

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2021.131



开放科学(资源服务)标识码OSID:



不同连接形式的装配式混凝土梁柱节点 受力性能试验研究

张健新^{a,b}, 李晨晨^a, 戎贤^{a,b}, 张标^a

(河北工业大学 a. 土木与交通学院; b. 河北省土木工程技术研究中心, 天津 300401)

摘要:为研究不同连接形式的装配式混凝土梁柱节点受力性能,对1个现浇混凝土节点和2个装配式混凝土梁柱节点试件进行循环往复加载试验,分析节点的破坏特征、梁端弯矩-转角、节点核心区剪力-梁端转角、刚度退化、钢板的应变等。结果表明:方钢管连接的装配式混凝土节点呈梁端弯曲破坏,设置端板和水平连接板的装配式节点和现浇节点呈节点核心区剪切破坏。装配式节点的梁端弯矩和节点剪力显著提高,梁端转角显著增加,节点核心区剪切变形减小,刚度退化变缓,受力性能得到明显改善。在节点核心区设置方钢管和十字隔板作为钢骨架的节点受力性能最佳,远优于现浇节点。在节点核心区加入钢连接件,预制梁端设置预埋工字钢,现场采用焊接或者栓接装配,后浇连接区混凝土,这种连接形式能够有效传力,提升装配式节点的受力性能。

关键词:装配式混凝土结构;梁柱节点;受力性能;往复荷载试验

中图分类号:TU374 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2023)02-0123-08

Experimental study on the mechanical performance of prefabricated concrete beam-column joints with different connection forms

ZHANG Jianxin^{a,b}, LI Chenchen^a, RONG Xian^{a,b}, ZHANG Biao^a

(a. School of Civil and Transportation Engineering; b. Civil Engineering Technology Research Center of Hebei Province, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, P. R. China)

Abstract: To study the mechanical performance of prefabricated concrete beam-column joints with different connection forms, the cyclic loading test for one monolithic concrete joint and two prefabricated concrete beam-column joints were conducted to evaluate the damage characteristics, beam end's moment-rotation, joint core shear force-beam end's rotation, stiffness degradation and strain of steel plates. The results show that the prefabricated concrete joint with square steel tube experienced flexural damage, and the prefabricated joint with end plates and horizontal connection plates and monolithic joint presented shear damage at the joint core. The bending moment and shear force of prefabricated joints significantly increased, while shear deformation in the core area decreased, stiffness degradation constrained, and the rotation in the beam end significantly enhanced,

收稿日期:2021-03-01

基金项目:河北省自然科学基金(E2021202012、E2018202290、E2020202134);河北省高层次人才资助(B2017003003)

作者简介:张健新(1986-),女,博士,主要从事结构抗震研究,E-mail: zhangjianxin505@126.com。

Received:2021-03-01

Foundation items: Natural Science Foundation of Hebei Province (No. E2021202012, E2018202290, E2020202134); Financial Support from High-Level Talents Project of Hebei Province (No. B2017003003)

Author brief: ZHANG Jianxin (1986-), PhD, main research interest: structure seismic, E-mail: zhangjianxin505@126.com.

thus the mechanical performance significantly improved. The joint with square steel tube and orthogonal steel plate had the best mechanical performance, which was much better than that of the monolithic joint. The connection forms in which steel connectors were added to the joint core region, H-steel was set in the beam end, welded or bolted connection were used on site, and post-casting concrete was poured in the connection area could effectively transfer force and improve the mechanical performance.

Keywords: prefabricated concrete structure; beam-column joints; mechanical performance; cyclic loading test

装配式混凝土结构具有建筑质量高、装配速度快及节能环保等优势。但在高地震区,装配式混凝土结构在地震中损伤较大,究其原因,主要是梁柱连接节点的失效^[1-6]。为进一步推动装配式混凝土框架结构的应用,研发受力性能优越的连接形式很有必要。

