

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, 44(2): 202-210. DOI: 10.11956/j.issn.1008-0562.20240123

HUANG Ying, WANG Liyuan. Parameter analysis and optimized deployment study of flexural performance of prestressed UHPC-reinforced damaged beams[J]. Journal of Liaoning Technical University(Natural Science), 2025, 44(2): 202-210. DOI: 10.11956/j.issn.1008-0562.20240123

预应力UHPC加固损伤梁抗弯性能参数分析与优化布设研究

黄颖¹, 王黎园²

(1. 福建船政交通职业学院 土木工程学院 福建 福州 350007; 2. 福州大学 土木工程学院, 福建 福州 350108)

摘要: 为优化超高性能混凝土(UHPC)加固层布设并提升其性能, 采用数值模拟及试验对比方法, 分别利用无配筋UHPC、普通配筋UHPC、预应力UHPC加固损伤RC空心板梁, 研究不同加固状态下梁体的受力性能及加固层厚度、长度、预应力对梁体加固效果的影响。研究结果表明: 与普通配筋UHPC加固相比, 预应力UHPC加固能改善梁体应力状态, 有效地约束裂缝的发展, 极大地提高被加固空心板梁的承载力和刚度, 梁体的开裂荷载、屈服荷载和抗弯极限承载力均提升显著, 加固防护更加高效耐久; 对比分析加固层厚度、长度、预应力等参数变化, 提出加固层优化建议。研究结果可为UHPC加固损伤梁体设计提供参考。

关键词: 预应力; 超高性能混凝土; 混凝土损伤模型; 加固技术; 抗弯性能; 梁体

中图分类号: TU375.1

文献标志码: A

文章编号: 1008-0562(2025)02-0202-09

Parameter analysis and optimized deployment study of flexural performance of prestressed UHPC-reinforced damaged beams

HUANG Ying¹, WANG Liyuan²

(1. College of Civil Engineering, Fujian Chuanzheng Communications College, Fuzhou 350007, China; 2. College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

Abstract: To optimize the layout of ultra-high-performance concrete (UHPC) reinforcement layer and improve its performance, numerical simulation and experimental comparison methods were used to study the stress performance of damaged RC hollow slab beams reinforced with unreinforced UHPC, ordinary reinforced UHPC, and prestressed UHPC under different reinforcement states, as well as the influence of reinforcement layer thickness, length, and prestress on the reinforcement effect of the beam. The research results show that compared with ordinary reinforced UHPC reinforcement, prestressed UHPC reinforcement can improve the stress state of the beam, effectively restrain the development of cracks, greatly improve the bearing capacity and stiffness of the reinforced hollow slab beam, and significantly increase the cracking load, yield load, and bending ultimate bearing capacity of the beam. The reinforcement protection is more efficient and durable. The changes in parameters such as thickness, length, and prestress of the reinforcement layer are compared and analyzed, and suggestions for optimizing the reinforcement layer are proposed. The research results can provide reference for the design of UHPC reinforced damaged beams.

Keywords: prestressed; ultra-high-performance concrete; concrete damage model; reinforcement technology; flexural behavior; beam

收稿日期: 2024-05-12 修回日期: 2024-08-12 接受日期: 2024-08-30 责任编辑: 黄琦

基金项目: 国家自然科学基金项目(51878172); 福建省教育厅应用技术创新中心项目(闽教科[2018]105号);

福建省交通运输科技计划一般科技项目执行计划(YB202405)

作者简介: 黄颖(1982-), 女, 江西南城人, 博士, 教授, 主要从事预应力结构受力性能与耐久性方面的研究。

E-mail: huangying6820@163.com

0 引言

《2023 年交通运输行业发展统计公报》^[1]统计数据显示, 截至 2023 年末, 中国公路桥梁共计 107.93 万座, 总长超过 95 288.2 km, 其中, 中小桥梁占比为 82.6%。中小桥梁中的空心板梁桥受力形式简单、设计灵活、施工工艺成熟且经济性较好, 是较常见的桥梁形式。由于早期设计标准过低, 对交通量的增长缺乏预见性以及养护不达标等因素, 桥梁经常出现底板横向裂缝、腹板竖向裂缝、铰缝损伤等病害^[2-3], 若不及时进行加固处理, 会导致梁体安全性降低, 影响桥梁的正常使用。

目前, 空心板梁桥加固常用的两种形式为粘钢加固和碳纤维布加固^[3]。这两种加固方式均存在一定的局限性: 粘钢加固耐腐蚀性差; 碳纤维布加固只能提高构件的抗拉强度, 对结构的刚度几乎无影响^[3]。超高性能混凝土 (ultra-high performance concrete, UHPC) 因超高的力学性能、超强的抗拉韧性, 以及在抗腐蚀和抗氯离子侵蚀方面的优异特性, 在实际工程中得以应用^[4-5], 但 UHPC 价格高昂, 大面积推广应用受到限制。已有研究表明, 预制装配化可降低 UHPC 在服役期间产生的附加应力, 且通过施加界面压应力可增大 UHPC-RC (reinforced concrete, RC) 界面的抗剪能力^[6-7], 从而进一步提高 UHPC 和 RC 结构黏结界面的耐久性。ASHRAF 等^[8]通过倾斜剪切试验和劈裂拉伸试验, 检测普通混凝土与 UHPC 的黏结性能, 研究表明普通混凝土和 UHPC 之间的黏结性较好。GRAYBEAL 等^[9]对 UHPC 在桥梁中的应用进行综述, 分析 UHPC 的应用价值和前景。AL-OSTA 等^[10]在矩形梁底浇筑 UHPC, 研究表明加固后矩形梁的抗弯承载能力显著提高。TANARSLAN 等^[11]通过在 UHPC 中配置钢筋薄层来加固梁体, 发现梁体的极限承载力提升显著, 但抗弯刚度变化较小。ZHANG 等^[12]分别采用预

