

盒子建筑舱体连接节点简化分析及整体结构抗震分析

姜枫, 许峰

沈阳建筑大学土木工程学院, 辽宁 沈阳

收稿日期: 2024年3月26日; 录用日期: 2024年4月16日; 发布日期: 2024年4月26日

摘要

目的: 对盒子建筑舱体连接节点进行简化分析, 将简化结果应用于某多层盒子模块化装配式学生公寓, 并对该结构进行整体抗震分析。方法: 应用有限元软件ABAQUS建立节点有限元实体模型与简化模型, 分析在柱顶施加0.2轴压比的轴压力及150 mm水平位移作用下, 比较两种模型的破坏形态及荷载位移曲线。采用MIDASGEN2022建立整体结构计算模型, 对其进行地震反应谱分析, 并将计算结果与现行国家标准限值进行对比。结果: 有限元简化模型与实体模型应力分布规律一致, 破坏形态相同, 二者破坏形态均为模块梁屈服, 梁端发生塑性铰破坏, 且两种模型的荷载位移曲线较为接近, 二者的初始刚度、屈服荷载和极限荷载相差不大。反应谱分析结果均满足国家标准限值要求。结论: 简化模型与实体模型破坏形态相同, 荷载位移曲线接近, 验证了简化模型的合理性。盒子模块结构设置刚性支撑, 可较大提升整体结构的抗侧刚度。

关键词

节点简化, 有限元计算模型, 地震反应谱分析, 抗震性能

Simplified Analysis of Box Building Connecting Nodes and Overall Structural Seismic Analysis

Feng Jiang, Feng Xu

School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang Liaoning

Received: Mar. 26th, 2024; accepted: Apr. 16th, 2024; published: Apr. 26th, 2024

Abstract

Purpose: Simplified analysis of the connecting nodes of box building compartments is carried out,

the node simplification results are applied to a multi-story box modular assembly student apartment, and the overall seismic analysis of the structure is carried out. **Methods:** The finite element software ABAQUS is applied to establish the node finite element solid model and the simplified model, and analyze the damage patterns and load displacement curves comparing the two models under the axial pressure of 0.2 axial compression ratio applied at the top of the columns and the horizontal displacement of 150 mm. MIDAS/gen 2022 is used to establish the calculation model of the whole structure, the seismic response spectrum analysis is carried out, and the calculation results are compared with the limits of the current national standards. **Results:** The stress distribution pattern of the simplified finite element model and the solid model are consistent, and the damage patterns are the same, the damage pattern of both models is the yielding of the modular beam, and the plastic hinge damage occurs at the end of the beam, and the load displacement curves of the two models are close to each other, and the differences in initial stiffness, yield load and ultimate load are not big between the two models. The results of reaction spectrum analysis meet the requirements of national standard limits. **Conclusion:** The simplified model has the same damage pattern as the solid model, and the load-displacement curves are close to each other, which verifies the rationality of the simplified model. Setting rigid support for the box module structure can greatly improve the lateral stiffness of the overall structure.

Keywords

Nodal Simplification, Finite Element Calculation Model, Seismic Response Spectrum Analysis, Seismic Performance

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

“十二五”期间,我国大力推进绿色建筑的发展,相关政策不断出台,体现了国家对于提高当前建筑工业化程度及预制、装配式技术集成水平的决心[1];2016年2月1日到9月27日,国务院陆续发布《关于钢铁行业化解过剩产能实现脱困发展的意见》和《关于大力发展装配式建筑的指导意见》,提出当前应推广以装配式钢结构为主的钢结构建筑,同时需革新建造及施工方法以提高装配式技术在新建建筑中应用的比例[2];2017年12月,国务院发布《国务院关于印发“十三五”节能减排综合工作方案的通知》,结合我国目前钢铁产量过剩,钢铁价格较低的特点,对建筑节能及绿色建筑等方面提出了新的要求:“到2020年,提高绿色建筑在新建建筑中的比例至50%”[3];2020年8月,《关于加快新型建筑工业化发展若干意见》提出应加强系统化设计、工业化生产,截止到2025年,新建城镇建筑应全面执行绿色建筑标准,该方案对我国建筑节能标准和降碳标准提出了新的要求。在我国建筑领域不断向工业化及绿色化发展的时代背景下,以模块建筑(又称“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[4]。

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按照连接位置划分主要分为模块内部连接、模块间连接和模块与基础的连接[5],其中模块间连接主要指相邻模块之间的连接,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的连接形式。CHEN等[6][7]提出了一种预张拉组合连接节点,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。Dhanapal 等[8] [9]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。戴骁蒙等[10]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。陈志华等[11] [12] [13] [14]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。Lee S. S. 等[15] [16] [17]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。Nadeem Gohar [18]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[19] [20]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, 独立承担弯矩, 加劲板、内隔板和外盖板能有效提高节点承载力和延性。

本文对某多层盒子模块化装配式学生公寓进行建筑结构设计与分析, 盒子模块间连接方式采用盒子建筑舱体连接节点, 根据连接节点简化方式, 在 MIDAS/gen 2022 中建立盒子结构整体计算模型, 并对该结构进行地震反应谱分析, 将相关力学指标等计算结果与国家现行规范进行对比, 以满足建筑结构设计要求。

