

PC 斜拉桥体系刚度退化及 UHPC 加固 主梁性能提升研究

郭鑫, 颜东煌, 袁晟, 袁明

(长沙理工大学, 湖南 长沙 410114)

摘要:为了研究 PC 斜拉桥主梁受损后体系刚度退化规律及超高性能混凝土(UHPC)加固主梁后体系刚度提升性能,以一座跨径 220 m 的 PC 斜拉桥为研究背景,开展 PC 斜拉桥节段缩尺模型试验,并对破坏后主梁进行裂缝灌浆处置,对比分析原主梁与灌浆主梁结构体系在相同加载工况下的刚度退化规律;基于数值分析方法,探讨 PC 主梁损伤后处于不同刚度折损情况下,采用不同厚度 UHPC 材料加固 PC 主梁对体系刚度的提升性能。结果表明:斜拉桥体系的刚度下降较梁截面刚度下降迟缓;主梁裂缝灌浆处置后对结构体系刚度提升明显,但很难恢复至未受损之前;随着主梁受损程度的增加,原主梁及灌浆主梁 PC 斜拉桥体系刚度越来越接近。数值分析结果表明:PC 斜拉桥体系的刚度下降较梁截面刚度下降迟缓,这与试验结果相同。同时体系刚度的提升并不随 UHPC 加固层厚度的增加而线性增加,为使主梁受损破坏后的斜拉桥体系刚度恢复至未受损时,在对主梁进行灌缝封闭处置后,还需采用在受拉侧加固 2.660 cm 厚 UHPC 层。

关键词:桥梁工程;模型试验;PC 斜拉桥;UHPC;体系刚度

1 引言

预应力混凝土斜拉桥(PC 斜拉桥)是由索塔、主梁、斜拉索和桥墩组成的一种索承结构。通常,桥塔和桥墩是钢筋混凝土结构构件,主梁是 PC 结构构件,斜拉索属于柔性构件。目前,中国已建成主跨超过 200

m 的 PC 斜拉桥 80 余座,世界上排名前 10 的最大跨径 PC 斜拉桥中的 8 座位于中国。中国部分 PC 斜拉桥在服役期间,因长期遭受各类荷载、恶劣环境等众多不利因素影响,出现了不同程度的质量问题,导致桥梁承载力显著降低或使用性能严重退化。因此,对 PC 斜拉桥进行加固将是未来既有桥梁研究领域的热点及难点问题之一。

极为罕见,施工环境恶劣,安全风险巨大。施工采用步履式千斤顶成功完成 200 m 曲线半径箱梁顶推安装施工,成桥后各项指标满足设计及规范要求,为类似工程的实施积累了施工经验,具有很好的借鉴作用。

参考文献:

- [1] 邓小华. 广东虎门第二公路通道桥位选择[J]. 中外公路, 2013(4).
- [2] 谢道平,刘益平,吴明威,等. 大跨度钢桁梁顶推技术研究及应用[J]. 中外公路,2017(4).
- [3] 孙玉祥,舒大勇,杨绍斌,等. 九堡大桥步履式平移顶推与传统拖拉式施工对比分析[J]. 中国港湾建设,2012(3).

- [4] 赵秋,陈美忠,陈友杰. 中国连续钢箱梁桥发展现状调查与分析[J]. 中外公路,2015(1).
- [5] 周仁忠,谭浩明,杨炎华. 空间曲线钢混组合结构桥梁施工技术研究[J]. 中外公路,2016(4).
- [6] 李垚,董创文,彭亮,等. 三跨提篮式拱桥的顶推架设方法及其顶推受力安全论证[J]. 中外公路,2013(5).
- [7] 王天鹏,周先雁,贺国京,等. 大跨柔性钢梁顶推施工导梁结构优化及局部受力分析[J]. 公路,2016(7).
- [8] 杨柳,张清,王阳建,等. 曲线钢箱梁平转体施工悬臂状态有限元分析[J]. 中外公路,2020(5).
- [9] 叶成银,庞彪. 刚果(布)滨河大道斜拉桥主桥设计[J]. 中外公路,2019(4).

