

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2020.183

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



模块化钢框架单元新型盒式连接节点及其设计方法

秦佳俊¹, 谭平¹, 尚继英¹, 李一明¹, 戴淑丹²

(1. 广州大学 工程抗震研究中心; 广东省地震工程与应用技术重点实验室; 工程抗震减震与结构安全教育部重点实验室, 广州 510405; 2. 广州建筑产业研究院有限公司, 广州 510405)

摘要:提出一种模块化钢框架单元(以下简称“模块单元”)的连接方法,采用盒式连接组件(BCC-1和BCC-2)、连接板即可实现2、4、8个模块单元的全螺栓连接。分析节点的受力机理,并基于中国规范给出模块单元新型盒式连接节点(以下简称:“盒式节点”)的设计流程和设计方法。以某11层模块化钢框架办公楼为例,分别对一角节点和边节点进行设计,并采用有限元软件Abaqus对节点进行循环往复加载,以验证节点的抗震性能。结果表明:角节点、边节点的塑性铰均先在BCC-1、BCC-2腹板上形成,可以在震后快速更换BCC-1、BCC-2,以恢复节点使用功能;角节点和边节点均符合ANSI/AISC 360-10规范对半刚性节点的要求,且节点滞回曲线均饱满,抗震性能好;节点极限抗弯承载力预测值与有限元结果的比值均大于90%,说明盒式节点构造、设计理念以及提出的连接设计方法合理。

关键词:模块化钢框架;盒式连接节点;节点刚度;抗震性能;设计方法

中图分类号: TU391 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2021)03-0037-07

Design method on inovative box connections of modular steel frame units

QIN Jiajun¹, TAN Ping¹, SHANG Jiyong¹, LI Yiming¹, DAI Shudan²

(1. Earthquake Engineering Research & Test Center; Key Laboratory of Earthquake Engineering and Applied Technology in Guangdong Province; Key Laboratory of Earthquake Resistance Earthquake Mitigation and Structure Safety Ministry of Education, Guangzhou University, Guangzhou 510405, P. R. China; 2. Guangzhou Research Institute of Construction Industry, Guangzhou 510405, P. R. China)

Abstract: A method to connect modular steel frame units (hereinafter referred to "modular units") was proposed, which is that 2, 4, or 8 modular units can be connected by innovative box connecting component (BCC-1 and BCC-2), plates through high strength bolts. Force mechanism of box connections were analyzed, and based on the Chinese code, the design flow and design method of the inovative box

收稿日期: 2020-07-17

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFC0703600); 教育部创新团队项目(IRT13057); 广州市高校“羊城学者”首席科学家项目(1201541630); 广东省教育厅创新团队项目(2016KCXTD016)

作者简介: 秦佳俊(1986-), 女, 博士生, 主要从事结构隔震与减震研究, E-mail: qinjjgz@126.com.

谭平(通信作者), 男, 研究员, 博士生导师, E-mail: ptan@foxmail.com.

Received: 2020-07-17

Foundation items: National Key Research and Development Program (No. 2017YFC0703600); Ministry Education Innovative Research Team (No. IRT13057); Chief Scientist, Guangzhou Scholar, Guangzhou (No. 1201541630); Guangdong Provincial Department of Education Innovation Team Project (No. 2016KCXTD016)

Author brief: QIN Jiajun (1986-), PhD candidate, main research interests: isolated and damping structure, E-mail: qinjjgz@126.com.

TAN Ping (corresponding author), professor, doctoral supervisor, E-mail: ptan@foxmail.com.

connections (hereinafter referred to "box connections") of modular units were proposed. Taking the 11 layers modular steel frame office as an example, an corner connection and an edge connection were designed, and low cycle reciprocating loading were carried out on the connection using the finite element software Abaqus to verify seismic resistance of modular connections. Results show that: plastic hinge of corner connections and edge connections initialed on web of BCC-1 and BCC-2, which can be quickly replaced after an earthquake to restore the function of connections. Both connections met the requirements of the ANSI/AISC 360-10 specification for semi-rigid connections, and hysteresis curve were full, indicating good seismic resistance. Both ratio of ultimate bending capacity of predicted value and finite element results exceed 90%, indicating that the structure, the idea, and the design method are reasonable.

