

基于断裂力学疲劳裂纹扩展研究及修复试验

吴 炜

[同济大学建筑设计研究院(集团)有限公司,上海市 200092]

摘 要: 针对正交异性钢桥面板部分疲劳部位裂纹扩展行为进行分析时,基于有限元模型,引入初始裂纹,得到裂纹尖端应力强度因子与循环荷载下不同疲劳细节的裂纹扩展过程,与实桥裂纹情况对比后发现两者基本一致。在此基础上,采用止裂孔法、CFRP布粘贴加固+止裂孔法加固修复了带有裂纹的横隔板弧形开口试件,并对修复后的试件分别进行静力和疲劳试验,所得试验结果也与有限元计算结果基本一致。针对正交异性钢桥面裂纹的修补与维护进行研究具有重要意义,可供相似工程参考。

关键词: 钢桥面板裂纹扩展;有限元;横隔板;修复;试验

中图分类号: U441+.4

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2025)09-0374-06

Study of Fatigue Crack Extension Based on Fracture Mechanics and Repair Tests

WU Wei

[Tongji University Architectural Design Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200092, China]

Abstract: Aiming at the analysis of the crack extension behaviour of fatigue parts of orthotropic steel bridge decks, based on the finite element model, the initial crack is introduced, and the crack extension process of different fatigue details under the stress intensity factors of the crack tip and the cyclic load is obtained. After compared with the actual bridge crack situation, it is found that the two are basically the same. On this basis, the arc-shaped opening specimens of the transverse partition with cracks are repaired by using the anti-crack hole method, and the CFRP cloth bonding reinforcement + anti-crack hole method reinforcement. And the static and fatigue tests are respectively conducted on the repaired specimens. The obtained test results are also basically consistent with the finite element calculation results. It is of great significance to conduct research on the repair and maintenance of cracks in orthotropic steel bridge decks, which can serve as a reference for similar projects.

Keywords: steel bridge deck crack extension; finite element; transverse partition; repair; test

0 引 言

随着正交异性钢桥面板在国内外大跨度桥梁中的广泛应用,其疲劳问题也越发得到重视。过往的经验以及实桥的检测结果表明,正交异性钢桥面板的横隔板与纵肋弧形缺口处为疲劳裂纹出现的典型部位^[1],因此该疲劳细节的研究和修复具有重要理论研究和实践意义。

1 疲劳裂纹扩展参数

初始裂纹用于线弹性断裂力学基本理论模拟裂纹扩展^[2],也用于计算裂纹尖端应力强度因子,并且

疲劳寿命与应力强度因子的计算结果很大程度上取决于初始裂纹尺寸的选取。在二维裂纹扩展模型中采用线裂纹,三维裂纹扩展模型中采用面裂纹,本文采用正交异性钢桥面三维裂纹扩展模型,其初始裂纹为三维面裂纹。1/4椭圆形、半椭圆形、椭圆形是常用且较精准的裂纹模拟形状,本文初始裂纹采用长度10 mm、深度2.5 mm(半短轴 a_0 /半长轴 $c_0 = 1/2$)的半椭圆裂纹,以考虑初始的可检测。

根据裂纹扩展速率的理论阐述,描述裂纹扩展的Paris公式^[3]表达式为: $\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m$,参照日本JSSC规范,其中 C 值取 1.5×10^{-11} m/次, m 值取2.75。判断裂纹是否扩展的依据取决于应力强度因子幅值 ΔK_{th} 是否达到 $92 \text{ MPa} \cdot \text{mm}^{0.5}$,裂纹扩展方向为最大切应力方向。

收稿日期: 2024-10-13

作者简介: 吴炜(1980—),男,硕士,高级工程师,从事桥梁设计工作。

2 应力强度因子分析

现分别将半椭圆裂纹引入至 U 肋-横隔板疲劳细节处,如图 1 所示。在有限元模拟中,裂纹类型采用扩展有限元,不进行裂纹扩展与几何非线性分析,裂纹与整体模型之间采用“硬接触”。应力强度因子的计算采用 J 积分法,输出裂纹尖端前 15 道围线积分,取积分结果稳定后的应力强度因子。

