钢结构模块连接边界条件的模拟分析和探讨

晏景通* 沈 磊 杨添博
（上海中森建筑与工程设计顾问有限公司，上海 200062）

摘 要 随着建筑工业化不断推进和绿色低碳建筑逐渐成为行业发展的趋势，模块化建筑在国内逐渐得到应用，但是其模块之间连接的计算边界条件及其模拟在国内还缺乏深入研究。本文首先对国内外文献中的模块间连接计算假定进行总结；其次对模块之间的竖向连接采用不同的边界条件模拟结果进行比较分析，并开展初步探讨，同时对竖向连接采用铰接和刚接两种边界条件在地震作用下的极限破坏模式作了初步的比较；最后，对模块间的竖向连接和水平连接的边界条件模拟给出一些建议，以供模块化建筑结构设计参考。

关键词 模块化建筑，模块间竖向连接，模块间水平连接，边界条件模拟，破坏模式
中图分类号：TU391 **文献标志码**：A **DOI**：10.15935/j.cnki.jggcs.202604.0003

Analysis and Discussion on Mechanical Boundary Conditions of Steel Modular Building Connections

YAN Jingtong* SHEN Lei YANG Tianbo
（Zhongsen Architectural & Engineering Designing Consultants Ltd., Shanghai 200062, China）

Abstract With the continuous advancement of industrialized construction and the progressive shift toward green and low-carbon buildings, modular construction has seen increasingly widespread application in China. However, in-depth research on the calculation boundary conditions and simulations of connections between modules remains limited. This paper first reviews the assumptions adopted in the analysis of module connections as reported in domestic and international literature. It then compares and analyzes simulation results obtained under different boundary conditions for vertical connections between modules, followed by a preliminary discussion. Furthermore, a comparative study is conducted on the ultimate failure modes of vertical connections under seismic action, considering both hinged and rigid boundary conditions. Finally, recommendations are proposed for simulating boundary conditions for both vertical and horizontal connections between modules, aiming to provide guidance for the structural design of modular buildings.

Keywords modular construction, vertical connections between modules, horizontal connections between modules, boundary condition simulation, failure modes

0 引 言

近年来，模块化建筑的建造引起了建筑行业的广泛关注，其相比传统的施工方法具有许多优势，施工过程更快、更安全，竣工时间可预测，有更高的质量保证、现场工人更少、资源浪费更少以及环境友好等[1]。近年来，绿色低碳建筑成为建筑行业发展的趋势，模块化建筑契合“建筑工业化、智能化、绿色化”的发展方向[2]。因此，模块化建筑在国内也逐渐开始得到了应用。

收稿日期：2024-07-08

* **联系作者**：晏景通，男，高级工程师，一级注册结构工程师，主要从事结构设计研究。E-mail：907280363@qq.com

目前模块化建筑在我国还处于起步阶段，对模块化结构分析、设计的经验和方法还有待总结，模块化建筑与传统建筑虽然都是框架或框架与各种抗侧力结构组成的结构体系，但是其构件之间的连接形式有很大区别。模块化建筑是由各个独立模块通过各种类型的连接件连接堆叠而成的一个整体，结构分析中首先需要尽可能保证各个模块之间的计算边界条件与实际情况相符，才能保证最终计算结果满足工程设计要求。本文对模块间水平连接和竖向连接的不同边界条件进行模拟，探讨不同的边界条件对结构受力特性的影响，以便在模块化结构设计中采用正确的边界条件，进行结构受力分析，保证分析结果相对准确和结构安全。

1　模块单元间连接简化分析模型概述

关于计算模型的边界条件假定，国内协会标准和国内外相关文献均有所提及。总的来说，模块间竖向连接一般采用从上下模块分别延伸小短柱的方式进行连接；水平方向采用短梁等方式连接。

