

超大跨径斜拉桥钢桥面板疲劳损伤监测与 断裂力学研究

徐 炳

(宁波交通工程建设集团有限公司, 浙江 宁波 315000)

摘 要: 为研究超大跨径斜拉桥钢桥面板的疲劳损伤问题,以某斜拉桥为工程背景,对实桥进行了现场疲劳损伤监测与分析,并基于断裂力学的三维裂纹扩展模型,对钢箱梁顶板-U肋和横隔板-U肋等焊接细节进行了数值仿真与研究。结果表明:实桥顶板-U肋焊缝细节高应力幅(大于 10 MPa)循环次数与疲劳损伤度明显低于横隔板-U肋细节,横隔板-U肋焊缝最大应力幅达到 75~90 MPa,顶板-U肋焊缝最大应力幅为 15~30 MPa,横隔板-U肋焊缝细节处裂纹数量远大于顶板-U肋焊缝细节处裂纹数量;顶板-U肋焊缝裂纹在扩展过程中基本保持平面,裂纹扩展有先沿焊缝方向纵向扩展,再向深度方向扩展的趋势;横隔板-U肋焊缝焊趾处裂纹先沿初始裂纹深度方向在横隔板扩展,再向横隔板厚度方向扩展,焊趾处裂纹先向 U 肋厚度方向扩展,后沿初始裂纹长度方向顺桥向扩展;在初始裂纹尺寸与荷载条件相同的情况下,顶板-U肋焊缝焊趾处裂纹扩展速度大于焊跟处裂纹扩展速度,横隔板-U肋焊缝焊趾处裂纹扩展速率大于横隔板焊趾处裂纹扩展速率。

关键词: 超大跨径斜拉桥;钢桥面板;疲劳监测;断裂力学;三维裂纹扩展模型

中图分类号: U441+.4

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2023)12-0211-07

0 引 言

目前,我国超大跨径正交异性钢桥面板斜拉桥已达 200 余座^[1],此类桥梁钢桥面板因顶板、U 肋与横隔板采用全焊连接,受几何不连续、焊接工艺的影响、交通量增大以及超载车辆影响,其疲劳问题越来越突出^[2]。尤其在超大跨径斜拉桥钢桥面板的顶板-U肋和横隔板-U肋等焊接细节处更为明显^[3-8]。有鉴于此,本文以某超大跨径钢箱梁斜拉桥为研究背景,对实桥进行了现场疲劳损伤监测与分析,并基于断裂力学的三维裂纹扩展模型,对钢箱梁顶板-U肋和横隔板-U肋等焊接细节进行了数值仿真与研究。

1 超大跨径钢箱梁疲劳裂纹分布情况

根据 2018—2020 年对某大桥的病害统计数据,发现裂纹数量较多、长度较长的主要有横隔板-U肋交叉焊缝裂纹及弧形缺口母材裂纹、顶板-U肋角焊缝疲劳裂纹以及桁架纵隔板斜撑疲劳裂纹三种形式,其全桥的分布情况可能与重车道、钢板厚度有

关。本文主要针对正交异性钢桥面板普遍存在且疲劳问题较为严重的横隔板-U肋交叉焊缝与顶板-U肋角焊缝展开研究,其实桥疲劳病害在纵桥向与横桥向的分布如下所述^[9]:

(1)钢箱梁横隔板-U肋交叉焊缝位置裂纹在全桥纵桥向和横桥向的分布统计如图 1 所示。裂纹纵桥向分布在全桥每一段钢箱梁,总体集中分布在南北侧辅助墩间、边跨 1/2 附近、主跨 1/4 附近,其中主跨纵桥向裂纹分布较为集中,且裂纹数量较多,在钢箱梁 NJ27 处出现裂纹数量最多;在南北侧合龙段、南北塔以及跨中附近数量减少,其中裂纹数量最少出现在钢箱梁 SJ01 处。裂纹横桥向在每根 U 肋都有所分布,但裂纹集中分布的比较明显,分别集中分布在重车道与中间车道附近正下方的 U 肋两侧,紧急停车带中下方的 U 肋两侧裂纹分布较少,快车道正下方 U 肋两侧裂纹以桥梁中心线向两侧递增。

(2)钢箱梁顶板-U肋角焊缝疲劳裂纹在全桥纵桥向和横桥向的分布统计如图 2 所示。裂纹纵桥向主要集中在几个钢箱梁段内,全桥并未全部分布,其中钢箱梁 NJ22 号内裂纹数量最多,为 31 条,其次是钢箱梁 NJ23 号,裂纹数量为 25 条,北侧的裂纹共有 64 条,占总数的 80%,南侧的裂纹共有 16 条,占总数的

