

UHPC 加固混凝土柱轴压承载力试验研究

李迎昊^{1,2}, 肖明杰^{1,2}, 王康宁^{1,2}

(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)

摘要: 为研究普通钢筋混凝土柱采用超高性能混凝土(Ultra High Performance Concrete, UHPC)加固后轴压承载力的变化情况, 设计、制作了 2 根试验柱(未加固混凝土柱 RC 和 UHPC 加固柱 UC), 分析加固前后试件的荷载-位移曲线、承载力变化规律及破坏模式。结果表明, UC 试件相较于 RC 试件刚度和承载力大幅提高, 其中承载力增幅高达 208%; 通过代入不同规范 UHPC 加固柱轴心抗压承载力计算方法, 并结合试验数据, 确定了精度较高且安全可靠的计算公式; 依托实际工程, 设计了 50 mm 厚 UHPC 桥墩加固方案, 较原桥墩承载力提升了 67%; 相同承载力提升幅度下, 加固层厚度较常规混凝土减小 58%。

关键词: 桥梁加固; 超高性能混凝土; 轴压承载力; 计算方法; 工程应用

中图分类号: TU375.3

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2025)10-0280-04

Experimental Study on Axial Compressive Bearing Capacity of UHPC Reinforced Concrete Columns

LI Yinghao^{1,2}, XIAO Mingjie^{1,2}, WANG Kangning^{1,2}

(1. National Key Laboratory of Bridge Intelligent and Green Construction, Wuhan 430034, China; 2. China Railway Bridge Science Research Institute, Co., Ltd., Wuhan 430034, China)

Abstract: To study the variation of axial compressive bearing capacity of ordinary reinforced concrete columns reinforced with ultra-high performance concrete (UHPC), two test columns (unreinforced concrete column RC and UHPC reinforced column UC) are designed and fabricated to analyze the load-displacement curve, bearing capacity change rule and failure mode of specimens before and after the reinforcement. The result shows that compared with RC specimens, the stiffness and bearing capacity of UC specimens are significantly improved, in which the range of bearing capacity increases up to 208%. By substituting into the different calculation methods for the axial compressive bearing capacity of UHPC reinforced columns and combining with the test data, a high-precision, safe and reliable calculation formula has been determined. Relying on the practical projects, a reinforcement scheme for a 50mm thick UHPC bridge pier is designed to increase the load-bearing capacity of the bridge piers by 67% compared with the original ones. Under the same increase in bearing capacity, the thickness of the reinforced layer is reduced by 58% compared with that of conventional concrete.

Keywords: bridge reinforcement; ultra-high performance concrete; axial compressive bearing capacity; calculation method; engineering application

0 引言

自改革开放以来, 伴随着国民经济的蓬勃增长, 我国交通事业同样实现了跨越式的发展。由《交通运输行业发展统计公报》^[1]可知, 截至 2024 年初, 我国公路桥梁的总数已接近 107.93 万座, 总长度更是达到了约 9 528.82 万延 m, 其中混凝土桥梁占据了压

倒性的多数, 比例超过 90%。然而, 随着时间的推移和交通流量的不断增加, 特别是车辆荷载的持续加重, 混凝土梁桥桥墩等关键下部结构面临严峻挑战。在水流侵蚀、冻融循环以及氯离子侵蚀等多重因素的共同作用下, 这些结构极易出现混凝土剥落、钢筋外露及锈蚀等损害现象。值得注意的是, 多起桥梁损毁事件与桥墩损坏存在直接关联, 此外, 桥梁维护与修缮费用庞大, 其中桥墩修缮费用尤为显著, 体现了桥墩维护的重要性和紧迫性。

桥墩加固中常采用增大截面法, 该方法通过扩展混凝土截面及增加配筋比例, 有效提升桥墩的强

收稿日期: 2024-12-05

作者简介: 李迎昊(1998—), 男, 硕士, 工程师, 从事桥梁设计工作。

通信作者: 王康宁(1995—), 男, 硕士, 工程师, 从事桥梁设计工作。电子邮箱: 13971095202@163.com

度、刚度、稳定性能以及抗裂能力。超高性能混凝土(Ultra High Performance Concrete, UHPC)作为一种新型水泥基复合材料,具备超高的力学性能、优异的耐腐蚀性能以及快硬早强和自流平等特点^[2],且相较于普通混凝土,同等截面下具有更强的力学性能^[3],在新桥建设和旧桥加固中存在明显优势。