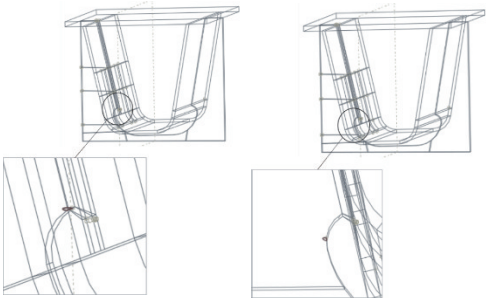


图 1 初始裂纹位置

断裂力学中根据裂纹的 3 种开裂形态,将裂纹类型分为张开型的 I 型裂纹、滑开型的 II 型裂纹、撕开型的 III 型裂纹,3 种开裂类型对应的裂纹应力强度因子表示为 K_I 、 K_{II} 、 K_{III} 。现对移动车载下疲劳焊接细节的裂纹尖端应力强度因子进行分析。提取裂纹尖端沿厚度方向中点的 K_I 、 K_{II} 、 K_{III} ,对模型进行移动加载,设定横纵向移动步距均为 200 mm(纵向中心处增加 1 个工况),横向设置 9 个工况,纵向设置 35 个工况。加载工况布置见图 2。

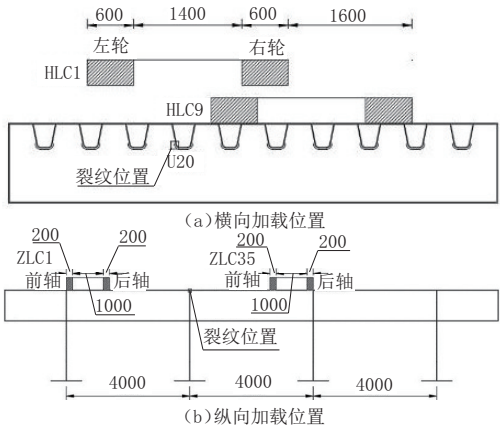


图 2 车辆荷载位置(单位:mm)

在 U 肋与横隔板连接处,焊趾焊根处各加载工况下的裂纹尖端应力强度因子 K_I 影响线见图 3。各加载工况下,在焊趾与焊根处的纵向、横向中心位置处,U 肋焊趾、横隔板焊趾和横隔板弧形缺口这 3 处裂纹尖端应力强度因子 K_I 、 K_{II} 、 K_{III} 的横向、纵向影响线见图 4、图 5。

结果表明:

