



钢管混凝土L形柱-H型钢梁Z字形节点抗震性能研究

吴桐宇 刘学春 陈学森

SEISMIC BEHAVIOR OF Z-SHAPED JOINT CONNECTING H-BEAM AND L-SHAPED CONCRETE-FILLED STEEL TUBULAR COLUMN

WU Tong-yu, LIU Xue-chun, CHEN Xue-sen

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.6052/j.issn.1000-4750.2021.06.S016>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

带Z字形悬臂梁段拼接的装配式钢框架节点抗震性能试验研究

EXPERIMENTAL STUDY ON SEISMIC BEHAVIOR OF PREFABRICATED STEEL-FRAME-JOINTS WITH Z-SHAPED CANTILEVER-BEAM SPLICING

工程力学. 2017, 34(8): 31-41 <https://doi.org/10.6052/j.issn.1000-4750.2016.03.0220>

型钢混凝土L形柱空间角节点抗震性能分析

ANALYSIS ON SEISMIC PERFORMANCE OF STEEL REINFORCED CONCRETE L-SHAPED COLUMN SPACE CORNER JOINTS

工程力学. 2018, 35(5): 180-192 <https://doi.org/10.6052/j.issn.1000-4750.2017.01.0081>

PEC柱-异形钢梁框架中节点抗震性能试验研究

EXPERIMENTAL STUDY ON SEISMIC PERFORMANCE OF PEC COLUMN-SPECIAL SHAPED STEEL BEAM INNER-FRAME JOINTS

工程力学. 2020, 37(1): 126-134 <https://doi.org/10.6052/j.issn.1000-4750.2019.02.0046>

WCFT柱-钢梁节点抗震性能试验研究

EXPERIMENTAL RESEARCH ON SEISMIC PERFORMANCE OF WCFT COLUMN-STEEL BEAM JOINTS

工程力学. 2020, 37(12): 34-42 <https://doi.org/10.6052/j.issn.1000-4750.2020.02.0092>

一种改进型方钢管柱与钢梁连接节点抗震性能研究

THE SEISMIC PERFORMANCE OF AN IMPROVED SQUARE STEEL HOLLOW COLUMN TO STEEL BEAM JOINT

工程力学. 2019, 36(6): 164-174 <https://doi.org/10.6052/j.issn.1000-4750.2018.05.0275>

有缺陷的装配式混凝土梁柱节点抗震性能试验研究

EXPERIMENTAL STUDY ON THE SEISMIC BEHAVIOR OF PRECAST CONCRETE BEAM-COLUMN JOINTS WITH CONNECTION DEFECTS

工程力学. 2021, 38(11): 134-146, 159 <https://doi.org/10.6052/j.issn.1000-4750.2020.11.0788>



订阅号：面向读者



订阅号：面向作者

扫码关注微信公众号，获得更多资讯信息

文章编号: 1000-4750(2022)Suppl-0101-08

钢管混凝土 L 形柱-H 型钢梁 Z 字形节点抗震性能研究

吴桐宇, 刘学春, 陈学森

(北京工业大学, 北京市高层和大跨度预应力钢结构工程技术研究中心, 北京 100124)

摘 要: 对适用于装配式钢结构的钢管混凝土 L 形柱-H 型钢梁 Z 字形节点的抗震性能进行研究。建立并基于节点试验结果验证了 ABAQUS 有限元模型, 通过有限元分析获得了节点的荷载-位移曲线、骨架曲线、破坏模式和性能指标。结果表明: 设置腹板拼接板、增加梁高、减小上翼缘最外排螺栓与拼接区中心距离等措施, 能够提高节点的屈服荷载和峰值荷载; 增加翼缘高强度螺栓数量能够提高节点的滑移荷载, 但是会降低延性; 增加悬臂梁外伸距离, 可以提高滑移荷载、屈服荷载和峰值荷载, 减少翼缘连接的高强度螺栓数量需求。基于有限元结果, 验证了节点受弯承载力和极限受弯承载力计算公式的可靠性。

关键词: Z 字形节点; L 形柱; 梁柱连接; 悬臂梁段; 抗震性能

中图分类号: TU352.1+1; TU398+9 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2021.06.S016

SEISMIC BEHAVIOR OF Z-SHAPED JOINT CONNECTING H-BEAM AND L-SHAPED CONCRETE-FILLED STEEL TUBULAR COLUMN

WU Tong-yu, LIU Xue-chun, CHEN Xue-sen

(Beijing Engineering Research Centre of High-rise and Large-span Prestressed Steel Structures, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: The seismic behavior of Z-shaped joints connecting H-section beam and L-shaped concrete-filled steel tubular column for prefabricated steel structures were studied. The ABAQUS finite element model was established and validated based on the joint test results. The load-displacement curves, skeleton curves, failure mode and performance indicators of the joint were obtained by finite element analysis. According to the finite element results, adding web splice plates, increasing the beam section height or decreasing the distances between the outmost bolts and the splicing zone center can increase the yield load and peak load of the joints. Increasing the bolt number on the flange can improve the slip load of the joint, but may reduce the ductility performance. Increasing the overhang distance of cantilever beam can improve the slip load, yield load and peak load, and reduce the required bolt number for the flange connection. Based on the finite element results, the reliability of the calculation formulas for the joint flexural capacity and ultimate flexural capacity is verified.

