

典型正交异性桥面板病害分析与加固技术研究

郭福宽^{1,2},周尚猛^{1,2}

(1.桥梁结构健康与安全国家重点实验室,湖北 武汉 430034;2.中铁大桥科学研究院有限公司,湖北 武汉 430034)

摘要:为了解决正交异性钢桥面板的病害问题,该文依托某钢箱梁斜拉桥桥面加固工程,开展钢桥面板病害分析与加固技术研究。结果表明:钢桥面板病害主要表现为疲劳开裂,疲劳裂缝具有数量多、长度短、开裂深、持续增长等特点,病害不断加重;疲劳应力幅超标是导致钢桥面板疲劳开裂的主要因素,钢桥面板一旦发生开裂,裂缝尖端应力幅不断增长,裂缝将会持续扩展;理论上改进型超高性能混凝土(UHPC)加固方案可使钢桥面板疲劳细节应力幅和裂缝尖端应力幅分别降低86.4%和92.6%(均降至常幅疲劳极限以下)。实桥加固后钢桥面板疲劳应力幅显著降低,疲劳病害得到有效缓解。

关键词:正交异性桥面板;疲劳开裂;病害分析;加固技术;应力幅;常幅疲劳极限

中图分类号:U443.31

文献标志码:A

0 引言

正交异性钢桥面板的病害问题一直是钢桥领域的重点和难点。钢桥面常用的铺装结构有环氧沥青混凝土、浇筑式沥青混凝土、双层SMA等,主要为柔性铺装结构。由于沥青混凝土材料弹性模量较小,对提升桥面局部刚度作用有限,在车辆荷载作用下,桥面局部变形较大,桥面系结构应力集中较为严重,加上交通荷载繁重,极易出现疲劳破坏。而沥青铺装层在这种支撑条件下,也容易出现开裂和脱层等病害^[1]。针对钢桥面病害问题,工程上多采用疲劳裂缝修补和沥青铺装层重铺的方式处置,但病害反复发生,很难根治^[2-3]。

近年来提出一种新型组合钢桥面铺装,该铺装引入超高性能混凝土(简称UHPC)材料作为结构层,与钢桥面板之间采用短剪力钉结合,形成组合铺装结构。由于UHPC具有良好的抗拉性能,在荷载作用下不易发生开裂,同时钢桥面板与UHPC层组合后,大幅度增加了钢桥面板的局部刚度,有效地减小了钢桥面的疲劳应力幅^[4-9]。目前该桥面铺装已经较多应用于新建公路和铁路桥梁工程中^[10],取得了

较好的效果。与新建桥梁相比,旧桥钢桥面存在裂缝多、修补质量差、结构整体性差等诸多不利因素,将该新型组合桥面应用于旧桥钢桥面上是否能够解决病害问题,尚需深入研究。

本文依托某座在役钢箱梁斜拉桥桥面加固工程,归纳桥面板病害并对其产生原因进行分析,然后制定有效的加固方案并对加固效果进行总结,可为类似钢桥面加固工程提供借鉴。

1 工程概况

某在役大桥主桥为五跨双塔双索面斜拉桥,跨径布置为(48+204+460+204+48)m=964m。主梁为闭口钢箱梁,尺寸为38.8m(宽)×3m(高)。桥面为正交异性板,U肋开口宽300mm,高260mm,厚6mm,横隔板间距为3m。钢箱梁横截面如图1所示。

该桥已运营20余年,桥面铺装部分历经多次维修,历次维修均为柔性沥青混凝土方案。钢箱梁部分在运营5年后出现了疲劳裂纹,随着荷载的持续增长,裂缝数量不断攀升,曾达到上万条,期间多次进行裂缝修焊,但反复开裂,得不到彻底根治。

收稿日期:2021-02-08

基金项目:中国中铁股份有限公司科技研究开发计划项目(编号:2018-重点-10,2019-重大-05)

