文章编号:1674-2974(2024)09-0015-09 DOI:10.16339/j.cnki.hdxbzkb.2024083

UHPC加固空心板梁现场足尺抗弯试验研究

王连华[1†],龚志权[2],李立峰[1],孙秀贵[3],黄哲标[1],吴焕征[1]
(1. 湖南大学 土木工程学院,湖南 长沙 410082;
2. 江西省交通设计研究院有限责任公司,江西 南昌 330022;
3. 湖南省交通规划勘察设计院有限公司,湖南 长沙 410008)

摘 要:为分析UHPC加固受损空心板梁的抗弯性能,设计制作了2片空心板梁以开展现场足尺抗弯试验研究.基于现场试验结果对比分析了未加固和加固空心板梁的破坏模式和荷载-跨中位移曲线.试验结果表明UHPC加固层可以有效改善受损空心板梁的破坏模式,并且加固空心板梁呈现出更好的抗弯和变形能力.与未加固空心板梁相比,加固空心板梁的开裂和极限荷载均得到明显提升,提升幅度分别达到11.5%和23.8%.此外讨论了UHPC层的加固机理,同时推导了加固空心板梁的抗弯极限承载能力公式,并将理论值与试验值进行对比.结果表明抗弯承载能力计算值和试验值的最大误差仅为1.1%,证明了理论公式的准确性.

关键词:超高性能混凝土;空心板梁;加固;现场足尺试验;破坏模式;抗弯承载能力
中图分类号:U443.32 **文献标志码**:A

Field Full-scale Experimental Study on Flexural Behavior of Hollow Slab Girder Strengthened by Ultra-high Performance Concrete

WANG Lianhua[1†], GONG Zhiquan[2], LI Lifeng[1], SUN Xiugui[3], HUANG Zhebiao[1], WU Huanzheng[1]
(1. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;
2. Jiangxi Communications Design and Research Institute Co., Ltd., Nanchang 330022, China;
3. Hunan Provincial Communications Planning, Survey & Design Institute Co., Ltd., Changsha 410008, China)

Abstract: To investigate the flexural performance of damaged hollow slab girders strengthened with UHPC, two hollow slab girders were designed and fabricated to perform the field full-scale experiments, and the failure modes and load-mid span deflection behavior of the unreinforced/reinforced girder were analyzed based on the comparison of field testing results. The experiment results show that the UHPC layer can effectively improve the failure mode of the damaged hollow slab girder, and the reinforced girder exhibits good flexural and deflection capacities. Compared with the unreinforced girder, the cracking and ultimate loads of the reinforced girder are increased by 11.5% and 23.8%, respectively. Moreover, the reinforcement mechanism of the UHPC layer was discussed, and the theoretical

* **收稿日期**:2023-09-22
基金项目:长沙市自然科学基金资助项目(KQ2202133),Natural Science Foundation of Changsha (KQ2202133);湖南省自然科学基金资助项目(2023JJ30152),Natural Science Foundation of Hunan Province (2023JJ30152);湖南省企业科技创新创业团队支持计划资助项目(2020),Scientific and Technological Innovation and Enterprises in Hunan Province (2020)
作者简介:王连华(1975—),男,湖南娄底人,湖南大学教授,博士
† 通信联系人,E-mail: Lhwang@hnu.edu.cn

formulas were derived to determine the ultimate bending moment of the reinforced girder, and the theoretical values were compared with the experimental results. The results show that the error between the calculated values and experimental ones is only 1.1%, which verifies the accuracy of the theoretical formulas.

Key words: ultra-high performance concrete; hollow slab girder; reinforcement; field full-scale experiment; failure mode; flexural bearing capacity

20世纪末,空心板梁桥在我国得到了广泛的应用.然而这些桥梁近年来普遍出现了顶板开裂和桥面渗水等病害,严重影响了桥梁的正常运营.桥梁工程中,通常采用增大截面、粘贴钢板以及张拉体外预应力等方法进行加固[1-3].总体而言,这些加固方法可以在一定程度上提高受损空心板梁桥的抗弯能力.然而局限于加固材料,对空心板梁耐久性的提升相对有限.同时也无法解决开裂和钢筋锈蚀等隐蔽性病害.因此,研发快速和经济实用的空心板梁加固技术具有重要的意义.

超高性能混凝土(Ultra-High Performance Concrete, UHPC)具有良好的韧性和超强的耐久性,不仅对受损部位进行高强和低渗透保护,而且能有效提高结构的使用寿命[4].Safdar等[5]开展了UHPC加固钢筋混凝土结构的正/负弯矩加载试验研究.Habel等[6]利用试验研究了UHPC加固钢筋混凝土构件的抗弯性能和时变特性.Prem等[7]开展了不同UHPC加固层钢筋混凝土的抗弯加固试验.Yin等[8]进行了UHPC加固混凝土梁弯剪耦合试验研究.Tanarslan等[9]进行了UHPC加固钢筋混凝土梁的试验研究.Ramachandra等[10]利用UHPC加固循环荷载作用下的钢筋混凝土研究了梁体的断裂行为和弹塑性行为.这些研究表明UHPC可以明显提高混凝土梁的承载能力和耐久性能.然而这些研究主要关注梁体受拉区的性能提升,并不涉及空心板梁.从这个角度而言,基于UHPC的加固方法并不适用于空心板梁的加固.

