

足尺钢管混凝土柱-梁节点抗剪性能试验

康利平, 吕西林

(同济大学 土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092)

摘要: 对 10 个不同节点构造的足尺钢管混凝土柱-梁节点在不同轴压比下的抗剪性能进行了试验研究. 在此基础上, 对不同的节点域抗剪承载力计算公式进行了比较分析, 并进一步讨论了节点域受剪性能的数值模拟(OpenSEES)方法. 研究表明, 所有的节点均表现出良好的抗剪性能; 中国规范建议的节点域抗剪承载力公式有待改进; OpenSEES 数值模型合理地模拟了节点域的剪力-剪切变形性能.

关键词: 钢管混凝土柱节点; 剪切承载力; 剪力-剪切变形曲线; 足尺试验; 数值分析

中图分类号: TU375

文献标志码: A

Full-scale Experimental Research on Shear Capacity of Concrete-filled-steel-tube Column Connections

KANG Liping, LÜ Xilin

(State Key Laboratory of Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Experimental research was conducted on 10 full-scale concrete-filled-steel-tube (CFT) column connections to investigate their seismic performance under various axial force ratios. Different shear strength equations were compared, and the shear strength-deformation relations were further implemented into OpenSEES simulations. Results show that all tested CFT connections present excellent shear capacity in resisting lateral loadings; the equations proposed in Chinese specifications need improving; and OpenSEES model provides reasonable simulations on both shear strength and shear deformations of the joints.

Key words: concrete-filled-steel-tube (CFT) column connections; shear strength; shear strength-deformation relations; full-scale experiments; numerical simulations

钢管混凝土(CFT)柱体系由于竖向承载力高、侧向刚度大及施工周期短等优点, 日益成为大量高层建筑的主要受力体系^[1-2]. 在这些体系中, 钢管混凝土柱与钢梁组成的框架结构是最为普遍的一种结构形式. 合理的预测节点域的受剪承载力及变形对于结构设计及分析非常重要. 《矩形钢管混凝土结构技术规程》^[3]中给出了节点域承载力的预测公式, 这是基于吕西林等的研究^[4]得到的. 此外, 《铁骨钢筋混凝土构造计算规范 同解说》^[5]、台湾的 Wu 等^[6]以及西安建筑科技大学的周天华^[7]都提出了钢管混凝土柱节点域的承载力公式. 这些公式基于节点域不同的受力变形机制, 并采用不同的计算公式来预测各个部件的受剪承载力贡献, 故得出了不同的节点剪切承载力公式. 这些公式的适用范围及准确性值得探讨.

目前对于钢管混凝土柱-梁节点域剪力-剪切变形全曲线的研究还处于起步阶段. 日本的 Fukumoto 等^[8]提出节点域受剪三折线模型, 这是对钢管以及混凝土各自受剪的三折线模型进行叠加再简化而成. 相关的研究被日本建筑学会收录到 2008 版的《钢管混凝土构造设计施工指针》^[9]. 清华大学的聂建国等^[10]基于和 Fukumoto 相似的叠加方法对节点域剪力-剪切变形曲线进行了预测. 这些理论对节点域的弹性变形性能的预测比较准确, 但是对塑性阶段的预测误差较大. 此外, 台湾的 Wu 等^[6]基于螺栓连接的钢梁-钢管混凝土柱节点的研究也提出了节点域的剪力-剪切变形全曲线公式, 提出的公式对所测试的试件刚度及强度预测都比较合理, 公式概念清晰, 计算简单. 但是 Wu 等提出的公式对于钢管混凝土柱梁焊接节点的适用性还需要验证.

本文通过 10 个钢管混凝土柱-梁节点在不同轴压比作用下的反复荷载试验研究节点的受剪性能,

收稿日期: 2013-10-18

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划(2011BAJ09B01-03); 国家自然科学基金重大国际合作项目(51261120377); 国家自然科学基金重大研究计划集成项目(913153014)

第一作者: 康利平(1983—), 女, 博士生, 主要研究方向为钢-混凝土组合结构的抗震性能. E-mail: liping@gatech.edu

通讯作者: 吕西林(1955—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为高层建筑的抗震性. E-mail: lxlst@tongji.edu.cn

对各个承载力预测公式进行综合比较分析,并进一步讨论节点域剪力-剪切变形曲线在数值分析(OpenSEES^[11])中的应用.分析的节点包括外隔板节点、内隔板节点、内隔板外伸节点以及带狗骨式钢梁的内隔板节点等形式.

1 试验研究

1.1 试验设计

足尺钢梁-钢管混凝土柱节点的加载示意图如图 1.柱底通过铰接和基础连接;梁两端固定竖向方向的位移,水平方向可自由移动;柱顶施加竖向轴力以及水平反复荷载.钢管混凝土柱高 3 m,截面长、宽分别为 400 mm,400 mm,柱钢管厚度为 14 mm;采用工字型梁,梁长 4.2 m,截面尺寸见图 2.

钢管混凝土柱的轴压比是根据材性试验得到的混凝土及钢材的实际强度,认为混凝土及钢管共同受力且变形协调(符合平截面假定)而计算出来的.节点具体信息见表 1.钢材及混凝土的材性结果见表 2 和表 3.试验中采用位移控制,使每级加载的层间位移角依次达到 1/1 000,1/800,1/500,1/400,1/300,1/200,1/100,1/50,1/30 及 1/20.前 2 级循环 2 圈,其余加载级别均循环 3 圈.