作者简介:郭福宽,男,硕士,工程师.E-mail:1247627724@qq.com

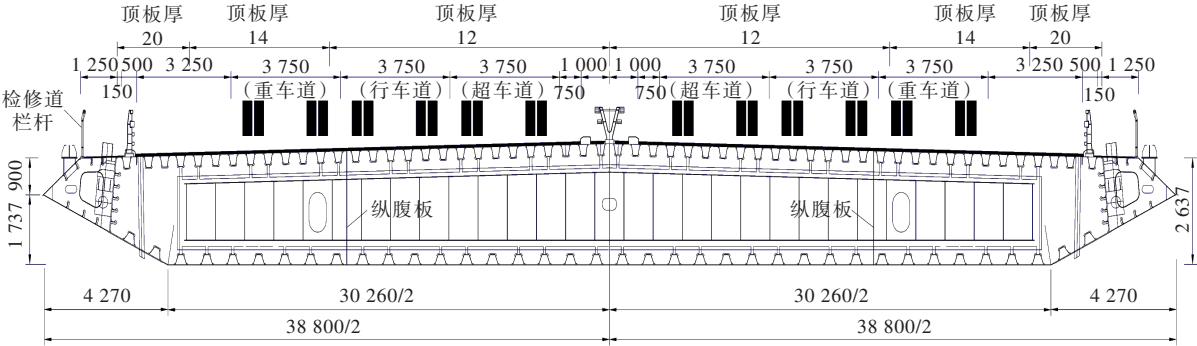


图1 钢箱梁示意图(单位:mm)

2 桥面板病害分析

2.1 钢桥面板病害

2017年,上游侧半幅桥面铺装翻修,对钢桥面裂缝进行探测。裂缝主要为U肋与桥面板角焊缝处向桥面板方向发展的裂缝,裂缝类型如图2所示。共发现UMJ-1和UMJ-2类裂缝4 688条,其中行车道发现裂缝2 733条,长度为356.3 m,重车道上发现裂缝1 955条,长度为270.2 m。无论在裂缝数量还是裂缝长度上行车道都较重车道严重。

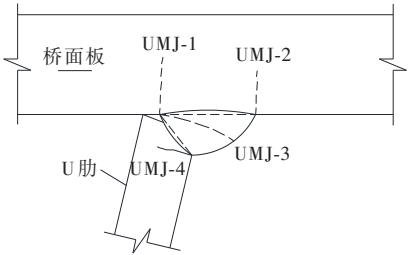


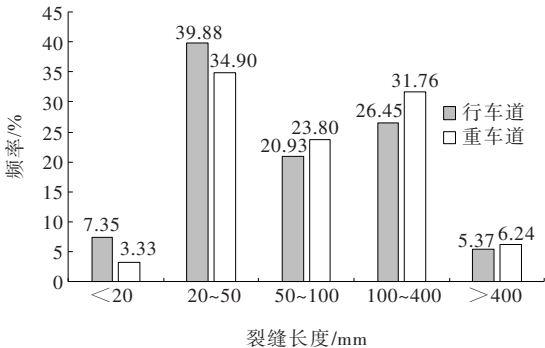
图2 UMJ型裂缝分类示意图

钢桥面裂缝长度及深度分布如图3所示。

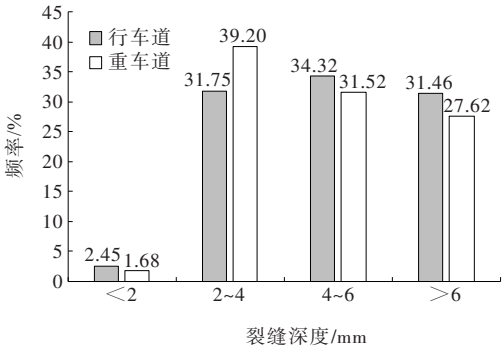
由图3可知:① 行车道和重车道探测到的面板裂缝长度中,20~50 mm裂缝占比最高,多数裂缝长度为20~400 mm;② 行车道和重车道探测到的面板裂缝中约98%的裂缝深度大于2 mm。大量裂缝存在裂穿现象。

