

文章编号:1673-2049(2019)06-0080-08

传统风格建筑混凝土梁-柱节点承载力 影响参数灰色关联分析

董金爽^{1,2}, 隋 龔², 薛建阳²

(1. 海南大学 土木建筑工程学院, 海南 海口 570228; 2. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055)

摘要:为研究传统风格建筑混凝土梁-柱节点的破坏特征及力学性能,进行了2个节点试件的动力循环加载试验,包括1个传统风格建筑混凝土双梁-柱节点试件和1个单梁-柱节点对比试件,获得了试件的恢复力特征曲线。基于试验研究结果,采用ABAQUS软件建立试件三维有限元模型,在验证模型结构合理性的基础上,结合灰色系统理论的关联分析方法,以轴压比、混凝土强度、上下梁间距及配箍率等关键参数为关联因子,对影响传统风格建筑混凝土梁-柱节点承载力的关键参数进行关联度计算,得出了各参数对其承载力影响权重排序。结果表明:相对于单梁-柱节点,传统风格建筑混凝土双梁-柱节点承载力及耗能能力较高,滞回曲线更饱满,但其位移延性略小于单梁-柱节点;总体上,传统风格建筑混凝土梁-柱试件节点域的变形及耗能能力较强,抗震性能良好;传统风格建筑混凝土梁-柱节点承载力关键影响因素的权重依次为混凝土强度、配箍率、型钢强度、轴压比;所得结论为传统风格建筑力学性能及承载力计算的进一步研究提供了新思路。

关键词:传统风格建筑;双梁-柱节点;承载力;灰色关联分析

中图分类号:TU311 **文献标志码:**A

Grey Relevance Analysis of Influencing Parameters of Bearing Capacity of Concrete Beam-column Joints in Traditional Style Buildings

DONG Jin-shuang^{1,2}, SUI Yan², XUE Jian-yang²

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Hainan University, Haikou 570228, Hainan, China;

2. School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, Shaanxi, China)

Abstract: In order to study the failure characteristics and mechanical properties of concrete beam-column joints of traditional style building, the dynamic cyclic loading tests of two joint specimens were carried out, including a traditional style concrete double-beam-column joint and a single-beam-column joint. And the restoring force characteristic curves of the specimens were obtained. Based on the experimental results, the three-dimensional finite element model of specimen was established by using ABAQUS software. On the basis of validating the rationality of the model structure and combining with the relational analysis method of grey system theory, taking the key parameters such as axial compression ratio, concrete strength, spacing between upper and lower

收稿日期:2018-10-22

基金项目:海南省自然科学基金项目(519QN190);国家自然科学基金项目(51208411);海南省重大科技计划项目(ZDKJ201803);海南大学科研基金资助项目(KYQD(ZR)1860);陕西省教育厅重点实验室科研计划项目(17JS061);陕西省科学技术研究发展计划项目(2013KW23-01)

作者简介:董金爽(1989-),男,山东菏泽人,海南大学讲师,工学博士,E-mail:mlcxll@163.com。

通信作者:隋 龔(1978-),男,黑龙江双城人,副教授,工学博士,E-mail:suiyanmy@163.com。

beams and stirrup ratio as the relational factors, the relational degree of the key influencing factors of bearing capacity of the traditional style concrete beam-column joints was calculated, and the weight order of the influencing factors of each parameter on its bearing capacity was obtained. The results show that compared with single beam-column joints, the traditional style concrete double beam-column joints have higher bearing capacity and energy dissipation capacity, fuller hysteretic curve, but their displacement ductility is slightly smaller than single beam-column joints. Generally, the deformation and energy dissipation capacity of the joint area of the traditional style concrete beam-column specimens are strong, and the seismic performance is good. The key influencing factors of bearing capacity of traditional style concrete beam-column joints are concrete strength, stirrup ratio, section steel strength and axial compression ratio in turn. The research results provide a new idea for the further study of mechanical properties and bearing capacity calculations of traditional style buildings.

