

考虑黏结滑移的型钢超高性能混凝土组合梁 受力性能影响因素分析

沈德建^{1*}, 白松林¹, 姜国庆², 刘慈¹, 李明¹

(1. 河海大学土木与交通学院, 南京 210024; 2. 南京建工集团有限公司南京建工集团研究院, 南京 210012)

摘要: 在型钢混凝土组合结构中使用超高性能混凝土 (ultra-high performance concrete, 简称 UHPC) 可以提高结构的承载能力、减小截面尺寸, 同时能改善结构中因密集配置箍筋和剪力件而导致的施工复杂等问题。目前对于型钢 UHPC 组合梁在进行有限元仿真分析时, 主要集中在受弯性能的参数化定性分析方面, 而忽略了型钢与 UHPC 间黏结滑移方面的研究, 缺少对其界面黏结性能和组合效应的评估, 对 UHPC 受拉区的受力性能也缺乏深度讨论。本文对型钢 UHPC 组合梁开展基于 ABAQUS 的受弯性能有限元仿真分析, 对 UHPC 的强度、型钢强度、纵向配筋率和配钢率进行参数分析。研究了荷载-跨中挠度曲线、截面应变分布, 界面黏结应力分布以及 UHPC 受拉区性能。结果表明: (1) 组合梁在加载过程中可分为完全弹性阶段、损伤工作阶段、塑性强化阶段和延性发展阶段四个阶段; (2) 受拉区的 UHPC 在处于峰值荷载状态时仍可以在一定程度上参与截面抗弯, 基于参数分析提出了 UHPC 受拉区等效应力折减系数的取值建议; (3) 型钢上的翼缘黏结应力主要集中在加载处, 下翼缘黏结应力分布则受裂缝开展的控制, 应在设计中通过设置剪力连接件或在型钢表面进行处理等方式改善型钢与 UHPC 界面的黏结性能; (4) 组合梁在设计过程中应限制型钢的强度和配置率, 以保证组合梁具有良好的延性和受拉区 UHPC 具有良好的抗拉性能。

关键词: 型钢混凝土组合结构; 超高性能混凝土; 黏结滑移; 有限元分析; 等效应力折减系数

中图分类号: TU398+.9

文献标志码: A

文章编号: 1671-9379(2025)05-0029-11

DOI: 10.13969/j.jzgjz.20231120001

Analysis of Factors Affecting the Mechanical Performance of Steel Reinforced Ultra-High Performance Concrete Beams Considering the Bond-Slip Effect

SHEN Dejian^{1*}, BAI Songlin¹, JIANG Guoqing², LIU Ci¹, LI Ming¹

(1. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210024, China; 2. Nanjing Construction Engineering Group Research Institute, Nanjing Construction Engineering Group Co., Ltd., Nanjing 210012, China)

*Corresponding author: shendjn@163.com

Abstract: The application of ultra-high performance concrete (UHPC) to steel reinforced concrete structures can improve the load carrying capacity, reduce the cross-section size, and solve the problems of complex construction caused by the intensive configuration of stirrups and shear members. The current finite element simulation study of steel reinforced

收稿日期: 2023-11-20

基金项目: 国家杰出青年科学基金(52425905), 新疆兵团科技计划项目(2023AB016-01), 江苏省住房和城乡建设厅科技项目(2022ZD076)

作者简介:

沈德建(1979—), 男, 博士, 教授, 主要从事工业化建筑抗震性能及设计方法等方面的研究。

E-mail: shendjn@163.com。(通信作者)

白松林(2000—), 男, 硕士研究生, 主要从事混凝土组合结构受力性能及设计方法的研究。

UHPC beams is mainly a parametric qualitative study of bending capacity, ignoring the bond-slip effect between steel and UHPC, which lacks the assessment of its interfacial bond performance and combination effect, as well as the in-depth discussion of the stress performance of the UHPC in tensile zone. In this paper, the finite element simulation analysis of the bending performance of steel reinforced UHPC beams was carried out based on ABAQUS, and the strength of UHPC, the strength of steel, the longitudinal reinforcement ratio and the steel ratio were parametrically investigated. The load-mid-span deflection curves, cross-section strain distribution, interface bond stress distribution, and tensile zone performance of the UHPC were analyzed. The main conclusions are as follows: (1) The loading process of the composite beam can be divided into four stages: the fully elastic stage, the damaged working stage, the plastic hardening stage, and the ductility development stage. (2) The UHPC in the tensile zone can still participate in the section bending resistance at the peak load, and suggestions for the value of the equivalent stress reduction factor for the tensile zone of UHPC are proposed based on parametric research. (3) The bond stress of the upper flange is mainly concentrated at the loading area, while the distribution of the bond stress on the lower flange is controlled by the development of cracks. The bond performance between the steel section and UHPC at the interface should be improved in the design by means of shear connectors or surface treatment of the steel profiles. (4) During the design process of composite beams, the strength and configuration rate of the steel profiles should be limited to ensure that the composite beams have good ductility and the UHPC in tensile zone exhibits good load-bearing performance.

Keywords: steel reinforced concrete structure; ultra-high performance concrete; bond-slip; finite element analysis; equivalent stress reduction factor

型钢混凝土 (steel reinforced concrete, 简称 SRC) 组合结构在使用过程中能充分发挥混凝土和钢材各自的材料性能优势, 因此被广泛应用到了高层及大跨度结构中^[1-2]。超高性能混凝土 (ultra-high performance concrete, 简称 UHPC) 是一种将不同粒径颗粒材料以最佳比例配置成最紧密堆积状态的混凝土, 通过此种配置方式以提高材料的力学性能, 同时加入了纤维材料以提高韧性^[3-4]的水泥基材料。将 SRC 结构中的混凝土材料替换为 UHPC, 可以发挥 UHPC 在强度、耐久性和抗拉性能等多方面的显著优势, 同时也能减小结构的截面尺寸, 延长结构的使用寿命, 改善传统 SRC 结构中因箍筋和剪力件密集配置而导致施工复杂的现状^[5]。

近年来, 关于 SRC 结构的相关研究发展快速, 诸多学者通过对 SRC 结构展开试验, 验证了高强钢和高强高性能混凝土等材料在 SRC 结构上应用的可行性^[6-7]。同时, 大量参数化分析也在型钢 UHPC 组合梁领域中展开, 通过对型钢 UHPC 组合梁的试验研究和有限元建模, 研究分析了因混凝土强度等级、含钢率和型钢位置等因素的不同对试件受弯性能的影响规律^[8-10], 很多学者提出普通混凝土和 UHPC 二者的受力性能有较大差异, 不能用普通混凝土的设计方法对 UHPC 进行设计^[11-12]。在组合结构数值分析的过程中, 很多学者在建模过程中往往忽略了型钢与 UHPC 间的黏结滑移效应^[13-14], 以“内置区域”的方式固定型钢, 所得的极限承载能力结果与试验所得的结果基本一致, 但不同部件的接触面完全绑定将会导致组合梁的刚度退化过程以及

