

钢结构仿古建筑带斗拱檐柱延性及刚度分析

薛建阳, 浩飞虎, 马林林

(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带斗拱檐柱的延性和刚度退化规律, 对其进行了低周反复荷载试验, 分析了试件的受力过程和破坏形态, 同时, 研究了试件柱端 $P-\Delta$ 滞回曲线和水平荷载-应变曲线, 研究了其延性和刚度在加载过程中的变化规律。结果表明: 试件长细比对其延性影响较大。当采用同一轴压比数值时, 试件延性随着长细比数值的增大而越高, 塑性变形能力越强; 试件长细比对其刚度退化影响较大, 当轴压比数值一定时, 试件刚度退化速率随其长细比数值的增大而逐渐降低, 破坏时柱转角也随之减小。反之, 试件刚度退化速率增大, 试件破坏时, 柱转角增大。

关键词: 仿古建筑; 檐柱; 斗拱; 延性; 刚度

中图分类号: TU391

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2019)05-0629-06

Ductility and stiffness analyses of eave columns with corbel brackets in steel archaized buildings

XUE Jianyang, HAO Feihu, MA Linlin

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

Abstract: In order to study the ductility and stiffness degradation characteristics of eave columns with corbel brackets in steel archaized buildings, the low-cycle repeated load test was carried out on the steel structure antique building with bucket column. The $P-\Delta$ hysteresis curve, horizontal load-strain curve, stress process and failure mode of the specimen were analyzed. The variation of ductility and stiffness during the loading process was studied. Results show that the slenderness ratio of the specimen has a great influence on the ductility. When the same axial compression ratio is used, the ductility of the specimen increases with the increase of the slenderness ratio, and the plastic deformation ability is stronger. The slenderness ratio of the specimen has a great influence on the stiffness degradation. The rate of degradation of the specimen gradually decreases with the increase of the ratio of the slenderness ratio, and the corner angle of the column also decreases. On the contrary, the rate of stiffness degradation of the test piece increases, and the column rotation angle increases when the test piece is broken.

Key words: archaized buildings; eave columns; corbel brackets; ductility; stiffness

古建筑木结构是中国古建筑的特有形式, 集古代文化、技术于一体, 仿古建筑延续了古建筑木结构独到的文化与民族特色, 不但保留了古建筑雄伟壮观的建筑形式, 同时, 通过结合现代的科学技术, 使得仿古建筑既能展现古建筑独有的魅力, 又具有良好的耐久性和安全性。因此, 研究仿古建筑对中国传统文化的发扬具有重要的意义。^[1-2]

仿古建筑的受力与现代建筑有所不同, 国内学者对其结构或构件的受力性能进行了相关的试验研究。谢启芳^[3]等通过对传统风格建筑钢筋混凝土梁-柱节点做拟静力荷载试验, 研究了其耗能性能、刚度退化规律以及延性性能, 结果表明:

节点核心区的配箍率对其刚度变化影响不大, 但可提高其延性性能。漆成^[4]通过对仿古建筑不同轴压比和节点形式的试件进行低周反复荷载试验, 观察了节点的破坏形态及特征, 分析了仿古建筑节点的滞回性能、刚度退化规律和延性性能。周升^[5]对钢结构仿古建筑双梁柱进行水平低周反复加载试验, 研究了其节点的滞回性能, 结果表明其刚度退化主要是由于节点焊缝的破坏和柱壁屈曲引起的。目前国内学者对仿古建筑梁柱节点的研究内容较多, 而对于仿古建筑带斗拱檐柱的耗能性能研究较少。

基于此, 本文依据文献[6]中钢结构仿古建筑带斗拱檐柱低周反复荷载试验, 详细研究了钢结构仿

收稿日期: 2018-07-09

修改稿日期: 2019-06-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51678478); 陕西省重点科技创新团队计划基金资助(2019TD-029)

第一作者: 薛建阳(1970—), 男, 博士, 教授, 主要从事钢与混凝土组合结构及古建筑结构抗震研究。E-mail: jianyang_xue@163.com

