

UHPC+CFRP加固10 m空心板抗弯性能 试验研究

徐祥龙^{1,2}, 王君熠^{1,2}, 王康宁^{1,2}, 张恩光^{1,2}

(1. 桥梁智能与绿色建造全国重点实验室, 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: 为研究超高性能混凝土(UHPC)+碳纤维布(CFRP)组合加固空心板的抗弯性能,开展10 m足尺空心板试验研究,分析UHPC+CFRP组合加固后空心板破坏模式和承载力,并提出加固后空心板承载力简化计算方法。试验结果表明:UHPC与CFRP组合加固后空心板的变形能力提高,最终破坏形式为CFRP断裂、UHPC发生压溃,UHPC的抗压性能得到充分利用;UHPC+CFRP加固后试件承载力为1 926 kN·m,具有较高的安全性,CFRP破坏后试件仍可保持较久承载力,试件带裂缝工作时仍有较大安全余量;试件承载力的试验结果和理论计算结果较吻合,误差为7.6%,可为UHPC和CFRP组合加固混凝土桥梁设计计算提供参考。

关键词: 桥梁工程;超高性能混凝土加固;碳纤维布;空心板;抗弯性能;承载力

中图分类号: U448.35; TU997

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2025)11-0311-05

Experimental Study on Flexural Behavior of 10-m Hollow Slab Strengthened with UHPC + CFRP

XU Xianglong^{1,2}, WANG Junyi^{1,2}, WANG Kangning^{1,2}, ZHANG Enguang^{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: In order to study the flexural behavior of hollow slabs strengthened with the combined ultra-high performance concrete (UHPC) + carbon fiber reinforced polymer (CFRP), a 10 m full-scale hollow slab test is carried out. The failure mode and bearing capacity of hollow slabs strengthened with the combined UHPC + CFRP are analyzed, and a simplified calculation method for the bearing capacity of hollow slabs after being strengthened is proposed. The test results show that the deformation capacity of the hollow slab is improved after being strengthened with the the combined UHPC and CFRP. The final failure mode is CFRP fracture and UHPC crushing, and the compressive performance of UHPC is fully utilized. The bearing capacity of the specimen after the combined UHPC + CFRP reinforcement is 1, 926 kN/m, which has the higher safety. After CFRP failure, the specimen can still maintain a long bearing capacity, and there is still a large safety margin when the specimen works with cracks. The test results of the bearing capacity of the specimens are in good agreement with the theoretical calculation results, and the error is 7.6 %, which can provide reference for the design and calculation of the concrete bridges strengthened with the combined UHPC and CFRP.

Keywords: bridge engineering; ultra-high performance concrete (UHPC) reinforcement; carbon fiber reinforced polymer (CFRP); hollow plate; flexural behavior; bearing capacity

0 引言

随着交通运输业的快速发展,现役桥梁面临着更大交通需求的同时,会导致病害与损伤频发。空心板由于其优秀的结构形式和便捷的施工过程在桥梁建设过程中被广泛应用,随着服役时间的增长和车流量的增加,空心板逐渐出现不同程度的病害,影响行车舒适性的同时面临着承载力和耐久性的问题。有必要对原空心板梁桥采取有效的加固措施以应对当前空心板梁桥出现的病害,进而提高其承载

收稿日期: 2025-05-31

基金项目: 湖北省科技厅创新发展项目“基于超高性能混凝土的装配式桥梁结构研发及应用”(2021BLB155);中国中铁股份有限公司科技研究开发计划项目“桥梁结构运维及灾害防治技术-C”(2023-专项-02);中国中铁股份有限公司科技研究开发计划项目“桥梁新结构与新材料”(2022-专项-02)

作者简介: 徐祥龙(2000—),男,学士,助理工程师,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。电子信箱: 1049214938@qq.com