卢春玲^[4]等设计、制作 1 根未加固柱和 3 根 UHPC 加固柱,轴压性能试验结果表明:UHPC 加固层能有效提升试件承载力和延性,提升幅度随 UHPC 厚度增加而增大。舒田宇^[5]等采用增大截面法对混凝土圆柱进行加固,结果表明:被加固混凝土的强度等级对加固效果没有太大影响。王勃^[6]等通过有限元软件和试验研究发现,UHPC 加固柱的承载力随加固层箍筋间距和长细比增加而减小,随箍筋直径增大而增大。徐鹏松^[7]通过 6 根加固厚度不同的 UHPC 柱轴心受压性能试验发现,UHPC 加固层能起到良好的约束作用,改善试件脆性破坏形态。

目前针对 UHPC 加固柱的轴压性能承载力的研究较多,现存公式种类繁多,鉴于此,本文设计、制作了 2 根试验柱(未加固混凝土柱 RC 和 UHPC 加固柱 UC),结合试验数据,评估不同 UHPC 加固柱轴压承载力公式的计算精度,并基于实际工程,设计了 50 mm 厚 UHPC 加固桥墩的方案。

1 试验方案

1.1 试验设计

未加固混凝土柱 RC 采用 C50 混凝土,圆形截面直径 200 mm,高 880 mm,内置 HRB400 环形钢筋网,纵筋直径 10 mm,箍筋间距 100 mm,柱端 100 mm 范围内加密至 30 mm,保护层厚度 20 mm。UHPC 加固柱 UC 基于与 RC 试件同尺寸的 C50 混凝土柱,经表面凿毛、植筋及增设直径 10 mm HRB400 钢筋网后,浇筑 30 mm 厚 UHPC 加固层成型。试件两端均包裹碳纤维布防止局部压溃,详细设计尺寸和配筋如图 1 所示。

试验加载前测试同等养护条件下 C50、UHPC 试块的抗压强度,详细数据如表 1 所示,此外,钢筋屈服强度 418 MPa,弹性模量 200 GPa。

1.2 加载方案

试验在 MTS6000kN 万能试验机上进行,试件加载情况如图 2 所示。所有试件均为轴心受压,试验开始前进行预加载确认装置与仪表运行正常。初始采用分级力加载的形式,每级 50 kN,临近破坏时转为位移控制,缓慢施加直至试件失效。每级荷载保

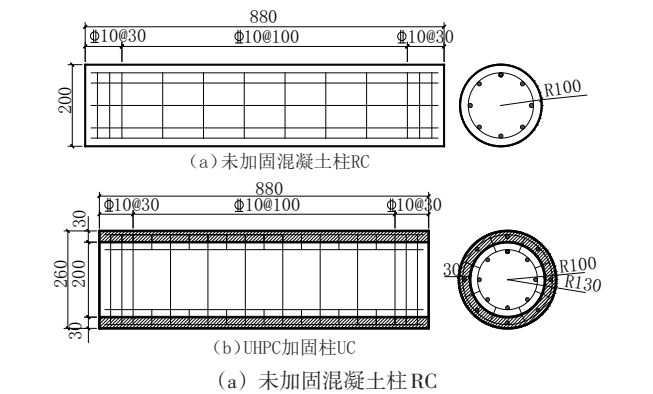


图 1 试件详细设计尺寸及配筋图(单位:mm)

