

钢桥面板顶板与纵肋连接疲劳开裂局部加固分析

杨靖男^{1,2}, 朋茜^{2*}, 孙义斐³

(1.宁波大学 土木工程与地理环境学院, 浙江 宁波 315211; 2.宁波工程学院 建筑与交通工程学院, 浙江 宁波 315211; 3.中交公路规划设计院有限公司, 北京 100088)

摘要: 正交异性钢桥面板纵肋与顶板连接细节处极易产生疲劳裂纹. 本文通过精细化有限元模型, 分析了栓接角钢加固法和粘贴纤维增强复合材料(Fiber Reinforced Polymer, FRP)型材加固法对钢桥面板疲劳性能的影响. 结果表明: 采用角钢、FRP 型材对顶板与纵肋连接细节的疲劳裂纹进行加固, 焊缝裂纹附近热点应力峰值降幅可达 56.2% 和 46.5%; 焊缝裂纹尖端附近应力强度因子随着板件整体尺寸的增大而减小; 改变板件厚度对应应力强度因子结果值影响最大, 最高可使其下降约 80%, 改变板件纵向长度和单肢长度对其有一定影响; 随着裂纹的持续扩展, 栓接角钢法的加固效果开始下降. 建议在监测到构造细节处疲劳裂纹后应尽早加固.

关键词: 桥梁工程; 正交异性钢桥面板; 疲劳加固; 扩展有限元法

中图分类号: U441

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2023) 02-0042-08

正交异性钢桥面板(简称“钢桥面板”)具有承载能力大、施工速度快等优势, 已经在大跨径桥梁与城市道路桥梁中普遍应用. 由于结构受力复杂, 而且存在不可避免的焊接初始缺陷, 在钢桥面板焊缝处极易产生疲劳裂纹^[1]. 桥梁作为基础设施建设的重要环节之一, 容易疲劳开裂问题会导致安全隐患, 造成重大经济损失, 因此引起业界和学界的广泛关注^[2-4].

在钢桥面板中, 由于轮载直接作用于顶板, 因此在顶板与纵肋位置的焊趾和焊根处经常产生裂纹, 这些裂纹竖向会穿透顶板, 并沿着纵肋向迅速扩展. 由于钢桥面板中纵肋数量众多, 所以有大量焊缝连接顶板与纵肋. 加上车轮荷载的直接作用, 萌生较多的疲劳裂纹, 因此研究减缓顶板与纵肋连接细节疲劳裂纹扩展不容忽视.

在钢桥面板顶板与纵肋处疲劳裂纹加固研究中, 常用的加固方法有局部刚度加固法和整体刚度加固法. 局部刚度加固法一般是通过栓接或粘贴局部板件, 从而增大顶板与纵肋处局部刚度, 减

缓顶板与纵肋处疲劳裂纹的扩展^[5]. Wang 等^[6]、王贤强等^[7]研究发现, 止裂孔可以暂时阻止钢桥腹板疲劳裂纹的扩展, 螺栓和粘贴角钢对抑制裂纹有作用. 吕志林等^[8]、邓扬等^[9]、徐伟伟等^[10]通过碳纤维增强基复合材料(Carbon Fibre Reinforced Polymer, CFRP)板修复疲劳裂纹, 研究表明修复后钢板及其焊缝的疲劳寿命得以提高. 朱志伟等^[11]采用气动冲击修复技术, 较好抑制了复合型钢桥面板疲劳裂纹的扩展. 整体刚度加固法可以提高钢桥面板刚度的整体水平, 使得顶板与纵肋处的应力减小, 从而使该位置处疲劳裂纹扩展减缓. 尤永学^[12]、Qin 等^[13]、Cheng 等^[14]开展了超高性能混凝土(Ultra-High Performance Concrete, UHPC)铺装层对钢桥面板构造细节处疲劳性能的影响研究, 结果表明采用 UHPC 加固桥面铺装可以显著降低构造细节应力, 延长钢桥面板的疲劳寿命.

尽管整体加固方法的效果普遍优于局部加固法, 然而在大跨径桥梁中钢桥面板疲劳开裂的加固需要综合考虑加固效果及加固过程中引入的自重,

收稿日期: 2022-06-23.

宁波大学学报(理工版)网址: <http://journal.g.nbu.edu.cn/>

基金项目: 国家自然科学基金(52008215); 浙江省自然科学基金(LQ20E080013).

第一作者: 杨靖男(1999-), 男, 浙江嵊州人, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 钢结构与组合结构桥梁. E-mail: yangjin1999@163.com

*通信作者: 朋茜(1990-), 女, 陕西商南人, 博士/副教授, 主要研究方向: 钢结构与组合结构桥梁. E-mail: pengxi@nbut.edu.cn

在尽量不增加桥面板自重的情况下最大程度减缓疲劳裂纹的扩展.如何在尽量不中断交通,且对原有结构产生损伤较小的前提下,对钢桥面板顶板的疲劳开裂进行有效加固,仍亟待解决.

