

新型高层模块建筑整体结构性能数值分析研究

陈浩¹, 钟旭^{1*}, 王霄翔², 石拓³, 陈涛⁴, 高志成³

(1. 湖南建设投资集团有限责任公司, 长沙 410004; 2. 湖南建工集团有限公司, 长沙 410004;
3. 中湘智能建造有限公司, 长沙 410015; 4. 湖南省建筑科学研究院有限责任公司, 长沙 410011)

摘要: 作为新型装配式建筑形式, 模块建筑可依据主要受力结构的差异, 分为叠箱类模块结构与嵌入式模块结构。其中嵌入式模块结构在结构性能、建筑适用性及可维护性等方面具备技术优势, 但存在柱距偏小、现场连接工作量较大等问题。为此, 文中提出了一种基于稀疏钢框架的新型高层模块建筑体系。首先构建了该新型模块建筑的整体结构建模方法, 再通过 Midas Gen 分析软件对其开展数值分析。初步分析结果表明: 该结构框架柱长细比、框架梁跨度均较大, 构件承载力由竖向荷载主导, 侧向变形受水平荷载控制, 底部框架中部的框架柱及大跨度框架梁为设计控制关键部位。通过参数化分析, 文中明确了不同建筑层数和抗震设防烈度对结构整体性能的影响规律, 最后为满足刚度与承载力要求对构件进行重新设计, 得到不同建筑层数下稀疏框架结构的用钢量水平, 为论证该结构设计的可行性及评估其经济性提供参考。

关键词: 新型高层模块建筑; 稀疏钢框架; 数值模拟分析; 整体结构性能; 参数化分析; 用钢量水平

中图分类号: TU391

文献标志码: A

文章编号: 1671-9379(2026)03-0082-11

DOI: 10.13969/j.jzgjgz.20241025001

Numerical Investigation on Global Structural Performance of the Innovative High-Rise Modular Buildings

CHEN Hao¹, ZHONG Xu^{1*}, WANG Xiaoxiang², SHI Tuo³,
CHEN Tao⁴, GAO Zhicheng³

(1. Hunan Construction Investment Group Co., Ltd., Changsha 410004, China; 2. Hunan Construction Engineering Group Co., Ltd., Changsha 410004, China; 3. Zhongxiang Intelligent Construction Co., Ltd., Changsha 410015, China; 4. Hunan Academy of Building Sciences Co., Ltd., Changsha 410011, China)

*Corresponding author: 15122809761@163.com

Abstract: As a new type of prefabricated building, modular structure can be categorized into stacked modular structure and in-fill modular structure. The in-fill modular structure is technically better than stacked modules in terms of structural behavior, architectural applicability and maintainability, however, smaller column spaces and increased onsite connection work remain. Therefore, an innovative high-rise modular structure based on a sparse-component steel frame (SCSF) is proposed. First, a global modeling method for this new modular structural system is developed, and numerical analysis on the structure is conducted via Midas/Gen software. The results show that larger column slenderness ratios and beam spans result in vertical loads governing member bearing capacities, while horizontal

收稿日期: 2024-10-25

基金项目: 湖南省自然科学基金(2023JJ40271), 2022年芙蓉计划省企业科技创新创业团队项目

作者简介:

陈浩(1968—), 男, 学士, 研究员级高级工程师, 主要从事低碳建筑、智能建造、新型建筑工业化方面的研究。

E-mail: chking68@sina.com

通信作者:

钟旭(1994—), 男, 博士, 主要从事新型建筑工业化方面的研究。E-mail: 15122809761@163.com。

actions dominate lateral drift responses, especially for bottom middle columns and large-span beams. Afterwards, parametric analysis are conducted to explore the influences of story numbers and seismic actions on global structural responses. At last, the redesigns of structural members are conducted to satisfy stiffness and strength requirements, and the steel usage levels are compared among models with different story numbers. This results may provide a reference for demonstrating the feasibility of the proposed structural design and evaluating its economic performance.

Keywords: innovative high-rise modular structure; sparse-component steel frame; numerical analysis; global structural performance; parametric analysis steel usage level

钢结构模块建筑是一种将承重结构、围护系统、水电管线、装饰装修等在工厂完成加工与整合,形成三维模块单元后,运输至现场组装为整体的新型装配式建筑^[1-2]。目前国内模块建筑主要应用于应急医院、临时项目部、城市展厅等低层建筑^[3]及少数多高层公寓中^[4];而国外通过设置独立钢支撑框架、钢筋混凝土核心筒等方式将其应用于高层建筑领域^[5-6]。

按主要受力结构的不同,既有模块建筑可分为叠箱类模块结构和嵌入式模块结构。其中叠箱类模块结构由叠箱承担本层及以上各层的全部竖向荷载,依据是否增设额外抗侧力结构体系,可进一步分为全模块结构、模块-钢框架混合结构、模块-混凝土核心筒混合结构(图1a)~c);嵌入式模块结构则由外部主体框架承担竖向荷载,各层填充的模块单元仅需承担自身重量(图1d))。

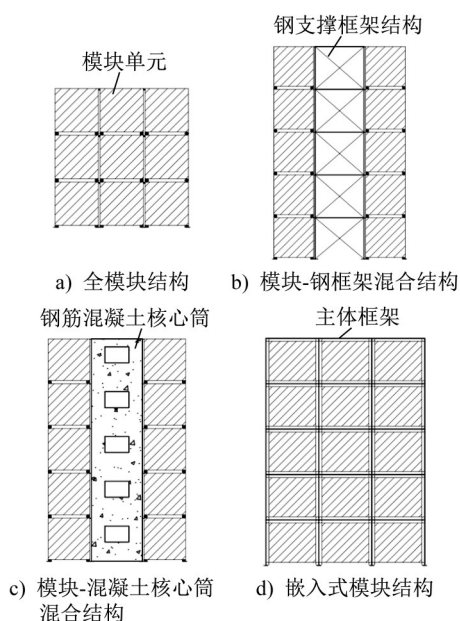


图1 既有典型模块结构体系

Fig. 1 Current typical modular structures system

嵌入式模块结构由主体框架承担竖向荷载及大部分侧向荷载,相较于叠箱类模块结构具备以下优势。其一,嵌入式模块结构的整体性能优于叠箱类模块结构的整体性能,更适用于高层建筑。叠箱类模块结构在竖向和水平方向均存在显著的非连续性^[7-9],为保证其整体结构性

