

引用本文:丁克伟,叶 堉.装配式混凝土梁柱节点抗震性能试验与数值模拟[J].建筑科学与工程学报,2021,38(4):24-32.

DING Ke-wei, YE Yu. Experiment and Numerical Simulation on Seismic Performance of New Type of Prefabricated Concrete Beam-column Joint[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2021, 38(4): 24-32.

DOI:10.19815/j.jace.2020.10073

装配式混凝土梁柱节点抗震性能试验与数值模拟

丁克伟^{1,2}, 叶 堉^{1,2}

(1. 安徽建筑大学 安徽省建筑结构与地下工程重点实验室, 安徽 合肥 230601;

2. 安徽建筑大学 土木工程学院, 安徽 合肥 230601)

摘要:为研究不同螺栓强度等级对新型装配式半刚性混凝土梁柱节点抗震性能的影响,分别对螺栓等级为5.6级和8.8级的梁柱节点进行了足尺试验,分析了节点的滞回曲线、骨架曲线、割线刚度、等效黏滞阻尼系数等抗震性能指标,并基于ABAQUS有限元软件对现浇节点和5.6级螺栓连接的试验节点进行了数值模拟。结果表明:基于5.6级和8.8级螺栓连接的半刚性梁柱节点均具有良好的抗震性能和耗能能力,2组梁柱节点构件的刚度均随着位移等级的增加而逐渐降低,与5.6级螺栓连接的节点相比,8.8级螺栓连接的节点刚度退化速率较快,且正向加载下5.6级螺栓连接节点的极限承载力为8.8级螺栓连接节点的85.42%,负向加载下5.6级螺栓连接节点的极限承载力为8.8级螺栓连接节点的83.68%;有限元模拟结果具有较高的准确性,能够很好地反映节点构件的抗震性能;与现浇节点对比发现,现浇节点在耗能能力方面比试验节点好,但试验节点的极限承载力要优于现浇节点;所得结论可为装配式半刚性梁柱结构的抗震设计提供依据,为新型装配式梁柱节点构件的发展及应用提供参考。

关键词:装配式混凝土梁柱节点;有限元分析;螺栓连接;抗震性能

中图分类号: TU375.4

文献标志码: A

文章编号: 1673-2049(2021)04-0024-09

Experiment and Numerical Simulation on Seismic Performance of New Type of Prefabricated Concrete Beam-column Joint

DING Ke-wei^{1,2}, YE Yu^{1,2}

(1. Anhui Provincial Key Laboratory of Building Structure and Underground Engineering, Anhui Jianzhu University, Hefei 230601, Anhui, China; 2. College of Civil Engineering, Anhui Jianzhu University, Hefei 230601, Anhui, China)

Abstract: In order to study the impact of different bolt strength grades on the seismic performance of the new type of prefabricated concrete beam-column joint, full-scale tests were carried out on the beam-column joints with 5.6 and 8.8 grade bolts, respectively. The seismic performance indicators such as the hysteretic curve, skeleton curve, secant stiffness, and equivalent viscous damping coefficient of the node were discussed. Moreover, based on ABAQUS finite element software, the cast-in-place joint and the test joint with 5.6 grade bolt connection were numerically simulated. The results show that the semi-rigid beam-column joints based on 5.6 and

收稿日期:2020-10-26

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFC0701500);国家自然科学基金项目(11472005);安徽省自然科学基金项目(1908085ME173)

作者简介:丁克伟(1962-),男,安徽合肥人,教授,博士研究生导师,E-mail:1254192805@qq.com。

8.8 grade bolt connections have good seismic performance and energy dissipation capacity. The stiffness of the two groups of beam-column joint members gradually decreases with the increase of the displacement level. Compared with the joint connected by 5.6 grade bolts, the stiffness of the joint connected by 8.8 grade bolts degrades faster, and under the positive load, the ultimate bearing capacity of the joint connected by 5.6 grade bolts is 85.42% of that of the joint connected by 8.8 grade bolts. Under negative loading, the ultimate bearing capacity of the joint connected by 5.6 grade bolts is 83.68% of that of the joint connected by 8.8 grade bolts. The finite element simulation results have high accuracy and can well reflect the seismic performance of joint members. The cast-in-situ joints are better than the experimental joints in terms of energy consumption, but the ultimate bearing capacity of the experimental joints is better than that of the cast-in-place node. The research results can provide a basis for the seismic design of prefabricated semi-rigid beam-column structures and provide a reference for the development and application of new prefabricated beam-column joint members.

Key words: prefabricated concrete beam-column joint; finite element analysis; bolt connection; seismic behavior

0 引言

装配式梁柱节点的连接形式及抗震性能是目前施工和设计中的重点问题,梁柱节点作为一种易发生脆性剪切破坏的传力构件,在地震荷载作用下是结构较为薄弱的环节。典型的梁柱连接形式有湿式连接和干式连接2种,因湿式连接与现浇节点的连接方式较为相似,所以运用较为广泛,但干式连接也具有很多优势,值得深入研究,梁柱节点的连接形式尤为重要。连接形式必须在强度、整体性和装配效率等方面都满足一定的设计要求。螺栓连接或焊接连接是较为有效的连接方式之一,Liu等^[1]提出了一种新型的插入式混凝土梁柱连接节点,节点连接处通过螺栓和焊接的方式进行固定,这种插入式梁柱节点虽然初始刚度与现浇节点相比较低,但具有较高的承载能力和加工质量。Ding等^[2-5]对梁柱节点等装配式构件的抗震性能进行了深入研究。吴从晓等^[6]设计了2组预制装配式混凝土框架节点和1组现浇节点,并进行了抗震性能对比。

