

文章编号:1673-2049(2018)06-0057-09

高轴压比下复式钢管混凝土柱-钢梁连接节点 抗震性能试验

张玉芬¹, 周金富², 朱戈³, 蒋宗昊³

(1. 河北工业大学 土木与交通学院, 天津 300401; 2. 中国联合网络通信有限公司北京市分公司, 北京 100052;
3. 北方工业大学 土木工程学院, 北京 100144)

摘要:为了研究高轴压比下复式钢管混凝土柱-钢梁连接节点的抗震性能,按照现行规范设计了3个强柱弱梁型复式钢管混凝土外环板节点试件,进行了低周往复加载试验,研究其在高轴压比下的破坏形态、承载能力、变形能力以及耗能能力等。结果表明:增加水平环板的宽度可以有效提高节点的延性;锚固腹板加肋可以增加梁柱连接节点的初始刚度,增强节点的整体性,从而提高节点的承载能力和耗能能力;节点试件的破坏表现为钢梁翼缘首先发生屈服,随着水平荷载加大,试件同时出现梁端塑性铰和柱端塑性铰的破坏形态,锚固腹板加肋和水平环板加宽的试件在加载后期出现明显的柱端压弯破坏,各节点核心区应力较小,基本处于弹性阶段,因此高轴压比下复式钢管混凝土柱-钢梁连接节点可实现强节点要求,但不能满足“强柱弱梁”的抗震设防要求。

关键词:复式钢管混凝土;梁柱节点;轴压比;拟静力试验;抗震性能

中图分类号:TU375 **文献标志码:**A

Experiment on Seismic Behavior of Joint Between Composite CFST Column and Steel Beam Under High Axial Compression Ratio

ZHANG Yu-fen¹, ZHOU Jin-fu², ZHU Ge³, JIANG Zong-hao³

(1. School of Civil and Transportation Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China;
2. China United Network Telecommunications Corporation Beijing Branch, Beijing 100052, China;
3. School of Civil Engineering, North China University of Technology, Beijing 100144, China)

Abstract: In order to study the seismic performance of the joint between composite concrete-filled steel tubular (CFST) column and steel beam under high axial compression ratio, three composite CFST external stiffening ring joint specimens followed by existing codes were designed and the quasi-static test was conducted. The failure mode, bearing capacity, deformability and energy dissipation capacity of the specimens under high axial compression ratio were studied. The results show that the ductility of joint can be improved by widening the width of external stiffening ring, and the initial stiffness of beam-column joint can be improved by adding ribs to the plate, then the integration is enhanced, both the bearing capacity and energy consumption capacity are improved. The failure of the joint starts from the yielding of beam flange and plastic hinges occur on both beam end and column end with the increasing load, but it is evident for specimens with anchored web stiffeners ribbed and specimens with widening the width of external stiffening ring to be

收稿日期:2018-05-08

基金项目:国家自然科学基金项目(51478004)

作者简介:张玉芬(1977-),女,辽宁岫岩人,教授,工学博士,博士后,E-mail:yf23227@163.com。

buckling at the column ends in the latter loading. The stress is small in core zone and in elastic stage. So the beam-column joint under high axial compression ratio can satisfy the principle of strong joints, but it is unable to meet the requirements of “strong column and weak beam” for seismic resistance.

Key words: composite CFST; beam-column joint; axial compression ratio; quasi-static test; seismic performance

0 引言

复式钢管混凝土结构是在 2 层或多层钢管之间浇筑混凝土而成,能更好地发挥钢管与混凝土在复杂应力状态下的协同作用^[1],使构件的韧性和延性得以提高,增强结构的承载力和耐久性,适合用在抗震设防烈度较高的地区^[2-3]。在复式钢管混凝土结构中,梁柱连接性能是影响结构整体性能的主要因素,节点属于结构抗震中最为关键同时也是最为薄弱的环节。影响节点性能的因素很多,其中不同轴压比下框架梁柱节点的力学性能差异较大,高轴压比不仅导致节点极限承载力降低,同时导致试件脆性性能逐渐增加,延性降低^[4-5]。国内外学者已对钢管混凝土柱-钢梁节点高轴压比下的抗震性能进行了研究并取得了一定的成果。王鑫^[6]对钢骨方钢管混凝土钢梁节点进行了有限元分析,Fukumoto 等^[7]对钢管混凝土柱-钢梁节点进行试验及理论分析的结果均得出,轴压比过大时节点承载力下降速度加剧;聂建国等^[8]对分层钢管混凝土加强环式节点抗震性能进行了试验研究,得出轴压比对节点的强度及刚度退化均有显著影响。Xu 等^[9]研究了轴压比对钢管混凝土外环板节点破坏形态的影响,对其进行了弹塑性有限元分析,结果表明:低轴压比对承载力的影响较小;随着轴压比增加,承载力会降低,节点的破坏模式也会从梁端过渡到柱端。

由于复式钢管混凝土柱优异的力学性能^[10-14],柱承受的竖向荷载较大,而目前中国相关各规程对于复式钢管混凝土柱则未予轴压比限制。因此,高轴压比下节点的抗震性能已经成了衡量复式钢管混凝土结构性能的一项重要指标,有必要进行高轴压比下节点的低周往复加载试验,从而得出复式钢管混凝土柱高轴压比下梁柱节点破坏形态、承载力及延性、耗能等规律。同时,钢管混凝土外环板节点是目前研究较为成熟的一种节点形式^[15-16],具有刚度大、塑性性能好、承载力高、传力可靠、抗震性能良好等优点^[17-19],本文设计了 3 个复式钢管混凝土柱-钢梁外环板节点试件,进行低周往复加载试验,分析高

