



新型装配式钢筋混凝土柱-钢梁组合节点 抗震性能试验研究

于素健^{1,2}, 丁晓娟², 李昊², 王江涛³, 吴成龙², 王永洪², 段海洋⁴, 李大壮³

(1. 青岛理工大学科技发展集团有限公司, 山东 青岛 266520; 2. 青岛理工大学 土木工程学院, 山东 青岛 266520; 3. 山东高速工程建设集团有限公司, 济南 250014; 4. 中青建安建设集团有限公司, 山东 青岛 266000)

摘要:针对装配式钢-混凝土组合结构节点的抗震韧性问题,提出一种基于榫式插接的新型装配式钢筋混凝土柱-钢梁组合节点(PRCSJs)。对3个PRCSJs边节点试件进行拟静力试验,以轴压比和后浇混凝土强度为参数变量,研究不同参数对PRCSJs承载能力、延性、耗能能力及性能退化的影响,并对节点进行刚性评估。结果表明:PRCSJs的破坏模式为梁端连接破坏,满足“强柱弱梁”抗震设计准则;PRCSJs的滞回曲线呈饱满梭形,具有明确的弹性、弹塑性及破坏受力3阶段;PRCSJs的平均延性系数在2.76~4.88之间,等效黏滞阻尼系数在0.28~0.31之间,展现出良好的延性和耗能;后浇超高性能混凝土(UHPC)能有效提升PRCSJs的承载能力,增强节点整体变形性能,降低后浇区混凝土的裂缝开裂;轴压比在0.15~0.3范围内时,增大轴压比能有效提高初始刚度,但会显著降低节点延性和刚度退化性能;PRCSJs在有侧移时为半刚性节点和部分强度节点。

关键词:预制装配式;RCS节点;轴压比;超高性能混凝土;刚性评估

中图分类号: TU398 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(XXXX)XX-0001-11

Experimental analysis on the seismic performance of novel assembled reinforced concrete column-steel beam composite joints

YU Sujian^{1,2}, DING Xiaojuan², LI Hao², WANG Jiangtao³, WU Chenglong²,
WANG Yonghong², DUAN Haiyang⁴, LI Dazhuang³

(1. Tech Development Group Co., Ltd. of QUT, Qingdao 266520, Shandong, P. R. China; 2. School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266520, Shandong, P. R. China; 3. Shandong High-Speed Engineering Construction Group Co., Ltd., Jinan 250014, P. R. China; 4. Zhongqing Jian'an Construction Group Co., Ltd., Qingdao 266000, Shandong, P. R. China)

Abstract: A novel prefabricated reinforced concrete column-steel beam composite joint (PRCSJs) based on

收稿日期: 2025-07-12

基金项目: 国家自然科学基金(52208482); 山东省自然科学基金(ZR2021QE046)

作者简介: 于素健(1973-), 男, 高级工程师, 主要从事装配式结构抗震与工程结构检测鉴定, E-mail: 2811917080@qq.com
吴成龙(通信作者), 男, 博士, 副教授, E-mail: wuchenglongabc@163.com。

Received: 2025-07-12

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (No. 52208482); Natural Science Foundation of Shandong (No. ZR2021QE046)

Author brief: YU Sujian (1973-), senior engineer, main research interests: seismic performance of prefabricated structures and structural inspection and evaluation, E-mail: 2811917080@qq.com

WU Chenglong (corresponding author), PhD, associate professor, E-mail: wuchenglongabc@163.com.

tenon-mortise connection is proposed to address seismic resilience issues in prefabricated steel-concrete composite structures. Quasi-static tests were conducted on three edge PRCSJs specimens, taking the axial compression ratio and the strength of post-cast concrete as parameter variables, to investigate the effects of different parameters on the load-bearing capacity, ductility, energy dissipation capacity, and performance degradation of PRCSJs, and to evaluate the rigidity of the joints. The results indicate that PRCSJs exhibited connection failure at the beam end, satisfying the “strong column-weak beam” seismic design principle. PRCSJs demonstrate plump spindle-shaped hysteresis curves, with distinct elastic, elastic-plastic, and failure stages. The average ductility coefficients range from 2.76~4.88 and the equivalent viscous damping coefficients from 0.28~0.31, demonstrating good ductility and energy dissipation capacity. Post-cast ultra-high performance concrete (UHPC) effectively improved the load-bearing capacity of PRCSJs, enhanced overall joint deformation, and mitigated cracking in the post-cast concrete area. Increasing the axial compression ratio (0.15~0.3) boosts initial stiffness but reduces ductility and stiffness degradation capacity. PRCSJs act as semi-rigid and partial-strength joints under lateral displacement.

Keywords: prefabricated; RCS joint; axial compression ratio; ultra-high performance concrete; rigidity assessment

钢筋混凝土柱-钢梁(reinforced concrete column and steel beam, RCS)组合结构兼具钢结构和钢筋混凝土结构的优点,具有自重轻、成本低、施工速度快等特点^[1-2]。现有 RCS 组合结构中,梁柱节点主要采用“梁贯通”和“柱贯通”的连接方式。但传统 RCS 组合节点往往存在节点域构造及钢筋布置复杂、混凝土浇筑困难、震后不易拆卸更换等问题^[3-4]。装配式 RCS 组合结构具有施工高效、质量可控及震损部件可修复等特点,有效解决传统 RCS 组合结构中存在的难点问题,有利于促进建筑工业化的多元化可持续发展。

已有震害调查发现,装配式建筑结构的损坏主要位于梁柱连接区域,梁柱连接节点的抗震性能直接影响建筑结构整体的安全性^[5-6]。为了保证装配式 RCS 组合结构体系中梁柱连接节点的安全可靠, Li 等^[7]通过连接板和连接螺栓创新了多种新型装配式 RCS 节点形式,提出了节点抗剪承载力计算公式。结果表明,该类节点具有良好的抗震性能,提高配筋率能显著提高节点抗侧力,连接板内设置摩擦铜板能增强节点耗能。Khaloo 等^[8]研究了具有不同细部构造的装配式 RCS 节点试件的抗震性能,发现通过设置剪力键和钢腹板可以有效增强节点强度和刚度,使用延伸盖板能显著减小节点剪切变形。部分学者还在节点区预埋连接螺栓^[9]、栓钉和 U 形槽^[10]等不同钢组件,以改善节点的受力性能。此外,舒兴平等^[11]提出了一种由顶底角钢连接的预制 RCS 节点,试验研究表明 RCS 节点属于典型半刚性节点,耗能能力和延性优于现浇钢筋混凝土梁柱节点。

超高性能混凝土(UHPC)因其出色的力学性能

和耐久性等特点,得到了诸多学者的关注和研究^[12],主要包括 UHPC 与钢筋之间黏结性能的研究^[13]、UHPC 在抑制裂缝开展方面的研究^[14-15]以及 UHPC 与普通混凝土界面之间的接触性能研究^[16]等。以上研究阐明了不同参数对 UHPC 和钢筋之间黏结性能的影响规律,揭示了 UHPC 在梁柱节点中的工作机理,提出了承载力计算公式和理论分析模型,建立了 UHPC 与普通混凝土界面接触的界面模型及协同工作性能,为 UHPC 在装配式结构中的应用奠定了良好的基础。