古建筑带斗拱檐柱的延性和刚度的退化规律^[7-9]。

1 试验概述及延性分析

1.1 试件设计及测试方案

设计制作了4个缩尺比例为1:1.5的钢结构仿古建筑带斗拱檐柱^[6],编号分别为GY1-1、GY1-2、GY2-1、GY2-2。试件设计控制参数为长细比 λ 和轴压比 n 。

试验初始阶段,先进行预加载。试验过程第一阶段以荷载控制,每次循环增加10 kN,直到试件开始进入塑性变形时,加载进入第二阶段,改用位移控制加载。试验通过在试件相应位置布置位移计和应变片来获得试件的变形规律及应力分布,如图1所示。

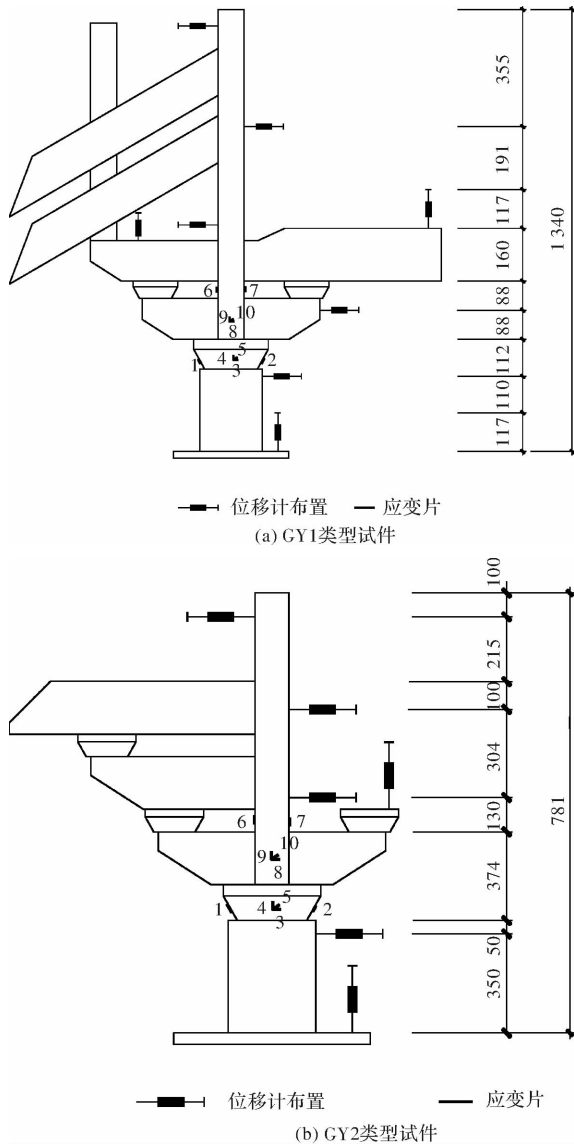


图1 试件测试装置(单位: mm)

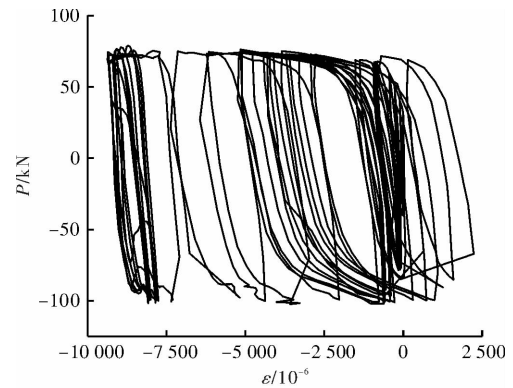
Fig. 1 Test device for test piece (Unit: mm)

