

DOI:10.11918/201908127

装配式双梁多柱节点框架试验和数值模拟

翟喜梅, 查晓雄, 袁立刚

(深圳储碳型水泥基材料工程重点实验室(哈尔滨工业大学(深圳)), 广东 深圳 518055)

摘要: 为研究水平静力荷载下不同角件节点传力特点,以某拟建新型装配式组合轻体板结构住宅工程为研究背景,取其两层一跨平面结构体系为试验原型,设计了包括L型、T型、十字型和灌浆L型4种节点的足尺框架模型的水平静力加载试验,对不同节点形式钢框架的工作性能与破坏特征进行研究,并与ABAQUS数值模拟进行对比验证。根据试验和数值模拟结果,得出了不同节点框架的初始刚度和极限荷载,以及不同截面位置上的应变值。结果表明:新型轻体板结构角件节点连接性能良好,钢框架发生梁铰破坏,节点部位完好,满足“强柱弱梁”与“强节点弱构件”的设计要求;T型节点双柱协同性能较好,L型、十字型节点的柱子易发生变形;节点小斜撑提高了钢框架初始刚度的38%,节点灌浆提高了钢框架初始刚度的14%,双梁完全独立工作,多柱不完全独立工作,通过应变分析与理论推导提出了双梁多柱的等效抗弯刚度计算方法,数值模拟与试验吻合较好,验证了结论的正确性。

关键词: 新型组合轻体板;角件节点;装配式建筑;试验研究;双梁多柱;数值模拟

中图分类号: TU398+.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2020)08-0081-07

Experimental study and numerical simulation on assembled frame with double-beam multi-column joints

ZHAI Ximei, ZHA Xiaoxiong, YUAN Ligang

(Shenzhen Key Lab of Carbon Storage Cement-based Materials Engineering (Harbin Institute of Technology, Shenzhen), Shenzhen 518055, Guangdong, China)

Abstract: To investigate the load transferring mechanism of different corner fitting joints under horizontal static load, horizontal static load tests of full-scale frames with four types of corner fitting joints (shaped of L, T, cross, and grouting L) were designed based on the double-layer single span structure of a proposed new assembled composite light-weight slab structure residential project. The working performance and failure characteristics of the steel frames with different joints were studied, and the results were compared with ABAQUS numerical simulations. According to the results of tests and numerical simulations, the initial stiffness and ultimate bearing capacity of the frames, as well as the strain values at different cross sections were obtained. Results show that the corner fitting joints of the new light-weight slab structure worked well, the steel frames broke in the beam hinges, and the joints were intact, which fulfilled the design requirements of "strong column and weak beam" and "strong joint and weak member". The double columns of T shaped joint had a good cooperative performance, and the columns of L and cross shaped joints were prone to deformation. Small diagonal braces and grouting joints increased the initial stiffness of the steel frames by 38% and 14% respectively. The double beams worked independently, and the multiple columns worked incompletely independently. A calculation method for equivalent bending stiffness of double-beam and multi-column was proposed through strain analysis. Numerical simulations agreed well with the tests results, which verified the correctness of the conclusions.

Keywords: new composite light-weight slab; corner fitting joints; assembled building; experimental study; double-beam multi-column; numerical simulation

“模块化建筑”是由工厂预制生产的“模块单元”通过现场可靠连接形成的结构体系^[1],模块单元间的连接可靠度直接影响结构整体的性能^[2]。大

量学者对模块化建筑连接节点开展了研究。Lawson等^[3-4]给出轻钢墙板和模块节点的设计建议;Englekirk^[5]、Bahrami等^[6]研发新型预制梁柱节点,并对其延性等受力性能进行试验;Annan等^[7-8]通过试验研究对比了钢模块框架与传统框架的抗震性能;Giriunas等^[9]、王化杰等^[10]分析了集装箱连接节点的受力规律;刘学春等^[11-12]研究了模块化多高层钢结构的全螺栓梁柱连接形式,分析多项因素对节

收稿日期: 2019-08-23

基金项目: 国家自然科学基金(51578181)

作者简介: 翟喜梅(1992—),女,博士研究生;

查晓雄(1968—),男,教授,博士生导师

通信作者: 查晓雄, zhahero@126.com

点性能的影响;王星星^[13]对多层冷成型钢连接节点进行了试验研究;文龙^[14]提出利用暗梁内套箍进行水平连接的混凝土楼板预制装配构造,并进行抗震性能分析.

