

• 研究论文 •

DOI:10.15961/j.jsuese.201701018

新型装配式混凝土框架梁柱节点抗震性能

于建兵^{1,2}, 郭正兴^{2*}, 郭 悬¹

(1.扬州大学 建筑科学与工程学院, 江苏 扬州 225127; 2.东南大学 土木工程学院, 江苏 南京 210096)

摘 要:为了能够综合评价一种钢绞线锚入式新型节点体系的抗震性能,对4个不同构造形式的预制装配节点及1个现浇节点进行低周反复荷载试验,考察各个节点的破坏过程及破坏形态,分析节点的骨架曲线、耗能能力及刚度退化。试验结果表明所有节点都发生了梁端弯曲破坏,节点区仅仅出现几条微小的交叉裂缝。在加载前期,所有预制节点的耗能能力不如XJ节点,设置附加钢筋的预制节点PC1和PC2,在加载后期的耗能能力强于XJ节点和预制PC3、PC4节点。由于预制节点在键槽处,存在新老混凝土结合面,导致所有预制节点在弹性阶段刚度都小于XJ节点,进入屈服阶段后,键槽段箍筋加密及附加钢筋的作用,使得PC1和PC2节点刚度大于XJ节点。综合来看,附加钢筋对于节点的承载能力及耗能性能都有所贡献。试验结果的基础上,采用ABQUAS对节点进行参数化分析,通过改变轴压比、混凝土强度等级、节点核心区附加钢筋直径等参数,得出不同的参数变化对预制节点力学性能的影响。

关键词:装配式; 预应力; 梁柱节点; 抗震性能; 有限元

中图分类号:TU371.1

文献标志码:A

文章编号:2096-3246(2018)03-0209-07

Seismic Behavior of a New Type Prefabricated Concrete Frame Beam-column Connections

YU Jianbing^{1,2}, GUO Zhengxing^{2*}, GUO Xuan¹

(1.College of Civil Sci. and Eng., Yangzhou Univ., Yangzhou 225127, China; 2.School of Civil Eng., Southeast Univ., Nanjing 210096, China)

Abstract: In order to comprehensively evaluate the seismic performance of a new type strand anchored precast concrete frame connection, low-cycle repeated loading tests were conducted on 4 prefabricated assembly connections and 1 cast-in-situ connection. The destructive processes and destruction patterns of each connection was investigated, the skeleton curves, energy dissipation capacity and stiffness degradation of the connections were analyzed. The experimental results show that the beam bending damage occurs at all connections, and there are only a few tiny cross-cracks in node area. In the pre-loading stage, all the prefabricated connections have less energy-consuming capacity than the XJ nodes, and the prefabricated connections PC1 and PC2 with additional rebar, the post-loading energy dissipation capability is stronger than that of the XJ and prefabricated PC3 and PC4 connections. Due to the prefabricated connections in the keyway there are new and old concrete interface, resulting in that the stiffness of all the prefabricated connections are less than that of XJ connection. After entering the yielding stage, the keyway hoop encryption and additional reinforcement, making PC1 and PC2 connections stiffness greater than XJ node. In general, the additional reinforcement contributes to the carrying capacity and energy dissipation of the connections. Based on the experimental results, the parametric analysis of the connections was carried out by ABQUAS. The influences of different parameters on the mechanical properties of the prefabricated connections were obtained by changing the axial compression ratio, the concrete strength grade and the additional steel bar diameter in the nodal area.

Key words: precast style; prestressed; beam-to-column connections; seismic performance; finite element

据统计,中国农民工数量从2011年到2016年的数量增长趋势每年都在减缓,并且建筑工人的老龄

化较为严重,主要原因是由于施工现场的工作环境较差,年轻人都不愿意再从事建筑这个行业^[1]。同时

收稿日期:2017-12-04

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2016YFC0701703);扬州市青年基金资助项目(YZ2017101)

作者简介:于建兵(1983—),男,博士,讲师。研究方向:抗震结构工程。E-mail: jlyujianbing2008@163.com

* 通信联系人 E-mail: guozx195608@163.com

网络出版时间:2018-05-05 17:49:00

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1773.TB.20180505.1749.006.html>