综上所述,学者提出了诸多连接构造的 RCS 节点形式,取得了显著的研究成果,但在装配式 RCS 节点试验和理论研究方面明显不足, UHPC 在装配式 RCS 组合结构中的研究也较少。基于此,笔者结合钢结构“干”式连接构造和 UHPC 增强的设计思路,提出一种新型装配式 RCS 组合节点(prefabricated RCS composite joints, PRCSJs),如图 1 所示,并通过低周往复加载试验的方法,研究轴压比和后浇混凝土类型对 PRCSJs 的破坏特征、应力分布及滞回特性的影响。

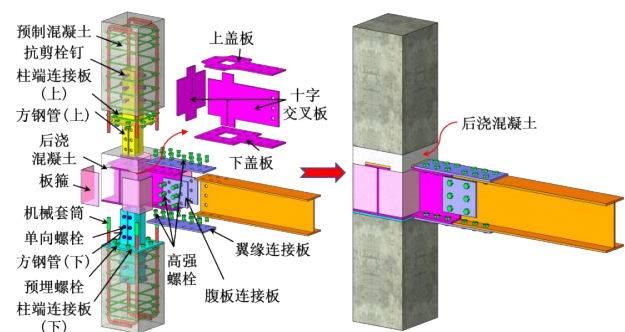


图 1 PRCSJs 构造示意图

Fig. 1 PRCSJs structure diagram

1 试验概况

1.1 试件设计与制作

基于规范^[17]和试验加载设备情况,设计了3个边节点试件(PRCSJ-1、PRCSJ-2、PRCSJ-3),尺寸及配筋详图见图2,设计参数见表1。参数变量为轴压比和后浇混凝土类型。其中,轴压比包括0.15和0.3,后浇混凝土包括C60高强度混凝土灌浆料(PRCSJ-1)和超高性能混凝土(UHPC)C120(PRCSJ-2和PRCSJ-3)。

PRCSJs主要包括预制RC柱、插接模块、钢梁、板箍和后浇混凝土。插接模块由十字交叉板与上下盖板焊接而成,是连接预制RC柱和钢梁的核心部件。预制RC柱的截面尺寸为300 mm×300 mm,总高1 500 mm,内部嵌有由纵向受力筋和箍筋组成的钢筋笼,其中纵筋采用 $\phi 20$ mm的HRB400钢筋,箍筋采用 $\phi 8$ mm的HRB300钢筋。基于连接构造设计及内力有效传递,预制RC柱中预埋一定长度的方钢管和柱端连接板。方钢管截面尺寸分别为100 mm×100 mm×7.5 mm(上柱)和120 mm×120 mm×7.5 mm(下柱),外露部分的四面开设长条形槽口用于与插接模块的插接,侧面开设螺栓孔以便上下方钢管连接,外表面焊接抗剪栓钉(长度60 mm,直径13 mm)及柱端连接板。上、下柱的方钢管在插接模块内部通过十字交叉板插接,并采用单向螺栓(10.9S M16)进行连接固定,增强节点核

心区抗剪性能和防止预制RC柱间滑移;柱端连接板与盖板通过高强螺栓连接;上下部预制RC柱间的纵筋采用规格为 $\phi 20$ 、长度50 mm的内螺纹机械套筒连接。

钢梁截面尺寸为250 mm×150 mm×10 mm×10 mm,其通过翼缘连接板、腹板连接板及10.9S M20高强螺栓等与插接模块进行连接。其中,翼缘连接板的功能主要是进行承载与耗能,达到塑性铰外移的目的。此外,在节点核心区焊接4块厚度为3 mm的L型板箍,焊接位置为板箍与十字交叉板及上下盖板之间的接触边缘部位,焊缝焊脚尺寸为2~3 mm。板箍代替箍筋约束核心区混凝土,不仅解决了核心区钢筋连接的复杂性问题,也保证了后浇混凝土施工质量。后浇混凝土区域在节点域及柱端连接高度80 mm范围内。PRCSJs所使用的钢材采用Q235B等级,预制RC柱均采用C40混凝土。

在装配时,首先利用高强螺栓和单向螺栓连接插接模块和预制RC柱。然后,通过机械套筒连接上下预制RC柱的纵向受力筋。其次,通过翼缘连接板、腹板连接板及高强螺栓连接插接模块和钢梁。最后,在插接模块四周焊接钢板箍,并完成节点核心区混凝土的浇筑。为便于PRCSJs的制作加工,在进行试验研究时其制作过程有所调整,如图3所示。

弹性阶段,节点整体处于弹性受力阶段,翼缘连接板提供主要的抗弯承载力,并使梁端内力传递

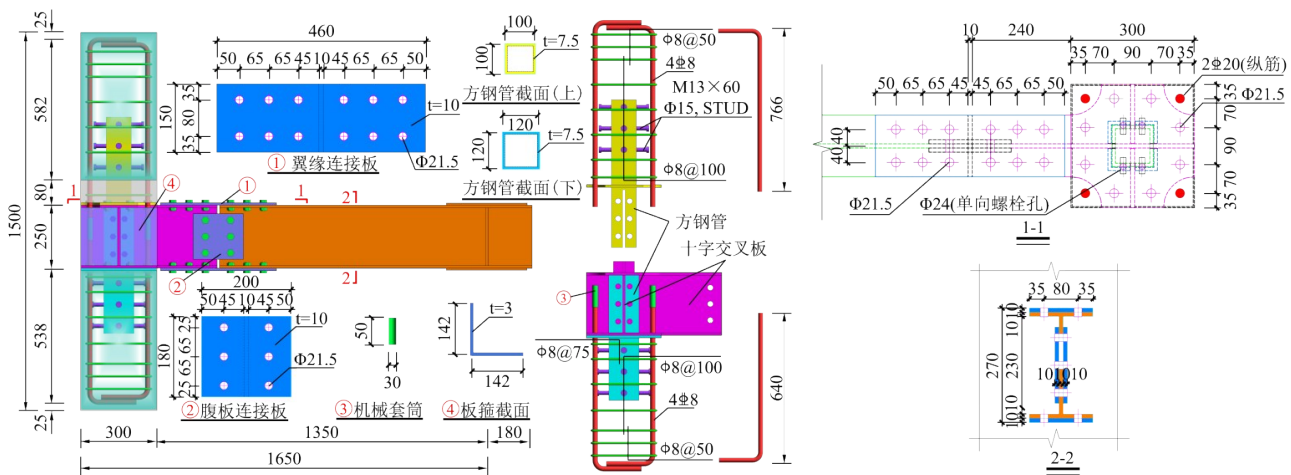


图2 试件尺寸和配筋(mm)
Fig. 2 Specimen size and reinforcement (mm)

表1 试验参数设计表
Table 1 Test parameter design table

试件编号	截面尺寸		参数变量	
	钢筋混凝土柱	钢梁	轴压比	后浇混凝土类型
PRCSJ-1	300 mm×300 mm	250 mm×150 mm×10 mm×10 mm	0.15	C60
PRCSJ-2	300 mm×300 mm	250 mm×150 mm×10 mm×10 mm	0.15	UHPC
PRCSJ-3	300 mm×300 mm	250 mm×150 mm×10 mm×10 mm	0.3	UHPC

至梁柱节点。弹塑性阶段,梁端内力仍可有效传递至节点核心区,使得预制 RC 柱混凝土发生开裂,但预制混凝土与后浇混凝土之间保持良好的界面黏结性能。同时,该阶段节点核心区内的集中应力开始逐渐转移至插接模块悬臂段或翼缘连接板,并使