在众多模块化建筑连接节点中,角件连接形式施工便捷,受力明确,最适合以墙板、楼板为基本模块的装配式板构房屋连接. 查晓雄等^[15]提出一种装配式轻体板构房屋角件节点,现为使楼板采用与墙板相似工艺进行加工,将楼板内伸进墙板下梁内,使墙板和楼板形成完全的板构房屋,并在单侧拧紧螺栓,减少搭建脚手架的费用,需对已有角件节点做出修改,并在静力荷载条件下进行试验和数值模拟,研究双梁多柱的抗弯刚度计算方法及小斜撑、灌浆等构造措施的影响.

1 角件节点连接形式

查晓雄等^[15]提出的角件节点由节点板及双梁双柱组成,在上下层墙板拼装时,上下层立柱端部焊接开设定位销孔的柱端钢板,并与节点板上的定位销相连接,上下层墙板 H 型钢梁的翼缘与节点板通过高强螺栓连接. 定位销下端为带螺纹的螺杆,同下层墙板柱子的柱端钢板螺纹连接,上端的尖端部分用来导向上层墙体安装,开孔用于吊装方便,上层柱子下端的柱端钢板的定位销孔用于插入定位销的尖端部分(图 1). 新型轻体板结构上下层墙板拼装时出现 H 型双梁,考虑到楼板与墙体的连接和板构房屋装配时施工顺序的问题,将双梁的上梁改为 T 型钢梁,见图 2,使楼板内嵌进上部墙体 T 型钢梁内;装配轻体板房屋时先安装下层墙板,采用节点板对下层墙板进行固定,然后安装楼板,最后安装上层墙板;墙板钢框架 H 型钢梁中间部位焊接钢垫板,并设螺栓孔,楼板钢框架为矩形钢管,矩形钢管中间部位焊接螺杆,安装楼板的过程中,使楼板的螺杆与钢垫板上的螺孔对应,通过高强螺栓连接.

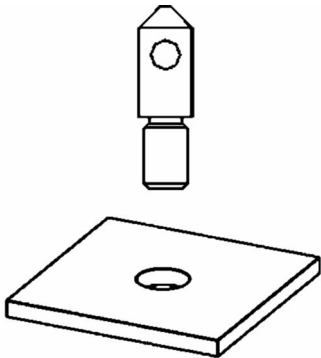


图 1 定位销与柱端钢板

Fig. 1 Locating pin and steel plate of column end

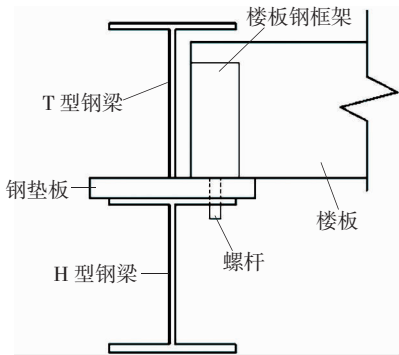


图 2 楼板内嵌示意

Fig. 2 Schematic of embedded floor

为使上下层墙板进行连接,在梁端上下层连接处,设计一种单侧连接盒,实现墙体单侧开洞和施工,加强梁端强度并使塑性铰外移,提高节点的抗震性能. 连接盒与梁柱均焊接在一起,形成墙板钢框架,为进一步提高钢框架平面内的抗侧刚度,在节点处加入了小斜撑的构造措施,小斜撑采用 5#槽钢焊接于梁柱端部,由梁、柱、连接盒、开孔节点板、定位销、高强螺栓和小斜撑组成角件节点见图 3,新型轻体板结构拼装形成 L 型、T 型、十字型角件节点形式见图 4.