2. 盒子建筑结构地震反应谱分析

2.1. MIDAS 中建立模型

2.1.1. 工程概况

某多层盒子模块化学生公寓, 建筑层数为 4 层, 层高 3.6 m, 结构采用盒子模块化钢框架结构体系, 图 1 为该建筑标准层平面布置图。

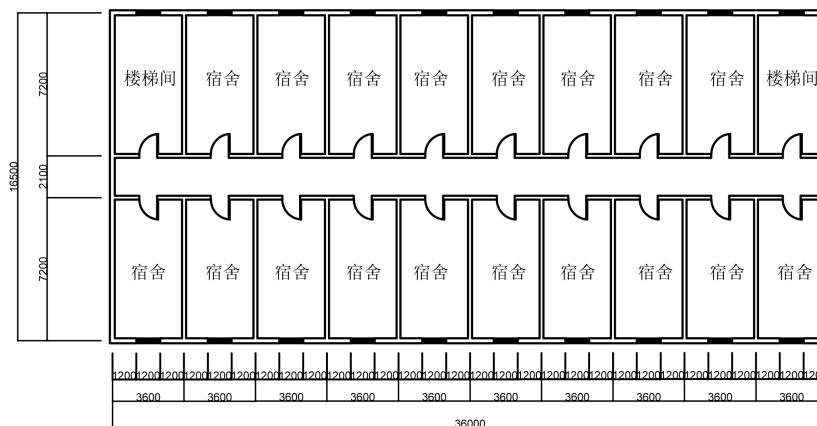


Figure 1. Standard floor layout plan

图 1. 标准层平面布置图

2.1.2. 模块划分与模块单元涉及

在盒子模块内部设置钢柱、钢梁提高模块承载力, 在盒子模块长跨方向设置刚性支撑提高盒子模块稳定性, 如图 2 所示。按照房间功能对建筑平面进行合理划分, 根据盒子模块单元是否设置内部支撑, 设计两种盒子模块布置方式, 如图 3 和图 4 所示。盒子模块具体尺寸见表 1。按照盒子模块单元尺寸与构造不同, 划分为 3 种不同类型的盒子模块单元。图 4 中, 为提高整体结构刚度, 减小荷载作用下的扭转效应, 在宿舍及楼梯模块, 设置刚性支撑。