学者们对装配式混凝土梁柱节点进行了大量研究。Wang等^[7]提出了一种新型预制预应力梁柱连接,梁坐落在柱子两侧角钢上,从而保证剪力的传递。在梁中及节点区放置空心钢管,预应力钢绞线和低碳钢筋穿过其中。试验结果表明,在控制楼层位移、易修复性和控制梁柱破坏等方面,这种新型预制预应力梁柱连接性能较好。Guan等^[8]利用U形钢筋在连接区域进行梁纵筋的搭接和锚固,利用灌浆套筒进行柱纵筋的连接。通过循环加载发现,所设计的连接形式符合强节点弱构件要求。对于梁柱纵筋的连接,Yan等^[9]使用灌浆套筒来实现。通过循环加载发现,预制框架梁柱连接的受力性能与现浇节点等效。Zhang等^[10]采用带端头的钢筋在节点区域进行锚固,以保证连接的性能,在连接区域使用高性能混凝土进行浇筑。循环加载试验表明连接的受力性能优异。通过合理的设计,预制梁柱连接可以实现与现浇连接等效甚至更优的受力性能。然而,预应力连接需要在钢绞线中施加预应力并且存在预应力的损失^[11]。通过钢筋搭接、锚固和灌浆套筒连接技术进行纵筋连接和销钉连接时连接区域存在大量钢筋,可能造成钢筋的相互妨碍,从而造成施工不便^[12]。为此,将钢结构连接技术应用到混凝土结构中可以作为解决上述问题的方法^[13]。并且,大量的钢连接装配式混凝土框架节点已经被开发出来,Liu等^[14]设计了一种插入式混凝土框架连接,但由于插接处安装间隙导致插接处整体性不好,连接的初始刚度较现浇连接差。Vidjeapriya等^[15]提出使用带加劲肋角钢和螺栓进行装配式混凝土梁柱连接,施工工艺较简单。然而,循环加载试验表明,该连接的极限承载力较现浇连接差。

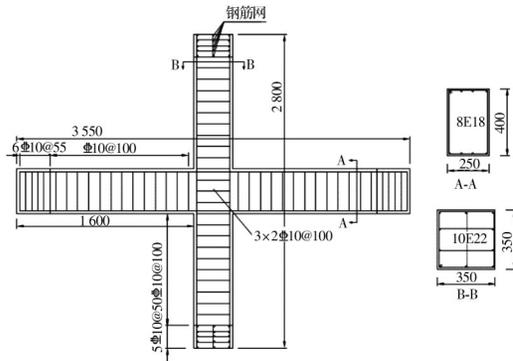
为了解决装配式混凝土框架节点整体性差而影响梁柱受力性能的问题,笔者提出两种新型钢连

接装配式混凝土框架梁柱节点的连接形式,在节点核心区使用钢骨架,在梁端预埋H型钢,连接处采用钢板进行焊接或者栓接。通过往复加载试验,对1个现浇混凝土节点和2种不同连接形式的装配式混凝土梁柱节点的受力性能进行研究。

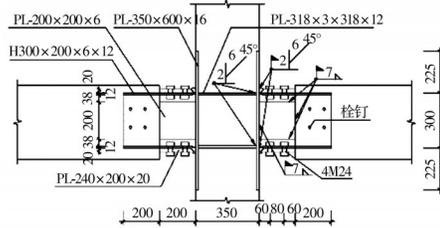
1 试验概况

为确定节点的强度和刚度等,基于“强构件弱节点”设计梁柱节点,设计了1个对照现浇节点试件RC1和2个装配式节点试件PC1和PC2。装配式节点包括预制柱、预制梁及连接部位,施工过程为:预制梁和预制柱均在工厂加工完成,现场装配采用基于钢结构节点焊接和栓接的连接形式。一旦装配完成,便可进行后续施工,不需要立即浇筑混凝土,能够实现快速装配。装配式节点试件PC1和PC2在节点核心区 and 梁上连接处采用不同的连接细部,从而达到弯矩和剪力有效传递的目的,图1(a)给出了所有梁柱节点试件的尺寸和配筋,图1(b)给出了装配式混凝土框架节点试件PC1的钢骨架。节点核心区域的钢骨架由两块水平板和两块竖向端板焊接而成,水平板四边设置供柱纵筋穿过的钢筋孔,中间设置便于混凝土浇筑的大圆孔,梁纵筋焊接在预埋的H型钢翼缘上。现场装配时,在柱壁端板上焊接水平连接板、竖向连接板与预制梁中的工字钢连接,焊缝形式为开坡口的全熔透对接焊缝。装配完成后,对连接区域浇筑混凝土。图1(c)给出了装配式混凝土框架节点试件PC2的钢骨架,十字形钢板嵌于方钢管内形成节点核心区域钢骨架。试件PC2的预制梁与试件PC1的做法相同。现场装配时,翼缘和腹板通过连接板栓接,最后对连接区域浇筑混凝土。

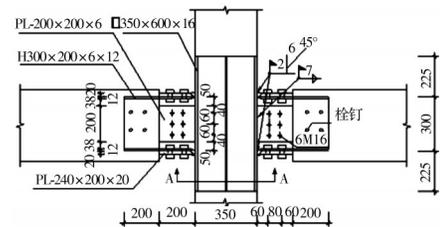
试验中所有试件及后浇区域均采用C45混凝土。预制梁和预制柱的混凝土立方体抗压强度为47.28 MPa,混凝土轴心抗压强度为31.62 MPa,弹性模量为33.96 GPa;连接区域混凝土立方体抗压强度为46.60 MPa,混凝土轴心抗压强度为31.17 MPa,弹性模量为34.08 GPa。型钢及钢板采用



