

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20230701001

四肢钢管混凝土格构柱-箱梁节点抗震性能试验 研究与优化分析*

黄志^{1,2}, 俞科辰¹, 陈俊烜¹, 王文慧¹, 李湘贤¹, 蒋丽忠³

(1. 湖南科技大学土木工程学院, 湖南湘潭411201; 2. 湖南省智慧建造装配式被动房工程技术研究中心, 湖南湘潭411201; 3. 中南大学土木工程学院, 湖南长沙410075)

摘要:为探究四肢钢管混凝土格构柱-箱梁节点的破坏特征和塑性耗能性能,进行了三个四肢钢管混凝土格构柱-箱梁节点的低周往复荷载试验。得到了其荷载-位移滞回曲线和骨架曲线。在试验研究基础上利用ABAQUS有限元软件建立了四肢钢管混凝土格构柱组合箱梁节点有限元模型,并与拟静力试验结果进行了对比验证,吻合较好。对节点核心区不同构造形式的四肢钢管混凝土格构柱-组合箱梁节点进行了优化设计,探讨了节点核心区构造是否对称、核心区不同构造形式等因素对其耗能能力的影响。结果表明:核心区构造为横隔板的节点具有最佳的塑性耗能能力;核心区构造越对称,节点的塑性耗能能力越好;节点核心区的构造形式对节点的刚度退化影响较小;不同核心区构造的节点的残余变形率均较大,表现出良好的塑性性能。试验的研究成果为四肢钢管混凝土格构柱与组合箱梁节点的核心区部位的抗震性能分析提供了参考。

关键词:钢管混凝土格构柱-钢箱梁节点; 试验研究; 抗震性能; 塑性耗能; 优化设计

中图分类号: TU393 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2024)06-1368-09

Experimental Study and Optimization Analysis of Seismic Performance of Four-limb Concrete-filled Steel Tube Lattice Column-box Girder Joints

HUANG Zhi^{1,2}, YU Kechen¹, CHEN Junda¹, WANG Wenhui¹, LI Xiangxian¹, JIANG Lizhong³

(1. School of Civil Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

2. Hunan Engineering Research Center for Intelligently Prefabricated Passive House, Xiangtan 411201, China;

3. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, China)

Abstract: In order to investigate the failure characteristics and plastic energy dissipation performance of four-limb concrete-filled steel tube (CFST) lattice column-box girder joints, low-cycle reciprocating load tests were conducted on three different CFST lattice column-box girder joints. Load-displacement hysteresis curves and skeleton curves were obtained from the tests. Based on the tests, finite element models of four-limb CFST lattice column-box girder joints were established using ABAQUS, and the results were compared and validated with the quasi-static test results, showing good agreement. Optimization designs were conducted for the core region of the joints with different configurations, and the influence of factors such as the symmetry of the core region and different configurations

* 收稿日期:2023-07-01;修回日期:2023-08-16

基金项目:国家自然科学基金资助(51808213)、湖南省自然科学基金(2019JJ50185)、湖南省教育厅科学研究优秀青年项目(20B214)、全国大学生创新创业训练计划项目(202212649003)资助

作者简介:黄志(1984—),男,副教授,硕导,博士。主要从事组合结构抗震性能研究。E-mail: huangzhi@hnust.edu.cn

on the energy dissipation capacity were investigated. The results indicated that the joints with a transverse diaphragm in the core region exhibited the best plastic energy dissipation capacity. The greater the symmetry of the core region, the higher the plastic energy dissipation capacity of the joint. The configuration of the core region had a minor influence on the stiffness degradation of the joint. Joints with different core region configurations showed significant residual deformation, demonstrating good plastic performance. The research findings of the tests provide reference for the seismic performance analysis of the core region of four-limb CFST lattice column-box girder joints.

Keywords: concrete-filled steel tube lattice column-box girder joint; experimental research; seismic performance; plastic energy dissipation; optimization design

0 引言

钢管混凝土格构柱不仅有单肢钢管混凝土构件承载力高、塑性和韧性好等优点,而且有更大的抗弯刚度,在工程实践中得到了广泛的应用。工程中利用其优点与不同类型的梁组合成不同形式的节点。这类构件具有较好的抗震性能、较大的承载能力和施工方便等优点,具有重要的现实意义和广阔的应用前景,在高层巨型组合结构工程领域发挥着重要作用。针对于这一领域,学者们进行了大量的研究。如惠存等^[1]研究了钢管混凝土柱在多种灾害耦合作用下的承载性能变化情况,探讨了该变化的机理和对结构长期使用的影响。马江萍等^[2]提出了一种改进型侧板加强型梁柱节点,并通过循环加载模拟分析发现,将上下两块小矩形柱侧板更换为一整块柱侧板能够较大程度地提高节点的承载力,同时给出了柱侧板的伸出长度、高度和厚度,以及梁侧板矩形部分、三角形部分的长度和长宽比等的合理建议。庞瑞等^[3]通过进行3个板柱节点的拟静力试验,发现配置型钢剪力架能显著提高空心楼盖板柱节点的承载力和抗震性能,而平行布管方式下空心板柱节点的抗震性能指标优于正交布管方式下的板柱节点。

