

doi:10.11835/j.issn.2096-6717.2019.154

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



装配式高强钢筋钢纤维混凝土框架 节点抗震性能试验研究

张健新, 丁传林, 戎贤, 杨洪渭

(河北工业大学 土木与交通学院, 天津 300401)

摘要:为研究装配式高强钢筋钢纤维混凝土框架节点的抗震性能,对 2 个预制装配式混凝土节点试件和 1 个现浇普通混凝土节点试件进行低周往复荷载试验,对比分析装配式混凝土节点试件的破坏特征、滞回特性和耗能能力等抗震性能指标。结果表明:节点核心区加入工字钢的装配式高强钢筋钢纤维混凝土梁柱中节点试件发生梁端弯曲破坏,满足“强柱弱梁”的抗震设计要求;普通现浇节点和采用钢板焊接端板连接的节点均发生节点核心区剪切破坏,而装配式混凝土节点核心区破坏程度较轻;在节点核心区及后浇区加入钢纤维能减少裂缝宽度,延缓裂缝传播,减轻核心区混凝土剥落程度,改善节点破坏形态;预制装配式混凝土梁柱节点试件的极限荷载、滞回性能和耗能能力均得到提高,刚度退化得到减缓,从而改善预制混凝土框架节点的抗震性能。

关键词:装配式框架节点;高强钢筋;钢纤维混凝土;抗震性能

中图分类号: TU375.4 文献标志码: A 文章编号: 2096-6717(2020)02-0157-08

Experimental research on seismic behavior of the prefabricated frame joints with high strength reinforcement and steel fiber concrete

Zhang Jianxin, Ding Chuanlin, Rong Xian, Yang Hongwei

(School of Civil and Transportation Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, P. R. China)

Abstract: In order to study the seismic performance of the prefabricated frame joints with high strength reinforcement and steel fiber concrete, two precast concrete joints and one cast-in-situ concrete joint were conducted under low cyclic reversed load test, the failure characteristic, hysteretic behavior and energy dissipation were analyzed. The results show that the prefabricated beam-column interior joints with high strength reinforcement and steel fiber concrete, which the H-steel was adopted in joint core area, present bending failure of beam end, which meets the seismic design principle of “strong column and weak beam”. The cast-in-situ concrete joint and the joint connected by the steel plate welded end plates occur shear failure in the joint core zone, while the failure mode of prefabricated joint significantly improves. The use of

收稿日期: 2019-06-02

基金项目: 河北省自然科学基金(E2018202290、E2017202278); 河北省高层次人才资助项目(B2017003003); 天津市建委科技项目(HE1863)

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: 2019-06-02

Foundation items: Natural Science Foundation of Hebei Province (No. E2018202290, E2017202278); High-Level Talents Project of Hebei Province (No. B2017003003); Science and Technology Project of Tianjin Construction Commission (No. HE1863)

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

steel fiber in core area and assembly segment can reduce the crack width and propagation, lighten concrete protection spalling and improve the damage pattern of joints. The ultimate load, hysteretic performance and energy dissipation capacity in the prefabricated beam-column joints are improved, the stiffness degradation is retarded and the seismic performance of prefabricated joints are improved.

Keywords: prefabricated frame joints; high strength reinforcement; steel fiber concrete; seismic behavior

预制装配式混凝土构件是指在工厂中制造并在建筑工地装配成整体构件的混凝土产品。与传统的现浇混凝土结构相比,预制混凝土结构具有生产效率高、构件加工精度高、节能环保、施工进度快、经济效益高等优点^[1-2]。但是,预制装配式混凝土刚度、整体性以及抗震性能差,大量研究表明,梁柱节点是影响预制结构抗震性能的关键因素^[3-5]。为此,学者们对不同节点连接类型的预制装配式混凝土结构进行了研究。吴从晓等^[6]对现浇节点与预制装配式混凝土框架节点进行了试验研究。张锡治^[7]通过试验研究了钢-混凝土预制混合梁试件的抗震性能,并采用 ABAQUS 进行有限元模拟。胡轩等^[8]提出了一种钢管混凝土柱-双钢梁预制装配式框架体系,对平面和空间节点进行拟静力试验。Kim 等^[9]完成了两个离心柱钢梁预制节点的静力加载试验,结果表明,离心柱与钢梁通过焊接连接比通过螺栓连接表现出更好的抗震性能。Yang 等^[10]研发了一种具有简单延性连接的 H 型钢预制混凝土组合系统,通过预应力筋把嵌入在预制柱中的预制梁与钢筋混凝土梁相连,然后在连接区后浇混凝土。Bahrami 等^[11]对 2 个新型抗弯预制节点进行了试验研究,对比分析节点的侧向刚度、延性和耗能能力,并采用有限元模型进行验证。Wang 等^[12]提出了一种新型预应力预制钢筋混凝土梁柱节点:预制梁中加入钢绞线提高构件的自修复能力,节点处可更换的钢筋提高了节点耗能能力。由此可见,合理设计的梁柱节点在地震荷载作用下具有良好的延性和耗能能力。