Key words: traditional style building; double beam-column joint; bearing capacity; grey relevance analysis

0 引言

传统风格建筑(又称仿古建筑)是在对中国传统建筑文化传承与创新的过程中应运而生的,是传统民族建筑与地域建筑特色结合的探索与创新。传统风格建筑是采用现代建筑技术、建筑材料仿制古建筑形制、外观的一种建筑形式。由于传统风格建筑料拱与雀替仅为装饰用非结构构件、梁柱节点及柱脚与基础刚性连接等结构特点,改变了古建筑榫卯半刚性连接、料拱铺作层以及柱脚的平摆浮搁等特殊营造技术,其结构受力特点与古建筑差异较大。由于采用古建筑材份形制要求,其受力特点亦与现代建筑有所不同^[1]。

目前,对传统风格建筑的研究多集中在施工工艺性^[2-4]及施工技术方面^[5-9],对其力学性能的研究尚处于起步阶段。Xue等^[10-13]对传统风格建筑钢结构梁-柱节点承载力进行了试验研究;隋龔等^[14-15]进行了附设黏滞阻尼器的传统风格建筑梁-柱节点力学特性分析。传统风格建筑由于其受力的复杂性和构造的特殊性,其受力性能关键影响参数较多,且各参数对构件承载力的贡献并非非线性,而是存在一定的耦合作用。

鉴于此,本文设计了2个传统风格建筑混凝土梁-柱节点试件,采用动力循环加载方式获得其承载力等力学性能,在此基础上,建立试件的数值分析模型,利用灰色系统理论的关联分析方法,计算各试验参数与构件承载力之间的关联度,以期在传统风格建筑抗震性能研究提供参考。

1 试验概况

1.1 试件设计

试验设计了2个传统风格建筑混凝土梁-柱节点试件,包括1个单梁-柱节点试件SLJ,1个典型双梁-柱节点试件DLJ。试件按照“强柱弱梁、强节点弱构件”的抗震要求进行设计。试件上柱为方钢管混凝土结构,试件下柱及梁为普通钢筋混凝土结构,方钢管伸入下柱尺寸依据相关规范确定,其尺寸为 $160\text{ mm}\times 5.5\text{ mm}$ 。

试件基本尺寸如图1所示。钢筋力学性能如表1所示。试件设计轴压比 $n=0.25$ 。

1.2 加载方案

试验加载装置如图2所示,梁端采用单向铰支座控制,使其只可以在水平方向移动。为与实际结构的边界条件相一致,双梁-柱试件的上下梁间采用双梁连接器(专利号:ZL 201420635422.1)。柱底采用球铰。

加载全程分为2个过程:①试件就位后,柱顶恒定轴压荷载采用1000 kN千斤顶施加,先施加至满载的50%,而后逐步加载至100%;②水平荷载采用位移控制的加载方案,为MTS793电液伺服程控结构试验系统快速输入正弦波的动力加载制度。

当试件不能正常维持所施加的轴向压力,或水平荷载下降到峰值荷载的85%时,结束加载。试验加载工况如表2所示,加载制度如图3所示。

1.3 主要试验结果

试验测得的试件水平荷载-位移($P-\Delta$)滞回曲线如图4所示,骨架曲线如图5所示。试件水平荷载-

满。加载初期,荷载与位移基本呈线性关系,随着加载的继续,试件进入到弹塑性工作阶段,滞回环所包围的面积也逐渐增大。

(2)随着荷载的增加,滞回环逐渐向位移轴倾斜,滞回环的初始斜率逐渐变小,表明加载时试件的刚度在逐渐退化。

(3)荷载较小时,试件的荷载-位移骨架曲线基本呈线性,说明试件在弹性工作阶段,随着荷载的增大及试件裂缝数量逐渐增多和宽度增大,荷载-位移曲线表现出明显的非线性,出现了明显的拐点,刚度开始降低,荷载增长滞后于变形。