能,对单元间连接节点的力学性能提出了较高要求^[10-11];但实际工程中,套筒承插型连接^[12]、预应力节点^[13]等刚度和承载力相对更高的节点形式,其现场施工便捷性及螺栓连接节点^[14]、插入式自锁节点^[15]等(图2)的现场施工便捷性,增加了现场安装的难度。而嵌入式模块结构的主体框架梁、柱连续性更强,填充模块单元主要发挥建筑功能,无需采用刚度较大的重型模块单元及单元间连接节点。即使应用于高层建筑,也能减少模块单元的用量,降低模块单元制作及现场连接的技术要求。

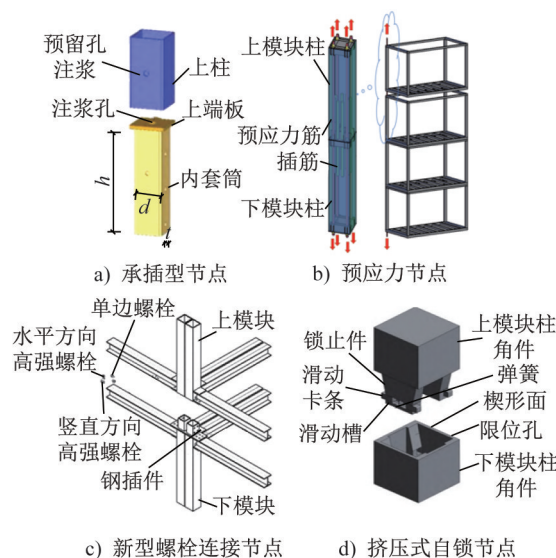


图2 几种不同类型的单元间连接节点

Fig. 2 Several different types of inter-unit connection joints

其二,受公路运输和吊装等条件的限制(图3a),单个三维模块单元的横向尺寸和高度存在一定限值,绝大部分模块的横向宽度和高度不超过3.30 m,导致叠箱类模块结构难以独立应用于大跨空间或大层高的建筑布局。

嵌入式模块结构的框架梁、柱等一维构件长度取值更为灵活,能够突破叠箱类模块结构在建筑空间尺寸上的局限。此外,叠箱类模块结构的管线需在单元间完成竖向接驳,内部渗漏点较多,提升了防渗处理的难度(图3b));而嵌入式模块结构可利用单元外的公共区域敷设室外管线,有效解决了既有模块结构的防渗和后期检修难题。



图3 叠箱类模块结构存在的技术难题

Fig. 3 Technical problems of stacked modular structures

嵌入式模块结构凭其技术优势,已成功应用于湖南农业大学教师员工公租房项目^[16](图3)但在工程实践发现,此类结构需逐层安装框架构件和模块单元,导致现场连接工作量较大,一定程度上降低了现场安装效率,结构形式上仍有优化空间。同时,现阶段关于高层模块建筑整体稳定性、抗震性能及建模方法的研究,仍主要集中于叠箱类模块结构体系^[5,8-9],无法为嵌入式模块结构及同类结构的设计提供充足依据。

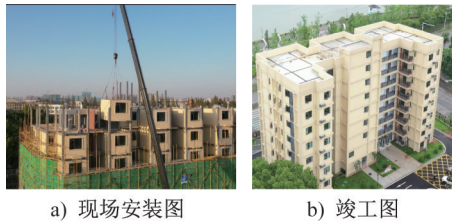


图4 嵌入式模块结构的典型工程应用

Fig. 4 Typical application of in-fill modular structures

为最大程度提升嵌入式模块结构的安装效率,本文提出了一种基于稀疏钢框架的新型高层模块建筑体系,即将主体结构替换为层高6 m以上、大柱距的稀疏钢框架,采用每1层框架结构安装2层模块单元的现场安装形式^[17]。该新型模块建筑体系相比嵌入式模块结构,可减少近一半的框架梁及现场节点连接工作量,实现“两街三巷”式的空中社区建筑格局,在高层模块建筑领域中具有较高的发展潜力。作为一种全新的高层模块建筑体系,其整体结构分析方法,以及对其不同层数、不同抗震设防烈度下的结构可行性亟待论证。本文的研究内容为,以10层模块建筑为例(基本组),研究其整体结构建模分析方法,论证该新型建筑体系结构设计的可行性;探究不同建筑层数(10、12、14、16、18和20层)及不同抗震设防烈度对结构响应的影响;在满足刚度和承载力要求的基础上,完成不同模型的结构设计并对比计算用钢量。

1 新型高层模块建筑建模方法及基本计算结果

1.1 分析案例基本情况

本文以10层模块建筑为基准案例,依据完整性、标准化、协调性原则完成建筑设计及模块单元的划分与组合^[18],该新型高层模块建筑的建筑平立面图如图5所示。该模块建筑共设计5个结构层,每个结构层内布置2层模块叠箱单元(奇数层对应M1~M8、偶数层对应M9~M16),同时在模块单元外的区域设置公共楼板及局部阳台。

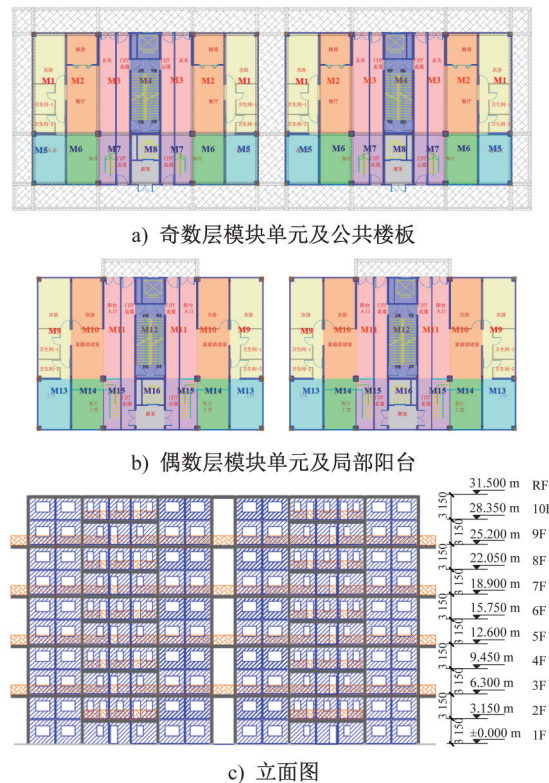


图5 新型高层模块建筑平立面图(10层基本组)

Fig. 5 Plane and elevation view for innovative high-rise modular structures (basic models with 10 stories)