应力 UHPC 和普通钢筋 UHPC 来加固 2 根损伤的矩形梁体, 并进行抗弯性能分析。研究表明, 采取预应力钢筋加固后, 梁体的极限承载力和抗弯刚度有所提升, 裂缝的发展也得到进一步限制。DHAFFER 等^[13]研究表明施工缝会削弱 UHPC 加固效果。刘颖峰^[14]对 6 根 RC 工字梁开展抗剪性能试验, 发现 UHPC 加固可有效提高损伤工字梁的抗裂性能和抗剪承载力。

现有研究成果已证明了利用 UHPC 加固损伤梁的有效性, 但目前对于 UHPC 加固梁体的参数分析及优化设计的研究较少。本文在原有 2 根空心板梁加固试验^[3]的基础上, 采用预应力 UHPC 对损伤 RC 空心板梁进行加固防护, 通过有限元模拟, 研究预应力 UHPC 加固技术对空心板梁受力性能的影响, 并通过改变底板厚度、长度和预应力, 对比分析梁体加固效果, 为预应力 UHPC 加固技术在 RC 空心板梁中的推广应用提供参考。

1 空心板梁介绍

空心板梁由于构造简单, 工厂预制化量产便利, 施工工艺成熟且成本较低, 成为中小跨径桥梁的主要结构形式之一。以福州市城市桥梁为例, 装配式空心板桥的数量在中小型桥梁中占六成。但 20 世纪 80 年代以前修建的桥梁, 由于设计载荷标准低, 承载力不足, 且年久失修、维修养护不到位, 导致数以万计的空心板桥均发生不同程度的破损, 逐渐成为危桥, 影响交通的正常运营。本文针对已在福州大学土木工程学院实验室开展试验的 2 根空心板梁^[15]进行 UHPC 加固技术研究, 并与原试验结果进行对比分析。空心板梁设计参数见表 1。为防止锚下应力集中造成混凝土劈裂, 钢筋保护层厚为 25 mm。加固层设置 3 根钢筋, 配筋见图 1。预应力筋采用直径为 12.7 mm 的预应力钢绞线, 居中放置, 张拉控制应力为 1 860 MPa, 保护层厚为 10 mm。

表 1 空心板梁设计参数

Tab.1 design parameters of hollow slab beams

尺寸/m	混凝土 等级/MPa	受拉钢筋	受压钢筋	纵筋 配筋率/%	箍筋	剪跨比	加固层 预应力筋	加固层厚 /mm	加固层 等级/MPa
0.5×0.3×6	C40	4Φ12 2Φ10	4Φ10	0.7	Φ8@60/120	3.9	1Φ12.7	50	120

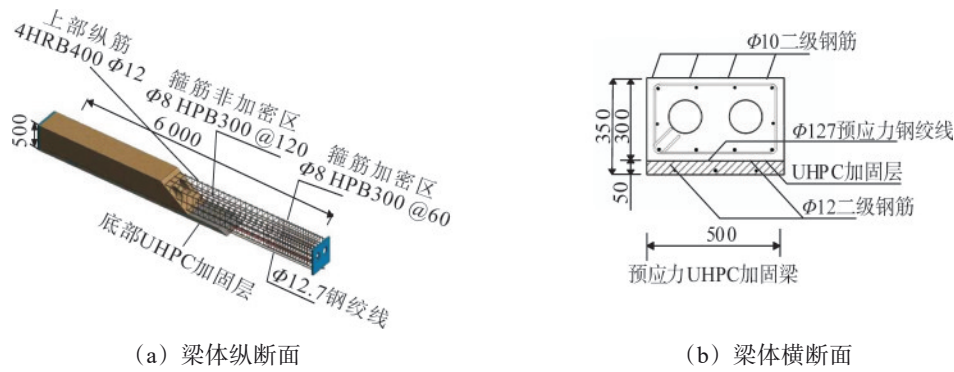


图 1 加固梁体配筋(单位:mm)

Fig.1 reinforced beam reinforcement (unit: mm)

2 UHPC加固损伤梁体有限元模拟

2.1 单元选择及相互作用界面

采用ABAQUS软件中的通用分析模块进行损伤梁体加固有限元模拟。混凝土单元采用八节点三维线性缩减积分实体单元C3D8R^[16],该单元可考虑混凝土开裂和压碎,具有抗剪切自锁功能,在梁体抗弯分析中计算结果较为准确^[12]。普通钢筋与预应力钢绞线采用T3D2单元进行简化处理,与混凝土单元的变形协调统一^[16]。UHPC加固层也采用C3D8R单元进行模拟。UHPC加固层与原梁体之间的黏结采用Cohesive单元进行模拟,该单元能提供一种假设界面厚为10 mm的黏聚力模型^[14-16],可模拟裂纹的产生和扩展,并与其他结构共用节点的方式来传递力和位移。黏聚力单元参数见表2。通过材性试验^[15]得到材性参数,见

表 3 单元类型及材料性质参数

Tab.3 unit type and material property parameters

材料	单元类型	弹性模量/MPa	泊松比	屈服强度/MPa	极限强度/MPa	剪胀角/(°)	黏性系数
普通混凝土	C3D8R	32 500	0.21			30	0.000 5
UHPC	C3D8R	42 100	0.30			36	0.005 0
纵筋	T3D2	200 000	0.30	440(Φ10);452(Φ12)	620(Φ10);640(Φ12)		
箍筋	T3D2	200 000	0.30	432	539		
预应力钢筋	T3D2	200 000	0.30	1 782			

