

既有刚架拱桥 UHPC 薄层加固技术研究

李伟^{1,2}, 武建中^{1,2}, 李胜才^{1,2}

(1. 广东和立交通养护科技有限公司, 广东 广州, 511400;

2. 广东省交通规划设计研究院集团股份有限公司, 广东 广州, 510440)

摘要: 某刚架拱桥主要构件出现较多的受力裂缝、裂缝宽度超限、桥跨整体刚度不足等病害。通过对原桥进行验算分析, 确定刚架拱产生病害的主要原因为横向联系及整体刚度不足, 在尽量少增加结构自重情况下, 采用 UHPC 薄层加固方案, 较好地解决了刚架拱构件承载力不足、整体性差、刚度不足、后期维护困难等问题, 相较于传统加固方案有显著优势, 最后总结了 UHPC 薄层加固的主要技术要点, 为类似工程提供参考。

关键词: 刚架拱桥; 病害分析; UHPC 薄层加固; 技术要点

中图分类号: U445.7

文献标识码: A

Research on UHPC Thin Layer Strengthening Technology of Existing Rigid Frame Arch Bridge

LI Wei^{1,2}, WU Jianzhong^{1,2}, LI Shengcai^{1,2}

(1. Guangdong Heli Traffic Maintenance Technology Co., Ltd., Guangzhou 511400, Guangdong, China;

2. Guangdong Communication Planning & Design Institute Group Co., Ltd., Guangzhou 510440, Guangdong, China)

Abstract: The main components of a rigid frame arch bridge have many stressed cracks, crack width exceeding limit, bridge stiffness insufficient, pier foundation erosion and other diseases. Through disease analysis and structural checking calculation of the original bridge, the main causes of the rigidly framed arch diseases is insufficient of horizontal connections and overall stiffness. Under the condition that the structural dead weight is increased as little as possible, the thin layer reinforcement scheme of UHPC is adopted. It solves the problems such as insufficient bearing capacity, poor integrity, insufficient stiffness and difficult maintenance of rigid frame arch members. Compared with traditional reinforcement schemes, it has significant advantages. Finally, this paper summarizes the main technical points of thin layer reinforcement of UHPC, which can provide reference for similar projects.

Key words: rigid frame archbridge; disease analysis; UHPC thin layer strengthening; technical points

刚架拱桥是在我国二十世纪八九十年代出现的一种轻型拱桥, 该桥型上部构造轻巧、简单, 在满足安全的前提下, 可尽量减少结构自重^[1]。随着我国公路交通量迅速增长, 许多桥梁开始出现老化、材料性能退化、结构损伤的情况, 安全问题日益突显。刚架拱桥虽然优点众多, 但也存在结构整体性差、空间整体受力能力弱、纵向刚度小、构件承载力潜力小等明显的缺点, 加之建造时的设计荷载标准低、施工工艺落后、设备材

料落后, 以及其他影响因素的综合作用, 经过多年运营后, 刚架拱桥会产生各种结构性病害, 且病害持续发展, 严重影响桥梁使用性能, 存在较大的安全隐患。

超高性能混凝土 (UHPC) 是一种具有超高耐久性和力学性能的新型水泥基复合材料, 在材料性能方面具有极其优异的性能, 是一种具有较强竞争力的混凝土结构加固材料^[2]。对于已经运营多年、出现不同程度损伤的老旧桥梁, UHPC

收稿日期: 2024-07-29

作者简介: 李伟, 工程师, 硕士, 研究方向为桥梁设计、桥梁加固设计

薄层加固技术应运而生。通过在老旧桥梁的关键部位应用 UHPC 薄层,可以修复损伤、提高结构的承载能力和耐久性,延长老旧桥梁的使用寿命。这种技术不仅节约了大量的维修成本,还避免了因桥梁拆除重建而带来的交通不便和社会影响。目前国内对于 UHPC 在旧桥加固中的应用仍处于探索阶段^[3-5]。本文以博罗大桥加固工程为背景,分析刚架拱产生病害的主要原因,通过采用 UHPC 薄层加固方案,使拱片的抗剪和抗弯能力得到明显提高,解决主要构件开裂问题,提升桥梁整体刚度,最后总结了 UHPC 薄层加固方案的关键技术要点,希望为类似工程提供一定的参考和指导。