目前,一些研究者对提高新型节点的承载能力和耗能能力做了很多的工作,研究了一些具有高刚度的连接构件,用于提高预制混凝土结构的稳定性^[7-9]。然而,关于节点的装配效率及灾后修复效率并没有过多的研究。Oliveira等^[10]设计了一种新型的混凝土梁柱节点,该节点的抗弯强度约为现浇节点的80%,但由于没有牛腿的存在,所以在组装梁柱时需要借助临时支撑进行连接。

为此,本文提出了一种基于螺栓连接的新型混

凝土梁柱节点,该节点为干式连接,其中明牛腿的存在不仅解决了临时支撑和节点安装等问题,还提供了良好的抗剪承载力。本文分析了试验节点的滞回性能、刚度退化、耗能能力等;同时,基于ABAQUS有限元仿真软件对比分析了现浇节点和试验节点的抗震性能差异。

1 试验概况

1.1 试验设计

与现浇节点不同,试验节点的混凝土梁柱是分别预制并进行安装的。这种混凝土装配式结构的构件特性使得梁柱的混凝土强度即使不同也不会妨碍整体构件的施工及安装过程。王清湘等^[11]的研究表明,使用C80高强度混凝土代替普通强度混凝土可以减小构件的横截面尺寸,从而达到减少材料和有效节省空间的目的。根据《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)设计制作了2种不同螺栓强度等级的装配式梁柱节点^[12],牛腿柱的混凝土强度为C80,T形梁的混凝土强度为C40,柱高为4200 mm,承压钢板采用Q345B级钢,钢板厚度为20 mm,螺栓直径为30 mm,螺栓预紧力为200 kN。基于5.6级螺栓和8.8级螺栓连接的节点构件编号分别为PC1和PC2,节点构件的细部构造和配筋如图1所示。

1.2 材料属性

根据《普通混凝土力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2002)和《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)的设计要求^[13-14],混凝土材料试

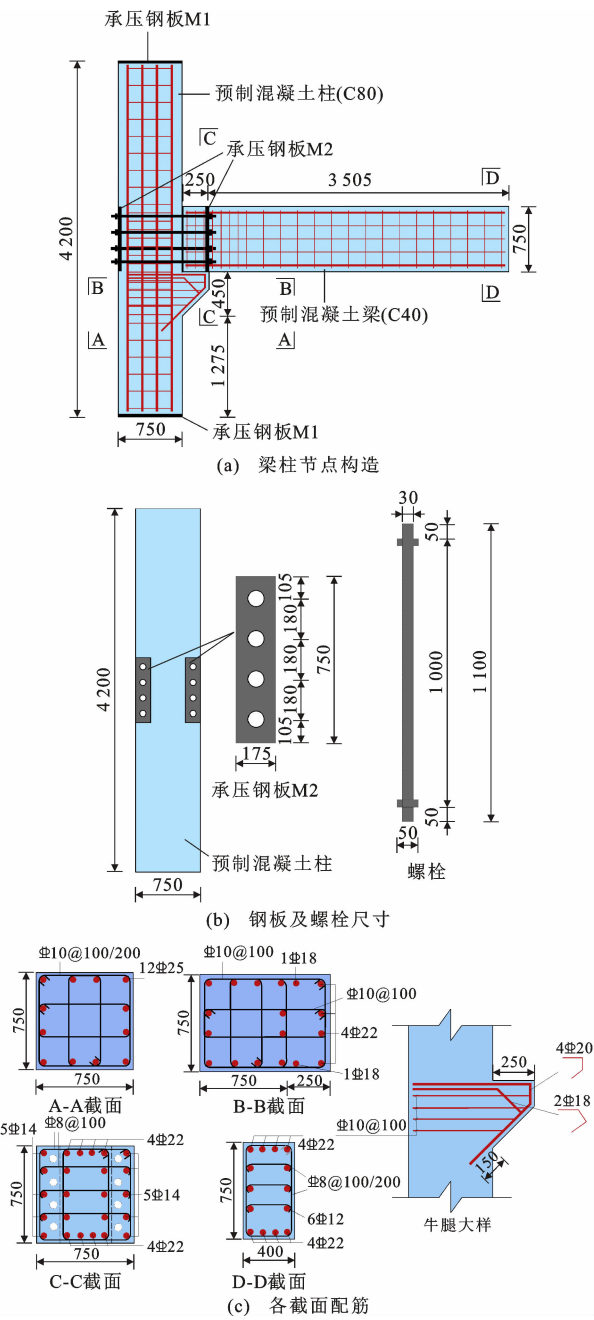


图 1 节点细部构造及配筋 (单位:mm)

Fig. 1 Construction and Reinforcement of Joint Details (Unit:mm)

表 1 混凝土力学性能指标

Tab. 1 Mechanical Performance Index of Concrete			
混凝土强度	立方体抗压强度/ MPa	轴心抗压强度/ MPa	弹性模量/ GPa
C40	28.68	18.25	325
C40	28.13	18.32	325
C40	29.28	18.34	325
C80	77.30	50.20	380
C80	78.20	52.30	380
C80	77.90	51.40	380

件采用与试验中混凝土试件相同条件养护的标准混凝土,并测得相应的混凝土力学性能指标,如表 1 所示。钢材和螺栓的力学性能指标由拉伸试验测得,如表 2,3 所示。

表 2 钢筋力学性能指标

Tab. 2 Mechanical Performance Index of Reinforcement					
钢筋类别	直径 (厚度)/mm	屈服强度/ MPa	极限强度/ MPa	伸长率/%	弹性模量/ GPa
HRB400	8	427.6	637.1	16.3	200
HRB400	10	437.9	568.3	15.6	200
HRB400	12	465.2	577.3	21.6	200
HRB400	14	447.4	567.6	23.2	200
HRB400	16	437.6	620.4	23.2	200
HRB400	18	456.4	589.6	22.6	200
HRB400	22	421.3	571.9	19.6	200
HRB400	25	456.6	605.7	20.2	200
Q345	28	380.2	516.8	17.9	206