<http://jsuese.ijournals.cn>

<http://jsuese.scu.edu.cn>

传统的建筑模式对环境带来巨大的冲击,据统计,每年城市建筑垃圾占垃圾总量的30%~40%^[2]。

针对传统建造模式所存在的问题,近些年国家在大力推行建筑工业化,预制装配混凝土结构是工业化建筑的方式之一。所谓装配式混凝土结构,是指建筑物的主要构件在工厂进行加工制作,然后通过运输工具运到现场采用可靠的连接方式将各构件拼装在一起。减少了现场所需工人数量,同时减少了现场湿作业及混凝土养护工作,有利于实现“四节一环保”的绿色发展要求^[3-7]。

目前国内预制装配混凝土结构的研究和应用多集中于预制装配剪力墙结构^[2]。实际上,框架结构更易于模数化、标准化和定型化,预制混凝土框架结构更加具有得天独厚的推广应用优势^[8-9]。通过对已有研究来看,预制混凝土后浇整体式节点的是目前应用和研究的主流热点^[10-11]。但是后浇整体式节点往往存在梁柱受力筋相互碰撞的问题。为了避免这个问题往往需要采取额外的措施保证钢筋之间精准地相互错开,或者直接改变构件的截面尺寸和钢筋的布置位置,这就提高了构件预制加工的难度,增加了生产成本。普通钢筋的硬度较大,如果因为制造误差而导致现场拼装作业不能顺利进行,这将会造成拼装质量和速度。这些因素也间接的影响了装配式框架结构在工程应用上的优势,成为规模推广的瓶颈^[12]。

1 新型节点的提出

针对预制节点加工要求高及运输难度高的问题,提出一种部分高强筋预制梁柱节点,该节点具体构造如下:预制梁底部受力筋采用直径为12.7 mm的钢绞线代替普通钢筋,同时在梁的底部配置2根直径为16 mm的构造钢筋,为了能够固定箍筋的位置,在梁中间部位设置两根直径为10 mm的腰筋,预制梁顶部预留一层厚度为120 mm厚的叠合层,以便于预制梁与板进行可靠的连接,预制梁侧面构造图如图1所示。考虑到配置高强筋的预制梁裂缝开展问题,对预制梁施加预应力,预制梁梁端留有长度为400 mm的键槽,键槽部分为无预应力段,防止该部分混凝土在低周反复荷载作用下大块剥落,将键槽内的箍筋进行加密,间距为50 mm,有利于提高该部分的刚度以及开裂荷载。钢绞线与混凝土之间的粘结性能较普通钢筋与混凝土之间的粘结性能弱,对钢绞线端部做压花锚处理,同时在压花锚端部设置锚固端板,增强钢绞线与混凝土之间的锚固性能。正常情况下,梁柱节点在地震荷载作用下,塑性铰一般出现在梁柱

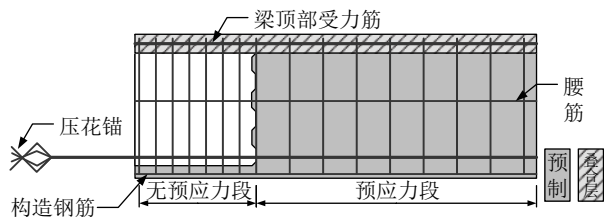


图 1 预制梁构造

Fig. 1 Detail of precast beam

结合面处,在该新型节点中考虑到塑性铰外移能够增加梁柱节点的变形能力,在节点核心区设置了2根直径为18 mm的钢筋,从而增强梁柱结合面处的强度,实现梁端塑性铰外移。预制柱采用与现浇柱相同的配筋,预制柱的上柱在工厂制作时,预埋灌浆套筒,下柱则预留外伸钢筋,在节点拼装时,下柱外伸钢筋直接伸入上柱灌浆套筒内,然后对套筒进行灌浆即实现了柱受力筋的连接。在梁柱拼装时,可以充分利用钢绞线的柔韧性,在键槽范围可以自由掰动,从而可以避免梁柱受力筋在节点区的相互碰撞,提高预制构件工厂的加工制作效率。梁柱节点拼装如图2所示。

