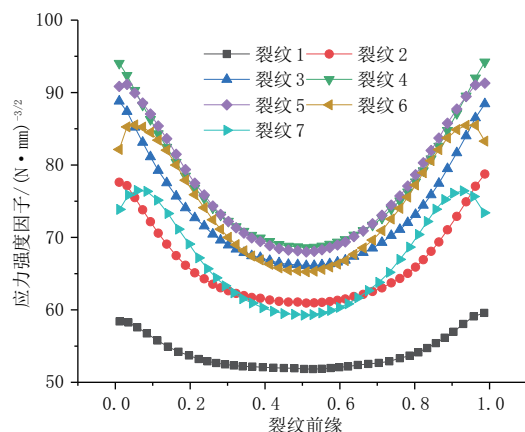


图6 等效应力强度因子变化曲线图

效应力强度因子数值来看,竖向初始缺陷状态下的裂纹4整体水平最高,扩展能力最强。同等偏转角度下,偏向焊缝方向的裂纹扩展能力强于背离焊缝方向的裂纹。

5 结 语

本文以某高速公路过江通道斜拉桥钢桥面板纵肋顶板焊缝关注细节为研究对象,分析了不同初始缺陷角度下的应力强度因子,主要结论如下。

(1)纵肋顶板焊缝疲劳开裂表现为由张开型、滑开型和撕开型三种基本开裂组成的复合开裂状态。就同一偏转方向而言,初始缺陷在偏转至 45° 过程中,偏转角越大, K_I 越小, K_{II} 和 K_{III} 越大,但 K_I 整体水平最高。

(2)纵肋顶板焊缝竖向初始缺陷等效应力强度因子整体水平最高,裂纹扩展能力最强。另外,同等偏转角度下,偏向焊缝方向的初始缺陷开裂风险较高。建议采用断裂力学方法分析纵肋顶板焊缝疲劳开裂

时,应结合裂纹实际断面特征,充分考虑初始缺陷的几何位置和偏转角度,以便更为准确地评估其疲劳寿命。

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):14-30,39.
- [2] 赵毅,王恒,李力.正交异性钢桥面板裂纹成因分析及疲劳性能改善措施综述[J].公路交通技术,2022,38(6):37-42.
- [3] 吴晓东,朱金柱.不同参数组合下纵肋顶板焊趾处裂纹扩展变化规律分析[J].工程与建设,2022,36(1):10-12,22.
- [4] 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.
- [5] 唐琨,赵秋,黄冠铭,等.钢桥面板纵肋顶板焊缝多裂纹扩展特性[J].南昌大学学报(工科版),2022,44(3):254-264.
- [6] 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.
- [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.
- [8] 卜一之,金通,李俊,等.纵肋与横隔板交叉构造细节穿透型疲劳裂纹扩展特性及其加固方法研究[J].工程力学,2019,36(6):211-218.
- [9] JTG D64—2015,公路钢结构桥梁设计规范[S].

《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

投稿网站:<http://www.csdqyfh.com> 电话:021-55008850 联系邮箱:cdq@smedi.com