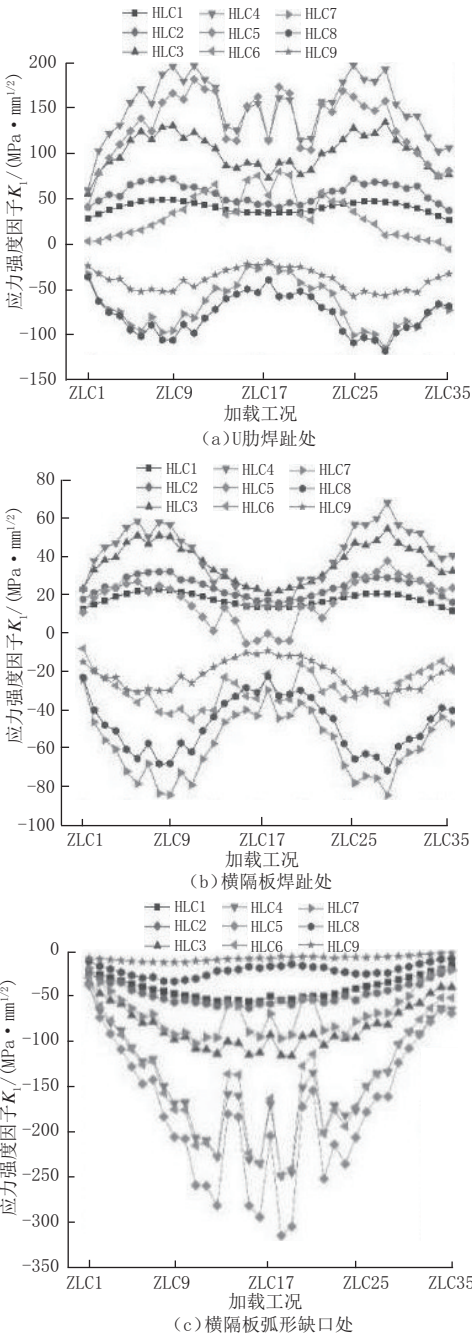


图 3 应力强度因子 K_I 影响线

- (1)U 肋焊趾处初始裂纹应力强度因子 K_I 最大值达到 $200 \text{ MPa} \cdot \text{mm}^{0.5}$,超过日本 JSSC 规范中的桥梁钢结构应力强度因子阈值,有较大的裂纹扩展驱动力,大于横隔板焊趾处 K_I 的最大值,与实桥中发现 U 型加劲肋的焊趾处短裂纹数量较多情况基本一致。
- (2)U 肋焊趾处 I 型裂纹占比较大,横隔板焊趾处 I 型和 II 型裂纹均占较大比例;横隔板弧形缺口处应力强度因子几乎均为负值,说明预制初始裂纹在荷载条件下以闭合状态为主。
- (3)U 肋-横隔板焊缝焊趾处的初始裂纹尖端的

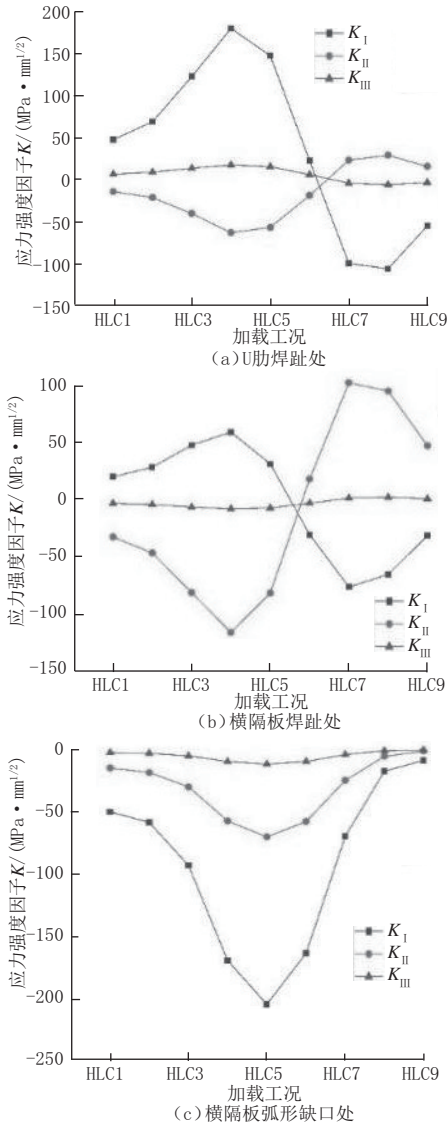


图4 纵向中心位置的应力强度因子

应力强度因子 K_I 在轮载位于纵向中心处时最小,在纵向中心两侧 1.6 m 位置处达到最大值。

3 疲劳裂纹三维扩展分析

根据应力强度因子分析结果,找到U肋-横隔板焊接细节的最不利荷载工况,利用ABAQUS中direct cyclic分析步在最不利荷载位置进行循环加载。循环方式见图6。

根据前述裂纹扩展参数,对U肋与横隔板的焊缝进行疲劳裂纹扩展模拟。根据应力强度因子的分析,由于横隔板弧形缺口处裂纹在仅考虑车辆荷载的条件下不具备足够的裂纹扩展驱动力,故不考虑该部位的裂纹扩展。

