

文章编号:1673-2049(2018)05-0142-10

多层冷弯薄壁型钢住宅体系动力时程分析

管 宇¹,周绪红^{1,2},石 宇²,姚欣梅¹

(1. 长安大学 建筑工程学院,陕西 西安 710061; 2. 重庆大学 土木工程学院,重庆 400045)

摘要:在采用有限元方法验证三层冷弯薄壁型钢房屋振动台试验结果的基础上,建立了多层冷弯薄壁型钢结构住宅空间整体模型,分析了模型前 3 阶自振频率、振型以及双向地震作用下的加速度、位移响应和水平地震剪力,考察了多层房屋的抗震性能。结果表明:《低层冷弯薄壁型钢房屋建筑技术规程》推荐的基频计算方法适用于多层冷弯薄壁型钢结构体系;随着输入地震波峰值加速度的增加,模型各层加速度幅值、相对位移和最大剪重比均增大,而各层峰值加速度放大系数有降低的趋势;随着结构高度的增加,模型各层峰值加速度放大系数、相对位移和最大剪重比均增大;多层冷弯薄壁型钢结构体系在多遇地震和罕遇地震作用下结构 X 向和 Y 向的水平地震剪力和最大层间位移角满足《建筑抗震设计规范》的要求,具备较好的抗震性能。

关键词:冷弯薄壁型钢;多层住宅;抗震性能;动力时程分析;数值模拟

中图分类号:TU392.1

文献标志码:A

Dynamic Time History Analysis for Mid-rise Cold-formed Thin-walled Steel Residential Building System

GUAN Yu¹, ZHOU Xu-hong^{1,2}, SHI Yu², YAO Xin-mei¹

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

2. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

Abstract: The spatial models of mid-rise cold-formed thin-walled steel residential building were established based on the shaking table test results of three-storey cold-formed thin-walled steel building verified by finite element method. In order to investigate seismic performance of mid-rise building, the first three natural frequencies and vibration modes as well as acceleration response, displacement response and horizontal seismic shear under bidirectional earthquake action were conducted on spatial finite element models. The results show that the fundamental frequency calculation method recommended in *Technical Specification for Low-rise Cold-formed Thin-walled Steel Buildings* is appropriate for mid-rise cold-formed thin-walled steel structural system. The acceleration amplitude, relative displacement and maximum shear-weight ratio of each floor raise with the increase of seismic-wave acceleration amplitude, while the peak acceleration amplification coefficient of each floor decreases. Moreover, the peak acceleration amplification coefficient, relative displacement and maximum shear-weight ratio of each floor raise with the increase of structural height. The horizontal seismic shear force and maximum story-drift ratio of mid-rise cold-formed thin-walled steel structural system in X and Y direction under

收稿日期:2018-06-03

基金项目:陕西省自然科学基金研究计划项目(2018JQ5037);国家重点研发计划项目(2016YFC0701201);

中央高校基本科研业务费专项资金项目(310828171011)

作者简介:管 宇(1988-),男,天津市人,讲师,工学博士,E-mail:guanyu88927@163.com。

frequently earthquake and rare earthquake are satisfied with the requirement of *Code for Seismic Design of Buildings* which demonstrating that this structural system has better seismic behavior.

Key words: cold-formed thin-walled steel; mid-rise residential building; seismic performance; dynamic time history analysis; numerical simulation

0 引 言

冷弯薄壁型钢结构住宅体系是由木结构房屋演变而来的,考虑到住宅产业化、环保、抗震防灾以及缩短房屋建造周期等因素,轻钢住宅体系逐渐取代了木结构房屋的历史地位,成为一种新型的“绿色”住宅结构体系^[1]。从 21 世纪起,冷弯薄壁型钢结构在中国迅速发展,先后应用于别墅项目、汶川灾后安置房项目以及六层住宅试点楼项目等,社会效益显著^[2]。

多层冷弯薄壁型钢住宅体系的抗震性能是推动这类轻型、环保、节能的装配式体系在中国应用与发展的关键。国内外学者对冷弯薄壁型钢住宅体系的抗震性能进行了试验研究, Peterman 等^[3]、Fiorino 等^[4]和李元齐等^[5]对低层冷弯薄壁型钢房屋足尺模型进行了振动台试验,分析了房屋在地震作用下的响应、破坏机理以及动力特性。Wang 等^[6-7]和 Shamim 等^[8]对多层冷弯薄壁型钢墙体分别进行了循环加载试验和振动台试验,研究了抗剪墙体的抗震性能以及多层墙体的受力机理、破坏模式; Dao 等^[9]和沈祖炎等^[10]基于试验研究和理论分析,对低层住宅体系的抗震设计方法进行了相关研究。《冷弯薄壁型钢结构技术规范》(GB 50018—2002)^[11]和《低层冷弯薄壁型钢房屋建筑技术规程》(JGJ 227—2011)^[12]提出了低层冷弯薄壁型钢基本构件的设计方法,但未对结构体系的抗震设计方法提出相关规定,抗震设计内容并不完善。同时,现有研究成果缺少多层冷弯薄壁型钢住宅体系的振动台试验以及抗震设计方法,尚无可供参考的设计指导规范。

本文以实际工程为背景,采用 ABAQUS 有限元软件建立 4 层、5 层和 6 层冷弯薄壁型钢结构住宅空间整体模型,通过模态分析得到多层结构体系的振动频率和前 3 阶振型,分析多层冷弯薄壁型钢结构住宅在 El Centro 波和唐山波作用下的动力响应,验证了多层冷弯薄壁型钢住宅各层水平地震剪力及抗震变形验算中的层间位移角均满足《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)^[13]的要求,具备较好的抗震性能。研究结果可为多层冷弯薄壁型钢结构体系的抗震性能研究和应用提供参照依据。

1 有限元正确性验证

1.1 振动台试验

参考文献[14]中的振动台试验,三层冷弯薄壁型钢房屋平面尺寸为 $5.1\text{ m} \times 5.1\text{ m}$,设置 2 个开间,层高为 3 m,屋顶标高为 9.36 m。墙架柱的尺寸为 $C90\text{ mm} \times 35\text{ mm} \times 10\text{ mm} \times 1\text{ mm}$,楼盖梁弦杆尺寸为 $U90\text{ mm} \times 41\text{ mm} \times 1\text{ mm}$,腹杆尺寸为 $C90\text{ mm} \times 35\text{ mm} \times 10\text{ mm} \times 0.8\text{ mm}$,屋盖上下弦杆尺寸为帽形 $90\text{ mm} \times 37\text{ mm} \times 9\text{ mm} \times 1\text{ mm}$,腹杆尺寸为 $C90\text{ mm} \times 35\text{ mm} \times 10\text{ mm} \times 0.8\text{ mm}$ 。楼面板、外墙板和屋面板分别为 18,12,12 mm 厚的 OSB 板,内墙板为 10 mm 厚的石膏板,试验试件及有限元模型见图 1。

