



UHPC 部分强化板柱节点的抗冲切试验与数值研究

冯斯奕, 顾凯欣, 梁诗雪

(浙江理工大学建筑工程学院, 杭州 310018)

摘要: 为了研究超高性能混凝土 (Ultra-high performance concrete, UHPC) 部分取代普通混凝土 (Normal concrete, NC) 对板柱节点抗冲切承载力提升效果的影响, 以不同 UHPC 强化区域的板柱节点为研究对象, 开展试验与数值模拟分析。进行抗冲切试验, 分析节点板中心点荷载-挠度曲线以及裂缝开展和破坏情况, 并比较不同 UHPC 强化区域对节点冲切性能的影响。在试验基础上, 建立相应的 ABAQUS 有限元模型, 分别采用混凝土损伤塑性 (Concrete damaged plasticity, CDP) 模型和摩擦接触模型, 模拟混凝土材料的非线性行为和 UHPC-NC 界面滑移过程, 输出模型的荷载-挠度曲线与板底拉伸损伤分布, 并与试验结果进行对比验证。结果显示: UHPC 部分强化可以有效提升板柱节点的抗冲切承载力, 增强节点的延性, 改善节点的破坏模式, 同时比全 UHPC 节点更具经济性。在研究工况下, 相较于 NC 板柱节点, 全 UHPC 板柱节点承载力提升约 153%, UHPC 面积为 440 mm×440 mm 的板柱节点承载力提升约 56.3%, UHPC 面积为 560 mm×560 mm 的板柱节点承载力提升约 82.3%, 提升了板柱节点承载力; 经 UHPC 强化的板柱节点延性提升, 出现了冲切、弯曲混合破坏模式, UHPC 部分强化板柱节点的延性提升幅度与全 UHPC 节点相近。该研究为 UHPC 局部强化板柱节点的应用提供了试验依据, 并建立了可用于后续开展 UHPC 部分强化尺寸、UHPC 强度、配筋率等参数扩展分析的有限元模型, 为实现节点承载力与经济性的多目标优化提供了模型基础, 具有良好的工程推广价值。

关键词: UHPC; 板柱节点; 有限元模拟; 抗冲切承载力

中图分类号: TU375.2

文献标志码: A

文章编号: 1673-3851 (2026) 03-0229-10

引文格式: 冯斯奕, 顾凯欣, 梁诗雪. UHPC 部分强化板柱节点的抗冲切试验与数值研究[J]. 浙江理工大学学报 (自然科学), 2026, 55(2): 229-238.

Reference Format: FENG Siyi, GU Kaixin, LIANG Shixue. Enhancing punching shear resistance in slab-column connections via partial UHPC reinforcement: Experimental testing and numerical modeling[J]. Journal of Zhejiang Sci-Tech University, 2026, 55(2): 229-238.

Enhancing punching shear resistance in slab-column connections via partial UHPC reinforcement: Experimental testing and numerical modeling

FENG Siyi, GU Kaixin, LIANG Shixue

(School of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: To investigate the enhancing effect of partially replacing normal concrete (NC) with ultra-high performance concrete (UHPC) on the punching shear capacity of slab-column connections, experimental and numerical analyses were conducted on slab-column joints with varying UHPC reinforcement zones. Punching shear tests were conducted to analyze the load-deflection curves at the slab center, crack propagation characteristics, and failure mechanisms. The effects of different UHPC

收稿日期: 2025-04-23 网络出版日期: 2025-09-17

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51808499); 浙江省自然科学基金项目 (LY22E080016); 浙江理工大学科研业务费专项资金项目 (24052126-Y)

作者简介: 冯斯奕 (2000—), 女, 浙江嘉兴人, 硕士研究生, 主要从事混凝土结构非线性分析方面的研究。

通信作者: 梁诗雪, E-mail: liangsx@zstu.edu.cn

reinforcement areas on the punching shear performance of slab-column connections were compared. Based on experimental studies, a corresponding ABAQUS finite element model was established. The concrete damaged plasticity (CDP) model and a frictional contact model were employed to simulate the nonlinear behavior of concrete materials and shear-slip behavior at the UHPC-NC interface. The model outputs included load-deflection curves and bottom-surface tensile damage distributions, which were compared with the experimental results for validation. The results showed that partial UHPC reinforcement can effectively improve the punching shear capacity, enhance the ductility, and modify the failure modes of slab-column connections, while offering better cost-efficiency compared to full UHPC reinforcement. Under the current test conditions, the ultimate load capacity increased by 153% when UHPC completely replaced NC. Partial UHPC reinforcement configurations with coverage areas of 440 mm×440 mm and 560 mm×560 mm exhibited punching shear capacity enhancements of 56.3% and 82.3%, respectively, which improved the punching shear capacity of slab-column connections. All UHPC-reinforced specimens demonstrated improved ductility compared to NC counterparts, accompanied by a transitional failure mode combining punching shear and flexural yielding. Notably, the ductility improvement magnitude between partially and fully UHPC-reinforced specimens was comparable. In summary, this study provides experimental evidence for the application of UHPC locally reinforced slab-column connections and develops a finite element model that can be extended to parametric studies on reinforcement area, UHPC strength, and reinforcement ratio. The model lays a foundation for multi-objective optimization considering both structural performance and economic efficiency, and demonstrates strong potential for engineering application.