本文选取钢桥面板顶板与纵肋连接细节作为研究对象,分别采用栓接角钢和粘贴 FRP 型材两种方法对该疲劳细节进行加固.基于足尺模型试验建立有限元模型,通过疲劳裂纹扩展数值模拟评价加固效果,验证栓接角钢和粘贴 FRP 型材对该细节疲劳裂纹加固的可靠性.

1 局部刚度加固法

目前,常见解决钢桥面板疲劳问题的方法有采用 UHPC 进行加固的组合桥面板结构,这种方法可以提高桥面的整体刚度,有效改善桥面局部受力;缺点是会影响正常的交通运输,并增加桥梁自重.如果仅针对钢桥面板较小范围内的疲劳开裂问题,可以运用局部刚度加固法减缓疲劳裂纹的扩展,以保证结构的安全使用.例如在裂纹附近

粘贴板件,不仅不会影响正常的交通运输,而且不需要大型设备辅助操作,发展潜力较大.

本文应用局部刚度加固法(图 1),该方法分为栓接角钢加固法和粘贴 FRP 型材加固法.栓接角钢加固法,即通过螺栓预紧将带有预留孔的角钢与顶板、纵肋连接起来,应用该方法时需拆除带裂纹顶板上部的局部桥面铺装,并考虑钢材打孔后结构应力的分布情况.粘贴 FRP 型材加固法,即将厂内预制的 FRP 型材与钢桥面板直接胶接,FRP 型材具有加工方便、自重轻、抗疲劳性能好等优点.探究这两种加固方法对抑制钢桥面板疲劳裂纹的扩展具有实际意义.

研究模型选取钢桥面板常规结构形式,以浙江沿海某桥为研究对象,该桥为连续钢箱梁斜拉桥,主梁采用单箱三室箱形截面,梁宽 29.5 m、梁高 3.5 m、顶板厚 16 mm,如图 2 所示.纵肋选用梯形肋,厚 8 mm、肋间中心距 600 mm;横隔板为实腹式,厚 12 mm、间距 3.5 m,具体构造如图 3 所示.其中 R 为过渡圆弧半径.

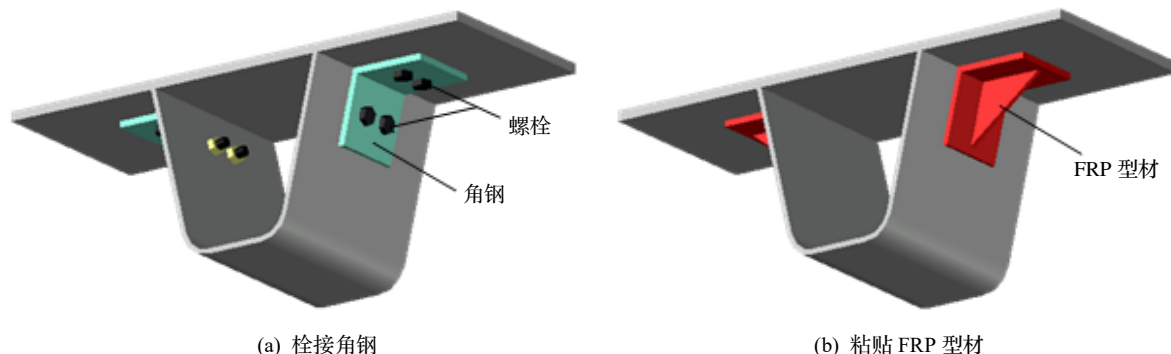


图 1 局部刚度加固法

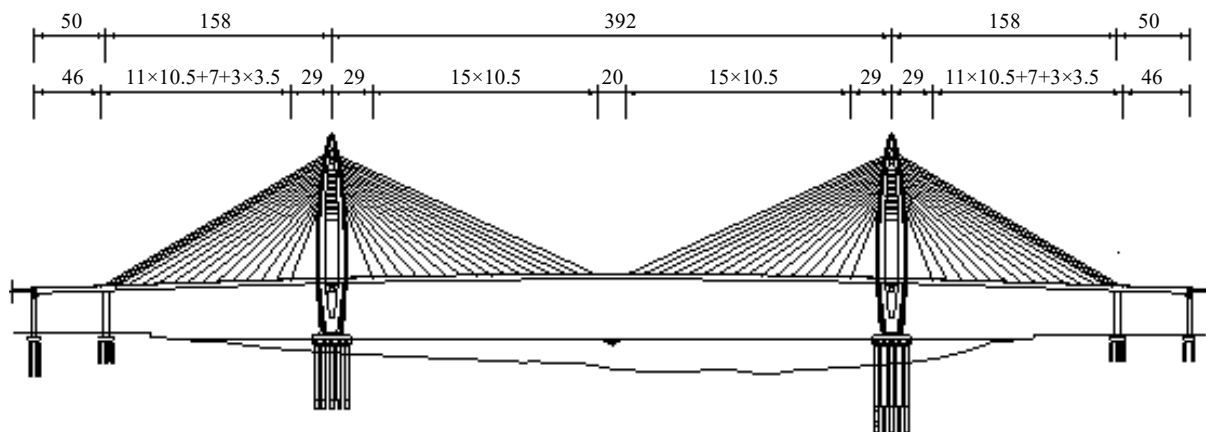


图 2 选用钢桥立面布置(单位: m)