1.2 试验结果

1.2.1 破坏模式

外隔板节点 JD11,JD12 及 JD13 的梁端与外隔板连接处发生屈服,形成塑性铰,属于典型的梁端破坏模式.内隔板节点破坏各有特点:JD22,JD22-D及

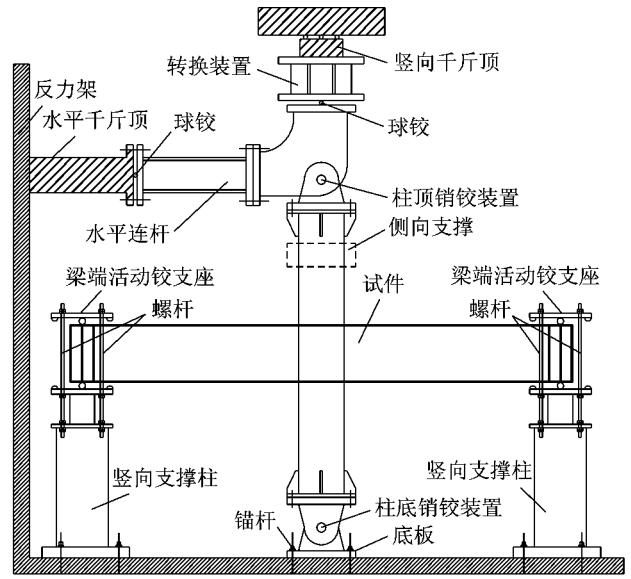


图 1 试验加载系统

Fig.1 Test setup

JD22-T1 的破坏发生在梁端靠近节点处;JD22-B 的塑性铰出现在钢梁狗骨式削弱处;JD22-T2 的梁端及节点域钢管均被拉裂,发生了节点域破坏;JD23 柱端钢管胀裂,混凝土被压碎,是典型的柱端破坏模式.内隔板外伸节点 JD32 的破坏起始于钢梁翼缘与外伸的隔板之间截面突变处的开裂,最终这个裂缝越来越严重,节点破坏. JD13 及 JD23 不同的破坏模式说明外隔板对节点域钢管及混凝土提供的约束作用大于内隔板,在高轴压比下,外隔板节点的柱钢管及混凝土仍然能保持承载力而内隔板节点的柱钢管及混凝土发生受压破坏. JD22 及 JD23 不同的破坏模式说明,随着轴压比的增大,节点的破坏模式从梁

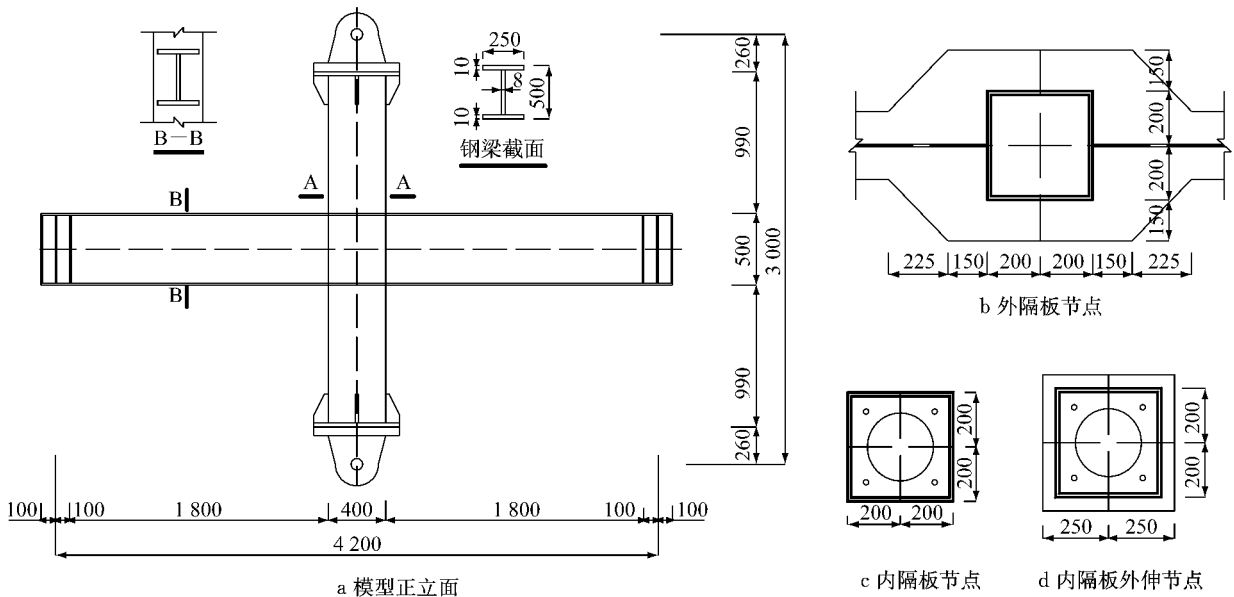


图 2 柱-梁节点构造(单位:mm)

Fig.2 Column-beam connection details (Unit: mm)

表 1 节点信息

Tab.1 Connection details

节点类型	节点编号	节点域钢管尺寸/mm		隔板尺寸	轴压比	轴力/kN
		边长	壁厚			
外隔板节点	JD11	400	14	宽 150 mm, 厚 10 mm	0.11	1 482
	JD12	400	14	宽 150 mm, 厚 10 mm	0.34	4 445
	JD13	400	14	宽 150 mm, 厚 10 mm	0.68	8 890
内隔板节点	JD22	400	14	厚 10 mm, 开洞直径 250 mm	0.34	4 445
	JD22-B (狗骨式钢梁)	400	14	厚 10 mm, 开洞直径 250 mm	0.34	4 445
	JD22-D	400	14	厚 14 mm, 开洞直径 250 mm	0.34	4 445
	JD22-T1	400	18	厚 10 mm, 开洞直径 250 mm	0.34	4 445
	JD22-T2	400	10	厚 10 mm, 开洞直径 250 mm	0.34	4 450
	JD23	400	14	厚 10 mm, 开洞直径 250 mm	0.68	8 890
内隔板外伸节点	JD32	400	14	宽 150 mm, 开洞直径 250 mm	0.34	4 445