中国工程建设协会标准《钢骨架集成模块建筑技术规程》[3]、国内学者陈志华等[4]、张鹏飞等[5]、顾进[6]将上下模块的梁柱节点各延伸一个小短柱，用铰接连接模拟。易国辉等[7]则是从下模块单元延伸小短柱，铰接于上模块底部，相邻模块单元水平方向则采用梁单元一端铰接一端刚接连接，如图 1 所示；赵宝军等[8]将相邻模块单元水平方向连接采用两端完全刚接进行处理；文献[3]则建议水平方向连接采用壳单元模拟；文献[4]提到将相邻模块柱端的节点水平方向连接采用 X、Y 自由度耦合来进行受力分析。

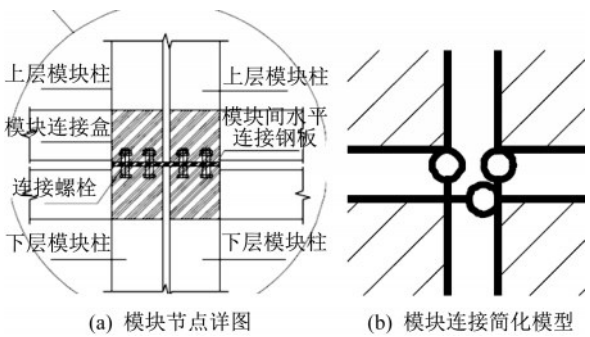


图 1　钢板螺栓节点连接边界条件模拟

Fig.1　Model of bolt-plate joint

国外学者 Annan 等[9]模拟了模块单元间的竖向连接，其假定在柱和梁相交区域，即 J1、J2、J3、J4 和下模块上柱端 J5、J6、J7、J8 为刚性区域，模块单元之间的短柱尺寸和结构性能均和下层模块单元柱一致。J4 和 J4′之间为节点单元，模拟上下模块之间相互的旋转自由度，C1 为下模块梁顶和上模块梁底之间的柱单元，梁柱之间的连接为刚接，如图 2 所示。此文献采用上述节点力学模拟，研究了在地震作用下带有支撑的模块建筑的力学特性。

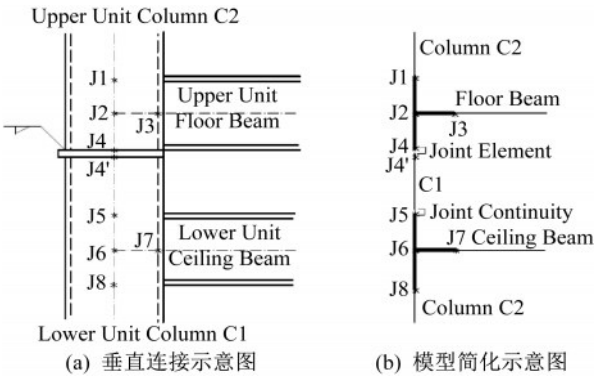


图 2　竖向连接节点简化模型

Fig.2　Simplified model of vertical connection joint

Chua 等[10]将模块之间连接节点通过一根链杆实现竖向连接，通过连接板和抗剪键完成水平连接。常见的简化模型中，模块单元之间的竖向连接通过延长柱的中心线，超过梁柱的交点，上模块柱底和下模块柱顶连接为铰接，如图 3(c)所示。此文献中提到，铰接的假设并不能确定是足够保守的，因此用图 3(b)来进行模拟。水平连接的模拟中，用“框架 frame”单元来模拟水平连接板，刚接连接到相邻两个模块的柱。图 3(b)和图 3(c)的水平连接都是刚接到下层模块单元柱上，刚接会造成连接处的刚度增大。但如果设置成铰接可能会导致其平面内抗剪刚度被忽略，如图 3(d)所示，无法传递连接板和柱子的弯矩。同时，简化模型是通过柱子来同时抵抗竖向压力和拉力的，此假设不符合实际情况，因为实际只是靠拉杆抗拉，抗拉能力小于柱子。因此针对以上情况，设计了“弹簧模型”link 单元来模拟节点的真实情况，如图 4 所示。

从国内外相关文献可以看出，首先，目前模块间的连接计算模拟还没有明确的方式，一方面是因为连接设计存在多样性，另一方面是相关设计还处于探索阶段。Chua 在上述文献中虽然给出