由图5可知,鉴于本结构体系以稀疏框架为主体结构,与嵌入式模块结构在组成上具有相似性,其基本设计信息、单箱重量等均参考典型嵌入式模块建筑工程,即湖南农业大学教师员工公租房项目确定。为偏于安全和保守,本文算例忽略填充模块单元的抗侧贡献。结构建模、分析与设计主要依据《建筑结构荷载规范》(GB 50009—2012)^[19]、《钢结构设计标准》(GB 50017—2017)^[20]、《建筑抗震设计标准》(GB/T 50011—2010)^[21]等国内现行标准。

由于稀疏钢框架柱的长细比较大,本案例在未增设钢支撑、剪力墙等抗侧构件的前提下,偏于保守按有侧移

框架进行设计和验算;除屋顶层因设置整体连续楼板,可按刚性楼板假定分析外,其余各结构层的模块单元仅在角部通过高强螺栓与框架梁连接,相邻模块单元的楼板不连续,整体面内刚度有限,宜按弹性楼板分析。本案例的基本设计参数及相关要点见表1。

表1 新型模块建筑案例分析的基本设计信息
Table 1 Basic information for case studies of innovative modular structure

项目	内容
层数	结构层数 N=5层(基本组)
	建筑层数 2N=10层(基本组)
抗震设防烈度	6度(基本地震动加速度0.05g) 设计地震分组:第一组;场地类别:II类
风荷载	基本风压 $0.35\text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$ (重现期50年); 地面粗糙度:B类
框架侧移类型	有侧移框架
楼板计算假定	标准层弹性楼板;屋面刚性楼板假定

1.2 主要构件的材料及截面

结合结构性能及现场施工对构件形式的需求,新型

模块建筑的稀疏钢框架中,框架柱主要采用方钢管柱或钢管混凝土柱,框架梁主要采用H型钢梁,公共区域楼板采用钢筋混凝土楼承板。由图5可知,该结构各层框架层高为6.3 m,柱距相对较大(填充模块区域内沿y轴为10.2 m和5.1 m,沿x轴为6.3 m和9.3 m),其中底层中部区域的框架柱及模块叠箱下方的部分大跨度框架梁将承受更大的竖向荷载,设计中需作为重点控制和加强的构件。按构件类型、方向及长度划分,基准模型的框架钢柱(GZ)和钢梁(GL)布置如图6所示。

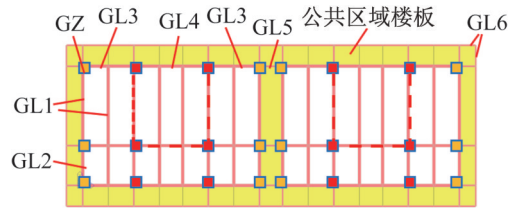


图6 稀疏钢框架的构件平面布置图

Fig. 6 Plane arrangement of members in sparse-component steel frame

基本组主要构件的材料及截面尺寸见表2。此外,公共区域设置100 mm厚钢筋混凝土板,屋面层及偶数层阳台外挑板设置80 mm厚钢筋混凝土板。

表2 稀疏钢框架梁、柱构件材料及截面尺寸

Table 2 Material and section dimensions of beams and columns in sparse-component steel frame

编号	构件长度/mm	截面/mm	钢材牌号
GZ	6 300	$\square 400 \times 16 / \square 400 \times 24$	Q355/Q420
GL1 (y)	10 200	H500 \times 400 \times 12 \times 16 / H500 \times 400 \times 20 \times 24	Q355
GL2 (y)	5 100	H500 \times 400 \times 12 \times 16	Q355
GL3 (x)	6 600	H500 \times 400 \times 12 \times 16	Q355
GL4 (x)	9 600	H500 \times 400 \times 12 \times 16	Q355
GL5 (x)	3 000	H300 \times 200 \times 10 \times 14	Q355
GL6(公共)	—	H300 \times 200 \times 8 \times 12	Q355

注:基本组底部3层中部4列柱(共12根)做加厚加强处理,其余框架柱均为Q355钢材, $\square 400 \times 16$ 截面;基本组大跨度框架梁大部分采用H500 \times 400 \times 12 \times 16截面,中部区域框架梁做截面加厚处理。

1.3 模块叠箱荷载的施加

与传统嵌入式模块建筑不同,新型模块建筑的每个结构层,其填充模块区域需承受对应2个建筑层的竖向荷载(奇数层模块M1~M8、偶数层模块M9~M16),模块单元外的区域则主要承受奇数层公共楼板的荷载。首先,框架柱、框架梁及楼板等构件的自重,可通过分析软件自动计算;模块单元区域按图7所示范围分区域施加双层叠箱的竖向荷载,恒荷载包含模块单元内钢骨架、面层及墙体等荷载(表3),活荷载取 $2.0\text{ kN}\cdot\text{m}^{-2} \times 2 =$

$4.0\text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$;屋面层楼电梯间区域还需考虑与奇数层高度相当的设备间荷载(对应M4、M8)。此外,奇数层公共区域及偶数层阳台等区域,按 $1.6\text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$ 的面层恒荷载和 $2.0\text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$ 的活荷载取值。上述叠箱荷载均按楼面荷载形式分配至就近的稀疏框架梁上。

1.4 基本计算结果

本文采用Midas Gen有限元分析软件对基本组模型进行结构分析,结果显示该结构前3阶振型分别为两个

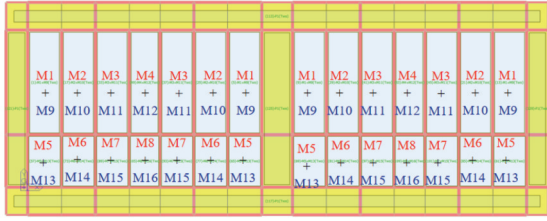


图7 模块叠箱荷载施加区域图

Fig. 7 Diagram for range of loads for stacked modules

建筑主轴(x 轴、 y 轴)的平动及 z 轴的扭转(图8),第一振型以 y 向平动为主,自振周期为2.263 s,表明该结构在 y 向(10.2 m+5.1 m跨)的刚度较弱。为简化结构设计并便于后续对比,本文暂不考虑扭转平动比 >0.9 的扭转效应限制,主要将两个建筑主轴方向的层间位移角及构件承载力作为控制指标;实际设计中,为降低扭转地震响应的影 响,需重新分配不同位置钢柱的截面尺寸,确保抗扭刚度满足设计要求。