混凝土应力分布状况与真实情况表现出一定的差异, 不能真实地反映二者的组合效应, 也无法对界面的黏结应力分布情况和受拉区混凝土的具体参与过程进行细致地定量评估。

本文开展了型钢 UHPC 组合梁受弯性能有限元模拟, 考虑型钢与 UHPC 间的黏结滑移效应, 评估了型钢与 UHPC 间的组合效应, 研究了受拉区混凝土在承载力能力上的贡献, 分析了 UHPC 强度、型钢强度、纵筋配筋率和型钢配钢率对组合梁受弯性能的影响。

1 有限元模型

1.1 模型概况

本文采用 ABAQUS 有限元分析软件对型钢 UHPC 组合梁进行了建模和参数化分析。建模模型为分离式三维模型, 型钢与 UHPC 均采用 C3D8R 单元, 钢筋笼采用 T3D2 单元。在加载点与支座处设置了大刚度钢垫块, 钢垫块采用 C3DR8 单元模拟。鉴于本文研究对组合梁进行三分点受弯单调静力加载试验时, 截面的内力分布有着左右对称的特性, 为减轻计算压力且绘制更精细的网格, 本次研究采用 1/2 模型, 并对组合梁纵向截面进行对称约束。

本次试验共设计了 13 个简支梁模型以进行三分点受弯模拟。如图 1 所示, 组合梁截面尺寸为 200 mm × 300 mm (宽 × 高), 总长度为 2000 mm, 其中纯弯段长为 600 mm。

如表 1 所示, 组合梁模型的变化参数包含 UHPC 强

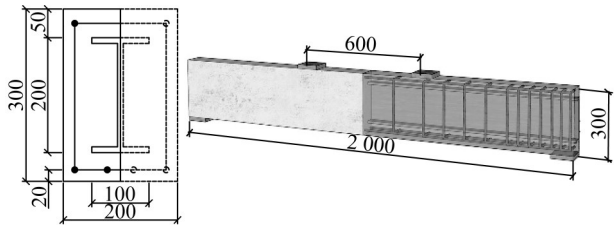


图1 模型尺寸设计(单位:mm)

Fig. 1 Model size design (unit:mm)

度、型钢强度、纵筋配筋率和配钢率,各变化参数的具体取值如表1所示。

表1 参数取值范围

Table 1 Parameter value range

参数名称	参数取值范围		
UHPC强度	120 MPa、130 MPa、140 MPa、150 MPa		
型钢强度	Q235、Q345、Q460、Q550		
纵筋 配筋率/%	0.34		4ΦC8
	0.52	纵筋	4Φ10
	0.75	配置情况	4Φ12
	1.03		4Φ14
配钢率/%	5.12		200×100×8×8
	6.35	型钢	200×100×8×12
	7.53	尺寸/mm	200×100×10×14
	8.69		200×100×12×16

组合梁的网格划分和边界条件如图2所示,在组合梁的支座垫块处设置了简支梁约束。加载垫块采用竖向线性位移加载的方法加载50 mm。

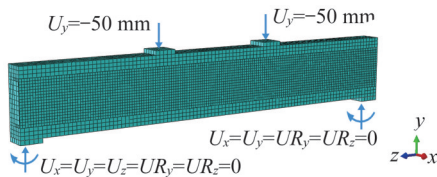


图2 模型边界条件

Fig. 2 Model boundary conditions

1.2 材料本构及接触设置

本文在有限元建模中使用了混凝土塑性损伤(concrete damage plasticity,简称CDP)模型模拟UHPC的受拉及受压塑性非线性行为和损伤发展过程^[15]。UHPC的本构模型选用郑文忠等^[16]提出的应力应变关系计算式进行计算,如式(1)、式(2)所示。本文CDP模型中损伤因子的计算方法基于Sidiroff能量等价原理建立^[17],计算公式如式(3)所示。CDP取膨胀角30°,偏移量取0.1,受压强度比取1.16,应力比取2/3,黏滞系数取

0.001。钢筋笼及型钢本构模型按理想弹塑性模型处理,为一弹性上升段和水平屈服段组成的双折线模型。

$$\frac{\sigma_c}{f_c} = \begin{cases} 1.55 \frac{\epsilon}{\epsilon_0} - 1.20 \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_0}\right)^4 + 0.65 \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_0}\right)^5 & 0 \leq \frac{\epsilon}{\epsilon_0} < 1 \\ \frac{\epsilon}{\epsilon_0} & \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \geq 1 \end{cases} \quad (1)$$

$$\frac{\sigma_t}{f_t} = \begin{cases} 1.17 \frac{\epsilon_t}{\epsilon_{t0}} + 0.65 \left(\frac{\epsilon_t}{\epsilon_{t0}}\right)^2 - 0.83 \left(\frac{\epsilon_t}{\epsilon_{t0}}\right)^3 & 0 \leq \frac{\epsilon_t}{\epsilon_{t0}} < 1 \\ \frac{\epsilon_t}{\epsilon_{t0}} & \frac{\epsilon_t}{\epsilon_{t0}} \geq 1 \end{cases} \quad (2)$$

$$d = 1 - \sqrt{\frac{\sigma}{E_0 \epsilon}} \quad (3)$$

式中: σ_c 为棱柱体UHPC压应力; ϵ 为棱柱体UHPC压应变; f_c 为棱柱体UHPC抗压强度; ϵ_0 为棱柱体UHPC峰值压应力对应的应变; σ_t 为棱柱体UHPC拉应力; ϵ_t 为棱柱体UHPC拉应变; f_t 为棱柱体UHPC抗拉强度; ϵ_{t0} 为棱柱体UHPC峰值拉应力对应的应变; d 为损伤因子; E_0 为UHPC初始弹性模量; σ 为混凝土真实应力。

本文在部件间的界面接触设置中,考虑了型钢与UHPC间的界面黏结滑移效应。但由于带肋钢筋与UHPC间存在可靠的黏结性能,且此种黏结性能远优于型钢表面与UHPC间的黏结性能,本文在接触设置中将钢筋与UHPC间的连接方式定义为Embedded^[10]。型钢与混凝土在不同形式的荷载作用下,界面黏结滑移效应也有显著差异。组合梁在受弯过程中其上下翼缘的黏结性能也有所不同,且受力状态与传统黏结滑移性能试验中的推出试验、拉拔试验以及短柱试验的受力状态均有较大差异,在考虑组合梁黏结滑移效应时应选用梁式黏结滑移本构关系。型钢受拉、受压翼缘与UHPC的界面黏结强度可按式(4)计算^[18]:

$$\begin{cases} \tau_{u,c} = 0.047 9f_{cu} + 1.183 1 \\ \tau_{u,t} = 0.028 4f_{cu} + 2.282 9 \end{cases} \quad (4)$$