轴压比下节点环板尺寸、锚固腹板加肋对节点抗震性能的影响并研究其在高轴压比下的抗震性能。

1 试验概况

1.1 试件设计

本文借鉴《钢结构设计规范》^[20]和《钢-混凝土组合结构设计规程》^[21]设计并制作 3 个十字形复式钢管混凝土柱-钢梁节点试件,编号分别为 SRJ1-1, SRJ1-2 和 SRJ3-1,梁柱线刚度比均为 0.39,按照《建筑抗震设计规范》^[22]抗弯承载力验算,属于强柱弱梁型试件。节点试件柱总高为 2 000 mm,梁总长为 3 700 mm。外钢管为方钢管,尺寸为 250 mm×8 mm,内钢管为圆钢管,尺寸为 133 mm×6 mm。所有试件均采用 H 型钢梁,尺寸为 244 mm×175 mm×7 mm×11 mm。节点采用外环板连接形式,环板通过对接焊缝与钢梁翼缘连接,节点部分的腹板连接板通过双夹板与钢梁腹板螺栓连接。考虑到复式钢管混凝土有内圆钢管的存在,因此复式钢管混凝土外环板节点的传力试件在外环板的基础上设置了锚固腹板,即节点区腹板直接与内钢管焊接埋于内外钢管间混凝土中形成锚固腹板,其中试件 SRJ1-2 采用锚固腹板加肋形式。试件 SRJ1-1 和 SRJ1-2 外环板宽度为 40 mm,SRJ3-1 环板宽度为 90 mm。在轴压比的计算中,考虑了复式钢管混凝土内外钢管的套箍作用,采用钢管混凝土统一强度理论计算组合柱的轴压组合强度,其中钢材采用屈服强度,混凝土采用了强度标准值,计算得出复式钢管混凝土柱轴压承载力^[23]。考虑到试验装置的加载能力,柱竖向加载轴向力为 2 400 kN,计算得轴压比 $n=0.567$ 。试件尺寸和几何构造见图 1,主要设计参数见表 1。

1.2 材性试验

节点试件先进行了钢材焊接和组装,然后在复式钢管混凝土柱内浇筑混凝土,浇筑同时制作了 150 mm×150 mm×150 mm 立方体试块。通过抗压试验得到混凝土立方体抗压强度 f_{cu} 实测平均值为 38.23 MPa。各钢板屈服强度 f_y 和抗拉强度 f_u 的实测值见表 2。

表 1 试件基本参数

Tab. 1 Basic Parameters of Specimens				
试件编号	环板宽度/mm	锚固腹板	钢梁尺寸	轴压比
SRJ1-1	40	不加肋	H244×175×7×11	0.567
SRJ1-2	40	加肋		
SRJ3-1	90	不加肋		

表 2 钢板材性试验结果

Tab. 2 Test Results of Material Properties of Steel Plates			
钢材种类	屈服强度 f_y /MPa	抗拉强度 f_u /MPa	弹性模量 $E_s/10^5$ MPa
外钢管	316.20	442.95	2.15
内钢管	362.75	440.02	2.11
水平环板	338.77	462.50	2.13
钢梁	327.59	460.99	2.21
连接板	295.31	403.89	2.01
锚固腹板	284.51	400.79	1.98

1.3 试验装置和加载制度

试件采用柱端加载方式,水平往复荷载通过反力墙来施加,南北侧平面内竖向支撑与底座均为铰支,加载装置示意图见图 2(a)。为防止钢梁发生平面外的转动,在钢梁两侧设置 4 个侧向支撑架,如图 2(b)所示。试验开始后,为消除加载装置初始缺陷的影响,试验开始时先施加设计值 40%的轴向力后卸载 1 次,再持续加载至设计轴压比 $n=0.567$ 的轴力值并保持恒定,持荷 5 min 后在柱端按照加载制度施加往复荷载。正向加荷(推为正)→卸荷→反向加荷(拉为负)→卸荷为一个循环加荷过程。

试验采用力和位移混合控制加载制度,屈服前采用荷载控制并分级加载,每级荷载约为 50 kN,循环加载 1 次,当荷载-位移曲线的斜率发生变化时认为试件即将达到屈服,采用位移控制加载,取位移增量为 5 mm,每级荷载循环 2 次,至试件破坏或荷载降至其峰值荷载的 85%以下时终止试验。

1.4 测点布置和测量方案

试验过程中各试件实测物理量包括力、位移和应变,为了便于比较,试件采取了相同的布置方案,柱端荷载-位移关系曲线通过拟静力加载系统自动收集。每个试件共布置 8 个位移传感器,D2,D3 位移传感器位于节点核心区,用于测量核心区剪切变形,D1,D5,D6,D8 传感器位于距离梁端 1 倍梁高的柱上,D4,D7 距离梁端 2 倍梁高,D5,D6 用于测量梁柱相对转角,D1,D4,D7,D8 用于测量柱端位移。节点核心区钢管、钢梁以及锚固腹板的应变片及位移计的布置见图 3。