表 2 钢材材性

Tab.2 Material property of the steel

厚度/ mm	屈服强度/ MPa	抗拉强度/ MPa	弹性模量/ GPa	伸长率/ %
8	333.88	525.57	206	29.0
10	354.62	553.83	211	29.5
14	324.41	498.49	206	29.3
18	336.80	512.68	218	33.6

表 3 混凝土材性

Tab.3 Material property of the concrete

强度等级	立方体抗压 强度/MPa	棱柱体抗压 强度/MPa	抗拉强 度/MPa	弹性模 量/GPa
C40	56.92	47.79	2.35	32.6

端破坏转化为柱端屈服模式. 节点 JD22-T2 的破坏说明, 减薄节点域钢管厚度的做法大大降低了节点域的抗剪承载力及刚度, 节点的破坏模式从 JD22 的梁端破坏转化为 JD22-T2 的节点域破坏.

1.2.2 层间剪力-层间位移角滞回曲线

所有节点的节点层间剪力 (V_c)-层间位移角 (R_c)滞回曲线均表现为饱满的梭子形, 说明节点的抗震性能好, 耗能能力高. 需要说明的是, 滞回曲线在原点附近出现了“捏缩效应”, 这是由于加载系统的螺栓与螺孔之间的间隙以及加载系统与试件之间存在“接触-压紧-反向接触”等原因引起的. JD11, JD12, JD22, JD22-B 及 JD22-D 的滞回曲线在层间位移角小于 1/20 时均非常稳定且形状饱满. JD13 及 JD23 由于轴压比高的缘故, 滞回曲线在加载后期出现大量锯齿形扰动且层间剪力大幅下降. JD22-T1 的滞回曲线稳定发展直至 1/30 加载级别. JD22-T2 的水平承载力稳步上升直至层间位移角达到 1/40, 然而由于层间位移角为 1/30 时钢梁翼缘与节点域的钢管拉裂, 滞回曲线出现严重的强度退化. JD32 由于钢梁与外伸的内隔板之间存在截面尺寸突变, 滞回曲线在层间位移角为 1/30 的加载级别的第 2

圈及第 3 圈出现严重的同级强度退化. 部分节点的试验滞回曲线见图 3.

1.2.3 层间剪力-层间位移角骨架曲线

内隔板外伸节点 (JD32) 及带有狗骨式钢梁的内隔板节点 (JD22-B) 的骨架曲线和内隔板节点 (JD22) 相近, 外隔板节点 (JD12) 的骨架曲线表现出更大的承载力且达到最大承载力后强度退化更加迅速 (图 4a). 和内隔板节点 (JD22) 比较起来, 节点域钢管厚度增大的节点 (JD22-T1) 节点强度增大, 但是达到最大承载力后的强度退化也更为迅速; 节点域钢管厚度减小的节点 (JD22-T2) 节点强度减小; 内隔板厚度增大的节点 (JD22-D) 屈服发生得更早, 强度退化也更为严重 (图 4b). 随着轴压比的增大, 节点强度减小, 且强度退化加剧 (图 4c).

1.2.4 节点的强度及延性

表 4 列出了节点的强度及延性等主要试验结果. 从 JD11, JD12 及 JD13 的比较看出, 随着轴压比的增大, 节点的屈服提前、强度减小且延性降低. 增大内隔板厚度的节点 (JD22-D) 及增大节点域钢管厚度的节点 (JD22-T1) 节点强度增大; 减小节点域钢管厚度的节点 (JD22-T2) 节点强度减小. 狗骨式钢梁 (JD22-B) 的处理方法使节点的强度和延性系数均有所减小 (和 JD22 比较). 内隔板外伸节点 (JD32) 的位移角延性系数 (2.668) 比内隔板节点 (JD22) 的位移角延性系数 (3.433) 更小. 从表中不难看出, 外隔板节点 (JD12) 强度最高, 延性最差; 内隔板节点 (JD22) 的强度稍低但是延性最好; 内隔板外伸节点 (JD32) 的强度和内隔板节点相近但是延性低一些.

节点屈服时的层间位移角为 0.010 0~0.016 3 rad, 是钢筋混凝土 (RC) 结构弹性层间位移角限值 (1/550) 的 5.5~9.0 倍, 也是钢结构弹性层间位移角限值 (1/250) 的 2.5~4.1 倍. 节点的极限层间位

