

预制混凝土梁柱节点试验及框架受力性能分析*

高向玲^{1†},徐龙标¹,李杰¹,曹杨²

(1.同济大学 建筑工程系,上海 200092;2.中国二十冶集团有限公司,上海 201900)

摘要:提出了一种预制装配式混凝土梁柱节点采用I字型钢连接的节点方式,并进行了该节点在低周反复荷载作用下的试验.针对型钢连接的特征,提出了一种简化的等效十字连接方式用以模拟该节点.结合试验结果以及二维空间撒点,进行了简化节点的等效混凝土弹性模量以及钢筋屈服强度等关键参数的识别,从而可通过数值分析获得预制装配式节点的滞回曲线.根据预制装配式节点的连接方式形成框架结构,同时根据梁柱的配筋形成了现浇框架结构,采用Pushover分析了2种框架的承载力和刚度.利用简化的节点数值模拟滞回曲线进行了预制装配式框架结构在震动作用下结构整体的受力非线性全过程分析.试验结果表明,该连接方式滞回环较饱满,节点抗震性能良好;数值分析结果表明采用型钢连接节点的预制装配式框架结构与同样梁柱配筋的现浇结构相比承载力和刚度有所提高,此装配式框架结构可满足我国抗震规范对于框架结构在弹性以及弹塑性阶段侧移限值的要求.

关键词:预制混凝土;梁柱节点;框架结构;抗震性能;数值模拟

中图分类号:TU375.4

文献标志码:A

Tests of Precast Concrete Beam-column Joints and Analysis on Mechanical Behaviour of Prefabricated RC Frame Structures

GAO Xiangling^{1†}, XU Longbiao¹, LI Jie¹, CAO Yang²

(1.Department of Structural Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2.China MCC20 Group Corp.LTD, Shanghai 201900, China)

Abstract: A new precast concrete beam-column joint connected by I-shaped section steel was presented. The precast concrete beam-column joint was tested under reversed cyclic loading. According to the characteristics of the I-shaped section steel connection, a simplified equivalent cross connection model was proposed to simulate the joint. Based on the experimental results of the joint and the stochastic point scattered in two-dimensional space, the equivalent elastic modulus of concrete and yield strength of steel bar were identified in the simplified cross connection model. Therefore, the hysteretic curve of the prefabricated concrete beam-column joint could be simulated easily by finite element analysis. A precast RC frame structure with six floors and three spans constructed by the precast concrete beam-column joint and a cast-in-situ RC frame structure with the same section and the same reinforcement ratio with the precast beam and column were analyzed by Pushover method. Meanwhile, according to the parameters identified from the

* 收稿日期:2016-05-27

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51261120374), National Natural Science Foundation of China(51261120374)

作者简介:高向玲(1968—),女,山西临汾人,同济大学副教授,博士

† 通讯联系人, E-mail: gaoxl@tongji.edu.cn

experimental results, the nonlinear numerical simulation of the precast RC frame structure under seismic excitation was developed. The experimental results show the hysteric curve of the precast concrete beam-column joint was plump. The numerical simulation results present that the precast RC frame structure exhibits the satisfactory load-carrying and deformation capacity. Thus, the presented precast concrete beam-column joint can be used as a connected type for the fabricated concrete frame structure.

Key words: precast concrete; beam-column joints; frame structures; seismic behavior; numerical simulation

在我国推行建筑工业化和绿色建筑的背景下, 预制装配式混凝土结构经济效益高、施工受气候条件影响小、产品质量易保证、建造时间短和对环境污染小等优点, 因而得到了大力推广和应用^[1]. 框架结构作为多层和小高层建筑的典型结构体系在我国应用范围广阔. 对于框架结构而言, 预制构件梁柱的连接方式以及连接节点的力学性能在很大程度上决定了框架整体的力学性能. 鉴于此, Priestley等^[2-3]研究了预制构件4种连接方式的抗震性能. Sucuoglu^[4]研究了混凝土梁柱节点的刚度对预制混凝土结构动力响应的影响. Negro等^[5-6]进行了一系列预制混凝土框架结构的抗震性能研究, 预制混凝土框架与现浇框架的抗震能力相当, 但延性较小, 变形大. Ozturan等^[7]的研究表明: 预制混凝土梁柱节点与现浇节点相比表现出很好的抗震性能, 其中螺栓连接节点在强度、延性和耗能方面都具有更大的优势.