研究人员还对地震作用下的钢管混凝土格构柱组合节点性能也进行了一系列试验^[4-5],并给出了优化建议^[6-7]。黄志等^[8-9]通过对4根钢管混凝土格构柱进行水平低周往复试验与分析对比,得出其格构柱的长细比宜小于10的结论。邹艳花等^[10]通过对2根钢管混凝土格构柱的低周往复试验进行三维数值模拟,发现在一定范围内,材料比例系数越大,试件的延性越好。王先铁等^[11]对4组8个不同构造形式的钢管混凝土构件进行了轴心受压试验,对比

分析了格构式钢管-钢管混凝土构件和普通钢管混凝土构件的轴压性能的区别。袁辉辉等^[12]通过对平缀管式钢管混凝土格构柱的缩尺模型进行拟静力试验分析,研究其结构的刚度、强度及耗能能力等抗震性能,证明了平缀管式钢管混凝土格构柱的抗震性能良好。欧智菁等^[13-14]以缀管布置形式作为控制变量,对7组不同布置形式的变截面钢管混凝土格构柱进行低周往复试验,并通过分析其结构的滞回曲线等得出斜缀管式格构柱相对于平缀管格构柱,它的初始刚度和水平峰值荷载变大了,而耗能能力相对更小,承载力退化较为明显的结论。高海峰^[15]通过对抗侧力格构柱的拟静力试验进行对比分析其滞回性能等,发现相对于缀件格构柱,抗侧力钢格构柱表现出更好的抗侧性能。同时,刘敏^[16]通过对受反复荷载作用的四肢钢管混凝土格构柱的受力分析,发现钢管的径厚比越小,斜腹杆的变形越大。

对于组合结构而言,学者们对于其中的单一构件相对有更多研究^[17-18],而提出的节点多集中于钢管混凝土-钢梁的形式,因此,本文提出四肢钢管混凝土格构柱-组合箱梁节点。对核心区不同构造的四肢钢管混凝土格构柱-组合箱梁节点进行低周往复试验和有限元数值分析,分析了不同核心区节点的荷载-位移滞回曲线、刚度退化和变形恢复能力,讨论了节点本身的承载能力与耗能能力,以及节点核心区构造对其抗震性能的影响,并进行了优化设计,为四肢钢管混凝土格构柱-组合箱梁节点的研究和工程应用提供参考。

1 试验概况

1.1 试件设计

试验以巨型框架边柱节点为原型,设计了3个

四肢钢管混凝土格构柱-箱梁节点试件。所有试件的柱高均为1 000 mm,箱梁高为270 mm,混凝土翼缘板高为80 mm。格构柱部分的肢柱和缀管均采用20#无缝钢管,管内填充C30自密实混凝土。梁部分采用销钉连接的Q235钢板拼焊钢箱梁和C30混凝土翼缘板构成。加强环和三种节点核心区构造件由10 mm厚Q345钢板制成,并焊接到肢管壁上。试验中LJ-1、LJ-2和LJ-3节点核心区构造件采用了不同的设计,分别为“平行工字型单肢斜撑”、“交叉T字形斜撑”和“实心横隔板”。节点立面如图1所示,节点核心区构造细节详见图2~图4,节点试件的详细参数见表1。

