

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2021.052



开放科学(资源服务)标识码(OSID):



钢桥面板-纵肋双面焊缝疲劳裂纹应力强度因子

张亚海¹, 郭宝圣¹, 张卫国², 陈方怀³

(1. 中交路桥华东工程有限公司, 上海 201210; 2. 江西省交通运输科学研究院有限公司, 南昌 330200;
3. 湖南工业大学 土木工程学院, 湖南 株洲 412007)

摘要: 双面焊有望改善顶板-纵肋焊接构造细节的疲劳抗力, 而初始焊接缺陷是影响该类构造细节疲劳性能的关键因素。基于断裂力学理论, 采用 FRANC3D-ABAQUS 交互技术建立了含初始裂纹的钢桥面板多尺度有限元模型, 研究顶板-纵肋连接焊缝疲劳裂纹应力强度因子。分析了焊缝熔透率、顶板厚度、初始裂纹形状比等对双面焊缝疲劳裂纹应力强度因子的影响规律。结果表明: 钢桥面板-纵肋连接焊缝细节处疲劳裂纹为 I 型主导的 I-II-III 复合型疲劳裂纹; 双面焊缝顶板焊根处疲劳裂纹应力强度因子最大值比单面焊缝小 64.3%, 改善了顶板-纵肋焊缝的疲劳性能; 焊缝熔透率对顶板-纵肋双面焊接细节疲劳裂纹应力强度因子影响较小; 加厚顶板显著降低了顶板-纵肋双面焊接细节疲劳裂纹应力强度因子; 随着初始裂纹形状比增大, 裂纹应力强度因子减小。

关键词: 钢桥面板; 双面焊缝; 有限元法; 应力强度因子; 疲劳性能

中图分类号: U448.36 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2022)03-0062-09

Fatigue crack stress intensity factor of double-sided welded rib-to-deck joints in steel bridge deck

ZHANG Yahai¹, GUO Baosheng¹, ZHANG Weiguo², CHEN Fanghuai³

(1. Zhong-jiao Road and Bridge East China Engineering Limited Company, Shanghai 201210, P. R. China;
2. Jiangxi Academy of Transportation Sciences Limited Company, Nanchang 330200, P. R. China;
3. School of Civil Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou 412007, Hunan, P. R. China)

Abstract: Double-sided welding is expected to improve the fatigue resistance of rib-to-deck welded joints, and the initial welding defect is the key factor affecting the fatigue performance of these joints. A multi-scale finite element (FE) model of steel bridge decks with initial cracks was established by combining FRANC3D-ABAQUS based on the fracture mechanics theory. The stress intensity factor of fatigue crack in the rib-to-deck welded joints was studied. The influences of weld penetration rate, thickness of deck plate and initial crack shape ratio on the stress intensity factor were analyzed. The results showed that the

收稿日期: 2020-10-16

基金项目: 国家自然科学基金(51908068); 湖南省自然科学基金(2018JJ3540)

作者简介: 张亚海(1988-), 男, 主要从事桥梁施工与运营研究, E-mail: 172006671@qq.com.

陈方怀(通信作者), 男, 博士, E-mail: 15200801151@stu.csust.edu.cn.

Received: 2020-10-16

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (No. 51908068); Natural Science Foundation of Hunan (No. 2018JJ3540)

Author brief: ZHANG Yahai (1988-), main research interest: bridge construction and operation, E-mail: 172006671@qq.com.

CHEN Fanghuai (correspondence author), PhD, E-mail: 15200801151@stu.csust.edu.cn.

fatigue cracks in rib-to-deck welded joints details are mixed mode cracks of sequenced I-II-III. The maximum stress intensity factor of fatigue crack of rib-to-deck double-sided welded root was 64.3% lower than that of single-sided weld, which can effectively improve the fatigue performance. The weld penetration rate has marginal effect on the stress intensity factor of fatigue crack in the rib-to-deck double-sided welded joints. Thickening the deck can effectively reduce the stress intensity factor of the fatigue crack in the rib-to-deck double-sided welded joints. With increase of the initial crack shape ratio, the crack stress intensity factor decreases.

Keywords: steel bridge deck; double-sided welding; finite element method; stress intensity factor; fatigue performance

正交异性钢桥面板(简称钢桥面板)具有施工便捷、轻质高强以及环境适用性好等优点,在大跨度斜拉桥和悬索桥中得到了普遍应用^[1-2]。但由于其结构复杂、焊缝多,在车辆荷载的长期作用下,焊缝几何形状突变或焊接缺陷等部位容易产生疲劳裂纹^[3-4]。目前,钢桥面板-纵肋广泛采用的部分熔透焊缝容易发生疲劳开裂,其中,起裂于顶板焊趾和焊根处向板厚方向扩展的疲劳裂纹较为突出,难以检测与控制^[5-8]。顶板-纵肋焊缝疲劳裂纹一直是影响钢桥面板使用寿命的控制性难题^[9-11]。

