

文章编号: 1001-4888(2014)02-0200-07

高层建筑结构边节点抗震性能研究^{*}

魏春明¹, 马潇潇¹, 赵星海², 赵强¹, 陈建华¹

(1. 东北电力大学 建筑工程学院, 吉林 吉林 132012; 2. 东北电力大学 能源与动力工程学院, 吉林 吉林 132012)

摘要: 通过 7 根留有施工缝的高层建筑结构边节点的低周反复抗震性能试验, 研究了轴压比、节点核心区的混凝土强度等级、柱中混凝土在梁中的延伸长度等对梁柱边节点抗震性能的影响, 对构件的破坏特征、承载能力、延性性能、滞回曲线和骨架曲线进行了对比分析。试验结果表明: 所有试验构件均为梁端受弯破坏; 柱中混凝土在梁中的延伸长度对骨架曲线的形态、屈服荷载和最大荷载都没有显著影响; 但是延伸长度对节点的延性性能是有影响的, 延伸长度为 $0.5h$ (h 为梁高) 的边节点构件的位移延性系数小于延伸长度为 $1.0h$ 和 $1.5h$ 的构件。

关键词: 高层建筑结构; 边节点; 抗震性能

中图分类号: TU375.4

文献标识码: A

DOI: 10.7520/1001-4888-13-119

0 引言

近年来, 国内外学者对高层、超高层建筑结构构件的受力性能进行了大量的研究, 解决了很多工程实际中的关键问题。但是, 已有的研究成果多集中在梁柱混凝土强度相同的情况。而在实际工程中, 尤其是高层、超高层建筑结构中, 由于柱子承受的荷载较大, 为了满足轴压比的要求, 同时减小柱子的截面尺寸、降低结构自重、增加使用空间, 常常会采用较高强度的混凝土柱子。同时, 对于以受弯为主的楼层梁板, 过高的混凝土强度对其抗弯承载力的贡献并不明显, 而且对构件承受非荷载应力(混凝土收缩应力、温度应力等)也是不利的^[1]。因此, 导致了高层、超高层建筑结构中, 柱子的混凝土强度等级往往高于现浇梁板的设计强度。而且随着建筑物高度的增大, 两者的设计强度差距也会加大, 尤其是高层、超高层建筑物的底层柱。由于工程实践的需要, 国内外学者近年来陆续开展了梁柱节点核心区采用梁混凝土浇筑的试验研究, 且混凝土的强度等级为普通混凝土^[2,3]。鉴于此, 本文采用拟静力试验方法, 对高层建筑结构不同混凝土强度等级的梁柱边节点的抗震性能进行研究, 其中节点核心区采用柱子的高强混凝土进行浇筑, 并考虑施工缝^[4,5]的影响。

1 试验概况

1.1 试验构件设计和制作

边节点试验构件取用承重框架梁柱反弯点之间的一个平面组合体, 即“T 字形”试件。为有效保证试件的浇筑质量和垂直度, 并与工程实际相符, 全部试件均采用钢模板、立模浇筑。边节点构件柱子的截面尺寸为 $200\text{mm} \times 200\text{mm}$, 梁的截面尺寸为 $150\text{mm} \times 250\text{mm}$, 纵向受力钢筋采用 HRB400 级, 箍筋采用 HPB235 级。柱子的配筋率为 1.13% , 梁的配筋率为 0.9% , 所有构件配筋率和钢筋的强度相同。为防止柱头破坏, 柱上、下端箍筋加密, 节点核心区按照抗震要求对箍筋进行了加密处理。本次试验

^{*} 收稿日期: 2013-07-31; 修订日期: 2013-10-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(50908037)和吉林省教育厅“十二五”科学技术研究项目(2013109)资助

通讯作者: 魏春明(1977—), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为钢筋混凝土结构抗震性能。E-mail: chunming@mail.nedu.edu.cn

共包括 7 根试件,详细的试验构件概况如表 1 所示(表中 h 为梁高),构件的尺寸和配筋图如图 1 所示。节点核心区采用柱中较高强度混凝土的构件,施工缝留设在梁下部;节点核心区采用梁中较低强度混凝土的构件,分别在梁上和梁下留设两道施工缝,施工缝处浇筑时间间隔为 2 天(48 小时)。

