

碳纤维加固钢桥面板 U 肋对接焊缝疲劳试验

吕志林¹, 姜旭¹, 杨燕², 强旭红¹, 张冠华³

(1. 同济大学土木工程学院, 上海 200092; 2. 中国建筑第八工程局有限公司, 上海 200135; 3. 辽宁省交通规划设计院, 辽宁 沈阳 110166)

摘要: 为探究钢桥面板 U 肋对接焊缝的疲劳开裂机理与修复加固方法, 设计了 2 个带嵌补段的足尺单 U 肋试件模型, 通过模型试验研究了该细节的疲劳破坏模式和实际疲劳抗力。随后, 基于线弹性断裂力学方法建立碳纤维增强复合材料 (CFRP) 加固对接焊缝裂纹模型, 通过数值模拟分别研究了 CFRP 布层数、CFRP 布尺寸对疲劳性能的影响。最后, 针对 U 肋对接焊缝介绍粘贴 CFRP 布无损修复方法和施工工艺流程, 并对 CFRP 布粘贴修复后的裂纹试件进行疲劳测试。结果表明: U 肋对接焊缝的疲劳易损点均出现在 U 肋圆弧过渡处, 平均疲劳强度仅为 59.7 MPa。经 3 层 CFRP 布修复后, 不同损伤程度的焊缝疲劳强度约为未加固试件的 0.8~2.6 倍。粘贴 CFRP 布能够有效改善钢桥面板 U 肋对接焊缝的疲劳性能, 且满足实桥无损修复的需求。

关键词: 桥梁工程; 对接焊缝; 碳纤维布; 裂纹修复; 疲劳加固

中图分类号: U445.7

文献标志码: A

Fatigue Test of CFRP-strengthened U-rib Butt Weld in Steel Bridge Decks

LÜ Zhilin¹, JIANG Xu¹, YANG Yan², QIANG Xuhong¹, ZHANG Guanhua³

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. China Construction Eighth Engineering Division Co., Ltd., Shanghai 200135, China; 3. Liaoning Provincial Transportation Planning and Design Institute Co., Ltd., Shenyang 110166, China)

Abstract: In order to explore the fatigue cracking mechanism and strengthening methods of U-rib butt welds in steel bridge decks, a total of two full-scale single U-rib specimen models with embedded sections were designed, and the fatigue failure modes and actual fatigue resistance of the detail were investigated through model tests. Then,

based on the linear elastic fracture mechanics method, a butt-weld cracked model repaired by CFRP strips was established, and the effects of the number of layers and the size of CFRP cloth on the fatigue performance were investigated through numerical simulation. Finally, the non-destructive repair methods and construction process of pasting CFRP strips were introduced for the U-rib butt welds, and the fatigue test of the cracked specimens repaired by CFRP strips was carried out. The results indicate that the fatigue vulnerable points of the U-rib butt welds all appear at the arc transition of U-rib, and the average fatigue strength is only 59.7 MPa. After being repaired by three layers of CFRP strips, the fatigue strength of the welds with different damage degrees is about 0.8 to 2.6 times of unrepaired specimens. Pasting CFRP strips can effectively improve the fatigue performance of the U-rib butt weld details of the steel bridge decks, and meet the demand for the non-destructive repair of actual bridges.

Key words: bridge engineering; butt weld; carbon fiber strips; crack repair; fatigue strengthening

正交异性钢桥面板因其结构自重轻、承载力高和施工快速等优点, 已经成为国内外大跨径桥梁桥面板结构形式的第一选择^[1-2]。然而, 随着重载交通的增长以及焊接初始缺陷的影响, 正交异性钢桥面板在服役过程中相继出现疲劳开裂问题^[3-5]。纵肋作为钢桥面板重要的受力构件, 在车轮荷载作用下反复发生纵向挠曲变形, 因此纵肋对接接头成为典型的疲劳易损细节之一。

当前纵向加劲肋连接形式一般为钢衬垫对接焊和高强螺栓连接。早期建成的钢桥面板纵肋对接形

收稿日期: 2022-02-16

基金项目: 国家自然科学基金(52278207); 中建股份科技研发计划(CSCEC-2020-Z-1); 上海市科技计划项目(20DZ2253000); 公路桥梁诊治技术交通运输行业研发中心开放课题(2018KFKT-07); 中央高校基本科研业务费专项资金(22120210574)

第一作者: 吕志林(1994—), 男, 博士生, 主要研究方向为钢桥疲劳加固。E-mail: lvzhilin@tongji.edu.cn

通信作者: 强旭红(1984—), 女, 副教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为钢结构疲劳加固。

E-mail: qiangxuhong@tongji.edu.cn



论文
拓展
介绍

式多采用焊接连接,其嵌补段一般位于2个横隔板间1/5~1/4处,即纵肋反弯点位置^[6]。然而,当车轮沿纵桥向行驶时,纵肋底部的带垫板条对接焊缝仍处于较大拉应力状态,加上现场仰焊质量难以保证,存在熔透不足等焊接缺陷,国内外现场实桥和试验研究均表明此纵肋焊接接头在循环往复荷载作用下容易产生疲劳裂纹^[7-9]。虽然相关统计表明,工地现场纵肋对接接头的疲劳裂纹数量仅占整个正交异性钢桥面板疲劳裂纹总数的6.3%^[10],但纵肋对接接头一旦开裂,原有纵肋承担的纵向应力会转移到顶板和相邻的纵肋上,同时容易加剧桥面板和横隔板面外弯曲等不利变形^[11],进而对邻近嵌补段结构的疲劳抗力产生不利影响。由此可见,纵肋对接接头的疲劳性能对实桥安全运营至关重要,因此有必要针对纵肋对接接头的疲劳开裂问题开展高效可行的修复技术研究。

传统的钢桥疲劳裂纹修复方法包括钻孔止裂法、裂纹焊补法和钢板补强法^[12]。钻孔止裂法是通过去除裂纹尖端塑性区来抑制裂纹扩展,但由于止裂孔边缘会形成新的应力集中点,因此往往存在二次开裂的风险。唐亮等^[13]在U肋拼接段疲劳裂纹尖端设置10 mm止裂孔,仅进行7万次循环荷载后发现新的疲劳裂纹在止裂孔边萌生并扩展,止裂效果短暂。裂纹焊补法是对既有焊接细节或疲劳裂纹进行局部研磨或切削后进行重新焊接。苏庆田等^[14]对组合桥面板U肋对接焊缝疲劳裂纹铣刨后进行补焊,疲劳试验结果表明:200万次作用下焊缝的疲劳强度为82.6 MPa,满足现行规范要求。然而,该操作方法难免对实桥结构造成损伤,并不可避免地引入焊接残余应力。钢板补强法是利用焊接、栓接或粘接的方法将外加钢板与既有结构相连,使钢板承担部分荷载并限制裂纹表面在疲劳荷载下的变形。Wang等^[15]选用3 400 mm×180 mm×10 mm钢板对U肋拼接段平底板疲劳裂纹进行粘贴修复,结果表明粘贴钢板能有效遏制裂纹扩展,疲劳寿命可提升为原来的70%。由于使用重型钢板或型钢会增加结构自重和腐蚀损伤的风险,同时现场施工相对操作不便,因此对设备要求较高。另外,该方法适用于平整钢板(如横隔板)的开裂加固^[16],针对裂纹出现在圆弧过渡段的U肋对接焊缝,由于补强板难以与原结构密贴,其加固效果值得商榷。张清华等^[17]提出通过栓接铁基形状记忆合金板并采用通电热激励方式使其产生预应力,旨在实现纵肋对接焊缝疲劳开裂的主动加固,但目前该方法尚处在理论研究和有限元分析阶段,止裂效果需进一步试验验证。除此