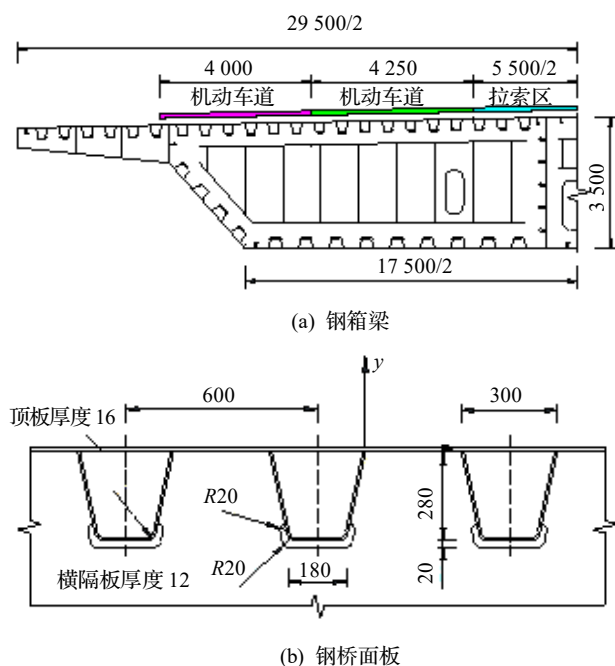


图3 钢箱梁与钢桥面板构造尺寸(单位: mm)

2 有限元分析

2.1 有限元模型

在荷载作用下钢桥面板顶板与纵肋焊接细节处产生疲劳裂纹,按照纵桥向萌生位置可以分为横隔板间疲劳裂纹和横隔板处疲劳裂纹,裂纹有3种潜在的开裂形式,如图4所示。裂纹A、裂纹B、裂纹C分别萌生于顶板焊趾、顶板焊根、纵肋焊趾位置,虽然3类裂纹萌生的位置不同,但是其扩展规律相似,裂纹沿纵桥向与竖向分别扩展,渐渐穿透钢板,并沿纵桥向迅速延伸。

以横隔板间顶板与纵肋连接为对象,设计了顶板与纵肋连接细节的足尺试件,并进行了静力与疲劳试验,如图5所示。试验结果表明:疲劳破坏的5个试件中,除1个试件从顶板焊根处萌生裂纹(图4中裂纹B)外,其余4个试件均从顶板焊趾处萌生裂纹(图4中裂纹A)。典型疲劳破坏过程分为裂纹萌生阶段、稳定扩展阶段和快速扩展阶段。提取距离焊缝 $0.5T$ (T 为母材厚度)位置处的测点应力,发现在这些试件中各部位应力水平从高到低排序依次为:纵肋焊趾处、顶板焊趾处以及顶板焊根处,其中顶板焊趾与顶板焊根处的应力水平相差不到1/10。