1.2 试件应变分析

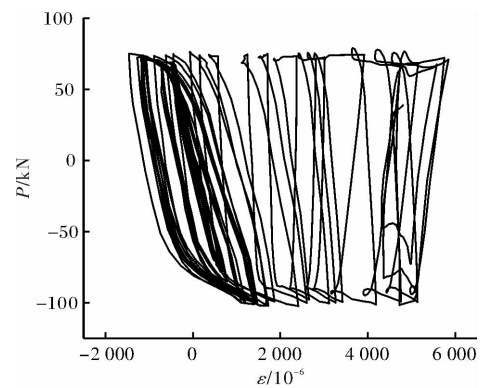
由试验数据可知,各试件应变分布及变化规

律基本一致,以试件GY1-1的荷载-应变曲线为例进行说明。试件GY1-1 斗斗翼缘及腹板的应变片分别是图1(a)中的1、2点和3、4、5点,由此可得斗斗翼缘(应变片1)和腹板(应变片5)的荷载-应变曲线,如图2(a)、(b)所示。由图2(a)、(b)可知,随着加载的进行,斗斗和翼缘的荷载-应变曲线整体呈矩形变化。斗斗逐渐进入塑性变形阶段,应变增长逐渐放缓。和腹板相比,翼缘处应变较大,斗斗翼缘和腹板处的最大应变值均超过了板材的屈服应变值,斗斗屈服。

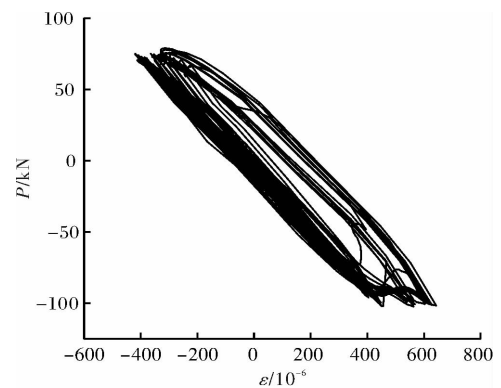
试件GY1-1 矩形钢管柱端部翼缘和腹板应变片分别是图1(a)中的6、7点和8、9、10点,由此可得矩形钢管柱端部翼缘(应变片6)和腹板(应变片10)的应变变化规律见图2(c)、(d)。由图2(c)、(d)可知,随着加载的进行,矩形钢管柱端部一直处于弹性变形阶段,未出现明显的屈服点。



(a) 试件GY1-1大斗翼缘应变



(b) 试件GY1-1大斗腹板应变



(c) 试件GY1-1方钢管底部腹板应变

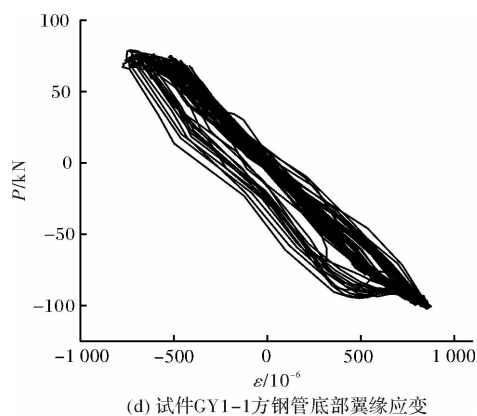


图2 节点区荷载-应变曲线

Fig. 2 Stress-strain curves of node area

各试件的破坏形态如图3所示,其中:试件GY1-1, GY2-2侧向变形过大;试件GY2-2方钢管底部屈曲破坏;试件GY2-1方钢管柱底部母材拉裂破坏。分析原因,主要有两点:(1)试件加载过程中,柱端位移对试件的整体变形会产生挠曲二阶效应。轴压比较小时挠曲二阶效应影响较小,在水平荷载作用下,方钢管柱底部两侧腹板与翼缘连接处的应力未达到极限应力,不足以使得试件达到破坏。反之,在水平荷载作用下,方钢管柱底部母材连接处拉应力会超过了材料的屈服应力,方钢管底部连接区母材屈服最后开裂。(2)通过量测试件各部位的应变可知,矩形钢管柱根部应变值较大,方钢管柱底部两侧腹板和翼缘连接处水平竖向焊缝较多,材性较差,多条焊缝连接处应力集中明显。

