

UHPC 加固钢筋混凝土梁抗弯承载力试验研究

郑纲^{1,2}, 李迎昊^{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梁不同受力区域加固超高性能混凝土(UHPC)后抗弯承载力的变化情况,设计、制作了3根试验梁[未加固钢筋混凝土梁(RC)、受压区 UHPC 加固梁(UC)和受拉区 UHPC 加固梁(UT)],采用四点加载法进行抗弯试验,分析加固前后试验梁的破坏模式、荷载-挠度曲线及承载力变化规律。结果表明:试验梁 UC 和 UT 相较于 RC,刚度和承载力大幅提高,其中承载力分别提高 61.2%和 96.9%;提出了钢筋混凝土梁受压区、受拉区(考虑纤维贡献)加固 UHPC 后的抗弯承载力简化计算公式,计算值和试验值误差小于 5%,具有较高的计算精度和适用性。

关键词:桥梁加固;超高性能混凝土;抗弯承载力;试验研究;理论分析

中图分类号:U444

文献标志码:B

文章编号:1009-7716(2024)06-0259-04

0 引言

“十四五”以来,国家紧紧围绕交通强国思想,加快道路桥梁建设。可随着旧有桥梁老化、运输要求持续增长,原设计标准不足以满足当前桥梁需求,较多老旧桥梁出现混凝土开裂、局部破损等病害。为保证桥梁结构安全,急需对在役桥梁进行定期检查和维修加固。

针对桥梁维修加固,实际工程中多采用增大截面法。该方法一般通过在梁底面或侧面增设混凝土来增大截面尺寸和有效高度,从而提高桥梁的承载能力^[1],但会大幅增加桥梁自重。

超高性能混凝土(UHPC)是一种新型水泥基复合材料^[2],具有超高的力学性能和耐久性能,在桥梁工程领域得到广泛应用^[3]。相较于普通混凝土,UHPC 同等截面下具有更强的力学性能,不会显著增加桥梁自重,但能否提升加固后结构的承载能力及抗裂性能值得进一步研究。

国内外学者对 UHPC 加固钢筋混凝土梁进行了部分研究。Safdar 等^[4]通过 7 根 RC 矩形加固梁抗弯试验,研究了不同 UHPC 加固层对 RC 梁抗弯性能的影响。结果表明:试验梁的抗弯承载力随着 UHPC

加固层厚度的增加同步提高,且 UHPC 加固层延缓了裂缝的开裂,提高了加固梁的耐久性。Prem 等^[5]采用不同厚度的 UHPC 加固层和不同配筋率的 RC 梁进行抗弯性能试验。结果表明:UHPC 加固层越厚、RC 配筋率越高,加固效果越好。吕长荣等^[6]提出了采用 UHPC 三面包裹试验梁底板和腹板的加固方案,并进行试验研究。结果表明:相同剪跨比下,加固后试验梁的抗剪承载力和抗变形能力显著提升,且能提供较大的安全储备。尹万杰等^[7]对内嵌钢筋 UHPC 加固梁开展了试验研究。结果表明:当钢筋嵌入 UHPC 加固层时,试验梁抗裂强度和极限承载力显著提升,并延迟了结构的开裂。黄松龄^[8]对 8 根预应力 UHPC 加固损伤 RC 梁的抗弯性能进行了较为系统的试验研究,为分析 UHPC 加固梁抗弯承载力提供了参考。

目前针对 UHPC 加固钢筋混凝土梁,较多研究集中于加固层厚度、梁体配筋率对其抗弯承载力的影响,对不同受力区域加固的研究较少。鉴于此,本文设计、制作了 3 根试验梁[未加固钢筋混凝土梁(RC)、受压区 UHPC 加固梁(UC)和受拉区 UHPC 加固梁(UT)],结合抗弯试验数据及理论公式计算,分析加固前后试验梁的破坏模式、荷载-挠度曲线及承载力变化规律,为后续 UHPC 加固钢筋混凝土梁研究提供试验数据和理论支撑。

1 试验方案

1.1 试验设计

未加固试验梁 RC 选用 C50 混凝土,截面宽和高为 800 mm 和 210 mm,长 2 300 mm,内设双层 HRB400

收稿日期:2023-11-06

基金项目:湖北省交通运输厅科技项目(2020-186-2-8);中国中铁股份有限公司科技研究开发计划项目(2022-专项-02)

