

# 基于断裂力学的UHPC加固钢桥面板性能分析

龙屹宇<sup>1</sup>,陈双庆<sup>2</sup>,唐春燕<sup>1</sup>,彭亚军<sup>1</sup>,周泽箭<sup>1</sup>

(1.广东省交通规划设计研究院集团股份有限公司,广东 广州 510080;

2.湖南文理学院 土木建筑工程学院,湖南 常德 415000)

**摘要:**正交异性钢桥面板的板-肋焊接处是车辆荷载下极易开裂的位置,通过UHPC加固可以有效减小钢桥面板的疲劳风险。为了研究UHPC加固钢桥面板的效果,基于线弹性断裂力学展开有限元分析。通过正交异性钢桥面板试验案例作为参考对焊趾处的疲劳性能进行计算,验证了有限元模型的可靠性,通过在焊接细节处插入初始裂纹进行应力强度因子计算分析,考虑不同加载位置以及UHPC层厚度对裂纹尖端的应力强度因子值的影响。研究结果表明:顶板处焊缝位置的热点应力要高于U肋处的焊缝,热点应力受荷载位置影响较为明显;增加UHPC层可有效增加正交异性钢桥面板的刚度,从而减少裂纹尖端的应力集中,增设50 mm厚的UHPC铺装层时,初始裂纹尖端的应力强度因子减小约89%,研究内容可为UHPC加固钢桥面板设计提供参考。

**关键词:**UHPC;钢桥面板;疲劳性能;应力强度因子;断裂力学

**中图分类号:**U441+.4

**文献标志码:**A

## 0 引言

正交异性钢桥面板是通过各个部件组合而得到的受力优良的结构,在大跨度桥梁中得到了广泛应用,然而由于交通荷载的日益增长以及施工质量等原因,目前正在服役的大跨度桥梁的疲劳开裂问题日益突出,其中正交异性钢桥面板开裂问题较为严重<sup>[1]</sup>,外在荷载如风荷载、温度荷载等也是导致大跨度桥梁损伤的关键因素<sup>[2-3]</sup>。近年来,随着超高性能混凝土材料(UHPC)的提出,为解决正交异性钢桥面板极易开裂损伤的问题提供了新的解决方法,通过UHPC材料加固钢桥面板,可提升结构局部的刚度,减小焊缝区域的应力集中。但如何合理高效地利用UHPC性能是解决目前病害问题的关键<sup>[4]</sup>。

针对现有钢桥面板的疲劳开裂以及加固问题,研究人员开展了大量研究,为研究重度开裂钢桥面板的加固效果,王洋等<sup>[5]</sup>以武汉军山长江大桥为研究背景,结合子模型技术对比计算了UHPC加固前

后结构的应力状态,为应对钢桥面板已出现贯穿型裂纹的加固问题,提出了一种新型钢板条-UHPC组合桥面板<sup>[6]</sup>;秦世强等<sup>[7-8]</sup>通过对比钢-UHPC组合桥面及环氧沥青桥面铺装桥的疲劳性能,基于应力监测数据发现钢-UHPC组合桥面拥有更大的抗弯刚度且抗高温性能相对更好;邓鸣等<sup>[9]</sup>以天津海河大桥为研究背景,分析了钢桥面板的病害特征及机理,并对加固后的桥梁状况进行了2年的监测;张清华等<sup>[10]</sup>针对现有问题提出了一种新型波形顶板-UHPC组合桥面结构,并对其进行了理论和试验分析;邵旭东等<sup>[11]</sup>、李荫等<sup>[12]</sup>对钢-超薄UHPC桥面板展开了大量研究,对其桥面板裂缝宽度及抗剪连接件性能进行了系统分析;王春生等<sup>[13]</sup>采用断裂力学方法可对加固前后结构的疲劳性能进行有效分析;邓扬等<sup>[14]</sup>通过研究发现在正交异性钢桥面板裂纹扩展早期进行疲劳加固,可使其应力强度因子幅值低于该材料的疲劳裂纹扩展门槛值;杨俊等<sup>[15]</sup>通过对拱圈的应力强度因子进行计算,发现通过对拱圈进行加固,带开裂型的裂纹以及滑开型的裂纹应力强度因子可减少20%以上。

