

文章编号:1673-9469(2015)04-0063-06

doi:10.3969/j.issn.1673-9469.2015.04.014

某钢榫结构房屋地震模拟振动台试验研究

周年强^{1,2},施卫星¹,欧阳郁汀¹,陈兴华³

(1. 同济大学 土木工程学院结构工程与防灾研究所,上海 200092;2. 南京林业大学 土木工程学院,
江苏 南京 210037;3. 苏州宝狮窗业有限公司,江苏 苏州 215100)

摘要:钢榫连接的新型集成房屋榫卯节点受力复杂,很难通过理论计算和有限元软件分析来评估结构抗震性能。对苏州某公司设计、生产的一栋单层钢榫结构集成房屋进行了足尺结构地震模拟台试验,通过对试验现象的观察和试验数据的分析,证实钢榫节点强度较高,连接可靠,在地震中无损伤,整体结构具有抵抗9级及以上大地震考验的能力,可以适用于高烈度地区。

关键词:钢榫结构;振动台试验;足尺结构试验

中图分类号:TU398.6

文献标识码:A

Shaking table test study of an integrated house with steel mortise – tenon connection

ZHOU Nian-qiang^{1,2}, SHI Wei-xing¹, OUYANG Yu-ting¹, CHEN Xing-hua³

(1. Research Institute of Structural Engineering and Disaster Reduction, College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. College of Civil Engineering of Nanjing forest University, Jiangsu Nanjing 21037, China;
3. Suzhou Porshseal UPVC Windows Co., Ltd., Jiangsu Suzhou 215100, China)

Abstract: As a new structural type, the integrated house with steel mortise – tenon connection has its characteristic technical superiority such as economical cost, simple design, modular production and construction. Involving complex structure stress and many difficulties in analyzing by traditional theories and FEM software, it is hard to define and assess seismic capacity of the buildings. So this paper consigned by a company in Suzhou studied the seismic behavior of integrated buildings by structural models with full scale on shaking table. Through simulated earthquake test on a shaking table, this paper analyzed the experiment data and phenomenon. The results proves that this type of composite joint had high strength and rigidity, and the house can resist 9 – magnitude earthquakes and is well suited to be deployed in earthquake stricken zones.

Key words: steel mortise – tenon structure; shaking – table test; full – scale structure test

钢榫连接是一种新型的钢结构连接形式,它借鉴了木结构的榫头连接形式,而又不显著降低连接部位的强度,并具有一定转动和延性特性。相比较传统的焊接和纯螺栓构造,具有设计简单,加工方便,现场施工强度低,可更换的特点。采用钢榫结构的集成房屋以传统的框架结构为设计依据,将钢构件与木板材相结合,是一种全新的建筑结构形式,如图1所示。目前国内尚未见到针对此类结构的动力试验的相关报道^[1-2],也没有针对钢榫结构集成房屋的设计标准和规范,针对集

成房屋的计算和设计仅有与钢结构和木结构相关的设计规范,考虑到该建筑中大量采用的套筒形式,极端情况下可能表现出高度非线性的特点,且木板材与钢构件的连接特点等因素都决定了钢榫结构的集成房屋采用传统的理论计算和软件分析是很难准确评估其抗震性能的。借助地震模拟振动台试验,可以较为真实地反映钢榫结构集成房屋在各类地震作用下的动力响应,进而研究其抗震性能。

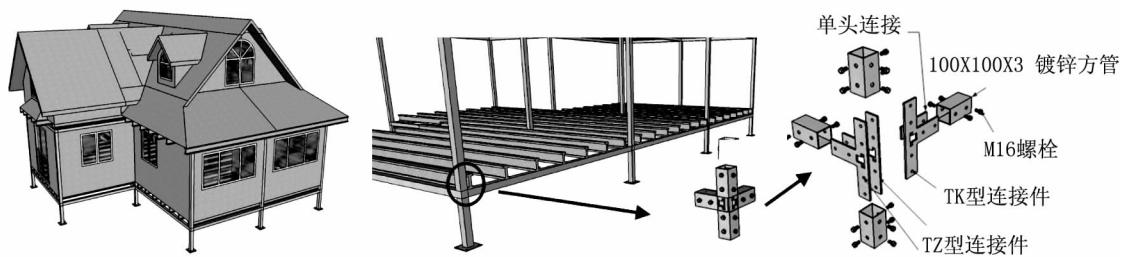


图1 钢椎集成房屋及钢椎连接构件图

Fig. 1 Integrated house with steel mortise-tenon connection and schematic diagram of steel mortise-tenon structure

