

集成装配式盒子建筑连接节点 抗震性能研究

许峰,张增辉,许伟,王春刚

(沈阳建筑大学土木工程学院,辽宁 沈阳 110168)

摘要 目的 研究一种新型集成装配式盒子建筑角件连接节点,解决节点连接对现场施工操作空间要求较高的局限性。方法 应用 ABAQUS 有限元软件建立精细化节点模型,在验证数值模拟方法有效的基础上,研究节点的承载力、刚度、变形能力、滞回曲线及耗能能力,分析不同轴压比、连接角件厚度、卷边高厚比对节点失效模式及抗震性能的影响。结果 节点的失效模式表现为靠近节点域天花板梁和地板梁梁端形成塑性铰,梁端翼缘发生鼓曲破坏,模块柱与连接角件均产生部分区域塑性变形,但未发生破坏,具有良好的抗震性能,符合“强柱弱梁,强节点弱构件”的设计原则。节点的抗震性能受轴压比影响较大,通过改变连接角件厚度和增设卷边可以有效提高节点的承载能力和抗震性能。结论 建议轴压比控制在 0.3 以内;连接角件厚度不宜低于 12 mm;增设卷边可以提高连接角件翼缘板的稳定性,防止角件翼缘发生屈曲变形。

关键词 集成装配式;盒子建筑;有限元;连接节点;抗震性能

中图分类号 TU391

文献标志码 A

引用格式:许峰,张增辉,许伟,等.集成装配式盒子建筑连接节点抗震性能研究[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2024,40(6):1012-1020.(XU Feng,ZHANG Zenghui,XU Wei,et al. Research on seismic performance of connections in integrated assembled box buildings[J]. Journal of Shenyang jianzhu university(natural science),2024,40(6):1012-1020.)

Research on Seismic Performance of Connections in Integrated Assembled Box Buildings

XU Feng,ZHANG Zenghui,XU Wei,WANG Chungang

(School of Civil Engineering,Shenyang Jianzhu University,Shenyang,China,110168)

Abstract: In order to solve the limitation of high requirement of on site construction operation space,a new type of corner connections of integrated prefabricated box building is studied. The

收稿日期:2023-12-04

基金项目:国家自然科学基金项目(51978422);辽宁省教育厅重点攻关项目(JYTZD2023168);沈阳市科技计划项目(20-202-4-38)

作者简介:许峰(1975—),男,副教授,主要从事轻钢结构抗震理论及工程应用等方面研究。

finite element software ABAQUS was used to establish a refined joint model. On the basis of verifying the effectiveness of the numerical simulation method, the bearing capacity, stiffness, deformation capacity, hysteresis curves and energy dissipation capacity of the connect were studied, and the effects of different axial compression ratios, connection angle thickness and edge thickness ratio on the failure mode and seismic performance of the joint were analyzed. The results show that the failure mode of the node is close to the node domain ceiling beams and floor beams form plastic hinges at the end of the beams, the flange of the end of the beams bulging damage, modular columns and connecting corners are part of the region of the plastic deformation, but did not occur, has good seismic performance, in line with the "strong columns and weak beams, strong nodes and weak components" design principle. The seismic performance of the node is greatly affected by the axial compression ratio, and the bearing capacity and seismic performance of the node can be effectively improved by changing the thickness of the connecting corners and adding rolled edges. It is suggested that the axial pressure ratio should be controlled within 0.3; the thickness of the connecting corner piece should not be lower than 12mm; the addition of rolled edge can improve the stability of the connecting corner piece flange plate, preventing the corner piece flange from buckling deformation.