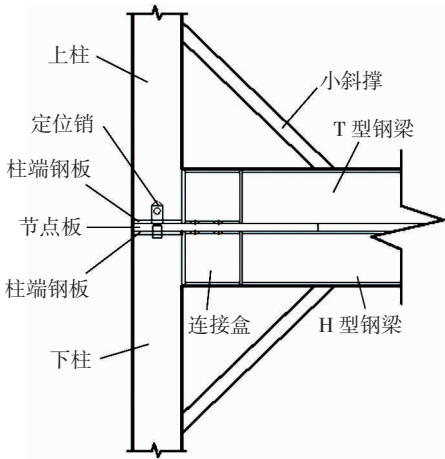


图 3 节点连接示意

Fig. 3 Schematic of joint connection

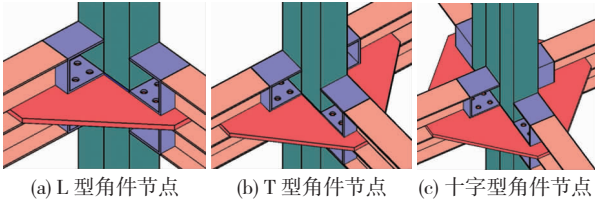


图 4 角件节点

Fig. 4 Corner fitting joints

2 试验概况

2.1 试件设计

以某拟建新型装配式组合轻体板结构住宅工程为研究背景,采用 1:1 比例的两层一跨模型,对 L 型、T 型、十字型和 L 型灌浆四种节点进行水平静力

侧推试验,试件编号分别为 JD1、JD2、JD3、JD4. 立柱采用尺寸为 130 mm×130 mm×6 mm 的方钢管,H 型钢梁尺寸为 150 mm×130 mm×7 mm×10 mm,T 型钢梁尺寸为 150 mm×130 mm×7 mm×10 mm,钢材型号均为 Q345 钢. 试件尺寸见图 5,试件所使用钢材材性见表 1.

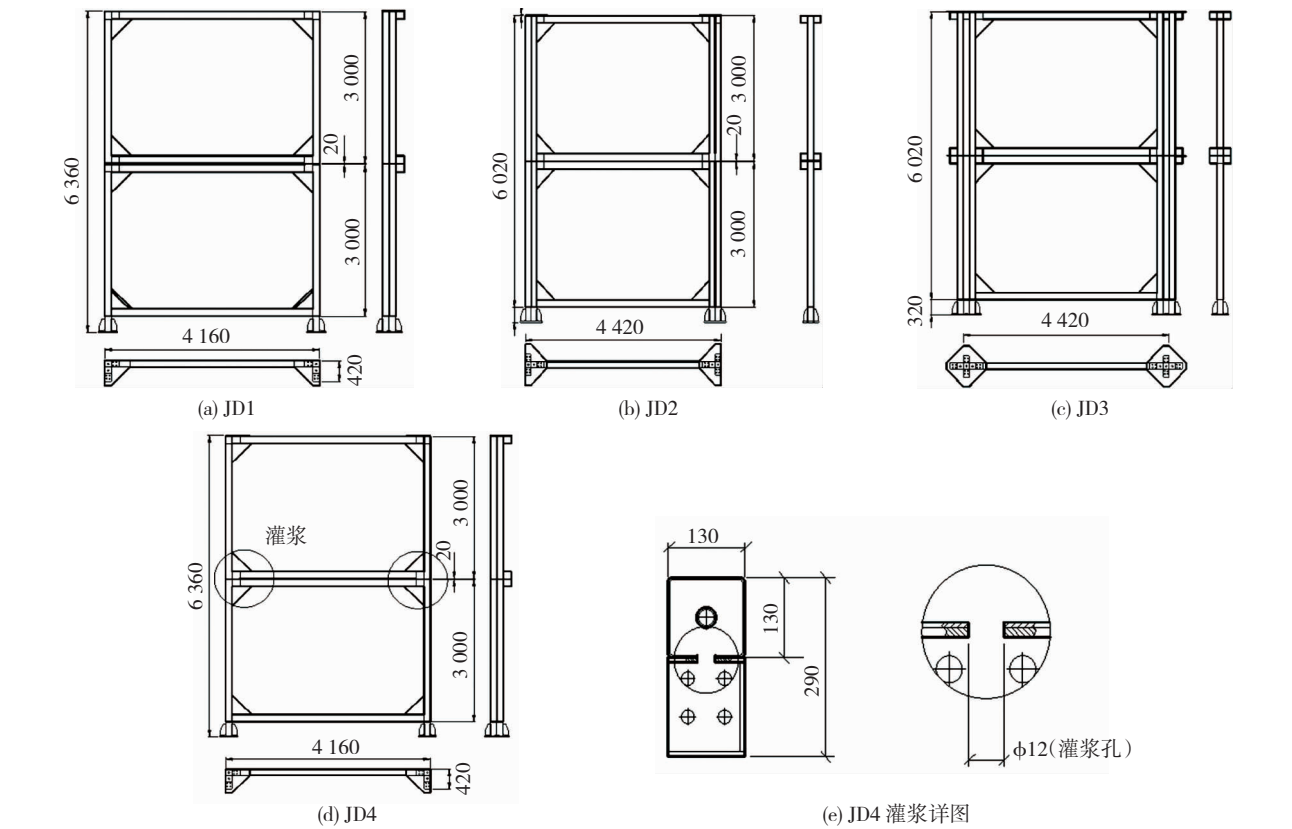


图 5 试件尺寸(mm)
Fig.5 Specimen size (mm)

表 1 钢材材性			
Tab. 1 Mechanical properties of steel			MPa
构件	弹性模量/ 10^5	屈服强度	抗拉强度
梁	2.17	345.41	498.83
柱	1.89	362.15	650.70
小斜撑	2.34	206.28	340.58
节点板	1.88	160.22	330.35
柱端钢板	1.98	206.29	393.74

2.2 加载装置和加载制度
试验加载装置见图 6.

