

圆钢管混凝土柱-预应力钢筋混凝土梁混合连接 节点抗震性能研究

李贝贝^{1,2}, 刘 奥^{1,2}, 王静峰^{1,2*}, 曹瑞雪³, 贡宏要³

(1. 合肥工业大学 土木与水利工程学院, 合肥 230009; 2. 合肥工业大学 土木工程结构与材料安徽省
重点实验室, 合肥 230009; 3. 中铁四局集团建筑工程有限公司, 合肥 230022)

摘要: 为研究圆钢管混凝土 (round concrete-filled steel tubular, RCFST) 柱-预应力钢筋混凝土 (prestressed reinforced concrete, PRC) 梁混合连接节点的抗震性能, 文中依托某高铁站候车层的 RCFST 柱-PRC 梁大跨度结构, 设计了两个缩尺比例为 1:5 的混合连接节点试件, 并对其开展了低周往复加载试验研究, 分析了有无工字钢牛腿试件的破坏模式、延性、刚度退化和滞回耗能能力。采用 ABAQUS 有限元软件建立了精细化的有限元分析模型, 经试验结果验证模型的有效性后, 分析了轴压比、预应力水平、梁端混凝土截面含钢率及混凝土强度对混合连接节点受力性能的影响规律。结果表明: 混合连接节点的破坏模式主要为与环梁交界处的主梁出现明显的塑性铰。相比无工字钢牛腿试件, 有工字钢牛腿试件的滞回曲线更为饱满, 且峰值荷载和延性分别提高了 16.76%、5.6%, 表明设置工字钢牛腿可以有效提高混合连接节点的抗震能力。轴压比、预应力水平、梁端混凝土截面含钢率和混凝土强度对混合连接节点的初始刚度无显著影响; 节点承载力与轴压比呈负相关, 与预应力水平、梁端混凝土截面含钢率和混凝土强度呈正相关, 其中合适的预应力水平可有效提升节点的承载能力, 因此, 基于文中 RCFST 柱-PRC 梁混合节点的构造形式, 建议预应力水平在设计时取 0.7。

关键词: 圆钢管混凝土柱; 预应力钢筋混凝土梁; 混合连接节点; 抗震性能; 低周往复加载试验; 有限元分析; 工字钢牛腿

中图分类号: TU398.9, TU352.11

文献标志码: A

文章编号: 1671-9379(2026)01-0001-09

DOI: 10.13969/j.jzgjz.20240717003

Seismic Performance of Hybrid Connection Joints Between RCFST Column and PRC Beam

LI Beibei^{1,2}, LIU Ao^{1,2}, WANG Jingfeng^{1,2*}, CAO Ruixue³, GONG Hongyao³

(1. School of Civil Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. Anhui Key Laboratory of Civil Engineering Structures and Materials, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 3. The Construction Engineering Company of CTCE Group, Hefei 230022, China)

*Corresponding author: jfwang008@163.com

Abstract: In order to study the seismic performance of hybrid connection joints between the round concrete-filled steel tubular (RCFST) column and prestressed reinforced concrete (PRC) beam, two hybrid connection joints with a scale ratio of 1:5 were designed based on a long-span RCFST column to PRC beam structure in the waiting floor of a high-

收稿日期: 2024-07-17

基金项目: 安徽省科技创新平台重大科技项目 (202305a12020013), 中央高校基本科研业务费专项资金项目 (123456789123)

作者简介:

李贝贝 (1992—), 男, 博士, 研究员, 主要从事金属结构和组合结构方面的研究。E-mail: lbbhfut@hfut.edu.cn。

通信作者:

王静峰 (1976—), 男, 博士, 教授, 主要从事钢结构与组合结构等方面的研究。E-mail: jfwang008@163.com。

speed railway station. A low-cycle reversed loading test was conducted on the two specimens with or without I-shaped steel corbels, to analyze the failure mode, ductility, stiffness degradation and energy dissipation. A refined finite element analysis model was established by ABAQUS software, and on the basis of the verification of the test results, the influence of axial compression ratio, prestress level, steel ratio of beam section and concrete strength on the mechanical performance of hybrid connection joints was analyzed. The results showed that the failure mode of the hybrid connection joint was mainly the obvious plastic hinge appeared between the end of the main beam at the junction with the ring beam. Compared with the specimen without I-shaped steel corbel, the hysteresis curve of the specimen with I-shaped steel corbel was fuller, and the peak load and ductility were increased by 16.76% and 5.6%, respectively, indicating a significant improvement in the seismic performance of the hybrid connection joints. There was almost no relationship between the initial stiffness of the hybrid connection joints and the axial compression ratio, the prestress level, steel ratio of beam section and concrete strength, while the bearing capacity of the hybrid connection joints was negatively correlated with the axial compression ratio, and was positively correlated with the remaining three parameters. Meanwhile, an appropriate prestress level can improve the bearing capacity of the joint. Therefore, based on the hybrid joint member form of RCFST column and PRC beam, it is suggested that a prestress level of 0.7 be adopted in the design of the PRC beam.

Keywords: round concrete-filled steel tubular (RCFST) column; prestressed reinforced concrete (PRC) beam; hybrid connection joint; seismic performance; low-cycle reversed loading test; finite element analysis; I-shaped steel corbel

钢管混凝土 (concrete-filled steel tubular, CFST) 柱和钢筋混凝土梁在土木工程结构中应用广泛,而节点作为梁柱间的核心连接构件,直接影响结构的形式与受力安全。目前,CFST柱与钢筋混凝土梁连接节点已获得一定程度的理论研究支撑与工程实践应用^[1-3]。随着大跨度空间结构和高层结构的快速发展,普通钢筋混凝土梁难以满足工程设计的要求,预应力钢筋混凝土 (prestressed reinforced concrete, PRC) 梁不仅具备普通钢筋混凝土梁的优点^[4],还弥补了其适用跨度有限、容易开裂、抗拉性能差等缺点。因此,PRC梁与CFST柱连接形成的新型结构体系适用于承载较大的大跨度结构。

