



局部采用超高性能混凝土的板柱节点 抗冲切性能试验研究

李创, 周妍

(长沙理工大学土木与环境工程学院, 长沙 410114)

摘要:为探索提高板柱节点抗冲切性能的新方法,通过9个板柱中节点试件在竖向集中荷载作用下的试验,研究在板中心区域使用超高性能混凝土(UHPC)对板柱节点受力性能和破坏机理的影响。试验参数包括UHPC区域大小和UHPC钢纤维体积掺量。结果表明:UHPC能显著提高板柱节点的抗冲切承载力和延性;当局部使用UHPC面积在距柱面1倍板厚时,相较于全部使用普通混凝土(NC)的试件,配纤率为0.8%试件的延性和抗冲切承载力分别提高了126%和64%。因此,对于UHPC与NC组合板柱节点,合理选择UHPC应用区域和钢纤维掺量能显著提升板柱节点的整体性能。通过使用3种规范对各试件进行抗冲切承载力理论计算,发现规范公式不能准确估计UHPC区域的抗冲切承载力,未来需对此进行更深入的研究。用有限元软件ABAQUS建立试件的受力分析模型,模拟结果与试验结果吻合良好,基于该模型进一步研究不同UHPC尺寸对试件抗冲切性能的影响,并提出了一个UHPC-NC组合试件抗冲切承载力的计算公式,该公式的计算值与有限元模拟值吻合较好。

关键词:超高性能混凝土;板柱节点;抗冲切承载力;试验研究;有限元模型

中图分类号:TU375 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(XXXX)XX-0001-15

Experimental study on punching shear capacity of slab-column joints with partial use of ultra-high performance concrete

LI Chuang, ZHOU Yan

(School of Civil and Environmental Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, P. R. China)

Abstract: This study conducted through the tests of nine interior slab-column joint specimens with partial utilization of ultra-high performance concrete (UHPC) under concentrated vertical loads to explore a new method for enhancing the punching shear resistance of such joints. This test examined the impact of UHPC on the performance and damage mechanisms of slab-column joints. The test parameters included the dimensions of

收稿日期:2025-03-03

基金项目:国家自然科学基金(52108112);湖南自然科学基金(2023JJ40052)

作者简介:李创(1999-),主要从事钢筋混凝土结构、结构防灾减灾等研究, E-mail: lichuang@stu.csust.edu.cn。

周妍(通信作者),博士, E-mail: yan.zhou@csust.edu.cn。

Received: 2025-03-03

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (No. 52108112); Natural Science Foundation of Hunan Province (No. 2023JJ40052)

Author brief: LI Chuang (1999-), main research interest: reinforced concrete structure and structural disaster prevention and mitigation, E-mail: lichuang@stu.csust.edu.cn.

ZHOU Yan (corresponding author), PhD, E-mail: yan.zhou@csust.edu.cn.

the UHPC area as well as the volume fraction of steel fiber present in the UHPC. The test results indicated that UHPC had the potential to substantially enhance the ductility and punching shear capacity of slab-column joints. When UHPC was used locally in an area of one times the slab thickness from the column face, the ductility and punching shear capacity for specimens with a fiber ratio of 0.8% increased by 126% and 64%, respectively, compared to the specimens made entirely of normal concrete (NC). Therefore, the overall performance of the UHPC and NC composite slab-column joints can be enhanced with the rational UHPC area and volume fraction of steel fibers in practice. In this paper, the punching shear resistance of each specimen was estimated by three different codes. It was found that all the code equations either overestimated or underestimated the punching shear capacity within the UHPC region. Therefore, further research is necessary to explore the punching shear capacity of UHPC slabs. The finite element software ABAQUS was used to establish the force analysis model of specimens. The simulation results agree well with the experimental results. Based on this model, the effect of different UHPC area on the punching shear capacity of the specimens was further investigated. Finally, an empirical formula for estimating the punching shear capacity of UHPC - NC composite slab-column joints is proposed. The predicted values obtained from this formula show good agreement with the numerical results.

Keywords: ultra-high performance concrete; slab-column joint; punching shear capacity; experimental study; finite element model

板柱结构又称无梁楼盖结构, 楼板双向受力直接支撑于柱上, 由于其经济性和建筑优势, 广泛应用于混凝土结构中。但在较大竖向荷载下, 板柱节点易发生脆性冲切破坏, 导致安全隐患。现有增设柱帽、配置抗剪钢筋、布置栓钉等改进措施, 但这些方法却存在施工复杂、结构自重增加及层间净高缩减等问题。

超高性能混凝土(UHPC)因力学性能优异, 在大跨度结构和超高层建筑中应用广泛^[1-3]。以往研究表明, 使用 UHPC 能够显著提高板柱节点的抗冲切承载力。方志等^[4]、陈佳醒^[5]、樊健生等^[6]和林旭健等^[7]探讨了 UHPC 强度、板的厚度、保护层厚度、配筋率以及加载区域面积等参数对试验板抗冲切及抗弯性能的影响, 结果表明, 相较于普通混凝土板, UHPC 板的抗冲切承载力和延性方面均表现出明显提升; Zohrevand 等^[8]和 Qi 等^[9]的研究主要集中于不同 UHPC 厚度对板柱节点抗冲切承载力的影响, 结果表明, 当 UHPC 的厚度与板的厚度相同时, 能够显著提高板柱节点的抗冲切承载力; Isufi 等^[10]和 Zhou 等^[11]对不同 UHPC 尺寸的 UHPC-普通混凝土(NC)组合平板进行了缩尺试验, 板厚分别为 150、60 mm, 所有 UHPC 厚度与板厚相同, 结果表明, UHPC 区域的最佳使用是从柱边到距离柱边一到两倍板厚的位置。张耀庭等^[12]通过在板柱节点核心区域采用工程用水泥基复合材料(ECC)材料代替 NC, 研究其抗震性能, 结果表明, 该种结构的极限承载力与延性均提升显著。综上所述, 有关新型水泥基材料(UHPC、ECC 等)在与 NC 组合板中的优化应用的研究较少, 尤其缺少开展综合考虑 UHPC

区域和钢纤维掺量的全尺寸板柱节点研究。

为探究 UHPC 加强板柱节点仅在竖向荷载下的抗冲切性能, 笔者通过改变 UHPC 的应用区域和钢纤维掺量, 研究不同全尺寸板的破坏模式和抗冲切承载力, 得出 UHPC 的最优区域及钢纤维掺量, 为 UHPC-NC 组合板的结构设计提供参考。

1 试验

1.1 试验设计

根据 Kang 等^[13]的研究, 钢筋混凝土板柱结构的跨高比通常介于 20~30 之间。因此, 选取原结构的板厚为 150 mm, 板跨为 3750 mm, 即跨高比为 25。参考邓清^[14]以及 Muttoni^[15]等的研究, 反弯线通常位于距离试件中心约 0.4 倍板跨的位置。设计并制作 9 个试件。所有试件尺寸相同, 边长 1500 mm, 板厚 150 mm, 保护层厚度 15 mm, 有效截面高度 123 mm。板上短柱采用 UHPC 浇筑, 其为边长 150 mm 的立方体, 短柱形心与板形心重合。试件仅在底层布置直径为 12 mm 的双层钢筋网, 采用 HRB400 级带肋钢筋, 配筋率为 0.98%。UHPC 的钢纤维体积掺量分为 0.8% 和 1.6% 两种, 钢纤维的直径 0.2 mm, 长度 13 mm, 抗拉强度 2850 MPa。UHPC 由湖南中路华程桥梁股份有限公司赞助, 其扩展度性能要求为 680~750 mm, 检验结果为 710 mm。普通混凝土强度等级为 C30, 采用自然养护方式进行养护。

试件包括 3 个配纤率为 0.8% 的组合试件(UNS-0.8); 3 个配纤率为 1.6% 的组合试件(UNS-1.6); 1 个普通钢筋混凝土试件(NS); 1 个配纤率为 0.8% 的试件(US-0.8); 1 个配纤率为 1.6% 的试件

(US-1.6)。组合试件 UHPC 区域边长分别距离柱边 h 、 $1.5h$ 和 $2h$ (h 为板厚),对应的 UHPC 边长分别为 450、600、750 mm。

试件的编号和详细参数见表 1;试件尺寸、应变片布置和剖面图如图 1 所示;试件钢筋应变片的局部大样图如图 2 所示(单位:mm);试件 UHPC 使用区域示意图如图 3 所示。

表 1 试件编号及参数

Table 1 Specimen number and parameters

试件编号	UHPC 区域	钢纤维体积掺量/%
NS1		
UNS2-0.8	450 mm×450 mm	0.8
UNS3-0.8	600 mm×600 mm	0.8
UNS4-0.8	750 mm×750 mm	0.8
US5-0.8	1500 mm×1500 mm	0.8
UNS2-1.6	450 mm×450 mm	1.6
UNS3-1.6	600 mm×600 mm	1.6
UNS4-1.6	750 mm×750 mm	1.6
US5-1.6	1500 mm×1500 mm	1.6