Key words: UHPC; slab-column joints; finite element simulation; punching shear resistance

0 引言

钢筋混凝土板柱结构有较大的空间利用率与出色的架构灵活性,而且施工便捷,可以快速搭建,因而广泛应用于地铁车站、地下车库及工业厂房等大跨度空间建筑中^[1]。板柱结构通过板与柱直接相连来传递荷载,板柱节点处的抗冲切能力较低,易在节点区域发生脆性冲切破坏,严重威胁工程安全。为了提升板柱节点的抗冲切承载力,改善破坏模式,研究者提出了许多改进措施,如设置柱帽^[2]、配置抗冲切钢筋^[3]、采用钢-混凝土组合结构^[4]等。但上述措施往往存在结构自重显著增加、施工复杂化等弊端,因此需要寻求新材料以有效提升板柱节点的抗冲切性能。

近年来,超高性能混凝土(Ultra-high performance concrete, UHPC)的出现为提升板柱节点抗冲切承载力提供了新思路。作为一种新型水泥基材料,UHPC相较于普通混凝土(Normal concrete, NC)抗压强度更高,一般可达到120~200 MPa^[5];同时,UHPC内部纤维的桥接效应使其具有良好的延性,能够有效抑制裂缝的开展,进而优化结构的破坏模式^[6]。因此,UHPC被广泛应用于提升结构的承载力。目前关于UHPC强化板柱节点抗冲切性能的研究已经取得了初步进展,但这些研究主要聚焦于UHPC对板柱节点的整体替换方案。

Zhou等^[7]对12块使用超高性能纤维增强混凝土(Ultra-high-performance fiber-reinforced concrete, UHPFRC)增强的测试板进行了试验和数值研究,结果表明应用UHPFRC混合物能有效提高平板板柱连接处的抗冲切承载力。EI Zareef等^[8]对超高性能自密实混凝土增强的板柱节点进行了试验与数值研究,结果表明该材料能够有效提升节点承载力并优化板厚与配筋率,为解决密集配筋与重载冲切问题提供一种高效的技术路径。Kadhim等^[9]在UHPC板柱节点试验基础上建立了有限元模型,证实了UHPC能够替代传统的剪切钢筋提升节点的抗冲切承载力,进而提供了一种更为高效的施工方案。然而,UHPC材料成本较高,整体使用UHPC虽然性能突出,但成本较高,经济性不佳,因此在板柱节点区域局部使用UHPC成为一种更优选择。目前关于UHPC部分强化板柱节点的抗冲切性能研究尚不充分,不同UHPC强化区域对板柱节点抗冲切承载力的具体影响规律仍需要进一步研究。

为探究UHPC部分强化对板柱节点抗冲切性能的影响,本研究制作4个不同UHPC强化区域的板柱节点试件,通过中心集中荷载试验研究其板中心荷载-挠度曲线以及裂缝开展和破坏情况。在试验基础上,利用ABAQUS/Standard建立相应数值模型,输出荷载-挠度曲线及拉伸损伤情况,通过对

比试验来验证模型的合理性,并对不同 UHPC 强化区域板柱节点的抗冲切性能进行分析。本研究系统分析 UHPC 局部强化在提升板柱节点的抗冲切承载力、延性表现以及破坏模式方面的潜在优势,可为 UHPC 在实际工程中作为经济高效的局部强化手段提供试验依据;同时,建立的数值模型可为后续 UHPC 部分强化尺寸、UHPC 强度、配筋率等参数研究提供基础,为实现节点承载力、延性与经济性等多目标优化设计提供理论支持。

1 UHPC 部分强化板柱节点抗冲切试验

1.1 试件设置

本研究共设计了 4 个板柱节点试件。所有试件均由方形板和方形截面短柱两部分整体浇筑振捣而成,其中:方形板截面尺寸为 $800\text{ mm} \times 800\text{ mm}$,厚度为 120 mm ;方形截面短柱尺寸为 $200\text{ mm} \times 200\text{ mm}$ 。短柱位于板中央,其截面形心与板中心重合,以消除偏心对板柱节点冲切承载力、裂缝开展模式的影响。板内部钢筋均采用 HRB400 级钢筋(Φ),钢筋保护层厚度取 25 mm 。为控制变量并突出 UHPC 强化区域的影响,所有试件统一仅配置底部正弯矩钢筋,布筋方式为 $\Phi 12@87.5$ 。上部柱结构中箍筋、纵向钢筋设有弯锚,弯锚长度为 100 mm 。试件尺寸及配筋情况如图 1 所示。由于本研究设置的加载方式主要是为了诱发节点的冲切破坏,该配筋方案可满足研究目标,且不会对试验结果的代表性产生显著影响。

表 1 试件参数

试件编号	材料	构件尺寸/mm	配筋率/%
C	C50		
CU-1	中心 $440\text{ mm} \times 440\text{ mm}$ 范围内采用 UHPC;其余范围采用 C50	$800 \times 800 \times 120$	1.34
CU-2	中心 $560\text{ mm} \times 560\text{ mm}$ 范围内采用 UHPC;其余范围采用 C50		
U	UHPC		

本研究中采用的 UHPC 配合比包括水泥、河沙、高效掺合料(硅灰、粉煤灰等活性粉末)、钢纤维、高效减水剂和水。该配合比未使用粗骨料,仅使用最大粒径为 2.4 mm 的细沙。所用钢纤维为平直镀锌铜钢纤维,平均长度为 13 mm ,直径为 0.2 mm ,极限拉伸强度为 2900 MPa 。UHPC 与 NC 在养护 28 d 后的基本力学性能如表 2 所示。