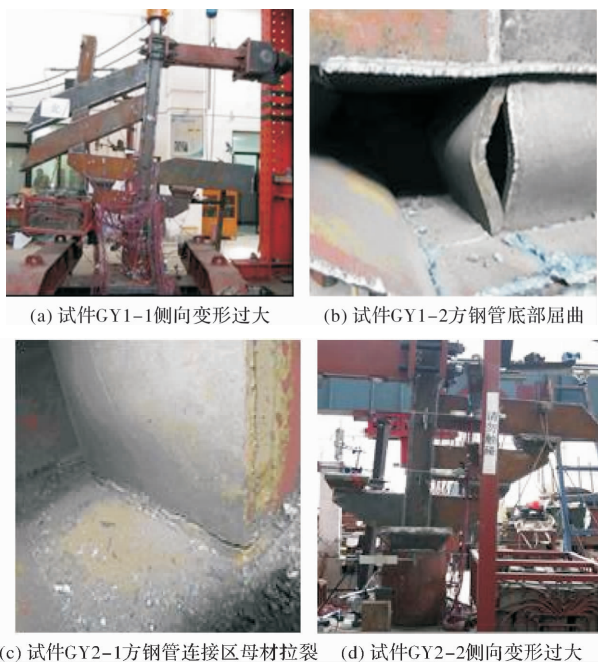


图3 试件破坏形态

Fig. 3 Failure modes of specimens

1.3 试件荷载-位移滞回曲线分析

试件的柱端荷载-位移滞回曲线如图4所示。根据图4可知:(1)试件加载初期,整体变形处于弹性阶段,滞回环不够饱满,各试件没有明显的耗能性能和刚度退化。(2)当试件进入屈服阶段,滞回环面积逐渐增大,形状呈纺锤形,试件有明显的刚度退化。