能力和使用寿命。

超高性能混凝土(UHPC)由于其优秀的力学性能和耐久性,近年来被广泛运用于桥梁加固和修复领域。张阳等^[1-3]采用UHPC和钢板-UHPC组合结构对钢筋混凝土梁顶部进行加固,发现预应力UHPC加固使得RC梁的抗弯刚度和极限承载力得到明显的提升,同时可有效抑制裂缝的形成与开展。孙霄等^[4-6]采用纤维网格复合超高性能混凝土对钢筋混凝土梁进行加固,发现破坏时裂缝数目增大且发展较均匀,可有效增大梁在破坏过程中的延性。王国林等^[7]采用UHPC板及其内嵌CFRP板条对RC梁进行加固,发现在其中内嵌CFRP板条可有效提高UHPC板的抗裂性能。周聪等^[7]对UHPC加固RC梁的抗扭性能进行了研究,认为全包裹形式能更好地抵抗扭转效应,加固效果最佳,若是采用两面包裹则有剥离的风险。常跃等^[9-12]针对加固层与原截面间的粘结性能,发现加固层厚度与加固层配筋率均会影响试件破坏模式与承载力提升幅度,但对于含拼缝试件加固厚度对其影响不明显。然而Huang等^[11]发现UHPC在对结构弯曲、剪切和冲剪等方面的加固已广泛应用,但对其与混凝土间界面黏结性能的微观研究仍不够深入。蔡雄庭等^[12-13]分别对RC梁受压、受拉区进行UHPC薄层加固,发现受拉区加固后承载能力提升效果显著大于受压区加固。

纤维增强复合材料(FRP)加固法是近年来新型的结构加固方法,可有效提高空心板梁桥承载力和解决底板开裂问题。王廷彦等^[14]采用FRP加固不同钢筋混凝土梁,发现FRP加固未损伤梁主要发生FRP剥离破坏,FRP加固损伤梁破坏主要为FRP布拉断。邓朗妮等^[15-16]对FRP网格加固对钢筋混凝土梁裂缝的影响进行了研究,发现加固后可有效减小裂缝平均间距、宽度和高度,改善空心板梁桥底板开裂和铰缝破损病害。

综上所述,目前UHPC和CFRP在空心板桥梁修复和加固工程中已有应用,但对组合加固足尺桥面板破坏性试验相关研究仍较为匮乏。为此,本研究对顶底部均进行加固的预制空心板研究,顶部受压区采用UHPC加固、底部受拉区采用碳纤维增强复合材料(CFRP)加固,对加固后空心板的破坏模式、承载能力等进行研究,并结合试验结果对加固后截面的开裂弯矩和极限弯矩提出了简化计算方法,以进一步提高UHPC在空心板桥梁加固工程中的应用效率。

1 试验概况

1.1 试件设计

设计1片10 m足尺空心板试件,试件混凝土等级为C50,尺寸为9.96 m×1.24 m×0.6 m,采用顶面设置50 mm UHPC+底面设置CFRP的加固方式,见图1。顶面加固对空心板开设纵向间距为400 mm、深115 mm和45 mm的槽口,植入长150 mm和80 mm的抗剪栓钉,铺设一层100 mm×100 mm间距钢筋网,并浇注50 mm厚UHPC。底面在空心板底面跨中5 m范围内沿空心板纵向方向粘贴CFRP进行加固,并布置4处横向CFRP进行固定,布置方法见图2。

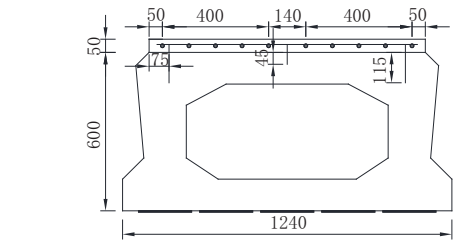


图1 试件加固方式(单位:mm)

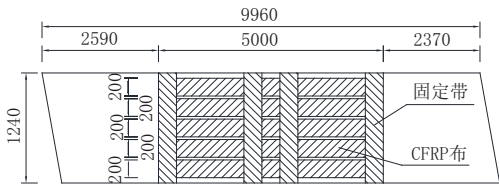


图2 底板CFRP布置(单位:mm)

