

文章编号:1000-582X(2011)08-128-06

# 大偏心距夹心梁柱节点抗震性能试验

华建民<sup>a,b</sup>, 陈祥<sup>a</sup>, 曹晖<sup>a,b</sup>

(重庆大学 a. 土木工程学院; b. 山地城镇建设与新技术教育部重点实验室, 重庆 400045)

**摘要:** 完成了 3 个梁柱偏心距大于 1/4 柱宽的夹心十字型平面节点试件的低周反复加载试验, 对试件的抗震性能、损伤过程、失效模式、位移延性、节点区受剪承载力等方面进行了分析。结果表明此类偏心夹心节点具有良好的承载能力和抗震性能, 并且可以用 X 筋替代部分节点区箍筋承担节点区剪力, 但梁筋在节点区的锚固性能较弱。与普通夹心节点相比, 大偏心夹心节点核芯区附近柱纵筋受力较为不利。

**关键词:** 大偏心夹心梁柱节点; 抗剪承载力; 抗震性能; 混凝土强度; 失效模式

**中图分类号:** TU375

**文献标志码:** A

## Experimental study on seismic behavior of beam-column sandwich joints with big beam-column eccentricity

HUA Jian Min<sup>a,b</sup>, CHEN Xiang<sup>a</sup>, CAO Hui<sup>a,b</sup>

(a. College of Civil Engineering; b. Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China)

**Abstract:** Three specimens of sandwich joints with eccentricity being larger than a quarter of the column width in middle floor of frame are designed and loaded under cyclic loading. Their shear capacity, failure modes, and ductility, as well as energy dissipation are analyzed. The results show that the performance of sandwich joints with big eccentricity is good under cyclic loading. X-type reinforcements can be used to substitute for stirrups in the joint to bear shear forces. But the anchorage of longitudinal bars of beams in eccentric sandwich joints is relatively weak. Comparing to sandwich joints without eccentricity, the column longitudinal bars near the sandwich joints with big eccentricity are vulnerable to sudden change of strain.

**Key words:** sandwich beam-column joint of big beam-column eccentricity; shear strength; seismic performance; concrete strength; failure modes

在多高层建筑结构中, 特别当设防烈度较高时, 由于受到柱轴压比及截面尺寸的限制, 柱混凝土强度经常高于梁混凝土。如果节点区按照柱混凝土浇筑, 不仅增大施工难度、影响施工进度, 还会造成工程质量隐患。如果节点区按梁混凝土来浇筑则有助于解决上述问题。节点区按梁混凝土来浇筑, 工程中一般称为“夹心”节点。迄今为止, Bianchini 和 Kim 等国外学者对夹心节点进行了比较深入的研

究<sup>[1-7]</sup>, 认为当柱与梁混凝土强度比小于 1.4 时可以忽略其强度降低的影响, 但当比值大于 1.4 时节点区强度应取折算强度, 其研究成果已经被引入美国 ACI318<sup>[8]</sup> 规范, 印度<sup>[9]</sup> 也开展了相应方面的研究并写进了本国规范; 但由于美国规范与我国规范不同之处在于他们认为节点区箍筋仅起构造作用, 因此国内学者<sup>[10-16]</sup> 也相继开展相应方向的研究, 研究表明, 与普通节点相比, 夹心节点在承载力以及抗

收稿日期: 2011-05-04

基金项目: 重庆市科技攻关资助项目 (CSTC, 2010AB0007)

作者简介: 华建民 (1974-), 男, 博士, 从事结构工程及施工技术研究, (E-mail) hjm191@163.com.