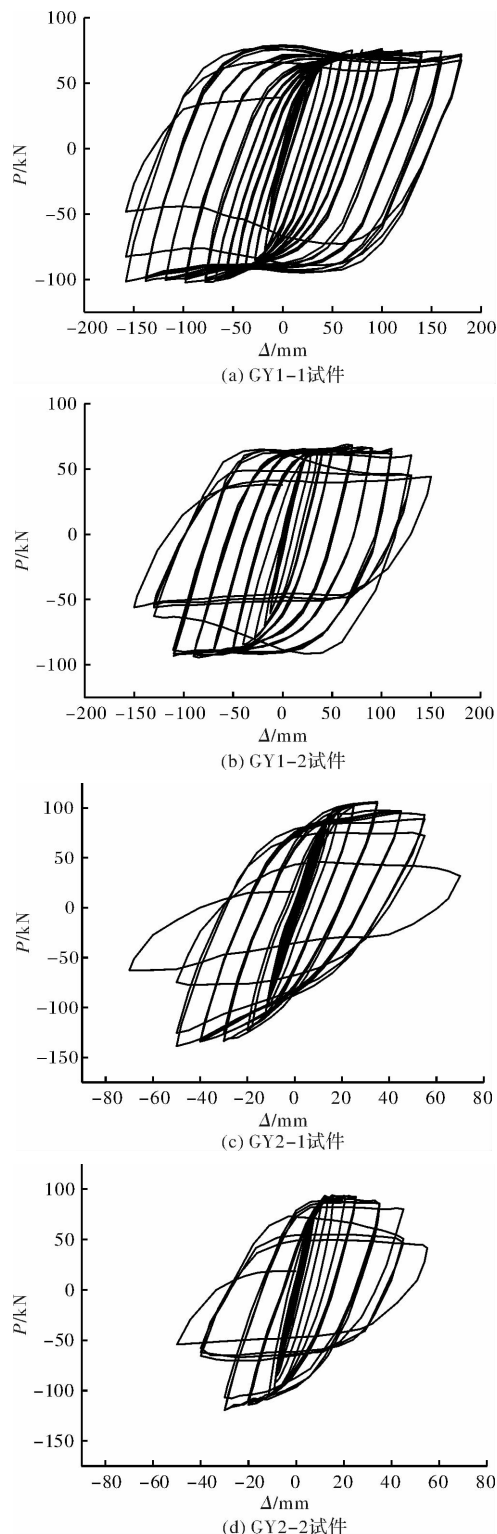


图4 柱端滞回曲线

Fig. 4 Column end hysteresis curve

1.4 试件延性分析

通过计算各试件的位移延性系数(见表 1)并分析可知:(1)各试件延性系数普遍较高,其平均值在 3.0~5.0 之间,表明试件具有良好的塑性变形能力。通过对比可知,正向和反向延性系数差异较大。分析原因主要是因为两个方向的刚度不同,致使试件在两个方向发生屈服时,正向位移大于反向位移,正向延性系数大于反向延性系数。(2)通过对比可知,相同长细比的试件,其轴压比增大,屈服位移和破坏位移则有所下降,两个方向的延性系数均有所降低;轴压比相同时,长细比的增大对试件延性的提高具有很大影响。

表 1 试件位移延性系数表

Tab. 1 The ductility coefficient of the specimens

试件 编号	轴压 比	长细 比	加载 方向	Δ_y /mm	Δ_m /mm	μ_Δ	平均值
GY1-1	0.3	12.5	正向	32	180	5.6	5.0
			反向	36	158	4.4	
GY1-2	0.6	12.5	正向	27	131	4.9	4.4
			反向	30	118	3.9	
GY2-1	0.3	8.9	正向	14	56	4.0	3.7
			反向	16	55	3.4	
GY2-2	0.6	8.9	正向	13	46	3.5	3.0
			反向	14	34	2.4	

分析原因可知,轴压比不变时,长细比增大导致试件刚度下降,试件屈服后,侧向位移增大。因柱端荷载产生的截面应变较大,因此,试件达到屈服和破坏时荷载减小,水平位移增大。通过表 1 可以得知,两个试件的屈服位移比值相差仅一倍左右,两者的破坏位移比值相差 3 倍以上,因此,试件 GY1 的延性高于试件 GY2 的延性。

2 试件的刚度及其退化规律分析

2.1 试件弹性变形阶段的刚度分析

定义试件开始加载时的刚度和转角分别为 K_0 和 θ_0 ,其值列于表 2。

表 2 初始刚度 K_0 实测值

Tab. 2 Test value of initial stiffness

试件 编码	$K_0/(kN \cdot mm^{-1})$			θ_0		
	反向	正向	均值	反向	正向	均值
GY1-1	3.457	2.481	2.969	1/237	1/170	1/198
GY1-2	4.762	3.191	3.977	1/257	1/290	1/273
GY2-1	7.281	8.358	7.819	1/258	1/268	1/263
GY2-2	9.404	10.030	9.717	1/336	1/322	1/329

注:规定正向为推力方向,反向为拉力方向。

由表 2 可知,试件初始加载时,GY2 与 GY1 初始刚度基本对称。GY2 类型试件的初始实测刚度平均值为 GY1 类型的 2.52 倍;试件 GY1-2 的初始刚度实测值为试件 GY1-1 的 1.34 倍,试件 GY2-1 的初始刚度实测值为试件 GY2-2 的 1.24 倍,说明随着长细比的增大,钢结构仿古建筑带斗拱檐柱的初始刚度显著减小。除此之外,试件正、反向刚度不对称,差异较大。分析原因主要是试件在加载平面外为非对称结构,且各部分通过焊缝构成,焊缝的存在使试件两侧焊接部位内力传递差异性较大^[10-11]。

2.2 试件屈服时的刚度分析

试件屈服时,其刚度实测值 K_y 与转角 θ_y 见表 3。由表 3 可知:

(1)GY2 类型试件屈服时,其刚度平均值大小为 GY1 类型的 3.0 倍;GY1-2 试件屈服时,其实测值刚度为试件 GY1-1 的 1.09 倍,而试件 GY2-1 的实测值刚度是试件 GY2-2 的 1.04 倍。