作者简介:郑纲(1977—),男,本科,高级工程师,从事桥梁设计工作。

通信作者:李迎昊(1998—),男,硕士,助理工程师,从事桥梁设计工作。电子信箱:13971095202@163.com

钢筋网,纵筋直径 22 mm,保护层厚 20 mm。试验梁 UC 和 UT 为 UHPC 加固梁,加固层内设 10 mmHRB400 纵横向钢筋。为充分发挥 UHPC 力学性能,考虑保护层规范要求,并依托模型制作工艺,加固层厚度取 40 mm。加固层与普通混凝土层间设界面钢筋,其伸入加固层后进行墩头或弯折处理来增强界面抗剪强度。试验梁 UC 和 UT 尺寸完全相同,加载试验时通过变换加固层与普通混凝土层位置来实现不同受力区域的加固形式。试验梁的关键参数见表 1,详细设计尺寸和配筋如图 1 和图 2 所示。

表 1 试验梁关键参数

编号	类型	材料		加固区域
		未加固梁	加固层	
RC	未加固钢筋混凝土梁	C50	/	/
UC	UHPC 加固梁	C50	UHPC	受压区
UT	UHPC 加固梁	C50	UHPC	受拉区

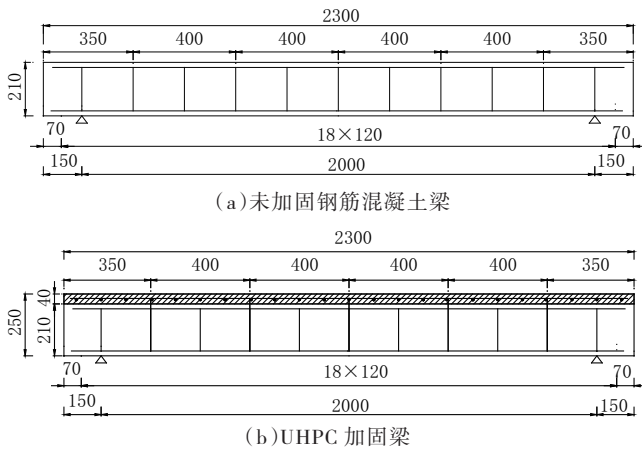


图 1 试验梁立面(单位:mm)

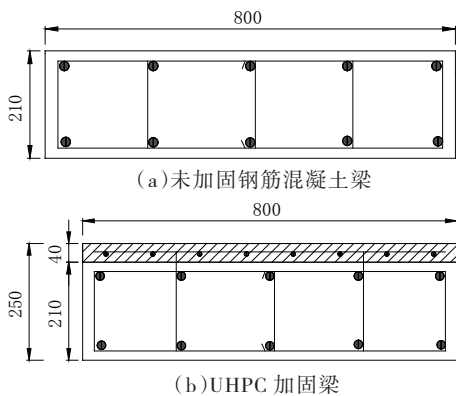


图 2 试验梁断面(单位:mm)

UHPC 配合比为普通水泥:石英砂:掺和料:外加剂:钢纤维:水=850:1 000:285:15:200:205。钢纤维为平直形,长径比 60,体积率 2.5%。28 d 养护后,UHPC 立方体抗压强度 122.9 MPa,棱柱体抗压强度 86.0 MPa,轴向抗拉强度 8.0 MPa,弹性模量 46.2 GPa。C50 立方体抗压强度 53.2 MPa,

棱柱体抗压强度 37.2 MPa,弹性模量 35.8 GPa;直径 10 mm 和 22 mm 钢筋屈服强度分别为 440 MPa、420 MPa,弹性模量 200 GPa。

1.2 加载方案

通过四点加载方式进行抗弯性能试验,加载方案如图 3 所示。采用 MTS1000 kN 万能作动器进行加载,荷载通过分配梁转递至试验梁,在铰支座顶部和跨中底部位置布置位移计,支座间距 2 000 mm,加载点间纯弯段距离 700 mm。试验过程中观察试件的挠度、裂缝萌生与扩展情况。

