



钢结构仿古建筑双梁-柱中节点的受力机理

薛建阳, 戚亮杰, 隋奕, 吴占景, 许丹

(西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055)

摘要:为研究钢结构仿古建筑双梁-柱中节点的抗震性能,对4个全焊双梁-柱中节点进行了水平低周反复加载试验。通过观测试件在侧向力作用下的受力过程和破坏形态,分析双梁-柱中节点的受力机理。根据梁截面形式的不同,将其分为箱型截面梁与工字型截面梁2类,依据仿古建筑独特的构造特点,将各试件节点核心区划分为上、中、下3个区域。通过量测各区域内的应变大小,分析该类结构节点核心区在侧向力作用下的受力机理及破坏模式,并建立双梁-柱节点的斜压杆受力模型。试验结果表明:仿古建筑双梁-柱节点的破坏形式主要为沿下核心区对角线的剪切破坏,并通过理论计算分析提出一种考虑轴压比与梁截面形式的双梁-柱中节点抗剪承载力修正公式。

关键词:仿古建筑;双梁-柱中节点;低周反复荷载;受力机理;抗剪承载力

中图分类号:TU391 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2016)01-0017-06

Mechanical performance of the double beam-column inner joints in steel imitated ancient building

Xue Jianyang, Qi Liangjie, Sui Yan, Wu Zhanjing, Xu Dan

(College of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, P. R. China)

Abstract: We carried out horizontal low cyclic loading tests of four all-welded double beam-column inner joints to study the seismic performance of the double beam-column inner joints of the steel imitated ancient building. We studied the mechanical performance of the double beam-column inner joints according to the loading process and failure pattern of the specimens under the action of lateral forces, and divided the double beam-columns into two kinds, which were the box section beam and I-shaped section beam, according to different section forms of beam. Based on unique structural features of the imitated ancient building, we divided the joint core area of each specimen into three regions, which were upper core zone, middle core zone and lower core zone. By measuring the shear strain within the scope of every area, we analyzed the mechanism performance and failure modes of the joints under lateral forces, and established the diagonal strut mechanism. The experimental results and theoretical analysis show that

收稿日期:2015-11-10

基金项目:国家自然科学基金项目(51208411),中建股份有限公司科技研发课题资助项目(CSCEC-2012-Z-16)

作者简介:薛建阳(1970-),男,教授,博士(后),主要从事钢结构及钢与混凝土组合结构抗震性能研究,(E-mail) jianyang_xue@163.com。

Received:2015-11-10

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 51208411), Technology Research Task of China State Construction Engineering Corporation (CSCEC-2012-Z-16)

Author brief: Xue Jianyang (1970-), professor, post doctor, main research interests: seismic research of steel structures and steel-concrete composite structures, (E-mail) jianyang_xue@163.com.

the failure mode of the double beam-column joints of the intimated ancient building is mainly for the shear failure along the diagonal of the lower core area. So we presented a modified formula of shear bearing capacity of double beam-column inner joints considering the axial compression ratio and the cross section of the beams.

Keywords: imitated ancient building; double beam-column inner joints; low cyclic loading; mechanical performance; shear capacity

中国传统古建筑具有气势恢宏、造型优美的特点,仿古建筑既继承了古建筑的特点又与现代科技技术相结合,使结构的抗灾害能力和耐久性得到增强^[1]。现代仿古建筑主要以钢筋混凝土结构和钢结构为主,改变了传统中国古建筑以木结构为主的受力体系。目前,国内外对钢结构梁-柱节点的研究局限于常规节点和两端梁截面形式不同或者不等高的异型节点^[2-4],对钢结构仿古建筑的研究很少,尤其是对钢结构仿古建筑框架结构双梁柱节点的研究几乎没有。

由于传承中国传统文化的需要,仿古建筑业快速发展,仿古建筑双梁柱节点的节点区范围比常规梁柱节点区范围要大,在设计时假定其受力特点和破坏形态与常规梁柱节点相同,并依据已有的规范和规程按常规梁柱节点要求进行设计明显不合理。因此,对仿古建筑结构构件的抗震性能进行试验研究十分必要。