(a) 节点RC1和PCJ1、PCJ2尺寸及配筋



(b) 节点PC1



(c) 节点PC2

图 1 节点详图(单位:mm)

Fig. 1 Detail of joint(Unit: mm)

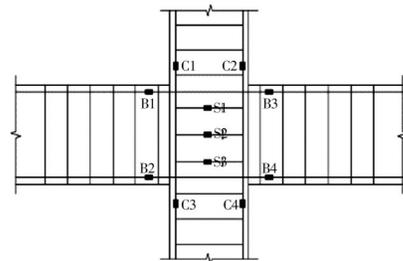
Q235钢,螺栓连接采用10.9级高强螺栓。试验中所使用钢材的力学性能如表1所示。构件制作时,在梁纵筋、柱纵筋、节点核心区箍筋、钢板及H型钢布置应变片,以测量构件应变,如图2所示。在节点核心区和梁端布置位移计,分别测量节点核心区变形和梁端的转动情况,位移计布置情况如图3所示。

图3所示为试验加载装置,采用梁端加载。柱底与底板铰接,柱顶反力钢架之间放置液压装置,用以施加柱顶竖向荷载。在柱顶放置力传感器,用于测量柱顶施加的荷载。柱底、柱顶通过水平钢锚杆固定在反力墙上,以限制柱端水平向的位移,在试验中忽略锚杆对柱脚转动的约束,柱脚能够转动。梁端通过作动器施加方向相反的低周往复荷

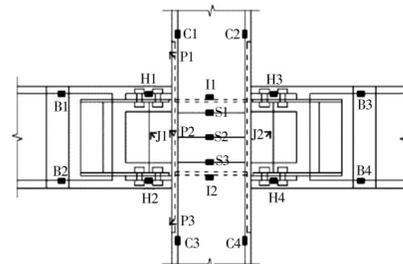
表 1 钢材的力学性能

Table 1 Mechanical property of steel

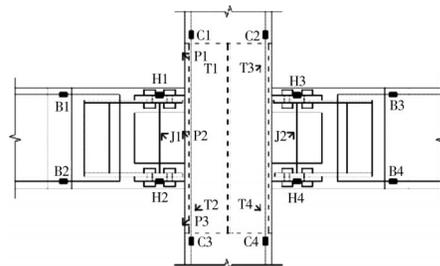
钢筋及钢板等级	直径或厚度/ mm	屈服强度/ MPa	极限强度/ MPa
HRB400	10	502.55	636.49
HRB600	18	700.79	875.90
HRB600	22	648.49	821.79
Q235	6	298.33	445.33
Q235	10	312.00	450.00
Q235	12	264.67	400.00
Q235	20	279.33	454.67



(a) 所有构件钢筋应变片



(b) PC1



(c) PC2

图 2 应变片布置图

Fig. 2 Strain gauge arrangement

载,采用拟静力加载,加载过程可以分为两个阶段:试件屈服前为荷载控制阶段,试件屈服后为位移控制阶段。首先在柱顶施加460 kN轴向力,荷载控制阶段的荷载幅值分别为 $0.4F_y$ 、 $0.8F_y$ 、 $1.0F_y$,其中,屈服荷载 F_y 为构件梁纵筋达到屈服应变时对应的荷载值,每个加载循环1次;试件屈服后为位移控制