之外,栓接工艺需在损伤区域打孔进而削弱构件截面,由此可能引入新的疲劳源。

近年来,碳纤维增强复合材料(CFRP)由于轻质高强、良好的耐腐蚀和抗疲劳性能以及可设计性好等优点而受到工程加固领域设计者的青睐。国内外大量研究^[18-19]表明,CFRP能有效降低疲劳裂纹尖端应力强度因子,进而通过减小裂纹扩展速率来达到延长结构使用寿命的目的。研究CFRP加固参数时发现,CFRP布粘贴的层数越多,CFRP对限制钢结构疲劳裂纹发展就越有效,粘贴3层CFRP布比仅粘贴1层CFRP布的钢板疲劳寿命提高了77.80%^[20],但当CFRP布层数过多(大于5层)时,其疲劳寿命提升效果逐渐降低^[21]。相比常规弹性模量CFRP,高弹性模量CFRP增强裂纹钢板的疲劳寿命更长,而且修复效果能达到预应力CFRP修复的水平^[22]。然而,这些研究大多聚焦于CFRP加固钢构件层面,关于CFRP加固焊接接头的研究较少^[23],外贴CFRP布已被证实对焊缝疲劳强度的提高和裂纹张开位移的限制行之有效^[24]。Tong等^[25]采用CFRP布对34个未开裂的狗骨式对接焊缝试件进行单面和双面补强,随后开展等幅拉伸疲劳荷载试验研究,结果表明采用CFRP布加固对焊接头的疲劳寿命比未加固试件的疲劳寿命提高了约1~10倍。其中,粘贴3层双面CFRP布加固效果最佳,200万次疲劳强度提高34%。因此,对于无开裂构件,采用CFRP布进行加固也可起到预防性维护作用。

目前国内外学者针对CFRP加固损伤钢构件或焊接接头主要是采用小尺寸的平钢板或狗骨式试件进行试验研究^[20-25],往往通过引入人工预制裂纹的方式来考虑初始损伤,难以模拟真实裂纹;另外,大多较小尺寸试件的疲劳加固试验仅考虑面内拉伸荷载,尚未考虑面外弯曲应力,研究得到的加固效果可能偏安全,无法真实反映实际结构的情况,因而少有研究可直接被钢桥面板U肋对接焊缝的疲劳加固借鉴。为此,设计了足尺U肋嵌补段对接接头试件,通过往复荷载作用产生真实疲劳裂纹,随后利用CFRP布进行加固以评价疲劳性能改善效果。

1 试验方案设计

1.1 试件设计

以某悬索桥(跨径布置为470 m+1 490 m+470 m)钢箱梁对接焊缝为工程背景,共设计2个足尺单U肋试验模型。试件沿桥梁纵轴截取一个横隔板间

距,垂直轴线方向取各300 mm部分,并使U肋嵌补段一侧对接焊缝处于试件正中;同时,支承处受到较大支反力,有可能导致支承板屈曲,为此在试件两端处各设置两道横隔板^[10],如图1所示。其中,顶板厚14 mm,横隔板厚12 mm,底板厚12 mm,U肋尺寸为300 mm×280 mm×6 mm。根据现场情况,U肋嵌

补段长度为400 mm,背垫板宽度和厚度分别为60 mm和4 mm。试件材质均为Q345钢材,制造工艺、板件厚度及构造细节参数均与实桥一致。为方便试件固定在试验台座,在两侧横隔板下方设置底板,同时考虑实际边界条件,对两边支承底板进行简支约束,即约束纵桥向、横桥向和竖向的位移。

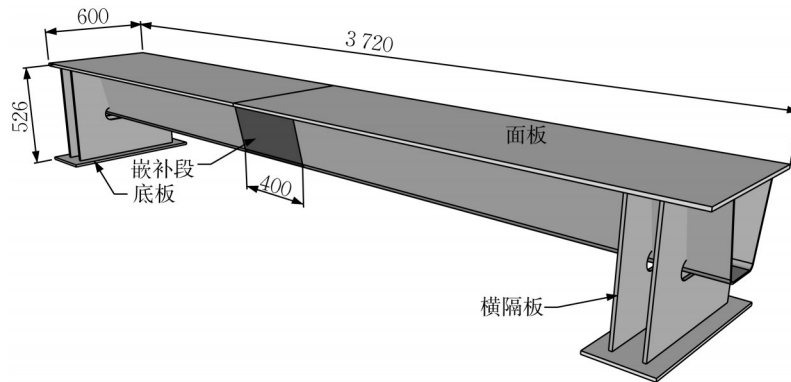


图1 试件三维模型(单位:mm)

Fig.1 Three-dimensional model of the specimen(unit:mm)

1.2 加载装置及测试方案

本试验采用同济大学结构实验室的PMS-500液压脉动疲劳试验机,加载频率为4 Hz。试件采用跨中单点加载方式,车轮加载面积为600 mm×200 mm,并在作动器和顶板之间放入橡胶垫板来模拟车轮轮胎与顶板的接触作用。模型试验共分为2个阶段,阶段I为疲劳开裂试验,阶段II为疲劳加固试验,相关加载装置如图2所示。

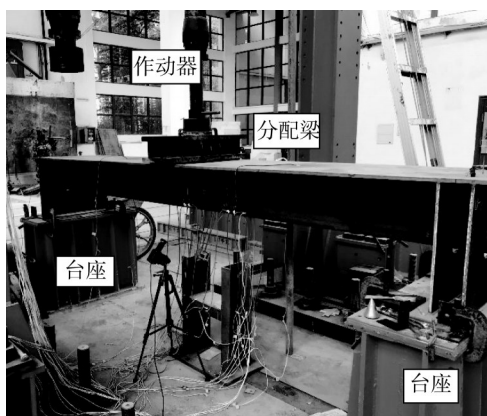


图2 加载装置

Fig.2 Loading device

模型测试内容主要为应变测量。测点布置应选择受力最为明显、疲劳裂纹易于萌生的部位。本试验分别在嵌补段底端焊缝两侧以及顶板U肋疲劳易损部位布置应变测点以观察疲劳应力变化特征。同

时,为了避免焊缝处应力集中效应,在远离焊缝的位置即嵌补段中心以及四分之一跨截面底部也布置测点。焊缝处测点取距离焊趾约15 mm的位置,具体各测点布置见下文。除此之外,采用辅助设备高清摄像头对细节位置进行实时监测,用以判断试验疲劳开裂情况。