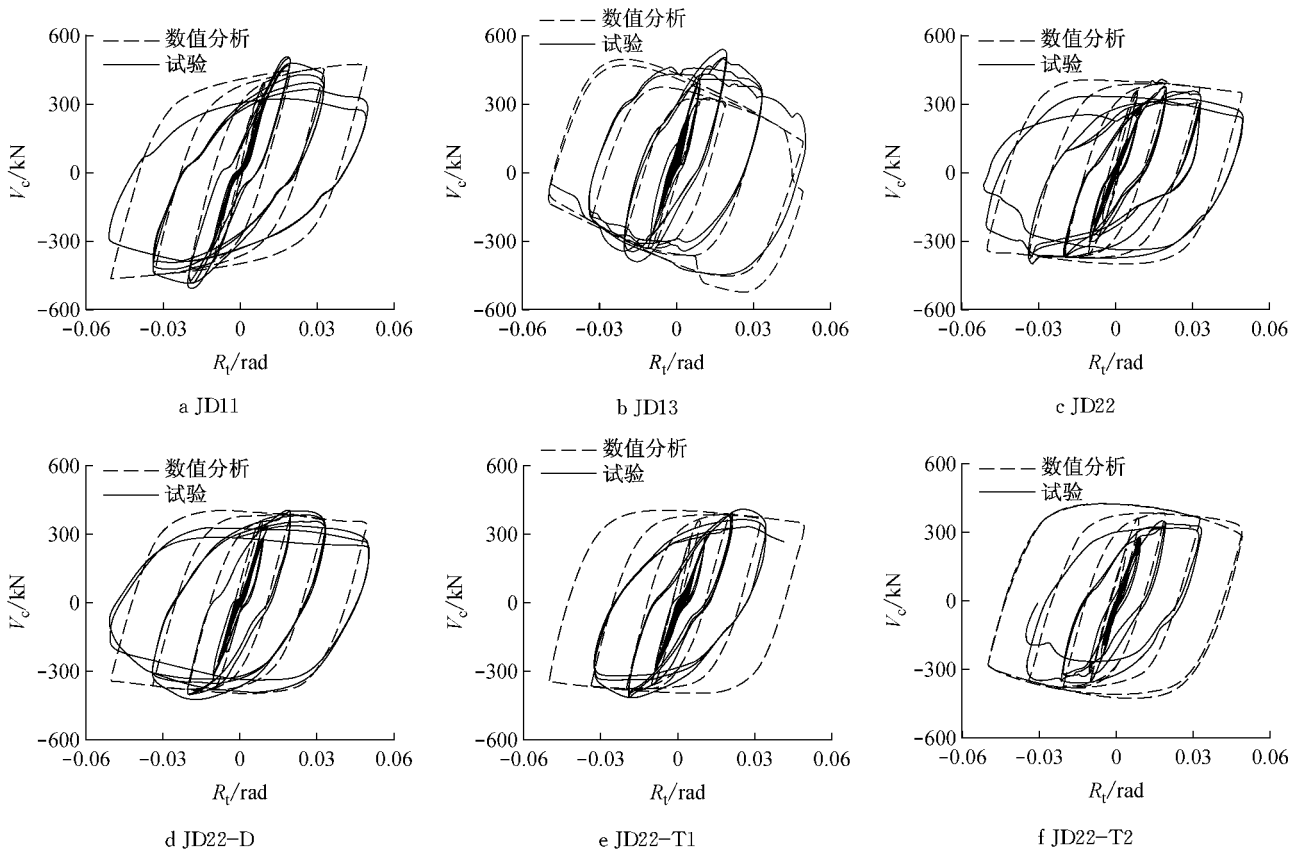


图 3 节点层间剪力-层间位移角滞回曲线

Fig. 3 Story shear force-story drift angle hysteresis curves

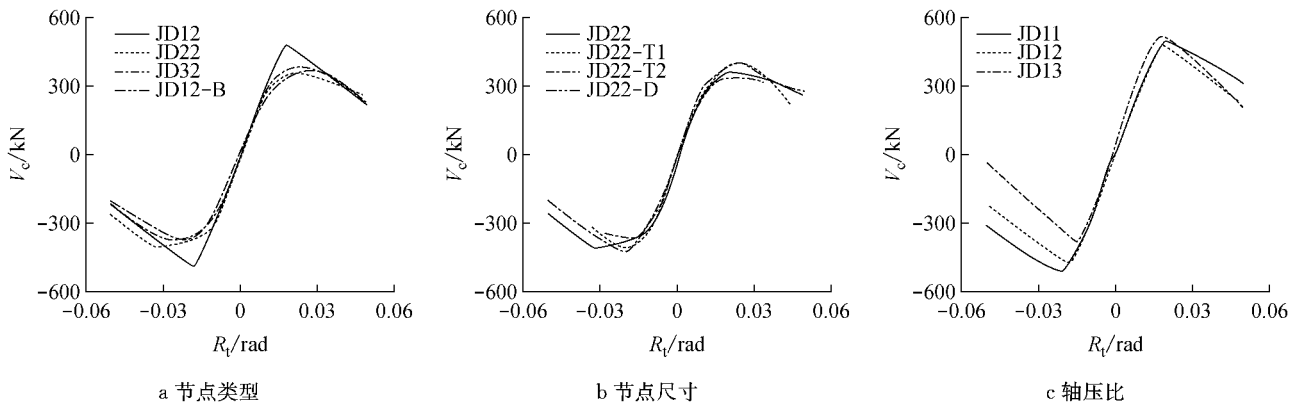


图 4 节点层间剪力-层间位移角骨架曲线

Fig. 4 V_c-R_t envelope curves

移角介于 0.022 8~0.040 0 rad 之间,是 RC 及钢结构弹性层间位移角限值的 1.1~2.0 倍. 总体来说,试验的所有节点均表现出非常好的延性.