近年来,研究人员针对钢桥面板-纵肋连接焊缝的疲劳开裂问题展开了大量研究。Sim等^[12]对不同熔透率(40%、60%、80%)的顶板-U肋焊缝进行了数值分析,结果表明,熔透率过高会导致焊缝的应力较大,从而引发疲劳裂纹。Kainuma等^[13]制作了不同熔透率(0%、75%和100%)的钢桥面板足尺试件进行疲劳试验研究,结果表明,熔透率在0%~75%之间有利于改善顶板-纵肋焊接细节的疲劳耐久性。Dung等^[3]通过对熔透率分别为75%和100%的钢桥面板足尺试件进行疲劳试验和数值分析,结果表明,熔透率为100%有利于提高顶板-纵肋焊缝的疲劳性能。熔透率对钢桥面板-纵肋焊接细节疲劳性能的影响尚不明确。若在纵肋内侧增加一道焊缝,能改变传统单面焊的偏心状态,增大熔透率,同时使焊根处未焊透部分形成封闭的刚性区,有望提高顶板-纵肋连接焊缝的疲劳性能。中国学者首创了U肋内焊技术,实现顶板-纵肋双面焊接工厂化,并成功应用于沌口长江大桥、嘉鱼长江大桥等实际工程^[14-15]。但目前仍缺乏对双面焊疲劳失效模式、疲劳性能等关键问题的研究。

断裂力学在焊接钢桥的疲劳评估中得到了广泛应用,而应力强度因子是该方法中最主要的物理力学参量之一,决定了裂纹扩展速率^[16]。对于受力模式和构造形式均较复杂的裂纹体的应力强度因子,主要通过数值方法计算得到^[17]。但目前对于钢桥面

板中出现的复杂三维裂纹的应力强度因子的研究较少。笔者基于线弹性断裂力学理论,建立了钢桥面板三维断裂力学有限元模型,以应力强度因子为评价指标,对比分析了顶板-U肋单面焊和双面焊的疲劳性能,并分析焊缝熔透率、顶板厚度、初始裂纹形态对双面焊接细节裂纹应力强度因子的影响规律。

1 应力强度因子计算理论

Yau等^[18]最先提出了计算3种断裂模式的应力强度因子(K_I 、 K_{II} 和 K_{III})的M积分法,M积分法的表达式为

$$M^{(1,2)} = \int_{\Gamma} \left(\sigma_{ij}^{(1)} \frac{\partial u_i^{(2)}}{\partial x_1} + \sigma_{ij}^{(2)} \frac{\partial u_i^{(1)}}{\partial x_1} - W^{(1,2)} \delta_{1j} \right) \cdot \frac{\partial q}{\partial x_j} ds / A_q \quad (1)$$

式中: $A_q = \int_{\Gamma} q_t ds$, q_t 是裂纹前缘函数值; $W^{(1,2)}$ 为相互作用应变能密度,定义为

$$W^{(1,2)} = \sigma_{ij}^{(1)} \epsilon_{ij}^{(2)} = \sigma_{ij}^{(2)} \epsilon_{ij}^{(1)} \quad (2)$$

式中: σ_{ij} 是应力张量; ϵ_{ij} 是应变张量;上标1、2分别代表实际场和辅助场。

M积分与材料属性以及应力强度因子K之间的关系为

$$M^{(1,2)} = 2 \times \left[\frac{1-\nu^2}{E} K_I^{(1)} K_I^{(2)} + \frac{1-\nu^2}{E} K_{II}^{(1)} K_{II}^{(2)} + \frac{1+\nu}{E} K_{III}^{(1)} K_{III}^{(2)} \right] \quad (3)$$

因此,

$$\int_{\Gamma} \left(\sigma_{ij}^{(1)} \frac{\partial u_i^{(2)}}{\partial x_1} + \sigma_{ij}^{(2)} \frac{\partial u_i^{(1)}}{\partial x_1} - W^{(1,2)} \delta_{1j} \right) \frac{\partial q}{\partial x_j} ds / A_q = 2 \times \left[\frac{1-\nu^2}{E} K_I^{(1)} K_I^{(2)} + \frac{1-\nu^2}{E} K_{II}^{(1)} K_{II}^{(2)} + \frac{1+\nu}{E} K_{III}^{(1)} K_{III}^{(2)} \right] \quad (4)$$

K_I 、 K_{II} 和 K_{III} 可由式(4)通过有限元计算得到。

在有限元模型中引入疲劳裂纹的方法是进行断裂力学分析的前提。三维断裂力学分析软件FRANC3D采用自适应网格重新划分技术,可以简单高效地引入任意形状的初始裂纹并联合有限元通用

软件 ABAQUS 进行求解。FRANC3D-ABAQUS 交互技术包括 ABAQUS 建模分析和 FRANC3D 断裂力学分析两部分,其工作流程如图 1 所示。

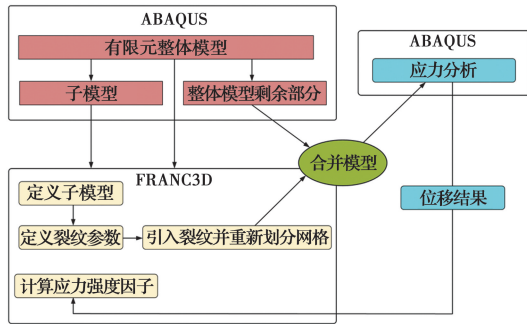


图 1 FRANC3D-ABAQUS 交互工作流程

Fig. 1 Interaction workflow of FRANC3D-ABAQUS

为验证 FRANC3D-ABAQUS 求解疲劳裂纹应力强度因子 K 的准确性与可行性,以含半椭圆表面裂纹的有限厚度板为研究对象,建立三维断裂力学有限元模型来计算裂纹应力强度因子,如图 2 所示。将不同半椭圆表面裂纹参数的应力强度因子计算结果与 Raju-Newman 手册^[19]的理论值进行对比,如图 3 所示。结果表明,有限元计算结果与理论值较吻合,最大相对误差小于 2.0%,表明基于 FRANC3D-ABAQUS 计算三维断裂问题的裂纹应力强度因子可行,具有较高的精度。