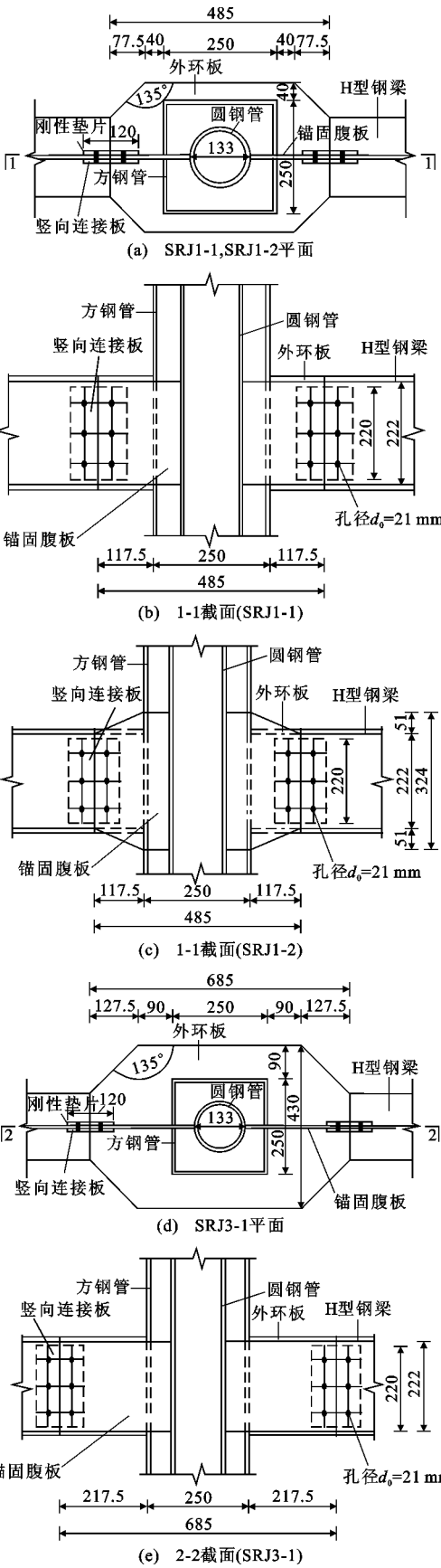


图 1 试件尺寸及构造(单位:mm)

Fig. 1 Dimensions and Details of Specimens (Unit:mm)

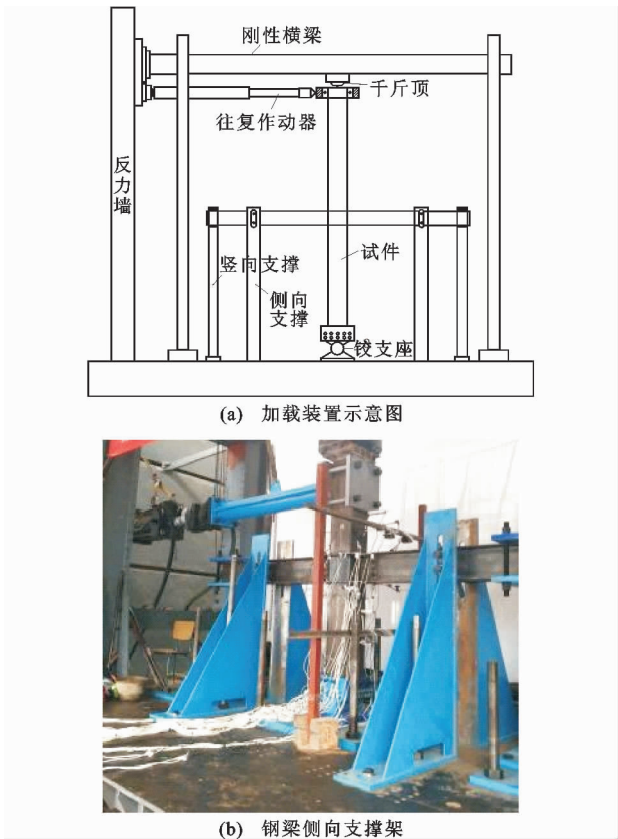


图 2 试验加载装置
Fig. 2 Test Loading Setup

2 试验过程及现象

2.1 试件 SRJ1-1

试件 SRJ1-1 破坏过程如图 4 所示。首先在柱端施加轴向荷载至 2 400 kN,之后进行柱端水平加载。节点试件柱端荷载-位移曲线呈线性递增,说明在柱端水平加载初期试件处于弹性阶段。当分级正向加载到 200 kN,反向加载到 170 kN 时,柱端荷载-位移曲线出现了明显的拐点,说明此时试件开始进入屈服阶段,而节点核心区尚未出现明显的变形或裂缝。同时,钢梁翼缘靠近对接焊缝处的纵向应变已达到 145×10^{-5} ,表明钢梁翼缘已经屈服,此时正向柱端位移约为 12 mm。此后,加载方式改为位移控制,进行每次增加 5 mm 的分级加载,每一级反复循环 2 次。加载至 42 mm 第 1 循环时,南梁上翼缘开始出现起皮现象,南梁中间位置应变片的应变值迅速增加,达到 13×10^{-3} ;正向加载至 47 mm,反向加载进行至 37 mm 第 1 循环时,南梁下翼缘与环板对接焊缝沿环板开始出现裂纹,承载力开始下降;加载至 52 mm 第 2 循环推时,南梁下翼缘出现微弯,如图 4(a)所示,但当柱端水平受拉时变形恢复,