为此,本文提出基于UHPC的空心板梁顶板的快速加固方法,并进行相应的现场足尺抗弯试验研究,通过分析UHPC层对空心板梁抗弯性能的影响,从而揭示UHPC层的加固机理.此外推导加固空心板梁的承载能力公式,并利用试验结果对理论值的准确性进行验证.

1 试验概况

1.1 空心板梁加固设计

基本思路是利用UHPC的优越性能对空心板梁顶板进行加固.对于这种加固,具有高强和高致密特性的UHPC能够解决顶板性能较差和渗水等问题.相反受损顶板可作为UHPC层的浇筑基底.此外,新浇筑的UHPC层能够增大空心板梁的截面刚度和抗弯承载能力.

为了验证加固思路的可行性,从湘潭二桥北引桥选取了2片寿命长达29年的受损空心板梁作为试件.这些空心板梁全长15.96 m、宽99 cm、高70 cm,顶板宽94 cm,梁体自重为139.7 kN,如图1所示.梁体采

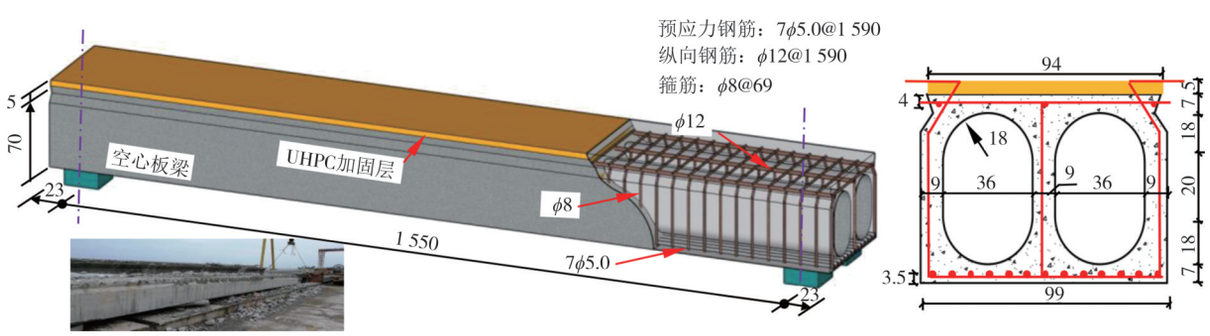


图1 空心板梁几何尺寸与钢筋构造图(单位:cm)

Fig.1 Dimensions and reinforcement construction of hollow slab girder (unit: cm)

用标号为40的混凝土,轴心抗压标准值28 MPa,抗拉标准值2.6 MPa.受拉区布置了13束ϕ^j_{15}(7ϕ5.0)钢绞线,张拉控制应力为1 095 MPa.受压区布置3根直径12 mm的Ⅱ级钢筋,抗压强度设计值为340 MPa.总体而言,两片空心板梁均存在腹板破损、顶板破损和钢筋暴露的病害.将其中一片空心板梁作为未加固梁用来确定原梁的抗弯性能,而将另一片梁采用UHPC进行加固作为加固梁.首先将空心板梁的桥面铺装层全部剔除,对加固界面进行凿毛处理,并使用高压水枪将凿毛后的界面清理干净.同时在空心板梁顶板制作模板,并保持基底充分湿润24 h.然后在表面浇筑5 cm厚的UHPC加固层,并覆盖塑料薄膜进行低温60 ℃蒸养72 h.加固后的空心板梁如图1所示.

为了保证结构的耐久性能与防渗性能,参考已有UHPC加固钢筋混凝土构件相关文献的试验结果,本文UHPC加固层的厚度为5 cm.同时,为了减少UHPC的收缩徐变,UHPC层需配置不小于8 mm、间距不小于25 cm的构造钢筋.此外,根据《公路桥梁加固设计规范》(JTG/T J22—2008)[11],设计植筋的深度为12 cm,横桥向间距为80 cm,顺桥向间距为20 cm,钢筋直径为10 mm.最终,加固后的内部构造如图2所示.

