

超高性能混凝土 (UHPC) 在桥墩的应用综述

温 帅 易仙竹 曾海斌 颜意波 张云翔

中国建筑第五工程局, 广东 深圳 518100

摘要: 超高性能混凝土 (UHPC) 作为一种性能优异的新型建筑材料, 其应用价值越来越受到土木行业的关注。近年来, 在役桥梁出现了不同程度的损伤, 损伤部位尤以桥墩损伤最为严重, UHPC 作为一种优质材料, 为加固桥墩提供了一条创新途径。本文重点总结了 UHPC 在桥梁桥墩部位的应用现状, 分析其技术可行性和经济性, 并以龙岗河四号桥为例, 验证了 UHPC 应用的可行性。

关键词: 超高性能混凝土; 桥墩; 技术可行性; 经济性

0 引言

目前国内造桥技术虽日臻成熟, 但是桥梁薄弱位置存在的结构安全隐患并未得到有效根治, 其大大制约了桥梁的服役寿命。伸缩缝^{[1][2]}、桥面铺装层^{[3][4]}和桥墩^{[5][6]}作为桥梁的重要组成部分, 长年累月经受着车辆冲击荷载、冻融循环、氯离子腐蚀等多重组合荷载的作用, 其结构的耐久性成为影响桥梁使用寿命的重要因素。传统材料在耐久性、耐腐蚀性、变形能力等性能方面存在着明显的不适性, 难以满足桥梁长寿命、少维护的目的。

UHPC 因其在强度、韧性、耐久性等方面表现卓越, 为增强桥梁薄弱位置的结构安全性开创了一条高效途径。UHPC 基于最大密实度原理, 在混凝土中掺杂可抑制裂缝扩展的钢纤维, 大幅度提高混凝土的各种力学性能, 呈现

出高强度、高韧性、高耐久性的“三高”优良性能。本文对国内外研究成果进行整理分析, 总结了 UHPC 在桥梁桥墩部位应用的关键技术路径以及 UHPC 应用技术的可行性、经济性以及工程可操作性, 为推动 UHPC 补强桥梁关键受损部位的应用前景添砖加瓦。

1 UHPC 在桥梁桥墩中的应用

桥墩作为传递荷载的重要部位, 在役期间经受船舶冲击荷载、温度效应、海水、河水腐蚀等多重组合荷载作用, 传统材料在上述荷载的作用下易出现负弯矩区开裂、耐久性差等诸多工程病害, 严重影响了桥梁的使用寿命, 增加了后期维护成本。UHPC 作为一种新型材料, 其力学性能已远超传统材料, 其力学性能见表 1^{[7][8]}。故大量学者将工作研究重点锁定到 UHPC 加固受损桥墩的研究中。

表1 UHPC和普通混凝土力学性能对比表

类别	项目	普通混凝土	UHPC
力学性能指标	抗压强度 /MPa	30~60	150~230
	抗折强度 /MPa	2~5	25~60
	弹性模量 /GPa	30~40	40~60
耐久性指标	氯离子扩散系数 / (m ² /s)	>1 × 10 ⁻¹¹	<0.01 × 10 ⁻¹¹
	徐变系数	1.4~2.5	0.2~0.3
	电阻率 / (kΩ·cm)	96 (C80)	1133
	91d 碳化深度 /mm	15	1

杨东洋等^[3]将先简支后连续小箱梁桥作为研究重点, 试验发现, UHPC-NC 组合结构柱在负弯矩区域的裂缝扩展速度明显减缓, 且抗裂性能与 UHPC 厚度呈正相关关系, 大大提高了桥墩的耐久性。并通过有限元模型验证了试验结论, 为后续的设计者提供了有力支持。邵旭东等^[4]将工作重点投入到钢-UHPC 组合梁, 试验结果研究表明: 钢-UHPC 企口界面