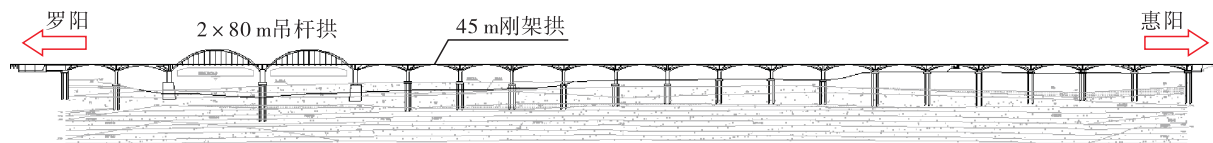


图1 桥梁立面图

空腹段次梁等构件组成裸肋,刚架拱拱片的结构组成如图2所示,刚架拱横断面如图3所示。横桥向则由横系梁将各拱片连接成整体,由肋腋板、主次梁组成桥面体系,再利用现浇混凝土桥面铺装层与裸肋构成整体组合结构。刚架拱桥结构为多次超静定体系,整体受力比较复杂。它与一般的拱桥由主拱圈受力不同,刚架拱桥的构件都有受力,且大部分为偏心受压构件,充分地利用了混凝土抗压性能好的优点。

1.3 加固历史

博罗大桥从1999年建成至今,通车运营23

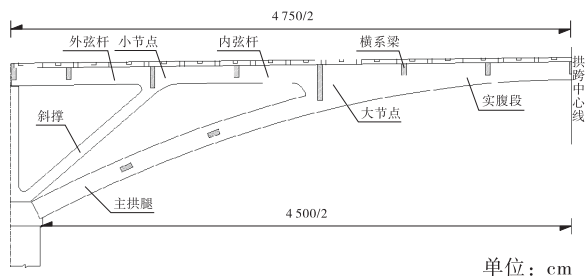


图2 刚架拱片的结构组成

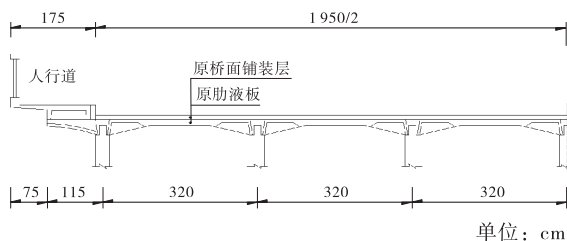


图3 刚架拱横断面图

1 桥梁概况

1.1 桥型总体

博罗大桥桥跨组合为 $16\text{ m} + 2 \times 45\text{ m} + 2 \times 80\text{ m} + 16 \times 45\text{ m}$,桥梁全长 $1\,083.26\text{ m}$,其中主跨为 80 m 吊杆拱,引桥为 45 m 刚架拱;桥梁原设计荷载标准为:汽车-20级,挂车-100级,人群荷载 3.5 kN/m^2 。该桥于1999年建成通车,桥梁布置图如图1所示。

1.2 刚架拱结构特点

博罗大桥引桥为典型刚架拱桥,上部结构自重轻,主要由主拱腿、斜撑、跨中实腹段主梁和

年,经历了多次维修加固,分别于2006年、2010年、2018年进行了专项维修加固。其中2010年全桥进行了大修,当时引桥刚架拱的病害主要有:刚架拱拱片的上弦杆存在比较密集的自顶而下的竖向裂缝,拱片上弦杆大节点、上弦杆小节点处竖向裂缝;横系梁存在竖裂、L形、U形裂缝;斜撑根部存在混凝土剥落露筋现象;3#~8#桥墩基础冲刷程度严重,部分桩基冲刷露筋;肋腋板存在开裂,部分裂缝伴有渗水、结晶等现象。当时刚架拱采用的加固方案:9#墩之前的主拱片跨中粘贴钢板加固,拱腿、斜撑外包砼加固,横系梁大小节点处采用槽钢剪刀撑加固,跨中两侧采用U形钢板加固,弦杆采用粘贴钢板抗剪加固。当时桥墩基础冲刷加固方案:3#、4#、5#过渡墩墩帽外包预应力砼加固,3#、5#墩身外包 30 cm 混凝土;4#墩身粘贴碳纤维布;6~8#墩桩基河床以上 7 m 至河床以下 0.5 m 范围外包 20 cm 厚混凝土。4#、6#、8#、11#墩采用加桩加固,新增桩基与旧承台连接为整体,并对6#、7#、8#采用抛石笼加固,3#、4#、5#墩基础采用抛片石加固。

1.4 现状病害情况

2010年的大修之后,经过十多年的运营,剩余未加固的刚架拱桥跨也相继出现不同程度病害。根据2021年的定检报告,博罗大桥全桥总体技术状况等级评定为4类桥梁,主要构件有大