收稿日期:2020-03-12

基金项目:湖南省自然科学基金资助项目(编号:2021jj30730)

作者简介:郭鑫,男,博士研究生,高级工程师.E-mail:530220383@qq.com

目前,提高 PC 斜拉桥抗弯承载能力的方法包括增大截面加固法、粘贴钢板加固法、体外预应力加固法、粘贴纤维复合材料加固法及改变结构体系法等,但这些加固方法均存在一定的局限与缺陷。增大截面加固法施工现场搭设作业工作量大,养护时间较长,加厚部分使桥梁自重和恒载弯矩增加较多,且需要在梁底面或侧面进行加固,施工质量不可控;粘贴钢板加固法中钢板锚固问题比较突出,钢板的耐腐蚀、耐火性均较差,后期养护费用较高;预应力加固法工艺复杂,其所用预应力筋在外界环境(温度、腐蚀等)的作用下易发生断裂;粘贴纤维复合材料加固法所用的纤维材料具有很高的抗拉强度,但对结构刚度的提高不明显,且由于纤维材料的脆性性能,破坏具有一定的突然性,纤维材料与混凝土之间黏结面的耐久性和防火性能也较差;改变结构体系加固法的缺点在于加固后对负弯矩区域的处理较为复杂。

近年来,超高性能混凝土(UHPC)作为一种先进的水泥基胶凝材料,因其具有超高强度、韧性和耐久性等优良性能,已受到国内外土木工程领域的广泛关注,具有广阔的工程应用前景。超高性能混凝土由水泥、石英砂、粉煤灰、硅粉、高效减水剂和钢纤维等材料组成,其抗压和抗拉强度(分别可达 150、8 MPa)均远远高于纤维增强混凝土。研究者通过对 UHPC 进行大量的数值和试验研究表明,UHPC 具有低渗透性能,高延性、高断裂能(高达 40 kJ/m²)和高耗能能力,强耐久性。Carbonell 试验研究表明:采用 UHPC 加固混凝土结构,界面黏结性能良好,强度可达到被加固混凝土(NSC)抗拉强度的 69%~91%,若对被加固混凝土表面进行切槽,其强度可达到 107%~117%。与传统方法相比,使用 UHPC 加固或修复钢筋混凝土结构能有效提高桥梁的承载能力,该方法不仅能显著提高加固钢筋混凝土结构的承载力和耐久性,还可采用预制和装配快速施工、截面尺寸变化最小、交通中断最小。因此,国内外学者对 UHPC 进行桥梁加固和维修做了大量试验,如 Muhammad Safdar、Lampropoulos A P 等将钢筋混凝土梁顶部和底部部分混凝土替换成 UHPFRC 材料,能有效增强 NC 梁的抗弯承载力;M. A. Al-Osta 等研究采用 UHPC 对 NC 梁的加固效果,证明采用 U 形套箍加固在梁底浇筑 UHPC 薄层对 NC 梁的承载力提高较多;邓宗才等采用配钢筋的 UHPC 薄层浇筑于 NC 梁底部对其抗弯承载力明显提升,并降低跨中挠度;徐世烺等采用掺聚合物纤维的素 UHPC 在桥梁底部加固素混凝土梁,发现其 UHPC

层不仅能大幅提高复合梁的抗弯承载力,还对被加固混凝土梁中裂缝的开展有抑制作用,有效提高了复合梁的延性。

目前,PC 斜拉桥开裂后非线性性能研究是桥梁工程界关注的热点之一,该文以一座主跨 220 m 的 PC 斜拉桥为背景,设计制作局部缩尺试验模型梁,旨在研究主梁开裂后 PC 斜拉桥的体系刚度退化特点及规律;当主梁加载破坏后对梁体裂缝进行灌缝处置,再施加与原试验工况一致的荷载进行加载,研究梁体破坏后仅灌缝处置 PC 斜拉桥模型体系刚度提升程度及体系刚度退化规律。基于原主梁及灌缝主梁试验,研究在不同裂缝状态下体系刚度变化情况,基于有限元分析,探讨主梁开裂后,在主梁不同刚度折损情况下,采用不同厚度 UHPC 材料加固 PC 主梁对体系刚度的提升性能,并计算将主梁受损斜拉桥体系刚度恢复至原主梁未损伤状态的最小 UHPC 层厚度。