3.1 U肋焊趾位置裂纹

图7为U肋与横隔板焊缝在U肋焊趾处的裂纹自初始状态至循环20万次的拓展形式。图8为3种

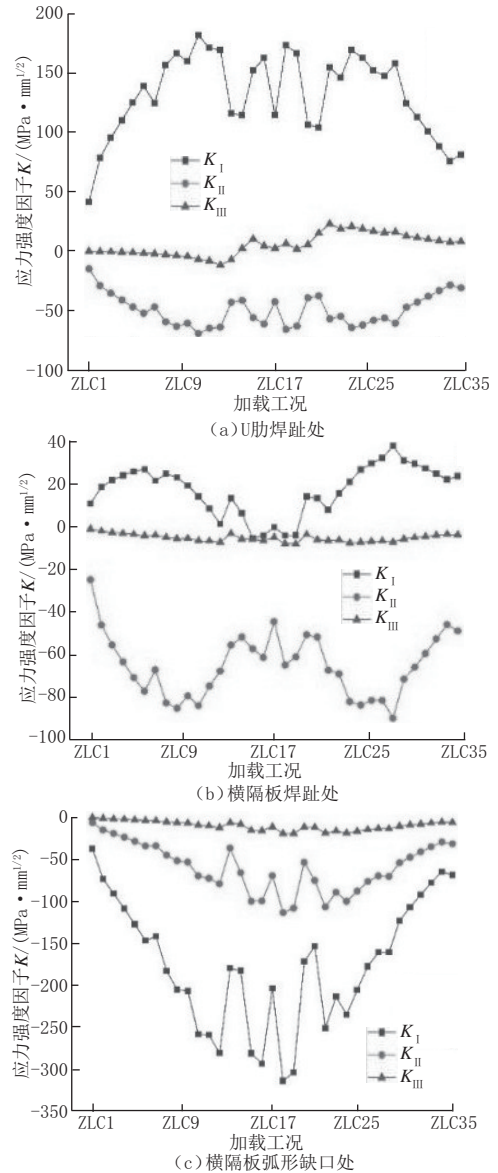


图5 横向中心位置的应力强度因子

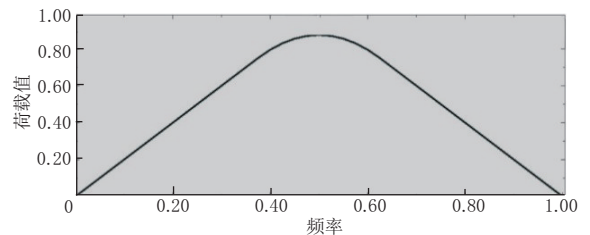


图6 荷载循环方式

形式裂纹的扩展速率和累计应变能释放率。U肋焊趾处裂纹初始阶段扩展方向为指向钢板厚度方向,随后沿桥长方向既有裂纹长度方向扩展,扩展过程后期裂纹局部转向桥面板方向。在整个裂缝扩展周期内,裂缝前期扩展较快,后期速度减慢,扩展过程中I型裂纹占主导地位。

3.2 横隔板焊趾位置裂纹

图9、图10为横隔板焊趾处裂纹扩展图形、裂纹扩展速率曲线和累计应变能释放率。

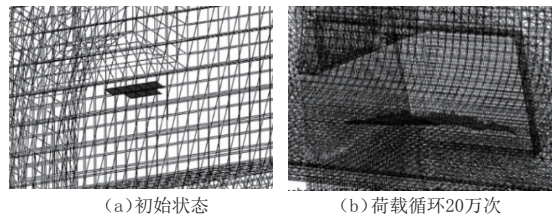


图 7 U肋-横隔板焊缝裂纹拓展形式

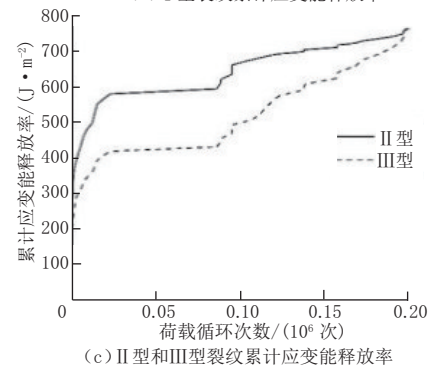
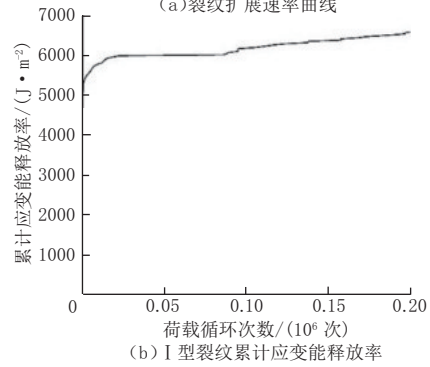
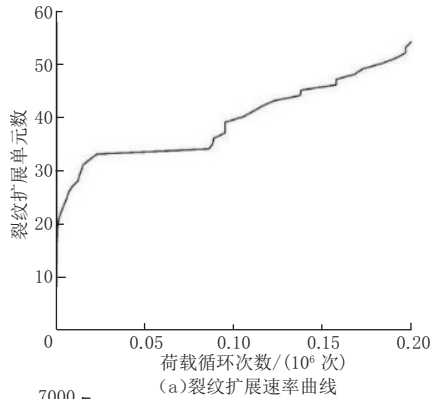