2 疲劳开裂试验

2.1 测点内容

结合确定的加载方案和仿真分析结果,2个试件所关注区域内各个应变测点的位置和编号如图3所示。设定嵌补段跨中对接焊缝为A截面、顶板对接焊缝为B截面,嵌补段另一条对接焊缝为C截面。为了便于记忆,这里设置编号规则UX-Y-Z,X表示试件号,Y表示截面测点位置,Z表示具体的测点编号。如U1-Ab-5表示试件U1下A截面上b位置5号测点。

2.2 阶段I加载历程与试验结果

按照应力等效原则同时兼顾试验效率,疲劳开裂试验的荷载幅取为产生规范规定的疲劳细节^[26]下相应荷载幅的1.5~2.5倍,2个试件的具体加载历程如表1所示。对试件U1和U2进行等幅疲劳加载时,前期试件表面没有发现疲劳裂纹,最终所有试件均因嵌补段U肋对接焊缝开裂而导致破坏。限于篇幅,此处仅给出疲劳开裂处附近关键测点的实测应

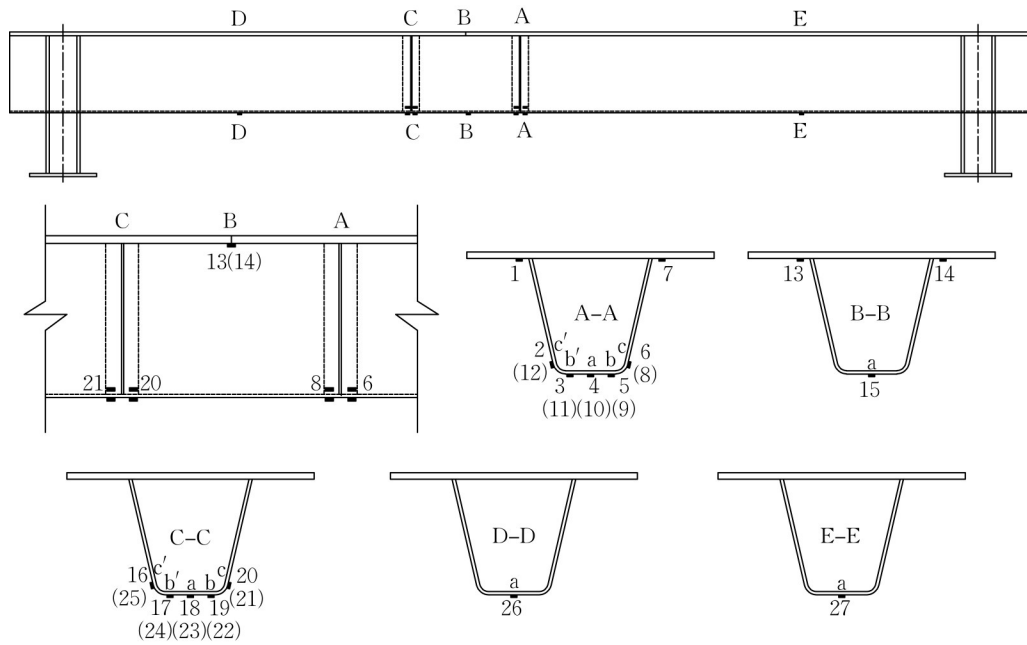


图3 应变测点布置

Fig.3 Arrangement of strain gauges

力幅与循环次数的关系,如图4所示。应力幅变化历程表明,在出现裂纹之前,各测点截面的应力幅随循环次数变化均匀。随着疲劳损伤的加剧,疲劳开裂区域测点应力幅发生重分布,开裂点处应力幅迅速降低,相邻位置未裂测点的应力幅迅速增大。如U1焊缝C圆弧过渡处b点在开裂之后应力幅逐渐降低,a点应力幅随着裂纹的开展逐渐增大。由于不同部位的焊接质量不同造成焊缝两侧部分测点实测值存在差异,应力最大值并不一定出现在纵肋底部中心点,而可能出现在纵肋底部圆弧过渡点处。

表1 阶段 I 加载历程

Tab.1 Loading process of stage I

试件编号	疲劳荷载/kN	停机循环次数/ 10^4
U1	25~75	49
U2	20~80	3

最终U1试件在荷载幅50 kN作用下经39万次便在C焊缝腹板表面过渡圆弧处发现了80 mm长的疲劳裂纹,随后继续加载约10万次,原有C焊缝表面裂纹继续向两侧扩展了265 mm,同时在跨中A焊缝腹板过渡圆弧表面处也发现了90 mm长的疲劳裂纹。试件U2在荷载幅60 kN作用下仅加载3万次便在纵肋底部圆弧过渡处焊缝出现一条肉眼清晰的疲劳裂纹,长度为70 mm。2个试件最终裂纹形态如图5所示。

2.3 焊缝疲劳强度评定

根据前述对焊缝应力幅变化历程的分析,以率

先开裂点处焊缝两侧测点平均应力为参考名义应力,取观测到裂纹时的加载次数为试件疲劳寿命,然后基于Miner损伤准则计算得到一个与原构造细节损伤度相等的等幅循环应力幅。同时,按照Eurocode规定的疲劳强度曲线^[26]计算实际焊缝的疲劳强度,计算结果如表2所示。U1嵌补段2条焊缝均出现疲劳裂纹,并且两者等级接近于欧洲规范规定的71 MPa强度等级。U2试件经200万次换算后的疲劳强度仅为41.1 MPa,不满足相关规范等级要求。分析焊缝质量可知,试件焊缝形状宽度和余高不均匀,尺寸存在突变。后续在对焊缝打磨和切除后发现,焊缝内部存在一些气孔夹渣和未熔透等焊接缺陷(见图6),因此造成该对接焊缝疲劳强度较低。

3 有限元分析

为了分析CFRP布相关加固参数对含裂纹试件疲劳性能改善的影响,基于U2试验结果,采用Abaqus软件建立含裂纹的加固模型。其中,裂纹采用静态裂纹“seam”模拟,裂纹长度为70 mm。由于裂尖应力具有奇异性,因此裂纹前缘单元考虑采用退化的三角形单元S3模拟,其余单元均采用S4R模拟。全局网格为10 mm,其中裂纹尖端处网格为0.5 mm,并在附近采用2 mm网格进行过渡,如图7a所示。利用“composite-layup”创建3层CFRP布,每