目前,国内少数学者开展了CFST柱-PRC梁混合连接节点的抗震性能研究:邱剑等^[5]采用梁端加载方式,对3个施加不同预应力水平的CFST柱-PRC梁混合连接节点试件进行了低周往复加载试验,研究了节点核心区未配置抗剪连接件的节点其抗震性能。丁阳等^[6]针对预应力筋呈直线布置的CFST柱-PRC梁T形节点开展了试验研究和有限元分析。李娟^[7]通过数值模拟对节点核心区焊有加强部件的预应力CFST进行了力学性能分析。近年来,CFST柱-PRC梁混合连接节点已在国内的工程项目中得到了应用,如杭州西站、贵阳北站等^[8],该节点有效保障了结构承载力与抗震性能,取得了良好的经济和社会效益。

为进一步研究CFST柱-PRC梁混合连接节点的抗震性能,本文依托某高铁站候车层采用的节点构造,如图1所示,对设置有工字钢牛腿和环梁的圆钢管混凝土 (round concrete-filled steel tubular, RCFST) 柱-PRC梁混合连接节点试件开展了低周往复加载试验研究,并采用ABAQUS有限元软件对节点模型进行了全过程精细化受

力和参数分析,重点分析轴压比、预应力水平、梁端混凝土截面含钢率和混凝土强度对混合节点抗震性能的影响规律。



a) 站房结构

b) 节点构造

图1 某高铁站房

Fig. 1 A high-speed railway station

1 试验概况

1.1 试件设计

依托某高铁站候车层的RCFST柱-PRC梁结构,根据反弯点位置和实验室加载条件设计了两个缩尺比例为1:5的混合连接节点试件,分别为试件GGZ-1和GGZ-2。两个试件的截面尺寸与配筋均相同,具体如下:RCFST柱高为2 600 mm,混凝土梁总长为3 600 mm。CFST柱采用圆管截面,钢管直径为300 mm,壁厚为8 mm,内部填充C40混凝土。PRC主梁采用矩形截面,高度为320 mm,宽度为220 mm,选用C40混凝土浇筑,内配4根直径为18 mm和2根直径为16 mm的HRB400纵向受力钢筋;同时主梁侧面配置4根直径为10 mm的HRB400扭筋;并采用直径为8 mm、间距为75 mm的HRB400箍筋;钢筋保护层厚度为20 mm。节点核心区设置混凝土环梁,环梁直径为540 mm,厚度为120 mm,高度为440 mm,内配4根直径为10 mm和4根直径为8 mm的环筋,环筋遇工字钢牛腿断开,断开处通

过焊接于工字钢牛腿腹板保持受力连续性,同时配置直径为10 mm的U形箍筋。节点核心区钢管壁外表面焊接2个外径为420 mm,内径为300 mm,板厚为8 mm和2个外径为340 mm,内径为300 mm,板厚为3 mm的圆形环板,并将主梁纵向受力钢筋和环梁U形箍筋焊接其上。试件GGZ-1设置Q355B材质工字钢牛腿,其表面按40 mm间距依次焊接M4栓钉;而试件GGZ-2不设工字钢牛腿,用于对比研究,二者具体布置如图2所示。

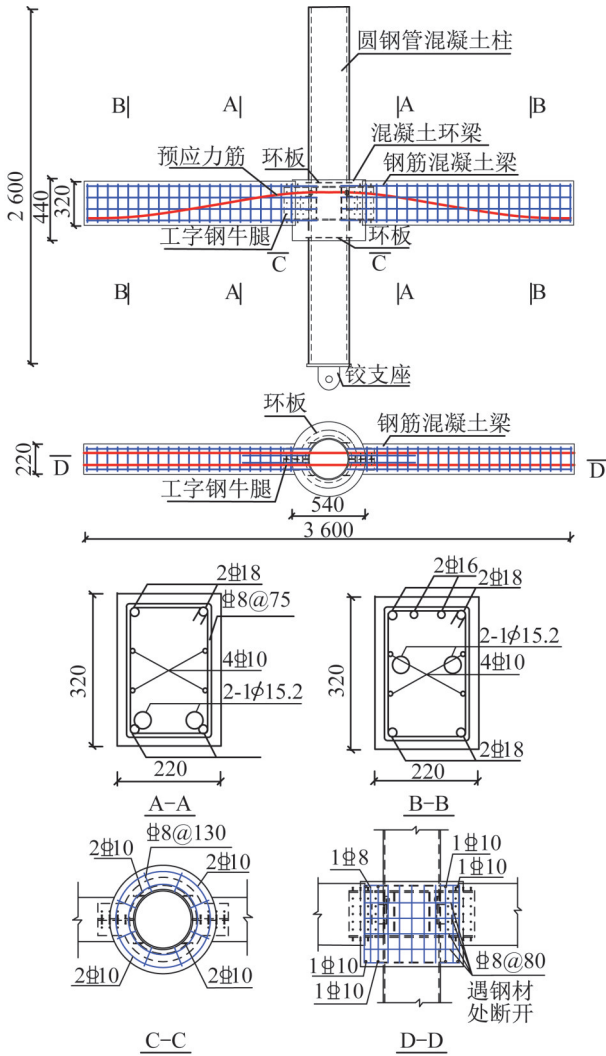


图2 节点构造(单位:mm)

Fig. 2 Joint construction (unit: mm)

试件GGZ-1和GGZ-2的混凝土梁均采用后张法张拉预应力筋,通过在钢管壁开孔、梁内预设波纹管,使预应力筋穿过节点核心区布设;预应力筋选用七股钢绞线,公称直径为15.2 mm,极限抗拉强度标准值为1 860 MPa,每个试件布置两根预应力筋,线型布置见图2。

1.2 材性试验

试件采用了圆钢管、工字钢牛腿和环板3种规格厚

度的钢材与4种直径的HRB400钢筋,其中环板由于尺寸过小,无法取样进行材性试验,其它所有钢材均参考现行国家标准《钢及钢产品 力学性能试验取样位置及试样制备》(GB/T 2975—2018)^[9]进行取样,并按照现行国家标准《金属材料 拉伸试验 第1部分:室温试验方法》(GB/T 228.1—2021)^[10]对结构钢材和钢筋进行拉伸试验,结果如表1所示。

