

DOI:10.16799/j.cnki.esdqyfh.2024.03.035

基于UHPC预制结构的BRT站台铺装层快速维修技术

王鹏^{1,2}, 王敏^{1,2}, 王康宁^{1,2}, 伍鹏飞³

(1.桥梁智能与绿色建筑全国重点实验室,湖北武汉 430034;2.中铁大桥科学研究院有限公司,湖北武汉 430034;

3.成都市城市道路桥梁监管服务中心,四川成都 610095)

摘要:为有效延长城市快速公交系统(BRT)站台铺装层的使用寿命并提升正交异性钢桥面板的抗疲劳性能,同时满足不中断交通的需求,提出了“正交异性钢桥面板+短剪力钉+预制超高性能混凝土(UHPC)板+TPO(薄层环氧抗滑铺装材料)”的复合桥面结构及装配化施工工艺。以成都二环线高架桥BRT站台为工程背景,设计了BRT站台铺装层快速维修方案,通过有限元分析确定了最优方案,并开展了BRT站台钢桥面维修改造试验段的实施。有限元分析结果表明:10 mm UHPC 灌浆料+50 mm 预制 UHPC 板+10 mm TPO 为最佳方案,维修方案的剪力钉受力性能、UHPC 抗裂性能均满足结构受力需求,且具有较大的安全储备,改造后正交异性钢桥面板常见疲劳敏感细节的疲劳性能显著提升。结合试验段实施提出了涵盖 UHPC 板预制、原铺装层处理、预制 UHPC 板安装和磨耗层与沥青接缝施工 4 个流程的城市 BRT 站台铺装层维修施工工艺,为同类型公交站台铺装层维护提供了理论和技术支撑。

关键词:桥梁工程;钢箱梁桥;超高性能混凝土;预制结构;铺装层改造;施工工艺

中图分类号: U445.7

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2024)03-0140-06

0 引言

近年来,快速公交系统(BRT)在我国应用日趋广泛。BRT 站台处公交启动、制动频繁,极易产生桥面板疲劳开裂、铺装层破损等问题^[1]。结合 BRT 公交车轮载重、公交站台处频繁启停等受力特性,以及传统铺装体系频繁、重复出现的铺装层开裂、拥包、脱层问题,可知传统铺装体系在城市桥梁钢箱梁铺装结构快速改造中不具备优势^[2]。

超高性能混凝土(UHPC)具有卓越的力学性能、耐久性能^[3]。UHPC 通过剪力钉与钢箱梁顶板协同受力,能够提高结构刚度,较大幅度地降低应力水平,从而降低钢箱梁开裂及铺装层脱层、车辙的风险。同时,UHPC 刚性铺装体系对施工环境要求不高,全寿命经济性好,磨耗层维修方便。综合考虑受力性能与施工特点,UHPC 刚性铺装体系方案有望从根本上解决 BRT 站台的病害。

近年来,国内外学者对 UHPC-钢板组合桥面体系开展了大量的研究。在疲劳性能方面,田启贤等^[4]依托军山长江大桥,通过有限元分析量化了增加面板厚度与采用钢-UHPC 组合桥面结构对正交异性

板疲劳性能的影响。Yuan 等^[5]、田启贤等^[6]、刘益铭^[7]等通过疲劳试验对 UHPC-钢组合桥面结构的疲劳性能进行了分析。裴必达等^[8]、伍智贤等^[9]、周立兵^[10]等通过实桥试验或运营期监测测试了引入 UHPC 层前后钢桥面板常见疲劳细节的应力响应,验证了 UHPC 层可明显降低疲劳细节的应力幅。在抗剪性能方面,田启贤等^[9]通过短剪力钉的推出试验提出了短剪力钉的破坏模式和设计方法。Cao 等^[11]基于短栓钉抗剪推出试验,研究了不同设计参数对短栓钉抗剪性能的影响。张瀚文等^[12]提出了适用于大跨缆索承重桥梁组合桥面的短钢筋抗剪连接件。越来越多的新建或维修工程也开始考虑采用 UHPC-钢正交异性板组合桥面结构来解决桥面板疲劳开裂和铺装层破损的问题。

BRT 是城市居民“出行大动脉”,为了保证其正常运营,维修往往选择在夜间 BRT 停运的窗口期进行,因此对维修时间要求十分严苛。传统的 UHPC-钢正交异性板组合桥面体系工艺繁琐,施工周期长,并不适用于城市 BRT 站台铺装层的维修。