注:试件编号中,NS表示全普通混凝土板;UNS表示 UHPC-NC 组合板;US表示全 UHPC 板。

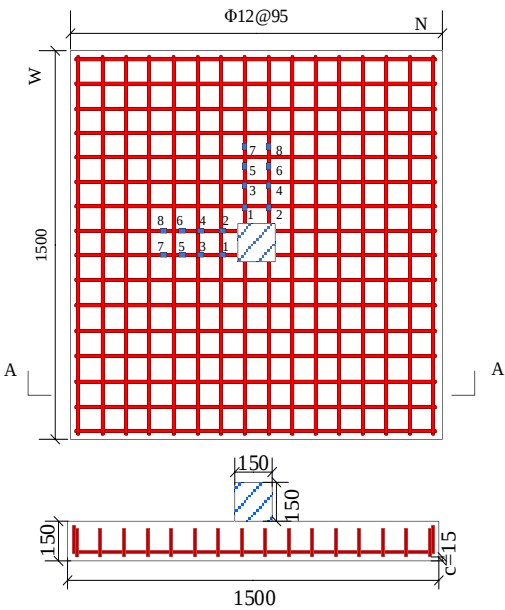


图 1 钢筋应变片布置和 A-A 剖面图
Fig.1 Reinforcement strain gage arrangement and A-A Sections

试件浇筑分两个阶段:首先浇筑板,待板固化后,在中心位置做凿毛处理并进行 UHPC 柱头的浇筑。在浇筑 UHPC-NC 组合板时,使用 5 cm 厚的泡沫板分隔出 UHPC 区域。外围普通混凝土区域先浇筑,当普通混凝土接近初凝状态时,移除泡沫板并开始浇筑 UHPC,当两种混凝土的表面高度基本一致时,使用振捣棒在两种材料的交界处进行振捣,确保两种材料充分融合。试件浇筑过程如图 4

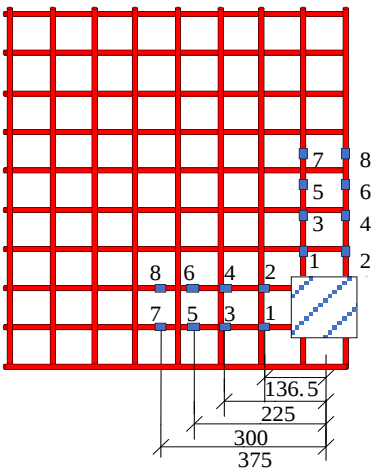


图 2 钢筋应变片布置局部大样图
Fig.2 Partial sample drawing of reinforcement strain gage arrangement

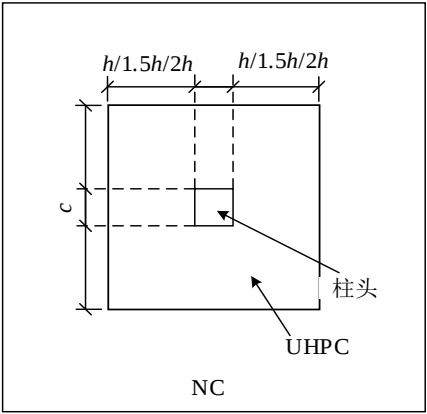


图 3 UHPC 区域示意图
Fig.3 Schematic diagram of the UHPC area

所示。

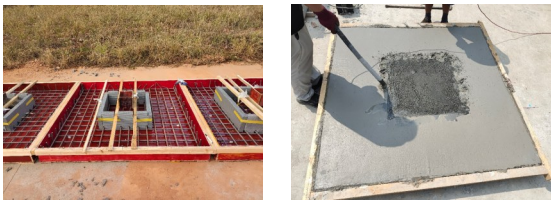


图 4 试件浇筑过程
Fig.4 Specimen pouring process

1.2 材料力学性能参数

试件的普通混凝土均采用 C30 级商品混凝土。在进行浇筑时,预留 3 个标准立方体试块,并与试件在相同条件下养护。UHPC 抗压强度的测试依据《活性粉末混凝土》(GB/T 31387—2015)规范^[16],预留 3 个 100 mm 立方体试块,所有试块的抗压强度均超过设计强度 120 MPa;UHPC 抗拉强度的测试依据《超高性能混凝土基本性能与试验方法》(T/CBMTF 37—2018,T/CCP A7—2018)的建议,预留 3 个狗骨头试件。各个试件的测试结果如表 2

所示。

表2 混凝土力学性能试验结果

Table 2 Concrete mechanical properties test results

混凝土类别	抗压强度 f_{cu} /MPa	抗拉强度 f_t /MPa
C30	31.8	
UHPC-0.8	133.0	5.6
UHPC-1.6	141.5	9.6

所有试件均采用12 mm的钢筋,同时预留3根同批次的钢筋,钢筋的材性试验结果如表3所示。

表3 钢筋力学性能试验结果

Table 3 Reinforcing steel mechanical properties test results

钢筋直径/mm	f_y /MPa	f_u /MPa	弹性模量/GPa
12	447	633	201.4

1.3 加载装置及试验方案

为模拟在均匀重力荷载下中柱节点的边界条件,参考Dam等^[17]提出的加载方案,在反弯线(正弯矩与负弯矩的交界截面)上均匀布置8个简支支座。每个支座由截面尺寸为100 mm×100 mm×50 mm的刚性垫块和100 mm×100 mm×15 mm的氯丁橡胶组成。支座与刚性混凝土墩之间采用高精度、可调节的刚性支座。该试验使用100 t液压千斤顶进行倒置加载,加载装置如图5所示。

正式加载时,根据预先计算的极限荷载采用分

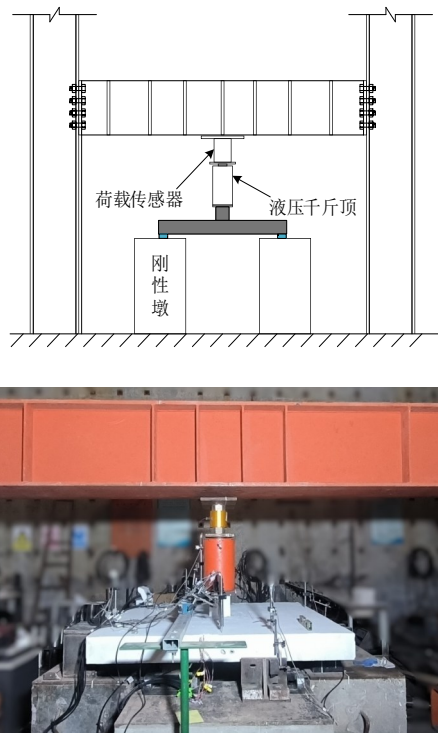


图5 加载装置

Fig.5 Loading setup

级加载策略,前期加载速率为20 kN/min,每级加载后稳定2 min,然后进行下一级加载。当荷载接近极限荷载时,加载速率减小至10 kN/min,直至试件发生破坏。同时,在板底放置高清摄像机,记录每级荷载下板底裂缝的开展情况。

1.4 测量方案

试验的测量内容主要包括钢筋应变、破坏荷载以及板的竖向位移。为了更好地研究UHPC与普通混凝土交界处的受力情况,应变片主要布置在这两种材料的交界处,具体测点的位置如图1所示。同时,用位移计记录板的竖向位移,位移计的位置见图6。

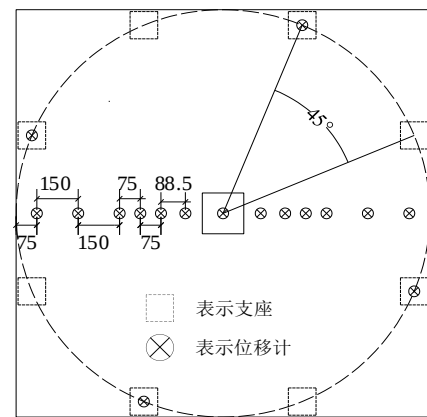


图6 支座和位移计布置

Fig.6 Support and LVDT arrangement

2 试验结果与讨论

2.1 试验现象

各个试件的裂缝分布情况及破坏形态如图7所示,破坏详细信息见表4,其中,破坏挠度是指试件中心位置的挠度。试验的大部分试件最终都发生了冲切破坏。根据樊健生等^[6]的研究,将板未形成塑性绞线但有冲切锥的破坏模式定义为冲切破坏,将形成塑性绞线和冲切锥的破坏模式定义为弯冲破坏。将试件破坏时形成塑性绞线,并且最终在支座附近发生了剪切的破坏模式定义为弯剪破坏。