收稿日期: 2023-06-23

作者简介: 徐炳(1982—),男,本科,高级工程师,从事桥梁工程的施工、运营管理工作。

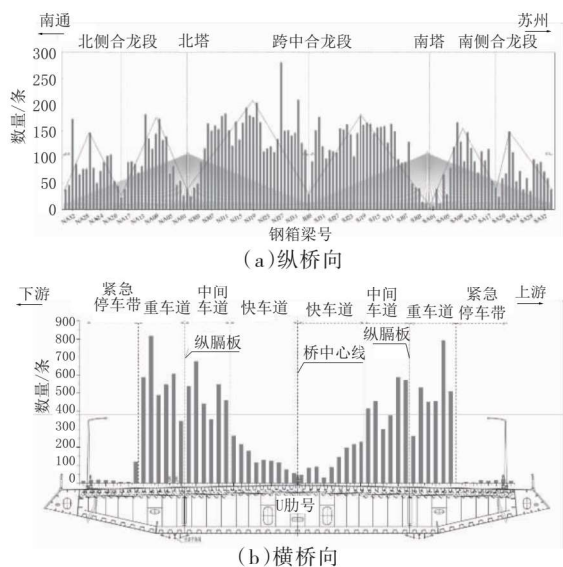


图1 横隔板-U肋交叉焊缝处裂纹分布

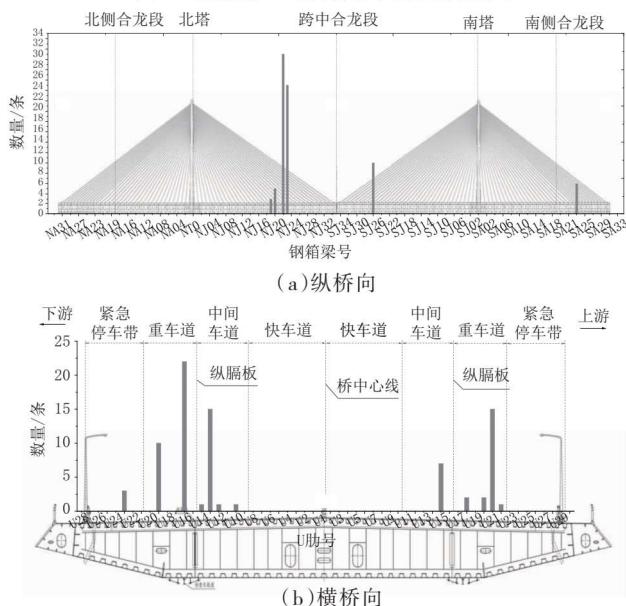


图2 顶板-U肋角焊缝裂纹横桥向分布

20%。裂纹横桥向主要分布在重车道与中间车道正下方U肋两侧,与横隔板-U肋交叉焊缝处裂纹的横桥向分布较为相似,也是集中分布在重车道与中间车道的轮迹正下方。以钢箱梁桥中心为分界线,下游的裂纹数量为53条,占总数的66.25%;上游的裂纹数量为27条,占总数的33.75%。下游的裂纹数量比上游的裂纹数量多,同样与横隔板-U肋交叉焊缝处裂纹横桥向分布较为相似。

2 超大跨径斜拉桥疲劳监测与损伤分析

近年来,健康监测系统在桥梁上逐渐得到广泛应用,但基于监测系统的疲劳评估主要反映桥梁的整体运营情况,对局部焊接细节的疲劳情况无法精确评测。故有必要对关注疲劳细节进行细部监测,获取疲劳应变时程。根据过往监测数据显示,在车

辆经过待测结构细节上方时,应变时程具有大致相同的曲线形状,相同的时间段内具有大致的循环次数^[10-12],因此,可认为实桥应变在荷载作用下是不断循环的过程,通过监测一定时间内的应变时程计算疲劳应力幅,进而可以进行疲劳程度评估。因此基于2018年、2019年以及2020年对钢箱梁外观检查及病害统计数据,在疲劳裂纹分布较多的顶板-U肋焊接处、U肋-横隔板焊接处布设应变传感器,获取48 h应变时程数据,根据数据处理结果对大桥钢箱梁疲劳损伤进行分析,得到测点应力时程曲线、各级疲劳应力幅、疲劳损伤度等。

2.1 测试断面

根据大桥前期设计计算、受力分析、交工阶段动静载试验以及2009年、2018年疲劳应力监测结果,并考虑到测试的经济性,选择如图3所示的区域作为疲劳应力监测部位。其中中跨S1处(距北塔约348.8 m)钢箱梁顶板发生厚度变化(18 mm→14 mm),U肋厚度最小(8 mm),且此处发生焊接细节疲劳裂纹较多,拟在S1附近的NJ22和NJ23节段内纵桥向选择2个测试断面S1-1~S1-2。其中S1-1断面位于NJ22-2梁段,S1-2位于NJ23-3梁段。南通侧边跨辅助墩间S2断面(距北塔约362.8 m)出现较多顶板-U肋角焊缝裂纹,拟选择在SA23-2梁段进行测点布置。

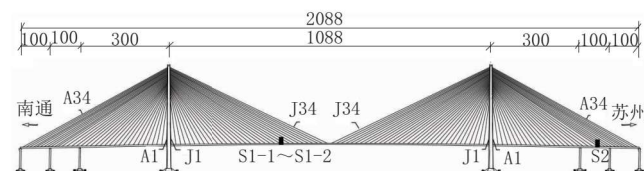


图3 疲劳应力监测部位(单位:m)