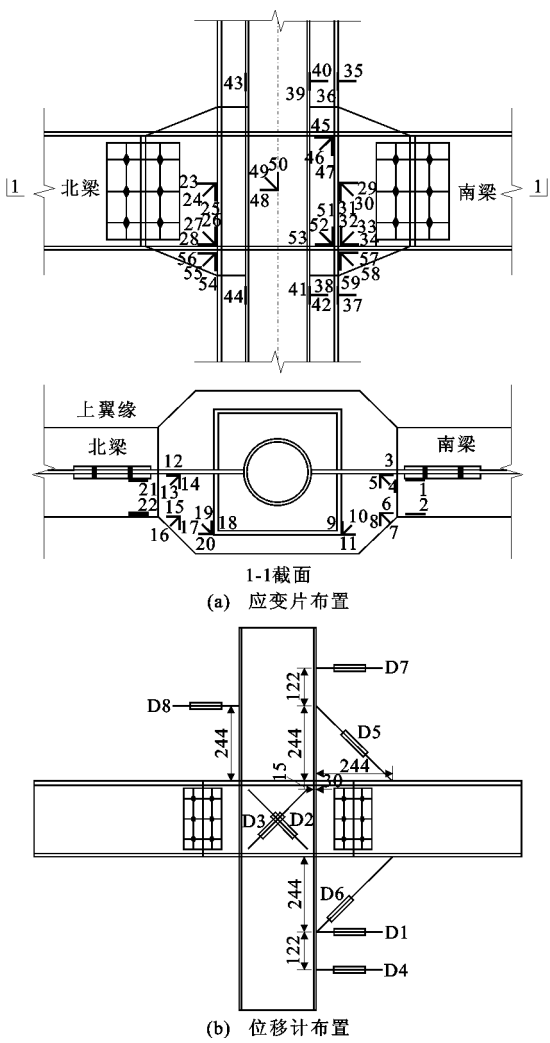


图 3 应变片及位移计布置(单位:mm)
Fig. 3 Measurement Arrangement of Strain Gauges and Displacement Meters (Unit:mm)

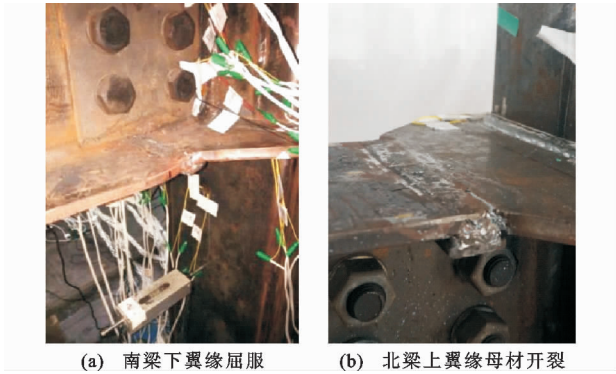


图 4 试件 SRJ1-1 破坏过程
Fig. 4 Failure Process of Specimen SRJ1-1

北梁上翼缘与环板对接焊缝处开始出现裂纹,如图 4(b)所示;加载至 57 mm 第 2 循环时,南梁下翼缘弯曲明显,外方钢管竖向应变和内圆钢管横向应变达到 27×10^{-4} ,表明柱端进入了塑性阶段,承载力

降至极限承载力的 85% 以下,试验结束。

2.2 试件 SRJ1-2

试件 SRJ1-2 加载制度与 SRJ1-1 一致。试件 SRJ1-2 破坏过程如图 5 所示。水平加载初期柱端荷载-位移曲线关系基本呈线性,整个试件处于弹性范围内。当柱端水平荷载加至 210 kN 时,钢梁翼缘靠近对接焊缝处纵向应变达到 15×10^{-4} ,表明钢梁翼缘处已经屈服,此时柱端的位移约为 24 mm。此后加载方式改为位移控制,当加载进行至 44 mm 第 1 循环时,南梁上翼缘开始出现起皮现象;加载至 54 mm 第 2 循环推时,北梁下翼缘与环板对接焊缝处开始出现细微裂纹,下柱在距环板约 110 mm 处在南北两侧出现轻微鼓曲,受拉后鼓曲恢复,此时承载力开始下降;加载进行至 64 mm 时,南梁下翼缘对接焊缝出现开裂现象,如图 5(a)所示,锚固腹板肋板与柱壁连接处撕裂;下柱出现严重鼓曲现象,不可恢复,如图 5(b)所示。这主要是由于在柱端轴力和弯矩共同作用下,应力值超过钢材的屈服应力,钢管柱壁屈服,其最终破坏模式表现为柱端压弯破坏。试验过程中节点核心区应力较小,始终处于弹性状态。



(a) 南梁下翼缘焊缝处母材开裂 (b) 柱端鼓曲

图 5 试件 SRJ1-2 破坏过程

Fig. 5 Failure Process of Specimen SRJ1-2

2.3 试件 SRJ3-1

试件 SRJ3-1 破坏过程如图 6 所示。在荷载控制加载阶段,柱端荷载-位移曲线基本呈线性变化,整个试件处于弹性范围内。当加载至 200 kN 时,钢梁翼缘靠近对接焊缝处纵向应变达到 15×10^{-4} ,表明钢梁翼缘开始屈服。此后,改用位移控制方式进行加载。当加载至 41 mm 时钢梁翼缘出现起皮现象。加载至 56 mm 第 1 循环时下柱距环板约 100 mm 处出现肉眼可见的轻微鼓曲。加载至 61 mm 第 2 循环时,北梁下翼缘与环板对接焊缝处开始出现裂纹,如图 6(a)所示,下柱东西两侧也出现明显



(a) 北梁下端焊缝母材出现裂缝 (b) 柱端鼓曲

图 6 试件 SRJ3-1 破坏过程

Fig. 6 Failure Process of Specimen SRJ3-1

的鼓曲。加载至 66 mm 第 1 循环时,南梁上翼缘距环板约 5 cm 处出现局部弯曲现象。加载至 71 mm 第 2 循环时,南梁下翼缘与环板对接焊缝开始出现裂缝,上翼缘弯曲明显,柱端钢板鼓曲明显,如图 6(b)所示。