表 3 螺栓力学性能指标

Tab. 3 Mechanical Performance Index of Bolt				
构件编号	螺栓等级	直径/mm	屈服强度/MPa	极限强度/MPa
PC1	5.6	30	412	640
PC2	8.8	30	626	865

1.3 加载装置与加载制度

本试验采用了力和位移混合加载的方式,试验地点为安徽省建筑结构与地下工程重点实验室,试验加载装置由电液伺服加载系统、千斤顶、连接杆、地脚螺栓、反力墙、反力架组成,柱顶柱底均采用铰支座,柱顶施加 500 kN 的液压千斤顶,梁端施加低周反复荷载,加载装置如图 2 所示。

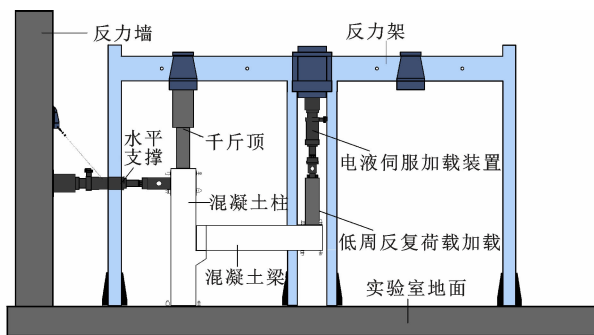
2 组试验节点构件均采用变幅循环加载。荷载加载时每级循环 1 次,位移加载时每级循环 3 次,下推为正,上拉为负,加载制度如图 3 所示。

2 试验结果及分析

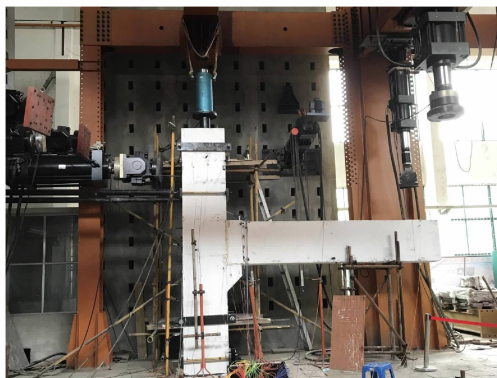
2.1 试验现象

(1)PC1 的试验现象

第一阶段以力为控制模式进行加载。荷载加载至+10 kN 和-40 kN 时,PC1 节点均无明显的试验现象。+25 kN 时,T 形梁端翼缘处出现第一条裂缝,裂缝宽度为 0.19 mm。-55 kN 时,原先在受拉阶段产生的裂缝基本闭合,构件没有产生新的裂缝。+60 kN 时,梁翼缘顶部产生多条细微裂缝,最大裂缝宽度增加至 0.86 mm。-80 kN 时,混凝土梁产生较大的变形,靠近节点核心区的梁端裂缝宽度增大至 2.76 mm。



(a) 示意图



(b) 现场图

图2 加载装置

Fig. 2 Loading Device

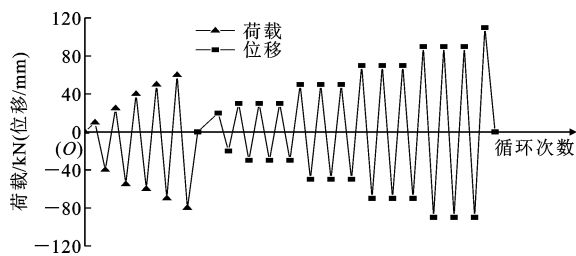


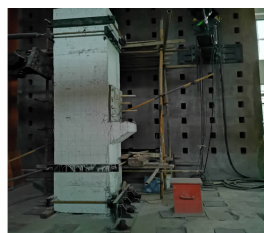
图3 加载制度

Fig. 3 Loading System

第二阶段以位移为控制模式进行加载。位移加载至+90 mm时,灌浆缝的宽度为1 cm,梁底部最大裂缝为8 mm。+110 mm时,混凝土梁产生了较大的位移,核心区节点处出现多处裂缝,靠近牛腿处的1根螺栓发生断裂,梁翼缘端上部发生混凝土压碎破坏,柱身无损伤,说明节点符合“强柱弱梁”的抗震要求。最终破坏状态如图4所示。

(2) PC2 的试验现象

第一阶段以力为控制模式进行加载。荷载加载到+25 kN时,PC2节点无明显的试验现象,+40 kN时,第一条宽度为0.1 mm的裂缝在梁翼缘上部出现。+50 kN时,梁上部裂缝的最大宽度为0.54 mm。+60 kN时,梁产生明显的变形,梁翼缘上端裂缝的宽度持续增加至0.8 mm。



(a) 混凝土柱身无损伤



(b) 螺栓断裂



(c) T形梁裂缝破坏情况

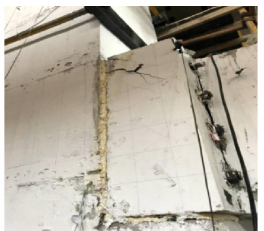


(d) 梁翼缘上部混凝土压碎

图4 PC1节点破坏形态

Fig. 4 Joint Failure Forms of PC1

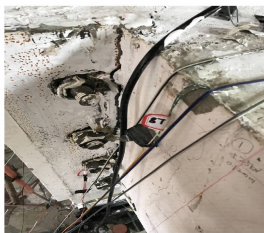
第二阶段以位移为控制模式进行加载。位移加载至+90 mm时,梁裂缝持续增多,裂缝宽度也增加。+110 mm时,梁下部节点处混凝土被压碎,T形梁端裂缝宽度达到12 mm,混凝土梁处的承压板附近裂缝达到8 mm,梁部裂缝主要集中在靠近节点核心区翼缘上端,而柱身无明显裂缝产生,说明节点符合“强柱弱梁”的抗震要求。最终破坏状态如图5所示。