收稿日期:2022-07-12(修改稿)

基金项目:湖南省交通科技项目(编号:202013)

作者简介:龙屹宇,男,硕士,工程师.E-mail:302613279@qq.com

基于上述研究,本文建立考虑正交异性钢桥面板焊接细节的精细化有限元模型,对顶板及U肋焊接位置的热点应力进行计算分析。在此基础上,基于线弹性断裂力学方法,通过在疲劳细节位置插入初始裂纹,计算UHPC加固前后的应力强度因子分布特性,最后对不同厚度UHPC加固下的有效应力强度因子进行对比分析,研究从断裂损伤角度为UHPC对正交异性钢桥面板的加固效果评估提供参考。

1 试件布置

试验模型参照文献[16]中的试验模型,试件由顶板及U肋焊接而成,顶板厚度为16 mm,U肋厚度为顶板厚度的1/2,试件横向宽度为1 000 mm,纵向长度为400 mm,U肋高度为300 mm,开口宽度与U肋高度一致,U肋与顶板之间采用二氧化碳气体保护焊焊接,焊缝为80%熔透率的坡口角焊缝。试件的约束条件为两端简支约束,约束位置距离顶板端部50 mm,试件的具体布置及尺寸如图1所示。试件材料为Q345Qd,试验中通过拉伸试验测得了顶板及U肋的材料参数如表1所示。本文共分为2组试件:一组加载位置位于中间位置,称为试件1;另一组为偏心加载,即加载位置相对于居中位置向右侧移动了150 mm,称为试件2。在进行UHPC加固分析时,加载位置与加固前正交异性钢桥面板试件一致。

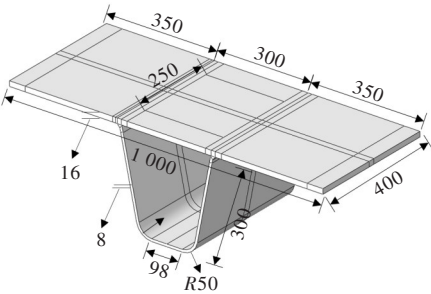


图1 试件布置及几何尺寸(单位:mm)

表1 材料参数属性

构件	弹性模量/MPa	屈服强度/MPa	极限强度/MPa
顶板	200 000	353	508
U肋	190 000	400	495

2 有限元模型建立

2.1 模型建立

通过有限元软件Abaqus对模型进行建立和计算分析,有限元模型包括顶板以及U肋,通过表1中试验所得的材料属性数据对材料本构关系进行定义,由于在实际桥梁工程中正交异性钢桥面板上方会铺设沥青铺装层,轮载作用下荷载由铺装层传递到顶板时存在扩散效应<sup>[16]</sup>,为避免试验中加载装置直接与顶板接触,在顶板上方设置一层橡胶板,橡胶板尺寸为250 mm×250 mm,厚度为50 mm。在顶板两端50 mm位置设置简支约束,模型边界及加载示意如图2所示,可以看到:试件1加载位置位于中间,试件2为偏心加载,图2中还给出了测点的布置,后文将对测点布置进行详细说明。橡胶板与顶板之间通过绑定约束模拟二者之间的接触关系,模型中均采用六面体单元,通过软件布置网格尺寸进行单元划分,在焊缝位置的单元尺寸为0.5 mm,单元类型为三维实体单元C8DR,划分网格后共计单元481 160个,模型在焊接细节及关注部位进行网格加密,有限元模型及细部单元如图3所示,图3中模型是在图2的基础上增设UHPC层进行网格划分的。