的缺损,严重影响桥梁使用功能。主要病害如下:

(1) 主要构件裂缝超限:刚架拱主要受力构件均出现不同程度的受力裂缝,裂缝数量统计情况如图4所示。其中主拱肋最大裂缝宽度0.25 mm,肋腋板最大裂缝宽度2.5 mm,横系梁最大裂缝宽度0.2 mm,均超过规范允许值。刚架拱主要受力裂缝分布示意如图5所示。

(2) 整体刚度不足:为了进一步评估刚架拱现状情况,对博罗大桥第6跨、第10跨刚架拱进行了荷载试验,试验结果显示,第6跨(2010年

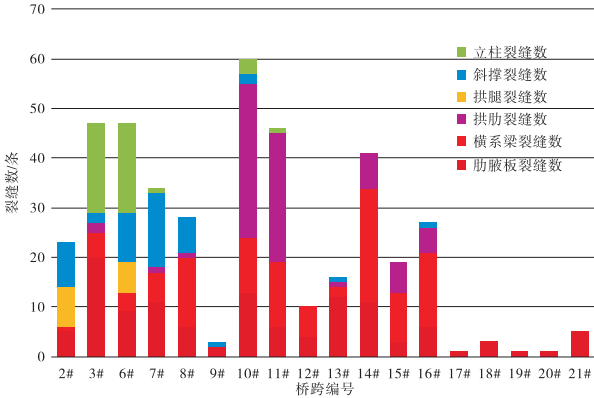


图4 刚架拱裂缝数量统计图

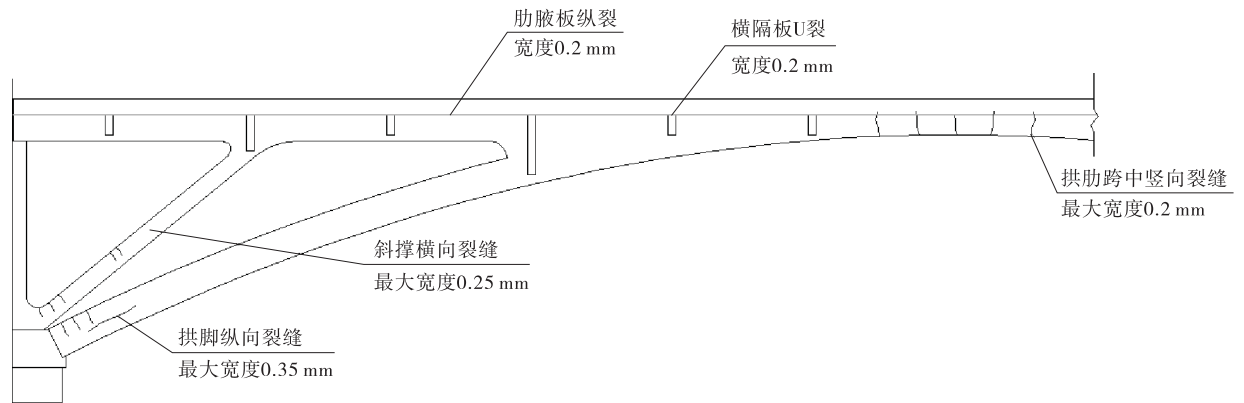


图5 刚架拱裂缝分布示意图

已加固) 受力满足原设计荷载要求,第10跨(病害较严重)整体刚度不足,跨中控制截面挠度的校验系数为1.13(规范要求 ≤ 1.0),无法满足原设计荷载要求。

2 原因分析

为了分析博罗大桥刚架拱病害的主要原因,对原桥结构进行数值模拟验算,采用Midas Civil有限元软件,根据桥梁的原设计状态进行建模分析。

2.1 原桥复算

根据竣工图纸,博罗大桥刚架拱片内弧为抛物线,桥跨共采用7片刚架拱片,拱片中距3.2 m。拱片间用肋腋板,外侧采用悬臂板,上有8 cm的现浇混凝土桥面层。据上模拟刚架拱的几何特征、材料特性及边界条件,建立全桥有限元模型,如图6所示。设计荷载:汽车-20级、挂车-100、人群3.5 kN/m²。