表 2 UHPC 与 NC 的基本力学性能

混凝土类型	抗压强度/MPa	弹性模量/GPa	抗拉强度/MPa
NC	32.9	345	2.80
UHPC	133.0	477	9.01

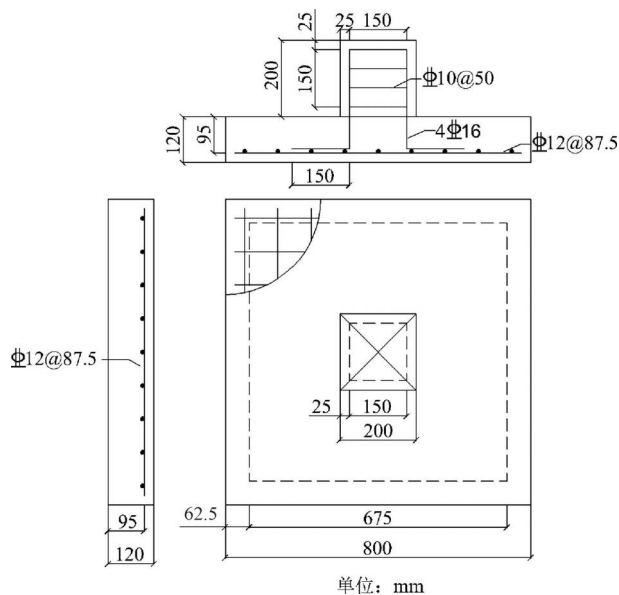


图 1 试件平面图

为了研究 UHPC 强化面积对板柱节点的承载力及破坏模式的影响,试验设置 2 组对照组,其中:一个对照组选用 C 试件,C 试件全采用 C50 混凝土;另一个选用 U 试件,U 试件全采用 UHPC。基于板柱节点常见的冲切破坏模式,板柱结构的冲切角一般为 45° ,确保 UHPC 覆盖潜在的破坏区域;设置两组试验组,分别选用 CU-1 和 CU-2 试件,其中:CU-1 试件在 $440\text{ mm} \times 440\text{ mm}$ 的板中心范围内浇筑 UHPC,其余部分浇筑 C50 混凝土;CU-2 试件在 $560\text{ mm} \times 560\text{ mm}$ 的板中心范围内浇筑 UHPC,其余部分浇筑 C50 混凝土。试件参数如表 1 所示。

试件 C 与 U 采取一次性整体浇筑方式,试件 CU-1 与 CU-2 采用分阶段浇筑的施工方式,具体顺序为:首先浇筑板中心区域的 UHPC 强化部分,在完成初凝后再浇筑周边 NC 板段,最后进行短柱的整体浇筑。短柱采用与节点核心区相同的 UHPC 材料,旨在确保柱一板连接区域的整体性能。UHPC 与 NC 之间的界面在二次浇筑前均进行了凿毛处理,以增强界面粘结力与协同工作性能。混凝土应变测点布置在试件上下表面;因试件几何对称,为了减少重复工作并节约成本,应变片布置在试件的 $1/4$ 区域,上下表面各 7 个。试件浇筑现场照片及应变片位置示意图如图 2 所示。

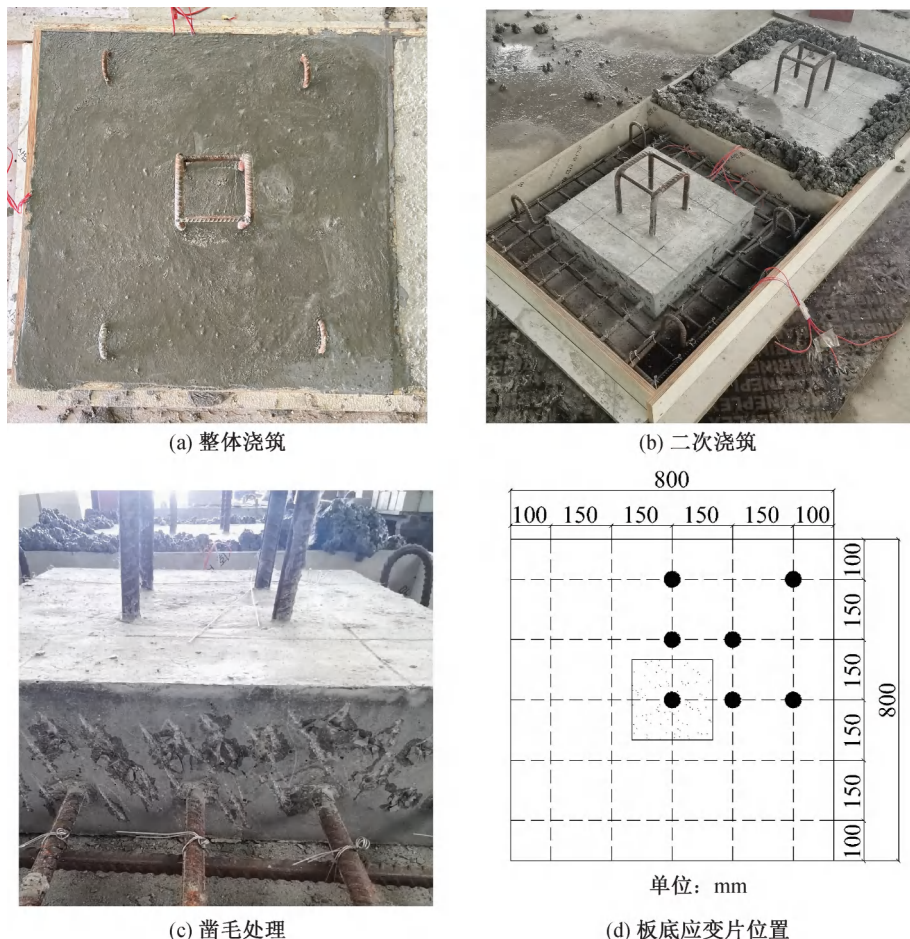


图2 试件浇筑照片及应变片位置示意图

1.2 试验装置及加载方案

试件的边界条件设计为四边简支,为便于在试验中观测试件下表面的裂缝开展情况,制作了钢框架结合4个钢支墩组成了支撑结构,如图3(a)所示。使用电液伺服长柱试验件作为加载设备,如图3(b)所示。仪器型号为CZS-5000F,量程为50 kN~2000 kN,示值精度为 $\pm 1\%$ 。实验过程中实时记录力-位移、力-荷载数据。采集系统使用DHDAS动态信号采集分析系统,实时记录应变-时间与位移-时间数据,非线性精度 $\leq 0.1\%$ 。