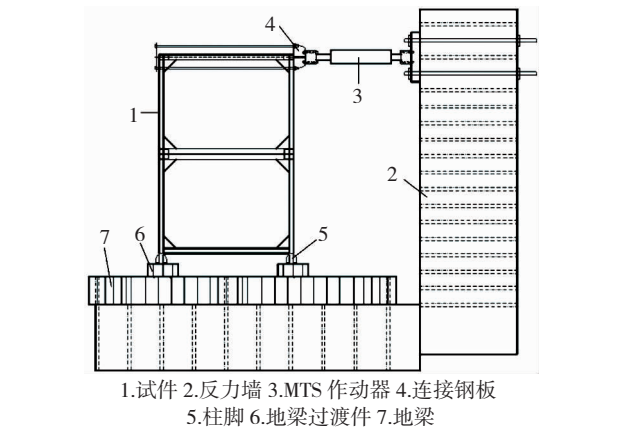


图 6 加载装置示意
Fig. 6 Test setup

试验以二层框架梁的位移作为控制位移进行分级加载,首先以 2 mm 为一级荷载,加载至 6 mm,然后分别以 1/500、1/400、1/300、1/250、1/200、1/150、1/100、1/75、1/50 的层间位移角限值为控制位移加载,直至试件进入下降段或出现破坏. 每一级加载持荷时间不少于 10 min. 试验过程中,当监测到试件出现明显屈服现象时,开始缓慢加载,当荷载下降到峰值荷载的 85% 以下时,可停止加载. 此外,当发生下列现象之一时也认为试件已经失去承载能力或已不安全,可停止加载:1) 螺栓被剪断或节点被破坏;2) 柱端或梁端出现明显屈服破坏现象;3) 节点板出现破坏;4) 层间位移角达到 1/30(顶端位移 200 mm).

3 试验结果及分析

3.1 破坏形态和破坏过程

JD1 在弹性阶段进行有小斜撑框架的静力侧推试验,为对比小斜撑对钢框架刚度的影响,现场切掉小斜撑后继续加载,见图 7(a). 试验现象表明:1) 各试件破坏共同点是 T 型钢梁梁端的小斜撑下方位置处最先出现屈服现象,见图 7(b),双梁的变形情况不一致,协同工作性能不好;四类节点均完好,见图

7(c),满足“强柱弱梁”与“强节点弱构件”的设计要求;2)各试件破坏不同点是 JD2 双柱协同工作性能较好,见图 7(d),沿平行框架平面排列紧密;JD3 三柱沿平行框架平面排列,见图 7(e),出现柱子大变形,内力重新分配;JD4 双柱协同工作性能较差,双柱沿垂直框架平面排列,见图 7(f),错位现象明显。



图 7 试验现象

Fig. 7 Experimental phenomena

3.2 荷载 - 位移曲线

图 8 为各试件的荷载 - 位移曲线,其中 F 为二层的剪力, Δ 为二层顶部位移与地梁的滑移差值, JD1-1 为 L 型带小斜撑节点试件, JD1-2 为 L 型无小斜撑节点试件. 加载前期,曲线处于线弹性阶段,随着荷载增大,T 型梁梁端变形使试件缓慢进入非线性的弹塑性阶段. 柱顶位移达到 200 mm 时, JD1-2 与 JD4 基本平缓达到实际最大荷载, JD2 与 JD3 仍有较大上升趋势,其强度与刚度均比 JD1-2 与 JD4 高. JD3 的荷载 - 位移曲线在柱顶位移 130 mm 时刚度发生突变,出现刚度强化现象,结合柱子变形与缝

隙变化的试验现象,推测为十字型节点试件采用三柱拼合的结构形式,其柱子数量较多,当大变形发生时,由于柱端节点板的约束作用,框架内柱发生失稳,失稳后的内柱相当于斜压杆,使框架的整体抗侧刚度增加. 整体钢框架变形能力较强,当试件顶端位移达到 200 mm 时,试件均未达到下降段,没有明显的屈服点. JD1-1 与 JD1-2 对比得出,小斜撑提高了框架整体初始刚度的 38%; JD1-1 与 JD4 对比得出,节点灌浆后的框架整体刚度提高了 14%,表明小斜撑、灌浆对整体框架刚度有积极影响,但节点处灌浆施工困难,且框架整体性较好,节点自身传力效果良好,因此建议在节点处不进行灌浆处理。