试件UNS2-0.8和UNS2-1.6的失效荷载分别为510.9 kN和482.4 kN。因为试件UNS3-1.6在初始试验阶段发生了断电现象,电力恢复后试验重新开始。与试件UNS3-0.8相比,断电有可能导致更低的失效荷载。

2.1.1 冲切破坏模式

冲切破坏通常表现为在板中心区域产生向外发散的辐射状裂缝,并未扩展至板边缘。在试件最终发生破坏时,冲切锥体形成于板中心区域,钢筋大部分未达到屈服状态,且未观察到明显的弯曲裂

表 4 试件破坏信息

Table 4 Specimen damage information

试件编号	破坏挠度/mm	破坏荷载/kN
NS1	8.75	312.0
UNS2-0.8	19.78	510.9
UNS3-0.8	20.10	519.6
UNS4-0.8	22.99	538.9
US5-0.8	12.75	645.7
UNS2-1.6	10.85	482.4
UNS3-1.6	22.13	548.1
UNS4-1.6	22.05	585.4
US5-1.6	10.13	761.5

缝。试件 NS1、US5-0.8、以及 US5-1.6 均发生冲切

破坏(图 7),图中的实线框表示 UHPC 区域的范围,而虚线框表示柱头的投影边界线。破坏过程以 NS1 为例:在加载初期,试件处于弹性阶段,荷载与位移呈线性增长;当加载至 $0.24P_{\max}$ ($P_{\max}$ 为破坏荷载)时,在板底出现细微辐射状裂缝;随着荷载增加,裂缝逐渐增多且尚未贯穿;加载至 $0.38P_{\max}$ 时,试件的刚度明显下降,在板底短柱周围形成更多辐射状裂缝,未见明显受弯裂缝;继续加载至 $0.5P_{\max}$ 时,裂缝相互搭接,在板底逐渐形成环状裂缝;当加载至 $0.8P_{\max}$ 时,裂缝的数量稳定,宽度变大,刚度进一步下降;加载至 $P_{\max}$ 时,短柱冲入板内,伴随巨大的声响,承载力瞬间减小,板底出现明显的冲切环状裂缝,并有混凝土剥落,停止试验。

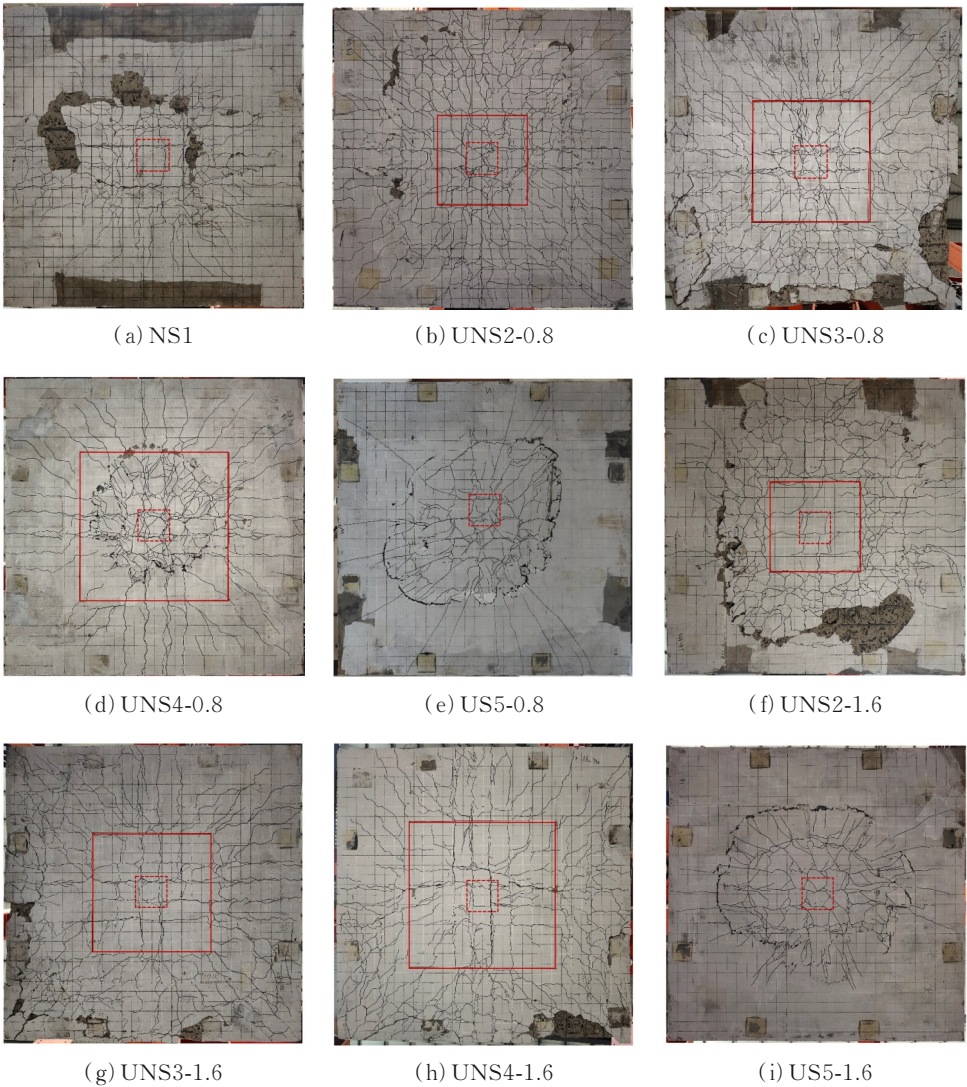


图 7 试件破坏板底裂缝图

Fig.7 Specimen damage to the bottom of the slab crack diagram

2.1.2 弯冲破坏模式

弯冲破坏是指试件先发生弯曲破坏,随后发生冲切破坏。在破坏发生前,可在板底部可以观察到明显的贯通水平弯曲裂缝,且辐射状裂缝扩展到板

边缘。纵筋达到屈服状态先于冲切锥的形成,最终破坏时形成明显的冲切锥体。试件 UNS2-0.8、UNS4-0.8 和 UNS2-1.6 均发生弯冲破坏(图 7)。破坏过程以 UNS2-0.8 为例:加载初期,试件处于弹

性阶段,荷载与位移线性增长;加载至 $0.24P_{\max}$ 时,板底短柱附近出现短辐射状裂缝;当加载至 $0.38P_{\max}$ 时,UHPC与普通混凝土交界处开始出现斜裂缝,裂缝向板边缘发散;当加载至 $0.6P_{\max}$ 时,裂缝在UHPC与普通混凝土交界处搭接形成环状裂缝,并伴随更多相互交叉裂缝的产生;加载至 $0.8P_{\max}$ 时,在板底跨中出现“井”字形的贯通裂缝;继续加载至 $0.92P_{\max}$,试件的刚度明显降低,板底的贯穿裂缝宽度增加并向板边缘进一步发展。当试件破坏时,加载短柱与部分UHPC以及部分混凝土一起冲入板内,荷载突然降低,停止试验。

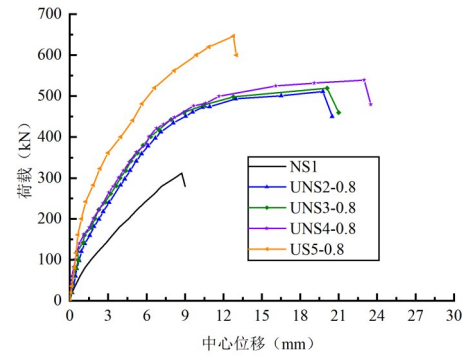
2.1.3 弯剪破坏模式

弯剪破坏是指试件先发生弯曲破坏,随后在支座附近产生剪切破坏。板底裂缝分布较为密集,存在明显的贯通弯曲裂缝,且辐射状裂缝扩展到板边缘。最终破坏时,试件在支座附近发生明显的剪切破坏,并伴有混凝土产生严重剥落,板底未形成明显的冲切锥体,并且大部分钢筋已经达到屈服状态。试件UNS3-0.8、UNS3-1.6和UNS4-1.6均发生弯剪破坏(图7)。破坏过程以UNS3-0.8为例:在加载初期,试件处于弹性阶段,荷载与位移呈线性增长;加载至 $0.24P_{\max}$ 时,在板底短柱附近出现短辐射状裂缝;当加载至 $0.4P_{\max}$ 时,板底UHPC与普通混凝土的交界处开始出现较短的斜裂缝;继续加载至 $0.6P_{\max}$ 时,斜裂缝开始向板边缘无序开展,并且在UHPC范围内裂缝的数量进一步增加;加载至 $0.78P_{\max}$ 时,在板底跨中区域出现“井”字形裂缝,并且该裂缝的宽度明显大于其余裂缝;当加载至 $0.92P_{\max}$ 时,板底出现更多交叉裂缝。当试件破坏时,加载短柱与部分UHPC及部分混凝土区域一起冲入板内,在试件靠近支座位置的混凝土发生严重剥落,在板底没有出现明显的冲切环状裂缝,但出现明显“井”字形的塑性绞线。