2.2 监测点布设

(1) 横隔板-U肋交叉焊缝细节

纵桥向测试断面取S1-1~S1-2断面。在测试断面的下游选择重车道下20#U肋下方的横隔板,拟定无拉索处的横隔板(厚10 mm)为测试对象。横隔板开裂会使裂纹周围应力场发生改变,为确保数据的准确性,选择紧邻的未开裂横隔板作为监测对象。横隔板-U肋交叉焊缝处共有两个疲劳细节,一类是横隔板与U肋焊接细节,另一类是弧形切口两倒圆弧交点过渡处。对于第一类焊接细节,可继续取距焊趾0.4t和1.0t(t为板厚或U肋厚度)作为热点应力,如图4(a)所示。而对于弧形切口自由边细节,参考AASHTO LRFD的热点应力法,应变片布设在离焊趾或自由边边缘6 mm位置,如图4(b)所示。

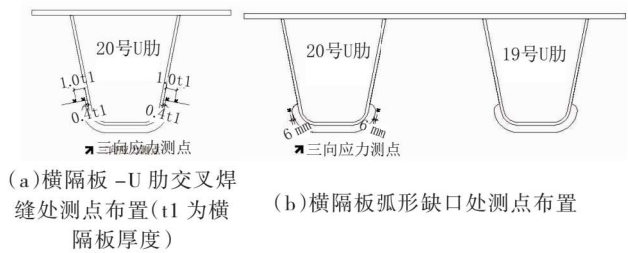


图 4 横隔板-U肋交叉焊缝细节监测点布设示意图

(2)顶板-U肋角焊缝细节

纵桥向测试断面取 S1-1~S1-2、S2 断面,在测试断面的下游选择纵隔板附近的顶板及顶板 U 肋(重车道和中间车道下车轮轮迹线位置)作为测试区域。对于 S1-1~S1-2 断面,横桥向顶板 U 肋的位置选择钢箱梁下游侧 14#、17#、20#。对于 S2 断面,横桥向顶板 U 肋的位置选择钢箱梁下游侧 14#、17#、18#、20#。根据国际焊接学会的推荐,具体测点可取距焊趾 $0.4t$ 和 $1.0t$ (t 为板厚或 U 肋厚度)作为热点应力,取焊趾 $1.5t$ (t 为板厚或 U 肋厚度)处的应力作为外推的热点应力,如图 5 所示。对于较薄厚度的 U 肋,考虑到应变片粘贴的难易程度,在距焊趾 $0.5t$ 、 $1.5t$ 处布置测点。

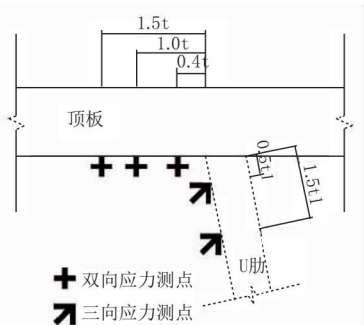


图 5 顶板-U肋角焊缝细节监测点布设示意图
(t 和 t_1 分别为顶板和顶板 U 肋的厚度)

2.3 实桥疲劳损伤监测时程与分析

(1)横隔板-U肋交叉焊缝细节

由于 48 h 应力历程数据量太大,现提取典型时段(30 min)实桥应力历程(见图 6)进行分析。由图可知,在外界荷载的循环作用下,横隔板-U肋焊缝处的热点应力点在车辆荷载的循环作用下,以压应力为主,幅值基本在 20 MPa 范围内;考虑到横隔板-U肋交叉焊缝热点应力点测值与实际焊趾处应力的差值,及横隔板弧形缺口位置存在的较大残余应力,在残余应力与车辆荷载的叠加下可能出现拉应力,为该部位的疲劳开裂创造条件。

(2)顶板-U肋角焊缝细节

由于 48 h 应力历程数据量太大,现提取典型时段(30 min)实桥应力历程(见图 7)进行分析。由图可

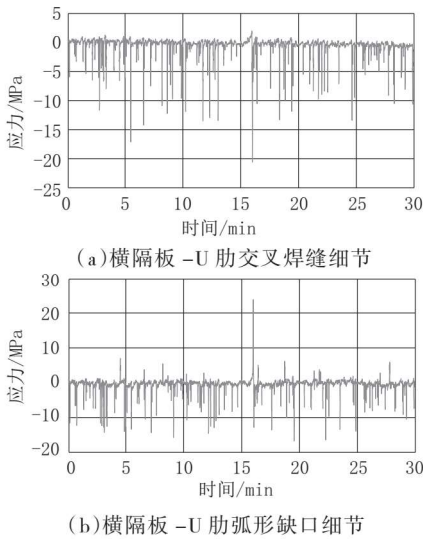


图 6 横隔板-U肋交叉焊缝细节疲劳应力时程

知,顶板-U肋角焊缝焊趾处热点应力点的最大主应力,在车辆荷载的循环作用下,幅值基本在 10 MPa 范围内;顶板-U肋角焊缝 U 肋测点应力幅值略大于顶板测点;顶板焊趾处的热点应力点数据显示,在车辆荷载的循环作用下,纵桥向应力与横桥向应力表现为明显的拉压循环,横桥向应力幅值小于纵桥向。