在原设计标准下(未考虑截面损伤折减),刚架拱的主要截面承载力可满足原设计要求,大节点主拱处截面承载力富余度为1.6%,富余较小。详见表1。

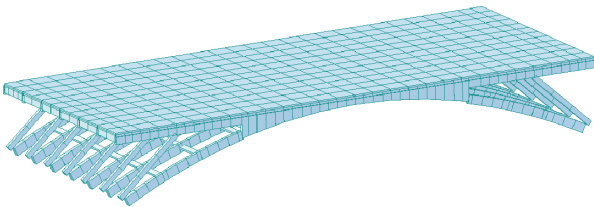


图6 刚架拱有限元模型

表1 原设计典型桥孔主要截面验算

荷载组合	验算截面	荷载效应			抗力		富余度
		轴向/ kN	剪力 z/ kN	弯矩 y/ kN·m	R/ kN		
组合 I、II、III 包络	跨中截面	197.28	123.2	514.64	227	13.1%	
	大节点-实腹段	3 139.19	136.79	-1 264.28	6 490	51.6%	
	大节点-弦杆	785.03	-205.08	-258.53	2 150	63.5%	
	小节点	844.12	83.33	-504.09	1 920	56.0%	
	小节点-弦杆	384	-260.71	-226.18	558	31.2%	
	外弦杆-跨中	-202.55	37.05	297.07	-351	42.3%	
	大节点-主拱	1 151.39	-113.12	639.81	1 170	1.6%	
	主拱拱脚	1 178.77	211.11	589.89	1 440	18.1%	
	斜撑根部	1 042.17	4.18	-112.23	1 760	40.8%	

2.2 刚架拱空间效应分析

由于刚架拱各拱片之间主要由横系梁及桥面

板提供连接作用，横向联系的强弱对刚架拱的整体刚度有直接影响，横系梁与主拱片均为现浇施工，两者连接可作为刚性连接模拟计算。而桥面板为预制肋腋板，肋腋板底面与拱片顶面通过砂浆粘结，肋腋板顶面则通过预留钢筋与拱肋榫头顶部预留钢筋及桥面铺装共同浇筑连接，主拱肋侧面及顶面设置了剪力槽口，故桥面板与主拱之间的连接作用并不能完全视为刚性连接，对于部分肋腋板出现较多裂缝的桥跨，其连接作用可能进一步减弱。

原桥验算中未考虑现状桥梁实际病害情况，各构件之间的连接均为理想的刚性连接，实际工程中节点连接是介于完全铰接和刚性连接之间^[6]，为了反映桥梁现状，本次验算考虑从横向联系对桥梁整体性影响出发，按照桥面板与拱片间的联系作用采用铰接、半刚性连接及刚性连接分别计算对比，分析桥面板连接作用对整体刚度的影响。

考虑模型中板单元与拱肋梁单元为共节点，可采用释放板单元约束来实现板桥面板与主拱之间的连接作用，具体实现方式如表2所示。

表2 节点连接方式

连接方式	模型中具体实现方式
类似铰接	80%以上的板单元释放转角约束，仅传递剪力和轴力
半刚性连接	与大小节点相交处板单元不释放约束，其余板单元释放转角约束
接近刚接	80%以上的板单元与拱肋单元共节点，不释放约束

根据刚架拱受力特性，通过有限元计算，对3种工况——类似铰接、半刚性连接、接近刚接，分别计算刚架拱各截面的内力值，计算结果如图7所示。

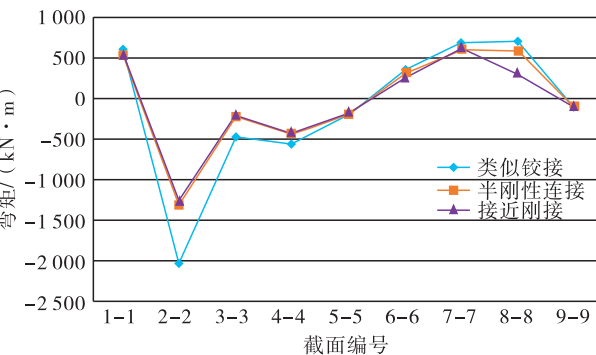


图7 荷载组合下拱肋各截面弯矩值

由以上计算结果可知，当板单元与拱肋连接

采用类似铰接模拟时，主拱跨中、大节点－弦杆、小节点－弦杆、大节点－主拱及主拱拱脚截面处弯矩明显增大，且部分截面承载力不满足要求，在类似铰接模型下，各截面弯矩值最大，相较于接近刚接模型弯矩增幅最大可达57.5%，相较于半刚性连接模型弯矩增幅最大可达50.7%。说明在类似铰接模型下，刚架拱的整体刚度最小，局部受力情况最为不利。