钢箱梁内部裂缝也较为严重,呈现数量庞大、病害种类多的特点,在同类型桥梁中十分突出。2015年采用裂缝补焊的方式进行了一次内部裂缝全面维修,但维修后达不到预期效果,短时间内又重新开裂,在2016年9月检查中又发现了5 598条裂缝。2016年9月至2017年9月,钢箱梁内部裂缝数量如图4所示。从增长趋势来看,进入2017年后裂缝增长速

度放缓,但仍处于增长态势。



(a) 裂缝长度



(b) 裂缝深度

图3 裂缝长度及深度分布情况

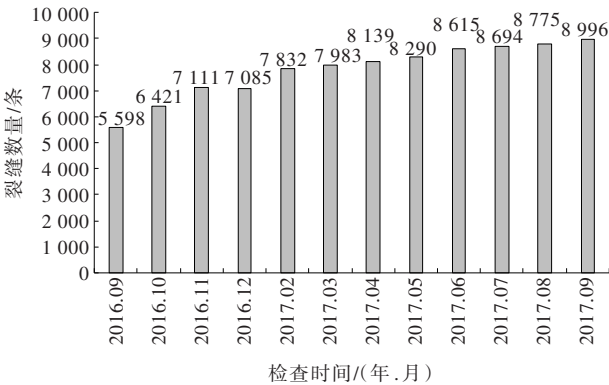


图4 钢箱梁内部裂缝发展趋势图

2.2 有限元分析

为了研究桥面体系受力情况,建立钢箱梁局部模型进行疲劳分析。该模型纵向取中跨跨中1个标准梁段(含4道横隔板),横桥向取半幅箱梁结构。利用Ansys单元生死功能模拟钢桥面板开裂现象。计算中的疲劳加载车根据规范[11]规定的疲劳荷载模型Ⅲ,静力加载车采用规范[12]规定的车辆。由于车辆的中后轴相距较长,计算时仅考虑后轴的双轴作用。在横桥向,车轮作用位置分U肋正上方、骑U肋、U肋间3种加载方式,在纵桥向,则分跨中和隔板两种加载位置,共计6种工况。通过不同工况加载确定各疲劳细节的最不利横向位置以及最不利横向布载工况。

需重点关注:钢桥面结构疲劳应力及裂缝区域疲劳应力,包括主要构件及构造的应力疲劳细节分别为:①顶板与U肋角焊缝在顶板上的焊趾;②顶板与U肋角焊缝在加劲肋上的焊趾;③U肋与横隔板角焊缝在U肋上的焊趾;④U肋与横隔板角焊缝在横隔板上的焊趾;⑤横隔板弧形切口;⑥U肋肋底拼接位置。具体疲劳细节位置如图5所示。

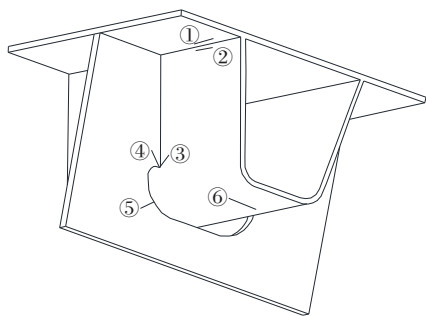


图5 疲劳细节位置

(1) 钢桥面板疲劳细节应力

取距离关注细节5 mm处应力值作为各关注点的名义应力,并与常幅疲劳极限对比,比较结果见表1。由于具有不同裂缝长度的钢桥面板,在各工况荷载下对于各细节的应力影响差异较小,故此只列出无裂缝时的应力。

由表1可知:采用沥青类柔性铺装的钢桥面,在疲劳车辆作用下,①~④号疲劳细节疲劳应力幅均超过了常幅疲劳极限,尤其是顶板疲劳细节①接近常幅疲劳极限的1.5倍,钢桥面板开裂风险较大。