钢纤维混凝土能克服普通混凝土抗拉强度低、延展性能弱等缺点,在框架节点核心区加入钢纤维可以有效降低节点配筋率,提高节点的抗震性能^[13-16]。为研究节点的抗震性能,提出两种新型预制装配式混凝土节点连接形式,在节点核心区加入钢连接件和钢纤维,通过进行低周往复荷载试验,研究其抗震性能。

1 试验概况

试验设计了 3 根混凝土中节点试件,按照“强构件弱节点”进行设计,节点核心区未充分配置箍筋,其中,试件 ZJ1 为现浇的普通高强钢筋混凝土试件,试件 ZJ2、ZJ3 为装配式混凝土节点试件,包括预制梁、预制柱和梁柱连接区 3 部分。为实现装配式节点的施工方便,采用在试件 ZJ2、ZJ3 的节点区加入型钢或者钢板的方式进行连接,以达到有效传力。试件配筋及节点详图如图 1 所示,柱和梁的截面尺寸分别为 350 mm×350 mm 和 250 mm×400 mm,柱纵筋采用 10 根 HRB600 钢筋,梁纵筋采用 8 根 HRB600 钢筋,梁柱箍筋均采用 HRB400 钢筋,间距为 100 mm。试件 ZJ2 预制柱中部预埋工字钢,工字钢尺寸为 354 mm×200 mm×6 mm×12 mm,预制梁中伸出的钢筋直接焊接在预制柱的工字钢上。试件 ZJ3 预制柱端设置尺寸 250 mm×400 mm×20 mm 的端板,预制柱中部预埋一块尺寸为 710 mm×330 mm×10 mm 的钢板,同时,钢板与端板焊接,并在预制柱中部上下均采用 4 根直径 18 mm 的钢筋与端板塞焊;预制梁中预埋尺寸为 354 mm×200 mm×6 mm×12 mm 的坡口工字钢,预制梁内工字钢的翼缘与预制柱端板现场施焊,腹板通过焊接于预制柱端板的连接板螺栓连接,连接板尺寸为 220 mm×165 mm×6 mm。同时,试件 ZJ2、ZJ3 节点核心区和后浇区浇筑钢纤维混凝土,体积百分含量为 1%。型钢采用 Q235 钢材,型钢连接采用 10.9 级高强螺栓。

试件采用的混凝土强度等级为 C45,轴心抗压强度为 31.17 MPa,弹性模量 33.96 GPa;采用的钢纤维混凝土强度等级为 C45,轴心抗压强度为 31.7 MPa,弹性模量 34.11 GPa。预制构件节点核心区和后浇区采用的钢纤维长度为 30 mm、直径 0.5 mm、抗拉强度为 1 100 MPa、密度为 7 850 kg/m³。