震性能方面均具有良好的表现。但是对于梁柱中线不对齐的节点,是否可以参照上述夹心节点的试验结果进行设计还有待进一步的研究。本文对 3 个大偏心距的夹心节点试件进行低周反复加载试验,研究其承载能力和抗震性能。

## 1 节点试件设计

设计 3 个平面十字型梁柱偏心夹心节点,试验分两批浇筑,GJ-4 为第一批,GJ-5 和 GJ-6 为第二批。GJ-4 按《建筑抗震设计规范》<sup>[17]</sup>进行设计并适当提高节点区抗剪承载力。GJ-5 节点区箍筋与 GJ-4 相同,满足受剪承载力要求,但不增配 X 筋用来加强节点区抗剪承载力。GJ-6 与 GJ-5 的差别在于用 X 筋来替代部分节点区箍筋。

试件柱截面尺寸为 350 mm×350 mm,梁截面尺寸为 150 mm×350 mm,梁中线与柱中线之间偏心距为 100 mm,偏心距与柱宽比值为 1/3.5。《建筑抗震设计规范》<sup>[17]</sup>规定:梁柱偏心距大于 1/4 倍柱宽时应计入偏心影响。本试验采取水平加腋的方法,腋长  $L_x$  为 250 mm,腋宽  $b_x$  为 100 mm,节点和梁混凝土设计等级为 C20,柱混凝土设计等级为 C40。箍筋均采用 HPB235,其他钢筋则采用 HRB400。试件尺寸见图 1,钢筋力学性能见表 1,试件配筋及混凝土实测强度如表 2。

表 1 钢筋力学性能

钢筋级别与直径/mm	屈服强度/MPa	断后伸长率/%
φ 12	33	
φ 12	424	≥20
φ 14	453	
φ 16	441	

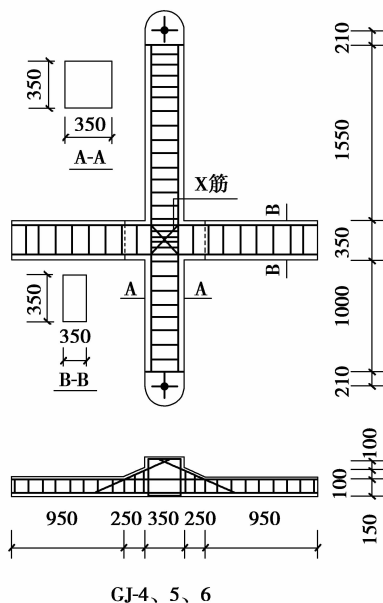


图 1 试件尺寸

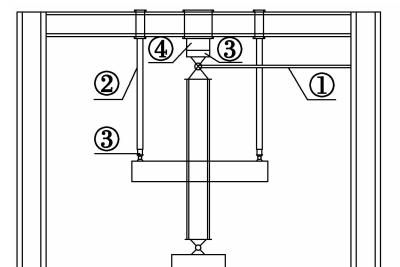
表 2 试件配筋及混凝土强度

项目	GJ-4	GJ-5	GJ-6
柱配筋	4 φ 16+6 φ 14		
柱配筋率/%	1.41		
梁纵筋	2 φ 16 (上)/2 φ 16(下)		
梁配筋率/%	0.77		
加腋斜筋	2 φ 12		
	12-3 道	12-3 道	
	(2 肢)	(3 肢)	12-6 道
节点箍筋	12-3 道	12-3 道	(2 肢)
	(2 肢)	(3 肢)	
节点 X 型钢	4 φ 14	无	4 φ 16
节点及梁混凝土强度	22.8	20.6	20.9
fcu/MPa			
柱混凝土	38.8	32.6	39.6
强度 fcu/MPa			
柱/节点混凝土强度	1.70	1.58	1.89

(表中节点区/梁、柱混凝土强度 fcu 为立方体抗压强度)

## 2 试验方法

用液压千斤顶加载,GJ-4、GJ-5 和 GJ-6 的最大预定加载值分别为 1 426、1 198、1 455,分 500 kN、1 000 kN 和最大预定加载值三级施加,每级荷载作用后保持恒定一定时间并记录钢筋应变,达到最大预定轴压力后,保持恒定直至试验结束。梁两端采用液压千斤顶分别施加拉力和压力进行低周反复加载,加载装置见图 2。加载制度采用位移控制,梁端控制位移分别为 2、3、6、8、12、16、24、32、48、69、92、110 mm,以逆时针方向加载为正循环,顺时针方向加载为反循环,加载过程中左右梁端位移保持 1:1,每个控制位移下循环两次,加载制度见图 3。