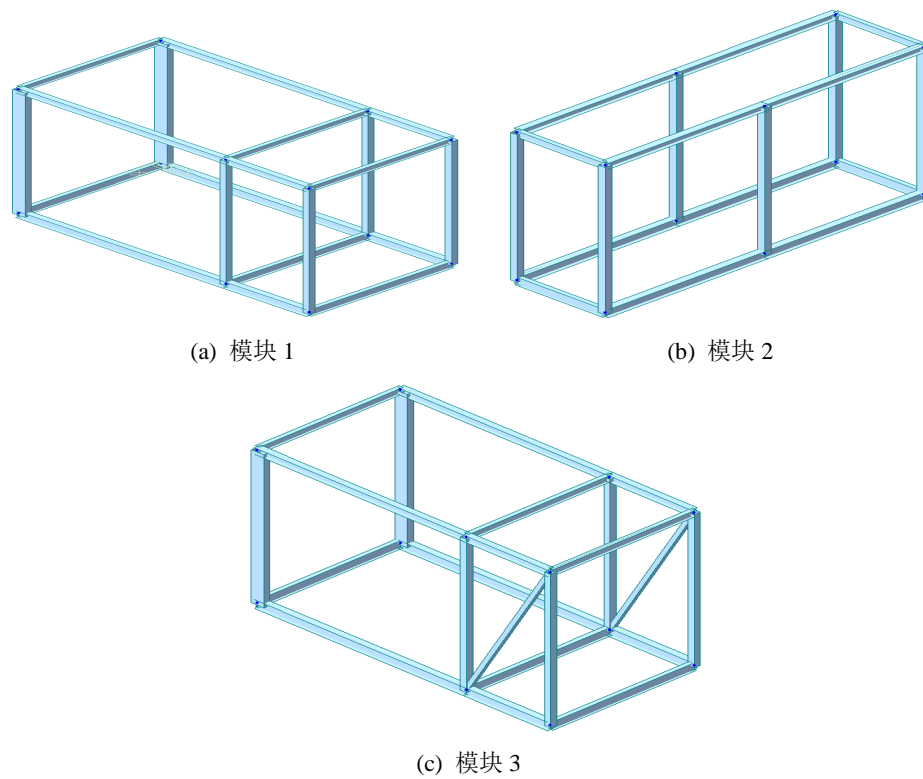


Figure 2. Box module types

图 2. 盒子模型尺寸

Table 1. Box module size

表 1. 盒子模块尺寸

模块编号	长/mm	宽/mm	高/mm
模块 1	7200	3600	3600
模块 2	7200	2100	3600
模块 3	7200	3600	3600

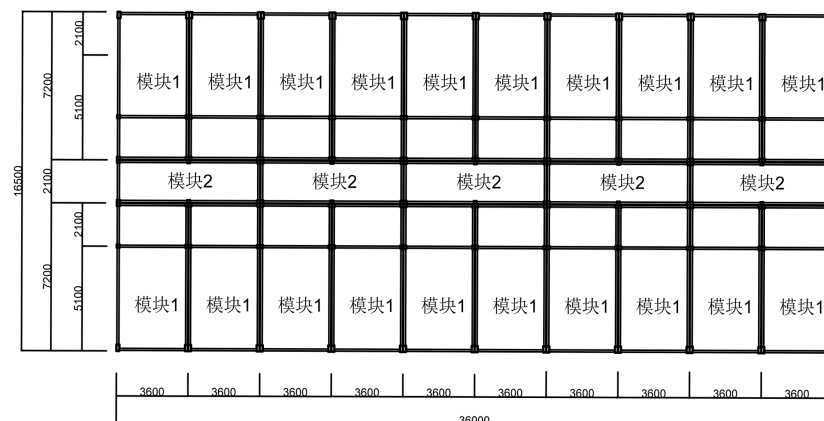


Figure 3. Structural layout without support module

图 3. 不带支撑模块结构平面布置图

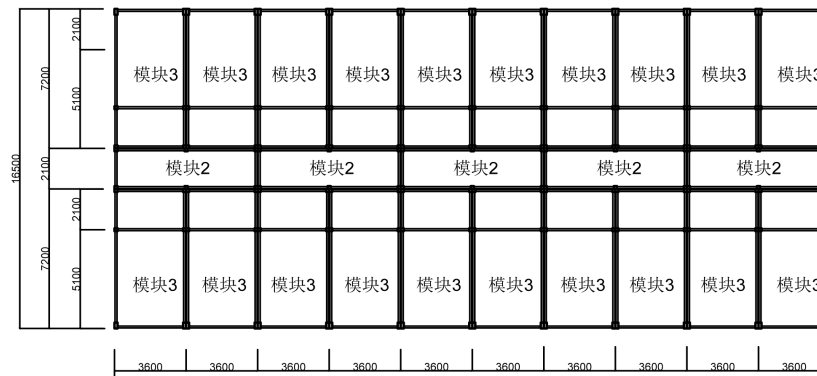


Figure 4. Structural layout with support modules
图 4. 带支撑模块结构平面布置图

2.1.3. 模型参数

根据《建筑抗震设计规范》[21] (GB50011-2010) 并按照建筑物拟建地点的地址资料, 确定建筑结构设计参数如下: 结构设计使用年限为 50 年, 安全等级为二级, 丙类建筑, 抗震设防烈度为 7 度, 基本地震加速度为 0.1 g, 地震分组为第一组, 场地类别为类, 对应的特征周期为 0.45 s。

根据《建筑结构荷载规范》[22] (GB50009-2010), 查得基本风压为 0.55 KN/m², 基本雪压为 0.50 KN/m², 地面粗糙度为 C 类。

2.1.4. 模型荷载信息

根据建筑结构荷载规范及建筑结构实际做法, 考虑建筑恒荷载、活荷载、风荷载、雪荷载、地震荷载及其相应荷载组合。

(1) 建筑恒荷载: 盒子模块楼面采用压型钢板混凝土组合楼板, 荷载为 4.1 KN/m², 天花板采用轻型钢板, 荷载为 1.0 KN/m², 不上人屋面恒荷载 5.4 KN/m², 外墙荷载为 4.2 KN/m², 内墙荷载为 3.4 KN/m²。

(2) 建筑活荷载: 宿舍(非卫生间)活荷载为 2.0 KN/m², 宿舍卫生间活荷载为 2.5 KN/m², 楼梯间活荷载为 3.5 KN/m², 不上人屋面活荷载为 0.5 KN/m², 宿舍走廊活荷载为 2.0 KN/m²。

2.1.5. 盒子模块构件尺寸

根据学生公寓结构设计荷载情况, 选用 Q355B 钢材, 盒子模块单柱采用方钢管截面, 其中方钢管截面采用 150 mm × 150 mm × 6 mm。盒子模块双柱采用方钢管与 C 型钢的组合截面, 其中 C 型钢截面采用 C1 150 mm × 150 mm × 20 mm × 6 mm, 方钢管截面采用 150 mm × 150 mm × 6 mm。盒子模块梁均采用工字形截面, 其中 6.6m 方向地板梁选用 HN 200 mm × 150 mm × 6 mm × 9 mm, 天花板梁选用 HN 150 mm × 150 mm × 6 mm × 8 mm; 3.3m 方向地板梁选用 HN 200 mm × 100 mm × 5.5 mm × 8 mm, 天花梁选用 HN 150 mm × 100 mm × 4.5 mm × 6 mm, 盒子模块构件间连接方式为工厂焊接。

2.1.6. 盒子结构有限元模型的建立

采用 MIDAS/gen 2022 对学生公寓结构进行有限元模型建立与分析, 按照图 3 及图 4 进行模块布置, 并采用上述连接节点的简化方式建立有限元计算模型, 如图 5 所示。除刚性支撑采用桁架单元模拟外, 其余盒子模块构件均采用梁单元进行模拟。

2.2. 盒子模块结构有限元计算模型

2.2.1. 振动周期与迭代振型

盒子模块结构前 15 阶振动周期如表 2 所示, 并在图 6 中对前十阶自振周期数据进行绘制。分析图表

数据可得出, 加支撑盒子模块结构的自振周期小于无支撑盒子模块结构, 加支撑模块结构的第一阶迭代振型为 X 向平动, 对应的振动周期为 1.625 s, 第二迭代振型为扭转, 振型周期为 1.038 s, 第三迭代振型为 Y 向平动, 振型周期为 0.999 s; 振型周期比 $T_2/T_1 = 1.038/1.625 = 0.639 < 0.9$, 盒子结构前 15 阶 X 方向平动质量参与系数总计为 99.99%, Y 方向平动质量参与系数总计为 99.99%, 满足《高层民用建筑钢结构技术教程》(JGJ99-2015)中振型有效质量参与系数不低于 90%的要求。无支撑盒子模块结构的第一阶迭代振型为 X 向平动, 振动周期为 1.664 s, 第二阶迭代振型为扭转, 振动周期为 1.432 s, 第三阶迭代振型为 Y 向平动, 振动周期为 1.048 s, 周期比 $T_2/T_1 = 0.861 < 0.9$, 周期比满足规范限值要求。

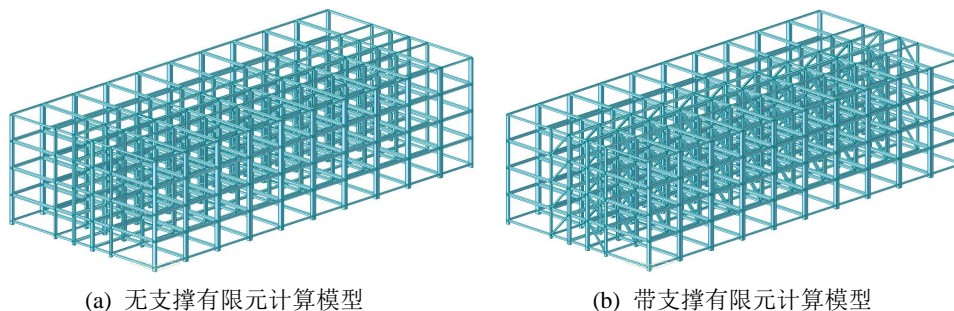


Figure 5. Finite element calculation model
图 5. 有限元计算模型

Table 2. Comparison of the first 15 orders of self-resonance period for structures with and without support modules
表 2. 有无支撑模块结构前 15 阶自振周期对比