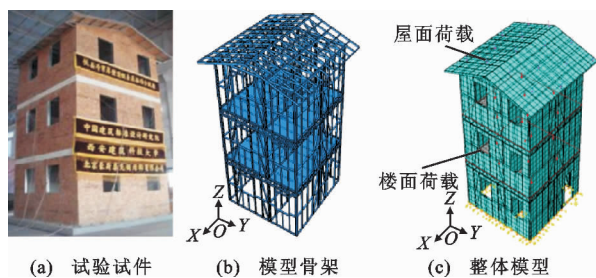


图 1 试验试件及有限元模型

Fig. 1 Test Specimen and Finite Element Model

试件中 0.8 mm 厚钢材屈服强度为 340 MPa,抗拉强度为 426 MPa,弹性模量为 $2.14 \times 10^5\text{ MPa}$; 1.0 mm 厚钢材屈服强度为 401 MPa,抗拉强度为 502 MPa,弹性模量为 $1.99 \times 10^5\text{ MPa}$ 。OSB 板的弹性模量为 3 790 MPa,抗弯强度为 19.6 MPa。

1.2 有限元建模

采用 ABAQUS 建立有限元模型,用壳单元 S4R 模拟所有冷弯薄壁型钢构件、OSB 板以及石膏板。钢材选用 Von Mises 准则和双折线本构模型,覆面板材料参数按照试验结果输入,并定义瑞利阻尼参数,其中阻尼比在多遇地震作用下选取 3%,在罕遇地震作用下选取 5%^[15]。采用 Coupling 约束耦合自攻螺钉位置处 2 个节点 3 个方向的平动自由度来模拟螺钉连接。在基本构件之间建立摩擦接触以防止出现相互穿透的现象,法向作用采用硬接触,切向作用采用库仑摩擦模型,抗滑移系数取为 0.3。

在全局坐标系 Z 向定义重力加速度 $g=9.8\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ 来模拟结构自重,通过设置均布荷载的方式来考虑楼面、屋面荷载。约束房屋底面全部自由度来模拟试验的边界条件。动力时程分析加载工况见表 1,在施加双向地震波时,放开模型底层 X 向和 Y 向约束。

表 1 加载工况
Tab. 1 Loading Cases

加载工况	地震烈度	地震波	主振方向	加速度输入值	
				X 向	Y 向
9	8 度多遇	El Centro 波	X 向	0.07g	0.06g
10			Y 向	0.06g	0.07g
37	8 度罕遇		X 向	0.40g	0.34g
38			Y 向	0.34g	0.40g

1.3 试验与有限元分析对比

(1)加速度响应

选取加载过程中楼层中部加速度峰值与底层中部加速度峰值的比值,确定模型最大加速度放大系数变化曲线。有限元分析得到模型在不同工况下各层最大加速度放大系数变化曲线与试验曲线对比,见图 2,由图 2 可知:有限元曲线和试验曲线发展趋势和变化规律相近,误差基本小于 15%。

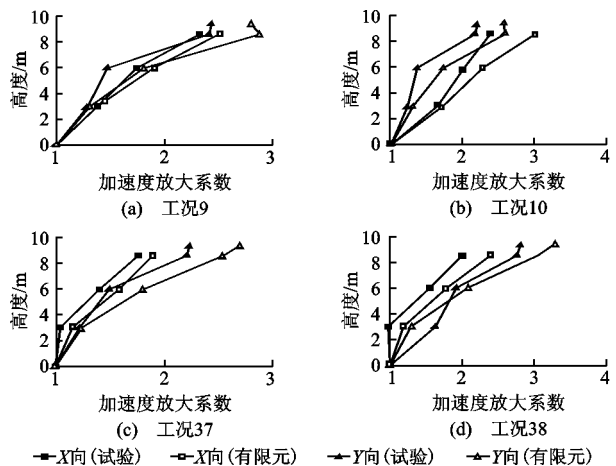


图 2 最大加速度放大系数变化曲线有限元与试验对比
Fig. 2 Comparison of Maximum Acceleration Amplification Coefficient Variation Curves Between FEM and Test

(2)位移响应

最大相对位移是指在加载过程中各楼层中部绝对位移减去底层中部位移的最大值。有限元分析得到模型在不同工况下各层最大相对位移变化曲线与试验曲线对比,见图 3,由图 3 可知:有限元曲线和试验曲线发展趋势和变化规律相近,误差基本小于 15%。

由加速度响应和位移响应结果可知,工况 37 和 38 有限元分析结果与试验结果的误差较大,原因是

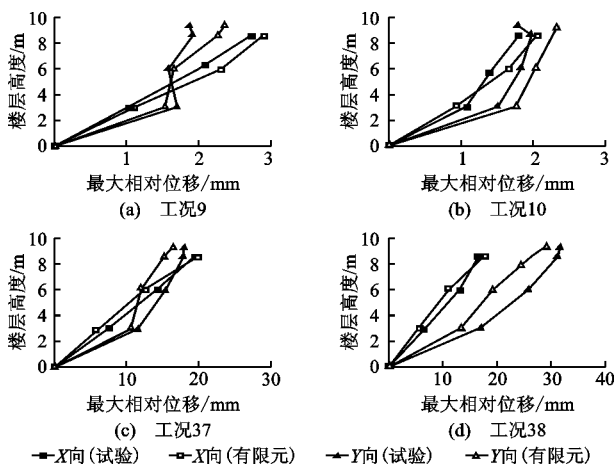


图 3 最大相对位移变化曲线有限元与试验对比
Fig. 3 Comparison of Maximum Relative Displacement Variation Curves Between FEM and Test

工况 37 和 38 测取的试验数据是三层房屋试件经历了 36 个工况后的结果。由文献[14]可知,在前述工况中试件已经出现局部破坏的情况,如抗拔件松动、变形等,而有限元模型建立过程并未考虑前述工况的损伤累积,模型整体刚度强于试验试件,故有限元和试验之间存在一定的误差。