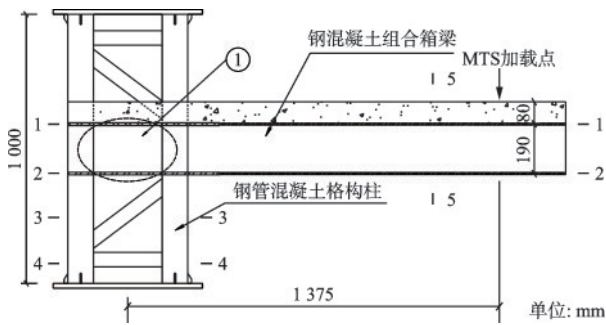


图1 节点立面
Fig.1 Elevation view of the joint

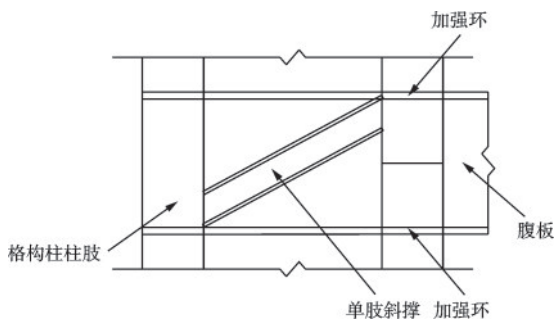


图2 单肢斜撑节点构造
Fig.2 Structural diagram of single-limb diagonal brace joint

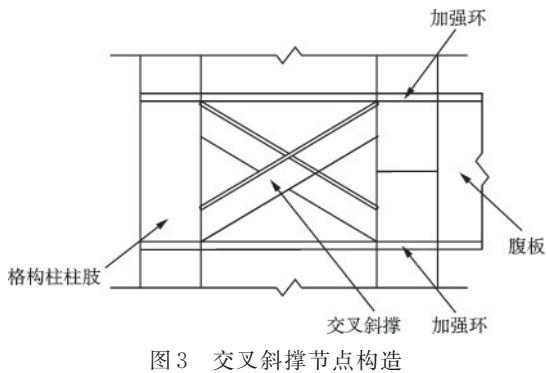


图3 交叉斜撑节点构造
Fig.3 Structural diagram of cross diagonal brace joint

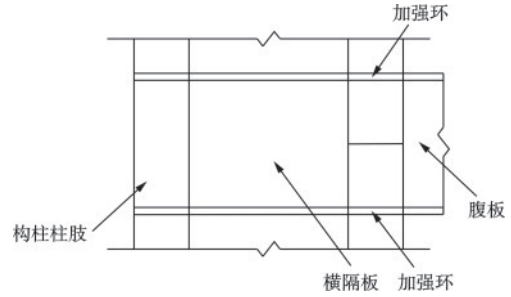


图4 横隔板节点构造
Fig.4 Structural diagram of diaphragm joint

表1 节点试件参数表
Table 1 Parameters of joint specimens

节点编号	LJ-1	LJ-2	LJ-3
节点连接件构造	单肢斜撑	交叉斜撑	横隔板
肢管 $D \times t$		$\Phi 102 \times 4$	
缀管 $d \times t$		$\Phi 57 \times 3$	
缀管角度/ $^\circ$		53°	
钢箱 $h \times b \times t_w \times t_f$		$190 \times 350 \times 6 \times 6$	
混凝土翼缘板 $b_c \times h_c$		750×80	
主筋		B10@110	
箍筋		A6@100	
栓钉		A13@100	
厚度 t		10	
环板宽度 b		75	
轴压力/kN		730	
轴压比 n		0.3	

1.2 材料力学性能

节点试件中各材料的基本力学性能由材性试验获得。翼缘板中C30普通混凝土以及填充于钢管内的自密实C30混凝土的平均抗压强度分别为35.5、31.2 N/mm²,其对应的弹性模量分别为31 470、23 800 MPa。试验中的钢材严格按照规范进行取样和拉伸实验,相关性能见表2。

表2 钢材力学性能指标
Table 2 Mechanical properties of steel

钢材类型	厚度(直径)/mm	实测尺寸/mm	屈服强度 f_y / (N·mm ⁻²)	极限强度 f_u / (N·mm ⁻²)
钢管 A102	4.0	4.20	305	431
钢管 A57	3.0	3.22	258	422.5
钢板(Q345)	10.0	9.40	455	537.5
钢板(Q235)	6.0	5.66	324	465
纵筋	10.0	9.24	547	637
箍筋	6.0	5.12	428	529

1.3 加载方案与测点布置

试验开始前对节点试件进行轴向预加载,确认安全后开始试验。试验采用了拟静力加载方案,以向柱底的恒定轴向荷载和向梁端的竖向往复荷载模拟节点的受力状态,竖向荷载采用荷载-位移控制加载方式。当节点处于弹性阶段时,采用荷载控制加载方法,共分6级,每级荷载增量为所加载方向屈服荷载的1/6,每级荷载循环1次。当节点处于非弹性阶段时,采用位移控制加载方法,每级荷载增量为一倍加载方向的屈服位移,每级荷载循环3次。节点达到破坏的判定标准包括:节点出现明显的变形和破坏特征、荷载下降到峰值的85%或位移出现突增。发生破坏后,立即停止试验。试验中,使用MTS系统直接读取了箱梁的竖向荷载值,并使用应变片测量各构件的应变。位移计分别布置在肢柱侧和箱梁底板处,用于测量相对位移转角。柱顶和柱底各布置了位移计,以修正相对位移转角的误差。

1.4 试验现象与破坏形态

在试验初期,所有试件均处于弹性阶段。随着反向加载的增加,翼缘混凝土开始出现开裂现象,此时达到了节点开裂荷载。当荷载达到-20 kN,混凝土板边缘出现横向裂缝。随着荷载的继续增加,裂缝逐渐扩大,在梁端加载点周围不断产生新的裂缝。当反向屈服荷载出现时,已经出现了数条横跨混凝土板的裂缝。

进入塑性阶段后,当荷载达到反向屈服位移的1~2倍,肢柱与混凝土板之间出现小间隙,两者开始分离。随着荷载的增加,当荷载达到正向屈服位移的2倍,翼缘板和钢箱发生滑移,伴随着巨大的声响和少量混凝土碎屑的掉落。当荷载增加到正向屈服位移的3~4倍,在肢柱周围产生多条纵向裂缝。在LJ-2节点中,由于拉应力过大,交叉斜撑下方的焊缝断裂,如图5所示。

当反向加载位移达到4倍屈服位移所示,加强环与钢箱梁翼缘间的焊缝断裂,导致周围混凝土板横向折断,梁腹板撕裂,试件的反向承载力明显下降,出现了破坏迹象,如图6、图7所示。正向加载至5倍正向屈服位移,钢梁局部腹板受压鼓曲,正向承载力也明显下降,如图8所示。当反向屈服位移达到5倍,试件出现大块混凝土掉落,钢梁腹板撕裂成狭长缺口,如图9所示。最终,试件彻底破坏,试验结束。最终破坏模式如图10所示。