1.2 试件制作

由于空心板试件直接由预制梁场购置,试件制作主要分为两个部分:(1)顶面加固:在试件进行顶面凿毛开孔、植入抗剪栓钉,随后在顶面布设加固层钢筋网,进行UHPC浇筑、养护;(2)底面加固:对试件底面进行打磨、涂刷环氧浸渍胶,粘贴底面碳纤维布。

1.3 材料特性

空心板C50混凝土棱柱体抗压强度29.1 MPa,钢筋屈服强度482 MPa。UHPC配合比见表1,立方体抗压强度120 MPa,抗拉强度7.8 MPa,弹性模量42 GPa。预应力束按规范^[14]取值。碳纤维布厚度0.167 mm,弹性模量240 GPa,抗拉强度3 862 MPa。

表1 UHPC配合比					单位:kg/m ³
普通水泥	石英砂	掺合料	外加剂	钢纤维	水
850	1 000	285	15	200	205

1.4 测点布置与加载方案

应变及位移测点布置见图3。在空心板跨中底部粘贴应变片,对跨中开裂进行监测;在支座和加载

点处布置位移计,测试各测点挠度。

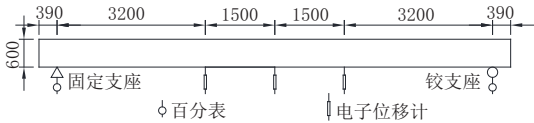


图3 应变及位移测点布置(单位:mm)

试验采用2台100 t MTS试验机进行四点加载,跨中纯弯段长3 m。试验加载方式采用荷载-位移控制分级加载,加载至试验梁预计开裂荷载前,每级荷载加载值需小于20 kN;加载至试件开裂后,荷载可增大至40 kN/级;加载至接近承载力计算值时,改为位移控制加载,加载至试件破坏。

2 试验结果

2.1 破坏模式

UHPC+CFRP加固后空心板的破坏模式为:荷载达到320 kN时,跨中底面混凝土出现0.01 mm裂缝,试件底部逐渐出现细微裂缝;荷载达到480 kN时,试件底部裂缝最大宽度扩大至0.2 mm;当加载到1 060 kN时,荷载达到峰值,CFRP发生破坏、脱落,最大裂缝宽度扩大至1.0 mm。随后加载过程荷载稍有降低,当再次加载到1 013 kN时,顶部UHPC层发生压溃破坏,空心板承载力迅速下降。试件破坏之前,空心板底部裂缝未扩展至顶部UHPC加固层,试件破坏后将跨中底部混凝土凿开,发现预应力钢筋和普通钢筋并未破坏,试件破坏模式见图4。对于空心板试件而言,由于UHPC高抗压、高韧性的特性,采用UHPC+CFRP组合加固会使其变形能力显著增大,提高顶部抗压能力和底部抗拉能力,使结构的顶部底部加固性能得到充分利用。