抗裂性能强, 适当加密配筋可进一步增强试件延性和抗弯承载力, 而 UHPC 中的钢纤维可抑制混凝土开裂, 提高梁体刚度和延性。有限元模拟与试验值吻合, 为接缝构造设计提供理论依据。

基于上述学者在试验和有限元领域取得的重大成就, 弥补了 UHPC 在国内应用的空白, 为后来设计者的创作提供了扎实的理论基础。

在国内，如湖南益阳金岭路高架桥、云南武倘寻高速公河天生特大桥，都展示了其卓越的力学和加固效果。随着UHPC应用理论和实践的深入研究以及对桥梁性能的高标准要求，UHPC的优越性会被越来越多的学者关注到，会推动UHPC迈向一个更广阔的应用舞台。

总之，UHPC在墩顶负弯矩区的应用，无论是钢-UHPC组合梁还是UHPC-NC组合，都优势显著、前景良好，有望在我国桥梁工程中发挥更大作用，保障桥梁结构的安全性、耐久性和经济性。

2 UHPC在墩顶负弯矩区的应用分析

2.1 技术可行性分析

UHPC可明显提高桥墩负弯矩区的抗拉能力，减少了受拉区容易出现裂缝、混凝土脱落等问题的出现。其超高抗拉强度和韧性可大大抑制裂缝产生，提高结构承载能力与延性；其高密实度和低孔隙率极大提高了桥墩的耐久性，能提高抵御氯离子腐蚀的能力，延长桥梁寿命；快速硬化特性缩短施工周期，高耐久性降低维护成本，是提高桥梁性能与耐久性的理想材料。邵旭东^[23]等以普通混凝土先简支后连续预制T梁为背景，采用UHPC新型湿接缝设计方案进行计算与配筋设计。结果显示，UHPC应用优势明显，新型湿接缝简化施工工艺，提高抗裂与承载能力，限制裂缝宽度，提高截面刚度，改善内力及挠度重分布。总之，UHPC在墩顶负弯矩区应用具有理想可行性。

2.2 经济性分析

UHPC材料成本较高，基于以下因素^[9]：

①原材料组成复杂，主材价格昂贵，钢纤维成本占比超总材料成本50%，硅灰、高效减水剂

等价格也偏高，目前材料成本约3500-5000元/m³，市售价格8000-10000元/m³。②运输方式及成本影响大，一般以预混半成品陆路运输，短途和市内物流成本50-100元/t，递增成本在150-300元/m³，运输距离阈值为300km。③施工工艺复杂，拌制需专业设备和人员，相应增加了人工和设备租赁成本。

不过，从长远来看，UHPC的作用随桥梁的使用年限呈正相关，其卓越的耐性和抗裂性可减少维护成本、延长桥梁寿命；早期性能优良，缩短了施工周期，降低工程成本；高强度特性可减少材料用量、避免了材料自重对结构的不利影响。尽管初期投资成本高于传统材料，但长期的综合效益远超传统材料，使其成为桥梁桥墩领域经济高效的解决方案。

3 UHPC应用论证

龙岗河四号桥布置于湿地公园东侧，跨越龙岗河，桥长约134.5m，宽8m。四号桥联通湿地公园、台地公园及山地步道，形成贯通两岸的碧道系统，并服务社会人群。桥墩为钢管外包UHPC，厚度为60mm。其设计标准见下表：

表2 龙岗河四号桥设计参数表

类别	项目	部位	时间
耐久性	使用年限	支座	20年
		主桥	100年
		桥面铺装	15年
		钢结构防腐涂层	20年
腐蚀性	环境类别及环境作用等级	非干湿交替露天环境	I-B级
		干湿交替环境	I-C级
		钢结构腐蚀环境类别	C3
		桥面防水等级	1级