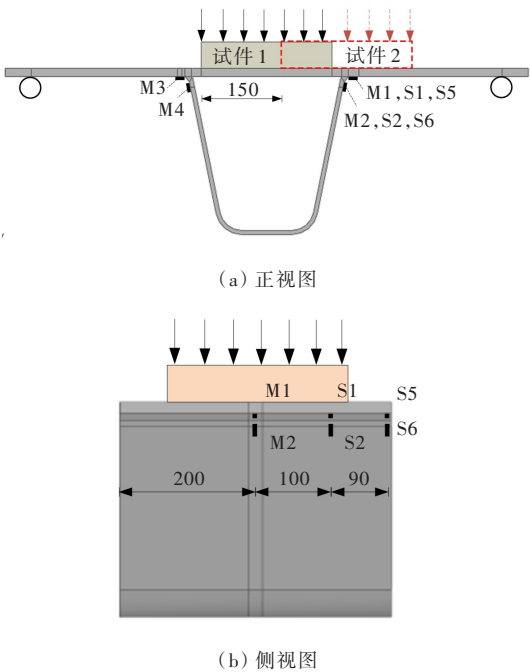


图2 试验模型加载及测点布置示意图(单位:mm)

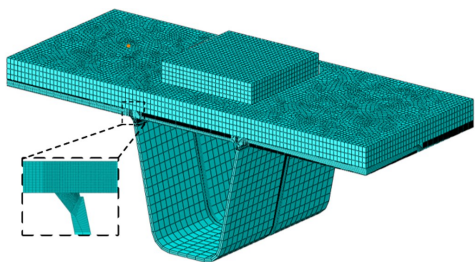


图3 有限元模型

为研究 UHPC 材料加固后正交异性桥面板的受力,在试验模型的基础上增加 UHPC 层的模拟,同样采用三维实体单元 C8DR,橡胶与 UHPC 及顶板的接触关系均采用绑定约束,忽略 UHPC 与顶板之间的剪力连接件。对于 UHPC 材料,需要定义精细的本构关系,此处采用混凝土损伤塑性模型(CDP)模拟,参照文献[17-19]中所提出的 UHPC 受拉及受压应力-应变曲线,如图 4、5 所示,具体参数按照文献[17-19]中试验得出的数据进行设置,计算公式如图 4、5 所示。

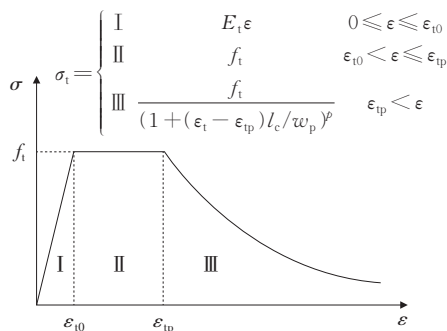


图4 受拉应力-应变曲线

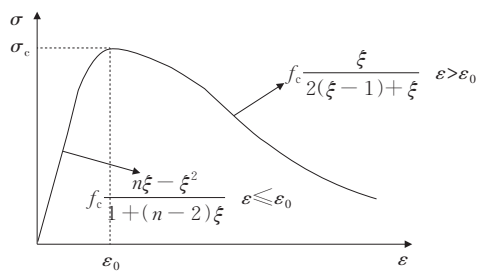


图5 受压应力-应变曲线

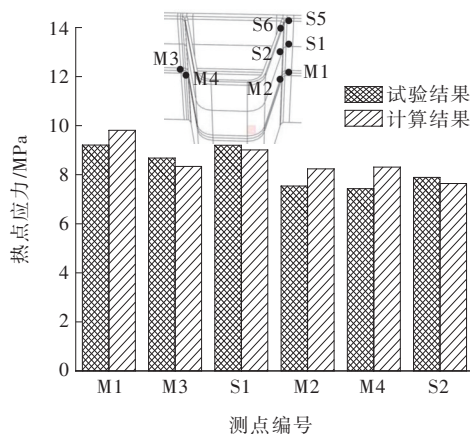
图 4、5 中各项参数所代表的意义为:  $\epsilon_{t0}$  为受拉峰值应变;  $f_t$  为应变硬化阶段的平均应力;  $\epsilon_{tp}$  为受拉极限应变;  $l_c$  为试件测量的引伸标距;  $w_p$  为裂缝宽度参数;  $p$  为轴拉性能试验拟合所得到的参数;  $f_c$  为抗压强度;  $\xi$  为受压应变值与受压峰值应变比值;  $\epsilon_0$  为受压峰