(2) 疲劳细节①裂缝尖端应力

为了进一步研究铺设柔性沥青铺装的桥面板发

生开裂后裂缝的扩展规律,在裂缝区域横桥向分别提取不同长度裂缝的尖端应力幅进行比较(表2)。

表1 各疲劳细节名义应力

疲劳细节	应力幅值/ MPa	常幅疲劳极限/ MPa	应力幅/常幅 疲劳极限
①	80.2	52.0	1.5
②	62.6	52.0	1.2
③	70.3	52.0	1.4
④	71.5	52.0	1.4
⑤	38.7	52.0	0.7
⑥	38.2	66.0	0.6

表2 钢桥面的疲劳细节①裂缝尖端应力幅

裂缝长度/mm	最大应力幅/MPa
0	80.2
100	115.9
200	133.3
300	160.1
400	217.8

由表2可知:当铺设柔性铺装的钢桥面板发生开裂后,裂缝尖端区域的疲劳应力幅随着裂缝的增长大幅度升高,400 mm长度的裂缝最大应力幅达217.8 MPa,相比完好钢桥面板增幅高达171.6%,说明对于已经出现疲劳裂缝的钢桥面板,若不采取有效措施,裂缝尖端的应力不断增长,裂纹将迅速扩展。

综上,采用沥青混凝土方案,在疲劳车辆荷载作用下,正交异性桥面板疲劳细节应力幅易超过常幅疲劳极限,尤其是面板与U肋连接构造(即UMJ开裂区域),存在较大的开裂风险。一旦发生开裂,裂缝尖端区域应力不断增长,裂缝将持续扩展,病害加剧。因此,采用柔性沥青铺装方案不能解决疲劳病害问题,而且疲劳裂缝一旦产生必须进行有效修补,否则病害将进一步加剧。

3 加固方案研究

3.1 加固方案拟定

为解决桥面病害问题,拟定了改进型的钢-超高性能混凝土(UHPC)组合桥面。该铺装结构自下而上为:55 mm UHPC+30 mm SMA。其中UHPC层

内部布设纵横钢筋网(上层、横向采用 $\phi 12$ mm钢筋,间距50 mm;下层、纵向采用 $\phi 10$ mm钢筋,间距37.5 mm,净保护层15 mm),与桥面板之间通过间距(横 \times 纵)为150 mm \times 200 mm的 $\phi 13$ mm \times 35 mm栓钉连接。为了提高UHPC层底面在桥面裂缝区域的抗裂性能,在UHPC层底面设置横向钢板条强化。加固方案结构示意图如图6所示。

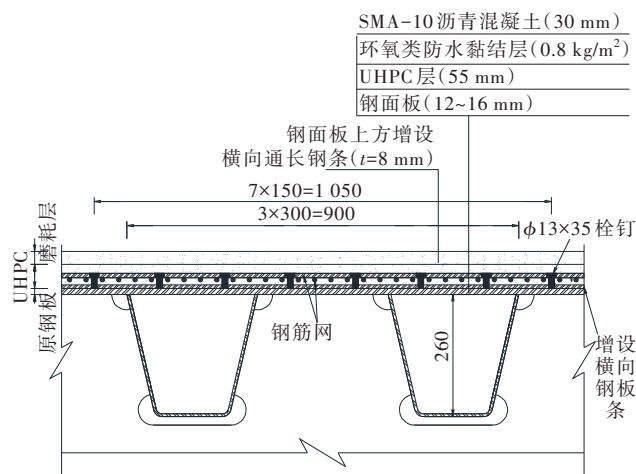


图6 加固方案结构示意图(单位:mm)

该方案主要施工工序为:交通管制、原桥面铺装层清除、钢桥面板裂缝处置、钢桥面板与钢板条焊钉焊接、粘贴钢板条、喷涂环氧富锌漆、布设钢筋网、分块浇筑厚55 mm的UHPC层、UHPC层表面抛丸、涂刷环氧类防水黏结层、UHPC层上铺设30 mm厚SMA-10沥青混凝土、交通标线恢复。