Key words: integrated assembly; box building; finite element; connection; seismic performance

盒子建筑又称模块化建筑、箱式建筑,是建筑装配化高度发展的成果^[1-2]。与传统建筑不同,盒子建筑将建筑分割为以房间为单元的预制结构单元,各单元均在工厂预制加工完成,只需运输到施工现场进行各结构单元之间的拼接与组装。近年来,装配式建筑因其预制率高、绿色环保、建造周期短等优势,逐渐在国内得到推广和应用,其中以盒子建筑为代表的装配式钢结构成为一种极其适应当前建筑行业环境的建筑形式^[3]。

盒子建筑主要通过其连接节点来实现荷载在模块间的传递。模块化盒子建筑的连接节点可以根据连接位置的不同分为模块与基础的连接、模块间连接和模块内部连接^[4]。模块间连接主要包括角柱连接、边柱连接以及中柱连接,具有多梁多柱的连接特点。目前国内外学者对模块化建筑连接节点的研究主要集中在模块间连接,其中以螺栓连接节点、铸钢件连接节点、预应力连接节点为主要连接形式。S. S. Lee 等^[5-6]提出了一种盖板-螺栓连接节点,通过试验和有限元对比分析了模块柱开洞、柱壁厚度等因素对节点强度、刚度的影响。J. Dhanapal 等^[7-8]对提

出的铸钢连接节点进行了轴向拉、压及单、双轴受弯试验,明确了节点在不同受力状态下的破坏模式。N. Gohar 等^[9]提出了一种自锁式节点,模拟分析了梁厚度、螺栓预拉力和摩擦系数对节点抗弯性能的影响。邓恩峰等^[10]设计了一种螺栓-封板组合节点,通过试验和有限元对比分析,明确了双梁无组合效应,加劲板、内隔板和外盖板能有效提高节点承载力和延性。刘洋等^[11-12]设计了一种新型角件旋转式连接节点,通过试验和数值模拟,并结合理论分析明确了该节点的传力机理,为工程应用提供了最优构造形式参考。戴晓蒙等^[13]设计了一种插入自锁式连接节点,通过试验和数值模拟对该节点抗震性能进行分析,明确了该节点属于半刚接全强节点。Z. Chen 等^[14-15]提出了一种预张拉组合连接节点,并进行了预应力连接节点静力抗弯试验和拟静力试验,结果表明该节点具有良好的自复位特性。