表 1 为钢筋及钢板的力学性能。

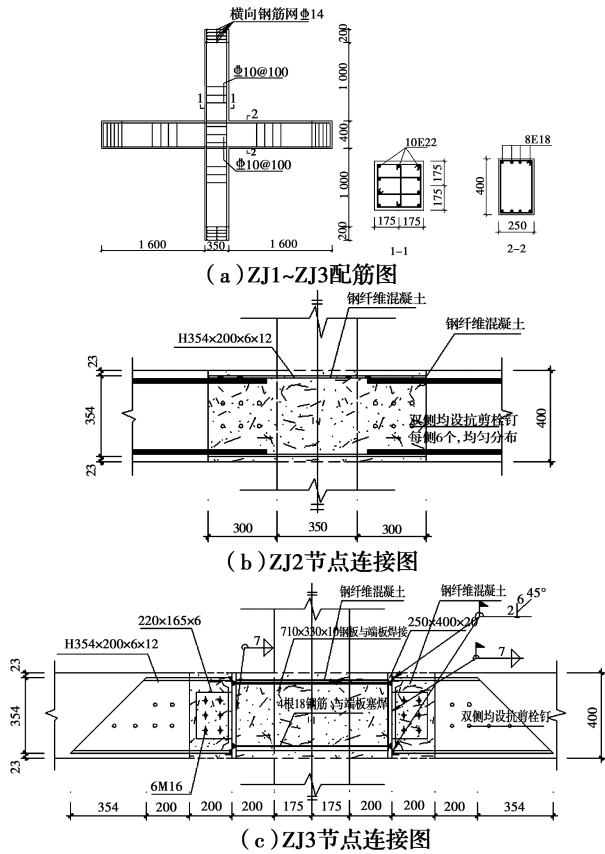


图 1 节点详图

Fig. 1 Detail of joint

表 1 钢筋及钢板的力学性能

Table 1 Mechanical property of reinforcement and steel

钢筋及钢板规格	屈服强度/MPa	极限强度/MPa
HRB400(10 mm)	502.55	636.49
600MPa(18 mm)	700.79	875.90
600MPa(22 mm)	648.49	821.79
Q235(6 mm)	298.33	445.33
Q235(10 mm)	312.00	450.00
Q235(12 mm)	264.67	400.00
Q235(20 mm)	279.33	454.67

试验加载装置及加载制度如图 2 所示。试验加载方案采用拟静力往复加载。将试验试件安装就位后,进行预加载,检查仪器运行。之后进行试验,首先,通过柱顶的竖向千斤顶施加恒定的轴压力;然后,通过梁端的液压作动器施加低周往复荷载。试验加载制度采用荷载-位移混合加载方式,即试件屈服前采用荷载控制,循环 1 次,屈服后改为位移控

制,循环 3 次,当荷载降至峰值荷载的 85% 时结束试验。试验采用 DH3816 系统采集数据,在梁柱纵筋、箍筋以及钢板粘贴应变片,以测量对应位置的应变,在梁端布置位移计以测量转角,图 3 为位移计布置图。

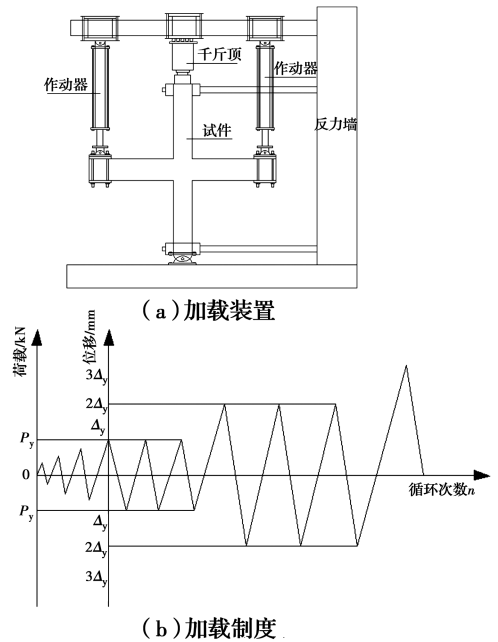


图 2 试验加载装置及加载制度

Fig. 2 Test setup and loading systems

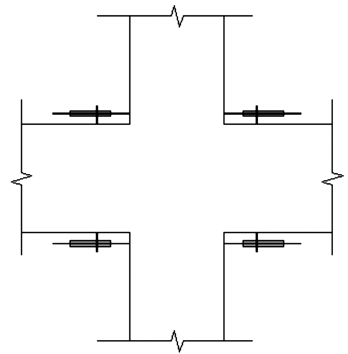


图 3 位移计布置图

Fig. 3 Displacement meter layout

2 破坏特征

图 4 为现浇普通混凝土梁柱中节点和装配式梁柱中节点的破坏图。

由图 4 可以看出:现浇混凝土中节点试件 ZJ1 和装配式混凝土中节点试件 ZJ3 最终发生节点核心区剪切破坏,而装配式混凝土中节点试件 ZJ2 为典型的梁端弯曲破坏。试件 ZJ2 中的工字钢贯穿节点核心区,节点核心区部位刚度较大,工字钢能够在节