Keywords: modular steel frame; box connections; joint rigidity; seismic performance; design method

模块化钢结构建筑的梁、柱等构件均由工厂加工生产,施工现场只需进行螺栓拼接或者人工焊接即可,具有工业化程度高、轻质高强、施工周期短等优点,是一种极具工业化特性的建筑结构体系^[1]。形成可靠模块化结构体系的难点在于一个节点上需要连接两柱四梁、四柱八梁、甚至是八柱十六梁,而且高装配率模块单元需要在工厂完成,现场连接不占用室内空间。目前已经开发了多种模块单元连接形式,Annan 等^[2]提出全焊接式模块化钢支撑体系的连接节点,并对节点以及钢框架支撑体系进行了深入的研究。Park 等^[3]提出的采用拼接板、高强度螺栓进行模块之间的水平和竖向连接,理论和试验研究的重点在于节点处 4 根柱作为嵌入式地基的整体。Lee 等^[4]以不削弱柱截面为前提,提出采用 L 型、T 型、十字型连接件将模块单元连接在一起,并且对上、下两个模块连接节点进行了抗震性能的试验研究。中国学者也开展了对模块化结构的节点形式及其性能的探索,Deng 等^[5]提出用柱端开孔,采用十字型拼接板螺栓连接,盖板焊接封口的模块单元连接方式,并且对角节点和边节点的抗震性能进行了深入研究,结果表明,节点在往复荷载作用下的破坏均发生在梁端。Chen 等^[6-7]采用插入式连接件和对穿螺栓实现了模块单元之间的连接,分别对模块单元角节点和边节点进行了足尺试验。王燕等^[8]提出一种内套筒加焊接的连接件用于多个模块的连接,用有限元分析不同套筒厚度、连接板厚度下节点的应力路径,提出了可供参考的套筒厚度。

笔者提出了一种新型盒式模块单元连接形式,可以仅使用螺栓即可完成模块单元之间的连接。用于连接模块单元的连接组件包括 BCC-1、BCC-2 以及一些连接板,根据实际需要确定不同连接位置的连接组件类型和个数,所有的连接工作可以在模块

单元外部完成且无焊接流程。除此以外,设计时以节点核心区受剪而稳定耗能且塑性铰形成于 BCC-1、BCC-2 腹板为目标,让节点能用于抗震设防烈度地区并实现 BCC-1、BCC-2 的可更换。阐述了节点的构造和设计理念,基于“等强度理论”,结合《结构抗震设计规范》^[9]、《钢结构设计规范》^[10]给出盒式节点设计的一般过程,将该方法用于 7 度设防区的某模块化钢结构办公楼的模块单元连接设计中,并使用有限元软件 Abaqus 6.14 对节点性能进行验证。

1 盒式节点构造及原理

设计了用于模块单元连接的盒式连接组件,可以实现 2、4、8 个模块单元之间的连接,图 1(a)、(b)分别为连接 2 个和 4 个模块单元的边节点示意图。每 4 个模块单元按图 1(b)完成连接固定后,再通过连接板在模块单元柱加劲肋上连接即可完成 8 个模块单元的连接。根据设计需要的个数和位置开螺栓孔,并且模块单元柱端有一小段悬臂长度用于上、下模块单元柱之间的连接。BCC-1 用于角节点上、下模块单元的连接,BCC-2 可以同时实现模块单元的水平 and 竖向连接。

基于对钢结构节点的性能要求^[11],兼顾模块单元连接的实际需要,阐述本模块单元连接节点的设计理念和传力机制。首先,用 BCC-1 和 BCC-2 的竖向连接板实现上、下模块单元柱与柱的直接连接,保证竖向荷载传递的连续性,同时,避免因为模块单元柱截面上拉应力存在而在上、下模块单元之间产生缝隙。其次,让 BCC-1 和 BCC-2 腹板参与受剪,实现稳定的能量耗散。对于角节点,在水平荷载作用下,BCC-1 腹板上受到的剪力来自两个部分,柱腹板拼接板和水平加劲肋之间的腹板区域受剪引起

