

[文章编号] 1003-4684(2023)02-0074-05

基于 ABAQUS 的装配式结构新型节点抗震性能研究

桂文祥, 蔡洁, 徐琪

(湖北工业大学土木建筑与环境学院, 湖北 武汉 430068)

[摘要] 基于新型装配式节点(PPEFF 节点)拟静力试验,用有限元软件 ABAQUS 对 PPEFF 节点进行有限元非线性分析。得到的滞回曲线与试验滞回曲线吻合良好,说明该有限元模型能够较好地模拟节点的受力状态。在此基础上,研究混凝土强度等级、轴压比、箍筋配箍率等相关参数对 PPEFF 节点抗震性能的影响。结果表明:混凝土强度等级对节点承载力的影响较为明显,轴压比对节点承载力的影响较小,而箍筋配箍率对节点承载力影响不明显。

[关键词] PPEFF 节点; 拟静力试验; ABAQUS; 有限元非线性分析; 抗震性能

[中图分类号] TU37 **[文献标识码]** A

装配式建筑凭借其较好的施工效率、工期较短、绿色环保等诸多优点,在目前的建筑中广泛应用,大力发展装配式建筑也有利于促进我国建筑工业化。然而,在国内外的震害中,装配式建筑破坏较为严重的区域往往在节点核心区,节点核心区的严重破坏使节点失去了承载能力,从而导致结构破坏。因此,对于装配式结构节点的研究十分必要。

现阶段,装配式混凝土结构中梁和柱之间的连接方式有干式连接和湿式连接两种^[1]。干式连接是指在现场不需要现浇混凝土或者用灌浆材料连接的方式,而是通过螺栓、焊接或者预应力等方式将节点连接起来。常见的干式连接有预应力连接、牛腿连接、螺栓连接等。湿式连接是指预制构件之间采用现场现浇混凝土或灌浆材料的连接方式,湿式连接现场存在大量的湿作业,施工效率较低,内部钢筋多采用套筒连接,连接质量可控性不足。而干式连接凭借施工便捷以及更高的效率逐渐成为现在的研究热点^[2]。在干式连接方法中,后张预应力连接具有残余变形小,震后损伤小以及自复位能力好的特点,但相关研究发现:该连接方式的结构耗能能力不足^[3-4]。张锡冶等^[5]通过对 4 个钢-混凝土预制混合梁试件进行低周往复试验,通过对试件的破坏模式、受力过程以及受力机理的研究发现:试件在整个加载过程中保持了较好的整体性,而混凝土与钢梁段连接处的破坏相对严重,自复位性能以及震后恢复性能较差。Morgen 等^[6]提出一种安装有阻尼器

的装配式节点,对节点进行拟静力试验。研究表明该节点具有较好的耗能能力,但是由于阻尼器的安装会对预制构件的制造与安装要求更高,提高了施工难度,不利于施工效率的提升。

在以上现状的基础上,提出一种后张无粘结预应力装配式节点,分析了混凝土强度等级、轴压比、箍筋配箍率等相关参数对节点抗震性能的影响,为 PPEFF 节点的推广提供支持。

1 试验概况

1.1 试验设计及制作

本文设计 5 个 PPEFF 节点足尺试件,梁截面尺寸为 300 mm×600 mm,梁长 1800 mm,柱截面尺寸为 500 mm×500 mm,柱长 2600 mm,梁柱混凝土等级均为 C40,梁柱均采用 HRB400 级钢筋。其余参数见表 1。

表 1 试件相关参数

编号	耗能钢筋配筋率/%	无粘结段/mm	预应力大小/MPa
JD1	0.38	100	1150
JD2	0.38	200	1150
JD3	0.38	300	1150
JD4	0.24	200	1150
JD5	0.59	200	1150

