

## 模块化钢框架结构考虑内嵌墙板刚度贡献的力学性能研究

周 欣, 王 燕\*

(青岛理工大学 土木工程学院, 青岛 266525)

**摘要:** 为研究内嵌墙板对模块化钢框架的刚度贡献, 采用 Midas/gen 有限元软件建立了带内嵌墙板模块化钢框架计算模型进行抗侧力学性能分析。推导了带内嵌墙板的钢框架模型抗侧刚度计算公式, 并与有限元结果进行对比分析, 研究表明: 在水平力作用下内嵌墙板与钢框架协同工作可分为加载初期的协同工作阶段以及钢框架变形后的内嵌墙板支撑阶段; 带有内嵌墙板的钢框架的抗侧刚度和极限承载力主要由内嵌墙板承担; 考虑内嵌墙板模块化钢框架抗侧刚度计算公式(10)与有限元模型计算结果相比, 二者误差小于 10%; 考虑内嵌墙板刚度贡献的钢框架, 其极限承载力和抗侧刚度都得到了显著提升。

**关键词:** 模块化钢框架; 抗侧刚度; 内嵌墙板; 刚度贡献

**中图分类号:** TU391 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4602(2025)01-0043-09

### Study on the mechanical properties of modular steel frame structure taking into account the stiffness contribution of embedded wallboard

ZHOU Xin, WANG Yan\*

(School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266525, China)

**Abstract:** In order to study the stiffness contribution of embedded wallboard to modular steel frame, Midas/gen finite element software is used to establish the calculation model of modular steel frame with embedded wallboard to analyze its lateral mechanical properties. The formulas of the model for calculating the lateral stiffness of steel frame with embedded wallboard are derived and compared with the finite element results. The results show that the cooperative work of embedded wallboard and steel frame under horizontal force can be divided into the cooperative work stage during initial loading and the support stage of embedded wallboard after steel frame deformation. The lateral stiffness and ultimate bearing capacity of steel frame with embedded wallboard are mainly borne by the embedded wallboard. Compared with the results of the finite element model, the error of formula (10) which is used to calculate the lateral stiffness of modular steel frame with embedded wallboard is less than 10%. The ultimate bearing capacity and the lateral stiffness of steel frame taking into account the stiffness contribution of embedded wallboard are significantly improved.

**Key words:** modular steel frame; lateral stiffness; embedded wallboard; stiffness contribution

收稿日期: 2023-11-26

基金项目: 国家自然科学基金(52078258)

作者简介: 周 欣(1997—), 女, 四川广安人。硕士, 研究方向为结构工程。E-mail: 1138416399@qq.com。

\* 通信作者: 王 燕(1957—), 女, 山东青岛人。博士, 教授, 主要从事钢结构方面的研究。E-mail: yanwang2010803@163.com。

装配式模块化建筑作为一种新型的工业化建筑,具有预制化程度高、施工周期短、施工作业量小、节省人力物力、绿色环保等特点,近年在国内外广受关注。模块化建筑在欧洲、北美、日韩等国已得到推广与应用,“住宅67”作为蒙特利尔世界博览会的一项重要展示项目,开创了三维预制居住模块单元先河<sup>[1]</sup>。美国纽约布鲁克林32层模块化住宅大厦是目前世界最高的模块化建筑<sup>[2]</sup>。英国伍尔弗汉普顿学生公寓由824个模块单元搭建而成,是当时在建的最高模块化建筑<sup>[3]</sup>。近年来我国已建成多栋模块化建筑,天津静海子牙尚林苑(白领宿舍)是多层模块化建筑的示范工程项目,采用钢模块与钢框架混合结构体系建成高度集成预制装配式结构,具有非常广阔的推广应用前景;雄安市民服务中心企业临时办公区采用593个标准化模块组成,内部功能空间及装饰等均采用标准化设计,装配化率达80%以上,是模块化建筑体系的典型应用实例<sup>[4]</sup>。

伴随着模块化建筑的蓬勃发展,模块化结构的力学性能研究已形成热点,ANNAN等<sup>[5]</sup>提出一种单边焊接连接节点并应用于带斜撑的模块单元。HONG等<sup>[6]</sup>提出一种新型模块化结构抗侧力体系——双层薄钢板组合框架结构,并进行力学分析及试验研究,得出了轻型钢框架结构的弯矩-曲率关系。LAWSON等<sup>[7]</sup>针对模块化建筑的轻钢墙板和模块间的节点连接进行试验研究,为结构设计提供依据。刘明扬<sup>[8]</sup>提出了一种模块化板式内套筒连接节点,对其进行了单调加载静力性能及抗震性能的分析,提高了模块间连接节点处的抗震性。梁晓婕等<sup>[9]</sup>根据模块间连接节点的形式及传力路径进行节点简化,建立三维钢框架计算模型对结构进行反应谱分析和抗震性能分析。曲可鑫<sup>[10]</sup>采用Midas/gen软件对比了刚接节点模块结构和铰接节点模块节点的动力性能,研究表明刚接节点能较好地满足“强柱弱梁”的要求。陈志华等<sup>[11]</sup>提出一种钢模块与钢框架复合体系,通过简化节点来建立整体模型,对结构进行时程分析表明层间位移角和层间位移均满足设计要求。