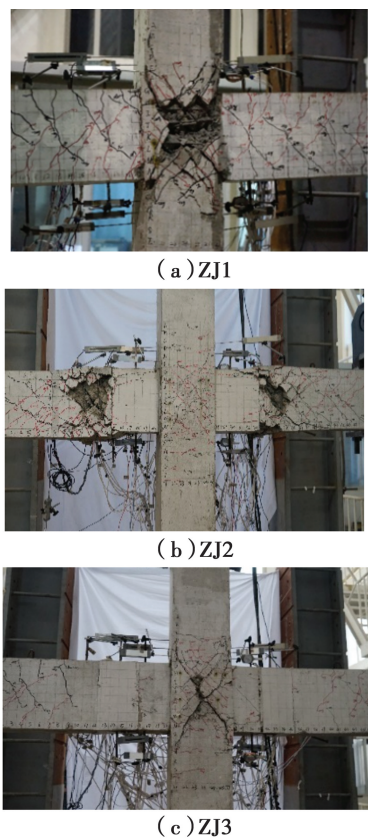


图4 破坏特征

Fig. 4 Failure characteristic

点核心区均匀地传力,因此,节点核心区部位保持较好的完整性。该构件的预制梁纵筋直接焊接在预制柱工字钢上,此处连接刚度发生突变,产生塑性铰并充分发展,通过采用工字钢这种新型装配式连接形式,实现塑性铰外移,保证了节点的完整性,最终发生了梁端弯曲破坏形态。

而试件 ZJ3 的节点核心区部位采用钢板、钢筋与端板相连,预制梁与预制柱连接处翼缘采用焊接,腹板通过增设连接板栓接,刚度比节点核心区大,同时,钢板能够在节点核心区部位均匀传力,核心区部位裂缝发展较为均匀,最后发生了核心区剪切破坏。

对比未加入钢纤维的现浇混凝土中节点试件 ZJ1,采用工字钢连接,同时,在节点核心区及后浇区加入钢纤维的中节点试件 ZJ2 核心区裂缝细而密,梁端连接区域裂缝很少,梁纵筋与工字钢焊接部位出现塑性铰,节点核心区没有明显的剪切破坏,实现“强柱弱梁”的原则;随着位移增加,塑性铰发展较为严重。与现浇混凝土中节点试件 ZJ1 相比,装配式混凝土中节点试件 ZJ3 虽然最终也发生节点核心区剪切破坏,但由于在核心区加入钢连接件和钢纤维,能够更好地传力,有效减少了裂缝的产生和发展,节

点的剪切变形得到很大改善,核心区未出现严重混凝土脱落,左右梁及节点核心区裂缝宽度明显减少,表明采用钢板与端板连接形式能显著改善节点的破坏形态;同时,在造价增加数十元的情况下,节点核心区加入钢纤维能显著减少裂缝宽度,改善节点性能明显。对比装配式混凝土中节点试件 ZJ2、ZJ3 破坏模式,ZJ3 的连接形式改善效果没有 ZJ2 的理想。

3 试验数据结果及分析

3.1 滞回曲线

各试件的梁端荷载-位移曲线如图5所示。

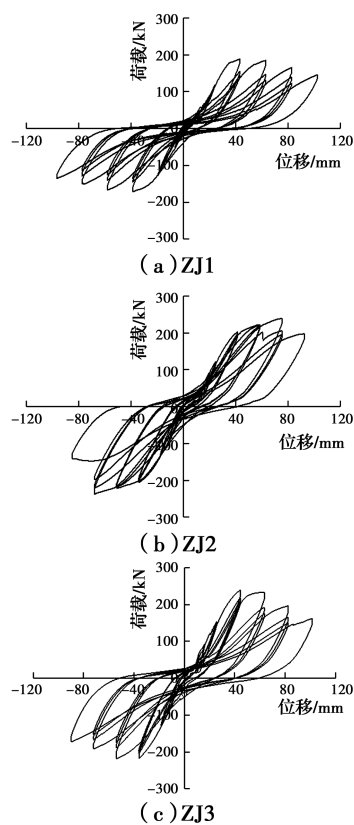


图5 荷载-位移滞回曲线

Fig. 5 Load-displacement hysteretic curves

由图5可以看出,在加载初期,所有试件的荷载-位移滞回曲线几乎都是线性的,滞回环面积较小,表明试验梁柱中节点处于弹性阶段。随着加载不断进行,试件进入弹塑性阶段后,滞回曲线随荷载的增加呈现非线性变化,滞回环面积不断增大,表明试件的耗能能力增大。最后,试件达到峰值荷载后,随着加载位移的进一步增大,卸载后残余变形增大,但荷载逐渐减小。