吕西林等^[8]和范力^[9]进行了预制混凝土框架结构的拟动力试验研究. 陈适才等^[10]针对多高层预制混凝土结构装配节点的特性, 进行了不同连接方式的高轴压、大尺寸预制梁-柱-叠合板装配中节点抗震性能的试验研究. 于建兵等^[11]通过采用预应力筋及附加箍筋调整梁端塑性铰出现的位置, 改善装配式梁柱节点的耗能能力. 邹响等^[12]运用有限元软件 ABAQUS 进行了单调加载和低周往复荷载下具有自复位功能框架节点抗震性能主要影响因素的分析研究.

通常在混凝土结构建模分析时假定非弹性反应集中在梁、柱、楼板和剪力墙的非弹性变形区, 但是框架梁柱节点的非弹性反应对结构的数值分析结果有很大的影响. 本文进行了预制装配式框架节点的试验研究以及理论分析, 并实现了预制装配式框架结构整体的非线性受力全过程分析.

1 梁柱节点的抗震性能试验研究

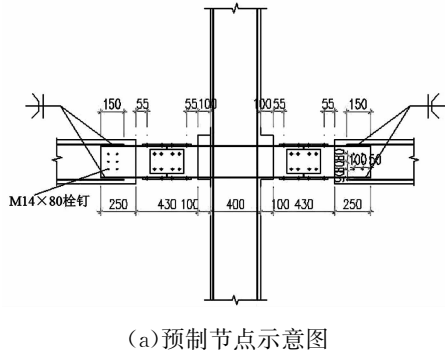
1.1 试件概况

为了掌握提出的采用型钢连接预制混凝土梁柱节点的力学性能, 进行了型钢连接梁柱节点在低周反复荷载作用下的受力性能试验. 型钢连接梁柱节点尺寸如图 1(a)所示, 预制梁截面尺寸为 250 mm×400 mm, 预制柱截面尺寸为 400 mm×400 mm, 预制构件及后浇节点的混凝土等级为 C50, 100 mm 边长的混凝土立方体实测抗压强度为 47.3 MPa. 纵筋采用 HRB400 级钢筋, 采用对称配筋, 梁中配筋上下均为 2 根 20 mm 直径的钢筋, 柱中截面为 4 根 22 mm 直径的钢筋. 预制柱在连接部位预埋工字型钢, 梁、柱中预埋工字型钢的截面尺寸均为 340 mm×150 mm×8 mm×10 mm, 工字钢的长度分别为 460 mm 和 1 020 mm, 型钢连接螺栓预留孔位置见图 1(b)和图 1(c). 预制梁内钢筋与工字型钢采用搭接焊的方式连接, 且预制梁内腹板处布置有栓钉, 钢材均为 Q235B. 梁柱型钢连接处上下翼缘内侧采用 8 块尺寸为 390 mm×60 mm×6 mm 的钢板连接, 上下翼缘外侧采用 4 块尺寸为 390 mm×150 mm×6 mm 的钢板连接, 腹板部位采用 4 块尺寸为 250 mm×240 mm×6 mm 的钢板连接, 螺栓为 M16 高强螺栓. 预制构件连接部位的型钢和钢板的尺寸、数量列于表 1. 梁柱型钢连接部位在连接施工完毕后, 采用 C50 等级混凝土进行连接的二次浇筑, 从而形成框架节点.