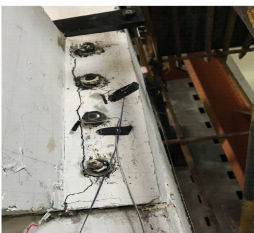
(a) PC2梁翼缘破坏



(b) PC2梁翼缘破坏



(c) 左承压板破坏



(d) 右承压板破坏

图5 PC2节点破坏形态

Fig. 5 Joint Failure Forms of PC2

2.2 滞回曲线

PC1与PC2节点构件的滞回曲线如图6所示,通过滞回曲线可以得到以下结果:

(1)两滞回曲线均呈弓形,且整体来说较为光滑、饱满,滞回环的面积随着位移加载的增大而增

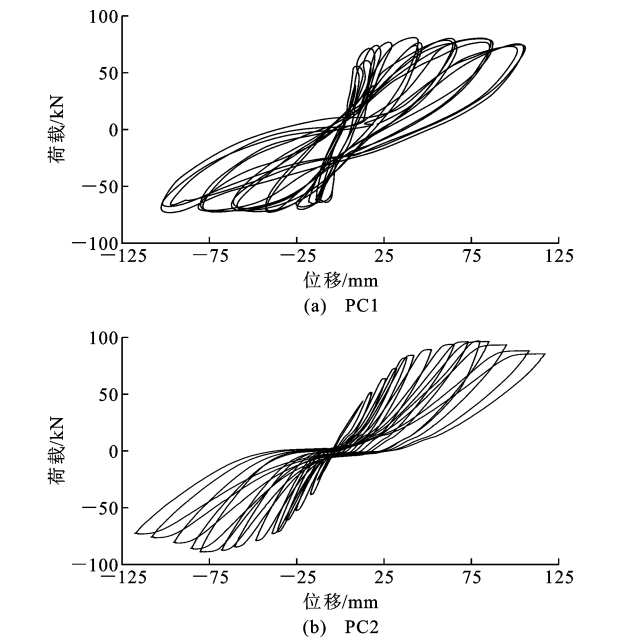


图 6 PC1 与 PC2 的滞回曲线

Fig. 6 Hysteresis Curves of PC1 and PC2

大,说明构件具有良好的塑性变形能力。

(2)螺栓强度等级较小节点构件的滞回环较为饱满,但 PC2 的极限承载力较高。

(3)两滞回曲线均出现“捏缩”效应,这是由于螺栓与螺栓孔洞之间存在间隙,导致螺栓产生了相对滑移。PC2 的“捏缩”效应比 PC1 较大。

(4)加载初期,构件的耗能较小,两构件的滞回曲线基本重合,且斜率保持一致,无较大的残余变形产生,在弹性阶段滞回环的面积较小,构件的刚度大且无明显的刚度退化。随着加载等级的增大,两节点构件滞回曲线屈服后均表现出一定的刚度退化,这是由于随着低周往复荷载的作用,节点核心区混凝土发生开裂,螺栓发生相对滑移现象,且刚度退化趋势大的部分主要是在屈服阶段。同时,PC1 的下降段没有 PC2 明显,说明 PC2 的刚度退化速率较 PC1 快。

2.3 骨架曲线

图 7 为 PC1 与 PC2 节点构件的骨架曲线,由骨架曲线的整体趋势可知,PC2 的水平极限承载力明

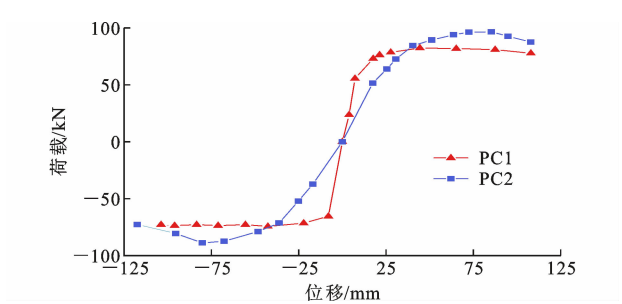


图 7 PC1 与 PC2 的骨架曲线

Fig. 7 Skeleton Curves of PC1 and PC2

显高于 PC1,说明螺栓强度等级的增大有利于提高节点构件的水平极限承载力。在正负加载的过程中,PC1 均先于 PC2 到达极限点。

2.4 骨架曲线特征值

由《建筑抗震试验规程》(JGJ/J 101—2015)中的规定可知:骨架曲线峰值点对应的横纵坐标分别定义为极限位移 Δ_m 和极限荷载 P_m ,将 85% P_m 对应的横纵坐标分别定义为破坏位移 Δ_y 和破坏荷载 P_y , Δ_y 为屈服位移, P_y 为屈服荷载,因此,由骨架曲线可以得到的特征值点为:屈服点(Δ_y, P_y),极限点(Δ_m, P_m),破坏点(Δ_y, P_y)^[15]。表 4 为详细的特征值参数。由表 4 可知:①正向加载下,PC1 的屈服承载力为 PC2 的 82.83%,PC1 的极限承载力为 PC2 的 85.42%;②负向加载下,PC1 的屈服承载力为 PC2 的 89.79%,PC1 的极限承载力为 PC2 的 83.68%。