3.2 桥面板疲劳细节应力

(1) 钢桥面板疲劳细节应力

为了研究UHPC加固方案的可行性,对加固后的钢桥面进行疲劳分析,提取加固后的钢桥面疲劳应力幅并与柔性铺装比较(图7)。通过考察加劲肋间相对挠度和最小曲率半径两项桥面系局部刚度指标^[13]可知,加固方案中沥青层对改善钢桥面的应力贡献率低于0.6%,因此分析中忽略其影响。

由图7可知:UHPC加固方案对降低钢桥面板疲劳细节应力幅效果显著,尤其是顶板疲劳细节①应力降幅达86.4%。各疲劳细节应力均降至常幅极限值以下,处于较低开裂风险水平。

(2) 疲劳细节①裂缝尖端应力

进一步研究UHPC加固方案对钢桥面板已有裂纹的影响规律,分别提取不同长度裂缝的钢桥面采用UHPC加固后的裂缝尖端应力幅(图8)。

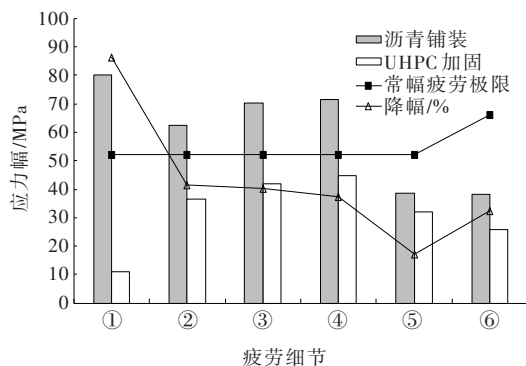


图7 加固前、后局部疲劳应力幅对比

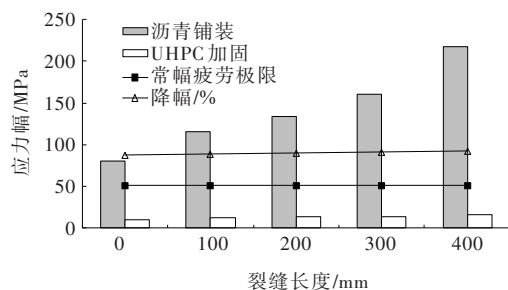


图8 加固前、后裂缝尖端应力幅对比

由图8可知:UHPC加固方案对降低钢桥面板裂缝所在区域的尖端应力幅效果显著,降幅高达92.6%,均降至其常幅疲劳极限52 MPa以下,且处于较低水平,对于已开裂的钢桥面板,裂缝不会继续扩展。因此,该方案对裂缝有很好的抑制作用。

3.3 UHPC层静载拉应力

(1) UHPC层顶拉应力

UHPC层的设计控制指标为顶面的拉应力,主要关注在静力荷载作用下,梁段负弯矩区域的顶面拉应力。通过计算可知,其受裂缝长度的影响较小。UHPC层顶面的静载拉应力横桥向最大值为3.3 MPa,纵桥向最大值为5.8 MPa,处于较低水平,开裂风险较低。

(2) UHPC层底拉应力

钢桥面板的开裂将导致局部刚度下降,在静载作用下,需要重点关注裂缝区域对应的UHPC层底是否存在开裂风险。计算结果表明,对于已经开裂的钢桥面板,UHPC层底最大拉应力受钢桥面板裂缝的影响较大。随着裂缝长度不断增长,UHPC层底横向拉应力趋于平稳,直至断开U肋间桥面板,底面最大拉应力为22.5 MPa(横桥向)。需要布置底层横向钢板条,配置后底面开裂名义应力达到43.2 MPa(模型试验获得),底面开裂风险大幅降低。

4 效果分析

2018年下半年,该桥下游侧半幅实施了上述UHPC加固方案。为了掌握加固后的实际效果,对该桥上、下游桥面进行了专项应力监测。

在该桥主跨1/4位置处,选取上、下游侧行车道及重车道下方局部区域作为测试区域,将顶板、横隔板和U肋的关键细节应力作为重点测试对象,建立钢箱梁实时监测系统,按时间段随机提取关注细节应力数据,分析上游侧(沥青铺装方案)和下游侧(UHPC加固方案)的实际运营状态。由于行车道监测数据普遍大于重车道,行车道钢桥面受力更为不利,故本文仅列出行车道监测结果(表3)。