各试件在试验过程中均有明显的弹性、弹塑性和塑性破坏阶段。在试验结束时,梁柱节点核心区基本保持完好,破坏形式均为钢梁翼缘先发生屈服,随着荷载加大,试件形成梁端塑性铰。环板宽度为 90 mm 的 SRJ3-1 产生的塑性铰距离节点核心区较远,对节点核心区起到保护作用,锚固腹板加肋的试件 SRJ1-2 和 SRJ3-1 钢梁翼缘屈服后应变明显小于 SRJ1-1,但在峰值荷载时 3 个试件柱钢管应变均超过 3×10^{-3} ,说明高轴压比下节点的破坏模式确实会从梁端过渡到柱端,这一点与文献[9]结论完全一致。另外锚固腹板加肋和环板宽度增加增强了钢梁的抗弯能力,故在梁端翼缘屈服后柱端逐渐发生鼓曲,在柱端弯矩和较大轴力共同作用下,出现柱端压弯破坏模式。这一现象不能满足“强柱弱梁”的抗震设防要求。试验过程中各节点核心区应力较小,始终处于弹性状态,说明复式钢管混凝土柱-钢梁外环板节点连接可实现强节点要求。

3 试验结果及分析

3.1 滞回曲线

试件 SRJ1-1, SRJ1-2, SRJ3-1 的柱端荷载-位移 ($P-\Delta$) 滞回曲线如图 7 所示。在加载初期,各曲线的柱端荷载-位移关系基本呈线性趋势,试件处于弹性工作状态。随着荷载的增大,试件刚度下降,残余变形逐渐增大,承载力逐渐下降。从图 7 可以看出,在高轴压比下节点试件具有较稳定的滞回性能,主要原因是高轴压比下较大的轴向荷载抑制了试件钢

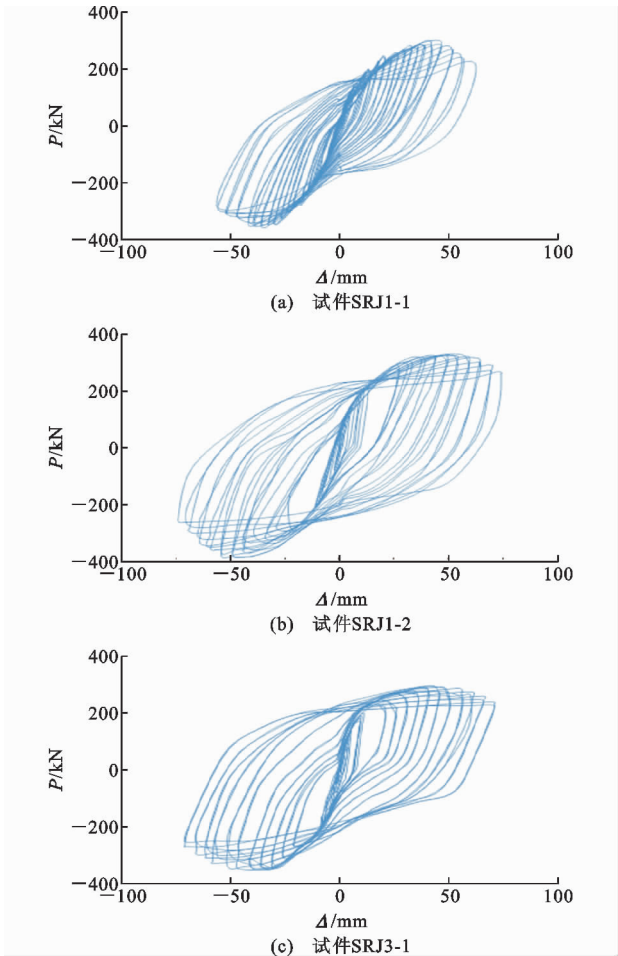


图 7 柱端水平荷载-位移滞回曲线

Fig. 7 Lateral Load-displacement Hysteretic

Curves of Column Top

管混凝土间一部分的黏结滑移。滞回曲线皆呈梭形且相对饱满,无明显捏拢现象,表现出良好的耗能能力,而加载进入弹塑性阶段后,由于 $P-\Delta$ 效应增大了试件屈服后损伤的积累,较早出现下降段,强化阶段不明显,延性降低较快;在试件每一级卸载完成开始进行反向加载时,滞回曲线的斜率并非直接指向最大荷载而是存在着明显的拐点,说明高轴压比下试件具有较大的初始刚度,反向加载需要克服较大的轴向压力做功。试件在高轴压比下初始刚度较大,随着加载进行,滞回曲线的斜率逐渐减小,表明各试件在加载过程中刚度逐渐退化,弹性阶段卸载刚度与初始刚度近似,下降段卸载刚度比加载刚度略有下降。SRJ1-1 与 SRJ1-2 滞回曲线形状类似,但由于 SRJ1-2 锚固腹板加肋,其滞回曲线较 SRJ1-1 更为饱满。SRJ3-1 的包络面积明显大于 SRJ1-1,说明其有更好的耗能能力。