图 8 U肋-横隔板焊缝在U肋焊趾处的裂纹扩展速率曲线和累计应变能释放率

横隔板与U肋焊趾处的初始裂纹与焊缝长度方向有夹角,裂纹在疲劳荷载下,发展过程为先朝向裂纹深度方向,后朝向隔板厚度方向,整体方向与初始方向一致。裂纹扩展速率在约300万次和800万次荷载循环处出现明显的增长点。图10(b)显示:I型裂纹占比较少;II型和III型裂纹前期发展慢,后期占主导地位,且发展迅速,原因应是其面外变形和受力较大。

经分析可得到以下结论:

(1) U肋-横隔板的焊缝焊趾处前期裂纹扩展

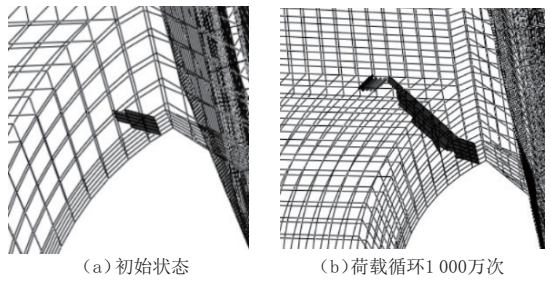


图 9 U肋-横隔板焊缝在横隔板焊趾处的裂纹内部状态

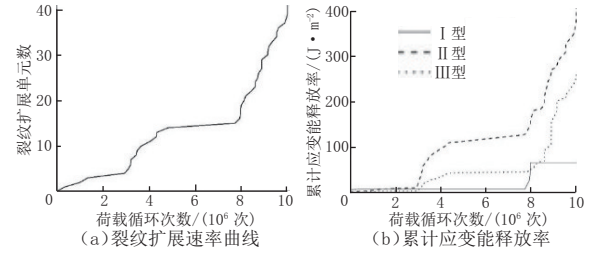


图 10 U肋-横隔板焊缝在横隔板焊趾处的裂纹扩展速率曲线及累计应变能释放率

快,而实桥处相对位置短裂纹数量较多,即理论计算与实际情况较符合;U肋焊趾与横隔板焊趾处裂纹扩展过程与实桥实测基本一致。

(2)横隔板焊趾处裂纹以II、III型裂纹为主,在疲劳荷载下,裂纹向其深度方向发展,再向隔板厚度方向发展,整体方向与初始方向一致;焊趾处裂纹初始阶段扩展方向为钢板厚度方向,随后向桥长方向既有裂纹长度方向扩展,扩展后期裂纹局部转向桥面板方向,扩展过程中以I型裂纹占主导地位。