图3 试验装置现场照片

1.3 试验结果分析

1.3.1 荷载-挠度

试件板中心的荷载-挠度关系如图4所示。由图4可以看出,随着UHPC强化面积的增加,板柱节点的刚度与抗冲切承载力也随之提升。与C试件相比,U试件的极限承载力提升最为显著,达153.6%,UHPC部分强化试件(CU-1、CU-2)的极限承载力也有大幅提升,分别为56.3%与82.3%,呈非线性正相关。使用UHPC的试件(CU-1、CU-2、U)对应于极限荷载的挠度较C试件显著增大,但不同UHPC强化面积的试件(CU-1、CU-2、U)极限挠度较为接近,这表明使用不同UHPC强化面积均能有效提升结构的延性,且提升幅度基本相当。

1.3.2 裂缝开展

为了揭示节点在荷载作用下的裂缝发展特征,测试过程中记录了各试件底部的裂缝开展过程与对应荷载,如图5—图8所示。所标示的载荷值对应加载过程中的关键阶段,包括初始开裂、裂缝快速发展、极限荷载前状态及最终破坏形态,以反映从裂缝

萌生到破坏的全过程。随着 UHPC 面积的增加,试件的初始开裂荷载逐步提高,结构的整体抗弯刚度提升。对比 C 与 U 试件的裂缝形态可以发现:C 试件裂缝数量少,自中心区域向四角延伸扩展,为典型的冲切破坏模式;U 试件裂缝数量多,分布更为均匀,且在中心区域网状连通,试件为弯曲、冲切混合破坏模式^[10]。UHPC 部分强化试件(CU-1、CU-2)都呈现出弯曲、冲切混合破坏的特征。试验结果表明,UHPC 材料的加入能增强节点区域的延性,促使节点由冲切破坏向弯曲破坏转变。从部分强化试件的破坏形态可见,UHPC-NC 界面处均存在较为集中的界面裂缝,表明界面破坏是局部强化构件中的薄弱环节。该界面处裂缝的出现可能引起界面分离,影响 UHPC 区域与附近 NC 板的协同工作,进