2 PC 斜拉桥模型试验

2.1 原模型梁试验介绍

原缩尺斜拉桥模型试验梁是以某主跨为 220 m 的 PC 斜拉桥为原型桥,选取单侧塔跨中附近 5 根索及对应的 5 个节段,根据相似理论按相似比为 1:7.4 制作的。设计试验梁全长 7 196 mm,计算跨径 6 736 mm,主梁截面为 T 形截面,梁高 420 mm,腹板厚度 195 mm;主梁选用 C50 细骨料混凝土;模型试验梁上、下部纵向预应力直束均采用 2 $\phi^{15.24}$ mm 钢绞线,极限抗拉强度为 1 860 MPa,张拉控制应力为 1 395 MPa;普通纵向钢筋及箍筋均采用 HRB335 钢筋,配筋率与原桥截面配筋率保持一致;斜拉索采用单根 $\phi^{15.24}$ mm 钢绞线等效替代,具体张拉力根据理论计算所得进行控制,主梁内预埋斜向螺杆与斜拉索连接。具体模型断面尺寸及配筋如图 1 所示。

对模型梁进行破坏加载过程中,在集中力和均布荷载作用下,首先在集中力附近开裂,随着活载倍数的增加,裂缝不断扩展,主梁不断损伤,钢筋屈服,当荷载达到 18 倍活载时,试验梁 $L/4\sim 3L/4$ 范围内满布裂缝,最大裂缝宽度达 3.4 mm,此时主梁顶板混凝土压碎,主梁破坏。

2.2 主梁裂缝封闭试验介绍

原试验梁加载破坏后,大部分裂缝宽度超过 0.2 mm,集中力作用处顶板混凝土压碎,为提升主梁及斜拉桥体系刚度,采用优质 A 级改性环氧灌封胶对主梁

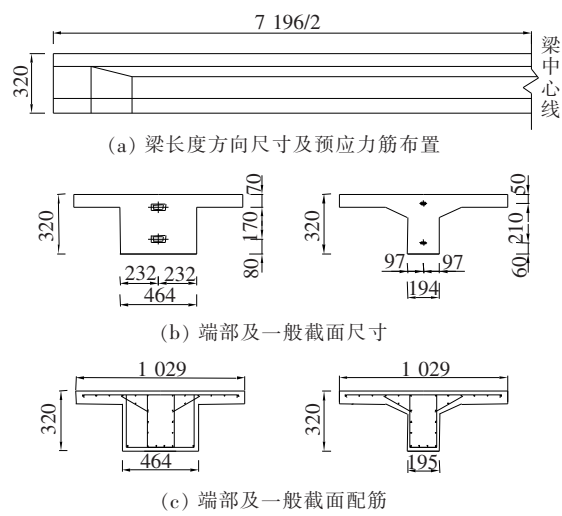


图1 预应力混凝土模型梁尺寸及配筋(单位:mm)

所有宽度大于 0.1 mm 的裂缝进行灌缝封闭。清理原试验梁顶板破碎及松散混凝土,并浇筑 UHPC 层以便于安装加载装置。为对比分析灌浆主梁体系刚度较原主梁试验模型提升程度,裂缝灌浆主梁试验的测点布置及加载工况与原主梁加载试验保持一致。

2.3 测点布置及加载工况

分别在斜拉索正下方及两端支座中心线处布置位移计进行主梁挠度测量,位移计布置如图 2 所示。斜拉索成桥索力控制及试验过程中索力变化采用在斜拉索塔端安装振弦式锚索计方式进行监测。

原实桥设计汽车荷载等级为公路—I级,根据 JTG B01—2014《公路工程技术标准》,其车道荷载为均布线荷载 10.5 kN/m 和集中荷载 360 kN,设计车道数为单向五车道,跨径为 220 m,考虑横向折减系数、纵向折减系数及横向分布系数后,最终得到汽车荷载计算系数为 3.312,试验模型相似比为 7.422 7,且模型梁在横向取实桥截面的 1/2,因此可得试验梁等效车道荷载。

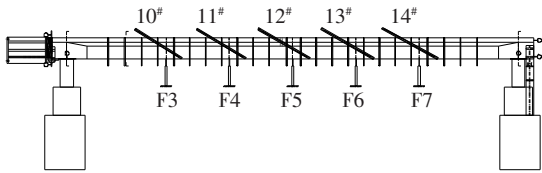


图2 测点布置图

等效后模型梁一倍均布线荷载为:
 $10.5 \times 3.312 \div 7.422\ 7 \div 2 = 2.342\ 5\ \text{kN/m}$
等效后模型梁一倍集中力为:
 $360 \times 3.312 \div 7.422\ 7 \div 2 = 80.32\ \text{kN}$
试验采用等效车道荷载,原主梁试验加载过程中