Key words: Z-shaped joint; L-shaped column; beam-column connection; cantilever-beam; seismic performance

钢结构具有良好的抗震性能, 但钢结构梁柱节点可能发生震害^[1]。1994 年美国北岭地震和 1995 年日本阪神地震中钢结构梁柱节点的震害表明, 在钢结构抗震设计中需采用改进节点构造^[2-3]。工厂完成焊接、现场采用螺栓拼接是改进钢结构

梁柱节点的重要措施之一。张爱林等^[4]研究了方钢管混凝土柱-H 形钢梁螺栓连接节点的受力性能, 研究结果表明: 该类节点具有良好的延性性能和耗能能力。刘学春等^[5]研究了模块化装配式全螺栓连接节点的抗震性能, 验证了该类节点具

收稿日期: 2021-06-01; 修改日期: 2022-02-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(51978013)

通讯作者: 陈学森 (1990—), 男 (汉族), 河北保定人, 助理研究员, 工学博士, 主要从事钢结构研究 (E-mail: chenxuesen@bjut.edu.cn)。

作者简介: 吴桐宇 (1996—), 男 (汉族), 北京人, 硕士生, 主要从事钢结构设计与抗震研究 (E-mail: 857937957@qq.com);

刘学春 (1974—), 男 (汉族), 河北遵化人, 教授, 工学博士, 主要从大跨度预应力钢结构和装配式高层钢结构体系创新与应用研究 (E-mail: liuxuechun@bjut.edu.cn)。

有良好的延性和耗能能力。

近年来钢管混凝土柱应用逐渐增多^[6-7], 针对钢管混凝土柱与梁的连接, 本文提出一种钢管混凝土 L 形柱-H 型钢梁 Z 字形节点, 可实现现场全螺栓装配。并对该节点的抗震性能开展了数值模拟研究。

1 节点构造与设计

1.1 节点构造

提出的 Z 字形节点构造如图 1 所示, 由带悬臂梁段的钢管混凝土 L 形柱与上翼缘外伸式 H 型钢梁通过高强度螺栓拼接而成。悬臂梁段的加工及与钢管柱的焊接、H 型钢梁的加工和垂直加劲肋的焊接等均在工厂完成, 有利于焊接质量控制。现场装配时只需进行螺栓拼接, 可显著提高施工速度。

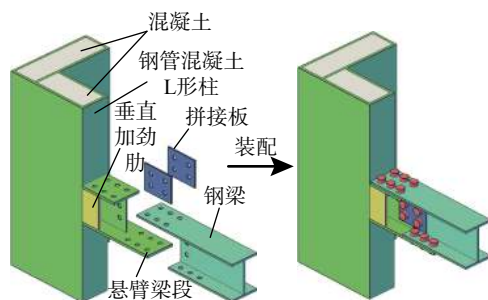


图 1 节点构造示意
Fig. 1 Construction of joint

1.2 节点设计

节点构造见图 2。柱为肢宽 150 mm、肢长 450 mm、壁厚 12 mm 的焊接 L 形钢管, 柱长 3300 mm, 内浇 C40 自密实混凝土; H 型钢梁截面为 194 mm×150 mm×6 mm×9 mm, 悬臂梁采用 197 mm×150 mm×6 mm×12 mm 焊接工字形钢, 梁端到柱中心线距离为 1950 mm。所有钢材均为 Q345B。采用 10.9 级 M20 高强度螺栓现场拼接, 采用直径 22 mm 标准孔, 按与钢梁等强原则确定基准节点螺栓数量。变化腹板拼接板、翼缘高强度螺栓数量、垂直加劲肋、H 型钢梁高度、悬臂梁外伸距离和上翼缘最外排螺栓与拼接区中心距离等参数, 共设计 15 个节点, 见表 1。