针对目前城市桥梁钢箱梁铺装结构存在的铺装层易破损且屡修屡坏、钢桥面板疲劳开裂、维修时间短等情况,本文提出了一种基于预制 UHPC 板的新型钢箱梁桥面铺装结构。同时,结合成都二环线高架桥 BRT 站台开展了维修方案设计,且通过有限元分析

收稿日期:2023-10-30

作者简介:王鹏(1996—),男,硕士,工程师,从事桥梁工程技术相关工作。

确定了最优的维修方案,并基于试验段实施提出了合理完善的科学施工工艺。

1 BRT 站台铺装层快速维修方案

根据研究,本文提出“正交异性钢桥面板+短剪力钉+预制UHPC板+铺装面层”的复合桥面结构改造方案。组合桥面结构如图1所示。维修时,先刨除原有破损铺装层,然后在钢箱梁顶板上焊接剪力钉,再装配预制UHPC板,最后施工预制板间接缝和铺装面层。

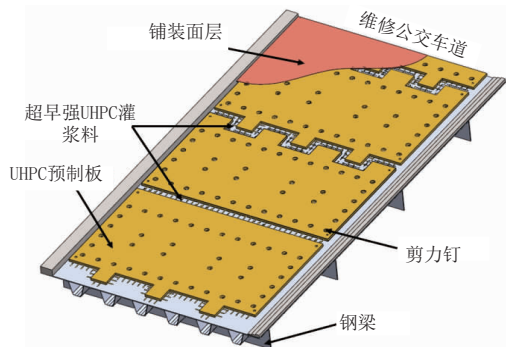


图1 基于UHPC预制板的复合桥面结构

已有的UHPC-钢正交异性板组合桥面结构工程案例采用的铺装面层多为改性沥青混凝土SMA,少量工程也采用了TPO(薄层环氧抗滑铺装材料)作为面层。TPO是由改性环氧树脂黏结料和高强度抗滑骨料结合形成的一种抗滑功能表层,已成功应用于宜昌长江公路大桥钢-UHPC组合桥面结构中,并表现出良好的抗磨损性能、层间黏结性能和抗疲劳性能。

经剪力钉孔后浇UHPC推出试验可知,现浇UHPC和预制剪力钉孔后浇UHPC两种工艺的试件破坏模式相同,均为剪力钉剪断。两种工艺的剪力钉荷载-滑移曲线基本吻合,且抗剪承载力和抗剪刚度基本一致,因此维修方案采用预制剪力钉孔后浇UHPC的工艺。

张晨曦^[13]研究了UHPC湿接缝的抗弯性能,发现当钢筋搭接长度大于10倍钢筋直径时,接缝形状和钢筋搭接形式对湿接缝承载力无显著影响,且接缝的承载力与预制梁接近。因此,本项目在保证钢筋锚固长度满足要求的前提下,采用宽度为150mm的UHPC湿接缝。

结合成都二环路高架桥BRT站台原铺装设计,提出以下3种铺装方案。方案1:10mmUHPC灌浆料+50mmUHPC预制板+10mmTPO磨损层。方案2:10mmUHPC灌浆料+40mmUHPC预制

板+20mmTPO磨损层。方案3:10mmUHPC灌浆料+30mmUHPC预制板+30mmSMA13沥青混凝土。原铺装结构和拟采用的铺装结构如图2所示,并通过有限元分析对比不同方案下剪力钉受力性能、UHPC抗裂性能和钢桥面板的抗疲劳性能,以确定最优的复合桥面结构改造方案。

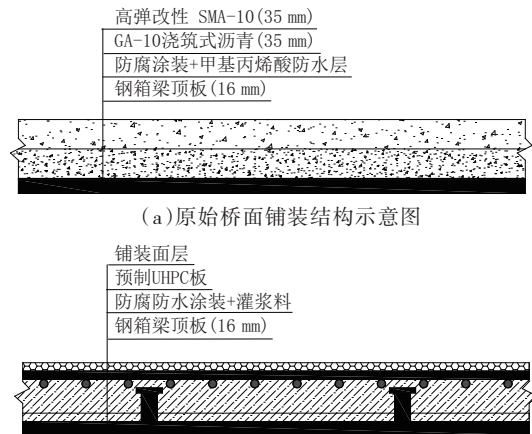


图2 桥面铺装结构对比

2 有限元分析

2.1 有限元模型

成都二环路高架桥钢箱梁标准截面如图3所示,梁高1.8m,宽12.36m。钢箱梁采用U形加劲肋,间距300mm,高280mm,U肋板厚8mm;钢箱梁顶板厚16mm;横隔板厚20mm,横隔板间距为3m。