式中: $\tau_{u,c}$ 为型钢受压翼缘与UHPC界面的局部黏结强度; $\tau_{u,t}$ 为型钢受拉翼缘与UHPC界面的局部黏结强度; f_{cu} 为UHPC的抗压强度。

界面局部黏结强度达到峰值时的滑移值和界面剪切失效时的滑移值可按式(5)计算:

$$\begin{cases} s_0 = 0.057 4\lambda + 0.057 8 \\ s_r = 0.103 6\lambda + 0.047 3 \end{cases} \quad (5)$$

式中: s_0 为界面局部黏结强度达到最大值时所对应的滑

移值; s_r 为界面局部剪切失效时所对应的滑移; λ 为梁剪跨比。

本文使用内聚力模型(Cohesive behavior)对型钢与混凝土间黏结应力进行了设置,设置条件如下:(1)在接触法线方向上,定义二者为硬接触,其与内聚力模型间不相互影响,硬接触仅在与主表面接触时控制界面的法向应力,部件分离时内聚力模型才参与接触法向应力的控制,以模拟不同部件间的法向化学胶结力及机械咬合力;(2)在剪切方向上,如果界面黏性刚度未受损,则内聚力模型处于工作状态,摩擦模型处于休眠状态,在加载过程中部件间切向滑移会受到内聚力的抵抗,产生线弹性剪切力。通过剪切失效滑移值以定义内聚力模型损伤,则剪切应力会随着损伤演变而开始退化减小,同时摩擦模型激活并开始产生剪切应力。摩擦模型的弹性上升刚度与内聚力模型的退化刚度成正比;(3)在内聚力模型最终失效之前,剪切应力由内聚力模型和摩擦模型二者产生的应力共同组成,而一旦达到失效滑移值,内聚力模型退出工作,对剪切应力的唯一贡献来自摩擦模型。

本文对文献[14]中的6根试验梁进行了有限元建模,组合梁峰值荷载模拟值与文献试验值对比如表2所示,组合梁荷载-跨中挠度关系曲线如图3所示。模拟所得峰值荷载的平均相对误差为1.7%。在荷载-跨中挠度曲线对比中,开裂后组合梁抗弯刚度及型钢屈服点位置都能较好地还原文献试验过程。经过将有限元模型曲线和峰值荷载与文献曲线和峰值荷载对比研究可知,本文建立的有限元模型能够较好地模拟型钢UHPC组合梁的受力过程。

表2 极限荷载的模拟值与试验值对比

Table 2 Comparison of simulated and tested load values

试件编号	试验值/kN	模拟值/kN	相对误差/%
B-1	390.0	386.4	0.9
B-2	420.2	411.6	2.0
B-3	473.6	457.0	3.5
B-4	356.7	351.9	1.4
B-5	418.2	417.2	0.2
B-6	460.3	469.2	1.9

2 结果分析

2.1 荷载-挠度曲线

本文通过应用ABAQUS模拟得到组合梁加载端荷载与跨中挠度的关系曲线,如图4所示。该模型使用的UHPC强度等级为120 MPa,工字型钢的强度等级

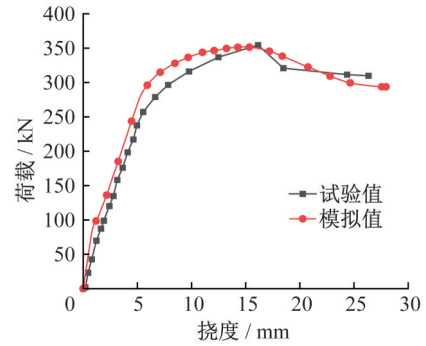


图3 荷载-跨中挠度曲线验证

Fig. 3 Validation of load-deflection curves

为Q345,钢筋型号为HRB400,截面尺寸为200 mm×300 mm,型钢截面尺寸为100 mm×200 mm×8 mm×12 mm,梁底纵向受力钢筋配置4C8。型钢UHPC组合梁的三分点受弯加载受力全过程可划分为四个阶段。

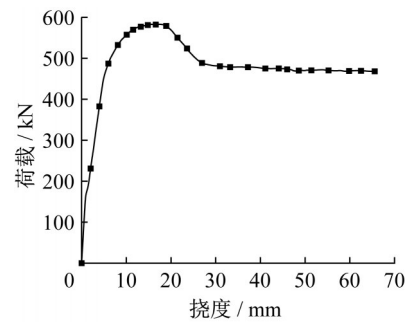


图4 荷载-跨中挠度曲线

Fig. 4 Load-deflection curves

第一阶段,完全弹性阶段:UHPC尚未出现裂缝,与型钢的受压、受拉区都处于线弹性工作阶段,且UHPC与型钢间的界面黏结应力也处于线弹性上升阶段。此时组合梁的抗弯刚度为一定值,抗弯刚度由各部件材料性能决定,在荷载-跨中挠度曲线中表现为完全弹性上升阶段。

第二阶段,损伤工作阶段:梁底UHPC开裂,出现数条小裂缝,表现为条带状的混凝土拉伸损伤,且裂缝缓慢发展,在荷载-跨中挠度曲线中表现为一拐点,曲线刚度有一定损失,在此过程中,由于裂缝的出现使得型钢受拉翼缘与UHPC间的界面黏结应力重新分布,恢复了一部分损失的刚度,此后荷载-跨中挠度曲线仍旧近似为线性上升。

第三阶段,塑性强化阶段:跨中型钢下翼缘屈服,且屈服区域不断沿组合梁纵向以及截面高度方向扩散。UHPC中的裂缝快速发展,条带状的混凝土拉伸损伤伸长扩散、彼此连通。UHPC在梁顶出现局部混凝土压缩损伤,荷载-跨中挠度曲线刚度快速下降,直到荷载达到

峰值。

第四阶段,延性发展阶段:UHPC 裂缝继续发展,混凝土拉伸损伤和压缩损伤区域快速扩散,直至组合梁梁顶 UHPC 被压碎,UHPC 受压及受拉区均退出工作,由型钢继续承载,在荷载-跨中挠度曲线中呈现为一近似水平线。

2.2 截面应变分布

由于 UHPC 截面应变分布存在较大离散性,故提取跨中纯弯段 300 mm 内的网格单元梁纵向应变求平均值,得到跨中 300 mm 内的截面平均应变分布,如图 5 所示。