表3 模块叠箱恒荷载取值汇总

Table 3 Summary of vertical loads of stacked modules

编号	模块编号	建筑功能	范围($x \times y$)/mm ²	恒荷载/(kN·m ⁻²)
1	M1+M9	次卧、卫生间	3 300×10 200	8.99
2	M2+M10	厨房+餐厅、次卧+家庭活动室	3 300×10 200	5.01
3	M3+M11	玄关/阳台入口+走道	3 300×10 200	7.28
4	M4+M12	楼梯间+电梯间	3 000×10 200	7.78
5	M5+M13	老人房、主卧	3 300×5 100	7.29
6	M6+M14	客厅(含室内楼梯)	3 300×5 100	3.24
7	M7+M15	客厅(含上空)	3 300×5 100	6.10
8	M8+M16	电梯间	3 000×5 100	9.29
9	M4	突出楼电梯间	3 000×10 200	4.38
10	M8	突出楼电梯间	3 000×5 100	5.62

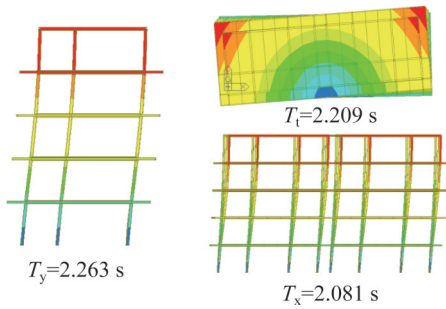
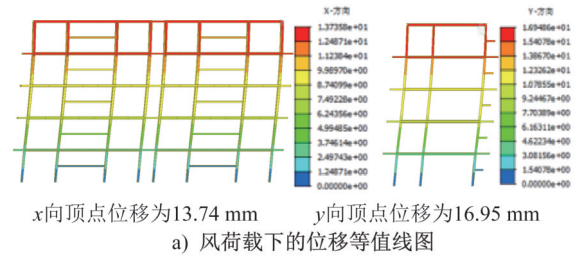


图8 基本组模型的前3阶振型及周期

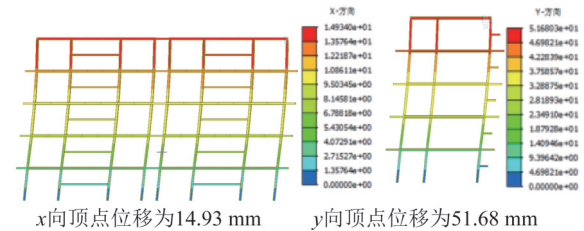
Fig. 8 First three vibration modes and periods of basic group models

基准模型在风荷载和地震作用下的侧移分别如图9a)和图9b)所示。结果表明:6度地震作用标准值下,结构最大层间位移角 $\theta_{max}=1/1\ 299 \leq [\theta]=1/250$;风荷载标准值下,结构最大层间位移角为 $\theta_{max}=1/420 \leq [\theta]=1/250$,均未超过钢结构框架在多遇地震作用下的层间位移限值,基本满足该类结构对侧向抗侧刚度的设计需求^[20]。此外,水平荷载作用下,结构层间侧移的最大值均出现在第2个结构层的 y 轴方向,验证了该结构 y 轴方向振型周期更大的合理性。

根据《建筑结构荷载规范》(GB 50009—2012)^[19]考



a) 风荷载下的位移等值线图



b) 地震作用下的位移等值线图

图9 水平荷载下的稀疏框架结构侧移图(基本组)
Fig. 9 Lateral displacements of sparse-component steel frame structures (basic models)

虑包括地震作用、风荷载在内的全部荷载设计工况后,基本组模型稀疏框架的最大组合应力为246.2 MPa,出现在底层中部框架柱;框架梁的最大组合应力为212.3 MPa,出现在中部9.6 m大跨度梁的端部。所有钢框架构件的组合应力均小于强度设计值即 $\sigma_{s,max} \leq f$;对壁厚为 t (单位

mm)的钢材,Q355钢 $t \leq 16$ mm时, $f=305$ MPa; 16 mm $< t \leq 40$ mm时, $f=295$ MPa; Q420钢 $t \leq 16$ mm时, $f=375$ MPa, 16 mm $< t \leq 40$ mm时, $f=355$ MPa^[20]。

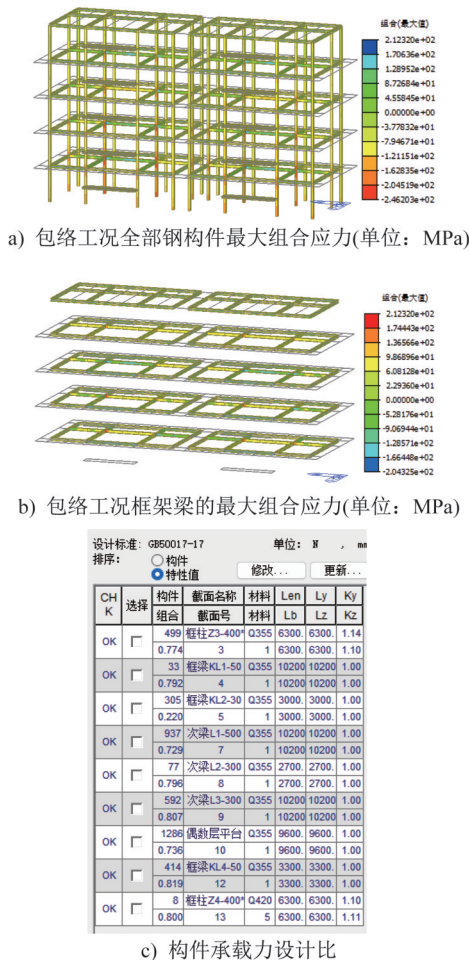


图 10 包络工况下稀疏钢框架的强度验算结果(基本组)

Fig. 10 Strength check of sparse-component steel frame under envelope (basic models)

表 4 不同抗震设防烈度等级下 10 层建筑模型的计算结果

Table 4 Results for 10-story building models under different seismic fortification intensities (SFI)

设防等级	层间位移角/rad				最大应力/MPa	柱设计比	梁设计比
	WX 工况	WY 工况	ESX 工况	ESY 工况			
6度(0.05g)			1/1 597	1/1 299	246.2		
7度(0.10g)			1/798	1/650	246.2		
7度半(0.15g)	1/1 411	1/420	1/532	1/433	246.2	0.800	0.819
8度(0.20g)			1/399	1/325	263.0		