根据疲劳试验结果,选择顶板与纵肋连接焊

趾细节为疲劳热点部位,采用ABAQUS软件建立精细化有限元模型,如图6所示。

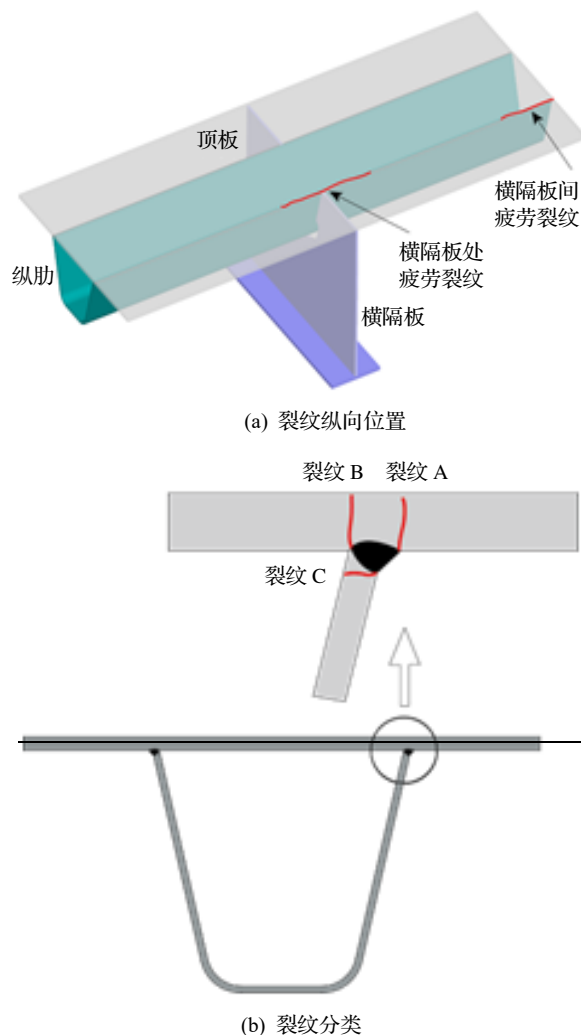


图4 纵肋与顶板连接处常见的裂纹形式



(a) 加载

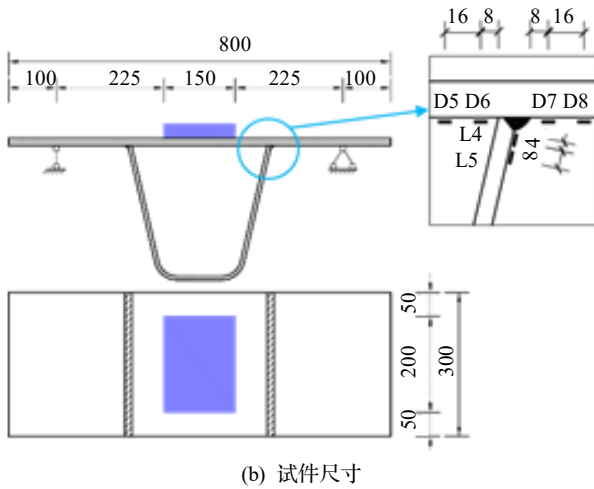


图5 加载与试件尺寸示意图(单位: mm)

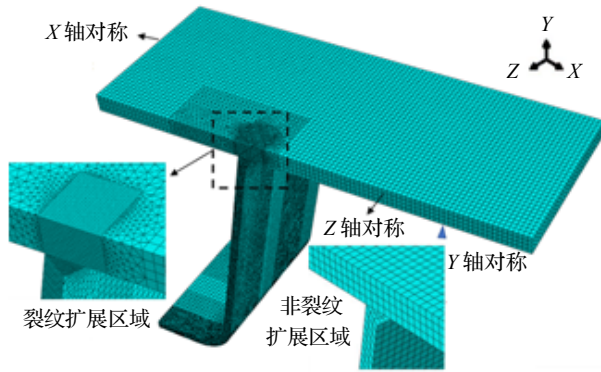


图6 有限元 1/4 模型

有限元模型加载位置与试验相同,荷载按静力试验最大级荷载施加。为了提高计算速度,建立1/4模型,并在纵桥向(Z轴对称面)和横桥向(X轴对称面)施加对称约束,顶板边界右端距离10 mm处下侧面设置为Y轴向支撑。钢材采用理想的弹塑性模型,弹性模量取 2.06×10^5 MPa,泊松比取0.3。有限元整体模型单元类型为C3D8R,网格尺寸4 mm;疲劳裂纹扩展区域单元类型为C3D8,对网格进行局部加密,沿裂纹扩展方向单元网格尺寸为0.1 mm。将距离顶板焊趾0.5T和1.5T位置处有限元分析与试验测试应力进行对比,结果如图7所示。疲劳试验沿试件纵向每隔25 mm布置一个应变片,监测其应变(应力)的分布。从图7可见,顶板焊趾细节处有限元计算应力结果与足尺试验实测结果规律吻合,且两者误差小于5%。因此,可以得出该有限元模型具有良好的精度,能较好地模拟钢桥面板顶板与纵肋细节的受力特征。

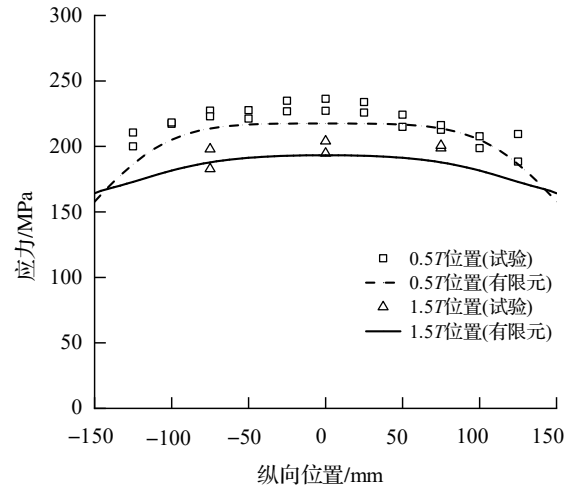


图7 有限元分析结果与试验测试结果对比

在线弹性断裂力学中,假定材料为带裂纹线弹性体,若裂纹尖端塑性区域远小于裂纹尺度,则该塑性区域对裂纹尖端周围应力分布影响较小,可以运用线弹性断裂力学理论进行讨论;若塑性区域接近或超过裂纹本身尺度,则需运用弹塑性断裂力学理论进行研究。