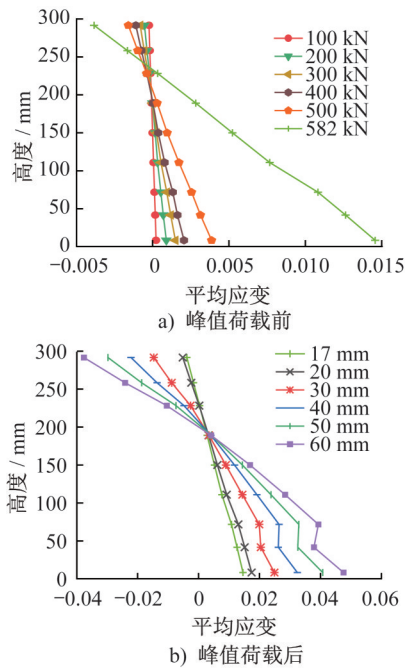


图 5 UHPC 截面平均应变分布

Fig. 5 Cross-section average strain distribution of UHPC

UHPC 在荷载达到 150 kN 后开裂,开裂应变逐渐增大,中和轴逐渐上移。UHPC 开裂应变在荷载为 450 kN 后加速上升,裂缝快速发展。在 550 kN 后 UHPC 压应变明显大幅度上升,并出现压缩塑性应变,最终达到峰值荷载 582 kN,加载至峰值荷载前 UHPC 截面符合平截面假定。在峰值荷载后继续进行位移加载的过程中,UHPC 逐渐退出工作,中和轴下移。受拉区 UHPC 拉伸损伤条带扩散至片状区域,受型钢翼缘影响被分割为上下两部分,在型钢约束范围内的 UHPC 仍能在中和轴附近提供拉应力,而截面应变在型钢翼缘处出现断层。

随着拉区混凝土损伤发展,型钢截面中和轴在混凝土开裂后逐渐上移。当达到峰值荷载时,型钢仅上翼缘受压,腹板及下翼缘全部处于受拉区,如图 6 所示。研究

发现组合梁在极限承载力状态下,UHPC 与型钢均充分利用了自身的材料优势。在峰值荷载后,组合梁处于延性发展阶段,UHPC 的拉伸损伤及压缩损伤快速发展,直至梁顶 UHPC 被压碎退出工作,型钢的中和轴逐渐下移,截面承担更多的压应力。

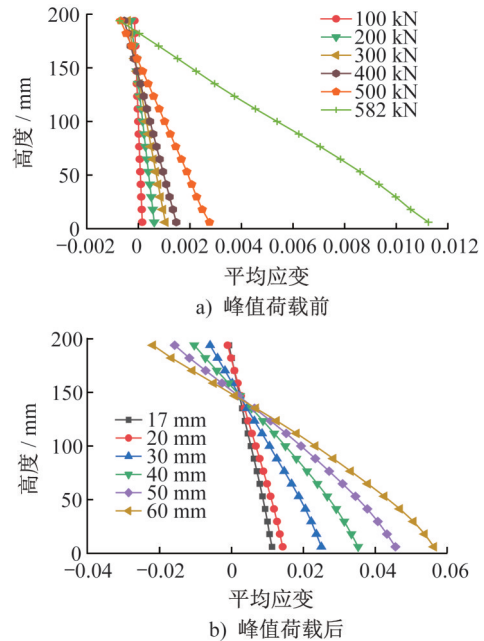


图 6 型钢截面平均应变分布

Fig. 6 Cross-section average strain distribution of steel

组合梁在加载至界面出现内聚力模型损伤后,界面相对滑移值逐渐增大,UHPC 应变与型钢接触面网格节点的应变出现明显差异,但在摩擦模型和内聚力模型的共同作用下,型钢与 UHPC 在跨中 300 mm 内的平均应变仍保持着较高的协同性。在 150 kN、450 kN 和 582 kN 的荷载下,型钢与 UHPC 的截面平均应变及中和轴距离组合梁梁底的高度基本一致,如表 3 所示,在达到峰值荷载时组合梁整体截面满足平截面假定。

表 3 加载过程各部件中和轴高度

Table 3 Height of the neutralization axis

部件	中和轴高度/mm		
	150 kN	450 kN	582 kN
型钢	152.33	194.85	232.73
UHPC	152.46	193.77	233.24

在峰值荷载后,UHPC 的压缩损伤以及拉伸损伤快速开展,跨中型钢下翼缘与 UHPC 界面内聚力模型完全失效,甚至部分出现分离脱开现象,组合梁截面不再符合平截面假定。

2.3 界面黏结应力分布

在组合梁受弯加载过程中,型钢与UHPC间的界面黏结应力沿梁纵向呈现出一定的分布规律,如图7所示,且该分布规律在型钢上下翼缘有着明显差异。由于黏结应力在跨中两侧对称分布,取1/2组合梁进行分析。

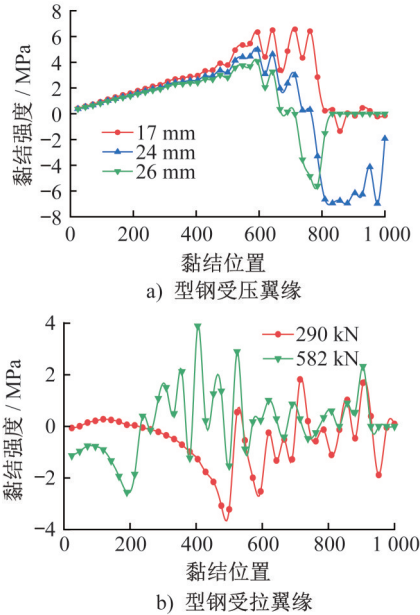


图7 型钢与UHPC界面黏结应力纵向分布

Fig. 7 Distribution of bond stress at the interface between steel and UHPC

在型钢受压翼缘表面,黏结应力在加载初期首先在加载垫块附近集中分布,黏结强度逐渐上升直至达到峰值黏结强度。当达到峰值荷载时,加载垫块附近存在黏结强度纵向集中分布区域,该区域在峰值荷载前一直承担由受压翼缘产生的大部分界面黏结应力。在峰值荷载后,组合梁挠度持续增大,跨中受压区域UHPC压应变与型钢压应变不再协调,型钢形变大于极限受压状态时UHPC的形变,出现与垫块附近方向相反的界面黏结应力,该应力不断增大直至产生黏结破坏。达到破坏荷载时,受压区UHPC被局部压碎退出工作,但由于型钢挠度不断增大导致与UHPC脱离,跨中附近的翼缘上表面黏结应力下降为0。

