

结构参数对低层轻钢房屋抗震性能影响分析

周绪红^{1,2},姚欣梅^{1†},管宇¹,石宇²

(1. 长安大学 建筑工程学院,陕西 西安 710061;

2. 山地城镇建设与新技术教育部重点实验室(重庆大学),重庆 400045)

摘要:为研究不同结构参数对低层轻钢房屋抗震性能的影响,以已有试验结果为基础,采用 ABAQUS 软件建立轻钢房屋的有限元模型,计算得到的房屋自振频率、加速度反应及位移反应等均与试验结果吻合较好,验证了有限元模型的正确性.在此基础上,对验证后的房屋模型在 9 度多遇及 9 度罕遇地震作用下进行了变参数分析.研究表明:采用增加覆面板数量、增设柱间斜撑的墙体构造形式可提高房屋的自振频率、加速度及位移响应;但改变覆面板材料对整体结构的动力特性及地震响应影响较小;墙体开洞率对房屋在地震作用下的结构响应影响明显,因此墙体开洞率不应大于 29.09%;轻钢房屋长宽比减小,平面布置更规则,结构自振频率增大,加速度及位移响应降低.

关键词:低层轻钢结构;振动台试验;动力特性;抗震性能;有限元分析

中图分类号:TU317.1;TU391

文献标志码:A

Influence Analysis of Different Structural Parameters on Seismic Performance of Low-rise Lightweight Steel Buildings

ZHOU Xuhong^{1,2}, YAO Xinmei^{1†}, GUAN Yu¹, SHI Yu²

(1. School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, China;

2. Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area (Chongqing University) of the Ministry of Education, Chongqing 400045, China)

Abstract: In order to investigate the influence of different structural parameters on the seismic performance of low-rise lightweight steel buildings, the finite element model of lightweight steel building was established by ABAQUS based on the experimental results. It shows that the finite element analysis results, in terms of fundamental frequency, acceleration and displacement responses, agree well with the experimental results. Furthermore, a parametric study based on the verified model under 9-degree frequent occurring and maximum considered earthquakes was carried out. The results show that the increase of the sheathing number and adding diagonal bracing can improve the fundamental frequency, acceleration and displacement responses of buildings, but the change of the sheathing material has little effect on it; the wall opening ratio has obvious effect on the structural response of the building under earthquake. Thus, the wall opening ratio should not be greater than 29.09%; decreasing the aspect ratio and choosing

* 收稿日期:2019-01-25

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51890902,51908047), National Natural Science Foundation of China(51890902,51908047);陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2018JQ5037), Natural Science Basic Research Program of Shaanxi(2018JQ5037)

作者简介:周绪红(1956—),男,湖南南县人,长安大学教授,中国工程院院士

† 通讯联系人, E-mail: yaixinmei1216@163.com

regular plan layout of lightweight steel buildings result in the increase of the natural frequency and decrease of the acceleration response and displacement response.

Key words: low-rise lightweight steel building; shaking table tests; dynamic characteristics; seismic behavior; finite element analysis

轻钢房屋不仅符合国家大力推广装配式建筑的战略,而且满足绿色建筑可持续发展需求,已广泛应用于住宅、公寓、酒店及旅游度假建筑中,并逐渐由低层向多层发展。

目前,国内外学者已对轻钢基本构件的轴压及受弯性能进行了全面研究^[1-2],并进一步对低多层轻钢房屋的抗震性能开展了振动台试验研究。李元齐等^[3-4]指出两层轻钢房屋的破坏主要表现为螺钉失效、螺钉连接及开洞部位的墙面板局部破坏,双面覆板组合墙体结构模型满足我国“大震不倒”的抗震设防要求。黄智光等^[5]研究表明,轻钢房屋体系的抗震性能与墙面板的蒙皮效应及抗拔件的抗倾覆能力密切相关,3层轻钢房屋体系在9度地震作用下,满足抗震规范对结构最大层间位移角限值的要求。Peterman等^[6-7]通过振动台试验研究发现承重墙体及其他非结构构件在地震荷载作用下对房屋的抗震性能有显著贡献,房屋抗侧体系、承重体系及非结构构件体系可形成整体系统,协同作用。Hutchinson等^[8]对6层轻钢房屋的抗震性能进行振动台试验研究,指出结构破坏特征主要为螺钉拔出、石膏板碎裂、剪力墙钢板局部屈曲。Fiorino等^[9]采用振动台试验研究了两层轻钢箱形房屋的动力特性及地震响应,结果表明,非结构构件可使模型自振频率提高20%,使模型抗侧刚度提高约4.5倍。叶继红等^[10]提出多层冷成型钢复合剪力墙结构体系并进行了5层1:2缩尺模型振动台试验,提出相应简化分析模型。

尽管国内外很多科研机构和轻钢房屋企业对轻钢结构房屋已开展了较多的试验研究,但其抗震设计方法研究尚处于起步阶段。本文基于单层轻钢房屋振动台试验,对低层轻钢房屋进行有限元分析,分析不同因素对轻钢结构房屋在地震作用下的动力特性及结构响应的影响,为发展冷弯薄壁型钢结构住宅体系、促进建筑工业化和住宅产业化提供参考。

1 有限元模型建立

为研究不同结构参数对低层轻钢房屋动力特性、加速度及位移响应的影响,在单层轻钢房屋振动台试验的基础上,建立相应的有限元模型。

1.1 试验概况

单层轻钢房屋模型^[11]高度为3.62 m,纵向长度为2.9 m,横向长度为1.9 m,结构骨架采用冷弯薄壁型钢构件,钢材等级为Q345。墙体立柱之间布置横撑及斜撑,墙体内外覆面板均采用9.5 mm厚OSB板,屋架覆面板采用12 mm厚OSB板。试件与振动台之间通过型钢梁进行连接,连接方式为螺栓连接。墙体及屋架具体构造、加载工况、测点布置见文献[11]。