与现浇混凝土中节点试件 ZJ1 相比,装配式高强钢筋钢纤维混凝土梁柱中节点试件 ZJ2 滞回曲线

更为饱满,表明采用工字钢连接形式能显著改善梁柱节点的滞回性能。装配式高强钢筋钢纤维混凝土梁柱中节点试件 ZJ3 的滞回曲线比 ZJ1 更为饱满,说明采用钢板与端板连接形式能显著改善高强钢筋钢纤维混凝土梁柱节点的滞回性能,进而在低周往复荷载作用下提高构件的耗能能力。

节点核心区加入工字钢的装配式高强钢筋钢纤维混凝土梁柱中节点试件 ZJ2 的滞回曲线比采用钢板与端板焊接连接的装配式节点试件 ZJ3 更饱满,滞回曲线中部“捏缩”效应得到改善,具有更好的耗能能力。

3.2 荷载-位移骨架曲线

骨架曲线是将滞回曲线中每一加载工况下第 1 个加载循环的滞回环峰值连线形成的外包络曲线,各试件的骨架曲线如图 6 所示。各试件的特征点荷载和位移如表 2 所示。

由图 6 和表 2 可以看出,装配式高强钢筋钢纤维混凝土梁柱中节点试件 ZJ2、ZJ3 在正向和反向加载时的屈服荷载平均值分别比试件 ZJ1 高 28%、29%,试件 ZJ2 的平均屈服位移比试件 ZJ1 高 7%,而试件 ZJ3 的平均屈服位移比试件 ZJ1 低 5%,试件 ZJ2、ZJ3 平均极限荷载分别比现浇混凝土中节点试件 ZJ1 高 33%、27%,表明在节点核心区加入工字钢可以提高节点的梁端受弯承载力,采用钢板和端

板焊接的形式能够提高构件的节点抗剪承载能力。现浇节点 ZJ1 的平均破坏位移分别比装配式节点 ZJ2、ZJ3 高 5%、9%,这主要是由于装配式节点中加入了钢连接件,使其刚度增大,变形有所降低。

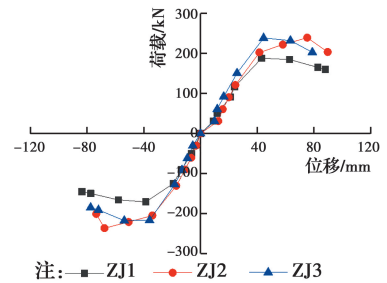


图 6 骨架曲线

Fig. 6 Skeleton curve

对比装配式高强钢筋钢纤维混凝土梁柱中节点试件 ZJ2、ZJ3,在正向加载时,试件 ZJ2 的极限荷载略微高于试件 ZJ3,在反向加载时,试件 ZJ2 的极限荷载比试件 ZJ3 高 9%,说明采用工字钢连接的装配式节点具有更高的梁端受弯承载力。试件 ZJ3 在达到极限荷载后强化幅度较长,曲线经历了较长的平台段后下降,而试件 ZJ2 荷载迅速下降,这可能是由于焊接在工字钢上的梁纵筋部分断裂造成的。同时,试件 ZJ2 的破坏位移平均值比试件 ZJ3 高约 4%,表明采用工字钢连接的装配式节点具有较高的变形能力。

表 2 荷载和位移

Table 2 Load and displacement

试件	加载方向	屈服荷载/kN	屈服位移/mm	极限荷载/kN	极限位移/mm	破坏荷载/kN	破坏位移/mm
ZJ1	正向	178.63	45.15	188.00	47.93	159.80	88.19
	负向	145.10	30.70	171.05	42.87	145.39	83.63
ZJ2	正向	206.64	45.01	239.45	75.27	203.53	89.77
	负向	208.03	35.94	236.85	67.73	201.32	73.52
ZJ3	正向	213.12	39.08	238.65	44.52	202.85	78.89
	负向	204.39	33.44	218.00	53.57	185.30	77.50

