

低周反复荷载下新型装配式梁柱节点力学性能分析

王宇¹,王立志¹,李峥²,刘铁林¹

(1. 沈阳建筑大学土木工程学院,辽宁 沈阳 110168;2. 中建二局第四建筑工程有限公司,天津 300457)

摘要 目的 研究不同混凝土强度对新型装配式梁柱节点力学性能的影响及其变化规律。方法 利用有限元分析软件 ABAQUS 建立数值模型并施加低周反复荷载,对比新型装配式梁柱节点和现浇式梁柱节点的力学性能。结果 随着混凝土强度等级的提高,装配式和现浇式节点承载力均有所增加,但现浇混凝土试件滞回曲线的捏缩现象依然存在,而装配式混凝土试件的捏缩现象得到显著改善,说明装配式混凝土试件在结构抗震中具有更好的吸能能力。结论 新型装配式梁柱节点具有更好的抗震性能,综合分析其力学性能及造价等原因,建议工程中采用 C35 混凝土。

关键词 装配式;梁柱节点;力学性能;有限元分析;低周反复荷载

中图分类号 TU398.9 文献标志码 A

Mechanical Property Analysis of New Prefabricated Beam-column Joints under Low-cyclic Loading

WANG Yu¹, WANG Lizhi¹, LI Zheng², LIU Tielin¹

(1. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. The Fourth Construction Engineering Co. Ltd., China Construction Second Engineering Bureau, Tianjin, China, 300457)

Abstract: The influence of different concrete strength on the mechanical properties of new prefabricated beam-column joints and its variation rule were studied. The finite element software ABAQUS was used to build the numerical model and the low cyclic loading was applied, the mechanical properties of new type prefabricated concrete beam-column joints and cast-in-place concrete beam-column joints were compared. With the strength grade of concrete improved, the maximum bearing capacity of prefabricated and cast-in-place concrete joints are increased, but the pinch phenomenon of hysteretic curve of cast-in-place concrete specimen still exists, and the pinch phenomenon of prefabricated concrete specimen is significantly improved, which indicates that it has better energy absorption capacity in the seismic performance of the structure. Through comparative analysis, the new type of prefabricated beam-column joint has better seismic

收稿日期:2021-05-07

基金项目:国家自然科学基金项目(11672190)

作者简介:王宇(1977—),男,副教授,主要从事结构抗震、建筑抗火等方面研究。

performance, comprehensive analysis of its mechanical properties and cost and other reasons, it is recommended to use C35 concrete in the project.

Key words: prefabricated; beam column joints; mechanical property; finite element analysis; low-cyclic loading

装配式建筑具有安装简单,施工周期短,湿作业少等优点,在建筑工程领域应用广泛^[1-3]。在装配式建筑中,节点连接形式是影响结构力学性能的重要因素^[4-6]。

Y. C. Loo 等^[7]率先进行了明牛腿装配式混凝土梁柱节点以及无牛腿装配式混凝土梁柱节点对比试验,结果表明,无牛腿装配式混凝土梁柱节点其延性性能、能耗能力等低于明牛腿的装配式混凝土梁柱节点。R. Vidjeapriya 等^[8]采用明牛腿连接预制梁柱节点的方式进行试验,结果表明,现浇式梁柱节点的承载力相比预制梁柱节点的极限承载力提高了 25%,但新型装配式梁柱节点相比现浇混凝土梁柱节点有更高的延性性能和能量耗散能力。E. Onur 等^[9]等对装配式梁柱节点采用明牛腿连接方式进行试验,结果表明,装配式梁柱节点采用明牛腿连接方式相比采用暗牛腿具有更好的延性性能和能量耗散能力。李晓等^[10]利用有限元分析软件 ABAQUS 对阶梯型干式和法兰盘型干式暗牛腿梁柱节点连接方式进行抗震研究,结果表明,现浇式梁柱节点的承载力与阶梯型预制梁柱节点的承载力比较接近,但现浇式梁柱节点的承载力和法兰盘型预制梁柱节点的承载力相差很大。郭淑丽等^[11]采用高强螺栓和反丝套筒连接暗牛腿梁柱节点并进行足尺框架边节点试验,结果表明,新型装配式节点有较好延性性能和耗能能力,采用新型装配式节点可以有效实现塑性铰外移和保护节点核心区。李亚萍等^[12]采用型钢做暗牛腿梁柱节点连接方式并进行试验分析,结果表明,装配式节点在刚度、耗能、承载力方面均高于现浇节点。