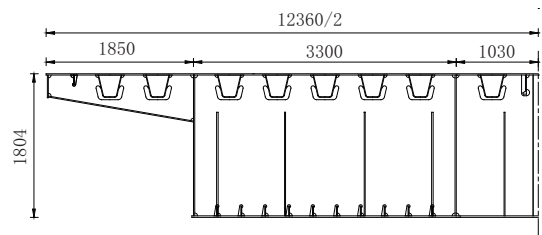


图3 1/2标准节段钢箱梁横截面(单位:mm)

选取成都二环路钢箱梁典型节段为局部分析模型(见图4),模型横向包括2个拼装节段,含12根纵肋;纵向包括2个梁节段,含3道横隔板,不考虑悬臂与底板。UHPC板仅考虑3.75m宽,计算时不考虑铺装层与钢桥面板间的黏结,仅靠剪力钉提供剪力。UHPC层考虑UHPC灌浆料的厚度。模型在边腹板处施加三向约束。为求得剪力钉的最不利受力情况,忽略UHPC层与钢桥面板间的黏结作用,剪力钉与UHPC采用嵌入式约束。

参照《城市桥梁设计规范》(CJJ 11—2011)(2019年版)^[14],选取车辆荷载中重力标准值为140kN的双轴荷载进行加载。车轮的横桥向间距为1.8m,顺

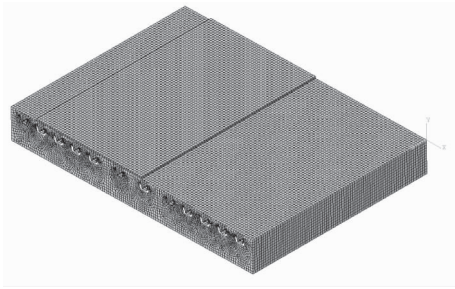


图4 钢箱梁节段有限元模型

桥向间距为 1.2 m, 车轮加载面积为 0.6 m × 0.25 m。

纵桥向分为 3 个加载工况, 如图 5 所示。工况 A: 双轴荷载对称分布在中间横隔板两侧; 工况 B: 一单轴作用在中间横隔板; 工况 C: 双轴位于两相邻横隔板中间。将双轴荷载在车道上进行横向移动加载, 加载间距取 150 mm, 以确定最不利荷载工况, 横向共 4 个工况。

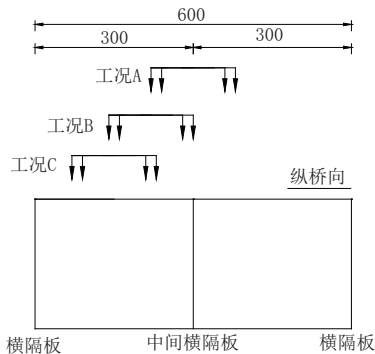


图5 轴载纵向布置工况(单位:mm)

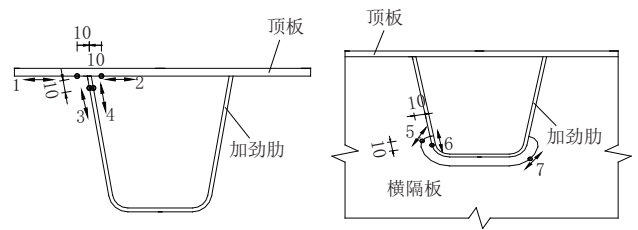
2.2 UHPC 层应力分析

通过有限元分析得到方案 1、2、3 中 UHPC 层最大拉应力分别为 3.06 MPa、4.22 MPa 和 4.66 MPa, 且均出现在中腹板顶部, 为横向应力。根据 UHPC-钢正交异性板组合桥面体系静力开裂强度影响参数试验可知^[6], 对于 50 mm 间距钢筋网、横向钢筋在上

的构造, 组合桥面 UHPC 层横向开裂强度为 12.7~13.3 MPa, 纵向开裂强度为 16.3~23.8 MPa。因此, 3 种方案中, UHPC 层均满足抗裂性能要求, 且具备较大的静力承载能力储备。