值应变。其中关键参数  $f_t$  及  $f_c$  分别取值 7.67 MPa 及 129.1 MPa<sup>[17-19]</sup>。

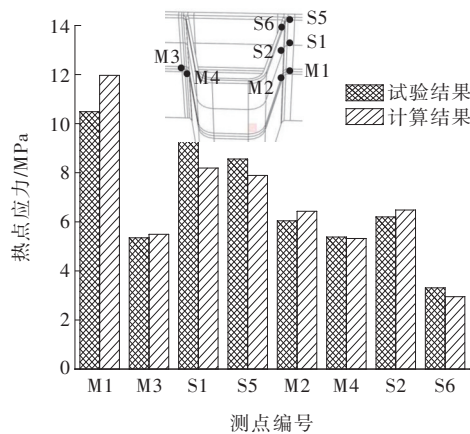
## 2.2 计算结果验证与分析

参照文献[16]的静力试验,通过加载 1 kN 荷载,测得图 6 所示测点的热点应力,通过有限元模型,将计算得到的热点应力值与试验结果进行对比,用于验证本文计算的准确性,图 6 数据为试验中测得数值的平均值。本文中有有限元的热点应力结果参照国际焊接协会推荐的两点线性外推方法,通过在热点位置的 0.4t 及 1.0t (t 为厚度) 位置精细化划分网格,并且提取该位置节点的应力,通过式(1)计算出热点应力<sup>[14]</sup>:

$$\sigma_{hs} = 1.67\sigma_{0.4t} - 0.67\sigma_{1.0t} \quad (1)$$



(a) 试件 1



(b) 试件 2

图6 热点应力计算结果与试验结果对比

图 6 中: M3 及 M1 测点分别代表左侧及右侧顶板处焊缝位置(测点距端部 200 mm), M4 及 M2 测点分别代表左侧及右侧 U 肋处焊缝位置(测点距端部距离 200 mm), S1 及 S5 测点在右顶板处焊缝位置,测



点距端部分别为300 mm、390 mm, S2及S6测点代表右侧U肋处焊缝位置,测点距端部分别为300 mm、390 mm。

由图6可知:① 本文所计算得到的热点应力分布情况与试验基本一致,并且误差相对较小,证明本文通过精细化建模计算方法的可靠性,数据存在一定误差可能是由于焊接时产生的残余应力以及试件加工时的误差导致的<sup>[13]</sup>;② 顶板上的热点应力相较于U肋上焊缝的要高,顶板最大热点应力位于加载位置的正下方,在偏心荷载的作用下,偏心荷载侧的热点应力较远离侧要大,偏载作用下顶板热点应力相较于中间加载高出了22%(M1测点),说明钢桥面板的疲劳性能受荷载加载位置的影响较大,同时顶板裂纹是检测人员需要关注的重点。

