

文章编号:1673-2049(2009)03-0071-05

低层冷弯薄壁型钢房屋振动台 试验及有限元分析

齐 岩¹, 苏明周¹, 张琳琳², 孙 建¹, 黄智光¹

(1. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 中国矿业大学
力学与建筑工程学院, 北京 100083)

摘要:为研究低层冷弯薄壁型钢房屋在地震作用下的动力特性, 对一个原大的三层冷弯薄壁型钢房屋模型进行了振动台模拟地震试验; 根据试验结果分析了该结构体系在地震作用下的破坏特征和动力特性, 应用有限元分析程序建立了简化模型, 并对模型结构进行了计算分析; 最后对该结构体系的研究方向和结构设计提出了建议。结果表明: 位移反应的计算值与试验值吻合良好, 该结构体系是一种理想的新型抗震结构体系。

关键词:冷弯薄壁结构; 振动台试验; 简化模型; 有限元分析; 动力特性

中图分类号: TU391 **文献标志码:** A

Shaking Table Test and Finite Element Analysis of Low-rise Cold-formed Thin-walled Steel Residential Buildings

QI Yan¹, SU Ming-zhou¹, ZHANG Lin-lin², SUN Jian¹, HUANG Zhi-guang¹

(1. School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, Shaanxi, China; 2. School of Mechanics & Civil Engineering, China University of Mining & Technology, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to study the dynamic characteristics of low-rise cold-formed thin-walled steel residential buildings under earthquake, a shaking table simulation seismic test was carried out for a 1:1 scale three storied cold-formed thin-walled steel residential building model. The damage features and dynamic characteristics of the prototype structure were got by the similitude relationships according to the testing results. Using finite element analysis programs, the simplified model structure was made. Finally, some advices on research and design for this structure system were put forward. The results show that the calculated values coincide with the test values. This kind of structure system is a new ideal aseismic structure system.

Key words: cold-formed thin-walled structure; shaking table test; simplified model; finite element analysis; dynamic characteristic

0 引言

冷弯薄壁型钢低层住宅结构体系具有结构自重轻、施工周期短、抗震性能好、环保、综合经济效益好

等优点, 在美国、日本、澳大利亚等国家被广泛应用并获得了良好的经济效益。近年来, 这种结构体系开始在中国推广应用^[1], 但目前中国对冷弯薄壁型钢住宅结构体系在地震力作用下的受力性能研究较

收稿日期: 2009-03-28

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划项目(2006BAJ04A02-04)

作者简介: 齐 岩(1984-), 男, 陕西咸阳人, 工学硕士研究生, E-mail: qiyansky@126.com。

少,因此有必要对此类结构的抗震性能进行研究。笔者通过三层冷弯薄壁型钢房屋模型振动台试验及有限元分析对低层冷弯薄壁型钢房屋在地震作用下的动力反应进行了研究。

1 模型制作及振动台试验

1.1 模型的制作

振动台试验模型(图1)是按照北京豪斯泰克公司提供的设计方案制作的缩尺比例为1:1的模型^[2],模型设计时考虑了中国建筑科学研究院工程抗震实验室振动台的尺寸及性能参数。模型层数为3层,层高3 m,屋顶标高9.36 m。基础选用C30混凝土,钢结构



图1 固定在振动台上的模型

Fig. 1 Model Fixed on Shaking Table

材料选用Q345钢,屋面板、外墙板、楼面板选用进口OSB板,内墙板选用石膏板。柱采用C型钢,其中一层柱为双柱布置形式(即2个C型钢组合柱),二、三层柱都为单柱,墙板通过自攻螺钉连接到结构骨架上。楼面配重为 $1.194 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-2}$,墙面配重为 $0.3 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-2}$,布置在墙体根部的楼板上,屋面配重为 $0.406 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

1.2 振动台试验

试验于2008年12月28日在中国建筑科学研究院工程抗震实验室的MTS三向六自由度模拟地震振动台上进行。根据结构的动力特性和场地条件,选定3种地震动作为振动台模拟地震输入波^[3]:①El Centro波;②唐山波;③上海人工波(上海人工波为 x 、 y 方向单向输入)。

加速度传感器布置于每层的刚心及四角处,以检验结构是否出现扭转,其中底层只在刚心的 x 、 y 方向布置加速度传感器2个,在二、三层 x 、 y 方向各布置加速度传感器10个,在屋架 x 、 y 方向布置加速度传感器2个。试验时首先用 x 、 y 方向白噪声对模型进行频谱扫描,以得到模型的自振频率和阻尼比;然后,用所选的3种地震波分别进行输入。