目前,国内外学者针对模块间连接节点做了大量可行性设计与研究,现有节点连接形式多为螺栓连接。为了解决节点连接对现场施工操作空间要求较高的局限性,笔者提

10% 以内,排除上述因素影响,有限元模拟得到的滞回曲线与试验曲线基本吻合。从骨架曲线可以看出,在弹性阶段,两条曲线基本重

合,模拟所得节点初始刚度略低于试验值,相对较保守,进一步验证了笔者数值模拟方法的合理性。

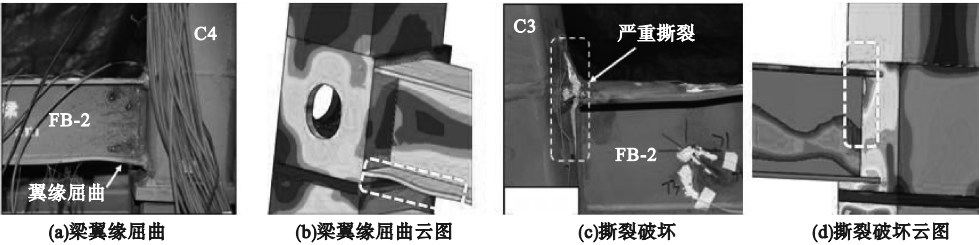


图5 变形对比结果

Fig. 5 Deformation comparison results

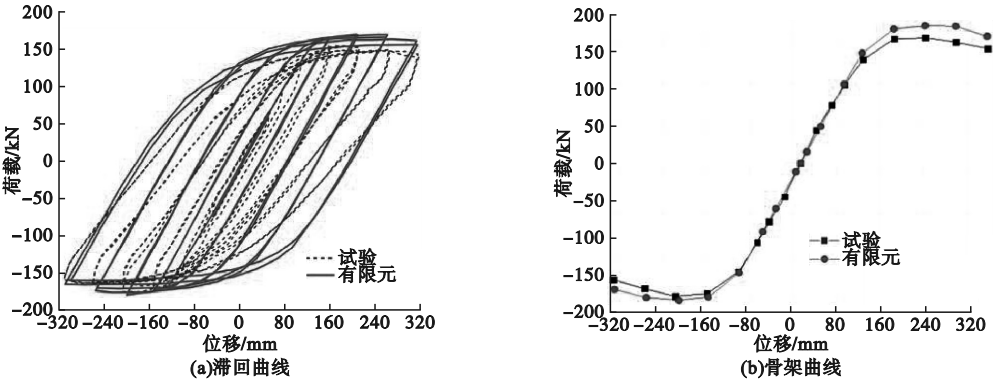


图6 曲线对比结果

Fig. 6 Curve comparison results

3 结果与分析

3.1 失效模式

ZGJD 节点在往复荷载作用下破坏时的应力云图如图 7 所示。从图中可以看出,节点的整体失效模式表现为靠近节点域天花板梁和地板梁梁端形成塑性铰,梁端翼缘发生鼓曲破坏,模块柱与连接角件均产生部分区域塑性变形,但未发生破坏。

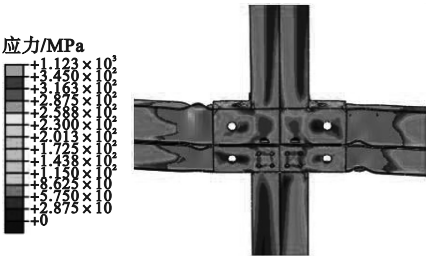


图7 ZGJD 节点整体应力云图

Fig. 7 ZGJD node overall stress plot

ZGJD 节点失效时连接角件的应力云图

如图 8 所示。从图中可以看出,连接角件的塑性变形区域主要集中在开孔周围,但未形成塑性铰,角件仍有较大的承载能力储备。

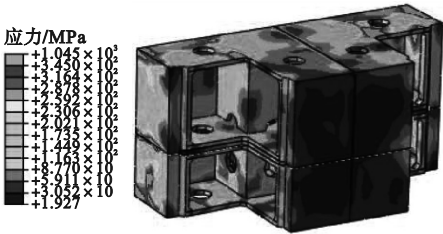


图8 ZGJD 节点连接角件应力云图

Fig. 8 ZGJD node connection corner piece stress plot

3.2 抗震性能分析

3.2.1 滞回曲线

ZGJD 节点滞回曲线如图 9 所示。从图中可以看出,加载初期,荷载位移呈线性关系;随着柱端加载位移的增大,梁端开始发生屈服,最终在梁端形成塑性铰,构件进入承载力下降阶段,刚度退化明显,滞回曲线呈梭

形,对称性较好且无捏拢效应,滞回环面积饱满,耗能能力较强。

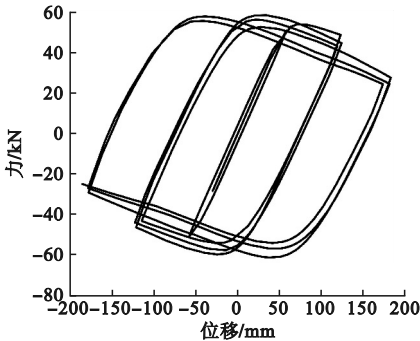


图9 ZGJD 节点滞回曲线

Fig. 9 Hysteretic curve of ZGJD joint

3.2.2 骨架曲线

ZGJD 节点骨架曲线如图 10 所示。根据《建筑抗震设计规范》(GB50011—2015)^[19]规定:多、高层钢结构在罕遇地震作用下薄弱层弹塑性层间位移角限值为 1/50。图 10 中对应节点位移为 66 mm,如图中虚线所示。骨架曲线大致呈“S”形,表现出良好的抗震性能。