焊趾裂纹外部状态有限元分析与实桥裂纹对比见图11。

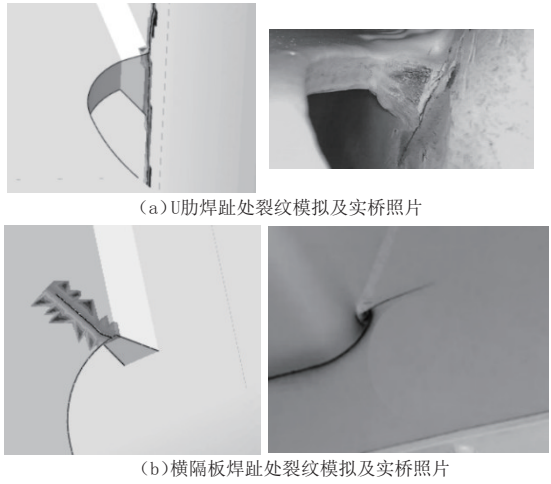


图 11 U肋-横隔板焊缝裂纹有限元与实桥裂纹对比

4 试件和试件修复

在以上理论和有限元分析基础上,对设计的带有预制裂纹的横隔板弧形开口试件分别采用止裂孔法、CFRP布粘贴加固+止裂孔法进行修复,再对修复

后的试件进行静力和疲劳加载,并比较试验结果与有限元计算结果之间的差异。

试件为6块构造完全相同的Q345钢板,用火焰切割出弧形切口,打磨光滑以减少其他因素的影响(见图12)。其中3块进行止裂孔修复,记作S-H;3块进行止裂孔+CFRP布粘贴修复,记作S-CH。与有限元计算时相同,在每块试件的弧形切口边制造长度为60 mm的裂纹;修复用的止裂孔为 $\phi 16$ mm的圆形,圆心与裂纹端部一致;CFRP布尺寸为75 mm $\times$ 400 mm。

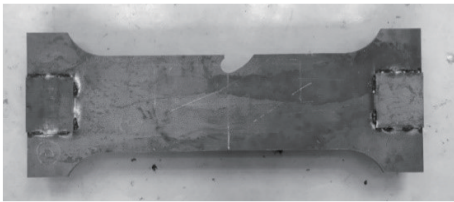


图12 标准试件

其中,S-CH试件组采用在带有止裂孔的标准试件上双面各粘贴双层CFRP布,且预制裂纹与CFRP纤维互相垂直。具体操作方法及工艺为:打磨待粘贴区;保证CFRP被胶水完全浸润,进行粘贴;刮除多余胶,使CFRP布与钢板密贴;粘贴完双面加压高温养护。

5 静力及疲劳试验

5.1 静力试验

加载时试件上端施加荷载,下端固定。试件采用轴向拉伸的中点对称加载,荷载自0开始,以每级10 kN增加,每级加载20 s后停留10 s,到达60 kN后卸载。

依据预制裂纹方向、荷载加载模型及数值模拟结果综合考虑,止裂孔周边以承受竖向力为主,所以应变片的设置以检测竖向变形为主。S-H试件组在水平方向对称布置5个点位,共10个应变片,距止裂孔边缘分别为2、15、30、60、90 mm,如图13(a)所示;S-CH试件组因CFRP布覆盖了止裂孔边缘区域,其双面相应设置后3个点位,共6个应变片,距止裂孔边缘分别为30、60、90 mm,如图13(b)所示。