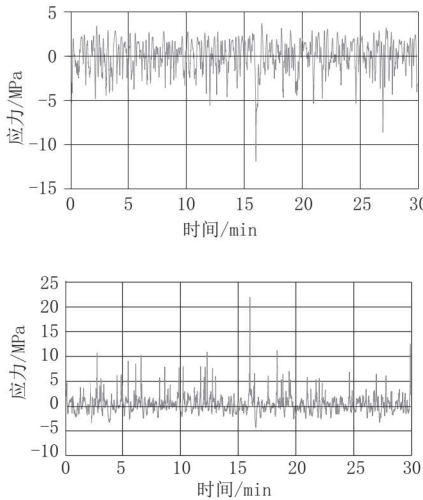


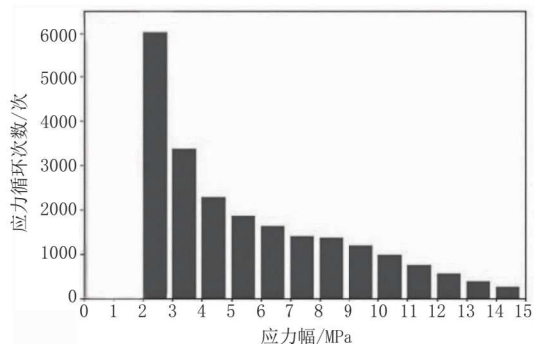
图 7 顶板-U肋角焊缝细节疲劳应力时程

2.4 实桥疲劳损伤分析

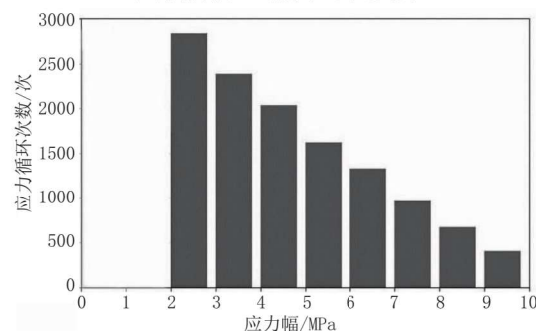
2.4.1 疲劳应力幅分析

根据各测点所测得的应力时程数据,通过雨流计数法计算测点 48 h 的各级疲劳应力幅分布情况如图 8 所示。由图可知:(1)各个热点应力测点的应力幅变化趋势相同,都是循环次数随着应力幅的增大而减少,但不同测点在相同的应力幅下循环次数差异较大。(2)在热点应力测点的 48 h 应力时程中,横隔板-U肋焊缝部位 10 MPa 以上的应力幅明显多于顶板-U肋细节;应力幅在 10 MPa 以内的应力循环次数占总数的 90%以上,各热点应力测点超出常幅

疲劳极限值的应力幅几乎为0。(3)对于顶板-U肋焊缝细节,其横桥向应力幅值明显小于纵桥向应力幅值。根据实桥监测数据,横隔板-U肋焊缝细节热点应力点最大应力幅达到75~90 MPa,顶板-U肋焊缝细节热点应力点最大应力幅为15~30 MPa。



(a)横隔板-U肋交叉焊缝细节



(b)顶板-U肋角焊缝细节

图8 各测点疲劳应力幅分布情况

2.4.2 疲劳损伤度分析

根据疲劳应力监测数据,结合规范设计疲劳强度、雨流计数法与Miner累积损伤准则,对轮载作用下各疲劳细节的疲劳损伤进行分析,横隔板-U肋交叉焊缝细节的累积损伤度在 $5.07 \times 10^{-8} \sim 3.86 \times 10^{-7}$,顶板-U肋焊缝细节的累积损伤度在 $1.33 \times 10^{-10} \sim 1.77 \times 10^{-8}$ 。监测结果表明:顶板-U肋焊缝细节热点应力点顺桥向疲劳损伤度明显大于横桥向疲劳损伤度;48 h内顶板-U肋焊缝细节处热点应力点疲劳损伤度明显小于横隔板-U肋焊缝细节处,与实桥检测结果中,横隔板-U肋焊接细节处裂纹数量远大于顶板-U肋焊缝处裂纹数量的情况较为一致。

3 基于断裂力学的裂纹扩展研究

3.1 U肋-顶板焊缝细节裂纹扩展分析

对U肋-顶板焊缝疲劳细节进行三维疲劳裂纹扩展模拟^[14],实桥钢箱梁理论有限元模型如图9所示。随着荷载循环次数的增加,焊缝焊跟与焊趾的裂纹扩展情况如下:

(1)U肋-顶板焊缝焊跟处裂纹在扩展过程中

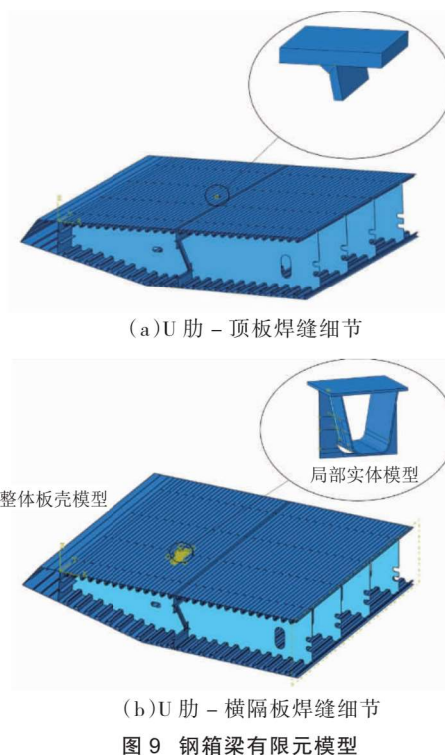
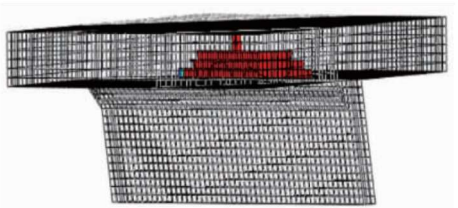


图9 钢箱梁有限元模型

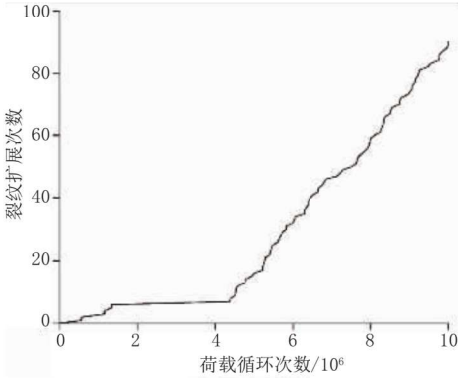
裂纹形态、扩展速率与累计应变能释放率的变化情况如图10所示。在1000万次荷载循环后,裂纹面扩展至短轴(深度)方向8 mm,长轴方向60 mm。裂纹扩展过程中I型(张开型)裂纹占主导地位;II型(滑开型)和III型(撕开型)裂纹占比均较小。焊跟处裂纹在扩展过程中几乎保持平面,裂纹形状依然大致为半椭圆形,但长短轴比不断发生变化。裂纹扩展速度在约450万次荷载循环后显著增大,此时占比最大的I型累计应变能释放率约为 100 J/m^2 ,裂纹扩展至深度4 mm,长度方向30 mm。

(2)U肋-顶板焊缝焊趾处裂纹在扩展过程中裂纹形态、扩展速率与累计应变能释放率的变化情况如图11所示。在200万次荷载循环后,裂纹面扩展至深度方向8 mm,长度方向70 mm。裂纹扩展过程中I型(张开型)裂纹占主导地位,II型(滑开型)和III型(撕开型)裂纹在裂纹扩展前期相当。在约130万次荷载循环后的增长速度显著加快,主要体现在裂纹扩展后期的方向偏转,II型(滑开型)和III型(撕开型)裂纹的存在会加速裂纹扩展并影响裂纹面的扩展方向,不容忽视。焊趾处裂纹主要沿半椭圆初始裂纹的长轴方向扩展,扩展后期向焊缝方向偏转。在110万次循环后扩展速度加快,此时占比最大的I型累计应变能释放率约为 800 J/m^2 ,裂纹扩展至深度8 mm,长度34 mm。

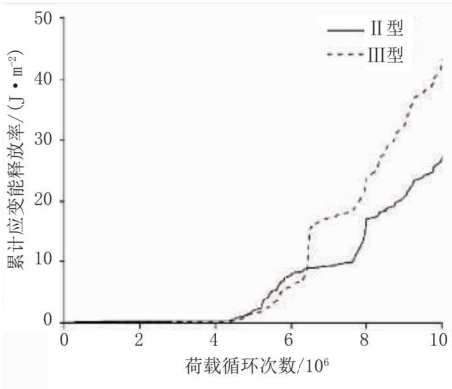
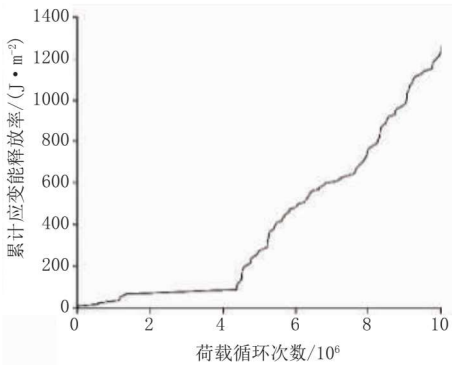
由以上对裂纹扩展过程的分析可知:裂纹在扩