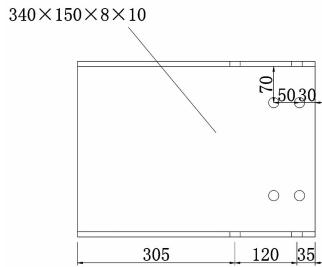
表 1 工字钢和钢板表

Tab.1 I section steel and steel plate

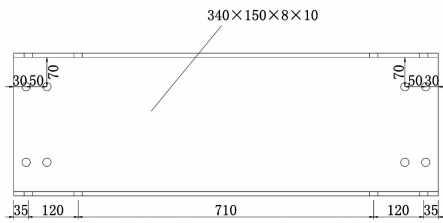
型号	长度/mm	数量	位置
340×150×8×10	460	2	梁中预埋型钢
340×150×8×10	1 020	1	柱中预埋型钢
250×240×6	—	4	型钢间腹板连接钢板
390×60×6	—	8	型钢间翼缘内侧连接钢板
390×150×6	—	4	型钢间翼缘外侧连接钢板



(a) 预制节点示意图



(b) 梁中预埋工字型钢



(c) 柱中预埋工字型钢

图 1 预制梁柱节点

Fig.1 Precast concrete beam-column joints

1.2 加载制度

本试验为拟静力反复加载试验,所采用加载装置如图 2 所示.作动器采用铰接方式连接于梁端,采用同步加载模式(一拉一推),并通过位移和力传感器分别采集梁端位移和所施加荷载.柱头和柱脚均采用平面铰连接方式模拟反弯点边界条件,并采用钢系杆将柱顶耳板固定于剪力墙,同时借助反力架.整个加载过程由预加载及位移控制阶段组成(图 3).预加载阶段首先通过千斤顶施加柱轴力(轴压比控制为 0.27),然后加载一次 10 kN 循环,以检查设备和加载装置工作情况.此后进行一次 $0.5P_y$ (约 35 kN) 的循环.位移控制阶段,按照梁端加载点位移分别为 30 mm, 60 mm 和 90 mm 进行加载,每级加载进行 3 次反复循环.根据现浇节点的试验结果当梁端的位移为 30 mm 时,梁中纵筋屈服^[13],因节点区为型钢连接,当加载点的位移约为 3 倍梁中纵筋屈

服对应的位移时认为节点破坏.

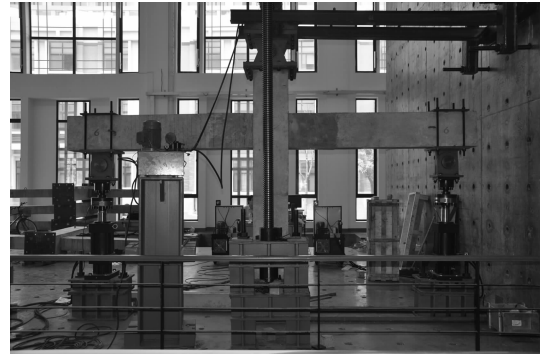


图 2 试件加载图

Fig.2 Loading system of the test

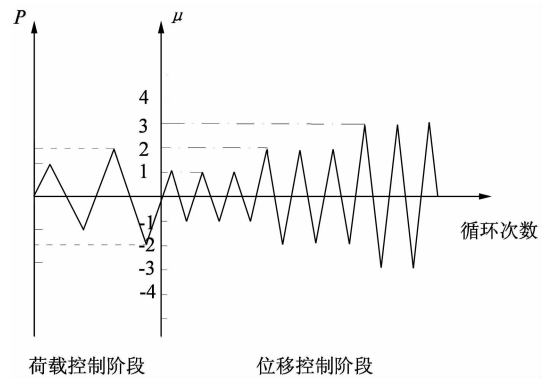


图 3 加载制度

Fig.3 Loading process

1.3 试验结果

预制装配式型钢连接节点在梁端反复荷载作用下当荷载达到 14 kN 时,梁靠近柱端的底部有竖向受拉裂缝出现;当荷载达到 35 kN 时(对应的位移为 30 mm),核心区有对角方向的斜裂缝出现;当位移加载到 60 mm 时,核心区斜裂缝变宽、数量增多,梁、柱受弯裂缝分别向加载点和柱脚扩散发展,当卸载后,预制部分和节点型钢连接现浇部分拼装处受弯裂缝无法闭合,而核心区斜裂缝基本闭合;当位移加载到 90 mm 时,梁根部及拼装截面的裂缝较宽,且梁根部受弯裂缝延伸为核心区的斜裂缝,在反复荷载作用下,混凝土和型钢间逐步发生粘结滑移破坏(发出明显的摩擦声),最终核心区混凝土(靠近梁端)因缺少有效约束而发生剪切破坏(挤压脱落),最终荷载达到 110 kN.试件破坏形式如图 4 (a)所示,节点的梁端加载滞回曲线见图 4(b).