表 1 试验构件概况
Tab. 1 Survey of specimens

序号	梁—柱混凝土 设计强度等级	节点混凝土 强度等级	设计轴压比	柱中混凝土在 梁中的延伸长度	施工缝
BZ1Y1	C70-C85	C85	0.3	$0.5h$	一道
BZ1Y2	C70-C85	C85	0.3	$1.0h$	一道
BZ1Y3	C70-C85	C85	0.3	$1.5h$	一道
BZ2Y1	C70-C85	C85	0.5	$0.5h$	一道
BZ2Y2	C70-C85	C85	0.5	$1.0h$	一道
BZ2Y3	C70-C85	C85	0.5	$1.5h$	一道
BZ1	C70-C85	C70	0.3	—	两道

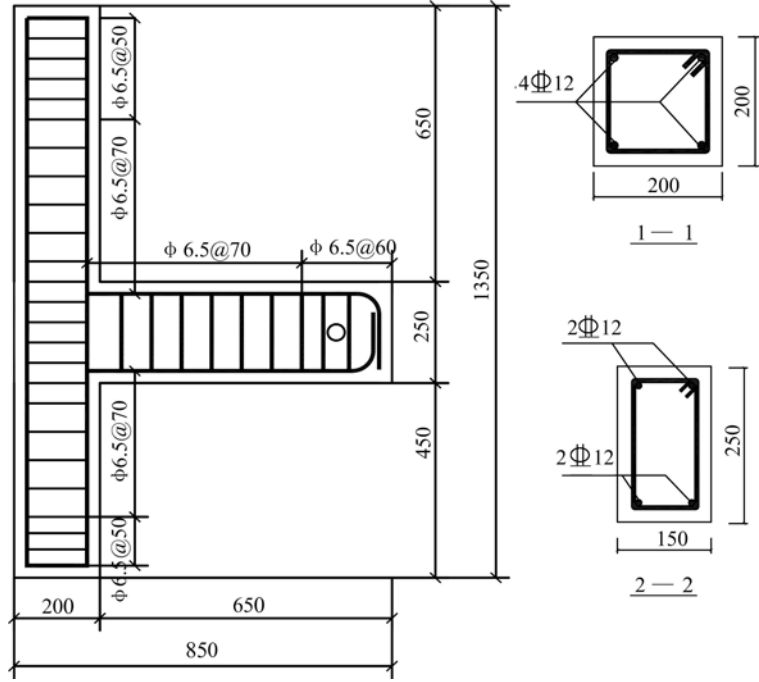


图 1 构件尺寸和配筋图
Fig. 1 Dimension and reinforcement of members

1.2 试验方法和加载装置

采用低周反复加载试验方法对边节点的抗震性能进行研究,加载制度为力—位移混合控制加载,在开始加载到构件屈服前采用力控制;构件屈服后,改用屈服位移的整数倍为级差作为回载控制点,每一位移下循环 3 次。

在实际框架结构中,当施加水平荷载时,上柱反弯点可视为水平可移动铰,相应的下柱反弯点可视为固定铰,而节点两侧梁的反弯点可视为水平可移动铰。这样可以有两种加载方案:一种是在柱端施加水平荷载或位移,这时梁能够左右移动而上下受到约束,产生剪力和弯矩。这种边界条件比较符合实际结构中的受力状态;另一种是将柱保持垂直状态,在梁的自由端施加反复荷载或位移,此时边界条件变为上下柱反弯点为不动铰,梁反弯点为自由端^[6]。本次试验采用的是柱端加载的方式,即采用在柱顶施加轴向力和水平力的方式进行试验。

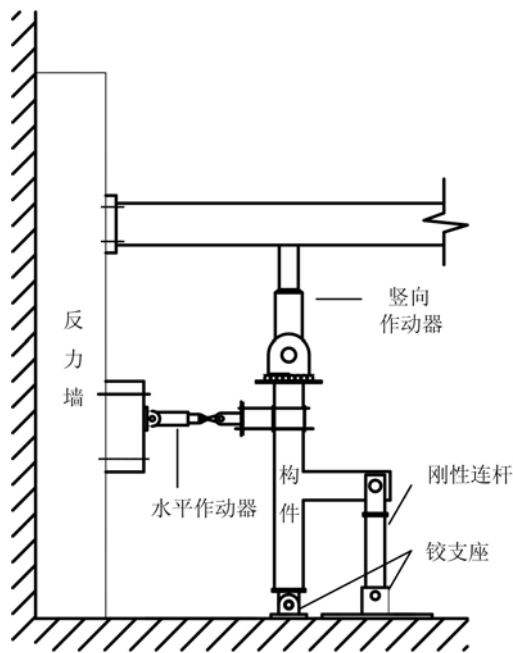


图 2 加载装置示意图

Fig. 2 Test set-up

10kN, 反向开裂荷载为 20kN。裂缝扩展速度较快, 裂缝区域主要集中在梁的端部范围内, 节点核心区只有少量细小的裂缝出现, 没有明显破坏。构件最后在梁端形成塑性铰, 塑性铰发展充分。构件 BZ1 的柱子和梁的实际配合比相差 2 个强度等级, 说明当梁柱强度等级相差较小时, 节点能够满足抗震设计要求。