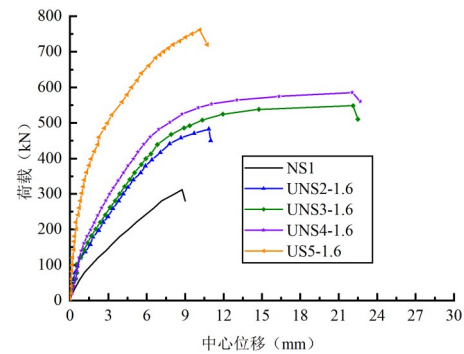
2.2 荷载-中心位移曲线

各个试件的荷载-中心位移曲线见图8。图中中心位移为中点处位移减去平均支座位移的实际位移值。由图8可知,所有使用UHPC试件的初始刚度均高于全部使用NC的试件;在同一钢纤维体积掺量条件下,随着UHPC使用面积的增加,试件的初始刚度呈现逐渐增加的趋势。

对局部使用UHPC的板柱节点,随着UHPC区域的增大,试件的破坏荷载也相应增加,破坏模式由冲切破坏转变为弯冲破坏和弯剪破坏。这是因为UHPC有效约束了混凝土的横向变形,抑制了裂缝的开展,延长了冲切破坏过程,从而有效地提高了抗冲切承载力和变形能力。



(a) UHPC-0.8



(b) UHPC-1.6

图8 试件荷载-中心位移曲线

Fig.8 Load-center displacement curves for each specimen

然而,完全采用UHPC时,破坏模式又表现为冲切破坏,可能是因为所有截面的抗冲切承载力均相同,而对于UHPC与普通混凝土的组合试件,某些截面的抗弯承载力可能小于抗冲切承载力,使得试件在破坏前具有足够的变形能力。

因此,UHPC与NC的组合试件能优化板柱节点的力学性能,提高抗冲切承载力和变形能力。

2.3 钢纤维体积掺量的影响

为研究钢纤维体积掺量对板柱节点抗冲切力学行为的影响,设计了0.8%和1.6%两种钢纤维体积掺量。表5汇总了在相同UHPC面积条件下,不同钢纤维体积掺量试件的位移、荷载和初始刚度。初始刚度是指试件在荷载-位移曲线关系中线性阶段的刚度特征,用于反映试件在受力初期的变形抵抗能力。根据Smadi等^[18]的相关研究,初始刚度定义为荷载达到首次开裂荷载前荷载-位移曲线的斜率。

试验结果表明,当UHPC的边长从柱面向外延伸超过一倍板厚时,钢纤维体积掺量的增加能够略微提高板柱节点的初始刚度和抗冲切承载力。当UHPC的使用面积一定时,增加钢纤维体积掺量会提高试件的初始刚度。通过有限的试验数据可以发现,对于UHPC-NC组合材料的试件,UHPC的钢纤维体积掺量对试件的延性和破坏模式影响较小。

综合考虑经济因素,在实践中推荐使用0.8%配纤率。

表 5 钢纤维掺量对试件性能影响
Table.5 Effect of steel fiber content on the properties of specimens

UHPC 边长/mm	钢纤维掺量/%	破坏挠度/mm	破坏荷载/kN	初始刚度/(kN/mm)
450	0.8	19.78	510.9	132.67
450	1.6	10.85	482.4	146.92
600	0.8	20.10	519.6	162.14
600	1.6	22.13	548.1	185.30
750	0.8	22.99	538.9	206.64
750	1.6	22.05	585.4	214.00
1 500	0.8	12.75	645.7	230.07
1 500	1.6	10.13	761.5	244.85

2.4 板平面位移分布曲线

用于测量竖向位移的LVDT布置如图5所示,各个试件的板面竖向位移曲线如图9所示。竖向位移值为对称位置两个位移计的平均值减去支座位移的平均值。

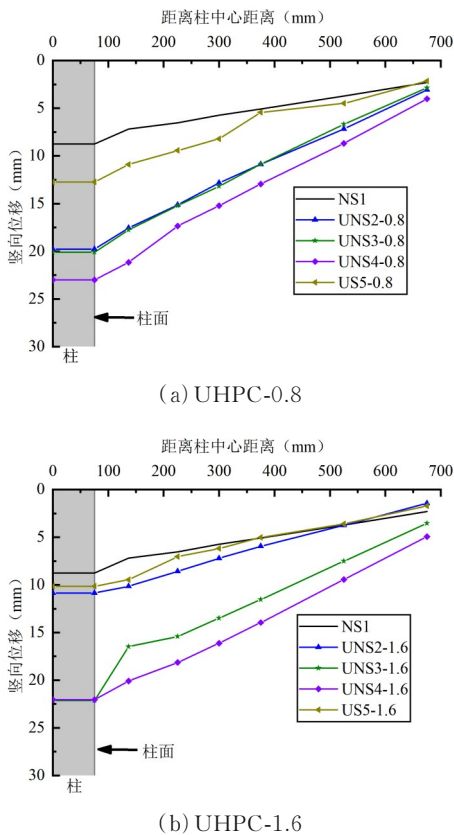


图 9 板面竖向位移曲线

Fig.9 Vertical displacement curves of the slab surface

根据图9显示,当UHPC钢纤维体积掺量一定时,使用不同UHPC面积的试件表现出不同的变形能力。具体而言,对于配纤率为0.8%的试件,当

UHPC的边长为1500 mm时,试件的延性与全部使用普通混凝土的试件基本相同,变形能力较差;然而,当UHPC的边长为450、600、750 mm时,变形能力较好。对于配纤率为1.6%的试件,当UHPC的边长为450、1500 mm时,试件的延性与全部使用普通混凝土的试件基本相同,变形能力相对较差;而当UHPC的边长为600、750 mm时,试件的变形能力较好。

对于组合试件,随着UHPC面积的增加,试件的整体变形能力可以得到显著的改善。其原因是UHPC面积的增加提升了板的受弯性能,使得试件的抗弯承载力增强,从而提升整体变形性能。

2.5 钢筋应变

试件应变片布置如图1和图2所示。由于部分应变片在试验过程中损坏或数据不稳定,因此,选择到柱中心距离相同中一个稳定的应变片进行分析。各个试件的钢筋应变曲线见图10,钢筋的屈服应变为 2219×10^{-3} 。

试验结果表明,在加载初期阶段,钢筋应变增长较为缓慢。对于NS1、US5-0.8和US5-1.6试件,均发生脆性冲切破坏,试件中仅有部分或没有钢筋达到屈服(图10)。以NS1试件为例,当荷载达到约80 kN时,位置1处钢筋应变片的数值迅速增加,此时通过底部摄像机观察到板底中心附近出现细微裂缝。随着荷载继续增加至约140 kN时,钢筋应变片的数值迅速增加,尤其是位于1位置的应变片增加最为显著。此时,在试验过程中可观察到板底中心区域出现环状裂缝以及径向辐射状裂缝,表明试件内部混凝土已经发生开裂。

对于UHPC-NC组合试件,在试件破坏之前,部分钢筋达到屈服状态,表现出相对较好的变形能力(图10)。以UNS2-0.8试件为例,当荷载达到约100 kN时,首先观察到2位置处的应变片数值迅速增加,可能是由于在浇筑过程中,UHPC与NC的交界区域对该处应变片产生了一定影响,试验过程中在两者交界处观察到细微裂缝;继续加载至约310 kN时,1和3位置处的钢筋应变值已达到屈服应变,尤其是1位置钢筋的应变值迅速增加。此时,在试验过程中观察到,在UHPC与NC交界处出现环状裂缝和径向裂缝,并向板边进行扩展,同时在UHPC区域也产生肉眼可见的细微裂缝。