名称	抗压强度/MPa		弹性模量/GPa
	立方体	棱柱体	
C50	53.2	37.8	35.8
UHPC	122.9	96.8	46.2

持 2~3 min,期间记录试件的应变与位移数据。

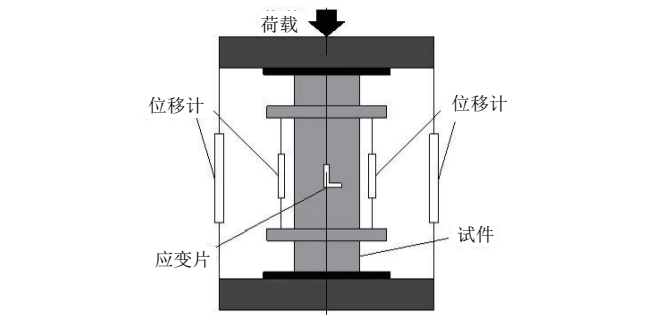


图 2 试件加载示意图

2 试验结果分析

未加固的混凝土柱 RC 的破坏过程如下:初始阶段,试件处于弹性状态,其轴向变形及混凝土应变均保持在较低水平,试件表面无明显变化。随着荷载的逐步增加,位移与应变数据随之增大,试件逐渐由弹性阶段过渡到塑性阶段。此后,随着荷载的进一步增大,试件保护层开始出现细微裂缝,并逐渐扩展。当荷载达到峰值时,裂缝显著开展,随后伴随保护层开裂声响,紧接着纵向钢筋发生屈曲,混凝土压碎,荷载急剧下降,试件破坏,破坏模式如图 3 所示。

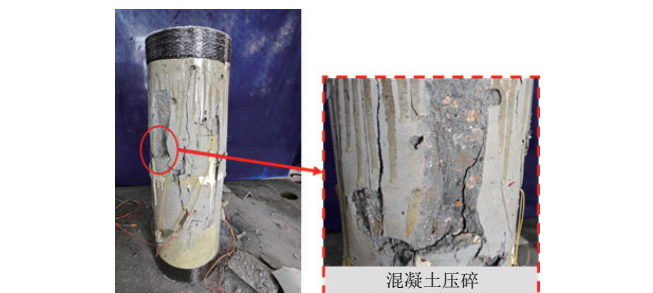


图 3 RC 试件破坏模式

相比之下,UHPC加固柱UC破坏模式的前期阶段与RC试件相似。然而,当荷载临近峰值时,加固层表面出现细微裂缝,并不断扩展;随后荷载开始呈现下降趋势并维持在某一水平,随着位移的持续增加,加固层表面裂缝进一步扩大,内部钢筋逐渐外露并发生明显屈曲,最终试件破坏。由于钢纤维的存在,加固层混凝土裂而不散,溃而不碎^[8],表现出较好的延性,具体如图4所示。



图4 UC试件破坏模式

图5和图6为试件的荷载-位移曲线,可以看出基本分为三个阶段:一是未出现裂缝的弹性阶段,试件荷载与位移间呈线性关系;二是出现裂缝的弹塑性阶段,试件表面混凝土出现裂缝之后,逐渐退出工作,随着试件的承压横截面积的减小,试件刚度变化,荷载-位移曲线偏离原有直线;三是荷载下降阶段,峰值荷载之后,荷载降低。

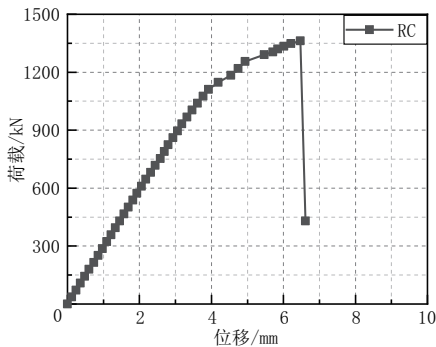


图5 RC试件荷载-位移曲线

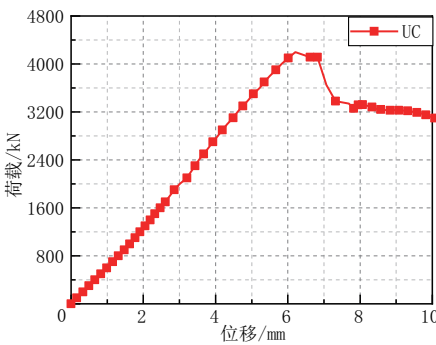


图6 UC试件荷载-位移曲线

相较于RC试件,UC试件极限承载力提高了208%。在弹性阶段内,相同荷载条件下,UC试件的

位移远小于RC试件,这充分证明了UHPC加固层有效增强了试件的刚度。在荷载下降阶段,RC试件展现出脆性破坏的特征,荷载急剧下降,而UC试件存在明显的下降平台,这得益于UHPC加固层对内部混凝土的有效约束,且由于其内部钢纤维的增韧作用,进一步增强了试件整体性,从而提高了试件延性。