图 3 BZ1 破坏图片

Fig. 3 Failure photo of BZ1



图 4 BZ1Y3 破坏图片

Fig. 4 Failure photo of BZ1Y3

不同轴压比和不同延伸长度下, 边节点核心区采用柱子混凝土强度的构件破坏图片如图 4~9 所示。构件 BZ1Y3 破坏图片如图 4 所示, 初始裂缝出现在梁端第一道箍筋处, 正向开裂荷载为 14.3kN, 反向开裂荷载为 25kN。裂缝扩展速度比构件 BZ1 慢, 裂缝区域范围比构件 BZ1 大, 节点核心区未见明显开裂, 构件最后在梁端形成塑性铰, 塑性铰发展较充分。构件 BZ2Y3 的破坏图片如图 5 所示, 整个破坏过程和破坏现象与构件 BZ1Y3 类似, 正向开裂荷载为 14.8kN, 反向加载开裂荷载约为 20kN。

构件 BZ1Y1 和 BZ2Y1 的破坏图片如图 6 和图 7 所示, 构件 BZ1Y1 的初始裂缝出现在梁端第一道箍筋处, 正向开裂荷载为 7.5kN, 反向开裂荷载约为 20kN; 构件 BZ2Y1 和构件 BZ1Y1 的初始裂缝出现位置相同, 正向开裂荷载为 12.5kN, 反向加载开裂荷载为 15kN。二者的裂缝扩展速度都比构件 BZ1

慢,裂缝范围介于构件 BZ1 和延伸长度为 $1.5h$ 的构件之间,节点核心区未见明显开裂,构件最后在梁端形成塑性铰,塑性铰发展比较充分。



图5 BZ2Y3 破坏图片

Fig. 5 Failure photo of BZ2Y3



图6 BZ1Y1 破坏图片

Fig. 6 Failure photo of BZ1Y1



图7 BZ2Y1 破坏图片

Fig. 7 Failure photo of BZ2Y1



图8 BZ1Y2 破坏图片

Fig. 8 Failure photo of BZ1Y2

构件 BZ1Y2 和 BZ2Y2 的破坏图片如图 8 和图 9 所示,构件 BZ1Y2 的初始裂缝出现在梁端第一道箍筋处,正向开裂荷载为 10kN ,反向开裂荷载为 15kN ;构件 BZ2Y2 和构件 BZ1Y2 的初始裂缝出现位置相同,正、反向开裂荷载均为 15kN 。二者的裂缝扩展速度都比构件 BZ1 慢,裂缝范围介于延伸长度为 $0.5h$ 和延伸长度为 $1.5h$ 的构件之间,节点核心区未见明显开裂,构件最后在梁端形成塑性铰,塑性铰发展比较充分。

综上所述,当延伸长度为 $0.5h$ 时,出现裂缝的范围较小;当延伸长度为 $1.5h$ 时,出现裂缝的范围较大;延伸长度为 $1.0h$ 时,裂缝的范围居两者之间;同时,只有延伸长度为 $0.5h$ 时,在梁的根部出现了破坏裂缝。从开裂荷载上看,延伸长度为 $1.5h$ 的构件开裂荷载最大,说明延伸长度对梁的开裂荷载有一定的影响。节点核心区均未产生明显的破坏,这是由于所有构件均采用了“强节点,弱构件”的设计原则,节点核心区的箍筋做了加密,采用了柱子的混凝土强度浇筑节点核心区,与梁和柱子相比较,节点具有更好的抵抗低周反复荷载的能力。



图9 BZ2Y2 破坏图片

Fig. 9 Failure photo of BZ2Y2

2.2 骨架曲线和滞回曲线

不同轴压比和不同延伸长度下,边节点核心区采用柱子混凝土强度的构件骨架曲线对比如图 10 和图 11 所示。轴压比越大,滞回曲线的刚度也越大。在 0.3 和 0.5 轴压比下,延伸长度对骨架曲线的形态、屈服荷载和最大荷载都没有显著影响,而延伸长度为 $0.5h$ 的试件,下降段更陡峭一些。