阶段,梁端以屈服位移的整数倍进行加载,每级加载循环 3 次,直至试件加载值下降到峰值荷载的 80% 后,认为试件破坏。

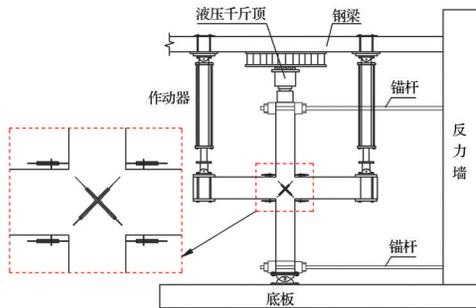


图 3 加载装置

Fig. 3 Loading device

2 受力性能分析

2.1 试验现象和破坏特征

各试件在失效时的破坏形式如图 4 所示。当加载至 50 kN 时,现浇混凝土节点试件 RC1 左右梁端均出现初始弯曲裂缝;当加载至 90 kN 时,节点核心区出现对角斜裂缝;随着加载的进行,节点核心区对角斜裂缝向边缘延伸,梁上弯曲裂缝横向发展;当荷载达到 120 kN 时,梁纵向钢筋开始屈服,随着位移的增加,节点核心区斜裂缝逐渐扩展,混凝土保护层出现轻微的剥落;最终试件 RC1 节点核心区混凝土因保护层脱落严重而破坏。装配式混凝土框架节点试件 PC1 的裂缝发展模式与试件 RC1 相似,节点核心区对角斜裂缝主要在两块水平连接板之间扩展。装配式混凝土框架节点试件 PC2 梁端裂缝发展情况与试件 RC1 和试件 PC1 相似,而由于方钢管的有效约束作用,节点核心区没有出现裂缝,最终梁端混凝土剥落严重,梁左端纵筋在焊缝边断裂,右侧破坏集中于连接区域,左侧和右侧破坏形态有差别,后续研究需结合补充试验及理论分析等深入讨论。

试件 RC1 和试件 PC1 发生节点核心区剪切破坏,在临近破坏时,试件 PC1 梁端形成塑性铰,装配



(a) RC1



(b) PC1

(c) PC2

图 4 试件破坏图

Fig. 4 Specimen failure

式混凝土框架节点试件 PC2 发生梁端弯曲破坏。与试件 RC1 相比,试件 PC1 混凝土在节点核心区和梁端破碎剥落现象更严重,且在节点核心区的剥落位置也更集中,这主要是因为试件 PC1 在节点核心区加入了水平连接板,水平连接板将节点核心区破坏限制在一定范围内。与试件 RC1、试件 PC1 相比,失效时试件 PC2 梁左端纵筋在焊缝边断裂,梁端混凝土破碎严重,但节点核心区未出现明显破坏,这主要是由于预埋方钢管能够有效约束节点核心区,提高节点的抗剪能力。梁纵筋焊接于 H 型钢的翼缘位置,此处因为刚度突变而造成应力较大,使得塑性铰外移,破坏集中在梁纵筋和 H 型钢焊接处。与试件 RC1 相比,试件 PC1 和试件 PC2 性能较好,试件 PC2 破坏最理想。可考虑在试件 PC1 的两水平连接板之间设置竖向腹板,以改善节点的破坏形态。

2.2 梁端弯矩-转角骨架曲线

图 5 所示为各试件在循环加载下的梁端弯矩-转角滞回曲线的包络线,即骨架曲线。表 2 给出了各试件在特征点的弯矩和转角。

与试件 RC1 相比,试件 PC1 正向屈服弯矩略

表 2 弯矩和转角

Table 2 Moment and rotation

试件	加载方向	屈服弯矩/(kN·m)	屈服转角/rad	极限弯矩/(kN·m)	极限转角/rad	破坏弯矩/(kN·m)	破坏转角/rad
RC1	正向	236.7	0.034	249.1	0.071	211.7	0.179
	负向	192.3	0.023	226.6	0.068	192.6	0.145
PC1	正向	231.5	0.035	267.5	0.084	227.3	0.175
	负向	224.9	0.028	247.4	0.085	210.3	0.170
PC2	正向	250.2	0.037	293.4	0.082	249.4	0.189
	负向	246.5	0.036	293.3	0.106	249.3	0.186

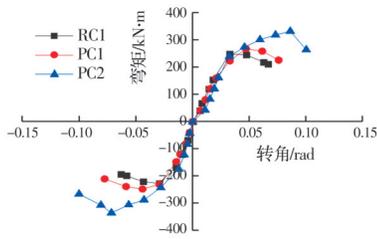


图 5 梁端弯矩-转角骨架曲线

Fig. 5 Moment-rotation skeleton curves in beam end

低,而其他特征点弯矩均较大,表明在节点核心区加入由水平连接板和端板构成的钢骨架可以有效改善节点的抗弯能力。与试件 RC1 和试件 PC1 相比,试件 PC2 在所有特征点弯矩均较大,说明在节点核心区使用方钢管和十字隔板对改善连接节点的抗弯能力更有效。除试件 PC1 的正向破坏转角略小于试件 RC1 外,其余特征点转角都大于试件 RC1,表明试件 PC1 中节点核心区钢骨架和梁端设置 H 型钢的连接形式可以改善节点的变形能力。对于试件 PC2,除了正向极限转角小于试件 PC1 外,其余特征点转角均大于试件 RC1 和试件 PC1。因此,在节点核心区加入方钢管和十字隔板对连接变形能力的改善更有效。