(a) 荷载循环 1 000 万次裂纹扩展内部拓展图



(b) 裂纹扩展速率曲线



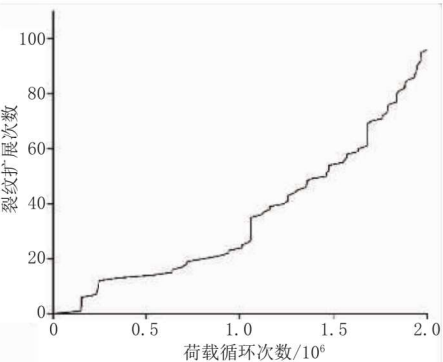
(c) 裂纹扩展的累计应变能释放率

图 10 U 肋 - 顶板焊缝处裂纹扩展

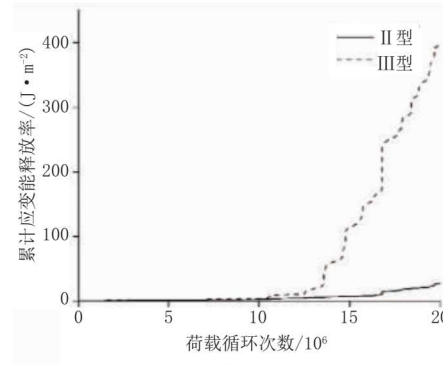
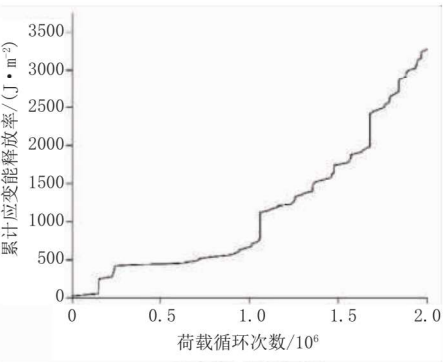
展过程中基本保持平面,向椭圆初始裂纹的宽度与深度方向扩展,焊趾处裂纹在扩展后期向焊缝位置发生轻微偏转。裂纹扩展有先沿焊缝方向纵向扩展,再向深度方向扩展的趋势。在初始裂纹尺寸与荷载条件相同的情况下,焊趾处裂纹扩展速度大于焊跟处裂纹扩展速度。焊跟裂纹与焊趾裂纹分别扩展至 $(a/2c)=4\text{ mm}/30\text{ mm}$ 与 $(a/2c)=8\text{ mm}/34\text{ mm}$ 时,裂纹扩展速率显著加快。U 肋 - 顶板焊缝裂纹模拟与



(a) 荷载循环 200 万次裂纹扩展内部拓展图



(b) 裂纹扩展速率曲线



(c) 裂纹扩展的累计应变能释放率

图 11 U 肋 - 顶板焊趾处裂纹扩展

实桥观测情况对比图如图 12 所示。

3.2 U 肋 - 横隔板焊缝细节裂纹扩展分析

对 U 肋 - 横隔板焊缝疲劳细节进行三维疲劳裂纹扩展模拟。在最不利荷载的循环作用下,U 肋焊趾与横隔板焊趾的裂纹扩展情况如下:

(1)U 肋 - 横隔板焊缝 U 肋焊趾位置裂纹在扩展过程中裂纹形态、扩展速率与累计应变能释放率的变化情况如图 13 所示。在 20 万次荷载循环后,裂纹

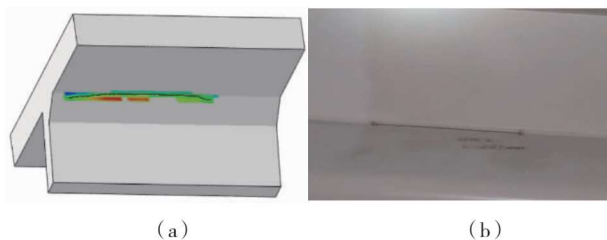
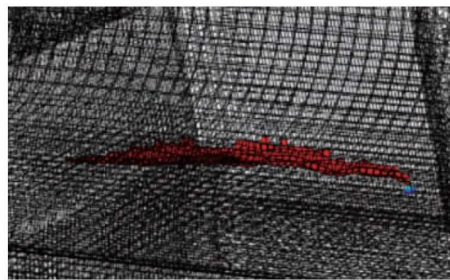


图12 U肋-顶板焊缝裂纹模拟与实桥观测情况对比图

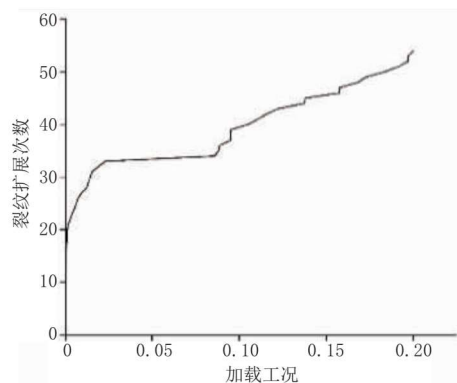
面深度方向贯穿U肋板厚,长度方向扩展至54 mm。U肋焊趾处裂纹先向U肋厚度方向扩展,后沿初始裂纹长度方向顺桥向扩展,U肋表面裂纹延伸,扩展过程后期裂纹面出现竖向向上的轻微偏转,扩展过程中I型(张开型)裂纹占主导地位。U肋焊趾处裂纹前期扩展较快,扩展至厚度方向4 mm,长度20 mm时速度减慢,此时占比最大的I型(张开型)累计应变能释放率达到5 500 J/m²,后期扩展速度减慢。推测认为,此处几何构造不连续造成裂纹扩展前期速率较大,通过裂纹扩展的方式释放一定的位移后,扩展速率逐渐减小。