对于钢桥面板顶板与纵肋连接细节处萌生的顶板贯穿裂纹(图4中裂纹A),在裂纹尖端周围产生的塑性区域远小于裂纹尺度,对裂纹尖端应力分布影响较小,可以运用线弹性断裂力学理论对该疲劳裂纹进行讨论。金属材料断裂应力与裂纹长度之间关系的修正公式为:

$$\sigma_c \sqrt{a} = \left(\frac{2EU}{\pi} \right)^{1/2} = C,$$

式中: σ_c 表示断裂应力; a 表示裂纹长度; E 表示弹性模量; U 表示裂纹在扩展过程中所消耗的形变功; π 为圆周率; C 为材料常数。

针对特定的各向同性线弹性材料,线弹性断裂力学常用应力强度因子(K)描述裂纹尖端局部的应力分布,其值由外界作用应力、裂纹尺寸与所在位置、试件几何形状决定:

$$K_i = \sigma_\infty \sqrt{\pi a},$$

式中: K_i 表示应力强度因子, $i=1,2,3$ 为裂纹类型,三者分别指张开型、滑开型、撕开型; σ_∞ 表示外界作用应力。

Paris 定律常用于疲劳裂纹扩展阶段数值模型的研究,其公式为:

$$\frac{da}{dN}=C(\Delta K_{eff})^m,$$

式中: N 表示应力循环次数; ΔK_{eff} 表示裂纹尖端等效应力强度因子幅值; m 表示与材料相关的裂纹扩展参数.

2.2 不同加固方式的影响

2.2.1 应力水平及分布

为了探究不同加固方式对顶板焊趾热点应力分布规律的影响, 基于足尺试验建立精细化有限元模型. 选取距离热点处 $0.5T$ 和 $1.5T$ 位置的应力外推值作为热点应力, 分析不作加固处理、栓接角钢加固、粘贴 FRP 型材加固 3 种形式下焊缝附近热点应力的分布情况.

有限元模型中钢材和 FRP 型材参数见表 1.

表 1 材料参数取值

材料	弹性模量/($\times 10^3$ MPa)						泊松比		
	E_{11}	E_{22}	E_{33}	E_{12}	E_{13}	E_{23}	μ_{12}	μ_{13}	μ_{23}
FRP	98	7.8	7.8	4.7	4.7	3.2	0.34	0.34	0.44
钢材	206						0.3		

考虑 FRP 型材各向异性, 其参数根据文献[15]取值. 角钢、FRP 型材均为实体单元 C3D8R, 通过绑定与原钢板连接. 两者尺寸大小相同, 与顶板、纵肋板接触尺寸为 $100\text{ mm}\times 100\text{ mm}$, 板厚 10 mm . 不同加固方式下顶板焊趾附近热点应力分布如图 8 所示.

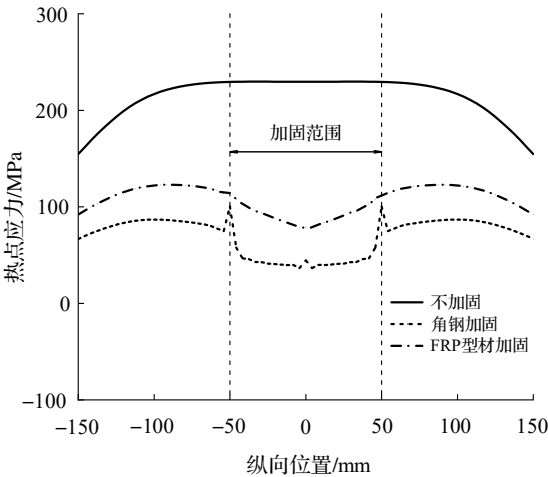


图 8 不同加固方式下顶板焊趾处热点应力分布

从图 8 可知, 试件在未加固时顶板焊趾处附近的热点应力分布呈“倒盘型”, 即中间热点应力较大, 且存在一段区间(约 $2/3$)均匀分布, 至两边逐渐

减小. 经角钢或 FRP 型材加固后, 其热点应力明显下降, 在板件加固范围内, 热点应力分布呈“驼峰型”, 即中间应力小, 两端相对较大.

由于裂纹一般在跨中部位产生, 经分析可知, 应用栓接角钢、粘贴 FRP 型材局部刚度加固法可以降低焊缝裂纹附近的热点应力, 基本能够在不同程度上达到抑制裂纹扩展的效果. 从数据结果看, 栓接角钢可以使最大应力值下降 56.2% , 粘贴 FRP 型材可以使其下降 46.5% , 所以栓接角钢法在减小裂缝附近应力的能力相较于粘贴 FRP 型材更胜一筹.