2 理论分析

2.1 节点剪切承载力

众多学者提出了节点剪切承载力的计算公式. 吕西林等^[4]提出的公式(也是《矩形钢管混凝土结构技术规程》^[3]中建议的公式)假设节点域的钢管腹板

及焊缝、内隔板以及混凝土共同承受剪力的贡献之和即为节点域的剪切承载力. 这个公式关于内隔板屈服的假设值得商榷,因为节点域的内隔板的变形受到附近混凝土及钢管的高度约束,不太可能形成屈服;公式中计算了焊缝的抗剪贡献,这一点也和实际不一致;公式中没有考虑轴压力对混凝土及钢管受力的影响,这将会高估节点域的承载力. 日本的规范在计算节点域剪切承载力时,只考虑了钢管腹板及混凝土的贡献,给出的是抗剪承载力的下限. 周天华^[7]也提出了节点域的抗剪承载力公式,认为钢管

表 4 节点的主要试验结果

Tab.4 Test results about the connections

节点编号	方向	屈服状态		极限状态		破坏状态		层间位移角 延性系数
		强度/ kN	层间位移角/ rad	强度/ kN	层间位移角/ rad	强度/ kN	层间位移角/ rad	
JD11	正	429.8	-0.016 0	505.6	-0.019 0	429.8	-0.034 0	2.123
	负	-439.5	0.016 5	-517.0	0.019 8	-439.5	0.035 0	
JD12	正	402.0	-0.012 7	494.7	-0.017 9	420.5	-0.027 0	1.860
	负	-428.0	0.014 2	-490.3	0.016 7	-416.8	0.026 0	
JD13	正	450.0	-0.013 0	535.5	-0.018 7	455.2	-0.027 0	1.839
	负	-337.0	0.011 8	-397.0	0.013 9	-337.5	0.018 6	
JD22	正	283.0	-0.011 3	361.9	-0.020 3	307.6	-0.040 0	3.433
	负	-330.0	0.012 0	-405.7	0.031 2	-344.8	0.040 0	
JD22-B	正	293.0	-0.014 2	379.9	-0.030 9	322.9	-0.038 3	2.586
	负	-308.0	0.013 1	-377.6	0.017 0	-321.0	0.032 3	
JD22-D	正	313.0	-0.011 8	401.1	-0.019 9	340.9	-0.033 5	2.668
	负	-312.0	0.012 3	-425.2	0.019 2	-361.4	0.030 8	
JD22-T1	正	313.0	-0.012 4	406.2	-0.024 2	345.3	-0.034 5	2.455
	负	-355.0	0.012 9	-422.2	0.018 4	-358.9	0.027 6	
JD22-T2	正	313.0	-0.010 4	355.3	-0.019 4	320.4	-0.032 1	3.028
	负	-298.0	0.011 2	-364.3	0.020 5	-337.2	0.033 3	
JD23	正	311.0	-0.009 7	483.7	-0.017 0	411.1	-0.031 8	2.775
	负	-316.0	0.010 3	-437.1	0.012 0	-371.5	0.023 7	
JD32	正	316.0	-0.012 8	405.1	-0.019 8	344.3	-0.033 4	2.668
	负	-305.0	0.012 2	-365.1	0.013 3	-310.3	0.033 3	

翼缘和内隔板组成一个“钢框架”,而钢管腹板形成一个“钢剪力墙”。“钢剪力墙”首先屈服,然后“钢框架”4个角部出现塑性铰,最终混凝土达到抗压承载力。这个公式考虑了轴压力对“钢剪力墙”受剪的影响,却没有考虑对“钢框架”的影响;在计算钢框架的抗剪承载力时,使用钢材的抗拉强度而不是屈服强度;公式直接采用型钢混凝土柱混凝土抗剪承载力的经验公式,而忽视了型钢混凝土柱与钢管混凝土柱的区别,并且在计算混凝土抗剪承载力时也没有考虑混凝土的有效约束面积^[12]。Wu等^[6]通过对钢管混凝土柱螺栓节点的研究,推导出节点域剪力-剪切变形的曲线,同时也给出了节点域的抗剪承载力的预测公式。Wu等的公式假定,在剪力作用下2个钢管腹板产生剪切变形,2个钢管翼缘产生受弯变形,并采用Mohr-Coulomb提出的失效准则来计算混凝土的极限抗剪承载力。公式考虑了轴压力对混凝土抗剪承载力的影响,却没有考虑对钢管腹板及翼缘的影响。

采用各个理论公式计算了各节点的抗剪承载力,并与试验结果比较,见表5,表中AIJ表示按照日本《钢管混凝土构造设计施工指针》^[9]计算结果,CECS表示按照文献^[3]的计算结果,CECS-m表示在文献^[3]的公式中不考虑焊缝的抗剪贡献的计算结果,周天华表示按照文献^[7]计算结果,周天华-m表示周天华公式中考虑了混凝土有限约束的作

用^[12],吴赖云表示按照文献^[6]计算结果,吴赖云-m表示在文献^[6]提出的公式中考虑了轴压力对钢管翼缘抗剪承载力的影响。试验值是根据层间极限剪力(柱端剪力)及梁端极限剪力按照几何关系换算出来的。为了便于比较,所有节点的抗剪承载力均除以根据CECS计算出的JD22节点域的剪切承载力 4.24×10^6 N。从表中看出,日本AIJ公式能够反映钢管厚度的影响;CECS能够反映隔板厚度以及钢管厚度的影响;周天华与吴赖云的公式能够反映轴压比及钢管厚度的影响。CECS对节点承载力的预测是最高的,接下来依次是周天华、AIJ以及吴赖云的预测。对于CECS来说,不考虑焊缝的抗剪贡献,节点域的抗剪承载力的预测值几乎降到50%。对于周天华的公式,考虑混凝土有效约束面积的影响也会降低节点域抗剪承载力的预测值。对于吴赖云的公式,在轴压比较低的情况下(JD11)是否考虑轴压比对节点域的抗剪承载力的预测值的影响甚微;但是在高轴压比情况下(JD13及JD23),考虑轴压比则大幅降低节点域抗剪承载力的预测值(降低了18.3%)。Morino等^[13]的试验试件SCP与SCC以及Lu等^[4]的试验试件YG5的抗剪承载力也列在表5中。对于节点SCP及SCC来说,CECS公式对节点的剪切承载力预测值最大,其次是AIJ和周天华的预测值,吴赖云的预测值最小。对于YG5来说,采用周天华的公式计算的节点剪切承载力值最大,其次是AIJ及

CECS, 吴赖云的预测值最小. 由于节点 SCP 及 SCC 的轴压比仅为 0.15, YG5 的轴压比仅为 0.20, 吴赖云公式中是否考虑轴压比对这 3 个节点抗剪承载力预测值影响甚微. 从表 5 看出, 根据吴赖云的公式计

算的节点域抗剪承载力预测值与试验值较为接近, 而其他理论预测值普遍偏高. 如果不考虑 CECS 规范中节点域钢管之间焊缝的抗剪承载力的贡献, 则预测值和试验值较为接近.