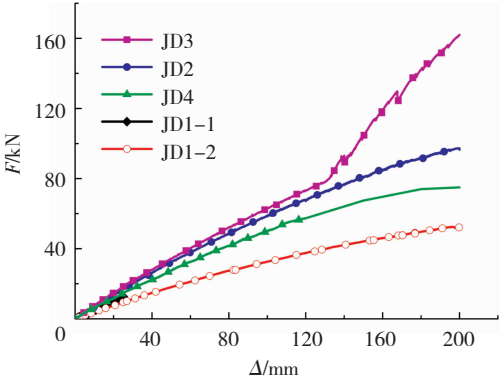


图 8 各节点的荷载 - 位移曲线

Fig. 8 Load-displacement curves of different joints

4 双梁多柱理论研究

4.1 双梁典型截面应变分析

T 型与 H 型钢梁独立工作时,两者理论中和轴分别为 y_{T0} 与 y_{H0} ,协同工作时双梁理论中和轴为 y_{TH} (图 9). 由试验应变数据得到的中和轴位置与双梁独立工作的中和轴位置基本一致,与双梁协同工作的中和轴位置完全不同. 试验的中和轴位置平均值与双梁独立工作时的理论值对比见表 2, T 型、H 型钢梁中和轴误差均小于 5%. 试验结果表明:双梁完全独立工作,其等效抗弯刚度可取 $E_b I_T + E_b I_H$,其中 E_b 为钢梁弹性模量, I_T 和 I_H 分别为 T 型、H 型钢梁截面惯性矩.

表 2 梁端截面中和轴位置试验值与理论值对比

Tab.2 Comparison of neutral axis locations of beam end section between tests and theoretical values

中和轴	中和轴位置/mm		误差/%
	试验值	理论值	
y_{T0}	38.00	37.24	2.00
y_{H0}	245.60	245.00	0.20

4.2 双柱典型截面应变分析

双柱独立工作时,两者理论中和轴分别为 y_{01} 与 y_{02} ,两者协同工作时,中和轴为 y_{12} (图 10). 由试验应变数据得到的中和轴位置与双柱独立工作时的中

和轴位置不完全一致,框架柱承担的应力比立柱大,当框架柱达到极限强度时,立柱尚未达到极限强度,双柱实际抗弯刚度小于理论双柱独立工作的抗弯刚度.柱端截面试验中和轴位置平均值与理论值对比见表 3,立柱中和轴误差仅为 2.5%,框架柱中和轴误差为 6.2%.试验结果表明:双柱不完全独立工作,其等效抗弯刚度应小于 $2E_cI_c$,其中 E_c 和 I_c 分别为柱子弹性模量和截面惯性矩.

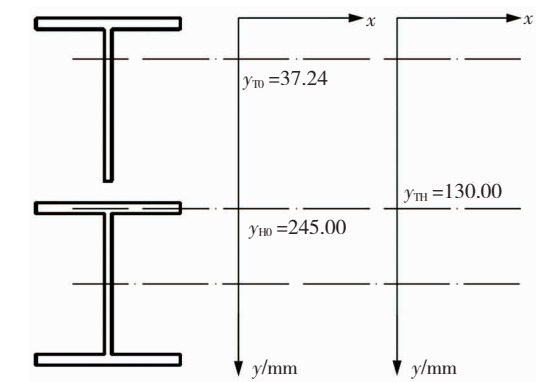


图 9 梁端截面理论中和轴位置

Fig. 9 Theoretical neutral axis location of beam end section

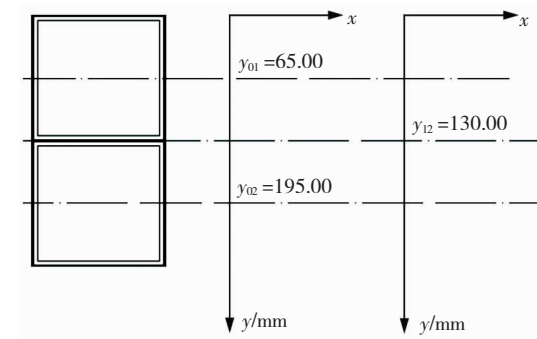


图 10 柱端截面理论中和轴位置

Fig. 10 Theoretical neutral axis location of column end section

表 3 柱端截面中和轴位置试验值与理论值对比

Tab. 3 Comparison of neutral axis locations of column end section between tests and theoretical values

中和轴	中和轴位置/mm		误差/%
	试验值	理论值	
y_{01}	63.40	65.00	2.50
y_{02}	183.00	195.00	6.20

4.3 多柱等效抗弯刚度推导

不同节点的侧移刚度试验值与理论值见表 4.