综上所述,针对模块化结构的研究主要聚焦在模块间连接节点及整体结构的抗震性能。由于模块结构为工厂化预制,模块结构由支撑框架和内嵌预制墙板组成,内嵌预制墙板使模块结构的刚度获得提升。为深入研究内嵌预制墙板对模块化钢框架结构抗侧刚度的贡献,采用ABAQUS有限元软件建立结构计算模型,并与文献[12]的试验结果进行了对比,研究了模块化钢框架结构考虑内嵌墙板刚度贡献的抗侧刚度计算公式,研究内容可为工程应用提供参考。

## 1 有限元模型与试验验证

### 1.1 文献[12]试验概况

文献[12]试验模型为单跨两层平面钢框架结构(图1),柱截面尺寸为H250 mm×200 mm×8 mm×12 mm,梁截面尺寸为H300 mm×120 mm×6 mm×12 mm,钢材为Q235B。墙板采用ALC板材,截面为600 mm×100 mm×2350 mm。试验采用两点单调水平加载,每级荷载增量为10 kN,加载至极限承载力的80%后改为每级增量为5 kN,直至结构破坏。

### 1.2 有限元模型验证

参考文献[12]试验模型及钢材本构参数建立有限元计算模型(图2),单元类型为C3D8R实体单元。有限元建模中墙板与梁翼缘采用弹簧单元连接,弹簧刚度设置为12.9 kN/mm<sup>[13]</sup>。墙板与柱翼缘以及墙板之间的相互作用根据库伦摩擦模型定义接触以反映试验中的相对滑移,采用最大静摩擦系数与滑动摩擦系数大致相等的原则,选取墙板与柱翼缘之间的摩擦系数 $\mu_1=0.2$ ,墙板之间的摩擦系数 $\mu_2=0.4$ <sup>[13]</sup>。梁柱之间均采用Tie连接模拟焊接。在保证计算精度的前提下,梁柱的网格密度为50 mm,墙板的网

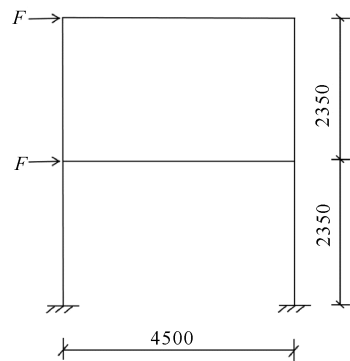


图1 文献[12]钢框架结构(单位:mm)

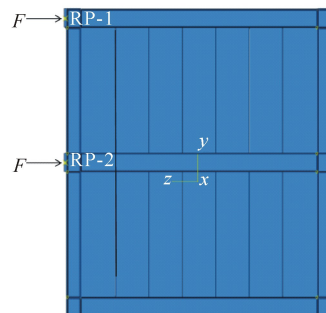


图2 有限元计算模型

格密度为 100 mm,其他细部构件的网格尺寸为 20 mm。柱底限制 6 个方向自由度以实现固接。同时为防止平面外失稳,约束框架梁翼缘及墙体外侧  $x$  轴方向自由度。为避免在柱顶施加荷载时造成局部受力破坏,将侧向荷载施加区域表面耦合到表面形心处作为耦合点,并在耦合点处施加与试验相同的荷载。

图 3 为有限元模型计算结果与文献[12]中试验模型的荷载-位移曲线,可以看出,二者吻合较好,所建立的有限元模型可用于分析带内嵌墙板的钢框架结构的力学性能。

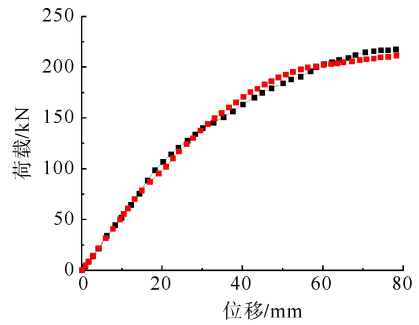


图 3 荷载-位移曲线对比  
■-文献[12]结果; ■-有限元结果

## 2 模块化钢框架荷载工况及内力计算

设计 6 层模块化钢框架结构,图 4(a)为结构平面,图 4(b)为图 4(a)阴影部分的结构立面,图 4(c)为采用结构分析软件 Midas/gen 建立的三维有限元计算模型,构件截面尺寸见表 1。按照《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)及相关规定,结构设计使用年限为 50 年,丙类建筑,安全等级为 II 级;地震分组为 2 类,场地类别为 III 类,地震设防烈度为 7 度,基本地震加速度为 0.15g;场地特征周期为 0.55 s,地面粗糙度为 C 类。根据内部楼面板和屋面板构造情况,楼面和屋面的永久荷载分别取 3.39 和 4.65 kN/m<sup>2</sup>。同时依据《建筑结构荷载规范》(GB 50009—2012)考虑可变荷载,楼面和屋面的活荷载分别取 2.0、0.5 kN/m<sup>2</sup>。考虑施加风荷载,基本风压取 0.6 kN/m<sup>2</sup>。