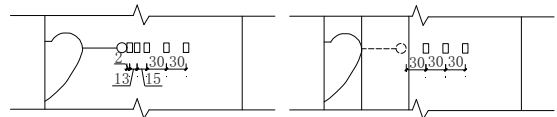


图13 S-H、S-CH试件组应变片布置图

采用钢板两侧应变片平均值作为静力加载试验值,有限元计算值(FEA)与试验值的对比见图14。

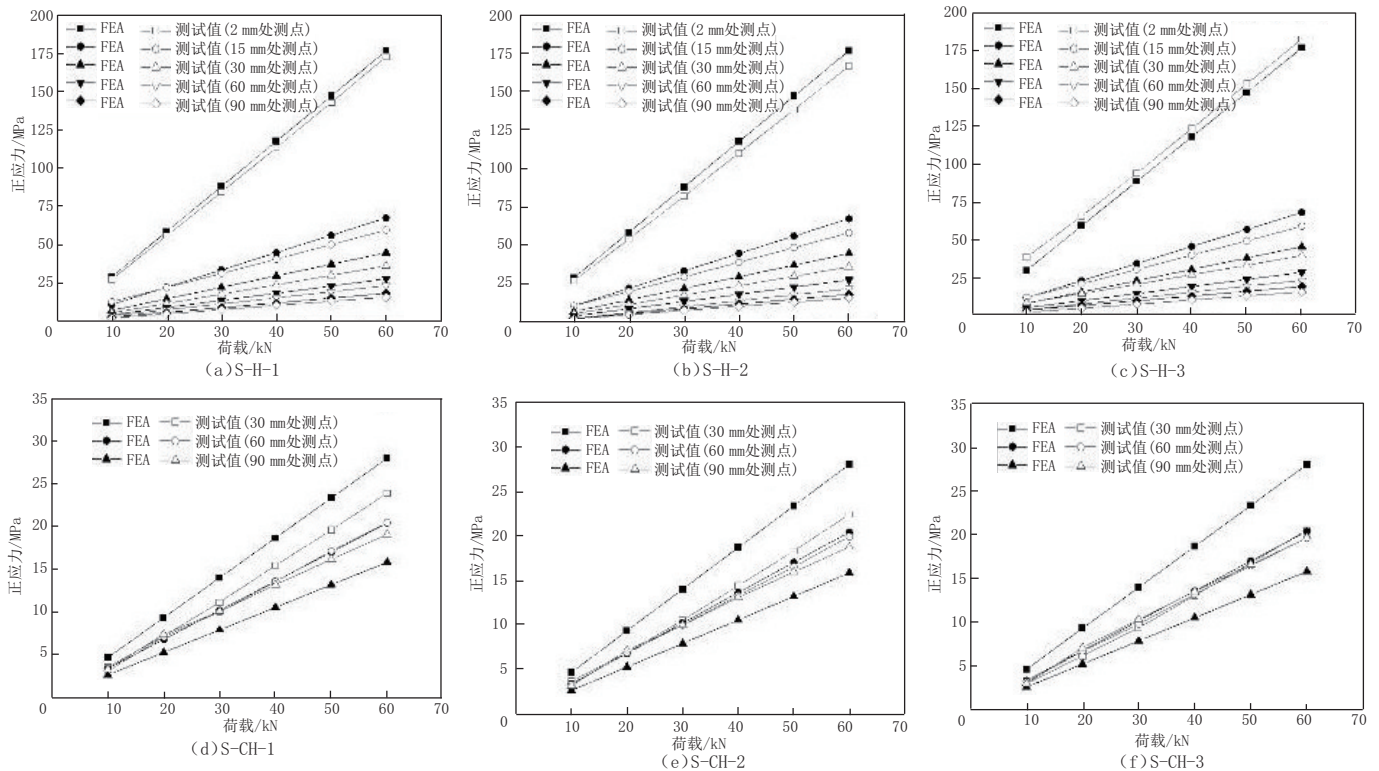


图14 静力加载试验值与有限元计算值对比

由图14可见:S-H试件组的有限元计算值与试验值非常接近,总体上试验值较有限元计算值略小,

原因可能是应变片粘贴误差。而S-CH试件组在前几级荷载中3个测点的实测值较接近,与中间测点

的有限元计算值较接近,且实测值呈现非线性。结合破坏试件拆解后的状况,认为原因极有可能是在粘贴 CFRP 时,胶水渗入到预制裂缝中而粘合了裂缝,使裂缝有了抗拉强度,改变了裂缝所在构件整体截面性质。静力结果对比显示,两者吻合度高,采用有限元模型进行的分析可靠,能够较准确地模拟修复材料及工艺。

5.2 疲劳试验

S-H、S-CH 试件组的疲劳破坏形态见图 15;疲劳加载历程见表 1。结果显示,除试件 S-CH-1 外,其余试件的裂纹均萌生于止裂孔边缘预制裂纹延伸线上。S-CH 试件组的典型破坏模式为:首先在 CFRP 裂缝截面处外侧边缘胶层出现脱胶,随后该边缘胶层处产生少量细小裂纹;随着疲劳荷载的继续施加,脱胶区域横向扩展至内侧边缘胶层,随后止裂孔边缘开始萌生裂纹。