综上,在地震荷载作用下,螺栓强度越高的构件其水平极限承载力也越高。

2.5 刚度退化

割线刚度能表现节点构件的刚度退化情况,可以按公式(1)进行计算

$$K_i = (|F_i| + |-F_i|) / (|\Delta_i| + |-\Delta_i|) \quad (1)$$

式中: K_i 为第 i 级加载下的割线刚度; $F_i, -F_i$ 分别为第 i 级加载下的正、反向峰值荷载值; $\Delta_i, -\Delta_i$ 分别为第 i 级加载下正、反向峰值荷载对应的位移值。

图 8 为 PC1 与 PC2 的刚度退化曲线。由图 8 可以看出:①两节点构件的刚度均随着位移等级的增加而逐渐降低,且曲线整体趋势基本相近,但 PC2

表 4 骨架曲线特征值

Tab. 4 Characteristic Value on Skeleton Curve

构件编号	屈服点		极限点		破坏点	
	Δ_y/mm	P_y/kN	Δ_m/mm	P_m/kN	Δ_y/mm	P_y/kN
PC1 (+)	11.34	62.67	44.39	82.25	117.50	66.91
PC1 (-)	-8.89	-65.87	-42.66	-74.32	-110.20	-63.17
PC2 (+)	32.89	75.66	72.45	96.29	111.14	81.85
PC2 (-)	-39.61	-73.36	-80.21	-88.81	-106.20	-75.49

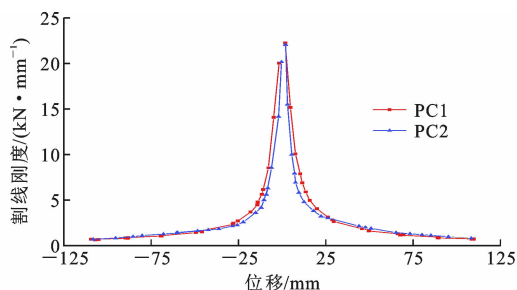


图 8 PC1 与 PC2 的刚度退化曲线

Fig. 8 Stiffness Degradation Curves of PC1 and PC2

与 PC1 相比,刚度退化的速率较快,说明螺栓强度等级的增大使得构件刚度退化的速率加快;②位移在 10~25 mm 时,两节点构件刚度退化的幅度最大,这是由于混凝土裂缝开展使得混凝土受压区高度迅速减小,随着位移等级增加,刚度退化趋势明显平缓。

2.6 等效黏滞阻尼系数

节点构件能否很好地吸收地震所释放的能量是整体结构在地震作用下能否确保其不倒塌的重要因素之一。构件具有足够的耗能能力,这是衡量结构抗震性能的一个重要的指标。本文通过等效黏滞阻尼系数来评价构件的耗能能力。

两节点构件的滞回曲线如图 9 所示。等效黏滞阻尼系数 h_e 可以根据公式(2)计算

$$h_e = (S_{ABCA} + S_{ADCA}) / [2\pi(S_{\triangle OBE} + S_{\triangle ODF})] \quad (2)$$

式中: S_{ABCA} , S_{ADCA} 分别为曲线 ABCA, ADCA 所围成的面积; $S_{\triangle OBE}$, $S_{\triangle ODF}$ 分别为 $\triangle OBE$, $\triangle ODF$ 的面积。

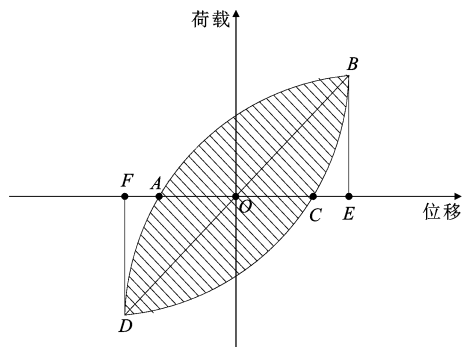


图 9 滞回曲线

Fig. 9 Hysteresis Curves

图 10 为 PC1 和 PC2 的等效黏滞阻尼系数。由图 10 可知,随着节点构件进入屈服阶段,两节点的等效黏滞阻尼系数持续增加,但由于 PC2 的捏缩效应更为明显,等效黏滞阻尼系数增长较为缓慢,且 PC1 的等效黏滞阻尼系数整体较大。PC1 和 PC2 的等效黏滞阻尼系数 h_e 分别在 0.062~0.195 和

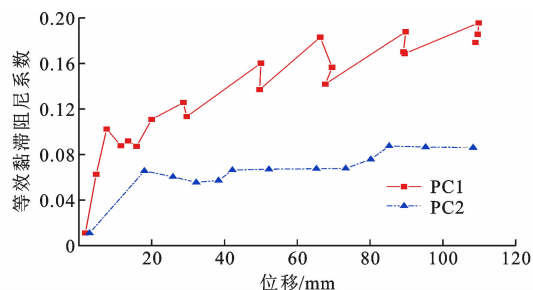


图 10 PC1 与 PC2 的等效黏滞阻尼系数

Fig. 10 Equivalent Damping Coefficients of PC1 and PC2

0.067~0.09 之间。因此,PC1 的耗能能力强于 PC2,适当减小螺栓等级能够有效提高节点构件的耗能性能。

3 有限元模拟分析

为了进一步对比分析试验节点和一般现浇节点的差异性,本文采用有限元仿真模拟软件 ABAQUS 对试验节点和现浇节点 PC1 分别进行了有限元模拟,其中,现浇节点的材料属性和模拟方法等均与试验节点保持一致。