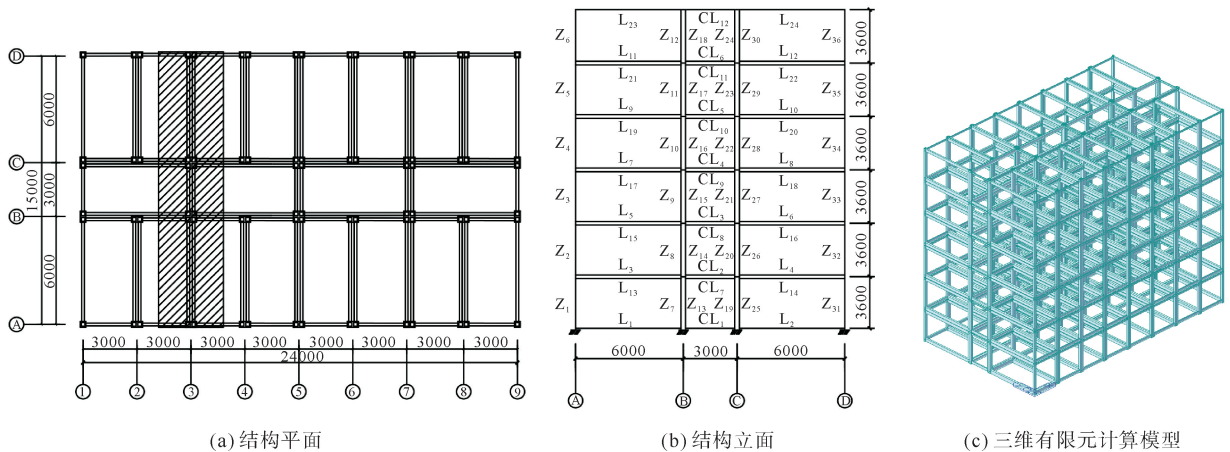


图 4 模块化钢框架结构

表 1 构件编号及截面尺寸

构件编号	构件类型	截面尺寸/mm
Z <sub>1</sub> —Z <sub>36</sub>	模块柱	200×200×6
L <sub>1</sub> —L <sub>12</sub>	楼面主梁	H300×200×6/10
L <sub>13</sub> —L <sub>24</sub>	屋面主梁	HN300×150×6.5/9
CL <sub>1</sub> —CL <sub>6</sub>	楼面次梁	HN250×125×6/9
CL <sub>7</sub> —CL <sub>12</sub>	屋面次梁	HN150×75×5/7

图 5 为图 4(b)中梁柱内力计算结果,计算结果表明,柱的最大应力比为 0.788,梁的最大应力比为 0.792,所选梁柱截面尺寸满足设计要求。

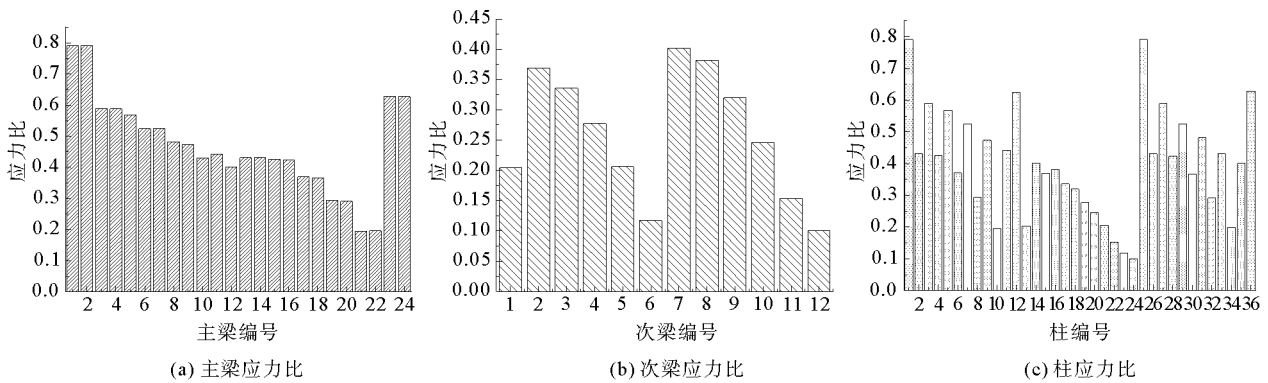


图5 模块化钢框架梁、柱应力比

### 3 带内嵌墙板的模块化钢框架结构有限元分析

为研究内嵌墙板与模块化钢框架的协同作用以及考虑内嵌墙板对模块化钢框架抗侧刚度的贡献,分别建立图6所示的钢框架和图7带有内嵌墙板的钢框架有限元计算模型,为简化计算,选取平面框架建立有限元模型,建模方式同1.2节。