BCC-1 腹板的受剪,以及 BCC-1 水平连接板上螺栓孔受螺栓挤压引起 BCC-1 腹板受剪,相对来说,作用在 BCC-1 腹板截面上的剪力较小,通过设置合理的截面尺寸或者采用低屈服应力、高变形能力的材料使 BCC-1 腹板参与受剪耗能,将塑性铰集中在 BCC-1 腹板上。BCC-2 因为长度较小,截面上的剪应力不可忽略,且 BCC-2 水平、竖直两个方向受剪,容易实现 BCC-2 的腹板耗能。对于中间节点,水平方向的受力及耗能机理同边节点,可以满足抗震设防地区的需要。最后,仅由 BCC-1、BCC-2、腹板连接板等采用高强度螺栓即可完成模块单元之间的连接,安装方便且可拆卸,地震作用下塑性变形集中在 BCC-1、BCC-2 腹板上,震后可以快速更换 BCC-1 和 BCC-2,以恢复结构的使用功能。

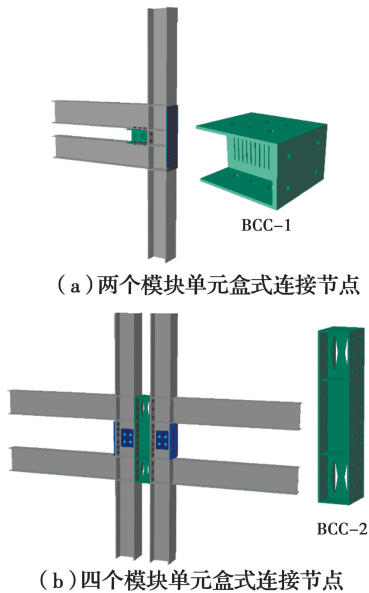


图 1 模块单元盒式连接节点

Fig. 1 Schematic diagram of box connection

2 盒式节点设计流程

模块单元连接节点作为模块化结构体系中的重要部分,在设计时除了考虑强度、刚度外,还要具有良好的延性以及耗能能力。具体来说,盒式节点设计时主要通过 3 个方面来提高盒式节点的抗震性能,使模块化钢框架体系能用于抗震设防烈度地区。第一,强度方面,竖向连接截面的强度要大于模块单元柱的截面强度;第二,刚度方面,通过有限元计算验算小震作用下层间位移角是否满足《结构抗震设计规范》^[9] 的要求;最后,通过合理设计 BCC-1、BCC-2 腹板实现节点的稳定耗能,使得模块化钢结

构体系能用于抗震设防区,具体的盒式节点设计流程见图 2。

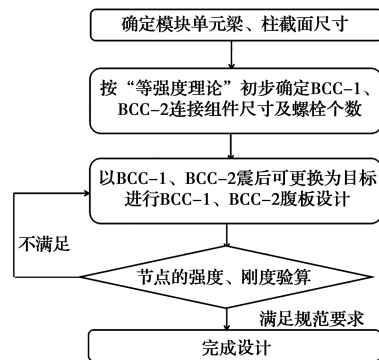


图 2 模块单元连接设计流程图

Fig. 2 Connecting design flowchart of modules

3 盒式节点设计

3.1 竖向连接设计

按照“等强度理论”要求实现模块单元之间的竖向连接,盒式角节点、边节点的竖向连接公式可以统一为式(1)。

$$\sum A_L \geq \sum A_N^c, \sum W_L \geq \sum W_N^c \quad (1)$$

式中: $\sum A_L$ 、 $\sum A_N^c$ 分别为竖向连接截面、柱截面的净截面面积之和; $\sum W_L$ 、 $\sum W_N^c$ 分别为竖向连接截面、柱截面的净截面模量之和。