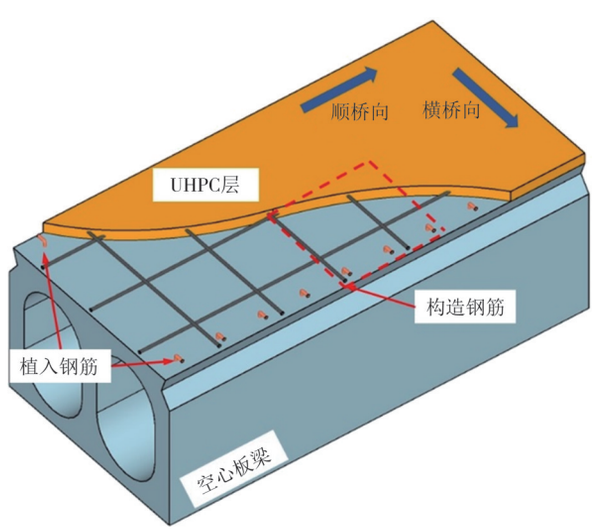


图2　加固梁内部构造图

Fig.2　Internal structure of reinforced beams

根据《混凝土物理力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2019)[12]对UHPC进行材料性能测试.在材料性能试验中,采用静力受压弹性模量试验测试了UHPC的弹性模量.同时,参考《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)[13],轴心抗压强度f_{ck}按$f_{ck}=0.88\alpha_{c1}\alpha_{c2}f_{cu,k}$计算,其中$\alpha_{c1}$为棱柱强度与立方体强度比值,取0.82;$\alpha_{c2}$为脆性折减系数,取0.87.此外,根据《活性粉末混凝土》(GB/T 31387—2015)[14],制作了3个抗折试件(100 mm×100 mm×400 mm),并根据《混凝土物理力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2019)测试了UHPC的抗折强度.抗折强度的计算公式为:

$$f_1=\frac{Fl}{bh^2} \tag{1}$$

式中:f_1为UHPC抗折强度;F为破坏荷载;l为支座间距;b为截面宽度;h为截面高度.

表1给出了UHPC的主要材料力学性能.

表1　UHPC主要材料力学性能

Tab.1　Key material mechanical properties of UHPC

材料特性	试验平均值
立方体抗压强度/MPa	124.7
轴心抗压强度/MPa	78.3
抗折强度/MPa	19.0
弹性模量/GPa	41.5

1.2　加载装置设计与制备

为了进行现场足尺试验,设计并制作了现场足尺试验加载装置,如图3所示.其中试验梁简支在试验台座,而压力传感器放置于试件与分配梁之间,并在分配梁上堆放混凝土块.加载之前,千斤顶和承压墩共同承受分配梁与混凝土块的所有荷载.加载时,利用液压同步装置控制千斤顶的升降,将荷载通过分配梁传递至试件,从而实现四点弯曲加载.

1.3　测点布置与加载方案

为了确定试件的位移和挠曲线,在1/4跨、加载点和跨中位置的底板处分别布置5个百分表,在两

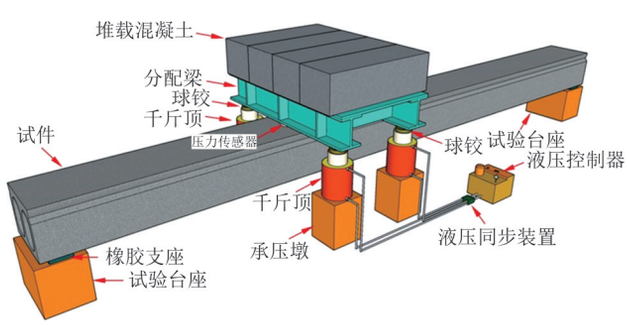


图3　桥梁结构现场足尺试验加载装置

Fig.3　Loading device for field full-scale experiment

端支座线中心的梁顶处布置2个百分表.同时,在跨中、1/4跨和支座中心线位置的加固界面处沿纵向布置5个水平千分表用于测试UHPC与混凝土的界面滑移量.在跨中区域每间隔1 m的截面处分别沿底板、腹板、顶板均匀布置11个应变片用于测试混凝土的应变.同时,共粘贴了3个应变片用于测试两者的应变.试件的测点布置如图4所示.

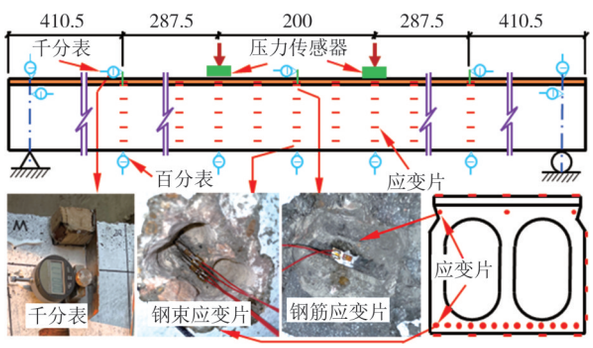


图4 UHPC加固空心板梁足尺抗弯试验测试方案

Fig.4 Full-scale bending test scheme of UHPC reinforced hollow slab girders

本次试验在新型加载装置的加载原理上利用空心板梁替换了钢分配梁,利用承压墩取代了其中一侧千斤顶,进一步节约了大量成本.加载方式为四点弯曲加载,在距离跨中1 m的位置处对称布置了2个荷载传感器用于传递荷载并输出荷载值.采用同步顶升装置控制加载,该装置由千斤顶、液压同步装置和油泵组成.在加载前期,采用每级荷载增量为30 kN的分级加载,并在试件接近开裂状态时将荷载增量减小至10 kN.试件开裂后,记录每级荷载下裂缝的形态、长度和宽度.在加载后期,采用位移增量为0.1 mm的位移控制加载.试验加载现场如图5所示.



