

钢桥面板纵肋围焊处贯穿型疲劳裂纹数值模拟分析

钱媛媛, 郭云锋

(湖北省交通规划设计院股份有限公司, 湖北 武汉 430051)

摘要: 纵肋围焊处疲劳裂纹是钢桥面板典型疲劳裂纹之一, 该细节的疲劳裂纹易裂穿纵肋形成长大裂纹, 对行车安全构成严重威胁。文中依托某工程项目, 利用有限元软件对钢桥面板纵肋围焊处贯穿型疲劳裂纹进行数值模拟。结果表明, 钢桥面板纵肋围焊处贯穿型疲劳裂纹表现为以 I ~ II 型为主的复合开裂模式, 主要受纵肋正上方局部轮载作用, 桥梁运营养护中应加强该位置疲劳裂纹检测。

关键词: 桥梁; 钢桥面板; 贯穿型疲劳裂纹; 纵肋; 围焊; 应力强度因子

中图分类号: U441.4

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2023)06-0106-03

钢桥面板在制造过程中不可避免地产生多种焊缝, 局部轮载作用下焊缝处应力幅较大, 加上焊接中常产生气孔、夹杂等初始缺陷, 关键受力焊缝易出现疲劳开裂, 其中纵肋围焊处的疲劳裂纹占比较高, 是目前钢桥面板疲劳问题研究的重点部位之一。

相关学者采用不同分析方法对钢桥面板纵肋围焊构造细节进行了研究。黄云等采用断裂力学分析方法, 通过钢桥面板纵横向受力分析, 对比分析了围焊处不同裂纹形式对疲劳性能的影响^[1]; 王万威采用名义应力法分析了不同开孔形式对围焊处应力的影响^[2]; 崔闯等采用热点应力法得到了围焊处疲劳寿命^[3]; 王春生等采用扩展有限元法研究了钢桥面板疲劳裂纹耦合扩展机理, 实现了裂纹动态扩展模拟^[4]; 刘仕茂等采用热点应力法计算钢桥面板与纵肋双面焊焊接细节的热点应力历程, 分析了该细节的疲劳性能^[5]; 赵辛玮运用有限元软件, 采用相互作用积分法计算顶板—纵肋内侧焊缝典型疲劳裂纹应力强度因子, 分析了钢桥面板与纵肋双面焊接细节的疲劳开裂机理^[6]。以上研究缺少对钢桥面板围焊处贯穿型疲劳裂纹的分析。实桥中检测到的疲劳裂纹尺寸较大, 大多已裂穿纵肋, 开展围焊处贯穿型疲劳裂纹研究具有重要意义。

1 钢桥面板纵肋围焊处疲劳裂纹

钢桥面板疲劳裂纹具有多发性, 不仅不同细节会出现疲劳裂纹, 同一细节也会出现不同疲劳抗力的裂纹形式。钢桥面板纵肋围焊处疲劳裂纹见图 1。参考文献[7-8], 该细节存在 3 种疲劳裂纹

形式: 裂纹 1 为最常见且受力最薄弱的疲劳裂纹, 该裂纹萌生于围焊处, 沿纵肋厚度扩展, 裂穿纵肋后继续斜向向上沿纵肋扩展至顶板, 该裂纹为典型的贯穿型疲劳裂纹; 裂纹 2 为萌生于纵肋与横隔板连接处的裂纹, 该裂纹沿横隔板厚度扩展, 为横隔板面内裂纹形式, 一般不宜扩展至顶板位置; 裂纹 3 为萌生于横隔板开孔处的裂纹, 沿横隔板厚度扩展, 与裂纹 2 一样, 为横隔板面内裂纹形式, 该裂纹的形成与开孔处局部几何特征密切相关。一般钢板母材处疲劳裂纹难以发生, 因此主要研究第一种裂纹形式。

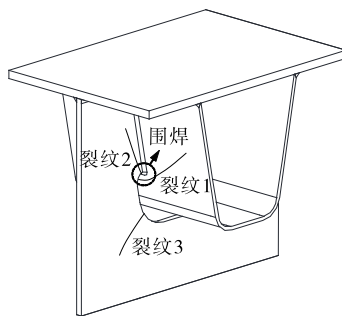


图 1 钢桥面板围焊裂纹示意图

2 研究对象

以某斜拉桥钢桥面板为研究对象, 横隔板开孔采用梯形开孔形式。由于钢桥面板疲劳问题为局部应力响应问题, 分析模型截取局部节段桥面板。选取横向 3 个纵肋, 纵向取两跨横隔板间距进行分析, 模型横断面见图 2。横隔板间距为 3 000 mm, 顶板、横隔板、纵肋厚度分别为 16 mm、14 mm、8 mm。纵肋围焊由于机器不便于施焊, 往往采用手