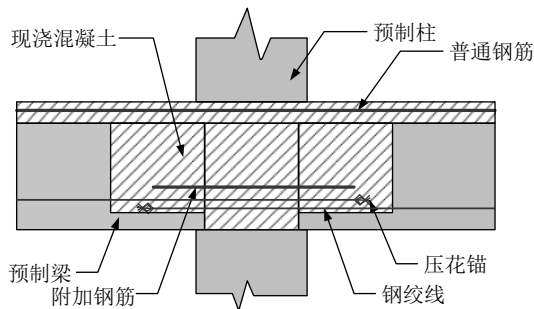


图 2 节点拼装图

Fig. 2 Assembly diagram of connection

2 节点试验研究

2.1 节点设计与制作

试验按照“强柱弱梁,强节点构件”的原则^[13]设计了4个预制节点及1现浇对比,分别编号为PC1、PC2、PC3、PC4和XJ节点,其中XJ节点代表现浇对比节点,PC1节点为节点核心区设置附加钢筋,并且预制梁底部钢绞线在键槽部位设置一段无粘结段,PC2节点为设置附加钢筋,梁底部钢绞线不设置无粘结段,PC3节点为节点核心区不设置附加钢筋,但梁底部钢绞线设置无粘结段,PC4节点为既不设置附加钢筋也不设置无粘结段。本次试验所有节点都采用足尺模型,采用C40混凝土,纵向钢筋均采用HRB335级普通钢筋,箍筋采用HPB300钢筋。节点设计详图见图3。

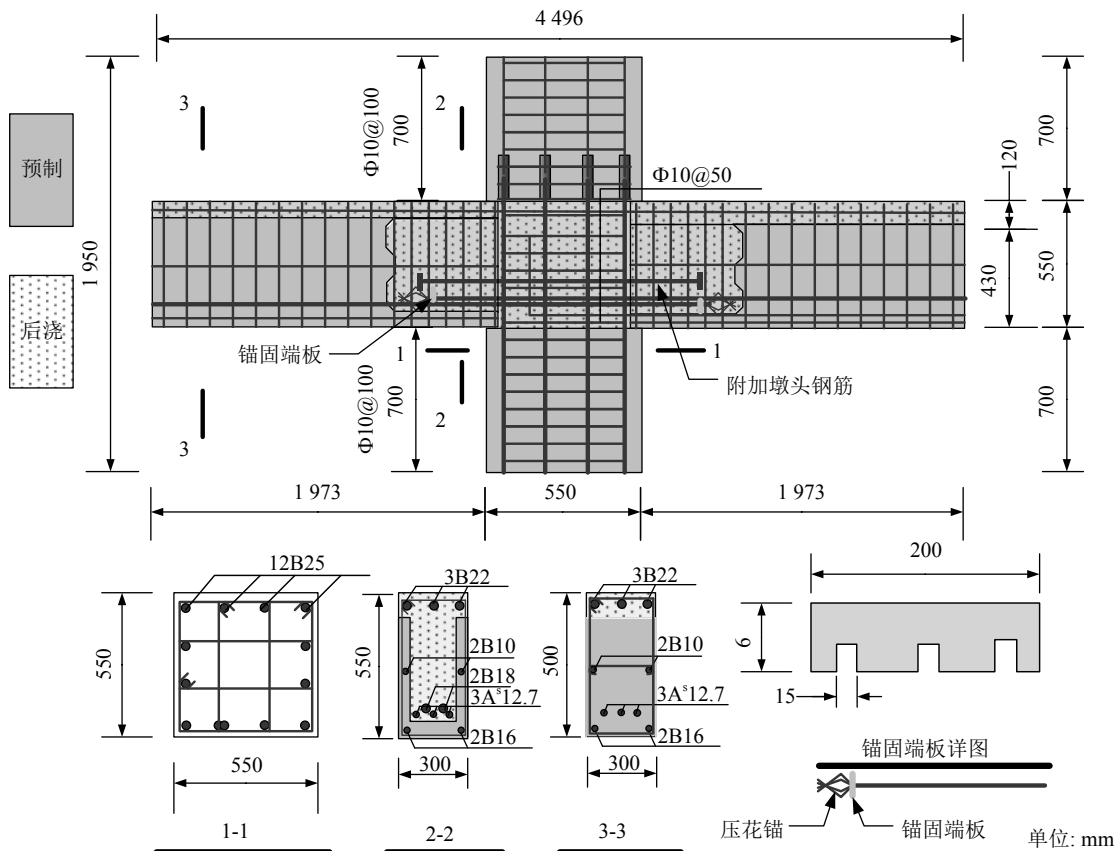


图3 新型节点详图

Fig. 3 The detail of new connection

2.2 试验加载装置及加载程序

加载装置见图4。柱上下端采用铰支座，试验时，由千斤顶对柱顶施加一恒定的轴向力，确保柱的轴压比维持在0.2。柱左右两边梁各放置2个单向千斤顶，施加荷载时，通过油泵连接交叉成组的2个千斤顶对节点施加反对称荷载。根据《建筑抗震试验