2 有限元分析

2.1 模型建立

选用 ABAQUS 建立试件的三维有限元模型。建模时模型截面尺寸和试验试件尺寸完全相同。模型选用 S4R 壳单元,网格划分采用结构优化网格技术,混凝土与钢管单元尺寸为 55 mm×55 mm,钢筋单元尺寸为 80 mm×80 mm。定义与试验一致的边界条件,在加载部位设置高强垫板,避免加载端出现应力集中,将荷载施加在高强垫板之上,将加载步设置为先在柱顶施加轴向荷载,而后在柱顶端部施加水平荷载。钢材采用双线性强化模型^[16],混凝土采用 Kent-Scott 约束混凝土本构模型^[17]。根据预留试样的材性试验结果定义材料的特征值。钢管与混凝土间采用绑定(Tie)方式定义接触关系,钢筋与混凝土采用嵌入(Embed)定义接触关系,且不考虑混凝土与钢材间的黏结滑移^[18]。有限元模型如图 6 所示。

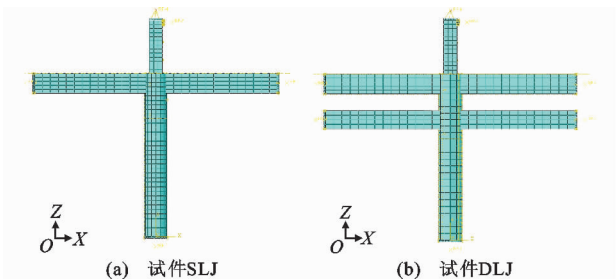


图 6 有限元模型

Fig. 6 Finite Element Models

2.2 有限元结果分析

试验结果与有限元结果对比如图 7 所示,两者所得极限荷载见表 3。由图 7 可知:在弹性阶段,试验结果与有限元结果吻合度较高,进入到弹塑性阶段,两者曲线逐渐分离。这是由于采用动力加载方式,导致试件承载力及刚度退化较严重,试件存在损

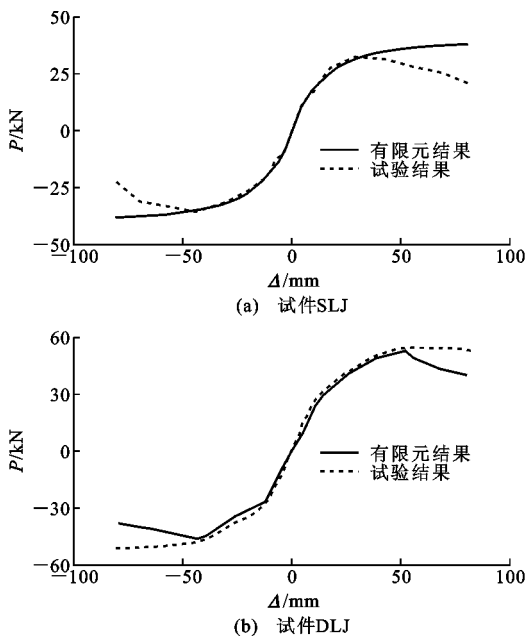


图 7 试验结果与有限元结果对比

Fig. 7 Comparisons of Experimental and Finite Element Results

表 3 极限荷载比较

Tab. 3 Comparison of Ultimate Loads

试件编号	加载方向	P_u^{Te}/kN	P_{FEMu}^u/kN	P_{FEMu}^u/P_u^{Teu}
SLJ	正向	32.3	38.1	1.18
	负向	-35.5	-36.9	1.07
DLJ	正向	53.0	55.6	1.05
	负向	46.1	51.3	1.13