工焊进行焊接,焊接尺寸为 8 mm。纵肋高度为 300 mm,横隔板高度为 700 mm。

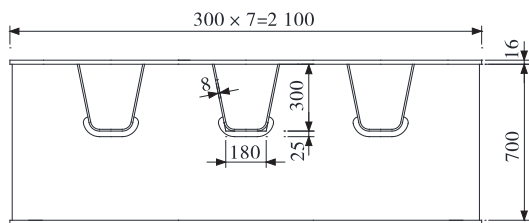
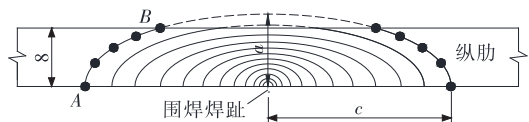


图2 某斜拉桥钢桥面板分析模型横断面(单位:mm)

3 应力强度因子

3.1 裂纹尺寸

确定裂纹尺寸是计算应力强度因子的前提。裂纹在贯穿纵肋之前,裂纹长度方向比深度方向扩展更快,呈现不同的扩展特征。参考文献[9],初始裂纹选为半椭圆形。由于纵肋厚度较小,综合考虑裂纹扩展规律,取贯穿型裂纹尺寸如下:深度 $a = 15$ mm,长度 $c = 30$ mm。钢桥面板纵肋围焊处贯穿型疲劳裂纹见图3。



A、B 分别为裂纹贯穿时非贯穿侧和贯穿侧与纵肋板面的交点

图3 贯穿型疲劳裂纹示意图(单位:mm)

3.2 应力强度因子

应力强度因子是分析疲劳裂纹的重要参数。钢桥面板焊缝处疲劳裂纹扩展阈值 $K_{th} = 63 \text{ N/mm}^{3/2}$,当裂纹前缘应力强度因子 K 超过该扩展阈值时,裂纹开始扩展, K 值越大,裂纹扩展能力越强,疲劳寿命越低。断裂力学分析中一般将 K 分解为 K_I (张开型)、 K_{II} (滑开型) 和 K_{III} (撕开型)。钢桥面板由各种板件相互焊接而成,受力状态较复杂。纵肋围焊处主要受活载作用于横隔板正上方时的面内受力作用,一般用等效应力强度因子 K_{eff} 表示复杂受力状态下裂纹总体扩展情况。对于 K_I 、 K_{II} 、 K_{III} 三者的贡献,参考文献[10], K_{eff} 由式(1)计算得到。

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

式中: ν 为钢材的泊松比,取 0.3。

K_I 、 K_{II} 和 K_{III} 值通过相互作用积分原理由应力计算得到,应力可由有限元软件提取得到。

4 有限元模型

为提高计算效率,采用子模型技术构建研究对象有限元模型。对于横向 3 个纵肋,取中间纵肋围焊为分析对象,纵肋围焊及开孔位置定义为子模型,该区域采用 Solid 95 二次实体单元模拟,子模型以外区域采用 Solid 45 线性实体单元模拟,裂尖单元采用楔形体单元求解奇异场应力。加载面积采用 JTG D64—2015《公路钢结构桥梁设计规范》^[11] 中标准疲劳车形式,荷载考虑 3 倍超载系数,加载位置为横隔板正上方。设置纵肋正上方(工况 1)、跨纵肋(工况 2)和纵肋间(工况 3)3 种加载工况,根据局部节段模型受周围的支承情况分别对顶板横向两侧、横隔板底侧、纵桥向顶板和纵肋进行约束。将各板件单元进行离散化,建立图 4 所示有限元模型。

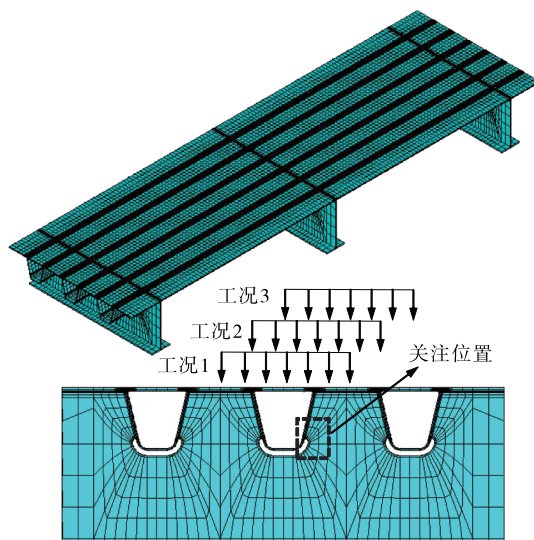


图4 有限元模型

5 模拟计算结果与分析

在钢桥面板纵肋围焊处引入贯穿型裂纹时,裂纹前缘单元与纵肋表面相交处单元形状不规则,出现数据失真现象。因此,在模拟贯穿型裂纹时,尽可能将裂尖单元尺寸控制在 0.5 mm 以内。在提取裂纹前缘应力强度因子时,由于模型纵向对称,取裂尖一侧 AB(见图 3)为关注对象,并对 AB 进行距离归一化处理,即将裂纹任一点处至点 B 的长度指标用该长度与 AB 总长度之比来表示。计算所得 3 种工况下钢桥面板纵肋围焊处应力强度因子和等效应力强度因子见图 5、图 6。