方法规程》，对节点进行拟静力试验时，一般采用采用力、位移混合加载控制方法^[14]，力控制加载时，每级荷载只循环1次，进入屈服阶段后，采用位移控制加载，且每级荷载循环3次，加载一直进行到荷载下降到极限荷载的85%。节点加载制度如图5所示。

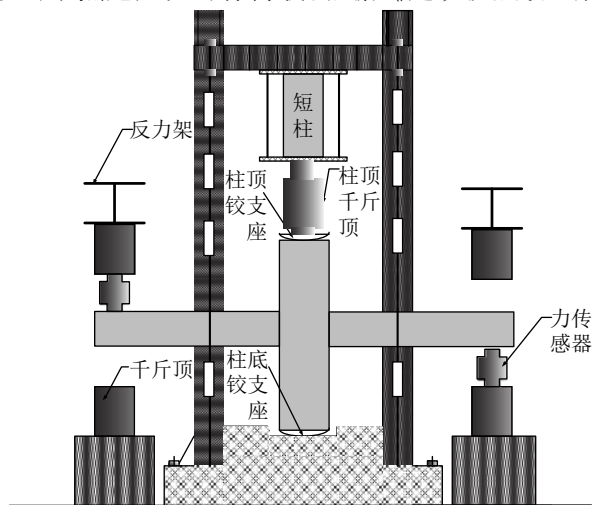


图4 加载装置

Fig. 4 Loading device

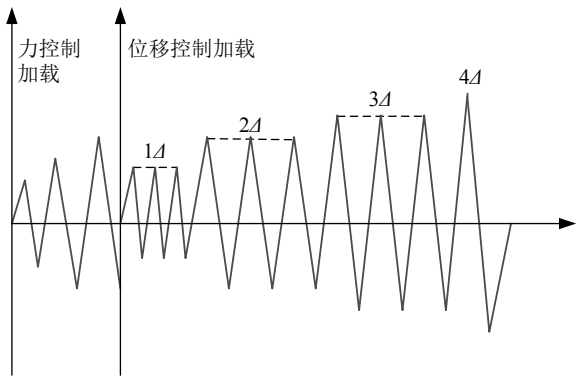


图5 加载制度

Fig. 5 Loading system

2.3 节点试验破坏过程及破坏形态

各个试件虽然构造有所不同，但是破坏过程都经历了3个阶段，即弹性阶段、带裂缝工作阶段和破坏阶段，图6为各个试件在试验中的最终破坏形态。

由图6各节点的最终破坏形态可以看出，XJ节点

梁端塑性铰形成于梁柱结合面处,而在节点核心区设置附加钢筋的节点PC1和PC2节点,塑性铰都有向外转移,其他节点区没有设置附加钢筋的预制节点

塑性铰也都有外移趋势,这主要是由于在节点拼装时,预制梁底部钢筋线伸入到对面梁键槽内,对梁柱结合面也有一定的增强作用。

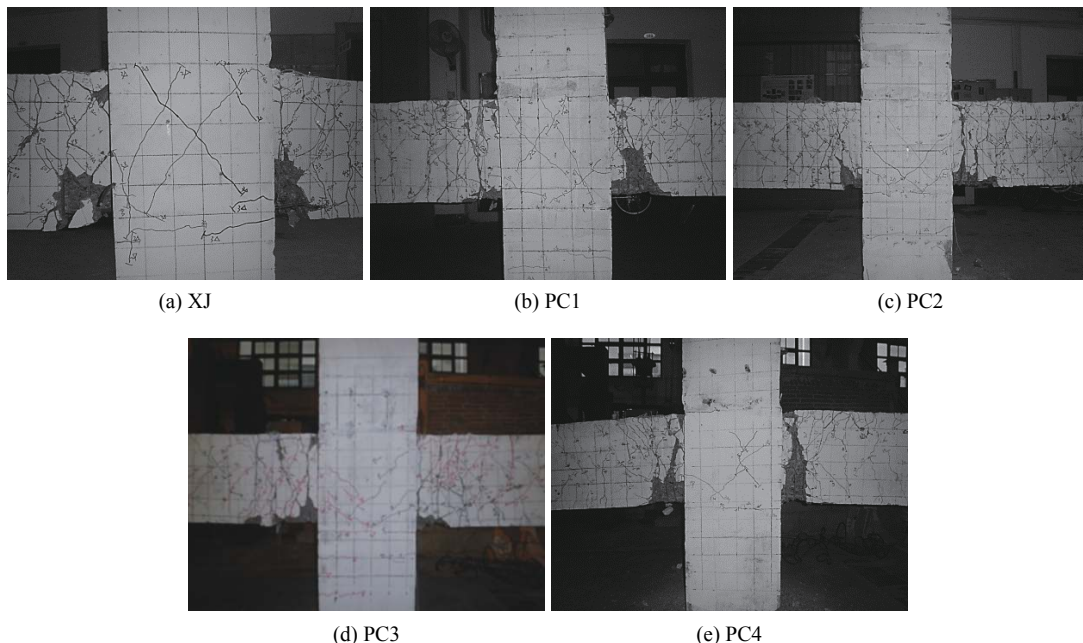


图 6 试件破坏形态

Fig. 6 Destruction form of specimens

本次试验的5个节点都发生了设计所期望“梁铰机制”的弯曲破坏,而节点区仅仅出现几条交叉斜裂缝,没有发生严重的剪切破坏,柱端也没有出现裂缝,说明所有节点都符合设计所要求的“强柱弱梁、强节点弱构件”的设计原则。

3 试验结果分析

3.1 骨架曲线分析

通过各个节点的骨架曲线能够了解到构件的强度、刚度、延性、耗能及抗倒塌能力等,能够定性比较和衡量构件的抗震性能,也是确定恢复力模型中特征点的重要依据^[14]。本次对5个节点进行了分组比较,各节点滞回曲线如图7所示。