3.2 骨架曲线

各节点试件荷载-位移骨架曲线见图 8,节点试

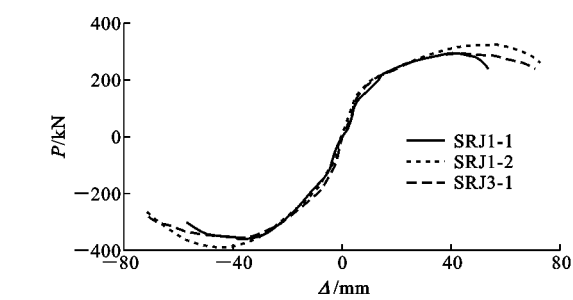


图 8 柱端水平荷载-位移骨架曲线

Fig. 8 Lateral Load-displacement Skeleton

Curves of Column Top

件的骨架曲线均呈 S 形,有明显的弹性、塑性和破坏 3 个过程。高轴压比下的试件承载力强化段较短,在屈服后不久达到极限荷载,随后承载力下降明显。因加载卸载过程中滞回曲线出现明显拐点,反映出水平荷载需克服较大的竖向轴力做功,故高轴压比下节点试件初始刚度较大。

3.3 承载能力与延性

为便于比较,通过作图法确定节点试件的屈服点,并定义荷载-位移($P-\Delta$)关系曲线的最高点对应的峰值荷载为节点试件的极限荷载 P_{\max} ,峰值荷载下降 15% 时的荷载 P_u 为破坏荷载,破坏荷载对应位移定义为破坏位移 Δ_u 。用以上方法确定各试件推、拉 2 个方向的屈服荷载 P_y 、极限荷载 P_m 和破坏荷载 P_u ,以及对应的屈服位移 Δ_y 、极限位移 Δ_m 和有效破坏位移 Δ_u ,见表 3。

表 3 试验结果

Tab. 3 Test Results

试件	加载方向	屈服状态		极限状态		破坏状态		延性系数
		P_y/kN	Δ_y/mm	P_m/kN	Δ_m/mm	P_u/kN	Δ_u/mm	
SRJ1-1	推	252.7	21.9	295.8	40.1	251.4	52.5	2.4
	拉	311.4	24.1	359.1	34.5	305.3	56.2	2.3
SRJ1-2	推	231.0	28.8	325.4	56.6	276.6	70.5	2.5
	拉	298.1	27.0	385.3	40.6	327.5	63.0	2.3
SRJ3-1	推	238.4	19.3	295.3	43.0	251.0	63.3	3.5
	拉	246.8	15.0	352.8	38.3	299.8	62.7	4.5

从表 3 可以看出,SRJ1-1 与 SRJ3-1 屈服承载力和极限承载力均较为接近,但 SRJ3-1 延性较好,说明较宽的水平环板宽度能够使塑性较远离核心区,充分发挥节点延性从而达到较理想的破坏模态。SRJ1-2 极限承载力要明显优于 SRJ1-1 与 SRJ3-1,说明锚固腹板加肋可以增强节点的整体性,增加梁柱连接节点的初始刚度,从而明显提高节点的承载能力,但对节点试件的延性影响不明显。

3.4 刚度退化

环线刚度 K_i 是在相同位移幅值下每一级循环加载的平均荷载与平均位移的比值,用以表征结构的刚度退化^[24]。各节点试件刚度退化如图9所示。在加载过程中,各试件刚度表现出明显且持续地退化,退化形式较为相似。锚固腹板加肋的 SRJ1-2 初始刚度较高,同时刚度退化也较为明显,SRJ1-1 和 SRJ3-1 刚度退化率较低,具有较优越的抗震性能。

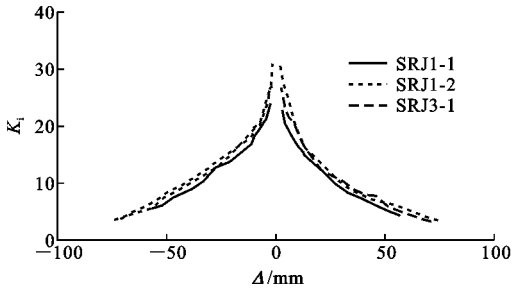


图9 试件刚度退化曲线

Fig. 9 Stiffness Degradation Curves of Specimens

3.5 承载力退化

承载力降低系数 λ_i 是相同位移幅值下循环加载最后一次循环时荷载-位移($P-\Delta$)曲线对应峰值点的荷载值与第1次峰值点对应荷载值之比,用以表征试件承载力的退化^[25]。各试件承载力退化如图10所示。该次试验得到的高轴压比下节点承载力退化规律表现较为离散。SRJ1-1 承载力退化最为明显,其次为 SRJ1-2,而节点 SRJ3-1 承载力退化程度最低,说明环板较宽的节点在荷载作用下能表现出更好的工作性能,且 SRJ1-1, SRJ1-2 在达到极限承载力后承载力降低系数有提高的趋势,所有试件的承载力降低系数均保持在 0.9 以上,表明此复式钢管混凝土节点试件在高轴压比下具有较稳定的工作性能。

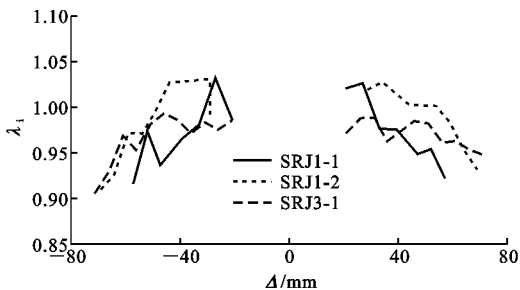


图10 试件承载力退化曲线

Fig. 10 Bearing Capacity Degradation Curves of Specimens

3.6 耗能能力

通过等效黏滞阻尼系数 h_e 和能量耗散系数 E 来衡量节点试件的耗能能力。基于试件的荷载-位

移($P-\Delta$)曲线,可以定量算出每半周(半个加载循环)试件耗散的能量,由此评估试件的耗能能力^[26]。各试件等效黏滞阻尼系数与每级循环关系曲线如图11所示。在计算试件耗能时,半周取连续2个零荷载点之间的滞回环。各试件达到破坏时等效阻尼系数均达到较高的值,此时塑性较吸收的能量较多。节点 SRJ1-2 和 SRJ3-1 的等效黏滞阻尼系数均比 SRJ1-1 要高,表明锚固腹板加肋和增加环板宽度可提高节点的耗能能力。