而削弱节点整体的刚度与承载力。综上所述,在 UHPC 局部强化板柱节点的工程应用中需要重点关注界面破坏问题。

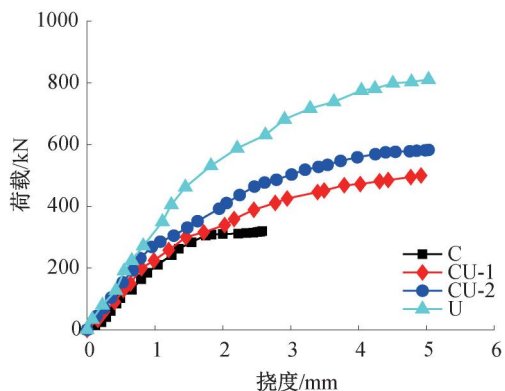


图 4 板底中心荷载-挠度曲线

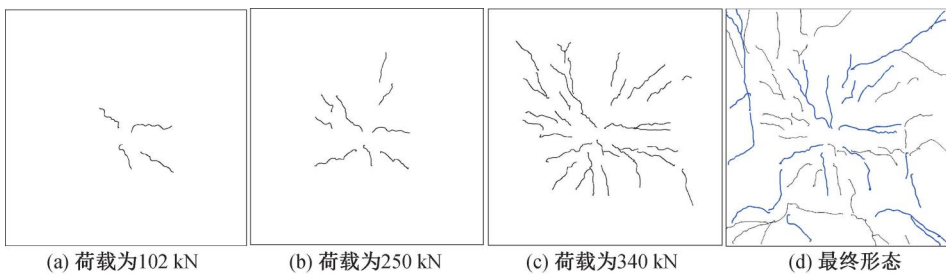


图 5 C 试件裂缝开展图及对应荷载

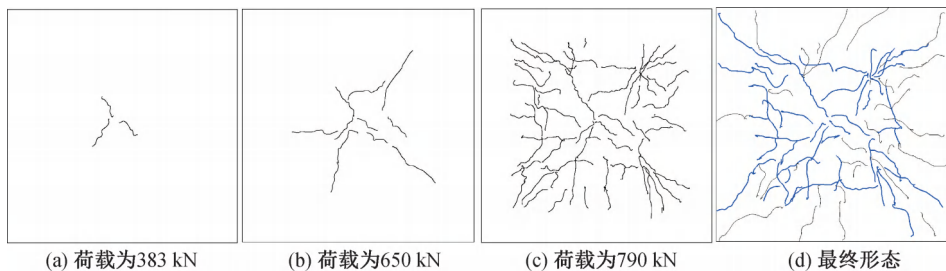


图 6 U 试件裂缝开展图及对应荷载

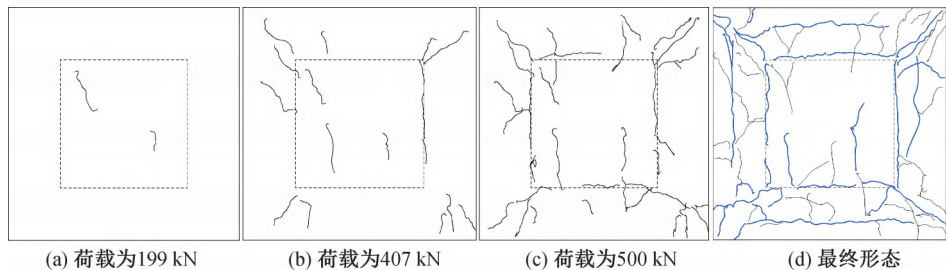


图 7 CU-1 试件裂缝开展图及对应荷载

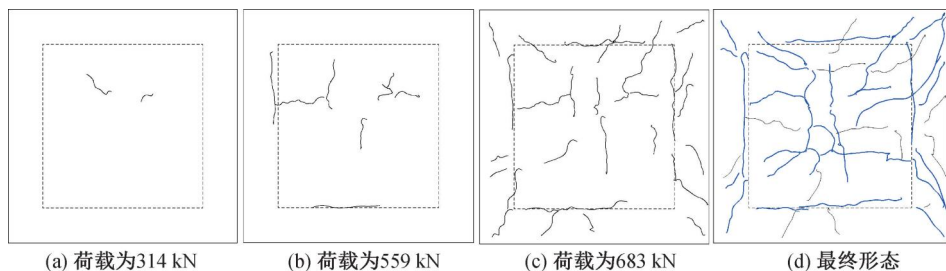


图 8 CU-2 试件裂缝开展图及对应荷载

2 UHPC 部分强化板柱节点的有限元模拟

本研究采用 ABAQUS/Standard 隐式求解器进行数值分析,该方法具有较好的收敛性和对刚体运动的控制能力,适用于模拟混凝土构件冲切破坏过程中细微的裂缝演化和损伤发展。模型网格划分采用结构化划分的策略,主要使用线性缩减积分六面体单元(C3D8R)和线性杆单元(T3D2),分别用于实体结构与钢筋的建模。板和柱区域均以近似正方体的形状划分单元。为验证网格划分对模拟结果的影响,本研究进行了网格敏感性分析,最终采用 20 mm 的网格划分方案,以兼顾计算效率与模拟精度。整个模型共划分 10920 个单元,其中 C3D8R 单元 10600 个,T3D2 单元 320 个,对应节点总数为 13959 个。

2.1 材料参数

2.1.1 混凝土塑性损伤模型

混凝土材料在外荷载作用下呈现复杂的非线性力学响应特征,主要表现为刚度强化、应变软化及最终失效。在现有混凝土本构模型中,混凝土损伤塑性(Concrete damaged plasticity, CDP)模型能有效模拟材料从弹性阶段至完全失效的全过程力学行为而被广泛应用,其本构方程由损伤因子(d_c 、 d_t)、塑性流动法则和非关联硬化准则共同描述。本研究采用《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)中推荐的单轴拉压本构关系为基础,参考试验材料的基本力学性能参数,CDP 模型中损伤因子的计算如式(1)—(2)所示:

$$d_t = 1 - \frac{\sigma_t}{E_0 \epsilon_t} \quad (1)$$

$$d_c = 1 - \frac{\sigma_c}{E_0 \epsilon_c} \quad (2)$$

其中: d_c 、 d_t 分别为压缩与拉伸损伤因子, σ_c 、 σ_t 分别为单轴压应力和拉应力, ϵ_c 和 ϵ_t 分别为单轴压应变和压应变, E_0 为材料初始弹性模量。

本研究参考 Fakeh 等^[11]针对 UHPC 结构的数值建模经验,对控制屈服面形状与塑性流动行为的塑性参数进行取值。取扩张角 $\psi = 55^\circ$, 偏心率 $e = 0.1$, 应力比 $f_{b0}/f_{c0} = 1.2$, 张压比 $K_c = 2/3$ 。

2.1.2 钢筋双折线模型

依据《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)建议采用双折线模型表征钢筋的力学行为,其应力-应变关系曲线如图 9 所示。该模型将钢筋的受力过程简化为 2 个阶段:弹性阶段与强化阶段。当钢筋处于弹性阶段时,应力与应变呈

线性比例关系,其斜率即为弹性模量为 E_s ;当应力达到屈服强度 σ_y 时,钢筋进入强化阶段,此阶段应力继续上升但增长速率明显减缓,斜率定义为强化模量 E_p ,通常取为 $0.01E_s$;随着应变继续增大,材料最终达到极限应变 $\epsilon_{s,u}$,对应的极限强度为 $\sigma_{s,u}$ 。

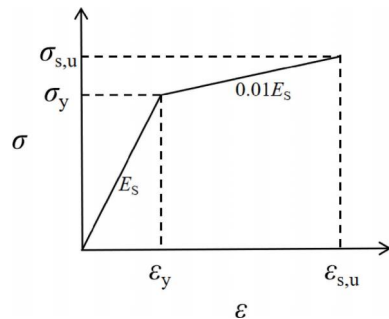


图 9 钢筋应力-应变关系曲线

本研究中 HRB400 钢筋的屈服强度取 $\sigma_y = 400$ MPa,极限强度取 $\sigma_{s,u} = 540$ MPa,在弹性阶段的弹性模量取 $E_s = 200$ GPa。

2.2 边界条件、荷载与相互作用

本研究采用位移作为加载方案,参考试验结果,在柱中心施加沿负 z 轴方向 10 mm 的垂直位移。为模拟试验中四面宽 62.5 mm 的钢支架四边简支条件,在板底与钢支架接触区域设置约束以限制 z 方向的位移,同时在四角设置约束以限制 x 方向位移,防止结构水平移动。模型约束与荷载位置如图 10(a)—(b)所示。模型不考虑钢筋与混凝土之间的粘结滑移行为,使用内置区域将钢筋框架直接嵌入到混凝土中,如图 10(c)所示。

针对 UHPC 与 NC 的层间界面特征,构建摩擦-接触模型表征界面力学行为:界面法向接触采用硬接触准则,切向摩擦行为采用库仑摩擦模型模拟。摩擦因数 μ 的取值直接影响 UHPC 与 NC 之间剪切力的传递能力。根据 *Building Code Requirements for Structural Concrete* (ACI 318-19) 中的建议,若混凝土界面经过机械粗糙处理(如凿毛深度 ≥ 5 mm), μ 可取 $0.6 \sim 1.0$ 。本研究中界面采用人工凿毛处理,凿毛深度约 5 mm。为在确保模型稳定性的前提下保守评估界面的滑移行为,本研究选取 $\mu = 0.5$ 。模型中的 UHPC-NC 界面定义如图 10(d)所示。

2.3 模型、试验结果对比

2.3.1 荷载-挠度

4 个试件有限元模型的极限承载力与实验结果的误差如表 3 所示,有限元模拟与试验的荷载-挠度

曲线如图 11 所示。从表 3 和图 11 可以看出:有限元模拟获得的荷载-挠度曲线与试验结果较为吻合。有限元模型的极限抗冲切承载力(V_{FE})与实验结果(V_{test})基本一致,误差控制在 4%之内。C 与 U 试件早期模拟刚度略高于试验结果,这可能是因为模型采用了理想化的材料本构关系与完全嵌固的钢筋建模方式,未考虑钢筋滑移及混凝土的早期缺陷,导