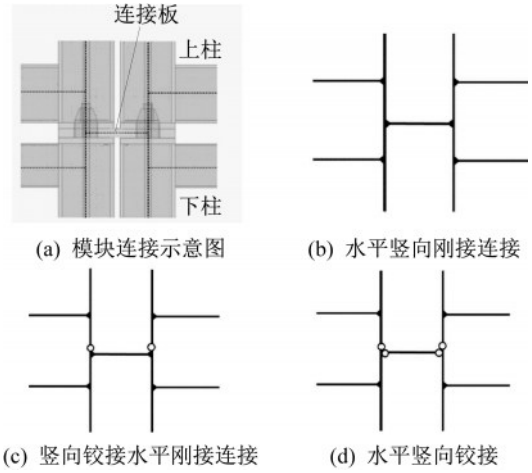


图3 模块间连接及其简化节点模型

Fig.3 Inter-model connections

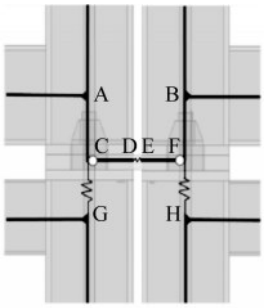


图4 连接-水平连接板节点弹簧模型

Fig.4 Model of link-horizontal plate joint

尽量模拟真实的边界条件，但是较为复杂，弹簧刚度不容易准确给出，也不便于用到实际设计中。其次，各文献还没有对各个边界条件模拟给出比较，证明其准确性。从目前模块化结构连接节点来看，竖向连接主要是通过螺栓、自锁式连接以及灌浆插入件等方式连接，如图5所示，上述几种形式无法在竖向连接处传递上下柱端的弯矩，连接方式应采用铰接；模块上下柱子直接采用对接焊接以及通过内套筒焊接连接，属于刚接连接[11]，若刚接连接采用焊接方式进行安装，现场工作量大，受到施工条件制约多，因此实际工程中采用相对较少。一般模块间的竖向连接较多采用铰接形式，因此本文的模块竖向连接主要针对其采用铰接连接方式展开研究。

从上述国内外相关文献可以看出，模块间水平连接主要是通过水平连接板连接，其计算模拟主要有以下方式：①通过梁单元连接；②通过壳单元连接；③通过两个模块的节点自由度耦合。本文就以上几种方式对水平连接的模拟进行分析和讨论。

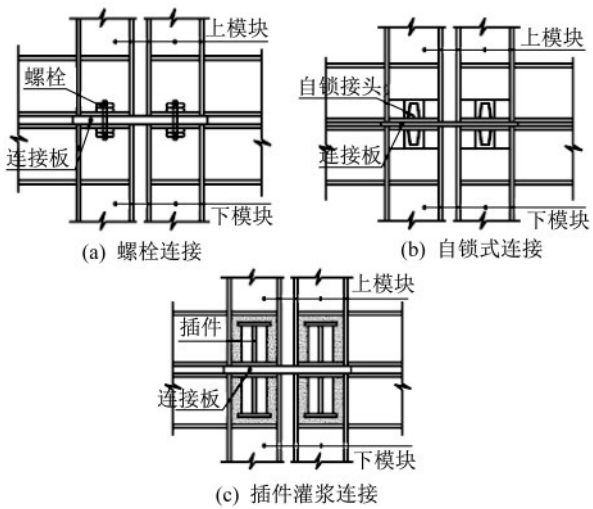


图5 模块连接铰接形式

Fig.5 Hinge joints between modules

2 竖向连接边界条件模拟

首先探讨竖向铰接连接边界条件的模拟，为了便于采用壳单元建模开展受力分析并进行比较，梁柱均采用矩形截面，模块柱截面尺寸为200 mm×200 mm，模块底梁截面尺寸为200 mm×400 mm，顶梁截面尺寸为200 mm×300 mm，材料弹性模量E_s=2.06×10^5 MPa，如图6所示，壳单元模型如图7所示。模块竖向连接均采用自锁、抗剪键插入式或螺栓连接等铰接形式，按照铰接点的位置和简化为线单元的几何位置，分为六种情况，对应六种模型，见表1。为了有针对性地研究其受力特点，分别按照承担竖向荷载和承担水平荷载两种情况进行分析。竖向荷载情况下，每个模块底部梁的均布荷载q_1=5 kN/m，每个模块顶部梁的均布荷载q_2=3 kN/m；水平荷载情况下，从上至下分别为F_4=30 kN、F_3=20 kN、F_2=10 kN、F_1=4 kN，力的作用点在屋面以及第4、3、2层模块底标高处，竖向荷载和水平荷载分别如图8—图9所示。

