

# 型钢混凝土异形柱中框架和边框架抗震性能试验对比分析

薛建阳, 杨青峰, 刘祖强, 赵鸿铁, 周超锋

(西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055)

**摘要:** 为对比空间位置不同的型钢混凝土(SRC)异形柱框架的抗震性能, 各设计1榀边框架和中框架进行低周反复加载试验, 获得其破坏形态, 分析其滞回曲线、骨架曲线、承载力、延性、耗能能力、刚度和型钢应变等特性。结果表明: SRC异形柱框架符合“强柱弱梁、强构件弱节点”的抗震设计要求, 滞回曲线饱满, 延性好, 耗能能力强; 与边框架相比, SRC异形柱中框架具有更高的承载力、更强的耗能能力和更大的初始刚度, 但两者的延性比较接近, 刚度退化速度相差不大。

**关键词:** 型钢混凝土; 异形柱框架; 拟静力试验; 抗震性能

中图分类号: TU398.2

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2016)03-0316-05

## Comparison and experimental analysis of the seismic performance of steel reinforced concrete exterior frame and middle frame with special-shaped columns

XUE Jianyang, YANG Qingfeng, LIU Zuqiang, ZHAO Hongtie, ZHOU Chaofeng

(School of Civil Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China)

**Abstract:** In order to compare the seismic performance of steel reinforced concrete (SRC) frames with special-shaped columns at different spatial locations, two models, an exterior frame and a middle frame, were tested under low cyclic reversed loading. The failure pattern were obtained and the mechanical behaviors such as hysteretic loops, skeleton curves, carrying capacity, ductility, energy dissipation, stiffness and shape steel strain distribution were analyzed. Test results show that SRC frame with special-shaped columns satisfies the seismic design principle of “strong column and weak beam, strong joint and weak member”, the hysteretic loops are plump, the ductility is good and the energy dissipation is strong. Compared with the exterior frame, the middle frame has higher carrying capacity, stronger energy dissipation and larger initial stiffness, but the ductility and rate of stiffness degradation is not as great.

**Key words:** steel reinforced concrete (SRC); frame with special-shaped columns; quasi-static test; seismic performance

型钢混凝土(SRC)异形柱结构作为一种新型结构体系, 不仅柱楞在室内不凸出, 建筑观瞻好, 房间得房率高, 而且承载力高, 抗震性能好<sup>[1]</sup>。SRC异形柱框架根据其空间位置的不同, 可以分为边框架和中框架两种类型<sup>[2]</sup>。边框架是L形柱作为角柱, T形柱作为边柱, 由梁连接而成; 中框架是T形柱作为边柱, 十形柱作为中柱, 由梁连接而成。目前, 对于SRC异形柱及其框架节点的构件研究<sup>[3-6]</sup>已进行较多, 但针对SRC异形柱框架结构的研究还很少, 仅文献[7]通过对1榀单跨两层框架模型进行了拟动力和拟静力试验, 研究结果表明: 该类型框架具有良好的抗震性能, 能够应用于高地震烈度区。但是上述研究的框架较为简单, 异形柱的类型单一, 不能完全反映SRC异形柱框架的特点, 且由于异形柱边框架和中框架所处的空间位置不同, 使得其受力性能存在差异。因此, 本文通过低周反复加载试验, 对实腹式型钢混凝土异形柱边框架与中框架的抗震性能进行了对比分析。

## 1 试验概况

### 1.1 试件设计与制作

试验设计实腹式配钢的SRC异形柱边框架(SYBK)和中框架(SYZK)各1榀, 均为两跨三层, 框架柱采用实腹式SRC异形柱, 框架梁采用钢筋混凝土梁。试件的具体尺寸及梁、柱截面配钢情况如图1所示, 设计参数如表1所示。为与实际结构更为接近, 梁侧悬挑翼缘板, 以考虑楼板的作用。由于柱下端承受较大的弯矩, 第一层柱中以下型钢的部分钢板作了加厚处理。

框架柱中配置的实腹式型钢由钢板焊接而成, 制作好的U形和封闭矩形箍筋焊接在型钢上, 并将箍筋和纵筋绑扎在一起形成整体钢骨架。在梁柱节点处, 梁角部的纵向钢筋从柱中型钢两侧通过, 其锚固长度按规范要求执行; 中间的纵向钢筋通过角焊缝与焊接在型钢上的连接板相焊接, 如图2所示。材料物理力学性能的试验结果详见文献[2]。