注:纵筋分2种类型,直径分别为10 mm和12 mm。

2.2 材料本构模型

根据《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)^[18],混凝土采用单轴受压、单轴受拉应力-应变本构模型以及CDP混凝土损伤塑性模型^[18],参数取值见表4。

表3。以往的有限元分析大部分未考虑混凝土损伤,室内试验也基本采用新浇筑的梁体,但实际上加固是针对已损伤的梁体。为与实际情况更加吻合,本文采用混凝土塑性损伤模型(concrete damage plasticity, CDP)^[17],该模型通过混凝土塑性应变损伤因子对进入塑性状态的梁体进行刚度折减,考虑了混凝土在长久服役过程中的刚度退化特性,可更好地研究载荷作用下混凝土结构开裂损伤的非线性、随机性变化规律^[17]。

表 2 黏聚力单元参数

Tab.2 cohesive force unit parameters

参数	取值
法向刚度 $K_{nn}/(N \cdot mm^{-3})$	1 372
切向刚度 $K_{ss}, K_{tt}/(N \cdot mm^{-3})$	586
$t_n^0, t_s^0, t_t^0/MPa$	5.63
总位移/mm	0.241

注: t_n^0, t_s^0, t_t^0 分别为界面处法向接触应力、第一剪切方向剪切接触应力、第二剪切方向剪切接触应力。

表 4 CDP模型基本参数

Tab.4 CDP model basic parameters

材料	剪胀角/(°)	ε_c	f_{b0}/f_{c0}	k	黏性系数
普通混凝土	30	0.1	1.16	0.667 0	0.000 5
UHPC	36	0.1	1.16	0.666 7	0.005 0

注: ε_c 为塑性势函数偏心距; f_{b0} 为双轴抗压强度,MPa; f_{c0} 为单轴抗压强度,MPa; k 为沿拉压子午线的强度比。

普通钢筋采用弹塑性本构模型^[16],即

$$\begin{cases} \sigma = E_0 \varepsilon & \varepsilon \leq \varepsilon_0 \\ \sigma = f_y & \varepsilon > \varepsilon_0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: σ 为应力, MPa; ε 为应变; E_0 为弹性模量, MPa; f_y 为屈服强度, MPa; ε_0 为屈服应变。

预应力钢筋采用线性强化双折线弹塑性本构模型^[16],即

$$\begin{cases} \sigma = E_0 \varepsilon & \varepsilon \leq \varepsilon_0 \\ \sigma = f_y + E_r (\varepsilon - \varepsilon_0) & \varepsilon > \varepsilon_0 \end{cases} \quad (2)$$

式中, E_r 为强化段等效弹性模量, MPa。

《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)^[18]中,混凝土单轴受压本构模型为

$$\frac{\sigma}{f_c} = \begin{cases} \alpha_a x + (3 - 2\alpha_a)x^2 + (\alpha_a - 2)x^3 & x \leq 1 \\ \frac{x}{\alpha_d(x-1)^2 + x} & x > 1 \end{cases} \quad (3)$$

混凝土单轴受拉本构模型为

$$\frac{\sigma}{f_t} = \begin{cases} 1.2x - 0.2x^6 & x \leq 1 \\ \frac{x}{\alpha_t(x-1)^{1.7} + x} & x > 1 \end{cases} \quad (4)$$

式(3)、式(4)中: α_a 为单轴受压应力-应变曲线上升段的参数; α_d 、 α_t 均为单轴受拉应力-应变曲线下落段的参数; f_c 为单轴抗压强度设计值, MPa; f_t 为单轴抗拉强度设计值, MPa; $x = \varepsilon/\varepsilon_c$, ε_c 为受压峰值点处的应变。

普通混凝土单轴受压及受拉应力-应变参数取值见表5。

表5 普通混凝土单轴受压及受拉应力-应变参数取值

Tab.5 stress-strain parameters values for normal concrete under uniaxial compression and tension

参数	取值	参数	取值
f_c/MPa	40	α_t	1.25
f_t/MPa	2.0	$\varepsilon_c/10^{-6}$	1 790
α_a	1.90	$\varepsilon_t/10^{-6}$	95
α_d	1.94	$\varepsilon_{cu}/\varepsilon_c$	2.0

注: ε_t 为达到受拉峰值应力时所对应的应变; ε_{cu} 为极限压应变。

将表5中各参数代入式(3)和式(4),得到普通混凝土应力-应变曲线,见图2。

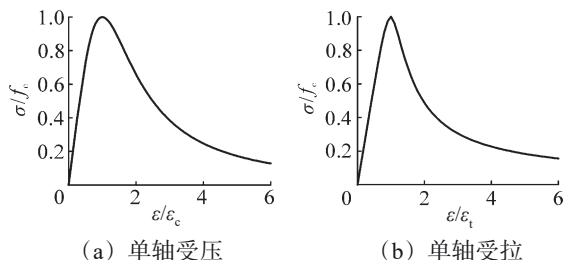


图2 普通混凝土应力-应变曲线

Fig.2 normal concrete stress-strain curve

为精确地模拟UHPC受力状态,其受拉变形采用双折线本构模型^[12],即

$$\frac{\sigma}{f_c} = \begin{cases} \frac{nx - x^2}{1 + (n-2)x} & 0 < x < 1 \\ \frac{x}{2(x-1)^2 + x} & x \geq 1 \end{cases} \quad (5)$$