根据上述情况，建立有限元模型进行计算分析，其中壳单元模型将柱上下端对应的柱截面中心处的单元节点三个方向平动自由度进行耦合，模拟柱上下端铰接连接，取图7对应点的位置分析结果进行对比，对在竖向和水平荷载作用下，梁顶(底)、柱外(内)侧的应力分析结果进行统计，与相对准确的壳单元的分析结果进行比较。为节省篇幅，这里给出其最终的计算结果偏差对比，见表2。

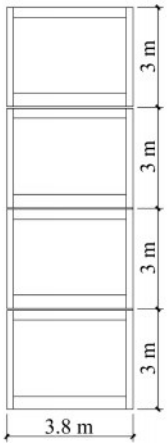


图6　模块框架立面

Fig.6　Elevation of frame model

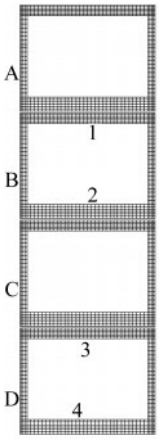


图7　模块壳单元立面

Fig.7　Elevation of shell element model

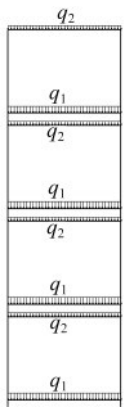


图8　竖向荷载

Fig.8　Vertical loads

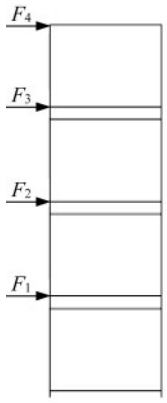


图9　水平荷载

Fig.9　Horizontal loads



(a) 铰接位于下端　(b) 铰接位于上端　(c) 铰接位于中间

图10　模块间铰接位置示意图

Fig.10　Location of hinge joint and connection

分析结果表明，采用线单元模型进行计算，考虑上下短柱铰接点位置不同，与相对准确的壳单元计算结果比较，其分析结果偏差也不尽相同。在竖向荷载下，以梁顶或梁中心线建模，铰接点置于下一层模块顶和上一层模块底之间连接短柱中间，即按照模型3和模型6的边界条件进行模拟，构件应力偏差均小于8.5%，位移小于2.5%，其他模拟方式应力偏差均大于25%，位移相对偏差近10%，远大于模型3和模型6的偏差。从上述分析可以看出，竖向荷载作用下，采用模型3和模型6

表1　竖向连接边界条件模拟分类

Table 1　Category of vertical boundary conditions

模型编号	模型相关说明
模型1	根据构件中心线建立线单元模型，模块之间均采用短柱连接，铰接点置于短柱下端
模型2	根据构件中心线建立线单元模型，模块之间均采用短柱连接，铰接点置于短柱上端
模型3	根据构件中心线建立线单元模型，模块之间均采用短柱连接，铰接点置于短柱中间
模型4	根据构件顶建立线单元模型，模块之间均采用短柱连接，铰接点置于短柱下端
模型5	根据构件顶建立线单元模型，模块之间均采用短柱连接，铰接点置于短柱上端
模型6	根据构件顶建立线单元模型，模块之间均采用短柱连接，铰接点置于短柱中间
壳单元	根据实际平面尺寸建立壳单元模型

注：铰接点的位置如图10所示。

表2 各个模型分析结果比较

Table 2 The results of 6 models

模型编号	竖向荷载应力对比平均偏差	竖向荷载位移对比平均偏差	水平荷载应力对比平均偏差	水平荷载位移对比平均偏差
模型1	39.00%	15.70%	−25.90%	17.98%
模型2	26.40%	9.90%	−21.50%	24.38%
模型3	8.30%	1.10%	−23.70%	20.22%
模型4	37.90%	17.50%	−11.90%	15.91%
模型5	26.20%	12.20%	−6.90%	23.07%
模型6	7.20%	2.40%	−9.40%	18.17%