工况 1、2 以计算活载倍数控制,工况 3~7 则以裂缝宽度控制;灌缝主梁试验加载过程中控制荷载,工况 1、2 与原主梁相同,而工况 3~7 则以原主梁各工况裂缝宽度对应的所需活载倍数进行控制,具体见表 1。

表1 原主梁加载工况

工况	项目	活载/倍	试验特征
1	预加载	1.50	仪器调试
2	承载能力	2.50	未开裂
3	0.1 mm 裂缝	5.25	预应力结构裂缝限宽
4	0.2 mm 裂缝	7.78	混凝土结构裂缝限宽
5	0.3 mm 裂缝	9.92	较大的裂缝宽度
6	0.5 mm 裂缝	11.57	受拉钢筋接近屈服
7	主梁破坏	18.00	钢筋屈服,顶板混凝土开裂

注:每一工况重复加载 3 次,加、卸载采用分级加载。其中,工况 3 为 5.25 倍活载,是由原主梁模型首次加载至 0.1 mm 缝宽的活载倍数确定,工况 4、5、6 活载倍数同理。

模型试验梁均布线荷载采用杠杆—挂篮加载装置进行施加,即主梁浇筑时预埋 24 对竖向螺杆,挂篮荷载采用杠杆放大并通过竖向螺杆传递到试验梁,以节点力等效活载均布线荷载。集中力荷载采用分配梁—集中力加载装置进行施加,即用 2 根 $\phi 25\ \text{mm}$ 的螺纹钢筋穿过主梁预留孔洞,并与主梁上下 2 根分配梁连接,再将 1 根 $\phi 48\ \text{mm}$ 螺纹钢筋一端锚固在梁底分配梁,另一端穿过试验室地面反力墙孔洞进入地下室锚固,通过千斤顶反顶加载。模型总装如图 3 所示。



图3 试验模型总装图

2.4 试验结果分析

为研究原主梁在破坏荷载作用下全过程刚度下降情况,选取 12# 索正下方的 F5 号位移计作为控制截面位移,工况 7 破坏荷载作用下主梁的位移与活载倍数的关系曲线及对相应区间进行拟合结果如图 4 所示。

由图 4 可知:主梁裂纹张开荷载(2.5 倍汽车荷载)小于初裂加载的开裂荷载(4.4 倍汽车荷载),在裂

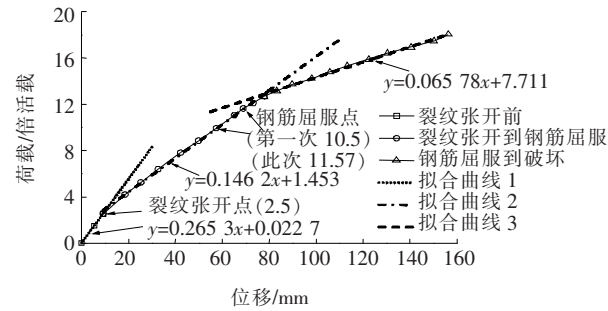


图 4 工况 7 作用下刚度曲线拟合

纹张开前接近弹性工作状态;裂纹张开后,刚度迅速减小,钢筋屈服后,刚度进一步降低,但仍能继续承受部分荷载和变形。主梁在裂纹张开前和张开后,体系刚度大概下降了 45%,钢筋屈服后对应的拟合区间为 12.64~18 倍活载,该阶段主梁受压区混凝土基本屈服,混凝土屈服主梁截面刚度几乎降为 0,而其体系刚度下降了 75%。可以发现:斜拉桥体系的刚度下降比较迟缓,梁截面刚度下降比较快,即使主梁丧失了承载能力,斜拉桥体系仍具有一定的承载能力。

为研究原主梁及灌浆主梁在不同工况下的结构体系刚度变化情况,同样选取 12# 索正下方的 F5 号位移计作为控制截面位移。因各工况 3 次加载的重复性好,文中仅示出原主梁和灌浆主梁第 3 次加载结果。原主梁和灌浆主梁各工况刚度拟合曲线见图 5、6。