上述文献对牛腿连接梁柱节点的力学性能进行了试验和数值模拟研究,但均未给出

混凝土强度对牛腿连接梁柱节点受力性能的影响及变化规律。针对这一研究现状,笔者提出一种新型暗牛腿连接梁柱节点,利用有限元分析软件 ABAQUS^[13]建立数值模型,通过不同试件混凝土强度进行受力性能分析,并将计算结果与现浇混凝土试件进行对比分析,研究不同混凝土强度对新型装配式和现浇式梁柱节点力学性能的影响及变化规律。研究表明:新型装配式混凝土试件较现浇混凝土试件具有更好的塑性变形能力,抗震性能更好,综合分析其力学性能及造价等原因,建议工程中采用 C35 混凝土。

1 有限元模型

1.1 几何模型

装配式混凝土柱截面长×宽为 500 mm×400 mm,柱纵向受力钢筋采用 4 根直径 25 mm,箍筋采用直径 8 mm 间距 100,装配式混凝土梁截面宽×高为 400 mm×600 mm。装配式梁下侧受拉钢筋采用 4 根直径 28 mm,上侧受压钢筋采用 2 根直径 22 mm,箍筋采用直径 8 mm 间距 100,牛腿纵向受力钢筋、箍筋均与柱相同。试件中节点连接钢板型号为 Q235B,钢筋型号为 HRB400。混凝土采用 C30、C35、C40 三个强度等级,试件参数见表 1,其几何尺寸见图 1 所示。

表 1 试件参数

Table 1 Parameters of the test specimens

试件	编号	梁截面宽×高/mm	混凝土强度
装配式	1	400×600	C30
	2	400×600	C35
	3	400×600	C40
	4	400×600	C30
现浇梁	5	400×600	C35
	6	400×600	C40

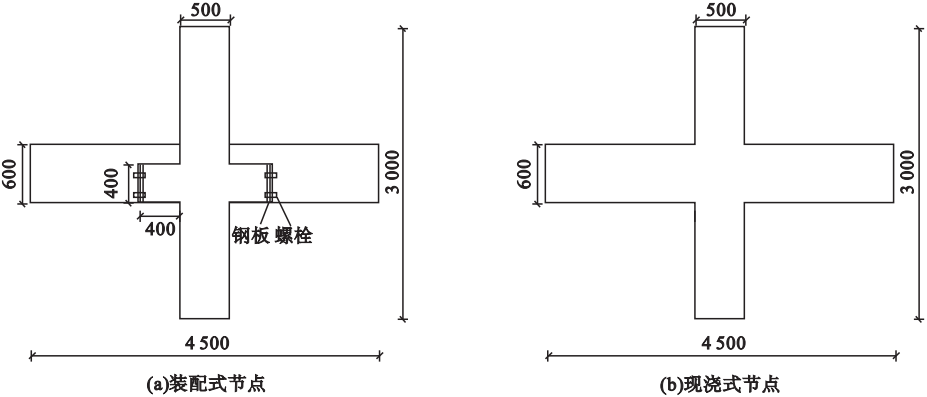


图1 梁柱节点

Fig. 1 Beam-column joints

1.2 材料本构关系

1.2.1 混凝土本构关系

混凝土本构关系采用塑性损伤模型,混凝土受拉和受压应力-应变关系如图2所示。

图2中, ε_{um} 、 σ_{um} 分别为模型中混凝土结构卸去荷载点的应变值和应力值; ε_c^{pl} 为模型中混凝土材料的受压残余应变值; ε_t^{pl} 为模型中混凝土材料的受拉残余应变值^[14]。

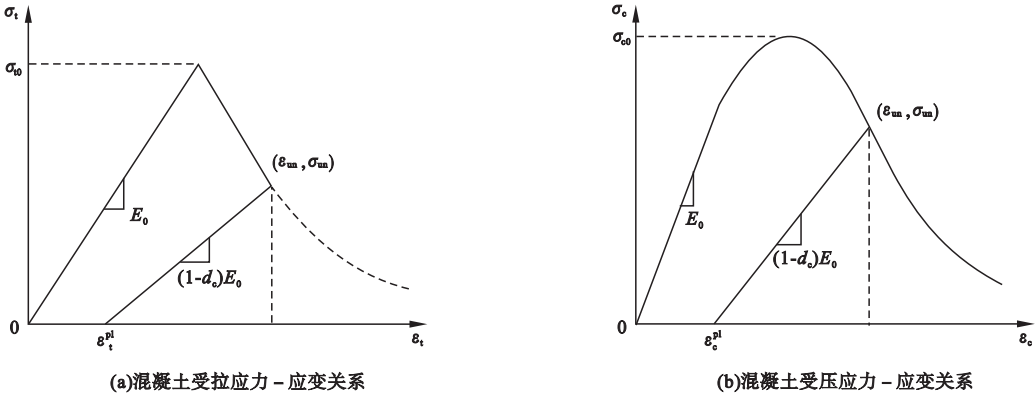


图2 混凝土应力-应变关系

Fig. 2 The stress-strain relationships of the concrete

混凝土材料在单轴受拉条件下应力-应变曲线计算公式如下:

$$\sigma = (1 - d_t) E_c \varepsilon. \tag{1}$$

$$d_t = \begin{cases} 1 - \rho_t [1.2 - 0.2x^2], & x \leq 1; \\ 1 - \frac{\rho_t}{\alpha_t (x - 1)^{1.7} + x}, & x > 1. \end{cases} \tag{2}$$

$$x = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{t,r}}. \tag{3}$$

$$\rho_t = \frac{f_{t,r}}{E_c \varepsilon_{t,r}}. \tag{4}$$

式中: α_t 为混凝土单轴受拉应力-应变曲线下降段的参数值; $f_{t,r}$ 为混凝土的单轴抗拉强度代表值; $\varepsilon_{t,r}$ 为与单轴抗拉强度代表值相应

的混凝土峰值受拉应变; d_t 为混凝土单轴受拉损伤演化参数。

混凝土单轴受压应力应变曲线计算公式如下:

$$\sigma = (1 - d_c) E_c \varepsilon. \tag{5}$$

$$d_c = \begin{cases} 1 - \frac{\rho_c n}{n - 1 + x^n}, & x \leq 1; \\ 1 - \frac{\rho_c}{\alpha_c (x - 1)^2 + x}, & x > 1. \end{cases} \tag{6}$$

$$x = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{c,r}}. \tag{7}$$

$$\rho_t = \frac{f_{c,r}}{E_c \varepsilon_{c,r}}. \tag{8}$$

$$n = \frac{E_c \varepsilon_{c,r}}{E_c \varepsilon_{c,r} - f_{c,r}} \tag{9}$$

式中: α_c 为混凝土单轴受压应力 - 应变曲线下降段参数值; $f_{c,r}$ 为混凝土单轴抗压强度代表值,MPa; $\varepsilon_{c,r}$ 为与单轴抗压强度相应的混凝土峰值受压应变; d_c 为混凝土单轴受压损伤演化参数。

1.2.2 钢材的本构关系

钢筋采用《混凝土结构设计规范》(GB50010—2010)^[15]附录 C 的应力 - 应变本构方程。本构模型如图 3 所示。

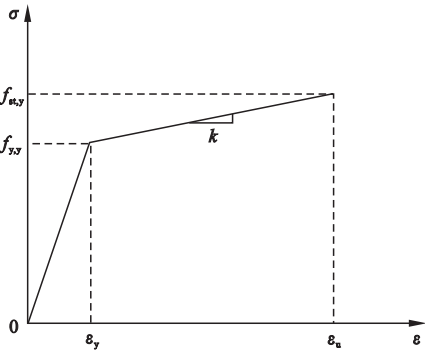


图 3 钢筋的本构模型

Fig. 3 The constitutive model of steel bar

计算公式如下:

$$\sigma_s = \begin{cases} E_s \varepsilon_s, & \varepsilon_s \leq \varepsilon_y; \\ f_{yr} + k(\varepsilon_s - \varepsilon_{uy}), & \varepsilon_y < \varepsilon_s \leq \varepsilon_u; \\ 0, & \varepsilon_s > \varepsilon_u. \end{cases} \tag{10}$$

$$k = (f_{st,r} - f_{y,r}) / (\varepsilon_u - \varepsilon_{uy}). \tag{11}$$

式中: E_s 为钢筋的弹性模量; σ_s 为钢筋应力; ε_s 为钢筋应变; $f_{y,r}$ 为钢筋的屈服强度代表值; $f_{st,r}$ 为钢筋极限强度代表值; ε_y 为与 $f_{y,r}$ 相应的钢筋屈服应变,可取 $f_{y,r}/E_s$; ε_{uy} 为钢筋强化阶段起点应变; ε_u 为与 $f_{st,r}$ 相应的钢筋峰值应变; k 为钢筋强化段斜率。

1.3 单元类型及网格划分

为保证计算的准确性和收敛性,试件中的混凝土和钢板采用 C3D8R 单元,钢筋采用 T3D2^[16-17],混凝土和钢筋之间的作用为 EMBEDDED 约束,高强螺栓与螺母之间的作用采用 Tie 约束,装配式混凝土梁柱节点网