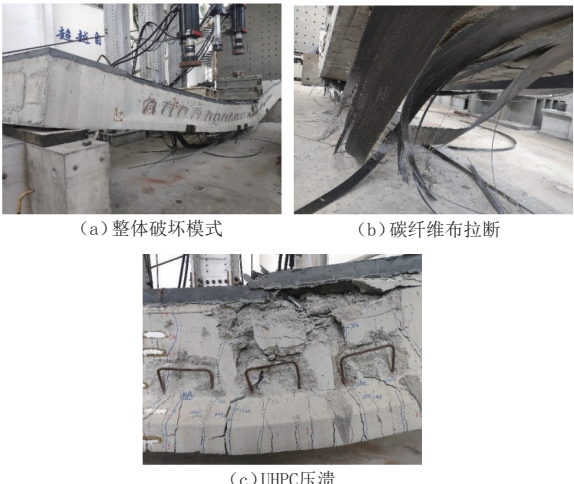


图4 试件破坏模式

2.2 荷载-挠度曲线

试件的荷载-挠度曲线见图5。曲线分为三个阶

段:(1)弹性阶段:该阶段试件尚未发生开裂,空心板试件处于弹性状态。(2)弹塑性阶段:该阶段空心板试件已发生开裂,整体抗弯刚度有所降低,但整体仍呈现较好弹性状态。(3)塑性至破坏阶段:普通钢筋进入屈服状态,该阶段中CFRP被拉断,加载荷载达到峰值1 060 kN,跨中挠度为138 mm;随位移荷载继续增大,加载至跨中下挠达到538 mm时(峰值荷载下挠的3.9倍)承载力开始下降;最终顶部UHPC被压碎,试件承载力迅速下降,发生破坏。试件的塑性阶段荷载-挠度曲线有较长的水平段,即试件在钢筋屈服和CFRP破坏后仍可保持较高的承载力,具有较好安全性。

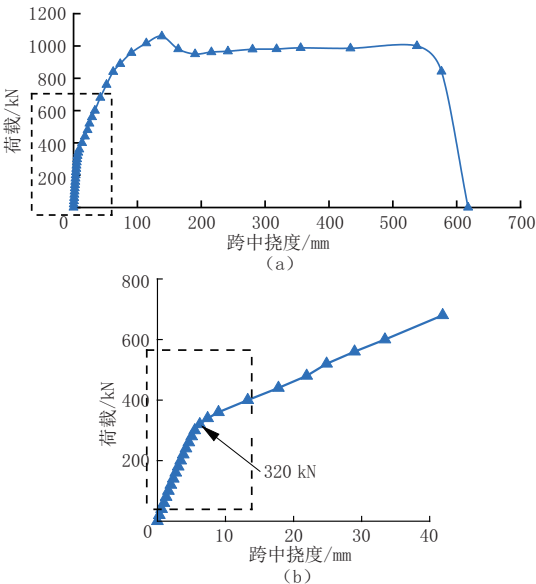


图5 荷载-挠度曲线

2.3 裂缝扩展

试件的荷载-最大裂缝宽度曲线见图6,UHPC和CFRP加固后,试件底部抗裂能力得到提高。最大裂缝宽度增大至0.2 mm时,试件对应荷载为480 kN,约为极限荷载 P_u 的0.45倍;当加载至480 kN时裂缝扩展速度变缓;试件纵筋发生屈服后,底部裂缝增长速度迅速加快,峰值荷载时最大裂缝宽度达到1 mm。加固后结构带裂缝工作时仍有较大安全余量,CFRP对底部加固可有效减缓空心板底板裂缝扩展速度。

3 开裂弯矩和承载力计算分析

为进一步推广UHPC+CFRP组合加固在桥梁加固领域中的应用,需对UHPC+CFRP组合加固空心板后抗弯性能结合现行规范进行理论分析,并结合上述试验结果提出开裂弯矩和极限弯矩的简化计算方法。

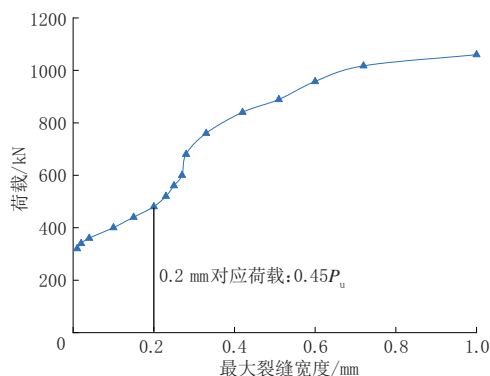


图6 荷载-最大裂缝宽度曲线

3.1 开裂弯矩

采用钢材、混凝土面积不变和截面抗弯刚度相等的方法,对空心板标准截面进行等效。计算时不考虑结构顶板、腹板构造钢筋和受拉区普通混凝土的贡献,受压区仅考虑 UHPC 和空心板混凝土对抗压强度的影响,受拉区仅考虑 CFRP、预应力钢筋和底板普通钢筋对抗拉强度的影响。