结构类型	自振周期/s							
	1 阶	2 阶	3 阶	4 阶	5 阶	6 阶	7 阶	8 阶
加支撑	1.625	1.038	0.999	0.549	0.347	0.330	0.317	0.285
无支撑	1.664	1.432	1.408	0.569	0.493	0.483	0.363	0.320
结构类型	9 阶	10 阶	11 阶	12 阶	13 阶	14 阶	15 阶	
加支撑	0.221	0.213	0.149	0.137	0.033	0.027	0.026	
无支撑	0.315	0.293	0.260	0.256	0.035	0.028	0.027	

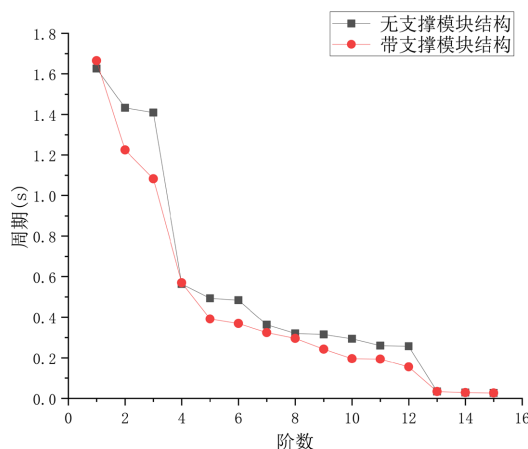


Figure 6. Distribution of vibration patterns of the first 15 orders of the box module structure
图 6. 盒子模块结构前 15 阶振型分布

盒子模块结构前三阶迭代振型如图 7 所示, 在模块单元增加刚性支撑减小模型的自振周期, 提高盒子模块结构的抗侧刚度, 提高盒子模块的稳定承载力, 因此该装配式学生公寓采用图 5(b)所示带支撑模块结构整体有限元计算模型, 且后文的计算和分析结果均建立在带支撑的有限元模型基础之上。

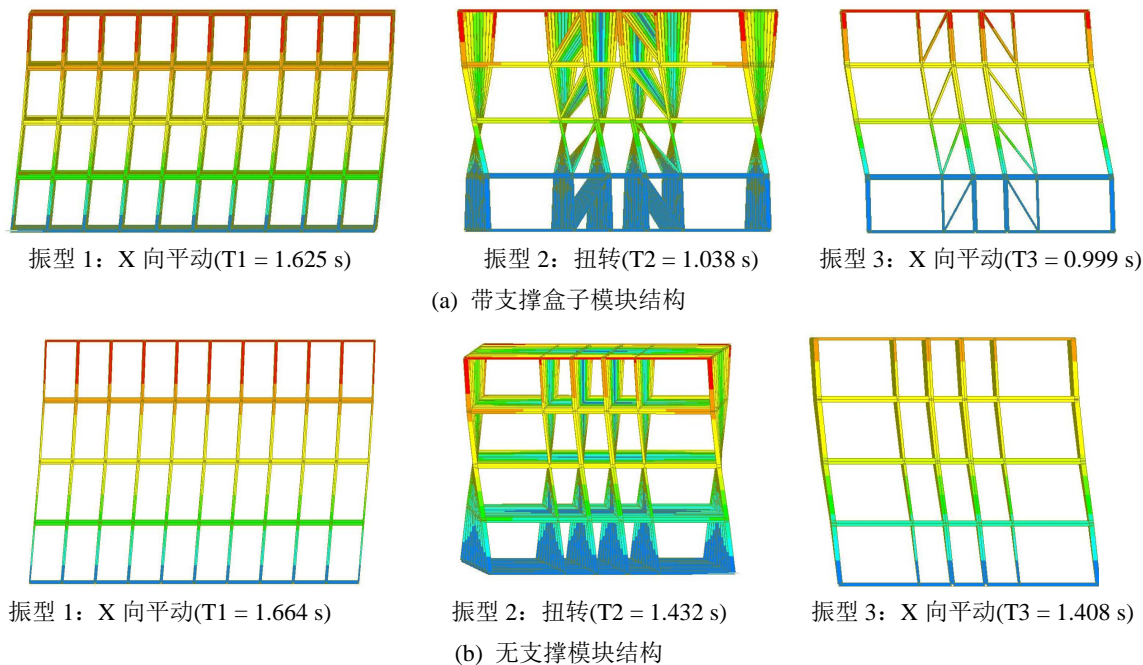


Figure 7. Comparison of the first 3 orders of iterative vibration patterns of the box module structure
图 7. 盒子模块结构前三阶迭代振型对比

2.2.2. 地震反应谱分析结果

表 3 为盒子模块结构在多遇地震作用下的顶点位移, 表 4 为该结构在多遇地震作用下的层间位移角,

Table 3. Vertex displacement
表 3. 顶点位移/mm

楼层号	X 向地震	Y 向地震
1	5.5	2.4
2	10.9	6.5
3	15.0	10.2
4	17.3	12.9

Table 4. Angle of interlayer displacement
表 4. 层间位移角

楼层号	X 向地震	Y 向地震
1	1/673	1/1590
2	1/662	1/871
3	1/830	1/941
4	1/1292	1/1180

在图 8 中进行绘制。结合图表分析可知, 在多遇地震作用下 X 向盒子模块结构顶点最大位移为 17.3 mm, Y 向为 12.9 mm, X、Y 两方向盒子模块结构的顶点位移曲线呈现剪切变形, 最大层间位移角出现在盒子模块结构的第 2 层, 分别为 X 向的 1/662 和 Y 向的 1/871, 均满足《钢结构设计标准》(GB50017-2017) 规定限制 1/250 的要求。通过比较两方向顶点位移及层间位移角, 可以得出在盒子模块结构设置刚性支撑, Y 向抗侧刚度得到了较大提升。