1—水平支撑; 2—200 kN 拉压千斤顶  
3—荷载传感器; 4—2000 kN 拉压千斤顶

图 2 试件加载装置

试验过程中,量测并记录梁端加载点的荷载大小及其加载点的位移、柱筋应变、梁纵筋以及加腋斜筋应变、节点区箍筋应变、节点区交叉斜筋应变、节点区剪切变形、梁筋滑移、裂缝开展及试件破坏状态。

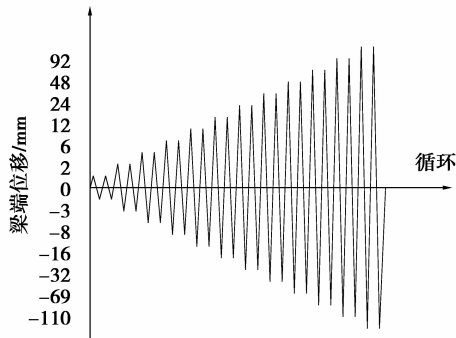


图 3 加载制度

### 3 试验结果及分析

#### 3.1 破坏过程

当按梁端位移 2 mm 施加荷载时,三个试件左右梁端均产生弯剪裂缝。随着梁端位移的增大,裂缝不断发育并有部分裂缝开始逐渐贯通梁截面。梁筋屈服前梁端弯剪裂缝发育比较充分,屈服后试件变化主要表现为裂缝宽度不断增宽以及梁混凝土保护层剥落。试件破坏时三个试件偏心一侧柱混凝土均有一定的劈裂,角部混凝土逐渐剥落。节点区剪切裂缝出现时梁端位移见表 3。

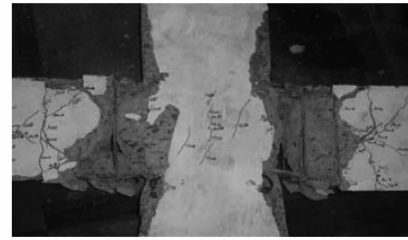
表 3 节点区剪切裂缝

编号	正向加载裂缝	反向加载裂缝
GJ-4	12 mm 第二正循环	32 mm 第一反循环
GJ-5	16 mm 第一正循环	无
GJ-6	12 mm 第一正循环	无

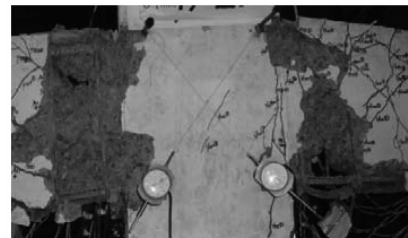
各试件均在梁端出现塑性铰后节点区才出现剪切裂缝。直到梁端混凝土压碎,节点区箍筋均未屈服。试件的最终破坏形态属于梁的弯曲破坏,见图 4。在低周反复加载过程中,柱端靠近节点区处以及节点区边缘处柱纵筋应变有一定的突变,且 GJ-5 和 GJ-6 的柱纵筋均出现受拉的情况。与低剪压比作用下的普通夹心节点相比,柱筋受力更为不利。但整个试验过程中均未发现柱筋屈服的现象,其中 GJ-5 右侧柱筋应变见图 5。



(a) GJ-4



(b) GJ-5



(c) GJ-6

图 4 试件最终破坏状态

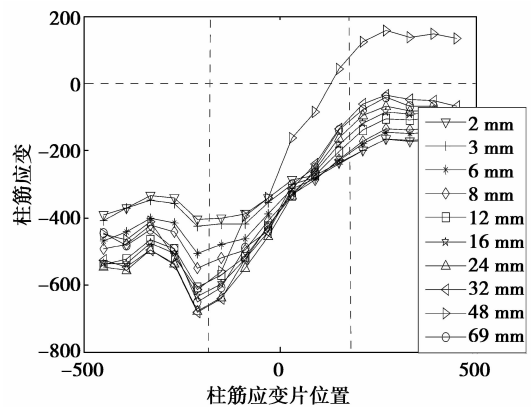
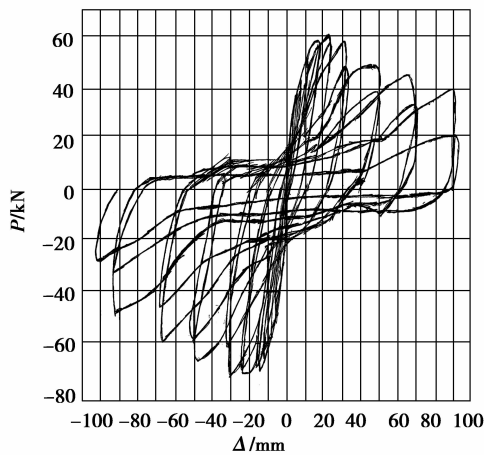