其逐渐发生塑性变形集中损伤耗能,其余构件处于弹性状态。破坏阶段,因插接模块悬臂段或翼缘连接板发生弹塑性变形使节点失效。在该阶段,预埋方钢管、后浇混凝土及插接模块共同承担梁端荷载引起的主要内力和变形,节点能维持不发生倒塌。

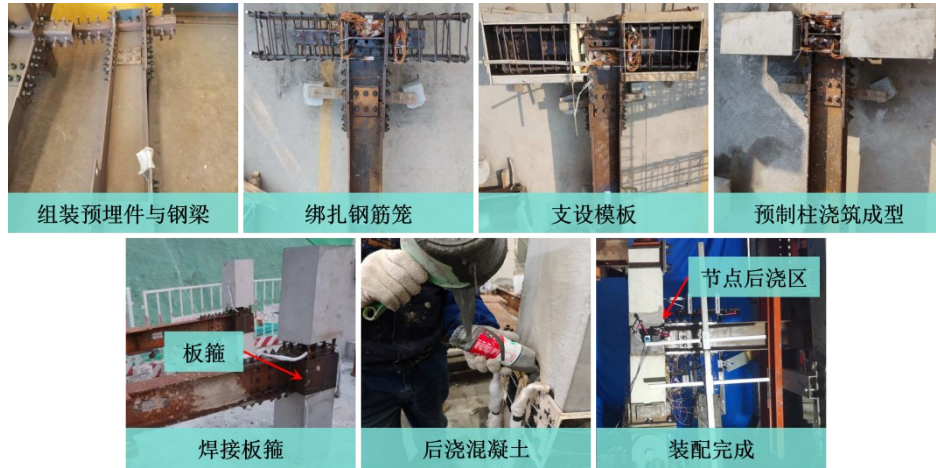


图3 PRCSJs 试件制作过程

Fig. 3 PRCSJs specimen production process

1.2 材性试验

PRCSJs中预制 RC 柱采用 C40 混凝土,核心区后浇混凝土采用 C60 高强混凝土 (PRCSJ-1) 和 C120 的 UHPC (PRCSJ-2、PRCSJ-3)。浇筑试件时,C40 混凝土预留 $150\text{ mm} \times 150\text{ mm} \times 150\text{ mm}$ 的立方体试块,C60 高强混凝土和 C120 的 UHPC 均预

留 $100\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ 的立方体试块。根据 T/CBMF 37—2018^[18]和 GB/T 50081—2019^[19]测得 C40、C60 和 C120 试块立方体抗压强度实测平均值分别为 56.80、60.37、121.60 MPa。表 2 是按照 GB/T 228.1—2021^[20]对试件所用钢材进行材性测试后的结果。

表2 钢材力学性能试验结果

Table 2 Steel mechanical properties test results

钢材牌号	取样位置	厚度/直径/mm	屈服强度 f_y /MPa	抗拉强度 f_u /MPa	伸长率 δ /%
Q235B	板箍	3	321.4	383.8	25
Q235B	方钢管	7.5	375.4	520.4	21
Q235B	钢梁	10	392.6	520	22
Q235B	柱端连接板	12	390.2	548.2	22
HRB300	箍筋	8	418.4	658.3	25
HRB400	纵筋	20	434.6	625.2	23

1.3 试验加载与变形测量

加载设备装置如图 4 所示。试件柱底部放入与铰支座连接的钢盒中,柱顶通过水平支撑进行约束,并通过 100 t 油压千斤顶施加轴压。梁端采用 50 t MTS 液压伺服作动器施加往复作用力,为防止钢梁在加载过程中发生平面外失稳,在其两侧安装有侧向支撑。

试验加载制度如图 5 所示,加载方式采用变幅位移控制加载^[21], θ 为层间位移角。加载时以作动器推(向下)为正、拉(向上)为负,试验加载顺序先正后负。加载过程分为两部分,首先进行预加载,确保作动器正常工作,试件安装牢固。随后,正式

进行往复加载,按照 0.375%、0.5%、0.75%、1%、1.5%、2%、3%、4%、5% rad……的顺序依次加载,每级循环 3 次,加载速率为每循环 4 min,直至试件出现严重破坏或承载力下降为峰值荷载的 85% 及以下时,停止加载。

变形测量主要包括应变和位移测量。柱端位移通过位移传感器(量程 $\pm 50\text{ mm}$) LVDT1 和 LVDT2 测得,核心区剪切变形通过 LVDT3 和 LVDT4 测得,翼缘连接板处位移通过 LVDT5 和 LVDT6 测得,钢梁连接端竖向位移通过 LVDT7 和 LVDT8 测得,钢梁加载端荷载和位移由 MTS 加载系统自动采集。节点核心区及其附近区域的变形

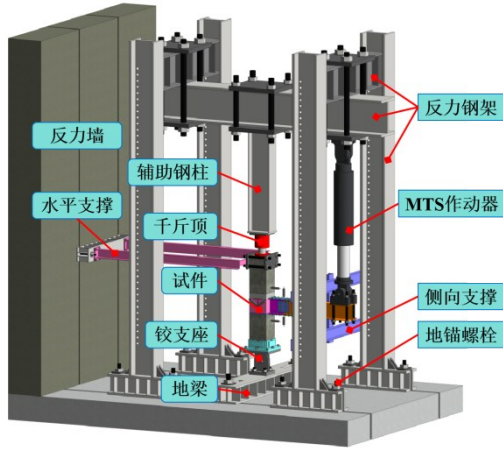


图4 试验加载装置图

Fig. 4 Test loading device diagram

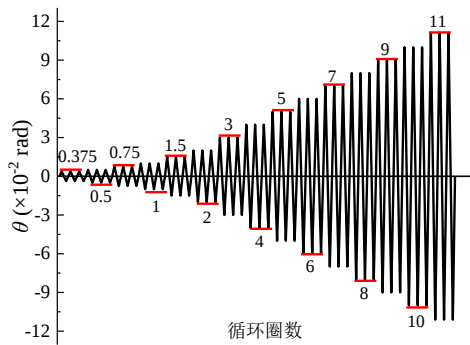


图5 加载制度

Fig. 5 Loading system

主要是通过粘贴应变片(型号为SZ120-80AA、BX120-5AA)进行采集,主要组成部件包括钢筋、方钢管、钢梁及混凝土等(见图6)。

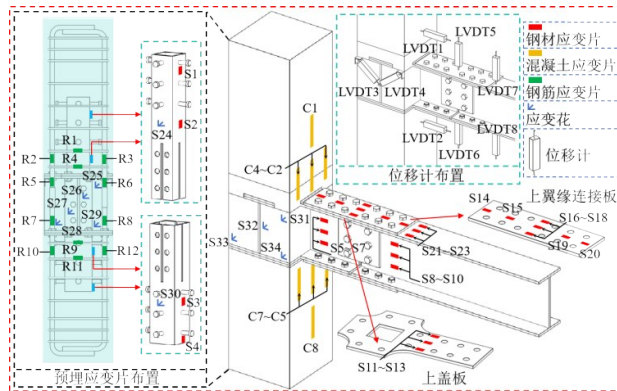


图6 应变片和LVDTs布置图

Fig. 6 Layout of strain gauges and LVDTs

2 试验结果分析

2.1 试验现象及破坏特征

1)PRCSJ-1试件

θ 为1.5% rad时,上柱正面左侧拐角处出现竖向细微裂缝,下柱处表面出现细微水平裂缝,上柱后浇砼与预制砼交界处出现横向细微裂缝。 θ 为3% rad时,翼缘连接板出现轻微滑动,滑移长度约