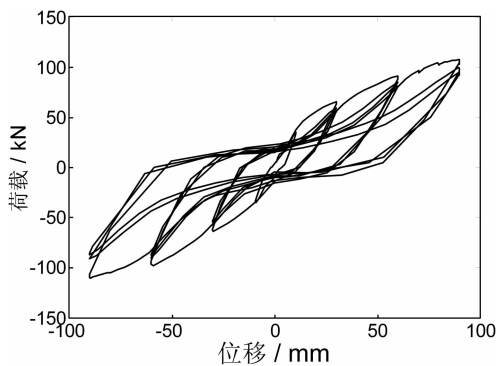
2 梁柱节点数值模拟

2.1 简化的梁柱节点数值模拟方法

对于装配式混凝土框架结构,梁柱节点区由于



(a)破坏图



(b)滞回曲线

图4 型钢连接节点

Fig.4 Testing results of the beam-column joints connected by I section steel

采用型钢连接(包括螺栓连接以及钢板与型钢的焊接连接),若在数值模拟时按实际构件的连接方式建模,则存在钢板与混凝土的连接、节点后浇混凝土与预制构件的连接、钢板间的连接等问题,建模复杂.且在非线性阶段,存在钢筋与混凝土界面、型钢间的连接、以及型钢与混凝土界面的滑移等现象,但是这些连接部位的相关力学参数难以准确获取.本文采用简化的模型,通过参数识别获取表征节点区整体力学性能的等效混凝土的弹性模量和钢筋的屈服强度,从而获得预制装配式框架节点数值模拟的滞回曲线,为采用此种型钢连接的预制装配式框架结构的整体分析提供节点的滞回曲线.

预制混凝土梁柱节点的简化模拟采用 Open Sees 有限元程序中的 Nolinear Beam Column 单元建立的十字形节点区模拟,在梁柱节点区域取一段梁柱的长度作为节点区,节点区柱的长度从梁柱节点中心取上下分别为 400 mm,梁的长度从节点中心取其型钢连接的长度 730 mm,见图 5 节点核心区示意图.节点核心区的梁柱截面采用纤维截面,混凝土的本构关系采用 Concrete01 本构模型,钢筋采用 Steel02 本构关系,采用 Transformation 方法进

行多点约束.

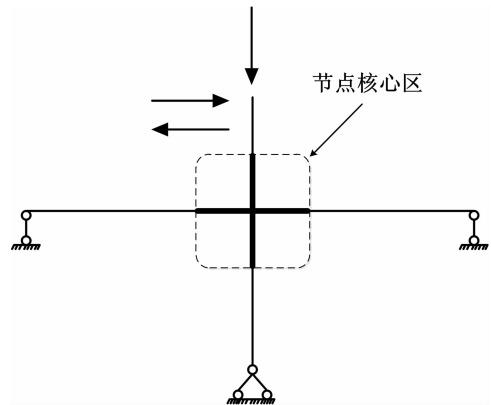


图5 梁柱节点简化模拟方法示意图

Fig.5 The simplified computational model of the joint

采用图 5 所示简化的节点模型,根据试验得到的预制装配式节点的滞回曲线,通过采用二维空间撒点的方式随机给出节点区的混凝土弹模以及钢筋屈服强度,通过 OpenSees 建模分析,将计算结果与试验结果进行比较,计算结果与试验结果相对二范数误差最小的点即为节点区等效的混凝土弹性模量和钢筋的屈服强度等材料参数.节点区等效材料参数识别流程如图 6 所示.