注: P_u^{Te} 为极限荷载试验结果; P_{FEMu}^u 为极限荷载有限元结果。

伤累积效应;有限元分析时采用的是单次加载,有限元模型没有考虑混凝土的损伤,导致有限元分析结果与试验结果在一定程度上存在差异。

图 8 给出了达到极限荷载时试件节点核心区混凝土和型钢的主应力矢量图。图 8(a),(c)为核心区型钢腹板的主应力图。主应力方向与加载方向基本呈 45°且相互垂直,说明型钢腹板受剪明显。核心区对角线及其两侧的混凝土最小主应力方向基本一致,形成了一个有一定分布宽度的斜向压杆。由于在达到极限荷载时试件应力已经达到所选用的应力-应变曲线上的峰值应力,所以斜向压杆两边的最小主应力大于中间的最小主应力。图 9 为试件节点核心区型钢腹板及混凝土的 Mises 应力云图。试件 SLJ,DLJ 节点核心区型钢腹板的屈服强度分别为 235,210 MPa。试件达到极限荷载时,节点核心区型钢腹板尚未屈服,且其他部分型钢应力较小,说明模型结构在达到极限荷载时节点核心区还未破坏,这与试验现象相一致,表明有限元模型准确合理,能

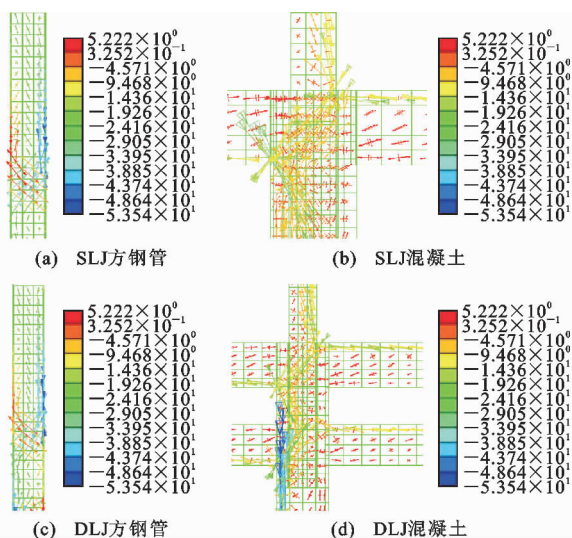


图8 节点核心区应力流(单位:MPa)

Fig. 8 Stress Streams of Core Areas of Joints (Unit:MPa)

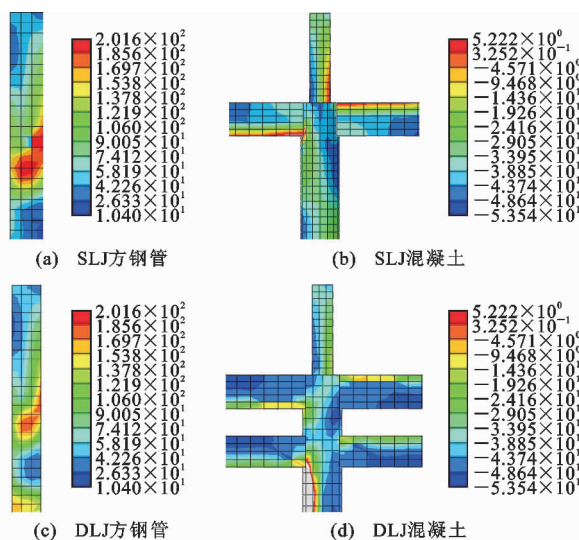


图9 节点核心区应力云图(单位:MPa)

Fig. 9 Stress Nephograms of Core Areas of Joints (Unit:MPa)

够客观反映节点核心区受力状态,可用于后续的灰色关联参数分析。

3 分析方法

3.1 基本概念

灰色系统理论、模糊数学及概率统计是3种较为常用的不确定性系统研究方法,而灰色系统理论具有解决其他2种研究方法所不具有的“小样本、贫信息”的研究优势,其特点是“少数据建模”,可通过对“部分”已知信息的生成、开发,提取有价值的信息,实现对现象的确切描述和认识。

灰色关联分析方法对样本量的多少和样本是否

有规律同样适用,且计算量小,不会出现量化结果和定性分析结果不相符的矛盾。灰色关联分析方法的基本思想是:根据序列曲线几何形状的相似程度判断其联系是否紧密。曲线越接近,相应序列之间的关联度越大,反之越小^[19]。