在型钢受拉翼缘表面,黏结应力在开裂前均匀分布于两部件接触面上。达到开裂荷载后,受拉区UHPC应变发生突变,界面黏结应力重新在纯弯段裂缝两侧集中分布,随着裂缝不断在梁底开展,将受拉区UHPC纵向分割为数个区间,纵向界面黏结应力的分布开始随裂缝开展规律地出现较大起伏变化。随着新裂缝在梁底不断出现,黏结应力集中分布区域从纯弯段逐渐向梁端演化,最大黏结应力出现的位置不断向梁端支座处移动。达到峰

值荷载后,跨中局部受拉区UHPC退出工作,跨中附近出现纵向黏结应力为0的区段。

2.4 受拉区UHPC工作性能

输出加载过程中UHPC拉伸损伤云图,如图8所示,在本文建立的有限元模型中,UHPC的开裂荷载为151.32 kN,此时跨中UHPC的局部拉应变超过其峰值拉应变,梁底UHPC张开微小裂缝,掺入的纤维进入工作。

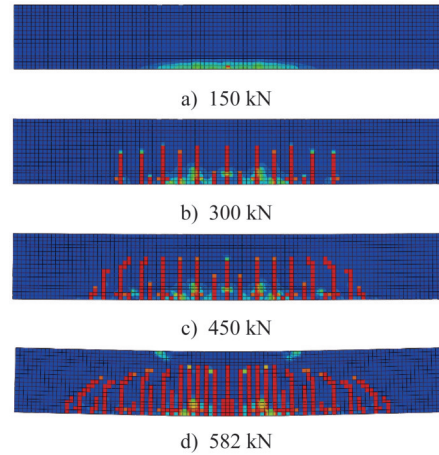


图8 UHPC拉伸损伤分布

Fig. 8 UHPC tensile damage distribution

在接近峰值荷载时,梁底仍不断有新裂缝出现,由于UHPC中纤维的掺入使得其受拉区延性较普通混凝土有显著提升,条带状的混凝土拉伸损伤现象在云图中密集且均匀地分布于梁侧,类似在高纵筋配筋率下的型钢普通混凝土组合梁裂缝的分布。此时的纵筋配筋率为0.34%,刚好满足《组合结构设计规范》(JGJ 138—2016)^[19]中所要求的最小纵向配筋率0.3%。

UHPC受拉区的工作由接近中和轴处未裂混凝土、裂缝间仍与钢材存在可靠黏结的混凝土、开裂但纤维仍在拔出拉断过程中的混凝土共同承担,不能通过较长标距内包括裂缝宽度的平均应变进行应力换算。根据平截面假定可计算跨中型钢、UHPC、纵向钢筋的应力值,对中和轴求矩可得各部件截面弯矩的贡献占比,如图9所示。

当荷载加载至150 kN时,UHPC达到开裂荷载,此时其受拉区UHPC截面的弯矩贡献占比达到35.6%,随着裂缝发展,其贡献占比逐渐下降。加载至450 kN时,受拉区UHPC截面弯矩贡献占比仅为5.8%,继续加载至峰值荷载后又提升至8.2%,这是由于UHPC受拉区的损伤发展减缓,纤维不断进入工作,使得受拉区仍保持着一定受拉能力,同时中和轴上升使得受拉区UHPC所贡献的截面弯矩占比略有回升。

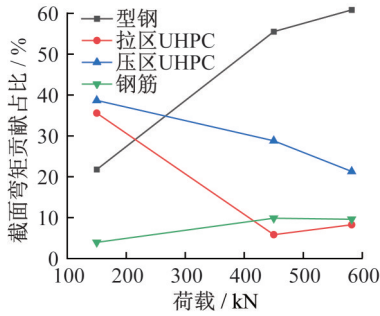


图9 各部件截面弯矩贡献值

Fig. 9 Contribution of each component to the section bending moment

在计算UHPC的正截面受弯承载力时,普遍的做法是将受拉区的应力分布等效为矩形分布,将其均匀分布在中和轴至梁截面区边缘的截面上,应力大小取 kf_t ,其中 k 为受拉区等效应力折减系数。在此前的研究中,不同学者对 k 的取值存在不同看法,郑文忠等^[16]在其试验中所得值处于0.27—0.44间,出于安全考虑建议取值为0.25,此后还有学者建议取值为0.30、0.75以及0.85等。

3 参数分析

3.1 UHPC和型钢的材料强度

为研究不同材料强度对组合梁承载能力和变形能力的影响,设计了不同UHPC抗压强度以及不同型钢强度的模型,UHPC抗压强度分别为120 MPa、130 MPa、140 MPa和150 MPa,型钢屈服强度分别为235 MPa、345 MPa、460 MPa和550 MPa。其中基准组的UHPC抗压强度为120 MPa,型钢屈服强度为345 MPa。根据ABAQUS输出的荷载-跨中挠度曲线可以得到各工况下组合梁的峰值荷载、破坏荷载,如表4、表5所示,其中破坏荷载值取受压区UHPC压碎时对应荷载值。

表4 不同UHPC强度下组合梁特征荷载值

Table 4 Characteristic load values of beams with different UHPC strengths

UHPC强度 / MPa	峰值荷载 / kN	破坏荷载 / kN	μ	k
120	582.91	489.69	3.95	0.322
130	595.77	494.59	4.09	0.358
140	603.30	513.77	3.97	0.372
150	605.83	511.71	4.02	0.352

根据式(6)可以计算各工况下组合梁的延性系数,并以此来衡量组合梁的延性^[20]。

表5 不同型钢强度下组合梁特征荷载值

Table 5 Characteristic load values of beams with different steel strengths

型钢强度 / MPa	峰值荷载 / kN	破坏荷载 / kN	μ	k
235	469.06	410.58	4.93	0.411
345	582.91	489.69	3.95	0.322
460	704.01	603.62	3.00	0.333
550	787.57	684.49	2.66	0.304

$$\mu = \frac{\Delta_f}{\Delta_y} \quad (6)$$

式中: μ 为延性系数; Δ_f 为破坏荷载对应位移; Δ_y 为屈服荷载对应位移。研究发现组合梁的荷载-跨中挠度曲线中并无明显屈服点,应采用能量等效法确定组合梁的屈服点^[21]。

如图10所示,提高UHPC抗压强度后组合梁极限荷载值较基准组提升了2.21%、3.50%和3.93%,UHPC抗压强度的提高使得组合梁峰值荷载略有提升,峰值荷载对应的挠度值增大,破坏荷载对应挠度延后,但延性系数没有明显变化。