收稿日期: 2015-04-29

修改稿日期: 2016-06-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(51308444, 50978217); 陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2014JQ7288); 陕西省教育厅科研计划项目(16JK1464); 陕西省重点科技创新团队计划项目(2014KCT-31)和西安建筑科技大学青年科技基金(QN1408)

作者简介: 薛建阳(1970—), 男, 博士, 教授, 主要从事钢与混凝土组合结构及工程结构抗震研究。E-mail: jianyang\_xue@163.com

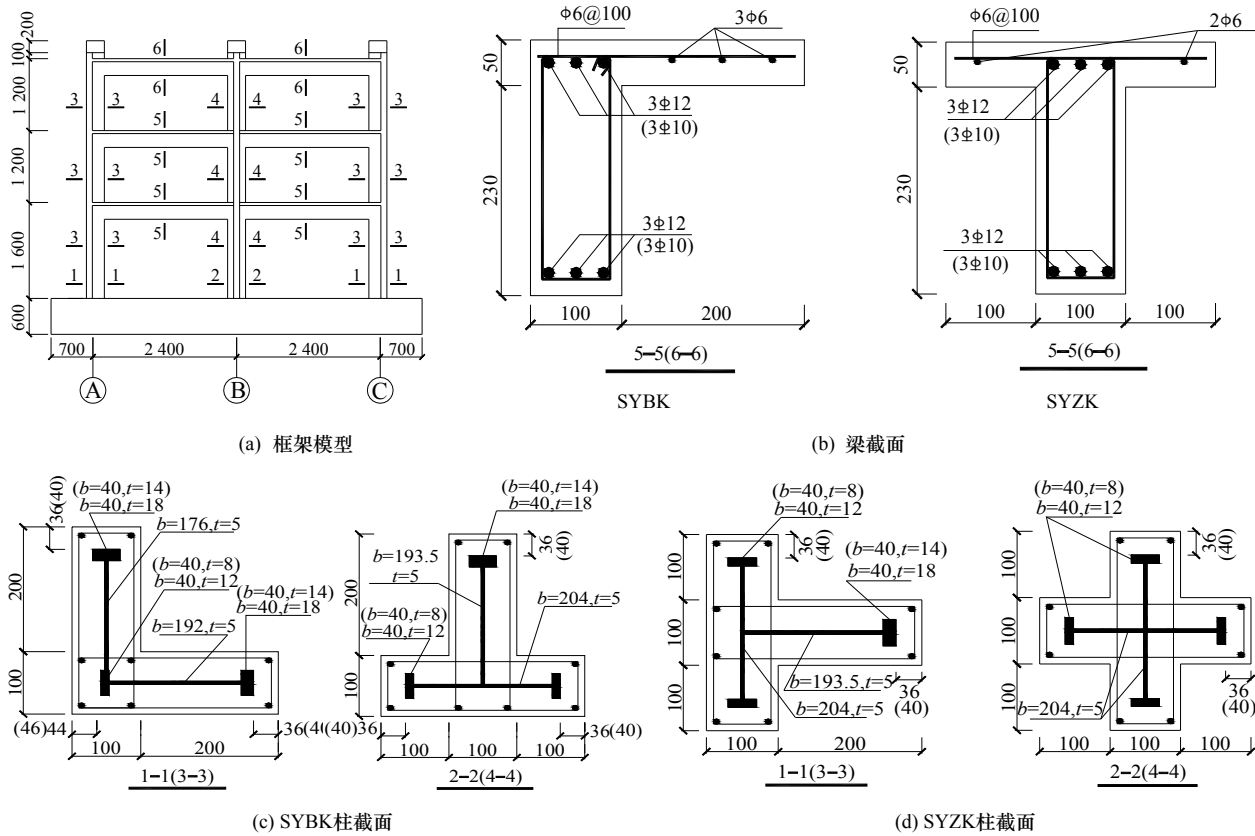


图1 试件几何尺寸及配钢形式  
Fig.1 Geometry and steel layout of specimens

表1 试件的设计参数

试件名称	框架柱					框架梁		
	截面类型	部位	设计 轴压比	体积配钢率/%		截面类型	纵筋配筋率/%	
				非加厚区域	加厚区域		第一、二层	第三层
SYBK	L形	角柱	0.2	6.56	7.52	倒L形	2.66	1.85
	T形	边柱	0.4	6.38	7.34			
SYZK	T形	边柱	0.2	6.38	7.34	T形	2.66	1.85
	十形	中柱	0.4	6.59	7.87			