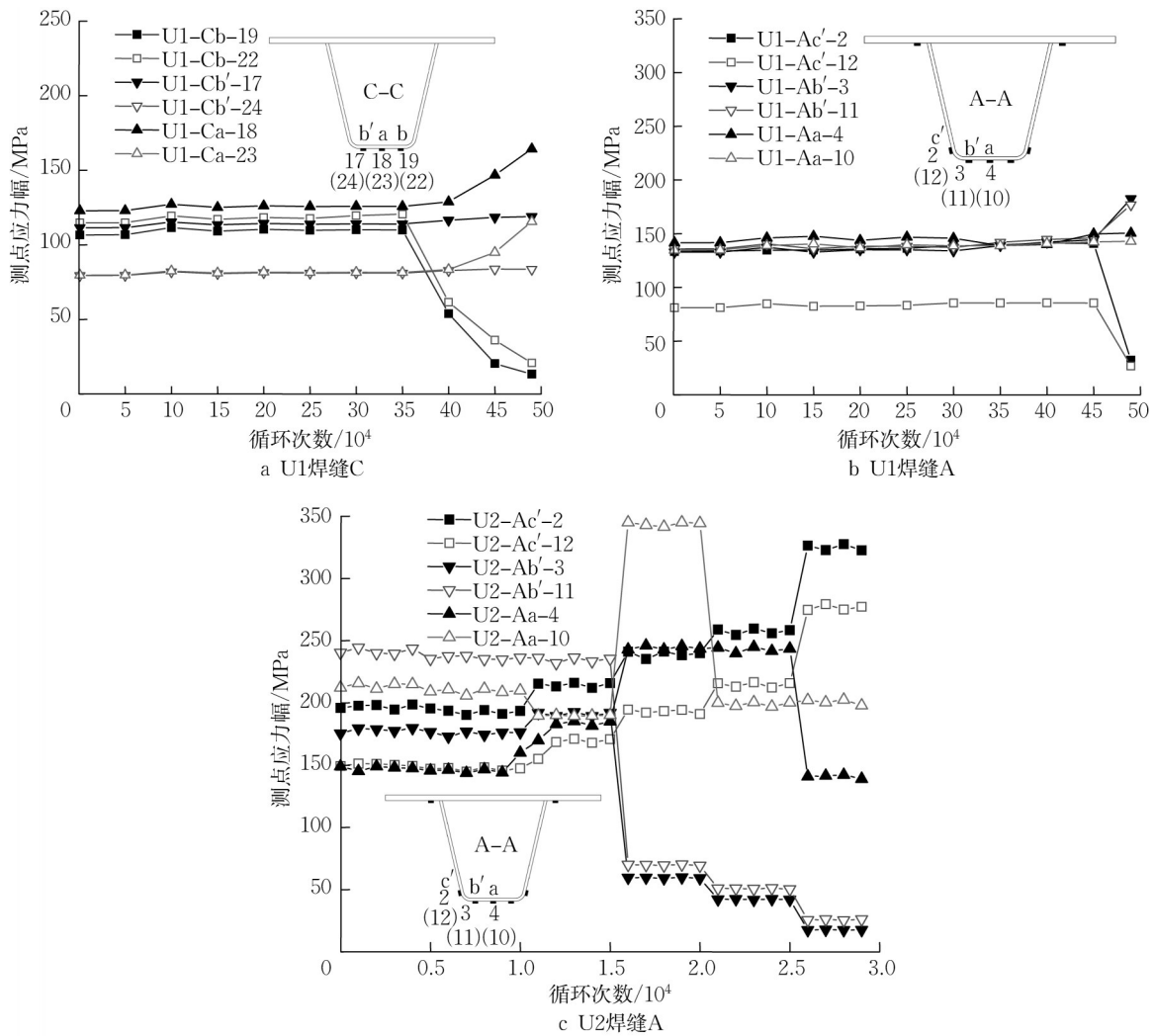


图4 疲劳开裂区域关键测点应力幅与循环次数关系

Fig.4 Relationship between stress amplitude and cycle number at key points in fatigue cracking area

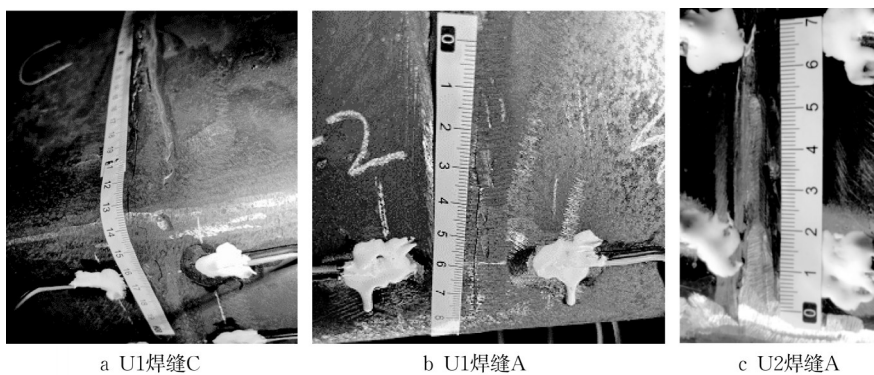


图5 焊缝疲劳裂纹

Fig.5 Fatigue cracks at weld joints

层厚0.167 mm,铺角均为90°,如图7b、c所示。结构胶采用S4R单元模拟,胶层厚0.55 mm。钢板、胶层和CFRP布之间采用绑定约束连接,不考虑界面滑移失效。施加荷载取为60 kN。试验中钢板、CFRP布和胶层相关材性指标如表3所示。计算分析中将

考虑CFRP布层数、CFRP布粘贴长度2种加固参数在CFRP布整幅包覆加固方式下对裂纹尖端应力强度因子的影响。

为方便比较,引入量纲一的疲劳加固系数 R_f 来表征加固材料的疲劳加固效果,计算式如下所示:

表 2 焊缝强度计算评定

Tab.2 Strength estimate of weld joints

试件编号	加载至开裂次数/ 10^4	等效应力幅/MPa	200 万次疲劳强度/MPa
U1 焊缝 C	39	118.1	68.5
U1 焊缝 A	49	110.9	69.4
U2 焊缝 A	3	166.5	41.1

$$R_k = \left(1 - \frac{K_{I,S}}{K_{I,U}}\right) \times 100\% \quad (1)$$

式中: $K_{I,U}$ 为试件加固前裂纹尖端的应力强度因子; $K_{I,S}$ 为试件加固后裂纹尖端的应力强度因子。分析可知,加固系数 R_k 越接近于 100,加固效果越好。若 R_k 大于 100,则表明加固后应力强度因子存在负值,

裂纹处于受压闭合状态,加固效果最佳。

考察 CFRP 布相关加固参数对加固系数的影响,如图 8 所示。暂取粘贴长度 200 mm,分别建立层数为 1~7 层 CFRP 布粘贴加固下的有限元模型。随着 CFRP 布层数的增加,加固系数迅速增加,但疲劳加固效果逐渐减弱,并且裂纹尖端 1 的加固效果明显高于裂纹尖端 2。另取纤维层数 3 层,改变 CFRP 布粘贴长度进行数值分析,结果如图 8b 所示。加固系数 R_k 随 CFRP 布粘贴长度变化基本不变,表明 CFRP 布层数对结构疲劳加固效果较 CFRP 布粘贴长度影响大。实际加固中考虑到粘贴锚固的需要以及操作的便利性^[20,25],因此试验初定 CFRP 布层数为 3 层、粘贴长度为 250 mm。