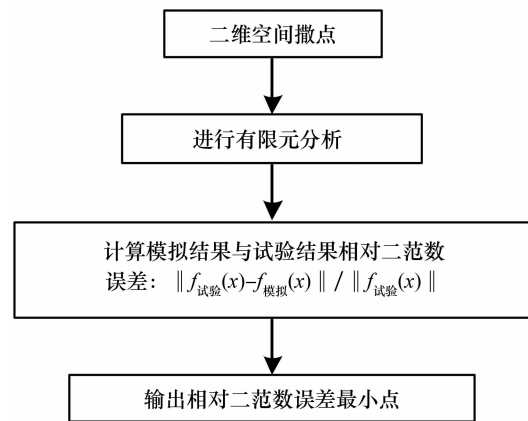


图6 节点区参数识别流程图

Fig.6 Flow chart of parameters identification in the joint

2.2 简化的梁柱节点数值模拟计算结果

通过节点区等效的参数识别,可以获得简化模型的等效混凝土弹性模量和钢筋的屈服强度,根据等效参数以及简化模型进行预制装配式节点的有限元模拟结果与试验结果的对比见图 7.由图 7 可知,模拟结果与试验结果的滞回曲线具有一定的一致性,模拟结果与实测结果的承载力几乎一致,数值分析结果的耗能能力稍大.表明通过此简化模拟方法可以很好地模拟该型钢连接预制装配式梁柱

节点的滞回曲线,该简化模型可为采用这种梁柱连接方式的框架结构整体受力分析奠定基础。

由于试验加载装置所限,本试验采用的是梁端加载机制,而在实际的结构中,水平荷载是施加在柱端,因此采用数值模拟的方法,根据梁端所施加力的大小根据节点平衡计算柱端的水平力,从而获得该预制装配式梁柱节点柱端水平加载的滞回曲线如图 8 所示。

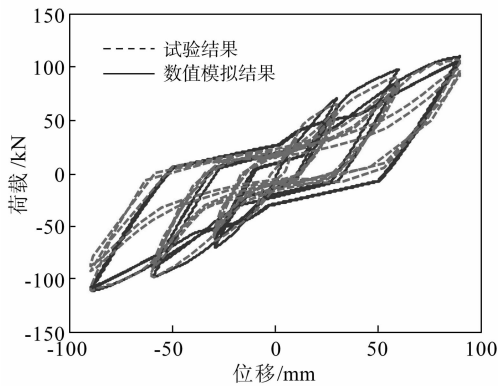


图 7 简化模型计算结果与试验结果的对比
Fig.7 Comparison of test and calculated hysteretic curves of the joint by the simplified model

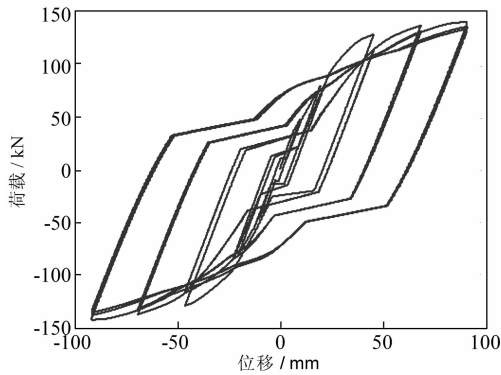


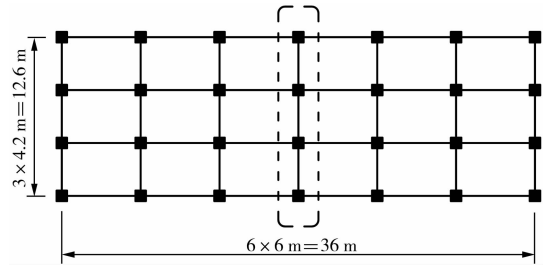
图 8 柱端加载节点的滞回曲线
Fig.8 Calculated hysteretic curves of the joint loaded on the column end

3 预制混凝土框架结构抗震性能分析

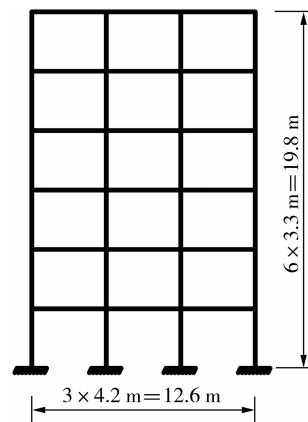
3.1 框架结构概况

根据试验采用的预制混凝土梁柱节点的连接方式形成一个 6 层 3 跨的混凝土装配式框架结构,框架的平面和立面分别见图 9.预制混凝土梁柱的配筋与试验节点相同,混凝土等级为 C50,纵筋及箍筋分别为 HRB400 和 HPB300,材料强度的标准值是根据材料的等级按照《混凝土结构设计规范》^[14]进行取值.按照框架结构所在地的设防烈度为 8 度,

场地类别为 II 类进行框架结构的整体受力性能分析.混凝土楼板厚 100 mm,恒载、活载均取为 3 kN/m².