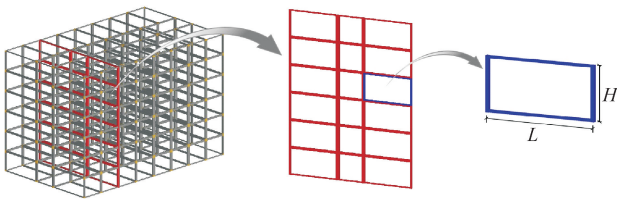


图6 模块化钢框架有限元计算模型

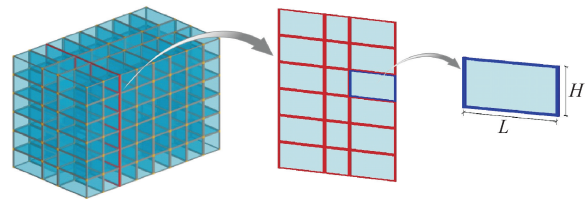


图7 带内嵌墙板的框架有限元计算模型

钢材为 Q355,选取强化阶段的双线性随动强化模型(图8),弹性模量  $E_s = 2.06 \times 10^5$  MPa,屈服应力  $\sigma_y = 355$  MPa,极限应力  $\sigma_u = 355$  MPa,泊松比  $\mu = 0.3$ 。内嵌墙板采用蒸压轻质混凝土(Autoclaved Lightweight Concrete, ALC)板材,尺寸为  $600 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 3000 \text{ mm}$ ,计算参数取值参考文献[14],弹性模量  $E = 1700$  MPa,泊松比  $\mu' = 0.2$ ,抗压强度  $f_{pr} = 3.9$  MPa,对应峰值应变  $\epsilon_{pr} = 0.003$ ,抗拉强度  $f_t = 0.4$  MPa。荷载及接触设置见图9,荷载加载方式采用位移加载,在耦合点处按照每级  $10 \text{ mm}$  递增,持续加载至  $180 \text{ mm}$ 。

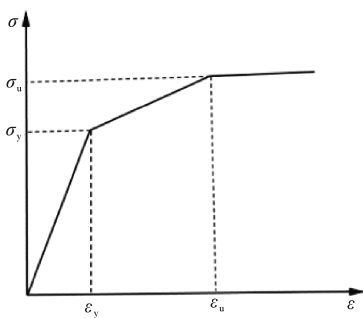


图8 钢材应力-应变曲线

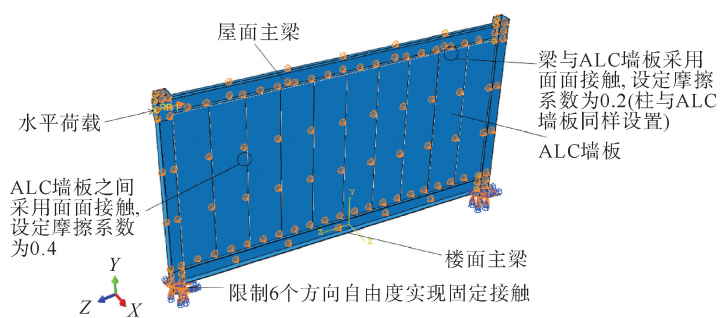


图9 荷载及接触设置

图10(a)为带内嵌墙板的钢框架有限元模型应力云图,根据有限元计算结果可知,墙板与钢框架的协同工作可分为2个阶段,即钢框架发生变形前墙板与钢框架的协同工作阶段和发生变形后墙板支撑阶段。

在荷载加载初期,墙板与钢框架二者具有良好的协同工作效应,此时结构刚度呈上升趋势,应力云图见图 10(b)所示;随荷载增加,ALC 墙板与钢框架发生脱离,此时墙板主要通过角挤压参与受力,荷载主要由墙板承担,结构刚度呈降低趋势,应力云图如图 10(c)所示。