0.5~1 mm。 θ 为5% rad时,翼缘连接板开始发生轻微屈曲,下柱左侧面新增水平细微裂缝。 θ 为6%~7% rad时,翼缘连接板滑移现象明显。上柱右侧面梁上后浇混凝土出现竖向裂缝,局部混凝土表面轻微剥落。上下柱混凝土不断延长增加。 θ 为8% rad时,腹板连接板发生转动滑移。随着加载级别和循环次数的增加,柱端混凝土表面局部开始变酥。 θ 为10% rad时,上柱右侧面左右拐角处混凝土开裂明显加剧,并伴有混凝土轻微剥落现象。翼缘连接板屈曲变形显著。左右两侧板箍与下盖板焊缝断裂,下盖板悬臂段在拐角处发生断裂。 θ 为11% rad时,上柱正面右下角开裂剥落严重;板箍右侧鼓曲;此时梁端荷载下降至峰值时85%以下,停止加载。如图7所示。

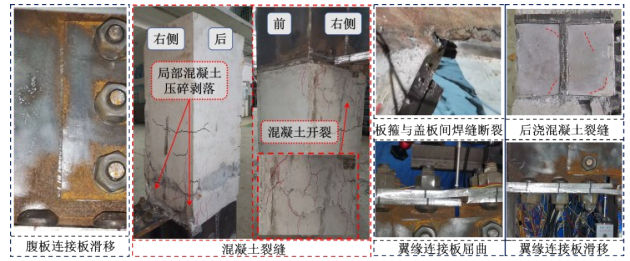


图7 PRCSJ-1试件

Fig. 7 PRCSJ-1 specimen

2)PRCSJ-2试件

θ 为1%~1.5% rad时,预制RC柱两侧出现细微水平裂缝和斜裂缝,并沿拐角延伸至下柱正面。 θ 为3% rad时,翼缘连接板发生轻微屈曲和滑移,试件承载力开始下降。 θ 为4%~5% rad时,翼缘连接板滑移明显,腹板连接板出现轻微转动滑移。随着 θ 的增大,翼缘连接板滑移加剧,最大滑移长度5~6 mm,腹板连接板滑移转动明显。 θ 为7% rad时,上柱后浇混凝土与预制混凝土交界处拐角开裂,下柱裂缝进一步发展。 θ 为8% rad时,插接模块下盖板与板箍焊缝出现裂纹,翼缘连接板的屈曲变形持续加剧,滑移现象不断增加,混凝土柱表面的细小裂缝不断延长增加。最终,在 θ 为10% rad时,下盖板与板箍焊缝断裂,承载力下降,试验终止,如图8所示。

3)PRCSJ-3试件

θ 为2% rad时,下柱左侧面出现细微裂缝,翼缘发生轻微屈曲变形。 θ 为3% rad时,翼缘连接板发生轻微滑移并伴有螺栓滑移响声。左侧板箍与下盖板焊缝出现裂纹,腹板连接板出现轻微转动滑移。 θ 为4% rad时,右侧板箍与下盖板焊缝出现裂纹,承载力开始下降。 θ 为5% rad时,翼缘连接板开始发生弯曲变形;左侧板箍顶部与上盖板连接处焊

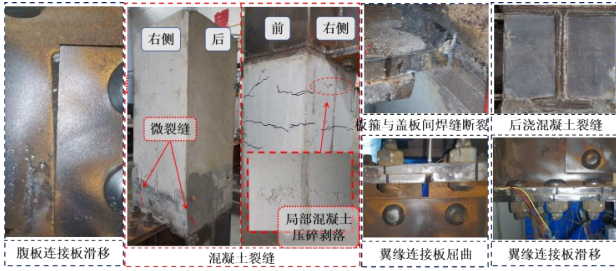


图8 PRCSJ-2 试件

Fig. 8 PRCSJ-2 specimen

缝断裂,并发生屈曲变形。 θ 为6% rad时,左侧板箍与下盖板焊缝断裂,板箍撕裂长约1 cm。插接模块下盖板悬臂段的拐角处发生局部断裂。 θ 为7% rad时,左侧板箍上部因拉伸开裂导致的屈曲变形加剧,插接模块下盖板悬臂段在拐角处的局部断裂情况继续加剧。最终,因承载力下降至峰值的0.85倍,试验终止,如图9所示。观察发现PRCSJ-3预制RC柱整体处于弹性状态,未出现明显开裂现象。预制混凝土和后浇UHPC整体工作性能良好,连接界面处未发生开裂和压酥脱落现象。

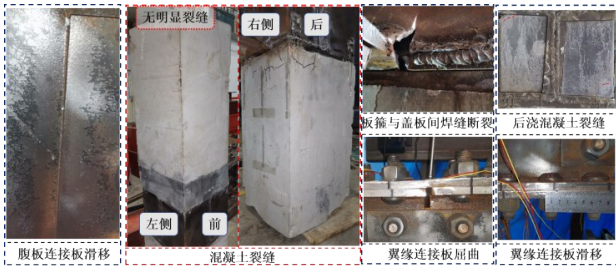


图9 PRCSJ-3 试件

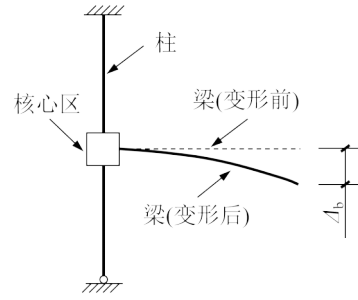
Fig. 9 PRCSJ-3 specimen

综上可知,加载前期,PRCSJs受力状态良好,整体处于弹性状态。梁端内力主要依靠连接组件和高强螺栓与钢梁之间的摩阻力传递至插接模块(节点核心区),插接模块通过高强螺栓、后浇混凝土及预埋方钢管将内力传递至预制RC柱。随 θ 的增加,预制RC柱混凝土表面及拐角处的细微裂缝增多并逐渐发展,主要原因是翼缘连接板尚未发生明显的屈曲变形,可有效将梁端内力传递至插接模块及预制RC柱。随着梁端内力的不断增大,翼缘连接板出现滑移和屈曲变形。节点核心区内力逐渐向梁端转移,从而导致翼缘连接板滑移明显,腹板连接板出现轻微转动。最终,插接模块的下盖板与板箍之间的连接焊缝断裂,导致试件承载力下降并发生破坏。

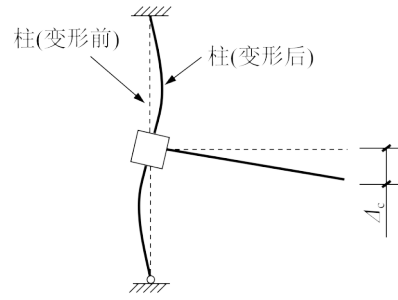
2.2 节点变形分析

图10为PRCSJs各部件变形示意图。在往复加载过程中,梁、柱及节点核心区均会发生一定的变形并反映在梁端总位移 Δ 上。因此,将梁、柱及节点

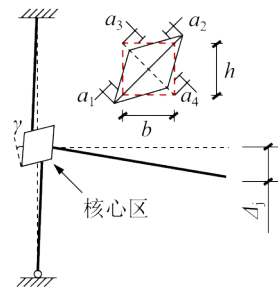
核心区变形依次记为 Δ_b 、 Δ_c 、 Δ_j 。梁柱相对变形记为 Δ_{b-c} 。各部件变形按式(1)~(4)计算。