2.3 剪力-梁端转角滞回曲线

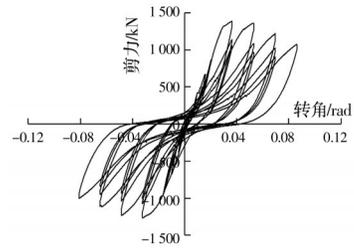
各试件的剪力-梁端转角滞回曲线如图 6 所示。

在加载初期,各试件处于弹性阶段,滞回曲线几乎为一条直线,随着加载的进行,试件出现塑性变形,滞回环逐渐变饱满。与现浇混凝土框架节点试件 RC1 相比,装配式混凝土框架节点试件 PC1、试件 PC2 的滞回环更饱满,其累积滞回面积分别是现浇节点的 1.7 倍和 3.4 倍,具有良好的耗能能力。其中,试件 PC2 的滞回环最饱满,具有最优的耗能能力。此外,与试件 RC1 相比,试件 PC1、试件 PC2 的极限剪力和破坏剪力更大,具有更强的抗剪能力。试件 PC1、试件 PC2 的梁端转角比现浇节点试件 RC1 大,具有较强的梁端变形能力。试件 PC2 的极限剪力和破坏变形最大,具有最优的抗剪能力和梁端变形能力。因此,在装配式节点试件节点核心区加入钢骨架,梁端设置预埋工字钢,提高了连接的剪力-梁端转角滞回性能和抗剪能力。在节点核心区加入方钢管和十字隔板的连接对节点抗剪能力的提升效果最好。

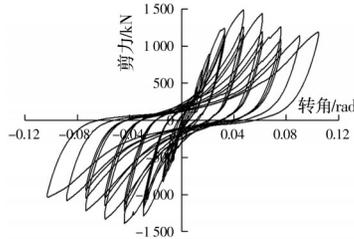
2.4 节点核心区剪切变形

节点剪切变形主要通过图 3 中节点核心区布置的位移计测得,典型的节点区剪切变形如图 7(a) 所示。节点区的剪应变计算式为

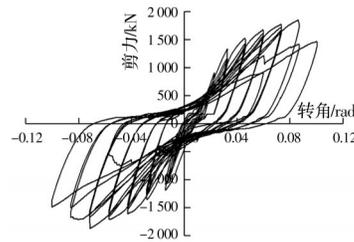
$$\gamma = \frac{\sqrt{|AB|^2 + |AD|^2}}{2 \cdot |AB| \cdot |AD|} (\Delta|AC| + \Delta|BD|) \quad (1)$$



(a) 试件 RC1



(b) 试件 PC1



(c) 试件 PC2

图 6 剪力-梁端转角滞回曲线

Fig. 6 Shear-beam end rotation hysteresis curves

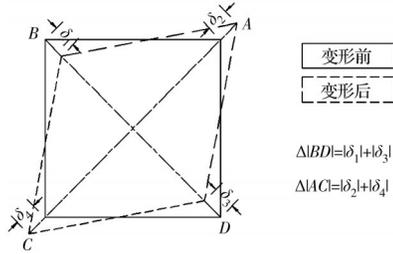
式中: γ 为节点区剪应变; $|AB|$ 为节点区竖向距离; $|AD|$ 为节点区水平距离; $\Delta|AC|$ 为节点区 AC 方向的长度变化; $\Delta|BD|$ 为节点区 BD 方向的长度变化。

各试件节点核心区的剪力-剪切变形关系如图 7 所示,可以看出,与试件 RC1 相比,试件 PC1 最大剪切变形变小,这主要是由于试件 PC1 在节点核心区加入了由水平连接板和端板构成的钢骨架,提高了节点核心区的抗剪刚度,节点破坏程度得到改善,剪切变形减小。与试件 RC1 和试件 PC1 相比,试件 PC2 的剪切变形大幅度减小,这主要是因为试件 PC2 的破坏集中于梁端,节点核心区保持完好。由此可见,在节点核心区加入方钢管和十字隔板可以更有效地提高核心区抗剪刚度,限制节点核心区的剪切变形。