通过有限元软件 Midas Civil 来分析不同连接模型下桥梁自振频率的变化情况。刚架拱桥低阶自振频率及振型特征如表3所示。在连接方式由铰接过渡到刚性连接作用下，桥梁基频由小变大，说明桥梁整体刚度由铰接到刚接逐渐增大。

表3 不同连接方式下桥梁基频与振型

振型阶数	自振频率/Hz			振型特征
	类似铰接	半刚性连接	接近刚接	
1	1.19	1.50	—	正对称横弯
2	1.88	2.02	2.57	反对称横弯
3	2.40	2.64	2.86	反对称竖弯

根据检测报告所述的桥面板病害情况，部分桥跨桥面板裂缝数量较多，最大裂缝宽度为2.5 mm，部分裂缝修补后重新开裂，肋腋板与拱肋间也存在较大缝隙。对于肋腋板开裂情况严重的桥跨，计算时应考虑现状病害情况对桥梁整体刚度的影响，肋腋板开裂情况较多的桥跨可偏保守考虑采用类似铰接模型，此时，主拱承载力验算结果不满足要求，与现状病害有一定的对应关系。

2.3 原因分析

博罗大桥刚架拱主拱肋出现较多裂缝病害的主要原因：刚架拱由于常年超负荷运营下导致部分肋腋板与主拱片连接强度弱化，出现较多裂缝情况的桥跨，其连接方式可能已近似铰接，在该工况下，主拱截面承载力不满足原设计要求；对于存在少量裂缝或暂无病害的桥跨，其连接方式可视作半刚性连接，在该工况下，主拱承载力可满足原设计要求。

综合检测及计算分析结果，博罗大桥刚架拱部分受力构件承载能力不满足原设计要求，且该桥10#跨在荷载试验下，整体刚度不满足原设计荷载要求，为了保证桥梁安全及使用寿命，对其薄弱环节进行针对性的加固处理是十分必要的。

3 加固方案

3.1 加固方案比选分析

综上分析，对于受力裂缝数量较多且刚度不

足的第 10#跨采取有效加固措施, 进行加固方案比选分析。

3.1.1 桥面板加固方案

对于刚架拱桥面改造加固, 传统的加固方法一般为拆除原预制肋腋板, 对整跨桥面板进行拆除改造, 新建桥面板采用现浇方式, 与主拱片通过植筋连接, 从而加强桥梁整体连接刚度。但该方案对原结构影响较大, 需拆除重建原人行道, 且需全封闭交通施工, 施工周期长, 对于博罗大桥现状的交通影响较大。

为了尽量减少对原桥结构的影响, 针对原肋腋板普遍开裂情况, 采用 UHPC 薄层加固技术, 先凿除该跨 8 cm 厚桥面铺装层, 再对肋腋板桥面采用 UHPC 薄层加固 (6 cm 厚 UHPC 加固层 + 2 cm 超薄磨损层), 加固方案见图 8, UHPC 的超高强度使得改造后的桥面铺装可与肋腋板共同受力, 从而提高肋腋板承载力, 同时采用 UHPC 加固开裂的桥面肋腋板不仅能提升桥梁的整体结构刚度和延展性, 有效减少和延缓裂纹的发生, 还可有效提高结构耐久性、延长桥梁使用寿命。

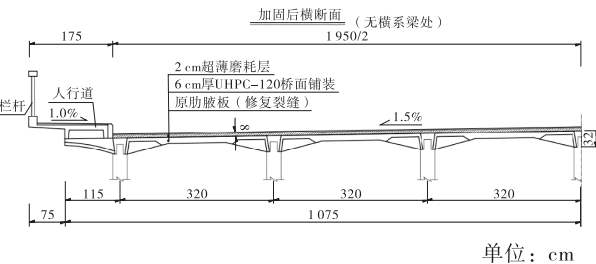


图 8 刚架拱桥面板 UHPC 薄层加固布置图

3.1.2 主拱肋加固方案

对于主拱肋出现较多受力裂缝的情况, 传统的加固方法一般有增大截面加固法、粘贴钢板加固法, 但采用普通混凝土外包加固, 加固厚度一般不小于 15 cm 厚^[7], 对于原本自重就较轻的刚架拱片, 采用普通混凝土加固势必导致结构自重增加较大; 如采用粘贴钢板加固, 虽然对构件局部补强有较明显的提升, 但后期维护费用较高, 对结构胶的耐久性要求也较高, 后期的加固效果难以保证。