同样用“等强度理论”确定模块之间连接所需的高强度螺栓个数。考虑作用在盒式角节点模块单元柱截面上的弯矩设计值为 $M_c = W_n^c \cdot f$, 在柱截面弯矩作用下,翼缘连接板连接的高强度螺栓受剪,所需高强度螺栓个数见式(2)。BCC-1 上水平连接板与地板梁、天花板梁翼缘连接的高强度螺栓以受拉为主,作用在地板梁、天花板梁高强度螺栓上的总设计拉力值分别为: $N_t^{fb} = A_w^{fb} \cdot f_v$ 、 $N_t^{cb} = A_w^{cb} \cdot f_v$, 高强度螺栓个数按照式(3)计算。

$$n_{cf} = \frac{W_n^c \cdot f}{(H_{ctcf}) \cdot N_v^b} \quad (2)$$

$$n_{fb} \geq \frac{N_t^{fb}}{N_T^b}, n_{cb} \geq \frac{N_t^{cb}}{N_T^b} \quad (3)$$

式中: n_{fb} 、 n_{cb} 、 n_{cf} 分别为地板梁与 BCC-1 连接、天花板梁与 BCC-1 连接、柱翼缘与 BCC-1 上竖向连接板连接所需的高强度螺栓个数; f 、 f_v 分别为钢材的抗拉、抗剪强度设计值; A_w^{fb} 、 A_w^{cb} 分别为地板梁、天花板梁横截面积; N_v^b 、 N_T^b 分别为高强度螺栓的抗剪、抗拉承载力设计值。

3.2 水平连接设计

边节点中 BCC-2 竖向截面要满足弯矩、剪力在水平方向的传递, BCC-2 的竖向截面、竖向连接所需高强度螺栓个数需要分别满足式(4)、式(5)。

$$A_{nV}^2 \geq A_{fb} + A_{cb}, \quad W_{nV}^2 \geq W_{fb} + W_{cb} \quad (4)$$

$$n_V^2 = \frac{W_{nV}^2 \cdot f}{(H_2^V t_2) \cdot N_V^b} \quad (5)$$

式中: A_{nV}^2 、 A_{fb} 、 A_{cb} 分别为 BCC-2 纵向、地板梁、天花板梁的净截面面积; W_{nV}^2 、 W_{fb} 、 W_{cb} 分别为 BCC-2 纵向、地板梁、天花板梁的纵向截面净截面模量; n_V^2 为 BCC-2 竖向连接板与柱翼缘连接所需要的高强度螺栓个数。

3.3 节点域验算

对于盒式角节点和边节点, 节点核心区①、②的设计同普通钢结构节点核心区, 盒式节点的设计理念为 BCC-1 腹板耗能, BCC-2 腹板除了耗能外还需传递水平方向外力, 其合理设计是实现模块化结构体系用于抗震设防区以及实现 BCC-1、BCC-2 可更换的前提。图 3 给出了盒式角节点、盒式边节点的受力示意图, 盒式边节点受力示意图取一半结构。

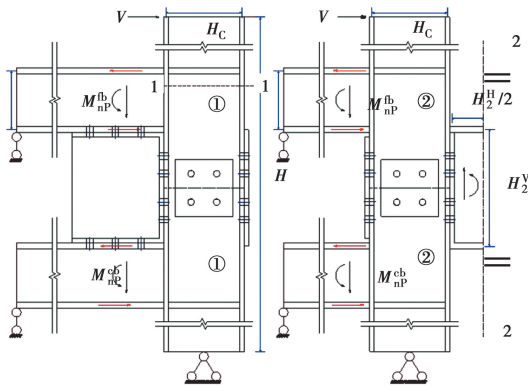


图 3 模块单元受力示意图

Fig. 3 Forced diagram of modular unit

对于盒式角节点, BCC-1 腹板需要满足截面 1-1 上剪应力小于核心区①, 且能保持腹板的局部稳定性。

$$\tau_{1-1} = \frac{V}{A_1 + A_c} \leq \frac{4}{3} f_v, \quad \tau_{1-1} \leq \tau_{1-1}^c \quad (6)$$

式中: A_1 、 A_c 分别为 BCC-1 腹板、核心区①的截面面积; τ_{1-1}^c 、 τ_{1-1} 分别为 1-1 截面上 BCC-1 腹板、核心区 1 按照截面面积所分担的剪应力。