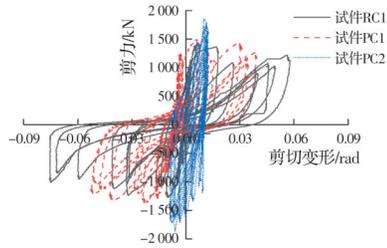
2.5 刚度退化

各试件的刚度退化曲线如图 8 所示,割线刚度取正向加载和反向加载时每个循环的极限荷载与对应位移的比值。

由图 8 可知,在初始阶段,由于混凝土开裂,节点刚度迅速退化,试件屈服后,所有试件的刚度退化逐渐变缓。与试件 RC1 相比,试件 PC1 和试件 PC2 的



(a) 节点剪切变形



(b) 剪力-剪切变形曲线

图7 节点核心区剪切变形

Fig. 7 Shear deformation in the joint

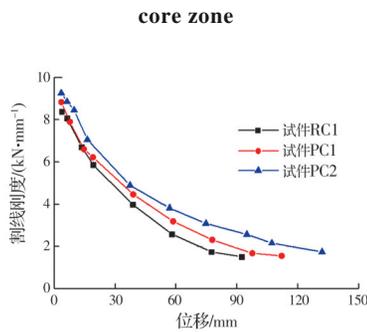


图8 刚度退化曲线

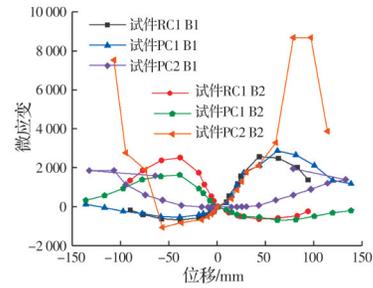
Fig. 8 Stiffness degradation curves

初始刚度较大,其中试件PC2最大。在整个加载过程中,装配式混凝土框架节点试件的割线刚度均大于现浇节点试件,尤其是试件PC2割线刚度最大,表明装配式节点试件刚度退化更平缓,试件PC2刚度退化最平缓。由此可见,在节点核心区加入钢骨架可以减缓节点的刚度退化,尤其在节点核心区加入方钢管和十字隔板,其刚度退化最为缓慢。

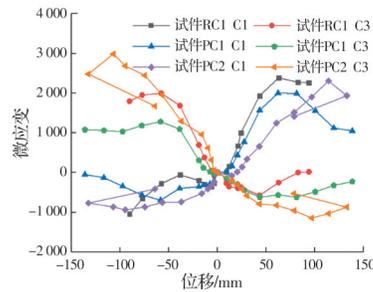
2.6 钢筋应变

各试件的梁柱纵筋和节点核心区箍筋应变情况如图9所示,应变片布置情况如图2(a)所示。

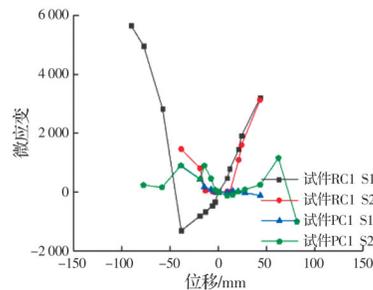
图9(a)所示为梁纵筋应变曲线,在整个加载中,试件RC1和试件PC1梁纵筋微应变始终小于屈服微应变3504,承载性能未得到充分发挥,这主要是由于两试件发生了节点核心区剪切破坏,大变形主要集中在节点核心区。对于试件PC2,在整个加载过程中,右梁上部纵筋始终未屈服,而左侧下部纵筋在正向加载位移为60 mm左右和负向加载位



(a) 梁纵筋



(b) 柱纵筋



(c) 节点核心区箍筋

图9 钢筋应变曲线

Fig. 9 Strain curve of reinforcement in various parts of specimen

移为90 mm左右达到屈服,屈服后应变迅速增长,最终达到破坏。试件PC2左梁纵筋微应变与其梁端发生弯曲破坏的情况相符。图9(b)所示为节点核心区柱纵向钢筋应变曲线,在整个加载过程中,3个试件的柱纵筋微应变始终小于屈服微应变3242。试件PC2的微应变较其他两个试件大,这主要是由于试件PC2的弯矩较其他试件大。试件PC2柱纵筋应变情况与节点核心区未发生破坏时情况相符,完全符合“强柱弱梁”的设计原则。试件RC1和试件PC1箍筋应变曲线如图9(c)所示。试件RC1节点核心区上部箍筋在正向加载30 mm左右和负向加载70 mm左右达到屈服微应变2513,中间箍筋在正向加载和负向加载30 mm左右达到屈服微应变;试件PC1节点核心区上部箍筋在加载40 mm左右达到屈服微应变,中间箍筋在正向加载90 mm左右达到屈服微应变。箍筋微应变在屈服后迅速增

加,这主要是由于节点刚度下降所致。此外,试件 PC1 微应变进入屈服的位移较 RC1 更大,这主要是由于试件 PC1 节点核心区加入端板和水平连接板,提升了节点的抗剪能力。