3 抗冲切承载力计算分析

采用3种规范公式对各个试件进行理论计算,并与试验结果进行对比。对于UHPC-NC组合板柱节点,需同时验算冲切控制截面1以及UHPC区域

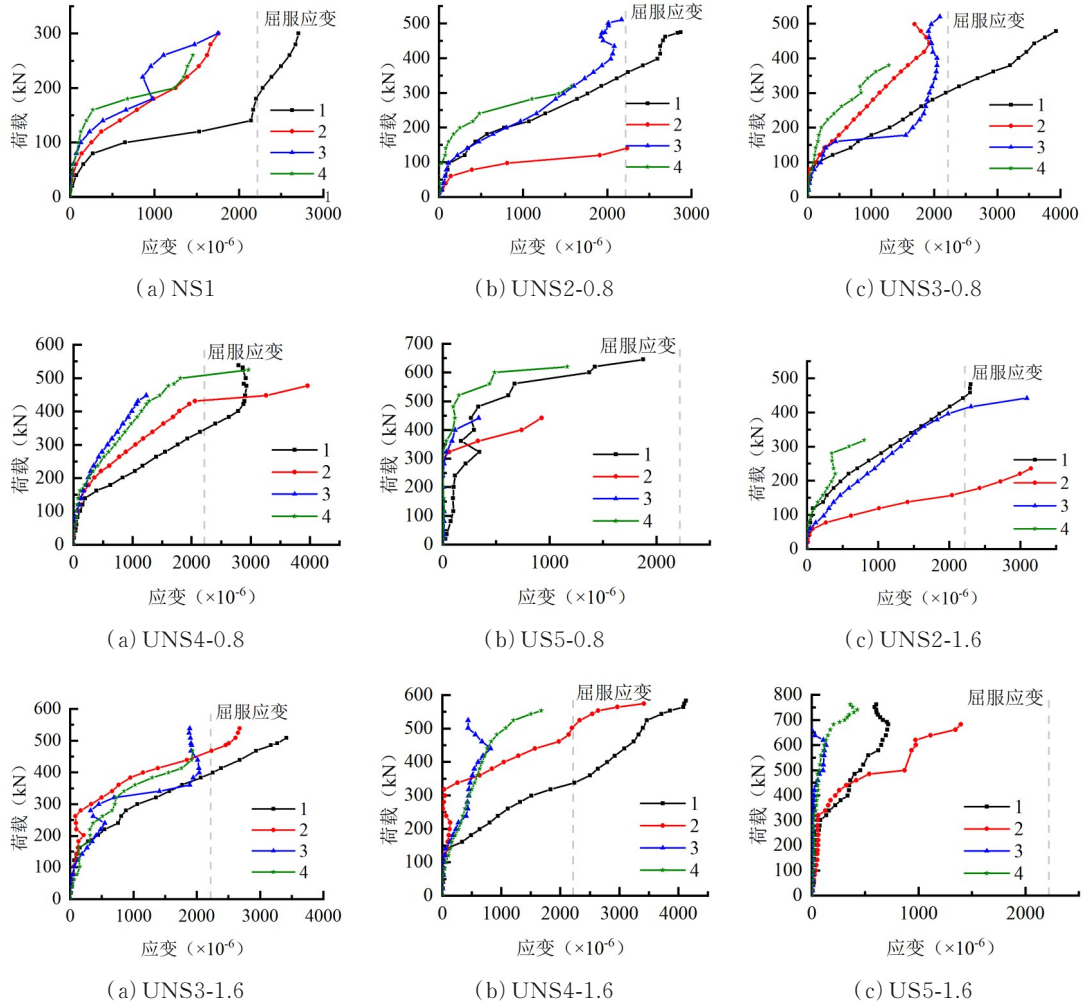


图 10 试件钢筋应变分布

Fig.10 Strain distribution of reinforcement in specimen

外的冲切控制截面 2。

3.1 规范承载力计算公式

对未配置抗剪钢筋板柱节点的抗冲切承载力,根据 ACI 318-19 规范^[19]要求,冲切控制截面如图 11(a),必须取式(1)~式(3)的最小值。

$$V_c = \left(0.17 + \frac{0.33}{\beta} \right) \sqrt{f'_c} b_0 d \quad (1)$$

$$V_c = \left(0.17 + \frac{0.083\alpha_s d}{b_0} \right) \sqrt{f'_c} b_0 d \quad (2)$$

$$V_c = 0.33 \sqrt{f'_c} b_0 d \quad (3)$$

对于第 2 个控制截面,将 UHPC 区域看作使用抗剪钢筋加固区域,根据 ACI 318-19 规范要求,按照式(4)计算。

$$V_c = 0.17 \sqrt{f'_c} b_0 d \quad (4)$$

式中: f'_c 为混凝土圆柱体抗压强度; b_0 为临界截面周长; β 为柱长边与短边之比; α_s 为柱位置影响常数; d 为板有效高度。

根据规范 GB 50010—2010^[20]的规定,冲切控制截面如图 11(a),抗冲切承载力的计算公式为

$$V_c = 0.7\beta_h f_t \eta u_m d_0 \quad (5)$$

式中: η 为考虑柱截面形状和位置的修正系数,取式(6)中的较小值。

$$\eta_1 = 0.4 + \frac{1.2}{\beta_s}, \eta_2 = 0.5 + \frac{\alpha_s h_0}{4u_m} \quad (6)$$

式中: f_t 为混凝土轴心抗拉强度; β_h 为截面高度影响系数; β_s 为荷载作用面是矩形时的长宽比; α_s 为柱位置影响系数; u_m 为计算受冲切破坏面周长; d_0 为板的有效厚度。

根据欧洲规范 EN1992-1-1:2004^[21]的规定,冲切控制截面如图 11(b)。抗冲切承载力的计算公式为

$$V_{Rd,c} = 0.18(1+k) \left(100\rho_1 f_{ck} \right)^{1/3} b_w d \geq V_{min} \quad (7)$$

$$V_{min} = 0.035(1+k)^{3/2} f_{ck}^{1/2} b_w d \quad (8)$$

$$k = \sqrt{200/d} \quad (9)$$

式中: f_{ck} 为混凝土圆柱体抗压强度; d 为板截面有效高度; ρ_1 为纵筋配筋率; b_w 为冲切控制截面周长; $V_{Rd,c}$ 为设计剪应力。

3.2 规范抗冲切承载力计算结果分析

根据 3 种规范对各个试件进行了理论计算,并

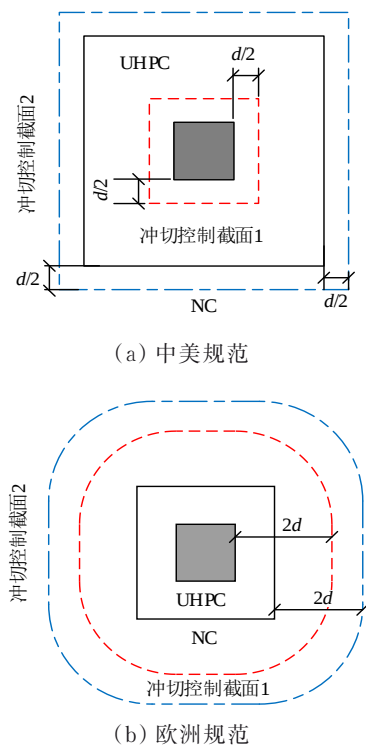


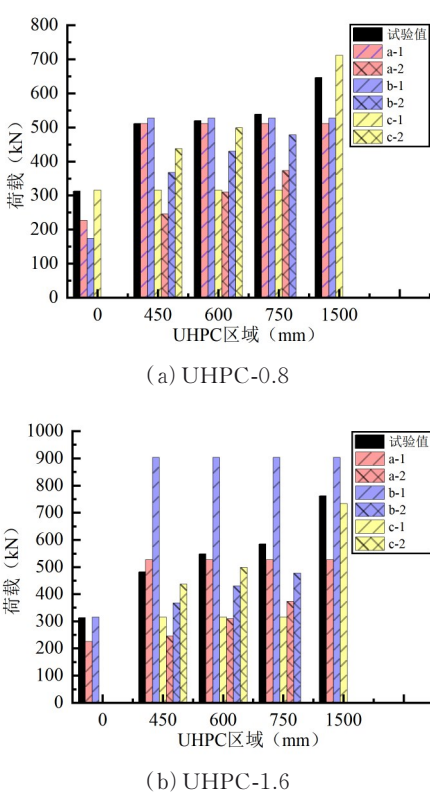
图 11 冲切控制截面示意图

Fig.11 Schematic diagram of punching control section

将计算结果整理如表 6 及图 12 所示。利用试验数据,采用 3 种规范受冲切承载力计算值与受冲切承载力试验值为统计参数进行分析,具体的统计结果见表 7。

通过对比美国、中国和欧洲 3 种不同规范的计算结果,可以发现:

1)对于组合试件,欧洲规范的冲切控制截面 1 位于 UHPC 区域外,导致其计算结果偏小,未能反映 UHPC 的抗冲切承载力。而中国和美国规范的冲切控制截面 1 均位于 UHPC 区域内,美国规范的计算结果与试验结果吻合较好,中国规范高估了纤维掺量为 1.6% 的组合试件。这可能是因为中国规范计算公式采用抗拉强度,而美国规范采用抗压强



注:图例中,a表示美国 ACI318-19;b表示中国 GB20010—2010;c表示欧洲 EN1992-1-1-2004;“-1、-2”分别代表第 1 个临界截面和第 2 个临界截面。

图 12 试件的试验值与计算值的柱状图
Fig.12 Bar chart of test values and calculated values for specimens

度。试验中不同钢纤维掺量的试件抗拉强度差异大,抗压强度变化小。因此,对于不同钢纤维掺量的 UHPC 板,如何改进我国规范中抗冲切承载力公式,以使其能更好地预测 UHPC 板的抗冲切承载力,仍然是需要研究的问题。