格划分如图 4 所示。

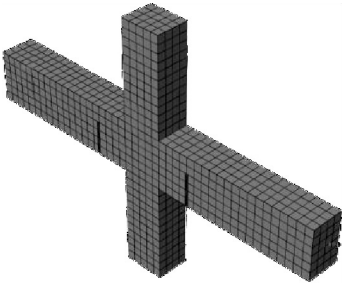


图 4 结构网格划分

Fig. 4 Structural meshing

1.4 边界条件及加载方式

有限元模型柱子底端边界条件设为 $U1 = U2 = U3 = UR1 = UR2 = UR3 = 0$,即用固结方式约束模型^[18],柱顶端位移边界条件设 $U1 = U2 = U3 = 0$,梁两端边界条件为 $U1 = U3 = UR1 = UR2 = 0$,梁柱节点加载位移曲线和加载方式分别如图 5、图 6 所示。

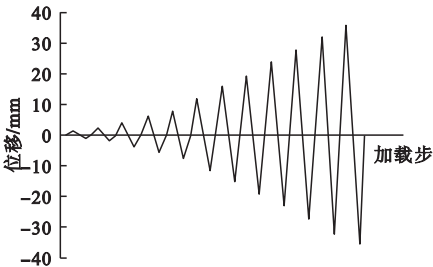


图 5 位移加载曲线

Fig. 5 Displacement loading curve

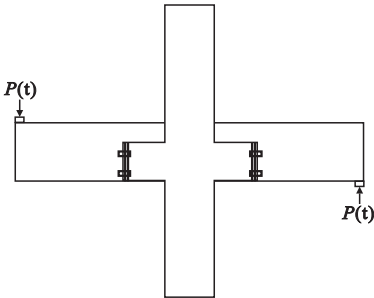


图 6 节点荷载加载方式

Fig. 6 Loading method of joints

2 有限元模拟结果

2.1 节点变形和破坏形态

装配式和现浇节点在低周反复荷载作用下的受压和受拉损伤如图 7、图 8 所示。

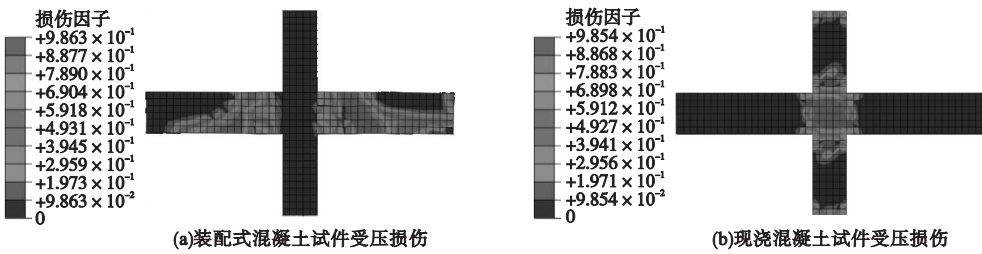


图 7 装配式混凝土试件和现浇混凝土试件受压损伤

Fig. 7 The compressing damage of fabricated concrete specimen and ordinary concrete specimen

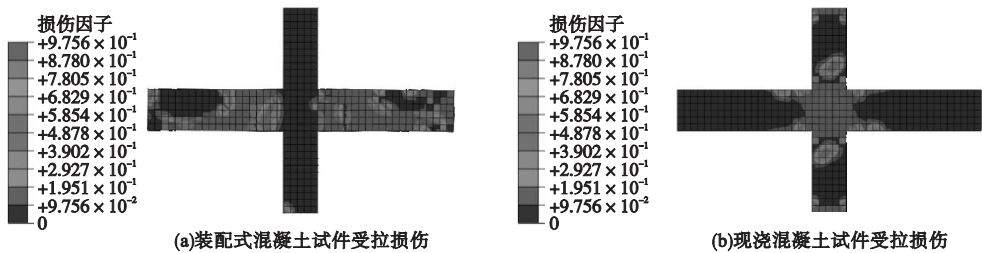


图 8 装配式混凝土试件和现浇混凝土试件受拉损伤

Fig. 8 The bending damage of fabricated concrete specimen and ordinary concrete specimen

由图 7 可知,对于装配式节点,其损伤因子达到了 0.986,对于现浇混凝土梁柱节点,损伤因子达到了 0.985。由图 8 可知,装配式节点和现浇混凝土梁柱节点,损伤因子均达到了 0.976。

综合分析可知,两类试件受拉和受压损伤因子最大值均超过 0.9,说明试件已经完全破坏。装配式混凝土试件损伤最先由梁跨中底部开始,随后梁底部出现斜裂缝并不断向上发展,试件受拉范围不断缩小,裂缝在荷载作用下不断向两侧延伸,最终节点核心区外混凝土梁被破坏,试件破坏时纵筋明显屈服,挠曲非常明显。现浇混凝土试件在荷载作用下最先在节点核心区出现损伤,随着位移荷载不断增大,试件的受拉损伤不断扩大,最终节点核心区混凝土被拉碎。装配式混凝土梁柱节点的受拉和受压损伤面积较大,现浇混凝土梁柱节点受拉和受压损伤面积较小,装配式混凝土梁柱节点破坏主要分布在节点连接外侧,而现浇混凝土试件破坏主要集中在梁柱相交核心区,新型装配式梁柱节点符合“强柱