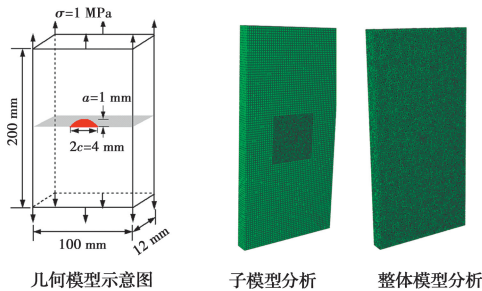


图 2 有限元模型

Fig. 2 Finite element model

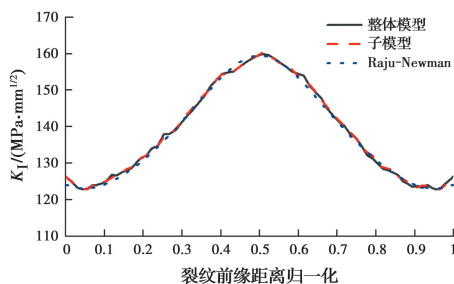


图 3 FRANC3D 计算值与 Raju-Newman 理论值对比

Fig. 3 Comparison of FRANC3D calculated values with Raju-Newman theoretical values

2 顶板-纵肋双面焊接构造

基于考虑顶板-纵肋单面坡口焊缝焊根处存在的未熔透“类裂纹”构造(如图 4 所示)导致其疲劳开裂突出的本质特性,中国的研究者研发了自动化 U 肋内焊技术,在传统单面焊接构造的基础上,通过智能化机器人自动化焊接技术在 U 肋内部增加一道角焊缝而形成新型双面焊接构造,如图 5 所示。双面焊构造使焊根处未熔透部分形成了封闭的刚性区,有望解决萌生于焊根处的疲劳裂纹,但引入的内焊缝也可能成为新的疲劳裂纹源。因此,以文献[22]中的几种裂纹形式来分别模拟单面焊接和双面焊接的初始焊接缺陷的影响,如图 6 所示。

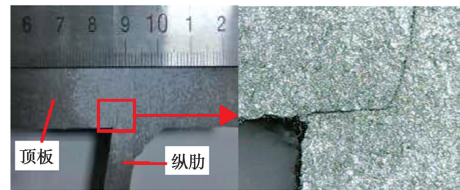


图 4 顶板-纵肋单面焊缝焊根疲劳裂纹^[20]

Fig. 4 Fatigue crack in weld root of deck-to-rib^[20]

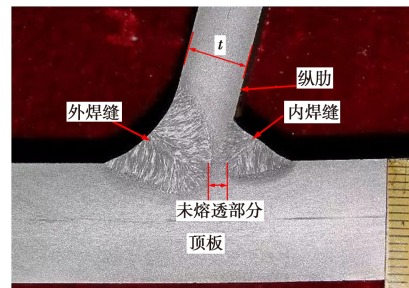


图 5 双面焊接构造^[21]

Fig. 5 Double-sided welded joints^[21]

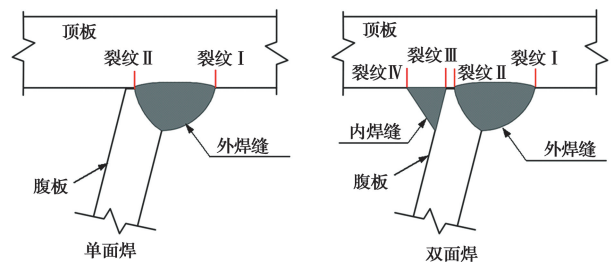


图 6 裂纹形式示意图

Fig. 6 Schematic of crack form

3 顶板-纵肋焊接构造多尺度有限元模型

3.1 工程概况

某主跨为 380 m 的斜拉桥钢箱梁正交异性钢桥面板的顶板厚 16 mm, U 肋厚 8 mm, 上口宽、下口宽分别为 300、170 mm, 横向间距为 600 mm, 横隔板厚

横隔板时结束,各加载工况如图 9 所示。

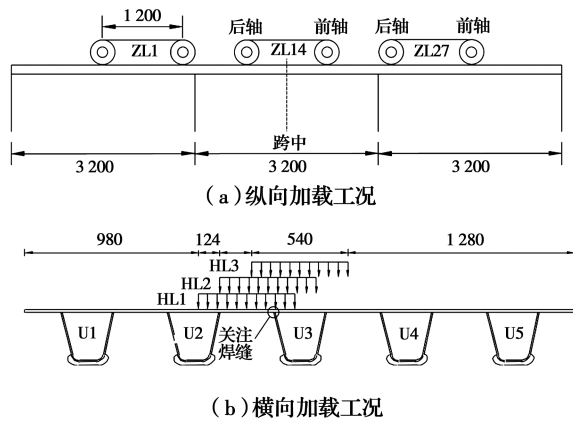


图 9 加载工况 (单位:mm)

Fig. 9 Loading conditions (unit: mm)