2.2.2 应力强度因子

结合扩展有限元法(Extended Finite Element Method, XFEM)的分析方式^[16], 基于试验建立包含裂纹的精细化断裂力学有限元模型, 并分析求解, 得出裂纹尖端所对应的 K 值. 裂纹选择半椭圆形, 椭圆短半轴(裂纹深度)、椭圆长半轴(裂纹长度的一半)分别取 5 mm 和 10 mm . 通过有限元计算得到 K_1 值为 454.10 , K_2 值为 7.09 , K_3 值为 5.80 . 可见, K_1 值远大于 K_2 与 K_3 值, 即纵肋-顶板构造细节处的顶板焊趾裂纹类型为 I 型(张开型)裂纹, 后续着重结合 K_1 分析.

对栓接角钢和粘贴 FRP 型材两种加固方式进行有限元分析计算, 得到相应的 I 型裂纹应力强度因子. 通过角钢加固试件的 K_1 值为 101.80 , 通过 FRP 型材加固试件的 K_1 值为 125.37 . 相较于未加固试件可以发现, 采用局部刚度加固法后, K_1 值明显减小. 采用栓接角钢法 K_1 降低 77.6% , 采用粘贴 FRP 型材法 K_1 降低 72.4% . 表明应用局部刚度加固法可以降低焊缝裂纹尖端附近处的热点应力, 有效减缓裂纹的扩展, 且栓接角钢法的加固效果略优于粘贴 FRP 型材法.

2.3 板件尺寸大小的影响

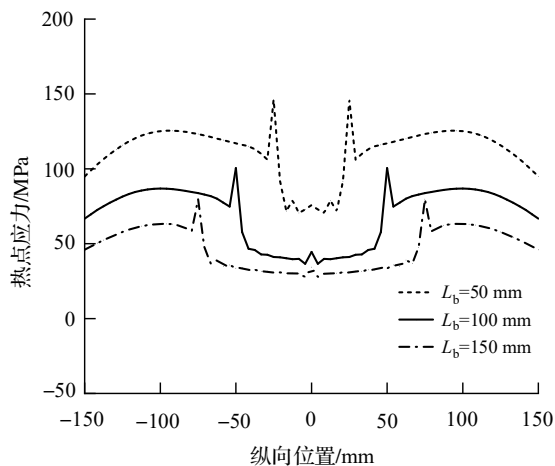
2.3.1 应力水平及分布

采用栓接角钢加固法研究板件尺寸对顶板焊趾处热点应力分布规律的影响, 板件参数见表 2.

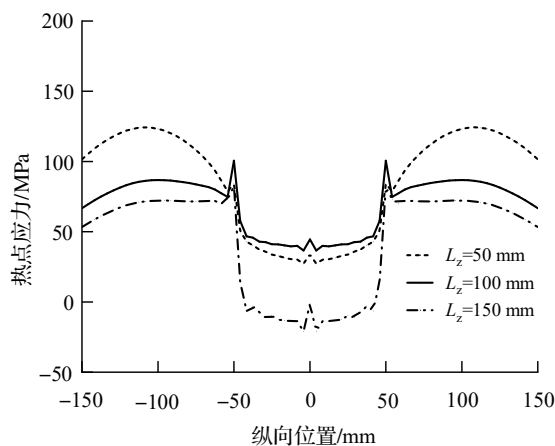
表 2 板件参数选取

mm		
纵向长度(L_b)	单肢长度(L_z)	厚度(t)
50	50	5
100	100	10
150	150	15

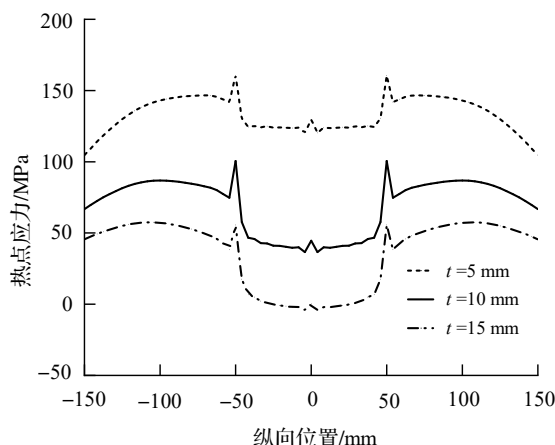
板件尺寸大小改变对顶板焊趾细节处的热点应力分布影响如图9所示。



(a) 板件纵向长度



(b) 板件单肢长度



(c) 板件厚度

图9 不同板件尺寸大小对应顶板焊趾热点的应力分布

从图9可以看出,变换纵向长度、单肢长度和厚度3个板件尺寸参数时,顶板焊趾处热点应力分

布均会发生变化。随着板件纵向长度和厚度的增加,焊趾处热点应力水平明显降低,且随着板件纵向长度和厚度的增大,应力降幅逐渐减小,二者表现出相似的变化规律。当板件单肢长度逐渐增加时,热点应力分布变化不如板件纵向长度和厚度明显。当单肢长度从100 mm减至50 mm时,在板件加固范围内的热点应力略有减小,而两端的热点应力增加明显;当单肢长度由100 mm增至150 mm时,在板件加固范围内的热点应力明显下降,而两端应力降幅较小。工程中可以根据实际裂纹特征选择具体的加固板件尺寸,以改善构造细节处应力水平的降低程度。