对于盒式边节点, 作为受弯构件设计的 BCC-2, 其截面上剪力较大, 2-2 截面上的剪表达式为

$$V_{2-2} = \frac{2(VH - M_{np}^b - M_{np}^c)}{H_2^t} \quad (7)$$

2-2 截面上剪力面上的剪应力需满足强度要求, 即式(8), 以及局部稳定性要求。

$$\tau_{2-2} = \frac{V_{2-2}}{A_2^V} \leq \frac{4}{3} f_v \quad (8)$$

3.4 极限抗弯承载力

对于角节点来说, 极限抗弯承载力 $M_{u,P}^c$ 为所连接上、下模块单元地板梁、天花板梁极限抗弯承载力 M_{np}^c 、 M_{np}^b 之和, 见式(9), 因模块单元天花板梁、地板梁上有螺栓孔, 则天花板梁、地板梁的极限抗弯承载力均为去除螺栓孔的净截面所提供。

$$M_{u,P}^c = M_{np}^c + M_{np}^b \quad (9)$$

BCC-2 连接的左、右模块单元柱各自受力变形, 定义盒式中间节点的极限抗弯承载力为相邻模块单元柱所承受的极限抗弯承载力之和。盒式边节点所连模块单元天花板梁、地板梁受弯, BCC-2 双向受剪, 盒式边节点的极限抗弯承载力 $M_{u,P}^c$ 为

$$M_{u,P}^c = M_{np}^c + M_{np}^b + (A_{nV}^2 \cdot f_v) H_2^t + (A_{nH}^2 \cdot f_v) H_2^y \quad (10)$$

式中: A_{nH}^2 为 BCC-2 横向的净截面面积。

4 盒式节点工程应用及验证

4.1 连接设计

以某 11 层模块化建筑示范综合办公楼为例, 完成了新型盒式节点的研发与设计研究。办公楼的设计使用年限为 50 年, 建筑类别丙类, 地面粗糙度为 B 类, II 类场地, 50 年设防烈度为 7 度, 设计地震分组第 2 组, 基本地震加速度 0.1g。办公楼平面尺寸为 42 m × 15.6 m, 选择一层模块单元和二层模块单元之间的盒式节点进行连接设计。一、二层模块单元柱截面为 HW250 × 250 × 9 × 14, 模块单元梁截面均为 HN150 × 300 × 6.5 × 9。模块化钢结构单元、BCC-1、BCC-2、腹板连接板、翼缘连接板用钢均为 Q235 钢, 螺栓采用 10.9 级 M20 的高强度螺栓。

根据模块单元的梁、柱尺寸, 按前述设计流程, 分别进行角节点、边节点的设计。盒式角节点处使用的连接构件为 BCC-1(×1)、腹板拼接板(×1)、翼缘拼接板(×1), 其中, 翼缘拼接板尺寸同 BCC-1 的竖向连接板。盒式边节点处使用的连接组件为翼缘

连接板(×2),其中,翼缘拼接板尺寸同 BCC-1 的竖向拼接板,腹板连接板(×2)、BCC-2(×1)。

4.2 有限元模型

为验证盒式节点的抗震性能,采用有限元软件 Abaqus 6.14 分别对角节点和边节点进行静力推覆分析。模型中,模块单元、连接组件用钢的设计屈服强度为 $f_y=235 \text{ N/mm}^2$, 极限强度 $f_u=370 \text{ N/mm}^2$;采用 10.9 级 M20 高强度螺栓,屈服强度为 $f_y=940 \text{ N/mm}^2$,极限强度 $f_u=1\ 040 \text{ N/mm}^2$ 。建模时,模块单元、连接构件以及高强度螺栓均采用实体元建模,在模型中分别考虑上模块与下模块之间、连接组件与模块单元之间、连接组件与高强度螺栓之间、模块单元与高强度螺栓之间的接触。参考《钢结构设计规范》,各部件之间采取喷硬质石英砂处理,摩擦系数取为 0.45,在 Abaqus 6.14 里采用 bolt force 对螺栓杆施加的预紧力。角节点、边节点的加载作用点均在柱端,用点 rp 耦合角节点整个柱顶截面,边节点的加载点在相邻柱柱端,分别用点 rp1、rp2 耦合左、右模块柱柱顶截面,角节点、边节点均施加 X 方向的位移,如图 4 所示,模型中均考虑了 0.1 的轴压比。

