

模块化钢结构建筑连接技术及鲁棒性 研究进展与展望

陈金林^{1,2}, 侯兆新^{1,2}, 龚超^{2*}, 刘兆祥², 赵木子², 付张鑫^{1,2}

(1. 中冶建筑研究总院有限公司, 北京 100088; 2. 中冶建筑研究总院(深圳)有限公司,
广东 深圳 518055)

摘要: 模块化钢结构建筑凭借标准化、集成化和工业化等优势, 迅速得到了学术界和工程界的青睐。以模块间连接节点强度不足、相邻构件协同工作性能差和结构鲁棒性弱这3个问题为切入点, 归纳了国内外模块化钢结构建筑中采用的半刚接和刚接节点, 从力学机理和施工安装两个维度论述了现有模块间连接节点的发展与不足, 提出了“梁端-柱端混合式连接”的解决思路。针对模块化钢结构建筑的模块间梁-梁、柱-柱协同工作, 分析其与钢-混凝土组合梁和格构柱的异同, 在考虑建筑装修及施工的基础上提出了非连续连接组合梁(柱)的解决思路, 然后总结了模块化钢结构建筑鲁棒性的影响规律。基于现有研究成果, 建议在模块间刚性连接节点、非连续连接组合构件及体系分析方面开展更为深入的研究。

关键词: 模块化钢结构建筑; 模块间连接节点; 构件协同工作; 鲁棒性; 非连续连接组合梁(柱)

中图分类号: TU391

文献标志码: A

文章编号: 1671-9379(2025)04-0001-13

DOI: 10.13969/j.jzgjz.20231101001

State-of-the-Art Research and Prospect of Inter-Module Connections and Robustness of Modular Steel Buildings

CHEN Jinlin^{1,2}, HOU Zhaoxin^{1,2}, GONG Chao^{2*}, LIU Zhaoxiang²,
ZHAO Muzi², FU Zhangxin^{1,2}

(1. Central Research Institute of Building and Construction Co., Ltd. MCC Group, Beijing 100088, China; 2. Central
Research Institute of Building and Construction (Shenzhen) Co., Ltd. MCC Group, Shenzhen 518055, China)

*Corresponding author: gongchao6330@163.com

Abstract: With the advantages of standardization, integration and industrialization, modular steel building has quickly attracted the attention of academia and industry. In this paper, the authors summarize the semi-rigid and rigid connection of modular steel buildings and mainly focus on weak connection, poor cooperative performance of adjacent components and weak robustness. The advantages and disadvantages of existing modular connections are elaborated from mechanical mechanism and construction. The idea of "connected at both beam and column end" is proposed. For the cooperative performance of beam-beam and column-column between modules, the similarities and differences with steel-concrete composite beams and lattice columns are analyzed. Considering the decoration and construction, the

收稿日期: 2023-11-01

基金项目: 深圳市科技计划 (CJGJZD20230724093302005)

作者简介:

陈金林(1998—), 男, 硕士研究生, 主要从事模块化钢结构方面的研究。E-mail: chenjinlin0220@163.com。

侯兆新(1963—), 男, 博士, 正高级工程师, 主要从事钢结构、装配式和模块化建筑方面的研究。

通信作者:

龚超(1981—), 男, 博士, 正高级工程师, 主要从事钢结构、装配式和模块化建筑方面的研究。E-mail: gongchao6330@163.com。

solution of composite beam (column) with discontinuous connection is put forward. Additionally, the patterns influencing the robustness of modular steel buildings are summarized. Based on the existing research, it is recommended to conduct more in-depth research on rigid connections between modules, composite components with discontinuous connection, and system analysis.

Keywords: modular steel building; module-to-module connection; component cooperative work; robustness; composite beam (column) with discontinuous connection

随着我国建筑工业化的发展和“双碳”目标的提出,装配式建筑得到了显著发展与应用。模块化建筑作为装配式建筑与新型建筑工业化的高级形式,具有规模效益好、施工速度快和质量可控等优点^[1],已在国内外公寓、酒店、学校、宿舍、住宅、医疗、办公等多种类型的民用和工业建筑中得到了广泛应用。尤其是在新型冠状病毒疫情时期,模块化建筑发挥了至关重要的作用。此外,模块化建筑在军事设施建设、应急救援等领域和国家“一带一路”建设中也具有较好的应用前景^[2]。

模块化钢结构作为一种高度预制的装配式建筑^[3],具有标准化、集成化和工业化的特点,高度契合我国建筑工业化、智能化、绿色化的发展方向。然而,建筑楼板、隔墙使得全要素集成的钢模块间节点的连接缺少施工作业面^[4]——尤其是建筑中部8个模块拼接的位置,不利于模块间连接节点的设计与施工。此外,工程应用中模块间连接节点力学性能差,且柱承重式钢模块之间的连接仅限于模块单元的角部,模块间相邻构件缺乏有效连接,无法协同工作,这些因素共同限制了模块化钢结构建筑的实际推广和应用。

1 模块化钢结构建筑的特点及问题

模块化建筑通过在工厂预制模块单元,施工现场只需完成基础施工和模块单元的拼接,便可快速交付使用,其典型的建筑特点包括双墙体、双楼板、多梁、多柱、弱节点。然而,模块化建筑的集成化设计目前正面临着多模块间连接操作困难、模块间连接节点抗弯刚度不足、模块连接与墙板存在冲突等技术难题^[5]。

柱承重式模块化钢结构建筑的传力路径明确、模块规格多样、空间布置灵活^[5],目前应用最为广泛。然而,这种结构的连接主要集中在角柱或角柱附近的梁端,其他位置缺乏有效约束,因此结构离散性较大,抗震能力较弱,整体性能相对较差,安全冗余度较低^[3]。而抗震结构的整体性要求加强相邻构件间的连接,以充分发挥各构件的承载及变形能力,从而提高结构的整体抗震性能、稳定性和鲁棒性^[6]。从模块间的连接节点、模块间梁-梁协同工作和模块间柱-柱协同工作3个方面归纳了模块化钢结构建筑连接技术的研究进展,并总结了影响模块化建筑鲁棒性的因素。

2 模块化钢结构的连接节点

模块间连接节点是结构传力的关键^[3],对结构整体性能有显著影响^[4];实际工程中,模块间连接节点的抗弯刚度弱,不利于形成有效的抗弯框架,设计计算时一般简化将其为铰接。根据《中国地震动参数区划图》(GB 18306—2015)^[7]和《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)^[8]的规定,我国全域范围内均需进行抗震设防,铰接节点的设计制约了模块化钢结构建筑向多高层建筑和高烈度地区的发展。近年来,国内外学者提出了多种适用于模块化钢结构建筑的半刚性和刚性连接节点。

螺栓-连接板节点是模块化钢结构建筑中模块之间常用的连接形式,如图1所示。邓恩峰等^[9-11]提出一种螺栓-封板(半刚性)节点并研究了其静力和抗震性能,在弯矩作用下截面厚度较小的天花板梁发生局部屈曲,在低周往复荷载作用下柱壁被撕裂,过大的层间位移角导致梁柱焊缝根部断裂,而增设加劲肋、内隔板和封板等能够改善节点性能。文献^[12-16]提出了一种螺栓-竖向连接板(半刚性)节点并研究了其力学性能,建立了水平荷载作用下箱式模块化钢结构的简化分析模型,推导并验证了模块柱的整体稳定承载力理论计算方法。LEE等^[17-18]研究发现,连接板-天花板梁牛腿式(刚性)节点具有较好的滞回耗能能力,能够满足美国钢结构抗震设计规范中特殊受弯框架的抗震设防需求^[3],同时该设计也符合“强柱弱梁”的设计理念。Z Modular公司^[19-21]推出了一种“VectorBloc铸钢模块连接件”,用于模块间的刚性连接。研究表明,柱是该连接节点的关键构件,柱端率先形成塑性铰进而导致节点失效,增大柱的轴压比会显著降低节点的抗弯刚度,这与“强柱弱梁”的设计理念不符。以上节点虽然传力路径明确、构造简单、力学性能好,但节点连接时往往缺乏操作空间。

为解决节点安装时缺少施工作业面的问题,文献^[22-23]基于摩擦自锁原理,提出了一种插入式自锁(半刚性)节点,并建立了节点的简化模型与设计方法。王永瑞等^[24-25]提出了一种新型柱内置螺栓(半刚性)节点,其破坏模式为梁柱焊缝断裂和梁屈曲破坏,但随着梁截面高度的增加,塑性铰开始在柱上形成。如图2所示,这类节点虽然能够传递模块间的竖向轴力和弯矩,但模块间的水平连接弱且其安装精度要求很高,且难以运用于模块与抗侧力体系的连接。