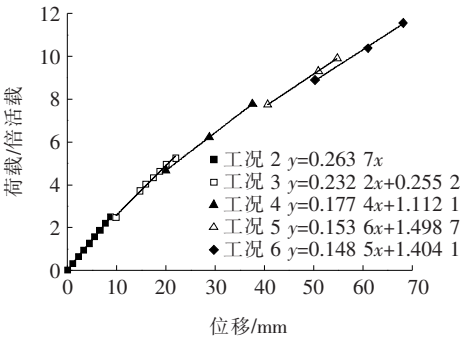


图 5 原主梁各工况刚度曲线拟合

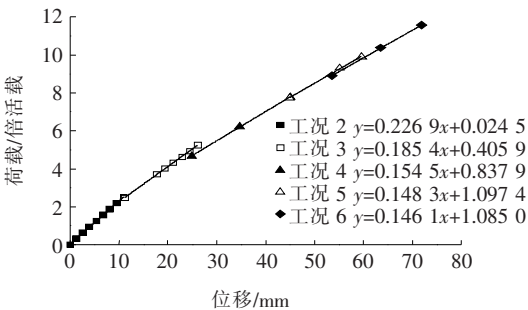


图 6 灌浆主梁各工况刚度曲线拟合

根据图 5、6,以原主梁工况 2 作用下刚度为基准,将原主梁及灌浆主梁各工况下刚度折减情况列于表 2。

表 2 各工况试验模型体系刚度变化比

工况	刚度变化比	
	原主梁	灌浆主梁
2	1.000	0.860
3	0.881	0.703
4	0.673	0.586
5	0.582	0.562
6	0.563	0.554

由图 5、6 及表 2 可知:原主梁工况 6(受拉钢筋屈服)加载时体系刚度为未受损时的 0.56。由图 4 可知:工况 7(钢筋屈服,顶板混凝土开裂)加载时体系刚度仅为未受损时的 0.25,而在裂缝灌浆处理后,体系刚度达到 0.86,能显著提升 PC 斜拉桥破坏主梁的刚度,但仅做裂缝灌浆处置很难将破坏主梁的刚度恢复到受损之前;随着主梁受损程度的增加,原主梁及灌浆主梁 PC 斜拉桥试验模型体系刚度越来越接近,在工况 6 作用下,原主梁模型与灌浆主梁模型体系刚度几乎相同。

试验结果表明,即使工况 6 满载时,整个试验模型的承载能力仍有较大富余,当 PC 斜拉桥主梁受损严重时,对其进行加固处理能显著提高其体系刚度及承载能力,而仅进行灌缝封闭处置很难将破坏主梁的刚度恢复到受损之前,因此采用合理的加固方法及加固材料进行加固处置后提高其承载能力及耐久性显得尤为重要。

3 UHPC 加固方案探讨

UHPC 加固钢筋混凝土梁或板自 2007 年首次提出后,国内外学者就超高性能混凝土加固钢筋混凝土受弯构件做了大量研究,图 7 为 4 种加固配置。

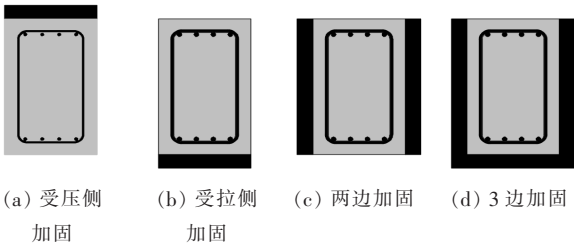


图 7 4 种不同的 UHPC 加固配置方式

由图7可知:使用双面配置的主要原因是提供抗剪加固,且这种结构的抗弯加固效率应低于3面结构。

为研究UHPC加固PC斜拉桥主梁体系刚度提升性能,根据试验研究结果,对受损PC斜拉桥主梁进行灌缝封闭。为确保主梁受压区混凝土不会过早被压碎而破坏,在主梁顶板集中力加载附近1 m范围内加固2 cm厚UHPC;在主梁受拉区域采用受拉侧加固配置。为研究主梁在不同损伤程度下采用不同厚度UHPC层加固受拉侧对PC斜拉桥体系刚度提升效果,通过改变主梁刚度近似模拟主梁不同的损伤程度,研究主梁刚度退化对体系刚度的影响;随后在此基础上采用不同UHPC厚度对受损主梁进行加固,研究不同厚度UHPC对PC斜拉桥体系刚度的影响程度,并探讨主梁开裂后,在主梁不同刚度折损情况下,采用不同厚度UHPC材料加固PC主梁对体系刚度的提升性能,确定将主梁受损斜拉桥体系刚度恢复至原主梁未损伤状态的最小UHPC层厚度。