图5 交叉斜撑焊缝裂痕

Fig.5 Weld cracks in cross diagonal brace



图6 箱翼缘焊缝断裂

Fig.6 Weld fracture in box flange

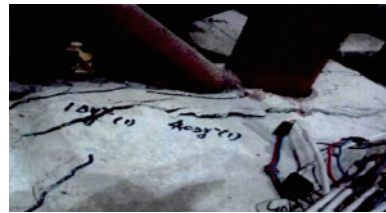


图7 混凝土板横向折断

Fig.7 Transverse fracture of concrete slab

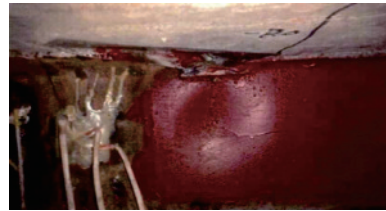


图8 钢箱梁腹板鼓曲

Fig.8 Web buckling of steel box girder



图9 钢箱梁腹板撕裂缺口

Fig.9 Tear in the web of steel box girder



图10 节点最终破坏形态

Fig.10 Final failure mode of joints

2 试验结果与分析

2.1 荷载-位移滞回曲线

针对试验节点建立了 ABAQUS 有限元模型, 并对模型结果进行了对比验证。荷载-位移曲线如图 11 所示。

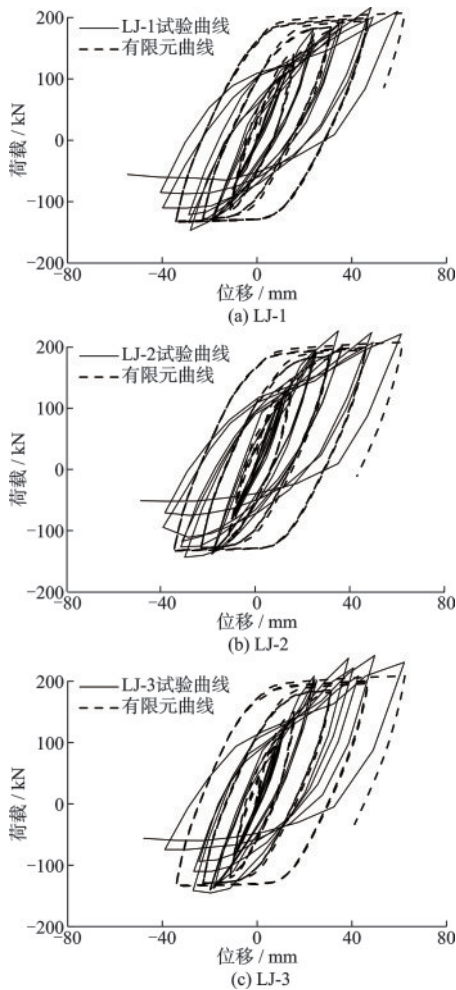


图 11 荷载-位移滞回曲线

Fig.11 Load-displacement hysteresis curves

各节点试件的滞回曲线均呈现饱满梭形, 滞回环面积较大, 表明 3 种核心区节点的耗能和变形能力良好。在屈服前期, 曲线与坐标轴围成面积小, 耗能能力较小, 屈服后, 节点产生较大残余变形, 与坐标轴围成的面积较大, 塑性耗能能力好。到达塑性加载阶段后, 节点内的混凝土发生损伤, 产生明显裂缝, 滞回曲线面积不断增大。继续位移加载, 节点处加强环与钢箱梁翼缘间的焊缝断裂, 混凝土板折断, 梁腹板撕裂。试件的滞回曲线有一定程度的捏缩, 形状逐渐转变为弓形, 残余变形在卸载过程中也随着位移加载增大, 正反向承载力和刚度发

生明显退化。

节点核心区构造对节点滞回曲线影响较大。LJ-3 节点相较于 LJ-1、LJ-2 节点, 滞回曲线下降段更陡, 峰值后阶段变形能力更强。总体上, 滞回曲线饱满程度呈现出以下规律: 横隔板 > 交叉斜撑 > 单肢斜撑, 表明节点核心区采用越对称的构件对试件在低周往复荷载下的表现更有利。

与试件 LJ-2 相比, LJ-3 试件的正向承载力更高, 下降段斜率更加缓和, 变形能力有所上升。分析其原因为 LJ-3 节点传力更加均匀, 在一定程度上减轻了节点核心区周围混凝土的损伤, 承载能力和耗能能力均有所提升。