(a) 框架模型平面图



(b) 框架模型立面图

图 9 框架模型

Fig.9 Plan and elevation of the frame structure

框架结构整体分析采用 OpenSees 有限元软件.混凝土采用 Concrete01 本构模型,钢筋采用 Steel02 模型.对于采用型钢连接的梁柱节点区采用提出的简化模型模拟,一榀框架整体分析计算简图如图 10 所示.计算得到的框架前 3 阶周期分别为 0.523 s,0.226 s 和 0.140 s.

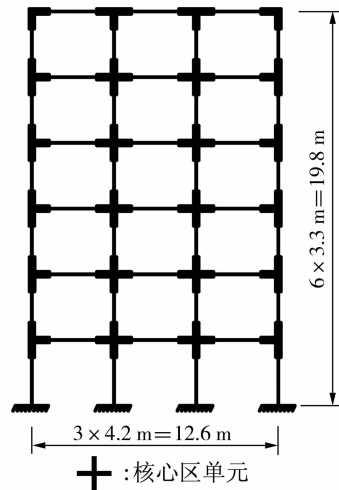


图 10 框架简化模型示意图

Fig.10 Computational model of the frame structure

3.2 Pushover 分析

Pushover 分析方法的一个基本假设是结构响应可以等效为一个单自由度体系响应,结构响应由第一阶振型控制,并且在整个地震反应中结构第一振型保持不变^[15].对于由第一振型控制的结构,Pushover 方法可以比较准确地评估结构的抗震性能^[16].采用此方法对于预制装配式型钢连接框架以及梁柱采用与预制框架相同配筋的现浇框架进行分析对比,计算得到的两种框架底层剪力与顶层位移的关系曲线见图 11.从图 11 可以看出,预制型钢连接装配式框架的极限水平承载力可达 600 kN,而现浇框架的最大承载力为 470 kN.预制装配式框架最大荷载对应的顶点侧移约为 110 mm,现浇框架最大荷载时框架顶点侧移为 200 mm,充分说明了预制装配式型钢连接框架具有良好的抗侧刚度和承载能力.