2 冷弯薄壁型钢住宅动力时程分析

2.1 工程概况及模型建立

有限元模型参考盐城市绿色建筑项目中多层冷弯薄壁型钢宿舍实体工程,结构平面布置见图 4。模型宽度为 18.8 m,长度为 42.2 m,层高为 3 m。墙体上、下导梁尺寸为 U140 mm×40 mm×1.5 mm,墙架柱布置间距为 600 mm,尺寸为 C140 mm×45 mm×12 mm×1.5 mm,墙内横撑规格同墙架柱;楼盖梁间距为 600 mm,尺寸为 C305 mm×40 mm×14 mm×1.5 mm,边梁为 U305 mm×35 mm×1.5 mm。内、外墙面板分别采用 10 mm 厚的石膏板和 12 mm 厚的 OSB 板,楼面板采用 0.75 mm 厚 YX-14-63-820 mm 的压型钢板,并浇筑 40 mm 厚的石膏基自流平砂浆,强度等级为 C30。所有螺钉连接均采用 ST4.8 自攻螺钉进行连接。楼面均布活荷载取 2 kPa,屋面均布活荷载取 0.5 kPa。

采用 ABAQUS 软件建立 4 层、5 层和 6 层有限元模型,建模方法同第 1.2 节,选取 B31 梁单元建立冷弯薄壁型钢构件,选取 S4R 壳单元建立压型钢板,自流平砂浆采用实体单元 C3D8R 进行模拟,材料属性参照表 2 和表 3 进行输入,压型钢板与楼盖梁采用 Coupling 约束进行连接,自流平砂浆与压型

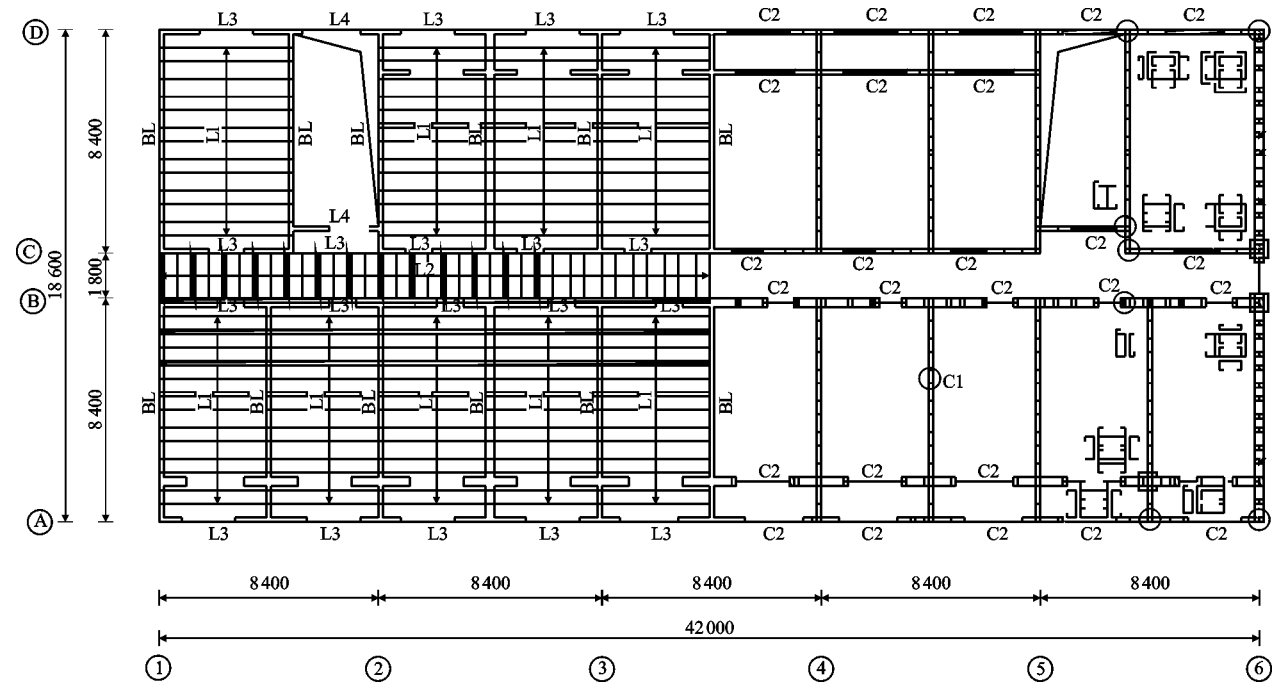


图 4 结构平面布置(单位:mm)

Fig. 4 Structural Floor Arrangement (Unit: mm)

表 2 钢材和砂浆材性

Tab. 2 Material Characteristics of Steel and Mortar					
材料	密度/ ($t \cdot m^{-3}$)	弹性模量/ MPa	泊松比	屈服强度/ MPa	抗拉强度/ MPa
钢材	7.85	2.06×10^5	0.3	345.00	450.00
砂浆	1.99	2.34×10^4	0.2	—	—

表 3 OSB 板和石膏板材性

Tab. 3 Material Characteristics of OSB and Gypsum Board						
板材	测定方向	抗弯模 量/MPa	剪切模 量/MPa	抗弯强 度/MPa	抗剪强 度/MPa	泊松比
石膏板	平行纵向	2 484	1 097	1.52		0.37
	垂直纵向	1 587	1 097	0.66		0.23
OSB 板	平行纵向	5 250	1 180	21.20	8.2	0.30
	垂直纵向	1 910	1 280	7.86	7.9	0.11

钢板采用 Tie 约束进行连接,有限元模型见图 5。

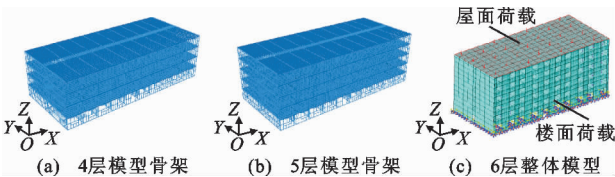


图 5 有限元模型

Fig. 5 Finite Element Models

2.2 加载工况

按照《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)^[13]中的规定,工程场地类别为Ⅱ类,设计地震分组为第2组,抗震设防烈度选为7度(0.10g)和8

度(0.20g),选取 El Centro 波和唐山波 2 条实际记录的地震波,地震动持续时间为 15 s,时间间隔分别为 0.02 s 和 0.01 s,见图 6,并对 2 条地震波加速度时程曲线的加速度峰值进行调整,使选出的地震记录峰值加速度与地震烈度的统计峰值加速度相等。