3.2 试件承载力灰色关联分析过程

3.2.1 关联因子的确定

根据现有研究理论^[20-21],钢-混凝土组合结构承载力影响因素主要包括混凝土强度 f_c 、配箍率 ρ_{yv} 及其屈服强度 f_{yv} 、轴压比 n 、型钢腹板面积 $t_w h_w / (b h_0)$ (t_w, h_w 分别为型钢腹板厚度、高度; b, h_0 分别为截面宽度、有效高度)及其屈服强度 f_a 等。

以传统风格建筑混凝土单梁-柱节点为例,选择混凝土强度 f_c 、配箍率及其屈服强度特征值 $f_{yv} \cdot \rho_{yv}$ 、轴压比 n 、型钢腹板面积及其屈服强度特征值 $f_a t_w h_w / (b h_0)$ 作为试件承载力的关联因子,以其承载力 F/bh_0 作为系统的母序列 $\{x_0(k) | k=1, 2, \dots, 16\}$,以参数 $f_c, f_{yv} \rho_{yv}, n, f_a t_w h_w / (b h_0)$ 作为系统的子序列 $\{x_i(k) | i=1, 2, 3, 4; k=1, 2, \dots, 16\}$ 。

3.2.2 计算模型确定

根据已确定的关联因子,每个关联因子设为4个水平,模型结构各关键参数水平如表1所示。以模型结构1为例,其轴压比 $n=0.20$,混凝土强度 $f_c=30$ MPa,配箍率为2.16%,型钢腹板面积及其屈服强度特征值为7.34 MPa,其他模型以此类推。

3.2.3 初值化处理

考虑到系统中各参数的计量单位和数据的量纲不同,为便于分析,在对各因素进行比较前将原始数据进行归一化处理,初值化处理的过程为

$$x'_i(k) = x_i(k) / x_i(1)$$

$$i=1, 2, 3, 4; k=1, 2, \dots, 16 \quad (1)$$

式中: $x'_i(k)$ 为经过初值化处理后的数据序列; $x_i(1)$ 为各原始数据序列第1个数据。

采用式(1)初值化处理方法,得到相应的量纲一的序列,使各序列数据具有可比性。各原始数据序列及经过初值化处理后的数据序列见表4。

3.2.4 母序列与各子序列的绝对差值 $\Delta_i(k)$

绝对差值 $\Delta_i(k)$ 计算式如下

$$\Delta_i(k) = \{ |x'_0(k) - x'_i(k)| \}$$

$$i=1, 2, 3, 4; k=1, 2, \dots, 16 \quad (2)$$

式中: $x'_0(k)$ 为初值化处理的母序列; $x'_i(k)$ 为初值化处理后的子序列。

经过初值化处理后,按式(2)可求得母序列与各子序列的绝对差值,计算结果见表5。

表 4 原始试验数据及初值化序列
Tab. 4 Original Test Data and Initialization Sequence

k	$F/(bh_0)$		f_c		$f_{yv}\rho_{yv}$		n		$f_s t_w h_w/(bh_0)$	
	$x_0(k)$	$x_0'(k)$	$x_1(k)$	$x_1'(k)$	$x_2(k)$	$x_2'(k)$	$x_3(k)$	$x_3'(k)$	$x_4(k)$	$x_4'(k)$
1	2.29	1.00	30	1.00	2.16	1.00	0.2	1.00	7.34	1.00
2	2.42	1.06	30	1.00	2.16	1.00	0.4	2.00	7.34	1.00
3	2.48	1.08	30	1.00	2.16	1.00	0.6	3.00	7.34	1.00
4	2.49	1.09	30	1.00	2.16	1.00	0.8	4.00	7.34	1.00
5	2.42	1.06	30	1.00	2.16	1.00	0.4	2.00	7.34	1.00
6	2.50	1.09	40	1.33	2.16	1.00	0.4	2.00	7.34	1.00
7	2.51	1.10	50	1.67	2.16	1.00	0.4	2.00	7.34	1.00
8	2.55	1.11	60	2.00	2.16	1.00	0.4	2.00	7.34	1.00
9	2.42	1.06	30	1.00	2.16	1.00	0.4	2.00	7.34	1.00
10	2.45	1.07	30	1.00	2.16	1.00	0.4	2.00	10.78	1.47
11	2.47	1.08	30	1.00	2.16	1.00	0.4	2.00	12.19	1.66
12	2.51	1.10	30	1.00	2.16	1.00	0.4	2.00	14.06	1.91
13	2.42	1.06	30	1.00	1.08	0.50	0.4	2.00	7.34	1.00
14	2.49	1.09	30	1.00	2.16	1.00	0.4	2.00	7.34	1.00
15	2.58	1.13	30	1.00	3.24	1.50	0.4	2.00	7.34	1.00
16	2.61	1.14	30	1.00	4.32	2.00	0.4	2.00	7.34	1.00