图 6 试件焊接缺陷

Fig.6 Welding defects of the specimen

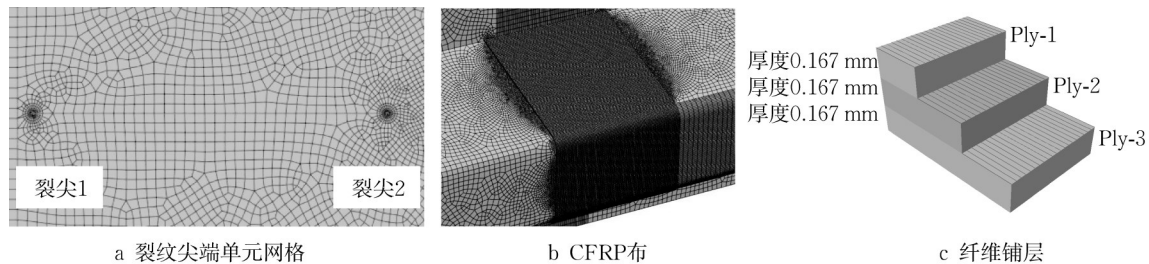


图 7 有限元计算模型

Fig.7 Finite element model

表 3 材料特性

Tab.3 Material properties

材料特性	厚度/mm	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	弹性模量/MPa	剪切模量/MPa	泊松比
Q345 钢板		≥ 345		206 000		0.3
HM-30 CFRP 布	0.167(单层)		3 668.0	240 000	13 000	0.3
纤维浸渍胶	0.55		53.1	2 490		0.3

4 加固方案及流程

CFRP 布可弯曲缠绕成型,因此对各类曲面结构或复杂结构的加固优势明显。CFRP 布加固试件分别命名为 SU1 和 SU2。结合有限元参数分析,选择 3 层 CFRP 布,确定粘贴长度为 250 mm。针对 U1 嵌补段一侧较长的疲劳裂纹,由于 CFRP 的常见最

长模数宽度仅为 500 mm,因此采用多块 CFRP 布搭接交叉包覆粘贴;对试件 U2 底部较短的疲劳裂纹,选择局部粘贴,如图 9 所示。在纤维长度方向取不同长度进行错层粘贴来保证一定的粘贴锚固要求。因此,从底层到面层的 CFRP 布尺寸分别为 150 mm \times 500 mm, 200 mm \times 500 mm 和 250 mm \times 500 mm,如图 9c 所示。加固材料均由上海悍马建筑科

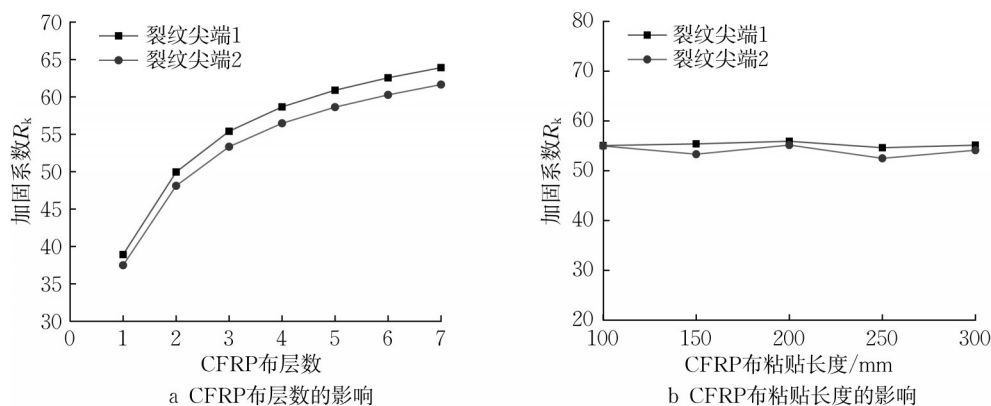


图8 CFRP布加固参数对加固系数影响

Fig.8 Effect of CFRP strengthening parameters on strengthening coefficient

技术有限公司提供,其中CFRP布为HM-30高强I级碳纤维布,结构胶采用配套的HM-180C3P碳纤维浸渍胶,该结构胶具有良好的浸润性和黏结力,且相关性能指标满足《纤维增强复合材料工程应用技术标准》(GB50608—2020)^[27]要求。

CFRP布加固U肋对接焊缝主要包含以下施工步骤:①表面处理,用角磨机打磨焊缝除锈后用酒精棉擦拭钢结构表面;②利用电动剪刀按照设定尺寸裁剪CFRP布;③配制搅拌纤维浸渍胶,涂抹底胶后粘贴CFRP布;④粘贴每一层CFRP布时,用金属压轮沿纤维方向进行滚压压实处理,消除气泡并使纤维布充分浸润在浸渍胶中;⑤覆盖聚氨酯薄膜,常温养护一周以上。施工时严格控制粘贴质量,避免粘贴时出现空鼓、夹杂气泡等问题。CFRP布加固试件如图10所示。

5 疲劳加固试验

5.1 测试内容

在2.1节基础上对加固试件部分测点进行调整,均在原有裂纹延展方向上距离尖端1 cm处各布

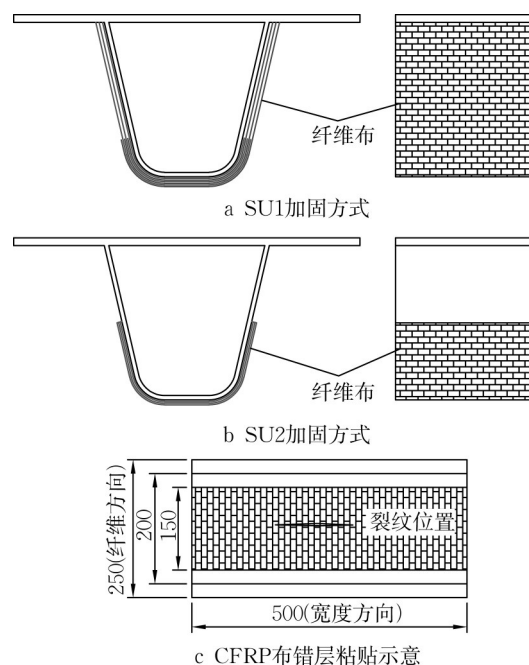


图9 CFRP加固方式(单位:mm)

Fig.9 CFRP strengthening mode (unit: mm)

置一个测点,以观测裂纹是否继续扩展。SU1试件在A截面埋入测点1和5,而SU2试件在A截面埋入

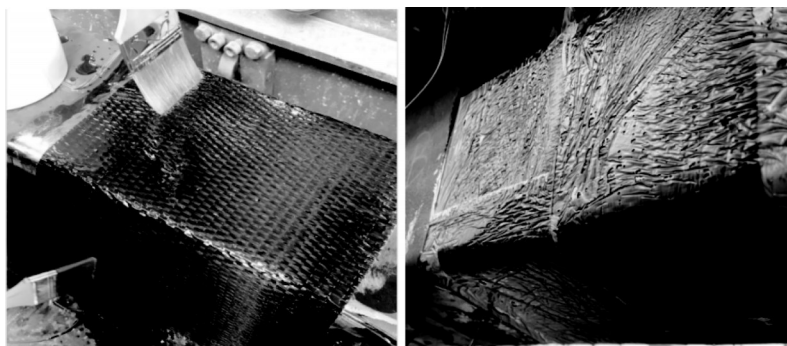


图10 CFRP布加固试件

Fig.10 Specimen strengthened by CFRP strips

测点1、5、7和C截面测点11和12。为尽可能小地减轻埋入导线对CFRP布粘贴性能的影响,选择外径为0.6 mm的细导线进行应变片外接。经CFRP布粘贴后,在包裹焊缝的CFRP布底端布置3个测点以获得CFRP布的受载应变。加载过程中定期观察CFRP布边缘是否脱开,并用小锤通过CFRP布表面敲击辨别是否有试件空鼓声,以检查内部是否脱开。