注:WX 工况、WY 工况分别对应沿 x 、 y 方向的风荷载工况,ESX 工况、ESY 工况分别对应沿 x 、 y 方向的地震作用工况,后同。

对比表 4 中不同模型的层间位移角可知,该结构由水平力产生的结构响应主要由风荷载控制;但随着抗震设防烈度的提高,地震作用下的层间位移角显著增大,尤

对所有构件进行压、弯、剪组合受力下的稳定承载力验算,得到最不利荷载组合下钢梁的最大承载力设计比(最大内力设计值与相应承载力之比,以下简称“最大设计比”)为 0.819,钢柱的最大设计比为 0.800,均小于 0.9 (图 9)。由此可见,基本组的结构具有良好的安全储备,其稀疏钢框架钢构件的单位面积用钢量为 $53.3 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ (详见 2.3 节框架用钢量统计部分),初步论证了新型建筑体系的结构设计具有可行性。但本文选取 6 度抗震设防烈度,且仅为 10 层模块建筑,仍需探究抗震设防烈度提高、建筑高度增加后该结构的适用性。

2 新型高层模块建筑结构性能的参数化分析

为论证该结构在建筑高度增加、抗震设防烈度提高后,是否仍能较好地满足安全性和经济性要求,本文开展以下研究:在保持与基本组相同的结构布置及构件设计的前提下,分析抗震设防烈度提高至 7 度(0.10g)、7 度半(0.15g)、8 度(0.20g)时,结构侧向响应及承载力储备的变化规律,同时分析建筑层数增加至 12、14、16、18、20 层后的结构计算结果;对不满足计算要求的模型构件进行重新设计,使其在正常使用极限状态和承载力极限状态下均满足设计要求;最后分析构件重新设计后不同模型的用钢量变化,论证该结构体系在不同适用范围下的可行性,并提出后续结构优化的设计建议。

2.1 不同抗震设防烈度对结构响应的影响

为研究不同抗震设防烈度对结构响应的影响,本文参照基本组的荷载信息和结构设计进行整体建模,仅将地震反应谱分析中的抗震设防烈度调整为不同等级,对比 6 度、7 度、7 度半、8 度的地震工况下,建筑模型的层间位移角、钢框架构件的最大组合应力及构件承载力设计比,计算结果见表 4。

其是 8 度及以上抗震设防时,建筑两个主轴方向的层间位移角均超过风荷载工况,构件最大组合应力也高于其他抗震设防烈度下的计算结果。因此,抗震设防烈度的

提高会使结构侧向位移显著增大,甚至成为与构件承载力同等重要的结构设计控制因素。

框架梁、柱的承载力设计比未随抗震设防烈度的提高发生变化,原因在于:有地震作用的荷载组合中,恒荷载和活荷载的分项系数按规范取值相对无地震作用时更小,即由 $1.3D+1.5L$ 变为 $1.3(D+0.5L)$;而本结构的竖向荷载对承载力设计比的影响最为明显,承载力最不利的荷载组合为恒荷载、活荷载和风荷载的组合。

2.2 不同建筑层数对结构响应的影响

为研究不同建筑层数对结构响应的影响,本文保持各层竖向荷载及抗震设防烈度不变,通过逐次向上复制1个结构层及对应2个建筑层的竖向荷载,建立不同层数的建筑模型,对比分析建筑层数对整体结构响应的影响。不同建筑层数模型的侧向变形如图11a)~f)所示;层间位移角、最大组合应力及梁、柱承载力设计比见表5,各项指标随层数的变化曲线如图12所示。

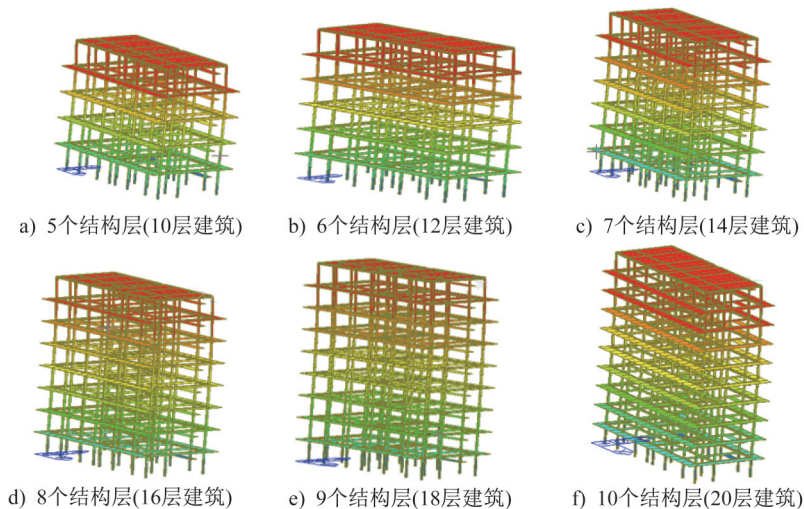


图11 不同层数下稀疏钢框架的侧移云图(以y向风荷载为例)

Fig. 11 Drift contours of sparse-component steel frame with different stories (taking y-direction wind action for examples)

表5 不同建筑层数下结构计算结果(6度抗震设防烈度)

Table 5 Results of building models with different stories (SFI of 6 degrees)

层数/层	层间位移角/rad				最大应力/MPa	柱设计比	梁设计比
	WX 工况	WY 工况	ESX 工况	ESY 工况			
10	1/1 411	1/420	1/1 597	1/1 299	246.2	0.800	0.819
12	1/1 049	1/318	1/1 319	1/1 090	292.0	1.014	0.830
14	1/835	1/256	1/1 307	1/1 035	340.1	1.272	1.015
16	1/689	1/213	1/1 035	1/883	400.3	1.503	1.162
18	1/584	1/181	1/958	1/831	461.6	1.736	1.298
20	1/504	1/157	1/905	1/773	521.5	1.964	1.444

对比表4及图12的计算结果可知,若关键构件的截面尺寸和材料强度均不调整,结构侧向变形将随层数增加而显著增加。以6度抗震设防烈度下,弱轴风荷载(WY)作用的最大层间位移角为例:建筑层数由10层增至20层时,最大层间位移角 $\theta_{\max,y}$ 由1/420增至1/157,每增加2层结构层间位移角较基本组模型依次增大32.08%、64.06%、97.18%、132.04%和167.52%;当层数超过14层后, $\theta_{\max,y} > [\theta] = 1/250$,不再满足正常使用极

限状态下的侧向刚度要求。

建筑层数的增加会显著增大结构底层构件的竖向荷载,因此需分析建筑层数对构件承载力的影响:建筑层数由10层增至20层时,构件最大组合应力值由246.2 MPa增加至521.5 MPa,每增加2层最大组合应力较基准模型依次增加18.61%、38.12%、62.59%、87.48%及111.84%;当层数超过16层后,最大组合应力 $\sigma_{s,\max} > f(Q420) = 355$ MPa,构件强度不再满足设计要求。考虑稳定承载力