### 3 应力强度因子计算分析

#### 3.1 应力强度因子计算方法

通常UHPC用于钢桥面板已有疲劳裂纹的加固中,而在运营之初,由于焊接质量或者材料本身的原因,结构不可避免存在初始裂纹,细小的初始缺陷在疲劳荷载作用下存在应力集中,当荷载作用下的应力强度因子幅值超过了钢桥面板材料的扩展门槛值时,疲劳裂纹将不断扩展,最终危及结构的使用安全,然而在扩展初期,裂纹较小阶段不便于检查人员发现,通过数值方法能够对带有初始表面裂纹的钢桥面板进行有效的计算,本文通过线弹性断裂力学方法<sup>[13-15]</sup>,对前文中试验构件焊接细节处的裂纹应力强度因子值进行计算分析,同时对UHPC加固前后的有效应力强度因子值进行对比,文中UHPC的加固分析针对正交异性钢桥面板不便于肉眼检测的疲劳裂纹进行。应力强度因子的计算可以作为结构损伤的判据,断裂力学认为疲劳裂纹的扩展取决于裂纹简单的应力强度因子幅值,当幅值超过材料扩展的阈值时,疲劳裂纹将不断扩展,因此通过对加固前后的应力强度因子变化进行对比,从结构损伤的角度研究UHPC对正交异性钢桥面板的加固效果。

在断裂力学分析中,应力强度因子是一个重要的参数,是裂纹扩展方向及距离的决定因素之一。应力强度因子分为3类,即张开型、滑开型及撕开型,

为对3种应力强度因子均进行有效计算,本文结合Franc 3D断裂力学分析软件,采用M积分方法进行计算<sup>[20-21]</sup>。计算方法参考了文献[14]的Ansys-Franc 3D交互技术,计算过程通过有限元程序Abaqus及Franc 3D实现,为提高计算效率,将图3中局部细化的关键构造细节处切割并定义子模型,在该处插入初始表面裂纹,然后与原始模型合并,最后在荷载作用下进行应力强度因子计算分析,模型所切割出的子模型如图7所示。根据前文计算结果,顶板焊缝位置的热点应力值相对较大,因此此处仅考虑位于顶板焊缝位置的表面裂纹,表面裂纹通常为半椭圆形,  $a$  和  $c$  分别表示半椭圆形裂纹的尺寸,本文计算中均取0.2 mm。

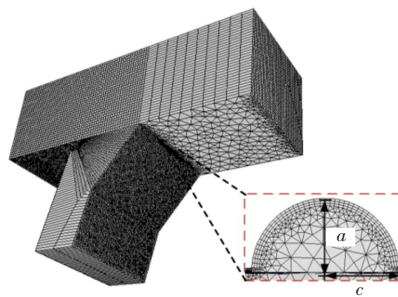


图7 子模型网格划分图

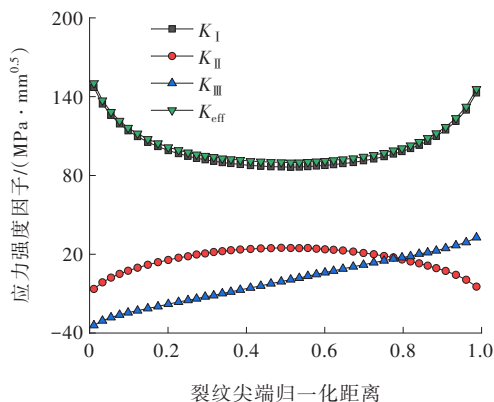
#### 3.2 参数分析

在文献[16]静力试验的基础之上,通过对正交异性钢桥面板进行断裂力学计算,可得出图8中裂纹尖端的应力强度因子分布,计算时施加的荷载为10 kN。由图8可知:在荷载作用下,顶板处焊缝位置处于复合型断裂类型,其应力强度因子由I型(开裂型)主导,加固前与加固后的应力强度因子分布特点基本一致,在本文中设置了初始裂纹的情况下,裂纹尖端的I型应力强度因子呈现出端点大于中点的分布趋势,UHPC的加设没有改变裂纹尖端的开裂类型,但是大大减小了其应力强度因子,有效应力强度因子值  $K_{eff}$  是对于复合型裂纹综合考虑了3种开裂类型的断裂力学指标,通过式(1)可以对其进行计算<sup>[22]</sup>,通过计算可以得出对于中间加载,加固前裂纹尖端端点的  $K_{eff}$  为  $150.2 \text{ MPa} \cdot \text{mm}^{0.5}$ ,增设UHPC层后  $K_{eff}$  降低了87.8%;裂纹尖端中点的  $K_{eff}$  为  $89.8 \text{ MPa} \cdot \text{mm}^{0.5}$ ,增设UHPC层后  $K_{eff}$  降低了87.6%。同样可得出偏载情况下裂纹尖端中点及端点  $K_{eff}$  降幅