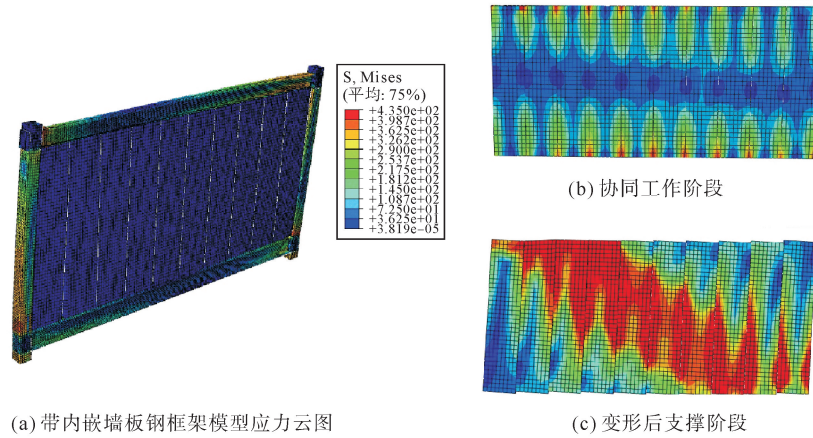


图 10 带内嵌墙板的模块化钢框架有限元模型应力云图

## 4 抗侧刚度理论分析

### 4.1 计算假定

从图 10 所示的有限元计算结果可以得到内嵌墙板模块化钢框架在水平侧向力作用下的变形及应力分布规律。在弹性阶段,内嵌墙板的应力分布主要集中在对角线区域,故可将每块墙板等效为沿对角线方向的等效压杆进行理论推导,计算出带有内嵌墙板钢框架结构的抗侧刚度,图 11 为带内嵌墙板的钢框架等效压杆模型。为分析带有内嵌墙板钢框架受力性能,做如下假设<sup>[15-16]</sup>:

- 1) 内嵌墙板为各向同性的均质材料,且不做开洞处理;
- 2) 屈服前内嵌墙板与钢框架不分离,且在水平侧向力作用下的侧向位移量相等;
- 3) 内嵌墙板的宽度和刚度始终保持不变。

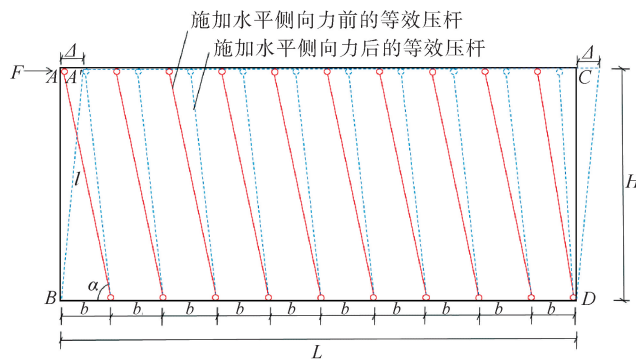


图 11 带内嵌墙板模块化钢框架等效压杆模型

$L$ —钢框架计算长度; $H$ —钢框架计算高度; $F$ —发生侧移  $\Delta$  所需要的水平侧向力; $b$ —ALC 墙板的宽度;  
 $l$ —等效压杆的长度; $\alpha$ —夹角; $A, B, C, D$ —钢框架 4 个角编号; $A'$ —发生位移  $\Delta$  后  $A$  的位置

在水平侧向力  $F$  作用下,考虑内嵌墙板钢框架抗侧刚度主要来自角柱和墙板的协同作用,其整体抗侧刚度  $K$  计算公式为

$$K = K_1 + K_2 \tag{1}$$

式中: $K_1$  为水平侧向力作用下内嵌墙板的抗侧刚度; $K_2$  为水平侧向力作用下钢框架角柱的抗侧刚度。

## 4.2 带内嵌墙板的钢框架抗侧刚度

取图 12 所示的等效压杆为计算单元,荷载  $f_1$  作用下侧移为  $\Delta$ ,可得等效压杆形变量  $\Delta l$ :

$$\Delta l = \Delta \cos \alpha \quad (2)$$

$$\cos \alpha = \frac{b}{\sqrt{b^2 + H^2}} \quad (3)$$

等效压杆发生形变量  $\Delta l$  所需的轴力  $N$ :

$$N = \frac{\Delta l \cdot ES}{l} = \frac{\Delta \cos \alpha \cdot ES}{\sqrt{b^2 + H^2}} = \frac{\Delta b ES}{b^2 + H^2} \quad (4)$$

可得等效压杆发生水平侧移  $\Delta$  所需的水平侧向力  $f_1$ :

$$f_1 = N \cos \alpha = \frac{\Delta b^2 ES}{(b^2 + H^2)^{3/2}} \quad (5)$$

则内嵌墙板的抗侧刚度  $K_1$ :

$$K_1 = \frac{nf_1}{\Delta} = \frac{nb^2 ES}{(b^2 + H^2)^{3/2}} \quad (6)$$

式中: $S$  为 ALC 墙板截面面积; $n$  为 ALC 墙板的数量。

## 4.3 角柱的抗侧刚度

图 11 所示的角柱  $AB$  可简化为图 13 所示的力学计算简图,角柱发生水平侧移  $\Delta$  时, $AB$  两端的弯矩为

$$\begin{cases} M_{AB} = 4i\theta - 6i \frac{\Delta}{H} \\ M_{BA} = 2i\theta - 6i \frac{\Delta}{H} \end{cases} \quad (7)$$

式中: $M_{AB}$  为  $A$  点弯矩; $M_{BA}$  为  $B$  点弯矩; $i$  为线刚度, $i = \frac{EI}{H}$ ;  $E$  为钢材弹性模量; $I$  为柱  $AB$  截面惯性矩; $H$  为柱  $AB$  计算长度。