4 顶板-U 肋焊接细节应力分析

进行应力分析的主要目的是:表征移动车辆荷载下钢桥面板节段整体模型焊接细节的应力分布规律,确定最不利加载位置;应力分析结果施加到含裂纹实体子模型边界上,用于裂纹应力强度因子计算。

4.1 应力历程分析

钢桥面顶板-U 肋焊接细节的疲劳开裂主要受垂直于焊缝的横向应力的影响。因此,仅考虑顶板-U 肋焊接细节处的横向应力分量。在移动车辆荷载作用下,顶板-U 肋单面焊缝与双面焊缝各细节的横向应力纵向历程曲线如图 10、图 11 所示。

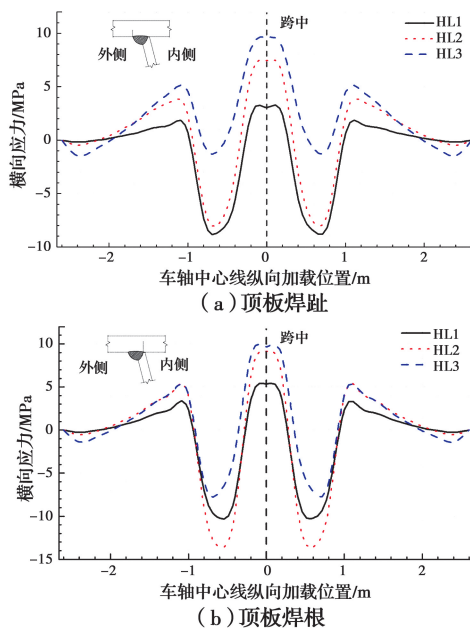


图 10 单面焊缝细节横向应力历程曲线

Fig. 10 Transverse stress course curve of single-sided welded details

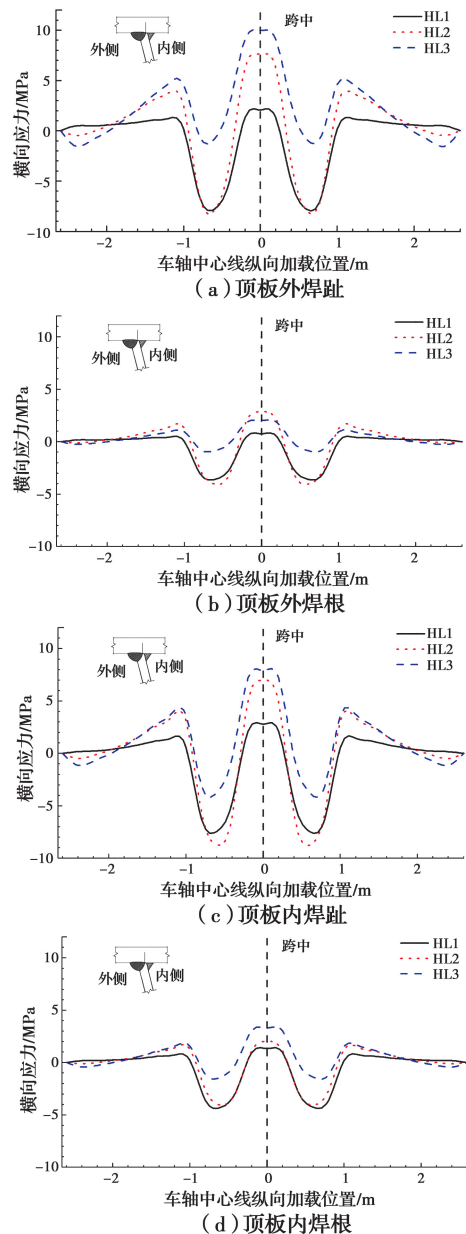


图 11 双面焊缝细节横向应力历程曲线

Fig. 11 Transverse stress course curve of double-sided welded details

由图 10、图 11 可知:移动车载下顶板-U 肋双面焊接细节处横向应力历程曲线与单面焊接相似。随着车辆荷载的移动,当车轴中心线作用于跨中位置时,顶板-U 肋焊接细节处所受拉应力最大。当前轮行驶至第 2 道横隔板附近和后轮离开第 3 道横隔板时,焊缝细节处的应力约为 0,说明车辆荷载作用下钢桥面顶板-U 肋焊接细节所受应力的纵向影响线仅限于两道横隔板之间。在各横向加载工况下,车辆荷载沿顺桥向移动时,顶板-U 肋单面焊接和双面焊接细节处均产生两个压应力峰值和 3 个拉应力峰值的拉-压应力循环,且以压应力为主。