通过对 4 个钢结构仿古建筑双梁-柱中节点的低周反复加载试验,观测了该类型结构的破坏现象及应变分布,分析了这类节点的破坏模式、受力机理、剪切变形等,并建立了其抗剪承载力的计算公式,为钢结构仿古建筑双梁-柱中节点在水平地震作用下的抗剪设计提供理论参考。

1 试验概况

1.1 试件设计及材料属性

仿古建筑有其独特的建筑构造形式,其双梁-柱节点区主要由檐柱、斗拱、阑额与由额等构件组成^[5],如图 1 所示,其不同于常规的梁-柱节点形式。

本试验的试件参照典型仿古建筑工程的梁柱节点形式,共设计了 4 个双梁-柱节点试件,模型缩尺比例为 1:2。为研究构件核心区的抗剪特性,构件按照“强构件弱节点”的原则^[6]进行设计。试件主要研究参数为试件轴压比与梁截面形式,将其分为箱型截面梁-柱节点(XL)系列和工字型截面梁-柱节点(GL)系列,编号为 XL-1、XL-2、GZ-1、GZ-2。其

试件形式及尺寸如图 2 所示。延续中国传统建筑的圆柱特点,下部檐柱采用无缝圆钢管,上部檐柱采用方形钢管。试验相关设计参数见表 1,钢材力学性能参数见表 2。

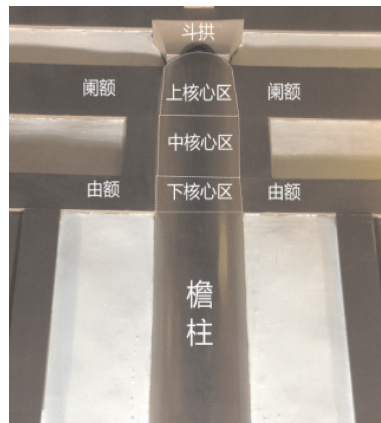


图 1 双梁-柱中节点形式

Fig. 1 Double beams-column inner joint

表 1 试件主要参数

Table 1 Parameters of specimens

节点类型	试件编号	试件高度/mm	试件宽度/mm	设计轴压比
箱型截面梁-柱节点(XL)	XL-1	2 250	2 496	0.3
	XL-2	2 250	2 496	0.6
工字截面梁-柱节点(GL)	GZ-1	2 250	2 496	0.3
	GZ-2	2 250	2 496	0.6

表 2 钢材力学性能指标

Table 2 Mechanic performance indexes

材料	t /mm	f_y /MPa	f_u /MPa	E /MPa
板材	12	318.9	472.3	2.077×10^5
	16	289.7	436.7	2.106×10^5
	20	268.9	406.6	2.130×10^5
管材	6	323.0	425.6	2.101×10^5
	16	301.7	438.9	2.121×10^5

注: t 为材料厚度, f_y 为屈服强度, f_u 为极限强度, E 为弹性模量。

1.2 加载装置及加载程序

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进行,加载装置如图3。由液压千斤顶对构件柱头施加竖向荷载到预定值,并在整个试验过程中保持恒定,由 MTS 水平作动器施加往复

水平荷载。在试件屈服前采用力控制,每级荷载增量为 30 kN;屈服后采用位移控制,以屈服时水平位移的倍数逐级递增^[7],直至荷载下降到极限荷载的 85%左右,试验结束。