可得柱  $AB$  发生侧移  $\Delta$  时所产生的剪力:

$$Q_{AB} = \frac{M_{AB} + M_{BA}}{H} = \frac{4i\theta - 6i\Delta/H + 2i\theta - 6i\Delta/H}{H} = \frac{3i\Delta}{H^2} \quad (8)$$

柱  $AB$  的抗侧刚度  $K_2$  为

$$K_2 = 2 \frac{Q_{AB}}{\Delta} = \frac{6i}{H^2} \quad (9)$$

将式(6)(9)代入式(1)可得考虑内嵌墙板的模块化钢框架的抗侧刚度  $K$  为

$$K = K_1 + K_2 = \frac{nb^2 ES}{(b^2 + H^2)^{3/2}} + \frac{6i}{H^2} \quad (10)$$

表 2 为带内嵌墙板钢框架有限元模型计算结果与式(10)计算值的对比,可见,内嵌墙板的抗侧刚度  $K_1$  与有限元模型的计算结果二者误差仅为 3.85%,说明式(6)与有限元计算结果取得了较好的一致性;式(9)计算得到的角柱抗侧刚度  $K_2$  为 1.338 kN/mm,有限元模型的计算结果为 3.011 kN/mm,二者相差 50%,分析其原因是由于图 10 所建立的有限元计算模型中,钢框架的上、下梁与角柱协同受力,而图 13 所示的计算模型中忽略了上、下梁的约束贡献,仅考虑角柱的抗侧刚度,导致式(9)

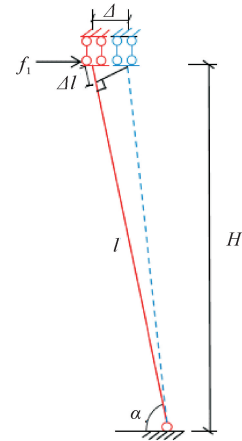


图 12 等效压杆力学简图

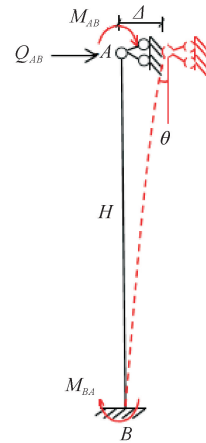


图 13 角柱力学简图

表 2 有限元模型计算值与式(10)结果对比

抗侧刚度	有限元模型值/ (kN · mm <sup>-1</sup> )	公式(10)值/ (kN · mm <sup>-1</sup> )	差值/%
$K_1$	12.348	12.823	3.85
$K_2$	3.011	1.338	50
$K$	15.359	14.161	7.79

计算得到的角柱抗侧刚度远小于有限元模型的计算结果,但从整体计算结果来看, $K$  值与有限元计算结果的误差仍在 10%以内,说明内嵌墙板为钢框架提供了大部分的抗侧刚度约束贡献。

### 5 考虑内嵌墙板的模块化钢框架抗侧刚度贡献分析

为分析内嵌墙板对模块化钢框架的刚度贡献,分别选取钢框架结构与带有内嵌墙板的模块钢框架结构进行抗侧性能分析。图 14 为 1 层钢框架结构模型有限元分析结果,图 15 为 2 层钢框架模型有限元分析结果。