弱梁、强结点弱构件”的设计理念。

2.2 滞回曲线

滞回曲线可以综合反应节点的抗震性能,各节点的滞回曲线如图 9 所示。

由图 9 可知,装配式和现浇式梁柱节点的滞回曲线形状类似,试件加载前期,混凝土未产生开裂。当位移达到 10 ~ 15 mm 时,受拉区混凝土开裂,试件开始产生残余变形;继续增大荷载,试件屈服后,滞回环斜率降低;到达极限承载力后,两类试件滞回曲线均开始下降,但装配式混凝土试件的屈服位移大于现浇混凝土试件,残余变形增长迅速,滞回曲线包络面积随之增大,节点耗能增大。混凝土强度相同条件下,试件产生相同位移时,装配式混凝土试件的承载力大于现浇混凝土试件并且装配式混凝土试件较现浇混凝土试件滞回环面积更大。随着混凝土强度等级的提高,节点承载力增加,但现浇混凝土试件滞回曲线捏缩现象依然存在,而装配式混凝土试件的滞回曲线捏缩现象得到了显著改善,说明其在结构抗震性中具有更好的吸能能力。

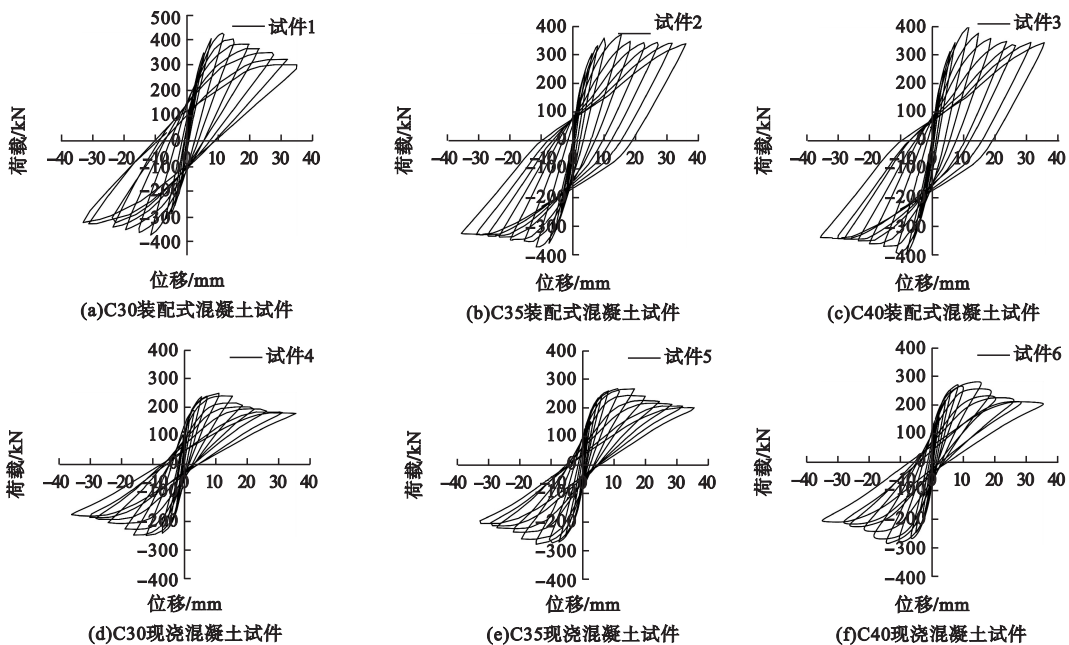


图9 现浇混凝土试件与装配式试件滞回曲线

Fig. 9 Hysteresis curves of ordinary concrete and fabricated specimens

2.3 骨架曲线

骨架曲线是滞回曲线每一级循环加载达到最大位移处荷载值的轨迹曲线,各节点骨架曲线如图10所示。

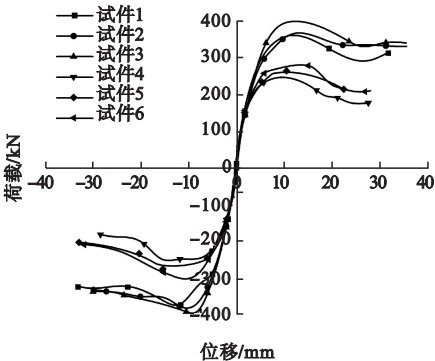


图10 梁柱节点骨架曲线

Fig. 10 Skeleton curves of beam-column joints

由图10可知,两类试件的骨架曲线形状相似,相同混凝土强度等级下,现浇混凝土试件的骨架曲线低于装配式混凝土试件,表明装配式梁柱节点的承载力高于现浇混凝土梁柱节点。加载前期试件的混凝土未发生开裂,其承载力随位移线性增大,随着混凝土开裂各试件承载力增长幅度变缓;试件屈服后,承载力上升幅度明显变缓,刚度大幅降低,试