表 5 归一化后的节点域抗剪承载力预测值和试验值比较

Tab.5 Comparison of the joint shear strength after normalization

节点编号	AIJ	CECS	CECS-m	周天华	周天华-m	吴赖云	吴赖云-m	试验值	备注
JD11	0.86	1.00	0.51	0.87	0.80	0.63	0.62	0.55	
JD12	0.86	1.00	0.51	0.88	0.80	0.65	0.62	0.53	
JD13	0.86	1.00	0.51	0.86	0.76	0.60	0.49	0.50	
JD22	0.86	1.00	0.51	0.88	0.80	0.65	0.62	0.41	
JD22-B	0.86	1.00	0.51	0.88	0.80	0.65	0.62	0.41	所有数值乘 4.24×10^6 N 得抗剪 承载力
JD22-D	0.86	1.01	0.51	0.88	0.80	0.65	0.62	0.44	
JD22-T1	0.97	1.21	0.58	0.99	0.91	0.77	0.74	0.44	
JD22-T2	0.74	0.79	0.44	0.78	0.69	0.53	0.51	0.39	
JD23	0.86	1.00	0.51	0.86	0.76	0.60	0.49	0.49	
JD32	0.86	1.00	0.51	0.88	0.80	0.65	0.62	0.41	
SCP	0.41	0.50	0.20	0.40	0.40	0.36	0.35	0.31	所有数值乘 7.22×10^5 N 得抗剪 承载力
SCC	0.75	1.00	0.34	0.67	0.67	0.65	0.64	0.39	
YG5	1.02	1.00	0.62	1.08	0.90	0.66	0.62	0.67	所有数值乘 6.68×10^5 N 得抗剪 承载力

为了对各个公式抗剪承载力的构成做一个全面的比较, 表 6 列出了 JD22 节点域各个部件(钢管腹板、钢管翼缘、内隔板及混凝土等)抗剪承载力的贡献. 可以看出, 钢管腹板及混凝土贡献了绝大部分的节点抗剪承载力(总剪力的 99%~100%), 而钢管翼缘及内隔板的贡献几乎可忽略不计(总剪力的 1%~2%). 这或许可以解释 AIJ 规范中不考虑钢管翼缘及内隔板的剪力贡献的原因. 各个理论都反映出钢管腹板的贡献大于混凝土的贡献, 但是各个理论计算值两者的贡献比例有所不同.

表 6 节点 JD22 归一化后的节点域抗剪承载力构成的比较
Tab.6 Shear strength contributions of the joint of JD22 (after normalization)

公式	钢管腹板	钢管翼缘	内隔板	混凝土	节点
AIJ	0.48	0	0	0.38	0.86
CECS	0.79	0	0.01	0.21	1.00
CECS-m	0.29	0	0.01	0.21	0.51
周天华	0.44	0.01	0	0.43	0.88
周天华-m	0.44	0.01	0	0.35	0.80
吴赖云	0.46	0.01	0	0.18	0.65
吴赖云-m	0.44	0.01	0	0.18	0.62

2.2 节点域剪力-变形曲线

目前对于节点域剪力-剪切变形全曲线的研究还处于初步阶段. Fukumoto 等^[8]提出的节点域剪力-剪切变形三折线计算公式在混凝土达到极限承载力之前的预测值和试验值相近, 但是却低估了节

点的抗剪承载力. 聂建国等^[10]提出的计算公式对节点的弹性刚度预测合理, 但是节点的刚度退化以及能量耗散能力的预测和试验结果差距较大. Wu 等^[6]提出的两折线曲线公式是基于钢管混凝土柱的螺栓连接节点提出的, 与试验结果吻合较好, 但是这个公式是否适用于钢管混凝土柱焊接节点还有待验证, 在第 3 节通过数值分析来验证 Wu 等提出的节点域剪力-变形曲线的适用性.

3 数值验证

3.1 OpenSEES 数值模型

在 OpenSEES 软件中建立节点的数值模型. 由于试验结束后将节点域钢管切割开发现混凝土与钢管黏结良好, 滑移量几乎可以不计, 故采用“BeamColumn”纤维梁柱单元来模拟钢管混凝土柱, 不考虑钢管与混凝土之间的滑移. 钢梁采用“BeamColumn”纤维梁柱单元. 节点采用“BeamColumnJoint”单元^[14]来进行模拟, 见图 5. 节点域的受力变形是通过“BeamColumnJoint”单元中的节点域转动弹簧(rotational spring: R1)来进行模拟的, 梁-节点及柱-节点连接是通过刚度很大的线性弹簧单元组(GS1—GS4)来模拟的. 钢材采用 Steel02 材料属性进行模拟, 不考虑钢材的捏缩效应及延性和能量损伤; 混凝土采用 Concrete02 材料属