2.3 钢箱梁抗疲劳性能分析

已有研究表明^[15-17], 正交异性钢桥面板常见疲劳细节包括顶板与 U 肋连接细节、U 肋与横隔板连接细节、横隔板挖孔细节等。本文针对这些疲劳细节选取疲劳应力幅关注点, 其中 U 肋与顶板连接细节选取钢箱梁节段中间横隔板两侧节段跨中, 如图 6 中 1~4 号点所示, 分别位于 U 肋两侧顶板下缘及 U 肋腹板两侧, 与顶板和 U 肋交点距离均为 10 mm, 计算结果取正应力。U 肋与横隔板连接细节取钢箱梁节段中间横隔板位置, 如图 6 中 5 号、6 号点所示, 分别位于横隔板与 U 肋连接端部横隔板侧和 U 肋侧, 与端部距离均为 10 mm, 横隔板弧形切口应力幅关注点如图 6 中 7 号点所示, 为弧形切口处最大主拉应力点, 5~7 号关注点计算结果均取主拉应力。



(a) 加劲肋与顶板连接构造 (b) 加劲肋与横隔板连接部位

图6 疲劳应力幅计算点(单位:mm)

通过有限元分析得到四种方案各构造细节的最大应力幅, 详见表 1。表 1 中给出的 500 万次常幅疲劳极限根据《公路钢结构桥梁设计规范》(JTG D64—2015)^[18]求得。

表 1 正交异性板典型构造细节最大应力幅计算结果

构造细节位置	最大应力幅 /MPa				常幅疲劳极限 (500 万次)/MPa		
	沥青混凝土铺装	60 mm UHPC+ 10 mm TPO	50 mm UHPC+ 20 mm TPO	40 mm UHPC+ 30 mm SMA			
加劲肋与顶板连接构造	顶板下缘	外侧	29.3	18.2	18.5	19.7	66.0
		内侧	27.9	15.7	16.5	18.2	66.0
	加劲肋	外侧	27.8	13.5	13.7	15.7	66.0
		内侧	23.7	10.4	11.2	18.3	66.0
加劲肋与横隔板连接构造	横隔板侧	30.4	20.8	21.8	23.3	66.0	
	加劲肋侧	71.3	32.7	36.0	42.0	92.0	
横隔板切口边缘	50.3	41.7	45.1	46.6	92.0		

采用钢-UHPC 组合桥面体系时, 各疲劳细节最大应力幅较原沥青铺装体系均有所减小, 且均远低于 500 万次常幅疲劳极限。随着 UHPC 层厚度的增

加, 各构造细节的最大应力幅呈减小趋势。其中, 方案 1 顶板与纵肋连接细节、纵肋与横隔板连接细节、横板挖孔细节的应力幅分别减低 37.8%~56.2%、

31.5%~54.1%、17.1%。因此,采用的组合桥面体系维修方案可显著降低钢箱梁各典型疲劳细节应力幅,大幅降低其疲劳开裂风险。结合钢箱梁抗疲劳性能和抗裂性能分析,为保证改造后钢桥面的抗裂和疲劳安全储备,优先选择方案1。

2.4 剪力钉受力性能分析

以方案1为基础,设计了3种剪力钉布置形式,如图7所示。第一种形式采用剪力钉满布的设计,第二种在UHPC预制板边缘和中心设置剪力钉,第三种仅在UHPC预制板边缘设置剪力钉。经有限元分析可知,3种方案下,剪力钉最大剪力分别为9.8 kN、13.7 kN、14.8 kN。