2 有限元分析

2.1 模型基本信息

采用 ABAQUS 软件建立各节点有限元模型, 如图 3 所示, 为了防止加载过程中发生应力集中

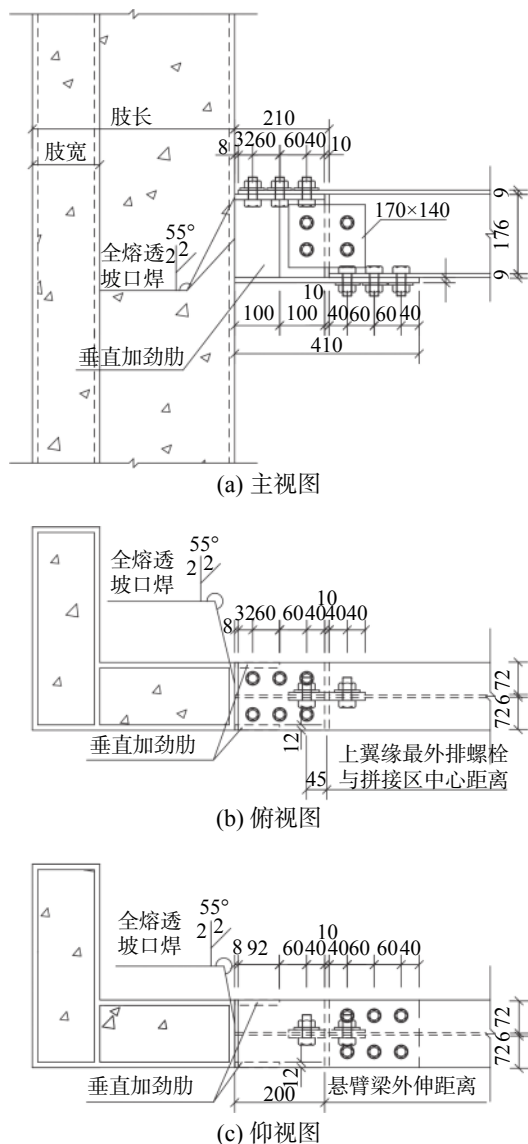


图 2 节点详图

Fig. 2 Details of the joint

现象, 梁端加载点处、柱顶部及底部各设置 12 mm 厚的刚性垫块, 并与相对应的钢材和混凝土绑定连接。在这三个刚性垫块的形心上耦合参考点, 柱底参考点处约束 X、Y、Z 向位移, 柱顶参考点处约束 X、Y 向位移。采用三折线等向强化模型, 泊松比取为 0.3, 其余材料性能见文献 [8]。在柱顶参考点处施加沿 Z 轴负向的 1000 kN 恒定压力, 在梁端参考点处依据美国抗震规范 ANSI/AISC 341-16^[9] 的加载制度施加沿 Z 轴的往复荷载。模型中约束钢梁 Y 向位移以避免侧向失稳。模型中的各部件均采用 C3D8R 单元, 节点受力关键区域加密网格。拼接区板件之间的抗滑移系数取为 0.3^[10], 螺栓帽与板件之间、螺栓杆与孔壁之间的抗滑移系数取为 0.05^[11], 钢管与混凝土之间的抗滑移系数取为 0.2^[12], 接触对均定义法向硬接触。

表 1 节点编号和参数

Table 1 Number and parameters of the joints

节点 编号	腹板 拼接板	翼缘 高强螺 栓数量	垂直 加劲肋	H型钢 梁高/mm	悬臂 梁外伸 距离/mm	上翼缘最外排 螺栓与拼接区 中心距离/mm
NS1	√	6	√	194	200	45
NS2	—	6	√	194	200	45
NS3	—	8	√	194	260	45
NS4	—	10	√	194	320	45
NS5	√	8	√	194	260	45
NS6	√	10	√	194	320	45
NS7	√	6	—	194	200	45
NS8	√	6	√	244	200	45
NS9	√	6	√	294	200	45
NS10	—	6	√	194	400	45
NS11	√	6	√	194	400	45
NS12	√	8	√	194	400	45
NS13	√	10	√	194	400	45
NS14	√	6	√	194	250	95
NS15	√	6	√	194	300	145