5.2 阶段Ⅱ加载历程与试验结果

根据荷载等效原则,SU1和SU2的阶段Ⅱ加载历程及相应的换算应力幅如表4所示。限于篇幅,这里仅给出SU1的疲劳破坏过程,SU2与SU1类似。试件SU1经过加固后,其关键测点的应力幅如图11所示。

前200万次加载时,所有测点应力值基本维持不变,包括位于裂纹尖端前缘的测点。从外观上看,CFRP布未发生剥离或撕裂现象,用小锤敲击加固位置也未听到空鼓声,表明CFRP布与试件母材表面贴合完好。对于焊缝C,由于CFRP布测点10离原有裂纹位置最近,因此承担的应力最大。随着循环次数递增,外侧

表4 阶段Ⅱ加载历程
Tab.4 Loading process of stage Ⅱ

试件编号	焊缝编号	荷载/kN	应力幅/MPa	循环次数/ 10 ⁴
SU1	焊缝C	15~35	48.0	200
		20~50	71.9	20
	焊缝A	15~35	56.8	200
		20~50	85.2	50
SU2	焊缝A	15~35	66.9	200
		20~50	100.4	50
		25~75	167.4	26

CFRP布应力显著提高,表明试件疲劳损伤不断累积并产生塑性变形,因此CFRP布协助承担更多载荷。继续加载至220万次,听到噼啪开裂声响,检查发现裂纹侧CFRP布发生部分脱开,脱开位置位于腹板与底板圆弧交界过渡处,脱开范围长度约为14 cm。随着脱开范围的逐渐增大,原有裂纹处的测点12失去CFRP布的保护作用,从原来受压转为受拉,并在裂纹迅速扩展后发生失效,记录此时循环次数约为225万次。而后加载约至240万次,测点11也因失去底部CFRP布保护而发生失效,即裂纹进一步向前扩展。在焊缝C发生CFRP布脱胶失效后,结构应力往刚度较大的焊

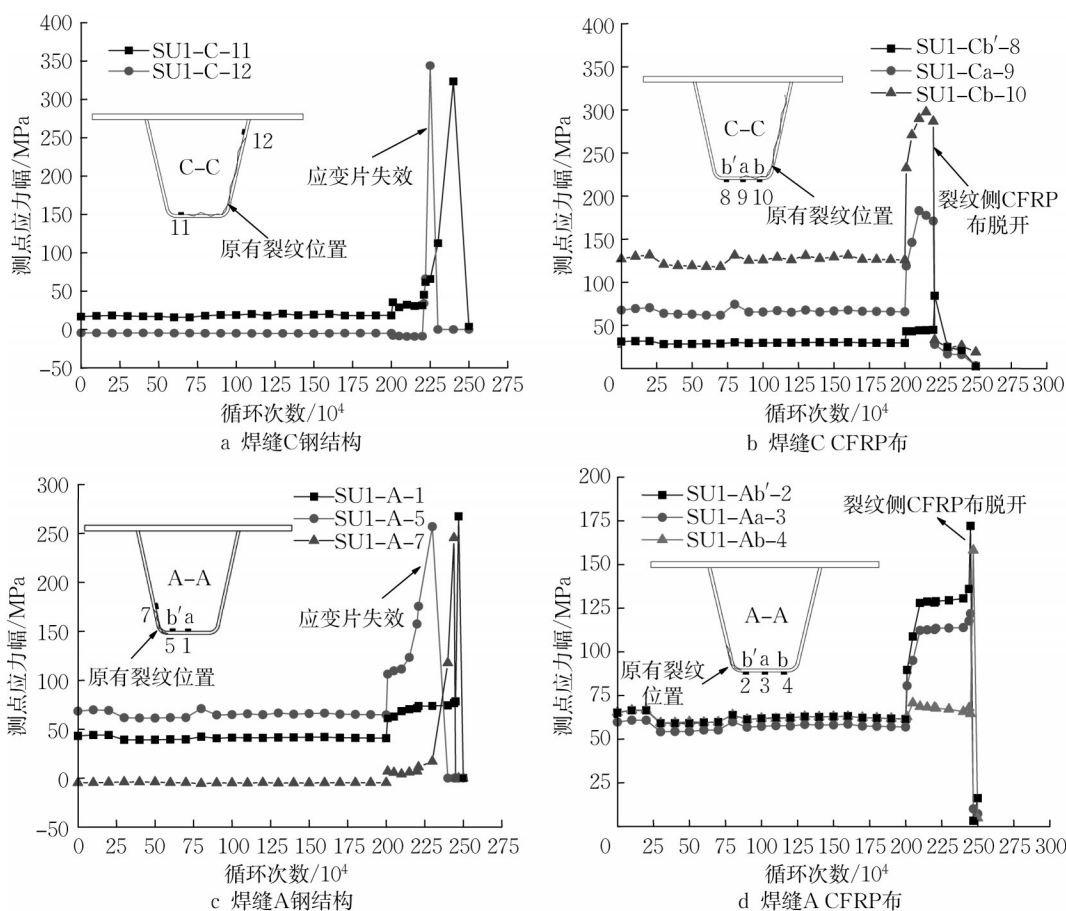


图 11 试件SU1关键测点应力幅历程

Fig.11 Stress amplitude history at key points in SU1

缝A发生转移。前期疲劳损伤程度较小的焊缝A此时疲劳损伤加剧。加载至230万次时,埋入裂纹尖端前沿的测点5发生扩展失效,表明试件此时有新的疲劳微裂纹产生,但未发生CFRP布明显脱离现象。加载至244万次,测点7应力发生突变随即发生扩展失效,同时观测到原有裂纹位置覆盖的CFRP布边缘发生剥离现象。随着脱开范围的不断增大,CFRP布发生纵向撕裂现象,如图12所示。加载至约250万次,嵌补段两端的CFRP布均发生大面积脱胶现象,随后钢结构裂纹大幅扩展,结构试件整体变形严重,判定此时结构失去承载力,随即停机检查。