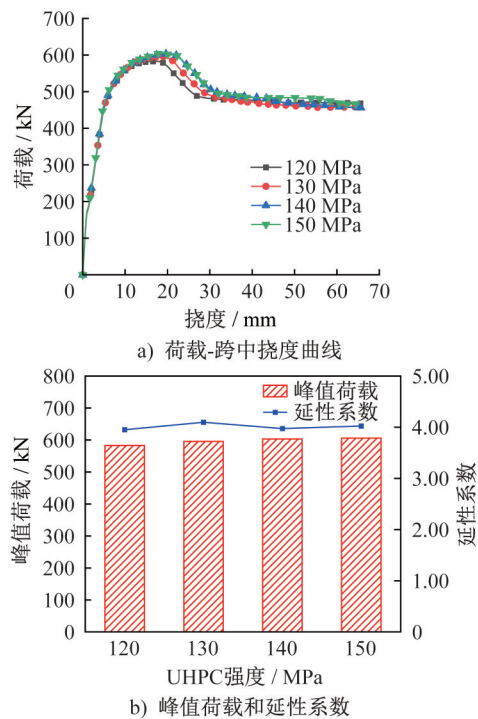


图10 不同UHPC强度组合梁模拟数据

Fig. 10 Data of beams with different UHPC strengths

随着UHPC抗压强度的提升,组合梁达到峰值荷载时UHPC的中和轴不断上移,较120 MPa基准组分别提高了

1.44 mm、3.73 mm 和 4.65 mm, 达到峰值荷载时受拉区 UHPC 的截面弯矩贡献占比呈现先上升后下降的趋势, 其受拉区等效应力折减系数在 UHPC 强度等级为 140 MPa 时最高, 达到 0.372。UHPC 强度等级继续提升至 150 MPa 后, 组合梁承载能力提升不明显, 且在达到峰值荷载时受压区边缘平均压应变仅为 UHPC 受压峰值强度对应压应变的 98%, 此后 UHPC 强度继续发展直至被压碎的过程中并没有使得组合梁承受荷载能力得到提升。

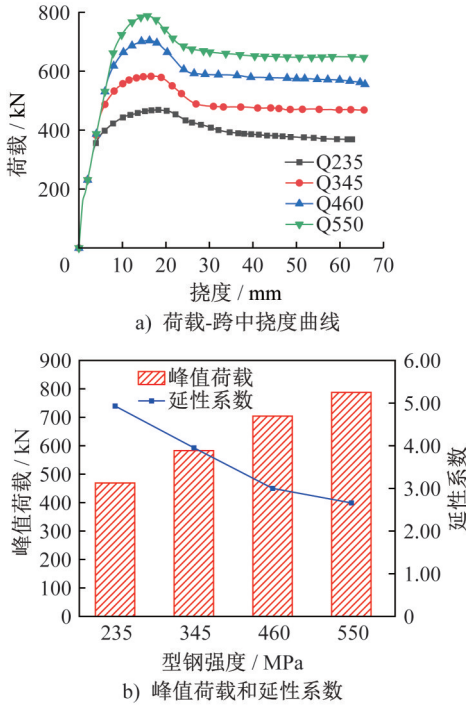


图 11 不同型钢强度组合梁模拟数据

Fig. 11 Data of beams with different steel strengths

如图 11 所示, 提高型钢强度后组合梁极限荷载值较基准组提升了 20.78% 和 35.11%, 而型钢强度为 235 MPa 的对照组相较于基准组承载能力降低了 19.53%。随着型钢强度的提高, 组合梁承载能力得到大幅提升, 但同时延性系数显著下降。提高型钢强度后组合梁延性系数较基准组下降了 24.05% 和 32.66%, 而型钢强度为 235 MPa 的对照组相较于基准组延性系数提高了 24.81%, 当荷载达到峰值荷载时受拉区 UHPC 的截面弯矩贡献占比也逐渐下降, 在使用 Q550 型钢时, UHPC 受拉区等效应力折减系数仅为 0.304。组合梁使用强度等级为 120 MPa 的 UHPC 且同时配置 Q235 型钢, 当达到峰值荷载时, UHPC 受压区边缘平均压应变仅为 UHPC 受压峰值强度对应压应变的 94%, 此后 UHPC 强度继续发展的过程中组合梁承受荷载能力没有得到提升。

研究表明提升 UHPC 强度会使得组合梁的承载能力先升高而后逐渐趋于不变, 且其受拉区的截面弯矩贡献占

比也随之先提升后下降。在组合梁配置 Q345 型钢时, 应当对应使用强度等级为 140 MPa 以下的 UHPC 为优。提升型钢强度可以大幅提升组合梁承载能力, 但会使得组合梁延性变差, 同时 UHPC 对受拉区的贡献占比下降。在组合梁使用强度等级为 120~150 MPa 的 UHPC 时, 应当对应配置 Q345 或 Q460 型钢为优, 使得组合梁具有较好延性且受拉区 UHPC 的受力性能得到保证。

3.2 纵向配筋率和型钢配钢率

为研究不同部件含钢率对组合梁承载能力和变形能力的影响, 设计了不同纵筋配筋率以及不同型钢配钢率的模型, 其中纵筋配筋率分别为 0.34%、0.52%、0.75% 和 1.03%, 型钢配钢率分别为 5.12%、6.35%、7.53% 和 8.52%。其中基准组的纵向配筋率为 0.34%, 型钢配钢率为 6.35%。根据 ABAQUS 输出的荷载-跨中挠度曲线可以得到各工况下组合梁的峰值荷载、破坏荷载, 如表 6、表 7 所示。

表 6 不同纵筋配筋率下组合梁特征荷载值

Table 6 Characteristic load values of beams with different reinforcement ratios

配筋率/%	峰值荷载/kN	破坏荷载/kN	μ	k
0.34	582.91	489.69	3.95	0.322
0.52	618.37	526.99	3.58	0.356
0.75	654.12	560.01	3.68	0.328
1.03	699.49	599.56	3.42	0.364

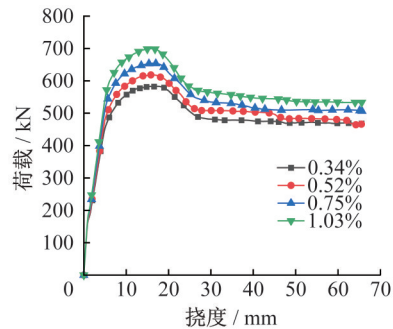
表 7 不同型钢配钢率下组合梁特征荷载值

Table 7 Characteristic load values of beams with different steel ratios

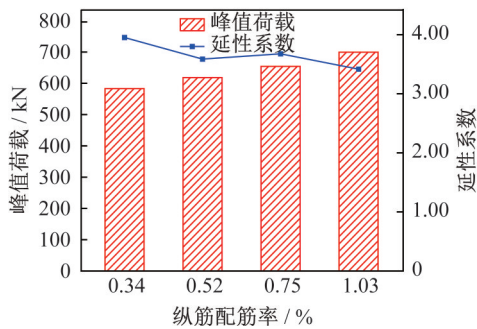
配钢率/%	峰值荷载/kN	破坏荷载/kN	μ	k
5.12	515.85	429.88	4.00	0.347
6.35	582.91	489.69	3.95	0.322
7.53	654.05	552.95	3.54	0.335
8.52	712.88	590.46	3.37	0.278