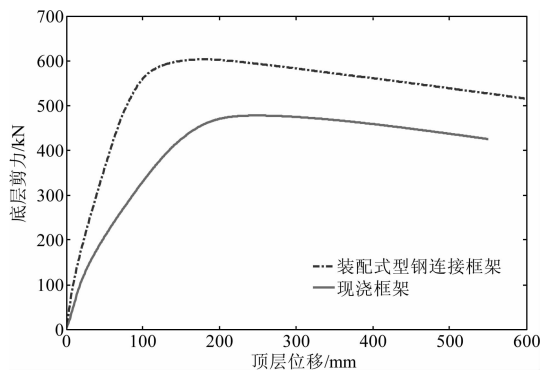


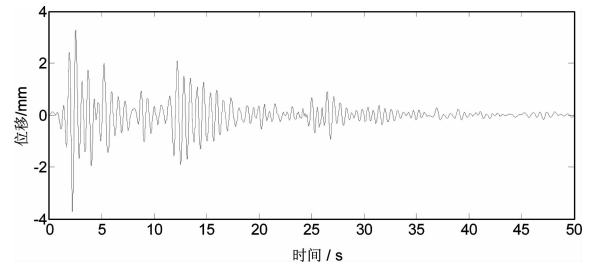
图 11 型钢连接框架 Pushover 曲线

Fig.11 Pushover analysis of the fabricated frame structure

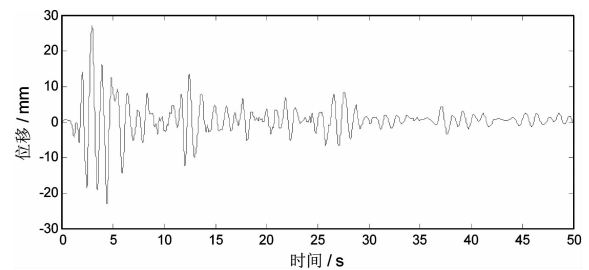
3.3 预制装配式框架弹性动力时程分析

预制装配式框架整体建模时在节点区同样采用简化的模型以及根据简化模型获得的节点的滞回曲线.选用 El Centro 波进行预制装配式框架结构的动力时程分析,弹性与弹塑性动力时程分析时地震动的峰值加速度分别取为 0.7 m/s^2 和 4 m/s^2 .根据数值模拟结果,框架底层弹性以及弹塑性相对层间位移时程曲线分别见图 12,预制框架最大弹性和弹塑性层间位移随层高的变化分别见图 13.由图 13 (a)可知,在弹性阶段,结构第 2 层的层间相对位移出现最大值为 4 mm,层间相对位移角约为 $1/825$,小于我国《高层建筑混凝土结构技术规程》^[17] 的限值 $1/500$.由图 13(b)可知,在弹塑性阶段,结构第 1 层的层间相对位移出现最大值为 28 mm,层间相对位移角约为 $1/117$,同样小于《高层建筑混凝土结构技术规程》^[17] 的限值 $1/50$.计算结果表明采用此种

方式连接的预制装配式混凝土框架结构在设防烈度为 8 度的地区可满足小震不坏、大震不倒的要求,是一种可行的连接方式.



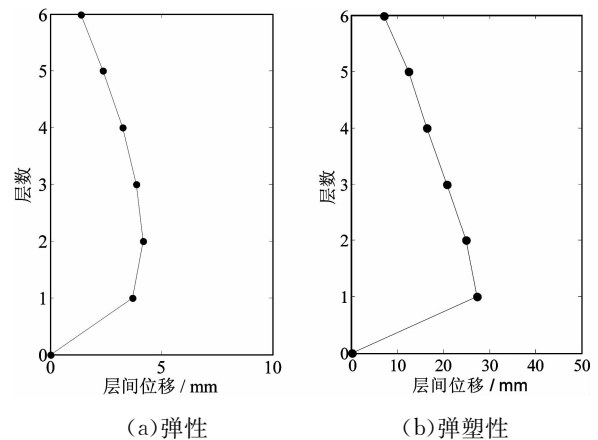
(a)弹性



(b)弹塑性

图 12 框架底层弹性及弹塑性相对层间位移时程曲线

Fig.12 Displacement time history curve of the prefabricated frames under seismic excitation



(a)弹性

(b)弹塑性

图 13 框架最大相对层间位移

Fig.13 Maximum storey-displacement of the prefabricated frames under seismic excitation

4 结论

1)提出了一种采用型钢及节点域后浇混凝土连接的预制混凝土梁柱的连接方式.通过节点在反复荷载作用下的试验可知,新型连接方式的滞回环较饱满,且峰值荷载较大.当延性系数约为 3.0 时,节点区保护层局部脱落.型钢连接节点具有较好的