1.2 有限元模型的建立

采用ABAQUS软件建立轻钢房屋模型,采用梁单元B31模拟屋架上下弦、腹杆、墙体龙骨柱、上下导轨等冷弯薄壁型钢骨架构件,采用壳单元S4R模拟墙面板和屋面板。自攻螺钉连接采用Tie约束进行模拟,即约束2个连接节点的6个自由度。模型底部边界条件为固接,即约束模型底部全部自由度。在Y方向定义重力加速度为 9.8 m/s^2 以考虑房屋自重。冷弯薄壁型钢采用Von Mises屈服准则,其本构模型为双折线,钢材屈服强度 f_y 为345 MPa,抗拉强度 f_u 为450 MPa,弹性模量为 $2.06 \times 10^5 \text{ MPa}$,泊松比为0.3。OSB板材料为各向异性,平行于纵向的屈服强度为19.6 MPa,弹性模量为3 790 MPa,泊松比为0.3;垂直于纵向的屈服强度为13.2 MPa,弹性模量为1 770 MPa,泊松比为0.11。有限元模型如图1所示。

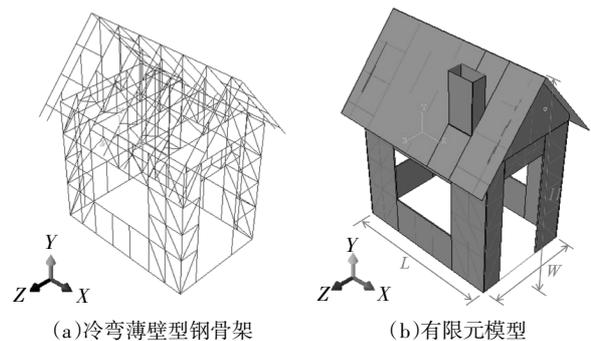


图1 有限元模型

Fig.1 Finite element model

2 有限元与试验结果对比及分析

2.1 房屋自振频率对比

表 1 为轻钢房屋模型前 2 阶自振频率结果与试验结果对比,误差小于 10%,表明有限元模型可较好地模拟轻钢房屋的动力特性.模型前 3 阶振型图如图 2 所示,房屋 1 阶振型为 Z 向平动,2 阶振型为 X 向平动,3 阶振型为整体扭转.在有限元变参数分析中,模型 Z 向(横墙方向)与试验模型 X 向一致,模型 X 向(纵墙方向)与试验模型 Y 向一致.

表 1 房屋结构前 2 阶频率对比

Tab.1 Comparison of the first two frequencies Hz

振型	有限元模型方向	试验	有限元模型	试验/模型
1 阶	Z 平动	10.9	12.0	0.91
2 阶	X 平动	16.4	17.3	0.95

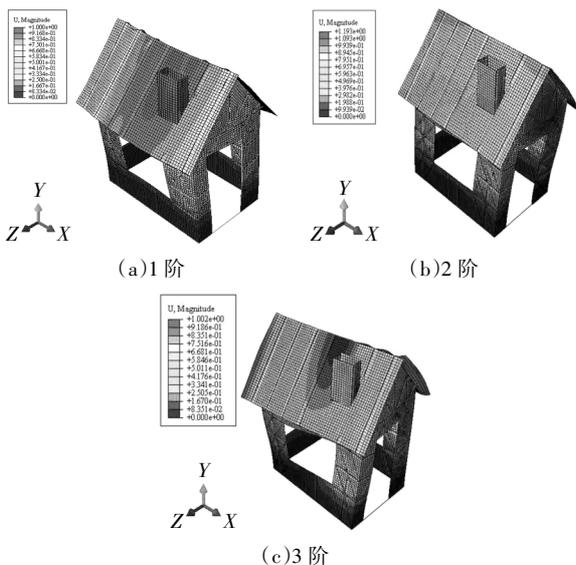


图 2 有限元模型(模型 3)振型图

Fig.2 Vibration modes of the finite element model (model 3)

2.2 加速度及位移对比分析

图 3 及图 4 所示分别为单层房屋模型在不同工况下的试验地震加速度反应曲线和最大相对位移变化曲线与有限元结果对比.由图可知,有限元计算结果与试验结果吻合较好,相对误差原因为在振动台试验中,地震波的输入与输出存在一定误差,振动台台面地震波输出峰值比输入峰值大,而在 ABAQUS 有限元分析中地震波的输入和输出相同.综上,有限元模型可以较为准确地模拟轻钢房屋在地震作用下的受力行为,表明有限元建模方法是正确可靠的.

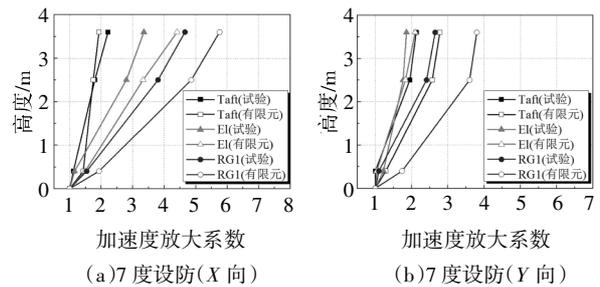


图 3 各工况试验与有限元加速度放大系数曲线对比
Fig.3 Comparison of acceleration amplification factor (AAF) curves between test and finite element model

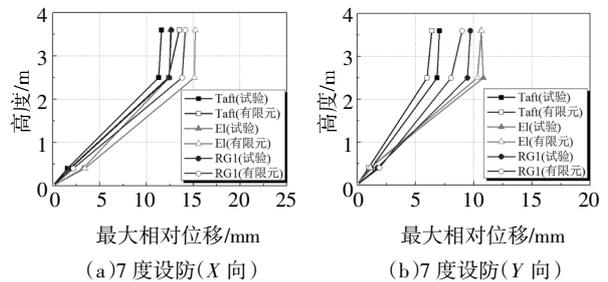


图 4 各工况试验与有限元最大相对位移曲线对比
Fig.4 Comparison of maximum relative displacement curves (MRD) between test and finite element model

3 有限元变参数分析

基于上述建模方法,对轻钢结构房屋进行变参数分析.变参数模型构造参数见表 2 及图 1.其中: L 为长度, W 为宽度, H 指高度, SO 为单面覆 9.5 mm 厚 OSB 板, DO 为双面覆 9.5 mm 厚 OSB 板, DS 表示双面覆 0.76 mm 厚钢板,开洞率为模型墙体总开洞面积与墙体总面积的比值.变参数模型时程分析选取人工波 RG1(如图 5 所示),地震烈度选取 9 度多遇和 9 度罕遇.模型 1、3、7 及模型 9~13 的有限元模型及其振型见图 2、图 6~图 10.变参数模型的自振频率结果及在 9 度多遇和 9 度罕遇地震作用下的最大层间位移角见表 2.