试验采用的 PPEFF 节点柱在工厂预制,梁为叠合构件,梁下 400 mm 为工厂预制,梁上 200 mm 为现场现浇。梁柱中心均预留预应力孔道,梁上部

[收稿日期] 2021-11-19

[基金项目] 国家重点研发计划“科技助力经济 2020”重点专项项目(2020ZLSH08)

[第一作者] 桂文祥(1996-),男,湖北荆门人,湖北工业大学硕士研究生,研究方向为装配式混凝土结构

耗能钢筋和抗剪钢筋均通过柱内预埋的直螺纹套孔与柱连接,同时,耗能钢筋靠近柱端用 PVC 管与热缩管做无粘结处理。梁和柱使用无粘结预应力筋使其连接成为一个整体。节点无粘结段构造及节点试验如图 1 所示。



(a) 无粘结段构造

(b) 节点试验

图 1 无粘结段构造及节点试验图

1.2 加载制度

1) 试验采用力-位移混合控制加载方式。节点屈服前,加载装置采用荷载控制,采用屈服荷载 P_{cr} 为控制荷载,加载值分别为 $0.5 P_{cr}$ 、 $0.7 P_{cr}$ 、 P_{cr} ,且每级循环一次。节点屈服后,加载装置采用位移控制,记屈服荷载对应的位移为 Δ ,以 $n\Delta$ ($n=1, 2, 3, \dots$) 的梁端位移进行加载,每级位移循环 2 次。试验加载程序如图 2 所示。

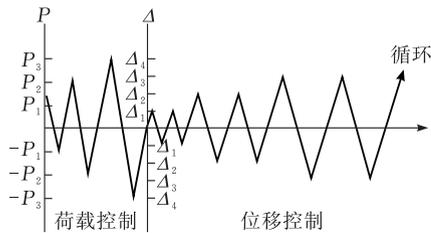


图 2 加载程序示意图

2) 当骨架曲线荷载已逐渐低于极限荷载的 85% 或试件破坏试验结束加载。

1.3 试验结果

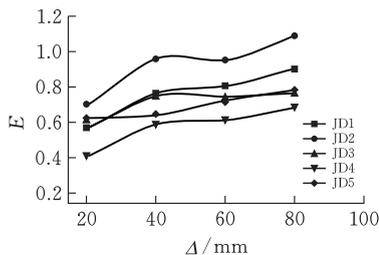


图 3 能量耗散系数对比图

通过对 5 组试件的能量耗散系数对比得出,随着梁端位移作用的增大,5 组试件的耗能能力均有不同程度的提高,在同级位移作用下 JD2 的耗能能力均强于其他 4 组节点,这是由于无粘结段长度适中时,耗能钢筋的刚度比较理想,其所承受的应力能较快地达到屈服强度,且不会过早达到极限强度,有利于试件耗散更多能量^[7]。

2 有限元模型建立

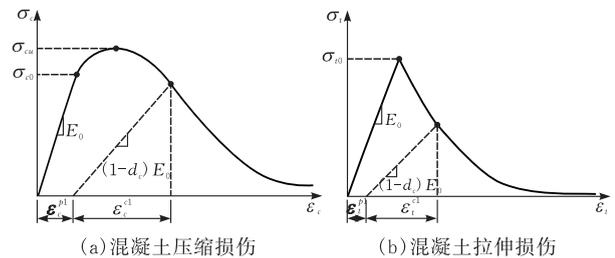
2.1 简化及假定

为了使有限元分析更加准确,与实际试验符合良好,采用以下基本假设:

- 1) 假设梁预制部分与现浇部分混凝土粘结良好,能够共同受力,协调变形;
- 2) 假设耗能钢筋、抗剪钢筋与混凝土协调变形(除耗能钢筋无粘结段外),无相对滑移^[7]。