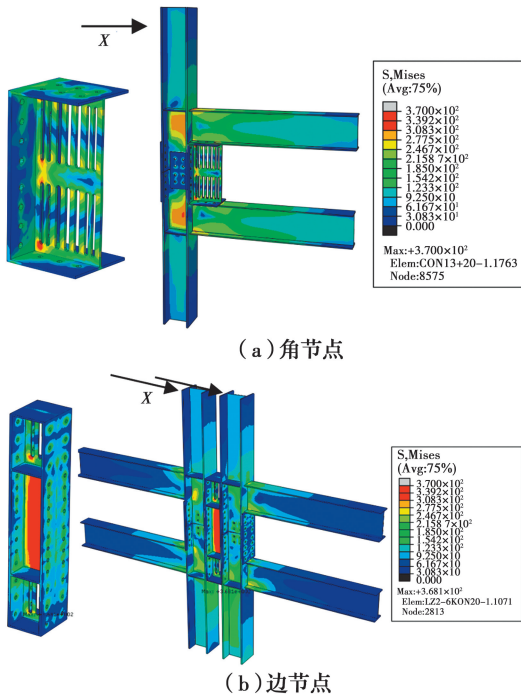


图 4 节点有限元模型和 0.02 rad 时的应力云图
Fig. 4 Finite element model and stress diagram of connection at 0.02 rad

4.3 数值分析

通过螺栓上预紧力(bolt force)加载步来验证有

限元模型的正确性,角节点模型中,螺栓单元上的平均应力为 317.8 N/mm^2 ,边节点模型中,螺栓单元上的平均应力为 316.5 N/mm^2 ,螺栓截面上拉力等于所施加的预紧力 100 kN,说明模型的模拟结果可靠。经验证的盒式角节点、盒式边节点的滞回曲线如图 5 所示,曲线呈明显梭形且饱满,表明节点在加载过程中均消耗大量的能量,具有良好的抗震性能。图 6 为角节点、边节点的骨架曲线,可以看出,角节点、边节点均符合 ANSI/AISC 360-10^[12]第 1~8 部分节点分类中对半刚性节点的要求。

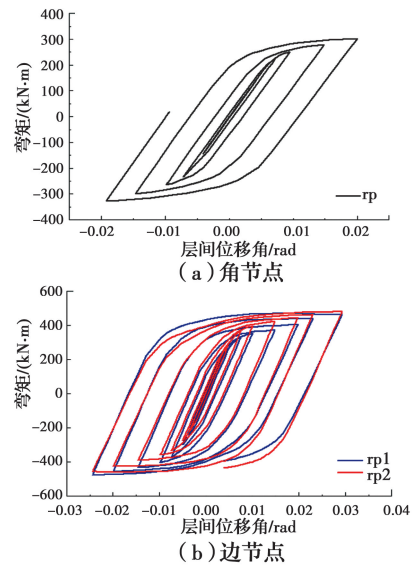


图 5 节点滞回曲线

Fig. 5 Hysteresis of connections

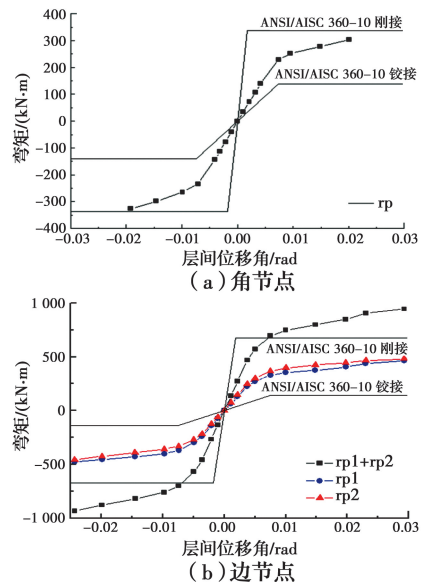


图 6 节点骨架曲线

Fig. 6 Skeleton curve of connection

图 6 结合表 1 分析表明:强度方面,节点在正、反方

向加载时均没有表现出明显峰值,角节点能够传递 90%以上弯矩,BCC-2 较大幅度地增加边节点的极限抗弯承载力,传递弯矩为 128.5%。延性方面,角节点、边节点均表现出较好的延性,正、反方向加载时,角节点的延性系数 μ 均值为 2.703 5,边节点的延性系数 μ 均值为