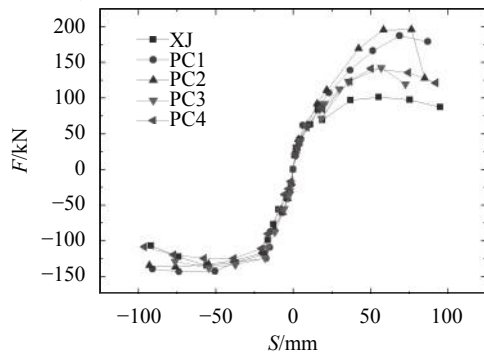


图 7 试件骨架曲线

Fig. 7 Skeleton curves of specimens

从图7中,各个试件滞回曲线的对比发现:1) XJ节点无论向上加载及向下加载,都有较为明显的屈服平台,延性较好。2) PC1和PC2试件骨架曲线类似,PC1和PC2节点骨架曲线较为接近,向下加载时,梁上部普通钢筋受力时,骨架曲线有明显的屈服平台,表现出与XJ节点相同的受力特征,而向上加载时,钢绞线受拉,没有明显的屈服台阶,荷载值随着位移值的增加一直上升,直至破坏时才出现下降段。3)同样,PC3和PC4试件表现出与PC1和PC2类似的规律,只是由于PC1和PC2节点核心区设置了附加钢筋,其极限荷载值相对于PC3和PC4的要大。

3.2 耗能分析

1974年Celebi和Penzien为了研究在反复荷载作用下,滞回环面积的主要影响因素为承载力和刚度退化。在研究中采用了等效粘滞阻尼系数(h_e)来表达^[14],如图8所示。

等效粘滞阻尼系数计算如下:

$$h_e = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{S_{ABC} + S_{CDA}}{S_{OBE} + S_{ODF}} \quad (1)$$

各节点的等效粘滞阻尼系数随加载次数(n)的变化曲线如图9,从图中可以看出,XJ节点等效粘滞阻尼系数基本都大于预制节点,但在加载到第13次即4J时,滞回耗能开始出现下降,导致其粘滞阻尼系数的降低。预制节点的耗能能力随着荷载的施加,呈

现出上升趋势。4个预制节点在13工况前,耗能能力基本相当,节点区配置附加钢筋的节点粘滞阻尼系数在节点进入屈服阶段后,略高于无附加钢筋节点,但加载到13工况时,节点临近破坏,PC1和PC2节点由于节点区附加钢筋作用,使其等效粘滞阻尼系数有了较大提升,附加钢筋对节点的耗能能力是有所贡献的。