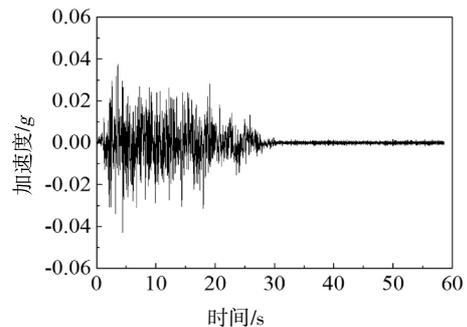


图 5 人工波 RG1
Fig.5 Artificial wave RG1

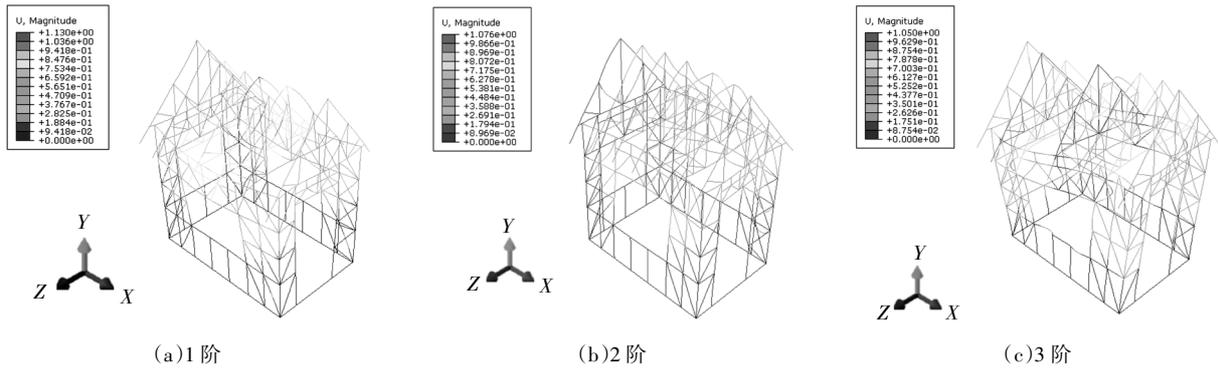


图6 模型1振型图

Fig.6 Vibration modes of model 1

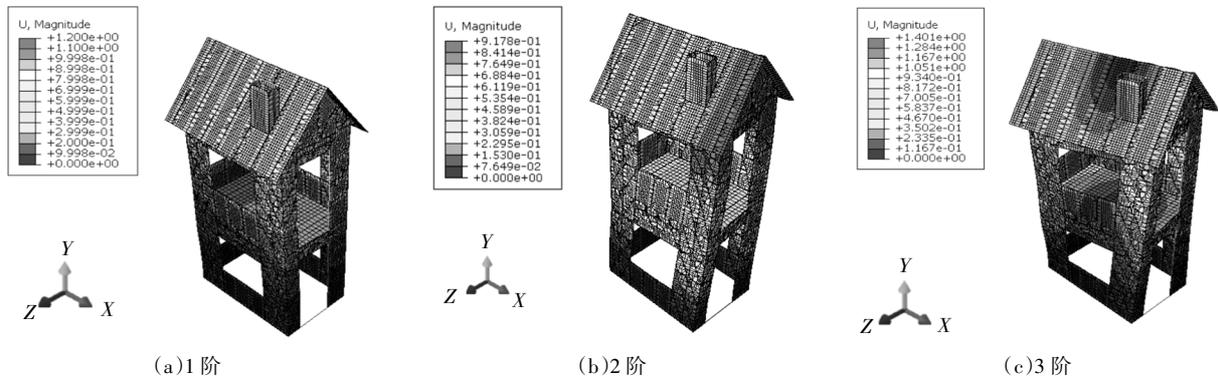


图7 模型7振型图

Fig.7 Vibration modes of model 7

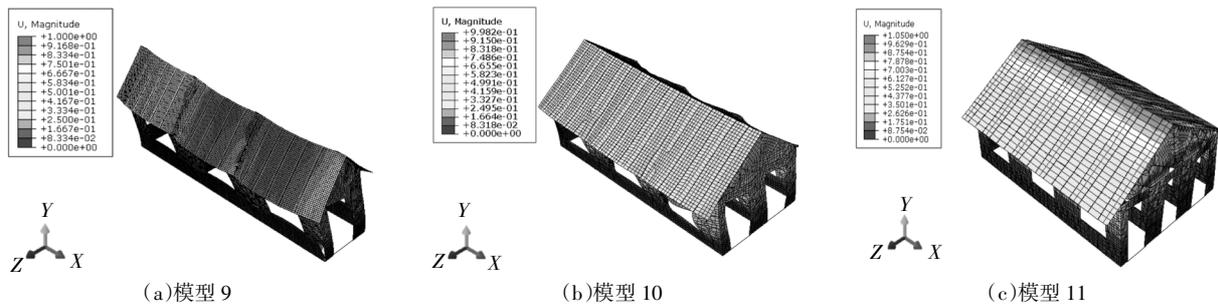


图8 模型9~11一阶振型图

Fig.8 First vibration modes of model 9 to 11

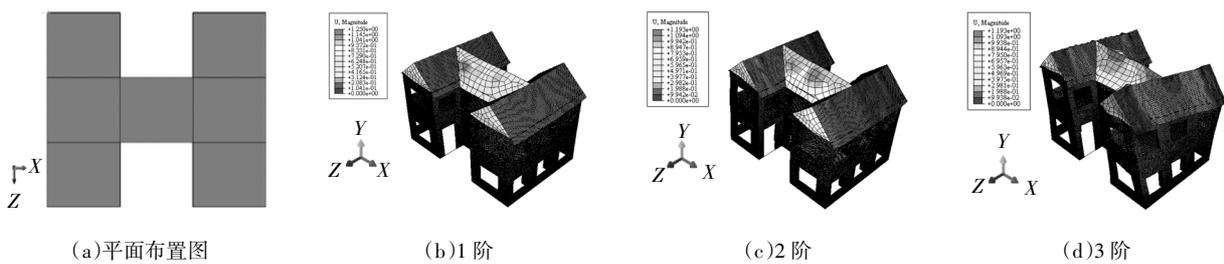


图9 模型12平面布置及振型图

Fig.9 Layout diagram and vibration modes of model 12

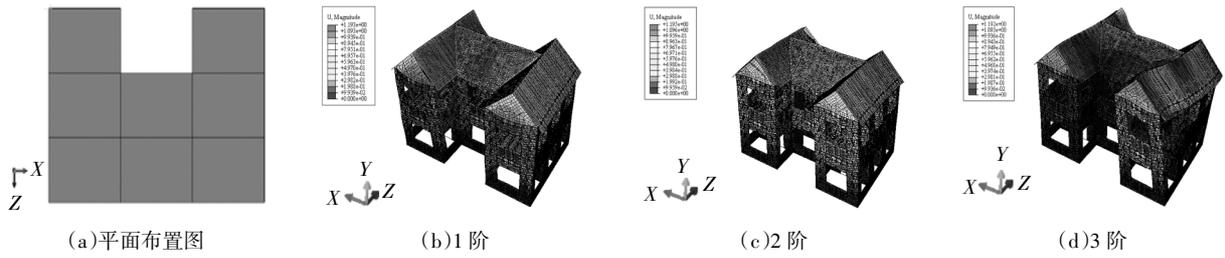


图 10 模型 13 平面布置及振型图

Fig.10 Layout diagram and vibration modes of model 13

表 2 变参数模型构造参数

Tab.2 Construction parameters of parameter models

模型编号	L/m	W/m	H/m	覆面板	柱间斜撑	开洞率/%	层数	跨度	开间	长宽比	基频	最大层间位移角	
												9 度多遇	9 度罕遇
1	2.9	1.9	3.62	无	是	21.81	1	1	1	1.5	11.5	1/264	1/122
2	2.9	1.9	3.62	SO	是	21.81	1	1	1	1.5	12.0	1/308	1/128
3	2.9	1.9	3.62	DO	是	21.81	1	1	1	1.5	12.6	1/340	1/146
4	2.9	1.9	3.62	DS	是	21.81	1	1	1	1.5	13.0	1/390	1/172
5	2.9	1.9	3.62	DO	否	21.81	1	1	1	1.5	10.2	1/310	1/130
6	2.9	1.9	3.62	DO	是	29.09	1	1	1	1.5	12.0	1/302	1/136