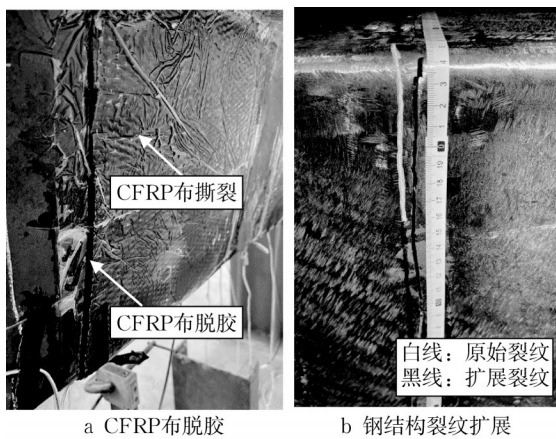


图12 SU1焊缝A疲劳破坏

Fig.12 Fatigue failure of weld A in SU1

在对表面CFRP布进行清除后,发现CFRP布脱离部位的钢板表面几乎没有胶层残留,判定是由于胶层附着力不够导致CFRP布与钢板之间脱粘。钢板和结构胶的黏结强度对加固试件的疲劳寿命起关键作用,因此建议对钢板进行糙化处理(如喷砂),以提升钢-结构胶的界面黏结行为。

5.3 疲劳性能提升评价

不同损伤程度试件的疲劳加固效果不同。为表征初始损伤程度对结构疲劳性能提升的影响,定义初始损伤度

$$\alpha = \frac{L_c}{L_t} \quad (2)$$

式中: L_c 为初始裂纹长度; L_t 为U肋截面全部长度。

研究中U肋对接焊缝属于外观未打磨的带衬垫熔透对接焊缝,按照欧洲规范对疲劳细节的要求,带衬垫U肋对接焊缝的200万次疲劳强度为71 MPa。根据 Miner 损伤累积原则,将试件实际加载应力幅 $\Delta\sigma_c$ 及相应的循环次数 N_c 换算成规范疲劳强度 $\Delta\sigma_R$ 下的等效循环次数 N_e ,如下所示:

$$N_e = N_c \left(\frac{\Delta\sigma_c}{\Delta\sigma_R} \right)^m \quad (3)$$

式中: m 为疲劳细节曲线的反斜率,取3.0。

各加固试件计算结果如表5所示。修复后的等效应力幅和相应的循环次数与各国规范^[26,28-30]比较结果如图13所示。SU1焊缝A经修复后满足美国、日本和英国规范,接近于欧洲规范规定的强度等级,可延长剩余使用寿命达189万次,寿命提升为原来的100%。初始损伤较大的焊缝C经过修复后尚不能满足各国规范,疲劳强度为加固前的0.8倍,但仍可延长50%的寿命。初始损伤较小的SU2焊缝A在满足各国规范的基础上尚有一定的富余量,疲劳强度为加固前的2.6倍,可延长剩余使用寿命达649万次,寿命提升为原来的16.6倍。不同损伤程度焊缝加固后的疲劳强度是原来的0.8~2.6倍,等效疲劳寿命可延长0.5~16.6倍。随着初始损伤的不断增大,修复后的疲劳强度迅速降低,因此一旦发现疲劳开裂,应立即进行加固处理。

表5 加固试件疲劳性能评估

Tab.5 Fatigue performance evaluation of strengthened specimen

试件编号	$\alpha/\%$	疲劳强度/MPa			等效疲劳寿命/ 10^4		
		加固前	加固后	提升倍数	加固前	加固后	提升倍数
SU1-C	47.4	68.5	53.4	0.8	180	88	0.5
SU1-A	12.4	69.4	69.6	1.0	187	189	1.0
SU2-A	9.6	41.1	105.1	2.6	39	649	16.6

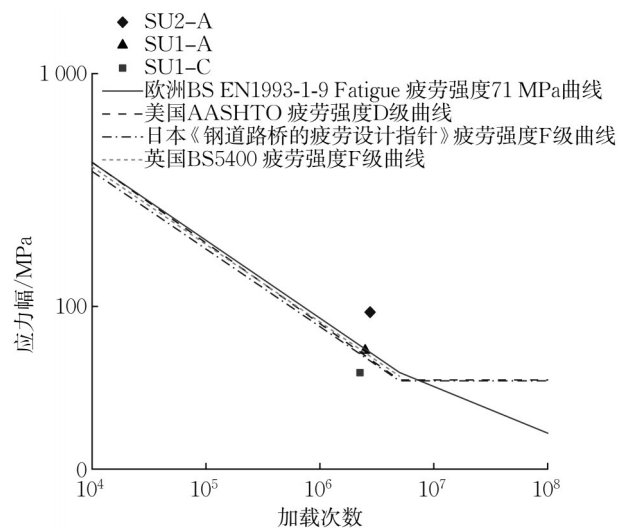


图13 加固试件试验结果与各国疲劳强度曲线对比

Fig.13 Comparison between experimental results of strengthened specimens and fatigue strength curves of various countries

6 结论

(1)疲劳开裂试验表明,嵌补段U肋对接焊缝的疲劳开裂点均出现在焊缝圆弧过渡区域,继而向底部和腹板两侧扩展。由于存在气孔和未熔透等焊接缺陷,U肋对接焊缝的平均疲劳强度仅为59.7 MPa,低于欧洲规范规定的71 MPa。

(2)CFRP布能有效协助承担疲劳开裂区域的荷载和限制开裂处的位移,从而延长损伤结构的疲劳寿命。加固焊缝相继发生CFRP布局部脱胶破坏和钢结构扩展破坏2个过程。当局部胶层失效后,部分CFRP布无法继续承担荷载而退出工作,剩余CFRP布继续与原结构协同受力,因此CFRP布加固可起到结构破坏前的预警作用,避免结构的突然断裂。

(3)经CFRP布粘贴修复后,不同损伤程度的U肋对接焊缝的抗疲劳性能均有了一定的提升。加固后U肋对接焊缝的疲劳强度约为原来的0.8~2.6倍,等效疲劳寿命可延长0.5~16.6倍。

(4)综合受力和施工便捷度考虑,推荐采用3层CFRP布进行粘贴修复。对多层CFRP布进行粘贴施工时建议采用沿纤维方向错层粘贴的方式。在此基础上,考虑温湿效应的钢-CFRP界面疲劳损伤劣化研究将是下一阶段的研究重点。

作者贡献声明:

吕志林:试验设计和试验结果分析,完成数据分析以及论文撰写与修改。

姜旭:项目负责人,指导试验设计、数据分析、论文写作与修改。

杨燕:试验研究顾问,对试验过程和论文写作提出建议。

强旭红:试验设计者和试验研究的执行人,指导试验设计和论文写作。

张冠华:试验研究顾问,对试验过程提出建议。

参考文献:

[1] 宋神友,陈伟乐.深中通道桥梁工程方案及主要创新技术[J].桥梁建设,2021,51(5):1.
SONG Shenyou, CHEN Weile. Bridges of Shenzhen-Zhongshan link and main innovative [J]. Bridge Construction, 2021,51(5):1.

[2] KAINUMA S, YANG M, JEONG Y S, *et al.* Fatigue behavior investigation and stress analysis for rib-to-deck welded joints in orthotropic steel decks [J]. International Journal of Steel Structures, 2018, 18(2):512.

[3] BERG N, XIN H, VELJKOVIC M. Effects of residual stresses on fatigue crack propagation of an orthotropic steel bridge deck[J]. Materials & design, 2021,198:109294.