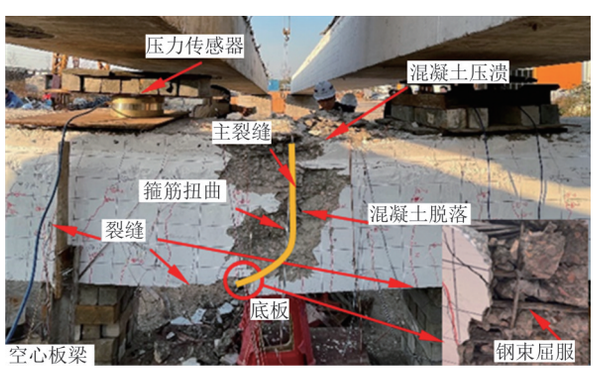
图5 现场加载方案

Fig.5 Field loading scheme

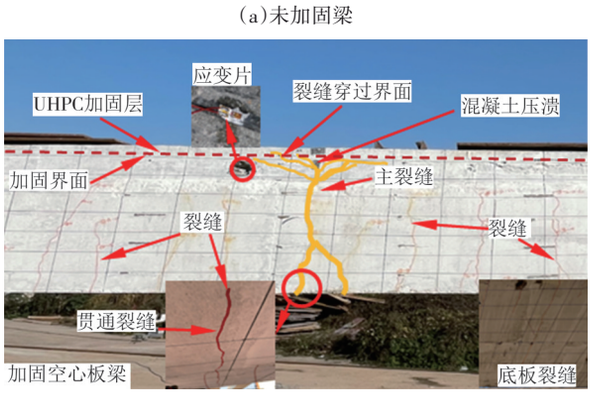
2 试验结果分析

2.1 破坏模式和裂缝形态

图6给出了未加固梁与加固梁的破坏模式和裂缝形态.可以看出两片梁均发生了典型的弯曲破坏.然而,破坏形态具有明显不同.总体而言,未加固梁出现了跨中底板和腹板大面积混凝土脱落,梁体沿主裂缝断裂,底部预应力钢束屈服,腹板和底板的钢筋部分外露等现象.同时箍筋也发生了一定的扭曲.相反,加固梁并没有发生表面混凝土脱落和梁体沿主裂缝断裂的现象.显然,UHPC层明显改善了加固空心板梁的破坏模式.此外还可以看出加固梁腹板的裂缝数量明显增多.



(a)未加固梁



(b)加固梁

图6 试验梁破坏模式和裂缝形态

Fig.6 Failure mode and crack pattern of the test girders

从加固的角度而言,顶板UHPC层直接增大了加固梁的抗弯刚度,从而导致加固梁裂缝发展范围更大.相反受损空心板梁在受压区的压应力主要集中在UHPC层,因此梁体的受力形式和变形能力得到了大幅改善.实际上,加固梁在达到峰值荷载时钢束和顶板UHPC均进入了屈服状态.然而空心板梁

仍具有良好的承载能力.

2.2　裂缝宽度

图 7 给出了加固梁与未加固梁的荷载-裂缝宽度曲线.可以看出,两片梁的荷载-裂缝宽度曲线表现出相同的增长趋势.实际上,在试件达到屈服荷载前曲线呈线性增长,而在加载至屈服荷载后曲线斜率随荷载增大而缓慢减小.然而加固梁的裂缝宽度小于未加固梁,并且裂缝增长速度明显小于未加固梁.因此,UHPC加固层似乎可以有效抑制空心板梁后期裂缝宽度的扩展速度.

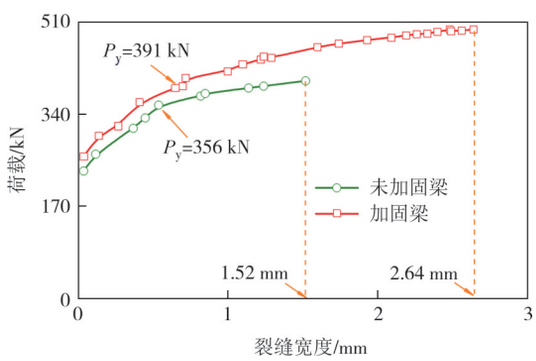


图 7　加固梁和未加固梁的荷载-裂缝宽度曲线

Fig.7　Load-crack width curves of reinforced and unreinforced beams

2.3　变形特性

2.3.1　荷载-跨中位移曲线

图 8 给出了加固梁与未加固梁的荷载-跨中位移曲线.可以看出,两片梁在荷载作用下分别经历了 4 个不同阶段:弹性阶段、弹塑性阶段、全塑性阶段以及破坏阶段.总体而言,未加固梁荷载-跨中位移曲线在弹性阶段呈线性增长.当加载至 234 kN 后,曲线斜率轻微地减小;当达到 356 kN 时,曲线斜率明显减小;在经历最大荷载 400 kN 后,曲线进入下降段,最终在跨中位移快达到 160 mm 时发生梁体断裂.相反,加固梁在各阶段的曲线斜率均更大,并且在破坏时的跨中位移值明显增大.显然空心板梁在加固层的作用下刚度和变形能力得到明显提高.具体而言,加固梁相对未加固梁的开裂荷载 P_{cr} 增大 11.5%,极限荷载 P_u 增大 23.8%.