4 有限元模型

有限元模型尺寸与试验模型相同。原主梁材料为C50混凝土,受拉区纵向钢筋和其他普通钢筋分别采用直径为10 mm和8 mm的HRB345钢筋;预应力筋采用屈服强度为1 860 MPa、直径为15.2 mm(1×7)的钢绞线;斜拉索采用直径为15.2 mm(1×7)的预应力钢绞线,屈服强度为1 860 MPa。

在Abaqus有限元软件中,主梁采用C3D8R单元模拟,支座采用弹簧单元模拟,弹簧刚度值由试验所得,普通钢筋以及预应力钢绞线采用T3D2单元模拟,并采用“embedded”处理进行自由度耦合,模拟混凝土和钢筋骨架之间的相互作用。为避免发生应力集中现象,在拉索和主梁之间设置了钢垫块。预应力筋和斜拉索都采用降温法施加初拉力,活载集中力通过试验梁顶板刚性垫块施加,活载均布荷载则在梁底通过“压强”荷载实现。各材料参数取值如表3所示。

表3 材料参数			
材料	弹性模量/GPa	材料	弹性模量/GPa
C50	34.5	钢绞线	195.0
UHPC	40.7	普通钢筋	200.0

5 计算结果分析

分别将主梁刚度下降为未受损主梁的90%~

10%,在此基础上,采用不同UHPC层厚度加固主梁受拉侧,探讨主梁在不同刚度折损情况下,采用不同厚度UHPC材料加固PC主梁对体系刚度的提升程度,并计算将主梁受损斜拉桥体系刚度恢复至原主梁未损伤状态的最小UHPC层厚度。选取12#索正下方截面位移作为控制截面位移,同时以未受损主梁体系刚度为基准,未加固主梁及加固主梁后体系刚度变化情况如表4、图8所示。

表4 刚度比随主梁刚度退化及UHPC加固层厚度变化情况

主梁刚度退化/%	不同UHPC层厚度(cm)时刚度比					
	未加固主梁	1	2	3	4	5
100	1.000	1.042	1.082	1.120	1.156	1.191
90	0.962	1.007	1.050	1.091	1.129	1.166
80	0.921	0.970	1.016	1.059	1.100	1.138
70	0.876	0.929	0.978	1.024	1.067	1.108
60	0.827	0.884	0.936	0.985	1.031	1.074
50	0.771	0.834	0.890	0.942	0.990	1.035
40	0.710	0.777	0.838	0.892	0.942	0.988
30	0.641	0.713	0.777	0.833	0.884	0.931
20	0.561	0.638	0.702	0.758	0.808	0.853
10	0.465	0.541	0.599	0.646	0.687	0.723

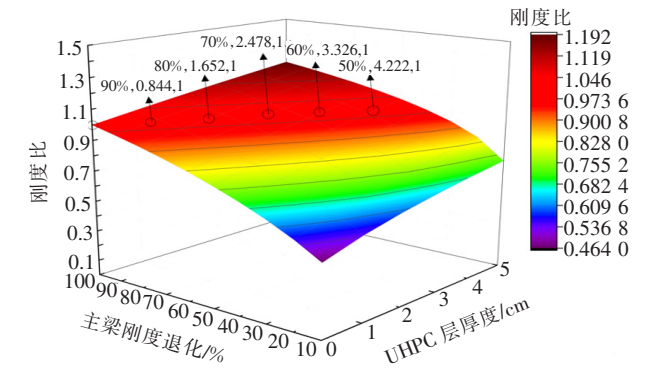


图8 刚度比随主梁刚度退化及UHPC加固层厚度变化情况

由表4、图8可知,PC斜拉桥体系的刚度下降较梁截面刚度下降迟缓,这与试验结果相同,体系刚度下降并不随主梁刚度下降线性变化;当主梁受损越严重,UHPC加固层对斜拉桥体系刚度提升越大,同时体系刚度的提升并不随UHPC加固层厚度的增加而线性变化;当主梁刚度退化为原主梁的90%、80%、70%、60%、50%时,为使斜拉桥体系刚度恢复至未受损时,需要最小的UHPC层厚度分别为0.844、1.652、