如图 12 所示, 提高纵筋配筋率后组合梁极限荷载较基准组提升了 6.08%、12.22% 和 20.00%。提高纵筋配筋率会显著提高组合梁受力前期的抗弯刚度, 但同时会使得组合梁延性变差, 延性系数降低, 梁顶 UHPC 退出工作更快。纵筋配筋率的上升使得 UHPC 受拉区性能得到改善, UHPC 受拉区等效应力折减系数有一定提升。

如图 13 所示, 提高型钢配钢率后组合梁极限荷载较基准组提升了 12.20% 和 22.30%, 而型钢配钢率为



a) 荷载-跨中挠度曲线



b) 峰值荷载和延性系数

图12 不同纵筋配筋率组合梁模拟数据

Fig. 12 Data of beams with different reinforcement ratios

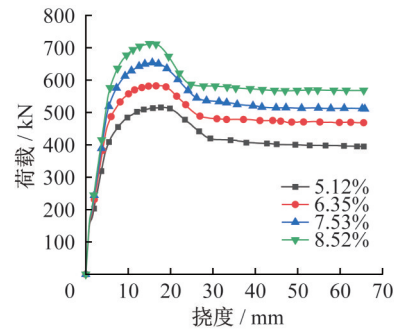
5.12%的对照组相较于基准组承载能力降低了11.50%。提高型钢配钢率也会显著提高组合梁受力前期的抗弯刚度,同时也会使得组合梁延性变差,延性系数随之降低。然而配钢率的提升并没有使得UHPC受拉区性能得到改善,其峰值荷载对应受拉区等效应力折减系数显著下降,在组合梁配钢率为8.52%时,UHPC受拉区等效应力折减系数仅为0.278。

提升纵筋配筋率较提升型钢配钢率对组合梁所带来的承载力提升更为显著,这是由于梁底纵筋形心距离中和轴更远,对受弯正截面承载力的提升较型钢更为显著。在地震作用下,组合梁依赖内部的钢骨耗能并将型钢视作强度储备,而在正截面受弯承载力设计中,提高承载力更有效的方式为适当配置更多的纵向受力钢筋。提升配钢率将会使得UHPC受拉区截面弯矩贡献占比显著降低,为使得UHPC受拉区性能得到保证,组合梁截面配钢率以小于8.5%为优。

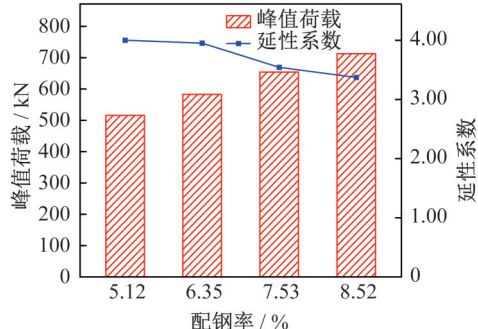
4 结论

本文对型钢UHPC组合梁进行了三分点加载有限元模拟研究,通过参数化分析得到以下主要结论:

(1) 组合梁在三分点受弯过程中可分为四个阶段,分别为完全弹性阶段、损伤工作阶段、塑性强化阶段和延性发展阶段。由于型钢的配置,组合梁在UHPC破坏破碎后且挠度较大时,仍能保持较好承载能力,延性较好。组合梁截面在达到峰值荷载之前基本满足平截面假定,



a) 荷载-跨中挠度曲线



b) 峰值荷载和延性系数

图13 不同型钢配钢率组合梁模拟数据

Fig. 13 Data of beams with different steel ratios

型钢与UHPC的中和轴在加载过程中基本保持重合。

(2) 组合梁在三分点受弯过程中,型钢上翼缘黏结应力主要集中在加载处,下翼缘黏结应力分布则受裂缝开展控制。界面在加载后期出现黏结失效现象,部件间传力依赖摩擦作用,跨中局部出现界面分离现象,因此应在设计中通过剪力连接件或型钢表面处理等方式改善型钢与UHPC界面的黏结性能。

(3) 受拉区的UHPC在开裂后并未退出工作,在达到峰值荷载时仍可以贡献一定的截面抗弯作用。UHPC受拉区等效应力折减系数在不同截面设计中并非固定值,会受截面尺寸、材料强度和含钢量影响,在本文模型中其变化区间为0.278~0.411,出于安全考虑建议设计取值0.25。

(4) 为使得型钢UHPC组合梁具有良好的延性,同时保证受拉区的UHPC具有良好的受力性能,组合梁在使用强度等级为120~150 MPa的UHPC时,截面配钢率以小于8.5%为优,型钢屈服强度以小于550 MPa为优。

参考文献:

[1] 卜良桃,刘娟.考虑型钢初应力的活性粉末混凝土包钢组合柱轴压性能研究[J].建筑钢结构进展,2023,25(11):54-67. DOI:10.13969/j.cnki.cn31-1893.2023.11.006.
BU Liangtao, LIU Juan. A study on axial compression performance of steel-encased reactive powder concrete composite