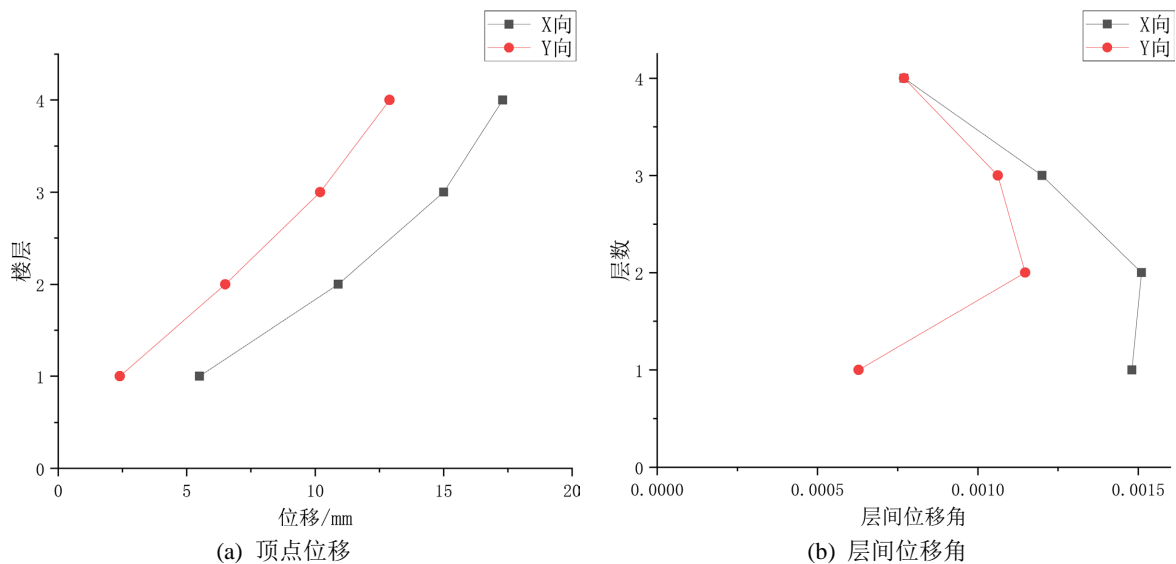


Figure 8. Box module structure vertex displacement and interstory displacement angle

图 8. 盒子模块结构顶点位移与层间位移角

2.2.3. 钢结构构件验算

经 MIDAS/gen 2022 钢构件验算, 盒子模块结构各构件在组合荷载作用下的应力比如图 9 所示, 从图

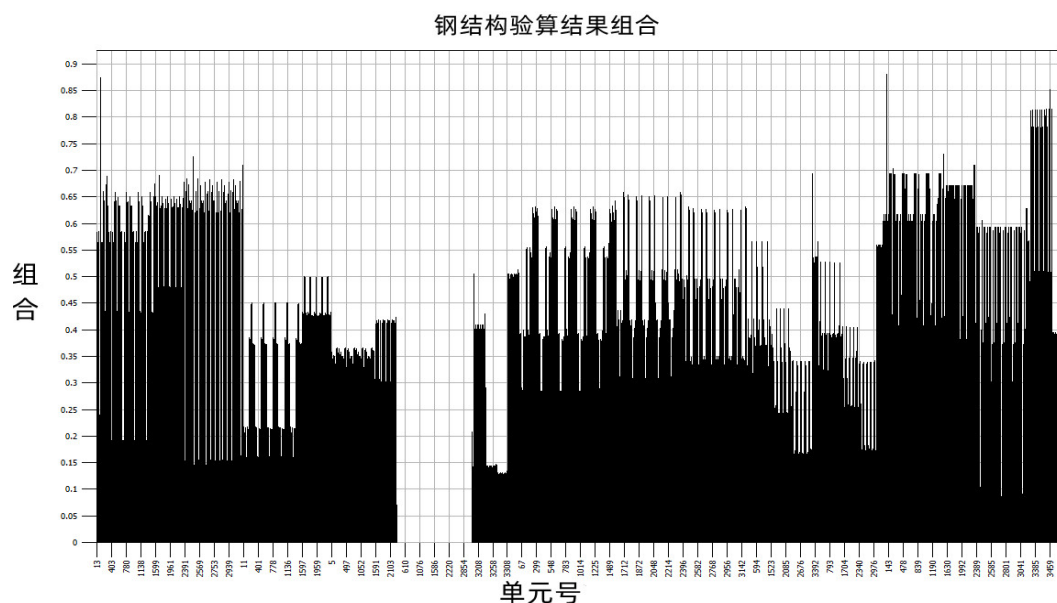


Figure 9. Box module structural component stress ratios

图 9. 盒子模块结构构件应力比

中数据可知, 梁柱构件应力比均低于 1.0, 且大多数构件应力比在 0.7 以下, 最大应力比 0.83 出现在顶层模块屋面梁上。盒子模块柱的应力比最大为 0.69, 但大部分低于 0.55, 盒子模块各构件仍有较大的强度储备, 为盒子模块结构预留了足够的安全空间, 并且模块柱的强度储备大于模块梁的强度储备, 满足“强柱弱梁”的设计准则。

3. 盒子建筑结构动力时程分析

3.1. 地震波的选取

本模块建筑工程抗震设防烈度为 7 度, 基本地震加速度为 0.15 g, 设计地震分组为第一组, 场地类别为 III 类, 特征周期为 0.45 s。根据地震三要素要求, 盒子模块建筑进行动力时程分析时选用人工波: RH4TG045、天然波 1: TH2TG045、天然波 2: Taft。时程分析时长为 30 s, 分析时间步长为 0.02 s, 对选取地震波按照公式 3.3 进行调幅, 所选取地震波在多遇地震下峰值调整为 35 cm/s^2 , 在罕遇地震下峰值调整为 220 cm/s^2 , 调整后的地震波曲线如图 10 所示。