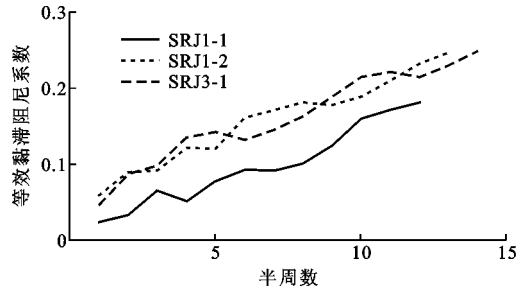


图11 等效黏滞阻尼系数-半周数曲线

Fig. 11 Curves of Equivalent Hysteretic Damping Coefficient Versus Number of Half Cycles

节点半周的耗能能力可根据低周往复荷载作用下的滞回曲线计算得到,以此来综合评价此类节点的抗震耗能能力,各试件的累积耗能与每级循环的关系曲线如图12所示。随着半周数的增加,试件的累积耗能逐渐增加并保持稳定提高的趋势。进入弹性阶段后试件的累积耗能仍持续增长,其中 SRJ1-2 和 SRJ3-1 耗能性能明显优于 SRJ1-1。

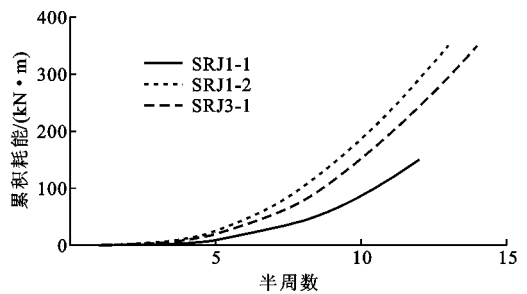


图12 累积耗能-半周数曲线

Fig. 12 Curves of Cumulative Energy Consumed Versus Number of Half Cycles

4 结语

(1)本文复式钢管混凝土柱与钢梁节点连接形式采用外环板节点形式,通过试验研究了高轴压比下复式钢管混凝土节点的抗震性能。在高轴压比下的节点试件均具有较稳定的滞回性能,节点试件初始刚度较大。各节点试件刚度相近,退化明显且稳

定;承载力退化也较为接近,达到极限承载力前节点试件的承载力变化较为相似,高轴压比下屈服荷载后迅速到达极限荷载,承载力的强化阶段较短。

(2)增加环板宽度和锚固腹板加肋均可提高梁柱节点的整体性、初始刚度及节点耗能能力。增加水平环板的宽度可以有效地提高节点的延性;锚固腹板加肋可以增加梁柱连接节点的初始刚度,增强节点的整体性,从而提高节点的承载能力。

(3)按照现行规范设计的强柱弱梁型复式钢管混凝土柱-钢梁连接节点试件在高轴压比下钢梁翼缘首先发生屈服,随着荷载加大,试件同时出现了梁端塑性铰和柱端塑性铰的破坏形态,对于锚固腹板加肋和水平环板加宽试件 SRJ1-2 和 SRJ3-1,加载后期出现明显的柱端压弯破坏,各节点核心区应力较小,基本处于弹性阶段,因此高轴压比下复式钢管混凝土柱-钢梁连接节点可实现强节点要求,但不能满足强柱弱梁的抗震设防要求。

参考文献:

References:

- [1] 蔡绍怀. 现代钢管混凝土结构[M]. 北京:人民交通出版社,2003.
CAI Shao-huai. Modern Concrete Filled Steel Tube Structures[M]. Beijing:China Communications Press, 2003.
- [2] CECS 159:2004,矩形钢管混凝土结构技术规程[S].
CECS 159: 2004, Technical Specification for Structures with Concrete-filled Rectangular Steel Tube Members[S].
- [3] DBJ 13-51-2003,钢管混凝土结构技术规程[S].
DBJ 13-51-2003, Technical Specification for Concrete-filled Steel Tubular Structures[S].
- [4] 张冬芳,赵均海,张玉芬,等. 复式钢管混凝土柱-钢梁节点的抗震性能有限元分析[J]. 世界地震工程, 2013,29(1):49-59.
ZHANG Dong-fang, ZHAO Jun-hai, ZHANG Yu-fen, et al. Finite Element Analysis of Seismic Performance of Composite Concrete-filled Steel Tube Column-steel Beam Connection[J]. World Earthquake Engineering, 2013, 29(1): 49-59.
- [5] 殷超. 高震区超高层钢-混凝土混合结构抗震设计关键技术研究与建议[D]. 北京:北京建筑大学, 2009.
YIN Chao. Study on Key Technology and Suggestions for the Design of Super High-rise Steel Concrete Composite Structure in High Seismic Region[D]. Beijing:Beijing University of Civil Engineering and Ar-

chitecture, 2009.