致初始刚度升高。CU-1 与 CU-2 试件在弹性阶段的模拟刚度略低于试验结果,这可能是因为使用摩擦-接触模型定义 UHPC-NC 界面处的接触,模型在加载初期发生轻微的滑移,导致刚度降低。综合来看,本研究对于模型的定义基本合理,尽管在材料参数、界面定义等方面仍有一定的优化空间,但已基本满足 UHPC 部分强化板柱节点的模拟要求。

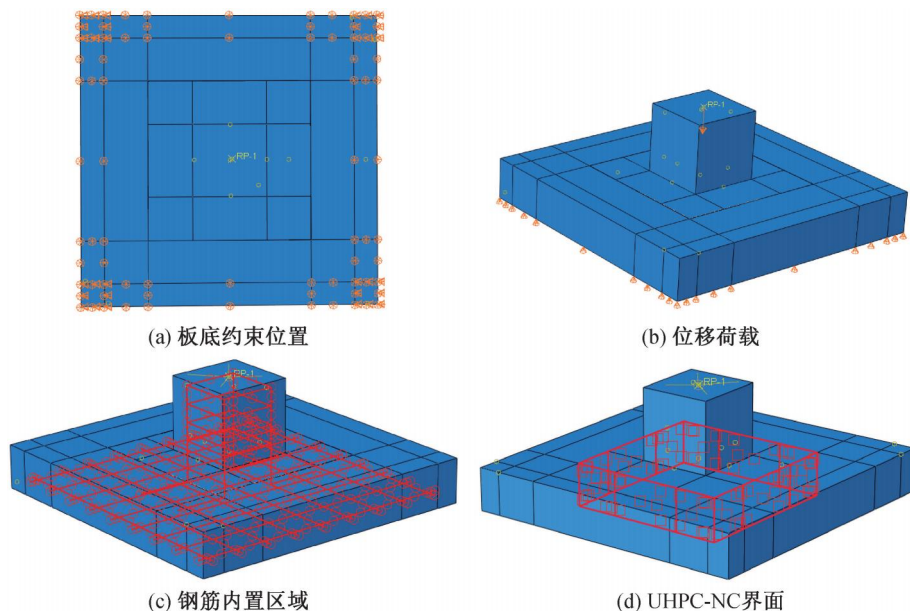


图 10 边界条件、荷载与相互作用示意图

表 3 试验与模拟极限承载力的误差

试件编号	V_{test}/kN	V_{FE}/kN	误差/%
C	319.80	325.96	1.93
U	811.06	782.23	3.55
CU-1	500.11	487.47	2.53
CU-2	583.12	568.16	2.57

2.3.2 损伤分布与裂缝开展

混凝土裂缝的萌生与开展主要由其拉伸强度决定,因此在 CDP 模型中引入拉伸损伤变量(DAMAGET),以表征材料开裂引起的刚度退化效应。在 ABAQUS 软件中输出损伤云图可实现损伤变量的可视化。当单元损伤因子趋近于 1 时,混凝土处于完全开裂状态。本研究通过观察模型的板底拉伸损伤分布来分析其裂缝的发展,并与试验裂缝图对比验证模型的可靠性。各试件数值模拟的拉伸损伤分布与试验裂缝开展的对照图如图 12 所示,其中左侧为数值模型板底拉伸损伤云图,右侧为试验试件板底裂缝图。

从图 12 可以看出:C 试件的高损伤区域较小,损伤分布不均匀,主要集中在节点的中心区域,U 试件的损伤分布更为均匀,高损伤区域通过四角连

通板边,对照相应的试验裂缝图,U 试件相较于 C 试件裂缝更加细密且均匀分布于节点区域,这表明 UHPC 在承担荷载时充分发挥了传力的作用。C 试件拉伸损伤由板中心向板角放射性分布,损伤值沿径向快速衰减,为典型的冲切破坏模式;使用 UHPC 强化的试件(U、CU-1、CU-2)出现了平行于板边的条状损伤,同时也存在损伤向四角扩展的冲切破坏特征,为冲切、弯曲混合破坏模式。此外,UHPC 部分强化试件 CU-1 与 CU-2 在 UHPC-NC 界面处可以观察到明显的损伤变化,该现象与试验得出的界面裂缝形态相符,这归因于界面应力集中引发 UHPC、NC 协同工作性能降低。

值得注意的是,有限元模拟中在部分板边缘区域未显示拉伸损伤,但试验中可观察到细微裂缝,主要原因在于界面采用摩擦-接触模型进行建模,未引入显式的损伤演化机制。当界面发生滑移或应力释放后,接触面区域内的拉应力将迅速减弱,导致 CDP 单元中拉伸损伤因子归零;而实际材料中,界面处可能由于粘结退化或初始缺陷已产生微裂缝。该现象表明,基于摩擦-接触模型的界面定义方式在表现界面细小裂缝的逐步发展及其对周围混凝土