2)中国和美国规范的控制截面 2 均位于 UHPC 范围之外 0.5 d 处。对于欧洲规范,当 UHPC 的边长为 750 mm 时,其冲切控制截面 2 位于整个试件之外。从表 6 可得出,对于中国和美国规范的控制截

表 6 各国规范的板柱节点抗冲切承载力计算结果

Table 6 Calculation results of punching shear capacity of slab-column joint for various national codes

试件	试验值/kN	控制截面 1/kN			控制截面 2/kN		
		ACI318-19	GB20010-2010	EN1992-1-1-2004	ACI318-19	GB20010-2010	EN1992-1-1-2004
NS1	312	227	175	316			
UNS2-0.8	511	511	527	316	246	368	438
UNS3-0.8	520	511	527	316	310	430	499
UNS4-0.8	539	511	527	316	374	478	
US5-0.8	646	511	527	711			
UNS2-1.6	482	527	903	316	246	368	438
UNS3-1.6	548	527	903	316	310	430	499
UNS4-1.6	585	527	903	316	374	478	
US5-1.6	762	527	903	733			

表7 规范计算值与试验值之比的统计参数

Table 7 Statistical parameters for the ratio of calculated code provisions to experimental values

试件名称	控制截面位置	公式来源	平均值	标准差	变异系数
组合试件	控制截面1	a	0.91	0.13	0.141
		b	1.23	0.40	0.326
		c	0.69	0.17	0.248
组合试件	控制截面2	a	0.56	0.09	0.157
		b	0.80	0.09	0.115
		c	0.89	0.16	0.182
全UHPC/NC试件	控制截面1	a	0.74	0.04	0.056
		b	0.85	0.26	0.299
		c	1.03	0.06	0.056

注:a表示美国ACI318-19,b表示中国GB20010—2010,c表示欧洲EN1992-1-1-2004。

面2与试验观察结果一致且抗冲切承载力计算值均小于试验值。美国规范偏小较多,中国规范估计值较安全。而欧洲规范控制截面1和2均位于UHPC区域外侧,所以其破坏控制截面也与试验结果一致。两个控制截面均较安全地估计了组合板的抗冲切承载力。

对于全普通混凝土(NS1)试件,美国规范的估计值较安全,中国规范计算值偏小,而欧洲规范估计值偏不安全。

对于全UHPC试件,美国规范计算值偏小;中国规范对0.8%钢纤维试件估计值偏小,1.6%钢纤维试件估计值偏大;而欧洲规范对0.8%钢纤维试件估计值偏大,1.6%钢纤维试件估计值偏小。

综合分析,现行规范公式对普通混凝土区域的计算结果相对较准确,即目前建立在普通混凝土研究基础上的规范公式可较安全地预估普通混凝土控制截面的抗冲切承载力。但对于UHPC区域内的控制截面,不能准确地估计UHPC板的抗冲切承载力。由于现行规范公式是建立在普通混凝土板的研究基础上,未全面考虑UHPC材料的抗拉性能及钢纤维对板抗冲切承载力的贡献,因此,计算结果与试验结果差异较大,需要进行更多的相关研究以改进UHPC板的抗冲切承载力计算公式。

4 数值模拟分析

4.1 单元类型与网格划分

基于ABAQUS有限元分析软件建立数值模型,如图13所示。其中,混凝土和UHPC均采用C3D8R单元,钢筋采用T3D2单元。采用网格切割技术对模型进行网格划分(图13),经网格收敛性测试确定网格尺寸。相关研究表明,沿板厚方向至少

划分5层网格^[14],以保证有限元模拟结果的准确性。

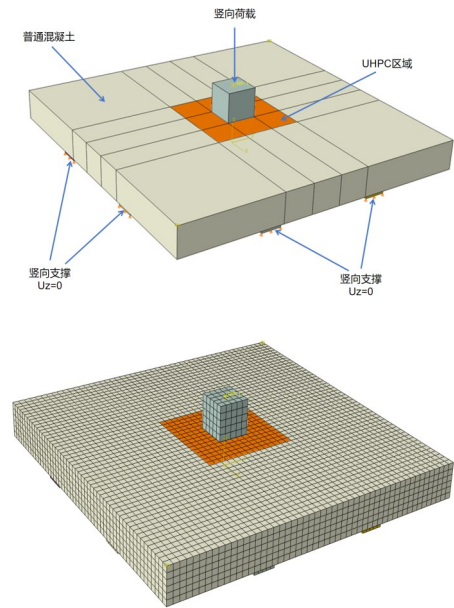


图13 有限元模型和网格示意图

Fig.13 Schematic diagram of finite element model and meshing

4.2 材料本构关系

钢筋的应力-应变关系选取理想弹塑性模型,其表达式如(10)所示:

$$\sigma = \begin{cases} E_s \varepsilon & \varepsilon \leq \varepsilon_y \\ f_y & \varepsilon > \varepsilon_y \end{cases} \quad (10)$$

在数值模拟中,混凝土采用塑性损伤(Concrete Damaged Plasticity, CDP)模型。在模拟中,混凝土在单轴受压状态下的应力-应变关系可采用Hognestad提出的抛物线模型,以真实地反映材料在加载过程的受力特征。该本构模型被广泛应用于混凝土结构的数值模拟中,并且已被证明能够较好地模拟板柱节点在外荷载作用下的受力性能^[22-24]。

混凝土单轴受拉应力-应变关系。在混凝土的抗拉强度达到峰值抗拉强度 f_t 之前,混凝土的应力-应变关系通常表现为线弹性行为。根据美国规范ACI318-19的建议,取 $f_t' = 0.33\sqrt{f_c}$ (MPa),其中 f_c 是混凝土抗压强度。在混凝土达到峰值抗拉强度 f_t 后,随着应变的增加,混凝土进入开裂阶段。此时,混凝土的应力通常不再表现为应力-应变关系,而是通过应力-裂缝宽度关系来描述裂缝的开展。

UHPC的受压本构模型采用Collins等^[25]提出的应力-应变表达式

$$y = \frac{nx}{n-1+x^{nk}} \quad (11)$$

$$A = \frac{E_o}{E_p} = \frac{n}{n-1} \quad (12)$$

式中: n 和 k 为参数^[26],参数用来描述曲线达到峰值应力前后的应变衰减。 n 和 k 用混凝土的抗压强度 f_c 来进行计算。

$$n = 0.8 + \frac{f_c}{17} \quad (13)$$

$$k = 0.67 + \frac{f_c}{62} \quad (14)$$

根据UHPC狗骨头实测的力-位移曲线,采用张哲^[27]提出的具有应变硬化特征的UHPC单轴受拉应力-应变关系模型(图14)。

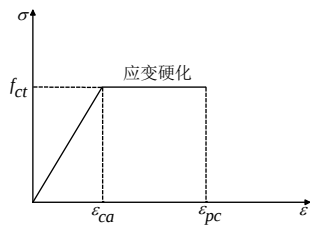


图14 UHPC受拉应力-应变曲线

Fig.14 UHPC tensile stress-strain curve

4.3 边界条件、接触关系及加载方式

在试验过程,未观察到UHPC与普通混凝土之间出现明显的脱落或分离现象,因此,在有限元模拟分析中,可将二者视为一个整体,采用tie约束进行模拟。试验采用八点支撑,为确保试件与刚垫块之间保持良好接触,在二者之间放置橡胶垫块。在有限元分析中,为提高计算效率,将橡胶垫块简化成线性材料。

有限元模型的边界条件为限制试件的竖向位移($U_3=0$),即沿竖向方向的位移受到约束。在试验过程中,采用千斤顶控制力进行加载,然而,在有限元分析中,直接施加控制力可能会导致计算不收敛。因此,为了避免此问题,在柱顶设置参考点RP-1,并进行与柱面耦合,采用控制位移的加载方式进行加载。

4.4 有限元模型验证与对比

图15为有限元模拟的破坏形态与试验结果的对比。鉴于试件数量较多,选择3个具有代表性的试件进行对比分析。由混凝土受拉应力云图可知,试件的损伤主要集中在板中心区域,并向板边逐步扩展,与试验现象相吻合。

图16对比了有限元模拟和试验得到的试件荷载-位移曲线。从对比结果可以看出,有限元模拟所得曲线的上升段与试验结果基本吻合,但数值模拟得到的刚度略高于试验值。然而,当荷载达到极限承载力之后,有限元模拟难以准确再现荷载-位移曲