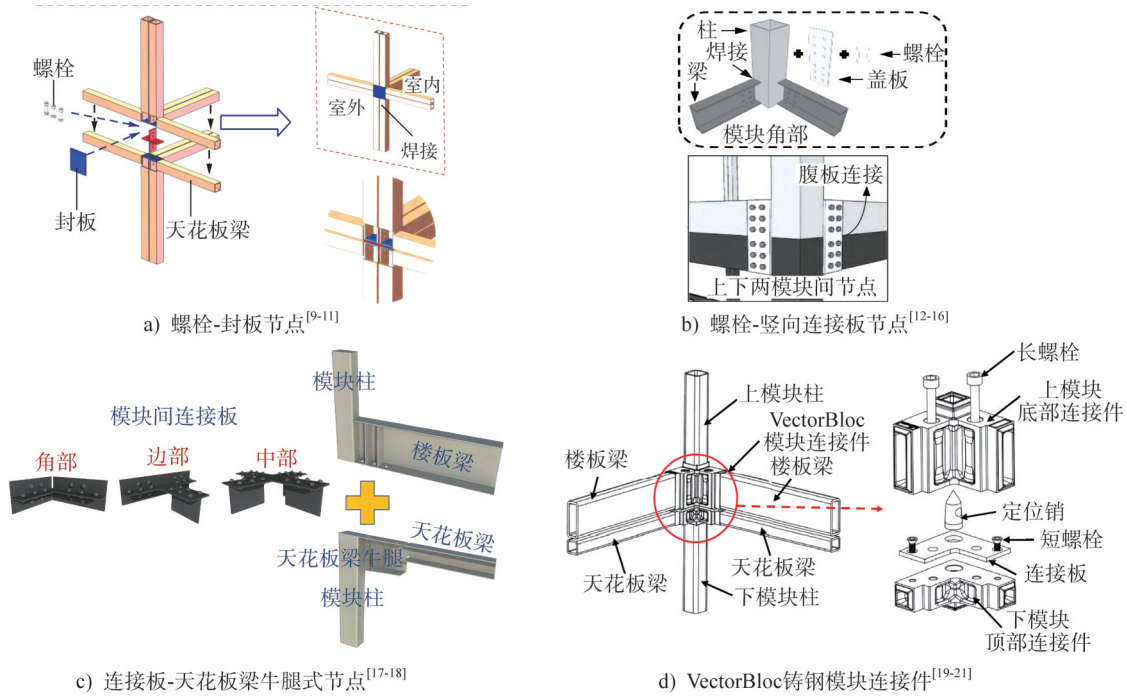


图1 螺栓-连接板式连接节点

Fig. 1 Bolted connection with connection plates

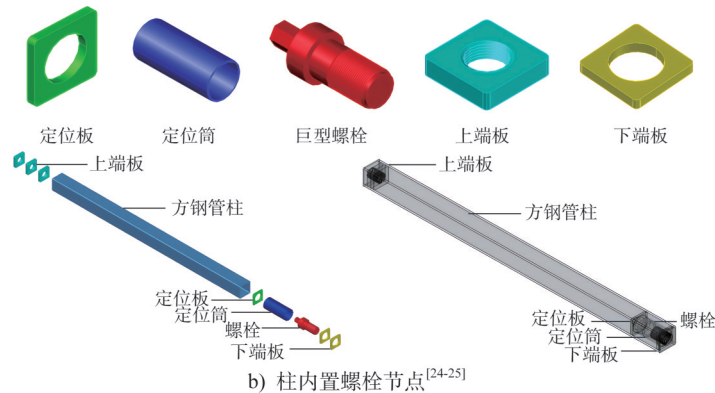
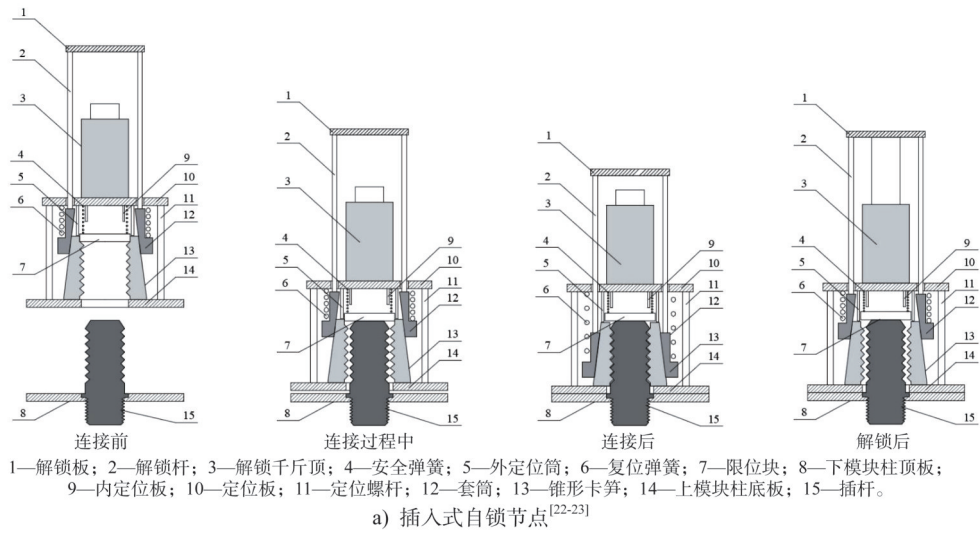


图2 不影响室内装修的节点

Fig. 2 Connections without affecting interior decoration

经过合理的设计,柱内插件-长螺栓节点能够满足模块间的竖向和水平连接需求,如图3所示。NADEEM等^[26]提出了一种内插件-自锁(半刚性)节点,弹簧销和螺栓可以有效避免柱与内插件的分离,提高了节点的抗弯刚度;在一定范围内增加梁高度可以提高节点的初始刚度和极限承载能力,其破坏模式为天花板梁根部屈服和螺栓屈服。KHAN等^[27-28]提出了一种柱内榫件-长螺栓

(半刚性)节点并进行了参数分析,结果表明增大内榫件的长度可显著提高节点初始刚度和极限承载能力,而模块间距对节点力学性能影响较小。MA等^[29]提出了一种柱内插件-长螺栓(半刚性)节点,实现了天花板梁和楼板梁的协同工作,二者的抗弯刚度比以及内插件与柱壁的距离是影响节点性能和模块间竖向传力的主要因素。这类节点虽然力学性能良好,但对安装精度的要求较高。

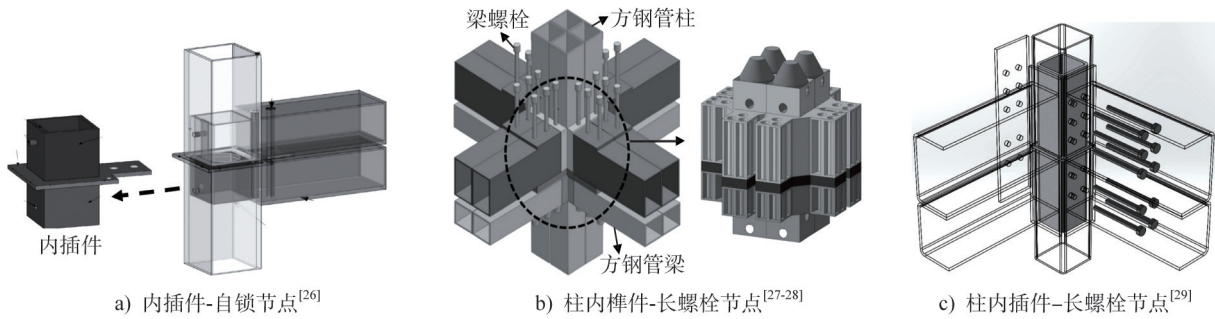


图3 柱内插件-螺栓节点

Fig. 3 Bolted connection with plug-in device

半刚性梁-柱节点对传统框架结构的初始刚度和内力分布均有显著影响^[30],简单地模块间的半刚接和刚接节点视为铰接,会导致内力计算结果与实际情况存在差异,可能使结构设计偏于不安全。因此,在结构分析时,可将模块间半刚性节点用半刚性弹簧代替,进而考虑节点刚度对结构整体受力性能的影响^[5],刚性节点亦可采用刚性短杆代替,简化分析模型如图4所示。