表 5 原始数据初值化处理差序列和关联系数序列
Tab. 5 Absolute Difference Sequence and Relational Coefficient Sequence of Original Data

k	f_c		$f_{yv}\rho_{yv}$		n		$f_s t_w h_w/(bh_0)$	
	$\Delta_1(k)$	$\xi_1(k)$	$\Delta_2(k)$	$\xi_2(k)$	$\Delta_3(k)$	$\xi_3(k)$	$\Delta_4(k)$	$\xi_4(k)$
1	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	1.00
2	0.06	0.96	0.06	0.96	0.94	0.61	0.06	0.96
3	0.08	0.95	0.08	0.95	1.92	0.43	0.08	0.95
4	0.09	0.94	0.09	0.94	2.91	0.33	0.09	0.94
5	0.06	0.96	0.06	0.96	0.94	0.61	0.06	0.96
6	0.24	0.86	0.09	0.94	0.91	0.62	0.09	0.94
7	0.57	0.72	0.10	0.94	0.90	0.62	0.10	0.94
8	0.89	0.62	0.11	0.93	0.89	0.62	0.11	0.93
9	0.06	0.96	0.06	0.96	0.94	0.61	0.06	0.96
10	0.07	0.95	0.07	0.95	0.93	0.61	0.40	0.78
11	0.08	0.95	0.08	0.95	0.92	0.61	0.58	0.71
12	0.10	0.94	0.10	0.94	0.90	0.62	0.81	0.64
13	0.06	0.96	0.56	0.72	0.94	0.61	0.06	0.96
14	0.09	0.94	0.09	0.94	0.91	0.62	0.09	0.94
15	0.13	0.92	0.37	0.80	0.87	0.63	0.13	0.92
16	0.14	0.91	0.86	0.63	0.86	0.63	0.14	0.91

3.2.5 关联系数计算

根据灰色系统理论,关联系数计算式如下

$$\xi_i(k) = [\min_i \min_k |x_0'(k) - x_i'(k)| + \xi_0 \max_i \max_k |x_0'(k) - x_i'(k)|] / [|x_0'(k) - x_i'(k)| + \xi \max_i \max_k |x_0'(k) - x_i'(k)|] \tag{3}$$

式中: ξ 为分辨系数,其作用是用来削弱二级最大差

过大而失真的影响,以提高关联系数之间差异的显著性; ξ 的取值范围为(0,1),一般可以取 $\xi=0.5$; $\min_i \min_k |x_0'(k) - x_i'(k)|$ 为二级最小差,在本例中, $\min_i \min_k |x_0'(k) - x_i'(k)| = 0$; $\max_i \max_k |x_0'(k) - x_i'(k)|$ 为二级最大差,在本例中, $\max_i \max_k |x_0'(k) - x_i'(k)| = 2.91$ 。