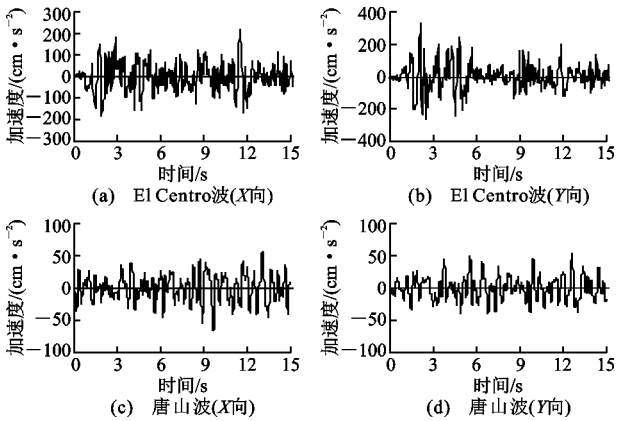


图 6 地震波

Fig. 6 Seismic Waves

2.3 模态分析

对有限元模型进行模态分析,可得到各模型前 3 阶的自振频率,见表 4。由表 4 可知:多层冷弯薄壁型钢房屋各阶自振频率随着房屋层数的增多而降低。采用《低层冷弯薄壁型钢房屋建筑技术规程》(JGJ 227—2011)^[12]计算得到的模型基频与有限元分析结果较为接近,故该规程计算基频的简易方法

表 4 有限元模型前 3 阶自振频率

Tab. 4 The First Three Order Natural Frequencies of

Finite Element Models Hz

模型	4 层			5 层			6 层		
	1 阶	2 阶	3 阶	1 阶	2 阶	3 阶	1 阶	2 阶	3 阶
有限元	2.92	2.95	4.63	2.40	2.43	3.80	2.01	2.06	3.19
规范	2.78~4.17			2.22~3.33			1.85~2.78		

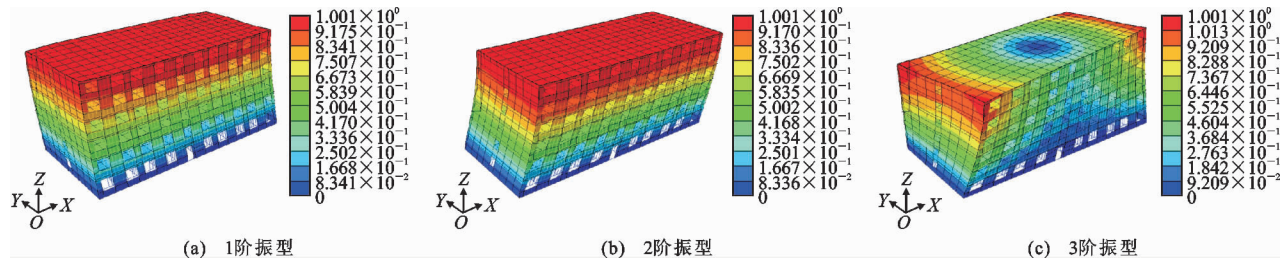


图 7 6 层模型前 3 阶振型

Fig. 7 The First Three Order Vibration Modes of 6-layer Model

2.4 动力时程分析

模型的加载工况见表 5,选取模型各层楼板中心节点作为参考点来分析结构的动力响应。

表 5 有限元加载工况

Tab. 5 Finite Element Loading Cases

工况	地震烈度	地震波	加速度峰值/(cm·s ⁻²)	
			Y 向	X 向
1	7 度多遇	El Centro 波	35	30
2		唐山波	35	30
3	7 度罕遇	El Centro 波	220	187
4		唐山波	220	187
5	8 度多遇	El Centro 波	70	60
6		唐山波	70	60
7	8 度罕遇	El Centro 波	400	340
8		唐山波	400	340

2.4.1 加速度响应分析

4 层、5 层和 6 层有限元模型在不同地震波和抗震设防烈度作用下的顶层参考点加速度时程曲线见图 8,9,模型各层参考点峰值加速度的放大系数曲线见图 10~12。

由图 8~12 可知:

(1)顶层参考点加速度时程曲线的波形在不同抗震设防烈度作用下基本保持一致。随着输入地震波峰值加速度的增大,模型顶层加速度幅值升高,而各层峰值加速度放大系数有降低的趋势,原因是随着地震加载的不断进行,模型会进入弹塑性阶段,发生刚度退化现象,使得模型阻尼比增加,加速度放大系数降低。模型各层峰值加速度放大系数随着结构高度的增加而增大,近似呈线性增长。

也适用于多层冷弯薄壁型钢房屋。4,5,6 层模型的前 3 阶振型相近,以 6 层模型为例,其前 3 阶振型见图 7。由图 7 可知:多层住宅第 1 阶振型表现为沿 Y 向的平动,第 2 阶振型表现为沿 X 向的平动,第 3 阶振型表现为绕 Z 向的扭转。模型前 3 阶振型均为整体振型,表明多层冷弯薄壁型钢房屋整体性能较好。

(2)在相同地震波和抗震设防烈度作用下,模型在 Y 向各层峰值加速度和峰值加速度放大系数均较 X 向各层峰值加速度和峰值加速度放大系数高,表明模型在 Y 向的加速度响应强于 X 向,这与结构在 Y 向的抗侧刚度较弱有关。

(3)当抗震设防烈度相同时,模型在 El Centro 波作用下的顶层峰值加速度和峰值加速度放大系数约高出唐山波作用下的顶层峰值加速度和峰值加速度放大系数 15%,表明模型对 El Centro 波的加速度响应大于对唐山波的加速度响应,主要原因是 El Centro 地震波功率谱的特征周期与结构自振周期较为接近。

(4)随着地震持续时间的增加,加速度时程曲线中相邻峰值加速度的时间间隔有逐渐增大的趋势,模型的 Y 向变化较 X 向明显,表明模型更易在抗侧刚度较弱的方向上发生破坏,导致结构刚度下降,固有频率降低,自振周期略有增大。

(5)在 El Centro 波和唐山波作用下,顶层参考点加速度时程曲线中加速度峰值对应的地震时间与施加地震波加速度时程曲线中加速度峰值对应的地震时间相差小于 2 s,主要原因为加速度响应与地震波频谱特性、自振周期和阻尼比有关,而阻尼比很难确定。