2.478、3.326、4.222 cm,根据试验结果,主梁灌缝封闭后,体系刚度约为未受损主梁体系刚度的 0.86,根据表 4 可知,为使主梁受损后的斜拉桥体系刚度恢复至未受损时,在对主梁进行灌缝封闭处置后,还需采用在受拉侧加固 2.660 cm 厚 UHPC 层。

6 结 论

通过对原主梁及灌缝主梁进行两侧试验研究,并采用 UHPC 加固主梁受拉侧进行数值模拟计算分析,得到以下结论:

(1) 斜拉桥体系为超静定结构,体系整体刚度在荷载作用下下降比较迟缓,梁截面局部刚度下降比较快。当主梁受拉区混凝土开裂区域丧失了承载能力,斜拉桥体系仍具有较强的承载能力。

(2) 主梁裂缝灌浆处置后对结构体系刚度提升明显,但很难恢复至受损之前;随着主梁受损程度的增加,原主梁及灌浆主梁 PC 斜拉桥体系刚度越来越接近,在工况 6 作用下,原主梁模型与灌浆主梁模型体系刚度几乎相同。

(3) 数值分析结果表明:PC 斜拉桥体系的刚度下降较梁截面刚度下降迟缓,这与试验结果相同,体系刚度的提升并不随 UHPC 加固层厚度的增加而线性增加,为使主梁受损破坏后的斜拉桥体系刚度恢复至未受损时,在对主梁进行灌缝封闭处置后,还需采用在受拉侧加固 2.660 cm 厚 UHPC 层。

参考文献:

- [1] Hongjiang LI, Xuebin JIA, Hanwan JIANG. Advances in Strengthening Existing Prestressed Concrete Cable - Stayed Bridges[C]. 14th COTA International Conference of Transportation Professionals, 2014.
- [2] JTG/T J22-2008 公路桥梁加固设计规范[S].
- [3] 李殿平. 混凝土结构加固设计与施工[M]. 天津:天津大学出版社, 2012.
- [4] 管品武, 涂雅笋, 张普, 等. 超高性能混凝土单轴拉压本构关系研究[J]. 复合材料学报, 2019(5).
- [5] 刘娟红, 宋少民. 活性粉末混凝土——配制、性能及微结

构[M]. 北京:化学工业出版社, 2013.

- [6] Brühwiler E, Denarié E, Habel K. Ultra-High Performance Reinforced Concrete for Advanced Rehabilitation of Bridges, 2005:951-956.
- [7] Carbonell, M. A., et al. Bond Strength between UHPC and Normal Strength Concrete (NSC) in Accordance with Split Prism and Freeze-Thaw Cycling Tests[C]. ProUHPC, 2012:377-384.
- [8] SAFDAR M, MATSUMOTO T, KAKUMA K. Flexural Behavior of Reinforced Concrete Beams Repaired with Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete (UHPFRC)[J]. Composite Structures, 2016(157):448-460.
- [9] LAMPROPOULOS A P. Strengthening of Reinforced Concrete Beams Using Ultra High Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPFRC) [J]. Engineering Structures, 2016(106):370-384.
- [10] AL-OSTA M A, ISA M N, BALUCH M H, et al. Flexural Behavior of Reinforced Concrete Beams Strengthened with Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete[J]. Construction and Building Materials, 2017(134):279-296.
- [11] 邓宗才, 张茂晨. 混杂纤维增强 RPC 加固混凝土梁抗弯性能[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2015(9).
- [12] 徐世烺, 王楠, 李庆华. 超高韧性水泥基复合材料增强普通混凝土复合梁弯曲性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2010(5).
- [13] Brühwiler, Eugen, Denarié, Emmanuel. Rehabilitation and Strengthening of Concrete Structures Using Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete [J]. Structural Engineering International, 2013, 23(4):450-457.
- [14] Zhu Y, Zhang Y, Hussein H H, et al. Flexural Strengthening of Reinforced Concrete Beams or Slabs Using Ultra-High Performance Concrete (UHPC): A State of the Art Review[J]. Engineering Structures, 2020, 205:1-19.
- [15] Al-Osta MA, Isa MN, Baluch MH, et al. Flexural Behavior of Reinforced Concrete Beams Strengthened with Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete. Constr Build Mater, 2017, 134:279-296.