

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

尤永学

(洛阳腾飞市政工程有限公司, 河南 洛阳 471000)

摘要: 疲劳开裂是正交异性钢桥面板常遭遇的病害之一, 而其与桥面铺装刚度较大使得关键细节应力幅过大密切相关, 因此, 利用 UHPC 提升桥面铺装刚度是缓解疲劳应力的重要手段。为研究实际车流作用下的关键细节的疲劳性能, 以跨沿洛河某公路斜拉桥为例, 开展了钢-UHPC 组合铺装正交异性钢桥面板构造细节的应力影响面分析, 并利用监测记录的实际车流对构造细节进行加载分析, 获得其应力谱; 基于 Miner 疲劳损伤等效原则计算得到了最大应力幅、等效应力幅及疲劳加载次数。结果表明: 采用 UHPC 加固桥面铺装将显著降低构造细节应力, 并改善了构造细节的力学行为, 显著降低了面板上构造细节的应力幅, 使得纵肋-面板焊缝构造细节和面板对接焊缝构造细节所记录到的最大应力幅均小于常幅疲劳极限。

关键词: 正交异性钢桥面板; 疲劳寿命; UHPC; 随机车流

中图分类号: U443.31

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2022)03-0182-04

0 引言

正交异性钢桥面板作为现代桥梁工程重要的标志性成就, 具有自重轻、承载力高、适用范围广等突出优点, 已经成为大跨度桥梁的首选桥面板结构, 其推广应用大大推动了桥梁工程向大跨、重载荷结构造型多样化等方向的发展^[1]。然而, 疲劳开裂和桥面铺装损坏是正交异性桥面板应用中面临的两大控制性难题, 自 1971 年英国报道了 Severn 桥疲劳开裂以来, 采用该类桥型的病害在欧洲各国、美国、日本及中国等世界范围内相继出现。正交异性钢桥面板的疲劳问题一直是各国学者高度重视的热点问题, 据不完全统计, 我国正在运营和规划中的该类型桥梁数量有 200 余座, 在当前的荷载条件下该类桥面板发生疲劳开裂是大概率事件。为此, 疲劳裂纹修复和结构加固是提升正交异性钢桥面板耐久性的研究热点。

研究表明疲劳开裂主要出现在板件焊接及过焊孔处, 其产生的主要原因是相应位置处疲劳应力幅较大, 由于截面变化引起的应力集中现象明显^[2-3]。针对钢桥面板各类疲劳裂纹, 一般采用裂纹焊合、钻止裂孔、栓接钢板或角钢、黏贴钢板等, 其基本原理

是缓解裂纹尖端的应力集中, 或提高裂纹附近钢板的强度和刚度^[4]。然而, 上述修复措施往往只是临时缓解疲劳开裂, 尤其是对于应力复杂的桥面板与 U 肋连接处的焊缝, 而提升钢桥面板刚度以减小疲劳应力幅是解决该问题的关键^[5]。工程实践已将正交异性钢桥面板板厚由早期常用的 12 mm 提高到 16 mm 甚至更厚, 但对于在役桥梁, 改变钢板厚度成本极高, 通过桥面铺装提高桥面刚度是减小钢桥面板和 U 肋在轮载下的应力的有效措施, 尤其是随着超高性能混凝土 (Ultra High Performance Concrete, UHPC) 的推广应用, 其已逐渐在正交异性钢桥面板的加固改造中发挥作用, 例如, UHPC 加固钢桥面板先后被应用于武汉沿洛河军山大桥、天津海河大桥、广东佛山市佛陈扩建西幅桥等工程中^[6-8]。学者们也先后开展了 UHPC-钢桥面板力学性能的理论 and 实验研究, 结果表明采用 UHPC-钢正交异性钢桥面板能有效地降低关键细节疲劳应力幅^[9-10]。

综上, 当前国内外学者就超高性能混凝土用于桥面铺装改善正交异性钢桥面的疲劳性能进行了大量研究, 但是现有研究多以规范疲劳车作为疲劳性能评估的荷载作用, 事实上基于实际交通的现场实验是最能反映正交异性钢桥面板疲劳性能的加载方式^[11]。本文将探索基于实际车流的 UHPC 加固钢桥面板方案的评估, 以更加真实地反应 UHPC-钢桥面板的疲劳性能。