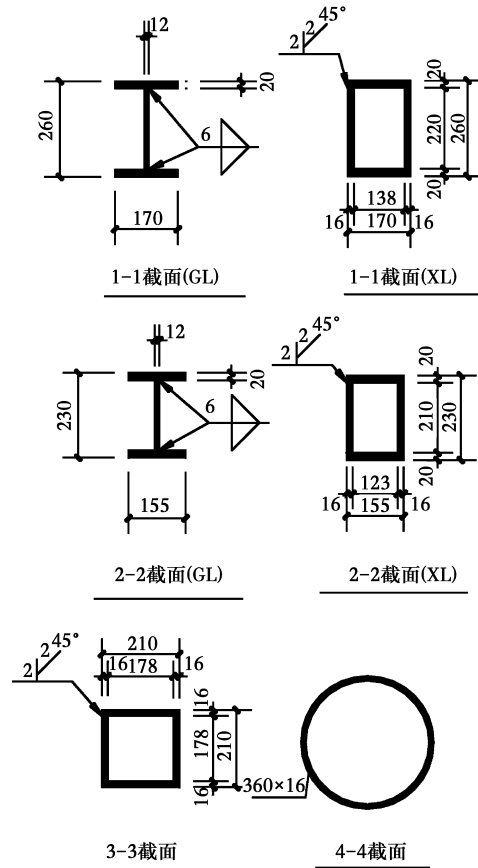
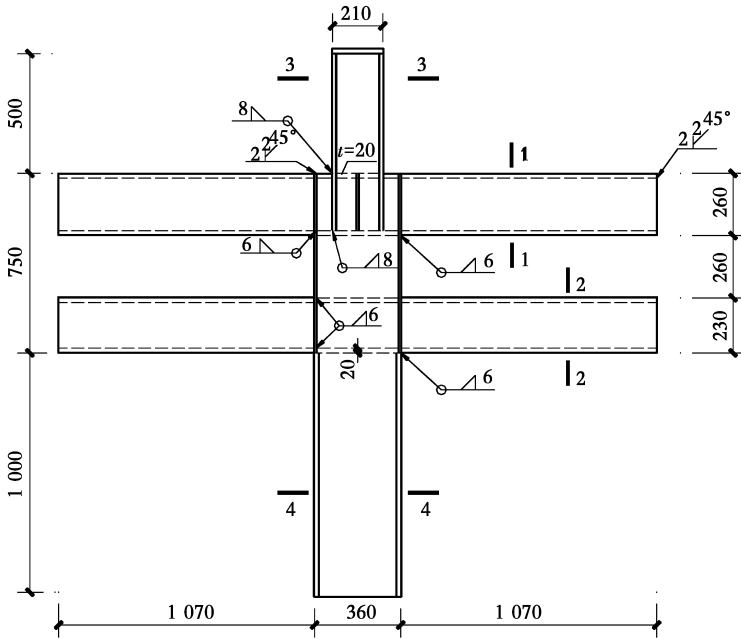
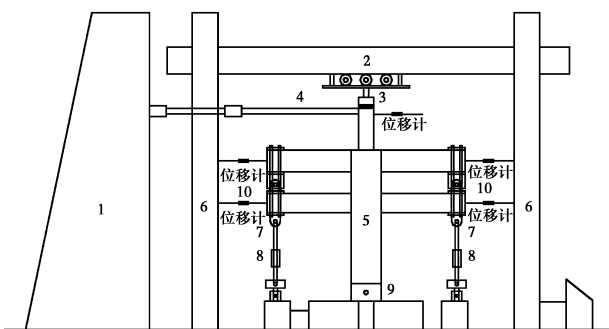


图 2 试件尺寸

Fig. 2 Specimen sizes



注: 1.反力墙, 2.反力梁, 3.油压千斤顶, 4.水平作动器, 5.双梁-柱试件, 6.反力钢架, 7.梁端铰支座, 8.力传感器, 9.柱底铰支座, 10.双梁连接器

图 3 加载装置

Fig. 3 Loading device figure

1.3 试验现象及破坏模式

1) 在柱端水平力作用下,所有试件均最先在节

点下核心区沿对角线方向发生屈服现象,随着加载的进行,节点域下核心区的钢管柱壁剪切变形范围不断向四周发展,如图4。



图 4 下核心区剪切变形

Fig. 4 Shear deformation of the lower core zone

2) 随着水平荷载的不断增大,由额下翼缘与下

檐柱的连接焊缝最先拉裂,随后上檐柱根部焊缝开裂。

3) 试验过程中,所有试件的中核心区柱壁均发生不同程度的外鼓翘曲变形。

4) 所有试件节点核心区的塑性变形都较大,工字截面梁比箱型截面梁剪切变形更明显,在设计中应着重考虑。

1.4 试件破坏模式分析

从试验现象看出,节点下核心区钢管柱壁为剪切破坏。节点核心区受力状态比较复杂,其同时承受柱端弯矩、剪力、轴力和梁端弯矩、剪力的共同作用。当柱端施加的水平荷载达到试件的屈服荷载时,节点下核心区沿两对角方向钢管柱壁(相当于箱形柱的腹板范围)发生斜向剪切变形,主应力方向和水平方向约成 45° 夹角。随着水平荷载的不断增大,下核心区钢管柱壁的剪切变形范围不断向四周发展。当水平荷载加载到极限荷载时,下核心区钢管柱壁沿对角线方向的应变约为梁端应变的 $5\sim 8$ 倍,且剪切变形十分明显。

