

钢桥面板与纵肋双面焊焊接细节应力强度因子有限元分析^{*}

赵辛玮

(上海城建城市运营(集团)有限公司, 上海 200023)

摘要: 正交异性钢桥面板疲劳开裂严重影响结构安全。为研究钢桥面板与纵肋双面焊接细节的疲劳开裂机理,文中运用有限元软件,采用相互作用积分法对顶板—纵肋内侧焊缝典型疲劳裂纹应力强度因子进行数值计算,分析裂纹扩展变化规律并对疲劳寿命进行评估。

关键词: 桥梁;钢桥面板;纵肋;双面焊接细节;疲劳开裂;应力强度因子

中图分类号: U445.4

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2023)04-0100-03

正交异性钢桥面板在桥梁建设中应用广泛。随着车流量的增加及大件运输比例的提高,正交异性钢桥面板多个构造细节出现一系列疲劳裂纹,严重影响结构安全。钢桥面板不同板件相互焊接所引起的局部构型不连续、应力集中效应突出是导致疲劳裂纹产生的本质因素,且焊接时难以避免产生局部夹杂、气孔、焊瘤等初始焊接缺陷,在一定程度上放大了应力集中效应,使疲劳裂纹更容易产生。文献[1]的研究表明钢桥面板与纵肋焊接细节疲劳裂纹在正交异性钢桥面板中占30.2%,该细节早期疲劳裂纹难以得到有效监测,往往在裂穿顶板铺装层形成长大裂纹且桥面板力学特性发生明显变化后才得以捕捉,严重威胁行车安全,是钢桥打造为品质工程的“痛点”。为此,文献[2]提出双面焊新型构造细节,并结合足尺模型疲劳试验和有限元数值分析对其进行了分析。文献[1]采用ABAQUS有限元软件对横隔板处钢桥面板与纵肋双面焊焊接细节残余应力进行了分析。考虑到钢桥面板与纵肋双面焊焊接细节具有多种典型疲劳裂纹,且隔板间的顶板与纵肋双面焊焊接细节内侧焊趾在实际运营中易出现疲劳开裂,本文基于线弹性断裂力学基本理论,采用ANSYS有限元软件对萌生于纵肋内侧焊缝顶板焊趾向顶板厚度方向扩展的疲劳裂纹进行数值模拟,分析不同扩展深度下应力强度因子,并对该裂缝产生时的疲劳寿命进行评估,为钢桥面抗疲劳设计提供参考。

1 钢桥面板与纵肋双面焊焊接细节及典型疲劳裂纹

一般钢桥面板与纵肋双面焊焊接细节先施焊纵肋内侧角焊缝,然后施焊纵肋外侧坡口焊缝,坡口焊缝焊接参数及焊缝尺寸与传统单面焊基本一致。根据文献[3-4],由于内侧角焊缝焊接质量难以控制,钢桥面板与纵肋双面焊焊接细节内侧焊趾处容易产生初始焊接缺陷,同时焊趾处应力集中显著,局部反复荷载作用下易产生疲劳裂纹。文献[4]通过试验加载,得到了图1所示双面焊内侧焊趾疲劳裂纹。

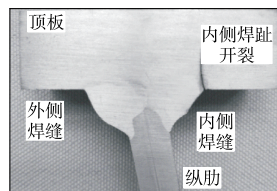


图1 双面焊焊接细节内侧焊趾疲劳裂纹

为便于展示裂纹分布情况,取钢桥面板与纵肋右上方相交处双面焊焊接细节(见图2)进行分析。

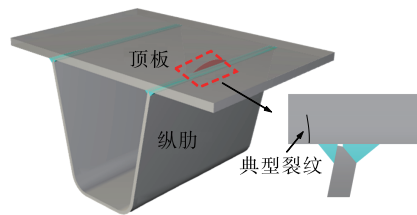


图2 钢桥面板与纵肋右上方相交处双面焊焊接细节及典型裂纹

^{*} 基金项目: 中华人民共和国住房和城乡建设部研发项目(2022-K-175)

5 计算结果分析

经计算,初始裂纹沿板厚方向前缘点的等效应力强度因子幅值为 $74.7 \text{ N/mm}^{3/2}$,大于裂纹扩展阈值($63 \text{ N/mm}^{3/2}$),裂纹能够扩展;裂纹扩展至 24 步时,裂纹深度达到 9 mm,达到临界裂纹扩展深度,判定疲劳失效^[5],此时中裂纹对应长度为 9.3 mm。裂纹扩展全过程中,中裂纹处 I 型、II 型和 III 型应力强度因子幅值 ΔK_I 、 ΔK_{II} 和 ΔK_{III} 随裂纹深度的变化见图 7。由图 7 可知:1) 在萌生于纵肋内侧焊缝顶板焊趾向顶板厚度方向扩展的中裂纹处, ΔK_I 较大, ΔK_{II} 和 ΔK_{III} 极小,表明该细节裂纹形式主要表现为张开型疲劳裂纹,基本不具有滑开型和撕开型裂纹特征;2) 中裂纹扩展至 6.5 mm 时, ΔK_I 达到峰值。