有限元分析的准确性决定着有限元模拟结果是否能有效地反映节点构件的抗震性能^[16]。为了保证单元类型、网格划分、接触设置、边界条件、材料参数和求解方法的可靠性。本文的有限元部分参考了众多研究者的数值模拟方法,Liu 等^[1]对新型插入式梁柱连接进行了抗震性能研究和有限元数值模拟。Brunesi 等^[17]介绍了螺栓节点的有限元建模过程。Zhou 等^[18]提出了各种预应力混凝土节点,并对节点细节进行了参数研究。

3.1 有限元模型

在不改变属性参数和建模方式的前提下,对试验节点和现浇节点分别进行建模,混凝土、螺栓、钢板均采用了 C3D8R 六面体线性减缩积分实体单元,钢筋采用 T3D2 线性桁架单元;网格划分采用先定义切割面后划分网格的方式来进行,这种方式可以有效地划分模型各区域,并将节点核心区的网格进行合理加密,网格划分情况如图 11 所示。

3.2 材料属性

钢材均符合 Mises 屈服准则并采用了双折线强化模型进行计算。混凝土材料均采用混凝土塑性损伤模型,它可以很好地模拟混凝土材料的拉压现象且具有良好的收敛性。材料属性见表 5。

3.3 相互作用

螺栓与混凝土梁柱之间、钢板与混凝土梁柱之

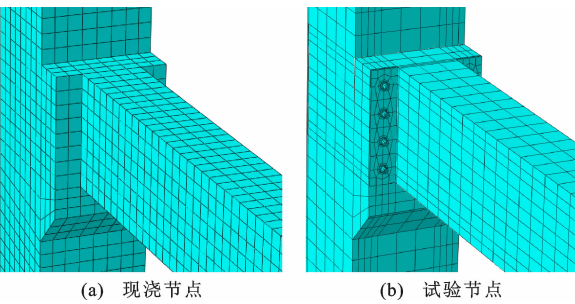


图 11 网格划分
Fig. 11 Mesh Dividing

表 5 材料属性

Tab. 5 Material Properties

材料类型		密度/(t·mm ⁻³)	弹性模量/MPa	泊松比
钢材		7.89×10 ⁻⁹	20 600	0.3
混凝土	C40	2.50×10 ⁻⁹	32 500	0.2
	C80	2.50×10 ⁻⁹	38 000	0.2

间、混凝土梁与混凝土柱之间的接触均采用面面接触,其中切向设置为“罚”接触,法向设置为“硬”接触,摩擦因数取 0.45,钢板与混凝土梁柱采用 Tie 约束(绑定约束),考虑到钢筋与混凝土之间的关系,则采用 Embed 命令(内置命令)将钢筋直接嵌入混凝土梁柱中。

3.4 边界条件与荷载加载

对柱顶柱底及梁端分别建立耦合点 RP1,RP2,RP3,并根据试验实际的边界条件对这 3 个耦合点进行约束和荷载设置(图 12),即对柱顶设置 x,z 两个方向的位移约束($u_x=u_z=0$)和 x,z 两个方向的转动约束($\delta_x=\delta_z=0$),对柱底设置 x,y,z 三个方向的位移约束($u_x=u_y=u_z=0$)和 x,z 两个方向的转动约束($\delta_x=\delta_z=0$)。根据试验的实际情况,在柱顶耦合点处施加了反轴向压力,并在梁端耦合点处施加了低周反复荷载。

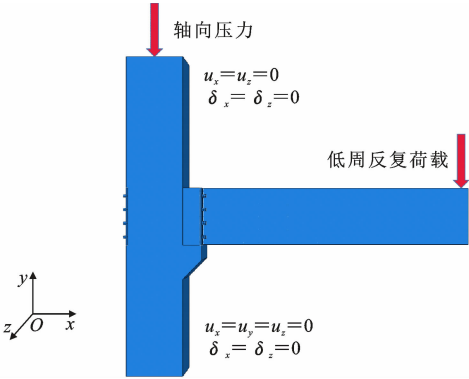


图 12 边界条件与荷载加载
Fig. 12 Boundary Conditions and Loading

3.5 有限元结果验证

为了验证有限元分析的正确性,将 PC1 节点的

ABAQUS 有限元软件模拟结果与试验结果进行对比,如图 13 所示。由图 13 可知:模拟结果与试验结果的滞回曲线均较为吻合。有限元模拟结果与试验结果略有差异,试验滞回曲线的“捏缩”效应比有限元模拟的更加明显,这是因为试验构件的钢筋发生黏结滑移而有限元模拟的情况更加理想所导致的,但两者之间的误差相对较小。图 14 为有限元模拟的试验节点 PC1 的等效塑性应变云图与试验破坏特征的对比,梁的翼缘顶部和牛腿承台处为主要分布区域,这与试验的结果基本一致。上述现象说明有限元模拟能够很准确地模拟节点构件的抗震性能,因此,所提出的有限元建模方法可以用于进一步的模拟分析。

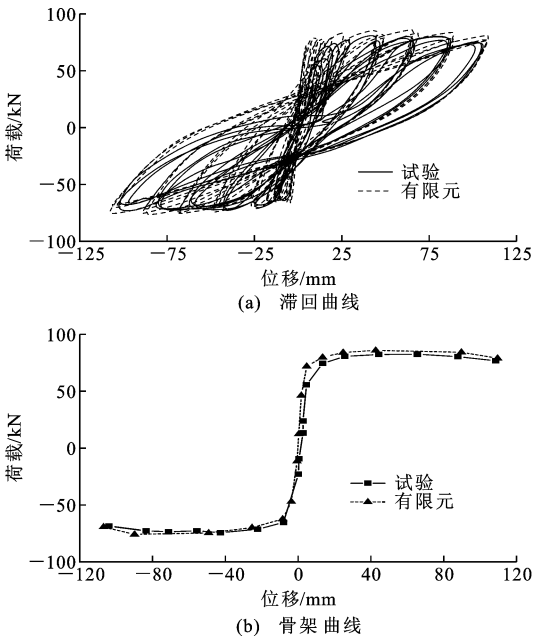


图 13 试验结果与有限元模拟结果对比
Fig. 13 Comparison of Test Results and Finite Element Simulation Results