1.5 节点核心区剪切变形

因节点核心区相对较弱,梁端、柱端不会出现塑性变形,节点核心区将承受梁端、柱端传来的水平剪力与弯矩作用,产生相应的剪切变形^[7]。对本结构来说,核心区转角主要由核心区剪切变形引起的^[8-9]。以工字截面梁试件 GL-1 为例,其下节点核心区在水平剪力作用下产生的剪力-剪切变形滞回曲线如图 5 所示。

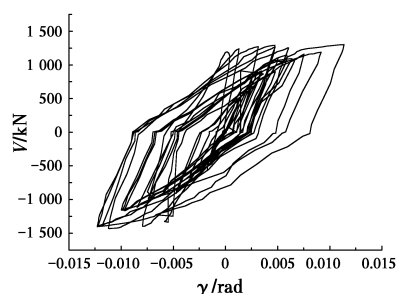


图 5 下核心区剪力-剪切变形滞回曲线

Fig. 5 Shear-shear deformation hysteretic loops in lower core zone

1) 加载初期各核心区的剪力-剪切变形曲线基本呈线性变化,随着柱端水平荷载的增加,下核心区沿对角线方向屈服进入塑性阶段,剪力-剪切变形滞回曲线较为饱满,剪切变形发展较为充分,表现出良好的抗剪能力。

2) 随着加载的进行,中核心区膨胀外鼓,表现出典型的受压破坏特征,而上、下核心区受剪破坏特征明显。主要是上、下核心区两侧均有梁端约束,在水平力作用下核心区承受左右两侧梁端弯矩及剪力作用,而中核心区由于没有直接外部荷载及梁端传来的弯矩和剪力作用,轴力导致的竖向影响较为明显。

3) 试验结束时,下核心区剪切角最大,约为 0.0120 rad ;上核心区次之,中核心区最小,仅达到 0.0008 rad 。由此可以看出,主要剪切变形发生在下节点核心区,与试验现象一致。

2 核心区抗剪承载力计算

2.1 核心区受力机理分析

试验加载初期柱顶水平荷载-位移曲线基本呈线性关系,节点域处于弹性受力状态。在柱端施加水平拉力时,上、下核心区左侧梁上部翼缘受拉,下部翼缘受压;右侧梁下部翼缘受拉,上部受压,主拉应力在节点上、下核心区的对角线方向比较大,节点区内部形成沿对角线的主压力场^[10]。箱形梁翼缘应力传递给内环板,再由内环板传递给四周的钢管柱壁^[11]。中核心区因上核心区右侧底部、左侧上部受压,形成与上、下核心区相反的主拉力场。由于没有直接外部荷载作用及梁端传来的弯矩和剪力,中核心区形成的压力场较上、下核心区的压力场作用相对较小。而在整个节点域的主压应力方向基本上成“S”形分布与反“S”形分布,称此为双梁-柱斜压杆受力机理模型。

2.2 抗剪承载力计算

为了分析的需要,取试件节点域的下核心区为隔离体,其上作用的荷载效应如图 6 所示,图中 N_c^T 、 N_c^B 表示节点上端、下端传递的轴力, V_c^T 、 V_c^B 、 M_c^T 、 M_c^B 分别表示上下柱端作用于节点核心区的剪力与弯矩。 T_b^L 、 C_b^L 、 T_b^R 、 C_b^R 分别为左、右梁传递给节点核心区的弯矩计算得到的等效拉力和压力。在节点核心区作截面 I-I,并取其下部为隔离体,在水平方向由力的平衡可以得到作用在节点域的剪力 V_j 为:

$$V_j = V_c^B - T_b^L - C_b^L \quad (1)$$

式中: $T_b^R = C_b^R = \frac{M_b^R}{h_b}$, $C_b^L = T_b^L = \frac{M_b^L}{h_b}$, h_b 为梁的高度。