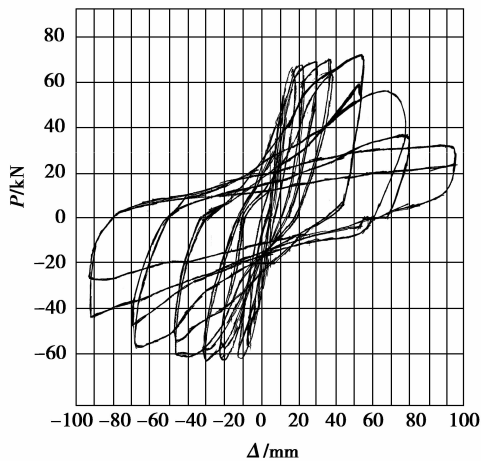
图 5 GJ-5 柱筋应变

#### 3.2 延性和耗能

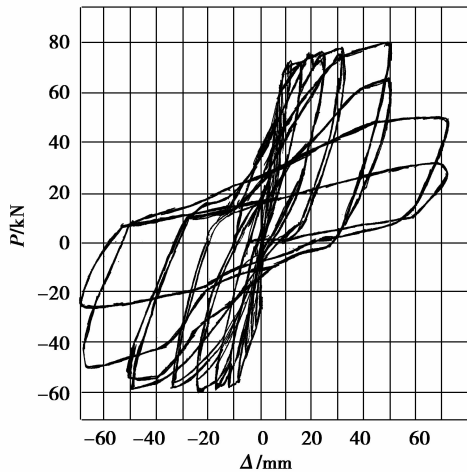
GJ-4、GJ-5 和 GJ-6 的梁端荷载滞回曲线和骨架曲线分别见图 6 和图 7。由于试件的破坏均源于梁受压区混凝土压碎,破坏时节点区混凝土损伤还不严重,属于延性破坏。因此试件均表现出良好的延性和耗能能力,试件位移延性比见表 4。表中屈服位移确定方法采用通用屈服弯矩法(G. Y. M. M),极限位移取梁端荷载下降至峰值荷载 85%时对应的位移。



(a) GJ-4



(b) GJ-5



(c) GJ-6

图 6 试件的滞回曲线

表 4 试件的延性比

编号	GJ-4	GJ-5	GJ-6
屈服位移	9.3	10.2	9.2
极限位移	58	66	61.2
位移延性	6.2	6.5	6.6

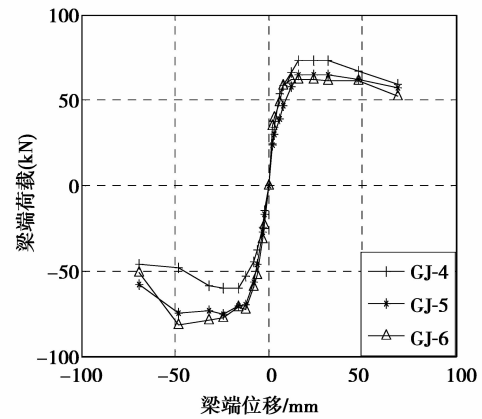


图 7 试件的骨架曲线

### 3.3 节点区抗剪承载力

表 5 给出了各试件在不同荷载水平下节点区的剪力大小以及节点区抗剪承载力。其中 GJ-6 节点区承受的最大剪力与抗剪承载力的比值达到 0.92,但试件仍然表现出良好的性能,破坏形态为延性破坏。从表中可见,GJ-4 的节点抗剪承载力最大,但其位移延性却最低。这是由于加载装置的原因,致使在加载后期 GJ-4 的梁受扭比 GJ-5 和 GJ-6 更严重。