收稿日期: 2021-05-15

作者简介: 尤永学(1967—), 男, 本科, 高级工程师, 从事桥梁施工技术工作。

1 工程概况及有限元模型

1.1 工程概况

该研究以跨沿洛河某公路斜拉桥为工程背景,其桥面结构采用 Q345C 钢,桥面板钢板厚度为 12 ~ 20 mm,铺装层总厚度为 75 mm。桥面板结构模型的尺寸如图 1 所示。日常检查记录和文献研究表明,钢箱梁桥面板主要病害为钢结构的裂缝病害,先后进行过多次维修,但是裂缝病害仍然继续发展且产生旧缝重新开裂的现象。根据裂缝检测记录,U 肋与面板的接缝裂缝是主要裂缝形式,因此首先采用有限元方法对该关键焊接细节处进行应力状态分析。

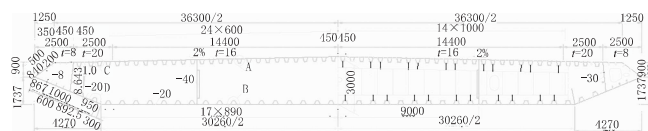


图 1 钢箱梁结构(单位:mm)

为研究 U 肋与面板接缝, 取如图 2 所示的局部进行分析。在车辆荷载的局部作用下, 主梁第一体系对桥面板各构造细节影响不大, 主要是以桥面板与横纵肋组成的桥面第二体系发挥作用, 同时由于正交异性钢桥面板应力影响线较短, 车辆荷载作用下钢桥面板局部节段模型与钢箱梁整体模型计算得到的应力状态相差较小。

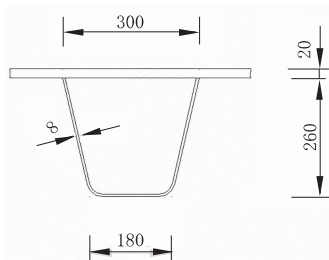


图2 局部构造细节(单位:mm)

1.2 有限元模型

考虑到建模计算效率,计算模型顺桥向长度取 1 m,横桥向宽度取一个 U 肋的间距 0.8 m,分析可知该尺寸大小的节段模型可以基本覆盖车轮经过时的应力影响区域。对选取的桥面板节段采用有限元分析软件 ANSYS 进行建模,模型采用 20 节点的实体单元 SOLID185,单元数量为 266 314,U 肋两端固接约束。因沥青在夏季高温等极端温度条件下不能保持原有刚度,故计算时忽略沥青铺装的影响。由于模型尺寸较大,为了后续能精细化分析,采用子模型技术,通过位移插值法将 U 肋焊缝处进行更精确的网格划分,有限元模型如图 3 所示。

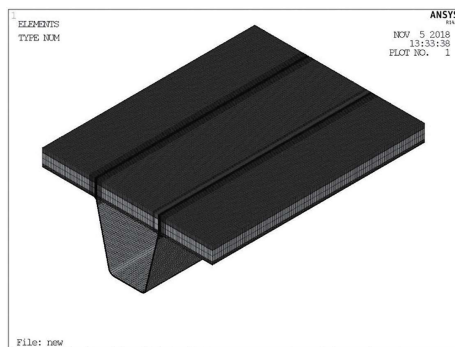


图 3 桥面 U 肋模型

选取钢桥面板 U 肋焊缝处的三个关注点对焊缝结构在车辆荷载作用下的疲劳性能展开分析,关注点位置如图 4 所示,1 号关注点位于顶板焊趾处,2 号关注点位于顶板焊根处,3 号关注点位于 U 肋焊趾处。研究中关注局部模型纵向跨中截面三个关注点的性能。

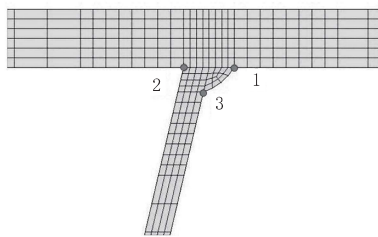


图 4 关注点几何位置

3 U肋焊缝处影响面计算

对桥面板结构进行疲劳计算时采用标准疲劳荷载模型,我国《公路钢结构桥梁设计规范》(JTG D64—2015)提出了三种疲劳荷载模型,并规定桥面系构件应当采用如图 5 所示模型 III 进行验算。