为此, 考虑 UHPC 加固材料为新材料、新工艺, 与普通混凝土相比有显著的性能提升, 材料单价虽然较高, 但一般加固厚度 2.5 ~ 6 cm 即可达到较高强度^[8], 与传统的外包砼加固方案进行对比, 可减少约 40% 的自重。综合考虑, 对主拱肋采用 UHPC 薄层加固, 外包厚度 6 cm, 加固断面见图 9。

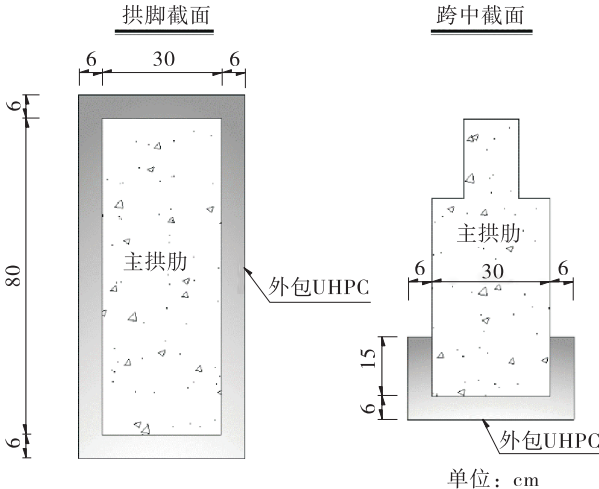


图 9 拱肋外包 UHPC 加固断面图

针对刚架拱结构特性及病害原因, 综合考虑技术可靠性、结构耐久性、后期养护方便和养护费用低廉等因素, 推荐采用 UHPC 薄层加固方案。

3.2 加固后验算分析

由于原桥面铺装层为 8 cm 厚的普通钢筋混凝土, 一般不参与结构受力, 采用 UHPC 薄层加固改造后, 可考虑 6 cm 厚的 UHPC 薄层参与桥面板受力, 加固后刚架拱主要截面受力验算结果见表 4。

表 4 桥面改造加固前后截面受力验算结果表

截面 编号	加固前荷载效应		加固后荷载效应		弯矩降幅/ %
	轴力/ kN	弯矩/ kN · m	轴力/ kN	弯矩/ kN · m	
1-1	226.0	566.6	144.5	528.7	6.7
2-2	3 272	-1 072	3 192	-1 017	5.1
3-3	823.1	-297.1	786.6	-263.1	11.5
4-4	607.1	-376.1	635.1	-364.7	3.0
5-5	127.4	-218.5	136.3	-203.3	7.0
6-6	-207.2	195.6	-202.6	177.5	9.2
7-7	1 089.9	791.7	1 063	789.7	0.3
8-8	1 222	-602.6	1 187	-576.9	4.2
9-9	892.9	-308.2	906.3	-300.5	2.5

考虑 6 cm 厚 UHPC 参与结构受力后, 刚架拱各主要节点处内力均有不同程度减小, 弯矩减少最大幅度达到 11.5%, 说明考虑 UHPC 加固后, 刚架拱整体受力情况得到改善, 桥梁整体刚度可得到有效提高。

通过 Midas Civil 建立肋腋板实体有限元模型, 对 UHPC 加固桥面板后肋腋板的局部强度进行验算分析。根据原设计荷载, 在肋腋板上施加

车轮荷载,汽车-20级轴重120 kN,按最不利位置布载,计算肋腋板底面应力。

在车轮荷载作用下,原肋腋板下缘主拉应力最大为1.66 MPa,考虑6 cm厚的UHPC薄层参与结构受力,按二次受力分析,肋腋板下缘主拉应力最大为1.21 MPa,如图10所示,验算表明UHPC薄层加固可有效增强肋腋板局部强度,改善原肋腋板应力状态。