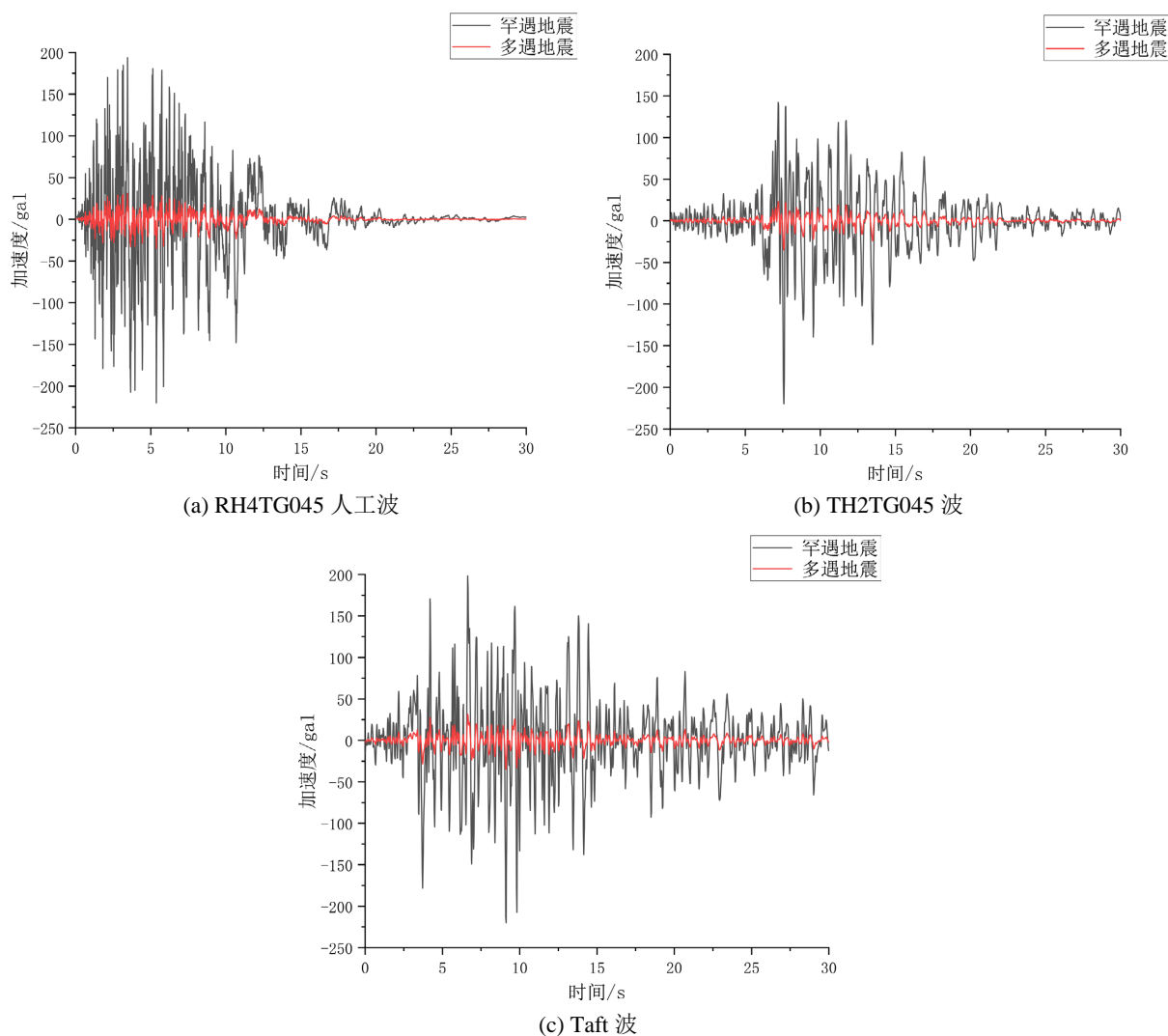


Figure 10. Dynamic time course analysis of seismic waves

图 10. 动力时程分析地震波

3.2. 多遇地震弹性时程分析结果

为验证选取三条地震波的准确合理性,对盒子模块建筑有限元模型分别施加两方向 X 和 Y 的地震波,并进行动力时程分析。将所得计算所得基底剪力与反应谱分析结果进行对比,如表 5 所示。对比结果可知,单条地震波时程分析所得结构基底剪力值均大于反应谱结果的 65%,X 方向三条地震波基底剪力平均值为 1126KN,是反应谱结果的 100%,Y 方向三条地震波基底剪力平均值为 1716 KN,是反应谱结果的 106%,符合规范规定的地震波基底剪力平均值与反应谱结果比值应在 80%~120%之间。经过与反应谱结果对比可知,所选取三条地震波均满足规范要求,可以用于本盒子模块结构的动力时程分析。

Table 5. Base shear in X and Y directions under multiple earthquakes

表 5. 多遇地震作用下 X、Y 方向基底剪力

地震波	方向	基底剪力(KN)	与反应谱比值(%)
反应谱	X	1122	100
	Y	1612	100
RH4TG045	X	1331	118
	Y	1742	108
TH2TG045 波	X	870	77
	Y	1882	117
Taft 波	X	1178	105
	Y	1524	95
三条波平均值	X	1126	100
	Y	1716	106

表 6 和表 7 为盒子模块整体模型在 RH4T045、TH2TG045、Taft 三条地震波作用下,动力时程分析所得 X、Y 方向层间位移角。从表中数据可知,盒子模块整体模型在三条地震波作用下 X、Y 两方向最大层间位移角均发生在结构第二层。在 RH4T045 (人工波)地震波作用下,盒子模块结构 X 和 Y 向最大层间位移角分别为 1/426 和 1/725;在 TH2T025 地震波作用下,盒子模块结构 X 和 Y 向最大层间位移角分别为 1/413 和 1/615;在 Taft 地震波作用下,盒子模块结构 X 和 Y 向最大层间位移角为分别为 1/587 和 1/770。盒子模块结构在弹性时程分析下的层间位移角分布规律与反应谱分析结果相似,且小于 1/250 的规范范围。