$f_c = 0.76 f_{cu}$ ,  $f_{cu}$  为 150 mm 立方体抗压强度实测值;名义剪压比按梁混凝土计算,表示为  $V_1 / f_{cb} b_j h_j$ ;试验剪压比按柱混凝土计算,表示为  $V_1 / f_{cc} b_j h_j$ ;节点有效宽度参考文献[18],取  $b_j = 180$  mm。

表 5 节点区剪力

编号	GJ-4	GJ-5	GJ-6
梁筋屈服时节点区剪力 $V_1$ /kN	341	356	357
最大荷载时节点区剪力 $V_1$ /kN	410.6	428	452
节点区抗剪承载力 $V_3$ /kN	627	536	489
$V_2 / V_3$	0.65	0.80	0.92
名义剪压比	0.29	0.34	0.34
试验剪压比	0.20	0.22	0.18

### 3.4 节点区受压承载力

本次试验三个试件节点区名义轴压比分别为 0.67、0.62 和 0.75(节点区名义轴压比按  $N / f_{cb} A$  计算,  $A$  为节点区面积)。在加载过程中柱顶荷载保持恒定,节点区承受了较大的轴力,但均未因承载力不足节点区出现轴压或斜压破坏的情况,位移延性最大达到了 6.6。

### 3.5 梁筋滑移

贯穿节点区梁纵筋的直径对于试件的抗震性能有一定的影响。本文试验三个试件的梁纵筋直径均采用 16 mm,纵筋直径与节点宽度的比值约为 1/22,略小于规范对于梁筋直径的限值。梁筋虽然没有发

生粘结滑移破坏,但在加载后期梁筋的滑移量较大,与文献[15]的结果一致。由于夹心节点核心区混凝土强度比普通节点低,对梁纵筋的锚固不利。因此建议在进行偏心夹心节点设计时采取更严格的控制梁筋滑移的措施,如将贯穿节点的梁筋直径控制在节点宽度的1/25以内。不同梁端位移下各试件梁筋滑移见图8。

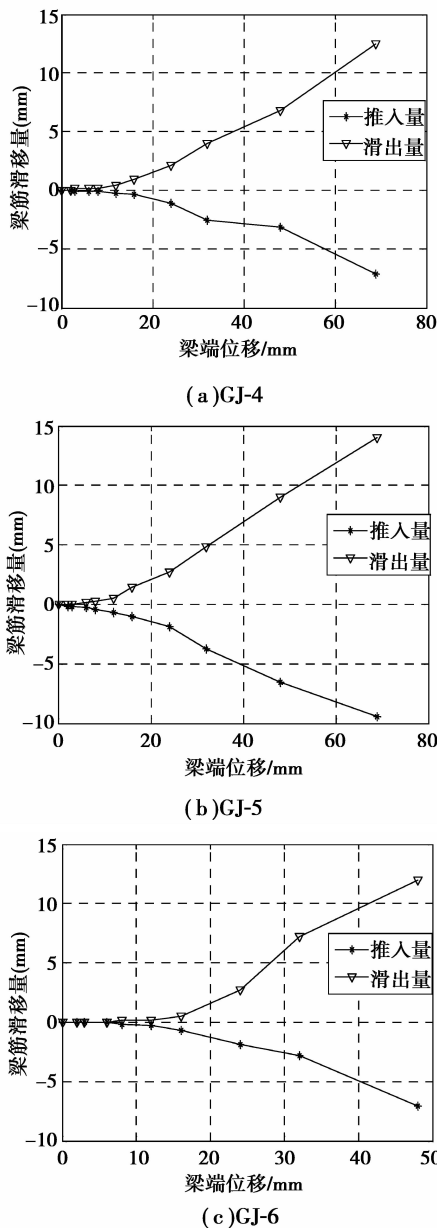


图8 试件的梁筋滑移量

### 3.6 X型钢筋应变

试件浇筑前,在每根X型钢筋中预埋7个钢筋应变片,其中GJ-6的X型钢筋应变见图9。从图中可以看出,随着荷载的增大,X型钢筋的应变也相应增大,抗剪作用不断得到发挥。但在整个加载过程中X型钢筋应变均远小于屈服应变。其原因可能是在进行节点区抗剪承载力计算时,低估了节点区