2.2 骨架曲线

不同节点核心区构造的各节点骨架曲线与有限元对比如图 12 所示, 三类节点试件的荷载-位移骨架曲线对比如图 13 所示。

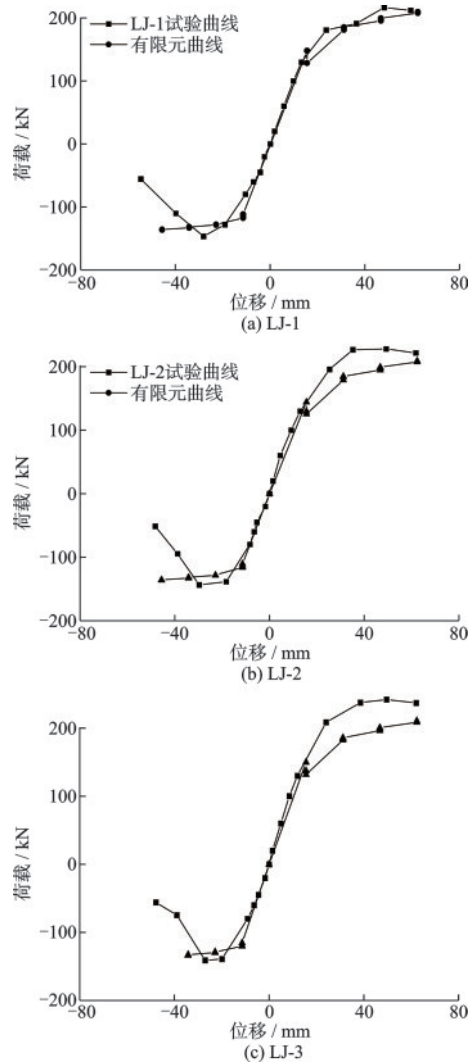


图 12 荷载-位移骨架曲线

Fig.12 Load-displacement skeleton curves

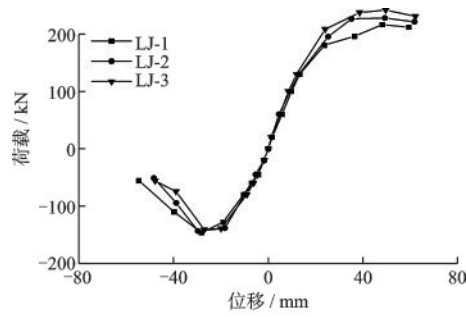


图13 荷载—位移骨架曲线

Fig.13 Load-displacement skeleton curves

由于翼缘板混凝土的拉压性能存在差异,该类反向承载力较小,在反向下阶段相比正向时的塑性表现较差。

随着节点核心区构造强度的增强,正向承载力、极限位移和塑性均有所提高。因此,在优化和设计中,需要充分考虑构造的强度和稳定性,确保结构正向承载能力和变形能力充分发挥。

3 有限元参数分析

为了研究节点核心区构造是否对称以及核心区不同构造形式对抗震性能的影响,在已有节点基础上,通过优化核心区构造,设计了三种不同的四肢钢管混凝土格构柱-组合箱梁节点,分别为JD-1“焊接球节点”、JD-2“交叉相贯钢管节点”和JD-3“交叉槽钢节点”。利用ABAQUS有限元软件对其进行数值分析,并进行了优化设计。由于原试验中LJ-1为非对称构造形式,LJ-3为对称构造形式,因此选取LJ-1与LJ-3和新构造形式的节点进行对比分析。

3.1 节点核心区构造

“焊接球节点”采用D112×5焊接球与Φ40×3钢管焊接而成;交叉相贯钢管节点采用20#无缝钢管焊接成的25°平面“X”型交叉构件与两侧柱肢焊接;而交叉槽钢节点则由两个相错的40×40×10×10 C型钢与柱肢焊接而成。各节点核心区具体的构造如图14~图16所示。

3.2 滞回曲线

获取了针对不同核心区形式节点的荷载—位移滞回曲线,将滞回曲线置于图中进行对比分析如图17所示。

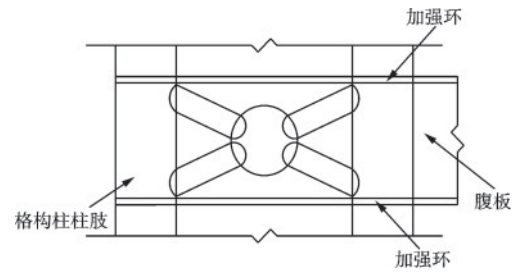


图14 核心焊接球节点

Fig.14 Core welded ball joint

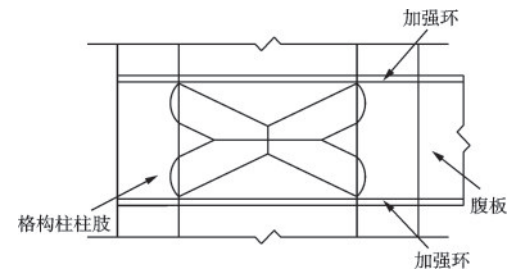


图15 交叉相贯钢管节点

Fig.15 Cross-intersecting steel tube joint

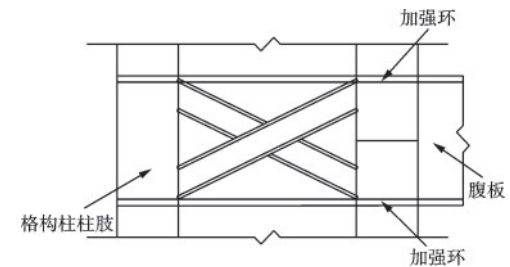


图16 交叉槽钢节点

Fig.16 Cross-channel steel joint

以上几种节点模型的滞回曲线均饱满,具有良好的耗能性能。相对于LJ-1而言,JD-3的滞回曲线略显收缩,说明其耗能性能略逊于LJ-1,原因是连接核心区高度较低,导致钢管倾斜角度偏小,连接的钢管尺寸较小,在连接处易出现应力集中现象,不利于抗震耗能。