(2)GY1 类型试件屈服时,其刚度实测平均值为初始值的 0.67 倍,GY2 类型试件的刚度实测平均值为初始值的 0.79 倍,这说明在试件在达到屈服之前,由于荷载的增加,变形也在逐渐增大,刚度开始折减,由于两种类型试件刚度长细比差别较大,故其刚度退化速率明显不同。

表 3 屈服刚度 K_y 的实测值

Tab. 3 Test value of yield stiffness

试件 编码	$K_y/(kN \cdot mm^{-1})$			θ_y		
	反向	正向	均值	反向	正向	均值
GY1-1	2.470	1.970	2.220	1/76	1/85	1/80
GY1-2	2.630	2.190	2.410	1/91	1/101	1/96
GY2-1	7.130	6.500	6.815	1/100	1/115	1/107
GY2-2	7.640	6.540	7.090	1/115	1/123	1/119

表 4 试件加载达到极限荷载时刚度 K_u 实测值

Tab. 4 Test value of ultimate stiffness

试件 编码	$K_u/(kN \cdot mm^{-1})$			θ_u		
	反向	正向	均值	反向	正向	均值
GY1-1	1.040	0.940	0.990	1/28	1/34	1/31
GY1-2	1.020	0.970	0.995	1/30	1/39	1/34
GY2-1	2.770	3.000	2.885	1/32	1/46	1/38
GY2-2	3.940	3.560	3.750	1/52	1/62	1/57

2.3 试件达到极限荷载时的刚度分析

试件加载达到极限荷载时,其刚度实测值 K_u

与柱转角 θ_d 见表 4。由表 4 可知:

(1) 试件加载达到极限荷载时, GY2 类型试件的刚度实测平均值为 GY1 类型的 3.34 倍; 试件 GY1-2 的刚度实测值为试件 GY1-1 的 1.01 倍, 而试件 GY2-2 的刚度实测值为试件 GY2-1 的 1.30 倍。

(2) 试件加载达到极限荷载时, GY1 类型试件的刚度实测值为初始值的 0.29 倍, GY2 类型试件的刚度实测值为初始值的 0.38 倍。说明此时 GY1 类型试件钢材的累计变形量较大, 钢材的残余应变也较大, 材料强度达到充分发挥, 随着柱端水平位移的增大, 试件刚度明显降低; 而 GY2 类型试件刚度显著降低则是因方钢管柱根部翼缘发生屈曲造成的。

2.4 试件破坏时的刚度分析

试件破坏时, 其刚度实测值 K_d 与转角 θ_d 见表 5。由表 5 可知:

(1) 试件破坏时, GY2 类型试件的刚度实测平均值为 GY1 类型的 3.98 倍; 试件 GY1-2 的刚度实测值为试件 GY1-1 的 1.05 倍, 试件 GY2-1 是 GY2-2 的刚度实测值的 1.28 倍。此时各试件的转角均大于文献[11]中规定的位移角限值, 说明试件具有较好的变形性能。

(2) 试件破坏时, GY1 类型试件的刚度实测平均值为初始值的 0.15 倍, GY2 类型试件的刚度实测平均值为初始值的 0.24 倍, 此时 GY1 类型试件材料强度随着柱端水平位移的增大而降低, 时间的刚度实测值较低; 而 GY2 类型试件则是由方钢管柱根部翼缘与内隔板连接处焊缝开裂及根部热影响区母材拉裂造成的。

表 5 试件破坏时刚度 K_d 的实测值

Tab. 5 Test value of failure stiffness

试件 编码	$K_d / (\text{kN} \cdot \text{mm}^{-1})$			θ_d		
	反向	正向	均值	反向	正向	均值
GY1-1	0.640	0.400	0.520	1/17	1/15	1/16
GY1-2	0.660	0.430	0.545	1/23	1/20	1/21
GY2-1	2.140	1.590	1.865	1/29	1/29	1/29
GY2-2	3.050	1.710	2.380	1/47	1/35	1/40