表 4 侧移刚度试验值与理论值对比

Tab. 4 Comparison of lateral stiffness between tests and theoretical values

节点类型	侧移刚度/($\text{kN} \cdot \text{mm}^{-1}$)		误差/%
	试验值	理论值	
L 型节点	0.51	0.58	-12.80
T 型节点	0.67	0.58	14.50
十字型节点	0.74	0.70	5.30

双柱和三柱的理论抗弯刚度分别为 $2E_cI_c$ 、 $3E_cI_c$.T 型、十字型节点框架的试验值均大于理论

值,理论设计是安全的,故 T 型、十字型节点抗弯刚度分别取 $2E_cI_c$ 、 $3E_cI_c$;L 型节点框架抗弯刚度试验值小于理论值,为增加设计安全性,在理论计算中引入安全系数 η ($0 < \eta < 1$),则双柱的抗弯刚度为 $2\eta E_cI_c$.通过与试验侧移刚度对比得到 η 值.根据 D 值法得 L 型节点框架侧移刚度 D 计算公式:

$$D = \alpha \frac{12k'_c}{h_c^2}, \tag{1}$$

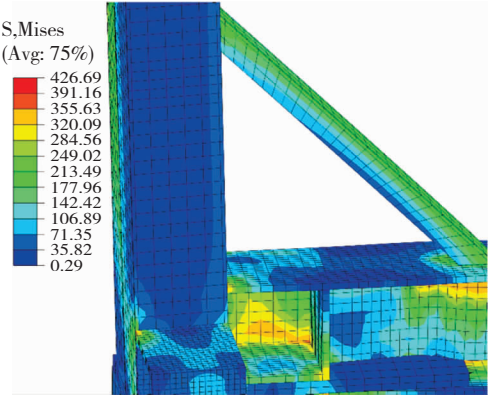
$$k'_c = \frac{2\eta E_c I_c}{h_c}. \tag{2}$$

式中: α 为框架节点转动对柱侧移刚度的影响系数, k'_c 为框架柱线刚度, h_c 为框架柱高度.

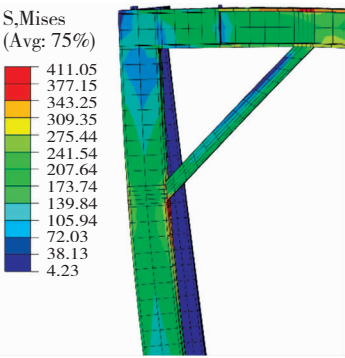
L 型节点框架整体刚度试验值 $D=0.51 \text{ kN/mm}$,根据式(1)、(2),得到 $\eta=0.87$,即 L 型节点抗弯刚度为 $1.74E_cI_c$.

5 试验模型有限元分析

采用 ABAQUS/CAE 建立试验模型,由于试验中节点螺栓无松动破坏现象,连接性能良好,可简化为固结,在节点板与框架梁连接部位采用 tie 连接.构件有限元模拟结果云图见图 11,出现 T 型梁梁端屈服与柱子错位现象.各节点试验和有限元荷载-位移曲线见图 12,L 型、T 型节点模拟结果与试验基本一致,但十字型节点的模拟结果与试验有较大差异,



(a) T 型梁梁端屈服



(b) 柱子错位

图 11 有限元计算结果云图

Fig. 11 Cloud map of finite element calculation results

因为实际装配过程中相邻柱子之间存在不均匀的缝隙,试验加载过程中不同缝隙的变化难以模拟,其模拟结果更接近理想状态.有限元模拟的不同节点的

初始刚度和极限承载力与试验对比结果见表 5,误差基本在 10% 以内,验证了有限元模拟的正确性.