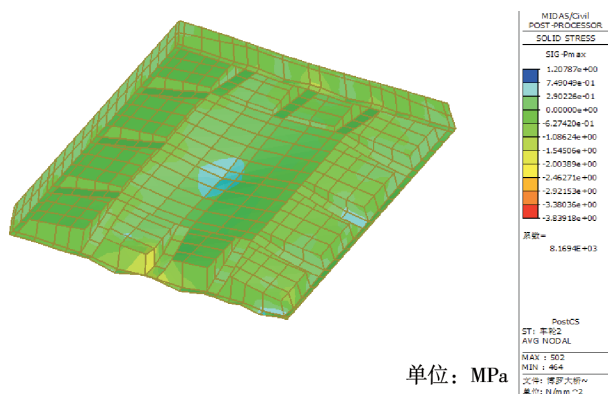


图10 加固后肋腋板主拉应力图

3.3 UHPC薄层加固技术要点

从提高刚架拱构件的承载力、刚度及耐久性方面考虑,UHPC相较于普通混凝土加固有着明显优势,但UHPC的材料性能、UHPC与原结构混凝土的界面性能以及UHPC加固层构造、浇筑方式、养护方法等因素都将直接影响加固效果,对此,总结刚架拱UHPC薄层加固的关键技术要点如下。

(1) 材料性能。UHPC的高强度和耐久性主要得益于其内部的微观结构和材料组成。通过特殊的制备工艺,UHPC的内部结构更加均匀密实,减少了孔隙和裂纹的产生。同时,UHPC中含有大量的纳米级材料和有机高分子材料,这些材料对提高混凝土的韧性和耐久性起到了关键作用,其水胶比一般不大于0.2,是一种高水化热、高收缩混凝土材料,在配制UHPC材料时,尽量选择低水化热、低收缩、高流动性的材料,塌落度扩展度不小于700 mm。胶凝材料用量应小于 900 kg/m^3 ,钢纤维体积掺量应大于2%,且不宜大于3.5%,宜选用高性能减水剂,减水剂的减水率宜大于30%。

(2) 界面处理。UHPC与原结构之间的界面黏结性能将直接影响加固效果,相较于传统普通混凝土外包加固,UHPC外包加固无需采用界面剂,仅需在原结构表面进行凿毛处理,原结构表

面应凿成凹凸差不小于6 mm的粗糙面,同时保持表面清洁。根据加固构件受力情况,还需进行植筋,对于正截面抗弯加固,一般可不进行植筋;对于抗剪加固,需适当植筋;对于抗压区加固,必须植筋,植筋间距一般为10~20 cm,外包层一般需布置直径8~12 mm的钢筋网,钢筋直径不宜过大,钢筋间距一般为6~10 cm,钢筋保护层厚度2 cm。

(3) UHPC浇筑。针对UHPC早期收缩和水化热升温大的特点,施工前应进行工艺试验,合理控制入模温度,尽量选择环境温度和湿度适宜的时机进行浇筑,并采取有效措施防止UHPC早期开裂。当UHPC浇筑长度大于20 m时,或位于截面突变处时,宜采用分段浇筑;浇注高性能混凝土应振捣密实,宜采用高频振捣器垂直点振。当混凝土较黏稠时,应加密振点分布。应特别注意二次振捣和二次振捣的时机,确保有效地消除塑性阶段产生的沉缩和表面收缩裂缝。

(4) UHPC养护。超高性能混凝土必须加强保湿养护,在浇注后,应立即用塑料薄膜严密覆盖。二次振捣和压抹表面时,可卷起覆盖物操作,然后及时覆盖,混凝土终凝后可用水养护。采用水养护时,水的温度应与混凝土的温度相适应,避免因温差过大而混凝土出现裂缝。保湿养护期不应少于14 d,保温养护期间应控制混凝土内部温度不超过 $75\text{ }^{\circ}\text{C}$;应采取措施确保混凝土内外温差不得超过 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

4 结语

从博罗大桥刚架拱桥梁加固的工程实例,对刚架拱相关病害进行研究分析,针对病害情况采用UHPC薄层加固技术方案,对加固前后的结构受力情况进行验算对比分析,得出以下结论:

(1) 博罗大桥由于常年超负荷运营下,肋腋板与主拱片连接强度逐年弱化,其连接方式可能已近似铰接,从而导致主拱肋截面内力增大,部分截面承载力不满足要求。

(2) 针对刚架拱的病害情况,采用UHPC薄层加固技术可有效提高主拱肋的截面承载力,桥面UHPC薄层加固可有效增强肋腋板局部强度及拱肋之间的联系,从而提高桥梁整体刚度和耐久性,加固效果良好。

(3) UHPC作为一种新型建筑材料,在刚架拱桥梁加固工程中应用还较少,UHPC薄层加固

(下转第79页)