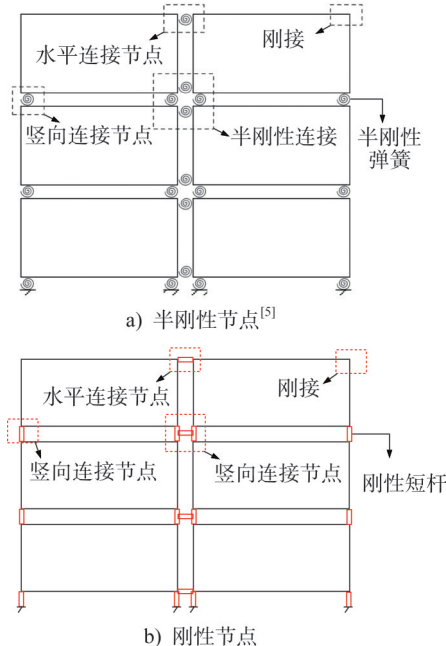


图4 柱承重式模块化钢结构建筑的简化分析模型

Fig. 4 Simplified analysis models of column-supported modular steel building

就模块间连接节点的简化分析力学模型而言,模块间连接节点分为柱端连接、梁端连接以及梁端-柱端混合

式连接3种方式,如图5所示,其中阻力臂 a_1 、 a_2 为1/2的柱宽, b_1 为梁端连接至转动中心的距离, b_2 为梁端连接至远端柱壁的距离, c_1 为柱端连接至转动中心的距离, F 为荷载。当模块化钢结构建筑采用柱端连接方式时,由于多模块拼装过程中缺少操作空间,因此模块间连接节点多采用柱截面开孔、自锁型节点和角件节点等形式,即连接只布置在柱中心且柱壁仅接触,其阻力臂 a_1 、 a_2 很小,连接节点的抗弯刚度及承载能力主要取决于柱间连接程度。但由于经济性和安装操作空间的限制,柱间连接强度一般不会特别高,因此工程项目中多采用铰接形式,如文中的柱端连接节点^[22-25]采用了45号钢(屈服强度 $f_y=450$ MPa)特制的型号为 $\phi 50$ 和 $\phi 90$ 的巨型螺栓,才能达到半刚性节点的要求。当模块化钢结构建筑采用梁端连接方式时,上、下模块柱仅承压接触,在水平荷载作用下容易出现上、下模块柱翘起脱开的现象,并且建筑角部连接节点在正、反两个方向的抗弯刚度存在较大差异,其核心原因是两个方向的阻力臂 b_1 、 b_2 不同。但对于梁端连接方式,仅需在建筑墙板上预留安装槽,便能解决多模块难以拼装的难题。当模块化钢结构建筑采用梁端-柱端混合式连接方式时,阻力臂 c_1 、 b_2 大且抵抗弯矩能力强,既能克服梁端连接节点的柱壁翘起脱离和两个方向刚度、承载能力差异大的问题,又能大幅提高柱端连接节点的刚度和承载能力。

就模块化钢结构建筑的现场安装而言,多模块拼装过程中往往缺少操作空间且安装精度要求高,模块化建筑工程项目中的模块间连接节点多为铰接且螺栓连接采用大圆孔,这种以牺牲力学性能为代价来降低安装难度、提高拼装效率的做法在后疫情时代恐难以复制推广。现

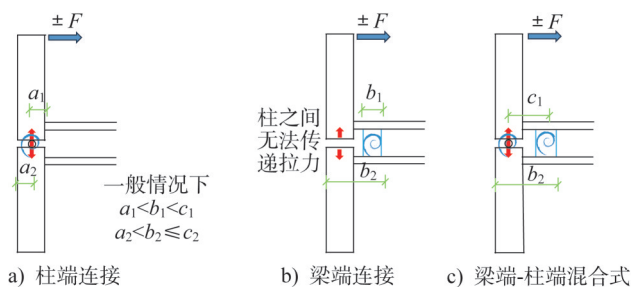


图5 模块间连接节点分类(简化分析力学模型)

Fig. 5 Classification of connection between modules (simplified analytical mechanics model)

有的模块间连接节点研究大多关注其力学性能,忽视了节点构造需与施工过程相匹配,虽已提出了多种多样的节点构造形式,但难以运用于实际工程中。对于柱承重式模块化钢结构建筑,模块梁、柱为结构传力的关键,建筑墙体、楼板等非主要承重构件可适当预留安装孔,待模块间连接节点安装完成后,再合上与建筑踢脚线等装饰装修相结合的后封板,就能基本不影响内装修,且安装孔还可以作为日后检修和拆除的作业面。此外,现有试验和研究主要集中于构件层面,缺乏基于新型节点的模块化建筑足尺试验和整体结构分析。因此针对梁端-柱端混合式连接,建议研发出力学性能更加优异、安装施工更加高效便利的新型模块间连接节点,同时基于所提出的新型节点,研究模块化钢结构建筑的整体结构性能与响应,形成体系化的研究成果,以便工程应用与推广。

3 模块化钢结构的梁-梁协同工作性能

由于施工需要,柱承重式模块化钢结构建筑的楼板梁和天花板梁之间往往存在一定间隙,从而形成了独立工作的双梁结构^[31-33],其抗弯刚度和承载能力均弱于相同高度叠合梁的对应性能,导致用钢量增加。与楼板梁相比,天花板梁仅承受吊顶恒载,其截面高度低、板材厚度小,在地震作用下,容易过早出现模块天花板梁局部屈曲和模块内梁-柱焊缝断裂的情况,使得结构提前失效。

在锅炉钢结构设计中,叠合钢梁的研究和应用较为成熟。根据相关规范规定:当梁高度超过3.8m时,可设计成叠合梁,且叠合梁的高跨比不宜大于1/6。如图6所示,田明等^[34]为改善锅炉超重型钢梁的腹板受力并解决运输安装等问题,提出了一种高强螺栓连接的叠合钢梁,挤压和剪切的作用使得其截面正应力呈非线性分布;叠合面使得截面中部的剪应力存在突变。黄仁锋等^[35]提出了一种混合钢种工字形叠合梁,用于锅炉钢架的大板梁,其中仅有下层工字梁的翼缘板采用较高强度钢,研究了截面尺寸、钢种强度比对梁抗弯承载力的影响。该叠合梁符合受压由稳定主导、受拉由强度主导的设计理念,充分发挥了板件的材料强度,减少了用钢量。与模块化钢结构相比,锅炉叠合钢梁的设计更侧重于构件层面且不考虑墙板等围

护结构的影响,因此设计较为灵活、连接方便。

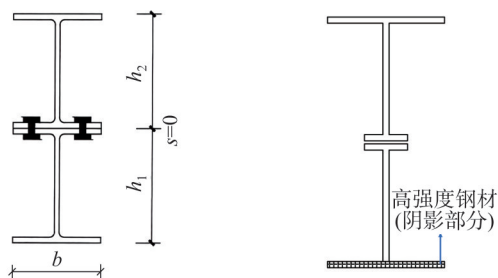


图6 叠层钢梁在锅炉钢结构中的应用

Fig. 6 Laminated steel beams applied to boiler steel structure

近年来,随着模块化钢结构建筑的发展,模块间相邻梁的协同工作也逐渐受到了关注。如图7所示,为使集装箱中的相邻模块梁共同工作,李杰等^[36-37]提出了一种非连续性叠层拼合钢梁,与自由叠合钢梁相比,其承载能力大幅提高,连接件布置在剪弯区比布置在纯弯区更有利于发挥叠合梁的整体工作性能。SHARAFI等^[6]提出了一种模块间相邻构件连锁体系,验证了构件协同工作有利于提高整体结构的受力性能。秦福阳^[38]的研究表明,通过连接端板和对拉螺栓连接形成的方钢管叠合梁,在相同抗弯承载力下,相较于独立双梁,可节省15%的用钢量。

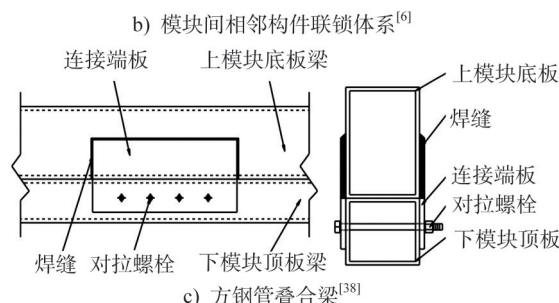
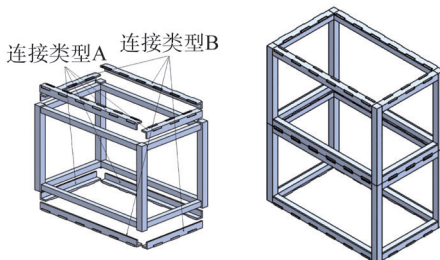
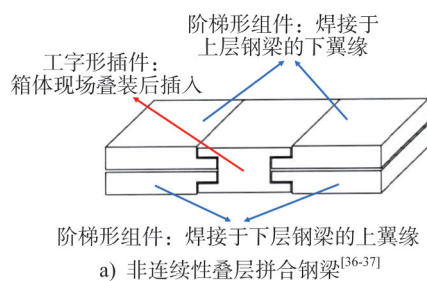