2.3.2　挠曲线

为了更加明确地反映变形特性,图 9 给出了未加固和加固空心板梁的挠曲线.可以看出,未加固梁在加载初期挠曲线增幅较小,当荷载增加至开裂荷载后跨中挠度大幅增加,同时挠曲线以跨中挠度为最大值向梁端依次减小成对称分布.当加载至极限

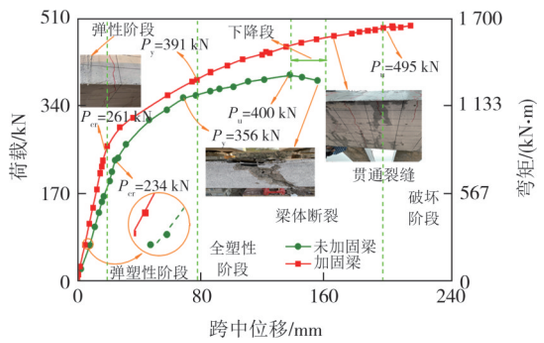


图 8　加固梁和未加固梁的荷载-跨中位移曲线

Fig.8　Load-mid span deflection curves of reinforced and unreinforced beams

荷载时,可以明显地看出挠曲线在跨中位置形成较大的曲率[图 9(a)].相反,加固梁挠曲线并没有在跨中位置形成较大的曲率,整段挠曲线的曲率也更加均匀[图 9(b)].因此,经过加固后的空心板梁整体受弯变形特性得到了明显的改善.

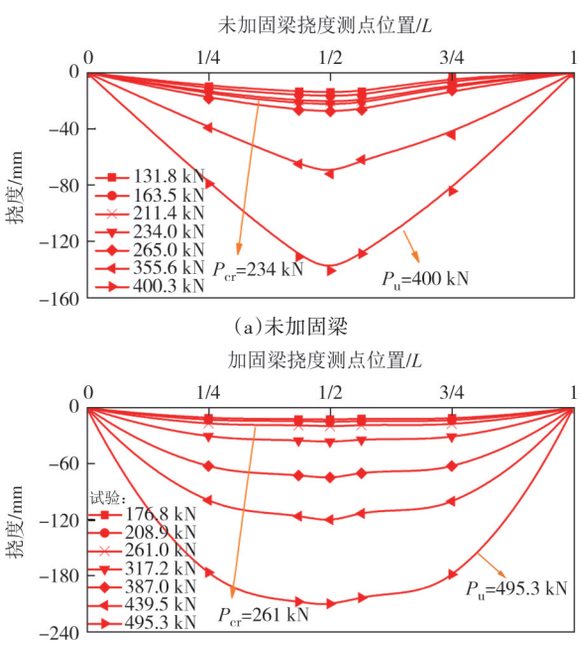


图 9　未加固梁和加固梁整体弯曲挠度分布特征对比

Fig.9　Comparison of the overall bending deflection distribution characteristics between unreinforced and reinforced beams

2.3.3　延性

为了研究 UHPC 层对空心板梁延性的影响,引入了延性系数 μ:

$$\mu = \frac{\Delta_y}{\Delta_u} \tag{2}$$

式中:Δ_y 为屈服挠度;Δ_u 为荷载下降至 85% 峰值荷载时对应的极限挠度.

表2给出了未加固梁和加固梁的屈服位移、极限位移以及延性系数的计算结果.可以看出,加固梁延性系数相对未加固梁提高了45%.这是由于未加固梁的顶板混凝土的抗压性能受损,在钢束达到屈服强度后便迅速达到抗压强度,导致未加固梁的极限位移较小.相反,加固梁在钢束达到屈服强度后UHPC远未达到抗压强度,此后仍能发生较大的变形.

表2 试验梁位移和延性系数

Tab. 2 Displacement and ductility coefficients of the test girders

试件	屈服位移/mm	极限位移/mm	极限荷载/kN	延性系数μ	提升程度/%
未加固梁	101.42	156.03	400.1	1.53	—
加固梁	97.44	216.31	495.0	2.22	45

2.4 荷载-应变曲线

2.4.1 预应力钢束

图10给出了未加固梁与加固梁受拉钢束的荷载-应变曲线.由于开裂之后拉应力由混凝土传递至受拉钢束,应变增速突然变大,因此两片空心板梁在开裂之后的斜率都大幅减小.然而加固梁在相同荷载作用下的应变值更小,且钢束应变极限值获得大幅提升,钢束屈服荷载提升了10%.这表明UHPC层能够减小空心板梁的受拉钢束应变增速,可以有效提高钢束的延性利用率.

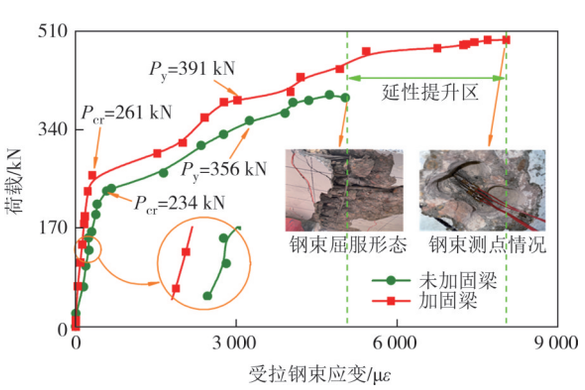


图10 试验梁跨中截面受拉钢束荷载-应变曲线

Fig.10 Load-strain curves of tensile steel bundles at the mid span section of the test beams

2.4.2 受压区钢筋

图11给出了跨中截面受压钢筋荷载-应变曲线.对于未加固梁而言,受压钢筋的荷载-应变曲线在屈服荷载之前呈线性增长.然而,达到屈服荷载时跨中截面刚度很小,受压钢筋应变急速增大.因此,当加载至屈服荷载时,曲线的斜率几乎为零.相反,由于加固层增大了截面高度,在加载过程中加固梁的中性轴会逐渐靠近受压钢筋.因此,加固梁在加载至屈服荷载后受压钢筋应变开始随着荷载的增加逐渐减小至零.