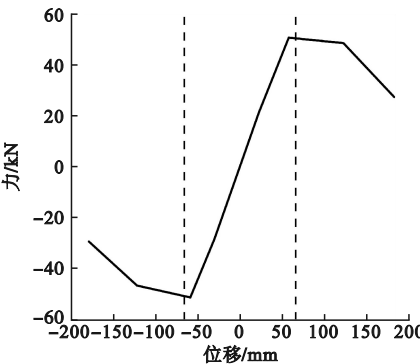


图10 ZGJD 节点骨架曲线

Fig. 10 ZGJD node skeleton curve

ZGJD 节点在往复荷载作用下的各项力学指标见表 1。其中屈服荷载采用通用屈服点法来确定;延性系数 μ 取极限位移 Δ_u 与屈服位移 Δ_y 之比,能够衡量结构从屈服状态达到极限承载力时的变形能力;极限位移 Δ_u 依据《建筑抗震试验规程》(JGJ/T101—2015)^[18]规定,选取极限荷载 85% 所对应的位移作为极限位移。

表1 ZGJD 节点在往复荷载下力学指标

Table 1 The mechanical index of ZGJD connection under reciprocating load

节点	$K_0/(N \cdot mm^{-1})$	P_y/kN	P_u/kN	μ	E
ZGJD	939.87	51.76	53.67	2.26	4.92

注: K_0 为初始刚度; P_y 为屈服荷载; P_u 为极限荷载; μ 为延性系数; E 为能量耗散系数。

3.2.3 耗能能力

ZGJD 节点的能量耗散系数曲线如图 11 所示。从图中可以看出,曲线斜率在 2~3 级及 5~6 级荷载范围内最大,在 $2\Delta_y \sim 3\Delta_y$ (Δ_y 为屈服位移, $\Delta_y = 61\text{ mm}$) 加载下具有较高的耗能效率,在 3~4 级荷载范围内梁端形成塑性铰,6~7 荷载范围内梁端发生屈曲变形,能量耗散系数增长缓慢。超过 7 级荷载后,节点由于屈曲破坏导致耗能能力减弱,能量耗散系数开始逐渐降低。由此可见,节点在中震条件下耗能能力较强。

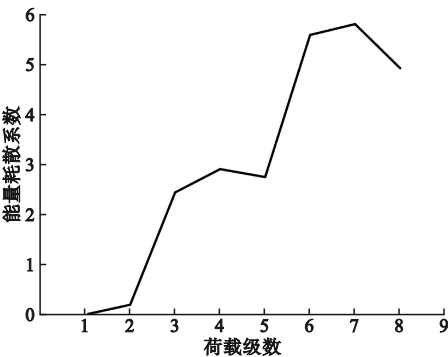


图11 ZGJD 节点能量耗散系数曲线

Fig. 11 ZGJD node energy dissipation factor curve

3.2.4 刚度退化

刚度退化是指结构在循环往复荷载作用下,随着加载位移增大,结构刚度不断降低的现象。ZGJD 节点刚度退化曲线如图 12 所示。笔者采用割线刚度 K_i 来描述结构刚度的变化情况,图中虚线为屈服状态点。从图中可以看出,节点屈服后,由于梁端塑性区域不断扩展,导致刚度退化加快,此后由于梁端塑性铰的形成,刚度退化逐渐变缓直至试件破坏。