式中: $n = E_c/E_s$, E_c 为初始弹性模量, MPa; E_s 为峰值点处的割线模量, MPa。

UHPC受压变形采用单轴受压本构模型^[19],即

$$\frac{\sigma}{f_t} = \begin{cases} \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{ca}} & 0 < \varepsilon \leq \varepsilon_{ca} \\ 1 & \varepsilon_{ca} < \varepsilon \leq \varepsilon_{pc} \\ \frac{1}{[1 + 400(\varepsilon - \varepsilon_{ca})]^{0.95}} & \varepsilon_{pc} < \varepsilon \end{cases} \quad (6)$$

式中: ε_{ca} 为产生受拉初始裂缝时所对应的应变; ε_{pc} 为受拉极限应变,参数取值见表6。

表6 UHPC单轴受压、受拉应力-应变参数取值

Tab.6 stress-strain parameters values for UHPC under uniaxial compression and tension

参数	取值	参数	取值
f_c/MPa	120	$\varepsilon_{pc}/10^{-6}$	765
f_t/MPa	7.84	ω/ω_p	400
n	1.228	p	0.95
$\varepsilon_{ca}/10^{-6}$	198		

注: ω 为裂缝宽, mm; ω_p 为曲线上应力下降至 2° 时的裂缝宽, 本文取 1 mm; p 为拟合参数。

根据式(5)和式(6),得到UHPC应力-应变曲线,见图3。

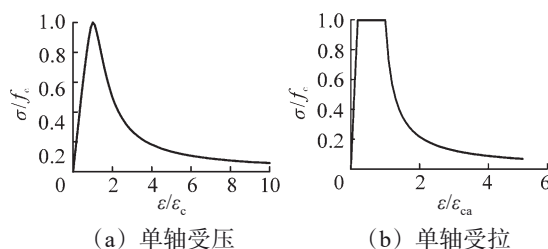


图3 UHPC应力-应变曲线

Fig.3 UHPC stress-strain curve

2.3 边界条件及预应力模拟

模型采用简支边界条件。为避免因梁体扭转导致计算结果不收敛^[20-21],同时施加竖向及横向约束。采用等效降温法来模拟预应力钢绞线的张拉及UHPC加固层的约束收缩效应^[16],利用温度场建立预应力场,通过温度差体现预应力。参考文献[14]和文献[16],综合考虑模型精度和计算效率来确定

网格划分尺寸,混凝土、UHPC加固层、纵筋和箍筋的模型网格划分长度分别为 100 mm、25 mm、600 mm 和 45 mm。加固梁体有限元模型网格划分见图 4。

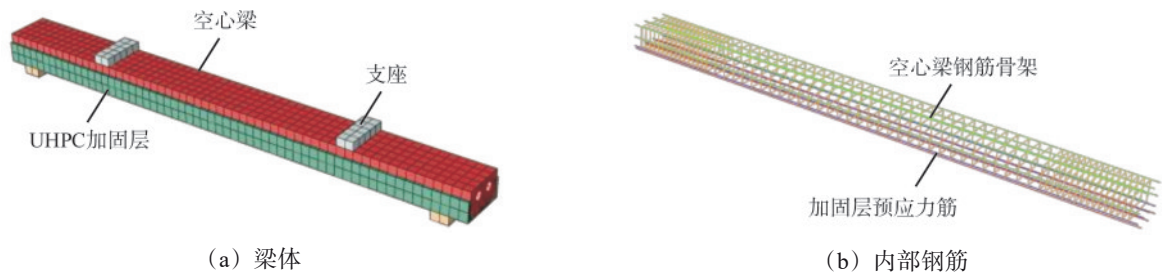


图 4 加固梁体有限元模型网格划分

Fig.4 mesh division of finite element model of reinforced beam body

2.4 有限元模型验证

加固梁体抗压试验见图 5,通过试验结果^[15]来验证本文有限元模型的合理性。梁体载荷-挠度曲线见图 6。由图 6 可知,空心板梁跨中载荷-挠度试验曲线与有限元模拟曲线基本吻合。试验与数值模拟结果对比见表 7。由表 7 可知,未加固梁体及加固梁体有限元模拟得到的开裂载荷、极限载荷与试验结果误差较小,关键点处误差均小于 10%,表明有限元模型合理可靠。



图 5 加固梁体抗压试验

Fig.5 reinforced beam compression test

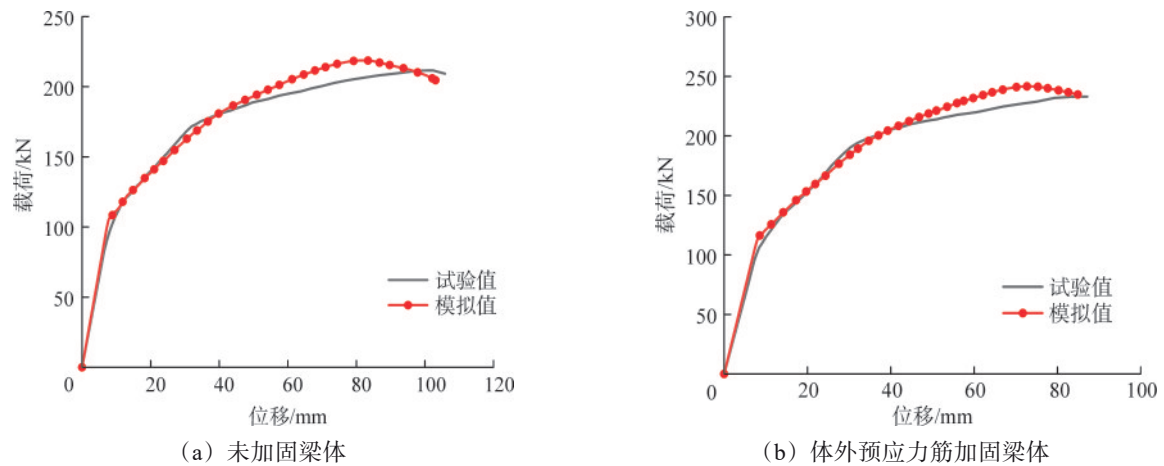


图 6 梁体载荷-挠度对比

Fig.6 comparison of beam load-deflection

表 7 未加固梁体与体外预应力筋加固梁体试验与数值模拟结果对比

Tab.7 comparison of test and numerical simulation results between unreinforced beam and external prestressed reinforcement beam