图7 叠合梁的连接件

Fig. 7 Connectors for laminated beams

槽形(C形)等开口截面极大地方便了模块间构件的连接,如图8所示。针对12 m大跨度的柱承重式模块化钢结构建筑,张惊宙等^[39]提出一种通过自攻螺栓将相邻模块的4根冷弯薄壁型钢梁连接形成整体的方案,以提高构件的承载能力和刚度,并给出了该结构的简化分析模型。杨晓杰等^[40]采用冷弯厚壁槽钢作为梁,并通过高强螺栓连接形成组合截面,槽钢组合截面梁可采用空腹桁架模型来模拟,该体系可用于6层以上的多高层钢结构建筑,随着建筑高度的增加,风荷载起控制作用,梁柱内力均增大,用钢量也随之增加。CHOI等^[41]通过非线性

分析发现,相邻构件(梁或柱)形成组合截面可提高模块化建筑的整体性和承载能力。徐博等^[33,42-45]研究发现,叠合面的剪切刚度对槽钢组合梁的抗弯性能影响显著。杨超等^[46-47]提出一种建筑边部的上下“双梁”采用H型钢,其余部分的“四梁”采用槽钢梁,并采用垫块、螺栓连接形成受力性能较好的“王”字形截面的设计方案,而非图8b)、d)中的“E”字形截面,螺栓在协调模块叠合梁的变形方面起主要控制作用。在理想情况下,合理布置垫块、螺栓,可以使组合梁的刚度及承载能力与等截面空腹式梁的对应性能相当。

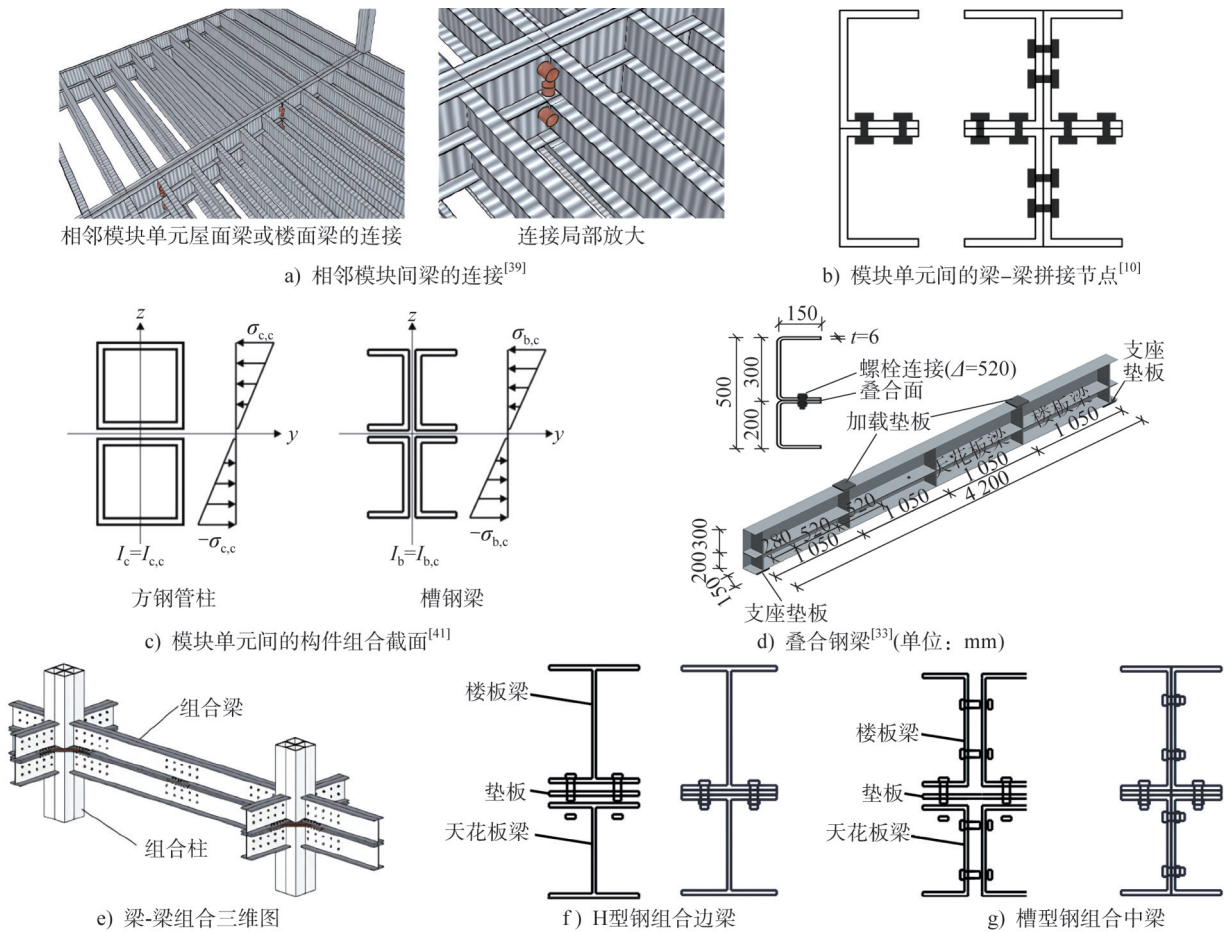


图8 模块单元间槽钢梁的组合截面^[46-47]

Fig. 8 Composite section of channel beams between modules^[46-47]

就模块间梁-梁协同工作的力学机理而言,与传统的钢-混凝土组合梁类似,层间剪切连接件都是保证上、下两个独立构件能够组合形成整体以实现协同工作的关键受力构件。不同的是,模块化钢结构建筑受到建筑墙板的影响,无法像钢-混凝土组合梁那样在全跨范围内通长布置层间抗剪连接件,只能在跨内几处集中布置,形成非连续性组合梁。此外,钢-混凝土组合梁和模块化建筑梁-梁协同工作的层间抗剪连接件的剪力-滑移模型不同,主要差异是模块化建筑的层间抗剪连接件多采用高

强度螺栓,标准螺栓孔的孔径一般比螺杆直径大1.5~3.0 mm,存在一个显著的滑移阶段,若考虑施工精度的影响采用大圆孔,则滑移段更长。层间抗剪连接件的剪力-滑移曲线如图9所示,当模块间梁-梁协同受弯时,层间的高强度螺栓主要承受剪力,滑移段会对结构的承载能力及刚度产生显著影响。目前对模块化建筑梁-梁协同工作的研究大多集中于等效模拟层面,对于揭示模块间梁-梁协同工作的机理以及层间抗剪连接件的抗剪-滑移本构模型的研究还不够充分。

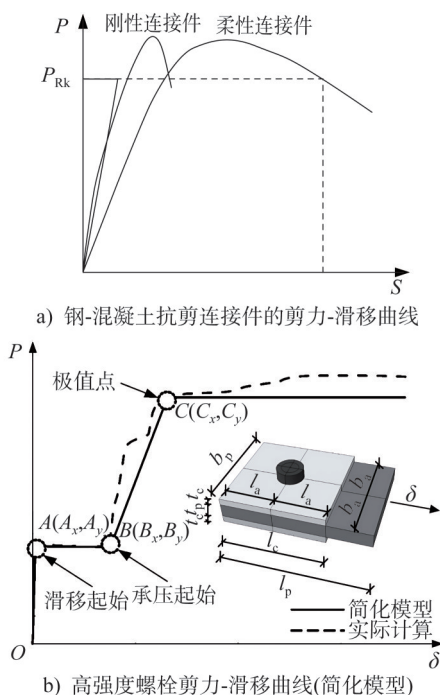


图9 层间抗剪连接件的剪力-滑移曲线
Fig. 9 Shear-slippage curves of inter-story shear connectors

就模块间梁-梁协同工作的运输、安装过程而言,需综合考虑单个模块工况和模块间拼接完成后的整体结构工况。目前模块间梁-梁协同工作的连接构造相对较少,主要以槽钢梁通过高强度螺栓连接为主。尽管槽钢梁连接完成后形成的“王”字形对称截面受力性能良好,但在单个模块工况时,槽钢梁的表现略有不足,因此实际工程项目中的模块梁仍然以箱形截面为主。此外,模块装修层使得模块间梁-梁连接缺少操作空间,层间抗剪键仅在跨内几处集中布置,并且在传统的模块箱体布局中,上下模块单元间往往存在一定间隙,常采用垫块-螺栓的连接方式,最终形成非连续连接组合钢梁。与锅炉钢结构的叠合梁相比,现有模块化建筑的非连续性组合钢梁研究起步较晚、综合影响因素更加复杂,虽在力学性能的研究上取得了一定成果,但在作用机理、设计方法和安装连接构造等方面还有待深入研究。