(a) 梁变形



(b) 柱变形



(c) 核心区剪切变形

图10 节点变形图

Fig. 10 Joint deformation diagram

$$\Delta_c = \theta_c \times L \quad (1)$$

$$\Delta_j = \gamma \times L \quad (2)$$

$$\Delta_b = \Delta - \Delta_c - \Delta_j \quad (3)$$

$$\Delta_{b-c} = \Delta_b - \Delta_c \quad (4)$$

$$\gamma = \frac{\sqrt{b^2 + h^2}}{bh} \cdot \frac{(a_1 + a_2 + a_3 + a_4)}{2} \quad (5)$$

式中: θ_c 为柱转角,通过布置在柱端的位移计测定。加载点到柱端的距离 $L=1\,350\text{ mm}$ 。 b 和 h 分别是核心区板箍宽度和高度。 a_1+a_2 和 a_3+a_4 分别代表核心区对角线伸长和压缩长度(图10(c)), $a_1=a_2$ 、 $a_3=a_4$ 分别由LVDT4和LVDT3测得。

图11是各关键部件及节点整体变形曲线和贡献图。PRCSJs的各部件变形对梁端总变形的贡献随加载位移级的增大而增大。当翼缘连接板发生屈服后($\theta>2\%$ rad), Δ_b (包括翼缘连接板、下盖板和钢梁)对梁端位移的贡献逐渐占据主要部分。 Δ_c 和

Δ_j 总体是呈降低趋势。其中,因 Δ_c 占比较小,使得 Δ_{b-c} 与 Δ_b 的整体变化基本一致。

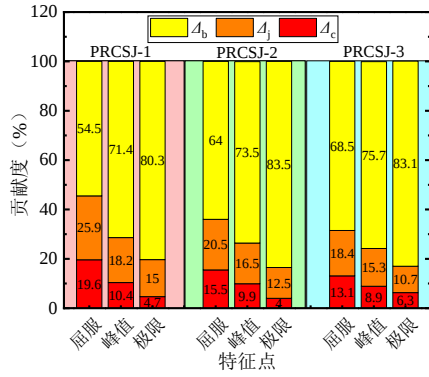


图 11 PRCSJs 组件贡献

Fig. 11 The component contribution of PRCSJs

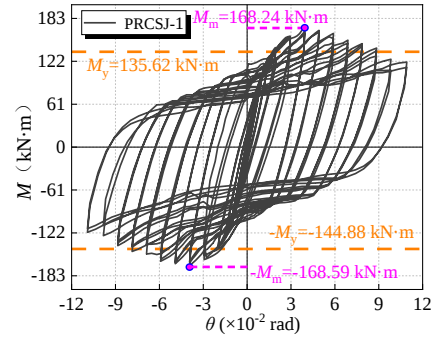
相比 PRCSJ-1 的屈服点, PRCSJ-2 在屈服点时 Δ_b 的占比提高 17.43%, Δ_j 和 Δ_c 的占比分别下降 20.85% 和 20.92%。在峰值点时 Δ_b 的占比提高 2.94%, Δ_j 和 Δ_c 的占比分别下降 9.34% 和 4.81%。在极限点时 Δ_b 的占比提高 3.99%, Δ_j 和 Δ_c 的占比分别下降 16.67% 和 14.89%。表明采用 UHPC 能有效保护节点核心区, 减少混凝土裂缝开展, 使梁端塑性发展更充分。

相比 PRCSJ-2 的屈服点, PRCSJ-3 在屈服点时 Δ_b 的占比提高 7.03%, Δ_j 和 Δ_c 的占比分别下降 10.24% 和 15.48%。在峰值点时 Δ_b 的占比提高 2.99%, Δ_j 和 Δ_c 的占比分别下降 7.27% 和 10.1%。在极限点时 Δ_b 和 Δ_j 的占比分别降低了 0.84% 和 14.4%, Δ_c 的占比增大了 57.5%, 其中 Δ_c 占比增大的原因是试件 PRCSJ-3 过早破坏, Δ 值较小。以上表明增大轴压比在一定程度上可抑制节点核心区的剪切变形。

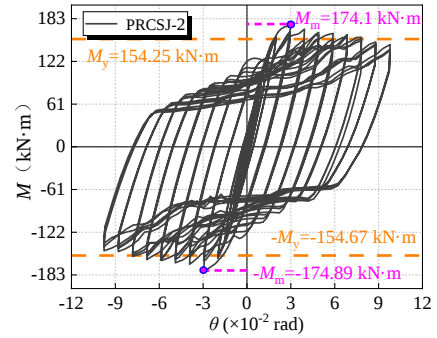
3 抗震性能分析

3.1 滞回曲线分析

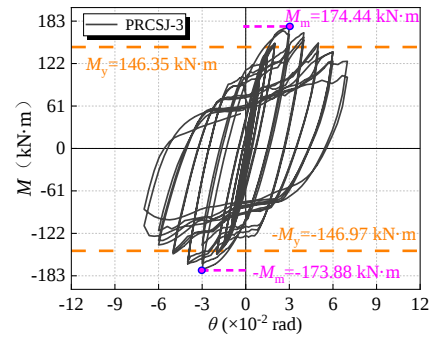
图 12 是 PRCSJs 的弯矩 (M)—转角 (θ) 滞回曲线。 $M=PL$, L 是试件加载点到柱端距离, P 是作用在加载端的荷载。采用等能量法^[22]确定骨架曲线的屈服点, 所对应的弯矩和转角为屈服弯矩 (M_y) 和屈服转角 (θ_y); 峰值点为骨架曲线中最大荷载的点, 对应的弯矩为峰值弯矩 (M_m)。加载前期, PRCSJs 处于弹性状态, 滞回曲线大致呈线性变化, 无明显残余变形。试件屈服后, 滞回环逐渐增大, 大致呈梭形。随着加载继续, 曲线出现明显滑移段, 主要是由翼缘连接板和腹板连接板滑动变形导致。PRCSJs 的滞回曲线均较为饱满, 试件整体的耗能力良好。



(a) PRCSJ-1



(b) PRCSJ-2



(c) PRCSJ-3

图 12 滞回曲线对比

Fig. 12 Comparison of hysteresis curves

当后浇混凝土由 C60 提升为 UHPC 时, PRCSJs 的屈服和峰值承载力明显提高, 滞回曲线达到峰值后的退化较为稳定。表明节点后浇区采用 UHPC 能有效提高节点的承载能力和稳定其退化性能。当轴压比从 0.15 增大至 0.3 时, PRCSJs 的滞回曲线包络面积有所降低。特别是, 滞回曲线在下降段的斜率降低明显。表明增大轴压比会降低节点的耗能和延性, 但对峰值承载力影响较小。