表1 钢材的材料性能

Table 1 Material properties of steel

参数	钢牛腿	圆钢管	Φ8 钢筋	Φ10 钢筋	Φ16 钢筋	Φ18 钢筋
屈服强度/MPa	287	354	430	422	585	561
极限强度/MPa	381	449	531	601	677	678
断后伸长率/%	28	37	15	8	11	14

根据现行国家标准《混凝土物理力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2019)^[11]对浇筑试件时预留的混凝土立方体标准试块进行受压性能测试,该试块的立方体抗压强度为48.1 MPa,弹性模量为34 380 MPa。材性试验现场照片如图3所示。



a) 金属拉伸试验 b) 混凝土立方体抗压试验

图3 材性试验

Fig. 3 Material property test

1.3 试验加载装置及加载制度

在试验加载装置布置中,试件柱底端采用销轴方式连接于地梁,拉杆上端与梁端铰接,拉杆下端与地梁铰接。柱上端通过过渡段加载头与100 t的液压伺服作动器MTS连接。柱顶设置千斤顶和两块聚四氟乙烯板,与上部反力梁实现低摩擦滑动接触。为防止试件发生平面外失稳,在距混凝土环梁上表面350 mm的RCFST柱的侧面各焊接一块平板,并将防侧移装置一端固定于反力架上,带有滚轮的另一端通过微调与平板接触,以保证试件仅在加载平面内运动,试验加载装置如图4所示。

在进行低周往复加载试验前,先在柱顶施加轴压力,轴压比取0.2。待轴压力持荷5 min并读数稳定后,使用

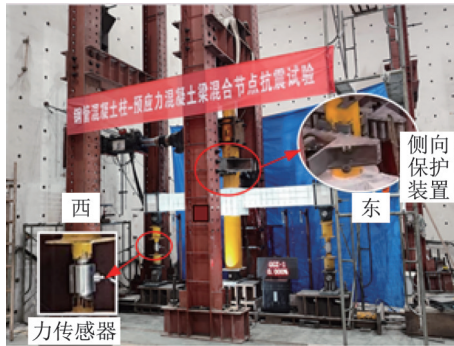


图4 试验加载装置

Fig. 4 Test loading setup

MTS作动器对柱顶施加水平荷载。节点加载制度如图5所示:以0.375%、0.500%、0.750%的层间位移角 θ 各循环6次,1%各循环4次,1.5%、2%、3%、4%、5%、6%各循环2次。当荷载下降至峰值荷载的85%以下时停止加载。

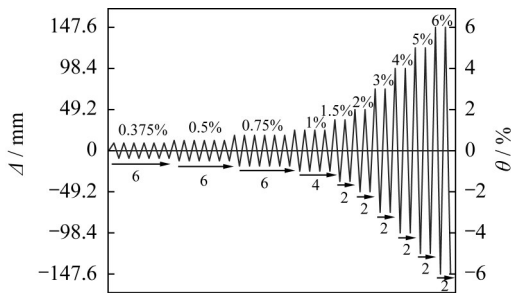


图5 试验加载制度

Fig. 5 Test loading system

2 试验现象和破坏模式

通过观察试验现象可以发现:当位移加载至9.23 mm ($\theta=0.375\%$)时,试件所受荷载较小,结构整体保持弹性工作状态,无裂缝产生。随着柱端位移的增加,试件GGZ-1在位移加载至12.3 mm ($\theta=0.5\%$)时,两侧主梁下表面相同位置出现少量竖向裂缝;当位移加载至36.9 mm ($\theta=1.5\%$)时,主梁上表面开始出现裂缝,环梁与主梁交界处出现轻微起皮和压碎现象;当位移加载至49.2 mm ($\theta=2.0\%$)时,主梁上下表面裂缝增多,主梁侧面竖向裂缝发展为斜向裂缝;当位移加载至73.8 mm ($\theta=3.0\%$)时,试件承载力达到峰值,主梁上下表面及侧面裂缝数量和长度显著增加,柱梁下表面裂缝间隙混凝土有掉落趋势,主梁侧面斜向裂缝逐步向环梁表面延伸;当位移加载至98.4 mm ($\theta=4.0\%$)时,试件承载力开始下降,工字钢牛腿伸入主梁端部区域,主梁上下表面出现明显开裂与破损,主梁与环梁交接处混凝土大量剥落,梁内纵筋及箍筋外露;当位移加载至123 mm ($\theta=5.0\%$)时,试件承载力下降至峰值荷载的85%,结束加载,此时预应力筋未发生断裂,试件破坏模式如图6所示。