Table 6. X-direction interlayer displacement angle

表 6. X 方向层间位移角

地震波	楼层	层间位移角
RH4TG045 (人工波)	1	1/448
	2	1/426
	3	1/552
	4	1/1058

续表

TH2T045	1	1/561
	2	1/413
	3	1/599
	4	1/1001
Taft	1	1/606
	2	1/587
	3	1/700
	4	1/1331

Table 7. Y-direction interlayer displacement angle
表 7. Y 方向层间位移角

地震波	楼层	层间位移角
RH4TG045 (人工波)	1	1/848
	2	1/725
	3	1/759
	4	1/1331
TH2T045	1	1/881
	2	1/615
	3	1/708
	4	1/1228
Taft	1	1/1480
	2	1/770
	3	1/916
	4	1/1656

盒子模块结构模型在 RH4T045、TH2TG045、Taft 三条地震波作用下, 动力时程分析所得顶点位移如图 11~13 所示。在 RH4T045 (人工波)地震波作用下, 盒子模块结构 X 和 Y 向顶点最大位移分别为 22.5 mm 和 13.4 mm; 在 TH2T025 地震波作用下, 盒子模块结构 X 和 Y 向最大层间位移角为 15.1 mm 和 13.8 mm; 在 Taft 地震波作用下, 盒子模块结构 X 和 Y 向最大层间位移角为 20.4 mm 和 11.1 mm。其中 RH4T045 地震波 X、Y 两方向顶点最大位移均大于反应谱计算结果; TH2TG045 地震波 Y 向顶点最大位移大于反应谱计算结果; Taft 地震波 X 方向顶点最大位移大于反应谱计算结果, 这是因为 RH4T045 地震波 X、Y 两方向基底剪力为反应谱计算结果的 118% 和 108%; TH2T025 地震波 Y 向基底剪力为反应谱计算结果的 117%; Taft 地震波 X 向基底剪力为反应谱计算结果的 105%, 因此其顶点位移相对地震反应谱分析结果较大。

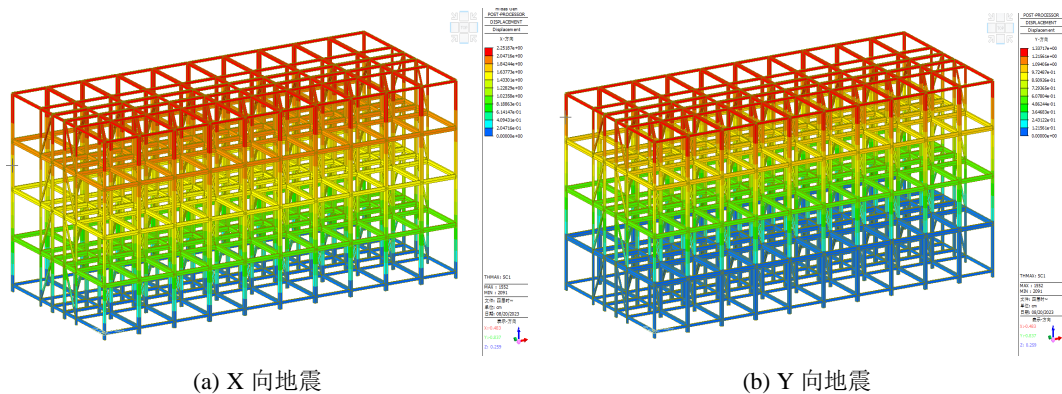


Figure 11. Overall displacement of RH4T045 wave under elastic time scale
图 11. 弹性时程下 RH4T045 波整体位移

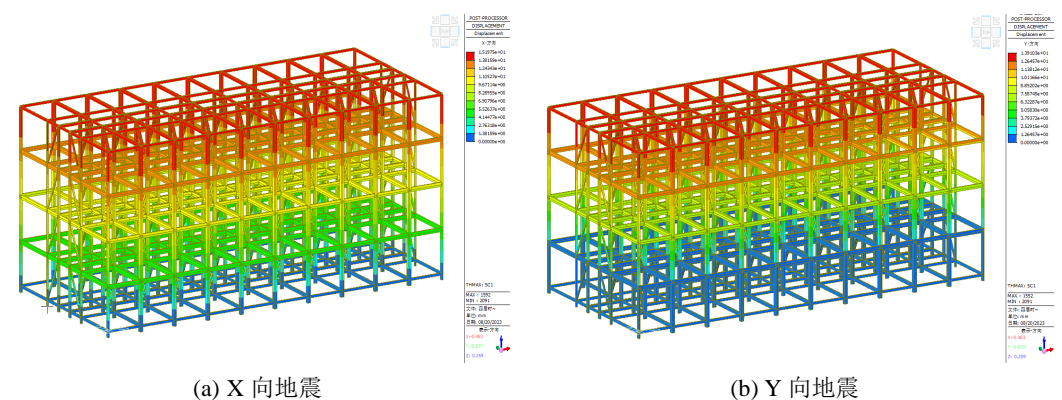


Figure 12. Overall displacement of TH2TG045 wave under elastic time scale
图 12. 弹性时程下 TH2TG045 波整体位移