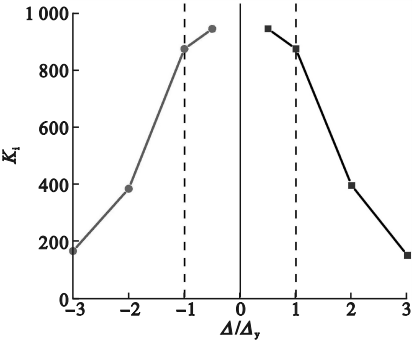


图 12 ZGJD 节点刚度退化曲线

Fig. 12 ZGJD connection stiffness degradation curves

4 参数分析

4.1 轴压比

ZGJD 节点在轴压比为 0.1、0.2 和 0.3 时的骨架曲线如图 13 所示,力学性能指标见表 2。

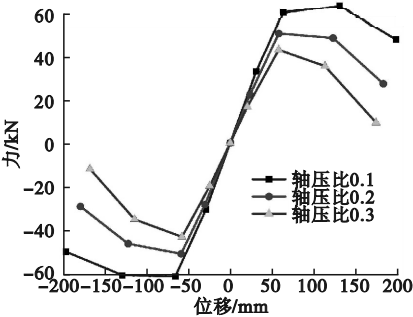


图 13 不同轴压比下骨架曲线

Fig. 13 Skeleton curves under different axial compression ratio

表 2 不同轴压比下力学性能指标

Table 2 Mechanical performance indexes under different axial compression ratios

轴压比	$K_0/(N \cdot mm^{-1})$	P_y/kN	P_u/kN	μ
0.1	1 067.69	60.91	63.94	3.34
0.2	939.87	51.76	53.67	2.26
0.3	810.2	43.12	44.48	1.77

由数据可知,随着轴压比增大,节点的极限承载力和屈服荷载逐渐降低,初始刚度也相应减小,延性下降;当轴压比超过 0.3 时,节点受“ $P-\Delta$ ”效应影响显著,柱端出现负弯矩,抗震性能变差。钢结构压弯构件在弯矩作用平面内的整体稳定计算满足要求时,通

常轴力较小,承载能力与稳定性和弯矩大小相关。对于低矮建筑,往往弯矩较大,轴力相对较小,轴压比一般在 0.2 ~ 0.4。考虑到 ZGJD 节点延性,建议轴压比控制在 0.3 以内可满足抗震要求。

4.2 连接角件厚度

ZGJD 节点在连接角件厚度为 8 mm、10 mm、12 mm 和 14 mm 时的骨架曲线如图 14 所示,力学性能指标见表 3。由数据可知,随着连接角件厚度的增加,节点的初始刚度略有提高。连接角件厚度为 10 mm、12 mm、14 mm 时,节点极限承载力较角件厚度为 8 mm 时分别提高了 7.64%、10.49%、11.85%,可见当连接角件厚度超过 12 mm 时,继续增大连接角件厚度对极限承载力的提高并不明显。当连接角件厚度小于 12 mm 时,增大其厚度对节点的延性影响不大,当连接角件厚度超过 12 mm 时,增大其厚度可有效提高节点的延性。综合考虑,建议连接角件厚度不小于 12 mm。

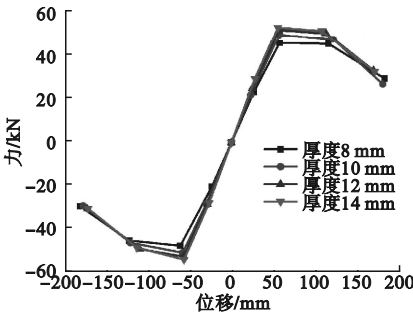


图 14 不同连接角件厚度下骨架曲线

Fig. 14 Skeleton curves under different thickness of connecting angle parts

表 3 不同连接角件厚度下力学性能指标

Table 3 The mechanical performance index of different connection angle thickness

厚度/mm	$K_0/(N \cdot mm^{-1})$	P_y/kN	P_u/kN	μ
8	867.66	47.86	49.86	2.27
10	939.87	51.76	53.67	2.26
12	995.92	52.90	55.09	2.28
14	1 040.26	53.58	55.77	2.45

4.3 卷边高厚比

在探究不同连接角件厚度对节点抗震性能影响的过程中,模拟表明当连接角件厚度较小时,其上、下翼缘板将产生大面积塑性变形,同时下连接角件上、下翼缘板发生轻微局部屈曲。为了提高连接角件翼缘板的稳定性,为其增设卷边来探究不同卷边高厚比对节点抗震性能的影响。图 15 为节点失效时连接角件未设卷边与增设卷边对比应力云图。从图中可以看出,增设卷边可以明显减少连接角件翼缘板塑性变形区域面积,防止角件翼缘发生屈曲变形。