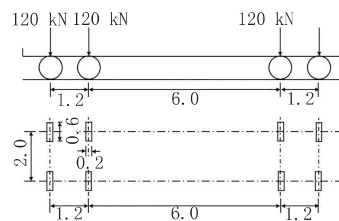


图 5 钢规疲劳车辆荷载模型 III (单位:m)

结合我国疲劳设计标准与规范, 疲劳计算所用轮载大小与面积采用《公路钢结构桥梁设计规范》(JTG D64—2015)推荐的疲劳车辆荷载模型 III (120 kN, $0.6\text{ m} \times 0.2\text{ m}$), 考虑铺装层对轮载的分布作用, 假设考虑铺装层对轮载的分布作用, 轮载按 45° 夹角向下传递, 铺装层厚度为 75 mm, 则实际作用于顶板的荷载面积为 $0.75\text{ m} \times 0.35\text{ m}$ 。此外由于正交异性钢桥面板应力影响面较小, 疲劳荷载模型纵向轴距及横轮较大, 因此相邻的轮载对于局部应力影响可以忽略不计, 在分析计算时仅采用单个车轮面积大小进

行加载。

按照上述疲劳车辆荷载模型进行加载,考虑到后续按照实测荷载应力谱的等效应力设计疲劳荷载时,需参考目标细节的影响面。故这里采用 1 t 的单位荷载对模型进行加载,横向加载位置之间间隔 0.1 m,以及两处 U 肋与顶板焊缝位置,共计 11 个位置,编号为 A1~A11;纵向加载位置之间间隔 0.1 m,包括 11 个位置,编号为 B1~B11,具体的荷载轮位情况如图 6 和图 7 所示。考虑到全部纵、横向位置组合,共计 121 个加载轮位。

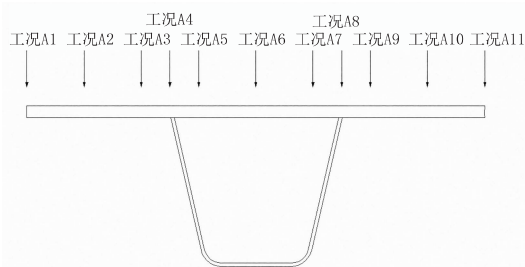


图 6 横桥向加载位置

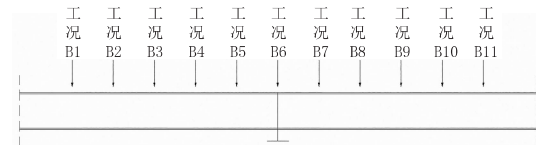


图 7 纵桥向加载位置

选取有限元模型纵向跨中截面 1~3 关注点进行分析。提取有限元模型纵向跨中截面 1~3 关注点的 x 向(横桥向)正应力进行影响面分析。

图 8 所示为原结构纵向跨中断面关注点 1 影响面。从图中可以看出关注点 1 处焊缝影响面最大应力加载工况 A4_B6,最小应力加载工况 A5_B6。在单位荷载(1 t)加载下,1 号关注点最大横向正应力幅值为 48.91 MPa。

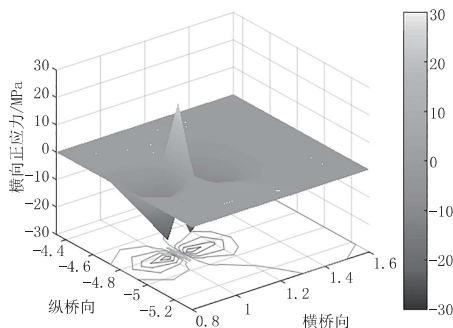


图 8 影响面 -1 号关注点

图 9 所示为原结构纵向跨中断面关注点 2 影响面。从图中可以看出关注点 2 处焊缝影响面最大应力加载工况 A6_B6,最小应力加载工况 A3_B6。在单位荷载(1 t)加载下,2 号关注点最大横向正应力幅值为 12.74 MPa。