2 试验结果与分析

2.1 模型的破坏形态

由于模型的自重较轻,在7度基本烈度前,模型

均无明显晃动;从7度基本烈度开始,模型晃动明显,石膏板出现局部压碎,部位主要集中在窗户过梁、桁架梁下方的石膏板接缝处;7度罕遇烈度时,模型的地震反应加剧,底层接缝处石膏板挤压严重,墙角处螺钉被拔起,石膏板有松动迹象,外墙OSB板局部接缝处也开始挤压开裂,但模型二、三层墙体没有发生破坏现象,结构整体完好;烈度达8度罕遇后,模型地震反应明显剧烈,振动声响较大,结构发生剪切型层间位移,三层墙体石膏板接缝明显变大,螺钉脱落,石膏板外突。试验结束后,对模型的外墙及内墙板进行了局部拆除,发现模型的骨架(包括立柱、桁架梁、屋架)没有变形,说明骨架在试验过程中并未发生塑性变形。观察发现,底层抗拔件变形严重,连接抗拔件与基础螺栓基本都有松动。由此可见,模型在试验后期发生很大整体位移可能是由于底层抗拔件螺栓松动引起的。

2.2 模型结构的动力特性

2.2.1 自振频率及阻尼比

试验前通过对模型进行白噪声扫描,得到了结构在输入地震波前后的自振频率和阻尼比,由此可以分析结构在振动过程中的刚度变化情况。图2为模型自振频率的变化,模型结构在 x 方向的基本频率为5.28 Hz,阻尼比为0.023 5, y 方向的基本频率为5.04 Hz,阻尼比为0.029 8。7度罕遇烈度前,结构的整体刚度变化不大,结构基本处于弹性阶段;7度罕遇烈度后,结构刚度迅速下降, x 方向刚度下降了17.0%, y 方向刚度下降了24.1%;9度罕遇烈度后,结构 x 方向刚度下降了37.0%, y 方向刚度下降了54.0%,这是因为结构墙面板已出现挤压破坏、拼缝扩大、螺钉拔出等现象,此时结构的蒙皮效应已逐渐丧失,导致结构刚度下降。

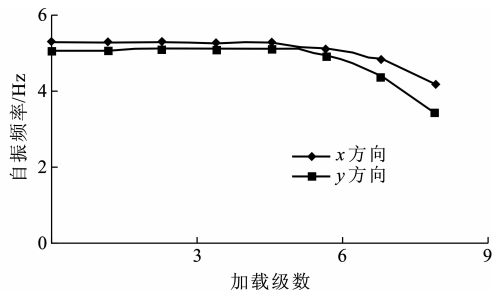


图2 模型自振频率的变化

Fig. 2 Natural Frequency Variations of Model

2.2.2 加速度反应

如图3所示,结构随着高度的增加,加速度反应呈增大趋势,这与实际是相符的;结构刚度较弱方向

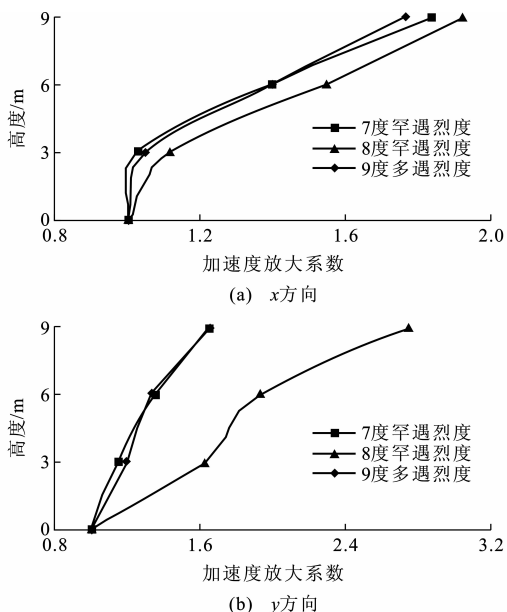


图3 El Centro波下的模型加速度反应

Fig. 3 Acceleration Responses of Model Under El Centro Wave

Under El Centro Wave

(y方向)的加速度反应大于较强方向(x方向)的;随着地震烈度的增加,结构的加速度反应变大,尤其是刚度较弱方向,加速度反应增大非常明显。

2.2.3 位移反应

如图4所示,随着高度的增加,位移反应呈增大趋势,且结构以剪切变形为主;结构随着地震烈度的增大,位移反应呈增大趋势;当地震烈度较小时,结构刚度强弱方向的位移反应基本相同,但当烈度达到8度罕遇烈度时,结构刚度较小方向的位移反应明显大于刚度较强方向的位移反应,并且,通过对结构4个角点的位移反应进行分析,发现结构扭转非常小。