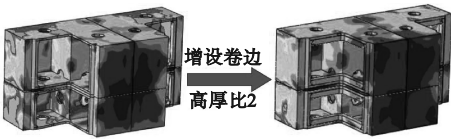


图 15 增设卷边对比应力云图

Fig. 15 Add crimp contrast stress plots

ZGJD 节点在卷边高厚比为 0、1、2 时的骨架曲线如图 16 所示,力学性能指标见表 4。由表可知,随着卷边高厚比的增加,节点的各项力学指标均略有提高。卷边高厚比为 1、2 时,节点初始刚度相比未设卷边时分别提高了 2.60%、5.42%;极限承载力分别提高了 0.61%、1.66%;延性系数分别提高了 1.33%、3.10%。可见增设卷边及提高卷边高厚比能够在一定程度上增强节点的承载力和抗震性能,可以考虑作为节点域的加强措施。

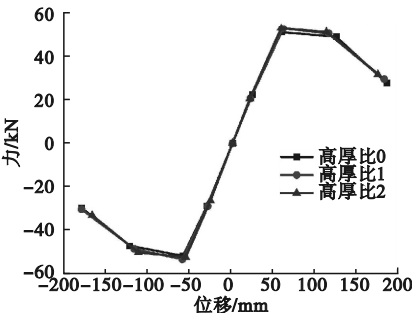


图 16 不同卷边高厚比下骨架曲线

Fig. 16 Skeleton curves under different curling height-thickness ratio

表 4 不同卷边高厚比下力学性能指标

Table 4 The mechanical performance index under different edge height-thickness ratios

卷边高厚比	$K_0/(\text{N}\cdot\text{mm}^{-1})$	P_y/kN	P_u/kN	μ
0	939.87	51.76	53.67	2.26
1	964.27	52.23	54	2.29
2	990.79	52.79	54.56	2.33

5 结 论

(1)新型角件连接节点在低周往复荷载作用下的破坏模式表现为节点域模块梁端屈曲破坏,模块柱与连接角件均产生部分区域塑性变形,但未发生破坏,具有良好的抗震性能,符合“强柱弱梁,强节点弱构件”的设计原则。

(2)随着轴压比的增大,节点受到“ $P-\Delta$ ”效应影响越发显著,刚度退化加快,抗震性能变差。当轴压比超过 0.3 时,继续增大轴压比将导致柱端负弯矩的产生,因此建议轴压比控制在 0.3 以内。

(3)增大连接角件厚度可有效提高节点的极限承载力,但当连接角件厚度超过 12 mm 时,继续增大其厚度对极限承载力的提高并不明显;当连接角件厚度小于 12 mm 时,连接角件发生塑性变形区域面积较大。综合考虑,连接角件厚度建议不小于 12 mm。

(4)增设卷边及提高卷边高厚比可以明显减小连接角件翼缘板塑性变形区域的面积,提高角件翼缘板的稳定性,防止其发生屈曲变形,使塑性铰外移,进一步提高节点的承载力和抗震性能,可以作为节点域的加强措施。

参考文献

[1] 毛磊,陆烨,李国强. 集装箱建筑发展历史及应用概述[J]. 建筑钢结构进展, 2014, 16(5): 9-17.
(MAO Lei, LU Ye, LING Guoqiang. Overview of the history and applications of container buildings [J]. Progress in steel building structures, 2014, 16(5): 9-17.)
[2] 许峰,张卓,张玉波,等. 模块化盒子建筑及其

连接节点研究进展[C]//2022年工业建筑学术交流会议论文集(中册).北京:工业建筑杂志社,2022.

(XU Feng, ZHANG Zhuo, ZHANG Yubo, et al. Research progress of modular box building and its connection joints [C]// Proceedings of the industrial buildings symposium 2022. Beijing: Industrial Architecture Magazine, 2022.)

- [3] 王文静,李志武,于春义,等.模块化钢结构建筑体系研究进展[J].施工技术,2020,49(11):24-30.

(WANG Wenjing, LI Zhiwu, YU Chunyi, et al. State of the art of modular steel building system [J]. Construction technology, 2020, 49(11):24-30.)

- [4] 黄馨仪,舒展,李征.装配式模块化建筑与模块节点研究进展[J].建筑钢结构进展,2022,24(2):40-49.