注：偏差均为各个模型各点（图7所示）与壳单元模型分析结果比较。

最接近相对准确的壳单元分析结果；在水平荷载作用下，与壳单元模型结果比较，模型4—6的应力偏差在10%以内，位移偏差稍微偏大，并且普遍大于壳单元分析的结果，最小达到15%，初步分析是由于忽略节点域刚域所致。总体而言，水平荷载作用下，模型4和6偏差相对较小，但是模型4在竖向荷载作用下应力偏差达到近38%。综合上述比较，在水平荷载和竖向荷载作用下，模型6分析结果偏差均最小，即梁单元以结构梁顶位置作为定位，柱子以中心线作为定位，上下模块之间连接小短柱，铰接位置置于短柱中间，以上述参数建立模块化结构整体模型进行计算偏差最小。

3 竖向连接的边界条件对地震作用下的结构极限承载力的影响

通过上述第2节分析，模块化建筑上下模块之间竖向连接如果是铰接，可以采用上下模块之间连接小短柱，铰接置于短柱中间。上下模块之间竖向连接采用刚接连接是模块间连接的另一种方式，为了研究这两种连接方式对结构受力的影响，以一个模块化建筑的结构平面模型为研究对象，研究此两种连接方式在水平地震作用下，其极限承载力和塑性铰的发展情况。

以上述图6模块平面框架为例，上述模块的柱子截面尺寸改为H200×200×8×12（mm），模块梁截面尺寸均为H200×150×6×9（mm），模块顶和底梁荷载均为均布荷载，其中恒载为8 kN/m，活载为4 kN/m。

采用SHW2地震波，通过放大峰值，让结构达到极限承载力状态。其中梁柱均采用ASCE41-17的集中铰，柱采用P-M3铰，梁采用M3铰。

图11为刚接模型和铰接模型顶点位移时程曲线对比，可以看出，在塑性铰出现之前，即13 s之前，二者之间的位移几乎吻合，都处于弹性阶段；在13 s时刻，其塑性铰的发展如图12所示，该阶段竖向连接方式对结构的水平刚度影响较小，但是当竖向连接为铰接模型的第一个塑性铰出现之后，其结构塑性发展比刚接连接模型要快；在20 s左右，铰接模型的顶点位移一直在大于0的位置往复，说明结构已经发生较大的塑性变形，没有恢复能力，并且还在逐渐增大；在27 s时，结构已经超过防倒塌状态；最后由于塑性发展，位移逐渐增大，计算不再收敛，该时刻二者的塑性铰发展情况如图13所示。从结构的塑性铰发展过程看，竖向连接为铰接的模型，其塑性铰出现到倒塌状态，该过程发展较快，刚接模型的塑性铰这方面发展则缓慢。

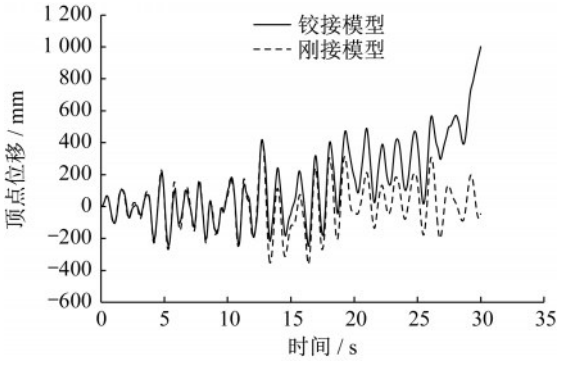


图11 刚接模型和铰接模型顶点位移时程曲线对比

Fig.11 Comparison of time-history analysis of hinge joint model and rigid joint model

由此可见，模块间的竖向连接采用刚接和铰接两种方式，在弹性阶段，对结构的极限承载力和刚度影响不大，但是进入塑性阶段后，模块竖向连接采用铰接，由于其赘余度较小，一旦少量的塑性铰出现，很快形成机构，达到倒塌状态。建议纯模块结构的竖向连接采用铰接时，应进行大震下弹塑性时程分析，保证结构塑性铰发展在可控范围