2.3.2 应力强度因子

基于扩展有限元法,求得不同加固板件尺寸对应的裂纹尖端应力强度因子,如图10所示。图10中横坐标50、100、150为板件纵向长度和单肢长度,括号内5、10、15为板件厚度。

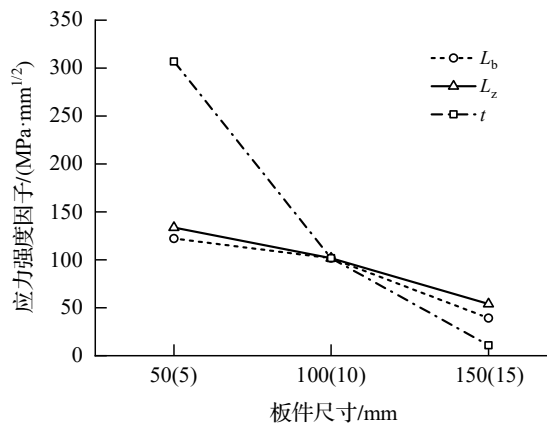


图10 不同板件尺寸大小对应的裂纹尖端 K_I 值

分析可知,随着角钢板件整体尺寸的增大,裂纹尖端附近的 K_I 值随之减小;板件纵向长度、单肢长度对 K_I 影响类似,数值相近,两者尺寸从50 mm增至100 mm时, K_I 值下降约23%,从100 mm增至150 mm时, K_I 值下降约53%;板件厚度从5 mm增至10 mm时, K_I 值下降约67%,厚度从10 mm增至15 mm时, K_I 值下降约80%。表明厚度的变化对裂纹尖端 K_I 值大小以及裂纹扩展速率的影响较大。

2.4 加固时间点的影响

钢桥面板在承受疲劳荷载时,随着加载次数的增多,疲劳裂纹也会随之不断扩展。为了探究疲

劳裂纹加固时最适宜的时间点,采用栓接角钢加固法,基于扩展有限元法求得不同裂纹长度下加固前后的裂纹尖端应力强度因子.加固板件尺寸为纵向长度100 mm、单肢长度100 mm、厚度10 mm.细节处裂纹尖端 K_I 值如图11所示.

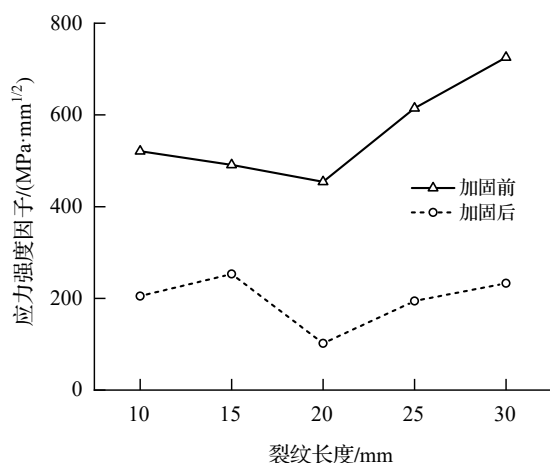


图11 应力强度因子随裂纹长度的变化

从图11可以看出,裂纹产生初期,能量需要通过裂纹的扩展得以释放,故 K_I 值略高.伴随着裂纹持续扩展,尖端附近处 K_I 值降低;裂纹扩展至一定长度后,周围约束减小,裂纹扩展迅速, K_I 值增长速度提高.在裂纹长度为20 mm时进行栓接角钢加固, K_I 值的下降幅度最高可达78%;在裂纹长度达到30 mm时进行加固, K_I 值的下降幅度降为68%.由此可知,伴随着裂纹的继续扩展,栓接角钢法的加固效果开始下降.

3 结论

本文研究了两种局部加固方法对钢桥面板顶板与纵肋连接细节处疲劳性能的影响,得到以下主要结论:

(1)采用栓接角钢法和粘贴FRP型材法对钢桥面板顶板与纵肋连接细节的疲劳裂纹进行加固,焊缝裂纹附近热点应力峰值得到明显下降,表明两种加固方法都能有效抑制疲劳裂纹的进一步扩展,且栓接角钢的加固效果更好.