3.6 滞回性能

图 15 为基于 ABAQUS 有限元软件模拟的现浇节点和试验节点 PC1 的滞回曲线。加载前期,现浇节点的承载能力比 PC1 节点较好,随着位移等级的加大,在加载中期,PC1 的承载能力明显优于现浇节点,但现浇节点的滞回曲线比试验节点的滞回曲线更为饱满。以上说明现浇节点在耗能能力方面比试验节点更好,但试验节点的极限承载力优于现浇节点,证明该节点具有一定的研究意义。

3.7 混凝土塑性损伤模型

图 16 为现浇节点和试验节点 PC1 在破坏阶段的混凝土塑性损伤模型。由图 16 可知,试验节点的

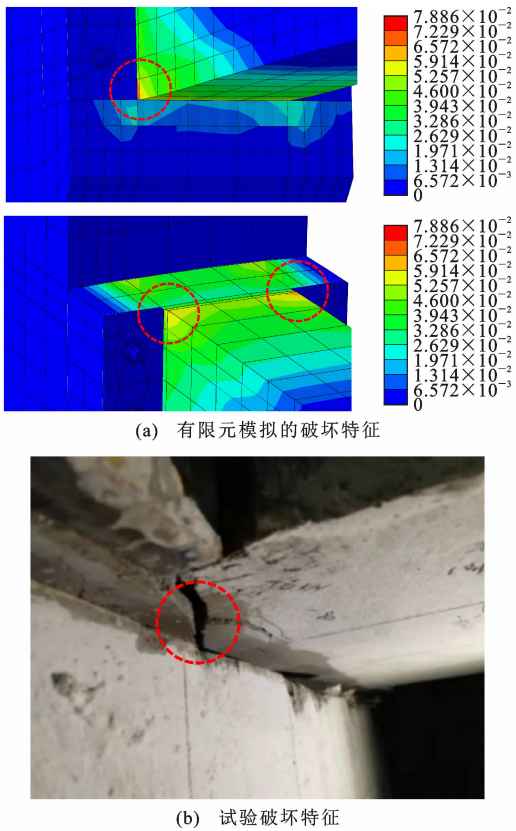


图 14 有限元与试验破坏特征的对比
Fig. 14 Comparison of Failure Characteristics by Finite Element and Test

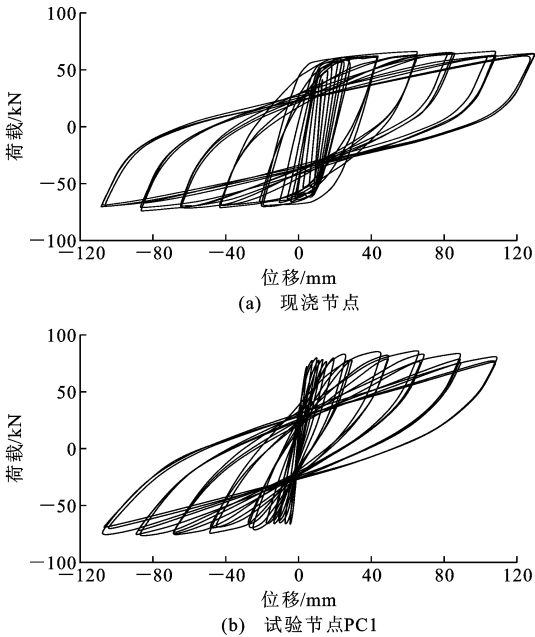


图 15 有限元模拟节点的滞回曲线
Fig. 15 Hysteresis Curves of Finite Element Simulation Node

混凝土塑性损伤区域主要集中在 T 形梁和螺栓孔洞周围的节点核心区,这与试验结果相吻合。因此,

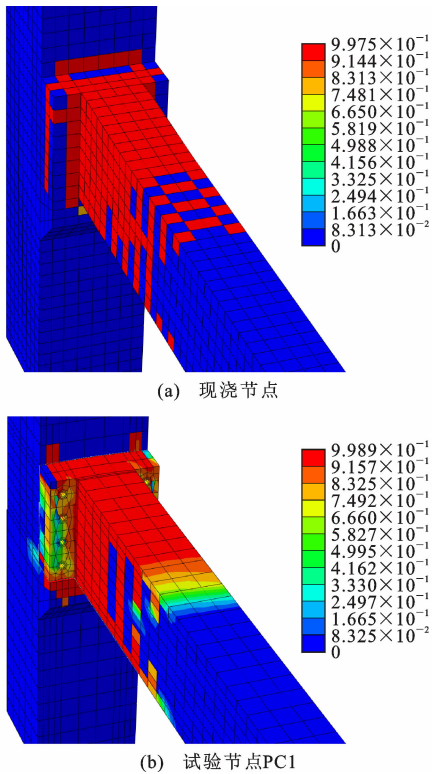


图 16 混凝土塑性损伤模型
Fig. 16 Plastic Damage Model of Concrete

研究后期可以通过在 T 形梁的翼缘上端添加耗能角钢来减少混凝土的塑性破坏现象。

对比现浇节点和试验节点的混凝土塑性损伤模型可以发现,试验节点由于螺栓孔洞的存在导致节点核心区的混凝土塑性损伤产生不均匀集中,而现浇节点的混凝土塑性损伤区域主要集中在 T 形梁端,且大部分处于较大损伤值的状态(DAMAGET 的损伤值大于 0.97)。