抗震性能,可作为预制装配式框架结构的连接方式。

2) 采用 OpenSees 分析软件中的 Joint2D 单元进行了预制混凝土梁柱节点的数值模拟,模拟结果与试验结果吻合较好。

3) 提出了一种简化方法模拟型钢连接梁柱节点的滞回曲线,计算结果表明,该方法不仅可准确地进行节点在反复荷载作用下的受力性能分析,且可提高计算效率。

4) 采用提出的简化方法实现了型钢连接装配式框架结构在地震激励下的整体受力性能分析。

参考文献

- [1] 黄小坤,田春雨. 预制装配式混凝土结构研究[J]. 住宅产业, 2010(9): 27-32.
HUANG Xiaokun, TIAN Chunyu, Research on prefabricated concrete frame structures[J]. Housing Industry, 2010(9): 27-32. (In Chinese)
- [2] PRIESTLEY M J N. Overview of PRESSS research program [J]. PCI Journal, 1991, 36(4): 50-57.
- [3] PRIESTLEY M J N. The PRESSS program: current status and proposed plans for phase III [J]. PCI Journal, 1996, 41(2): 22-40.
- [4] SUCUOGLU H. Effect of connection rigidity on seismic response of precast concrete frames [J]. PCI Journal, 1995, 40(1): 94-103.
- [5] NEGRO P, BOURNAS D A, MOLINA F J. Seismic testing of the SAFECAST three-storey precast building [C]//15th World Conference on Earthquake Engineering. Lisbon: Sociedade Portuguesa de Engenharia Sismica, 2012.
- [6] DIMOVA S L, NEGRO P. Seismic assessment of an industrial frame structure designed according to Eurocodes, part 2: capacity and vulnerability [J]. Engineering Structures, 2005, 27(5): 724-735.
- [7] OZTURAN T, OZDEN S, ERTAS O. Ductile connections in precast concrete moment resisting frames [J]. PCI Journal, 2006, 51(3): 66-76.
- [8] 吕西林,范力,赵斌. 装配式预制混凝土框架结构缩尺模型拟动力试验研究[J]. 建筑结构学报, 2008, 29(4): 58-65.
LV Xilin, FAN Li, ZHAO Bin. Pseudodynamic test on a reduced scale jointed precast concrete frame structure [J]. Journal of Building Structures, 2008, 29(4): 58-65. (In Chinese)
- [9] 范力. 装配式预制混凝土框架结构性能系数研究[J]. 土木工程学报, 2010, 43(S2): 131-136.
FAN Li. Investigation on behavior factor of jointed precast concrete frame structures [J]. China Civil Engineering Journal, 2010, 43(S2): 131-136. (In Chinese)
- [10] 陈适才,闫维明,李振宝,等. 大型预制混凝土梁柱叠合板中节点整体抗震性能试验研究[J]. 工程力学, 2012, 29(2): 135-141.
CHEN Shicai, YAN Weiming, LI Zhenbao, et al. Experimental study on seismic behavior of layered slab and beam to column interior joints in precast concrete structures [J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(2): 135-141. (In Chinese)
- [11] 于建兵,郭正兴,管东芝,等. 新型预制装配框架混凝土梁柱节点抗震性能研究[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2015, 42(7): 42-47.
YU Jianbin, GUO Zhengxing, GUAN Dongzhi, et al. Research on seismic behavior of a new style precast concrete beam-column connection [J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2015, 42(7): 42-47. (In Chinese)
- [12] 邹响,林晖,马卫强. 具有自复位功能装配式框架节点抗震性能的影响因素分析[J]. 工程力学, 2015, 32(S2): 72-77.
ZOU Yun, LIN Hui, MA Weiqiang. Influence factors analysis on aseismic behavior of prefabricated frame joints with capacity of self-centering [J]. Engineering Mechanics, 2015, 32(S2): 72-77. (In Chinese)
- [13] 徐龙标. 预制装配式混凝土框架结构的受力性能及可靠度分析 [D]. 上海: 同济大学土木工程学院, 2015: 70-73.
XU Longbiao. Mechanical behavior and reliability analysis on precast concrete frame structures [D]. Shanghai: College of Civil Engineering, Tongji University, 2015: 70-73. (In Chinese)
- [14] GB 50010-2010 混凝土结构设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010: 19.
GB 50010-2010 Code for design of concrete structures [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010: 19. (In Chinese)
- [15] KRAWINKLER H, SENEVIRATNA G. Pros and cons of a pushover analysis of seismic performance evaluation [J]. Engineering Structures, 1998, 20(4): 452-464.
- [16] 易伟建,尹翥. 基于位移及滞回耗能的结构抗震性能评估新方法[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2009, 36(8): 1-6.
YI Weijian, YIN Jiang. A new method for evaluating seismic performance based on displacement and hysteretic energy [J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2009, 36(8): 1-6. (In Chinese)
- [17] JGJ 3-2010 高层建筑混凝土结构技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011: 17-18.
JGJ 3-2010 Technical specification for concrete structures of tall building [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011: 17-18. (In Chinese)