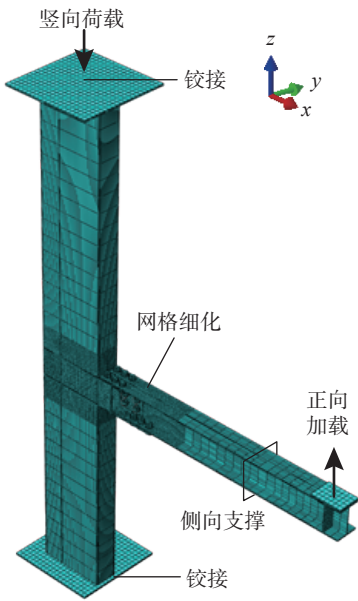


图 3 有限元模型

Fig. 3 Finite element model

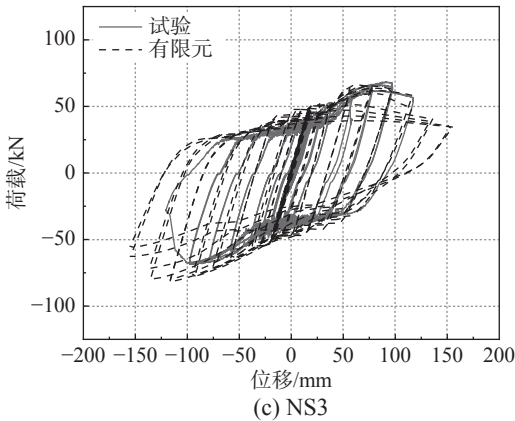
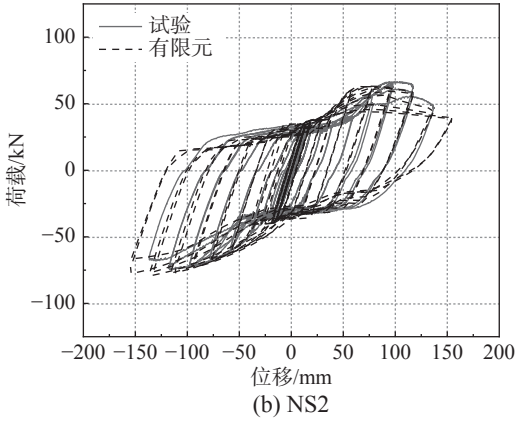
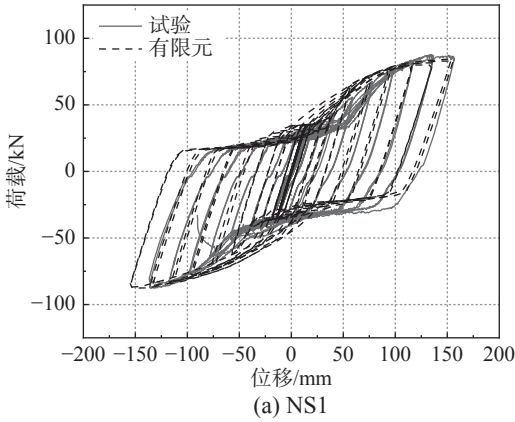
2.2 荷载-位移曲线

有限元分析得到的荷载-位移曲线见图 4，其中，与已有节点拟静力试验结果对比见图 4(a)~图 4(c)^[8]。有限元分析结果和试验结果吻合良好，证实有限元模拟的可靠性。依据分析结果，该节点具有较好的承载能力、延性和耗能能力，由于螺栓的滑移，曲线呈现一定的捏拢，但具有良好的变形能

力；随翼缘高强度螺栓数量的增加，荷载-位移曲线更加饱满，承载力提高；对比模型 NS1~NS6 的荷载-位移曲线，设置腹板拼接板的节点在加载后期承载力退化不明显，承载能力更大；增加梁高、增加悬臂梁外伸距离和减小翼缘最外排螺栓与拼接区中心距离，节点的承载力增加。

2.3 骨架曲线

各节点的骨架曲线如图 5 所示。由图可知，各节点正向和负向的骨架曲线不对称，正向加载时，荷载下降的较快。整个加载期间，节点经历了弹性阶段、滑移阶段、承载力强化阶段和弹塑性阶段。



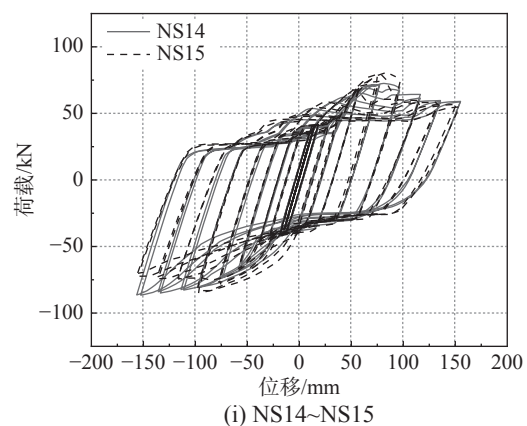
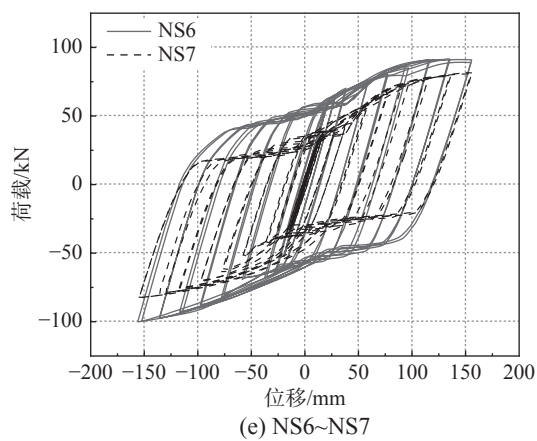
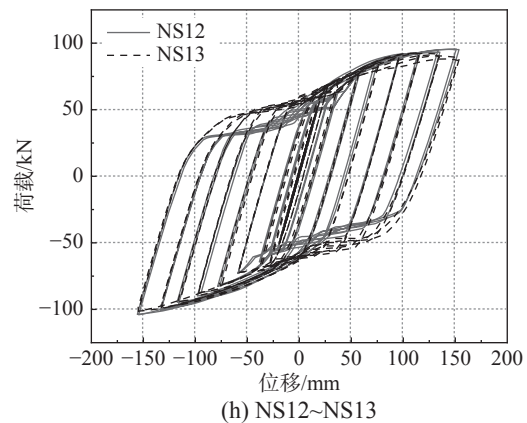
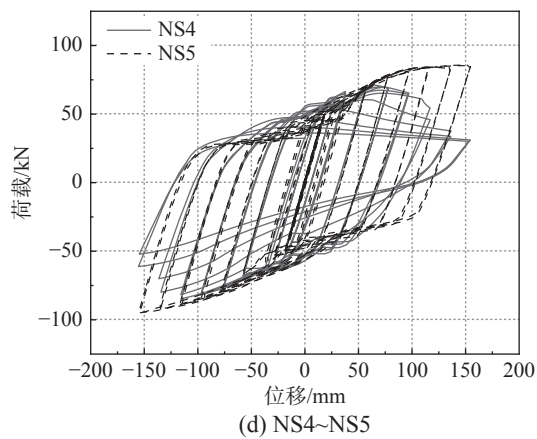