(2)U肋-横隔板焊缝横隔板焊趾位置裂纹在扩展过程中裂纹形态、扩展速率与累计应变能释放率的变化情况如图14所示。在1 000万次荷载循环后,裂纹面长度方向沿横隔板扩展至25 mm,厚度方向贯穿横隔板。横隔板焊趾处初始裂纹与焊缝有一定夹角,裂纹扩展过程中,先侧向沿横隔板扩展,再向横隔板厚度方向扩展,扩展方向与初始裂纹方向基本一致。裂纹扩展过程中I型(张开型)裂纹占比较少,II型(滑开型)和III型(撕开型)裂纹后期发展较快,占主导地位,裂纹形式与该部位的受力情况与较大的面外变形有关。裂纹扩展速率在约800万次荷载循环后显著增大,此时占比最大的II型(滑开型)累计应变能释放率达到130 J/m²,裂纹扩展至厚度方向6 mm,沿横隔板长度20 mm。

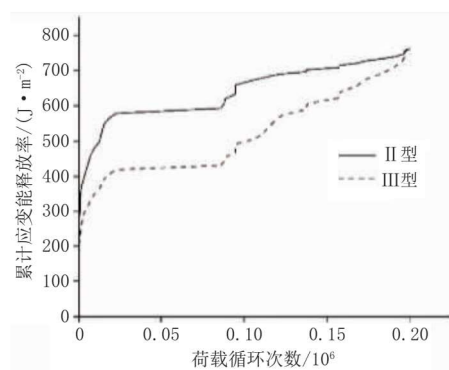
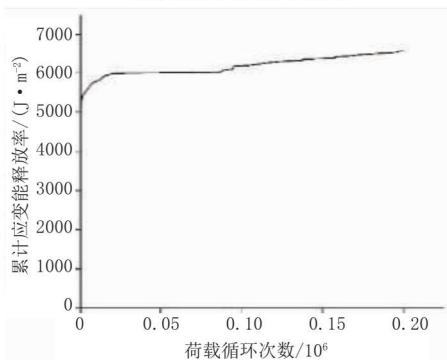
由以上对裂纹扩展过程的分析可知:数值模拟得到的U肋焊趾与横隔板焊趾处裂纹扩展模式与实桥扩展模式较为吻合。横隔板焊趾处裂纹在扩展过程中以II、III型裂纹为主导,先主要沿初始裂纹深度方向在横隔板扩展,再向横隔板厚度方向扩展;U肋焊趾处裂纹以I型裂纹为主导,先主要向U肋厚度方向扩展,后沿初始裂纹长度方向顺桥向扩展。在初始裂纹尺寸与荷载条件相同的情况下,U肋焊趾处裂纹扩展速率大于横隔板焊趾处裂纹扩展速率。对于U肋-横隔板焊缝,U肋焊趾处前期裂纹扩展较快,扩展至20 mm时速率减慢,与实桥U肋焊趾短



(a)荷载循环20万次裂纹扩展内部拓展图



(b)裂纹扩展速率曲线



(c)裂纹扩展的累计应变能释放率

图13 U肋-横隔板焊缝U肋焊趾处裂纹扩展

裂纹多的情况较为符合。横隔板焊趾处裂纹在扩展至厚度方向6 mm,沿横隔板长度20 mm后扩展速率显著加快。U肋-横隔板焊缝裂纹模拟与实桥观测情况对比如图15所示。