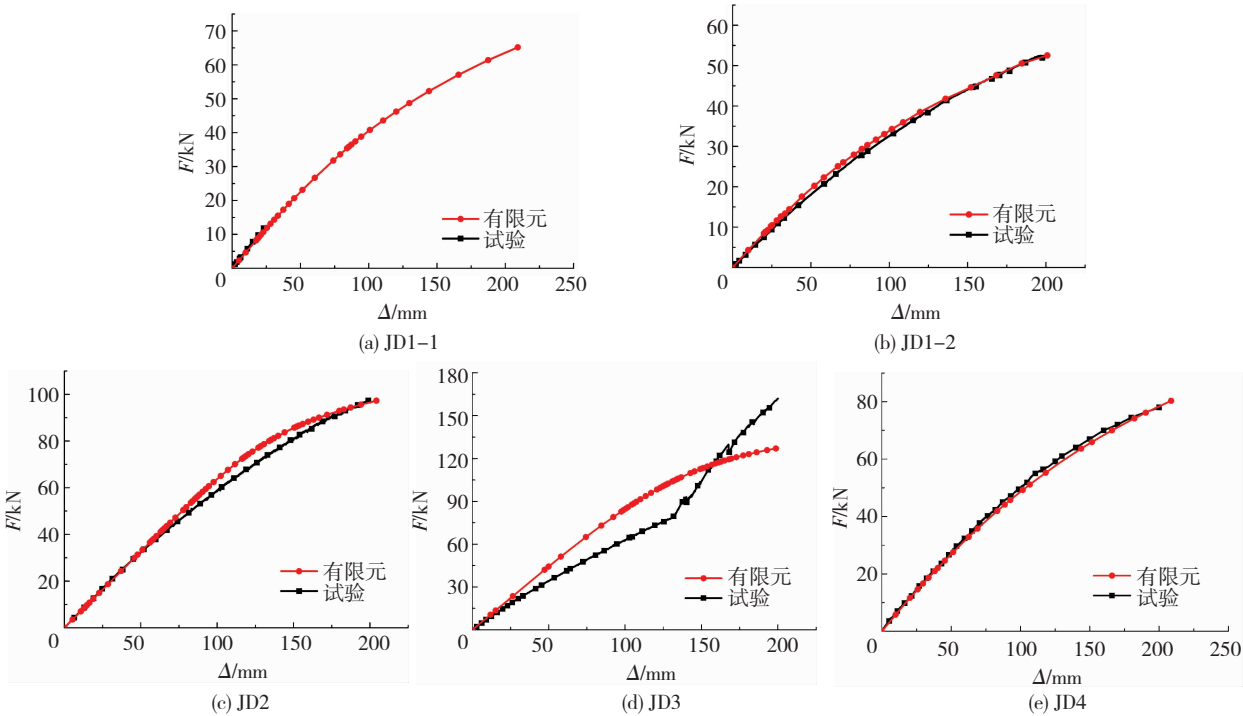


图 12 试验和有限元荷载 - 位移曲线

Fig. 12 Load-displacement curves of tests and finite element

表 5 试验与有限元的初始刚度和极限荷载对比

Tab.5 Comparison of initial stiffness and ultimate bearing capacity between tests and finite element

试件编号	初始刚度/(kN·mm ⁻¹)		初始刚度误差/%	极限荷载/kN		极限荷载误差/%
	试验值	有限元值		试验值	有限元值	
JD1-1	0.51	0.49	3.92	—	66.02	—
JD1-2	0.37	0.35	5.41	52.39	53.21	1.57
JD2	0.67	0.66	1.49	97.20	94.26	3.02
JD3	0.74	0.72	2.70	162.06	131.54	18.83
JD4	0.58	0.57	1.72	75.02	78.69	4.89

6 结 论

1)角件节点连接性能良好,框架破坏首先发生在 T 型梁梁端的小斜撑下方位置,即梁铰破坏,最后柱脚出现屈服现象,节点部位完好,满足“强柱弱梁”与“强节点弱构件”的设计要求.

2)小斜撑提高了框架整体初始刚度的 38% 左右,节点灌浆提高了框架整体初始刚度的 14% 左右,但由于节点灌浆施工难度大,且节点本身性能良好,建议节点不灌浆.

3)通过对双梁多柱端部截面的应变分析,以及框架侧移刚度分析,提出了双梁多柱的工作模式及其等效抗弯刚度计算方法,为工程设计提供试验与理论参考.

参考文献

[1] 曲媛媛. 模块化建筑空间设计的发展研究[D]. 苏州:苏州大学, 2009
QU Yuanyuan. Research on development of the design of modular architectural space[D]. Suzhou: Suzhou University, 2009

[2] 曲可鑫. 钢结构模块化建筑结构体系研究[D]. 天津:天津大学, 2014
QU Kexin. Study on steel structural system in modular buildings [D]. Tianjin: Tianjin University, 2014

[3] LAWSON R M, RICHARDS J. Modular design for high-rise buildings[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Structures and Buildings, 2010, 163(3): 152. DOI: 10.1680/stbu.2010.163.3.151

[4] LAWSON R M, OGDEN R G. 'Hybrid' light steel panel and modular systems[J]. Thin-Walled Structures, 2008, 46(7/8/9): 721. DOI: 10.1016/j.tws.2008.01.042