3 模型结构的有限元分析

在进行模型振动台试验的同时,用结构有限元分析程序 SAP2000 对模型进行时程分析,并把计算结果与试验结果进行比较。

3.1 有限元模型的简化

由于结构的复合墙体是通过自攻螺钉将墙面板和结构龙骨连接起来,复合墙体模型的建立会比较复杂,并且计算结果的误差也会比较大,所以笔者通过将墙面板(包括 OSB 板和石膏板)等效成两端铰支的斜拉压杆来建立有限元模型^[4],如图5所示。

等效拉压杆的抗压刚度 EA 的计算公式^[5]为

$$EA = \frac{1}{2}(H^2 + L^2)^{\frac{3}{2}} \left[\frac{HL}{Gt} + \right.$$

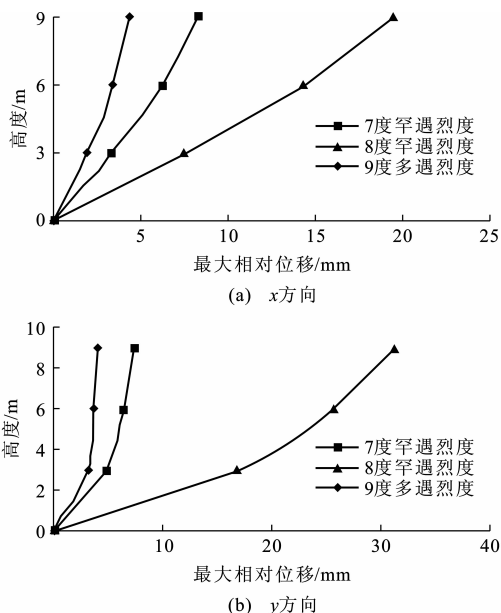


图4 El Centro波下的模型位移反应

Fig. 4 Displacement Responses of Model Under El Centro Wave

Under El Centro Wave

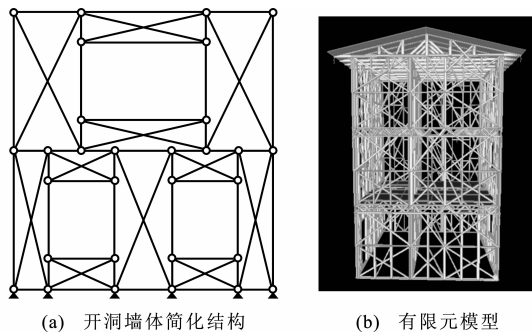


图5 墙体简化结构及有限元模型

Fig. 5 Simplified Wall Structure and Finite Element Model

$$(HL + L^2) \frac{2S_0}{n_N f_N} \Big]^{-1} \quad (1)$$

式中: E 为等效拉压杆的弹性模量; A 为等效拉压杆的横截面面积; H 为墙面板与荷载方向垂直边的长度; L 为墙面板与荷载方向平行边的长度; t 为墙面板厚度; G 为墙面板的剪切弹性系数; S_0 为自攻螺钉的水平滑移量; n_N 为墙面板与荷载平行方向的自攻螺钉数目; f_N 为自攻螺钉连接件的抗剪强度设计值。

式(1)可以用来计算 OSB 板和石膏板的等效拉压刚度。试验中可以发现石膏板上的自攻螺钉在地震作用下出现松动,甚至脱落,使得结构刚度出现下降,应对石膏板的等效斜杆抗压刚度乘以折减系数 0.8,所以有限元模型中的每根等效拉压杆的抗压刚度 $EA = EA_{OSB} + 0.8EA_{PB}$, A_{OSB} 为 OSB 板的等效拉压杆横截面面积, A_{PB} 为石膏板的等效拉压杆横截面面积。

3.2 自振周期与频率

模型使用两端铰支的等效斜拉杆来代替墙面板,虽然可以较好地等效墙体的平面内抗侧刚度,但却忽视了墙面板对墙体龙骨平面外的约束作用,计算所得频率与试验值相比较小^[6-13],所以本文中用来计算结构频率的模型并没有将等效斜拉杆设置为两端铰接,而是使用普通的框架连接,用 SAP2000 程序计算的模型结构自振周期与频率见表 1。

表 1 模型结构的自振周期与频率

Tab. 1 Natural Periods and Frequencies of Model Structure

阶次	1	2	3	4	5
周期/s	0.210	0.198	0.146	0.088	0.084
频率/Hz	4.754	5.048	6.385	11.391	11.859