2.4.2 位移响应分析

4 层、5 层和 6 层有限元模型在不同地震波和抗震设防烈度作用下各层参考点在 X 向和 Y 向的最大相对位移随高度增加的变化曲线如图 13~15 所示。

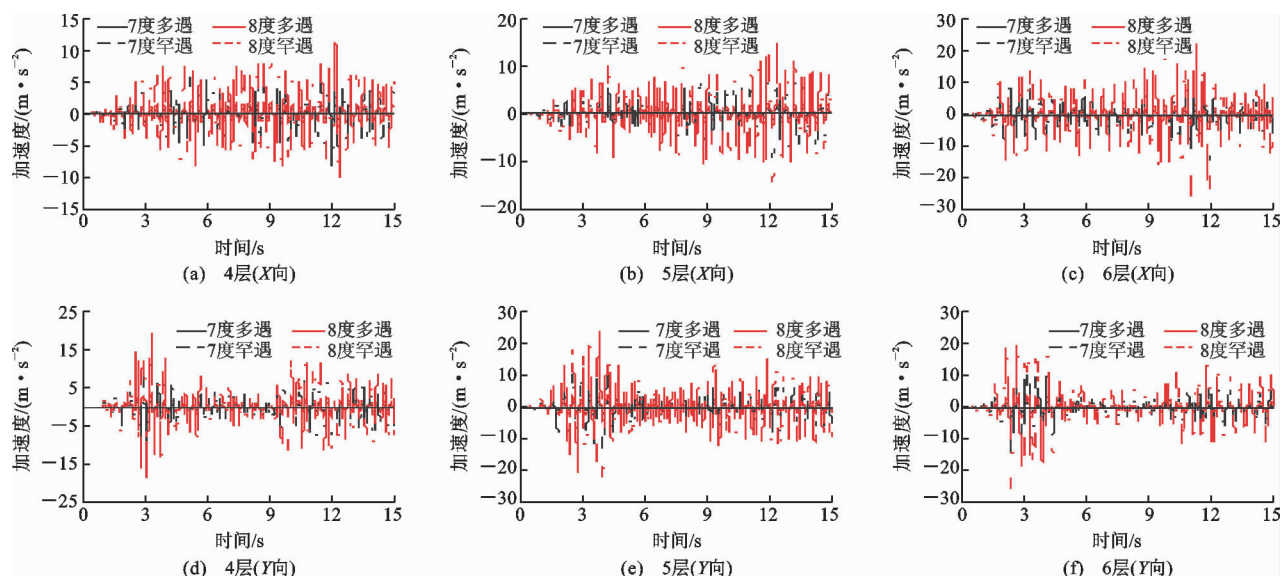


图 8 顶层参考点在 El Centro 波下的加速度时程曲线

Fig. 8 Acceleration Time History Curves of Top Reference Point Under El Centro Seismic Wave

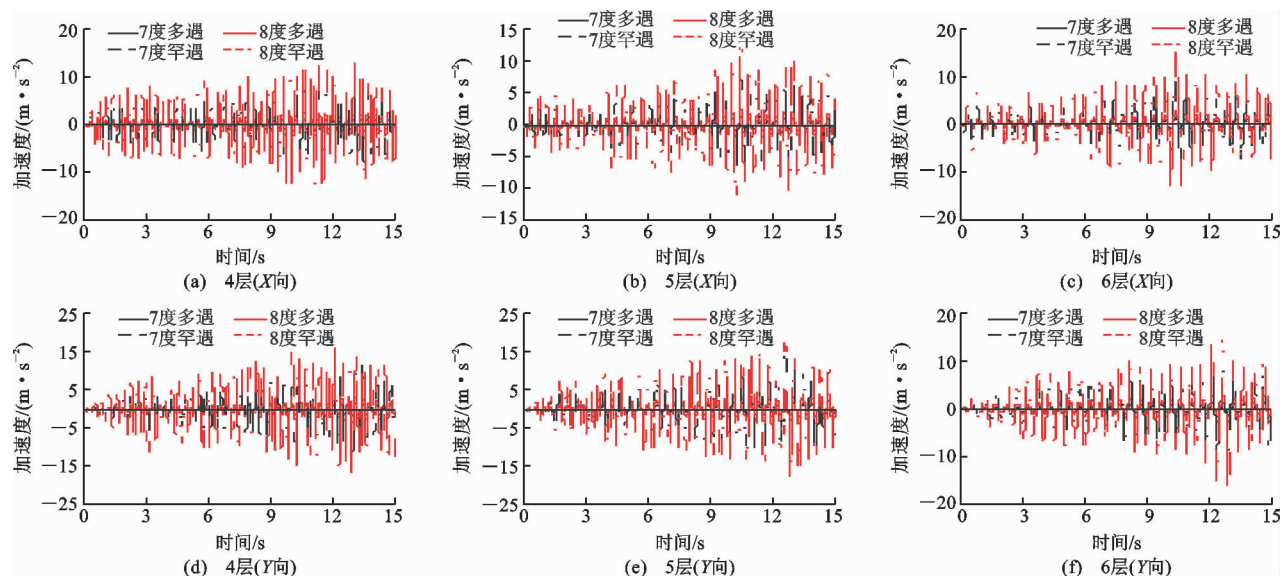


图 9 顶层参考点在唐山波下的加速度时程曲线

Fig. 9 Acceleration Time History Curves of Top Reference Point Under Tangshan Seismic Wave

由图 13~15 可知:

(1)模型各层相对位移随着结构高度的增加而增大,近似呈线性增长,表明随着楼层层数增多,结构对地震的响应增大,结构的抗震性能降低。在相同抗震设防烈度和地震波作用下,在 X 向 5 层模型第 4 层参考点相对位移比 4 层模型第 4 层参考点相对位移增大 53%,6 层模型第 4 层参考点相对位移比 5 层模型第 4 层参考点相对位移增大 40%。

(2)模型各层层间位移随结构高度的增加而逐渐减小,底层层间位移最大,顶层层间位移最小,故多层冷弯薄壁型钢住宅在地震作用下的侧移曲线呈

剪切型。在相同地震波和抗震设防烈度作用下,模型 Y 向各层相对位移均较 X 向各层相对位移大,表明模型在 Y 向的位移响应大于 X 向,这主要与结构 Y 向的抗侧刚度较弱有关。

(3)当抗震设防烈度相同时,模型各层相对位移在 El Centro 波作用下最大,表明模型对 El Centro 波的位移响应最大,这与地震波的频谱特性有关。同时,模型各层相对位移随着输入地震波峰值加速度的增加而增大,表明结构位移响应与地震烈度呈正比例增长。