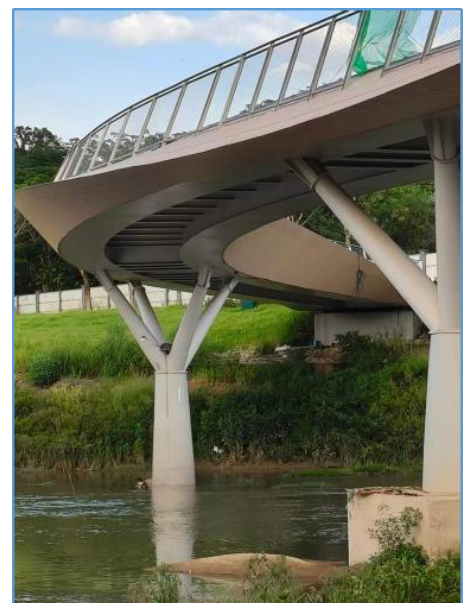


图1 龙岗河四号桥 UHPC 桥墩

从设计图纸可以看出, 龙岗河河水因水环境污染较重, 存在着较高的腐蚀性, 且龙岗河汛期水位较高, 桥墩部分长处于河水浸泡的状态, 出汛后水位降低, 处于较干燥状态, 如果按传统材料设计, 桥墩部位极易出现钢材的电化学腐蚀, 核心区域的钢筋逐渐被锈蚀整座桥的稳定性和强度将逐渐降低, 存在着较大的安全隐患和后期的高昂的维修费用。设计者在考虑和桥墩所处的自然环境和后期的管养维修问题, 使用新材料UHPC对钢护筒进行包封, 减缓了河水氯离子进入结构的速率, 大大提升了桥梁的使用年限, 省去了后期维修困扰。

参考文献:

- [1] 陈峰, 杨雨厚. 桥梁伸缩缝病害修复用超高性能混凝土性能研究 [J]. 西部交通科技, 2023(07):188-190, 193.
- [2] 任亮, 梁明元, 王凯, 等. 桥梁伸缩缝超高性能混凝土关键性能的研究与应用 [J]. 硅酸盐通报, 2018, 37(06):2048-2052.
- [3] 郭杰. 超高性能混凝土在桥面铺装上的应用 [J]. 黑龙江交通科技, 2021, 44(03):110-111.
- [4] 肖丽, 常城, 王滔, 等. 钢-超高性能混凝土组合桥面铺装现状 [J]. 公路交通技术, 2022, 38(04):1-5.
- [5] 杨东洋. 先简支后连续小箱梁UHPC-NC组合负弯矩区设计及试验研究 [D]. 武汉理工大学, 2023.
- [6] 邵旭东, 应李溶君, 赵旭东. 型钢-UHPC组合连续梁墩顶负弯矩区接缝抗弯性能试验 [J]. 中国公路学报, 2023, 36(09): 34-47.
- [7] Li W, Xie C, Yao L, et al. Effect of early strength agent on the properties of new bridge expansion joint UHPC material [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 2044 (1): 012019.
- [8] 贾小龙, 张志涛, 门光誉, 等. UHPC(超高性能混凝土)在桥梁伸缩缝中的应用技术研究 [C]//中国公路学会养护与管理分会. 中国公路学会养护与管理分会第十一届学术年会论文集. 宁夏道路养护工程技术研究中心; 宁夏交通建设股份有限公司, 2021:371-376.
- [9] 洪辉. 超高性能混凝土的应用与经济性分析 [J]. 建筑科技, 2021, 5(03): 32-35.

作者简介: 温帅(1994.09—), 男, 汉族, 山西省朔州人, 硕士研究生, 初级工程师, 研究方向: 桥梁与隧道工程。

4 结语

综上所述, 超高性能混凝土(UHPC)因高强度、高韧性和高耐久性, 在桥梁工程墩顶负弯矩区等关键部位应用前景良好。虽短期内UHPC存在初期成本高、施工工艺复杂的局限, 但在桥梁的全生命周期中经济性优势明显, 有很高的推广价值。后续的学者可进一步根据时代的需求, 从优化配合比、减少碳排放等角度进行研究, 推动其在桥梁工程中更广泛应用, 提升桥梁整体性能与可持续性。