为 4.911、5.384 5。 $M_{u,P}$ 为预测的节点极限抗弯承载力,其对角节点和边节点的极限抗弯承载力预测值与有限元结果比值 $M_{u,P}/M_u$ 的平均值分别为 1.01、0.905,具有很高的精度, M_u 取层间位移角 0.02 rad 对应的弯矩承载力为极限抗弯承载力。

表 1 节点有限元模型结果

Table 1 Finite element model results of connection

节点	加载方向	$k_0/(10^3 \text{ kN} \cdot \text{m})$	$M_u/(\text{kN} \cdot \text{m})$	$M_u/M_{p,beam}$	θ_y/rad	θ_u/rad	μ	$M_{u,P}/M_u$	ξ_{eq}
角节点 rp	+	32.4	303.0	0.90	0.007 39	0.019 15	2.591	1.05	0.183
	-	35.5	327.0	0.97	0.007 12	0.020 05	2.816	0.97	
边节点 rp1+rp2	+	123.3	849.0	1.26	0.005 00	0.029 29	5.858	0.92	0.313
	-	123.7	881.0	1.31	0.004 96	0.024 36	4.911	0.89	

注: k_0 为初始刚度; M_u 为极限抗弯承载力; $M_{p,beam}$ 为天花板梁和地板梁的设计抗弯承载力; $M_{u,P}$ 为预测的节点极限抗弯承载力; θ_y 为屈服层间位移角; θ_u 为破坏层间位移角; μ 为延性系数; ξ_{eq} 为等效阻尼比。

在弹性阶段,角节点上 BCC-1 腹板上的最大剪应力 $\tau_{1-1} = 98.2 \text{ N/mm}^2 < \frac{4}{3} f_v = 167 \text{ N/mm}^2$,边节点上剪应力 $\tau_{2-2} = 140.2 \text{ N/mm}^2 < \frac{4}{3} f_v = 167 \text{ N/mm}^2$,符合节点域强度验算要求。图 6 给出了盒式角节点和边节点在层间位移达到 0.02 rad 时的应力云图,可以看出,角节点、边节点的塑性破坏均出现在连接组件 BCC-1、BCC-2 腹板上,即大震作用下,边节点上模块单元基本保持弹性,可以通过震后更换 BCC-1、BCC-2 快速恢复结构的使用功能^[13]。

中国规范^[9]的“三水准”设防目标要求为“小震不坏、中震可修、大震不倒”,盒式角节点、在正、反方向加载的屈服层间位移角分别为:1/135、1/140,盒式边节点在正、反方向加载的屈服层间位移角分别为:1/200、1/202,均大于 1/250,在层间位移角为 1/50 时,角节点、边节点的抗弯承载力没有下降趋势,刚度方面满足中国规范^[9-10]要求。

5 结论

设计了基于盒式连接组件 BCC-1、BCC-2 的全螺栓盒式节点,对节点构造以及设计理念进行详细的阐述,并基于“等强度理论”给出了盒式节点的设计流程和竖向、水平方向的连接设计公式,分析了节点的极限抗弯承载力,并以塑性铰形成于 BCC-1、BCC-2 腹板为目标,进行了 BCC-1、BCC-2 的腹板设计,采用有限元软件 ABAQUS 6.14 对角节点、边节点抗震性能进行分析,结论如下:

1) 采用提出的模块单元盒式节点连接设计方法设计的角节点和边节点在往复加载作用下的塑性变形集中在节点核心区,并且 BCC-1、BCC-2 腹板截面削弱处首先屈服形成塑性铰,既满足了节点域腹板受剪耗能的理念,又可以在震后快速更换 BCC-1、BCC-2 以恢复节点的使用功能,表明提出的盒式节点设计理念和设计方法合理。