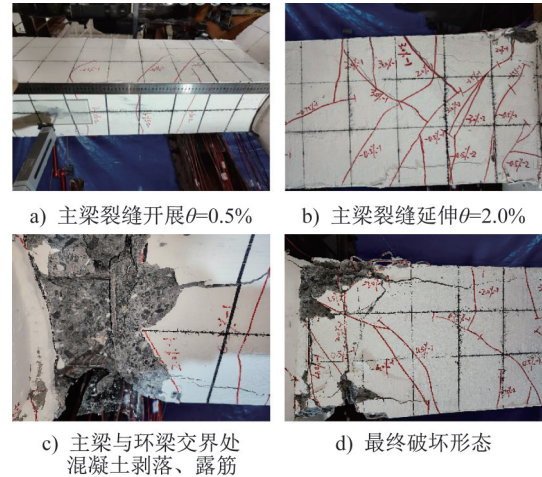


图6 试件GGZ-1破坏模式

Fig. 6 Failure modes of specimen GGZ-1

与试件GGZ-1相比,试件GGZ-2混凝土开裂现象提前,当位移加载至9.23 mm ($\theta=0.375\%$)时,试件开始出现微小裂缝;当位移加载至12.3 mm ($\theta=0.5\%$)时,主梁上下表面裂缝增大;当位移加载至36.9 mm ($\theta=1.5\%$)时,主梁侧面竖向裂缝向节点核心区延伸形成斜向裂缝,主梁与环梁交界处竖向裂缝向环梁表面延伸形成大量细碎裂缝;当位移加载至49.2 mm ($\theta=2.0\%$)时,主梁上下表面及侧面裂缝开展迅速,钢管柱与环梁之间出现混凝土压碎现象,主梁与环梁交界处混凝土有掉落趋势;当位移加载至73.8 mm ($\theta=3.0\%$)时,试件承载力达到峰值,靠近梁端的主梁底部混凝土剥落;当位移加载至98.4 mm ($\theta=4.0\%$)时,试件承载力开始下降,整个主梁上下表面出现明显开裂破损,主梁与环梁交界处大量混凝土剥落,钢筋裸露形成破坏模式;当位移加载至123 mm ($\theta=5.0\%$)时,试件承载力下降至峰值荷载的85%,结束加载,此时预应力筋未发生断裂,试件破坏模式如图7所示。

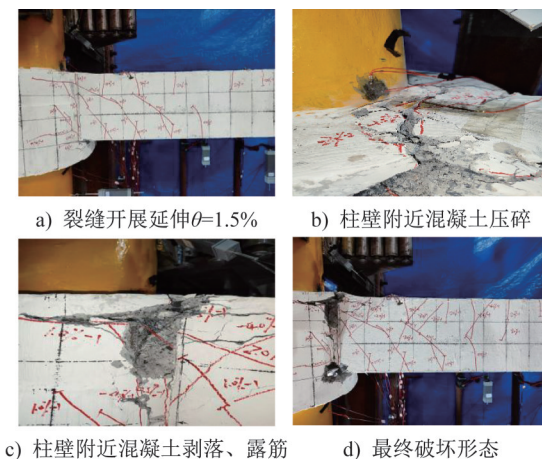


图7 试件GGZ-2破坏模式

Fig. 7 Failure modes of specimen GGZ-2

3 试验结果对比

由上述试验现象对比分析可知:带有工字钢牛腿的试件GGZ-1在 θ 为0.5%时出现裂缝,试件GGZ-2在 θ 为0.375%时出现裂缝,可见设置工字钢牛腿可减缓该节点试件裂缝开展速率;试件GGZ-1初始裂缝位置主要集中在牛腿伸入主梁端部位置处,且其裂缝主要分布在梁端与环梁核心区,由此可知,设置工字钢牛腿的试件GGZ-1其节点核心区更为安全,满足“强节点”设计理念。

将试验测得试件柱端的荷载和位移进行均值处理,绘制柱端水平荷载-位移曲线如图8所示。由图可知:加载初期试件处于弹性阶段,刚度较大;当加载至中后期时试件出现屈服,刚度降低,滞回环面积增大,滞回曲线呈梭形。从滞回环大小看,试件GGZ-1的滞回曲线较试件GGZ-2的滞回曲线更为饱满,表明此类混合连接节点的塑性变形能力和耗能能力较强,具有较好的抗震性能。各试件滞回曲线均表现出了捏缩现象,这是由于钢筋与混凝土之间发生了相对滑移。

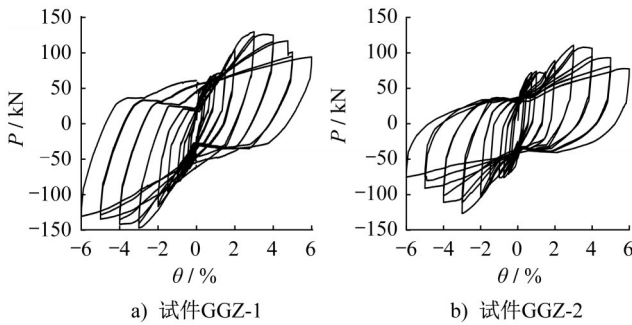


图8 试件水平荷载-位移曲线

Fig. 8 Horizontal load-displacement curves of specimens

由表2可知:带有工字钢牛腿的试件GGZ-1其峰值承载力均值比试件GGZ-2的峰值承载力均值提高了16.76%。

表2 骨架曲线特征点和延性系数

Table 2 Characteristic points and ductility coefficients of skeleton curves

试件编号	屈服点		峰值荷载点		极限点		μ	$\bar{\mu}$
	P_y/kN	Δ_y/mm	$P_{max, test}/kN$	Δ_{max}/mm	P_u/kN	Δ_u/mm		
GGZ-1	推	108.4	51.6	129.9	73.8	110.40	104.8	2.03
	拉	119.4	51.3	147.3	73.8	125.20	147.2	2.87
GGZ-2	推	83.3	44.7	110.8	73.8	94.18	108.0	2.42
	拉	98.5	45.5	126.6	73.8	107.61	101.6	2.23

通过试验结果对比分析可知:针对本文提出的RCFST柱-PRC梁混合连接节点,工字钢牛腿能够有效

提高该混合连接节点的承载力与延性。

4 试验结果分析

4.1 骨架曲线及位移延性

试件GGZ-1和GGZ-2的柱端水平荷载-位移骨架曲线如图9所示。

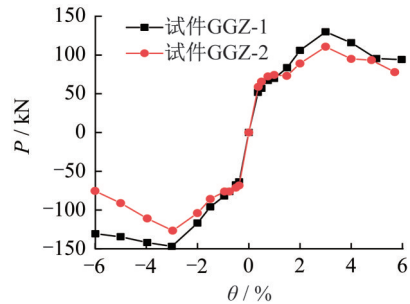


图9 试件骨架曲线

Fig. 9 Skeleton curves of specimens

骨架曲线特征点和节点延性系数 μ 如表2所示,其中 P_y 、 $P_{max, test}$ 和 P_u 分别为节点屈服、峰值、极限荷载, Δ_{max} 为节点峰值位移, μ 定义为梁柱节点屈服时对应的柱端位移 Δ_y 和节点承载力下降至 $0.85P_{max, test}$ 时的柱端位移 Δ_u 的比值,见式(1)。对于不同的屈服位移,采用等能量法计算。

$$u = \frac{\Delta_u}{\Delta_y} \quad (1)$$

由表2可得:相比于试件GGZ-2,试件GGZ-1的延性系数推拉均值 $\bar{\mu}$ 提高了5.6%,这是因为试件GGZ-1节点核心区设置有工字钢牛腿,节点出现裂缝后,混凝土保护层厚度开裂剥落,不再参与节点承载力传递,工字钢牛腿随即主动承担了梁端传来的弯矩和剪力,节点屈服抗弯承载力由牛腿受拉区翼缘的承载力控制,相较于钢筋混凝土结构,含工字钢牛腿的试件显著提升了结构的延性。