2.2 材料本构模型

混凝土塑性损伤模型能够较好的模拟出混凝土的非线性行为。为提高模拟的精确性,需考虑试件在往复荷载作用下的累计损伤,混凝土的塑性损伤模型如图 4 所示。



(a) 混凝土压缩损伤

(b) 混凝土拉伸损伤

图 4 混凝土压缩与拉伸损伤曲线

钢筋的本构关系采用双折线模型,钢材屈服前的应力-应变关系为斜直线, E_0 为屈服前的弹性模量, E_s 为屈服后的弹性模量,钢筋的本构曲线如图 5 所示。由于本节点采用预应力钢绞线,钢绞线无明显的屈服点,为计算方便,预应力钢绞线采用线弹性本构模型,其本构曲线如图 6 所示。

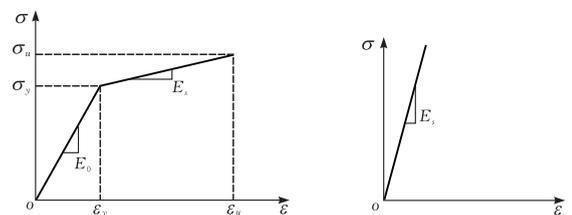


图 5 钢筋本构

图 6 预应力钢绞线本构

2.3 单元选用及网格划分

混凝土建模时采用三维实体单元,耗能钢筋和抗剪钢筋采用实体单元建模,箍筋和预应力筋采用桁架单元建模。

在网格划分方面,既要考虑模拟精度又要考虑计算效率,网格尺寸过大,将会导致有限元计算结果与实际试验结果相差较大,网格尺寸过小,将会导致有限元计算效率降低。因此,选取合适的网格尺寸至关重要。通过对本节点模型不断试算,取混凝土梁和柱的网格尺寸为 50 mm,耗能钢筋、抗剪钢筋网格尺寸为 10 mm,预应力筋网格尺寸为 230 mm,柱内纵筋网格尺寸为 260 mm,梁纵筋网格尺寸为

180 mm,梁、柱箍筋网格尺寸为 25 mm。

2.4 边界条件及加载

为更好模拟节点在实际试验中的受力状态,约束有限元模型节点柱端平动位移,使模型柱端的边界等同铰接。节点模型预应力采用降温法施加,在梁端施加往复荷载,加载采用力—位移混合控制。

3 有限元计算结果验证

试件 JD2 有限元模型模拟的滞回曲线与实际试验对比如图 7 所示,可以发现在加载初期,两条曲线刚度基本重合,有限元曲线与实际试验曲线基本重合,误差在可接受范围之内,可见本文所采取的有限元建模方法是有效可行的(试件 JD1、JD3、JD4、JD5 实测滞回曲线与有限元模拟滞回曲线基本吻合)^[8]。下文有限元变参数分析均以 JD2 为基础,通过改变相关参数来探究对 PPEFF 节点抗震性能的影响。

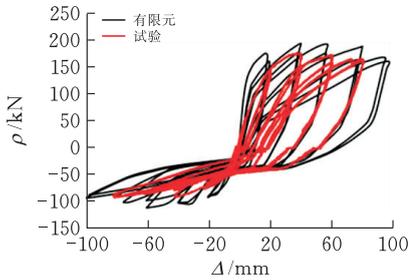


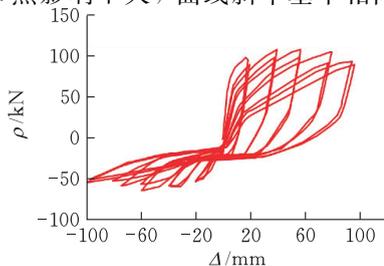
图 7 试验模拟滞回曲线对比

4 有限元变参数分析

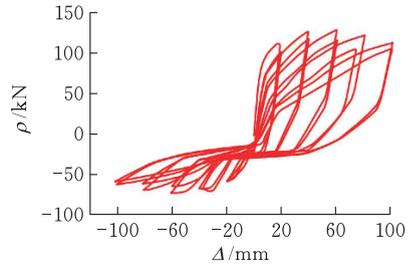
4.1 混凝土强度等级

本文在已经建立的 PPEFF 节点模型基础上,以 JD2 为原模型,通过改变混凝土的本构模型来模拟不同混凝土强度等级对 PPEFF 节点抗震性能的影响,本文选取混凝土强度等级为 C40、C50、C60 的 PPEFF 节点模型分析不同混凝土强度等级对节点滞回曲线和骨架曲线的影响。