3.3 位移反应

有限元计算和试验所得的位移反应包络图比较如图 6 所示。在单向上海人工波作用下,模型计算所得的位移反应和试验值吻合情况较好,相对误差在 10% 以内,说明等效拉压杆能较好地模拟墙体的抗侧刚度;在 El Centro 波和唐山波作用下,模型计算所得的位移反应和试验值基本一致,但由于结构较为复杂,误差比单向波作用下大。总体上分析,模型计算所得的位移反应和试验值是基本吻合的。

4 结 语

(1)从试验现象可以看出,墙体的开洞部位是结构的薄弱部位,在洞口两侧会出现较大的位移,这与试验中洞口处石膏板率先破坏的现象吻合,所以设计时要关注门窗部位的局部加强以及自攻螺钉连接的可靠度。

(2)墙面板除了对墙体抗侧刚度有较大的贡献,在平面外同样对结构骨架有着较强的约束作用,对结构刚度的大小起着不可忽视的作用,但目前对这方面的研究却比较少,希望今后能对结构的这种空间效应进行深入研究。

(3)由于条件限制,仅对三层冷弯薄壁结构在弹性阶段的地震反应做了一些研究,对于塑性阶段以及其他方面的性能,尚需更加深入的研究。

参考文献:

References:

[1] 周绪红,石 宇,周天华,等. 底层冷弯薄壁型钢结构住宅体系[J]. 建筑科学与工程学报,2005,22(2):1-14.
ZHOU Xu-hong, SHI Yu, ZHOU Tian-hua, et al.

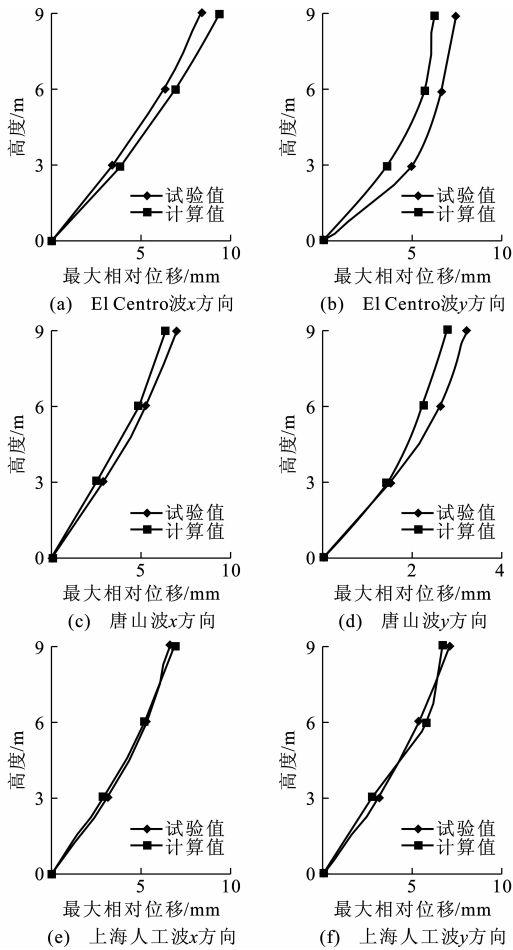


图 6 7 度罕遇烈度下有限元模型的位移反应

Fig. 6 Displacement Responses of Finite Element Model Under Seldom Earthquake of Intensity of Seven Degree

Cold-formed Steel Framing System of Low-rise Residential Building[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2005, 22(2): 1-14.

[2] 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-wall Steel Structures[S].
[3] 朱伯龙. 结构抗震试验[M]. 北京:地震出版社,1989. ZHU Bo-long. Structure Seismic Experiment [M]. Beijing: Earthquake Publishing House, 1989.
[4] 北京金土木软件技术有限公司, 中国建筑标准设计研究院. SAP 中文版使用指南[M]. 北京:人民交通出版社,2006. Beijing Civil King Software Technology Co., Ltd., China Institute of Building Standard Design and Research. SAP Chinese Edition Use Guide[M]. Beijing: China Communications Press, 2006.
[5] 聂少峰. 冷弯型钢立柱组合墙体抗剪承载力简化计算方法研究[D]. 西安:长安大学,2006. NIE Shao-feng. Research on Simplified Method of Calculation for Shear Resistance of Cold-formed Steel