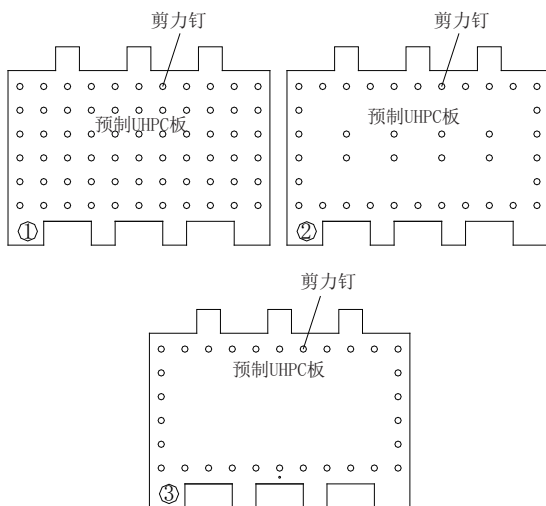


图7 剪力钉布置方案

剪力钉承载力按《钢-混凝土组合桥梁设计规范》(GB 50917—2013)^[19]进行计算,假设静力破坏模式为剪力钉剪断。该维修方案采用的19 mm直径剪力钉静力抗剪承载力和疲劳抗剪承载力见表2。有限元分析表明,最不利工况下,剪力钉最大剪力为14.8 kN,小于其静力及疲劳剪力容许值。考虑预制板装配难度和剪力钉受力性能,采用第二种剪力钉设计方案。

表2 19 mm 剪力钉静力及疲劳抗剪承载力

剪力钉直径/mm	静力抗剪承载力/kN	疲劳抗剪承载力/kN
19	87.9	17.6

2.5 维修方案

经有限元分析结果,成都二环高架桥BRT站台铺装采用“10 mm防腐防水层与灌浆料+50 mm UHPC预制板+10 mm TPO”的铺装维修方案,总铺装层厚度为70 mm,与原结构厚度保持一致。钢箱梁顶板焊接直径19 mm、长35 mm的圆柱头焊钉,布置间距为300 mm,以保证钢箱梁和铺装层的共同受力。

成都二环高架桥BRT站台铺装维修方案如图8所示。BRT车道改造试验段总面积为45.75 m²,长12.2 m,宽3.75 m。共施工5块UHPC预制板,其中A和B型预制UHPC板间采用矩形湿接缝连接,B、C、D型预制UHPC板间采用企口型湿接缝连接。预制板设纵横向钢筋网,钢筋纵横向间距均为100 mm。预制板湿接缝连接端部钢筋外伸100 mm以保证湿接缝钢筋锚固长度^[20],采用直筋搭接形式。同时相邻预制板间纵向钢筋需相互错开布置,避免钢筋打架导致定位安装问题。预制板预留剪力钉空洞,每块预制板设6个调平螺栓。

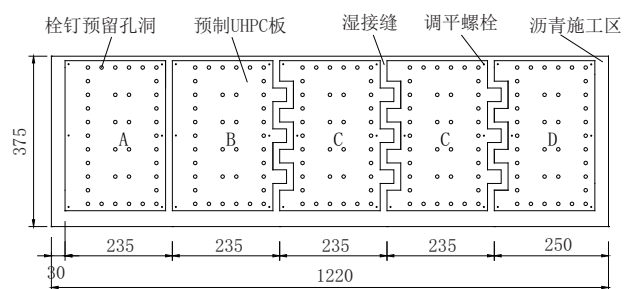


图8 成都二环高架桥铺装方案示意图(单位:mm)

3 BRT站台钢桥面维修改造试验段施工工艺

BRT站台维修时间短、维修难度高,本文选取成都市二环高架桥BRT光华村街口站BRT公交车道作为试验段。试验段现场实施主要包含UHPC预制板加工、原铺装层处理、预制UHPC板安装和磨耗层与沥青接缝施工4个流程。

3.1 UHPC板预制

UHPC预制板制作工序为底模胎架制作、脱模剂涂刷、剪力钉孔制作、钢筋绑扎、钢模板立模、接缝立模、UHPC浇筑和养护。

为避免预制UHPC板在制作和存放期间产生变形,需保证预制UHPC板底模胎架的制作精度。模板宜采用钢模,将底模胎架的高程差控制在2~3 mm,并尽量多设支承点。若预制板产生局部凹陷或凸起现象,高程差超限,可采取压重等方式微调,以确保预制板的平整度。

剪力钉孔采用在底模上预设PVC管的方式进行预留。为增加预制板与剪力钉孔内后浇UHPC的黏结强度,对预留孔内壁进行表明糙化处理,采用在PVC管外包裹草纹凿毛带的方式实现。

脱模剂宜选取性能优异的产品,以便后期能轻松脱模,避免脱模困难导致板体变形。浇筑前,应反复校核立模精度,同时保证UHPC预制板顶、底部的平整度。UHPC浇筑时,应分区域布料、抹平,便于及