空心板开裂前基本上处于弹性工作状态,基于平截面假定,应力与应变成正比,受压区与受拉区混凝土应变接近直线分布,受压区 UHPC 应力分布为梯形分布,见图 7。

试件的开裂弯矩按式(1)~式(5)计算,

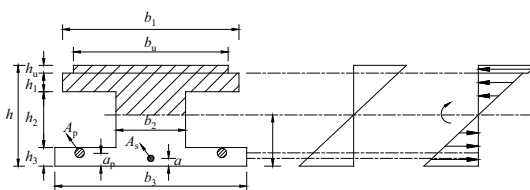


图7 试件初裂时梁截面应力应变分布

$$S = (\alpha_1 - 1)(A_s a_s + A_p a_p) + A_{底} \frac{h_3}{2} + A_{腹} (h_3 + \frac{h_2}{2}) + A_{顶} (h_3 + h_2 + \frac{h_1}{2}) + \alpha_2 A_U (h - \frac{h_U}{2}) \quad (1)$$

$$A = (\alpha - 1)(A_s + A_p) + A_{底} + A_{腹} + A_{顶} + \alpha_2 A_U \quad (2)$$

$$y = \frac{S}{A} \quad (3)$$

$$I = I_c + I_U + I_s + I_p \quad (4)$$

$$M_{cr} = \sigma_{cr} \frac{I}{y} \quad (5)$$

式中: M_{cr} 为开裂弯矩; α_1 、 α_2 为换算弹模比; $A_{底}$ 、 $A_{腹}$ 、 $A_{顶}$ 、 A_U 分别为空心板底板、腹板、顶板及 UHPC 层面积,见图 7。

计算结果汇总见表 2。UHPC+CFRP 加固后,截面高度增大 50 mm,考虑预应力钢束对空心板的预压应力储备,对加固试件开裂荷载进行计算,计算值为 509.6 kN·m 和试验值吻合较好,误差为 0.5%,表明该简化计算方法较为准确。

表2 开裂弯矩计算结果

编号	中性轴高度/mm	换算惯性矩/mm ⁴	跨中截面底部应力/MPa				开裂弯矩/(kN·m)		①/②
			抗拉强度	自重	预应力	应力储备	计算值①	试验值②	
试验试件	330.2	2.58×10 ¹⁰	2.47	2.93	-6.92	-6.51	509.6	512	99.5%

注:①预应力筋张拉应力为 1 395 MPa,去除预应力损失后按 1 186 MPa 取值。

3.2 极限承载力

对于 UHPC+CFRP 组合加固空心板试件承载力计算,由于 UHPC 抗压强度是普通混凝土的 3~5 倍,极限状态时受压区均位于 UHPC 加固层内,不考虑普通混凝土和 UHPC 加固层的受拉贡献。极限弯矩按式(6)、式(7)计算。

$$f_s A_s + f_p A_p + f_{CFRP} A_{CFRP} = f_c b_1 x \quad (6)$$

$$M_u = f_s A_s (h - a_s - \frac{x}{2}) + f_p A_p (h - a_p - \frac{x}{2}) + f_{CFRP} A_{CFRP} (h - \frac{x}{2}) \quad (7)$$

式中: x 为截面受压区高度; M_u 为极限弯矩。

通过计算可得,试件加固后承载力为 1 779 kN·m,和计算值 1 926 kN·m 吻合较好,误差为 7.6%。本计算公式为简化算法,仅考虑底板受拉钢筋对承载力贡献,未考虑腹板纵筋对承载力贡献,加固试件计算值略低于试验值,计算结果偏安全。

4 结 语

(1) UHPC+CFRP 加固后空心板破坏模式为底部 CFRP 发生破坏脱落,继续加载 UHPC 发生压溃。由于 UHPC 材料的高韧性,组合加固后空心板具有较好的变形能力,结构延性有较大提升。