4.2 刚度退化

根据试件GGZ-1与GGZ-2的水平荷载-位移曲线,计算各级循环下试件的割线刚度 K_i ,以反映节点在往复荷载作用下的累积损伤,其中 K_i 为第*i*级循环加载正、负向峰值荷载 P_i 与其对应的加载位移 Δ_i 的比值,见式(2)。

$$K_i = \frac{|+P_i| + |-P_i|}{|+\Delta_i| + |-\Delta_i|} \quad (2)$$

各试件的刚度退化曲线如图10所示。当 $\theta < 1\%$ 时,试件处于弹性工作状态,试件GGZ-2的刚度较大,且刚度退化较快、曲线较陡;随着荷载的增加,混凝土逐渐进入塑性开裂阶段,纵向受力钢筋也随后进入屈服阶段,刚度退化逐渐趋于平缓。随着节点位移的持续增大,混凝

土梁裂缝逐步增多,工字钢牛腿对节点刚度的贡献占比逐步提升,当 $\theta > 1\%$ 时,试件GGZ-2刚度退化程度大于试件GGZ-1刚度退化程度;当试件荷载加载至峰值荷载时,带有工字钢牛腿的试件GGZ-1比试件GGZ-2的刚度退化值大16.08%。

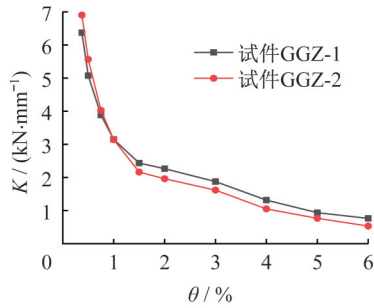


图10 试件刚度退化曲线

Fig. 10 Stiffness degradation curves of specimens

4.3 耗能能力

试件的耗能能力可通过水平荷载-位移曲线各级循环下的滞回环面积反映,图11为试件GGZ-1和GGZ-2的能量耗散曲线。由图可知:在达到峰值荷载前,带工字钢牛腿的试件GGZ-1与不带工字钢牛腿的试件GGZ-2耗能能力相差不大,当达到峰值荷载后,试件GGZ-1的耗能能力明显大于试件GGZ-2的耗能能力;随后达到破坏荷载时,相较于试件GGZ-2,试件GGZ-1的耗能能力提高了31.28%,说明工字钢牛腿可以有效提高节点在荷载达到峰值后的耗能能力。

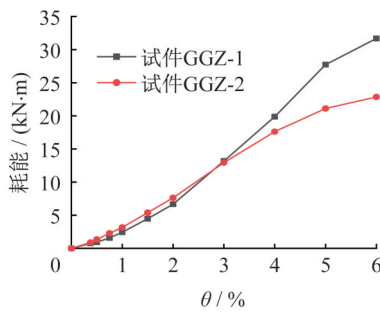


图11 试件能量耗散曲线

Fig. 11 Energy dissipation curves of specimens

5 有限元建模

5.1 本构关系

采用有限元软件ABAQUS进一步深入分析RCFST柱-PRC梁混合连接节点的低周往复性能。其中钢管内核心混凝土采用韩林海^[12]提出的单轴受压应力-应变模型,梁中混凝土采用塑性损伤模型^[13],膨胀角 ϕ 取 30° ,偏心率取0.1, f_{b0}/f_{c0} (混凝土双轴与单轴抗压强度比)取1.16,系数 K_c 取0.6667,黏性系数 γ 取0.005,应

力-应变曲线按《混凝土结构设计标准》(GB 50010—2010)^[14]计算得到。钢管、工字钢牛腿、预应力筋均采用具有随动强化特征的双线性弹塑性模型,强化段的弹性模量取 $0.01E_0$, E_0 为钢材的弹性模量,如图12所示。钢筋则采用CLOUGH^[15]提出的滞回本构模型,并引入方自虎等^[16]开发的umat子程序,以模拟“捏缩”效应,如图13所示。

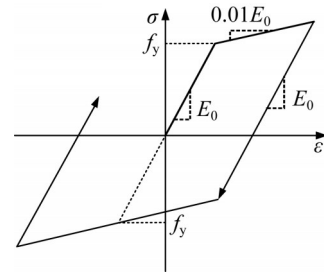


图12 双线性弹塑性模型

Fig. 12 Bilinear elastoplastic model

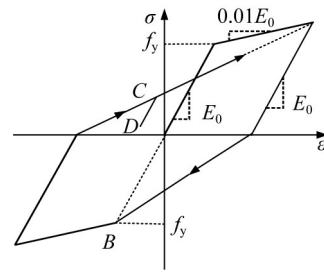


图13 CLOUGH模型

Fig. 13 CLOUGH model

5.2 网格划分

钢管、环板、工字钢牛腿及混凝土采用8节点线性六面体减缩积分单元C3D8R模拟,钢筋和预应力筋采用三维2节点桁架单元T3D2模拟。以试件GGZ-1为例,进行网格敏感性研究,研究钢管及混凝土单元网格尺寸对数值计算时间和计算精度的影响,表3给出了试验峰值荷载(推) $P_{\max, \text{test}}$ 与有限元模拟峰值荷载(推) $P_{\max, f}$ 对比结果。本研究为兼顾计算效率与计算精度,将钢管及混凝土单元网格尺寸设置为70 mm,环板及工字钢牛腿尺寸细化为30 mm,钢筋和预应力筋单元网格尺寸均按箍筋间距设置为75 mm。