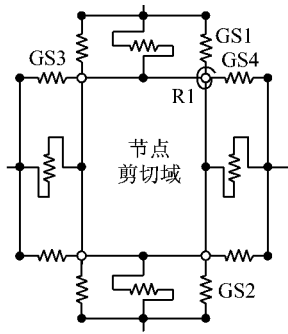


图 5 梁柱节点单元

Fig.5 Beam column joint element

性模拟,同时考虑混凝土的受压及受拉本构。

从 2.1 节中看出,相对于其他理论公式来说,吴赖云的公式对节点域抗剪承载力的预测值与试验值更为接近,故采用吴赖云的公式来计算节点域的抗剪承载力-剪切变形曲线。将节点域抗剪承载力转换成节点域弯矩,得到节点域弯矩-剪切变形关系,再用来定义转动弹簧的参数。

3.2 数值分析结果

3.2.1 层间剪力-层间位移角滞回曲线

OpenSEES 软件数值模拟的层间剪力-层间位移角关系和试验结果比较见图 3。数值模型对节点在反复荷载作用下的初始刚度、节点强度、卸载刚度及再加载刚度等方面的预测均较为准确,合理地反映了节点具体构造及轴压比等参数对节点宏观受力的影响。

3.2.2 节点域的剪力-变形性能

图 6 列出部分节点域的剪力 (V_j)-应变 (γ_j) 曲线。节点 JD11, JD13, JD22, JD22-D 及 JD22-T1 数值分析结果和试验结果接近。然而节点 JD22-T2 的数值分析结果几乎是试验值的 6 倍。需要说明的是,从试验破坏现象来看,JD22-T2 靠近钢梁受拉翼缘的节点域钢管被拉鼓出来,且发生了钢管的拉裂。显然此处节点域(钢管翼缘中心)的剪切变形是很大的。

由于节点域钢管的鼓曲程度从钢管翼缘中心向钢管腹板迅速减小,故布置在节点域钢管腹板表面测量节点域剪切变形的位移计(LVDT)测得的数值很小,试验中布置在节点域的 LVDT 测得的数据大大低估了节点域的实际剪切变形。在 OpenSEES 模型中,采用吴赖云提出的节点域剪力-剪切变形曲线来定义的转动弹簧合理地反映了节点域的真实变形,模拟结果和试验结果吻合。

4 结论

首先对 10 个不同节点构造的钢管混凝土柱-梁焊接节点在反复荷载作用下的受力性能进行了试验研究。研究表明:钢管混凝土柱-梁焊接节点表现出良好的抗震性能,滞回环形状饱满,具有很高的承载力及刚度以及很好的延性。这些节点中,外隔板节点的强度最大,达到最大承载力后的强度退化也最为

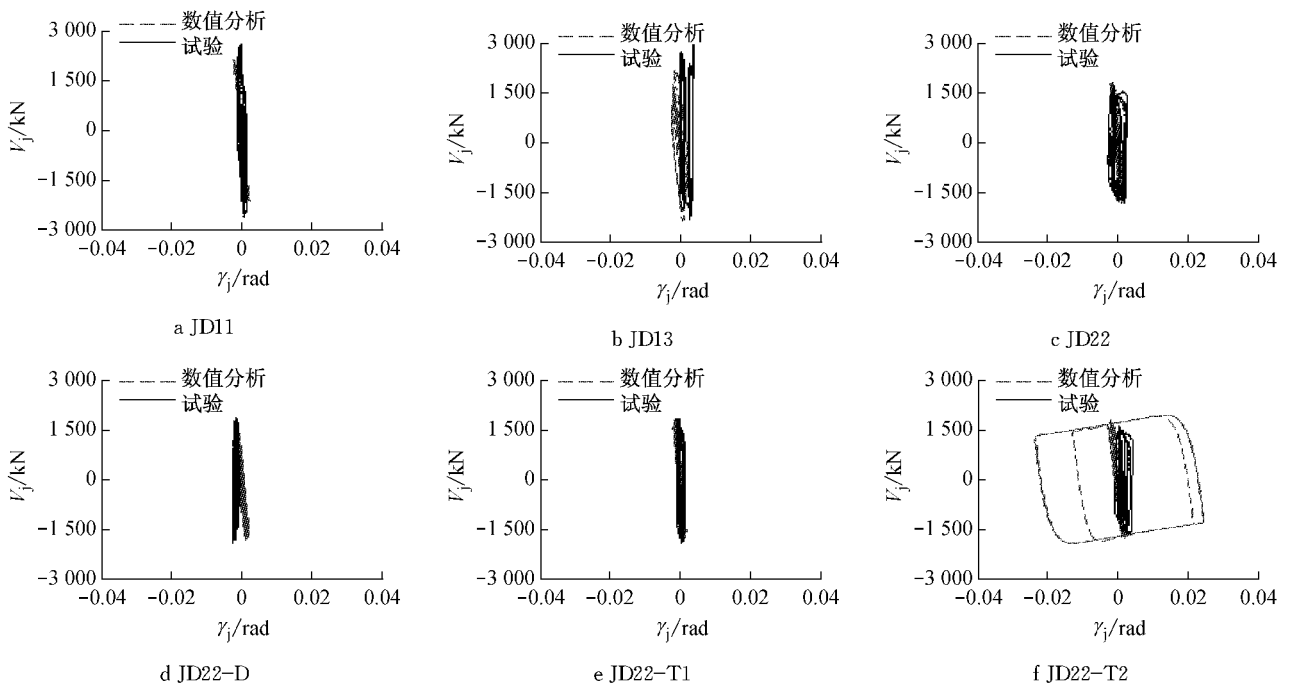


图 6 节点域剪力-变形曲线

Fig.6 Shear strength-deformation relations of the joints

迅速;内隔板节点强度稍小,但是延性很高,强度退化也更为缓和;内隔板外伸节点的强度和内隔板节点相近,延性稍小.随着轴压比的增大,节点的强度及延性都呈减小趋势.