2.5 各试件刚度退化规律分析

各试件在不同柱端位移下, 割线刚度随位移等级 ξ 的变化规律如图 5 所示, 其中位移等级为试件位移与屈服位移的比值。

各试件的刚度退化曲线如图 6 所示。由图 6 可知:

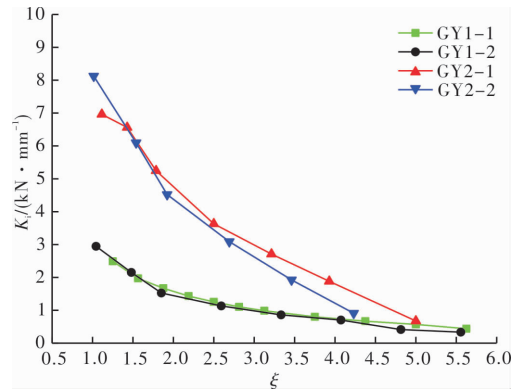


图 5 割线刚度变化

Fig. 5 Secant stiffness variation

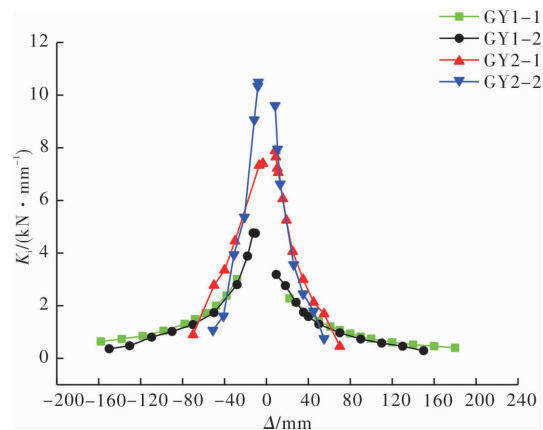


图 6 试件的刚度退化曲线

Fig. 6 Curves of stiffness degradation

(1) 各试件的刚度退化曲线基本对称, 这是因为仿古建筑钢结构带斗拱檐柱在加载平面内为对称构件且连接区的焊缝呈对称分布。

(2) 通过比较, GY2 类型的试件刚度退化速率要大于 GY1 类型的试件, 分析原因, 这主要是因为轴压比一致时, 长细比增大导致试件刚度下降, 试件屈服后, 侧向位移增大。因此, 试件达到屈服和破坏时荷载减小, 水平位移增大。GY2 类型的试件长细比较小, 檐柱端部发生小位移之后, 连接区焊缝较早地发生了破坏, 试件的延性和刚度降低。

(3) 长细比相同, 轴压比不同的试件, 其刚度退化曲线规律基本一致。轴压比相同, 长细比不同的试件, 其刚度退化曲线差异较大。这主要是因为轴压比较大的试件, 当长细比一致时, 试件达到屈服后柱端位移较小, 荷载特征值较小。轴压比较小的试件, 试件达到屈服后, 柱端位移较大, 荷载特征值较大。

3 结论

通过研究长细比和轴压比对仿古建筑钢结构

带斗拱檐柱的延性和刚度的影响,得到以下结论:

(1)钢结构仿古建筑带斗拱檐柱的塑形变形能力受长细比影响较大.轴压比对试件的屈服位移影响较小,长细比对试件的破坏位移影响较大,长细比增大使得试件塑性层间位移角增大,变形能力和延性系数均有所增加.

(2)试件在加载平面内和平面外的具有不同的受力性能,试件加载平面外受力性能较差,由于焊缝的存在使得试件平面外焊接部位内力传递较差,试件两个方向刚度差异性较大.试件在加载平面内对称性较好,正反向的往复加载使得试件刚度退化曲线在两个方向具有相似性.

(3)与轴压比相比较,长细比是影响试件刚度的决定因素.随着长细比的降低,试件的屈服荷载和极限荷载增大,试件柱端部位位移减小,刚度退化迅速,延性降低.反之,试件屈服荷载和极限荷载降低,试件柱端部位位移增大,刚度退化放缓,延性增大.