4.2 最大拉应力分析

拉应力是顶板-U肋连接焊缝的疲劳裂纹扩展的主要驱动力。不同加载工况下,单面焊接和双面焊接各细节处的最大拉应力对比分析如图12所示。

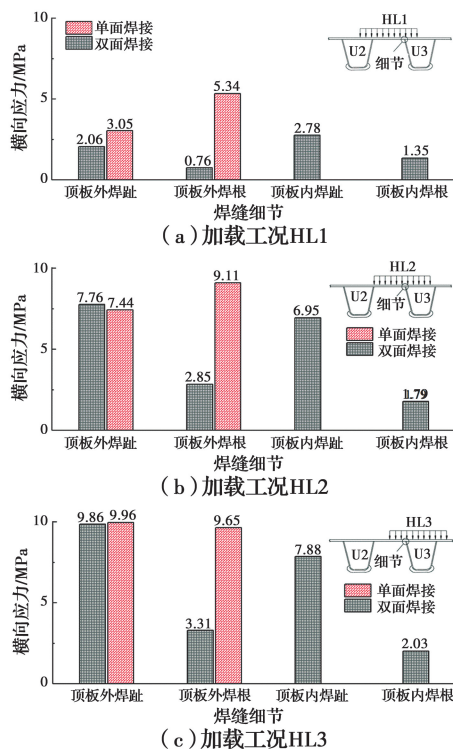


图12 焊缝细节最大拉应力比较

Fig. 12 Comparison of maximum tensile stress of welded details

由图12可知,在HL1和HL2作用下,单面焊缝最易疲劳损伤细节为顶板焊根,在HL3作用下,其最易疲劳损伤细节为顶板焊趾,而双面焊缝最易疲劳损伤细节始终为顶板外焊趾。顶板-U肋双面焊接顶板焊根处产生最大拉应力为3.31 MPa,比单面焊接顶板焊根处最大拉应力(9.88 MPa)降低了66.5%。因此,从结构应力分析来看,采用双面焊接可以有效降低顶板-纵肋顶板焊根发生疲劳开裂的可能性,提高焊缝构造细节的疲劳抗力,这主要是由于双面焊缝改变了传统单面焊缝对U肋腹板的偏心受力,同时,使顶板焊根处未焊透部分形成封闭的刚性区。

5 焊缝疲劳裂纹的应力强度因子分析

应力分析是基于无裂纹壳-实体单元节段模型,无法描述疲劳裂纹的影响。而对于钢桥面板-纵肋焊接构造而言,焊接过程中不可避免出现初始焊接缺陷。应力强度因子是反映结构或构件的裂纹尖端附近局部应力场状态并进行疲劳寿命预测的重要物理参量。因此,建立含裂纹断裂力学模型进行应力

强度因子分析,评估顶板-纵肋连接焊缝的疲劳性能。

5.1 两种焊缝细节疲劳裂纹应力强度因子对比

在最不利荷载工况(HL3)下,单面焊缝和双面焊缝各细节处的裂纹应力强度因子分析如图13、图14所示,其中, K_I 、 K_{II} 、 K_{III} 分别为I型(张开型)、II型(滑开型)、III型(撕开型)疲劳裂纹的应力强度因子。

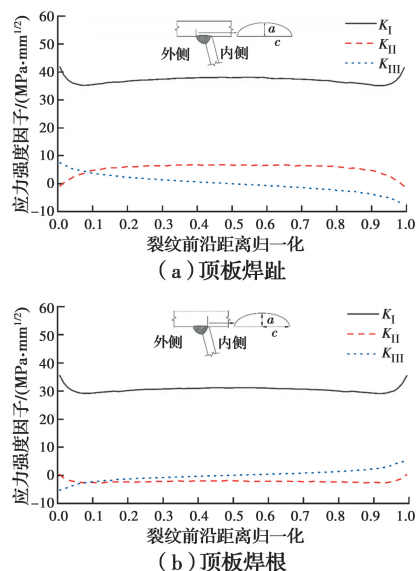


图13 单面焊缝细节疲劳裂纹应力强度因子

Fig. 13 SIF of crack at the single-side welded details

由图13可知,在车辆荷载作用下,顶板-U肋单面焊接细节处疲劳裂纹的 K_{II} 、 K_{III} 均远小于 K_I ,为I型为主导的I-II-III复合型裂纹。顶板焊趾和焊根处的裂纹表面点的 K_I 均大于裂纹最深点的 K_I 。

由图14可知,在车辆荷载作用下,顶板-U肋双面焊接细节的疲劳裂纹与单面焊接相似,为I型为主导的I-II-III复合型裂纹。顶板外焊趾、顶板内焊趾和顶板外焊根处的裂纹两端表面点的 K_I 均大于裂纹最深点的 K_I ,而顶板内焊根处的裂纹两端表面点的 K_I 小于裂纹最深点的 K_I 。顶板焊根处裂纹应力强度因子远小于顶板焊趾处裂纹应力强度因子。

由以上分析可知,I型(张开型)裂纹是钢桥面板顶板-U肋焊接构造细节疲劳开裂的主要原因。单面焊缝和双面焊缝各细节处疲劳裂纹应力强度因子 K_I 最大值对比分析如图15所示。

由图15可知,顶板-U肋单面焊缝与双面焊缝细节处最易疲劳损伤细节均为顶板焊趾。单面焊接 K_I 最大值为42.63 MPa·mm^{1/2},与双面焊接 K_I 最大值(41.77 MPa·mm^{1/2})相当。但双面焊缝顶