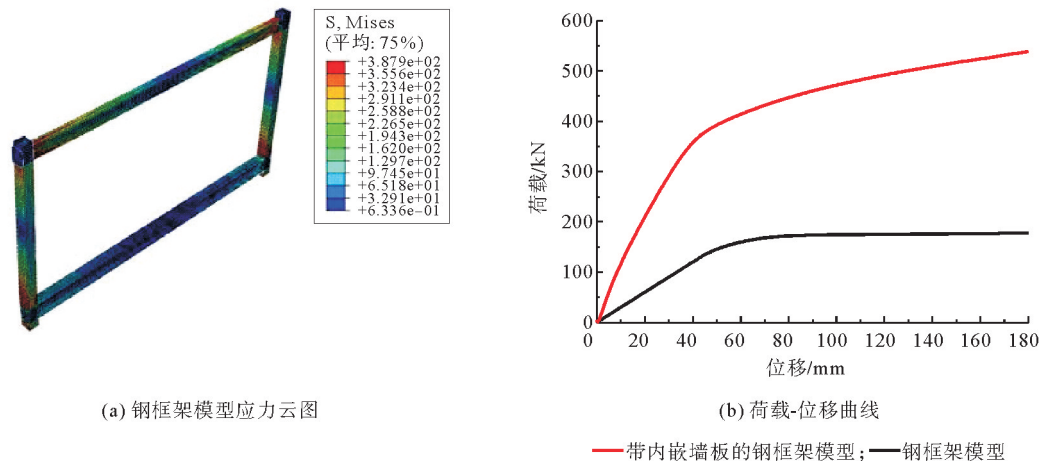


图 14 1 层模块化钢框架有限元模型计算结果

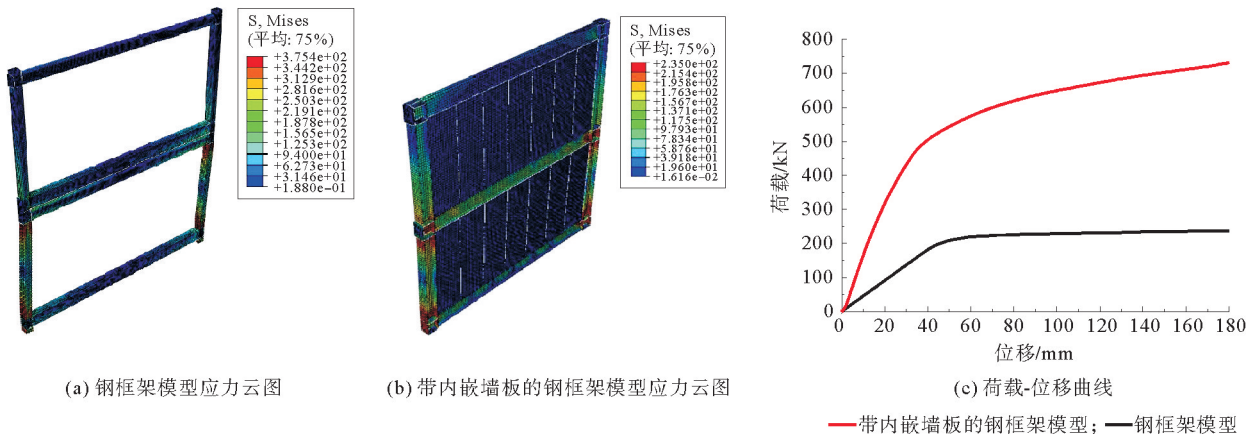


图 15 2 层模块化钢框架模型有限元计算结果

由有限元模型的应力云图及荷载-位移曲线可知,钢框架模型的荷载-位移曲线由上升状态转为近乎水平直线,此时结构的抗侧刚度急剧衰减近乎丧失。而带内嵌墙板的钢框架模型的荷载-位移曲线则由线性变为非线性状态,这是因为钢框架屈服后,内嵌墙板与钢框架协同作用,可以继续承受水平荷载,从而使结构的刚度虽然呈下降趋势,但与不考虑内嵌墙板协同作用的钢框架相比,仍具有较强的抗侧刚度<sup>[17]</sup>。

表 3 为带内嵌墙板的模块化钢框架有限元模型的计算结果,可以看出,带内嵌墙板的模块化钢框架屈服后,由于内嵌墙板提供了约束支撑的作用,与钢框架之间形成了协同工作机制,为其提供了较强的抗侧

刚度。与不考虑内嵌墙板的模块钢框架相比,1层和2层带内嵌墙板的模块化钢框架的极限承载力分别提升了1.90、1.77倍,抗侧刚度分别增大了2.82、2.23倍(增大系数=(带内嵌墙板的钢框架-钢框架)/钢框架)。其原因是由于在水平侧向力作用下,不带内嵌墙板的模块化钢框架的抗侧刚度主要由梁、柱组成的钢框架承担,而带有内嵌墙板的钢框架随荷载增加产生变形后,内嵌墙板与钢框架呈对角挤压状态,起到了支撑作用,模块钢框架产生变形后的抗侧刚度主要由内嵌墙板承担,与不考虑内嵌墙板的钢框架相比,其抗侧刚度和极限承载力都获得提高,说明内嵌墙板对模块钢框架结构的抗侧刚度具有显著的提升作用。

表3 带内嵌墙板钢框架与钢框架有限元模型计算结果对比

类型	模型	抗侧刚度/(kN·mm <sup>-1</sup> )	极限承载力/kN	极限位移/mm
1层	钢框架	3.01	163.10	63.60
	带内嵌墙板的钢框架	11.52	473.03	73.77
2层	钢框架	4.57	216.86	57.35
	带内嵌墙板的钢框架	14.80	601.97	71.60

## 6 结论

针对带内嵌墙板的模块化钢框架结构进行有限元数值模型及理论分析,研究了模块化钢框架内嵌墙板对钢框架的抗侧刚度贡献,推导了带内嵌墙板钢框架抗侧刚度计算公式,主要结论如下:

1) 在水平力作用下,内嵌墙板与模块钢框架协同工作可分为加载初期的协同工作阶段和钢框架变形后的内嵌墙板支撑阶段,带有内嵌墙板钢框架的抗侧刚度和极限承载力主要由内嵌墙板承担;

2) 建立的有限元模型与文献[12]试验结果进行对比,二者荷载-位移曲线具有较好的一致性,验证了有限元模型的可靠性。推导了考虑内嵌墙板钢框架抗侧刚度计算公式,与有限元模型计算结果相比,二者误差小于10%,验证了公式(10)的可靠性。