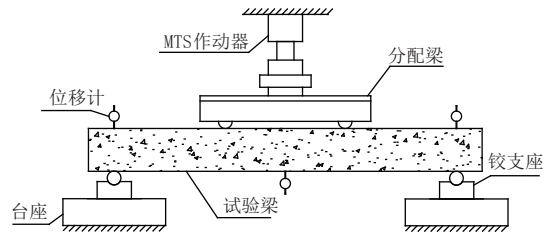


图 3 试验梁加载示意图

试验梁 UC 加固层位于钢筋混凝土梁上方,试验过程中承担压力,即受压区加固。试验梁 UT 加固层位于钢筋混凝土梁下方,试验过程中承担拉力,即受拉区加固。不同受力区域加固 UHPC 试验梁的加载如图 4 所示。

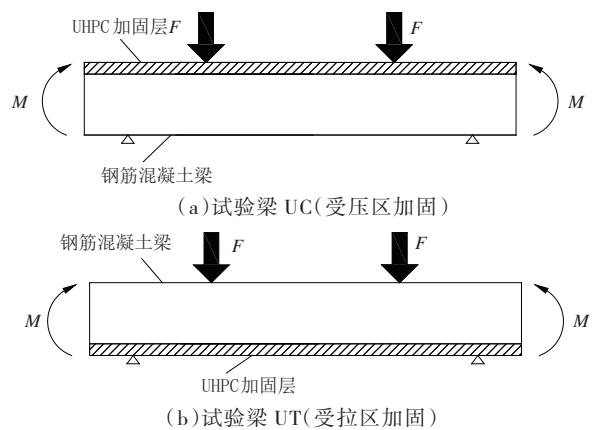


图 4 不同受力区域加固 UHPC 示意图

2 试验结果分析

未加固钢筋混凝土梁 RC 的破坏模式为:荷载达到 30 kN 时,底部普通混凝土受拉区出现裂缝(名义应力 1.66 MPa);加载至 370 kN 时,受拉区纵向钢筋屈服,试验梁在荷载基本不变的情况下,钢筋应变和挠度持续增大;直至峰值荷载 389 kN,受压区混凝土压碎,试验梁破坏。

受压区 UHPC 加固梁 UC 破坏模式为:荷载达到 44 kN 时,跨中混凝土底部出现裂缝(名义应力 1.68 MPa),与试验梁 RC 结果相近。随着荷载的增

加,纯弯段区域逐渐出现多条裂缝,且自底部逐步扩展至UHPC层和普通混凝土层交界面。最终,底部受拉区钢筋屈服,UHPC加固层与普通混凝土层界面出现相对滑移,顶部UHPC层轻微压溃。试验梁UC的屈服荷载和峰值荷载分别为584 kN和627 kN,相较于试验梁RC分别提高了57.8%和61.2%。

受拉区UHPC加固梁UT破坏模式为:荷载达到44 kN时,底部UHPC加固层出现裂缝(名义应力7.80 MPa),相比于普通混凝土,抗裂性能大幅提高。随后普通混凝土出现裂缝,且裂缝宽度的增速大于UHPC层。最终,UHPC薄层被主裂缝贯穿、顶部混凝土压溃而破坏。试验梁UT的屈服荷载和峰值荷载分别为750 kN和766 kN,相较于试验梁RC分别提高了102.7%和96.9%。试验梁破坏模式如图5所示。

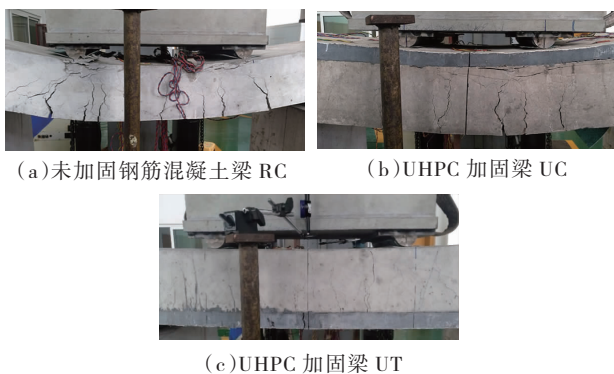


图5 试验梁破坏模式

由图6可以看出,试验梁的荷载-挠度曲线分为3个阶段:(1)未出现裂缝的线弹性阶段;(2)裂缝扩展阶段,此阶段裂缝数量增长速度快,宽度增长慢;(3)屈服至破坏阶段,此阶段荷载基本不变,挠度和裂缝宽度持续增加。试验梁UC和UT荷载-挠度曲线弹性阶段的斜率基本相同,且大于试验梁RC。鉴于UHPC层和层内钢筋的受拉贡献,试验梁UT的抗弯极限承载力比试验梁UC提高了22.2%。