内，并保证位移指标满足规范要求，否则很容易出现较大的塑性变形甚至倒塌。

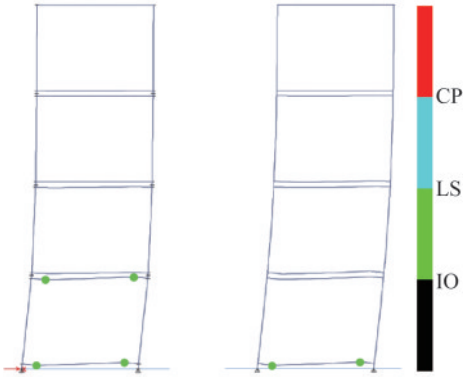


图 12　13 s 塑性铰发展示意图

Fig.12　Development of plastic hinges at 13 s

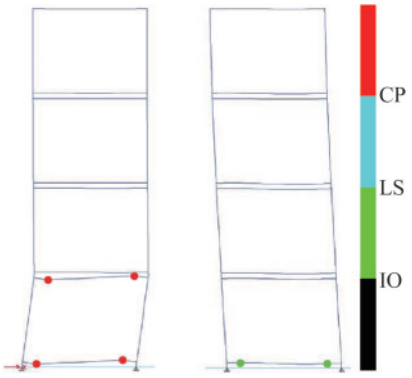


图 13　27 s 塑性铰发展示意图

Fig.13　Development of plastic hinges at 27 s

4　水平连接的模拟及其影响因素

模块间竖向连接从边界条件上区分可以分为铰接和刚接两类，水平连接一般是通过钢板与螺栓或连接插件连为一个整体，如上述图 5 所示。模块间的水平连接一般通过节点耦合、连接杆两端刚接、连接杆一端刚接另一端铰接、通过壳单元等方式进行模拟。上述四种模拟方式分别如图 14 中(a)、(b)、(c)、(d)所示，图 14(e)为杆单元端部约束情况，释放绕 Y 轴旋转约束。

为了研究水平连接杆的边界条件对结构的影响，下面以一个四层的纯模块叠拼框架为例，以表 3 中 5 种边界条件分别建立模型进行分析。

每个模块规格为 6 m×3.5 m×3 m，柱子截面为箱型 B150 mm×150 mm×10 mm，端开间长方向框

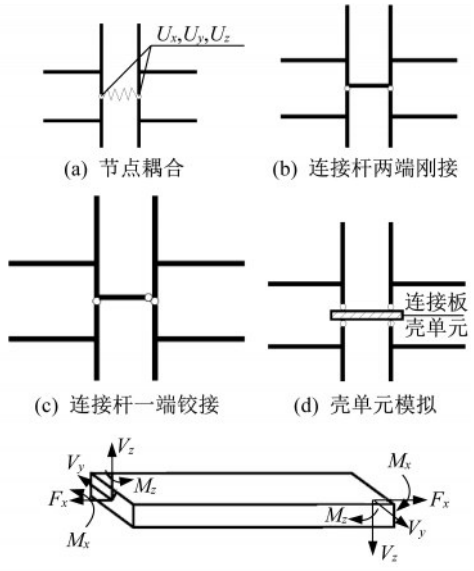


图 14　边界模拟假定示意图

Fig.14　Assumption of boundary conditions

表 3　　水平连接杆件的模拟方式

Table 3　Simulation of horizontal rod connections

模型编号	连接杆模拟方式
模型 1	耦合三个方向平动自由度，如图 14(a)所示
模型 2	连接杆采用刚性连接，不释放任何自由度，如图 14(b)所示
模型 3	连接杆采用一端刚接，不释放任何自由度，另一端释放三个方向旋转自由度，如图 14(c)所示
模型 4	连接杆采用壳单元模拟，如图 14(d)所示
模型 5	连接杆两端只释放绕 Y 轴自由度，如图 14(e)所示