参考文献 References

- [1] 赵鸿铁,薛建阳,隋葵,等. 中国古建筑结构及其抗震: 试验、理论及加固方法[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
ZHAO Hongtie, XUE Jianyang, SUI Yan, et al. Structure and seismic resistance of Chinese ancient buildings: test, theory and strengthening method [M]. Beijing: Science Press, 2012.
- [2] 田永复. 中国仿古建筑构造精解[M]. 北京: 化学工业出版社, 2013.
TIAN Yongfu. Chinese ancient building explained [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2013.
- [3] 谢启芳,李朋,葛鸿鹏,等. 传统风格钢筋混凝土梁—柱节点抗震性能试验研究[J]. 世界地震工程, 2015, 31(4): 150-158.
XIE Qifang, LI Peng, GE Hongpeng, et al. Experimental study on seismic performance of reinforced concrete beam-column joints with traditional style [J]. World Earthquake Engineering, 2015, 31(4): 150-158.
- [4] 漆成. 仿古建筑钢管柱—工字钢双梁节点抗震性能试验与有限元分析[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2014.
QI Cheng. Anti-seismic performance test and finite element analysis of steel-column columns-I-beam double-beam joints [D]. Xi'an: Xi'an Univ. of Arch. & Tech., 2014.
- [5] 周升. 全焊刚接仿古建筑双梁柱节点抗震性能试验研究及有限元分析[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2014.
ZHOU Sheng. Experimental study and finite element analysis of seismic performance of double-beam-column joints of all-welded rigid-connected antique buildings [D]. Xi'an: Xi'an Univ. of Arch. & Tech., 2014.
- [6] 马林林. 钢结构仿古建筑带斗拱檐柱节点抗震性能试验研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2015.
MA Linlin. Experimental study on seismic behavior of steel structure antique building with bucket column joints [D]. Xi'an: Xi'an Univ. of Arch. & Tech., 2015.
- [7] 薛建阳,戚亮杰,隋葵,等. 仿古建筑圆钢管柱—工字钢截面双梁节点抗剪承载力研究[J]. 地震工程与工程振动, 2016, 36(4): 192-199.
XUE Jianyang, QI Liangjie, SUI Yan, et al. Study on shear capacity of double-girder section of I-beam [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2016, 36(4): 192-199.
- [8] 隋葵,薛建阳,吴占景,等. 钢结构仿古建筑阻尼节点动力加载试验及有限元分析[J]. 建筑结构学报, 2018, 39(6): 110-118.
SUI Yan, XUE Jianyang, WU Zhanjing, et al. Dynamic loading test and finite element analysis of damping joints for antique structures in steel structures [J]. Journal of Building Structures, 2018, 39(6): 110-118.
- [9] 赵鸿铁,张海彦,薛建阳,等. 古建筑木结构燕尾榫节点刚度分析[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2009, 41(4): 450-454.
ZHAO Hongtie, ZHANG Haiyan, XUE Jianyang, et al. Stiffness Analysis of Dovetail Joints in Ancient Architecture Wood Structures [J]. J. of Xi'an Univ. of Arch. & Tech., 2009, 41(4): 450-454.
- [10] 马林林,薛建阳,董金爽,等. 传统风格建筑钢结构檐柱刚度分析[J]. 工业建筑, 2017, 47(10): 20-25.
MA Linlin, XUE Jianyang, DONG Jinshuang, et al. Stiffness analysis of steel columns in traditional style buildings[J]. Industrial Construction, 2017, 47(10): 20-25.
- [11] 薛建阳,翟磊,马林林,等. 抗震性能试验研究及有限元分析[J]. 土木工程学报, 2016, 49(7): 57-67.
XUE Jianyang, ZHAI Lei, MA Linlin, et al. Experimental study and finite element analysis of seismic behavior of steel structure antique columns with bucket columns[J]. China Civil Engineering Journal, 2016, 49(7): 57-67.
- [12] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑抗震设计规范: GB 50011-2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for seismic design of buildings: GB 50011-2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010.

(编辑 沈 波)