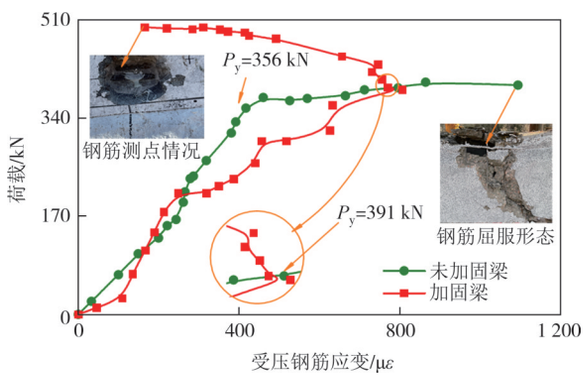


图11 试验梁跨中截面受压钢筋荷载-应变曲线

Fig.11 Load-strain curves of compressed steel bars at the mid span section of the test beams

2.4.3 顶板混凝土

图12给出了试验梁跨中截面受压区混凝土的荷载-应变曲线.可以看出未加固梁在开裂荷载之前曲线呈线性增长,开裂之后曲线斜率减小.相反,屈服后曲线斜率几乎骤减至零.同时,可以看出未加固梁破坏时应变水平并未达到峰值压应变.相反,加固梁由于受压区应力主要集中于UHPC加固层,在相同荷载的情况下顶板混凝土应变值更大,破坏时梁顶UHPC应变值远大于未加固梁.

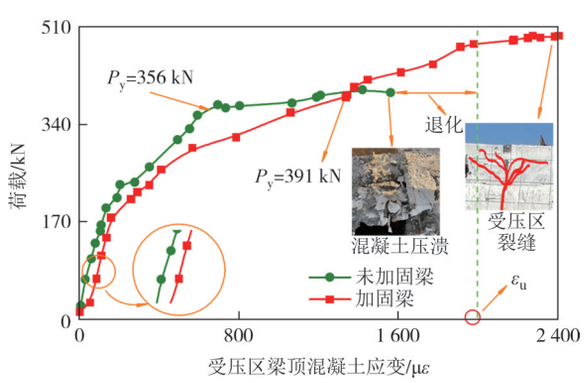


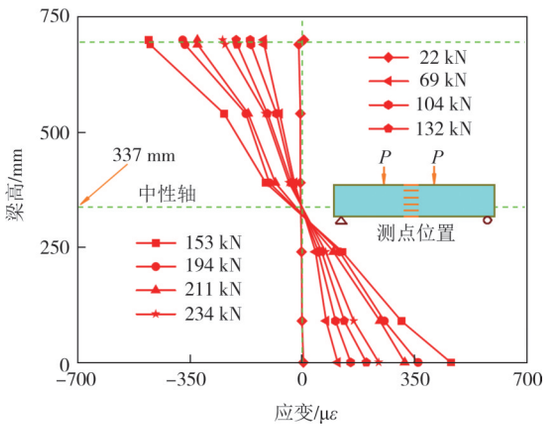
图12 试验梁跨中截面受压区混凝土荷载-应变曲线

Fig.12 Load-strain curves of concrete in the compression zone of the test beam at the mid span section

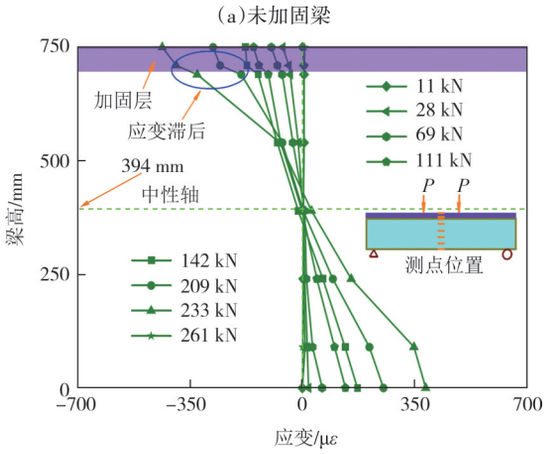
2.4.4 截面应变

图13给出了未加固梁与加固梁的跨中截面应变分布.可以看出未加固梁的跨中截面应变沿梁高呈线性分布,且中性轴处的应变均接近零.因此,平截面假定基本成立.相反,加固梁由于滑移效应引发

了加固界面处的应变滞后现象,从而使得截面应变仅在加固层以下梁高区域呈线性分布.因此,UHPC层对空心板梁的平截面假定存在一定影响.