架梁 KL1 截面尺寸为 B250×100×10(mm)，其余梁截面尺寸均为 B200×100×10(mm)，各层模块的高度均为 3.3 m。模块的底板和顶板结构布置相同，每个模块的梁柱均采用刚接，结构布置如图 15 所示，结构模型如图 16 所示。根据表 3 建立 5 种模型进行分析。

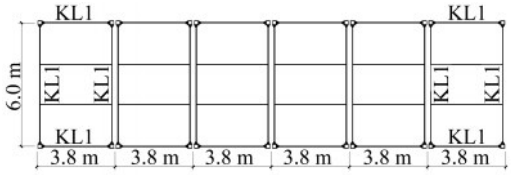


图 15　结构平面布置图

Fig.15　Structural layout

水平连接件采用上述 5 种连接方式进行分析，其分析结果见表 4，可以看出，上述 5 种模块间水平连接的边界条件对结构的总体指标影响差异较小。

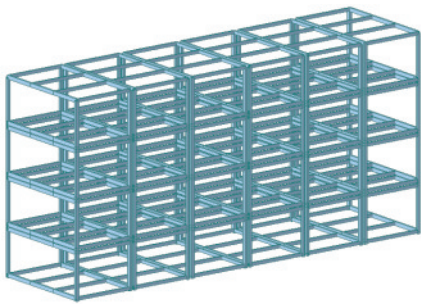


图16 结构模型图

Fig.16 Structural model

从实际传力机理进行分析，采用节点耦合，相当于两个模块的柱顶(底)三个方向平动自由度刚性连接，而忽略了垂直于连接板的Z方向的转动约束，进而忽略了连接板的弯矩M_z传递给螺栓或抗剪键的扭矩，对于竖向连接的螺栓或抗剪键的设计是偏不安全的。

采用一端铰接，一端刚接，由于连接板对两个模块连接相互对称，两端的约束条件也应该相同，同时连接板采用螺栓或自锁式连接，一般处于柱子截面中心，连接板的平面外约束是无法保证的，达不到刚接约束条件，也不符合实际情况。

连接板采用壳单元和其他边界条件所得到的指标相差也较小，但是采用壳单元在一般设计软件中难以实现。结合上述分析结果，采用杆单元[图14(e)]的边界条件模拟连接板受力。一方面，整体指标满足工程设计需要；另一方面，模块连接的节点受力符合实际情况，对连接件设计是偏于安全的，在各类软件中进行模拟也较方便。

表4 连接杆不同模拟方式的分析结果

Table 4 Results of different boundary conditions

分析指标		模型1	模型2	模型3	模型4	模型5
第1平动周期T_1(方向)		0.949(Y)	0.950(Y)	0.950(Y)	0.956(Y)	0.950(Y)
第2平动周期T_2(方向)		0.862(X)	0.854(X)	0.860(X)	0.869(X)	0.863(X)
地震作用下最大层间位移角(层号)	X	1/428(1)	1/428(1)	1/427(1)	1/422(1)	1/427(1)
	Y	1/349(1)	1/348(1)	1/348(1)	1/344(1)	1/349(1)

5 结 论

本文采用模块化建筑不同的边界条件，对其竖向和水平向不同连接方式的计算结果进行了分析与对比，得到以下主要结论：

(1) 模块化建筑结构的上下模块之间为铰接连接，建模可以按照各个模块的柱子中心线、梁顶标高位置建立线单元，竖向连接小短柱，铰接位置放在短柱中间，分析结果相对准确。

(2) 上下模块之间竖向连接采用铰接或刚接，在弹性阶段，在地震作用下二者的变形和受力性能差别不大；但是结构进入塑性阶段后，竖向连接为铰接，结构一旦出现塑性铰，其塑性发展较快，很容易进入倒塌阶段；而采用刚接连接，冗余度较大，结构塑性发展缓慢，抗倒塌能力更强。当模块竖向连接为铰接连接时，特别是对纯模块的框架结构，有必要进行大震弹塑性时程分析，考察结构塑性铰的发展情况，确保大震作用下有足够的抗倒塌能力。