4 模块化钢结构的柱-柱协同工作性能

模块间梁-梁协同工作以及楼板的存在可能会导致“强梁弱柱”的不利情况,因此有必要针对相邻模块间柱-柱协同工作进行研究。一些学者提出柱与柱之间通过耗能连梁、钢支撑或钢板剪力墙等措施形成组合柱,可以提高结构的耗能和承载能力。然而模块间的水平间隙小(一般为5~10 mm),增加耗能构件使相邻模块柱形成组合柱的方式在传统模块化建筑中难以实现。

如图10所示,孙瑛志等^[48]分析了填板(缀板)对模块

组合柱抗侧刚度的影响,得到了钢模块建筑中槽钢组合柱的长细比与截面惯性矩的计算式;杨晓杰等^[40]提出一种冷弯厚壁槽钢作为模块柱的结构体系,并给出了组合柱的简化设计模型。王伟^[49]提出了一种新型的异形柱,如图11所示,通过在柱壁上用螺栓连接使相邻模块柱形成组合柱,提高了模块化建筑的整体承载能力和抗侧移刚度。

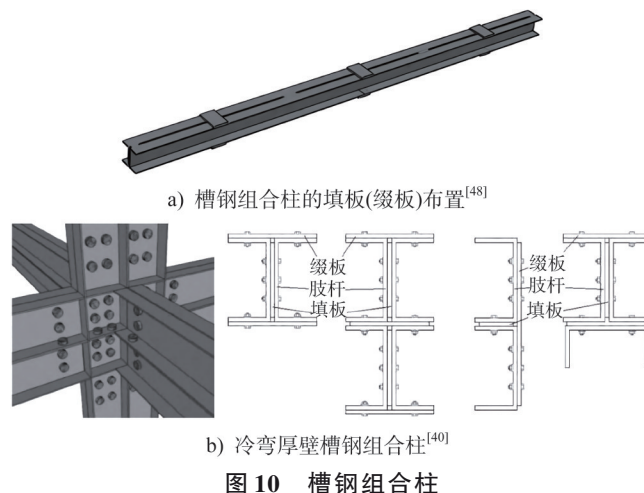


图10 槽钢组合柱
Fig. 10 Composite column with channel section

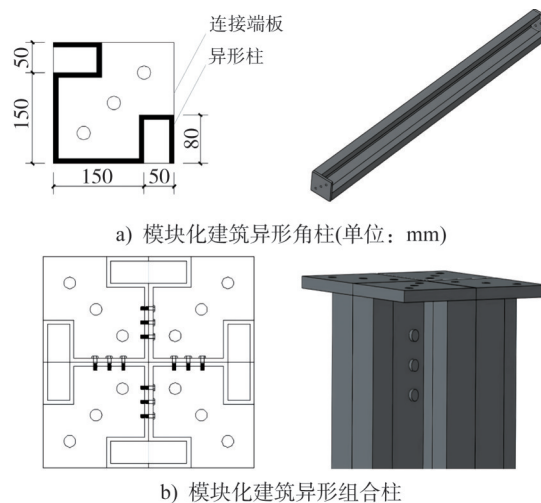


图11 模块化建筑异形组合柱^[49]
Fig. 11 Composite column with special section of modular steel building^[49]

针对受力性能较好的方钢管柱,徐亚冲^[50]提出一种外包钢板柱-柱组合的方式,其组合连接流程如图12所示,与单独工作的模块柱相比,外包钢板组合柱的塑性轴压极限承载力和抗震性能都得到了显著提高。杨超等^[46-47,51]针对外包钢板组合柱,从受力机理、影响参数和整体结构方面进行分析,研究表明:(1)与无外包钢板柱相比,外包钢板组合柱的初始刚度提升了61.5%,承载能

力提升了22.4%；(2) 钢板的线刚度对组合柱的刚度、承载能力和耗能影响显著；(3) 在罕遇地震作用下，组合后结构的位移响应和塑性发展程度都明显降低。

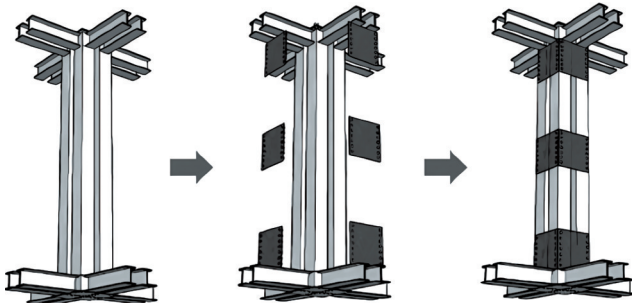


图12 外包钢板柱-柱组合单边螺栓连接流程^[46-47,50-51]

Fig. 12 Single-sided bolt connection processes between outer steel plate and column^[46-47,50-51]

就模块化建筑柱-柱协同工作的力学机理而言，与传统的格构柱类似，柱间连接（缀板）都是保证独立模块柱形成组合柱以实现协同工作的关键受力构件。与模块间梁-梁协同工作的力学机理类似，最终形成几处集中连接的格构柱；柱间连接也多采用高强度螺栓，与格构柱缀板焊接相比，螺栓抗剪滑移段也是不可忽视的要素。目前，模块间柱-柱协同工作性能研究多基于槽钢柱和异形柱，这种构件截面形式在单个模块的工况下受力性能不佳；形成组合柱后，大多数截面靠近中和轴，故柱的抗弯刚度和抗侧刚度提升不明显。虽然方钢管柱在单个模块工况和拼装完成后整体结构工况下，承载性能都较好，但方钢管柱如何形成组合柱以及如何减小其对墙体的影响都是必须突破的难题。就模块化建筑柱-柱协同工作的安装连接而言，其连接形式相对单一，研究成果也缺乏相应的试验验证。在不削弱柱截面的情况下，如何平衡模块间柱-柱连接和围护结构破坏之间的关系是亟需研究突破的难题。

5 模块化钢结构建筑的鲁棒性

建筑结构的鲁棒性是指在偶然灾变作用导致部分竖向承重构件失效的条件下，建筑结构不发生连续性倒塌破坏的能力^[52]。模块化钢结构建筑是新型的结构体系，在荷载传递路径、冗余度、拼装模式和稳定性要求等方面均不同于传统框架结构^[53]，因此有必要进行模块化钢结构建筑的抗连续性倒塌分析。

基于数值模拟和备用荷载路径法，不少学者对影响模块化钢结构建筑鲁棒性的要素进行了分析，如表1所示，主要得到以下结论：(1) 模块化钢结构建筑的鲁棒性主要取决于模块间连接的性质^[54-55]，水平连接的抗剪能力越强^[53,56]、竖向连接越可靠^[56]、模块间连接节点的刚度越大^[57]，则其鲁棒性越好；(2) 现有模块间连接节点对结构

鲁棒性影响的研究，大多基于模块内梁柱刚接和模块间铰接、半刚接或刚接的假定^[54]，而忽略了节点区域复杂的作用机理；(3) 结构横向刚度越大（每层模块数量越多^[56]、每层柱数量越多^[57]、柱截面承载能力越强^[56-57]）、建筑高度越低^[53,58,59-60]、模块跨度越小^[55-61]、初始失效位置越高^[61]，结构越不容易发生连续性倒塌；(4) 楼板的薄膜效应^[57]和支撑的布置^[56-57]都可以提高结构的鲁棒性；(5) SHARAFI等^[6]还发现，模块间构件的连锁可以增加结构的安全冗余度，提高结构的整体性和鲁棒性。

针对模块化钢结构建筑的鲁棒性，现有研究探索了不同初始失效构件情况下结构的响应和破坏模式，对影响结构鲁棒性的因素进行了参数分析，提出了提高模块化钢结构建筑鲁棒性的系列措施与方法。总体而言，模块间连接节点越强、模块间相邻构件协同工作性能越好、结构整体性越好，则模块化钢结构建筑的鲁棒性越好。然而，目前模块化钢结构建筑鲁棒性的研究大多采用基于有限元分析的备用荷载路径法，缺乏相关的试验验证。并且，传统建筑连续性倒塌的主流分析方法——备用荷载路径法在模块化钢结构建筑中的适用性方面还有待商榷。此外，建模分析时仅将模块间连接节点简化为铰接、半刚接或刚接，而忽视模块间连接节点多样化的连接构造，难以真实反映模块间连接节点对结构鲁棒性的影响。模块间相邻构件协同工作对模块化钢结构建筑鲁棒性的影响机理仍需进一步研究。模块单元内部的梁-柱节点在建模分析时常被假定为刚接，但若其表现出半刚性特性，则结构也会偏于不安全^[54]。