梁体类型	开裂载荷/kN			极限载荷/kN		
	数值模拟	试验值	误差/%	数值模拟	试验值	误差/%
未加固梁体	105.0	98.0	7.14	218.7	211.5	3.40
体外预应力筋加固梁体	114.0	106.0	7.55	241.6	232.8	3.78

3 预应力 UHPC 加固层优化布设分析

UHPC 成本较高,且施工工艺较复杂,在推广

和应用方面受到限制。本文针对预应力 UHPC,以预应力度、加固层厚度、加固层长度为分析参数,开展加固层优化布设分析,参数设置方案见表 8。

表 8 参数设置方案
Tab.8 parameter setting scheme

参数	方案
预应力度	UHPC 加固、UHPC 加固+50% 预应力筋屈服强度、UHPC 加固+70% 预应力筋屈服强度
UHPC 加固层厚度/mm	40、 <u>50</u> 、60
UHPC 加固层长度/mm	2 000、4 000、 <u>6 000</u>

注:带下划线的参数为基础参数方案。

3.1 加固方式对加固效果的影响

不同加固方式下载荷-挠度对比见图 7。其中, Normal 为未加固梁体; U-50-6000-P50% 表示采用 UHPC 加固, 加固层厚度为 50 mm、长度为 6 000 mm, 施加的预应力为预应力筋屈服强度 50% 的梁体, 其余加固梁体的命名方式以此类推。不同加固方式下的载荷特征值见表 9。由图 7 和表 9 可知, 4 种加固方式下, 梁体的破坏形式均为典型的弯曲破坏。与未加固梁体相比, UHPC 加固梁体的抗弯极限承载力提升显著。与单纯 UHPC 加固梁体 (U-50-6000) 相比, 增加预应力钢筋的 UHPC 加固梁体 (U-50-6000-P50%) 的开裂载荷、屈服载荷和极限载荷分别增大了 127.5%、63.9% 和 56.7%。随着预应力的增大, 开裂载荷从 156.60 kN 增至 190.6 kN, 增幅达 21.7%, 但屈服载荷和极限载荷的增幅相对较小。由开裂位移可知, 增加预应力筋可改善加固梁体的应力状态, 延缓载荷作用下

裂缝的产生和发展, 使梁体在相同损伤程度下具有更大的极限承载力。与 UHPC 加固梁体相比, 增加预应力钢筋的 UHPC 加固梁体 (U-50-6000-P50%) 的极限位移减小了 25.3%。随着预应力的增大, 极限位移进一步减小, 梁体延性减弱。不同加固方式下梁体的拉伸损伤云图见图 8。

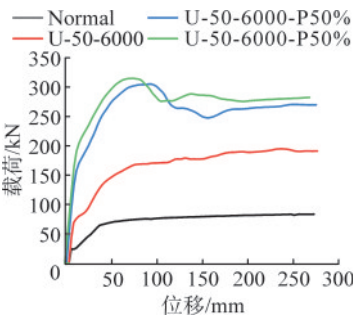


图 7 不同加固方式下载荷-挠度对比

Fig.7 comparison of load-deflection under different

表 9 不同加固方式下的载荷特征值

Tab.9 load characteristic values under different reinforcement methods

加固方式	开裂载荷/kN	开裂位移/mm	屈服载荷/kN	屈服位移/mm	极限载荷/kN	极限位移/mm
Normal	24.33	2.63	64.55	33.90	83.26	
U-50-6000	68.83	5.29	167.70	72.40	194.80	121.60
U-50-6000-P50%	156.60	8.56	274.80	46.90	305.10	90.78
U-50-6000-P70%	190.60	8.29	300.90	49.40	314.80	69.69

注:载荷均为单点加载结果。

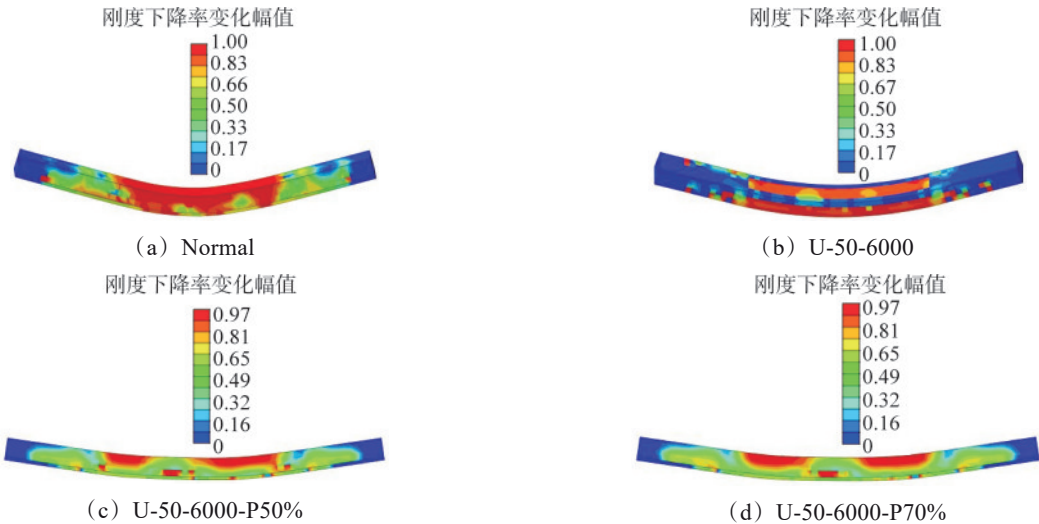


图 8 不同加固方式下梁体的拉伸损伤云图

Fig.8 tensile damage cloud diagram of the beam under different reinforcement methods