将试验数据代入式(1),可求得各试件节点下核心区的屈服剪力实测值 V_t 。

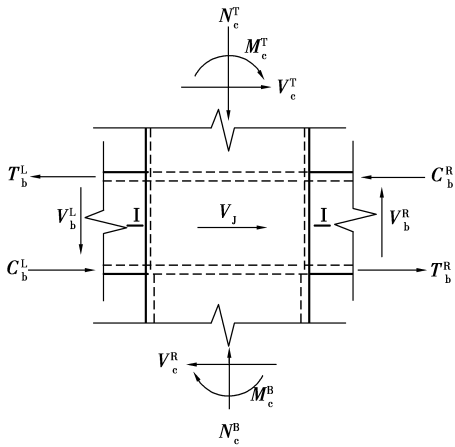


图 6 核心区受力简图

Fig. 6 Force diagram

美国钢结构协会 AISC 规范^[12]给出的常规节点核心区抗剪承载力计算公式为:

$$V_u = 0.6 f_y d_c t_w \left(1 + \frac{3b_{cf} t_{cf}^2}{d_b d_c t_w} \right) \quad (2)$$

式中: f_y 为核心区腹板材料的屈服强度; d_c 为柱截面的高度; d_b 为梁截面的高度; b_{cf} 为柱翼缘的宽度; t_w 为核心区腹板的厚度; t_{cf} 为柱翼缘的厚度。

考虑到节点核心区横截面为圆形截面,采用中国规范^[13]对圆形截面等效为方形截面的计算方法, t_{cf} 仍取圆钢管柱的壁厚, d_c 与 b_{cf} 分别取为 $1.76r$ 和 $1.6r$, r 为圆钢管平均直径的大小。经系数归并后,圆钢管柱-梁中节点核心区抗剪承载力可按以下公式计算:

$$V_c = 1.056 r f_y t_w \left(1 + \frac{4.8 r t_{cf}^2}{1.76 r d_b t_w} \right) \quad (3)$$

表 3 中列出了 V_t 与 V_c 的比值^[14], 可以发现,各试件节点核心区屈服剪力的试验值比按式(3)计算的结果偏小。说明按 AISC 规范给出的节点核心区抗剪承载力计算公式对钢结构仿古建筑中节点已不完全适用。经过对试验数据的统计回归分析,轴压比对节点承载力的影响系数可表示为

$$\varphi_1 = 1.2 - \frac{2}{3}n \quad (4)$$

其中: n 为构件的设计轴压比,考虑梁截面形式对核心区约束效应的不同,对箱型截面梁与工字截面梁的影响系数 m 分别取为 0.9 和 1.05。这样,得到仿古建筑双梁-柱节点抗剪承载力计算公式如下:

$$V_c^r = 1.056 m r f_y t_w \left(1.2 - \frac{2}{3}n \right) \left(1 + \frac{4.8 r t_{cf}^2}{1.76 r d_b t_w} \right) \quad (5)$$

按式(5)重新计算的抗剪承载力 V_c^r 列入表 3。

计算发现, V_t / V_c^r 比值的平均值为 0.999, 方差 $\sigma = 0.001$, 变异系数 $C_v = 0.031$, 采用式(5)的计算结果与试验结果吻合较好。

表 3 下核心区抗剪承载力试验值与计算值对比
Table 3 Comparison of shear capacity between test and calculation of the lower core zone

节点编号	V_t /kN	V_c /kN	V_c^r /kN	V_t / V_c	V_t / V_c^r
XL-1	628.10	704.73	634.26	0.891	0.990
XL-2	511.75	704.73	507.41	0.726	1.009
GL-1	711.95	704.73	739.97	1.010	0.962
GL-2	612.89	704.73	591.97	0.870	1.035