时覆膜、覆盖土工布,并至少保持3 d洒水养护。

TPO薄层磨耗层预制工序为UHPC板顶面糙化处理、第一层TPO预制、第二层TPO预制。为增强TPO与预制UHPC板间黏结性能,TPO施工前需对UHPC顶部进行抛丸、凿毛等糙化处理。TPO薄层厚度为1 cm,分两层预制。将剪力钉孔临时封堵后,在UHPC板表面均匀涂刷第一层环氧黏结剂,如图9所示。养护2 h后,人工均匀撒铺单粒径玄武岩碎石(粒径为3~5 mm),直至环氧黏结剂被完全覆盖,如图10所示。养护约24 h后,清理预制板顶部未黏结的玄武岩碎石后,完成第二层TPO薄层的预制。



图9 涂刷环氧黏结剂



图10 撒铺单粒径玄武岩碎石

3.2 原铺装层处理

原铺装层处理主要包括原铺装层刨除与清理、桥面抛丸除锈与防腐涂装、剪力钉焊接3个流程。

采用粗刨和细刨结合的方式清除钢桥面原铺装层。刨除后,将钢板表面局部打磨光亮,然后利用定制焊机与焊枪设备采用电弧螺柱焊的形式按设计方案焊接剪力钉。

3.3 UHPC预制板装配

现场UHPC预制板装配主要包括预制UHPC板预定位与调平固定、预制UHPC板坐浆、预制UHPC板间湿接缝施工3个流程。

预制UHPC板正式坐浆前,应先针对预制UHPC板上剪力钉孔位与钢板剪力钉焊接位置进行预定位装配。预定位完成后,根据坐浆层厚度对预制板进行

预调平,确定每个调平螺栓的拧进量,确保预制板安装高程,为快速完成坐浆与装配做好准备。

经工艺试验可知,每块UHPC预制板吊装、对空定位和调平固定整个施工流程预计消耗15~25 min,因此需保证预制UHPC板调平固定前坐浆料未硬化,同时在3~4 h内坐浆料强度需达到30~50 MPa。根据使用需求,调配了流动性时长为90 min且在4 h内达到50 MPa的超早强UHPC坐浆料。

完成预制UHPC板的预定位和调平固定后,开始搅拌超早强UHPC坐浆料,同时将定位调平好的预制UHPC板及压重物暂时吊至附近。按设计方案铺筑坐浆料,并快速连续完成所有预制板的装配。相连的预制板就位后,应及时对边部进行同步压重。预制板坐浆后,应迅速调整固定,否则易滑动导致定位不准及脱空,且预制板接触坐浆料后不宜反复调整,否则易局部脱粘。

完成全部预制板的装配后,立即开始施工湿接缝和剪力钉孔,确保接缝和剪力钉孔内的UHPC与坐浆料不分层且能养护到位。同时保证桥面整体的平整,避免后浇UHPC污染预制板。

3.4 磨耗层与沥青接缝处理

清除剪力钉孔与湿接缝处多余的超早强UHPC冒浆料,然后依次施工TPO和沥青碎石。在纵桥向接缝处提前安设胀缝板,待沥青料铺筑后采用压路机压实。

由于BRT站台交通需求大,因此本项目借助连续3 d的夜间窗口期完成了试验段改造,保障了白天所有车道的顺利通车。第一天完成了原铺装层处理和临时保交通措施,保交通措施采用了采用“木方+橡胶垫+钢板”的组合方案。第二天完成了预制UHPC板的装配及临时保交通措施。第三天完成了磨耗层与沥青接缝的施工。试验段维修区域历经十个月运营后效果良好。

4 结论

(1)本文针对BRT公交车站铺装层易产生病害、维修时间紧的情况提出了“正交异性钢桥面板+短剪力钉+预制UHPC板+TPO磨耗层”的复合桥面结构。铺装层维修改造中可通过预制板预留剪力钉孔并后浇UHPC、预制板间采用UHPC湿接缝等措施在保证结构受力的前提下提升施工效率。

(2)开展了成都二环高架桥标准节段钢箱梁的有限元仿真分析和方案比选,确定了最优的维修方

案。确定的维修方案中剪力钉数量大幅减少,最大剪力为 13.7 kN。UHPC 层最大拉应力为 3.06 MPa,抗裂性能满足受力需求。维修后,钢箱梁各典型疲劳细节应力幅可降低 17.1%~56.2%,能有效提升钢桥面板的疲劳寿命。