7	2.9	1.9	6.12	DO	是	21.81	2	1	1	1.5	7.6	1/296	1/120
8	2.9	1.9	6.12	DO	否	21.81	2	1	1	1.5	7.0	1/270	1/112
9	8.7	1.9	6.12	DO	是	21.81	1	3	1	4.6	11.2	1/311	1/135
10	8.7	3.8	6.12	DO	是	21.81	1	3	2	2.3	12.8	1/369	1/172
11	8.7	5.7	6.12	DO	是	21.81	1	3	3	1.5	13.5	1/481	1/238
12	8.7	5.7	6.12	DO	是	21.81	1	3	3 (H形)	—	11.0	1/418	1/188
13	8.7	5.7	6.12	DO	是	21.81	1	3	3 (U形)	—	12.1	1/532	1/221

3.1 覆面板数量的影响

与双面覆 OSB 面板模型的自振频率对比可知,无覆面板模型及单面覆 OSB 面板模型的自振频率分别降低 8.73%、4.76%。说明增加覆面板数量可增大墙体抗侧刚度进而提高结构自振频率。

如图 11 所示,在 9 度多遇地震作用下,与无覆面板房屋模型对比可知,单面覆 OSB 面板模型、双面覆 OSB 面板模型的 Z 向加速度放大系数峰值分别降低 9.31%、23.39%,X 向分别降低 17.94%、22.43%;在 9 度罕遇地震作用下,各模型 Z 向加速度放大系数峰值分别降低 5.01%、26.80%,X 向分别降低 12.70%、29.84%。以上分析表明:随覆面板数量增加,结构加速度放大系数峰值逐渐减小。

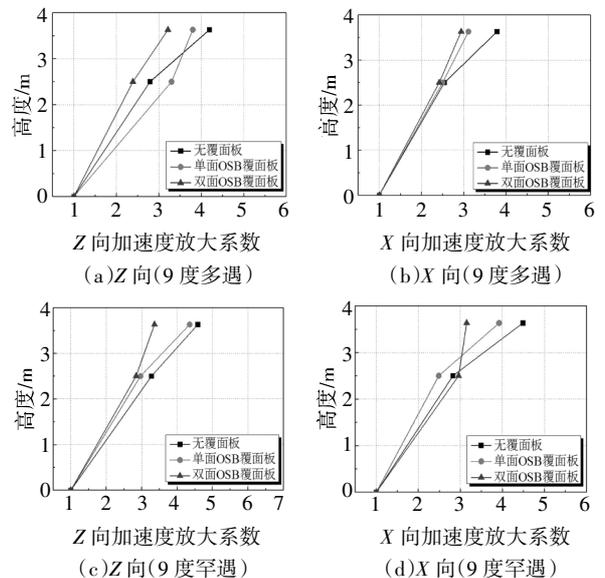


图 11 覆面板数量对加速度放大系数的影响

Fig.11 Influence of sheathing number on AAF curves

覆面板数量对结构最大相对位移的影响如图12所示. 与无覆面板模型对比可知,在9度多遇地震作用下,单面覆 OSB 面板模型、双面覆 OSB 面板模型的 Z 向最大相对位移依次降低 29.18%、36.30%, X 向依次降低 30.10%、31.07%; 在 9 度罕遇地震作用下,单面覆 OSB 面板模型、双面覆 OSB 面板模型的 Z 向最大相对位移依次降低 16.44%、23.29%, X 向依次降低 13.09%、12.71%.