应力状态的影响方面存在一定的局限。但本研究的模拟结果能够较为清晰地显示,主裂缝的起裂位置

和发展方向与试验中观察到的裂缝形态整体一致,满足研究的基本要求。

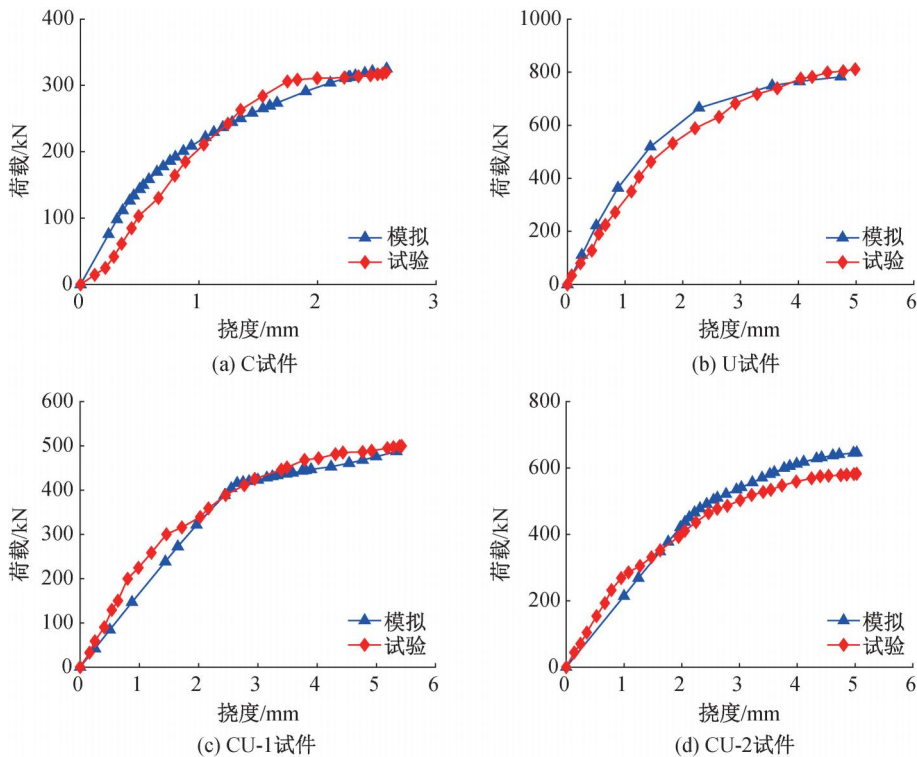
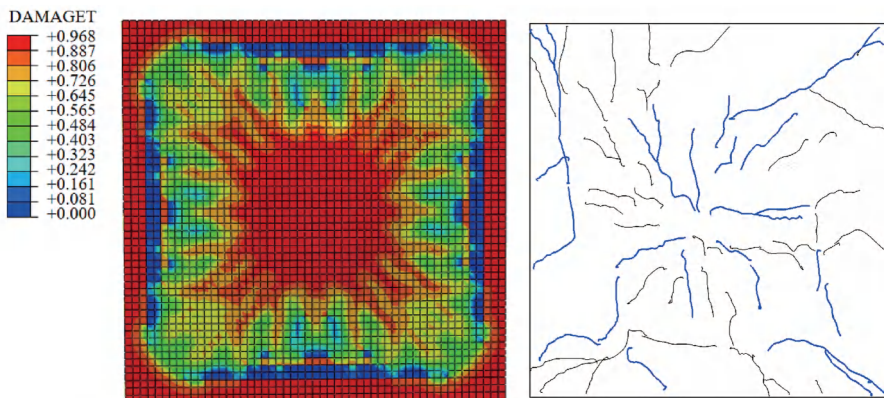
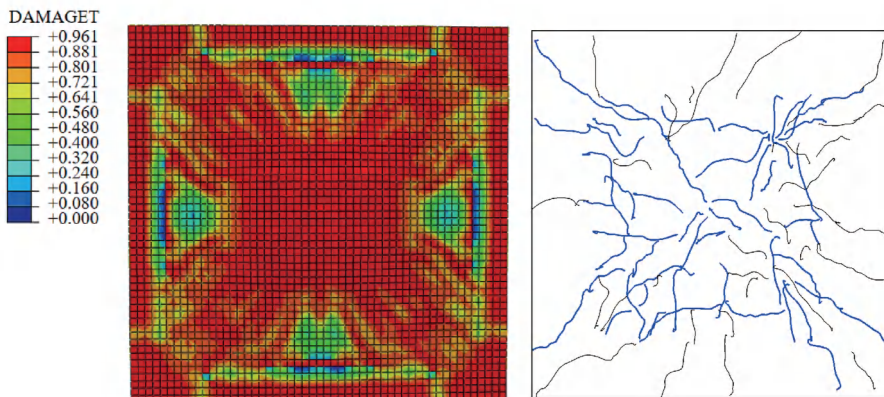