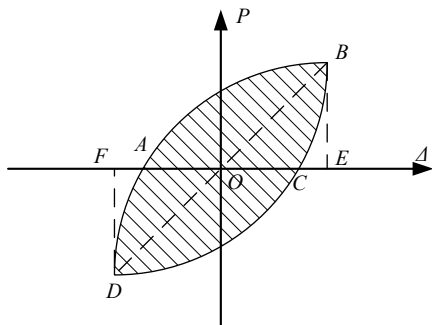


图8 等效粘滞阻尼系数计算示意图

Fig. 8 Diagram of equivalent viscous damping coefficient calculation

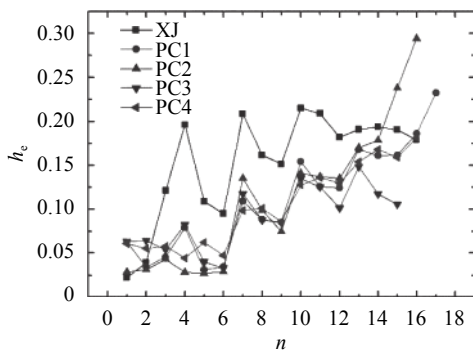


图9 节点等效粘滞阻尼系数

Fig. 9 Node equivalent viscous damping coefficient

3.3 刚度退化分析

结构在反复荷载作用下,结构的刚度会出现退化的现象,刚度退化实质是反映了结构在反复荷载作用下的累计损伤,是结构抗震性能分析的一个重要指标^[18]。由于本次试验的新型节点预制梁采用的上下非对称配筋,所以在对节点进行刚度退化分析时,对向上加载(钢绞线受力)与向下加载时(普通钢筋受力)的刚度分别进行了分析,刚度退化曲线如图10所示。

从图10可以发现,5个节点在试件在2个方向刚度退化曲线总体趋势一致,均是在弹性阶段,刚度退化较快,进入屈服以后,刚度退化随着位移的增加变小,最终趋于平缓。对于钢绞线作为受力筋时,在弹性阶段,由于预制节点在预制梁键槽处存在新老混凝土结合,预制节点刚度不如现浇节点。而进入屈服阶段后,普通钢筋屈服,XJ节点刚度下降较快,从图

中可以看出,进入屈服阶段后,XJ节点的刚度均小于预制节点,说明键槽内部箍筋加密及钢绞线的高强度对节点的刚度贡献较大。由于PC1和PC2节点区设置了附加钢筋,其刚度较PC3和PC4节点刚度要大,这说明节点核心区设置附加钢筋对试件的刚度有一定的贡献。当普通钢筋作为受力筋时,各节点的刚度退化曲线基本重合在一起,PC1和PC2节点刚度略大于PC3和PC4节点,说明附加钢筋对普通钢筋受力时的刚度也有一定的贡献。

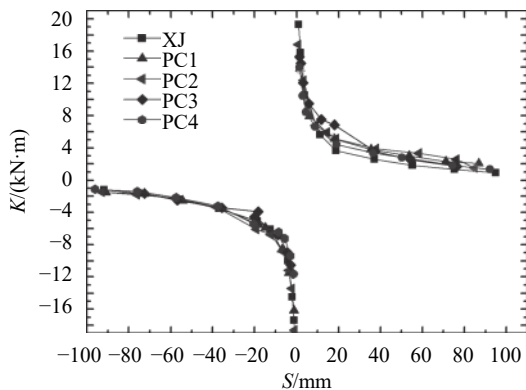


图10 节点刚度退化曲线

Fig. 10 Stiffness degradation curves of connections

4 节点有限元分析

4.1 模型的建立

通过试验发现,预制梁底部钢筋是否设置无粘结段对节点抗震性能影响较小,所以本文只对设置附加钢筋PC1和不设置附加钢筋的PC4节点进行计算分析。采用有限元软件ABAQUS对节点进行分析,建模时,混凝土采用C3D8R实体减缩积分单元。纵筋和箍筋采用空间三维二节点直线桁架单元T3D2,采用Embedded(内置区域)技术进行桁架单元与实体单元之间的自由度耦合。在对柱子施加轴力时,在柱顶设置钢垫块以防止加载点应力集中。采用位移控制加载来对节点施加反复荷载,并用幅值命令模拟试验中的低周反复加载制度^[15-16]。

所有试验节点几何形状都较为规整,在计算过程中采用结构化网格划分法进行网格划分。先将试件组合体划分为规则的长方体,再对其布置种子,由ABAQUS自动生成相应单元网格^[16]。兼顾计算精度和计算成本的影响,本次分析采用边长为50 mm的实体单元对混凝土进行离散,钢筋也采用50 mm一段的桁架单元划分,有限元模型如图11所示。