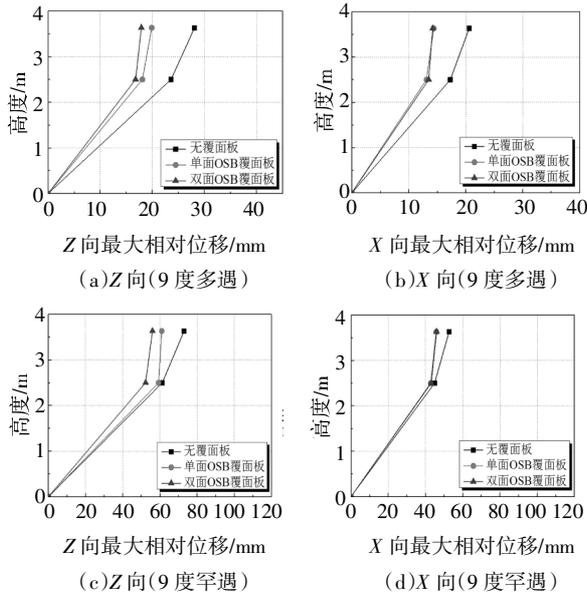


图 12 覆面板数量对最大相对位移的影响
Fig.12 Influence of sheathing number on MRD curves

由表 2 可知,随覆面板数量增加,结构最大层间位移角逐渐减小. 无覆面板模型在 9 度多遇地震作用下,最大层间位移角为 $1/264$,未满足《低层冷弯薄壁型钢房屋建筑技术规程》(JGJ 227—2011)^[12] 中多遇地震作用下层间位移角限值 $1/300$ 的规定,而单面覆 OSB 面板及双面覆 OSB 面板的最大层间位移角均满足低层冷弯规范^[12]规定,原因为组合墙体是轻钢房屋的主要抗侧构件,其抗侧性能主要取决于覆面板的蒙皮作用. 以上结果表明覆面板数量对轻钢结构房屋的层间位移具有显著作用,且覆面板房屋在 9 度多遇地震作用下处于弹性阶段.

综上,增加覆面板数量可有效提高轻钢房屋结构的自振频率,降低结构的加速度及位移响应. 因此,为保证冷弯房屋在 9 度地震作用下具有良好的动力特性及结构响应,建议采用双面覆面板组合墙体,OSB 板厚度不小于 9.5 mm.

3.2 覆面板材料的影响

双面覆 0.76 mm 厚钢板模型较双面覆 9.5 mm

厚 OSB 面板模型,其自振频率仅增大 3.17%.

如图 13 所示,随覆面板材料由 9.5 mm 厚 OSB 板变为 0.76 mm 厚钢板,在 9 度多遇、9 度罕遇地震作用下,双面覆钢板模型较双面覆 OSB 板模型 Z 向加速度放大系数峰值分别减小 5.30%和 7.14%. 如图 14 所示,与双面覆 OSB 面板模型对比,在 9 度多遇、9 度罕遇地震作用下,双面覆钢板模型的 Z 向最大相对位移分别减小 13.97%和 21.43%.

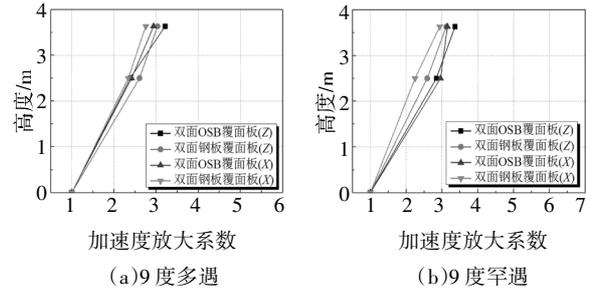


图 13 覆面板材料对加速度放大系数的影响
Fig.13 Influence of sheathing materials on AAF curves

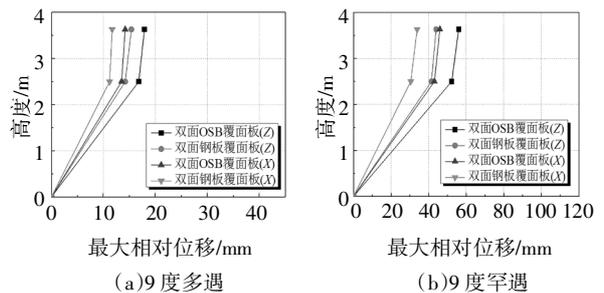


图 14 覆面板材料对最大相对位移的影响
Fig.14 Influence of sheathing materials on MRD curves

由表 2 可知,在 9 度多遇地震作用下,双面覆钢板模型的最大层间位移角较双面覆 OSB 面板模型分别减小 12.82%、15.11%,二者最大层间位移角均满足抗震规范^[13]规定的钢结构弹性层间位移角 $1/250$ 及低层冷弯规范^[12]中多遇地震作用下层间位移角限值 $1/300$ 的要求. 在 9 度罕遇地震作用下,双面覆 OSB 面板及双面覆钢板模型的最大层间位移角分别为 $1/146$ 、 $1/172$,均远小于抗震规范^[13]规定的钢结构弹塑性层间位移角 $1/50$ 的要求.

综上,钢板较 OSB 板的强度及承载力大,可提高墙体在水平荷载作用下的抗剪承载力、刚度,因而降低墙体的水平位移,因此钢板较 OSB 板可增强轻钢房屋结构在地震荷载作用下的抗震承载力,减小其水平位移及加速度,但其影响幅度均在 20%以内,说明通过改变覆面板材料来提高覆面板强度对结构动力特性、加速度及位移响应的影响较小.