其次,根据众多节点域抗剪承载力公式计算了10个节点的抗剪承载力并与试验结果进行比较.由于各个公式基于不同的节点域变形假设,且采用不同的公式来计算各个部分(混凝土、钢管腹板、钢管翼缘、内隔板等)的抗剪承载力贡献,导致各个公式的计算值差异较大.在这些公式中,CECS的预测值最高,其次是AIJ及周天华的预测,吴赖云的预测值最小.如果不考虑焊缝的抗剪贡献,CECS的抗剪承载力预测值则降为1/2,和吴赖云的预测结果接近.当轴压比较小时,吴赖云的公式中考虑轴压比与否对钢管及混凝土抗剪承载力的预测值影响甚微;但是当轴压比较大时,考虑轴压比将大大降低节点抗剪承载力的预测值.这说明轴压比对节点域抗剪承载力的影响还值得进一步探讨.同时,本文根据这些公式计算了其他研究者的节点抗剪承载力.总体来说,吴赖云的公式与试验结果符合较好;在CECS中,如果不考虑节点域钢管焊缝的抗剪承载力的贡献,则预测值和试验值比较接近.

最后采用吴赖云推导的节点域剪力-剪切变形公式,介绍了节点域剪力-剪切变形全曲线在OpenSEES数值分析中的应用.数值模型准确地模拟了节点宏观受力性能(层间水平剪力-层间位移角关系),合理地预测了节点域的变形,说明吴赖云推导的节点域剪力-剪切变形公式也适用于焊接钢管混凝土柱-梁节点.

本文的研究基于《矩形钢管混凝土结构技术规程》^[3]中推荐的3种钢管混凝土柱-钢梁焊接节点的试验,得到的节点域抗剪承载力公式的比较结果以及节点域的数值模拟等方法对于钢管混凝土柱-钢梁螺栓节点以及钢管混凝土柱-组合梁节点的适用性还有待进一步验证.

参考文献:

- [1] Morino S, Tsuda K. Design and construction of concrete-filled steel tube column system in Japan[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Seismology*, 2003, 4(1): 51.
- [2] 荣柏生. 高层建筑中的钢管混凝土柱及其节点[J]. *广东土木与建筑*, 2002(1): 3.
RONG Baisheng. Concrete-filled-steel-tube columns and connections in high-rise buildings[J]. *Guangdong Architecture Civil Engineering*, 2002(1): 3.
- [3] 中国工程建设标准化协会. CECS 159: 2004 矩形钢管混凝土结构技术规程[S]. 北京: 中国工程建设标准化协会, 2004.
China Engineering Construction Standardization Association. CECS 159: 2004 Technical specification for structures with concrete-filled rectangular steel tube members[S]. Beijing: China Engineering Construction Standardization Association, 2004.
- [4] Lu X, Yu Y, Kiyoshi T, *et al.* Experimental study on the seismic behavior in the connection between CFRT column and steel beam[J]. *Structural Engineering and Mechanics*, 2000, 9(4): 365.
- [5] 日本建筑学会. 铁骨钢筋混凝土构造计算规范 同解说[S]. 东京: 日本建筑学会, 1987.
Architecture Institute of Japan. Standard for structural calculation of steel reinforced concrete structures[S]. Tokyo: Architecture Institute of Japan, 1987.
- [6] Wu L Y, Chung L L, Tsai S F, *et al.* Seismic behavior of bidirectional bolted connections for CFT columns and H-beams [J]. *Engineering Structures*, 2007, 29(3): 395.
- [7] 周天华. 方钢管混凝土柱-钢梁框架节点抗震性能及承载力研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2004.
ZHOU Tianhua. Study on seismic behavior and load-carrying capacity of concrete-filled square tubular column to steel beam connection[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2004.
- [8] Fukumoto T, Morita K. Elastoplastic behavior of panel zone in steel beam-to-concrete filled steel tube column moment connections[J]. *Journal of Structural Engineering*, 2005, 131(12): 1841.
- [9] 日本建筑学会. 钢管混凝土构造设计施工指针[S]. 东京: 日本建筑学会, 2008.
Architecture Institute of Japan. Recommendations for design and construction of concrete filled steel tubular structures[S]. Tokyo: Architecture Institute of Japan, 2008.
- [10] 聂建国, 秦凯. 方钢管混凝土柱内隔板式节点骨架曲线的确定方法[J]. *土木工程学报*, 2008, 41(4): 1.
NIE Jianguo, QIN Kai. Method for calculation of skeleton curves of connections of concrete-filled steel tubular columns with inner diaphragms[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2008, 41(4): 1.
- [11] Mazzoni S, McKenna F, Scott M H, *et al.* OpenSEES command language manual [R]. Berkeley: University of California, Berkeley, 2007.
- [12] 赵鸿铁. 钢与混凝土组合结构[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
ZHAO Hongtie. Steel and concrete composite structures[M]. Beijing: Science Press, 2001.
- [13] Morino S, Kawaguchi J, Yasuzaki C, *et al.* Behavior of concrete-filled steel tubular three-dimensional subassemblages [C]//Engineering Foundation Conference. [S. l.]: ASCE, 1993: 726-741.
- [14] Lowes L, Mitra N, Altoontash A. A beam-column joint model for simulating the earthquake response of reinforced concrete frames [R]. Berkeley: Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California at Berkeley, 2003.