- columns with initial stress of steel[J].Progress in Steel Building Structures, 2023, 25(11): 54-67. DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2023.11.006. (in Chinese)
- [2] 薛建阳, 赵鸿铁, 杨勇, 等. 型钢混凝土柱粘结滑移性能及 ANSYS 数值模拟方法研究[J]. 建筑钢结构进展, 2006, 8(5): 8-16. DOI: 10.3969/j.issn.1671-9379.2006.05.002. XUE Jianyang, ZHAO Hongtie, YANG Yong, et al. Research on the bond-slip behavior and numerical simulation of steel reinforced concrete columns by ANSYS program [J]. Progress in Steel Building Structures, 2006, 8(5): 8-16. DOI: 10.3969/j.issn.1671-9379.2006.05.002. (in Chinese)
- [3] SHEN D J, LIU C, LUO Y Y, et al. Early-age autogenous shrinkage, tensile creep, and restrained cracking behavior of ultra-high-performance concrete incorporating polypropylene fibers [J]. Cement and Concrete Composites, 2023, 138: 104948. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2023.104948.
- [4] LIU C, SHEN D J, YANG X, et al. Early-age properties and shrinkage induced stress of ultra-high-performance concrete under variable temperature and uniaxial restrained condition[J]. Construction and Building Materials, 2023, 384: 131382. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.131382.
- [5] 伍凯, 徐超, 曹平周, 等. 型钢-碳纤维混凝土组合梁抗弯性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2019, 52(9): 41-52. DOI: 10.15951/j.tmgxcb.2019.09.004. WU Kai, XU Chao, CAO Pingzhou, et al. Experimental study on the flexural behavior of profile steel-steel fiber reinforced concrete composite beams [J]. China Civil Engineering Journal, 2019, 52(9): 41-52. DOI: 10.15951/j.tmgxcb.2019.09.004. (in Chinese)
- [6] LAI B L, BAO R L, ZHANG M Y, et al. Evaluation on the static and seismic performance of steel reinforced concrete composite columns with high strength materials[J]. Journal of Building Engineering, 2023, 79: 107886. DOI: 10.1016/j.job.2023.107886.
- [7] LAI B L, ZHANG M Y, ZHENG X F, et al. Experimental study on the axial compressive behaviour of steel reinforced concrete composite columns with stay-in-place ECC jacket[J]. Journal of Building Engineering, 2023, 68: 106174. DOI: 10.1016/j.job.2023.106174.
- [8] 郑山锁, 陶清林, 胡义, 等. 型钢高强高性能混凝土梁抗弯性能试验研究[J]. 工程力学, 2013, 30(3): 140-145. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2011.11.0740. ZHENG Shansuo, TAO Qinglin, HU Yi, et al. Experimental study on the bending behaviors of srhshpc beams [J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(3): 140-145. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2011.11.0740. (in Chinese)
- [9] 卜良桃, 刘鼎. 通过外包活性粉末混凝土型钢梁抗弯性能试验研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2018, 15(2): 389-397. DOI: 10.19713/j.cnki.43-1423/u.2018.02.016. BU Liangtao, LIU Ding. Experimental study on prestressed steel reinforced high-strength wrapped by reactive power concrete beams [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2018, 15(2): 389-397. DOI: 10.19713/j.cnki.43-1423/u.2018.02.016. (in Chinese)
- [10] 刘祖强, 周志明, 薛建阳, 等. 高强型钢超高性能混凝土短柱轴压性能试验及其有限元分析[J]. 工程力学, 2024, 41(8): 211-227. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2022.07.0604. LIU Zuqiang, ZHOU Zhiming, XUE Jianyang, et al. Experimental study and finite element analysis on axial compression performance of high strength steel reinforced ultra-high performance concrete short column [J]. Engineering Mechanics, 2024, 41(8): 211-227. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2022.07.0604. (in Chinese)
- [11] HU Y Q, MELONI M, CHENG Z, et al. Flexural performance of steel-UHPC composite beams with shear pockets [J]. Structures, 2020, 27: 570-582. DOI: 10.1016/j.istruc.2020.05.039.
- [12] ZHANG Y, CAI S K, ZHU Y P, et al. Flexural responses of steel-UHPC composite beams under hogging moment [J]. Engineering Structures, 2020, 206: 110134. DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.110134.
- [13] 刘祖强, 任甬伏, 薛建阳. 高强型钢超高性能混凝土梁受弯性能试验研究及有限元分析[J]. 工程力学, 2023, 40(4): 102-115. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2021.10.0765. LIU Zuqiang, REN Bengyou, XUE Jianyang. Experimental study and finite element analysis on flexural performance of high-strength steel reinforced ultra-high performance concrete beam [J]. Engineering Mechanics, 2023, 40(4): 102-115. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2021.10.0765. (in Chinese)
- [14] 翟建恺. 型钢活性粉末混凝土梁正截面受弯承载力试验与分析[D]. 扬州: 扬州大学, 2020. ZHAI Jiankai. Test and analysis of flexural bearing capacity of normal section of steel reactive powder concrete beam [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2020. (in Chinese)
- [15] 聂建国, 王宇航. ABAQUS 中混凝土本构模型用于模拟结构静力行为的比较研究[J]. 工程力学, 2013, 30(4): 59-67, 82. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2011.07.0420. NIE Jianguo, WANG Yuhang. Comparison study of constitutive model of concrete in ABAQUS for static analysis of structures [J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(4): 59-67, 82. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2011.07.0420. (in Chinese)
- [16] 郑文忠, 李莉, 卢姗姗. 钢筋活性粉末混凝土简支梁正截面受力性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2011, 32(6): 125-134. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2011.06.005. ZHENG Wenzhong, LI Li, LU Shanshan. Experimental research on mechanical performance of normal section of reinforced reactive powder concrete beam [J]. Journal of Building Structures, 2011, 32(6): 125-134. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2011.06.005. (in Chinese)

- [17] 郭嘉伟,徐彬.混凝土损伤塑性模型损伤因子的取值及应用研究[J].甘肃科学学报,2019,31(6):88-92.DOI:10.16468/j.cnki.issn1004-0366.2019.06.016.
GUO Jiawei, XU Bin. Study on value and application of the damage factors of concrete damaged plasticity model [J]. Journal of Gansu Sciences, 2019, 31 (6) : 88-92. DOI: 10.16468/j.cnki.issn1004-0366.2019.06.016. (in Chinese)
- [18] 郑山锁,李磊,邓国专,等.型钢高强高性能混凝土梁粘结滑移行为研究[J].工程力学,2009,26(1):104-112.
ZHENG Shansuo, LI Lei, DENG Guozhuan, et al. Experimental study on bond-slip behavior between shaped steel and HSHP concrete in steel reinforced HSHP concrete beams[J]. Engineering Mechanics, 2009, 26 (1) : 104-112. (in Chinese)
- [19] 中华人民共和国住房和城乡建设部.组合结构设计规范: JGJ 138—2016[S].北京:中国建筑工业出版社,2016.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for Design of Composite Structures: JGJ 138—2016[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2016. (in Chinese)
- [20] 张利梅,赵顺波,黄承逵.预应力高强混凝土梁延性性能分析与试验研究[J].工程力学,2005,22(3):166-171.DOI:10.3969/j.issn.1000-4750.2005.03.029.
ZHANG Limei, ZHAO Shunbo, HUANG Chengkui. Experimental study of ductility of prestressed high-strength concrete beams[J]. Engineering Mechanics, 2005, 22 (3) : 166-171. DOI: 10.3969/j.issn.1000-4750.2005.03.029. (in Chinese)
- [21] 冯鹏,强翰霖,叶列平.材料、构件、结构的“屈服点”定义与讨论[J].工程力学,2017,34(3):36-46.DOI:10.6052/j.issn.1000-4750.2016.03.0192.
FENG Peng, QIANG Hanlin, YE Lieping. Discussion and definition on yield points of materials, members and structures[J]. Engineering Mechanics, 2017, 34 (3) : 36-46. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2016.03.0192. (in Chinese)