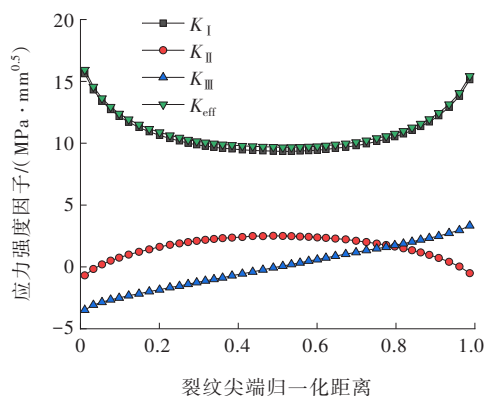
分别为 88.6% 和 88.5%。

$$K_{\text{eff}} = \sqrt{K_I^2 + K_{II}^2 + \frac{1}{(1+\nu)} K_{III}^2} \quad (1)$$

式中:  $K_I$  为张开型应力强度因子;  $K_{II}$  为滑开型应力强度因子;  $K_{III}$  为撕开型应力强度因子;  $K_{\text{eff}}$  为复合疲劳裂纹的有效应力强度因子;  $\nu$  为泊松比, 取 0.3。



(a) UHPC 加固前



(b) UHPC 加固后

图 8 应力强度因子分布图

为研究不同 UHPC 厚度对钢桥面板顶板焊缝表面裂纹有效应力强度因子的影响, 以试件 1 为研究对象, 考虑了 3 种不同厚度值, 分别为 40 mm、50 mm 及 60 mm, 计算得到的裂纹尖端中点及端点的结果对比如图 9 所示。由图 9 可以看出: UHPC 厚度对顶板焊缝处裂纹应力强度因子影响明显, 60 mm 厚度 UHPC 相较于 40 mm 时裂纹尖端中、端点的有效应力强度因子均约减小 45%。

## 4 结论

本文结合断裂力学计算软件, 建立 UHPC 加固

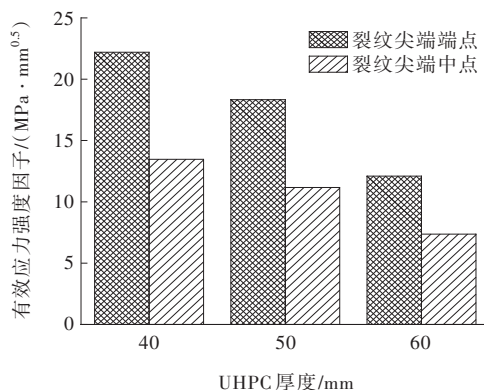


图 9 不同 UHPC 厚度的有效应力强度因子

后的正交异性钢桥面板有限元模型, 对关键构造细节处的应力强度因子进行了计算分析, 以研究 UHPC 加固前后的疲劳特性, 研究结论如下:

(1) 通过对关键构造细节处的网格进行加密, 可以有效计算正交异性桥面板在荷载作用下的热点应力, 有限元计算所得的结构疲劳风险较高位置与试验结果一致。

(2) 荷载作用下, 顶板处焊缝位置的热点应力要高于 U 肋处的焊缝, 构造细节的热点应力受荷载位置影响较为明显。

(3) 荷载作用下, 钢桥面板顶板焊缝处表面裂纹应力强度因子为复合型分布, UHPC 加固后裂纹尖端的分布特性不变, 但裂纹尖端有效应力强度因子大大减小, 50 mm 厚的 UHPC 板相较于未加固时减小了约 89%。