1.2 加载方案与测点布置

试验在西安建筑科技大学结构工程与抗震教育部重点实验室完成,试验加载装置如图3所示.加载制度为力和位移联合控制,分两步进行.第一步,先在柱顶施加预定的竖向荷载,并保持不变;第二步在顶层梁处施加低周水平反复荷载,试件屈服前采用力控制,每级荷载增量为20~30 kN,循环1次,试件屈服后采用位移控制,每级位移按屈服位移的倍数逐级递增,循环3次,当荷载下降至峰值荷载的85%或变形达到加载装置的允许值时结束试验.

为分析梁、柱及节点处的应力变化,在各层梁端、柱端及节点核心区的钢筋和型钢上设置应变

片,如图2所示.为监测框架在水平荷载作用下的位移,在框架侧面沿高度依次布置电子位移计,如图3所示.

1.3 破坏形态

试验结果表明,实腹式SRC异形柱框架在水平反复荷载作用下,塑性铰首先在梁端出现,之后才出现在柱端,破坏机制为梁铰机制,部分节点核心区的混凝土发生脱落,但晚于梁、柱,且核心区中的型钢腹板没有发生屈服,符合“强柱弱梁”、“强节点弱构件”的抗震设计要求.框架的局部破坏形态如图4所示.

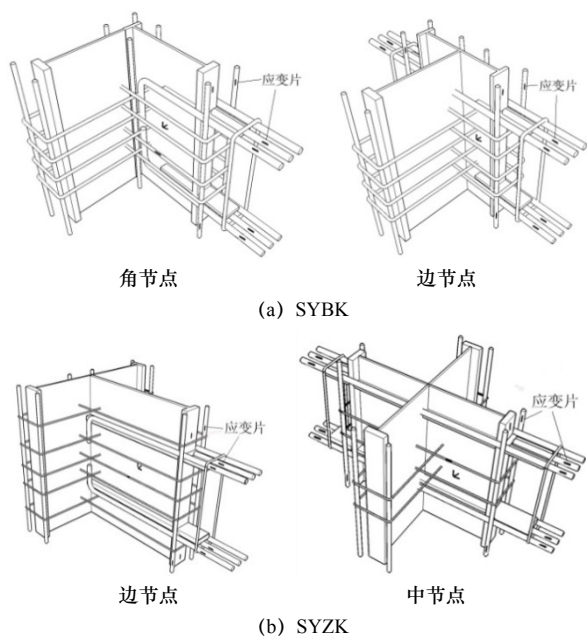


图2 节点构造

Fig.2 Details of joints

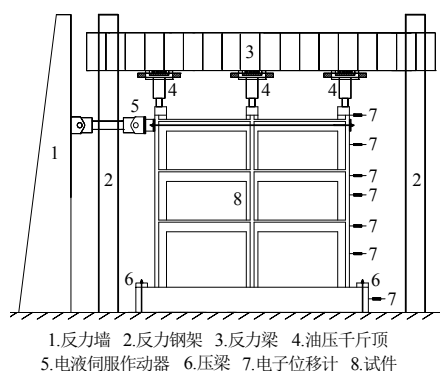
1.反力墙 2.反力钢架 3.反力梁 4.油压千斤顶  
5.电液伺服作动器 6.压梁 7.电子位移计 8.试件