件到达极限承载力后,承载力进入下降阶段;装配式混凝土试件骨架曲线斜率较现浇混凝土试件下降缓慢,说明装配式构件的塑性变形能力比较强。混凝土强度等级为C30时,试件1极限承载力较试件4提高了49.4%;混凝土强度等级为C35时,试件2极限承载力较试件5提高了40.0%;混凝土强度等级为C40时,试件3极限承载力较试件6提高了36.7%。随着混凝土强度等级的提高,可以提升装配式混凝土试件和现浇混凝土试件承载力;但混凝土强度由C35提升至C40,对试件承载力提升幅度没有C30提升至C35提升明显。综合分析新型装配式梁柱节点力学性能及造价等原因,采用C35混凝土能满足结构设计要求。

2.4 延性分析

延性是节点抗震性能非常重要的指标,各节点的屈服位移、极限位移和延性系数如表2所示。

由表2可知,相同混凝土强度下,新型装配式混凝土试件的延性和塑性变形性能均高于现浇混凝土试件。提高试件混凝土强度,

表2 现浇混凝土试件与装配式试件延性系数

Table 2 The ductility coefficients of ordinary concrete and fabricated specimens

试件	钢板厚度/ mm	屈服位移 Δ_y /mm	极限位移 Δ_u /mm	延性系数 μ
1	25	4.76	22.18	4.66
2	25	5.89	27.74	4.71
3	25	5.99	28.39	4.74
4	—	4.35	17.43	4.01
5	—	4.53	19.22	4.24
6	—	4.68	20.27	4.33

两类试件的屈服位移、极限位移、延性系数也有所增加。两类试件的屈服位移、极限位移、延性系数也有所增大。混凝土强度等级为 C30 时,装配式混凝土试件较现浇混凝土试件的屈服位移提高 9.42%,极限位移提高 27.2%,延性系数提高 13.90%。混凝土强度等级为 C35 时,装配式混凝土试件较现浇混凝土试件的屈服位移提高了 30.02%,极限位移提高了 43.33%,延性系数提高 11.10%。混凝土强度等级为 C40 时,装配式混凝土试件较现浇混凝土试件的屈服位移提高了 28.00%,极限位移提高了 28.60%,延性系数提高 9.50%。

2.5 刚度退化分析

试件刚度可用割线刚度来表示,各试件刚度退化曲线如图 11 所示。

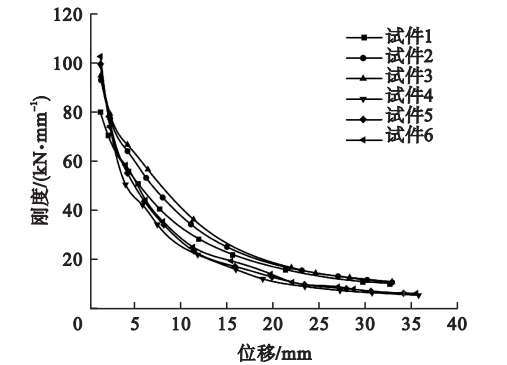


图 11 现浇混凝土与装配式试件刚度退化曲线

Fig. 11 The stiffness degradation curves of ordinary concrete and fabricated specimens

由图 11 试件刚度退化曲线可知:

(1)两类试件在荷载作用下刚度退化较为明显,刚度退化趋势基本一致。试件加载位移前 10 mm,刚度曲线斜率很大,下降速率较快。随着位移荷载增加,刚度曲线斜率减小,曲线下降速度变缓。试件 1、试件 4 混凝土强度均为 C30,两个试件加载初始刚度分别是 80.02 kN/mm 和 98.89 kN/mm;试件 2、试件 5 混凝土强度均为 C35,两个试件加载初始刚度分别是 92.92 kN/mm 和 99.56 kN/mm;试件 3、试件 6 的混凝土强度均为 C40,两个试件加载初始刚度分别是 94.82 kN/mm 和 102.6 kN/mm。相同混凝土强度等级下,装配式试件初始刚度小于现浇混凝土试件,继续增大位移荷载,现浇混凝土试件刚度退化严重。后续加载过程中,在相同位移下,装配式试件刚度始终高于现浇混凝土试件。