- Stud Composed Wall[D]. Xi'an:Chang'an University, 2006.
- [6] 周绪红,李艳敏,石宇,等. 竖向荷载作用下冷弯薄壁型钢墙架柱的承载力[J]. 建筑科学与工程学报, 2006,23(3):7-13.
- ZHOU Xu-hong, LI Yan-min, SHI Yu, et al. Bearing Capacity of Cold-formed Thin-walled Steel Wall Stud Under Vertical Load[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2006,23(3):7-13.
- [7] 何保康,郭鹏,王彦敏,等. 高强冷弯型钢骨架墙体立柱轴压性能试验研究[J]. 西安建筑科技大学学报:自然科学版, 2008,40(4):567-573.
- HE Bao-kang, GUO Peng, WANG Yan-min, et al. Experimental Investigation on High Strength Cold-formed Steel Framing Wall Studs Under Axial[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology: Natural Science Edition, 2008, 40(4): 567-573.
- [8] 聂少锋,周天华,周绪红,等. 冷弯型钢组合墙体抗剪承载力简化计算方法研究[J]. 西安建筑科技大学学报:自然科学版, 2007,39(5):598-604.
- NIE Shao-feng, ZHOU Tian-hua, ZHOU Xu-hong, et al. Research on the Simplified Method for Calculating Shear Resistance of Cold-formed Steel Composite Wall[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology: Natural Science Edition, 2007, 39(5): 598-604.
- [9] 郭秉山,彭军,刘朝科. 梁腹板削弱式刚性钢框架抗震性能研究[J]. 西安科技大学学报, 2007, 27(3): 364-367.
- GUO Bing-shan, PENG Jun, LIU Chao-ke. Anti-seismic Performance Testing of New Beam-to-column Connections in Steel Frames[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2007, 27(3): 364-367.
- [10] 张淑云,白国良,朱佳宁,等. 钢筋混凝土框架异型节点抗震性能试验研究[J]. 西安科技大学学报, 2005,25(2):147-150.
- ZHANG Shu-yun, BAI Guo-liang, ZHU Jia-ning, et al. Experiment on Seismic Behavior of the Abnormal Exterior Joint of Reinforced Concrete Frame[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2005, 25(2): 147-150.
- [11] 周天华,何保康,周绪红,等. 高强冷弯薄壁型钢轴压长柱受力性能试验研究[J]. 建筑科学与工程学报, 2005,22(4):65-71.
- ZHOU Tian-hua, HE Bao-kang, ZHOU Xu-hong, et al. Experimental Research on Bearing Capacity of High-strength Cold-formed Thin-walled Steel Long Columns[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2005, 22(4): 65-71.
- [12] 秦士洪,丁智潮,何熊. 预应力型钢混凝土构件收缩徐变试验[J]. 中国公路学报, 2008, 21(4): 74-80.
- QIN Shi-hong, DING Zhi-chao, HE Xiong. Experiment on Shrinkage and Creep of Prestressed Steel Reinforced Concrete Member[J]. China Journal of Highway and Transport, 2008, 21(4): 74-80.
- [13] 钟亚军,周天华,何保康. 冷弯型钢房屋墙体立柱临界屈曲荷载能量解[J]. 长安大学学报:建筑与环境科学版, 2004, 21(1): 8-11.
- ZHONG Ya-jun, ZHOU Tian-hua, HE Bao-kang. Energy Method for Buckling Load of Wall Studs in Cold-formed Lower House[J]. Journal of Chang'an University: Arch & Envir Science Edition, 2004, 21(1): 8-11.

《工业建筑》2010 年征订通知

《工业建筑》由中国钢铁工业协会主管,中冶建筑研究总院有限公司主办,1964 年创刊;重点报道建筑设计、建筑结构、地基和基础、建筑材料、施工技术等方面的应用研究成果及开发技术,突出工业建筑、钢结构、鉴定加固技术等特点;优先报道国家或者省部科学基金资助项目和重大工程建设;内容丰富翔实,理论结合实际;适合土木工程界广大科研、设计、教学、施工等专业技术人员及高校师生阅读。

《工业建筑》为大 16 开本,96 页,每月 20 日出版,国内外公开发行。全国各地邮局均可订阅,邮发代号:2-825,也可直接汇款到本编辑部订阅。

《工业建筑》兼营广告,每年 8 月开始征订下一年广告,收费合理,具有一定规模,是展示企业形象的理想舞台。

地址:北京市海淀区西土城路 33 号

邮编:100088

E-mail:gyjz@chinajournal.net.cn

电话:(010)82227239(兼传真),(010)82227237/8043/8927(编辑),

(010)82227236(发行),(010)82227191/7677/7238/7239(广告)