(3) 模块间水平连接，采用节点耦合、梁单元刚接、一端刚接一端铰接或壳单元，其分析结果对结构整体刚度、整体指标影响不大，但是从连接件设计层面和设计方便性考虑，建议采用杆单元模拟，并且要考虑连接板两端的平面内弯矩M_z，对连接件抗扭设计是偏于安全的，在现有设计软件中也容易实现；特别是水平连接采用节点耦合将会忽略连接件传向竖向连接件的扭矩，对结构是偏于不安全的。

(4) 以上对模块间连接边界条件模拟作了初步的探讨，影响边界条件的因素还有必要针对各种连接节点实际情况，考虑其刚域、节点刚度等影响因素结合试验、数值分析等进一步深入研究。

参 考 文 献

[1] Wahid F, Yu B, Tuan D N, et al. New advancements, challenges and opportunities of multistorey modular buildings-a state-of-the-art review [J]. Engineering Structures, 2019, 183(1): 883-893.

[2] 相敏，章一萍，周练，等. 模块化建筑研究应用现状及未来发展趋势[J]. 四川建筑科学研究，2024，50(1)：98-105.

Xiang Min, Zhang Yiping, Zhou Lian, et al. Research and application status and future development trend

of modular building [J]. Sichuan Building Science, 2024,50(1):98-105.(in Chinese)

[3] T/CECS 535—2018 钢骨架集成模块建筑技术规程[S].
T/CECS 535—2018 Technical specification for assembled modular buildings with steel stud walls[S].(in Chinese)

[4] 陈志华,周子栋,刘佳迪,等.多层钢结构模块建筑结构设计与分析[J].建筑结构,2019,49(16):59-64.
Chen Zhihua, Zhou Zidong, Liu Jiadi, et al. Structural design and analysis of multistorey steel structure module structures [J]. Building Structure, 2019, 49(16):59-64.(in Chinese)

[5] 张鹏飞,张锡治,刘佳迪,等.多层钢结构模块与钢框架复合建筑结构设计与分析[J].建筑结构,2016,46(10):95-100.
Zhang Pengfei, Zhang Xizhi, Liu Jiadi, et al. Structural design and analysis of multi-storey steel structure module and steel frame composite structures [J]. Building Structure, 2016, 46 (10) : 95-100. (in Chinese)

[6] 顾进.集装箱式模块化建筑结构设计[J].建筑结构,2021,51(S1):1152-1156.
Gu Jin.Structural design of container modular buildings [J].Building Structure,2021,51(S1):1152-1156.(in Chinese)

[7] 易国辉,娄霓,张兰英,等.钢结构模块建筑楼板平面内刚度对结构性能的影响分析[J].建筑结构,2022,52(S1):1866-1872.
Yi Guohui, Lou Ni, Zhang Lanying, et al. In-plane floor stiffness influence analysis of structural performance for steel module building [J]. Building Structure,2022,52(S1):1866-1872.(in Chinese)

[8] 赵宝军,王琼,陈志河,等.深圳市多层钢结构模块化幼儿园的抗震分析[J].广东土木与建筑,2021,28(5):26-29.
Zhao Baojun, Wang Qiong, Chen Zhihe, et al. Seismic analysis and structural optimization of multistory steel structure modular kindergarten in Shenzhen [J]. Guangdong Architecture Civil Engineering, 2021, 28(5):26-29.(in Chinese)

[9] Annan C D, Youssef M A, El Nag-gar M H. Seismic overstrength in braced frames of modular steel buildings [J]. Journal of Earthquake Engineering, 2009,13(1):1-21.

[10] Chua Y S, Liew J Y R, Pang S D. Modelling of connections and lateral behavior of high-rise modular steel buildings[J]. Journal of Construction Steel Research, 2020,166(1):1-17.

[11] 张忠豪,王燕,安琦,等.模块化钢框架模块间内套筒连接节点抗震性能试验研究[J].钢结构进展,2024,26(5):1-11.
Zhang Zhonghao, Wang Yan, An Qi, et al. Seismic performance test on inner sleeve splicing joints between modules of modular steel frame [J]. Progress in Steel Building Structure, 2024, 26(5) : 1-11. (in Chinese)