[5] ENGLEKIRK R E. Development and testing of a ductile connector for assembling precast concrete beams and columns [J]. PCI Journal,1995,40(2): 37. DOI: 10.15554/pci.03011995.36.51

[6] BAHRAMI S, MADHKHAN M, SHIRMOHAMMADI F, et al. Behavior of two new moment resisting precast beam to column connections subjected to lateral loading[J]. Engineering Structures, 2017,132: 809. DOI: 10.1016/j.engstruct.2016.11.060

[7] ANNAN C D, YOUSSEF M A, EL-NAGGAR M H. Seismic vulnerability assessment of modular steel buildings[J]. Journal of Earthquake Engineering, 2009, 13(8): 1066. DOI: 10.1080/13632460902933881

[8] ANNAN C D, YOUSSEF M A, EL-NAGGAR M H. Effect of directly welded stringer-to-beam connections on the analysis and design of modular steel building floors[J]. Advances in Structural Engineering, 2009, 12(3): 374. DOI: 10.1260/136943309788708400

[9] GIRIUNAS K, SEZEN H, DUPAIX R B. Evaluation, modeling, and analysis of shipping container building structures [J]. Engineering Structures,2012,43:48. DOI:10.1016/j.engstruct.2012.05.001

[10]王化杰,李洋,雷炎祥,等. 装配式集装箱结构体系优化及节点性能[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2017, 49(6): 118
WANG Huajie, LI Yang, LEI Yanxiang, et al. System optimization of fabricated container structure and the joint performance [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2017, 49(6): 118. DOI: 10.11918 /j. issn.0367-6234.201511115

[11]刘学春,浦双辉,徐阿新,等. 模块化装配式多高层钢结构全螺栓连接节点静力及抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2015, 36(12): 44
LIU Xuechun, PU Shuanghui, XU Axin, et al. Experimental study on static and seismic performance of bolted joint in modularized multi-layer and high-rise prefabricated steel structures[J]. Journal of Building Structures, 2015, 36(12): 44. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2015.12.006

[12]刘学春,杨志炜,王鹤翔,等. 螺栓装配多高层钢结构梁柱连接抗震性能研究[J]. 建筑结构学报, 2017, 38(6): 35
LIU Xuechun, YANG Zhiwei, WANG Hexiang, et al. Seismic performance of beam-column connection in bolted assembled multi-high-rise steel structure[J]. Journal of Building Structures, 2017, 38(6): 35. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2017.06.004

[13]王星. 多层冷成型钢组合墙体抗侧试验及简化计算方法研究 [D]. 南京:东南大学, 2017
WANG Xingxing. Experimental and simplified calculation method research on the lateral performance of mid-rise cold-formed steel shear walls[D]. Nanjing: Southeast University, 2017

[14]文龙. 预制装配式盒子结构试验与数值模拟分析 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016
WEN Long. Experimental test and numerical simulation of precast box-modularized structure[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016

[15]查晓雄,翟喜梅,王庆华. 现场无焊接装配式双梁双柱节点框架力学性能研究[J]. 建筑结构学报, 2018, 39(增刊2): 9
ZHA Xiaoxiong, ZHAI Ximei, WANG Qinghua. Mechanical properties of assembled frame connected by double-beam and double-column angle joints without on site welding[J]. Journal of Building Structures, 2018, 39(S2): 9. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2018.S2.002

(编辑 赵丽莹)

封面图片说明

封面图片来自本期论文“新型装配式冰场受力性能试验与模拟分析”,是哈尔滨工业大学土木工程学院张文元教授课题组为帮助双奥场馆实现可持续发展,与国家游泳中心 2022 年冬奥场馆改造团队联合提出的“冰水转换”方案原理图及效果图. 所提出的全装配冰壶场地及支承结构体系,不但可以实现游泳与冰壶两种比赛场地的随时转换,还具有装拆施工便捷、标高调节灵活、结构刚度大、构件承载力高、体系节能环保等特点. 基于该装配式冰场的现场试验测试结果和有限元精细模拟计算结果,讨论了装配式冰场的自振频率和振型特点,分析了冰场在使用荷载和极端荷载作用下的整体变形和各组件的应力水平,探讨了影响冰面应力、变形及开裂的关键因素. 从试验研究和理论分析两个角度同时证明了所提装配式冰场方案能够满足冬奥冰壶比赛对冰面的要求,正常使用荷载作用下冰面无开裂现象. 也指出了将该冰场移植到其他冰上项目比赛中需要使用大型浇冰车时应注意的问题.

(图文提供:张文元,杨奇勇. 哈尔滨工业大学;北京国家游泳中心有限责任公司)