2) 盒式角节点和边节点均符合 ANSI/AISC 360-10 规范对于半刚性节点的要求,正、反方向下,角节点、边节点能传递的极限抗弯承载均值分别为 93.5%、128.5%;角节点和边节点在层间位移角为 1/250 时,均处于弹性,层间位移角达到 1/50 时,没有表现出抗弯承载力的降低,而且滞回曲线、骨架曲线和模型结果数据显示节点具有良好的抗震性能,说明盒式节点的设计方法合理。

3) 正、反方向下,盒式角节点极限抗弯承载力的预测值与有限元结果的比值 $M_{u,P}/M_u$ 均值为 1.01,盒式边节点极限抗弯承载力的预测值与有限元结果的比值 $M_{u,P}$ 均值为 0.905,说明给出的节点极限抗弯承载力公式能很好地预测节点的极限抗弯承载力。

参考文献:

- [1] 王俊,赵基达,胡宗羽.我国建筑工业化发展现状与思考[J].土木工程学报,2016,49(5):1-8.
WANG J, ZHAO J D, HU Z Y. Review and thinking on development of building industrialization in China [J]. China Civil Engineering Journal, 2016, 49(5): 1-

8. (in Chinese)
- [2] ANNAN C D, YOUSSEF M A, EL NAGGAR M H. Experimental evaluation of the seismic performance of modular steel-braced frames [J]. *Engineering Structures*, 2009, 31(7): 1435-1446.
- [3] PARK K S, MOON J, LEE S S, et al. Embedded steel column-to-foundation connection for a modular structural system [J]. *Engineering Structures*, 2016, 110: 244-257.
- [4] LEE S, PARK J, KWAK E, et al. Verification of the seismic performance of a rigidly connected modular system depending on the shape and size of the ceiling bracket [J]. *Materials*, 2017, 10(3): 263.
- [5] DENG E F, ZONG L, DING Y, et al. Monotonic and cyclic response of bolted connections with welded cover plate for modular steel construction [J]. *Engineering Structures*, 2018, 167: 407-419.
- [6] CHEN Z H, LIU J D, YU Y J, et al. Experimental study of an innovative modular steel building connection [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2017, 139: 69-82.
- [7] CHEN Z H, LIU J D, YU Y J. Experimental study on interior connections in modular steel buildings [J]. *Engineering Structures*, 2017, 147: 625-638.
- [8] 刘明扬, 王燕, 郑书朔. 新型模块化钢框架板式内套筒连接节点力学性能研究[J]. *钢结构*, 2018, 33(1): 1-5, 10.
LIU M Y, WANG Y, JIA S S. Research on the mechanical properties of new plate-inner sleeve joint of steel modular frame [J]. *Steel Construction*, 2018, 33(1): 1-5, 10. (in Chinese)
- [9] 建筑抗震设计规范:GB 50011—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
Code for seismic design of buildings: GB 50011-2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010. (in Chinese)
- [10] 钢结构设计规范:GB 50017—2003[S]. 北京: 中国计划出版社, 2003.
Code for design of steel structures: GB 50017-2003[S]. Beijing: China Planning Press, 2003. (in Chinese)
- [11] 陈以一, 王伟, 赵宪忠. 钢结构体系中节点耗能能力研究进展与关键技术[J]. *建筑结构学报*, 2010, 31(6): 81-88.
CHEN Y Y, WANG W, ZHAO X Z. Development and key technical issues on energy dissipation capacity of joints in steel structures [J]. *Journal of Building Structures*, 2010, 31(6): 81-88. (in Chinese)
- [12] ANSI/AISC 360-10. Specification for structural steel buildings[S]. Chicago: American Institute of Steel Construction, 2010.
- [13] 周颖, 吴浩, 顾安琪. 地震工程: 从抗震、减隔震到可恢复性[J]. *工程力学*, 2019, 36(6): 1-12.
ZHOU Y, WU H, GU A Q. Earthquake engineering: from earthquake resistance, energy dissipation, and isolation, to resilience [J]. *Engineering Mechanics*, 2019, 36(6): 1-12. (in Chinese)

(编辑 章润红)