(2)采用栓接角钢法加固顶板与纵肋连接疲劳裂纹时,增大角钢板件整体尺寸,焊缝裂纹尖端附近的应力强度因子降幅也随之增大,可以提高加固效果.增大角钢板件的纵向长度、单肢长度或厚

度的任一尺寸时,细节处应力峰值降幅均有所提高,其中改变角钢厚度对抑制裂纹扩展具有更好效果.当厚度为15 mm时细节处应力强度因子的降幅约80%.

(3)栓接角钢法对顶板与纵肋连接细节的加固效果随着裂纹的持续扩展呈下降趋势.因此,建议在监测到顶板与纵肋细节疲劳裂纹后应尽早加固.

参考文献:

- [1] 张清华,李俊,卜一之,等.正交异性钢桥面板纵肋与横隔板交叉构造细节疲劳开裂快速加固方法[J].中国公路学报,2018,31(12):124-133.
- [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] 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.
- [4] 曹雪坤,傅中秋,高玉强,等.钢桥面板顶板焊根裂纹对铺装层受力性能影响[J].三峡大学学报(自然科学版),2022,44(4):39-44.
- [5] 王洋,邵旭东,陈杰,等.重度疲劳开裂钢桥桥面的UHPC加固技术[J].土木工程学报,2020,53(11):92-101;115.
- [6] Wang Y Z, Wang C S, Duan L. Bonding and bolting angle reinforcement for distortion-induced fatigue in steel girder bridges[J]. Thin-Walled Structures, 2021, 166: 108027.
- [7] 王贤强,杨羿,刘朵,等.平板贯穿裂纹高强螺栓止裂加固试验研究[J].建筑结构,2022,52(3):104-109.
- [8] 吕志林,姜旭,强旭红,等.高弹模CFRP粘贴法修复钢桥板疲劳裂纹[J].建筑钢结构进展,2022,24(5):92-100.
- [9] 邓扬,刘涛磊,曹宝雅,等.钢桥面顶板-U肋焊缝表贴增强板材疲劳加固方法研究[J].中国公路学报,2022,35(2):201-211.
- [10] 徐伟伟,祝志文,牛华伟.正交异性钢桥面板纵肋-面板疲劳开裂的CFRP加固研究[J].铁道科学与工程学报,2021,18(11):2933-2943.
- [11] 朱志伟,高天,吉伯海,等.基于现场监测的钢桥面板疲劳裂纹气动冲击修复效果评估[J].武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2022,46(1):120-124.
- [12] 尤永学.随机车辆荷载流下UHPC加固正交异性钢桥面板疲劳性能评估[J].城市道桥与防洪,2022(3):182-185;212.
- [13] Qin S Q, Zhang J B, Huang C L, et al. Fatigue

- performance evaluation of steel-UHPC composite orthotropic deck in a long-span cable-stayed bridge under in-service traffic[J]. *Engineering Structures*, 2022, 254: 113875.
- [14] Cheng B, Abdelbaset H, Li H T, et al. Fatigue behavior of rib-to-floorbeam welded connections in UHPC reinforced OSDs subjected to longitudinal flexural[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2022, 137:106383.
- [15] Kelly G. Load transfer in hybrid (bonded/bolted) composite single-lap joints[J]. *Composite Structures*, 2005, 69(1):35-43.
- [16] Wang B J, Zhou X Y, Chen A R. Probabilistic study on the macro-crack initiation of the rib-to-deck welded joint on orthotropic steel deck[J]. *International Journal of Fatigue*, 2020, 139:105721.

Partial reinforcement effect of fatigue cracks in rib-to-deck joints of orthotropic steel decks

YANG Jingnan^{1,2}, PENG Xi^{2*}, SUN Yifei³

(1.School of Civil & Environmental Engineering and Geography Science, Ningbo University, Ningbo 315211, China;

2.School of Architecture and Traffic Engineering, Ningbo University of Technology, Ningbo 315211, China;

3.CCCC Highway Consultants Co., Ltd., Beijing 100088, China)

Abstract: The rib-to-deck joints of orthotropic steel decks are prone to fatigue cracks. Through the establishment of finite element model, the influences on the fatigue performance by two approaches, bolting angle steel and pasting FRP profile of orthotropic steel decks, are analyzed. The results show that: the peak value of hot spot stress near weld crack decreases significantly by such two approaches. It can be reduced by 56.2% by bolting angle steel, and 46.5% by pasting prefabricated FRP profile. The stress-intensification factor near the tip of the weld crack decreases with the increase of the overall size of the plate, where the most influential factor is the thickness of the plate and the stress-intensification factor can be reduced by about 80% at most. In addition, the longitudinal length and single limb length of the plate also have certain influence on it. As the crack propagates, the reinforcement effect by bolting angle steel begins to weaken. It is suggested that the reinforcement should be carried out as soon as possible when the fatigue cracks in the longitudinal rib-to-deck joints are monitored.

Key words: bridge engineering; orthotropic steel deck; fatigue reinforcement; extended finite element method

(责任编辑 史小丽)