(3)结合工艺试验和试验段实施提出了基于预制 UHPC 板的 BRT 公交车站铺装层维修施工工艺。UHPC 板预制时,需从模板预制和预埋件定位等工序中严格控制预制板精度,以便提升装配施工效率。改造工程中需合理安排各工序的施工时间,确保不同工序间的紧密衔接,尤其要控制好现场装配过程中的预安装和坐浆流程,同时规划好 UHPC 坐浆料的养护时间。试验段已顺利运营数十个月,其基于 UHPC 预制结构的铺装层体系设计和施工经验对后续钢桥面铺装层的维修改造具有指导和借鉴意义。

参考文献:

- [1] 王春生,冯亚成.正交异性钢桥面板的疲劳研究综述[J].钢结构,2009,24(9):10-13,32.
- [2] 李智,钱振东.典型钢桥面铺装结构的病害分类分析[J].交通运输工程与信息学报,2006(2):110-115.
- [3] 邵旭东,樊伟,黄政宇.超高性能混凝土在结构中的应用[J].土木工程学报,2021,54(1):1-13.
- [4] 田启贤,高立强,杜新喜.面板结构设计对正交异性板疲劳性能的影响研究[J].桥梁建设,2016,46(1):18-23.
- [5] YUAN Y, WU C, JIANG X. Experimental study on the fatigue behavior of the orthotropic steel deck rehabilitated by UHPC overlay[J].

Journal of Constructional Steel Research, 2019(157): 1-9.

- [6] 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.
- [7] 刘益铭,张清华,卜一之,等.大纵肋正交异性钢-免蒸养 UHPC 组合桥面板力学性能研究[J].桥梁建设,2023,53(2):36-43.
- [8] 裴必达,李立峰,邵旭东,等.钢-UHPC 轻型组合桥面板实桥试验研究[J].湖南大学学报(自然科学版),2019,46(1):76-84.
- [9] 伍贤智,姜志刚,王敏.基于静动载试验的钢-UHPC 组合桥面应用研究[J].桥梁建设,2021,51(5):67-73.
- [10] 周立兵,张刚,王敏.军山长江大桥钢-UHPC 组合桥面改造效果研究[J].桥梁建设,2020,50(2):49-54.
- [11] CAO J H, SHAO X D. Finite element analysis of headed studs embedded in thin UHPC [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2019(161): 355-368.
- [12] 张瀚文,邵旭东,曹君辉,等.具有短钢筋连接件的超薄轻型组合桥面结构抗剪性能初探[J].公路工程,2019,44(2):8-13,35.
- [13] 张晨曦.横向多梁体系桥梁 UHPC 湿接缝抗弯性能研究[D].郑州:郑州大学,2022.
- [14] CJJ 11—2011,城市桥梁设计规范[S].
- [15] 蒲黔辉,高立强,刘振标,等.基于热点应力法的正交异性钢桥面板疲劳验算[J].西南交通大学学报,2013,48(3):395-401.
- [16] 王春生,翟慕赛, Houankpo TON. 正交异性钢桥面板典型细节疲劳强度研究[J].工程力学,2020,37(8):102-111.
- [17] 张清华,李俊,郭亚文,等.正交异性钢桥面板结构体系的疲劳破坏模式和抗力评估[J].土木工程学报,2019,52(1):71-81.
- [18] JTG D64—2015,公路钢结构桥梁设计规范[S].
- [19] GB 50917—2013,钢-混凝土组合桥梁设计规范[S].
- [20] 侍刚,邵旭东,高立强,等.HRB400 钢筋与超高性能混凝土粘结性能试验研究[J].桥梁建设,2021,51(6):61-67.

(上接第 136 页)

参考文献:

- [1] 杨凡.半地下式和全地下式污水处理厂布置形式分类浅析[J].中国市政工程,2017(6):42-45,110.
- [2] 胡维杰.地理式城市污水处理厂的技术研究及其建设运行经验[J].供水技术,2014,8(4):61-64.

- [3] 刘世德,王泽明,刘茜,等.地下式污水处理厂关键节点及设计对策[J].地下空间与工程学报,2021,17(增刊1):215-220.
- [4] 邱维.广州京溪地下污水处理厂设计经验总结[J].中国给水排水,2011,27(24):47-49.
- [5] 戴红,陈艾,薛文文,等.泸州某 Phoredox_MBR 工艺地下污水处理厂工程设计方案[J].中国给水排水,2020,36(10):52-57.