3.2 骨架曲线

图 13 是 PRCSJs 的 $M-\theta$ 骨架曲线对比, 表 3 汇总了 PRCSJs 的滞回性能指标。各试件曲线形状均呈 S 形。在低周往复荷载作用下, 先后经历了弹性、弹塑性和破坏 3 个阶段。对比 PRCSJ-1 和 PRCSJ-2 可知, 在弹性阶段, 二者曲线基本重合, 但 PRCSJ-2 更早发生屈服, M_y 相对提高约 10.13%。原因是

UHPC 使节点核心区刚度增大,梁端荷载更集中,导致 PRCSJ-2 梁端塑性铰提前出现。此外,PRCSJ-1 正向屈服时出现滑动,原因是节点核心区纵筋连接处发生滑移。在弹塑性阶段,PRCSJ-2 的刚度更大, M_m 相对提高约 3.61%。原因是 PRCSJ-1 的混凝土柱出现裂缝,导致试件整体刚度下降。随着加载的进行,PRCSJ-1 后浇区混凝土持续开裂和剥落,导致其承载力下降更快,表明后浇区采用 UHPC 能提高节点承载力,改善试件延性性能。

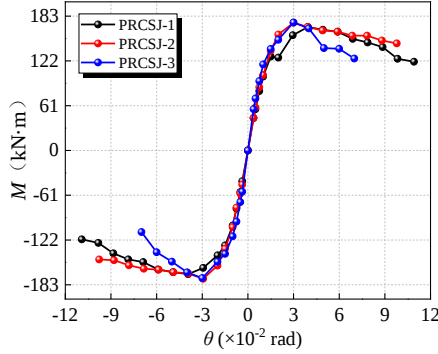


图 13 骨架曲线对比

Fig. 13 Comparison of skeleton curves

对比 PRCSJ-2 和 PRCSJ-3 可知,在弹性和弹塑性阶段,两者的初始刚度和承载力基本接近。但是,两者达到峰值承载力后,由于 PRCSJ-3 板箍与盖板之间的焊缝提早断裂并持续发展,很快达到破坏。表明增大轴压比能提高试件初始刚度,增幅约 19.29%。但同时会使试件延性降低,导致承载力退化加快。

3.3 延性及耗能

PRCSJs 延性由转角延性系数(u)反映,计算式见式(6)。

$$u = \frac{\theta_u}{\theta_y} \quad (6)$$

式中: θ_u 为极限转角。

通过等效黏滞阻尼系数(h_e)反映 PRCSJs 耗能性能,计算式及示意图如图 14。

表 3 中给出了 PRCSJs 的 u 值和 h_e 值。各试件 u 值在 2.76~4.88 之间,高于现有研究中装配式 RCS 组合节点的 u 值^[7],PRCSJs 具有良好的变形性能。相比于后浇 C60 混凝土,后浇 UHPC 使 PRCSJs 的 u 值提高了 25.77%,原因是组成 UHPC 的钢纤维和

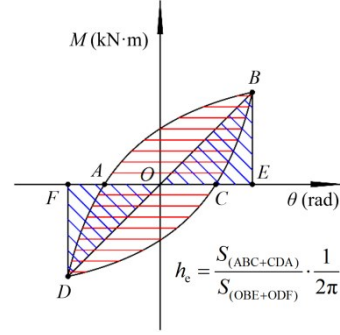


图 14 h_e 示意图

Fig. 14 Calculation diagram of h_e value

水泥基之间良好的黏结性能有效提高了节点核心区和柱端的抗剪刚度,提升了 PRCSJs 的塑性变形能力。当轴压比从 0.15 增大至 0.3 时,PRCSJs 的 u 值降低了 43.44%,主要原因是增大轴压比导致板箍与下盖板间的焊缝提前断裂,导致 PRCSJs 的塑性变形能力降低。各试件 h_e 值范围在 0.28~0.31 之间,表明 PRCSJs 具有较强的耗能能力^[23]。然而, h_e 值的变化幅度较小,表明后浇区混凝土强度和轴压比对 PRCSJs 的 h_e 值影响不明显。

图 15 是 PRCSJs 累积耗能(E_A)与循环次数(n)关系曲线对比。各试件的 E_A - n 曲线大致相同。当 n 小于 18 时($\theta=2\%$ rad), E_A 增长几乎为 0,表明此时的 PRCSJs 基本处于弹性状态,无明显残余变形。随着 n 值的继续增大, E_A 开始呈指数增加,展现出良好的累积耗能能力。对比 PRCSJs 发现, E_A - n 曲线基本重合,表明后浇区混凝土强度和轴压比对 PRCSJs 的 E_A 影响较小。

图 16 是 PRCSJs 的 h_e - n 曲线对比。PRCSJs 的 h_e - n 曲线具有相近的发展规律,均可分为 3 个发展

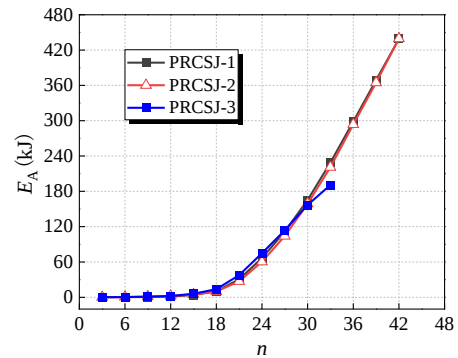


图 15 E_A - n 曲线对比

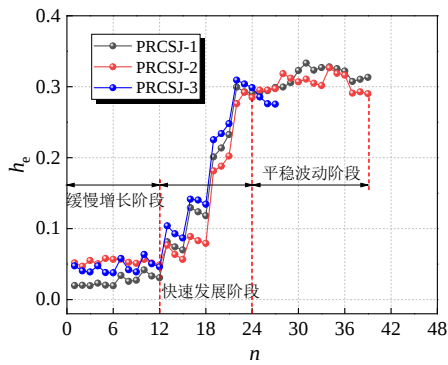
Fig. 15 Comparison of E_A - n curves

表 3 滞回性能指标汇总

Table 3 Summary of hysteretic performance indicators

试件编号	$M_y/(\text{kN}\cdot\text{m})$	$\theta_y/(10^{-2}\text{rad})$	$M_m/(\text{kN}\cdot\text{m})$	$\theta_u/(10^{-2}\text{rad})$	u	h_e
PRCSJ-1	140.25	2.20	168.42	8.50	3.88	0.31
PRCSJ-2	154.46	1.94	174.49	9.44	4.88	0.29
PRCSJ-3	146.66	1.80	174.16	4.98	2.76	0.28

阶段,即缓慢增长阶段、快速发展阶段及平稳波动阶段。当 n 小于12时, h_e 值基本在0.1以下, h_e - n 曲线增长缓慢。各试件基本处在弹性状态。该阶段,PRCSJ-2的 h_e 值会高于PRCSJ-1和PRCSJ-3。随 n 的继续增大,PRCSJs逐渐进入屈服阶段。节点在梁端的塑性变形得到充分发展, h_e - n 曲线迅速攀升。该阶段,PRCSJ-1和PRCSJ-3的 h_e 值会高于PRCSJ-2。当 n 超过24后,PRCSJs开始进入破坏阶段, h_e - n 曲线呈平缓波动的发展趋势。该阶段,PRCSJ-1和PRCSJ-2的 h_e - n 曲线会趋于接近。然而,PRCSJ-3的 h_e - n 曲线在达到 h_e 峰值后就迅速下降,试件很快发生破坏。