5.3 相互作用与边界条件

钢管与混凝土的法向采用Hard Contact方式连接,切向采用Penalty方式连接,摩擦系数取0.6。钢构件之间采用Merge方式连接,钢筋、工字钢牛腿、加强环板和预应力筋以Embed方式与混凝土结合。

如图14所示,分别在柱底下侧、柱顶上表面中心点、

表3 试件GGZ-1网格敏感性分析

Table 3 Mesh sensitivity analysis of specimen GGZ-1

网格尺寸/mm	计算效率/min	$P_{max, test}/P_{max, f}$
30	80	0.97
50	17	0.96
70	15	0.98
90	4	0.96
110	5	0.97

梁端两侧底部以及柱顶左侧加载位置设置5个参考点,参考点与相对的表面耦合,并约束RCFST柱底部铰支座(RP-1)的所有线位移和平面外转动位移($U_x=U_y=U_z=U_{Ry}=U_{Rz}=0$);分别在柱顶(RP-2)、柱顶左侧(RP-5)施加往复荷载、轴向荷载,并约束平面外的线位移和转动($U_y=U_{Rx}=0$)。加载过程中,梁端铰支座拉杆与力传感器之间的间隙,及梁端产生的侧向水平位移,会导致梁端发生微小的竖向位移,为平衡该竖向位移导致的结果误差,在梁端竖直方向(U_z)按一定幅值施加位移,其幅值为0~16 mm,同时在梁端铰支座(RP-3、RP-4)释放平面内的水平位移从而约束梁端平面外的线位移和转角($U_y=U_{Rx}=U_{Rz}=0$)。

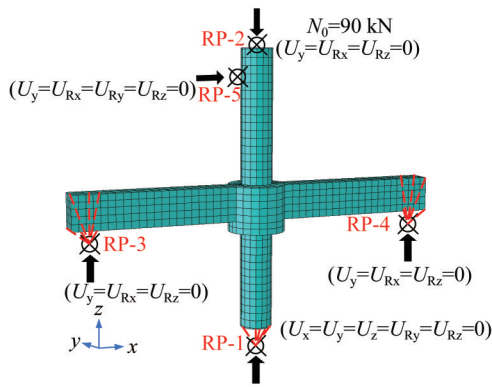


图14 试件边界条件

Fig. 14 Specimen boundary conditions

5.4 预应力模拟

本研究中,混凝土梁内布置的预应力筋采用降温法施加预张力,见式(3)。

$$T = \frac{\sigma_{con}}{E_p a} \quad (3)$$

式中: T 为降温量; σ_{con} 为设计张拉控制应力; E_p 为钢绞线弹性模量,取 $1.95 \times 10^5 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$; a 为线膨胀系数,取 1.15×10^{-5} 。预应力钢绞线的材性数据依据设计资料整理如表4所示,结合该表数据和式(3)计算,得到的降温量为 $-580.6 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

表4 预应力钢绞线材性

Table 4 Material properties of prestressed steel strands

类型	D/mm	$f_{ptk}/(\text{N}\cdot\text{mm}^{-2})$	$f_{py}/(\text{N}\cdot\text{mm}^{-2})$	σ_{con}	ν
无黏结	15.2	1 860	1 320	$0.70f_{ptk}$	0.3

注: f_{ptk} 为极限抗拉强度标准值; f_{py} 为抗拉强度设计值; ν 为泊松比。

5.5 有限元与试验结果对比

图15a)和b)为有限元模拟与试验水平荷载-位移曲线结果对比,图15c)和d)为有限元模拟与试验破坏模式对比。由图可知:有限元分析结果与试验结果整体吻合较好,且有限元模拟和试验得到的破坏模式均为梁端出现了塑性铰。其中,试件GGZ-1与GGZ-2的峰值荷载对比见表5,由表5可知:有限元模拟的正向和负向峰值荷载与试验结果的误差为2%~12%。综上可得,有限元模拟结果较为可靠,可以反映加载过程中试件滞回性能的变化规律。

表5 试件GGZ-1与GGZ-2峰值荷载对比

Table 5 Comparison of peak loads between specimen GGZ-1 and GGZ-2

试件编号	加载方向	P_{max}/kN	$P_{max, f}/\text{kN}$	$P_{max, f}/P_{max}$
GGZ-1	正向	129.9	127.2	0.98
	负向	147.3	129.0	0.88
GGZ-2	正向	110.8	117.4	1.06
	负向	126.6	114.5	0.90

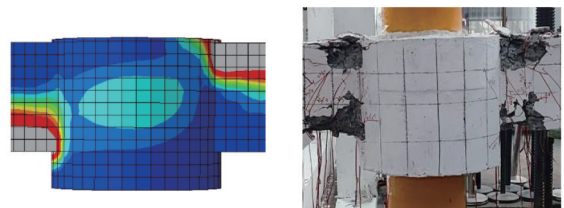
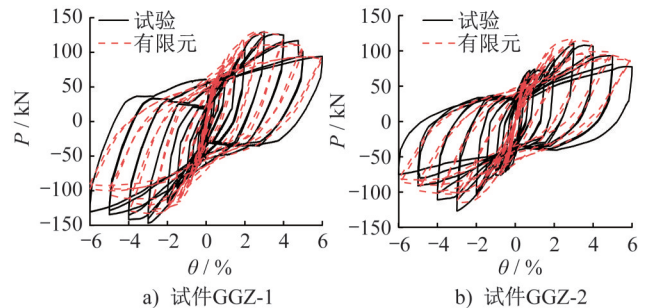


图15 试验与有限元模拟结果对比

Fig. 15 Comparison of results between test and finite element simulation

5.6 参数分析

在有限元模型验证的基础上,选取模型GGZ-1为标准模型,进一步分析各参数对此类混合节点抗震性能的影响规律,研究参数包括轴压比 n 、预应力水平 λ 、梁端混凝土截面含钢率 ρ 和混凝土强度,详细参数见表6。