(a)未加固梁



(b)加固梁

图 13　未加固与加固梁跨中截面应变分布

Fig.13　Strain distribution of mid span sections of unreinforced and reinforced beams

2.5　滑移

图 14 给出了加固梁界面相对滑移曲线,其中SL1~SL5分别为5个千分表对应的加固梁滑移测点位置.可以看出,当荷载达到208.9 kN时,界面出现微弱滑移,此后相对滑移值随荷载的增加不断增大.总体而言,同一荷载下相对滑移沿空心板梁跨中呈现反对称分布,且界面滑移最大值不超过0.2 mm.这表明UHPC具有高效的黏结性能.

3　抗弯承载能力计算公式

保持截面面积、转动惯量和质心位置不变,将空心板截面等效为工字截面,如图15所示.其中,b_{f1}为截面顶板宽度,b_{f2}为截面底板宽度,b_w为腹板宽度,

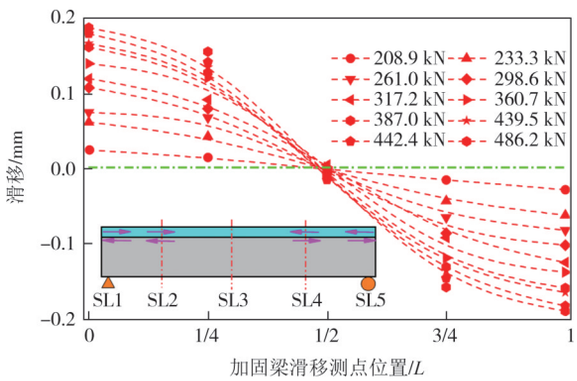


图 14　空心板加固梁界面的相对滑移

Fig.14　Relative slip of reinforcement interface of hollow slab beam

R_j为半圆内孔半径,h_j为矩形内孔高,h_0为加固前空心板梁高度,h_u为UHPC层厚度,h为加固后空心板梁高度,h_w为腹板高度,h_{f1}为上翼缘板厚度,h_{f2}为下翼缘板厚度,a'_s为受压钢筋合力作用点与上翼缘板顶缘之间的距离,a_p为受拉钢束合力作用点与梁底之间的距离,A'_s为受压钢筋面积,A_p为预应力钢束面积.

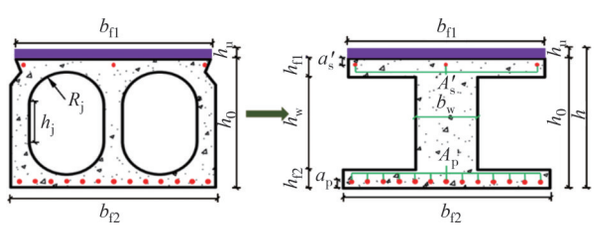


图 15　截面等效换算示意图

Fig.15　Cross-sectional equivalent conversion diagram

根据试验结果,加固梁受压区UHPC达到抗压强度时,临近的普通混凝土已经失效.同时,极限状态下的受压区钢筋应力接近零.因此,可考虑加固梁在极限状态下受拉区仅由钢束承担拉应力,而受压区仅由UHPC承担压应力,两者均可达到强度设计值.相应的加固梁极限状态力学分析模型如图16所示.

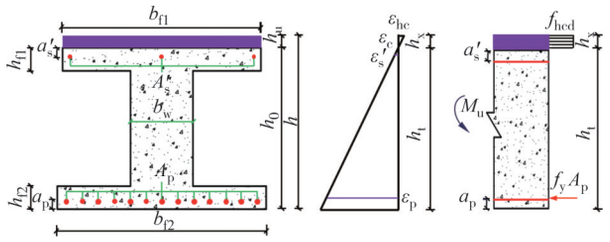
轴力平衡方程可以表示为:

$$f_{hcd} b_{f1} h_x = f_y A_p \tag{3}$$

式中:f_{hcd}为UHPC的抗压强度设计值;h_x为受压区高度;f_y为预应力钢束的屈服应力.

根据式(3)可求得相应的受压区高度h_x,加固空心板梁的抗弯承载能力计算公式为:

$$M_u = f_{hcd} b_{f1} h_x \left(h - a_p - \frac{h_x}{2} \right) \tag{4}$$



(a)加固梁截面示意图 (b)应变分布 (c)等效应力分布

图 16 加固梁抗弯承载能力计算图示

Fig.16 Calculation diagram of bending capacity

为了验证本文所提出计算公式的准确性,将未加固梁和加固梁的抗弯承载能力试验值与采用式(4)计算的理论值进行对比分析,结果如表3所示.可以看出,试验梁开裂荷载与极限荷载的理论计算值与试验值吻合良好,最大误差为1.1%,表明本文提出的理论公式可以较好预测UHPC加固空心板梁前后的抗弯承载能力.

表3 试验梁特征荷载理论值与试验值对比

Tab. 3 Comparison between theoretical and experimental values of characteristic loads on experimental beams

试件	极限荷载 M_u/(kN·m)		误差/%
	试验值	理论值	
未加固梁	1 606.4	1 596.3	0.6
加固梁	1 927.0	1 905.4	1.1

4 讨论

为了进一步论证本文加固方法的可行性,利用文献[3]中提供的公式计算普通混凝土C50加固空心板梁的极限抗弯承载能力,其中C50加固层厚度与UHPC加固层厚度保持一致.总体而言,采用C50加固空心板梁的极限荷载为1 461.7 kN,而采用UHPC加固空心板梁的极限荷载为1 927.0 kN.显然采用UHPC加固空心板梁的极限荷载提升了31.8%.