4 结 语

(1)2 种螺栓强度连接的梁柱节点均具有良好的承载能力和耗能能力,符合“小震不坏,中震可修,大震不倒”的设计要求,且在低周反复荷载的作用下,2 组节点的滞回曲线均出现明显的“捏缩”现象,导致这种现象的原因是螺栓与螺栓孔洞之间存在相对滑移,这也使得 2 组节点构件的耗能能力未能充分地发挥。

(2)试验节点在耗能能力方面与现浇节点相比较差,但承载能力方面却优于现浇节点。

(3)2 组试验节点构件均为梁端弯曲破坏模式,满足“强柱弱梁”的设计要求,明牛腿的存在解决了螺栓节点安装精度和装配效率等问题,同时还避免了临时支撑所带来的额外费用。

(4)基于 5.6 级和 8.8 级螺栓连接的梁柱节点的等效黏滞阻尼系数 h_e 分别在 0.062~0.195 和 0.067~0.09 之间。说明 5.6 级螺栓连接的节点构件的耗能能力明显优于 8.8 级螺栓连接的节点构件。

(5)8.8 级螺栓具有更高的极限承载力、变形能力以及较快的刚度退化速率,在正向加载下,5.6 级螺栓连接节点的极限承载力为 8.8 级螺栓连接节点的 85.42%。在负向加载下,5.6 级螺栓连接节点的极限承载力为 8.8 级螺栓连接节点的 83.68%。

参考文献:

References:

- [1] LIU Y, GUO Z, DING J, et al. Experimental Study on Seismic Behaviour of Plug-in Assembly Concrete Beam-column Connections [J]. Engineering Structures, 2020, 221: 111049.
- [2] DING K W, MA L. Pseudo-static Analysis of Fabricated Steel Cage Concrete Frame Structure [C]// AMMME. Proceedings of 2016 International Conference on Applied Mechanics, Mechanical and Materials Engineering. Lancaster: DEStech Publications, 2017: 332-336.
- [3] DING K W, LIU J H, REN J, et al. Dynamic Responses of Cellular Metal-filled Steel Beam-column Joint Under Impact Loading[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University: Science, 2020, 25(3): 1-10.
- [4] 丁克伟, 陈东, 刘运林, 等. 一种新型拼缝结构的叠合板受力机理及试验研究[J]. 土木工程学报, 2015, 48(10): 64-69.
DING Ke-wei, CHEN Dong, LIU Yun-lin, et al. Theoretical and Experimental Study on Mechanical Behavior of Laminated Slabs with New Type Joints [J]. China Civil Engineering Journal, 2015, 48(10): 64-69.
- [5] 丁克伟, 韩苗兰, 李兴龙. 装配式半刚性梁柱螺栓连接节点抗震性试验研究[J]. 合肥工业大学学报: 自然科学版, 2020, 43(6): 805-810.
DING Ke-wei, HAN Miao-lan, LI Xing-long. Experimental Research on Seismic Performance of Semi-rigid Bolted Beam-column Joints [J]. Journal of Hefei University of Technology: Natural Science, 2020, 43(6): 805-810.
- [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 Cong-xiao, ZHOU Yun, LAI Wei-shan, et al. Experiment on Seismic Performance of Cast-in-situ and Prefabricated Concrete Frame Structure Joints [J]. Journal Architecture and Civil Engineering, 2015, 32(3): 60-66.
- [7] WANG H, 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] KIM S K, KIM J M, HONG W K. Material Nonlinear Finite Element Analysis of Hybrid Hollow Concrete Beams Encasing Steel Sections [J]. Structures, 2020, 25: 500-519.
- [9] YANG T Y, DASHLEJEH A A, ARABZADEH A, et al. New Model for Prediction of Ultimate Load of Prestressed RC Deep Beams [J]. Structures, 2020, 23: 509-517.
- [10] OLIVEIRA J L A, ARAUJO D L, EI DEBS M K, et al. Precast Beam-column Connection Subjected to Cyclic and Dynamic Loadings [J]. Structural Engineering International, 2017, 27(1): 114-126.
- [11] 王清湘, 赵国藩, 林立岩. 高强混凝土柱延性的试验研究[J]. 建筑结构学报, 1995, 16(4): 22-31.
WANG Qing-xiang, ZHAO Guo-fan, LIN Li-yan. Study on Ductility of Reinforced High Strength Concrete Columns [J]. Journal of Building Structures, 1995, 16(4): 22-31.
- [12] GB 50011—2010, 建筑抗震设计规范[S].
GB 50011—2010, Code for Seismic Design of Buildings. [S].
- [13] GB/T 50081—2002, 普通混凝土力学性能试验方法标准[S].
GB/T 50081—2002, Standard for Test Method of Mechanical Properties on Ordinary Concrete [S].
- [14] GB 50010—2010, 混凝土结构设计规范[S].
GB 50010—2010, Code for Design of Concrete Structures [S].
- [15] JGJ/T 101—2015, 建筑抗震试验规程[S].
JGJ/T 101—2015, Specification for Seismic Test of Buildings [S].
- [16] ASHRAF E, TAREK S, SALAH N, et al. Behavior of Extended End-plate Bolted Connections Subjected to Monotonic and Cyclic Loads [J]. Engineering Structures, 2019, 190: 142-159.
- [17] BRUNESI E, NASCIMBENE R, RASSATI G A. Response of Partially-restrained Bolted Beam-to-column Connections Under Cyclic Loads [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2014, 97: 24-38.
- [18] ZHOU Y, HU X, PEI Y, et al. Dynamic Load Test on Progressive Collapse Resistance of Fully Assembled Precast Concrete Frame Structures [J]. Engineering Structures, 2020, 214: 110675.