3.3 柱间斜撑的影响

无覆面板并增设柱间斜撑的轻钢房屋骨架模型的自振频率为 11.5 Hz,与低层冷弯规范^[12]计算结果相符,说明设置柱间斜撑的房屋骨架自身刚度较大。加柱间斜撑单层及 2 层模型分别与无柱间斜撑模型对比,其自振频率分别提高 23.53%及 8.57%,说明柱间斜撑增强了墙体的抗侧性能及整体性。

在 9 度多遇和 9 度罕遇地震作用下,在单层房屋墙体内设置柱间斜撑使 Z 向加速度放大系数峰值分别降低 20.15%和 23.98%,X 向分别减小 18.11%、24.46%;在二层房屋墙体内设置柱间斜撑使模型 Z 向加速度放大系数峰值分别减小 6.18%和 3.15%,X 向分别减小 6.89%、3.27%。房屋在地震荷载作用下的加速度响应因设置柱间斜撑而减小,如图 15 所示。

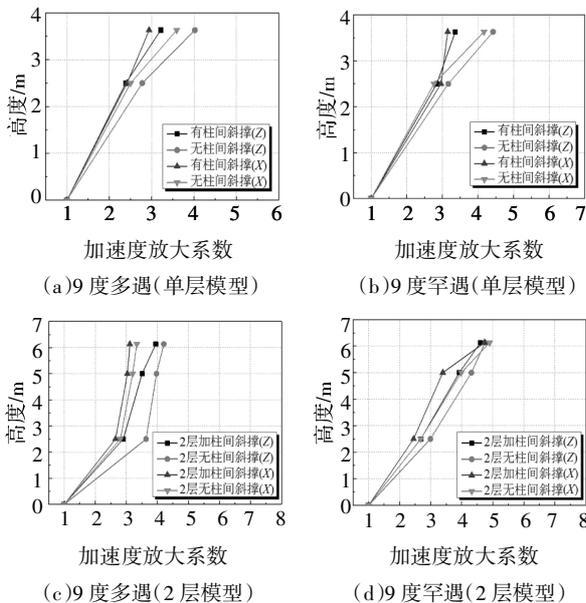


图 15 柱间斜撑对加速度放大系数的影响

Fig.15 Influence of bracings on AAF curves

如图 16 及表 2 所示,在 9 度多遇和 9 度罕遇地震作用下,对于单层房屋,增设柱间斜撑模型导致 Z 向最大相对位移分别降低 31.42%和 27.46%,最大层间位移角分别降低 8.82%和 4.98%,X 向最大相对位移分别降低 26.04%和 27.67%,最大层间位移角分别减小 10.96%和 20.20%;对于二层房屋增设柱间斜撑模型使 Z 向最大相对位移分别降低 5.95%和 8.13%,最大层间位移角分别降低 8.78%和 9.09%,X 向最大相对位移分别降低 8.42%及 0.36%,最大层间位移角分别降低 6.66%及 12.69%。表明设置柱间斜撑同样降低结构的位移响应及层间位移角。

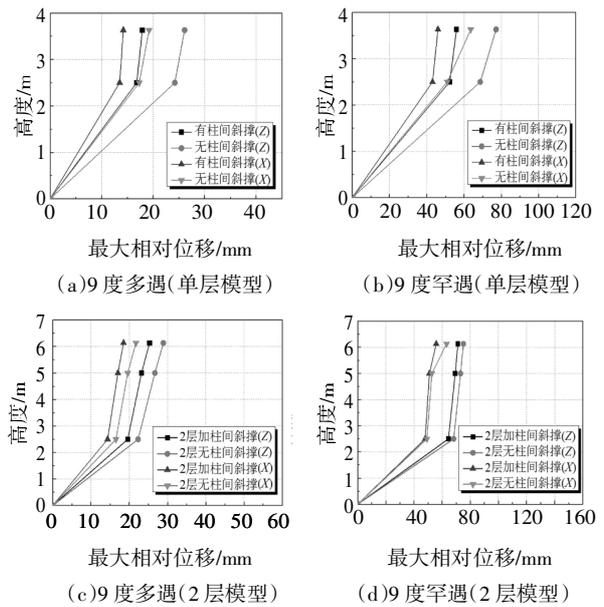


图 16 柱间斜撑对最大相对位移的影响

Fig.16 Influence of bracings on MRD curves

综上,墙体内设置柱间斜撑可显著提高整体结构的自振频率及结构响应,提升轻钢房屋的抗侧刚度,降低结构在地震作用下的加速度响应及位移响应,建议在 9 度抗震设防地区的轻钢房屋组合墙体设置柱间斜撑。

3.4 开洞率的影响

当墙体开洞率自 21.81%增大至 29.09%时,对应横墙开洞率增大 5.53%,纵墙开洞率增大 8.51%,模型的自振频率相应减小 4.76%,表明开洞率变大,导致整体刚度下降,自振频率减小。

由图 17 和图 18 可知,在 9 度多遇和 9 度罕遇地震作用下,结构开洞率由 21.81%增大至 29.09%,导致模型 Z 向加速度放大系数峰值分别提高 22.43%和 33.93%,X 向分别提高 18.71%和 27.94%;Z 向最大相对位移分别提高 23.46%和 10.89%,X 向分别增大 16.20%和 0.22%;Z 向最大层间位移角分别增大 12.58%、9.84%,X 向分别提高 7.35%、25.32%。当开洞率为 29.09%时,在 9 度多遇地震作用下,结构最大层间位移角为 1/302,仍处于弹性阶段,但在 9 度罕遇地震作用下,最大层间位移角增大为 1/136,此时结构进入弹塑性阶段。

综上,房屋开洞率增大,加速度响应及位移响应加剧,层间位移角增大,结构由弹性向弹塑性发展,结构的抗侧移能力降低,因此,为提供足够的安全储备,墙体开洞率不应大于 29.09%。