不同设防烈度作用下结构在 X 向和 Y 向各层

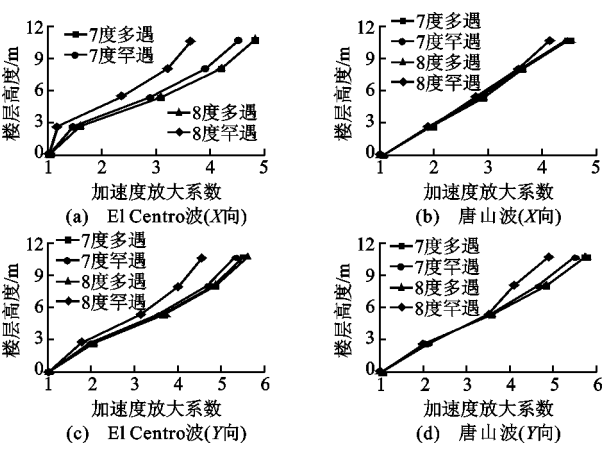


图 10 4 层模型各层参考点加速度放大系数曲线
Fig. 10 Acceleration Amplification Coefficient Curves of Reference Points in 4-layer Model

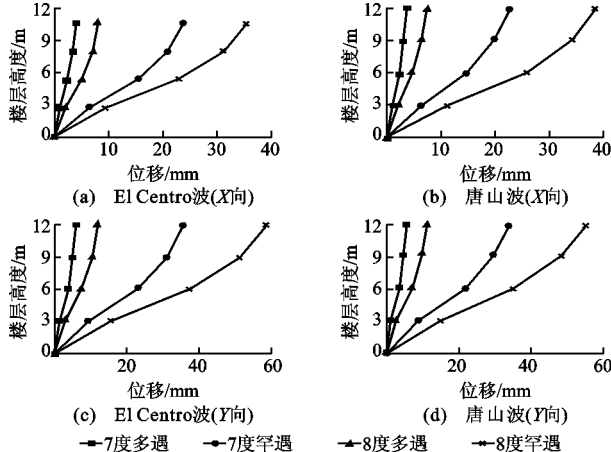


图 13 4 层模型各层参考点最大相对位移变化曲线
Fig. 13 Maximum Relative Displacement Variation Curves of Reference Points in 4-layer Model

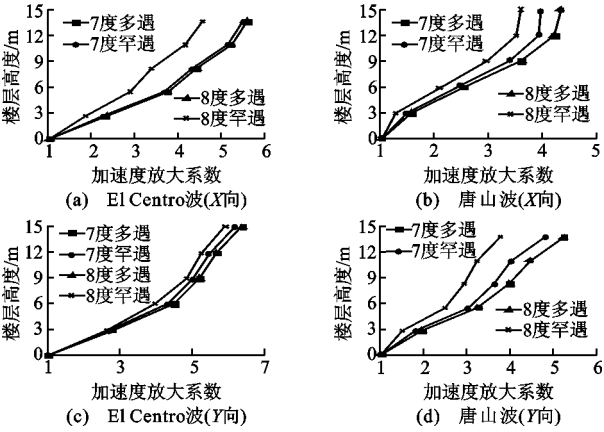


图 11 5 层模型各层参考点加速度放大系数曲线
Fig. 11 Acceleration Amplification Coefficient Curves of Reference Points in 5-layer Model

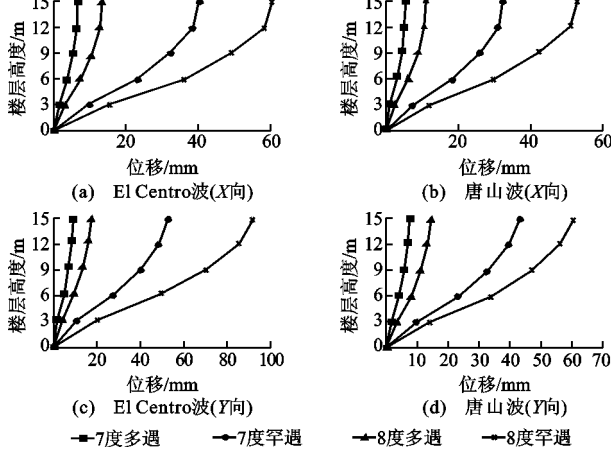


图 14 5 层模型各层参考点最大相对位移变化曲线
Fig. 14 Maximum Relative Displacement Variation Curves of Reference Points in 5-layer Model

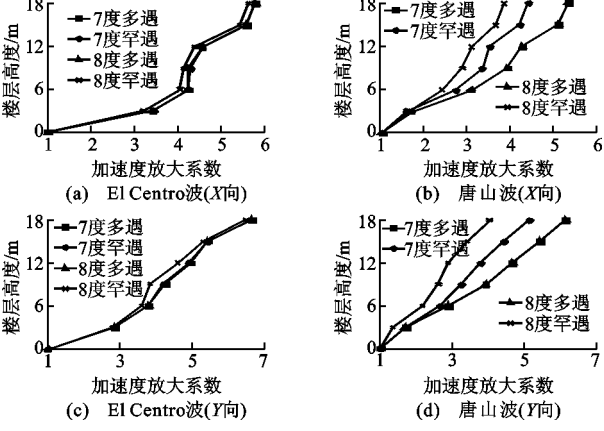


图 12 6 层模型各层参考点加速度放大系数曲线
Fig. 12 Acceleration Amplification Coefficient Curves of Reference Points in 6-layer Model

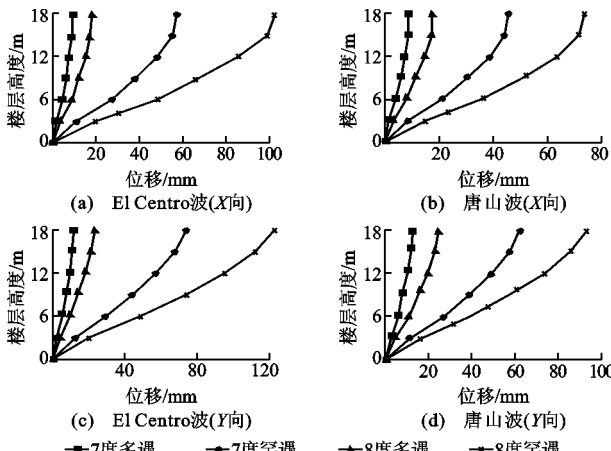


图 15 6 层模型各层参考点最大相对位移变化曲线
Fig. 15 Maximum Relative Displacement Variation Curves of Reference Points in 6-layer Model

最大层间位移角随结构高度变化的包络曲线(取 El Centro 波和唐山波的最大值)见图 16。

由图 16 可知:

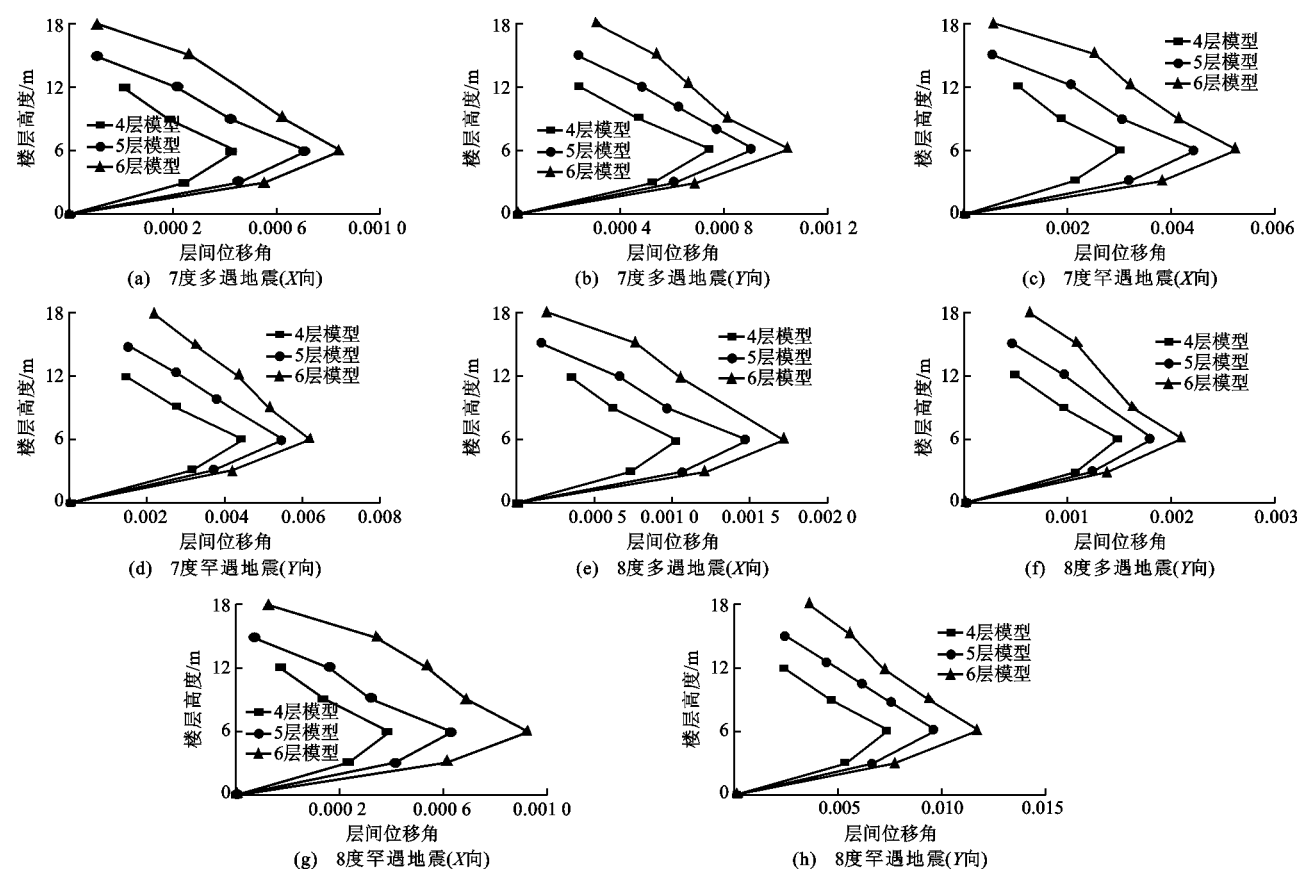


图 16 多层模型各层层间位移角包络曲线

Fig. 16 Inter-storey Drift Angle Envelope Curves of Multilayer Model

(1)当结构高度相同时,在相同抗震设防烈度作用下,6层模型层间位移角最大,4层模型层间位移角最小,模型Y向层间位移角均大于X向层间位移角;在不同抗震设防烈度作用下,模型层间位移角随着输入地震波峰值加速度的增加而增大。

(2)模型各层层间位移角并未随着楼层高度的增加而线性增大,对于4层、5层和6层模型的最大层间位移角均发生在第2层,这与结构第2层抗侧刚度与相邻楼层抗侧刚度相差较大有关,而且第2层水平地震剪力小于第3层水平地震剪力的80%。在薄弱层之上,结构各层的层间位移角随着楼层高度的增加而减小,因为在薄弱层之上的楼层抗侧刚度相近,沿竖向均匀变化。

(3)《建筑抗震设计规范》^[13]规定:多层、高层钢结构弹性层间位移角的限值为1/250,弹塑性层间位移角的限值为1/50。表6列出了4层、5层和6层模型在多遇地震和罕遇地震作用下结构X向和Y向的最大层间位移角,由表6可知:随着抗震设防烈度和楼层层数的增加,薄弱层层间位移角相应增大,对于6层模型在8度多遇地震作用下,第2层Y

向的层间位移角为1/475,满足抗震规定要求;对于6层模型在8度罕遇地震作用下,第2层Y向的层间位移角为1/102,满足抗震规范要求,表明多层冷弯薄壁型钢住宅满足抗震变形验算,具备较好的抗震性能。

2.4.3 水平地震剪力分析

在抗震验算时,模型各层水平地震剪力应满足《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)^[13]的要求,即 $V_{EKi} > \lambda \sum_{j=i}^n G_j$,其中, V_{EKi} 为对应于水平地震作用标准值的模型*i*层楼层剪力, λ 为剪力系数,当模型的基频小于3.5s时,7度抗震时 $\lambda=0.016$,8度抗震时 $\lambda=0.032$, G_j 为第*j*层重力荷载代表值。

不同抗震设防烈度作用下模型在X向和Y向各层最大剪重比见表7,由表7可知:①模型各层剪重比随着结构高度和输入地震波加速度峰值的增加而增大;②4层、5层和6层模型在相同抗震设防烈度作用下,底层和顶层剪重比并未随着楼层层数的增多而发生较大变化;③4层、5层和6层模型各层最大剪重比符合抗震规范规定7度和8度抗震设防

表 6 最大层间位移角有限元模型与规范对比

Tab. 6 Comparison of Maximum Inter-storey Drift Angle Between FEM and Specification

模型	薄弱层	多遇地震					罕遇地震				
		7 度		8 度		规范	7 度		8 度		规范
		X 向	Y 向	X 向	Y 向		X 向	Y 向	X 向	Y 向	
4 层	2 层	1/1 933	1/1 341	1/968	1/671	1/250	1/330	1/223	1/202	1/136	1/50
5 层	2 层	1/1 348	1/1 095	1/674	1/549		1/222	1/180	1/144	1/103	
6 层	2 层	1/1 172	1/949	1/586	1/475		1/189	1/162	1/107	1/102	