JD-2的滞回曲线更饱满,耗能能力更强,优于JD-1和LJ-1,说明提高节点对称性有助于提升结构的抗震耗能能力。

JD-2的滞回曲线前段与LJ-1相似,但在3倍屈服位移后略显收缩。这是由于JD-2的连接构造形式中,连接钢管是相贯焊接成一个整体,在传力过程中会产生局部屈曲,随着加载位移的增加,降低了节点的塑性耗能能力。在工程实际中,应避免采用这种构造。与LJ-1相比,JD-1的滞回曲线饱满程度基本相当,因为两者传力路径相似,均具有良好的耗能能力,优于其他节点构造形式。在工程设计中,可采用此思路进行优化。

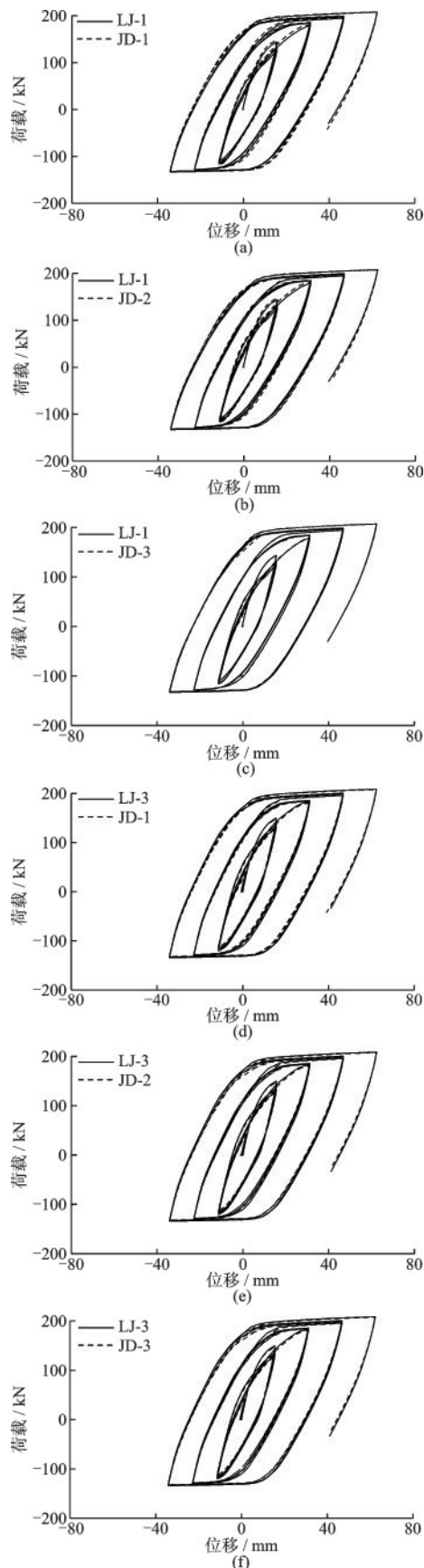


图 17 不同核心区形式荷载—位移滞回曲线对比
 Fig.17 Comparison of load-displacement hysteresis curves for different core region configurations

3.3 刚度退化

节点的刚度退化可以用割线刚度 K_i 表示:

$$K_i = \frac{|\pm F_{i\max}|}{|\pm \Delta_{i\max}|} \quad (1)$$

式中, $F_{i\max}$ 为每一级循环下正负峰值荷载的绝对值; $\Delta_{i\max}$ 为相应挠度的绝对值。

由图 18 可知,不同类别节点的刚度退化规律基本相同,初期加载时各节点的刚度退化速度较快,但随着位移增加,退化速度逐渐减缓。在正向加载下,各节点下部的钢板受拉力并传递至肢柱,不同梁柱连接形式会对结构刚度产生一定影响,因为它们各自传力路径和对肢柱约束的影响不同。但由于下加强板的存在,有效约束了肢柱和梁连接处的鼓曲变形,因此各种节点的刚度退化差异较小,随着加载位移的增加趋于一致。在反向加载下,各类节点的刚度退化速度都较快,因为此时钢筋混凝土板主要受拉力,对结构刚度影响最大,在刚度退化过程中起主导作用,其开裂加剧了混凝土的刚度退化,提前使钢筋进入塑性状态。

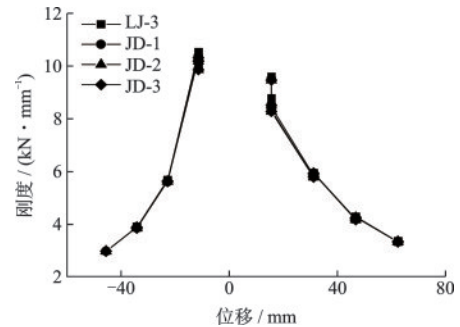


图 18 不同核心区构造节点的刚度退化曲线
 Fig.18 Stiffness degradation curves of structural joints for different core region configurations