(2)随着混凝土强度等级的提高,装配式和现浇混凝土试件的初始刚度随之提高,现浇混凝土试件强度等级由 C30 提升至 C35、C40 后试件的初始刚度增加不明显,而装配式试件初始刚度由 C30 提升至 C35、C40 增加显著。

2.6 等效黏滞阻尼系数

等效黏滞阻尼系数计算公式为

$$\zeta_{eq} = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{S_{(ABC+CDA)}}{S_{(OBE+ODF)}} \tag{12}$$

式中: $S_{(ABC+CDA)}$ 为滞回曲线环所围面积; $S_{OBE+ODF}$ 为 $\triangle OBE$ 和 $\triangle ODF$ 面积之和。

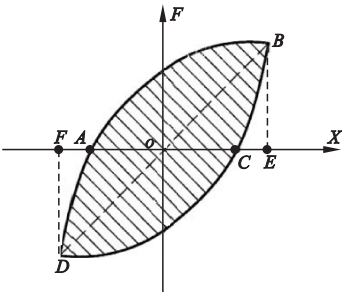


图 12 等效黏滞阻尼系数

Fig. 12 The equivalent viscous damping coefficient

现浇混凝土试件和新型装配式试件的等效黏滞阻尼系数如图 13 所示。

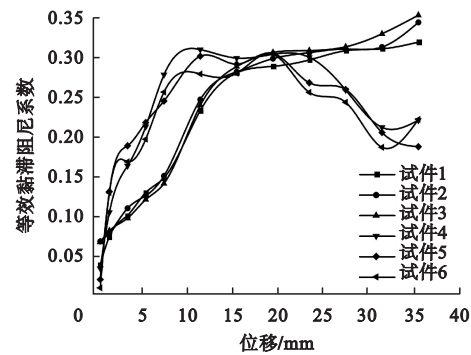


图 13 现浇混凝土与装配式试件等效黏滞阻尼系数曲线

Fig. 13 The equivalent viscous damping coefficient curves of ordinary concrete and fabricated specimens

由图 13 等效黏滞阻尼系数曲线可知：

(1) 在试件加载初期,等效黏滞阻尼系数增长较快,表明两类试件能量耗散能力较强;继续增大位移荷载,试件混凝土开裂,等效黏滞系数曲线斜率下降,等效黏滞系数增

长变缓。

(2)试件屈服前,现浇混凝土试件的等效黏滞阻尼系数高于新型装配式混凝土试件;试件屈服后,随着位移荷载继续增大,现浇混凝土试件的等效黏滞阻尼系数开始下降,逐渐低于装配式试件。而装配式试件随着荷载的增大其等效黏滞阻尼系数不断增加,说明现浇混凝土试件在屈服前能量耗散能较强。试件屈服后,其能量耗散能力明显下降,而装配式试件能量耗散能力不断上升,说明装配式试件相比现浇混凝土试件有较好的抗震能力。

(3)两类试件的等效黏滞阻尼系数随着混凝土强度等级的提高而增大。

2.7 耗能能力

试件在低周反复荷载作用下不同位移累计耗能值可以衡量节点抗震性能,各节点累计耗能如表 3 所示。

表 3 现浇混凝土与装配式试件不同位移累计耗能

试件	累计耗能/(kN·mm)				总耗能/(kN·mm)
	位移 4 mm	位移 8 mm	位移 16 mm	位移 32 mm	
1	393.0	2 437.7	9 603.6	38 283.2	48 224.7
2	429.4	2 437.6	10 415.2	43 343.7	56 152.9
3	405.2	2 562.6	10 722.7	44 969.9	5 7254.5
4	611.2	2 966.0	9 213.8	25 464.1	29 865.5
5	546.1	3 153.1	9 599.7	26 707.5	31 787.5
6	600.8	3 151.5	9 750.4	27 835.9	31 822.0

由表 3 可知,在 C30、C35 和 C40 混凝土强度下,装配式试件总耗能值较现浇混凝土试件分别提高 186.1%、76.5% 和 80.1%,说明装配式试件较现浇混凝土都有更好的能量耗散能力,其抗震能力也都高于现浇混凝土试件。

3 结 论

(1)低周反复荷载作用下新型装配式混

凝土梁柱节点较现浇混凝土梁柱节点滞回曲线形状更为饱满,捏缩现象明显得到改善;新型装配式混凝土试件屈服后,其骨架曲线斜率较现浇混凝土试件下降缓慢,其延性系数也高于现浇混凝土试件,说明新型装配式混凝土试件的塑性变形能力高于现浇混凝土试件。