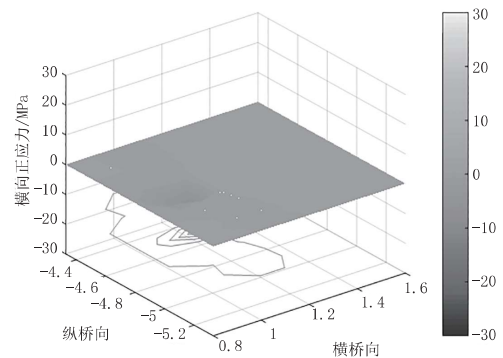


图 9 影响面 -2 号关注点

图 10 所示为原结构纵向跨中断面关注点 3 影响面。从图中可以看出关注点 3 处焊缝影响面最大应力加载工况 A4_B1(影响面同号),最小应力加载工况 A5_B6。在单位荷载(1 t)加载下,3 号关注点最大横向正应力幅值为 47.52 MPa。

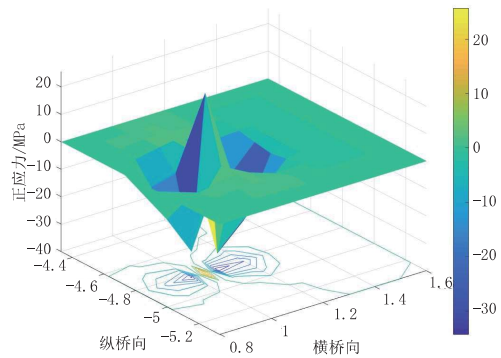


图 10 影响面 -3 号关注点

3 车辆荷载记录及分析

背景工程利用车辆荷载监测设备长期记录了交通流信息,该桥日均交通量约达 5 万辆/d,其中 10 t 和 20 t 以上车辆占比分别为 32.3%和 23.7%。图 11 所示为车型组成饼状图。可见,车流中大部分为两轴小客车,占比 67%,其次为 6 轴大货车,占比 11%。

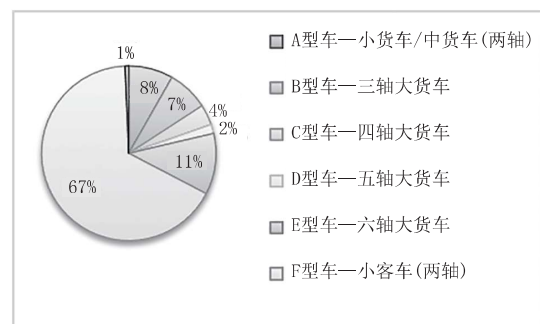


图 11 车型占比

4 桥面加固方案比较

对钢箱梁原有设计桥面结构进行 UHPC 加固,选取 45 mm、55 mm、65 mm 的 UHPC 混凝土层厚度进行加固后性能计算,分别计算 45 mm、55 mm、

65 mm 的 UHPC 加固结构影响面, 三者的三个关注点横向应力最大值工况均为轮载 A4_B6 工况。对无损状态下模型进行最大值轮载状态加载(轮载工况 A4_B6), 得到 U 肋纵向跨中截面关注点 1~3 的横向正应力状态。可见, 采用 STC 桥面加固方法后, 各关注点疲劳应力最大值有较大幅度降低, 其中, 45 mm、55 mm、65 mm UHPC 加固后疲劳应力最大值差距不大, 45 mm 厚加固层加固效果好。