表3 测点应力监测结果对比

典型疲劳 细节	应力(行车道)			常幅疲劳 极限/MPa
	上游侧/MPa	下游侧/MPa	降幅/%	
顶板	57.6	17.1	70.3	52
横隔板	64.8	10.7	83.5	52
U肋底	83.6	59.7	28.6	66

注:降幅是指下游侧采用UHPC加固后相较于未采用UHPC加固的上游侧,监测获得的典型疲劳细节(顶板、横隔板、U肋底)最大应力幅的变化幅度,计算公式为:(上游侧-下游侧)/上游侧 $\times 100\%$ 。

由表3可知:采用UHPC方案后,钢桥面行车道3处典型构造细节(顶板、横隔板、U肋底)的最大应力幅值均下降,降至常幅疲劳极限以下。其中顶板和横隔板降幅最为明显,降幅为70.3%~83.5%。因此UHPC加固方案对改善钢桥面板疲劳性能效果明显,可以较大程度上缓解桥面疲劳病害,延长桥梁使用寿命。

5 结论

本文通过对某一在役钢箱梁斜拉桥钢桥面疲劳病害诊治技术进行研究,得出以下结论:

(1) 通过病害调研可知,钢桥面板病害主要表现为疲劳开裂,疲劳裂缝具有数量多、长度短、开裂深、持续增长等特点。

(2) 钢桥面局部细节疲劳应力幅超标是导致疲

劳开裂的主要因素,钢桥面一旦发生开裂,裂缝尖端应力不断积累,裂缝将会持续扩展。

(3) 理论上改进型UHPC组合桥面铺装方案可使钢桥面板疲劳细节应力幅和裂缝尖端应力幅分别降低86.4%和92.6%,有效降低钢桥面开裂风险和抑制裂纹进一步扩展。

(4) 实桥加固效果表明,组合桥面铺装有效降低了疲劳应力幅,缓解了钢桥面板病害加剧,延长了桥梁使用寿命。

参考文献:

- [1] 黄卫.大跨径桥梁钢桥面铺装设计[J].土木工程学报,2007,40(9):65-77.
- [2] 王海君,陈峰,胡杰,等.钢桥面铺装脱层开裂病害冲击响应强度评价方法研究[J].公路交通科技,2020,37(11):49-55.
- [3] 谢飞,谢智荣,肖百豪.正交异性钢桥面铺装病害分析及维修对策研究[J].公路与汽运,2020(5):125-128.
- [4] 吴美艳,周尚猛.超高性能混凝土组合钢桥面承载性能试验研究[J].桥梁建设,2017,47(3):25-29.
- [5] 彭辉彬.RPC-正交异性组合桥面考虑轮载横向分布的疲劳效应分析[J].中外公路,2018,38(1):205-211.
- [6] 沈锐利,蒋雨骏,张晋瑞.现浇STC铺装体系施工方案对悬索桥成桥状态影响研究[J].中外公路,2019,39(1):73-77.
- [7] 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.
- [8] 张晋瑞,陈国平,胡建华,等.大跨径悬索桥超高性能轻型组合桥面施工控制研究[J].中外公路,2020,40(1):85-91.
- [9] 韦勇克.西江二桥钢-超高性能混凝土轻型组合梁设计研究[J].中外公路,2020,40(5):158-164.
- [10] 周尚猛,王伟.超高性能混凝土铺装体系在钢桥面中的应用[J].桥梁建设,2019,49(S1):20-25.
- [11] 中交公路规划设计院有限公司.公路钢结构桥梁设计规范:JTG D64—2015[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2015.
- [12] 中交公路规划设计院有限公司.公路桥涵设计通用规范:JTG D60—2015[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2015.
- [13] 招商局重庆交通科研设计院有限公司.公路钢桥面铺装设计与施工技术规范:JTG/T 3364-02—2019[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2019.