6 研究进展总结与展望

6.1 研究进展总结

6.1.1 模块间连接节点

实际工程项目中的模块间连接节点往往通过牺牲力学性能来降低安装难度，包括但不限于使用连接方便、构造相对简单、力学性能一般的角件节点，高强度螺栓连接采用大圆孔并局限于特定建筑类型以规避8模块连接困难的情况。已有研究成果虽解决了部分技术难题并提高了节点力学性能，但总体而言未能很好地处理现场高效安装与节点力学性能良好之间的矛盾，难以在实际工程项目中推广使用。

就力学性能而言，相比于传统钢框架结构中腹板和翼缘均连接的柱-柱拼接节点，现有柱端连接的模块间连接节点基本达不到等强连接的要求。梁端连接节点的阻力臂大，抗弯刚度及承载能力容易达到半刚性的要求，但模块柱之间无法承担拉力，在水平荷载作用下模块柱容易翘起脱离，影响结构安全。而梁端-柱端混合连接节点不仅阻力臂大，模块柱之间还能承担拉力，相较而言更容易实现半刚接甚至刚接，是本文比较推荐使用的一类节点形式。

表1 模块化钢结构建筑的鲁棒性研究内容
Table 1 Research contents on robustness of modular steel buildings

研究学者	柱或模块移除方案	模块间连接	结构横向刚度	建筑高度	模块跨度	楼板	支撑
SHARAFI等 ^[53]		✓		✓			
HE等 ^[54]		✓					
MUNMULLA等 ^[55]	✓		✓		✓		
THAI等 ^[56]	✓	✓	✓				✓
LUO等 ^[57]	✓		✓	✓		✓	✓
PENG等 ^[58]	✓			✓			
ALEMBAGHERI等 ^[59-60]	✓			✓			
赵晶晶 ^[61]	✓	✓			✓		

6.1.2 模块间构件协同工作

在常规的模块化钢结构建筑中,左右、上下模块单元之间均存在一定的间隙,相邻构件基本没有连接,处于独立工作状态。已有研究针对槽钢等异形截面和方钢管截面,提出了一些模块间构件的连接形式,在力学机理上也开展了一些研究,但总体上落后于工程实践。与模块间连接节点类似,模块间构件连接同样也面临着施工安装与墙板冲突、安装精度要求提高等问题。从全装修的建筑层面来看,沿用钢-混凝土组合梁(格构柱)的思路在跨内(柱高范围内)通长布置抗剪键(缀板),在模块化钢结构建筑中难以实现。桥梁工程中采用的群钉式装配组合梁在跨内几处集中布置抗剪连接件,似乎在模块化钢结构建筑中更具应用前景。

6.1.3 鲁棒性

已有研究基于有限元分析的备用荷载路径法,明确

了模块化钢结构建筑鲁棒性的影响因素及规律,除传统建筑的影响因素外,模块间连接节点及模块间构件协同工作都能显著影响结构的鲁棒性。

理想情况下,将柱承重式模块化建筑的模块间(水平、竖向)连接节点提升至刚接,保证弯矩在竖向构件间传递的连续性,有利于形成抗弯框架。将模块间相邻梁-梁、柱-柱连接形成组合梁、组合柱,有利于提高构件的承载能力和刚度、降低用钢量,同时提高结构的鲁棒性。如图13所示,通过上述方法,柱承重式模块化建筑的力学性能可以接近框架结构的力学性能,即自成抗侧力体系,满足纯模块化建筑向多高层建筑及高烈度地区发展的需求。然而,在设计方法、荷载传递路径和建造方式方面,模块化钢结构建筑也与传统钢框架结构存在较大差异。与成熟的框架结构体系相比,模块化钢结构建筑仍存在很多难题亟待解决。

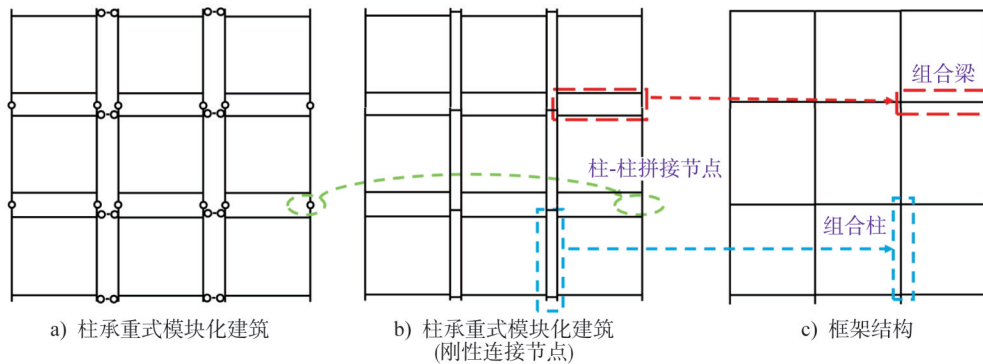


图13 柱承重式模块化建筑与框架结构对比

Fig. 13 Comparison between column supported modular building and frame structure

6.2 研究展望

6.2.1 模块间连接节点

现有的模块化钢结构建筑中,模块间连接节点难以兼具施工方便和力学性能良好的优点。箱体墙板、室内

外装修、模块制造误差和施工便利性要求等导致模块间连接节点的抗弯刚度弱,结构体系的抗震性能差。

针对模块间连接节点刚度弱的问题,在考虑安装公差的情况下建议后续针对以下几个方面开展研究:

(1) 增强模块的柱端式连接,可以借鉴交通、机械和航天等行业的连接构造来加强模块间的竖向连接,如火车的詹式车钩、高铁的柴田式密接车钩和超市防盗扣等。

(2) 采用梁端-柱端混合连接方法,通过增大节点抗弯的阻力臂来提高节点刚度。

(3) 扩大模块间连接的区域,将节点域附近的梁-梁、柱-柱分别栓接绑定,使得8个模块处的4个竖向连接节点和8个水平连接节点最终形成一个共同受力的“节点刚域”,共同承受弯矩。

6.2.2 结构体系

模块化钢结构建筑作为一种新型的装配式建筑形式,在结构特点、力学模型、计算假定和设计方法等方面与传统建筑存在较大差异。虽然目前已取得了一定的研究成果,但模块化钢结构建筑在运用推广时还在设计分析方法、计算参数取值和整体性能指标套用传统标准等方面面临挑战。基于当前的研究现状和建筑工业化的发展需要,建议后续针对以下几个方面开展研究:

(1) 模块化钢结构建筑中的非连续连接组合梁(柱)的强度及刚度设计分析方法。

(2) 考虑三维模块箱体与传统二维预制构件相结合的方式,例如三维箱体和二维预制楼板采用“棋盘式”、“内廊式”的布局,减少甚至避免建筑中部8个模块在一处相连的情况出现,从而降低模块的安装难度,提高节点性能。

(3) 取消模块箱体的天花板(矮)梁,用支撑或刚性吊具作为临时约束,形成“5面模块箱体”,从而将天花板梁与楼板梁合二为一,降低用钢量。

(4) 合理设计叠箱模块与抗侧力体系的连接,形成抗水平力和抗重力相分离的结构体系,使得叠箱模块主要承担竖向荷载,易于实现标准化、产品化,其中抗侧力体系主要承受水平荷载,按抗震需求设计。

(5) 考虑“刚性楼板”假定在模块化钢结构建筑中的适用性问题,明晰箱体墙体对结构刚度和周期的影响,并提出简化设计方法,探究模块-抗侧力结构体系的抗侧刚度分配机制,以及水平荷载作用下结构的侧向变形模式和内力分布特征。

(6) 针对模块化钢结构建筑,探索满足结构抗震、抗风、舒适度和鲁棒性等需求的综合设计方法,提出适用于模块化钢结构建筑的抗震性能化设计方法及其适用范围。

参考文献:

[1] 李爱群,周通,缪志伟. 模块化建筑体系研究进展[J]. 工业建筑, 2018, 48(3): 132-139, 150. DOI: 10.13204/j.gyjz201803025. LI Aiqun, ZHOU Tong, MIAO Zhiwei. State of the art of

modular building system [J]. Industrial Construction, 2018, 48(3): 132-139, 150. DOI: 10.13204/j.gyjz201803025. (in Chinese)

[2] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 住房和城乡建设部办公厅关于印发装配式钢结构模块建筑技术指南的通知: 建办标函[2022]209号[A/OL]. (2022-06-09). https://www.mohurd.gov.cn/gongkai/zc/wjk/art/2022/art_17339_766654.html.

Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Notice of the General Office of the Ministry of Housing and Urban-Rural Development on Issuing the Technical Guidelines for Prefabricated Steel Structure Modular Buildings: Jian Ban Biao Han [2022] No. 209 [A/OL]. (2022-06-09). https://www.mohurd.gov.cn/gongkai/zc/wjk/art/2022/art_17339_766654.html. (in Chinese)

[3] 宗亮,张一弛,崔健,等. 模块化钢结构梁柱子结构抗连续倒塌性能研究[J]. 工程力学, 2024, 41(8): 56-67. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2022.06.0521.

ZONG Liang, ZHANG Yichi, CUI Jian, et al. Progressive collapse analysis on beam-column substructure of modular steel construction [J]. Engineering Mechanics, 2024, 41(8): 56-67. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2022.06.0521. (in Chinese)

[4] 丁阳,邓恩峰,宗亮,等. 模块化钢结构建筑连接节点研究进展[J]. 建筑结构学报, 2019, 40(3): 33-40. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2019.03.003.

DING Yang, DENG Enfeng, ZONG Liang, et al. State-of-the-art on connection in modular steel construction [J]. Journal of Building Structures, 2019, 40(3): 33-40. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2019.03.003. (in Chinese)

[5] 翟思源,曹轲,李国强,等. 柱承重模块化钢结构建筑模块间连接节点研究进展[J]. 建筑钢结构进展, 2022, 24(11): 1-11. DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2022.11.001.

ZHAI Siyuan, CAO Ke, LI Guoqiang, et al. A state-of-the-art review on inter-module connections of column-supported modular steel buildings [J]. Progress in Steel Building Structures, 2022, 24(11): 1-11. DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2022.11.001. (in Chinese)

[6] SHARAFI P, MORTAZAVI M, SAMALI B, et al. Interlocking system for enhancing the integrity of multi-storey modular buildings [J]. Automation in Construction, 2018, 85: 263-272. DOI: 10.1016/j.autcon.2017.10.023.

[7] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 中国地震动参数区划图: GB 18306—2015 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.

General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Seismic Ground Motion Parameters Zonation Map of China: GB 18306—2015 [S]. Beijing: Standards Press of

- China, 2015. (in Chinese)
- [8] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 建筑抗震设计规范: GB 50011—2010[S]. 2016 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016. Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Code for Seismic Design of Buildings: GB 50011—2010 [S]. 2016 ed. Beijing: China Architecture & Building Press, 2016. (in Chinese)
- [9] 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. DOI: 10.11784/tdxbz201801017. 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. DOI: 10.11784/tdxbz201801017. (in Chinese)
- [10] DENG E F, ZONG L, DING Y, et al. Seismic behavior and design of cruciform bolted module-to-module connection with various reinforcing details[J]. Thin-Walled Structures, 2018, 133: 106-119. DOI: 10.1016/j.tws.2018.09.033.
- [11] 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. DOI: 10.1016/j.engstruct.2018.04.028.
- [12] 毛磊. 箱式建筑箱体拼接节点受力性能研究[D]. 上海: 同济大学, 2015. MAO Lei. Research on the joint mechanical behavior of container architecture [D]. Shanghai: Tongji University, 2015. (in Chinese)
- [13] LU Y, LI G Q, MAO L. Experimental research on joint mechanical behavior of container structures[J]. Modular and Offsite Construction (MOC) Summit Proceedings, 2015: 215-222. DOI: 10.29173/mocs171.
- [14] 曹轲, 翟思源, 李国强, 等. 柱承重模块化钢框架抗侧刚度足尺试验与理论计算方法研究[J]. 建筑结构学报, 2021, 42(增刊1): 55-61. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2021.S1.0007. CAO Ke, ZHAI Siyuan, LI Guoqiang, et al. Experimental study and theoretical calculation method on lateral stiffness of a full-scale column-supported modular steel frame[J]. Journal of Building Structures, 2021, 42 (Suppl. 1): 55-61. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2021.S1.0007. (in Chinese)
- [15] 曹轲, 翟思源, 李国强, 等. 足尺柱承重模块化钢框架稳定承载力试验研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2023, 51(3): 375-384. DOI: 10.11908/j.issn.0253-374x.21460. CAO Ke, ZHAI Siyuan, LI Guoqiang, et al. Full-scale experimental study on stability bearing capacity of column-supported modular steel frame [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2023, 51(3): 375-384. DOI: 10.11908/j.issn.0253-374x.21460. (in Chinese)
- [16] ZHAI S Y, LYU Y F, CAO K, et al. Experimental study on bolted-cover plate corner connections for column-supported modular steel buildings [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2022, 189: 107060. DOI: 10.1016/j.jcsr. 2021. 107060.
- [17] LEE S, PARK J, SHON S, et al. Seismic performance evaluation of the ceiling-bracket-type modular joint with various bracket parameters [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2018, 150: 298-325. DOI: 10.1016/j.jcsr.2018.08.008.
- [18] 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. DOI: 10.3390/ma10030263.
- [19] HAJIMOHAMMADI B, DAS S, GHAEDNIA H, et al. Structural performance of registration pin connection in VectorBloc modular construction system [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2022, 197: 107464. DOI: 10.1016/j.jcsr.2022.107464.
- [20] 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. DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.01.023.
- [21] 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. DOI: 10.1016/j.tws.2019.106536.
- [22] DAI X M, ZONG L, DING Y, et al. Experimental study on seismic behavior of a novel plug-in self-lock joint for modular steel construction [J]. Engineering Structures, 2019, 181: 143-164. DOI: 10.1016/j.engstruct.2018.11.075.
- [23] 戴晓蒙. 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. (in Chinese)
- [24] WANG Y R, XIA J W, MA R W, et al. Experimental study on the flexural behavior of an innovative modular steel building connection with installed bolts in the columns [J]. Applied Sciences, 2019, 9 (17): 3468. DOI: 10.3390/app9173468.
- [25] 王永瑞. 模块化建筑新型柱内置螺栓节点力学性能研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2020. WANG Yongrui. Study on the mechanical performance of an innovative modular steel building connection with installed bolts in the columns [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2020. (in Chinese)
- [26] NADEEM G, SAFIEE N A, ABU BAKAR N, et al. Finite element analysis of proposed self-locking joint for modular steel structures [J]. Applied Sciences, 2021, 11 (19): 9277.