图3 加载装置

Fig.3 Test setup



柱脚

梁、柱节点

(a) SYBK试件



柱脚

梁、柱节点

(b) SYZK试件

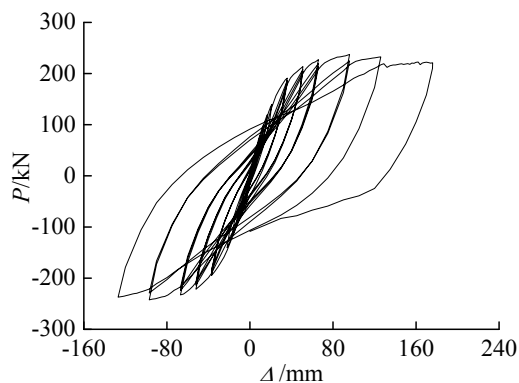
图4 试件破坏形态

Fig.4 Failure modes of specimens

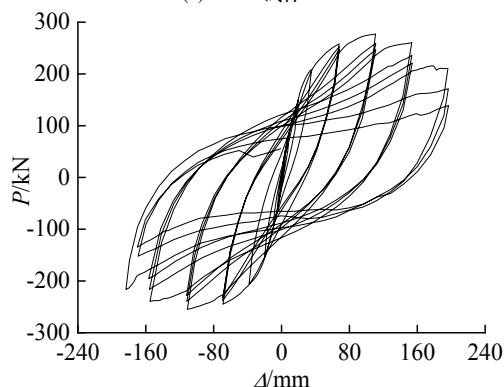
## 2 主要试验结果分析

### 2.1 滞回曲线与骨架曲线

实测两榀框架的荷载-顶点位移滞回曲线如图5所示. 由图可知, 同为实腹式配钢的SYBK和SYZK均显示出良好的滞回性能, 滞回环基本对称, 呈比较饱满的梭形或弓形. 由于SYBK的最后一级荷载仅在正向施加, 导致其曲线不对称, 但之前的曲线呈现较好的对称性.



(a) SYBK试件



(b) SYZK试件

图5 P-Δ滞回曲线

Fig.5 P-Δ hysteretic loops of specimen

图6为两榀框架的骨架曲线. 由图可以看出, SYZK试件的承载力明显高于SYBK试件, 这可能是由于对边框架加载时, 水平荷载未通过异形柱及梁的截面形心, 导致框架整体及异形柱存在部分扭转, 柱中型钢不能得到充分利用, 从而使得框架的承载力降低; 而对中框架加载时, 水平荷载正好对准异形柱及梁的形心, 型钢得到充分利用, 框架的承载力较高. 同时还可以看出, SYZK试件的曲线下降段在正向加载时比SYBK试件更加陡峭, 在负向两者相差不大. 骨架曲线特征点处的荷载值和位移值如表2所示. 表中 $P_y$ 为屈服荷载, 由通用屈服弯矩法<sup>[8]</sup>确定,  $P_m$ 为峰值荷载,  $P_u$ 为破坏荷载(取峰值荷载的85%),  $\Delta_y$ 、 $\Delta_m$ 、 $\Delta_u$ 分别为与 $P_y$ 、 $P_m$ 、 $P_u$ 对应

的位移值. 需要说明的一点是, SYBK试件的极限位移对应的荷载值取正向峰值荷载的93%, 这是因为此时的变形达到了加载装置的极限要求.

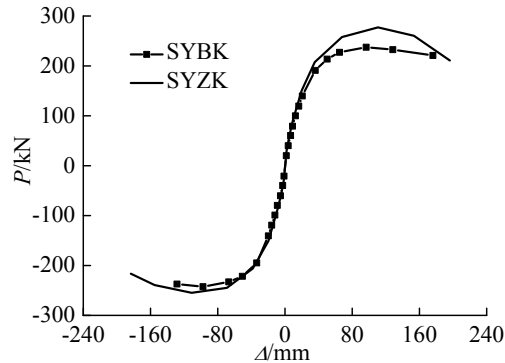


图6  $P-\Delta$ 骨架曲线  
Fig.6  $P-\Delta$  skeleton curves

表2 骨架曲线主要特征点的荷载值和位移值  
Tab.2 Experimental results at main loading stages

测试项目	SYBK		SYZK	
	推	拉	推	拉
$P_y/\text{kN}$	182.7	183.1	208.1	181.3
$\Delta_y/\text{mm}$	33.4	30.7	35.4	30.1
$P_m/\text{kN}$	237.6	242.5	277.3	254.7
$\Delta_m/\text{mm}$	96.6	97.5	110.7	111.1
$P_u/\text{kN}$	221.0	—	235.7	216.5
$\Delta_u/\text{mm}$	176.0	—	174.6	183.2
$\mu$	5.3	—	4.9	6.1

2.2 延性与耗能

延性采用位移延性系数 $\mu$ 表示, 实测两榀框架的位移延性系数如表2所示. 表中的位移延性系数 $\mu$ 为框架的极限位移 $\Delta_u$ 与屈服位移 $\Delta_y$ 的比值. 由于加载结束时SYBK试件的承载力并没有下降到峰值荷载的85%, 故SYBK的真实位移延性系数比表中的5.3要略大一些, 而SYZK在正负方向的位移延性系数平均值为5.5, 由此可以看出SRC异形柱边框架和中框架的延性差别不大.