根据式(3)计算的关联系数见表 5。

3.2.6 关联度计算及其排序

各比较序列及参考序列的关联度 r_i 计算如下

$$r_i = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \xi_i(k) \quad (4)$$

将表 5 中的关联系数代入式(4),可求得传统风格建筑混凝土梁-柱节点关联度序列。双梁-柱节点计算结果为{0.909,0.907,0.610,0.903},关联度排序为 $r_1 > r_2 > r_4 > r_3$ 。同理,单梁-柱节点计算结果为{0.922,0.915,0.752,0.870},关联度排序为 $r_1 > r_2 > r_4 > r_3$ 。由此可推定传统风格建筑混凝土梁-柱节点承载力影响因素按从大到小排序依次为混凝土强度、配箍率、型钢强度、轴压比。该结论与常规混凝土梁-柱节点承载力影响因素研究结论相一致。常规混凝土梁-柱节点试验表明,在混凝土未开裂前,混凝土承担的剪力约为总剪力的 50%,在混凝土构件进入塑性阶段后,该部分剪力主要转移给型钢腹板承担,因此,两者对传统风格建筑混凝土梁柱节点承载力的影响最大,该结论也与文献[10]中结果相一致。

4 结 语

(1)传统风格建筑混凝土梁-柱节点滞回曲线饱满,抗震性能较好。

(2)通过试验结果与有限元结果的对比,验证了所建有限元模型的准确性及合理性,可客观反映节点核心区受力状态。

(3)通过参数分析及灰色关联度分析,得到传统风格建筑混凝土梁-柱节点承载力影响因素的主次排序,依次为混凝土强度、配箍率、型钢强度、轴压比。所得结论使影响该类型结构承载力参数重要性的判别更具有科学性。

参考文献:

References:

- [1] 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 Qi-fang, LI Peng, GE Hong-peng, et al. Experimental Study on Seismic Behavior of RC Column-beam Joint Built in Traditional Style[J]. World Earthquake Engineering, 2015, 31(4): 150-158.
- [2] 屈 虹,路占卫. 仿古建筑油饰彩画施工技术在混凝土基层中的应用[J]. 施工技术,2012,41(增 2):310-313.
QU Hong, LU Zhan-wei. Application of Decoration of

- Antique Building Oil Painting Technique in Concrete Base[J]. Construction Technology, 2012, 41(S2): 310-313.
- [3] 詹 云. 建筑设计装饰艺术[J]. 文艺争鸣, 2011(2): 138-139.
ZHAN Yun. Architectural Design and Decoration Art [J]. Contention in Literature and Art, 2011(2): 138-139.
- [4] 赵 侃. 仿古建筑兴起的文化因素[J]. 艺术评论, 2009(3): 72-75.
ZHAO Kan. Cultural Factors of the Rise of Archaize Architecture[J]. Arts Criticism, 2009(3): 72-75.
- [5] 丁亮进,董欢涛,李 妍,等. 天人长安塔钢结构综合施工技术[J]. 施工技术,2010,39(8):158-159,166.
DING Liang-jin, DONG Huan-tao, LI Yan, et al. Comprehensive Construction Technology of Steel Structures in Tianrenchang'an Pagoda [J]. Construction Technology, 2010, 39(8): 158-159, 166.
- [6] 王昌兴,徐 珂,田立强. 洛阳隋唐城天堂遗址保护建筑设计[J]. 钢结构,2011,26(8):32-36,79.
WANG Chang-xing, XU Ke, TIAN Li-qiang. Structure Design of Tiantang for the Protection of the Ruins of Ancient Buildings Built in the Sui and Tang Dynasty in Luoyang City[J]. Steel Construction, 2011, 26(8): 32-36, 79.
- [7] 张兰香. 仿古混凝土构件安装施工探讨、研究与应用——永济鹳雀楼重建工程[J]. 古建园林技术,2009(4):73-75.
ZHANG Lan-xiang. Discussion, Research and Application of Antique Concrete Component Installation and Construction — Yongji Guanquelou Reconstruction Project[J]. Traditional Chinese Architecture and Gardens, 2009(4): 73-75.
- [8] 张兰香. 大型仿古建筑混凝土结构构架施工工法(YJGF47-2002)[J]. 施工技术,2005,34(3):80-83.
ZHANG Lan-xiang. Construction Method of Large Size Concrete Structural Frames in Pseudo-classic Building (YJGF47-2002)[J]. Construction Technology, 2005, 34(3): 80-83.
- [9] 贾慕晨,王江平,张兰香. 仿古建筑钢-木组合结构构架创新施工技术的研究与应用[J]. 施工技术,2014,43(15):111-115.
JIA Mu-sheng, WANG Jiang-ping, ZHANG Lan-xiang. Study and Application of Steel-wood Composite Structure Innovative Construction Technology for Ancient Style Building[J]. Construction Technology, 2014, 43(15): 111-115.
- [10] XUE J Y, DONG J S, SUI Y, et al. Dynamic Experi-