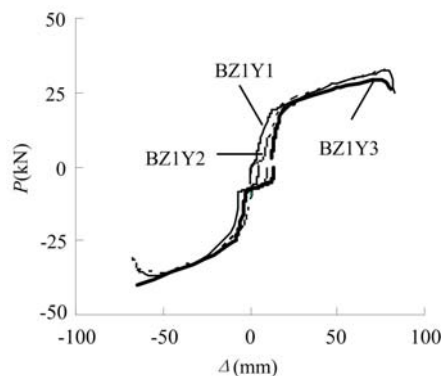


图 10 0.3 轴压比下的骨架曲线

Fig. 10 Skeleton curves of 0.3 axial compression ratio

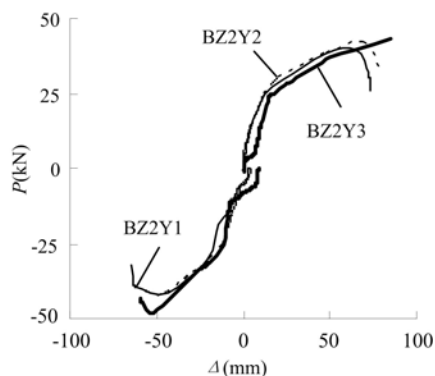


图 11 0.5 轴压比下的骨架曲线

Fig. 11 Skeleton curves of 0.5 axial compression ratio

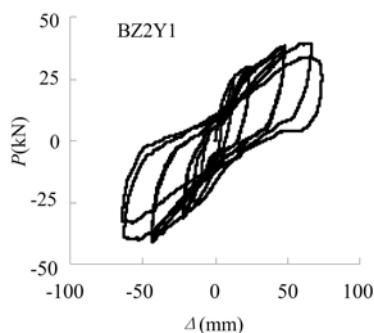
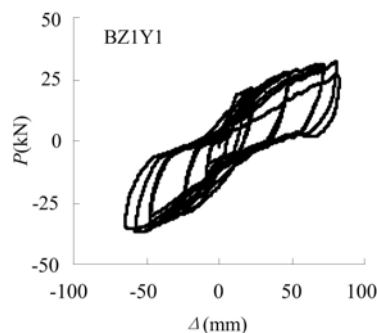


图 12 构件 BZ1Y1 和 BZ2Y1 的滞回曲线

Fig. 12 Hysteretic curves of BZ1Y1 and BZ2Y1

构件 BZ1Y1 和 BZ2Y1 的滞回曲线如图 12 所示,由图可以看出,滞回曲线呈梭形,较光滑;轴压比越大,滞回曲线的刚度也越大;从卸载曲线上看,主筋在节点存在一定量的滑移。其余边节点构件的滞回曲线与图 12 类似,均呈较光滑的梭形。

2.3 承载力和延性性能分析

边节点构件的试验结果如表 2 所示,延性系数取用最大位移(即构件的最大承载力对应的位移)与屈服位移的比值,屈服位移由图解法确定。从表 2 可以看出,在 0.3 轴压比下,延伸长度为 $1.5h$ 时的延性性能最好,为 3.26;延伸长度为 $1.0h$ 时的延性性能稍差,为 3.11;延伸长度为 $0.5h$ 时的延性性能最小,为 2.53;延伸长度对屈服荷载和最大荷载没有显著影响。在 0.5 轴压比下,延伸长度为 $1.0h$ 时的构件延性性能最好,为 2.73;延伸长度为 $1.5h$ 时的延性性能稍差,为 2.41;延伸长度为 $0.5h$ 时的延性性能最小,为 2.38。从试验结果可见,延伸长度为 $0.5h$ 时,延性性能最差,随着延伸长度的增加,延性性能会增大。延伸长度为 $1.5h$ 时的试件最大荷载略高于其他构件,延伸长度对屈服荷载没有显著影响。从试验结果可以看出,当构件所承受的轴压比较低时,即使梁柱边节点核心区采用强度较低的梁中混凝土,其承载能力仍能满足要求,但是延性性能弱于节点核心区采用柱子混凝土强度的构件。