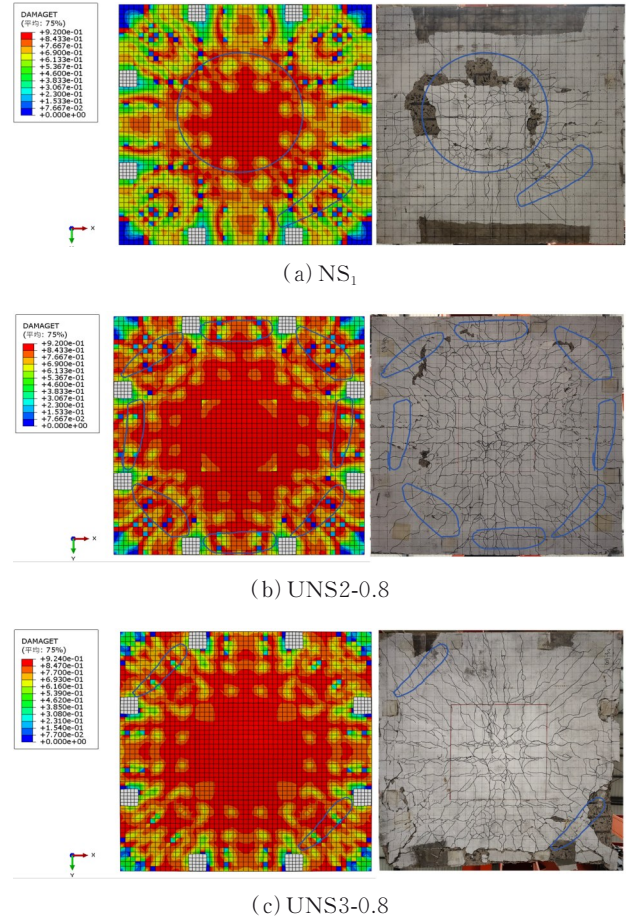


图15 部分试件的受拉损伤应力云图

Fig.15 Tensile damage stress cloud of some specimens

线的下降段。这是当荷载达到极限承载力之后,随着试件混凝土裂缝开展,有限元计算通常表现出不能收敛的情况,从而导致计算中止。此外,表8对比了有限元模拟和试验得到的峰值荷载,相对误差为4.9%,二者吻合良好。

总体而言,有限元模型能够较好地预测UHPC-NC组合试件的刚度和峰值荷载。

4.5 不同UHPC尺寸参数分析

为了进一步研究UHPC区域大小对局部使用UHPC板柱节点抗冲切承载力的影响,在试验的基础上,对试件中UHPC区域进行了改变。具体而言,将UHPC使用区域的边长扩展为距离柱表面 $2.5h$ 、 $3.0h$ 、 $3.5h$ 和 $4.0h$,其中 h 为板厚。表9列出了各个试件抗冲切承载力的数值模拟结果。

由表9结果可知,对于局部使用UHPC的试件,随着UHPC使用区域的增加,抗冲切极限承载力呈现逐步增大的趋势。当UHPC区域从距离柱边 $2.5h$ 增加到 $4.0h$ 时,虽然试件的抗冲切承载力有所提升,但提升程度较小。

4.6 建议计算公式

为了分析UHPC-NC组合试件的抗冲切承载

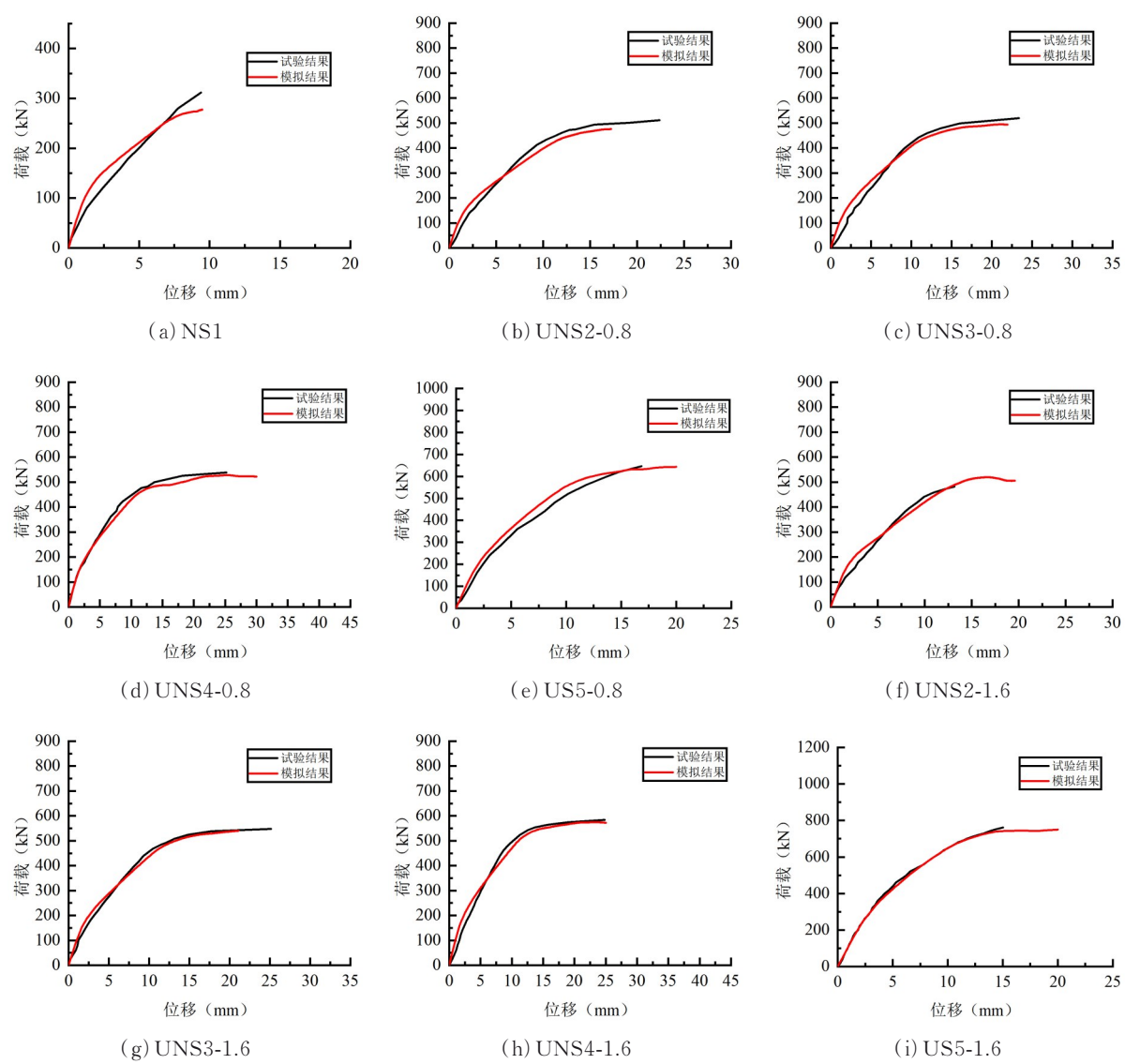


图 16 各个试件有限元模拟结果

Fig.16 Finite element simulation results for each specimen

表 8 试验试件数值模拟结果汇总			
Table 8 Summary of numerical simulation results for test specimens			
试件编号	数值模拟结果/kN		P_{FEA}/P_{test}
	P_{test}	P_{FEA}	
NS1	312.0	277.7	0.89
UNS2-0.8	510.9	475.9	0.93
UNS3-0.8	519.6	494.6	0.95
UNS4-0.8	538.9	527.8	0.98
US5-0.8	645.7	643.1	1.00
UNS2-1.6	482.4	519.4	1.08
UNS3-1.6	548.1	540.2	0.99
UNS4-1.6	585.4	574.9	0.98
US5-1.6	761.5	749.8	0.98
平均值			0.98
标准差			0.05
变异系数			0.049

表 9 不同 UHPC 区域各个试件的模拟计算结果		
Table 9 Simulation results for each specimen in different UHPC areas		
UHPC 距柱边距离	数值模拟结果/kN	
	钢纤维掺量 0.8%	钢纤维掺量 1.6%
2.5h	546.0	614.4
3.0h	581.9	661.9
3.5h	603.8	688.6
4.0h	623.6	731.0

力,基于有限元模拟结果进行分析。模拟结果表明,完全使用NC试件的抗冲切承载力为277.7 kN,完全使用UHPC试件在钢纤维体积掺量分别为0.8%和1.6%时的抗冲切承载力分别为643.1、749.8 kN。对于UHPC-NC组合试件,其抗冲切承载力可视为由UHPC区域和NC区域共同贡献。