3 承载力评估

3.1 承载力计算公式

在结构工程领域,采用增大截面法加固钢筋混凝土构件是一种较为常见的桥梁加固方法。根据《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG 3362—2018)^[9]的相关规定,普通钢筋混凝土柱的轴心抗压承载力计算已有了较为成熟的方法,其计算值与本文未加固混凝土柱RC试验误差仅在5%以内,吻合良好。然而,针对UHPC加固钢筋混凝土构件的轴压承载力计算,各规范方法不一,本文基于UC试件试验结果,对各公式进行了评估,试验值与计算值对比如表2所示。

表2 各公式试验值与计算值对比

试件 编号	参考规范	试验值/ kN	计算值/ kN	误差/%
RC	公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范	1 362.60	1 305.14	4.40
	直接叠加法		3 353.90	25.20
	混凝土结构加固设计规范		2 939.87	42.83
UC	公路桥梁超高性能混凝土加固技术指南	4 199.00	3 215.01	30.61
	原强度利用系数 试验现象修正		3 995.79	5.09

根据直接叠加法,试件的轴压承载力由原构件和加固层的强度叠加得出,如式(1)所示,其中涉及原构件与加固混凝土的抗压强度(f_{co} 、 f_c)、面积(A_{co} 、 A_c),以及原构件与加固钢筋的抗压强度(f_{y0} 、 f_y)、截面面积(A'_{s0} 、 A'_s)。该公式直接将原构件与UHPC加固层的强度叠加,但未考虑UHPC的约束效应及材料强度利用率,导致结果偏保守且与本文试验数据有较大偏差。

$$N_u = 0.9\varphi(f_{co}A_{co} + f'_{y0}A'_{s0} + f_cA_c + f'_yA'_s) \tag{1}$$

根据《混凝土结构加固设计规范》(GB 50367—2016)^[10]可知,试件的轴压承载力按式(2)计算,其中 α_{cs} 取0.8以反映加固层材料强度未充分利用。但该规范未计入UHPC加固层的约束效应,导致计算值偏低,与本文UC试件试验值相差42.83%。

$$N_u = 0.9\varphi \left[\frac{f_{c0}A_{c0} + f_{y0}'A_{s0}'}{\alpha_{cs}(f_cA_c + f_y'A_s')} \right] \quad (2)$$

《公路桥梁超高性能混凝土加固技术指南》(T/CHTS 10066—2022)^[11]引入了原构件混凝土强度提高系数 α_{c0} ,如式(3)所示。该指南考虑 UHPC 加固层的约束效应, α_{c0} 取 1.5,同时加固层混凝土和钢筋的强度利用系数 α_c 和 α_s 分别取 0.6 和 0.8。然而,计算结果偏低,误差达 30.61%,具有较高的安全度。这归因于 UC 试件破坏时,加固层内钢筋屈曲,且表面 UHPC 达到极限应变,表明其强度利用充分。结合试验现象, α_c 和 α_s 取 1.0 更贴合实际,此时计算值与试验结果吻合良好,误差仅 5.09%。

$$N_u = 0.9\varphi \left(\frac{\alpha_{c0}f_{c0}A_{c0} + f_{y0}'A_{s0}'}{\alpha_c f_c A_c + \alpha_s f_y' A_s'} \right) \quad (3)$$

综上所述,公式(3)最适用于实际工程加固承载力计算,且具有一定的安全富余。

3.2 工程应用及评估

传统钢筋混凝土加固桥墩时,因材料限制,常需增厚加固层并加密钢筋网,导致桥墩自重显著增加。而 UHPC 材料凭借其高强度与高韧性,能大幅减小加固层厚度,减轻自重影响,缩短工期并节省空间。此外,UHPC 自流平的特点便于施工,其高抗裂性和耐腐蚀性增强了桥墩的抗裂和耐腐蚀能力,延长了使用寿命,提升了安全性和可靠性,这对桥梁运行和公共安全至关重要。