4 结论

(1)实桥顶板-U肋焊缝细节高应力幅(大于

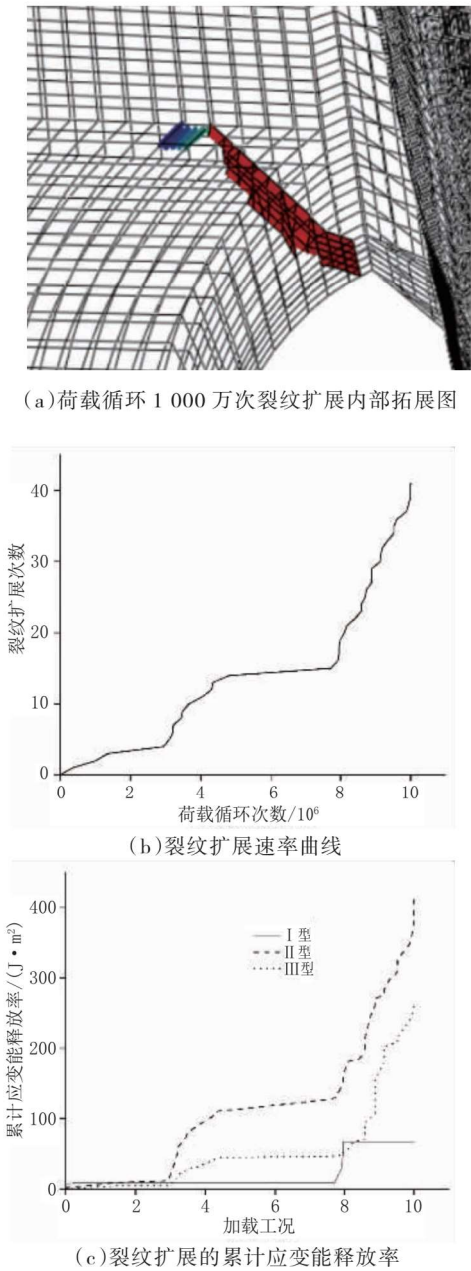


图 14 U 肋 - 横隔板焊缝横隔板焊趾处裂纹扩展

10 MPa)循环次数与疲劳损伤度明显低于横隔板 -U 肋细节,横隔板 -U 肋焊缝最大应力幅达到 75~90 MPa,顶板 -U 肋焊缝最大应力幅为 15~30 MPa,横隔板 -U 肋焊缝细节处裂纹数量远大于顶板 -U 肋焊缝细节处裂纹数量。

(2)顶板 -U 肋焊缝裂纹在扩展过程中基本保持平面,裂纹扩展有先沿焊缝方向纵向扩展,再向深度方向扩展的趋势;横隔板 -U 肋焊缝焊趾处裂纹先沿初始裂纹深度方向在横隔板扩展,再向横隔板厚度方向扩展,焊趾处裂纹先向 U 肋厚度方向扩展,后沿初始裂纹长度方向顺桥向扩展,与实桥表面裂纹扩

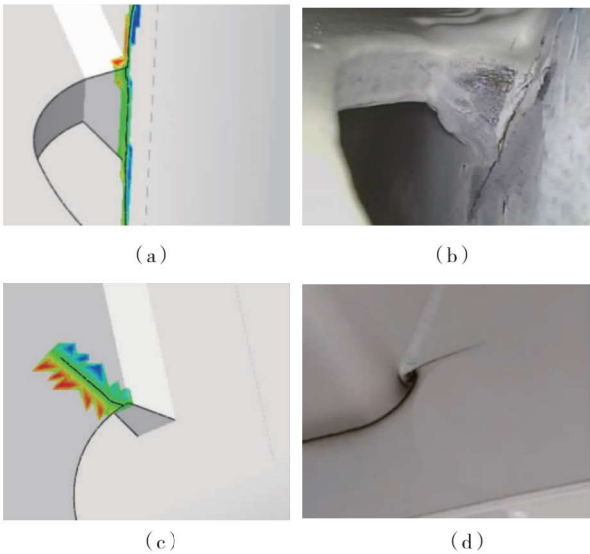


图 15 模拟与实桥观测情况对比图

展状态较为吻合。

(3)在初始裂纹尺寸与荷载条件相同的情况下,顶板 -U 肋焊缝焊趾处裂纹扩展速度大于焊跟处裂纹扩展速度,横隔板 -U 肋焊缝焊趾处裂纹扩展速率大于横隔板焊趾处裂纹扩展速率。

参考文献:

[1] 王春生,冯亚成.正交异性钢桥面板的疲劳研究综述[J].钢结构,2009,9(24): 9-13.

[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.

[3] American Society of CivilEngineers, Committee on Fatigue and Fracture Reliability of the Committee on Structural Safety and Reliability if the Structural Division [J]. Journal of the Structural Division, 1982, 108(ST1): 3-88.

[4] 姚蓓,张启伟.钢斜拉桥运营期耐久性与易损性监测[J].中外公路,2016,36(1): 90-94.

[5] Fisher.J.W, Roy.S., Fatigue of steel bridge infrastructure [J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2011,7(8): 457-475.

[6] 曾志斌.正交异性钢桥面板典型疲劳裂纹分类及其原因分析[J].钢结构,2011,26(2):9-15.

[7] 王斌华,吕彭民,邵雨虹.正交异性钢桥面板隔板与 U 肋连接热点应力分析[J].长安大学学报(自然科学版),2013,33(5): 57-63.

[8] 李丹. 正交异性钢桥面板典型疲劳裂纹成因分析与扩展性态研究[D].上海:同济大学,2021.

[9] 李丹. 超大跨径斜拉桥钢桥面板疲劳损伤监测与断裂力学研究[J].城市防洪与道桥,2021(7): 57-63.

[10] 荣振环.芜湖长江大桥主桥长期实时监控疲劳损伤及寿命评估系统研究[D].北京:铁道部科学研究院,2005.

[11] 曹硕,张启伟.基于实测的苏通大桥疲劳寿命评估[J].结构工程师,2011,27(2): 84-89.

[12] 周太全,郭力,陈鸿天.香港青马大桥在交通荷载作用下的疲劳评估[J].地震工程与工程振动,2002(5): 24-29.

[13] 汪珍,王莹.正交异性钢桥面板的疲劳裂纹扩展规律[J].中南大学学报(自然科学版),2020,51(7): 1873-1882.