3.3 刚度退化曲线

刚度定义为滞回曲线峰值点荷载值与滞回曲线峰值点对应位移值之比。各试件的刚度退化曲线如图 7 所示。

对比 3 个中节点试件的刚度退化曲线可以看出:在正反向加载时,装配式高强钢筋钢纤维混凝土梁柱中节点试件 ZJ2、ZJ3 的刚度退化曲线比现浇混

凝土中节点试件 ZJ1 更加平缓,刚度退化性能较好。在正向加载时,与节点核心区采用钢板、端板焊接连接的装配式混凝土中节点试件 ZJ3 相比,节点核心区加入工字钢的装配式混凝土中节点试件 ZJ2 的刚度退化更加减缓,后期变形能力更大,表明在节点核心区加入工字钢能够减缓节点试件的刚度退化;在反向加载时,节点核心区加入工字钢的装配式混

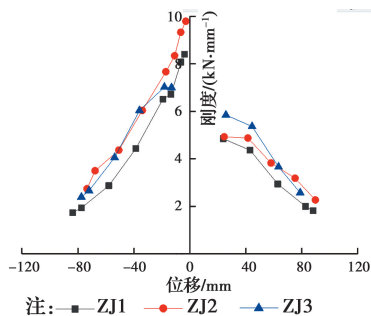


图7 刚度退化曲线

Fig. 7 Stiffness degradation curve

土中节点试件 ZJ2 的刚度退化速率与采用钢板、端板焊接连接的试件 ZJ3 相似。试件 ZJ2 的正反向初始刚度平均值比 ZJ3 高,这是由于工字钢贯穿节点核心区,其整体性较好,因此,刚度平均值较高,在地震作用下能够保证更好的稳定性。

3.4 耗能能力

为评价试件的耗能能力,在滞回曲线的基础上计算了试件的累积耗能,每个加载循环的能量耗散由该循环滞回曲线所围成的面积表示,累积耗能为当前循环之前所有能量耗散之和。各试件的累积耗能-位移曲线如图 8 所示。同时,还可以通过等效粘滞阻尼系数来评价节点构件的耗能能力,定义为某个滞回环面积与等效线性的系统应变能之比,再除以常数 2π ,各试件的等效粘滞阻尼系数曲线如图 9 所示。

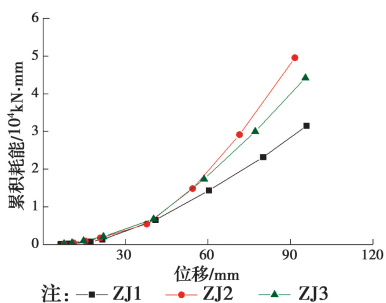


图8 累积耗能-位移曲线

Fig. 8 Cumulative energy dissipation versus displacement curve

由图 8 可知,在加载初期,钢纤维混凝土节点试件 ZJ2、ZJ3 的累积耗能与现浇节点试件 ZJ1 相似,这是由于节点试件处于弹性阶段。在加载位移达到 60 mm 以后,试件 ZJ2 的累积耗能比其他试件的累积耗能增加更快,这主要是由于后浇区焊接在工字钢上的梁纵筋屈服引起。破坏时,预制装配式节点试件 ZJ2、ZJ3 的累积耗能分别比现浇节点试件 ZJ1

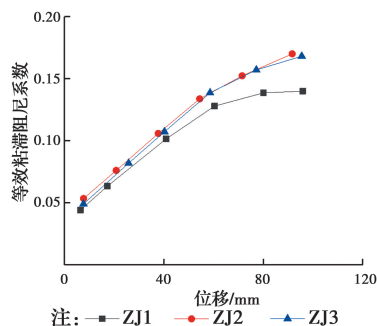


图9 等效粘滞阻尼系数

Fig. 9 Equivalent viscous damping coefficient

高 57%、40%,表明在节点核心区加入工字钢或采用钢板与端板焊接连接能显著提高节点的耗能能力。同时,试件 ZJ3 采用单片钢板、钢筋与端板焊接,与加入工字钢的试件 ZJ2 相比,总体来说整体性较差,进而导致节点的耗能能力比试件 ZJ2 差。对于节点核心区加入工字钢并与梁纵筋焊接的节点来说,虽然其整体性得到提高,但后浇区预制梁与预制柱的连接方面还有待进一步加强。从图 9 中可以得到类似的结论,试件 ZJ2、ZJ3 的等效粘滞阻尼系数在加载位移 60 mm 后,显著大于试件 ZJ1,具有较高的耗能能力。在破坏阶段,试件 ZJ2 的等效粘滞阻尼系数略高于 ZJ3。