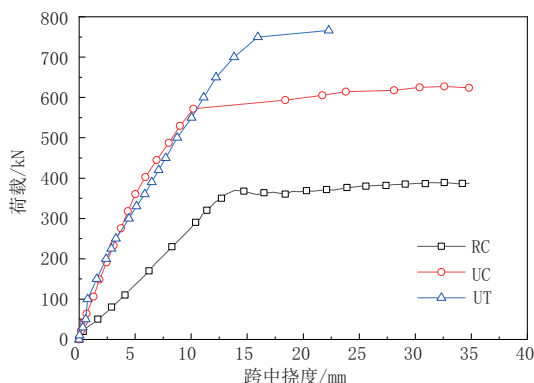


图6 荷载-挠度曲线对比

3 承载力简化计算方法

3.1 基本假定

(1)平截面假定。UHPC层与普通混凝土层之间无滑移,界面和结构构件展现整体行为。

(2)钢筋、UHPC和普通混凝土分别满足各自的材料本构关系,且不考虑普通混凝土的抗拉强度,考虑UHPC的抗拉贡献。

3.2 材料本构模型

UHPC本构参考法国规范^[9](双折线);钢筋采用理想弹塑性模型,即双折线弹塑性模型;C50混凝土受压本构参考《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)^[10]。

3.3 抗弯承载力理论计算

3.3.1 受压区加固

由试验结果可知,试验梁UC的破坏模式为顶部UHPC层压溃,普通混凝土层内钢筋屈服,且临近破坏时裂缝基本已扩展至两种材料交界面。因此,极限状态时截面中性轴位于UHPC层内。为简化计算,忽略UHPC层内钢筋受压和中性轴附近的UHPC受拉贡献,其应力分布如图7所示。

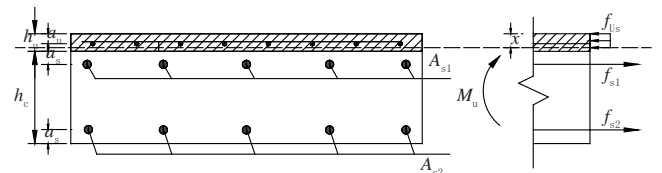


图7 受压区UHPC加固梁极限状态截面应力分布

由截面轴力平衡方程式(1)可得受压区高度 x 。再对中性轴取矩,得到受压区UHPC加固梁的抗弯极限承载力 M_u 。

$$f_{uc}bx = f_{s1}A_{s1} + f_{s2}A_{s2} \quad (1)$$

$$M_u = \frac{1}{2}f_{uc}bx^2 + f_{s1}A_{s1}(h_u + a_s - x) + f_{s2}A_{s2}(h_u + h_c - a_s - x) \quad (2)$$

式中: f_{uc} 为UHPC抗压强度; f_{s1} 、 f_{s2} 为普通混凝土上、下层钢筋屈服强度; b 为试验梁截面宽度; x 为受压区高度; h_u 为UHPC加固层厚度; h_c 为普通混凝土梁截面高度; a_s 为受拉钢筋重心到截面边缘的距离。

计算得受压区高度 $x=23.2$ mm,极限弯矩 $M_u=213.0$ kN·m,略大于受压区加固梁试验极限值203.8 kN·m(折算成峰值荷载627 kN)。这是因为试验梁UC在屈服至破坏阶段UHPC加固层与普通混凝土层错位,导致试验值偏低。试验值与计算值误差为4.5%,证明该理论公式能较好地预测受压区UHPC加固梁抗弯承载力。

3.3.2 受拉区加固

受拉区加固 UHPC 的试验梁抗弯破坏准则为:(1)受压区混凝土压碎;(2)UHPC 层和普通混凝土层内受拉钢筋屈服。极限状态截面应力分布如图 8 所示。

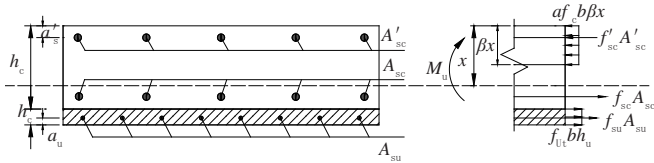


图 8 受拉区 UHPC 加固梁极限状态截面应力分布

由截面轴力平衡方程:

$$f_{U1}bh_u + f_{su}A_{su} + f_{sc}A_{sc} = \alpha f_c b\beta x + f'_{sc}A'_{sc} \quad (3)$$