3.4 变形恢复能力

每级加载残余变形率是一种用来比较结构变形恢复能力的指标。它的定义是卸载到初试状态的残余变形与最大荷载下的变形之比,其表达式为:

$$\gamma_i = \frac{\Delta_{ir}}{\Delta_{i\max}} \quad (2)$$

式中, Δ_{ir} 为该循环中卸载至力为零时残余变形; $\Delta_{i\max}$ 为最大荷载时的变形。

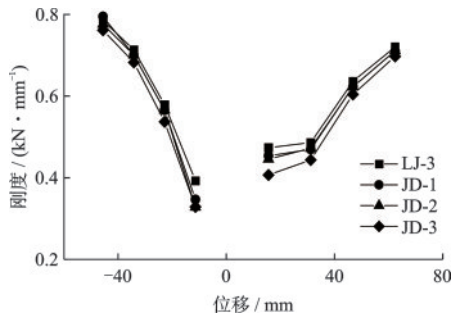


图19 不同核心区构造节点残余变形率-位移曲线

Fig.19 Residual deformation rate-displacement curves of structural joints for different core region configurations

随着加载位移的增加,各节点的残余变形率逐渐增大。这是因为在加载过程中,混凝土会不断受到应力作用而累积损伤,钢材也会发生不同程度地屈曲并进入塑性阶段。在试验中,各类节点的残余变形率均超过0.6,表现出了良好的塑性性能。

4 结 论

采用低周往复试验和有限元数值分析对不同核心区构造下的四肢钢管混凝土格构柱-钢箱梁节点进行了分析。探讨了不同核心区节点的荷载一位移滞回曲线、刚度退化和变形恢复能力,对比分析了节点核心区构造对其抗震性能的影响。得出了以下结论:

(1)经过对比分析,发现类横隔板式对称构造形式节点塑性耗能能力优于其他节点。节点核心区的对称性会影响四肢钢管混凝土格构柱-钢箱梁节点的滞回曲线和骨架曲线的最大峰值。随着核心区对称性的增加,节点的荷载一位移滞回曲线更加饱满,节点的塑性耗能能力也相应增强。

(2)类横隔板的对称构造可以提高节点传力的均匀性,并减小节点的刚度退化。改变节点核心区构造可以显著提升节点的塑性性能,因为核心区在结构受力过程中整体性较优。而在原有核心区构造下改变构件形式和种类对节点的影响相对较小,因为其并未改变原始结构的根本受力特征,但仍可略微提升结构的塑性性能。因此,为提高格构柱节点的抗震性能,需要采用核心区传力均匀的隔板构造,以使滞回曲线更加饱满,提高节点的耗能能力。

(3)改变钢管混凝土格构式柱-组合箱梁连接节点的核心区结构形式对残余变形的影响不大。在节点加载后期,各节点产生了较大的残余变形率,

并表现出良好的塑性变形能力。

参考文献:

- [1] 惠存,李永刚,李克,等.多灾耦合作用下钢管混凝土柱承载性能研究进展[J]. 防灾减灾工程学报,2022,42(2):259-268.
Hui C, Li L G, Li K, et al. Investigation on the load bearing capacity of concrete filled steeltube columns under the couple of multiple disasters [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2022, 42(2): 259-268. (in Chinese)
- [2] 马江萍,徐莹璐,张驰.钢框架侧板加强型梁柱节点滞回性能研究[J]. 防灾减灾工程学报,2018,38(2):336-344.
Ma J P, Xu Y L, Zhang C. Study on the hysteretic behavior of side plate reinforced beam-to-column connections in steel frame [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2018, 38(2): 336-344. (in Chinese)
- [3] 庞瑞,王璐,倪红梅,等.混凝土空心楼盖板柱增强节点抗震性能试验研究[J]. 防灾减灾工程学报,2020,40(6):919-928.
Pang R, Wang L, Ni H M, et al. Experimental study on the seismic behavior of strengthened RC slab-column connections in flate plate structures [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2020, 40(6): 919-928. (in Chinese)
- [4] 赵鹤,陶慕轩,聂鑫,等.竖向承重与水平抗侧相分离的组合结构体系在地震作用下的受力机理分析[J]. 建筑结构学报,2021,42(8):13-24.
Zhao H, Tao M X, Nie X, et al. Analysis of the force mechanism of a composite structural system with vertical load-bearing and horizontal lateral resistance separated under earthquake action [J]. Journal of Building Structures, 2021, 42(8): 13-24. (in Chinese)
- [5] 甄伟,张磊,丁然,等.组合抗侧体系在大高宽比和长宽比超高层钢结构建筑中的应用与试验研究[J]. 建筑结构学报,2023,44(4):74-86.
Zhen W, Zhang L, Ding R, et al. Application and experimental study of composite lateral resistance system in high rise steel structure buildings with high aspect to aspect ratio and aspect to aspect ratio [J]. Journal of Building Structures, 2023, 44(4): 74-86. (in Chinese)
- [6] 韩重庆,邵棚,许清风,等.受火后加固钢筋混凝土偏压格构柱受力性能试验研究[J]. 建筑结构学报,2021,42(1):169-178.
Han C Q, Shao P, Xu Q F, et al. Experimental study