2.7 钢板应变

各试件的钢板和 H 型钢、钢骨架应变情况如图 10~图 12 所示,其应变片布置情况如图 2(b)、(c) 所示。

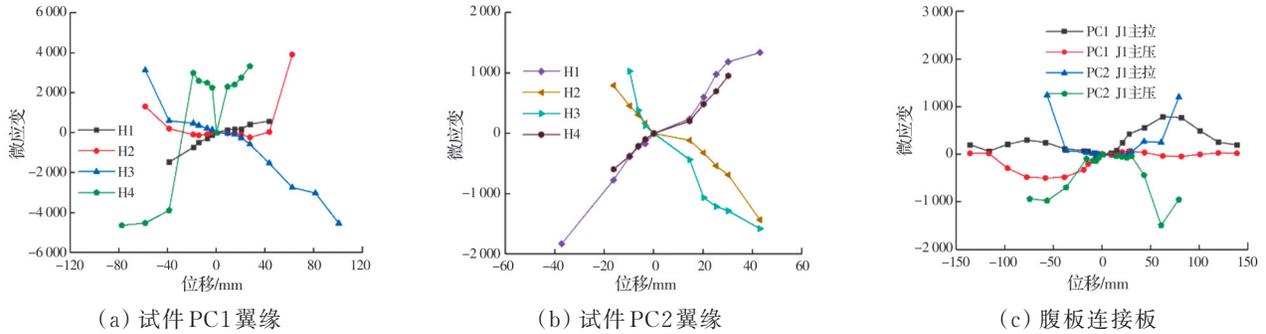


图 10 梁端连接板应变曲线

Fig. 10 Strain curves of connecting plates in beam end

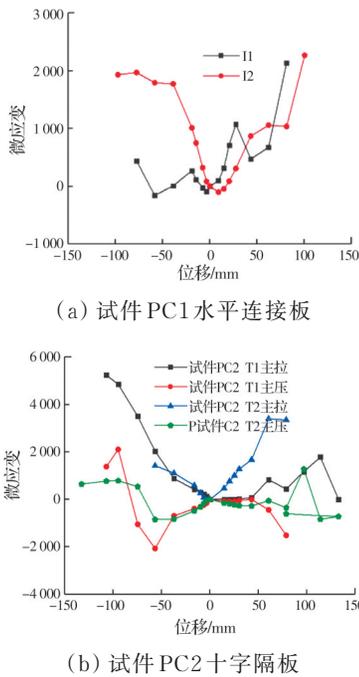


图 11 节点核心区连接板应变曲线

Fig. 11 Strain curves of connecting plates in joint core

图 10 所示为试件 PC1 和试件 PC2 梁端连接板应变曲线。试件 PC1 和试件 PC2 翼缘连接板微应变均达到屈服,表明翼缘连接板的应力可以达到较高水平,梁纵筋与 H 钢焊接传力可靠。此外,试件 PC2 翼缘连接板比试件 PC1 更早达到屈服微应变 1 350。图 10(c) 所示为试件 PC1 和试件 PC2 腹板连接板应变曲线。在整个加载过程中,试件 PC1 腹板连接板微应变始终未达到屈服微应变,但试件 PC2 腹板应变在达到屈服微应变后应变急剧增加。出现上述差异的主要原因是试件 PC1 发生节点核

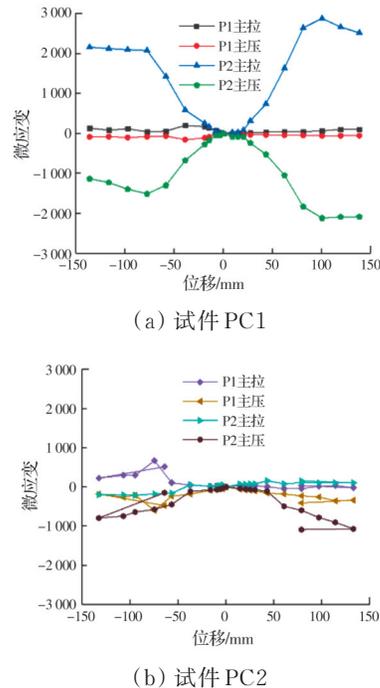


图 12 柱侧钢板应变曲线

Fig. 12 Strain curves in steel plates at column side

核心区剪切失效,变形主要集中在节点核心区,梁端混凝土破坏程度轻,混凝土承担部分剪力,使得腹板连接板微应变较小,而试件 PC2 发生梁端弯曲失效,变形主要集中在梁端,梁端混凝土严重破坏后,梁端剪力主要由腹板连接板传递。

图 11 所示为试件 PC1 和试件 PC2 节点核心区连接板应变曲线。试件 PC1 节点核心区上下部水平连接板和试件 PC2 节点核心区十字隔板均达到屈服微应变,达到屈服微应变后,应变迅速增加。

这表明试件PC2、试件PC1节点核心区的应力较高,梁上水平连接板和腹板连接板可以将荷载有效传递。柱侧钢板应变曲线如图12所示。试件PC1柱侧钢板上部主拉和主压微应变数值始终未达到屈服微应变,而钢板中间的主拉和主压微应变达到屈服微应变,表明柱侧钢板对荷载承担起到一定作用,但试件PC2柱侧钢板上部和中间微应变均未达到屈服微应变,表明方钢管对节点核心区混凝土起到较好约束作用。