(4) 裂纹尖端的有效应力强度因子随 UHPC 加固层的厚度基本呈线性变化, 60 mm 厚度 UHPC 相较于 40 mm 时裂纹尖端的有效应力强度因子均约减小 45%。

## 参考文献:

- [1] 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.
- [2] 朱金, 吴梦雪, 尹力, 等. 随机车流-风联合作用下沿海大跨度斜拉桥拉索疲劳寿命预测[J]. 中国公路学报, 2020, 33(11): 182-194.
- [3] 王达, 谭本坤, 赵鹏鑫. 钢-混凝土组合桥面板温度梯度效应的试验研究与数值模拟[J]. 建筑结构学报, 2021, 42(S2): 74-82.
- [4] 邵旭东, 邱明红, 晏班夫, 等. 超高性能混凝土在国内外桥梁工程中的研究与应用进展[J]. 材料导报, 2017, 31

- (23):33-43.
- [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] 王洋,邵旭东,沈秀将,等.钢板条-UHPC组合桥面结构静力及疲劳试验[J].中国公路学报,2021,34(8):261-272.
- [7] 秦世强,黄春雷,张佳斌,等.基于应力监测的钢-UHPC组合桥面和环氧沥青钢桥面疲劳性能对比[J].东南大学学报(自然科学版),2021,51(1):61-70.
- [8] 秦世强,张佳斌,黄春雷,等.大跨度钢箱梁斜拉桥钢-UHPC组合桥面加固效果评估[J].工程科学与技术,2022,54(3):139-148.
- [9] 邓鸣,张建仁,王蕊,等.UHPC铺装加固斜拉桥正交异性钢桥面板[J].长安大学学报(自然科学版),2018,38(1):67-74.
- [10] 张清华,程震宇,邓鹏昊,等.新型钢-UHPC组合桥面板抗弯承载力模型试验与理论分析方法[J].土木工程学报,2022,55(3):47-64.
- [11] 邵旭东,曹君辉,易笃韬,等.正交异性钢板-薄层RPC组合桥面基本性能研究[J].中国公路学报,2012,25(2):40-45.
- [12] 李萌,邵旭东,曹君辉,等.UHPC中短栓钉抗剪性能试验及理论分析[J].中国公路学报,2021,34(8):191-204.
- [13] 王春生,翟慕赛,唐友明,等.钢桥面板疲劳裂纹耦合扩展机理的数值断裂力学模拟[J].中国公路学报,2017,30(3):82-95.
- [14] 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.
- [15] 杨俊,周建庭,程俊,等.基于断裂力学的UHPC复合拱圈加固效率研究[J].桥梁建设,2018,48(4):74-78.
- [16] CHENG B, YE X H, CAO X E, et al. Experimental study on fatigue failure of rib-to-deck welded connections in orthotropic steel bridge decks[J]. International Journal of Fatigue, 2017, 103: 157-167.
- [17] 李萌,邵旭东,曹君辉,等.UHPC加固重度开裂钢桥界面抗剪静力试验研究[J].公路交通科技,2021,38(12):73-80.
- [18] 张哲,邵旭东,李文光,等.超高性能混凝土轴拉性能试验[J].中国公路学报,2015,28(8):50-58.
- [19] 李立峰,范昕,石雄伟,等.大比例预应力UHPC-T形梁抗弯性能试验研究[J].土木工程学报,2018,51(5):84-94,102.
- [20] 杨剑,方志.超高性能混凝土单轴受压应力-应变关系研究[J].混凝土,2008(7):11-15.
- [21] 祝志文,黄炎,向泽,等.货运繁重公路正交异性板钢桥弧形切口的疲劳性能[J].中国公路学报,2017,30(3):104-112.
- [22] WANG D, TAN B K, WANG L, et al. Numerical study on stress intensity factors for stud connectors of steel - concrete connection[J]. International Journal of Steel Structures, 2021, 21(5): 1775-1789.