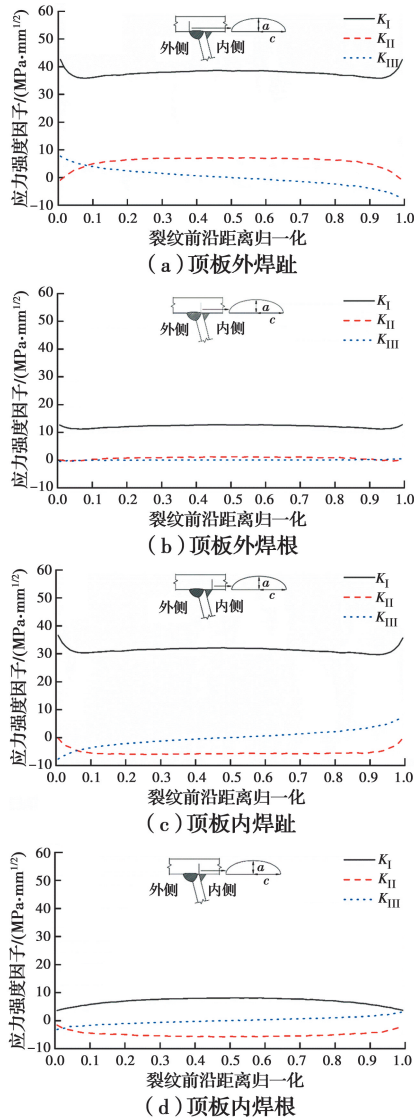


图14 双面焊缝细节疲劳裂纹应力强度因子

Fig. 14 SIF of crack at the double-side welded details

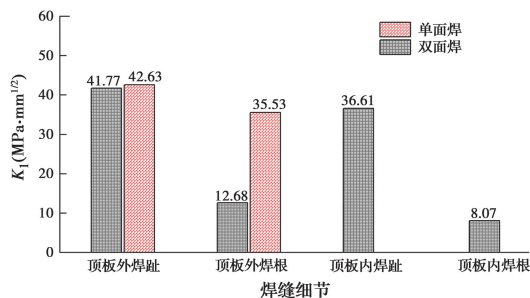


图15 疲劳裂纹最大应力强度因子比较

Fig. 15 Comparison of the maximum SIF of the cracks

板焊根处 K_I 最大值为 $12.68 \text{ MPa} \cdot \text{mm}^{1/2}$, 比单面焊缝顶板焊根处 K_I 最大值 ($35.53 \text{ MPa} \cdot \text{mm}^{1/2}$) 减少了 64.3% 。因此, 钢桥面顶板-U肋采用双面焊接可以减少顶板焊根发生疲劳开裂的可能性, 提高焊缝的抗疲劳性能。

5.2 焊缝熔透率对应力强度因子的影响

在最不利荷载工况 (HL3) 下, 研究焊缝熔透率对顶板-U肋双面焊接细节处疲劳裂纹应力强度因子的影响。保持其余参数不变, 焊缝熔透率分别为 0% 、 20% 、 40% 、 60% 、 80% 和 100% (为了考虑焊根, 实际熔透率约为 99%), 计算双面焊接细节处疲劳裂纹应力强度因子。限于文章篇幅, 仅考虑焊缝熔透率对裂纹最深处 K_I 的影响, 如图 16 所示。

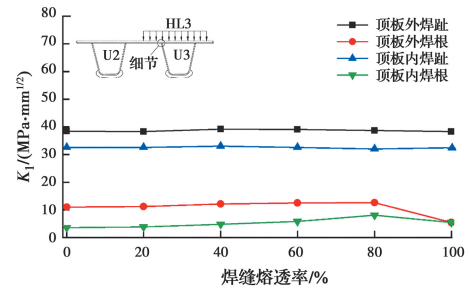


图16 焊缝熔透率对应力强度因子的影响

Fig. 16 Effect of weld penetration on SIF

由图 16 中可知, 顶板-U肋双面焊接细节处最易疲劳损伤部位始终为顶板外焊趾。顶板焊趾处疲劳裂纹最深处 K_I 受焊缝熔透率的影响不大, 最大变化在 2% 以内; 随着焊缝熔透率的增加, 顶板焊根处疲劳裂纹最深处 K_I 先增大后减小, K_I 最大值为 $12.68 \text{ MPa} \cdot \text{mm}^{1/2}$, 远小于顶板焊趾处的 K_I 最大值 ($39.11 \text{ MPa} \cdot \text{mm}^{1/2}$)。因此, 焊缝熔透率对顶板-U肋双面焊缝细节疲劳性能的影响效果不明显。

5.3 顶板厚度对应力强度因子的影响

在最不利荷载工况 (HL3) 下, 研究顶板厚度对顶板-U肋双面焊接细节处疲劳裂纹应力强度因子的影响。保持其余参数不变, 顶板厚度分别取 12 、 14 、 16 、 18 、 20 mm , 计算双面焊接细节处疲劳裂纹应力强度因子 K_I 。顶板厚度对疲劳裂纹最深处 K_I 的影响如图 17 所示。

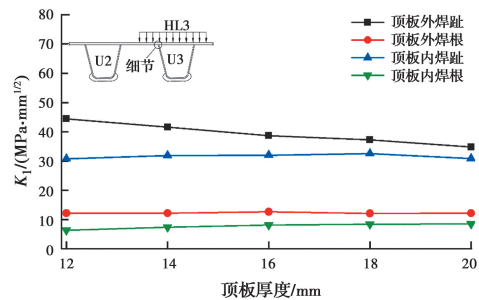


图17 顶板厚度对应力强度因子的影响

Fig. 17 Effect of deck plate thickness on SIF

从图 17 可知, 随着顶板厚度的增加, 顶板外焊趾疲劳裂纹最深处 K_I 逐渐减小, 应力强度因子从

44.44 MPa · mm^{1/2} 降至 34.86 MPa · mm^{1/2}, 下降了 21.6%。顶板内焊趾疲劳裂纹最深处 K_I 先增大后减小, 最大值为 32.55 MPa · mm^{1/2}, 小于顶板外焊趾最小值(34.86 MPa · mm^{1/2}); 顶板焊根处 K_I 均增大, 但远小于顶板焊趾处 K_I 。因此, 加厚顶板有利于提高顶板-U肋双面焊缝细节的疲劳性能。