由图 8 可知, 4 种梁体拉伸损伤的主要区别为: 在跨中纯弯区及加载点处, 未加固梁体的拉伸损伤面积较大, 损伤显著。与未加固梁体相比, 预应力加固层的拉伸损伤面积明显减小, 纯弯区拉伸损伤分布均匀且损伤面积远小于未加固梁体。

3.2 加固层厚度对加固效果的影响

加固层长度均取 6 m, 预应力钢绞线张拉控制应力取屈服强度的 70%, 加固层厚度分别取 40 mm、50 mm、60 mm, 开展梁体极限承载能力分析。不同加固层厚度下载荷-挠度曲线对比见图 9。不同加固层厚度下的载荷特征值见表 10。由图 9 和表 10 可知, 随着加固层厚度的增大, 开裂载荷、屈

服载荷、极限载荷均随之增大, 且屈服载荷和极限载荷的增幅逐渐减小。

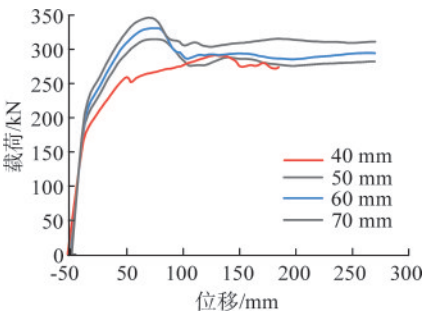


图 9 不同加固层厚度下载荷-挠度对比
Fig.9 comparison of load-deflection under different reinforcement layer thickness

表 10 不同加固层厚度下的载荷特征值

Tab.10 load characteristic values under different reinforcement layer thickness

加固层厚度/mm	开裂载荷/kN	开裂位移/mm	屈服载荷/kN	屈服位移/mm	极限载荷/kN	极限位移/mm
40	165.35	6.86	259.18	45.69	291.14	124.60
50	190.55	8.29	300.93	49.36	314.81	69.69
60	191.32	7.49	320.75	52.52	330.89	70.34
70	194.13	7.11	339.22	53.61	346.17	65.23

不同加固层厚度下梁体的拉伸损伤云图见图 10。由图 10 可知, 加固层厚度为 40 mm 时, 破坏发生在受剪区, 这是由于加固厚度太小, 抗剪能力的提升幅度小于抗弯承载能力, 梁体最终发生抗剪破坏。当加固层厚度超过 50 mm 时, 开裂载

荷和屈服载荷均显著增大, 梁体逐渐由抗剪破坏转化为抗弯破坏。综合考虑施工工艺、保护层厚度、结构自重以及经济性, 建议加固层厚度取 50 ~ 60 mm。

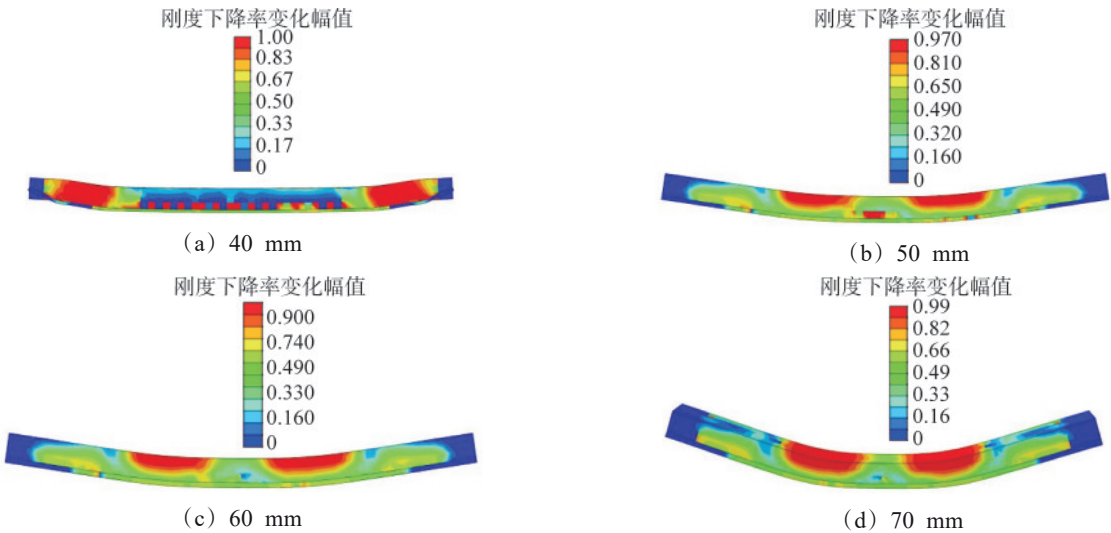


图 10 不同加固层厚度下梁体的拉伸损伤云图

Fig.10 tensile damage cloud diagram of beam body under different reinforcement layer thickness