3 结 论

通过对钢结构仿古建筑双梁-柱中节点低周反复荷载作用下抗震性能试验结果分析研究及理论研究,可以得到以下结论。

1) 将钢结构仿古建筑双梁-柱节点划分为上、中、下 3 个小核心区,其主要剪切破坏发生在节点下核心区,中核心区主要发生受压破坏。

2) 在水平力作用下,上柱与檐柱之间的焊缝、由额与檐柱之间的焊缝较容易发生开裂现象,应在设计时予以加强。

3) 在水平荷载作用下,双梁-柱节点承受压、弯、剪的复合受力形式,其受力机理为 S 形分布的斜压杆机理。

4) 基于试验结果和美国 AISC-LRFD 规范,建立考虑轴压比和梁截面形式的钢结构仿古建筑双梁-柱中节点的抗剪承载力计算公式,计算结果与试验结果吻合较好。

参考文献:

[1] 赵武运. 甘肃径川县某高层钢结构仿古塔的结构分析及若干问题探讨 [D]. 太原: 太原理工大学, 2011.

[2] 薛建阳, 陈茜, 周鹏, 等. 矩形钢管混凝土异形柱-钢梁框架节点受剪承载力研究 [J]. 建筑结构学报, 2012, 33(8): 51-57.

Xue J Y, Chen X, Zhou P, et al. Shear capacity of joints between concrete-filled square steel tubular special-shaped columns and steel beams [J]. Journal of Building Structures, 2012, 33(8): 51-57. (in Chinese)

[3] Fielding D J, Huang J S. Shear in steel beam-to-column connections [J]. The Welding Journal, 1971, 50(7): 1-10.

[4] Pafitt J J, Chen W F. Test of weld steel beam-to-column moment connections [J]. Journal of the Structural Division, 1976, 102 (ST1): 189-202.

[5] 田永复. 中国仿古建筑构造 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2010.

[6] 薛建阳, 胡宗波, 彭修宁, 等. 钢结构箱形柱与梁异型节点抗剪承载力分析 [J]. 土木工程学报, 2011, 44(8): 9-15.
Xue J Y, Hu Z B, Peng X N, et al. Analysis of shear resistance of irregular joint between steel box columns and beams [J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 44(8): 9-15. (in Chinese)

[7] 薛建阳, 刘祖强, 葛鸿鹏, 等. 实腹式型钢混凝土异形柱中框架抗震性能试验研究 [J]. 建筑结构学报, 2011, 32(11): 82-88.
Xue J Y, Liu Z Q, Ge H P, et al. Seismic behavior of solid steel reinforced concrete middle frame with special-shaped columns [J]. Journal of Building Structures, 2011, 32(11): 82-88. (in Chinese)

[8] Nakashima M, Asce M, Liu D W. Instability and complete failure of steel columns subjected to cyclic loading [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2005, 131(6): 559-567.

[9] 施刚, 石永久, 王元清. 钢结构梁柱连接节点域剪切变形计算方法[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2006, 36(4): 462-466.
Shi G, Shi Y J, Wang Y Q. Computational method of shear deformation for beam-to-column connection panel zone in steel frames [J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2006, 36 (4): 462-466. (in Chinese)

[10] 谢启芳, 李朋, 王龙, 等. 传统风格钢筋混凝土梁-柱节点抗剪机理分析与抗剪承载力计算[J]. 建筑结构, 2014, 44(19): 81-86.
Xie Q F, Li P, Wang L, et al. Shear mechanism analysis and shear capacity calculation of the RC column-beam joint built in traditional style [J]. Building Structure, 2014, 44(19): 81-86. (in Chinese)

[11] 魏志粉. 仿古建筑圆钢管柱-箱形截面双梁节点抗震性能试验与理论研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2014.

[12] AISC. Load and resistance factor design specification for structural steel buildings[S]. Chicago: American Institute of Steel Construction, 2005.

[13] GB 50010—2010 混凝土结构设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.

[14] 薛建阳, 刘祖强, 胡宗波, 等. 钢框架异型节点核心区的受剪机理及承载力计算[J]. 地震工程与工程振动, 2010, 30(5): 37-41.
Xue J Y, Liu Z Q, Hu Z B, et al. Shear mechanism and capacity calculation of abnormal joint panel zone in steel frame [J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2010, 30 (5): 37-41. (in Chinese)

(编辑 郭 飞)