图 16 h_e - n 曲线对比Fig. 16 Comparison of h_e - n curves

综上可知,PRCSJ-1~PRCSJ-3中 h_e 的最大值均在0.3以上,PRCSJs展示出良好的耗能能力。后浇UHPC对PRCSJs的整体耗能影响相对较小。增大轴压比会提高PRCSJs在快速发展阶段时的耗能能力,但也会导致试件的提前破坏。

3.4 刚度退化

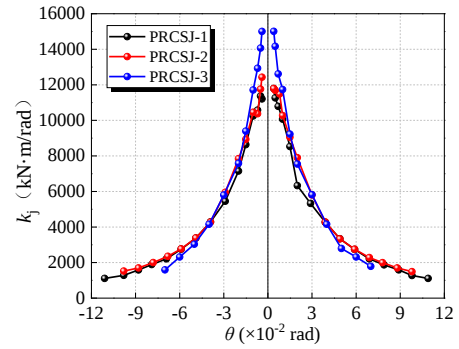
采用环线刚度(k_j)来反映PRCSJs在加载中的刚度退化性能,计算式见式(7)。

$$k_j = \frac{\sum_{i=1}^m M_{j,i}}{\sum_{i=1}^m \theta_{j,i}} \quad (7)$$

式中: k_j 为试件在 j 级加载下的环线刚度; $M_{j,i}$ 为试件在第 j 级加载位移下第 i 次循环的峰值弯矩; $\theta_{j,i}$ 是峰值弯矩 $M_{j,i}$ 对应的转角; m 为同级循环次数。

图17是PRCSJs的 k_j - θ 曲线。各试件在屈服后的刚度持续下降,后期逐渐趋于平缓,总体表现出稳定的刚度退化性能。对比PRCSJ-1~PRCSJ-3可知,后浇区采用UHPC对节点刚度退化影响较小,增大轴压比会提高节点的初始刚度。当轴压比从0.15增大至0.3时,PRCSJs在正负向的平均初始刚度提高约19.29%,但刚度退化速率更快。主要原因是增大轴压比会对节点核心区产生有利的约束作用,提高核心区混凝土的抗剪刚度,使插接模块

悬臂段承受的应力显著提升,导致下盖板与板箍之间的连接焊缝提前断裂。

图 17 k_j - θ 曲线对比Fig. 17 Comparison of k_j - θ curves

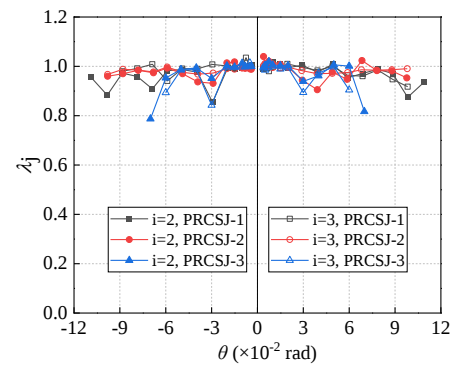
3.5 承载力退化

采用同级承载力退化系数(λ_j)来评定PRCSJs的承载力退化性能,计算式见式(8)。

$$\lambda_j = \frac{P_{j,i}}{P_{j,1}} \quad (8)$$

式中: λ_j 为第 j 级加载位移下的同级承载力退化系数, $P_{j,i}$ 为第 j 级加载位移下第 i 次循环的峰值荷载; $P_{j,1}$ 为第 j 级加载位移下第1次循环的峰值荷载。

图18是各试件的 λ_j - θ 曲线。当后浇混凝土由C60提升为UHPC时,PRCSJs的 λ_j - θ 曲线波动较小,变化幅度在0.07%~14.25%之间。PRCSJ-1中的 λ_j 值存在个别跳动较大,这是滑移和焊缝断裂导致。但是, λ_j - θ 曲线总体趋于稳定,表现出良好的同级承载力退化性能。表明后浇UHPC对PRCSJs的 λ_j 影响不大。对比PRCSJ-2和PRCSJ-3,在 θ 为3%~5% rad范围内,PRCSJ-3的 λ_j - θ 曲线出现波动并呈下降趋势。表明轴压比越大,在试件达到峰值后承载力退化越严重。

图 18 λ_j - θ 曲线对比Fig. 18 Comparison of λ_j - θ curves

4 节点刚性评价

为了评估PRCSJs的转动特性,根据欧洲规范^[24]中按刚度和按强度的方法对节点类型进行区

分,规范方法如表4所示。图19是PRCSJs骨架曲线与规范判别标准对比结果。由图19可知,按刚度分类,试件PRCSJ-1、PRCSJ-2、PRCSJ-3在无侧移框架中为刚性节点,在有侧移框架中为半刚性节点。

表4 欧洲规范对梁柱连接的分类

Table 4 Classification of beam-column connections according to European codes

节点类型	刚度	节点类型	强度
刚性节点	$K_{ji} \geq k_b EI_b / L_b$	全强度节点	$M_d \geq M_{pb}$
半刚性节点	$0.5 EI_b / L_b < K_{ji} < k_b EI_b / L_b$	部分强度节点	$0.25 M_{pb} < M_d < M_{pb}$
铰接节点	$K_{ji} \leq 0.5 EI_b / L_b$	铰接节点	$M_d \leq 0.25 M_{pb}$

注:表中 K_{ji} 为节点初始转动刚度; k_b 取值为8(无侧移框架)或25(有侧移框架); I_b 为梁截面惯性矩; E 为梁材料弹性模量; L_b 为梁跨度; M_d 为节点抵抗矩; M_{pb} 为梁塑性抵抗矩。

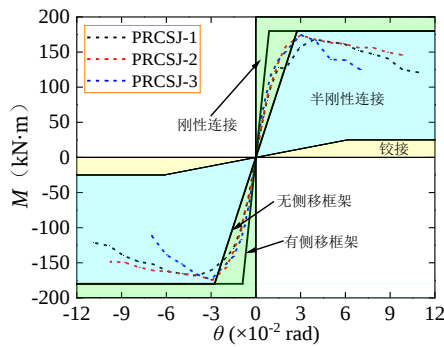


图19 节点刚性评估

Fig. 19 Evaluation of joint rigid

5 结论

提出了一种基于榫式插接的新型装配式RCS节点(PRCSJs)。通过对3个PRCSJs边节点试件进行往复加载试验,研究了轴压比和后浇混凝土强度对PRCSJs破坏模式、承载力及延性等抗震性能的影响,评估了PRCSJs的刚性特征。结论如下:

1)各试件均表现为梁端连接破坏,即下盖板与板箍焊缝断裂后承载力下降至不宜加载,符合“强柱弱梁”设计原则。试件破坏时板箍发生不同程度变形,但核心区混凝土损伤不明显,说明板箍能承担一定荷载,对核心区混凝土具有约束和保护作用。翼缘连接板在加载中变形最大,达到了试件主要耗能部件的设计目标。

2)PRCSJs的滞回曲线饱满,各阶段的内力传递路径明确,承载能力强。PRCSJs的 u 和 h_c 分别在2.76~4.88和0.28~0.31之间,承载力和刚度退化性能稳定,未出现承载力或刚度骤降现象。PRCSJs展现出良好的受力性能和抗震性能。