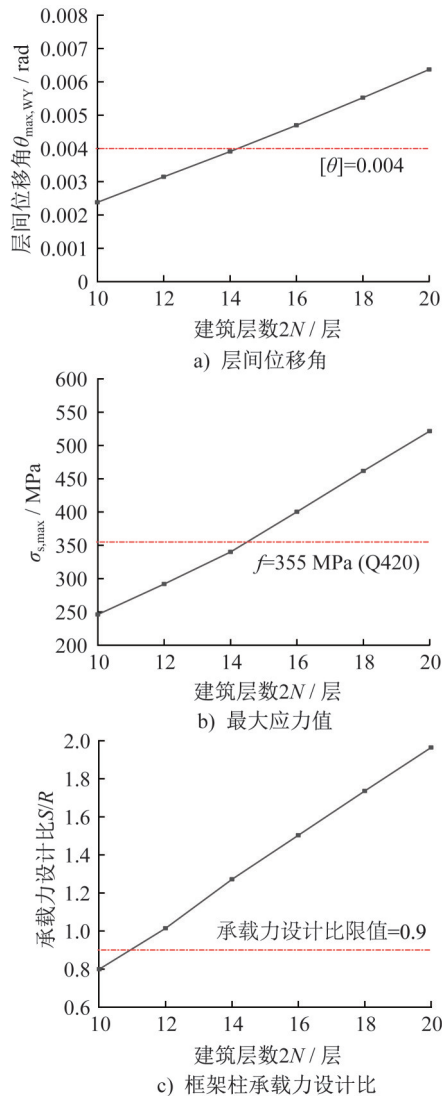


图 12 不同计算指标-建筑层数变化曲线

Fig. 12 Variation curves for different parameters with variable stories

后,框架柱的承载力设计比由基本组模型的0.800增加至1.964,每增加2层,承载力设计比较基本组依次增加26.75%、59.00%、87.88%、117.00%以及145.50%;当层

数不低于12层时,部分关键构件的承载力设计比开始超过0.9。由此可见,风荷载或地震作用下,结构的层间侧向变形和最大组合应力随层数增加近似呈线性增长,直至不满足刚度和强度要求;同时,竖向荷载随层数增加而增大,稀疏框架梁、柱的承载力储备持续降低,必须对构件进行重新设计。

综合对比表4和表5可知,建筑层数和抗震设防烈度的变化对结构侧向刚度(最大层间位移角)的影响均不可忽略;而对框架构件(尤其是框架柱)承载力验算的影响,建筑层数的增加远大于抗震设防烈度的提高,这主要是由以下原因导致:

(1) 由于构件具有大长细比、大跨度的特点,竖向恒荷载对构件受力的影响更为突出,而竖向恒荷载与建筑层数近似呈正比关系;

(2) 本结构构件承载力验算中,风荷载和地震作用为独立的荷载组合工况,地震作用作为偶然荷载,采用的作用效应系数更小,因此其对构件承载力验算的影响相较于风荷载更小。

综上,对于该新型模块建筑,层数增加时,设计应优先校核构件承载力是否满足要求,再复核侧向刚度;抗震设防烈度显著提高时,设计可优先关注结构层间侧移是否满足限值,再复核地震作用对构件最大承载力设计比的影响。

2.3 重新设计后的结构响应及用钢量统计

为满足风荷载和地震作用下的侧向刚度要求,同时保证构件承载力具备必要的安全储备,本文以两个建筑主轴在风荷载、地震作用下的最大层间位移角均满足 $\theta_{max} \leq [\theta]=1/250$,及所有稀疏钢框架梁、柱构件承载力设计比 ≤ 0.90 为控制目标,对构件进行重新设计。不同层数模型采用的构件材料及框架柱(GZ)、大跨度框架梁(GL1~GL2)的最大截面尺寸按表6进行取值;12~20层建筑模型在不同抗震设防烈度下的主要计算结果如表7所示。

表 6 重新设计后的稀疏钢框架构件信息

Table 6 Information of sparse-component steel frame members after redesign

层数 2N/层	框架柱		框架梁	
	钢材牌号	最大截面尺寸/mm	钢材牌号	最大截面尺寸/mm
10	Q355~Q420	□400×24	Q355	H500×400×20×24
12	Q355~Q460	□400×24	Q355~Q390	H500×400×20×24
14	Q355~Q460	□400×28	Q355~Q390	H500×400×20×24
16	Q355~Q460	□500×24	Q355~Q390	H500×400×20×24
18	Q355~Q460	□500×24	Q355~Q390	H500×400×20×24
20	Q355~Q460	□500×32	Q355~Q390	H500×400×22×26

表7 不同层数重新设计后建筑模型的主要计算结果
Table 7 Results of redesigned models with different stories

层数/层	设防等级	WX 工况	WY 工况	ESX 工况	ESY 工况	最大应力/MPa	柱设计比	梁设计比
12	6度(0.05g)	1/1 049	1/318	1/1 319	1/1 090	292.0	0.857	0.872
	7度(0.10g)			1/659	1/545	292.0		
	7度半(0.15g)			1/440	1/363	292.0		
	8度(0.20g)			1/330	1/273	305.0		
14	6度(0.05g)	1/903	1/288	1/1 325	1/1 070	296.5	0.872	0.846
	7度(0.10g)			1/663	1/535	296.5		
	7度半(0.15g)			1/442	1/357	296.5		
	8度(0.20g)			1/331	1/268	301.5		
16	6度(0.05g)	1/970	1/303	1/1 416	1/1 167	284.7	0.852	0.874
	7度(0.10g)			1/708	1/583	284.7		
	7度半(0.15g)			1/472	1/389	284.7		
	8度(0.20g)			1/354	1/292	285.5		
18	6度(0.05g)	1/838	1/270	1/1 327	1/1 095	298.3	0.872	0.894
	7度(0.10g)			1/664	1/544	298.3		
	7度半(0.15g)			1/442	1/363	298.3		
	8度(0.20g)			1/332	1/272	303.9		
20	6度(0.05g)	1/808	1/250	1/1 248	1/1 051	301.4	0.873	0.860
	7度(0.10g)			1/624	1/526	301.4		
	7度半(0.15g)			1/416	1/350	301.4		
	8度(0.20g)			1/312	1/263	301.4		

由表6可知,为保证结构的抗侧刚度和构件承载力满足设计要求,建筑层数由10层增至12层时,框架柱的最高钢材等级由Q420提升至Q460;层数继续增至14~20层时,底部钢框架柱及部分大跨度钢梁的最大截面尺寸总体随层数增加逐步增大。由表7可知,各建筑模型的计算结果呈下列规律:

(1) 结构层间位移角主要由风荷载WY控制,抗震设防烈度越高,地震作用下的最大层间位移角增幅越显著;

(2) 抗震设防烈度提高至8度后,部分模型弱轴的最大层间位移角由地震作用ESY控制,包络工况下的构件最大应力也略有上升;

(3) 本案例中,框架梁、柱的承载力设计比由竖向荷载与风荷载的组合工况控制,不受抗震设防烈度变化的影响;

(4) 构件重新设计后,所有模型的计算结果均满足设计要求;建筑层数越高,层间位移角限值对构件设计的制约越显著,即便构件最大承载力设计比略有降低,最大层间位移角仍呈增大趋势。

综上,随着建筑层数的增加,通过提高高等级钢材的使用比例、增大构件截面尺寸并加强关键构件,可显著提升结构的承载力和侧向刚度,使其满足设计要求;但这也不可避免地会增加结构单位面积的用钢量。为量化建筑层数对用钢量的影响,本文对稀疏钢框架的所有梁柱构件进行用钢量统计,通过总用钢量与建筑面积的比值计算单位面积用钢量并对比分析,结果如表8和图13所示。

由表8可知及图13可知,与10层基准模型相比,建筑层数增加后,12层模型的单位面积用钢量略有降低;层数超过12层后,为保证结构足够的侧向刚度和承载力储备,用钢量随层数增加逐步上升,层数不低于18层时,用钢量较基准模型的增加率超过12%,20层时增加率超过20%。需注意的是,尽管12层模型的用钢量略低于基准模型的用钢量,但因局部构件需采用更高等级的钢材才能满足设计要求,实际单位面积的加工成本仍略有增加。

综上,建筑层数越高,单位面积用钢量越大,且需根据楼层位置采用更多等级的钢材和不同规格的截面尺寸,这对构件加工的标准化造成不利影响。本文通过对

表8 不同层数建筑模型的用钢量统计

Table 8 Summary of steel usage for building models with different stories

层数/层	建筑面积/ m^2	用钢量/ $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-2})$	相对用钢量增加率/%
10	9 182.7	57.1	0
12	11 019.2	56.9	-0.35
14	12 855.8	59.2	3.68
16	14 692.3	61.8	8.23
18	16 528.9	64.4	12.78
20	18 365.4	68.7	20.32

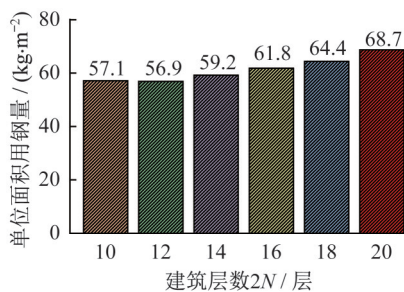


图13 不同层数建筑模型的单位面积用钢量对比

Fig. 13 Comparison of steel usage per unit area for building models with different stories

新型模块建筑的对比分析和用钢量统计,为初步评估该结构设计的可行性和经济性提供了参考。

3 结论

本文针对基于稀疏钢框架的新型高层模块建筑结构,提出了其整体建模方法,通过整体结构分析初步论证了结构设计的可行性;以抗震设防烈度和建筑层数为变量开展参数化分析,探究了不同因素对结构响应的影响规律;最后在满足设计要求的基础上,完成了各模型的结构设计及用钢量统计。主要结论如下:

(1) 该新型模块建筑采用“1层框架填充2层模块单元”的形式,因此对于2N层的模块建筑,建模时应设置N个结构层,并对每个结构层分别施加2层模块叠箱的恒、活荷载;此外,考虑到标准层模块单元的楼板不连续,建模分析时应按弹性楼板假定考虑。

(2) 该新型模块建筑的稀疏框架具有框架柱长细比大、框架梁跨度大的特点,构件承载力主要由竖向荷载控制,侧向刚度主要受水平荷载影响;底部框架中部的框架柱及大跨度框架梁端部为应力集中、承载力设计比偏高的关键部位,是设计的重点关注区域。

(3) 基于稀疏框架的结构特征,建筑层数增加对结构设计的不利影响,远大于抗震设防烈度提高的影响;为

满足刚度和承载力要求,需随着建筑层数的增加,对底部框架柱和大跨度框架梁的钢材等级、截面尺寸进行不同程度的加强。

(4) 稀疏框架的单位面积用钢量总体随建筑层数增加逐步上升,10层建筑的单位面积用钢量为 $57.1 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$;层数增至14、16、18、20层时,单位面积用钢量分别达到 $59.2 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 、 $61.8 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 、 $64.4 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 和 $68.7 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$,较10层基准模型分别增加3.68%、8.23%、12.78%和20.32%,该结果可为评估该结构设计的可行性和经济性提供参考。

该稀疏框架因大层高、大柱距的结构特点,其在竖向和水平荷载组合工况下的结构响应对建筑层数较为敏感,尤其是本研究中采用“将填充模块单元仅视为竖向荷载,忽略其刚度贡献”的计算假定,更放大了这一敏感性。

目前本研究中,稀疏框架的建模分析主要参考组成相似的嵌入式模块结构,因此后续应补充稀疏框架的抗侧试验予以验证。此外,还需进一步研究填充模块单元刚度、框架-单元连接节点刚度及建筑平面布置形式等因素对该类新型模块建筑整体结构性能的影响,为结构的设计优化提供必要参考。

参考文献:

- [1] 叶浩文,苏衍江.以新质生产力推动建筑业转型发展研究与探索[J].工程管理学报,2024,38(3):1-5.DOI:10.13991/j.cnki.jem.2024.03.001.
YE Haowen, SU Yanjiang. Research and exploration on promoting the transformation and development of the construction industry with new quality productivity [J]. Journal of Engineering Management, 2024, 38(3): 1-5. DOI: 10.13991/j.cnki.jem.2024.03.001. (in Chinese)
- [2] 岳清瑞,吴朝响,刘晓刚,等.多高层模块化结构及建造技术研究进展与未来趋势[J].建筑结构学报,2024,45(8):1-19. DOI:10.14006/j.jzjgxb.2023.0619.
YUE Qingrui, WU Zhaoyun, LIU Xiaogang, et al. Progress and future trends in development of multi-story and high-rise modular structures and construction technology [J]. Journal of Building Structures, 2024, 45(8): 1-19. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2023.0619. (in Chinese)
- [3] LUO H B, LIU J J, LI C Q, et al. Ultra-rapid delivery of specialty field hospitals to combat COVID-19: Lessons learned from the Leishenshan Hospital project in Wuhan [J]. Automation in Construction, 2020, 119: 103345. DOI: 10.1016/j.autcon.2020.103345.
- [4] 陈志华,钟旭,余玉洁,等.多层模块钢结构住宅项目关键技术及实践[J].建筑技术,2018,49(4):372-376. DOI: 10.3969/j.issn.1000-4726.2018.04.010.
CHEN Zhihua, ZHONG Xu, YU Yujie, et al. Key technologies and application in multi-storey modular steel residential