表 2 试验结果
Tab.2 Test results

试件 编号	延伸 长度	设计 轴压比	梁/柱混凝土强度 实测值(N/mm ²)	屈服荷载 (kN)	屈服位移 (mm)	最大荷载 (kN)	最大位移 (mm)	延性系数 均值
BZ1	—	0.30	70/82	20.43	27.25	27.18	53.58	2.17
				—32.13	—25.71	—43.14	—61.16	
BZ1Y3	1.5h	0.30	80/94	22.25	28.89	29.16	74.89	3.26
				—28.18	—16.46	—39.85	—64.63	
BZ2Y3	1.5h	0.50	70/85	29.14	27.52	43.27	85.00	2.41
				—36.22	—30.07	—48.36	—51.90	
BZ1Y2	1.0h	0.30	70/85	23.55	29.77	32.13	77.90	3.11
				—25.24	—13.81	—35.67	—49.62	
BZ2Y2	1.0h	0.50	70/85	29.18	18.61	42.24	69.48	2.73
				—32.87	—27.63	—41.22	—47.85	
BZ1Y1	0.5h	0.30	80/94	21.01	30.22	32.17	80.12	2.53
				—28.86	—23.11	—36.96	—55.67	
BZ2Y1	0.5h	0.50	70/82	28.05	18.64	39.52	64.54	2.38
				—36.23	—33.47	—41.18	—43.34	

3 结论

(1) 从破坏现象上看,试验构件的破坏均为梁端的受弯破坏。当构件所承受的轴压比较低时,即使边节点核心区采用强度较低的梁中混凝土,其破坏形态仍为梁端受弯破坏,但是延性性能略有下降。

(2) 从试验结果上看,柱子中高强混凝土在梁中的延伸长度为 1.5h 时的承载能力和开裂荷载最大,延伸长度对屈服荷载没有显著影响。

(3) 从延性性能上看,在 0.3 轴压比下,延伸长度为 1.5h 时的延性最好,为 1.0h 时的延性稍差,为 0.5h 时的延性最小。在 0.5 轴压比下,延伸长度为 1.0h 时的构件延性最好,为 1.5h 时的延性稍差,为 0.5h 时的延性最小。从试验结果可见,延伸长度为 0.5h 时,延性性能最差,随着延伸长度的增加,延性性能增大。

参考文献:

[1] 黄玉屏. 高层建筑框架梁柱节点的强度验算和施工处理[J]. 有色冶金设计与研究, 2004, 25(1):41—43,50 (Huang Yu-ping. Strength checking calculation and construction method of the node of tall building frame beam and column [J]. Nonferrous Metals Engineering & Research, 2004, 25(1):41—43,50 (in Chinese))

[2] Atta A E, Taher S E F, Khalil A A, et al. Behaviour of reinforced high-strength concrete beam-column joint[J]. Part 1: experimental investigation, Structural Concrete, 2003, 4(4):175—183, 9.

[3] 李英民, 刘建伟. 钢筋混凝土框架夹心节点抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2010, 31(12):74—82 (Li Yingmin, Liu Jianwei. Pseudo-static test for reinforced concrete sandwich beam-column joints[J]. Journal of Building Structures, 2010, 31(12):74—82 (in Chinese))

[4] Wei Chunming, Su Hui, Zhao Qiang, Bi Chunli. Bonding Mechanism of Horizontal Construction Joints[J]. Advanced Materials Research, 2011, 369:1264—1267.

[5] 魏春明. 现浇钢筋混凝土框架结构施工缝抗震性能[D]. 大连理工大学, 2006 (Wei Chunming. Seismic Behavior of Cast in-site Reinforced Concrete Frame Structure with Construction Joints [D]. Dalian University of

Technology, 2006 (in Chinese))

- [6] 唐九如. 钢筋混凝土框架节点抗震[M]. 南京:东南大学出版社, 1989:281 (Tang Jiuru. Seismic resistance of joints in reinforced concrete frames[M]. Nanjing: Southeast University Press, 1989:281(in Chinese))

Research on Seismic Performance of Exterior Joints in Tall-building Structure

WEI Chun-ming¹, MA Xiao-xiao¹, ZHAO Xing-hai², ZHAO Qiang¹, CHEN Jian-hua¹

(1. Architectural and Civil Engineering College of Northeast Dianli University, Jilin 132012, China;

2. Energy and Power Engineering College of Northeast Dianli University, Jilin 132012, China)

Abstract: Based on low-cycle loading test for 7 exterior joints of a tall-building structure with construction joint, the influence of parameters, such as axial compression ratio, concrete strength grade in exterior joints core region and extending length of column's high-strength concrete into beams etc, on seismic performance of beam-column exterior joints was experimentally studied. The failure characteristics, bearing capacity, displacement ductility, hysteretic curve and skeleton curve of components were analyzed and compared. Experimental results show that all beam-column exterior joints damage at beam ends due to bending. The extending length of column's high-strength concrete into beams has no significant effect on yield load, peak load and skeleton curve. While the extending length presents effect on displacement ductility. When the extending length is $0.5h$, the displacement ductility ratio of exterior joints is less than that of extending length $1.0h$ and $1.5h$, respectively.

Keywords: tall-building structure; exterior joints; seismic performance