表 7 有限元模型各层最大剪重比

Tab. 7 Maximum Shear-weight Ratios of Each Layer of Finite Element Models

模型	楼层	最大剪重比/%							
		7 度多遇		7 度罕遇		8 度多遇		8 度罕遇	
		X 向	Y 向	X 向	Y 向	X 向	Y 向	X 向	Y 向
4 层	4	8.5	10.0	50.4	62.4	17.3	20.1	73.9	94.8
	3	6.5	8.1	38.4	50.0	13.2	16.2	56.7	80.7
	2	5.4	6.7	31.8	41.5	10.9	13.4	47.1	67.1
	1	4.3	5.3	25.5	33.0	8.8	10.7	37.7	53.6
5 层	5	8.6	10.6	46.5	56.6	16.4	21.6	76.9	73.6
	4	6.7	8.6	36.6	47.8	13.5	17.6	60.1	65.3
	3	5.8	7.5	31.8	41.9	11.7	14.7	51.8	61.3
	2	5.0	6.4	27.8	36.6	9.8	12.6	44.9	56.4
	1	4.1	5.3	23.8	30.7	8.2	10.6	37.9	48.5
6 层	6	8.8	10.6	38.4	49.0	17.7	21.3	61.7	75.3
	5	7.4	9.2	30.5	43.7	14.7	18.4	48.0	67.6
	4	6.7	8.3	28.9	40.3	13.1	16.6	46.4	64.2
	3	5.8	7.4	28.1	37.2	11.7	14.8	45.2	58.8
	2	5.1	6.5	26.4	33.4	10.2	13.0	42.5	52.6
	1	4.4	5.6	23.4	28.5	8.9	11.2	37.6	45.4

烈度时楼层地震剪力系数限值,满足规范要求。

3 结 语

(1)《低层冷弯薄壁型钢房屋建筑技术规程》(JGJ 227—2011)^[12]推荐的基频计算方法适用于多层冷弯薄壁型钢结构体系。随着住宅层数的增多,结构各阶自振频率均逐步降低。

(2)随着输入地震波峰值加速度的增加,模型顶层加速度幅值增大,而各层峰值加速度放大系数有降低的趋势。模型各层峰值加速度放大系数随着结构高度的增加而增大,近似呈线性增长。

(3)多层冷弯薄壁型钢住宅在地震作用下的侧移曲线呈剪切型。随着输入地震波峰值加速度和住

宅高度的增加,模型各层相对位移和最大剪重比增大。模型抗侧刚度较弱的 Y 向加速度时程曲线中,相邻峰值加速度的时间间隔有增大趋势,自振周期略有增大。

(4)多层冷弯薄壁型钢住宅模型的最大层间位移角发生在第 2 层,在多遇地震和罕遇地震作用下模型 X 向和 Y 向的层间位移角符合《建筑抗震设计规范》的要求。

(5)多层冷弯薄壁型钢住宅具有较好的抗震性能。加快发展中国多层冷弯薄壁钢结构住宅,可促进住宅产业化进程,推动中国绿色建筑的可持续发展。

参考文献:

References:

[1] 何安康,周天华. 多层薄板轻钢房屋体系可行性报告(结构部分)[J]. 住宅产业,2007(8):39-45.
HE Bao-kang,ZHOU Tian-hua. Feasibility Report on Multilayer Thin-walled Light Steel Housing System (Structural Part)[J]. Housing Industry,2007(8):39-45.

[2] 周绪红,石 宇,王瑞成,等. 适合地震灾区快速重建的冷弯薄壁型钢结构住宅体系[R]. 北京:中国土木工程学会,2008.
ZHOU Xu-hong,SHI Yu,WANG Rui-cheng,et al. Cold-formed Thin-walled Steel Structural Housing System Suitable for the Rapid Reconstruction in Earthquake-stricken Area [R]. Beijing: China Civil Engineering Society,2008.

[3] PETERMAN K D,STEHMAN M J 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.

[4] 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.

[5] 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 Yuan-qi,LIU Fei,SHEN Zu-yan,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.

[6] WANG X X,YE J H. Cyclic Testing of Two- and

Three-story CFS Shear-walls with Reinforced end Studs[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2016,121:13-28.

[7] YE J H,JIANG L Q,WANG X X. Seismic Failure Mechanism of Reinforced Cold-formed Steel Shear Wall System Based on Structural Vulnerability Analysis[J]. Applied Sciences,2017,7(2):182-198.

[8] SHAMIM I,DABREO J,ROGERS C A. Dynamic Testing of Single- and Double-story Steel-sheathed Cold-formed Steel-framed Shear Walls[J]. Journal of Structural Engineering,2013,139(5):807-817.

[9] DAO T N,LINDT J W. Numerical Seismic Performance of an Innovative CFS Midrise Building Designed Using DDD[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities,2014,28(5):04014018.

[10] 沈祖炎,刘 飞,李元齐. 高强超薄壁冷弯型钢低层住宅抗震设计方法[J]. 建筑结构学报,2013,34(1):44-51.

SHEN Zu-yan,LIU Fei,LI Yuan-qi. Seismic Design Method of Low-rise High-strength Cold-formed Thin-walled Steel Framing Buildings[J]. Journal of Building Structures,2013,34(1):44-51.

[11] GB 50018—2002,冷弯薄壁型钢结构技术规范[S].

GB 50018—2002, Technical Code of Cold-formed Thin-walled Steel Structures[S].

[12] JGJ 227—2011,低层冷弯薄壁型钢房屋建筑技术规范[S].

JGJ 227—2011, Technical Specification for Low-rise Cold-formed Thin-walled Steel Buildings[S].

[13] GB 50011—2010,建筑抗震设计规范[S].

GB 50011—2010, Code for Seismic Design of Buildings[S].

[14] 黄智光. 低层冷弯薄壁型钢房屋抗震性能研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2010.

HUANG Zhi-guang. Seismic Behaviors Study on Low-rise Cold-formed Thin-wall Steel Residential Buildings[D]. Xi'an:Xi'an University of Architecture and Technology,2010.

[15] 马荣奎,李元齐. 低层冷弯薄壁型钢龙骨体系房屋抗震性能有限元分析[J]. 建筑结构学报,2014,35(5):40-47.

MA Rong-kui,LI Yuan-qi. FEA on Seismic Behavior of Low-rise Cold-formed Thin-walled Steel Framing Buildings[J]. Journal of Building Structures,2014,35(5):40-47.