4.2 节点参数化分析

在节点试验过程中,由于没考虑节点在不同轴压比、不同节点核心区附加钢筋直径和不同混凝土

强度等级等参数对节点受力性能影响,采用ABAQUS对节点在不同参数情况下的受力性能进行分析。主要对比分析试件在低周反复荷载作用下骨架曲线同原有曲线的区别,见图12~14。

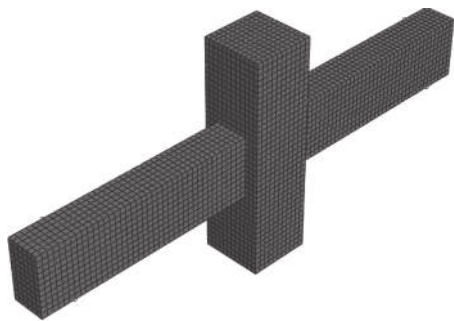


图 11 有限元计算模型

Fig. 11 Finite element calculation model

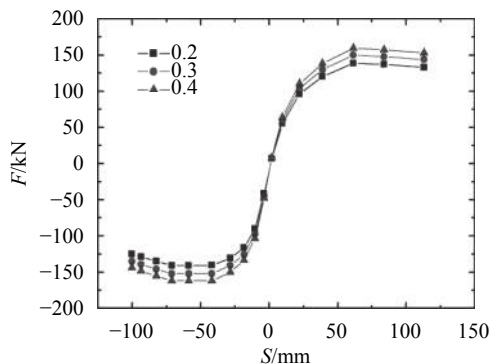


图 12 不同轴压比节点骨架曲线

Fig. 12 Skeleton curves under different axial compression ratios

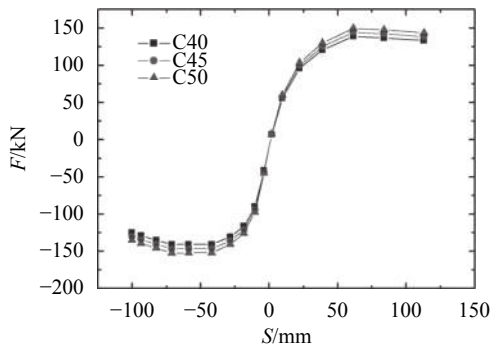


图 13 不同混凝土强度节点骨架曲

Fig. 13 Skeleton curves under different concrete strength

由图12可以发现,节点在加载初期,节点的骨架曲线受轴压比影响较小,不同轴压比下各骨架曲线基本重合,但是随着荷载的继续施加,待试件进入弹塑性阶段后,节点极限荷载随着轴压比的增大而增大,同时可以发现待节点进入屈服阶段后,轴压比对节点受力性能影响较为明显。

由图13和14可以发现,在加载初期,参数变化对节点受力性能影响较小,进入弹塑性阶段,随着附加

钢筋直径以及混凝土强度等级的增大,节点的峰值荷载略有提高,但整体影响较轴压比对节点受力性能影响要小。

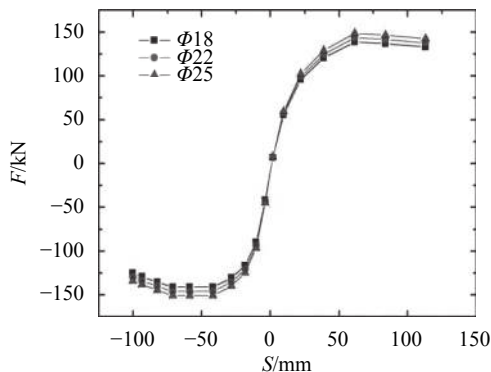


图 14 不同附加筋直径节点骨架曲线

Fig. 14 Skeleton curves under different reinforcement diameter

5 结 论

1)所有节点的都发生了设计所期望的“梁铰机制”破坏形式,并且柱和节点区都没有发生较为严重的破坏,说明所有的试验节点都符合设计所有要求的“强柱弱梁,强节点弱构件”设计原则。

2)对于预制梁底部的钢绞线设置无粘结段,对节点的抗震性能影响不明显,主要原因是因为梁底部构造筋没有锚入节点区。节点区设置附加钢筋的节点无论是极限承载还是各阶段刚度都较不设置附加钢筋节点的高,同时由于附加钢筋的延性较好,在低周反复荷载作用下,对节点的耗能能力也有所提高。总体来说,节点区设置附加钢筋对节点的抗震性能是有益的。

3)所有预制节点的等效粘滞阻尼系数均小于XJ节点,但是随着荷载进一步施加,待荷载施加到极限荷载之前,设置附加钢筋的节点PC1和PC2总体耗能能力都有较大提高,甚至超过了XJ节点,说明预制节点有着较大的安全储备。