- mental Study of Viscous Damper on Chinese Traditional Style Structure with Dual-lintel-column Joint of Steel and Composite Structures[J]. The Structural Design of Tall and Special Buildings, 2017, 26(10): e1366.
- [11] XUE J Y, DONG J S, SUI Y, et al. Dynamic Behaviors of Viscous Damper on Concrete Archaized Building with Lintel-column Joint[J]. Earthquakes and Structures, 2017, 13(4): 409-419.
- [12] 薛建阳, 吴占景, 隋 龔, 等. 传统风格建筑钢结构双梁-柱中节点抗震性能试验研究及有限元分析[J]. 工程力学, 2016, 33(5): 97-105.
- XUE Jian-yang, WU Zhan-jing, SUI Yan, et al. Experimental Study and Numerical Analysis on Aseismic Performance of Steel Double-beams-column Interior-joints in Traditional Style Building[J]. Engineering Mechanics, 2016, 33(5): 97-105.
- [13] 薛建阳, 吴占景, 隋 龔, 等. 仿古建筑钢结构双梁-柱边节点抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2015, 36(3): 80-89.
- XUE Jian-yang, WU Zhan-jing, SUI Yan, et al. Experimental Study on Seismic Performance of Steel Double-beams Column Exterior Joints in Antique Style Building[J]. Journal of Building Structures, 2015, 36(3): 80-89.
- [14] 隋 龔, 薛建阳, 董金爽, 等. 附设黏滞阻尼器的传统风格建筑混凝土梁柱组合件力学行为分析[J]. 工业建筑, 2017, 47(10): 45-51.
- SUI Yan, XUE Jian-yang, DONG Jin-shuang, et al. Research on Mechanical Behavior of Concrete Beam-column Subassemblages in Traditional Style Buildings with Viscous Damper[J]. Industrial Construction, 2017, 47(10): 45-51.
- [15] 隋 龔, 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 Jian-yang, WU Zhan-jing, et al. Dynamic Loading Test and Numerical Analysis of Steel Beam-column Joint in Traditional Style Buildings[J]. Journal of Building Structures, 2018, 39(6): 110-118.
- [16] SCOTT B D, PARK R, PRIESTLEY M J N. Stress-strain Behavior of Concrete Confined by Overlapping Hoops at Low and High Strain Rates[J]. ACI Journal Proceedings, 1982, 79(1): 13-27.
- [17] ALFANO G, ROSATI L. A General Approach to the Evaluation of Consistent Tangent Operators for Rate-independent Elastoplasticity[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1998, 167(1/2): 75-89.
- [18] 陈宗平. 型钢混凝土异形柱的基本力学行为及抗震性能研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2007.
- CHEN Zong-ping. Study on Basic Mechanical Behavior and Seismic Performance of Steel Reinforced Concrete Special-shaped Columns[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2007.
- [19] 刘思峰, 党耀国, 方志耕, 等. 灰色系统理论及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- LIU Si-feng, DANG Yao-guo, FANG Zhi-geng, et al. Grey System Theory and Its Application[M]. Beijing: Science Press, 2010.
- [20] 徐亚丰, 贾连光, 王连广, 等. 钢骨高强混凝土框架边节点抗剪承载力分析[J]. 东北大学学报: 自然科学版, 2005, 26(2): 167-170.
- XU Ya-feng, JIA Lian-guang, WANG Lian-guang, et al. Bearing Capacity of Side Joint of Steel-reinforced HS Concrete Frame for Shear Load[J]. Journal of Northeastern University: Natural Science, 2005, 26(2): 167-170.
- [21] 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, 33.
- XIE Qi-fang, LI Peng, WANG Long, 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, 33.