3.5 转动能力分析

节点的转动能力主要通过梁端弯矩-转角曲线来反映。梁端转角通过布置在梁端的位移计测量得到。根据布置在梁端范围内的梁端节点相对柱边的转动除以该长度,得到单位长度截面平均转角。各试件的弯矩-转角曲线如图 10 所示。

从图 10 中可以看出,现浇混凝土中节点试件 ZJ1 和装配式高强钢筋钢纤维混凝土中节点试件 ZJ3 的梁端弯矩-转角曲线呈现出非线性变化,装配式高强钢筋钢纤维混凝土中节点试件 ZJ2 梁端弯矩-转角曲线相对于 ZJ1、ZJ3 呈现出线性特征,这主要是由于在 ZJ2 节点核心区加入工字钢,提高了节点整体刚度。

各试件的初始转动刚度定义为弹性阶段弯矩与转角之比,从图 10 可以看出,试件 ZJ3 的初始转动刚度最大,试件 ZJ2 的初始转动刚度最小。与现浇节点 ZJ1 相比,节点核心区加入工字钢的装配式节点 ZJ2 的极限弯矩和极限转角均有所提高,可以看出,工字钢的加入能够提高梁端转动能力。对比试

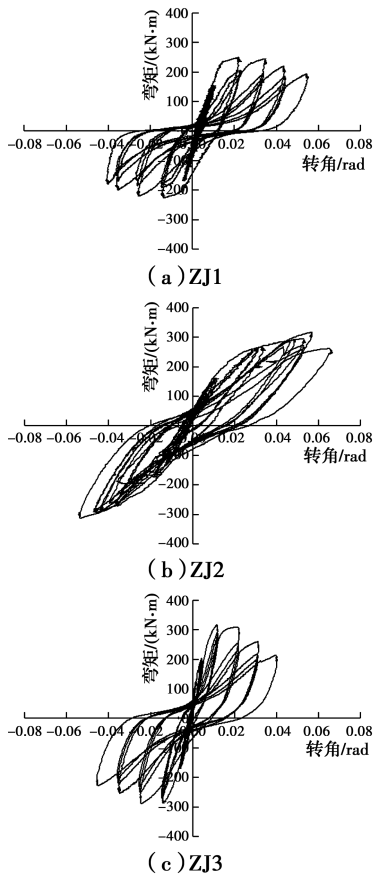


图 10 弯矩-转角曲线

Fig. 10 Moment-rotation curves

件 ZJ1、ZJ3 可以发现,采用钢板与端板焊接连接的试件 ZJ3 梁端极限弯矩比现浇节点 ZJ1 高,但梁端极限转角有所降低,这是由于 ZJ3 钢连接件的连接形式导致其初始转动刚度,转动刚度降低较为缓慢。由此可见,采用钢板与端板焊接连接的方式能够提高梁端的极限弯矩,其破坏阶段的转动能力有所降低。对比两种装配式节点,试件 ZJ2、ZJ3 的梁端极限弯矩相差不大,但试件 ZJ2 的极限转角约是试件 ZJ3 的 1.6 倍,可见试件 ZJ2 在用钢量减少的情况下,在节点核心区加入工字钢能显著提高其梁端的转动能力。

4 结论

1) 预制装配式梁柱节点核心区及后浇区加入钢纤维减少了裂缝的产生,改善了节点破坏形态。节点核心区采用钢板与端板焊接连接的装配式混凝土中节点试件和现浇节点试件呈现核心区剪切破坏,节点核心区加入工字钢的装配式高强钢筋钢纤维混凝土梁柱中节点试件破坏发生在梁端,满足“强柱弱

梁”的抗震设计要求。

2) 对于节点核心区加入工字钢的试件和节点核心区采用钢板与端板焊接连接的试件,由于在节点核心区加入了钢连接件,提高了整体刚度和保证了节点的完整性,同时,钢连接件能够均匀地传力,试件的极限荷载、滞回能力和耗能能力均得到提高,刚度退化得到减缓,从而改善预制节点的抗震性能。

3) 对比两种连接形式的装配式节点,采用工字钢连接的节点具有更高的极限荷载、变形能力和耗能能力,以及具有较好的滞回性能、较为缓慢的刚度退化性能和较高的梁端转动能力。采用钢板与端板焊接连接的节点具有最大的初始转动刚度,转动刚度降低较为缓慢,破坏阶段的转动能力有所降低。