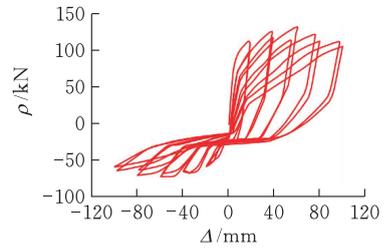
不同混凝土强度等级下三组 PPEFF 节点试件的滞回曲线如图 8 所示。由图 8 滞回曲线可以看出,在位移作用较小的阶段,混凝土强度等级对 PPEFF 节点影响不大,曲线斜率基本相同,随着梁



(a)C40 滞回曲线



(b)C50 滞回曲线



(c)C60 滞回曲线

图 8 不同混凝土强度等级节点滞回曲线

端位移作用的增大,混凝土强度等级越高,滞回曲线所围的面积越大,耗能越强,可见混凝土强度等级在一定程度上可以提高节点的耗能能力。

不同混凝土强度等级下 PPEFF 节点的骨架曲线如图 9 所示。

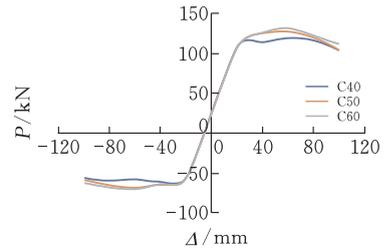


图 9 不同混凝土强度等级节点骨架曲线对比

通过图 9 三组不同混凝土强度等级节点的骨架曲线对比可以看出,在位移作用较小的阶段,三组试件的骨架曲线基本重合,混凝土强度等级在这一阶段对节点承载力影响不大,但是随着梁端位移作用逐步加大,三组试件骨架曲线发生明显变化,可以看出随着混凝土强度等级的提高,节点承载力加大,混凝土强度等级对节点承载能力有较大影响。

4.2 轴压比

在已建立的 PPEFF 节点模型基础上,以 JD2 为原模型,通过改变柱顶轴压力来模拟不同轴压比对 PPEFF 节点抗震性能的影响。本文选取轴压比为 0.2、0.3、0.4 的 PPEFF 节点模型来分析在不同轴压比情况下节点滞回曲线和骨架曲线情况。

不同轴压比下三组 PPEFF 节点试件的滞回曲线如图 10 所示。由图 10 滞回曲线可以看出:

1)在力控制阶段,三组试件的滞回环面积较小,耗能性能较差,进入位移控制阶段时,三组试件处于弹塑性变形阶段,随着梁端位移作用不断增大,滞回

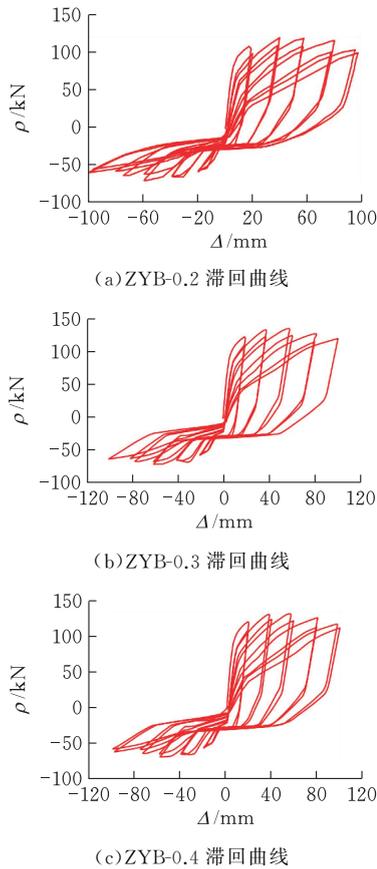


图 10 不同轴压比节点滞回曲线

环所围的面积增大,试件耗能能力增强。

2) 三组试件轴压比分别为 0.2、0.3、0.4,但三组试件滞回曲线所围面积基本一致,说明轴压比对节点耗能能力影响不大。

PPEFF 节点不同轴压比下的骨架曲线如图 11 所示。

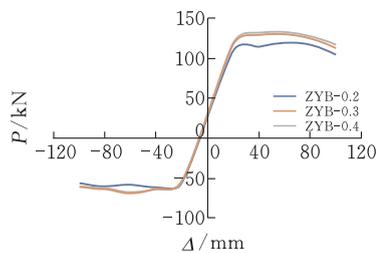


图 11 不同轴压比节点骨架曲线对比

由图 11 的骨架曲线可以看出:

1) 在弹性阶段,三组试件骨架曲线基本重合,在节点屈服时,骨架曲线出现明显变化,轴压比为 0.3 和 0.4 的试件屈服荷载明显高于轴压比为 0.2 的试件,说明提高节点轴压比可以一定程度上提高节点屈服荷载。

2) 节点屈服后,三组试件骨架曲线出现明显差异,三组试件峰值荷载随着轴压比的增大而变大,说明轴压比对节点峰值荷载的影响不大。

4.3 箍筋配箍率

本文在已建立的 PPEFF 节点模型基础上,以

JD2 为原模型,通过改变箍筋配箍率来模拟不同箍筋配箍率对 PPEFF 节点抗震性能的影响。本文选取箍筋配箍率为 0.34%、0.52%、0.75% 的 PPEFF 节点模型来分析不同箍筋配箍率对节点滞回曲线和骨架曲线的影响。

不同箍筋配箍率下三组 PPEFF 节点试件的滞回曲线如图 12 所示。

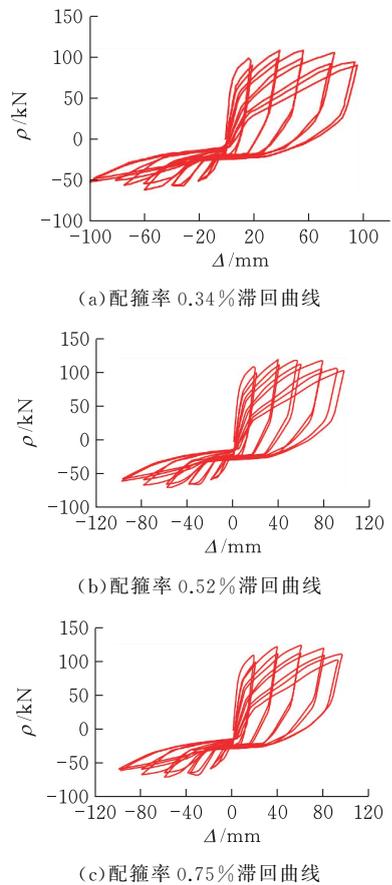


图 12 不同配箍率节点滞回曲线

由图 12 滞回曲线可以看出:

1) 三组试件在试验加载初期,滞回曲线切线斜率基本相同,节点刚度变化不大,三组试件在不同配箍率情况下滞回曲线饱满度基本相似,说明三组试件耗能能力差别不大。

2) 随着配箍率的增加,试件的滞回曲线下降段变得更为缓慢,但总体而言,配箍率对三组试件滞回曲线形态影响不明显^[9]。

3) 配箍率为 0.34% 和 0.52% 时,节点滞回曲线在位移为 60 mm 时达到峰值荷载,随后荷载出现下降,而随着配箍率提高到 0.72%,节点滞回曲线在位移为 40 mm 时达到峰值荷载,随后荷载出现下降,说明提高节点配箍率能提前使节点达到极限承载力。

PPEFF 节点不同配箍率下的骨架曲线如图 13 所示。

由图 13 的骨架曲线可以看出:

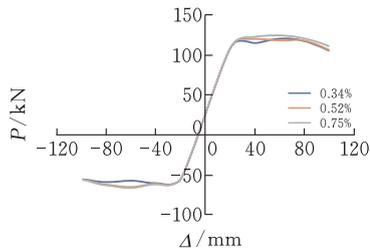


图 13 不同配箍率节点骨架曲线对比

1)不同配箍率的节点在弹性阶段刚度基本相同,节点屈服荷载相同,随着梁端位移作用的增大,节点承载能力逐渐增大。

2)随着节点配箍率的增加,试件的承载力都在增大,配箍率为 0.52% 时节点承载力较配箍率为 0.34% 提高了 0.84%,配箍率为 0.75% 时节点承载力较配箍率为 0.34% 提高了 4.2%,可见提高节点配箍率对节点承载力影响不明显。

5 结论

通过对 PPEFF 节点的试验研究、有限元非线性分析,得出以下结论:

1)通过对 5 组试件进行低周往复试验得出:当耗能钢筋配筋率为 0.34% 且无粘结段长度为 200 mm 时,节点耗能能力较强。

2)通过有限元滞回曲线与实际试验滞回曲线对比可知本文所采取的有限元建模方法有效可行,能较好地模拟节点在地震作用下的受力状态。

3)混凝土强度等级能提升节点的承载能力,混凝土强度等级越高,节点承载力越大。

4)轴压比在一定程度上可以提高节点承载力,但影响不大。箍筋配箍率对节点承载力影响不明显。

[参 考 文 献]

- [1] 吴超,谢建和,刘锋.装配式混凝土框架梁柱节点研究动态和展望[J].混凝土,2020(04):128-133.
- [2] 冯世强,杨勇,薛亦聪,等.预应力自复位装配式混合框架结构抗震性能试验研究[J].建筑结构学报,2022,43(07):111-122.
- [3] PRIESTLEY M. Overview of PRESS research program[J]. PCI Journal,1991,36(04):50-57.
- [4] STANTON J, NAKAKI S. Design guidelines for precast concrete seismic structural systems[R]. Seattle: Department of Civil Engineering, University of Washington, 2002.
- [5] 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(04):47-55.
- [6] MORGEN B, KURAMA Y. Seismic design of friction-damped precast concrete frame structures [J]. Journal of Structural Engineering, 2007, 133 (11): 1501-1511.
- [7] 刘晓旭.装配式结构新型节点建模方法及耗能性能研究[D].武汉:湖北工业大学,2019.
- [8] 吕远贵,刘李智,崔琦,等.关于抗剪钢筋对预压装配式节点抗震性能影响的研究[J].工业建筑,2022,52(03):105-111.
- [9] 胡锐,方志,许宝丹.不同配箍率和钢纤维掺量 UHPC 柱抗震性能试验[J].中国公路学报,2021,34(08):65-77.

Study on Seismic Performance of New Joints of Fabricated Structures based on ABAQUS

GUI Wenxiang, CAI Jie, XU Qi

(School of Civil Engin., Architecture and Environment, Hubei Univ., of Tech., Wuhan 430068, China)

Abstract: Based on the quasi static test of a new type of fabricated joint (PPEFF joint), the finite element nonlinear analysis of PPEFF joint is carried out by using the finite element software ABAQUS. The obtained hysteretic curve is in good agreement with the experimental hysteretic curve, which shows that the finite element model can better simulate the stress state of the joint. On this basis, the effects of concrete strength grade, axial compression ratio and stirrup ratio on the seismic performance of PPEFF joints are studied. The results show that the influence of concrete strength grade on the joint bearing capacity is obvious, the influence of axial compression ratio on the joint bearing capacity is small, and the influence of stirrup ratio on the joint bearing capacity is not obvious.

Keywords: PPEFF joint; quasi static test; ABAQUS; finite element nonlinear analysis; seismic performance

[责任编辑:裴 琴]