图 11 模拟与试验对比的荷载-挠度曲线



(a) C试件



(b) U试件

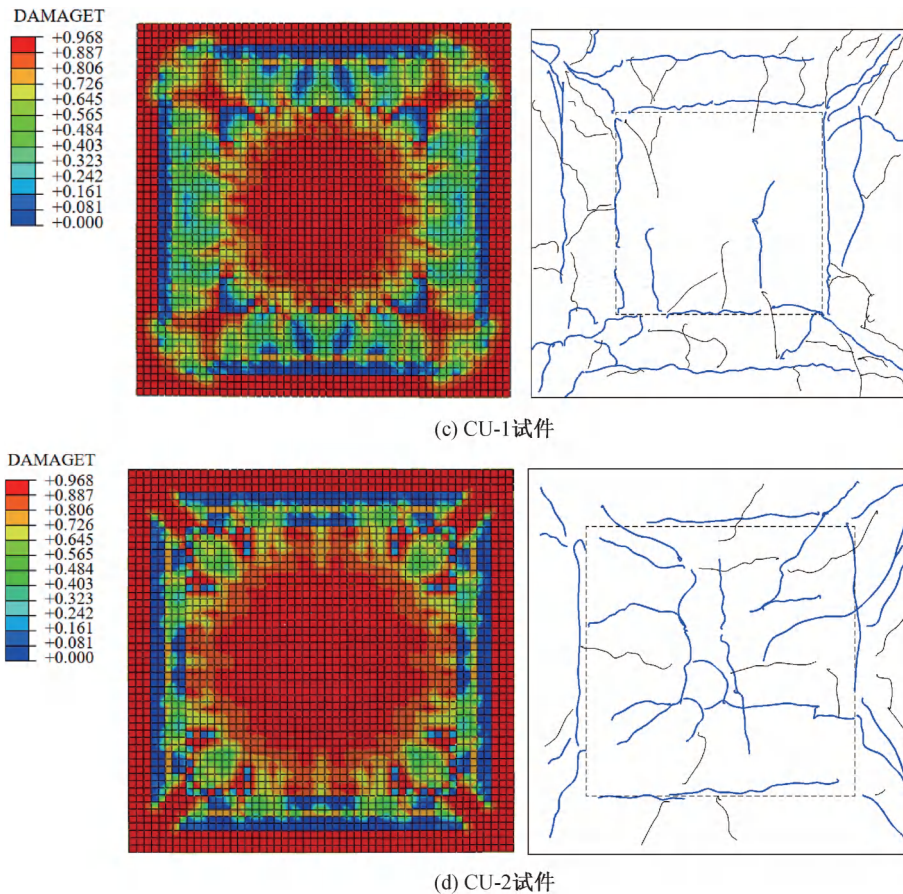


图 12 数值模型拉伸损伤云图-试验裂缝对照图

3 结 论

本研究开展了 UHPC 部分强化板柱节点的抗冲切试验,并在此基础上建立了能够有效反映节点力学行为的数值模型,结合试验与数值模拟结果,揭示了不同 UHPC 强化区域对板柱节点力学性能的影响规律,主要结论如下:

a) 试验结果表明,使用 UHPC 部分替换 NC 可以有效提升板柱节点的抗冲切承载力。在本研究工况下,440 mm×440 mm 的 UHPC 增强面积可以提升板的承载力约 35.0%,而 560 mm×560 mm 的 UHPC 增强区域可以将节点的承载力提升约 83.8%。

b) 有限元模拟结果与试验结果具有良好的-致性,这表明研究所建立的数值模型能够有效模拟 UHPC 部分强化节点的承载力变化规律。该模型可用于后续开展不同 UHPC 强化尺寸、UHPC 强度和配筋率等多参数扩展分析,为实现节点承载力与经济性等多目标优化设计提供可靠基础。

c) UHPC 部分强化能够改善板柱节点的破坏模式,且不同面积 UHPC 强化能实现相近的延性改

善效果。C 试件呈现出典型的冲切破坏特征;U 试件裂缝分布均匀且相互连通,为冲切、弯曲混合破坏模式;CU-1 与 CU-2 试件在 UHPC-NC 界面处出现了界面破坏,同时也呈现出冲切、弯曲混合破坏的特征。

d) 在工程实践中使用 UHPC 部分强化能够有效提升板柱节点延性,但需注意 UHPC-NC 的界面破坏,可通过界面凿毛处理^[12](凿毛深度≥5 mm)、涂覆界面剂^[13]等措施抑制 UHPC-NC 界面剥离风险。

与以往主要聚焦于全 UHPC 节点的研究相比,本研究从 UHPC 部分强化的角度出发,验证了其在提升节点性能方面的有效性,为探索其在节点承载性能提升与材料利用之间的权衡方式提供了试验支撑和数值模型基础,为后续开展多参数分析与节点设计优化研究奠定了初步基础,具有良好的工程应用前景和理论研究价值。

参考文献:

[1] 蒋明月,史庆轩,景炬光,等. 混凝土板柱节点受冲切承载力研究进展[J/OL]. 土木工程学报, 2024: 1-18. (2024-04-25)

- [2025-04-23]. <https://link.cnki.net/doi/10.15951/j.tmgcxb.24010043>.
- [2] 童亿力, 孙俊豪, 邬林锋, 等. 不同柱帽布置形式的板柱节点抗冲切性能有限元分析[J]. 水利规划与设计, 2022(9): 122-126.
- [3] Gouda A. Numerical study on the punching shear strength of edge steel-reinforced concrete slab-column connections [J]. Results in Engineering, 2025,25: 104581.
- [4] Nguyen-The D, Thai S, Nguyen-Van H, et al. Numerical modelling of punching shear behaviour of reinforced concrete flat slab and CFT column connections using steel plates [J]. Structures, 2025,74: 108594.
- [5] Yang J, Chen B, Su J, et al. Effects of fibers on the mechanical properties of UHPC: A review [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition), 2022,9(3): 363-387.
- [6] Yu R, Zhang J, Liu K, et al. Evaluation and regulation of Ultra-High Performance Concrete (UHPC) crack resistance based on physicochemical multi-factor coupling approach [J]. Construction and Building Materials, 2021,301: 124100.
- [7] Zhou Y, Shou H, Li C, et al. Punching shear behavior of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete and normal strength concrete composite flat slabs[J]. Engineering Structures, 2025, 322: 119123.
- [8] El Zareef M A, Abdulrahman A G, Alnemari A. Experimental investigation of punching shear behaviour of ultra-high performance self-compacting concrete slabs[J]. Case Studies in Construction Materials, 2023,19: e02307.
- [9] Kadhim M M A, Saleh A R, Cunningham L S, et al. Numerical investigation of non-shear-reinforced UHPC hybrid flat slabs subject to punching shear [J]. Engineering Structures, 2021, 241: 112444.
- [10] Liang S, Shen Y, Ren X. Comparative study of influential factors for punching shear resistance/failure of RC slab-column joints using machine-learning models[J]. Structures, 2022,45: 1333-1349.
- [11] Fakeh A, Hussein A, Elrefai A, et al. Finite element modeling of UHPC slab-column connections using CDP: Parameter calibration and experimental verification [J]. Engineering Structures, 2025,280: 115009.
- [12] Chen K, Lin Y, Wang Z, et al. Shear and tensile bonding performance of prefabricated UHPC and cast-in-place NC interface in composite girder bridges [J]. Construction and Building Materials, 2025,462: 139952.
- [13] Yuan C, Li J, Liu J. Study on Frost Resistance and Interface Bonding Performance of UHPC-NC Composite with Interface Agent[J]. Materials, 2021,14(21): 6593.

(责任编辑:康 锋)