- [6] 王鑫. 钢管方钢管混凝土柱与工字形钢梁节点力学性能研究[J]. 钢结构, 2016, 31(7): 50-59.
WANG Xin. Research on the Mechanical Properties of the Joint of Square Steel Tubular Columns Filled with Steel-reinforced Concrete and I-shaped Steel Beam [J]. Steel Construction, 2016, 31(7): 50-59.
- [7] 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): 1841-1853.
- [8] 聂建国,赵洁,柏宇,等. 分层钢管混凝土加强环式节点抗震性能研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2005, 37(增): 315-318.
NIE Jian-guo, ZHAO Jie, BAI Yu, et al. Seismic Behavior of Discontinuous Concrete Filled Steel Tube Ring Connection [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2005, 37(S): 315-318.
- [9] XU P Y, CHEN Q, XU Y F. Finite Element Analysis on Different Axial Compression Ratio of Composite CFST Column and Steel Beam Connection [J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 578-579: 278-281.
- [10] 张玉芬,张冬芳,赵均海. 复式钢管混凝土柱与 H 形钢梁连接节点抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2013, 34(9): 40-48.
ZHANG Yu-fen, ZHANG Dong-fang, ZHAO Jun-hai. Experimental Study on Seismic Behavior of Connection Between Composite CFST Column and H-shaped Steel Beam [J]. Journal of Building Structures, 2013, 34(9): 40-48.
- [11] ZHANG Y F, ZHAO J H, CAI C S. Seismic Behavior of Ring Beam Joints Between Concrete-filled Twin Steel Tubes Columns and Reinforced Concrete Beams [J]. Engineering Structures, 2012, 39: 1-10.
- [12] ZHANG Y F, ZHANG D F. Experimental Study on the Seismic Behavior of the Connection Between Concrete-filled Twin Steel Tubes Column and Steel Beam [J]. European Journal of Environmental and Civil Engineering, 2015, 19(3): 347-365.
- [13] ZHANG Y F, ZHANG Z Q. Study on Equivalent Confinement Coefficient of Composite CFST Column Based on Unified Theory [J]. Mechanics of Advanced Materials and Structures, 2016, 23(1): 22-27.
- [14] ZHAO X L, GRZEBIETA R. Strength and Ductility of Concrete Filled Double Skin (SHS Inner and SHS Outer) Tubes [J]. Thin-walled Structures, 2002, 40 (2): 199-213.
- [15] WANG W D, HAN L H, UY B. Experimental Behav-

- ior of Steel Reduced Beam Section to Concrete-filled Circular Hollow Section Column Connections [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2008, 64(5):493-504.
- [16] LI X, XIAO Y, WU Y T. Seismic Behavior of Exterior Connections with Steel Beams Bolted to CFT Columns [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2009, 65(7):1438-1446.
- [17] 王静峰, 韩林海, 江莹. 方钢管混凝土柱-钢梁外加强环节点的非线性有限元分析[J]. 沈阳建筑大学学报:自然科学版, 2007, 23(2):177-181.
WANG Jing-feng, HAN Lin-hai, JIANG Ying. Non-linear FEM Analysis of Steel Beam-to-concrete Filled Steel Square Tube Column Connections with External Stiffening Rings[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University: Natural Science, 2007, 23(2):177-181.
- [18] 王文达, 秦庚, 张鹏鹏. 钢管混凝土柱-钢梁外环板节点抗弯承载力计算方法[J]. 土木建筑与环境工程, 2011, 33(4):29-34.
WANG Wen-da, QIN Geng, ZHANG Peng-peng. Design Approach on Flexural Load-carrying Capacity of Steel Beam to CFST Column Joints with External Stiffening Ring[J]. Journal of Civil Architectural & Environmental Engineering, 2011, 33(4):29-34.
- [19] 赵滇生, 唐鸿初, 刘帝祥, 等. 方钢管混凝土柱与H型钢梁外环板刚接节点性能研究[J]. 浙江工业大学学报, 2011, 39(1):61-66.
ZHAO Dian-sheng, TANG Hong-chu, LIU Di-xiang, et al. Study on Joint of Concrete-filled Square Steel Tube and H-shaped Steel Beam[J]. Journal of Zhejiang University of Technology, 2011, 39(1):61-66.
- [20] GB 50017—2003, 钢结构设计规范[S].
- GB 50017—2003, Code for Design of Steel Structures [S].
- [21] DL/T 5085—1999, 钢-混凝土组合结构设计规程[S].
DL/T 5085—1999, Code for Design of Steel-concrete Composite Structure[S].
- [22] GB 50011—2010, 建筑抗震设计规范[S].
GB 50011—2010, Code for Seismic Design of Buildings[S].
- [23] ZHANG Y F, ZHAO J H, YUAN W F. Study on Compressive Bearing Capacity of Concrete-filled Square Steel Tube Column Reinforced by Circular Steel Tube Inside[J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2013, 19(6):787-795.
- [24] 过镇海, 时旭东. 钢筋混凝土原理和分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
GUO Zhen-hai, SHI Xu-dong. Reinforced Concrete Theory and Analysis[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003.
- [25] 赵作周, 贺小岗, 杨光, 等. 高轴压比下钢管高强混凝土组合剪力墙抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2016, 37(9):108-116.
ZHAO Zuo-zhou, HE Xiao-gang, YANG Guang, et al. Experimental Study on Seismic Behavior of High-strength Concrete Filled Steel Tube Composite Shear Walls Under High Axial Compression Ratio [J]. Journal of Building Structures, 2016, 37(9):108-116.
- [26] JGJ/T 101—2015, 建筑抗震试验规程[S].
JGJ/T 101—2015, Specification for Seismic Test of Buildings[S].