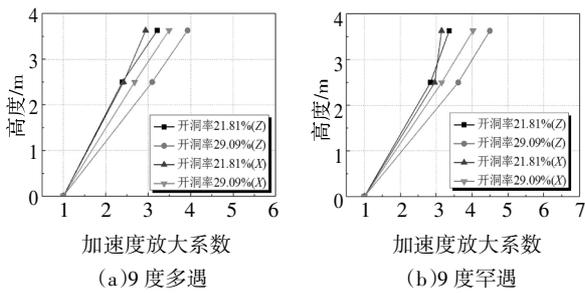


图 17 开洞率对加速度放大系数的影响
Fig.17 Influence of opening ratios on AAF curves

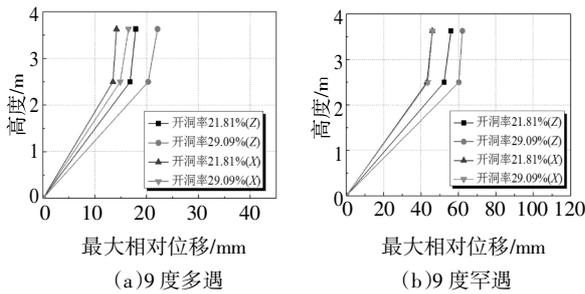


图 18 开洞率对最大相对位移的影响
Fig.18 Influence of opening ratios on MRD curves

3.5 平面长宽比的影响

当模型依次由 3 跨 1 开间增大至 3 跨 2 开间及 3 跨 3 开间时,长宽比自 4.6 依次降低至 2.3 及 1.5, 自振频率分别增大 14.29%、20.54%。

由图 19 可知,在 9 度多遇和 9 度罕遇地震作用下,当长宽比自 1.5 增大为 2.3 时,模型 Z 向加速度放大系数最大值分别增大 12.81%、19.14%,X 向分别增大 15.05%、16.88%;当模型长宽比由 2.3 增大至 4.6 时,结构 Z 向加速度放大系数最大值分别提高 34.06%、23.61%,X 向分别增大 7.60%、14.44%。

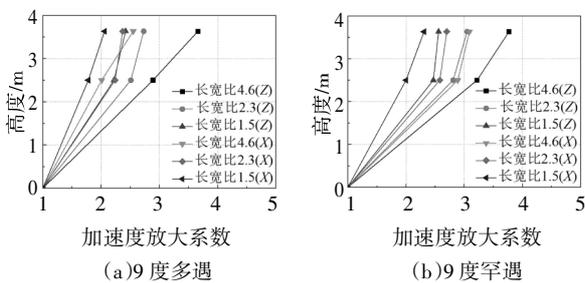


图 19 长宽比对加速度放大系数的影响
Fig.19 Influence of aspect ratios on AAF curves

如图 20 及表 2 所示,在 9 度多遇和 9 度罕遇地震作用下,当模型长宽比自 1.5 增大为 2.3 时,模型 Z 向最大相对位移分别增大 15.24%、11.69%,Z 向最大层间位移角分别增大 30.35%、38.37%,X 向最大相对位移分别增大 9.38%和 11.63%,X 向最大层间

位移角分别增大 36.05%和 24.84%;当模型长宽比由 2.3 增大至 4.6 时,结构 Z 向最大相对位移分别提高 24.34%和 16.26%,Z 向最大层间位移角分别提高 18.65%和 27.41%,X 向最大相对位移分别增大 13.33%和 13.10%,X 向最大层间位移角分别增大 29.23%和 40.71%。

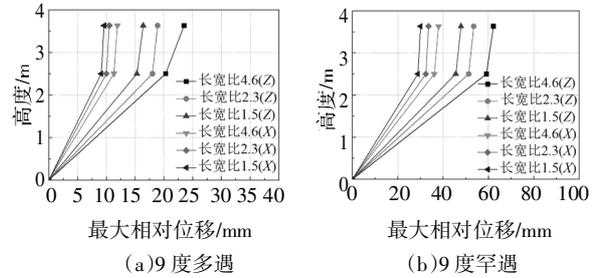


图 20 长宽比对最大相对位移的影响
Fig.20 Influence of aspect ratios on MRD curves

综上,当模型长宽比增大,即房屋结构平面形状由规则变为狭长时,结构自振频率降低,加速度及位移响应增强.因此建议结构长宽比越小,即房屋平面布置越简单、规则和对称,越能增加结构整体刚度,提高结构自振频率。

3.6 平面布置的影响

当结构布置平面呈 H 形和 U 形时(如图 9、图 10 所示),模型自振频率分别为 11 Hz、12.1 Hz,与规范^[12]计算结果相符,且 1、2 阶振型均以平动为主,3 阶振型为扭转,表明了该房屋振型规律。

由图 21、图 22 及表 2 可知,在 9 度多遇和 9 度罕遇地震作用下,H 形模型较 U 形的 Z 向加速度放大系数峰值分别增大 7.64%和 11.37%,X 向分别增大 9.62%和 14.53%;U 形模型的 Z 向最大相对位移相比 H 形模型小 13.54%、9.90%,X 向降低 7.19%和 6.44%;U 形模型的 Z 向最大层间位移角相比 H 形模型小 21.43%、14.93%,X 向降低 11.96%和 10.18%。U 形平面结构模型的 Z 向位移反应均高于 X 向,这与 U 形房屋的 X 向纵墙长度较长且整体性更强有关。

综上,覆面板数量、柱间斜撑、开洞率、平面长宽比及平面布置均对房屋层间位移角有明显影响.各房屋模型的最大层间位移角均发生在底层墙体顶部,原因在于底层墙体在地震荷载作用下,所受总剪力最大,由此产生的水平位移及层间位移角最显著.由表 2 可知:覆面板结构模型在 9 度罕遇地震作用下,最大层间位移角为 1/112,大于钢结构弹性层间位移角 1/250^[13]的规定,说明结构在 9 度罕遇地震作用下进入塑性,但仍满足弹塑性层间位移角 1/50 的规定。