耗能能力采用等效黏滞阻尼系数 $h_e$ 表征, 两榀框架的等效黏滞阻尼系数见表3. 由表3可知, 框架的等效粘滞阻尼系数随着位移的增加逐渐增大, 试件破坏时, 等效粘滞阻尼系数均大于0.2. 大量研究表明, 钢筋混凝土矩形柱框架破坏时的等效粘滞阻尼系数大致在0.1~0.2, 钢筋混凝土异形柱框架则更小, 可见实腹式SRC异形柱框架的抗震性能明显优于钢筋混凝土异形柱框架; 在同一特征点处, SYZK的等效粘滞阻尼系数均大于SYBK, 说明SRC异形柱中框架比边框架具有更强的耗能能力.

表3 等效黏滞阻尼系数  
Tab.3 Equivalent viscous damping coefficients

试件名称	$h_e$		
	屈服点	峰值点	破坏点
SYBK	0.091	0.173	0.240
SYZK	0.110	0.202	0.249

2.3 刚度

试件的刚度取割线刚度, 实测两榀框架在各级加载下第一次循环的刚度随位移的变化曲线如图7所示. 由图可知, SYBK和SYZK的初始弹性刚度平均值分别为15.38 kN/mm和17.30 kN/mm, 中框架的弹性刚度相对更大; 两榀框架的刚度退化速度较为接近, 均表现为先快后慢, 这主要是因为试件在加载初期, 梁端混凝土裂缝的发展及延伸, 使得框架整体刚度退化较快, 继续加载后, 试件逐渐屈服, 塑性很快发展, 混凝土不断退出工作, 刚度退化速度减慢.

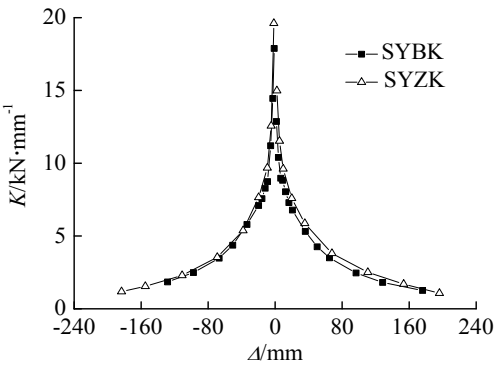


图7 刚度退化曲线  
Fig.7 Curves of stiffness degradation

2.4 型钢应变

由于柱中配置型钢, 异形柱框架的抗震性能显著改善. 在加载过程中, 一层柱脚受损最为严重, 二层次之, 三层受损程度最轻, 而节点核心区中的型钢基本未发生屈服, 故这里选取框架一层柱脚型钢进行应变分析, 如图8所示. 由图可知, 加载初期, 荷载-应变曲线关系呈直线, 表明柱脚型钢处于弹性工作阶段. 随着荷载的增大, 中框架T形边柱及边框架L形角柱型钢截面应变分布不均匀, 拉应变明显大于压应变, 相比之下, 边框架L形角柱截面受力不均匀现象更为明显, 其原因可能是加载过程中, 水平荷载未通过边框架构件截面形心, L形角柱发生扭转变形; 中框架十形中柱和边框架T形边柱型钢截面应变分布对称且基本一致, 表明加载过程中截面受力较为均匀.