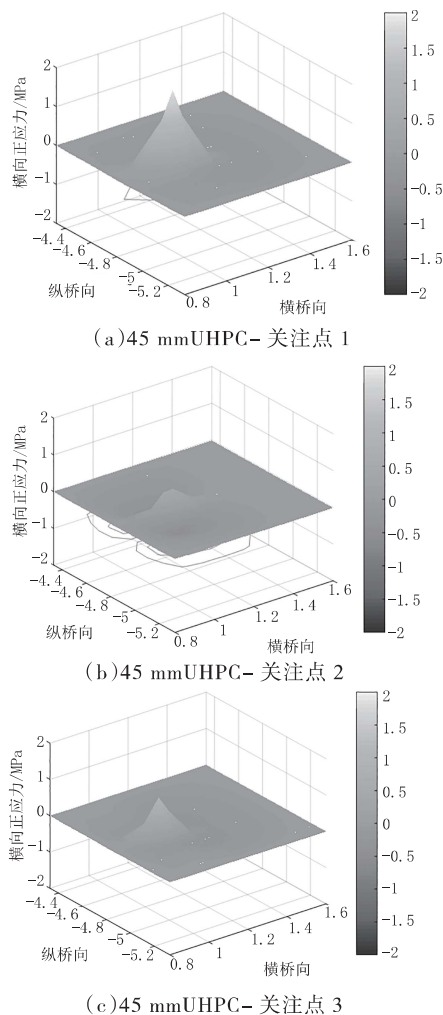


图 12 加固后结构疲劳荷载横向正应力影响面

表 1 STC 加固后关注点应力状态 单位: MPa

UHPC 厚度 /mm	关注点 1	关注点 2	关注点 3
正应力	0	-45.89	-50.79
	45	23.51	25.19
	55	24.73	25.50
	65	25.28	25.34
剪应力	0	0.000 08	-0.000 51
	45	0.000 07	-0.000 49
	55	0.000 05	-0.000 56
	65	0.000 02	-0.000 64

结合桥梁 WIM 系统实测车流数据, 考虑实际作用的车流荷载, 从而计算在实际状态下桥面板 U 肋

焊缝关注点处的疲劳性能。采用 2016 年 10 月 1 日至 15 日期间 6 车道实测车流荷载对关注点进行加载, 得到实际作用下的应力随时间变化的应力历程, 并通过雨流法得到实际关注点处的应力谱, 通过 Miner 准则对变幅应力等效为对应的常幅应力, 得到该时段实际车流荷载作用下各个关注点处的等效应力幅以及在实际车流下各关注点的疲劳寿命见表 2。通过对比发现, 实际车流作用下, 原结构关注点 2 处的疲劳寿命为 2 000 万次, 经过 45 mm 的 UHPC 加固方案改造后, 关注点 2 处的疲劳寿命为 16 000 万次。可见, 加固效果明显。

表 2 实际车流荷载下 45 mm UHPC 加固结构各关注点处疲劳寿命

关注点	等效应力幅 /MPa	疲劳寿命 / 万次	估算疲劳寿命年限 /a
1	17.01	20 318.29	96.75
2	18.18	16 642.49	79.25
3	1.22	55 070 689	262 241.4

为进一步分析加固效果, 对 45 mm UHPC 加固方案的各个关注点处的疲劳寿命进行估计。以汽车 - 超 20 级、挂车 -120 级, 设计车流量 15 000~20 000 次/d; 设计运营年限按 100 a 进行加载分析。考虑各个车道交通总量相同, 取重车比例 30%, 平均重轴数为 2 轴, 则单车道 1 a 疲劳加载轴次为 $N=(5\sim7)\times 10^5$ 次。结合上述计算结果, 各关注点处疲劳寿命见表 3。

表 3 规范疲劳荷载下 45 mm UHPC 结构各关注点处疲劳寿命

关注点	应力幅 /MPa	疲劳寿命 / 万次	估算寿命年限 /a
1	23.51	7 695.59	153.91
2	25.19	6 256.27	125.13
3	1.67	21 470 916.7	429 418.3

5 结 语

该研究以某跨沿洛河公路斜拉桥为研究对象, 该桥多年来面临的钢箱梁疲劳病害问题, 通过 WIM 系统收集了桥址处实测车流荷载数据, 并对其交通量特性、车型组成特性以及车轴荷载特性进行了统计, 为实测车流荷载谱及实际车流下结构疲劳性能评估提供了依据。

通过实际调研及有限元建模分析确定了桥面板 U 肋的关键部位, 通过对关键部位的局部有限元模型计算分析得到 U 肋焊缝处结构性能。结果表明: 原有桥面结构设计不能满足运营年限需求, 在实际车流荷载作用下疲劳寿命亦不能满足需求。

以实际交通流为基础分析了桥面铺装采用 UHPC 加固方案, 通过有限元分析 45 mm、55 mm、65 mm

(下转第 212 页)

有效计算,必须按照城市地下通道的具体状况和相关可靠性分析需求,综合考虑经济、数据等条件限制,选择合理的评价方法。由于道路的饱和度获取途径相对轻松,所以基于道路饱和度的可靠度算法是一种常用的计算方法。

2 案例应用

以东湖通道为例,利用基于道路饱和度的可靠度算法计算其可靠度,验证算法的可行性。

通过对东湖通道进行交通调查统计得知,东湖通道2020年主线上的高峰小时交通流量为4 560辆/h,饱和度为0.70,服务水平是C级,具有相对中等偏上的地下通道交通运行水平。