根据Qi等^[9]的研究,基于平截面假定,UHPC-NC组合试件满足变形协调。因此,试件的抗冲切

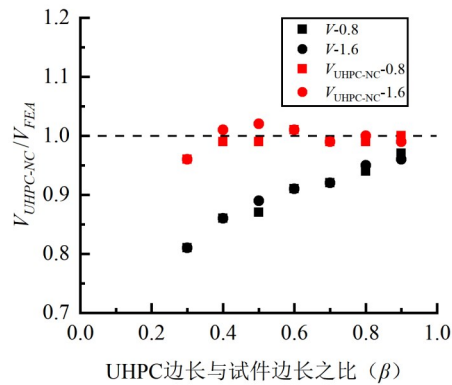


图 18 计算结果与有限元结果对比

Fig.18 Comparison of calculation results and finite element results

5 结论

1)UHPC 显著提高了板柱节点的抗冲切承载力和延性。试验结果表明,所有使用 UHPC 的试件,最终破坏时的中心位移和抗冲切承载力均大于全部使用普通混凝土的试件。

2)UHPC 对板柱节点的破坏模式产生显著影响。试验中,全普通混凝土板柱节点表现为冲切破坏。对于局部使用 UHPC 的试件,随着 UHPC 的区域从距离柱边 $1.0h$ 扩展到 $2.0h$,试件的破坏模式从冲切破坏转变为弯冲破坏和弯剪破坏。然而,当 UHPC 区域从距离柱面 $2.0h$ 扩展到整个板面时,试件的破坏模式变成冲切破坏。

3)综合考虑试件的经济性及安全性等多重指标,从破坏模式由冲切破坏转变为具有一定延性的弯冲破坏和弯剪破坏的角度出发,确定了最佳的 UHPC 区域和配纤率。对于配纤率为 0.8% 和 1.6% 的试件,理想的 UHPC 最佳区域均位于距离柱面 $1.0h$ 处,此时板柱节点的承载力相较于全普通混凝土试件分别提高了 64.0% 和 54.6% ,当 UHPC 的区域继续增大,对抗冲切承载力提升的效率降低;同时,中心位移分别增加了 126% 和 24% 。当 UHPC 的区域距离柱面 $1.0h$ 时,最佳的配纤率为 0.8% ,此时试件比配纤率为 1.6% 的试件具有更好的延性。

4)通过不同规范对板柱节点的抗冲切承载力进行理论计算现,所有规范公式能较准确地计算普通混凝土区域的抗冲切承载力,但对于 UHPC 区域的抗冲切承载力计算结果差异性较大,还需进行更多相关研究以改进 UHPC 板的抗冲切承载力计算公式。

5)采用 ABAQUS 有限元软件建立了试件的有限元模型,模型能够准确预测试件的刚度和峰值荷载。在此基础之上,进一步研究了不同 UHPC 区域

尺寸对试件抗冲切性能的影响。基于有限元模拟结果提出考虑 UHPC 不同使用面积的抗冲切承载力计算公式,该公式的预测值与有限元模拟值吻合较好。

参考文献

- [1] MATEN R NTER. Ultra high performance concrete in large span shell structures[M]. Delft, the Netherlands: Delft University of Technology, 2011.
- [2] 陈宝春,季韬,黄卿维,等.超高性能混凝土研究综述[J].建筑科学与工程学报,2014,31(3):1-24.
CHEN B C, JI T, HUANG Q W, et al. Review of research on ultra-high performance concrete [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2014, 31(3): 1-24. (in Chinese)
- [3] ZHU J S, WANG Y G, YAN J B, et al. Shear behaviour of steel-UHPC composite beams in waffle bridge deck [J]. Composite Structures, 2020, 234:111678.
- [4] 方志,陈佳醒,曹清. UHPC 双向板抗冲切性能试验[J].中国公路学报,2021,34(8):91-105.
FANG Z, CHEN J X, CAO Q. Experimental study on punching shear behavior of UHPC two-way slabs [J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, 34(8): 91-105. (in Chinese)
- [5] 陈佳醒.超高性能混凝土板的受力性能及设计方法研究[D].长沙:湖南大学,2023.
CHEN J X. Investigation on mechanical behaviors and design methods of ultra-high performance concrete slabs [D]. Changsha:Hunan University, 2023. (in Chinese)
- [6] 樊健生,王哲,杨松,等.超高性能混凝土板冲切与弯曲性能研究[J].工程力学,2021,38(4):30-43.
FAN J S, WANG Z, YANG S, et al. Research on punching shear and bending behavior of ultra-high performance concrete slabs [J]. Engineering Mechanics, 2021, 38(4): 30-43. (in Chinese)
- [7] 林旭健,郑作樵,钱在兹.钢纤维高强混凝土冲切板的试验研究[J].建筑结构学报,2003,24(5):72-77,97.
LIN X J, ZHENG Z Q, QIAN Z C. Research on steel fiber high-strength concrete slab subjected to punching shear[J]. Journal of Building Structures, 2003, 24(5): 72-77, 97. (in Chinese)
- [8] ZOHREVAND P, YANG X, JIAO X, et al. Punching shear enhancement of flat slabs with partial use of ultra-high-performance concrete [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2015, 27(9): 04014255.
- [9] QI J N, CHENG Z, ZHOU K, et al. Experimental and theoretical investigations of UHPC-NC composite slabs subjected to punching shear-flexural failure[J]. Journal of Building Engineering, 2021, 44:102662.
- [10] ISUFI B, RELVAS J P, MARCHÃO C, et al.

- Behavior of flat slabs with partial use of high-performance fiber reinforced concrete under monotonic vertical loading [J]. *Engineering Structures*, 2022, 264: 114471.
- [11] ZHOU K, QI J N, WANG J Q. Post-cracking punching shear behavior of concrete flat slabs partially reinforced with full-depth UHPC: Experiment and mechanical model [J]. *Engineering Structures*, 2023, 275: 115313.
- [12] 张耀庭, 万一凡, 朱大壮, 等. 局部采用高强高延性 PE-ECC 的 RC 板-柱节点拟静力试验研究[J]. *土木工程学报*, 2025, 58(5): 14-26.
- ZHANG Y T, WAN Y F, ZHU D Z, et al. Quasi-static experiment on RC slab-column connections partially replaced by high-strength and high-ductility PE-ECC [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2025, 58(5): 14-26. (in Chinese)
- [13] KANG T, WALLACE J. Dynamic responses of flat plate systems with shear reinforcement[J]. *ACI Structural Journal*, 2005, 102(5): 763-773.
- [14] 邓清. 板柱节点冲切受力性能及承载力计算方法研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2018.
- DENG Q. Study on punching shear behavior and capacity of reinforced concrete slab-column connections [D]. Changsha: Hunan University, 2018. (in Chinese)
- [15] MUTTONI A. Punching shear strength of reinforced concrete slabs without transverse reinforcement[J]. *ACI Structural Journal*, 2008, 105(4): 440-450.
- [16] 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)
- [17] DAM T X, WIGHT J K. Flexurally-triggered punching shear failure of reinforced concrete slab-column connections reinforced with headed shear studs arranged in orthogonal and radial layouts[J]. *Engineering Structures*, 2016, 110: 258-268.
- [18] SMADI M M, BANI YASIN I S. Behavior of high-strength fibrous concrete slab-column connections under gravity and lateral loads [J]. *Construction and Building Materials*, 2008, 22(8): 1863-1873.
- [19] ACI 318 COMMITTEE. Building code requirements for structural concrete (ACI 318-19) and commentary (ACI 318R-19) [S]. Farmington Hills, MI: American Concrete Institute, 2019.
- [20] 混凝土结构设计规范(2015 版): GB 50010—2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
- Code for design of concrete structures(2015 ed): GB 50010—2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015. (in Chinese)
- [21] BRITISH STANDARDS INSTITUTION. Eurocode 2: design of concrete structures - Part 1-1: general rules and rules for buildings: EN 1992-1-1 [S]. Brussels: European Committee for Standardization, 2014.
- [22] MILLIGAN G. Nonlinear finite element analysis of punching shear of reinforced concrete slabs supported on rectangular columns [D]. Waterloo, ON, Canada: University of Waterloo, 2018.
- [23] LAGUTA M. Effect of unbalanced moment on punching shear strength of slab-column joints[D]. Waterloo, ON, Canada: University of Waterloo, 2020.
- [24] HALVONÍK J, MAJTANOVÁ L. Experimental investigation of the maximum punching resistance of slab-column connections [J]. *Slovak Journal of Civil Engineering*, 2018, 26(3): 22-28.
- [25] COLLINS M P, MITCHELL D, MACGREGOR J G. Structural design considerations for high-strength concrete [J]. *Concrete International*, 1993, 15(5): 27-34.
- [26] VAN GYSEL A, TAERWE L. Analytical formulation of the complete stress-strain curve for high strength concrete [J]. *Materials and Structures*, 1996, 29(9): 529-533.
- [27] 张哲. 钢-配筋 UHPC 组合桥面结构弯曲受拉性能研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2016.
- ZHANG Z. Bending behaviors of composite bridge deck system composed of OSD and reinforced UHPC layer [D]. Changsha: Hunan University, 2016. (in Chinese)

(编辑 XXX)