- DOI:10.3390/app11199277.
- [27] KHAN K, YAN J B. Finite element analysis on seismic behaviour of novel joint in prefabricated modular steel building [J]. *International Journal of Steel Structures*, 2020, 20(3): 752-765. DOI:10.1007/s13296-020-00320-w.
- [28] KHAN K. 一种预制模块钢结构建筑新型节点抗震性能的发展和研究[D]. 天津:天津大学, 2018.
KHAN K. Development and study on the seismic behavior of novel joint in pre-fabricated modular steel building [D]. Tianjin: Tianjin University, 2018. (in Chinese)
- [29] MA R W, XIA J W, CHANG H F, et al. Experimental and numerical investigation of mechanical properties on novel modular connections with superimposed beams [J]. *Engineering Structures*, 2021, 232: 111858. DOI: 10.1016/j.engstruct.2021.111858.
- [30] 王燕, 李华军, 厉见芬. 半刚性梁柱节点连接的初始刚度和结构内力分析[J]. *工程力学*, 2003, 20(6): 65-69. DOI: 10.3969/j.issn.1000-4750.2003.06.012.
WANG Yan, LI Huajun, LI Jianfen. Initial stiffness of semi-rigid beam-to-column connections and structural internal force analysis [J]. *Engineering Mechanics*, 2003, 20(6): 65-69. DOI:10.3969/j.issn.1000-4750.2003.06.012. (in Chinese)
- [31] FATHIEH A, MERCAN O. Seismic evaluation of modular steel buildings[J]. *Engineering Structures*, 2016, 122: 83-92. DOI:10.1016/j.engstruct.2016.04.054.
- [32] 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): 151-164. DOI:10.1680/stbu.2010.163.3.151.
- [33] 徐博. 模块化钢结构建筑叠合钢梁受弯性能及力学模型研究[D]. 徐州:中国矿业大学, 2020.
XU Bo. Development and study on the seismic behavior of novel joint in pre-fabricated modular steel building [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2020. (in Chinese)
- [34] 田明, 饶晓峰. 叠合梁用于超重型钢梁的研究[J]. *重庆建筑大学学报*, 1996, 18(2): 115-121.
TIAN Ming, RAO Xiaofeng. A study of laminated beam used for heavy steel beam [J]. *Journal of Chongqing Jianzhu University*, 1996, 18(2): 115-121. (in Chinese)
- [35] 黄仁锋, 赵金城. 混合钢种工字形叠合梁抗弯承载力研究[J]. *钢结构*, 2015, 30(3): 12-17. DOI:10.13206/j.gjg201503003.
HUANG Renfeng, ZHAO Jincheng. Study on flexural capacity of hybrid I-shaped laminated steel girder [J]. *Steel Construction*, 2015, 30(3): 12-17. DOI: 10.13206/j.gjg201503003. (in Chinese)
- [36] 李杰, 桑丹, 王涤平, 等. 非连续连接的叠层钢梁试验研究[J]. *结构工程师*, 2013, 29(4): 125-131. DOI:10.15935/j.cnki.jggcs.2013.04.024.
LI Jie, SANG Dan, WANG Diping, et al. Experimental research on laminated steel beams with non-continuous connectors [J]. *Structural Engineers*, 2013, 29(4): 125-131. DOI:10.15935/j.cnki.jggcs.2013.04.024. (in Chinese)
- [37] 李杰, 邓林强, 桑丹, 等. 叠层钢梁整体抗弯性能试验研究[J]. *工业建筑*, 2015, 45(5): 115-118, 45. DOI: 10.13204/j.gyjz201505025.
LI Jie, DENG Linqiang, SANG Dan, et al. Experimental research on flexural behaviour of laminated steel beams [J]. *Industrial Construction*, 2015, 45(5): 115-118, 45. DOI: 10.13204/j.gyjz201505025. (in Chinese)
- [38] 秦福阳. 钢结构模块化建筑叠合钢梁协同受弯性能研究[D]. 徐州:中国矿业大学, 2019.
QIN Fuyang. Study on synergistic flexural performance of laminated steel beams in steel modular building [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2019. (in Chinese)
- [39] 张惊宙, 陆焯, 李国强. 三维钢结构模块建筑结构受力性能分析[J]. *建筑钢结构进展*, 2015, 17(4): 57-64. DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2015.04.008.
ZHANG Jingzhou, LU Ye, LI Guoqiang. Structural analysis on mechanical properties of 3D steel structure modular buildings [J]. *Progress in Steel Building Structures*, 2015, 17(4): 57-64. DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2015.04.008. (in Chinese)
- [40] 杨晓杰, 陆焯, 顾超, 等. 新型多高层钢结构箱式模块建筑的设计[J]. *建筑钢结构进展*, 2016, 18(5): 41-47, 72. DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2016.05.006.
YANG Xiaojie, LU Ye, GU Chao, et al. Structural design of steel modular high-rise and multi-story buildings [J]. *Progress in Steel Building Structures*, 2016, 18(5): 41-47, 72. DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2016.05.006. (in Chinese)
- [41] CHOI K S, LEE H C, KIM H J. Influence of analytical models on the seismic response of modular structures [J]. *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 2016, 20(2): 74-85. DOI: 10.11112/jksmi.2016.20.2.074.
- [42] XU B, XIA J W, MA R W, et al. Investigation on interfacial slipping response of laminated channel beams with bolt connections in modular steel buildings [J]. *Journal of Building Engineering*, 2023, 63: 105441. DOI: 10.1016/j.job.2022.105441.
- [43] XU B, XIA J W, CHANG H F, et al. Evaluation of superimposed bending behaviour of laminated channel beams in modular steel buildings subjected to lateral load [J]. *Thin-Walled Structures*, 2022, 175: 109234. DOI: 10.1016/j.tws.2022.109234.
- [44] XU B, XIA J W, CHANG H F, et al. Flexural behaviour of pairs of laminated unequal channel beams with different interfacial connections in corner-supported modular steel buildings [J]. *Thin-Walled Structures*, 2020, 154: 106792. DOI:10.1016/j.tws.2020.106792.
- [45] XU B, XIA J W, CHANG H F, et al. A comprehensive

- experimental-numerical investigation on the bending response of laminated double channel beams in modular buildings[J]. *Engineering Structures*, 2019, 200: 109737. DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.109737.
- [46] 杨超. 钢模块柱-柱及梁-梁组合耗能减震框架支撑结构分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
YANG Chao. Analysis of steel module column-column and beam-beam combined energy dissipation and vibration absorption frame brace structure[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019. (in Chinese)
- [47] 杨超, 徐亚冲, 欧进萍. 装配式钢模块柱-柱和梁-梁组合的框架结构及其抗震性能分析[J]. *地震工程与工程振动*, 2022, 42(1): 34-45. DOI: 10.13197/j.eeed.2022.0104.
YANG Chao, XU Yachong, OU Jinping. Fabricated steel modular column-column and beam-beam combination frame structure and its seismic performance analysis[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Dynamics*, 2022, 42(1): 34-45. DOI: 10.13197/j.eeed.2022.0104. (in Chinese)
- [48] 孙瑛志, 杨晓杰, 陆焯, 等. 模块建筑槽钢组合柱长细比与截面惯性矩研究[J]. *钢结构*, 2016, 31(5): 1-5. DOI: 10.13206/j.gjg.201605001.
SUN Yingzhi, YANG Xiaojie, LU Ye, et al. Research on the slenderness ratio and section moment of inertia of composite channel-column in modular architecture [J]. *Steel Construction*, 2016, 31(5): 1-5. DOI: 10.13206/j.gjg.201605001. (in Chinese)
- [49] 王炜. 多层箱式模块化建筑受力性能和设计方法的研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2017.
WANG Wei. A study on the mechanical performance and design method of modular building [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2017. (in Chinese)
- [50] 徐亚冲. 钢模块柱-柱组合框架结构及其抗震性能分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
XU Yachong. Seismic performance analysis of column-to-column combined modular steel frame buildings[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019. (in Chinese)
- [51] 杨超, 徐亚冲, 欧进萍. 模块化装配式钢框架组合柱及其抗侧与抗震滞回性能[J]. *工程力学*, 2022, 39(4): 65-75. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2021.01.0098.
YANG Chao, XU Yachong, OU Jinping. Modular prefabricated steel frame combination column and its lateral and seismic hysteretic performance [J]. *Engineering Mechanics*, 2022, 39(4): 65-75. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2021.01.0098. (in Chinese)
- [52] 王伟, 王俊杰. 建筑钢结构抗连续倒塌的机理、评估与鲁棒性提升[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2021.
WANG Wei, WANG Junjie. Progressive collapse prevention of steel building structures: mechanism, evaluation and robustness enhancement [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2021. (in Chinese)
- [53] SHARAFI P, ALEMBAGHERI M, KILDASHTI K, et al. Gravity-induced progressive collapse response of precast corner-supported modular buildings [J]. *Journal of Architectural Engineering*, 2021, 27(4): 04021031. DOI: 10.1061/(ASCE)AE.1943-5568.0000499.
- [54] HE X H C, CHAN T M, CHUNG K F. Effect of inter-module connections on progressive collapse behaviour of MiC structures [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2021, 185: 106823. DOI: 10.1016/j.jcsr.2021.106823.
- [55] MUNMULLA T, NAVARATNAM S, THAMBOO J, et al. Analyses of structural robustness of prefabricated modular buildings: a case study on mid-rise building configurations [J]. *Buildings*, 2022, 12(8): 1289. DOI: 10.3390/buildings12081289.
- [56] THAI H T, HO Q V, LI W Q, et al. Progressive collapse and robustness of modular high-rise buildings [J]. *Structure and Infrastructure Engineering*, 2023, 19(3): 302-314. DOI: 10.1080/15732479.2021.1944226.
- [57] LUO F J, BAI Y, HOU J, et al. Progressive collapse analysis and structural robustness of steel-framed modular buildings [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2019, 104: 643-656. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2019.06.044.
- [58] PENG J H, HOU C, SHEN L M. Progressive collapse analysis of corner-supported composite modular buildings [J]. *Journal of Building Engineering*, 2022, 48: 103977. DOI: 10.1016/j.job.2021.103977.
- [59] ALEMBAGHERI M, SHARAFI P, TAO Z, et al. Robustness of multistory corner-supported modular steel frames against progressive collapse [J]. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 2021, 30(18): e1896. DOI: 10.1002/tal.1896.
- [60] ALEMBAGHERI M, SHARAFI P, HAJIREZAEI R, et al. Collapse capacity of modular steel buildings subject to module loss scenarios: the role of inter-module connections [J]. *Engineering Structures*, 2020, 210: 110373. DOI: 10.1016/j.engstruct.2020.110373.
- [61] 赵晶晶. 集装箱模块化建筑的抗连续倒塌性能分析[D]. 南京: 东南大学, 2016.
ZHAO Jingjing. Analysis on progressive collapse resistance of container building [D]. Nanjing: Southeast University, 2016. (in Chinese)