3)后浇区采用UHPC有助于减少核心区混凝土的开裂,增强节点整体的承载能力和变形能力,但对节点耗能和初始刚度影响不明显。

4)当轴压比在0.15~0.3范围内时,增大轴压

点。按强度分类, M_{pb} 计算值为193.26 kN·m,试件PRCSJ-1、PRCSJ-2、PRCSJ-3发生破坏时弯矩在(0.74~0.77) M_{pb} 之间,为部分强度节点。

比可使节点核心区的剪切变形减小,初始刚度提高约19.29%,但增大轴压比会显著降低节点延性和刚度退化性能,不利于节点抗震。

5)按刚度分类,PRCSJs在无侧移时为刚性节点,有侧移时为半刚性节点;按强度分类,PRCSJs为部分强度节点。

参考文献

- [1] 门进杰,王家琛,樊冠磊,等. RCS梁柱节点半刚性连接弯矩-转角关系模型研究[J]. 土木工程学报, 2020, 53(10): 36-50.
MEN J J, WANG J C, FAN G L, et al. Moment-rotation model of semi-rigid connection of RCS beam-column assembly [J]. China Civil Engineering Journal, 2020, 53(10): 36-50. (in Chinese)
- [2] 冯思远,陶宇宸,金振奋,等. 轴压比和面承板厚度对混合节点抗震性能的影响[J]. 浙江大学学报(工学版), 2024, 58(6): 1185-1197.
FENG S Y, TAO Y C, JIN Z F, et al. Effects of axial compression ratio and face-bearing plate thickness on seismic performance of hybrid joints [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2024, 58(6): 1185-1197. (in Chinese)
- [3] 门进杰,王凯,兰涛,等. 翼缘板切除型钢筋混凝土柱-钢梁组合节点破坏模式和构造措施改进[J]. 建筑结构学报, 2017, 38(增刊1): 394-401.
MEN J J, WANG K, LAN T, et al. Failure modes and structure improvement of RCS composite joints with tapered-flange-type details [J]. Journal of Building Structures, 2017, 38(Sup 1): 394-401.
- [4] 张锡治,章少华,李星乾,等. 钢筋混凝土柱-钢梁混合结构体系研究进展[J]. 建筑结构, 2024, 54(19): 107-118.
ZHANG X Z, ZHANG S H, LI X Q, et al. Review of research on reinforced concrete column-steel beam hybrid structural system [J]. Building Structure, 2024,

- 54(19): 107-118. (in Chinese)
- [5] 王昱, 张冬芳, 赵均海, 等. 复式钢管混凝土柱-钢梁上焊下栓节点抗震性能研究[J]. 建筑结构学报, 2024, 45(9): 135-147.
- WANG Y, ZHANG D F, ZHAO J H, et al. Seismic behavior of joint of top-flange-welded and bottom-flange-bolted with CFST column to steel beam [J]. Journal of Building Structures, 2024, 45(9): 135-147. (in Chinese)
- [6] 曹子健, 李全旺. 有缺陷的装配式混凝土梁柱节点抗震性能试验研究[J]. 工程力学, 2021, 38(11): 134-146, 159.
- CAO Z J, LI Q W. Experimental study on the seismic behavior of precast concrete beam-column joints with connection defects [J]. Engineering Mechanics, 2021, 38(11): 134-146, 159. (in Chinese)
- [7] LI W, YE H, WANG Q, et al. Experimental study on the seismic performance of demountable RCS joints [J]. Journal of Building Engineering, 2022, 49: 104082.
- [8] KHALOO A, BAKHTIARI DOOST R. Seismic performance of precast RC column to steel beam connections with variable joint configurations [J]. Engineering Structures, 2018, 160: 408-418.
- [9] CHEN H, GUO Z X, BASHA S H, et al. Seismic behavior of RCS frame joints applied with high-strength bolts-end plate connection [J]. Journal of Building Engineering, 2023, 63: 105455.
- [10] ZIBASOKHAN H, BEHNAMFAR F, BEHFARNIA K. The new proposed details for moment resisting connections of steel beam to continuous concrete column [J]. Advances in Structural Engineering, 2016, 19(1): 156-169.
- [11] 舒兴平, 刘阳, 张再华, 等. RCS 混合干法框架梁柱节点试验研究[J]. 建筑结构, 2021, 51(18): 24-31, 124.
- SHU X P, LIU Y, ZHANG Z H, et al. Experimental study on beam-column joints of RCS dry-mixed frame [J]. Building Structure, 2021, 51(18): 24-31, 124. (in Chinese)
- [12] DU J, MENG W N, KHAYAT K H, et al. New development of ultra-high-performance concrete (UHPC) [J]. Composites Part B: Engineering, 2021, 224: 109220.
- [13] 李新星, 周泉, 李水生. 超高性能混凝土与钢筋的粘结-滑移本构关系试验研究[J]. 建筑结构, 2025, 55(6): 53-60.
- LI X X, ZHOU Q, LI S S. Experimental study on the bond-slip constitutive relationship between ultra-high performance concrete and steel bar [J]. Building Structure, 2025, 55(6): 53-60. (in Chinese)
- [14] XU Z K, CHENG J, YUAN H H, et al. Mechanical behavior of eccentrically loaded UHPC-encased CFST medium-long columns [J]. Engineering Structures, 2024, 315: 118403.
- [15] ZHOU C, WANG J Q, SHAO X D, et al. The feasibility of using ultra-high performance concrete (UHPC) to strengthen RC beams in torsion [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 24: 9961-9983.
- [16] 王洋辰, 王久祎, 王艳芝, 等. 基于 UHPC-NC 界面粘结性能多尺度表征与模拟的断裂机制研究[J]. 力学季刊, 2025, 46(3): 614-630.
- WANG Y C, WANG J Y, WANG Y Z, et al. Fracture mechanism evaluation of UHPC-NC interface based on multiscale interface bond characterization and numerical simulation [J]. Chinese Quarterly of Mechanics, 2025, 46(3): 614-630. (in Chinese)
- [17] 组合结构设计规范: JGJ 138—2016 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
- Code for design of composite structures: JGJ 138—2016 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2016. (in Chinese)
- [18] 超高性能混凝土基本性能与试验方法: T/CBMF 37—2018/T/CCPA 7—2018 [S]. 北京: 中国建材工业出版社, 2018.
- Fundamental characteristics and test methods of ultra-high performance concrete: T/CBMF 37—2018/T/CCPA 7—2018 [S]. Beijing: China Building Materials Press, 2018. (in Chinese)
- [19] 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)
- [20] 金属材料 拉伸试验 第1部分: 室温试验方法: GB/T 228.1—2021 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
- Metallic materials—Tensile testing: Part 1: Method of test at room temperature: GB/T 228.1—2021 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2021. (in Chinese)
- [21] Seismic provisions for structural steel buildings: ANSI/AISC 341-16 [S]. Chicago: American Institute of Steel Construction, 2016.
- [22] WU C L, LI H, SUN R Z, et al. Experimental study and theoretical evaluation of an innovative prefabricated RCS interlocking tenon connection [J]. Construction and Building Materials, 2025, 495: 143606.
- [23] FENG S Y, TAO Y C, YUAN L L, et al. Seismic performance of new detailing RCS connection with different axial compression ratio and FBP thickness [J]. Structures, 2024, 68: 107207.
- [24] Eurocode 3. Design of steel structures - Part 1-8: Design of joints: EN 1993-1-8: 2005 [S]. Brussels: European Committee for Standardization, 2005.