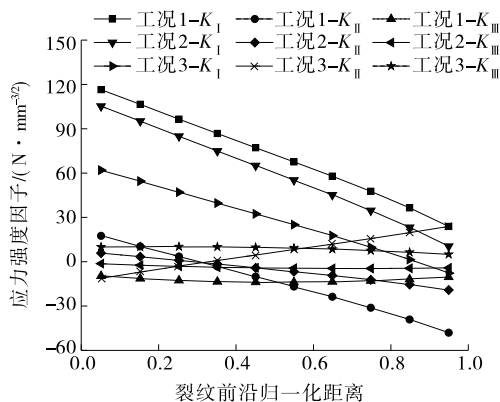


图5 应力强度因子变化曲线

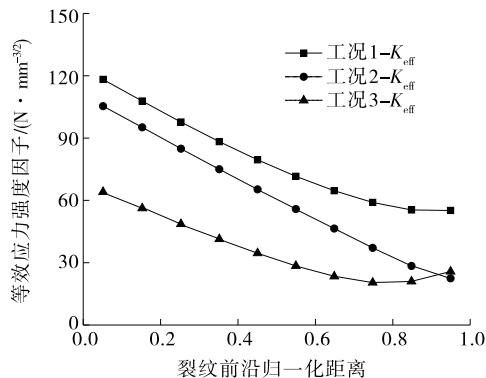


图6 等效应力强度因子变化曲线

由图5、图6可知:1) 钢桥面板纵肋围焊处 K_I 、 K_{II} 值较大, K_{III} 值控制在 $15 \text{ N/mm}^{3/2}$ 以内, 该处裂纹表现为以 I ~ II 型为主的复合开裂模式。2) 工况1作用下裂纹前缘点A处的等效应力强度因子最大, 整体水平较高; 裂纹前缘靠近点B时(贯穿侧), 不同工况下应力强度因子变化规律出现差异, 工况1和工况3作用下, 越接近点B等效应力强度因子先下降后上升, 但增加幅度不大。3) 工况3作用下非贯穿侧裂纹等效应力强度因子接近扩展阈值, 裂纹基本处于停滞扩展状态; 工况1和工况2作用下非贯穿侧等效应力强度因子较大, 扩展能力较强, 贯穿侧裂纹处于停滞扩展状态。进行钢桥面板焊接时, 应严格控制焊接参数和焊接材料, 避免在纵肋围焊处产生气孔、夹杂等焊接缺陷。

6 结论

(1) 在疲劳车局部轮载作用下, 钢桥面板纵肋

围焊处贯穿型裂纹贯穿侧和非贯穿侧应力值差别较大, 非贯穿侧裂纹扩展能力较强。

(2) 钢桥面板纵肋围焊处贯穿型疲劳裂纹撕开型应力强度因子的占比较小, 表现为以 I ~ II 型为主的复合开裂模式。

(3) 钢桥面板纵肋围焊处贯穿型疲劳裂纹主要受纵肋正上方局部轮载作用, 设计时纵肋中心位置应尽可能避开轮迹线, 并在运营养护中加强对该位置处疲劳裂纹检测。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 王万威. 钢桥面板 U 肋与横隔板焊缝疲劳特性分析[D]. 成都: 西南交通大学, 2018.
- [3] 崔闯, 卜一之, 张清华, 等. 基于热点应力法的正交异性钢桥面板疲劳寿命评估[J]. 桥梁建设, 2014, 44(4): 62-67.
- [4] 王春生, 翟慕赛, 唐友明, 等. 钢桥面板疲劳裂纹耦合扩展机理的数值断裂力学模拟[J]. 中国公路学报, 2017, 30(3): 82-95.
- [5] 刘仕茂, 祁义辉, 刘涛. 中欧规范下钢桥面板与纵肋双面焊接细节疲劳性能分析[J]. 公路与汽运, 2023(2): 119-121+126.
- [6] 赵辛玮. 钢桥面板与纵肋双面焊接细节应力强度因子有限元分析[J]. 公路与汽运, 2023(4): 100-102.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 庄茁, 蒋持平. 工程断裂与损伤[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.
- [10] 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.
- [11] 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: 2022-11-24