5.4 裂纹形态比对应力强度因子的影响

在最不利荷载工况(HL3)下, 分析初始疲劳裂纹形态比对应力强度因子的影响规律。保持其余参数不变, 选取 $a=0.15$ mm, a/c 分别为 0.2、0.4、0.6、0.8 和 1.0 的半椭圆表面疲劳裂纹, 分析疲劳裂纹形态比对应力强度因子 K_I 的影响, 如图 18 所示。

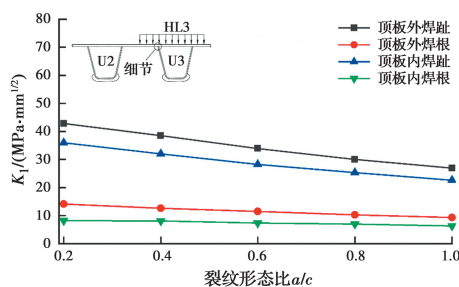


图 18 裂纹形态比对应力强度因子的影响

Fig. 18 Effect of crack shape ratio on SIF

由图 18 可知, 双面焊缝各细节疲劳裂纹最深处 K_I 均随疲劳裂纹形态比的增大而减小。顶板外焊趾疲劳裂纹 K_I 由 42.86 MPa · mm^{1/2} 减小到 26.91 MPa · mm^{1/2}, 减少了 37.2%。顶板内焊趾疲劳裂纹 K_I 由 35.96 MPa · mm^{1/2} 减小到 22.58 MPa · mm^{1/2}, 减少了 37.2%。顶板外焊根疲劳裂纹 K_I 由 14.13 MPa · mm^{1/2} 减少到 9.27 MPa · mm^{1/2}, 减少了 34.4%。顶板内焊根疲劳裂纹 K_I 由 8.18 MPa · mm^{1/2} 减少到 6.28 MPa · mm^{1/2}, 减少了 23.2%。因此, 疲劳裂纹形态比对应力强度因子的影响较大, 控制焊缝细节处疲劳裂纹表面长度能有效提高钢桥面板的疲劳寿命。

6 结论

基于线弹性断裂力学和有限元方法, 对比分析了钢桥面板-纵肋的传统单面焊缝和新型双面焊缝处疲劳裂纹应力强度因子, 并分析了顶板厚度、初始裂纹形状比和焊缝熔透率对双面焊缝疲劳性能的影响规律。主要结论如下:

1) 钢桥面板-纵肋连接焊缝细节处疲劳裂纹为 I 型主导的 I-II-III 复合型疲劳裂纹。不同横向荷载工况下, 单面焊接的最不利疲劳易损细节不断发生变化, 而双面焊接的最不利疲劳易损细节始终为

顶板外焊趾。

2) 双面焊缝顶板焊根处最大应力强度因子 K_I 为 12.68 MPa · mm^{1/2}, 比单面焊缝顶板焊根处 K_I 最大值(35.53 MPa · mm^{1/2}) 降低了 64.3%, 双面焊缝能有效改善顶板-纵肋焊接构造细节的疲劳性能。

3) 顶板-纵肋双面焊缝细节处裂纹应力强度因子受焊缝熔透率的影响不明显; 加厚顶板可以显著降低顶板外焊趾处的裂纹应力强度因子; 初始裂纹形状比越大, 焊接细节处裂纹应力强度因子越小。

笔者仅研究了车辆荷载作用下钢桥面板-纵肋焊缝细节的疲劳性能, 考虑焊接残余应力与车辆荷载复合作用下顶板-U肋双面焊缝构造细节处疲劳裂纹的扩展行为将是后续研究工作。

参考文献:

- [1] 张清华, 崔闯, 卜一之, 等. 钢结构桥梁疲劳 2019 年度研究进展[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2020, 42(5): 147-158.
ZHANG Q H, CUI C, BU Y Z, et al. State-of-the-art review of fatigue of steel bridge in 2019 [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2020, 42(5): 147-158. (in Chinese)
- [2] 周绪红, 朋茜, 秦凤江, 等. 钢桥面板顶板与纵肋连接焊根位置疲劳损伤特征[J]. 交通运输工程学报, 2018, 18(1): 1-12.
ZHOU X H, PENG X, QIN F J, et al. Fatigue damage characteristics of rib-to-deck weld root on orthotropic steel bridge deck [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2018, 18(1): 1-12. (in Chinese)
- [3] DUNG C V, SASAKI E, TAJIMA K, et al. Investigations on the effect of weld penetration on fatigue strength of rib-to-deck welded joints in orthotropic steel decks [J]. International Journal of Steel Structures, 2015, 15(2): 299-310.
- [4] DENG L, WANG W, YU Y. State-of-the-art review on the causes and mechanisms of bridge collapse [J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2016, 30(2): 04015005.
- [5] FISHER J W, BARSOM J M. Evaluation of cracking in the rib-to-deck welds of the Bronx-Whitestone Bridge [J]. Journal of Bridge Engineering, 2016, 21(3): 04015065.
- [6] 吉伯海, 叶枝, 傅中秋, 等. 江阴长江大桥钢箱梁疲劳应力特征分析[J]. 世界桥梁, 2016, 44(2): 30-36.
JI B H, YE Z, FU Z Q, et al. Analysis of fatigue stress property of steel box girder of Jiangyin Changjiang River Bridge [J]. World Bridges, 2016, 44(2): 30-36. (in Chinese)