(HUANG Xinyi, SHU Zhan, LI Zheng. Research development of prefabricated modular buildings and modular connections [J]. Progress in steel building structures, 2022, 24(2):40-49.)

- [5] LEE S S, PARK K S, HONG S Y, et al. Behavior of c-shaped beam to square hollow section column connection in modular frame [J]. Journal of Korean society of steel construction, 2015, 27(5):471-481.

- [6] CHOI K S, KIM H J. An analytical study on rotational capacity of beam-column joints in unit modular frames [J]. International journal of civil, environmental, structural, construction and architectural engineering, 2015, 9(2):100-103.

- [7] DHANAPAL J, GHAEDNIA H, DAS S, et al. Structural performance of state-of-the-art VectorBloc modular connector under axial loads [J]. Engineering structures, 2019, 183:496-509.

- [8] DHANAPAL J, GHAEDNIA H, DAS S, et al. Behavior of thin-walled beam-column modular connection subject to bending load [J]. Thin-walled structures, 2020, 149:106536.

- [9] GOHAR N, AZIZI N S, NABILAH B A, et al. Finite element analysis of proposed self-locking joint for modular steel structures [J]. Applied sciences, 2021, 11(19):9277.

- [10] 邓恩峰,宗亮,丁阳.钢结构集成模块建筑新型节点力学性能研究[J].天津大学学报(自然科学与工程技术版),2018,51(7):702-710.

(DENG Enfeng, ZONG Liang, DING Yang. Mechanical properties of innovative connection for integrated modular steel construction [J]. Journal of Tianjin university (science and technology), 2018, 51(7):702-710.)

- [11] 刘洋.角件旋转式节点连接的柱承重式钢模

块结构抗震性能研究[D].天津:天津大学,2021.

(LIU Yang. Seismic behavior of corner-supported modular steel structure with rotary inter-module connections [D]. Tianjin: Tianjin University, 2021.)

- [12] CHEN Z, LIU Y, ZHONG X, et al. Rotational stiffness of inter-module connection in mid-rise modular steel buildings [J]. Engineering structures, 2019, 196.

- [13] 戴骁蒙.模块化钢结构插入自锁式节点抗震性能与设计方法研究[D].天津:天津大学,2019.

(DAI Xiaomeng. Research on seismic behavior and design method of self-lock plug-in joints in modular steel construction [D]. Tianjin: Tianjin University, 2019.)

- [14] CHEN Z, LI H, CHEN A, et al. Research on pretensioned modular frame test and simulations [J]. Engineering structures, 2017, 151:774-787.

- [15] YU Y, CHEN Z, CHEN A. Experimental study of a pretensioned connection for modular buildings [J]. Steel and composite structures, an international journal, 2019, 31(3):217-232.

- [16] 中华人民共和国住房和城乡建设部.钢结构设计标准:GB 50017—2017[S].北京:中国建筑工业出版社,2017.

(Ministry of Housing and Urban Rural Development of the People's Republic of China. Steel structure design standard: GB 50017—2017 [S]. Beijing: China Construction Industry Press, 2017.)

- [17] 张卓.集成装配式盒子建筑连接性能研究[D].沈阳:沈阳建筑大学,2022.

(ZHANG Zhuo. Study on connection performance of integrated fabricated box building [D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2022.)

- [18] 中华人民共和国住房和城乡建设部.建筑抗震试验规程:JGJ/T 101—2015[S].北京:中国建筑工业出版社,2015.

(Ministry of Housing and Urban - Rural Development of the People's Republic of China. Code for seismic test of buildings: JGJ/T 101—2015 [S]. Beijing: China Construction Industry Press, 2015.)

- [19] 中华人民共和国住房和城乡建设部.建筑抗震设计规范:GB 50011—2015[S].北京:中国建筑工业出版社,2010.

(Ministry of Housing and Urban - Rural Development of the People's Republic of China. Code for seismic design of buildings: GB 50011—2015 [S]. Beijing: China Construction Industry Press, 2010.)

(责任编辑:杨永生 英文审校:刘永军)