对受拉区钢筋 A'_{sc} 合力作用点取矩,混凝土压碎破坏模式下受拉区 UHPC 加固的抗弯极限承载力

$$M_u = f_{U1}bh_u \left(\frac{h_u}{2} + h_c - a'_s \right) + f_{su}A_{su}(h_u + h_c - a'_s - a_u) + f_{sc}A_{sc}(h_c - a'_s - a_s) - \alpha f_c b\beta x \left(\frac{\beta x}{2} - a'_s \right) \quad (4)$$

式中: f_{U1} 为 UHPC 抗拉强度; f_{su} 、 f_{sc} 、 f'_{sc} 分别为 UHPC 加固层和普通混凝土层钢筋屈服强度; f_c 为普通混凝土层混凝土抗压强度; A_{su} 、 A_{sc} 、 A'_{sc} 分别为 UHPC 层和普通混凝土上下层钢筋面积; x 为按平截面假定的受压区高度; α 为矩形应力抗压强度等效系数,C50 混凝土取 1; β 为矩形应力受压区高度等效系数,C50 混凝土取 0.8。

计算得 $M_u=237.4 \text{ kN}\cdot\text{m}$, 小于受拉区加固梁试验极限值 $249.0 \text{ kN}\cdot\text{m}$ (换算成峰值荷载 766 kN),误差为 4.9%, 证明该理论公式能较好地预测受拉区 UHPC 加固梁极限抗弯承载力,且偏安全。

4 结论

(1)UHPC 加固钢筋混凝土梁抗弯承载力试验结果表明,采用 UHPC 加固钢筋混凝土梁可提高结构的刚度和承载力。受压区 UHPC 加固梁屈服荷载和

峰值荷载相较于普通钢筋混凝土梁分别提高 57.8% 和 61.2%,受拉区 UHPC 加固梁分别提高 102.7% 和 96.9%。

(2)UHPC 加固受拉区后,初裂荷载对应的名义应力由 1.66 MPa 增至 7.80 MPa ,表明试验梁抗裂性大幅提高,可有效延缓钢筋混凝土梁早期裂缝的扩展。

(3)提出了受压区 / 受拉区加固 UHPC 后矩形截面钢筋混凝土梁的承载力简化计算公式,试验值与计算值吻合良好,误差小于 5%,可为 UHPC 加固结构的计算提供参考。

参考文献:

- [1] 张开鹏,蒋玉龙,曾雪芳.桥梁加固的发展与展望[J].公路,2005(8): 299-301.
- [2] 雒敏,蔺鹏臻,杨子江.UHPC 单轴受压力学性能及本构关系研究[J].桥梁建设,2020,50(5): 62-67.
- [3] 邵旭东,邱明红,晏班夫,等.超高性能混凝土在国内外桥梁工程中的研究与应用进展[J].材料导报,2017,31(23): 33-43.
- [4] SAFDAR M, MATSUMOTO T, KAKUMA K. Flexural behavior of reinforced concrete beams repaired with ultra-high performance fiber reinforced concrete (UHPRC) [J]. Composite Structures, 2016,157(12):448-460.
- [5] PREM P R, MURTHY A R. Acoustic emission and flexural behaviour of RC beams strengthened with UHPC overlay [J]. Construction and Building Materials, 2016, 123(10):481-492.
- [6] 吕长荣,刘鹤,亓兴军,等.超高性能混凝土 U 形包裹加固钢筋混凝土 T 梁研究[J].混凝土与水泥制品,2023(7): 46-50.
- [7] 尹万杰,唐文元.UHPRC 加固钢筋混凝土梁受弯抗裂性能研究[J].交通科技,2022(3):112-116.
- [8] 黄松龄.预应力超高性能混凝土(UHPC)加固损伤 RC 梁抗弯性能研究[D].长沙:湖南大学,2021.
- [9] NF P 18-710,National Addition to Eurocode 2—design of Concrete Structures: Specific Rules for Ultra-high Performance Fiber-reinforced Concrete[S].
- [10] GB 50010—2010,混凝土结构设计规范[S].

《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

投稿网站: <http://www.csdqyfh.com> 电话:021-55008850 联系邮箱: cdq@smedi.com