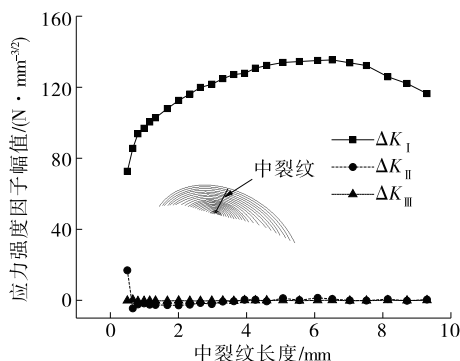


图 7 ΔK_I 、 ΔK_{II} 和 ΔK_{III} 变化曲线

根据 PARIS 公式,等效应力强度因子幅值直接决定裂纹扩展速率,按式(1)计算中裂纹 ΔK_{eff} ,结果见图 8。由图 8 可知:1) 中裂纹扩展至 6.5 mm 前,裂纹扩展速率越来越快;超过 6.5 mm 后,裂纹扩展速率逐渐下降。2) 裂纹扩展全过程中,等效应力强度因子幅值始终大于扩展阈值,中裂纹达到临界裂纹扩展深度时, $\Delta K_{eff} = 116.5 \text{ N/mm}^{3/2}$,裂纹仍具有较强的扩展能力,存在裂穿顶板的风险。

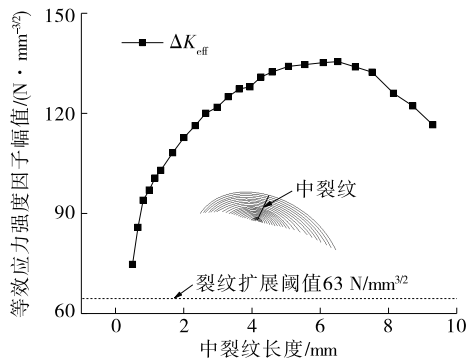


图 8 ΔK_{eff} 变化曲线

根据 ΔK_{eff} 计算结果,联合 PARIS 公式进行疲劳寿命 N_f 评估,计算公式如下:

$$N_f = \sum \frac{\Delta a_m}{C(\Delta K_{eff})^m} \quad (3)$$

经计算,在所选荷载工况下,钢桥面板与纵肋双面焊接细节在纵肋内侧焊缝顶板焊趾向顶板厚度方向存在裂纹时的疲劳寿命为 1 014 万次。

6 结论

(1) 对钢桥面板与纵肋双面焊接细节中萌生于纵肋内侧焊缝顶板焊趾向顶板厚度方向扩展的疲劳裂纹扩展情况进行数值模拟,得到中裂纹应力强度因子幅值,对裂纹扩展规律的分析结果表明张开型裂缝占主导地位。

(2) 通过 PARIS 公式对疲劳寿命进行评估,结果表明钢桥面板与纵肋双面焊接细节在纵肋内侧焊缝顶板焊趾向顶板厚度方向存在裂纹时的疲劳寿命为 1 014 万次。

参考文献:

- [1] 郭亚文.钢桥面板横隔板处纵肋与顶板焊接细节疲劳性能研究[D].成都:西南交通大学,2019.
- [2] 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.
- [3] 罗鹏军,张清华,龚代勋,等.钢桥面板 U 肋与顶板双面焊连接疲劳性能研究[J].桥梁建设,2018,48(2):19-24.
- [4] 张清华,李俊,袁道云,等.深圳至中山跨江通道钢桥面板结构疲劳试验研究[J].土木工程学报,2020,53(11):102-115.
- [5] 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+110.
- [6] YAU J F, WANG S S, CORTEN H T. A mixed-mode crack analysis of isotropic solids using conservation laws of elasticity[J]. Journal of Applied Mechanics, 1980, 47(2): 335-341.
- [7] 俞树荣,吴艳萍,荆炀.表面裂纹的三维模型及应力强度因子计算[J].兰州理工大学学报,2017,43(1):160-164.
- [8] 中交公路规划设计院有限公司.公路钢结构桥梁设计规范:JTG D64—2015[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2015.

收稿日期:2022-04-22