混凝土对受剪承载力的贡献。文献[11]建议将节点区混凝土强度提高40%考虑。

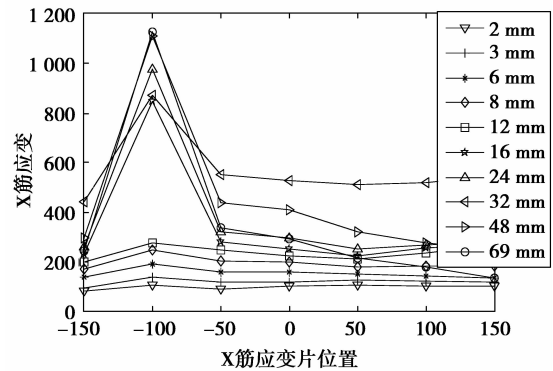


图9 GJ-6的X型钢筋应变

### 3.7 不同偏心距试件对比

在完成本次大偏心距的夹心节点试件(第二组)试验之前,作者已经完成了三个偏心距为67.5 mm的夹心节点试验(第一组)。第一组试件梁截面尺寸为175 mm×350 mm,梁上部钢筋为3 $\Phi$ 16,下部钢筋为2 $\Phi$ 16+1 $\Phi$ 14,梁端未加腋,柱尺寸及配筋与第二组相同。对比两组试验结果发现:

1)第二组试件对梁端采取了加腋措施,但是柱筋应变突变更为严重。第一组试件的柱筋在整个加载过程中均受压,第二组试件却有部分柱纵筋出现拉应变。即随着偏心距的增大,柱纵筋的应变突变更为严重。

2)第二组试件柱角混凝土劈裂更严重。

3)除上述问题外,第二组试件其他方面的性能并不比第一组差,有些地方甚至优于第一组,如梁筋滑移量,这可能与梁筋在节点内弯折有关。

## 4 结论

通过3个大偏心距夹心十字型平面节点试件的低周反复加载实验,对其承载力、破坏特征和抗震性能有了一定的了解,得出结论如下:

1)当节点区满足受剪承载力要求时,未出现节点区剪切破坏或者混凝土斜压破坏的情况。

2)试件均有较好的位移延性和耗能能力,用X筋替代部分节点区箍筋,未发现不利情况。因此对于节点区箍筋过多影响施工时,可以用X筋替代部分节点区箍筋。

3)梁柱偏心的距离与节点区宽度比值大于1/4时,与比值小于1/4的试件相比,偏心一侧节点区与梁的交界处以及柱端表层混凝土剥落更严重。

4)加载后期节点区梁筋滑移较大,在进行夹心节点设计时,有必要采取更严格的控制梁筋滑移的措施,如梁筋直径不大于柱在该方向截面尺寸的1/25。

5)偏心夹心节点对柱筋的影响大于普通夹心节点,且随着偏心距的增大,对柱筋的影响更严重。

## 参考文献:

- [1] BIANCHINI C A, WOODS E R, KESLER E C. Effect of floor concrete strength on column strength [J]. Journal of the American Concrete Institute, 1960, 31(11):1149-1169.
- [2] KIM J H, LAFAVE J M, SONG J. A new statistical approach for joint shear strength determination of RC beam-column connections subjected to lateral earthquake loading [J]. Structural Engineering and Mechanics, 2007, 27(4):439-456.
- [3] SARKAR P. Design of RC beam-column joints under seismic loading-a review [J]. Journal of Structural Engineering, 2007, 33(6):449-457.
- [4] KIM J H, LAFAVE J M. Key influence parameters for the joints shear behaviour of reinforced concrete (RC) beam-column connections [J]. Engineering Structures, 2007, 29(10):2523-2539.
- [5] LEE J H, YOON Y S, COOK W D, et al. Benefits of using pultruded HSC with fibers in slabs to transmit HSC column loads [J]. Journal of Structural Engineering, 2007, 133(12):1843-1847.
- [6] KIM J H, YANG J M, YOON Y S. Strategic slab-column joint details for improved transmission of HSC column loads [J]. Magazine of Concrete Research, 2008, 60(2):85-91.
- [7] KANG T H. Seismic design of reinforced concrete beam-column joints with headed bars [J]. ACI Structural Journal, 2009, 106(6):868-877.
- [8] Aci Committee. ACI318-05 Building code requirement for reinforced concrete and commentary [S]. USA: American Concrete Institute, 2005.
- [9] SUBRAMANIAN N. Transmission of HSC column Loads through NSC slabs [J]. Indian Concrete Journal, 2006, 80(1):44-49.
- [10] 余琼, 李思明. 核心区柱混凝土强度不等时节点的性能研究 [J]. 同济大学学报:自然科学版, 2004, 32(12):1558-1588.  
YU QIONG, LI SI-MING. Research on frames joint that concrete strength of core is inferior to that of column [J]. Journal of Tongji University: Natural Science Edition, 2004, 32(12):1558-1588.
- [11] 徐斌, 程懋堃, 张美励, 等. 核心区混凝土强度低于柱的框架节点定受力性能试验研究 [J]. 建筑结构, 2006, 36(6):18-23.  
XU BIN, CHENG MAO-KUN, ZHANG MEI-LI, et al. Experimental study on behavior of reinforced concrete beam-column joint with lower core concrete strength [J]. Building Structure, 2006, 36(6):18-23.
- [12] 应力, 宋长波, 刘永光, 等. 不等强混凝土框架节点受力性能 [J]. 沈阳建筑大学学报:自然科学版, 2007, 23(2):226-230.  
YING LI, SONG CHANG-BO, LIU YONG-GUANG, et al. Bearing performance of frame joints poured with the different strength concrete [J]. Journal of Shenyang Jianzhu University: Natural Science, 2007, 23(2):226-230.
- [13] 李英民, 刘建伟, 郑清, 等. 高剪压比钢筋混凝土框架夹心节点抗震性能研究 [J]. 重庆建筑大学学报, 2007, 39(4):44-48.  
LI YING-MIN, LIU JIAN-WEI, ZHENG QING, et al. Seismic load tests on reinforced concrete beam-column sandwich joints with high shear stress [J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2007, 39(4):44-48.
- [14] 冯亮亮, 刘文明, 范吉祥, 等. 现浇混凝土结构节点处浇筑方法的探讨 [J]. 施工技术, 2008, 37(6):8-10.  
FENG LIANG-LIANG, LIU WEN-MING, FAN JI-XIANG, et al. Discussion on pouring method of cast-in-situ concrete structures nodes [J]. Construction Technology, 2008, 37(6):8-10.
- [15] 刘建伟, 李英民, 杨治洪, 等. 平面 RC 框架夹心节点与传统节点抗震性能对比试验 [J]. 建筑结构, 2009, 39(4):10-13.  
LIU JIAN-WEI, LI YING-MIN, YANG ZHI-HONG, et al. Comparison of behavior of traditional and sandwich plane RC beam-column joints based on cyclic load test [J]. Building Structure, 2009, 39(4):10-13.
- [16] 杨治洪. RC 框架夹心节点抗震性能及设计方法研究 [D]. 重庆:重庆大学, 2010.
- [17] 中华人民共和国建设部. GB50011-2001 建筑抗震设计规范 [S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2001.
- [18] 王静峰, 柳炳康, 孙捷. 钢筋混凝土框架梁柱偏心节点抗裂性能的试验研究 [J]. 同济大学学报:自然科学版, 2003, 31(12):1395-1400.  
WANG JING-FENG, LIU BING-KANG, SUN JIE. Crack resistance of eccentric beam-column connections in reinforced concrete frames [J]. Journal of Tongji University: Natural Science Edition, 2003, 31(12):1395-1400.

(编辑 张小强)