图 4 荷载-位移曲线

Fig. 4 Load-displacement curve

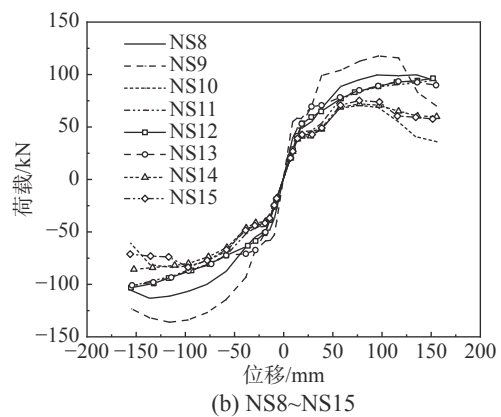
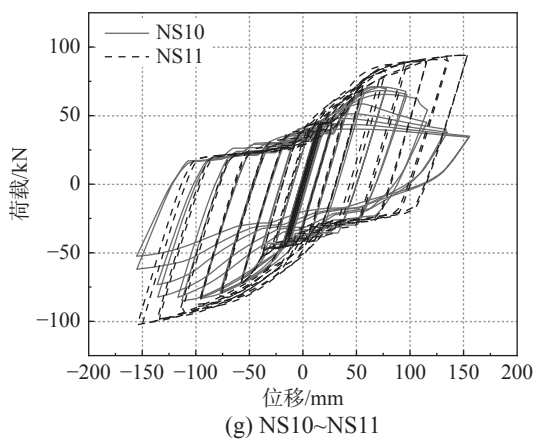
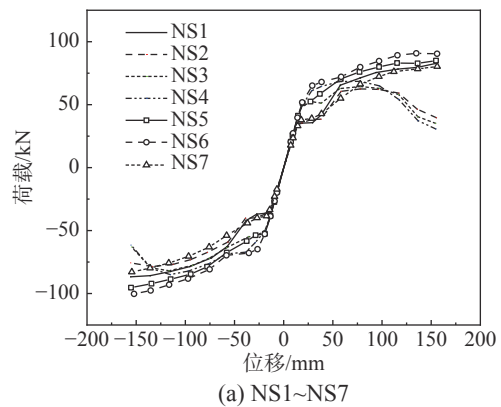
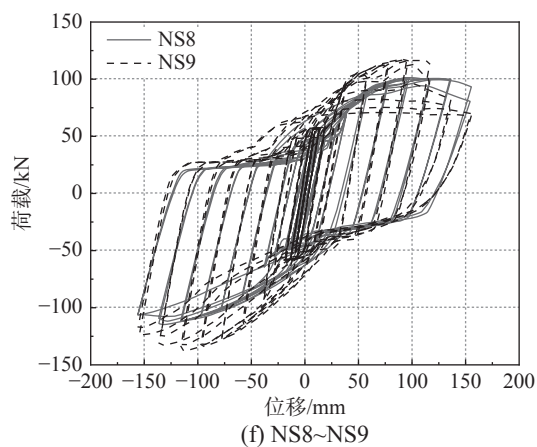


图 5 骨架曲线

Fig. 5 Skeleton curve

2.4 破坏模式

NS1~NS3 节点的试验与有限元失效模式对比如图 6 所示。NS4~NS15 节点的破坏模式如图 7 所示。由图可知, 试验与有限元破坏模式基本一致, 两者应力及变形较大部位也基本一致。