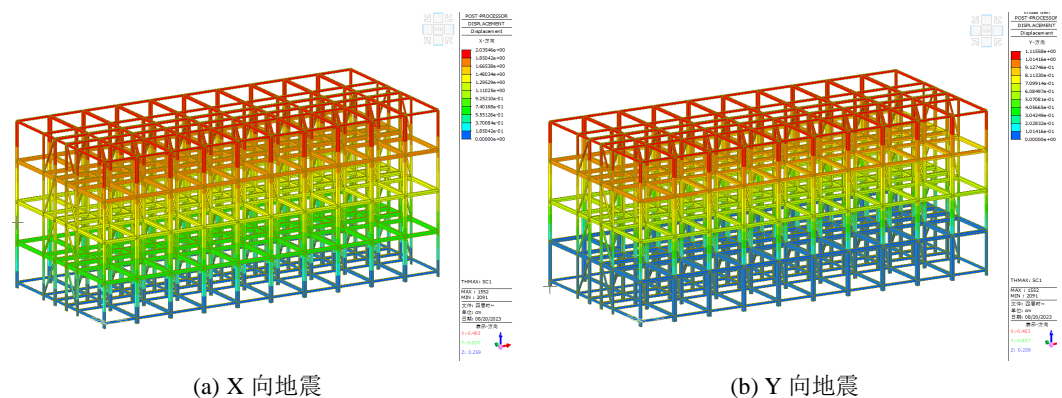


Figure 13. Overall displacement of Taft wave under elastic time scale
图 13. 弹性时程下 Taft 波整体位移

4. 结论

本文针对盒子建筑舱体连接节点进行简化分析, 对某多层盒子模块化学生公寓, 根据盒子舱体连接节点的简化方式, 运用 MIDAS/gen 2022 结构设计软件对结构进行地震反应谱分析。主要结论如下:

(1) 介绍了该盒子模块建筑的工程概况, 根据建筑设计平面图对盒子结构的模块单元进行设计、划分及布置, 并按照第三章所得的盒子建筑舱体连接节点的简化方式, 建立盒子整体结构有限元计算模型。

(2) 采用 MIDAS/gen 2022 结构设计软件对盒子建筑整体结构进行地震反应谱分析, 将分析结果所得的振动周期、迭代振型、结构顶点位移、层间位移角和构件应力比等相关力学性能指标与国家现行建筑规范进行对比, 研究结果表明各项力学性能指标均能满足相应建筑规范的要求。

(3) 在多遇地震作用下, 对盒子结构有限元模型进行弹性时程分析, 选取三条地震波并对其峰值进行调幅, 通过 MIDAS/gen 2022 结构计算软件计算所得的基底剪力、结构顶点位移及层间位移角等指标均满足建筑规范的要求, 表明该盒子模块建筑在多遇地震作用下具有良好的抗震性能。

参考文献

- [1] 陈敦宜, 张肇毅, 王卉, 等. 建筑工业化与绿色模块建筑[J]. 建筑结构, 2013, 43(S2): 334-336.
- [2] 国务院办公厅关于大力发展装配式建筑的指导意见[J]. 建筑技术开发, 2017, 44(1): 80.
- [3] 赵建安, 钟帅, 沈镭. 中国主要耗能行业技术进步对节能减排的影响与展望[J]. 资源科学, 2017, 39(12): 2211-2222.
- [4] 王文静, 李志武, 于春义, 刘洋, 叶浩文, 李振宝. 模块化钢结构建筑结构体系研究进展[J]. 施工技术, 2020, 49(11): 24-30, 36.
- [5] 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.
- [6] Chen, Z., Li, H., Chen, A., et al. (2017) Research Onpretensioned Modular Frame Test and Simulations. *Engineering Structures*, **151**, 774-787. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.08.019>
- [7] Yu, Y., Chen, Z. and Chen, A. (2019) Experimental Study of a Pretensioned Connection for Modular Buildings. *Steel and Composite Structures*, **31**, 217-232.
- [8] Dhanapal, J., Ghaednia, H., Das, S., et al. (2019) Structural Performance of State-of-the-Art VectorBloc Modular Connector under Axial Loads. *Engineering Structures*, **183**, 496-509. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.01.023>
- [9] Dhanapal, J., Ghaednia, H., Das, S. and Velocci, J. (2020) Behavior of Thin-Walled Beam-Column Modular Connection Subject to Bending Load. *Thin-Walled Structures*, **149**, Article ID: 106536. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2019.106536>
- [10] 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]: [博士学位论文]. 天津: 天津大学, 2019.
- [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]: [博士学位论文]. 天津: 天津大学, 2021.
- [12] Chen, Z.H., Liu, Y., Zhong, X. and Liu, J.D. (2019) Rotational Stiffness of Inter-Module Connection in Mid-Rise Modular Steel Buildings. *Engineering Structures*, **196**, Article ID: 109273. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.06.009>
- [13] 周子栋. 多层钢模块建筑性能与角件旋转式模块连接节点分析[D]: [硕士学位论文]. 天津: 天津大学, 2018.
- [14] 丛子怡. 钢结构模块角件旋转式连接节点力学性能研究[D]: [硕士学位论文]. 天津: 天津大学, 2019.
- [15] Lee, S.S., Park, K.S., Hong, S.Y., et al. (2015) Behavior of C-Shaped Beam to Square Hollow Section Column Connection in Modular Frame. *Journal of Korean Society of Steel Construction*, **27**, 471-481. <https://doi.org/10.7781/kjoss.2015.27.5.471>
- [16] Choi, K.S. and Kim, H.J. (2015) An Analytical Study on Rotational Capacity of Beam-Column Joints in Unit Modular Frames. *International Journal of Civil, Environmental, Structural, Construction and Architectural Engineering*, **9**, 100-103.
- [17] Choi, K.S., Lee, H.C. and Kim, H.J. (2016) Influence of Analytical Models on the Seismic Response of Modular Structures. *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, **20**, 74-85. <https://doi.org/10.11112/jksmi.2016.20.2.074>
- [18] Nadeem, G., Safiee, N.A., Abu, B.N., Abd, K.I. and Mohd, N.N.A. (2021) Finite Element Analysis of Proposed Self-Locking Joint for Modular Steel Structures. *Applied Sciences*, **11**, Article 9277. <https://doi.org/10.3390/app11199277>
- [19] 邓恩峰. 集成模块钢结构波纹钢板剪力墙与新型节点抗震性能研究[D]: [博士学位论文]. 天津: 天津大学, 2018.
- [20] 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.
- [21] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑抗震设计规范(GB50011-2010) [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [22] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑结构荷载规范(GB50009-2012) [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.