信的学习环境,鼓励学生大胆尝试、勇于创新,包容学生在探索过程中遇到的困难和失误,引导学生将失败视为成长的机会和经验的积累而非学习的障碍。同时,教师要关注学生在学习过程中的情感体验,适时给予鼓励和支持,帮助学生建立学习自信和成就感。总之,在创新教学中引入心流理论,可为教师优化教学设计、改进教学方法提供新的视角和思路。教师只有全面把握心流体验的特征和影响因素,并在教学实践中灵活运用,才能更好地激发学生的创新潜能,提升教学质量和人才培养水平。

4 结语

本文采用周记法收集数据,通过文本挖掘和组态分析方法,从学生视角对创新教学课程中的心流体验进行了探索性研究,得到了一些有价值的发现。但本文仍存在以下不足:一是样本局限于某一所高职院校,研究结论的外部效度有待检验;二是主要依赖学生自我报告数据,缺乏教师视角和客观行为数据的佐证;三是研究聚焦于心流体验状态的描述和影响因素分析,对于心流体验与学生创新能力之间的关系尚未涉及。未来研究可以扩大研究样本,纳入不同类型、不同区域的院校,提高研究结论的普适性。同时,采用多元研究方法,如观察法、测验法等,从多角度收集客观数据,提高研究结论的可信性;此外,还可以综合考察心流体验与创新能力关系,构建创新教学的心流干预模型,进一步彰显心流理论对创新教学的指导价值。

参考文献:

- [1]王振海,周俊男,吴庆兴.新工科背景下应用型高校专业教育与创新创业教育的深度融合研究[J].临沂大学学报,2024,46(2):147-155.
- [2]王林毅,宋冰.新时期高职院校课堂教学模式转变的思考[J].吉林省教育学院学报(上旬),2014,30(3):70-71.
- [3]CSIKSZENTMIHALYI M. Flow-The psychology of optimal experience [M]. New York: Harper Perennial, 1990:71-90.
- [4]张媛媛.心流理论在课堂教学中的应用[J].心理学进展,2024,14(4):418-423.
- [5]宋敏,董平军.基于心流的虚拟仿真实验教学实证研究[J].教育进展,2023,13(1):159-165.
- [6]程思锐,顾兴萍,唐可心,等.大学生社会存在感与网络学习投入:心流体验的中介作用.[J]心理学进展,2024,14(1):164-172.
- [7]薛敏霞.大学生思政课获得感的内生机理及实现路径——基于心流体验理论[J].高等教育研究学报,2023,46(4):59-65.
- [8]陈芳,陈茜,徐碧晨.基于文本挖掘的管制运行风险主题分析[J].中国安全生产科学技术,2020,16(11):47-52.
- [9]李晓虹,张婷婷,王梓宁.我国高等教育数字化转型建设路径的定性比较分析[J].远程教育杂志,2024,42(1):32-40.
- [10]张茜松,雷泽,孙宁,等.如何协同资源和大数据分析能力实现双元创新?——基于资源编排理论的fsQCA分析[J/OL].科学学与科学技术管理,1-21[2024-05-09].<https://xueshu.baidu.com/usercenter/paper/show?paperid=127w0600sm5y06k0wy5j0th0h9480162>.

(上接第6页)

工艺复杂,未来还需进一步优化UHPC的制备工艺、降低成本、提高性能,同时加强其在不同环境下的耐久性研究,为我国桥梁加固工程提供更多的选择和可能性。

参考文献:

- [1]单成林.刚架拱桥病害的综合剖析及整治对策[J].中外公路,2007(1):119-121.
- [2]孙向东,马玉全,田月强.超高性能混凝土桥梁设计与施工关键技术问题探讨[J].广东公路交通,2019,45(5):25-30.
- [3]孙航行,周建庭,徐安祺,等.UHPC加固技术在桥梁工程中的研究进展[J].混凝土,2020(1):136-143.

- [4]陈磊,丁鹏,周建庭,等.基于UHPC套箍与预应力相结合的肋拱桥加固技术研究[J].混凝土,2019(12):173-176.
- [5]王宗山,周建庭,杨俊,等.UHPC在圬工拱桥加固中的应用[J].世界桥梁,2022,50(2):105-111.
- [6]徐会果.基于半刚性连接的刚架拱桥受力分析与加固研究[D].南宁:广西大学,2013.
- [7]中交第一公路勘察设计研究院有限公司.公路桥梁加固设计规范: TG/T J22—2008[S].北京:人民交通出版社,2008.
- [8]BRÜHWILER E, DENARIÉ E. Rehabilitation and strengthening of concrete structures using ultra-high performance fibre reinforced concrete [J]. Structural Engineering International, 2013, 23(4): 450-457.