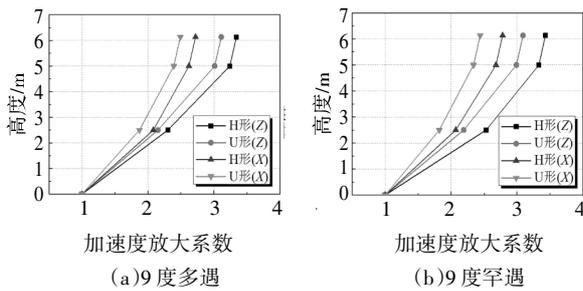


图21 平面布置对加速度放大系数的影响

Fig.21 Influence of plan layout on AAF curves

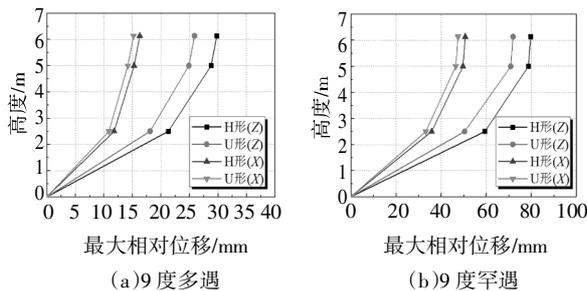


图22 平面布置对最大相对位移的影响

Fig.22 Influence of plan layout on MRD curves

4 结论和建议

1)通过单层轻钢房屋模型的自振频率、加速度及位移响应对比,有限元分析结果与试验结果吻合较好,验证了有限元模型的正确性。

2)覆面板墙体在9度多遇及罕遇地震作用下层间位移角均低于规范限值要求;采用增加覆面板数量、增设斜撑的墙体构造形式可有效提高房屋的动力特性,减小其加速度及位移响应;改变覆面板材料以提高覆面板强度及承载力,对整体结构的动力特性、加速度及位移响应提高较少。建议采用双面覆面板组合墙体,OSB板厚度不应小于9.5 mm。

3)当开洞率为29.09%时,低层轻钢房屋在9度罕遇地震作用下的最大层间位移角为1/136,大于钢结构弹性层间位移角1/250的规定,但仍低于弹塑性层间位移角1/50,表明此时结构处于弹塑性阶段。因此为提供足够的安全储备,墙体开洞率不应大于29.09%。

4)低层轻钢房屋的自振频率随结构平面长宽比的增大而降低,加速度响应及位移响应随长宽比增大而提高,建议采用平面长宽比较小的结构形式。

5)U形平面布置较H形平面布置结构的自振频率高,加速度响应及位移响应较小。因此建议采用平面布置简单、规则、对称的布置形式。

参考文献

- [1] 彭雄,杨娜,王彬,等.冷弯卷边槽钢轴压屈曲机理试验与数值研究[J].湖南大学学报(自然科学版),2013,40(8):34—39. PENG X, YANG N, WANG B, *et al.* Experimental research and simulation on lipped channel under axial compression [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2013, 40 (8): 34—39. (In Chinese)
- [2] 赵一婕,杜兆宇,张其林.冷弯薄壁型钢四肢组合受弯构件承载力研究[J].湖南大学学报(自然科学版),2012,39(11):28—34. ZHAO Y J, DU Z Y, ZHANG Q L. Analysis of the bearing capacity of cold-formed steel quadruple limbs built-up members under flexural loading [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2012, 39(11): 28—34. (In Chinese)
- [3] 李元齐,刘飞,沈祖炎,等.高强超薄壁冷弯型钢低层住宅足尺模型振动台试验[J].建筑结构学报,2013,34(1):36—43. LI Y Q, LIU F, SHEN Z Y, *et al.* Shaking table test on a full-scale model of low-rise high-strength cold-formed thin-walled steel framing buildings [J]. Journal of Building Structures, 2013, 34(1): 36—43. (In Chinese)
- [4] LI Y Q, SHEN Z Y, YAO X Y, *et al.* Experimental investigation and design method research on low-rise cold-formed thin-walled steel framing buildings [J]. Journal of Structural Engineering, 2013, 139 (5): 818—836.
- [5] 黄智光,苏明周,何保康,等.冷弯薄壁型钢三层房屋振动台试验研究[J].土木工程学报,2011,44(2):72—81. HUANG Z G, SU M Z, HE B K, *et al.* Shaking table test on seismic behaviors of three-story cold-formed thin-wall steel residential buildings [J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 44(2): 72—81. (In Chinese)
- [6] PETERMAN K D, STEHMAN M J, MADSEN R L, *et al.* Experimental seismic response of a full-scale cold-formed steel-framed building I: system-level response [J]. Journal of Structural Engineering, 2016, 142(12): 04016127.
- [7] PETERMAN K D, STEHMAN M J, MADSEN R L, *et al.* Experimental seismic response of a full-scale cold-formed steel-framed building II: subsystem-level response [J]. Journal of Structural Engineering, 2016, 142(12): 04016128.
- [8] HUTCHINSON T C, WANG X, HEGEMIER G, *et al.* Physical damage evolution during earthquake and post-earthquake fire testing of a mid-rise cold-formed steel framed building [C]// Proceedings of the 11th U S National Conference on Earthquake Engineering. Los Angeles: EER, 2018.
- [9] FIORINO L, MACILLO V, LANDOLFO R. Shake table tests of a full-scale two-story sheathing-braced cold-formed steel building [J]. Engineering Structures, 2017, 151: 633—647.
- [10] YE J H, JIANG L Q. Simplified analytical model and shaking table test validation for seismic analysis of mid-rise cold-formed steel composite shear wall building [J]. Sustainability, 2018, 10 (9): 3188.
- [11] 石宇,周绪红,刘立平,等.装配式轻钢房屋科普房振动台试验研究[J].建筑结构学报,2019,40(2):98—107. SHI Y, ZHOU X H, LIU L P, *et al.* Shaking table test on prefabricated light steel structure popular science building [J]. Journal of Building Structures, 2019, 40(2): 98—107. (In Chinese)
- [12] JGJ 227—2011 低层冷弯薄壁型钢房屋建筑技术规程[S].北京:中国建筑工业出版社,2011:14—15. JGJ 227—2011 Technical specification for low-rise cold-formed thin-walled steel buildings [S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2011: 14—15. (In Chinese)
- [13] GB 50011—2010 建筑抗震设计规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2010:43—44. GB 50011—2010 Code for seismic design of buildings [S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2010: 43—44. (In Chinese)