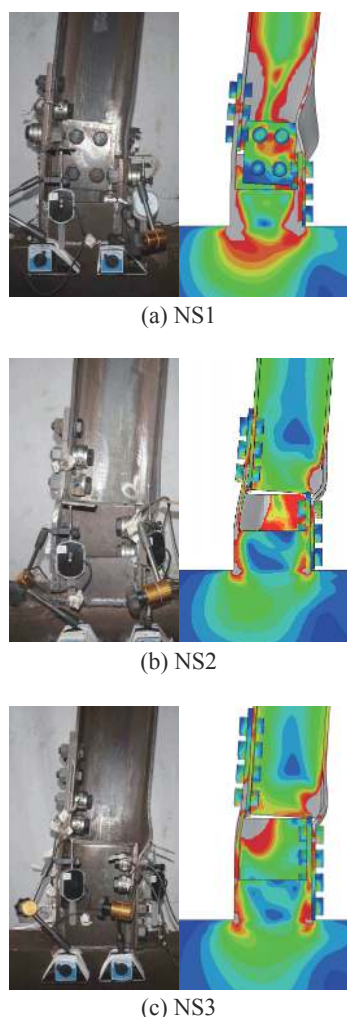


图 6 NS1~NS3 节点试验与有限元失效模式对比
Fig. 6 Comparison between test and finite element failure modes of NS1~NS3 joints

对比节点的有限元破坏模式, 节点均在拼接区外侧 H 型钢梁发生较大屈曲变形。没有腹板拼接板和增加梁高的节点在拼接区外侧翼缘发生较大屈曲, 拼接区悬臂梁腹板发生屈曲, 但是悬臂梁根部屈服面积较小; 随翼缘高强度螺栓数量的增加, 节点拼接区屈服面积变小; 设置垂直加劲肋, 可以减小悬臂梁根部两侧的屈服面积; 增加悬臂梁外伸距离, 悬臂梁屈服面积变大; 增加上翼缘最外排螺栓与拼接区中心距离, 拼接区外侧翼缘屈曲变大, 悬臂梁段根部屈服面积减小。

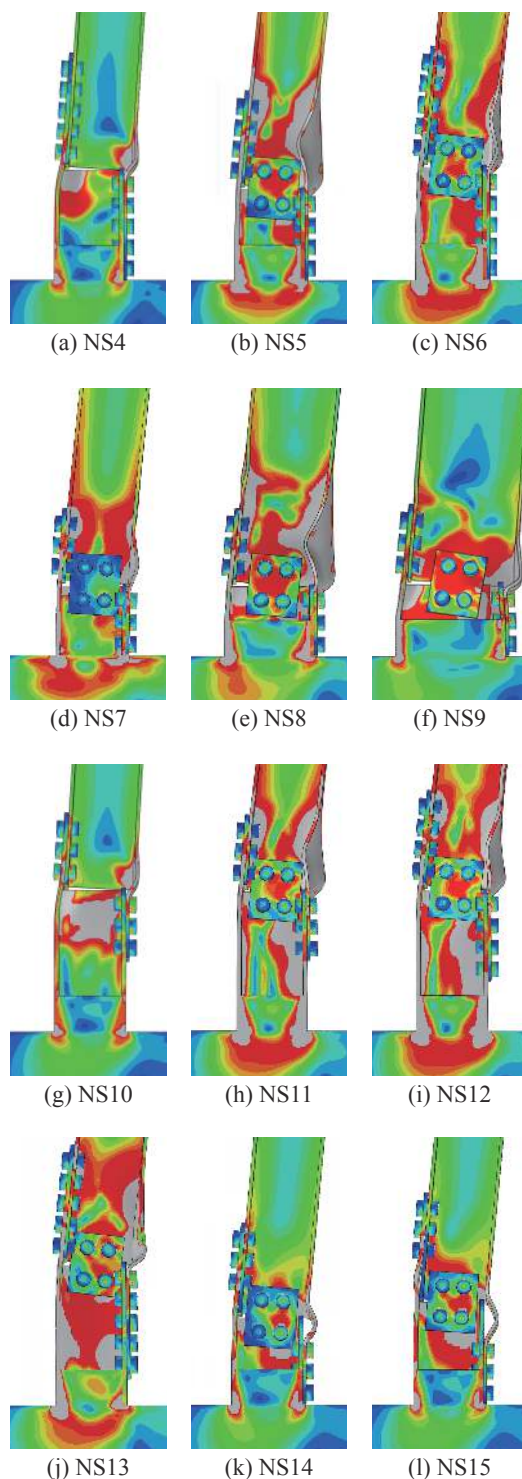


图 7 NS4~NS15 节点破坏模式
Fig. 7 Failure modes of NS4~NS15 joints

2.5 性能指标

表 2 列出各节点性能指标, P_s 和 Δ_s 为节点开始滑移时的荷载和位移, P_y 和 Δ_y 为节点屈服阶段开始时的荷载和位移, P_u 为节点峰值荷载, Δ_u 为节点破坏时的极限位移, $\mu = \Delta_u / \min\{\Delta_s, \Delta_y\}$ 为延性系数, $\theta_u = \Delta_u / L$ 为极限转角, 其中 $L = 1950 \text{ mm}$ 。