参考文献:

- [1] 林宗凡, SAGAN E I, KREGER M E. 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, SAQAN E I, KREGER M E. Study on the ductile connections for precast aseismic frame [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 1998, 26(2):134-138. (in Chinese)
- [2] 王俊, 赵基达, 胡宗羽. 我国建筑工业化发展现状与思考 [J]. 土木工程学报, 2016, 49(5):1-8.
WANG J, ZHAO J D, HU Z Y. Review and thinking on development of building industrialization in China [J]. China Civil Engineering Journal, 2016, 49(5):1-8. (in Chinese)
- [3] KIM T H, LEE H M, KIM Y J, et al. Performance assessment of precast concrete segmental bridge columns with a shear resistant connecting structure [J]. Engineering Structures, 2010, 32(5):1292-1303.
- [4] 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, 2016, 22(2):234-256.
- [5] LI S F, LI Q N, ZHANG H, et al. Experimental study of a fabricated confined concrete beam-to-column connection with end-plates [J]. Construction and Building Materials, 2018, 158:208-216.
- [6] 吴从晓, 周云, 赖伟山, 等. 现浇与预制装配式混凝土框架节点抗震性能试验 [J]. 建筑科学与工程学报, 2015, 32(3):60-66.

- WU C X, ZHOU Y, LAI W S, et al. Experiment on seismic performance of cast-in-situ and prefabricated concrete frame structure joints [J]. *Journal of Architecture and Civil Engineering*, 2015, 32(3):60-66. (in Chinese)
- [7] 张锡治, 章少华, 牛四欣, 等. 钢-混凝土预制混合梁受力性能分析[J]. *建筑结构学报*, 2019, 40(4):47-55.
- ZHANG X Z, ZHANG S H, NIU S X, et al. Analysis on mechanical performance of precast hybrid steel-concrete beam [J]. *Journal of Building Structures*, 2019, 40(4):47-55. (in Chinese)
- [8] 胡轩, 李元齐, 贾宝荣, 等. 装配式钢管混凝土柱-双钢梁框架节点受力性能试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2019, 40(7):100-108.
- HU X, LI Y Q, JIA B R, et al. Experimental study on mechanical behavior of prefabricated concrete filled steel tubular column-double steel beam connections [J]. *Journal of Building Structures*, 2019, 40(7):100-108. (in Chinese)
- [9] KIM J H, CHO Y S, LEE K H. Structural performance evaluation of circular steel bands for PC column-beam connection [J]. *Magazine of Concrete Research*, 2013, 65(23):1377-1384.
- [10] YANG K H, SEO E A, HONG S H. Cyclic flexural tests of hybrid steel-precast concrete beams with simple connection elements [J]. *Engineering Structures*, 2016, 118:344-356.
- [11] BAHRAMI S, MADHKHAN M, SHIRMOHAMMADI F, et al. Behavior of two new moment resisting precast beam to column connections subjected to lateral loading [J]. *Engineering Structures*, 2017, 132:808-821.
- [12] 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.
- [13] CHOI H K, CHOI Y C, CHOI C S. Development and testing of precast concrete beam-to-column connections [J]. *Engineering Structures*, 2013, 56:1820-1835.
- [14] MAYA L F, ZANUY C, ALBAJAR L, et al. Experimental assessment of connections for precast concrete frames using ultra high performance fiber reinforced concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2013, 48:173-186.
- [15] 王英俊, 梁兴文, 吴继伟, 等. 纤维增强混凝土梁柱节点受剪承载力计算模型[J]. *工程力学*, 2016, 33(3):77-86.
- WANG Y J, LIANG X W, WU J W, et al. Calculation model of shear capacity of fiber-reinforced concrete beam-column joint [J]. *Engineering Mechanics*, 2016, 33(3):77-86. (in Chinese)
- [16] 戎贤, 张健新, 李艳艳. 钢骨及纤维增强混凝土异形柱中节点滞回性能[J]. *地震工程与工程振动*, 2016, 35(6):207-212.
- RONG X, ZHANG J X, LI Y Y. Hysteretic behavior of specially shaped column interior joints with steel or fiber [J]. *Earthquake Engineering and Engineering Dynamics*, 2016, 35(6):207-212. (in Chinese)

(编辑 胡玥)