[4] 陈卓异,李传习,柯璐,等.钢桥面板弧形切口疲劳裂纹切割修复与优化[J].中国公路学报,2021,34(7):301.
CHEN Zhuoyi, LI Chuanxi, KE Lu, *et al.* Fatigue crack repair and optimization of cope holes in orthotropic steel decks [J]. China Journal of Highway and Transport, 2021,34(7):301.

[5] WANG Y, SHAO X, CHEN J, *et al.* UHPC-based strengthening technique for orthotropic steel decks with significant fatigue cracking issues[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2021, 176:106393.

[6] 吴冲,袁远,姜旭.正交异性钢桥面板闭口加劲肋对接焊缝疲劳性能评价[J].同济大学学报(自然科学版),2018,46(4):436.
WU Chong, YUAN Yuan, JIANG Xu. Fatigue assessment method of the close ribs butt weld of the orthotropic steel deck [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2018, 46(4):436.

[7] CHEN S, HUANG Y, ZHOU C, *et al.* Experimental and numerical study on fatigue performance of U-rib connections [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2019, 163:105796.

[8] HUANG Z, LEI J, GUO S, *et al.* Fatigue performance of U-rib butt welds in orthotropic steel decks [J]. Engineering Structures, 2020, 211:110485.

[9] SHAKIR S, ALEMDAR F. Experimental study of fatigue crack behavior of rib-to-rib butt welded connections in orthotropic steel decks [J]. Latin American Journal of Solids and Structures, 2018, 15(10):1.

[10] 黄云,张清华,卜一之,等.港珠澳大桥正交异性钢桥面板纵肋现场接头疲劳特性[J].中国公路学报,2016,29(12):35.
HUANG Yun, ZHANG Qinghua, BU Yizhi, *et al.* Fatigue properties on field splice joints of longitudinal ribs in orthotropic steel bridge decks of Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge [J]. China Journal of Highway and Transport, 2016,29(12):35.

[11] YANG M, KAINUMA S, JONG Y S. Structural behavior of orthotropic steel decks with artificial cracks in longitudinal ribs [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2018, 141:132.

[12] 陈开利.正交异性钢桥面板的疲劳裂纹处治[J].世界桥梁,2016,44(1):70.
CHEN Kaili. Retrofit methods of fatigue cracks in orthotropic steel bridge decks[J]. World Bridges, 2016,44(1):70.

[13] 唐亮,黄李骥,刘高,等.正交异性钢桥面板足尺模型疲劳试验[J].土木工程学报,2014(3):112.
TANG Liang, HUANG Liji, LIU Gao, *et al.* Fatigue experimental study of a full-scale steel orthotropic deck model [J]. China Civil Engineering Journal, 2014(3):112.

[14] 苏庆田,贺欣怡,曾明根.组合桥面板U肋对接焊缝疲劳破坏及修复方法试验[J].同济大学学报(自然科学版),2017,45(2):167.
SU Qingtian, HE Xinyi, ZENG Minggen. Experiment

- research on fatigue failure and repair method of butt weld in U-shaped rib of composite bridge deck [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2017, 45(2):167.
- [15] WANG C S, ZHAI M S, DUAN L, *et al.* Cold reinforcement and evaluation of steel bridges with fatigue cracks[J]. Journal of Bridge Engineering, 2018, 23(4):04018014.
- [16] 李传习,李游,陈卓异,等. 钢箱梁横隔板疲劳开裂原因及补强细节研究[J]. 中国公路学报, 2017, 30(3):121.
LI Chuanxi, LI You, CHEN Zhuoyi, *et al.* Fatigue cracking reason and detail dimension of reinforcement about transverse diaphragm of steel box girder[J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30(3):121.
- [17] 张清华,朱金柱,陈璐,等. 钢桥面板纵肋对接焊缝疲劳开裂主动加固方法研究[J]. 桥梁建设, 2021, 51(2):18.
ZHANG Qinghua, ZHU Jinzhu, CHEN Lu, *et al.* Research on a positive reinforcement method for fatigue cracking in longitudinal rib butt welds of orthotropic steel bridge deck [J]. Bridge Construction, 2021, 51(2):18.
- [18] ZHAO X L, ZHANG L. State-of-art review on FRP strengthened steel structures[J]. Engineering Structures, 2007, 29(8):1808.
- [19] HASSAN M M, SHAFIQ M A, MOURAD S A. Experimental study on cracked steel plates with different damage levels strengthened by CFRP laminates [J]. International Journal of Fatigue, 2020, 142:105914.
- [20] 李粒琿,王志宇,张宁. 碳纤维复合材料(CFRP)粘贴层数对开孔钢板疲劳寿命影响的试验研究[J]. 工程科学与技术, 2017, 49(S1):226.
LI Lihui, WANG Zhiyu, ZHANG Ning. Experimental study on the influence of the number of CFRP layers on the fatigue life of open-hole steel plates [J]. Advanced Engineering Sciences, 2017, 49(S1):226.
- [21] LIU H, AL-MAHAIDI R, ZHAO X L. Experimental study of fatigue crack growth behaviour in adhesively reinforced steel structures[J]. Composite Structures, 2009, 90(1):12.
- [22] WU C, ZHAO X L, AL-MAHAIDI R, *et al.* Fatigue tests of cracked steel plates strengthened with UHM CFRP plates[J]. Advances in Structural Engineering, 2012, 15(10):1801.
- [23] YU Q Q, CHEN T, GU X L, *et al.* Fatigue behaviour of CFRP strengthened out-of-plane gusset welded joints with double cracks[J]. Polymers, 2015, 7(9):1617.
- [24] NAKAMURA H, WEI J, SUZUKI H, *et al.* Experimental study on repair of fatigue cracks at welded web gusset joint using CFRP strips[J]. Thin-Walled Structures, 2009, 47(10):1059.
- [25] TONG L, YU Q, ZHAO X L. Experimental study on fatigue behavior of butt-welded thin-walled steel plates strengthened using CFRP sheets [J]. Thin-Walled Structures, 2020, 147:106471.
- [26] BS EN 1993-1-9:2005. Eurocode 3, design of steel structures. Part 1-9: fatigue [S]. Brussel: European Committee for Standardization, 2005.
- [27] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 纤维增强复合材料工程应用技术标准:GB50608—2020 [S]. 北京:中国计划出版社, 2020.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical standard for fiber reinforced polymer (FRP) in construction: GB50608—2020 [S]. Beijing: China Planning Press, 2020.
- [28] British Standards Institution. Steel, concrete and composite bridges. Part 10, code of practice for fatigue: BS 5400 [S]. London: British Standards Institution, 1980.
- [29] AASHTO LRFD. Bridge design specifications [S]. Washington DC: American Association of State Highway and Transportation Officials, 2014.
- [30] 日本道路协会. 钢道路桥疲劳设计指针[S]. 东京:丸善出版株式会社, 2002.
Japan Road Association. Fatigue design guidelines for steel highway bridges[S]. Tokyo: Maruzen Intec Co., Ltd., 2002.