根据东湖通道2020年的交通统计数据,通过基于道路饱和度的可靠度算法计算可知,东湖通道2020年总体可靠度为0.891 9。这与东湖通道实际交通调查结果相对应,表明利用畅通可靠度算法分析道路运行状态具有合理性和可行性。

3 结 语

(1)根据城市地下通道的特点和实际情况,提出了几种城市地下通道畅通可靠度的计算方法,分析了几种算法的前提条件,可综合考虑经济、数据等条件限制,选择合理的评价方法。

(2)以东湖通道为例,证明本文计算方法在地下

通道畅通可靠度的计算中具有实用性和可行性,可以合理地分析地下通道车辆的运行状态,使交通管理者能够以此为依据进行交通设施、路网优化,从而使地下通道畅通可靠度足够大或阻塞概率足够小,达到人们可以接受的概率。

参考文献:

- [1] 黄宏伟. 城市隧道与地下工程的发展与展望[C]. 地下空间, 2001: 311-317.
- [2] 胡锡岭, 陈立道. 城市道路隧道交通事故的分析[J]. 中国市政工程, 2003(6): 5-7.
- [3] 刘澜, 袁庆达, 杜文. ITS条件下道路行车系统可靠性评价的概念性研究[J]. 公路交通科技, 2001(6): 70-72.
- [4] 蒋雄. 基于复杂网络理论的城市道路系统可靠性测试[J]. 公路与汽车, 2013(6): 36-41.
- [5] 聂庆慧, 夏井新, 钱振东. 城市道路交通流短时预测及可靠性分析[J]. 西南交通大学学报, 2013(5): 955-960.
- [6] 唐涛. 道路交通网络路径行程时间可靠性计算方法[J]. 科技信息, 2013(14): 150-151.
- [7] 况爱武, 黄中祥, 唐志强. 考虑OD对出行时间可靠性的道路网容量可靠性[J]. 系统工程, 2013(1): 116-120.
- [8] 陈艳艳, 梁颖, 杜华兵. 可靠度在路网运营状态评价中的应用[J]. 土木工程学报, 2003(1): 36-40.
- [9] 黄中祥, 况爱武, 等. 出行信息对道路网络出行时间可靠性的影响[J]. 交通运输系统工程与信息, 2012(6): 93-99, 105.
- [10] 周翔, 韩印, 范炳全. 城市重大交通工程项目的交通影响分析研究——以温州市瓯江隧道工程为例[J]. 城市交通, 2006(6): 58-63.

~~~~~  
(上接第185页)

的UHPC加固层厚度可知,采用STC桥面加固方法后,各关注点疲劳应力幅有较大幅度降低,疲劳寿命也均有大幅提升,在当前车流状态下均满足运营年限需求。其中,45 mm厚加固层加固效果较好。

### 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): 14-39.
- [2] 张允士, 李法雄, 熊锋, 等. 正交异性钢桥面板疲劳裂纹成因分析及控制[J]. 公路交通科技, 2013, 30(8): 75-80.
- [3] 陈斌, 邵旭东, 曹君辉. 正交异性钢桥面板疲劳开裂研究[J]. 工程力学, 2012, 29(12): 170-174.
- [4] 吉伯海, 袁周致远. 钢箱梁疲劳开裂维护研究现状[J]. 工业建筑, 2017, 47(5): 1-5.

- [5] 邵旭东, 胡建华. 钢-超高性能混凝土轻型组合桥梁结构[M]. 北京: 人民交通出版社, 2015.
- [6] 李佳, 冯啸天, 邵旭东, 等. STC钢桥面铺装新体系的力学计算与实桥试验对比分析[J]. 中国公路学报, 2014, 27(3): 39-44.
- [7] 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.
- [8] 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): 92-115.
- [9] 田启贤, 高立强, 周尚猛. 超高性能混凝土-钢正交异性板组合桥面受力性能研究[J]. 桥梁建设, 2017, 47(3): 13-18.
- [10] 田启贤, 高立强, 周尚猛, 等. 超高性能混凝土-钢正交异性板组合桥面试验研究[J]. 桥梁建设, 2019, 49(S1): 13-19.
- [11] 祝志文, 黄炎, 文鹏翔, 等. 随机车流下钢-UHPC组合正交异性桥面疲劳性能研究[J]. 中国公路学报, 2017, 30(3): 200-209.
- [12] JTG D64—2015, 公路桥梁钢结构设计规范[S].