- on the mechanical performance of reinforced concrete eccentric compression lattice columns strengthened after fire [J]. *Journal of Building Structures*, 2021, 42 (1): 169-178. (in Chinese)
- [7] 孟凡涛, 阮兴群, 赵建锋, 等. 密缀板耗能格构柱加固既有框架结构的简化分析及工程应用[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2021, 52(3): 1004-1016.
Meng F T, Ruan X Q, Zhao J F, et al. Simplified analysis and engineering application of energy dissipating lattice column strengthening of existing frame structures with dense panel[J]. *Journal of Central South University (Natural Science Edition)*, 2021, 52(3): 1004-1016. (in Chinese)
- [8] 黄志, 熊陆增, 蒋丽忠, 等. 四肢钢管混凝土格构柱地震损伤模型及试验研究[J]. *应用力学学报*, 2022, 39(4): 717-725.
Huang Z, Xiong L Z, Jiang L Z, et al. Seismic damage model and experimental study of concrete filled steel tube lattice columns with four limbs [J]. *Journal of Applied Mechanics*, 2022, 39(4): 717-725. (in Chinese)
- [9] 黄志, 郭汉文, 张柏丑, 等. 钢管混凝土四肢格构柱抗震性能试验研究及有限元分析[J]. *自然灾害学报*, 2022, 31(5): 65-72.
Huang Z, Guo H W, Zhang B C, et al. Experimental study and finite element analysis on seismic performance of concrete filled steel tubular four limb lattice columns[J]. *Journal of Natural Disasters*, 2022, 31(5): 65-72. (in Chinese)
- [10] 邹艳花, 陈伯望, 文洪. 四肢钢管混凝土格构柱耗能能力有限元分析[J]. *建筑结构*, 2018, 48(24): 85-90.
Zou Y H, Chen B W, Wen H. Finite element analysis of energy dissipation capacity of concrete filled steel tubular lattice columns with four limbs[J]. *Building Structure*, 2018, 48(24): 85-90. (in Chinese)
- [11] 王先铁, 李博凡, 侯新宇, 等. 格构式钢管-钢管混凝土构件轴压性能试验研究[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2022, 49(1): 57-66.
Wang X T, Li B F, Hou X Y, et al. Experimental study on axial compression performance of lattice steel reinforced concrete filled steel tube components[J]. *Journal of Hunan University (Natural Science Edition)*, 2022, 49(1): 57-66. (in Chinese)
- [12] 袁辉辉, 吴庆雄, 陈宝春, 等. 平缀管式钢管混凝土格构柱拟动力试验研究[J]. *工程力学*, 2019, 36(7): 67-78.
Yuan H H, Wu Q X, Chen B C, et al. Pseudo dynamic experimental study on flat battened concrete filled steel tube lattice columns[J]. *Engineering Mechanics*, 2019, 36(7): 67-78. (in Chinese)
- [13] 欧智菁, 陈盛富, 袁辉辉, 等. 变截面平缀管式钢管混凝土格构柱的抗震性能[J]. *重庆大学学报*, 2018, 41(1): 17-29.
Ou Z J, Chen S F, Yuan H H, et al. Seismic performance of variable cross-section flat battened steel tube concrete lattice columns[J]. *Journal of Chongqing University*, 2018, 41(1): 17-29. (in Chinese)
- [14] 欧智菁, 陈盛富, 吴庆雄, 等. 变截面钢管混凝土格构柱抗震性能试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2018, 39(3): 77-83.
Ou Z J, Chen S F, Wu Q X, et al. Experimental study on seismic performance of variable cross-section steel tube concrete lattice columns [J]. *Journal of Building Structures*, 2018, 39(3): 77-83. (in Chinese)
- [15] 高海峰. 装配式抗侧力钢格构柱抗震性能研究[D]. 北京: 北京建筑大学, 2021.
Gao H F. Research on seismic performance of prefabricated lateral force resistant steel lattice columns[D]. Beijing: Beijing University of Architecture, 2021. (in Chinese)
- [16] 刘敏. 格构式钢管混凝土构件的抗震性能及恢复力模型研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2022.
Liu M. Research on seismic performance and resilience model of latticed steel tube concrete members[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2022. (in Chinese)
- [17] Feng Y, He S, Jiang L, et al. Uneven settlement threshold of continuous beam pier based on analytic mapping relationship[J]. *Structure and Infrastructure Engineering*, 2021, 19(9): 1190-1204.
- [18] 欧智菁, 陈盛富, 吴庆雄, 等. 四肢变截面钢管混凝土格构柱恢复力模型计算方法[J]. *交通运输工程学报*, 2018, 18(5): 77-89.
Ou Z J, Chen S F, Wu Q X, et al. Calculation method for restoring force model of concrete filled steel tube lattice columns with variable cross-section in four limbs [J]. *Journal of Transportation Engineering*, 2018, 18(5): 77-89. (in Chinese)

(本文编辑:张艺)