3.3 加固层长度对加固效果的影响

加固层厚度取 50 mm, 预应力钢绞线张拉控制应力取屈服强度的 70%, 加固层长度分别取 2 m、4 m、6 m, 开展梁体极限承载能力分析。不同加固层长度下载荷-挠度对比见图 11。不同加固层长度下的载荷特征值见表 11。由图 11 和表 11 可知, 随着加固层长度从 2 m 增至 6 m, 开裂载荷、屈服载荷和极限载荷特征值分别增大了 608.4%、325.9% 和 264.8%, 增幅较大, 表明加固层长度的变化会显著影响梁体的应力分布, 提高梁体抗裂性能和承载能力。

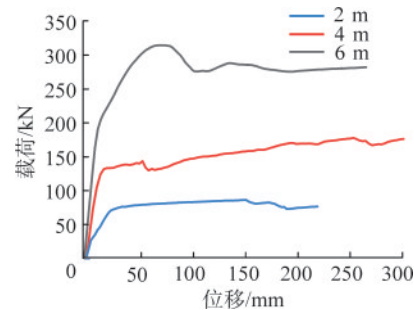


图 11 不同加固层长度下载荷-挠度对比
Fig.11 comparison of load-deflection under different reinforcement layer lengths

表 11 不同加固层长度下的载荷特征值

Tab.11 load characteristic values under different reinforcement layer lengths

加固层长度/m	开裂载荷/kN	开裂位移/mm	屈服载荷/kN	屈服位移/mm	极限载荷/kN	极限位移/mm
2	26.90	1.72	70.65	20.70	86.30	150.19
4	116.62	9.68	129.18	16.59	138.55	89.54
6	190.55	8.29	300.93	49.36	314.81	69.69

不同加固层长度下梁体的拉伸损伤云图见图 12。由图 12 可知, 当加固层长度未覆盖全梁底时, 在加固板端部会出现应力集中, 对抗弯承载能力

影响显著, 梁体发生剪切破坏。因此, 在进行梁体抗弯加固时, 为避免引发其他破坏情况, 保证加固效果, 不建议只进行局部加固。

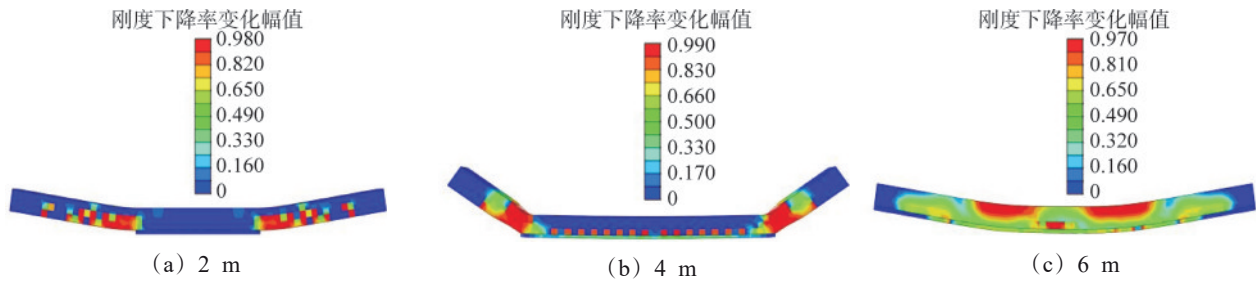


图 12 不同加固层长度下梁体的拉伸损伤云图

Fig.12 tensile damage cloud diagram of the beam body under different reinforcement layer lengths

4 数值模拟与试验结果对比

将本文数值模拟结果与在福州大学土木工程学院实验室开展体外预应力筋加固的空心板梁试验结果^[15]进行对比, 见表 12。由表 12 可知, 与体外预应力筋加固相比, 预应力钢绞线张拉控制应

力为屈服强度的 50% 时, 开裂载荷、极限载荷分别增大了 47.7%、18.1%; 预应力钢绞线张拉控制应力为屈服强度的 70% 时, 开裂载荷、极限载荷分别增大了 79.8%、35.2%。UHPC 预应力筋加固的效果更好, 且 UHPC 加固可通过工厂预制和装配, 现场施工难度相对较小。

表 12 体外预应力筋加固与 UHPC 预应力筋加固梁体试验与数值模拟结果对比

Tab.12 comparison of test and numerical simulation results of beams strengthened with external prestressed reinforcement and UHPC prestressed reinforcement

加固方式	开裂载荷/kN			极限载荷/kN		
	数值模拟	试验值	变化率/%	数值模拟	试验值	变化率/%
体外预应力筋加固		106.00			232.80	
U-50-6000-P50%	156.60		↑ 47.7	274.83		↑ 18.1
U-50-6000-P70%	190.55		↑ 79.8	314.81		↑ 35.2

注: “↑”表示增大。

5 结论

本文对添加预应力筋的 UHPC 加固梁体的抗弯

承载能力开展研究, 针对不同参数进行加固层优化配置分析, 并将分析结果与原有试验结果进行

对比,得出如下结论。

(1) 与单纯UHPC加固梁体相比,增加预应力筋的UHPC加固梁体的开裂载荷、屈服载荷和极限载荷均提升显著。预应力筋可改善加固梁体的应力状态,延缓载荷作用下裂缝的产生和发展,提高梁体抗裂强度。

(2) 随着加固层厚度的增大,开裂载荷、屈服载荷和极限载荷特征值随之增大。加固层厚度为40 mm时,梁体最终发生抗剪破坏而非典型的弯曲破坏。考虑施工工艺、结构自重、材料成本、性价比等,建议加固层厚度取50~60 mm。