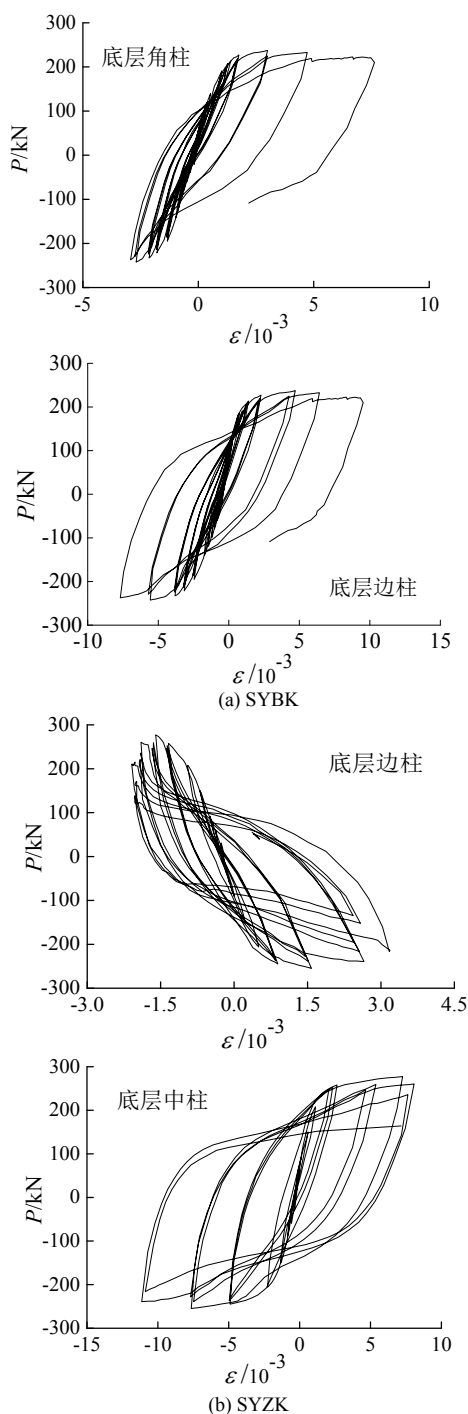


图8 柱脚型钢应变

Fig.8 Shape steel strain in column bottom

### 3 结论

通过试验研究,对实腹式SRC异形柱边框架和中框架的抗震性能进行了对比分析,得出以下结论:

- (1) 实腹式SRC异形柱框架符合“强柱弱梁、强节点弱构件”的抗震设计要求。
- (2) 实腹式SRC异形柱框架显示出良好的抗震性能,滞回曲线饱满,延性好,耗能能力强。
- (3) 和SRC异形柱边框架相比,中框架的承载力更高,耗能能力更强,初始刚度更大,但两者的

延性相差不大,刚度退化速度基本相同。

### 参考文献 References

- [1] 薛建阳, 陈宗平, 赵鸿铁. 型钢混凝土异形柱结构的性能、设计方法及其工程应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.  
XUE Jianyang, CHEN Zongping, ZHAO Hongtie. The performance of the steel reinforced concrete special-shaped column structure design method and its engineering application[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011.
- [2] 刘祖强. 型钢混凝土异形柱框架抗震性能及设计方法研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2012.  
LIU Zuqiang. Research on seismic performance and design method of steel reinforced concrete frame with special-shaped columns[D]. Xi'an: Xi'an Univ. of Arch. & Tech., 2012.
- [3] 徐亚丰, 刁晓征, 郭健, 等. 十字形钢骨混凝土异形柱双向偏心受压试验[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2009, 25(1): 100-105.  
XU Yafeng, DIAO Xiaozheng, GUO Jian, et al. Experimental study on the biaxial eccentric pressure bearing capacity of cross-shaped steel reinforced concrete columns[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University(Natural Science), 2009, 25(1): 100-105.
- [4] 陈宗平, 薛建阳, 赵鸿铁, 等. 型钢混凝土异形柱抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2007, 28(3): 53-61.  
CHEN Zongping, XUE Jianyang, ZHAO Hongtie, et al. Experimental research on seismic behavior of steel reinforced concrete special-shaped columns[J]. Journal of Building Structures, 2007, 28(3): 53-61.
- [5] 向平. 钢骨混凝土异形柱钢筋混凝土梁节点低周反复荷载试验研究[D]. 南宁: 广西大学, 2006.  
XIANG Ping. Experimental research on joints of steel reinforced concrete special-shaped column and reinforced concrete beam under double-direction low-cyclic reversed loading[D]. Nanning: Guangxi University, 2006.
- [6] 薛建阳, 刘义, 赵鸿铁, 等. 型钢混凝土异形柱框架节点承载力试验研究[J]. 土木工程学报, 2011, 44(5): 41-48.  
XUE Jianyang, LIU Yi, ZHAO Hongtie, et al. Experimental study of the bearing capacity of steel reinforced concrete specially-shaped column-beam joint[J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 44(5): 41-48.
- [7] 杨涛. T形截面钢骨混凝土异形柱框架抗震性能试验研究[D]. 南宁: 广西大学, 2007.  
YANG Tao. Experimental research on seismic behavior of steel reinforced concrete frame of T section special-shaped column[D]. Nanning: Guangxi University, 2007.
- [8] NIE J G, QIN K, CAI C S. Seismic behavior of connections composed of CFSSTCs and steel-concrete composite beams: finite element analysis[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2008, 64(6): 680-688.

(编辑 桂智刚)