3 结论

1)由于节点及梁端连接形式的不同,现浇节点和装配式节点试件PC1发生节点核心区剪切破坏,且试件PC1梁端形成塑性铰,混凝土脱落集中在水平连接板中间;而采用方钢管内置十字隔板连接的节点试件PC2发生梁端弯曲破坏,破坏发生在梁纵筋与H型钢焊接的交界面处。

2)节点核心区设置钢骨架及梁端设置预埋H型钢的连接形式可以改善连接节点的抗弯能力、抗剪能力和变形能力。方钢管内置十字隔板作为节点核心区钢骨架的连接形式对提升节点的受力性能最有效。

3)在装配式混凝土框架节点试件梁端预埋H型钢,可以实现梁端位置混凝土段与钢混连接段剪力和弯矩的有效传递,在节点核心区加入钢骨,钢骨协同混凝土进行传力,当方钢管内置十字隔板时,对混凝土的约束更有效,节点的核心区保持完整,未发生破坏。

参考文献

[1] METELLI G, MESSALI F, BESCHI C, et al. A model for beam-column corner joints of existing RC frame subjected to cyclic loading [J]. *Engineering Structures*, 2015, 89: 79-92.

[2] RONG X, YANG H W, ZHANG J X. Experimental study of precast beam-to-column joints with steel connectors under cyclic loading [J]. *Advances in Structural Engineering*, 2020, 23(13): 2822-2834.

[3] XU L H, ZHANG G, XIAO S J, et al. Development and experimental verification of damage controllable energy dissipation beam to column connection [J]. *Engineering Structures*, 2019, 199: 109660.

[4] DING T, XIAO J Z, ZHANG Q T, et al. Experimental and numerical studies on design for deconstruction concrete connections: An overview [J]. *Advances in Structural Engineering*, 2018, 21(14): 2198-2214.

[5] 林宗凡, E. I. Sagan, M. E. Kreger. 装配式抗震框

架延性节点的研究[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 1998, 26(2): 134-138.

- LIN Z F, SAGAN E I, KREGER M E. Study on the ductile connections for precast aseismic frame [J]. *Journal of Tongji University*, 1998, 26(2): 134-138. (in Chinese)
- [6] 马少春, 方宏远, 鲍鹏, 等. 水平钢筋连接对装配式复合剪力墙节点抗震性能的影响[J]. *土木与环境工程学报(中英文)*, 2021, 43(3): 44-50.
- MA S C, FANG H Y, BAO P, et al. Influence of horizontal steel bar connection on seismic performance of assembled composite shear wall joints [J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2021, 43(3): 44-50.
- [7] WANG H S, MARINO E M, PAN P, et al. Experimental study of a novel precast prestressed reinforced concrete beam-to-column joint [J]. *Engineering Structures*, 2018, 156: 68-81.
- [8] GUAN D Z, JIANG C, GUO Z X, et al. Development and seismic behavior of precast concrete beam-to-column connections [J]. *Journal of Earthquake Engineering*, 2018, 22(2): 234-256.
- [9] YAN Q S, CHEN T Y, XIE Z Y. Seismic experimental study on a precast concrete beam-column connection with grout sleeves [J]. *Engineering Structures*, 2018, 155: 330-344.
- [10] ZHANG Z Y, DING R, NIE X, et al. Seismic performance of a novel interior precast concrete beam-column joint using ultra-high performance concrete [J]. *Engineering Structures*, 2020, 222: 111145.
- [11] ZHANG J X, ZHANG B, RONG X, et al. Experimental investigation on seismic behaviour of hybrid precast beam-column joints with different connection configurations [J]. *Journal of Earthquake Engineering*, 2020: 1-25.
- [12] WU C L, LIU J M, TAN W Y, et al. Seismic behavior of composite interior joints of prefabricated H-shaped steel reinforced concrete column-steel beam [J]. *Structures*, 2020, 23: 558-572.
- [13] ZHANG J X, DING C L, RONG X, et al. Experimental seismic study of precast hybrid SFC/RC beam-column connections with different connection details [J]. *Engineering Structures*, 2020, 208: 110295.
- [14] LIU Y B, GUO Z, DING J H, et al. Experimental study on seismic behaviour of plug-in assembly concrete beam-column connections [J]. *Engineering Structures*, 2020, 221: 111049.
- [15] VIDJEAPRIYA R, JAYA K P. Experimental study on two simple mechanical precast beam-column connections under reverse cyclic loading [J]. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 2013, 27(4): 402-414.

(编辑 王秀玲)