3) 带内嵌墙板的模块钢框架屈服后,由于内嵌墙板提供了约束支撑作用,与钢框架之间形成协同工作机制,为钢框架提供了较强的抗侧刚度,与不考虑内嵌墙板的模块钢框架相比,带内嵌墙板的模块钢框架的极限承载力和抗侧刚度都得到了显著提升。

### 参考文献(References):

- [1] 郑小东. 住宅67,蒙特利尔,魁北克省,加拿大[J]. 世界建筑,2011(8):32-37.  
ZHENG Xiaodong. Habitat67, Montreal, Quebec, Canada[J]. World Architecture, 2011(8):32-37.
- [2] THOMPSON Y E. Some assembly required: Design manufacturing design assembly manufacturing assembly[D]. Toronto: Toronto Metropolitan University, 2015.
- [3] LAWSON R M, ASCE M, OGDEN R G, et al. Application of modular construction in high-rise buildings[J]. Journal of Architectural Engineering, 2012, 18(2):148-154.
- [4] 任祖华, 陈谋滕. 一种新的建筑模式的探索: 雄安市民服务中心企业临时办公区设计[J]. 建筑学报, 2018(8):10-13.  
REN Zuhua, CHEN Moumeng. A new exploration of construction method on the design of the temporary office area for enterprises at Xiong'an Civic Service Center[J]. Architectural Journal, 2018(8):10-13.
- [5] ANNAN C D, YOUSSEF M, NAGGAR M E. Seismic overstrength in braced frames of modular steel buildings[J]. Journal of Earthquake Engineering, 2008, 13(1):1-21.
- [6] HONG S G, CHO B H, CHUNG K S, et al. Behavior of framed modular building system with double skin steel panels[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2011, 67(6):936-946.
- [7] LAWSON R M, RICHARDS J. Modular design for high-rise buildings[J]. Structures and Buildings, 2010, 163(3):151-164.
- [8] 刘明扬. 模块化钢框架新型连接节点及结构力学性能研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2018.

- LIU Mingyang. Study on the mechanical properties of the modular steel frame new connection node and structure[D]. Qingdao:Qingdao University of Technology,2018.
- [9] 梁晓婕,王燕,周广兴. 模块化装配式钢框架结构简化计算模型及动力特性分析[J]. 钢结构(中英文),2022,37(1):9-20.  
LIANG Xiaojie,WANG Yan,ZHOU Guangxing. Simplified calculation model and dynamic characteristics analysis of modular prefabricated steel frame structure[J]. Steel Construction(Chinese & English),2022,37(1):9-20.
- [10] 曲可鑫. 钢结构模块化建筑结构体系研究[D]. 天津:天津大学,2014.  
QU Kexin. Study on steel structural system in modular buildings[D]. Tianjin:Tianjin University,2014.
- [11] 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 multi-storey steel structure module structures[J]. Building Structures,2019,49(16):59-64.
- [12] 刘玉姝,李国强. 带填充墙钢框架结构抗侧力性能试验及理论研究[J]. 建筑结构学报,2005(3):78-84.  
LIU Yushu,LI Guoqiang. Experimental and theoretical research on lateral load resistance of steel frames with infilled walls[J]. Journal of Building Structures,2005(3):78-84.
- [13] 金晓飞,孟永杰,杨晓杰,等. 内嵌围护墙板对钢框架抗侧力性能的影响效应[J]. 哈尔滨工业大学学报,2013,45(4):21-27.  
JIN Xiaofei,MENG Yongjie,YANG Xiaojie,et al. Effect of embedded enclosure wallboard on the lateral load behavior of steel frames[J]. Journal of Harbin Institute of Technology,2013,45(4):21-27.
- [14] 颜雪洲. 轻质高性能混凝土力学性能试验研究及新型复合墙体性能分析[D]. 北京:北京交通大学,2006.  
YAN Xuezhou. Experimental study on the mechanical behavior of light-weight & high-performance concrete and multi-ribbed composite wall[D]. Beijing:Beijing Jiaotong University,2006.
- [15] 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 Structures,2016,46(10):95-100.
- [16] 高松召. 基于等效斜撑模型的内嵌墙板钢框架抗震性能研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2014.  
GAO Songzhao. Seismic performance of steel frames with embedded wallboard based on equivalent slant supports model[D]. Harbin:Harbin Institute of Technology,2014.
- [17] 任佳妮,陈志华,余玉洁,等. 钢模块-框架复合结构的蒙皮效应分析[J]. 建筑钢结构进展,2019,21(2):40-47.  
REN Jiani,CHEN Zhihua,YU Yujie,et al. The skin effect module-frame composite structure[J]. Progress in Steel Building Structures,2019,21(2):40-47.

(责任编辑 张晓靖;英文校审 程文华)