- [7] LI M, SUZUKI Y, HASHIMOTO K, et al. Experimental study on fatigue resistance of rib-to-deck joint in orthotropic steel bridge deck [J]. Journal of Bridge Engineering, 2018, 23(2): 04017128.
- [8] 罗鹏军, 张清华, 龚代勋, 等. 钢桥面板 U 肋与顶板双面焊接疲劳性能研究[J]. 桥梁建设, 2018, 48(2): 19-24.
- LUO P J, ZHANG Q H, GONG D X, et al. Study of fatigue performance of U rib-to-deck double side welded joint in orthotropic steel bridge deck [J]. Bridge Construction, 2018, 48(2): 19-24. (in Chinese)
- [9] 鲁乃唯, 刘扬, 邓扬. 随机车流作用下悬索桥钢桥面板疲劳损伤与寿命评估[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2015, 46(11): 4300-4306.
- LU N W, LIU Y, DENG Y. Fatigue damage and life assessment for steel decks of suspension bridge under stochastic traffic flow [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2015, 46(11): 4300-4306. (in Chinese)
- [10] FISHER J W, ROY S. Fatigue of steel bridge infrastructure [J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2011, 7(7/8): 457-475.
- [11] 刘扬, 鲁乃唯, 邓扬. 基于实测车流的钢桥面板疲劳可靠度评估[J]. 中国公路学报, 2016, 29(5): 58-66.
- LIU Y, LU N W, DENG Y. Fatigue reliability assessment of steel bridge decks under measured traffic flow [J]. China Journal of Highway and Transport, 2016, 29(5): 58-66. (in Chinese)
- [12] SIM H B, UANG C M. Stress analyses and parametric study on full-scale fatigue tests of rib-to-deck welded joints in steel orthotropic decks [J]. Journal of Bridge Engineering, 2012, 17(5): 765-773.
- [13] KAINUMA S, YANG M Y, JEONG Y S, et al. Experiment on fatigue behavior of rib-to-deck weld root in orthotropic steel decks [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2016, 119: 113-122.
- [14] 张华, 孙雅洲, 舒先庆, 等. 正交异性钢桥面板 U 肋内焊技术[J]. 公路, 2018, 63(9): 115-120.
- ZHANG H, SUN Y Z, SHU X Q, et al. Internal welding technology of U-rib of steel bridge panel with orthogonality [J]. Highway, 2018, 63(9): 115-120. (in Chinese)
- [15] 冯鹏程, 付坤, 陈毅明. 沌口长江公路大桥主桥设计关键技术[J]. 桥梁建设, 2017, 47(2): 7-12.
- FENG P C, FU K, CHEN Y M. Key techniques of design of main bridge of Zhuankou Changjiang River Highway Bridge [J]. Bridge Construction, 2017, 47(2): 7-12. (in Chinese)
- [16] 揭志羽, 李亚东, 卫星, 等. 焊接节点表面裂纹复合型应力强度因子的数值计算研究[J]. 铁道学报, 2017, 39(2): 127-133.
- JIE Z Y, LI Y D, WEI X, et al. Numerical study of mixed-mode stress intensity factor of surface crack of welded joint [J]. Journal of the China Railway Society, 2017, 39(2): 127-133. (in Chinese)
- [17] 杨绍林, 卜一之, 崔闯, 等. U 肋对接焊缝三维疲劳裂纹应力强度因子分析[J]. 桥梁建设, 2015, 45(5): 54-59.
- YANG S L, BU Y Z, CUI C, et al. Analysis of stress intensity factors of 3-dimensional fatigue crack in butt weld joint of U rib [J]. Bridge Construction, 2015, 45(5): 54-59. (in Chinese)
- [18] 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.
- [19] NEWMAN J C Jr, RAJU I S Jr. An empirical stress-intensity factor equation for the surface crack [J]. Engineering Fracture Mechanics, 1981, 15 (1/2): 185-192.
- [20] 黄云, 张清华, 余佳, 等. 钢桥面板与纵肋焊缝疲劳评估及裂纹扩展研究[J]. 西南交通大学学报, 2019, 54(2): 260-268.
- HUANG Y, ZHANG Q H, YU J, et al. Fatigue evaluation and crack propagation characteristics of rib-to-deck welded joints in steel bridge decks [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2019, 54(2): 260-268. (in Chinese)
- [21] CUI C, ZHANG Q H, BAO Y, et al. Residual stress relaxation at innovative both-side welded rib-to-deck joints under cyclic loading [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2019, 156: 9-17.
- [22] 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.
- 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, 110. (in Chinese)
- [23] International Institute of Welding. Recommendations for fatigue design of welded joints and components: IIW-1823-07 [R]. IIW, Paris, 2008.
- [24] Eurocode 1: Actions on structures-Part 2: Traffic loads on bridges: UNE-EN 1991-2: 2003 [S]. BSI, London, 2003.
- [25] LU N W, LIU Y, DENG Y. Fatigue reliability evaluation of orthotropic steel bridge decks based on site-specific weigh-in-motion measurements [J]. International Journal of Steel Structures, 2019, 19(1): 181-192.