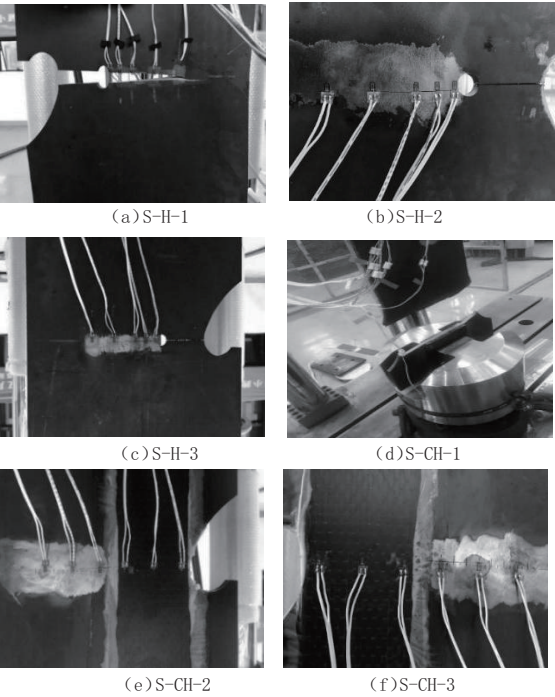


图 15 S-H、S-CH 试验组的疲劳破坏形态

表 1 S-H、S-CH 试件组的疲劳加载历程

试件 编号	实测荷 载幅/kN	应力 比	实测应 力幅/ MPa	名义应 力幅/ MPa	裂纹生 成寿命/ (10 ⁴ 次)	裂纹扩展 寿命/ (10 ⁴ 次)
S-H-1	74.8	0.1	215.0	35.6	551.4	15.4
S-H-2	95.3	0.1	267.7	45.3	185.5	24.3
S-H-3	122.5	0.1	361.5	58.2	12.0	10.2
S-CH-1	117.3	0.1	179.5	55.8	668.5	—
S-CH-2	116.5	0.1	187.4	55.4	286.6	15.5
S-CH-3	131.0	0.1	217.4	62.3	54.3	17.7

由于各组试件实际施加的名义应力幅不能一一对应,故统一换算成 50 MPa 以便比较。若换算成有限元计算出的等效荷载 35.7 kN,则对应的名义应力幅只有 17.0 MPa。根据常用国内外规范上 S-N 曲线,该应力幅已经低于疲劳截止限,因此本文不在该应力幅下比较疲劳寿命,选择统一换算成与实际施加值相近的 50 MPa,换算原则遵从疲劳损伤累积准则。

不同修复方案承受疲劳荷载时的疲劳寿命见表 2。试件在承受 200 万次荷载循环不发生破坏后,增大应力幅等级,测试其在更高等级应力循环下的加固效果。结果表明,粘贴 2 层 CFRP+止裂孔试件组的平均疲劳寿命约为单一止裂孔试件组的 4 倍。

表 2 换算名义应力幅后的 S-H、S-CH 试件组疲劳加载历程

试件 编号	名义应力 幅/MPa	疲劳 寿命/ (10 ⁴ 次)	换算名义 应力幅/ MPa	换算疲劳 寿命/ (10 ⁴ 次)	平均疲劳 寿命/ (10 ⁴ 次)
S-H-1	35.6	551.4	50	198.5	
S-H-2	45.3	185.5	50	137.8	118.4
S-H-3	58.2	12.0	50	19.0	
S-CH-1	55.8	668.5	50	927.0	
S-CH-2	55.4	286.6	50	389.4	473.8
S-CH-3	62.3	54.3	50	104.9	

6 结 论

(1)在典型疲劳部位的三维精细化模型中引入半椭圆裂纹,基于 Paris 公式对三维疲劳裂纹扩展进行模拟。有限元模拟结果表明,U 肋焊趾处初始裂纹应力强度因子与实桥中发现 U 型加劲肋的焊趾处短裂纹数量较多的情况基本一致,U 肋焊趾与横隔板焊趾处裂纹扩展过程与实桥实测基本一致。

(2)采用止裂孔法、CFRP 布粘贴加固+止裂孔法对试件进行修复,并对各组修复后的试件进行静力加载试验,所得试验结果与有限元计算结果吻合度高;疲劳试验表明,粘贴 2 层 CFRP+止裂孔试件组的平均疲劳寿命约为单一止裂孔试件组的 4 倍。本文分析方法和修复方法能为正交异性钢桥面裂纹的修补与维护提供一定的理论和实际操作基础。

参考文献:

[1] 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.

[2] IRWIN G R. Analysis of stresses and strains near a crack traversing a plate[J]. Journal of Applied Mechanics, 1957, 12(24): 361-364.

[3] PARIS P C, ERDOGAN F. A critical analysis of crack propagation laws [J]. Journal of Basic Engineering, 1963, 85(4): 528-533.