根据表 2, 设置腹板拼接板能够显著提高节点

表 2 节点主要性能指标
Table 2 Primary performance indicators of the joints

节点编号	方向	滑移荷载 P_s/kN	滑移位移 Δ_s/mm	屈服荷载 P_y/kN	屈服位移 Δ_y/mm	峰值荷载 P_u/kN	极限位移 Δ_u/mm	延性系数 μ	极限转角 $\theta_u/(\% \text{rad})$
NS1	正向	34.40	13.92	68.98	69.44	83.04	155.71	11.19	7.99
	负向	35.01	13.87	71.47	73.38	86.65	155.70	11.23	7.98
NS2	正向	35.49	14.10	41.14	40.03	62.57	125.89	8.93	6.46
	负向	36.24	14.10	60.37	60.22	78.50	155.74	11.04	7.99
NS3	正向	48.61	18.15	52.37	29.18	64.54	120.44	6.64	6.18
	负向	49.56	19.18	58.03	44.07	81.83	147.11	7.67	7.54
NS4	正向	49.16	18.32	61.58	29.52	68.64	109.45	5.98	5.61
	负向	49.44	18.20	67.36	42.76	84.89	143.39	7.88	7.35
NS5	正向	51.22	19.14	63.92	46.10	85.09	154.73	8.08	7.93
	负向	52.46	19.23	67.19	57.47	95.28	155.38	8.08	7.97
NS6	正向	65.20	28.94	69.06	42.94	90.90	155.85	5.39	7.99
	负向	64.73	26.70	69.14	52.79	100.21	152.34	5.71	7.81
NS7	正向	37.97	17.69	58.24	63.35	80.47	155.92	8.82	8.00
	负向	38.36	17.56	57.90	66.08	82.81	154.62	8.80	7.93
NS8	正向	48.07	14.10	74.24	45.51	98.93	155.45	11.03	7.97
	负向	48.94	14.08	87.74	57.79	114.17	155.83	11.07	7.99
NS9	正向	57.37	13.56	98.24	38.89	116.79	126.22	9.31	6.47
	负向	58.90	13.37	107.09	50.60	136.98	154.51	11.55	7.92
NS10	正向	37.88	14.10	49.49	40.54	69.78	109.03	7.73	5.59
	负向	38.07	14.10	68.65	57.12	84.71	145.50	10.32	7.46
NS11	正向	44.67	18.01	77.95	64.02	94.04	153.74	8.54	7.88
	负向	45.38	17.92	79.63	72.24	101.30	150.39	8.39	7.71
NS12	正向	52.53	19.18	72.14	51.64	95.58	151.99	7.93	7.79
	负向	52.09	19.18	74.33	60.18	104.10	155.16	8.09	7.96
NS13	正向	68.56	28.42	71.20	42.01	92.60	155.16	5.46	7.96
	负向	68.18	28.62	72.65	51.39	101.79	154.07	5.38	7.90
NS14	正向	37.54	14.10	54.70	45.71	71.21	132.53	9.40	6.80
	负向	37.16	14.10	68.59	63.75	86.61	152.14	10.79	7.80
NS15	正向	38.16	14.10	58.03	47.47	74.38	110.88	7.86	5.69
	负向	37.78	14.10	67.84	58.03	84.58	155.97	11.06	8.00

的屈服荷载和峰值荷载,可见腹板拼接是必须的;增加翼缘高强度螺栓数量能够提高节点的滑移荷载,但是会降低延性,不过降低后延性依然很大,远远满足抗震要求;增加梁高能够明显提高节点的承载能力,正、负向承载能力差距变大;增加悬臂梁外伸距离,可以提高滑移荷载、屈服荷载和峰值荷载,减少翼缘高强度螺栓需求;增加上翼缘最外排螺栓与拼接区中心距离,会降低屈服荷载和峰值荷载;有、无垂直加劲肋对节点抗震性能的影响不大。

各节点延性系数均大于 5,节点极限转角均大于 0.05 rad,满足美国抗震规范对特殊设防框架的节点延性要求^[9],表明节点具有良好的延性。

3 公式验证

3.1 力学模型

节点计算简图见图 8,梁上、下翼缘螺栓数相同。

3.2 受弯承载力

设计中,梁翼缘高强度螺栓连接的滑移承载力 M_{S1} 可按式 (1) 计算,螺栓孔削弱处梁净截面折算抗弯承载力 M_{S2} 可按式 (2) 计算,式中: l 为梁的计算跨度; l_3 为梁拼接区中心线间的距离; n_{bf} 为梁翼缘拼接一侧的高强度螺栓个数; P 为一个高强度螺栓的预拉力; μ 为抗滑移系数; h 为梁截面高; b 为梁翼缘宽; d_0 为螺栓孔直径; t_f 为梁翼缘厚; f 为钢材的抗拉强度设计值。

4 结论

提出一种钢管混凝土 L 形柱-H 型钢梁 Z 字形节点, 基于试验验证的有限元模型开展了 15 个节点抗震性能的参数分析, 获得如下结论:

(1) 整个加载期间, 节点经历了弹性阶段、滑移阶段、承载力强化阶段和弹塑性阶段。各节点延性系数均大于 5, 极限转角均大于 0.05 rad, 各节点具有良好的延性。

(2) 设置腹板拼接板、增加翼缘高强度螺栓数量、增加梁高、增加悬臂梁外伸距离和减小上翼缘最外排螺栓与拼接区中心距离, 对节点的承载能力有一定的提高。其中, 腹板拼接板和梁高对节点承载能力影响较大; 垂直加劲肋对节点抗震性能影响不大。

(3) 节点发生破坏时, 均在拼接区外侧 H 型钢梁产生较大屈曲变形。没有腹板拼接板和增加梁高的节点, 腹板发生屈曲变形, 屈曲区域变大。

(4) 节点受弯承载力和极限受弯承载力模拟值与设计公式值进行了对比, 验证了公式的可靠性。

参考文献:

- [1] Luis F Ibarra, Helmut Krawinkler. Global collapse of frame structures under seismic excitations [R]. Stanford, California: The John A. Blume Earthquake Engineering Research Center, 2005.
- [2] Miller D K. Lessons learned from the Northridge earthquake [J]. *Engineering Structures*, 1998, 20(4/5/6): 249 — 260.
- [3] Nakashima M, Inoue K, Tada M. Classification of damage to steel buildings observed in the 1995 Hyogoken-Nanbu earthquake [J]. *Engineering Structures*, 1998, 20(4/5/6): 271 — 281.
- [4] 张爱林, 孙勇, 刘学春, 詹欣欣, 李超. 方钢管混凝土柱-H 型钢梁螺栓连接节点受力性能试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2017, 38(11): 64 — 73.
Zhang Ailin, Sun Yong, Liu Xuechun, Zhan Xinxin, Li Chao. Experimental study on mechanical performance of concrete-filled square steel tubular columns to H-section steel beam bolted connection [J]. *Journal of Building Structures*, 2017, 38(11): 64 — 73. (in Chinese)
- [5] Liu X C, Zhan X X, Pu S H, et al. Seismic performance study on slipping bolted truss-to-column connections in modularized prefabricated steel structures [J]. *Engineering Structures*, 2018, 163: 241 — 254.
- [6] 张伟杰, 廖飞宇, 李威. 带圆弓形脱空缺陷的钢管混凝土构件在压弯扭复合受力作用下的滞回性能试验研究[J]. *工程力学*, 2019, 36(12): 121 — 133.
Zhang Weijie, Liao Feiyu, Li Wei. Experimental study on the cyclic behavior of concrete-filled steel tubular (CFST) members with circular-segment gaps under combined compression-bending-torsion loading [J]. *Engineering Mechanics*, 2019, 36(12): 121 — 133. (in Chinese)
- [7] 徐礼华, 宋杨, 刘素梅, 李彪, 余敏, 周凯凯. 多腔式多边形钢管混凝土柱偏心受压承载力研究[J]. *工程力学*, 2019, 36(4): 135 — 146.
Xu Lihua, Song Yang, Liu Sumei, Li Biao, Yu Min, Zhou Kaikai. Study on the eccentric compressive bearing capacity of polygonal multi-cell concrete filled steel tubular columns [J]. *Engineering Mechanics*, 2019, 36(4): 135 — 146. (in Chinese)
- [8] 刘学春, IM MYONG HAK, 陈学森, 余少乐, 潘钧俊. L 形钢管混凝土柱-H 型钢梁 Z 字形拼接节点抗震性能研究[J]. *建筑结构*, 2021, 51(23): 61 — 68.
Liu Xuechun, IM MYONG HAK, Chen Xuesen, Yu Shaole, Pan Junjun. Seismic behavior of Z-shaped splicing joint between concrete-filled L-shaped steel tubular column and H-section beam [J]. *Building Structure*, 2021, 51(23): 61 — 68. (in Chinese)
- [9] ANSI/AISC 341-16, Seismic provisions for structural steel buildings [S]. Chicago: American Institute of Steel Construction, 2016.
- [10] Liu X C, He X N, Wang H X, et al. Bending-shear performance of column-to-column bolted-flange connections in prefabricated multi-high-rise steel structures [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2018, 145: 28 — 48.
- [11] Liu X C, Cui F Y, Zhan X X, et al. Seismic performance of bolted connection of H-beam to HSS-column with web end-plate [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2019, 156: 167 — 181.
- [12] 刘威. 钢管混凝土局部受压时的工作机理研究 [D]. 福州: 福州大学, 2005.
Liu Wei. Research on mechanism of concrete-filled steel tubes subjected to local compression [D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2005. (in Chinese)
- [13] T/CSCS 012—2021, 多高层建筑全螺栓连接装配式钢结构技术标准 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2021.
T/CSCS 012—2021, Technical standard for fully bolted assembled steel structures of multi-high-rise storey buildings [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2021. (in Chinese)