表6 有限元模型参数

Table 6 Parameters of the finite element model

分析参数	参数取值
轴压比 n	0.1、0.2、0.3、0.4、0.5
预应力水平 λ	0、0.1、0.3、0.5、0.7、0.9
截面含钢率 ρ	0、4.85%、5.46%、6.07%、6.68%、7.28%
混凝土强度等级	C30、C45、C40、C45、C50

不同参数下节点有限元模型的骨架曲线如图16所示,分析可知:

(1) 轴压比对混合连接节点模型的初始刚度无显著影响,但随着轴压比的增大,试件峰值荷载明显降低,如图16a)所示。对比轴压比为0.1的节点模型, n 为0.2、0.3、0.4、0.5的节点模型其峰值荷载分别降低了9.47%、19.83%、29.86%、31.75%。可知,随着 n 的增大,节点的峰值位移减小,变形能力削弱。

(2) 相较于无预应力的节点模型,预应力水平为0.1、0.3、0.5、0.7、0.9的节点模型其承载力分别增大了5.13%、22.8%、12.47%、16.54%、15.87%,如图16b)所示。预应力的施加可以有效提高节点的承载力,但当预应力水平大于0.7时,节点模型的峰值荷载反而会略微降低。因此,在拟静力荷载作用下,基于本文研究的RCFST柱-PRC梁混合节点,在轴压比为0.2、混凝土强度为C40、节点含钢率为6.07%的条件下,建议在设计时预应力水平取0.7左右。

(3) 为研究截面含钢率对节点抗震性能的影响规律,通过改变工字钢牛腿腹板厚度来实现梁端混凝土截面含钢率的变化,工字钢牛腿腹板厚度分别设置为0、4 mm、6 mm、8 mm、10 mm、12 mm,对应的截面含钢率(钢牛腿)为0、4.85%、5.46%、6.07%、6.68%、7.28%。如图16c)所示,梁端混凝土截面含钢率由0增大到7.28%时,节点模型的峰值承载力分别提高了7.38%、15.17%、15.49%、15.92%、16.74%,表明梁端含钢率与节点峰值承载力呈正相关,设置工字钢牛腿有利于提升节点的承载能力;梁端混凝土截面含钢率在弹性阶段对节点承载力和刚度的影响较小,当节点核心区增设工字钢,即梁端混凝土截面含钢率增大到4.85%时,试件峰值承载力显著提升8.36%。

(4) 如图16d)所示,随着PRC梁中混凝土强度的提高,节点模型的承载能力和延性系数均有略微增大,但效果不明显。

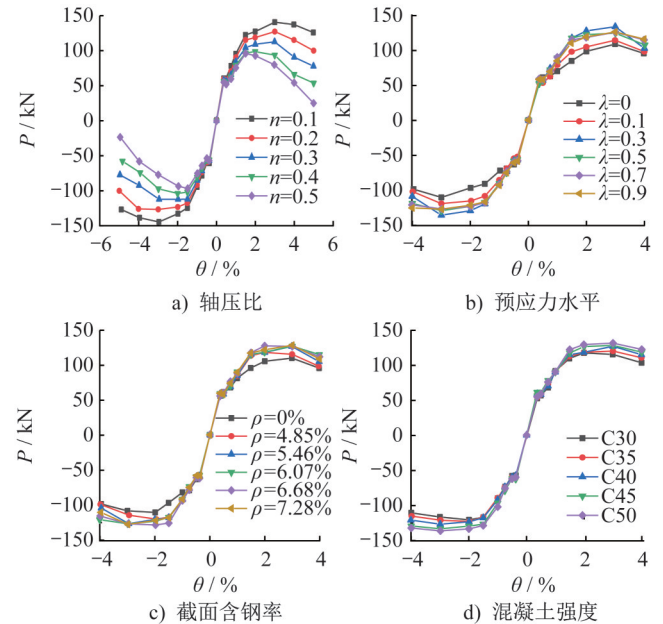


图16 不同参数影响下有限元模型的骨架曲线对比

Fig. 16 Comparison of skeleton curves under different parameters of finite element model

6 结论

通过RCFST柱-PRC梁混合连接节点的低周往复加载试验和有限元分析,主要得到以下结论:

(1) 混合连接节点的破坏主要集中于主梁与环梁的交界处梁端,并在此处形成塑性铰;表现为混凝土剥落、钢筋裸露、且工字钢牛腿伸入主梁部位的主梁上下表面混凝土开裂较为明显,以环梁为主的节点核心区未发生明显塑性破坏,满足“强柱弱梁”的抗震设计理念。

(2) 相较于试件GGZ-2,设有工字钢牛腿的试件GGZ-1的滞回曲线较为饱满,且峰值荷载和延性分别提高了16.76%和5.6%。结合节点含钢率参数分析,含有工字钢牛腿试件的峰值荷载提高了7.38%~16.74%,且试验和有限元模拟结果一致表明设置工字钢牛腿可以有效提高RCFST柱-PRC梁混合连接节点的抗震能力。

(3) 文中建立了RCFST柱-PRC梁混合连接节点的有限元模型,从水平荷载-位移滞回曲线、峰值荷载和破坏模式三个方面表明有限元模拟结果与试验结果吻合较好,可以反映加载过程中混合连接节点滞回性能的变化规律。

(4) 由参数分析可知,轴压比、预应力水平、梁端混凝土截面含钢率、混凝土强度对混合连接节点的初始刚度几乎没有影响;节点承载力与轴压比呈负相关,与其余三个参数呈正相关,并且合适的预应力水平可以提高节

点的承载能力,因此,在拟静力荷载作用下,基于本文研究的RCFST柱-PRC梁混合节点,在轴压比为0.2、混凝土强度为C40、节点含钢率为6.07%的条件下,建议在设计时预应力水平取0.7左右。

参考文献:

- [1] GAN D, ZHAO Z X, ZHOU Z, et al. Axial compression behavior of reinforced concrete beam to square thin-walled concrete-filled steel tube column joints stiffened by internal diaphragms[J]. *Structural Concrete*, 2023, 24(3): 3674-3691. DOI:10.1002/suco.202200462.
- [2] 陈云,赵威,董金爽,等. 钢管混凝土柱、型钢混凝土柱、钢柱与钢筋混凝土梁连接节点研究现状综述[J]. *建筑钢结构进展*, 2024, 26(7): 1-13. DOI:10.13969/j.cnki.cn31-1893.2024.07.001.
- CHEN Yun, ZHAO Wei, DONG Jinshuang, et al. Research review on the connection joints of concrete-filled steel tubular column, steel reinforced concrete column and steel column-reinforced concrete beam [J]. *Progress in Steel Building Structures*, 2024, 26(7): 1-13. DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2024.07.001. (in Chinese)
- [3] 廖飞宇,赵剑,尧国皇,等. 钢管混凝土叠合柱-混凝土梁节点滞回性能的有限元分析[J]. *建筑钢结构进展*, 2019, 21(5): 1-12, 19. DOI:10.13969/j.cnki.cn31-1893.2019.05.001.
- LIAO Feiyu, ZHAO Jian, YAO Guohuang, et al. Hysteretic performance finite element analysis of concrete encased CFST column to concrete beam joints under cyclic loading[J]. *Progress in Steel Building Structures*, 2019, 21(5): 1-12, 19. DOI:10.13969/j.cnki.cn31-1893.2019.05.001. (in Chinese)
- [4] 郑文华,宫剑飞,刘明保. 预应力和非预应力钢筋混凝土梁延性对比分析[J/OL]. *建筑结构*, 2024: 1-7. (2024-07-01). <https://link.cnki.net/doi/10.19701/j.jzjg.20230013>.
- ZHENG Wenhua, GONG Jianfei, LIU Mingbao. Comparative analysis on ductility of prestressed and non-prestressed reinforced concrete beams[J/OL]. *Building Structure*, 2024: 1-7. (2024-07-01). <https://link.cnki.net/doi/10.19701/j.jzjg.20230013>. (in Chinese)
- [5] 邱剑,李漫,方梅. 钢管混凝土柱-预应力混凝土梁节点抗震性能有限元分析[J]. *四川建筑科学研究*, 2020, 46(1): 21-27. DOI:10.19794/j.cnki.1008-1933.2020.0004.
- QIU Jian, LI Man, FANG Mei. Finite element analysis on seismic behavior of connection between concrete-filled steel tubular column and prestressed concrete beam [J]. *Sichuan Building Science*, 2020, 46(1): 21-27. DOI: 10.19794/j.cnki.1008-1933.2020.0004. (in Chinese)
- [6] 丁阳,刘晨,李宁,等. 钢管混凝土柱-预应力混凝土梁T形节点抗震性能研究[J]. *建筑结构*, 2015, 45(2): 15-19. DOI:10.19701/j.jzjg.2015.02.004.
- DING Yang, LIU Chen, LI Ning, et al. Seismic performance study on the T-shaped joint of concrete-filled steel tube-prestressed concrete beam [J]. *Building Structure*, 2015, 45(2): 15-19. DOI:10.19701/j.jzjg.2015.02.004. (in Chinese)
- [7] 李娟. 预应力钢管混凝土节点力学性能研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2017.
- LI Juan. Mechanical behavior of concrete filled steel tubular column-prestressed concrete beam joint [D]. Wuhan: Wuhan University, 2017. (in Chinese)
- [8] 熊学炜. 杭州西站桥建合一承轨层复杂关键节点抗震性能试验研究[J]. *工程抗震与加固改造*, 2023, 45(3): 102-110. DOI:10.16226/j.issn.1002-8412.2023.03.013.
- XIONG Xuewei. Study on seismic performance of complex key joints in integrated station-bridge structure of Hangzhou West Station [J]. *Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting*, 2023, 45(3): 102-110. DOI: 10.16226/j.issn.1002-8412.2023.03.013. (in Chinese)
- [9] GB/T 2975—2018 钢及钢产品 力学性能试验取样位置及试样制备[S].
- GB/T 2975—2018 Steel and steel products-location and preparation of test pieces for mechanical testing [S]. (in Chinese)
- [10] GB/T 228.1—2021 金属材料 拉伸试验 第1部分: 室温试验方法[S].
- GB/T 228.1—2021 Metallic materials—tensile testing: part 1: method of test at room temperature[S]. (in Chinese)
- [11] GB/T 50081—2019 混凝土物理力学性能试验方法标准[S].
- GB/T 50081—2019 Standard for test methods of concrete physical and mechanical properties[S]. (in Chinese)
- [12] 韩林海. 钢管混凝土结构—理论与实践[M]. 3版. 北京: 科学出版社, 2016.
- HAN Linhai. Concrete filled steel tubular structures[M]. 3rd ed. Beijing: Science Press, 2016. (in Chinese)
- [13] 张田,侯正猛,李晓琴,等. 混凝土塑性损伤模型参数计算方法研究[J]. *计算力学学报*, 2024, 41(6): 1130-1137. DOI:10.7511/jslx20230913003.
- ZHANG Tian, HOU Zhengmeng, LI Xiaojin, et al. Research on the calculation of model parameters for concrete plastic damage model in ABAQUS [J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2024, 41(6): 1130-1137. DOI: 10.7511/jslx20230913003. (in Chinese)
- [14] GB 50010—2010 混凝土结构设计标准[S].
- GB 50010—2010 Standard for design of concrete structures[S]. (in Chinese)
- [15] CLOUGH R W. Effect of stiffness degradation on earthquake ductility requirements[M]. Berkeley: Structural Engineering, Mechanics, and Materials, 1966.
- [16] 方自虎,甄翌,李向鹏. 钢筋混凝土结构的钢筋滞回模型[J]. *武汉大学学报(工学版)*, 2018, 51(7): 613-619. DOI:10.14188/j.1671-8844.2018-07-008.
- FANG Zihu, ZHEN Yi, LI Xiangpeng. Steel hysteretic model of reinforced concrete structures [J]. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2018, 51(7): 613-619. DOI: 10.14188/j.1671-8844.2018-07-008. (in Chinese)