UHPC 加固桥墩主要施工流程如下:(1)表面预处理,搭建脚手架后,采用高效方法彻底清理桥墩表面,确保粗糙度 ≥ 6 mm,并用高压水枪冲洗,增强粘结力;(2)裂缝修补,对严重区域,标记、清理裂缝两侧,钻孔布置注浆嘴,用封缝胶密封裂缝,注入修补胶,注浆压力 0.1~0.4 MPa;(3)植入栓钉,用钢筋探测仪定位,调整位置并钻孔,清洁孔壁后灌注胶体,植入栓钉并保持垂直,固化前避免触碰;(4)钢筋绑扎与模板架设,利用栓钉绑扎钢筋网,架设加劲钢模板,确保密封无变形,安装后排水,浇筑前湿润墩身表面;(5)UHPC 浇筑,严格控制拌制 UHPC 的质量,设计溜槽分层浇筑,避免冷缝,使用附着式振捣器确保均匀密实,达到设计强度后拆模,立即洒水养护至完全收缩。主要施工流程如图 7 所示。

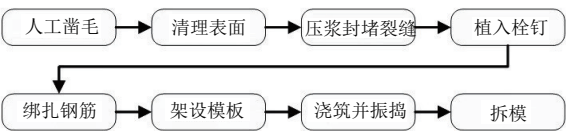


图 7 UHPC 加固桥墩主要施工流程图

选取湖北省某座钢箱梁桥的桥墩进行加固设计,旨在通过 UHPC 加固方案提高其承载能力,并有效防止潜在灾害对内部混凝土及钢筋的损害。设计细节如下:原桥墩直径为 1 600 mm,内置 18 根直径 22 mm 的 HRB400 钢筋,采用 50 mm 厚的 UHPC 厚度,层内均匀配置 18 根直径 10 mm 的 HRB400 钢筋,以评估其对桥墩承载能力的影响。

经公式(3)计算后,UHPC 加固的桥墩相比原桥墩,承载力显著提升 67%。在相同承载力增幅的设计要求下,UHPC 相比常规混凝土能减少加固层厚度约 58%,有效减轻了加固层自重,便于施工。

4 结 论

(1)试验结果表明,UHPC 加固后的 UC 试件刚度大幅提升,极限承载力较未加固的 RC 试件高出 208%。此外,UHPC 加固层通过约束内部混凝土并借助钢纤维的增韧作用,增强了试件的整体性,提高了试件的延性。

(2)评估了不同 UHPC 加固混凝土柱轴压承载力计算方法,选定了精度较高且安全可靠的计算公式,为 UHPC 加固结构计算提供了参考。

(3)依托实际工程,设计 50 mm 厚 UHPC 桥墩加固方案,该方案使桥墩承载力提升 67%。与常规混凝土相比,达到相同承载力提升幅度的情况下,加固层厚度减小了 58%;此外,UHPC 具备自流平、高抗裂性和耐腐蚀的特点,能极大简化前期施工工艺,降低后期维养频次。

参考文献:

[1] 中华人民共和国交通运输部.2023 年交通运输行业发展统计公报[R].北京:中华人民共和国交通运输部,2024.
[2] 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.
[3] 郑纲,李迎昊,王康宁.UHPC 加固钢筋混凝土梁抗弯承载力试验研究[J].城市道桥与防洪,2024(6):259-262;30.
[4] 卢春玲,欧阳康,王强.UHPC 加固混凝土圆柱轴压性能试验研究[J].建筑科学,2023,39(3):108-117.
[5] 舒田宇,谢剑,杨丽.UHPC 加固混凝土柱轴压性能研究[C]//第 28 全国结构工程学术会议.南昌:工程力学,2019.
[6] 王勃,周家宇.UHPC 加固钢筋混凝土柱轴压承载力研究[J].吉林建筑大学学报,2022,39(3):1-8.
[7] 徐鹏松.UHPC 加固受损混凝土短柱轴压性能试验及有限元分析[D].西安:西安理工大学,2024.
[8] 王敏,高立强,王康宁,等.高强钢筋 UHPC 梁抗弯性能及承载力试验研究[J].桥梁建设,2022,52(6):87-94.
[9] JTG 3362—2018,公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范[S].
[10] GB 50367—2016,混凝土结构加固设计规范[S].
[11] T/CHTS 10066—2022,公路桥梁超高性能混凝土加固技术指南[S].