(2)节点在相同位移加载条件下,装配式混凝土试件吸收能量高于现浇混凝土试

件,装配式混凝土试件有更好的抗震性能。

(3)综合分析新型装配式梁柱节点力学性能及造价等原因,采用 C35 混凝土能满足结构设计要求。

参考文献

- [1] 陈子康,周云,张季超,等. 装配式混凝土框架结构的研究与应用[J]. 工程抗震与加固改造, 2012, 34(4): 1-11.
(CHEN Zikang, ZHOU Yun, ZHANG Jichao, et al. Retroversion and forecast of present research and application of precast concrete structure [J]. Earthquake resistant engineering and retrofitting, 2012, 34(4): 1-11.)
- [2] IRTEM E, TURKER K. Investigation of semi-rigid bolted beam connections on prefabricated frame joints [J]. Structural engineering and mechanics, 2001, 12(4): 397-408.
- [3] 杨卉. 装配式混凝土框架节点抗震性能试验研究[D]. 北京:北方工业大学, 2014.
(YANG Hui. Experimental study on seismic performance of precast concrete frame joints [D]. Beijing: North China University of Technology, 2014.)
- [4] SERGIO M, ALCOCER B, RENE C. Seismic tests of beam-to-column connections in a precast concrete frame [J]. PCI journal, 2002, 47(3): 70-89.
- [5] LI Shufeng, ZHAO Di, LI Qingning, et al. Research on prefabricated concrete beam-column joint with high strength bolt-end plate [J]. Structural engineering and mechanics, 2020, 74(3): 395-406.
- [6] 丁克伟,陈伟. 装配式混凝土梁柱节点抗震性能试验和恢复力模型研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2021, 37(1): 51-60.
(DING Kewei, CHEN Wei. Experimental study and restoring force modeling on seismic performance of prefabricated concrete beam-column joints [J]. Journal of Shenyang jianzhu university(natural science), 2021, 37(1): 51-60.)
- [7] LOO Y C, YAO B Z. Static and repeated load tests on precast concrete beam-to-column connections [J]. PCI Journal, 1995, 40(2): 106-115.
- [8] 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.
- [9] ONUR E, SEVKET O, TURAN O. Ductile connections in precast concrete moment resisting frames [J]. PCI Journal, 2006, 51(3): 66-76.
- [10] 李晓. 预制装配式混凝土框架梁柱节点受力性能分析[D]. 沈阳:沈阳建筑大学, 2018.
(LI Xiao. Mechanical performance analysis of precast assembled concrete frame beam-column joints [D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2018.)
- [11] 贺瀚伦. 装配式钢筋混凝土新型框架梁柱节点抗震性能研究[D]. 成都:西南石油大学, 2018.
(HE Hanlun. Research on seismic performance of new prefabricated reinforced concrete frame joints [D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2018.)
- [12] 李亚萍. 新型装配式全预制混凝土型钢梁-柱节点研究[D]. 绵阳:西南科技大学, 2019.
(LI Yaping. Research on new type of prefabricated fully precast concrete steel beam-column joints [D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2019.)
- [13] 王玉镯,傅传国. ABAQUS 结构工程分析及实例讲解[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2010.
(WANG Yuzhuo, FU Chuanguo. ABAQUS structural engineering analysis and examples [M]. Beijing: China Building Industry Press, 2010.)
- [14] 刘巍,徐明,陈忠范. ABAQUS 混凝土损伤塑性模型参数标定及验证[J]. 工业建筑, 2014, 44(增刊1): 167-171.
(LIU Wei, XU Ming, CHEN Zhongfan. Parameter calibration and verification of concrete damage plasticity model of ABAQUS [J]. Industrial construction, 2014, 44(S1): 167-171.)
- [15] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构设计规范: GB50010—2010 [S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2011.
(The Ministry of Construction of the People's Republic of China. Code for design of concrete structures: GB50010—2010 [S]. Beijing: China Construction Industry Press, 2011.)
- [16] 石亦平,周玉蓉. ABAQUS 有限元分析实例讲解[M]. 北京:机械工业出版社, 2006.
(SHI Yiping, ZHOU Yurong. An explanation of ABAQUS finite element analysis [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2006.)
- [17] HO-LE K. Finite element mesh generation methods: a review and classification [J]. Computer-aided design, 1988, 20(1): 27-38.
- [18] 程学斌,马颖,袁子淇. 基于 ABAQUS 的钢筋混凝土柱抗震数值模拟分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2020, 18(6): 146-152.
(CHENG Xuebin, MA Ying, YUAN Ziqi. Seismic numerical simulation analysis of reinforced concrete column based on ABAQUS [J]. Journal of water resources and architectural engineering, 2020, 18(6): 146-152.)

(责任编辑:刘春光 英文审校:范丽婷)