4)对新型预制混凝土框架梁柱节点进行参数化分析发现,节点轴压比的改变对节点的承载能力影响较大,混凝土强度等级和节点区附加钢筋直径对节点承载力有一定的影响,但是影响不是很大。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国国家统计局.2016年农民工监测调查报告[EB/OL].<http://www.stats.gov.cn/>,2017.02.07.
- [2] Guo Zhengxing.Thinking on generalization and application of new prefabricated concrete structure[J].Construction Technology,2014(1):17-22.[郭正兴.新型预制装配混凝土结构规模推广应用的思考[J].施工技术,2014(1):17-22.]
- [3] Stanton J F,Nakaki S D.Design guidelines for precast con-

- crete seismic structural systems [R].PRESS report No.01/03-09.Department of Civil Engineering Seattle:University of Washington,2002.
- [4] Paolo N,Giandomenico T.Design guidelines for connections of precast structures under seismic actions [R].Joint Research Centre of the European Commission,European Union,2012
- [5] Alcocer.Seismic tests of beam-to-column connections in a precast concrete frame[J].*PCI Journal*,2002,47(3):70-89.
- [6] Ha S S,Kim S H,Lee M S,et al.Performance Evaluation of semi precast concrete beam-column connections with u-shaped strands[J].*Advances in Structural Engineering*, 2014,17(11):1585-1600.
- [7] Liu Jiabin,Chen Yungang,Guo Zheng-xing,et al.Seismic behavior of precast shear wall with rectangular spiral stirrups-constraint grouted corrugated pipe connection[J].*Journal of South China University of Technology*,2014, 42(11):92-98.[刘家彬,陈云钢,郭正兴等.螺旋箍筋约束波纹管浆锚装配式剪力墙的抗震性能[J].*华南理工大学学报*,2014,42(11):92-98.]
- [8] Gennaro M,Maddalena C.Cyclic shear tests on RC precast beam-to-column connections retrofitted with a three-hinged steel device[J].*Bull Earthquake Engingeer*,2017(15): 3797-3817.
- [9] Xue,Weichen;Zhang,B.Seismic behavior of hybrid concrete beam-column connections with composite beams and cast-in-place columns[J].*ACI Structural Journal*, 2014,111(3):617-627.
- [10] CAI Jian-guo.Experimental study on seismic behavior of middle joints of SCOPE system[J].*Journal of Central South University (Science and Technology)*,2012,43(5): 1894-1901.[蔡建国.世构体系框架中节点抗震性能试验研究[J].*中南大学学报(自然科学版)*,2012,43(5):1894-1901.]
- [11] Chen S,Yan W,Gao J.Experimental investigation on the seismic performance of large-scale interior beam-column joints with composite slab[J].*Advances in Structural Engineering*,2012,15(7):1227-1238.
- [12] Yu jianbing,Guo zhengxing.Seismic experimental study on strand anchored precast concrete frame connection[J].*Journal of Southeast University*,2017,47(4):760-765.[于建兵,郭正兴.钢绞线锚入式预制装配混凝土框架节点抗震试验研究[J].*东南大学学报*,2017,47(4):760-765.]
- [13] GB 50011—2010,建筑抗震设计规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2010.
- [14] JGJ 101—96,建筑抗震动试验方法规程[S].北京:中国建筑工业出版社,1997.
- [15] Nie Jianguo,Wang Yuhang.Comparison study of constitutive model of concrete in ABAQUS for static analysis of structure[J].*Engineering Mechanics*,2013(04):59-67, 82.[聂建国,王宇航.ABAQUS中混凝土本构模型用于模拟结构静力行为的比较研究[J].*工程力学*,2013(04):59-67,82.]
- [16] Georgia D,Kremmyda,Yasin M,et al.Nonlinear FE analysis of precast RC pinned beam-to-column connections under monotonic and cyclic shear loading[J].*Bull Earthquake Engingeer*,2014(12):1615-1638.

(编辑 黄小川)

引用格式: Yu Jianbing,Guo Zhengxing,Guo Xuan.Seismic behavior of a new type prefabricated Concrete frame beam-column connections[J].*Advanced Engineering Sciences*,2018,50(3):209-215.[于建兵,郭正兴,郭悬.新型装配式混凝土框架梁柱节点抗震性能[J].*工程科学与技术*,2018,50(3):209-215.]