另外,UHPC的弹性模量明显大于普通混凝土的弹性模量.因此UHPC加固空心板梁的截面抗弯刚度明显大于普通混凝土加固空心板梁的抗弯刚度.显然,从理论的角度,在相同荷载作用下,UHPC加固构件的裂缝宽度小于C50加固构件的裂缝宽度.此外,目前UHPC相对普通混凝土的造价较高,然而凭借UHPC的超强耐久性,可以使加固后的普通混凝土梁桥获得更长的寿命.因此,从加固理念的长期效益而言,采用UHPC加固普通混凝土梁桥的技术在桥梁工程中仍具有可行性.

5 结论

本文开展了2片空心板梁的四点弯曲试验,研究UHPC层对受损梁抗弯性能的影响规律,并推导了UHPC加固空心板梁抗弯承载能力的计算公式.主要结论如下:

1)未加固梁发生弯曲破坏时出现梁体断裂的现象,并伴随大面积混凝土脱落.相反,加固梁发生典型的弯曲破坏,其裂缝数量明显增多,裂缝分布范围显著增大.对比未加固梁,加固梁的开裂荷载提升11.5%,钢束屈服荷载提升10.0%,极限荷载提升23.8%.

2)加固梁呈现出良好的抗弯和变形能力,其挠曲线的曲率更加平顺均匀.此外,加固梁延性系数提高了45%.

3)加固梁受拉钢束的延性利用率获得大幅提升.同时未加固梁受压钢筋应变随荷载的增加逐渐增大,而加固梁受压钢筋在进入屈服阶段后应变随着荷载的增加逐渐减小至零.

4)利用UHPC加固空心板梁理论公式计算抗弯承载能力,并与试验值进行对比.结果表明两者的误差不超过1.1%.因此本文提出的理论公式具有良好的精度.

参考文献

[1] JONES R, SWAMY R N, CHARIF A. Plate separation and anchorage of reinforced concrete beams strengthened by epoxy-bonded steel plates[J]. Structural Engineer, 1988, 66(12): 187-188.

[2] 聂建国,赵洁. 钢板-混凝土组合加固钢筋混凝土简支梁试验研究[J]. 建筑结构学报,2008, 29(5):50-56.
NIE J G, ZHAO J. Experimental study on simply supported RC beams strengthened by steel plate-concrete composite technique [J]. Journal of Building Structures, 2008, 29(5): 50-56. (in Chinese)

[3] 王世超,王春生,王茜,等. 组合加固足尺预应力混凝土空心板梁抗弯性能[J]. 交通运输工程学报,2018,18(2):31-41.
WANG S C, WANG C S, WANG Q, et al. Flexural behaviors of

full-scale prestressed concrete hollow slab girders with composite strengthening [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering,2018,18(2):31-41.(in Chinese)

[4] SHI C, WU Z M, XIAO J F, et al. A review on ultra high performance concrete: part Ⅰ. raw materials and mixture design [J]. Construction and Building Materials,2015,101:741-751.

[5] 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.

[6] HABEL K, DENARIÉ E, BRÜHWILER E. Experimental investigation of composite ultra-high-performance fiber-reinforced concrete and conventional concrete members[J]. ACI Structural Journal,2007,104(1):93-101.

[7] PREM P R, MURTHY A R. Acoustic emission and flexural behaviour of RC beams strengthened with UHPC overlay [J]. Construction and Building Materials,2016,123:481-492.

[8] YIN H, TEO W, SHIRAI K. Experimental investigation on the behaviour of reinforced concrete slabs strengthened with ultra-high performance concrete [J]. Construction and Building Materials,2017,155:463-474.

[9] TANARSLAN H M, ALVER N, JAHANGIRI R, et al. Flexural strengthening of RC beams using UHPFRC laminates: bonding techniques and rebar addition [J]. Construction and Building Materials,2017,155:45-55.

[10] RAMACHANDRA MURTHY A, KARIHALOO B L, VINDHYA RANI P, et al. Fatigue behaviour of damaged RC beams strengthened with ultra high performance fibre reinforced concrete [J]. International Journal of Fatigue,2018,116:659-668.

[11] 公路桥梁加固设计规范:JTG/T J22—2008[S]. 北京:人民交通出版社,2008.
Specifications for strengthening design of highway bridges: JTG/T J22—2008 [S]. Beijing: China Communications Press, 2008.(in Chinese)

[12] 混凝土物理力学性能试验方法标准:GB/T 50081—2019[S]. 北京: 中国建筑工业出版社,2019.
Standard for test methods of concrete physical and mechanical properties: GB/T 50081—2019[S]. Beijing: China Architecture & Building Press,2019.(in Chinese)

[13] 混凝土结构设计规范: GB 50010—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社,2011.
Code for design of concrete structures: GB 50010—2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011.(in Chinese)

[14] 活性粉末混凝土: GB/T 31387—2015[S]. 北京:中国标准出版社, 2015.
Reactive powder concrete: GB/T 31387—2015 [S]. Beijing: Standards Press of China,2015.(in Chinese)