(3) 加固层长度对梁体的载荷特征值影响较大。随着加固层长度的增大,梁体极限承载力显著增大。当加固层长度未覆盖全梁底时,在加固板端部会出现应力集中,发生剪切破坏。在进行梁体抗弯加固时,为保证整体加固效果,不建议局部加固。

(4) 与体外预应力筋加固相比,采取预应力UHPC加固时,梁体的极限承载力显著增大,能更全面地改善梁体在使用阶段的受力性能。

本文分析结果适用于存量较大的中小型空心板桥在静载状态下的加固情况。未来可进一步开展动载、疲劳载荷等复杂载荷作用下梁体的加固研究,提高UHPC加固技术的普适性和技术成熟度。

参考文献(References):

- [1] 交通运输部. 2023年交通运输行业发展统计公报[N]. 中国交通报, 2024-06-18(2).
- [2] 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.
SHI Jiawei, WU Qianqian, WU Shanxia, et al. Analysis on disease repair effects of hollow slab bridge strengthened with prestressed FRP grid[J]. Journal of Southeast University(Natural Science Edition), 2024, 54(2): 407-415.
- [3] 黄俊杰, 余艳华, 李猛, 等. 不同碳纤维布加固方式的木构件损伤演化规律[J]. 东北林业大学学报, 2024, 52(1): 115-123.
HUANG Junjie, SHE Yanhua, LI Meng, et al. Damage evolution law of wooden components reinforced with different CFRP reinforcement methods[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2024, 52(1): 115-123.
- [4] GRAYBEAL B, BRÜHWILER E, KIM B S, et al. International perspective on UHPC in bridge engineering[J]. Journal of Bridge Engineering, 2020, 25(11): 04020094.
- [5] 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.
SHAO Xudong, FAN Wei, HUANG Zhengyu. Application of ultra-high-performance concrete in engineering structures[J]. China Civil Engineering Journal, 2021, 54(1): 1-13.
- [6] NOSHIRAVANI T, BRÜHWILER E. Rotation capacity and stress redistribution ability of R-UHPFRC-RC composite continuous beams: an experimental investigation[J]. Materials and Structures, 2013, 46: 2013-2028.
- [7] NOSHIRANANI T, BRÜHWILER E. Experimental investigation on reinforced ultra-high-performance fiber-reinforced concrete composite beams subjected to combined bending and shear[J]. ACI Structural Journal, 2013, 110(2): 251-261.
- [8] BAHRAQ A A, ALI AL-OSTA M, AHMAD S, et al. Experimental and numerical investigation of shear behavior of RC beams strengthened by ultra-high performance concrete[J]. International Journal of Concrete Structures and Materials, 2019, 13: 6.
- [9] GRAYBEAL B, TANESI J. Durability of an ultrahigh-performance concrete[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2007, 19(10): 848-854.
- [10] AL-OSTA M A, ISA M N, BALUCH M H, et al. Flexural behavior of reinforced concrete beams strengthened with ultra-high performance fiber reinforced concrete[J]. Construction and Building Materials, 2017, 134: 279-296.
- [11] 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.
- [12] ZHANG Y, LI X L, ZHU Y P, et al. Experimental study on flexural behavior of damaged reinforced concrete(RC) beam strengthened by toughness-improved ultra-high performance concrete(UHPC) layer[J]. Composites Part B: Engineering, 2020, 186: 107834.
- [13] MIRDAN D, SALEH A R. Flexural performance of reinforced concrete (RC) beam strengthened by UHPC layer[J]. Case Studies in Construction Materials, 2022, 17: e01655.
- [14] 刘颖峰. 超高性能混凝土(UHPC)加固损伤RC梁抗剪性能研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2021: 21-29.
- [15] 周成智. 体外预应力加固空心板梁受力性能与设计理论研究[D]. 福州: 福州大学, 2022: 13-37.
- [16] CAD/CAM/CAE技术联盟. ABAQUS 2022中文版有限元分析从入门到精通[M]. 北京: 清华大学出版社, 2023: 16-57.
- [17] 章莉, 赵兰浩, 刘智, 等. 循环荷载作用下的混凝土弹塑性损伤本构模型及数值实现[J]. 工程力学, 2023, 40(4): 152-161.
ZHANG Li, ZHAO Lanhao, LIU Zhi, et al. An elastic-plastic damage constitutive model of concrete under cyclic loading and its numerical implementation[J]. Engineering Mechanics, 2023, 40(4): 152-161.
- [18] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构设计规范: GB 50010—2010(2015年版)[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015: 209-220.
- [19] 何永波, 林上顺, 夏樟华, 等. 预制桥面板UHPC湿接缝的界面受力性能研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2021, 19(2): 126-130.
HE Yongbo, LIN Shangshun, XIA Zhanghua, et al. Mechanical behavior analysis of interface between UHPC wet joint and precast bridge deck[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2021, 19(2): 126-130.
- [20] 于玲, 王泽鹏, 任成明, 等. 预应力CFRP布加固混凝土梁受弯试验[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2024, 40(2): 241-249.
YU Ling, WANG Zepeng, REN Chengming, et al. Bending test of concrete beams strengthened with prestressed CFRP sheets[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University(Natural Science), 2024, 40(2): 241-249.
- [21] 黄颖, 许永吉. 既有预应力混凝土结构承载力影响参数分析[J]. 南昌大学学报(工科版), 2020, 42(1): 33-39, 45.
HUANG Ying, XU Yongji. Analysis on the influence parameters of the bearing capacity of the existing prestressed concrete structure[J]. Journal of Nanchang University(Engineering & Technology), 2020, 42(1): 33-39, 45.