(2) UHPC+CFRP 加固后空心板具有较高的安全性。加固试件在达到峰值荷载 1 060 kN 时 CFRP 破坏,CFRP 破坏后试件仍可保持较高的承载力,承载力可保持跨中挠度达到 538 mm,为峰值荷载时跨中挠度的 3.9 倍;当最大裂缝宽度增大至 0.2 mm 时,试件对应荷载为 480 kN,约为极限荷载 P_u 的 0.45 倍,结构带裂缝工作时仍有较大安全余量;该加固方法可有效提高空心板试件延性和承载力,在空心板加固修复领域具有较好应用前景。

(3) 开裂弯矩、极限弯矩的试验结果与理论计算结果较吻合,开裂弯矩误差为 0.5%,极限弯矩误差为

7.6%, 计算结果偏安全, 该计算方法可为 UHPC 和 CFRP 组合加固混凝土桥梁的设计和计算提供参考。

参考文献:

[1] 张阳,黄松龄,刘颖峰,等. 预应力 UHPC 加固 RC 梁抗弯性能试验研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2022, 49(3): 23-31.

[2] 张阳,王豪,黄松龄,等. 钢板-UHPC 组合加固损伤 RC 梁的受弯性能试验研究[J]. 建筑结构, 2024, 54(23): 90-96.

[3] 王连华,龚志权,李立峰,等. UHPC 加固空心板梁现场足尺抗弯试验研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2024, 51(9): 15-23.

[4] 孙霄,张文水,吴文克,等. 纤维网格复合超高性能混凝土加固 RC 梁抗剪性能试验研究[J]. 混凝土, 2023(3): 32-36; 41.

[5] 寇佳亮,温江,齐悦,等. 超高性能混凝土加固受损钢筋混凝土梁受弯性能试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2025, 45(1): 217-228.

[6] 黄颖,王黎园. 预应力 UHPC 加固损伤梁抗弯性能参数分析与优化布设研究[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2025(4): 202-210.

[7] 王国林,张宇轩,杨家林,等. 超高性能混凝土板加固足尺钢筋混凝土梁抗剪性能[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(5): 2007-2014.

[8] 周聪,汪建群,陈继涛,等. 基于 UHPC 的 RC 梁抗扭加固新方法 & 试验[J]. 中国公路学报, 2023, 36(9): 119-133.

[9] 常跃,黄俊旗,种迅,等. 超高性能混凝土加固钢筋混凝土梁受弯性能研究[J]. 振动与冲击, 2024, 43(11): 288-296.

[10] Asmaa Said, Mahmoud Elsayed, Ahmed Abd El-Azim. Using ultra-high performance fiber reinforced concrete in improvement shear strength of reinforced concrete beams[J]. Case Studies in Construction Materials, 2022(1): e01009.

[11] Huang Yitao, Steffen Grünewald, Erik Schlangen, et al. Strengthening of concrete structures with ultra high performance fiber reinforced concrete (UHPFRC): A critical review[J]. Construction and Building Materials, 2022(336): 127398.

[12] 蔡雄庭,刘力,伍贤智,等. UHPC 加固 RC 梁受力性能试验研究[J]. 世界桥梁, 2024, 52(0): 117-124.

[13] 曹君辉,樊伟,李立峰,等. 基于 UHPC 的高性能桥梁结构研究与应用[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2022, 49(11): 1-32.

[14] 王廷彦,楚运飞,张军伟,等. FRP 加固钢筋混凝土短梁受弯性能及承载力计算[J]. 建筑结构, 2025(16): 1-9.

[15] 邓朗妮,杨洲,钟锰军,等. FRP 网格增强 ECC 加固钢筋混凝土梁裂缝研究[J]. 建筑结构, 2025(11): 138-144.

[16] 施嘉伟,吴倩倩,武善侠,等. 预应力 FRP 网格加固空心板梁桥的病害修复效果分析[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2024, 54(2): 407-415.

[17] JTG 3362—2018, 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范[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

官方网址: <http://www.csdqyfh.com> 电话: 021-55008850 联系邮箱: roadbridgeflood@163.com



广告