- building [J]. *Architecture Technology*, 2018, 49 (4) : 372-376. DOI:10.3969/j.issn.1000-4726.2018.04.010. (in Chinese)
- [5] THAI H T, NGO T, UY B. A review on modular construction for high-rise buildings [J]. *Structures*, 2020, 28: 1265-1290. DOI:10.1016/j.istruc.2020.09.070.
- [6] FERDOUS W, BAI Y, NGO T D, et al. New advancements, challenges and opportunities of multi-storey modular buildings-A state-of-the-art review [J]. *Engineering Structures*, 2019, 183: 883-893. DOI:10.1016/j.engstruct.2019.01.061.
- [7] LI G Q, CAO K, LU Y, et al. Effective length factor of columns in non-sway modular steel buildings [J]. *Advanced Steel Construction*, 2017, 13 (4) : 412-426. DOI: 10.18057/IJASC.2017.13.4.6.
- [8] CHEN Z H, KHAN K, KHAN A, et al. Exploration of the multidirectional stability and response of prefabricated volumetric modular steel structures [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2021, 184: 106826. DOI: 10.1016/j.jcsr.2021.106826.
- [9] SRISANGEERTHANAN S, HASHEMI M J, RAJEEV P, et al. Numerical study on the effects of diaphragm stiffness and strength on the seismic response of multi-story modular buildings [J]. *Engineering Structures*, 2018, 163: 25-37. DOI: 10.1016/j.engstruct.2018.02.048.
- [10] SRISANGEERTHANAN S, HASHEMI M J, RAJEEV P, et al. Review of performance requirements for inter-module connections in multi-story modular buildings [J]. *Journal of Building Engineering*, 2020, 28: 101087. DOI: 10.1016/j.jobe.2019.101087.
- [11] 陈红磊,陈琛,李国强. 模块化建筑钢结构模块间新型节点及其承载性能 [J]. *建筑钢结构进展*, 2022, 24 (4) : 15-23. DOI:10.13969/j.cnki.cn31-1893.2022.04.003.
- CHEN Honglei, CHEN Chen, LI Guoqiang. Load-bearing capacity of a new joint for connecting modules in modular steel buildings [J]. *Progress in Steel Building Structures*, 2022, 24 (4) : 15-23. DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2022.04.003. (in Chinese)
- [12] 王关朝,周凌宇,陈浩,等. 模块化钢结构单元房承插式节点弯剪性能研究 [J]. *铁道科学与工程学报*, 2024, 21 (11) : 4663-4676. DOI:10.19713/j.cnki.43-1423/u.T20240072.
- WANG Guanchao, ZHOU Lingyu, CHEN Hao, et al. Bending and shear behavior of socketed joint in modular steel structure unit house [J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2024, 21 (11) : 4663-4676. DOI:10.19713/j.cnki.43-1423/u.T20240072. (in Chinese)
- [13] 李红星. 钢结构预应力模块框架体系试验及理论研究 [D]. 天津:天津大学, 2018.
- LI Hongxing. Investigations on mechanical behavior of prestressed steel modular framed structure system [D]. Tianjin: Tianjin University, 2018. (in Chinese)
- [14] 李豫明. 模块化钢结构单边螺栓连接节点力学性能研究 [D]. 天津:天津大学, 2018.
- LI Yuming. Mechanical behavior study on the blind bolted joint of modular steel structure [D]. Tianjin: Tianjin University, 2018. (in Chinese)
- [15] 王霄翔,陈浩,张明亮,等. 钢结构模块建筑挤压式竖向自锁连接节点设计研究 [J]. *绿色建筑*, 2024, 16 (1) : 110-114. DOI:10.3969/j.issn.1004-1672.2024.01.022.
- WANG Xiaoxiang, CHEN Hao, ZHANG Mingliang, et al. Research on the design of extruded vertical self-locking connection nodes of steel structure modular building [J]. *Green Building*, 2024, 16 (1) : 110-114. DOI: 10.3969/j.issn.1004-1672.2024.01.022. (in Chinese)
- [16] 陈浩,黄伟,王霄翔. 湖南建投集团钢结构模块建筑嵌入式箱框组合结构体系技术创新与实践 [J]. *施工企业管理*, 2024 (2) : 82-84. DOI:10.3969/j.issn.1001-9251.2024.02.025.
- CHEN Hao, HUANG Wei, WANG Xiaoxiang. Technical innovation and practice of embedded box-frame composite structure system of steel structure module building of Hunan Jiantou Group [J]. *Construction Enterprise Management*, 2024 (2) : 82-84. DOI: 10.3969/j.issn.1001-9251.2024.02.025. (in Chinese)
- [17] 陈浩,钟旭,石拓,等. 双层模块填充稀疏钢框架建筑及其讨论 [C]//中国土木工程学会总工程师工作委员会第三届总工论坛论文集, 2023:159-162.
- CHEN Hao, ZHONG Xu, SHI Tuo, et al. Discussion over the building with double-storey filled modules in sparse-component steel frame [C]//The 3rd Chief Engineer Working Committee of the Chinese Society of Civil Engineering, 2023: 159-162. (in Chinese)
- [18] 陈浩,钟旭,王霄翔,等. 基于稀疏框架的模块建筑平面设计及现场安装方案 [J]. *绿色建筑*, 2024, 16 (6) : 14-20, 68. DOI:10.3969/j.issn.1004-1672.2024.06.003.
- CHEN Hao, ZHONG Xu, WANG Xiaoxiang, et al. Planar and facade design as well as on-site installation scheme for modular structure based on sparse component frame [J]. *Green Building*, 2024, 16 (6) : 14-20, 68. DOI: 10.3969/j.issn.1004-1672.2024.06.003. (in Chinese)
- [19] GB 50009—2012 建筑结构荷载规范 [S].
- GB 50009—2012 Load code for the design of building structures [S]. (in Chinese)
- [20] GB 50017—2017 钢结构设计标准 [S].
- GB 50017—2017 Standard for design of steel structures [S]. (in Chinese)
- [21] GB/T 50011—2010 建筑抗震设计标准 [S].
- GB/T 50011—2010 Standard for seismic design of buildings [S]. (in Chinese)