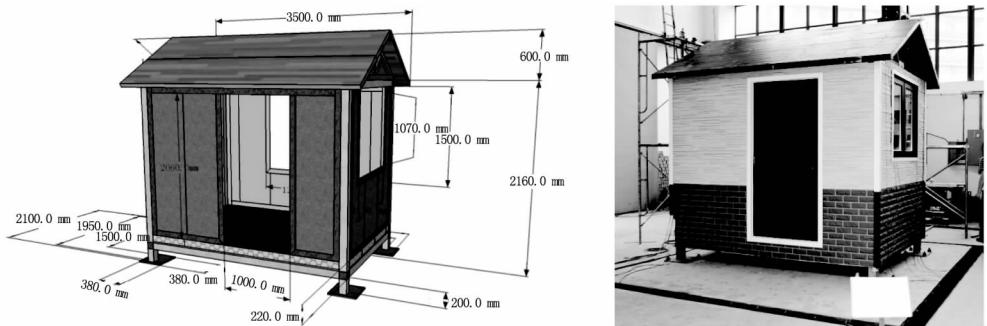


图2 试验对象及现场照片

Fig. 2 Test subject and photo of shake test specimen

1 试验对象及设备

1.1 试验对象

由苏州某公司提供的本次试验研究对象为一间 $3\ 000\text{ mm} \times 2\ 000\text{ mm} \times 2600\text{ mm}$ (长×宽×高)的钢椎结构集成足尺房屋(实为整栋房屋其中的一间),房屋具体尺寸如图2所示。

1.2 试验设备

本试验在同济大学土木工程防灾国家重点实验室进行,该实验室对模型结构的限高为8m,吊车最大吊重为15 t。MTS模拟地震振动台台面尺寸为 $4\text{ m} \times 4\text{ m}$,最大荷重为250 kN,可对试验对象进行X、Y、Z三方向六自由度的激振,激振类型可为简谐振动、冲击、地震激励等,振动台工作频率范围为 $0.1\sim50\text{ Hz}$,X、Y、Z方向的最大位移分别为 ± 100 、 ± 50 、 $\pm 50\text{ mm}$,X、Y、Z方向的最大速度分别为 $\pm 1\ 000$ 、 ± 600 、 $\pm 600\text{ mm/s}$,X、Y、Z方向的空台最大加速度分别为 ± 4.0 、 ± 2.0 、 $\pm 4.0\text{ g}$ 。数据采集采用MTS496数据采集系统,96通道,采样频率100 kHz,信号放大 $100\sim5000$ 倍,频响 $0\sim500\text{ Hz}$ 。加速度传感器采用频响范围为 $0.1\sim50\text{ Hz}$ 压电式加速度传感器,位移传感器采用拉线式位移传感器。采用应变片测量关键部位的应变

数值。

1.3 试验方法

由MTS模拟地震振动台施加各类型地震作用,根据地震反应评价结构的抗震性能。主要测试内容包括结构各部分的加速度反应、位移反应、台面输入加速度、关键部位应变等。

由于本次试验对象为足尺结构,因此各项相似系数均为 $1^{[6]}$,屋内地面固定钢板重量为12 kN($G=2\text{ m} \times 3\text{ m} \times 2\text{ kN/m}^2=12\text{ kN}$)模拟楼面荷载。

1.4 试验测点布置

本次试验主要采用三类传感器,分别为压电式加速度传感器,拉线式位移传感器和电阻应变传感器。分别监测结构主要部位的动力响应,并通过摄像机记录各试验工况的影像资料。测点布置示意图如图3所示。

1.5 试验工况

试验激励主要采用白噪声和天然地震记录,其中天然地震记录采用El-Centro波、SanFernando波、Chichi波和上海人工波按照7度、8度到9度的顺序进行试验,所对应的加速度峰值分别为0.10、0.20、0.40 g。试验后期,根据试验对象情况,增加了0.6、0.8、1.0 g加速度的地震模拟响应。

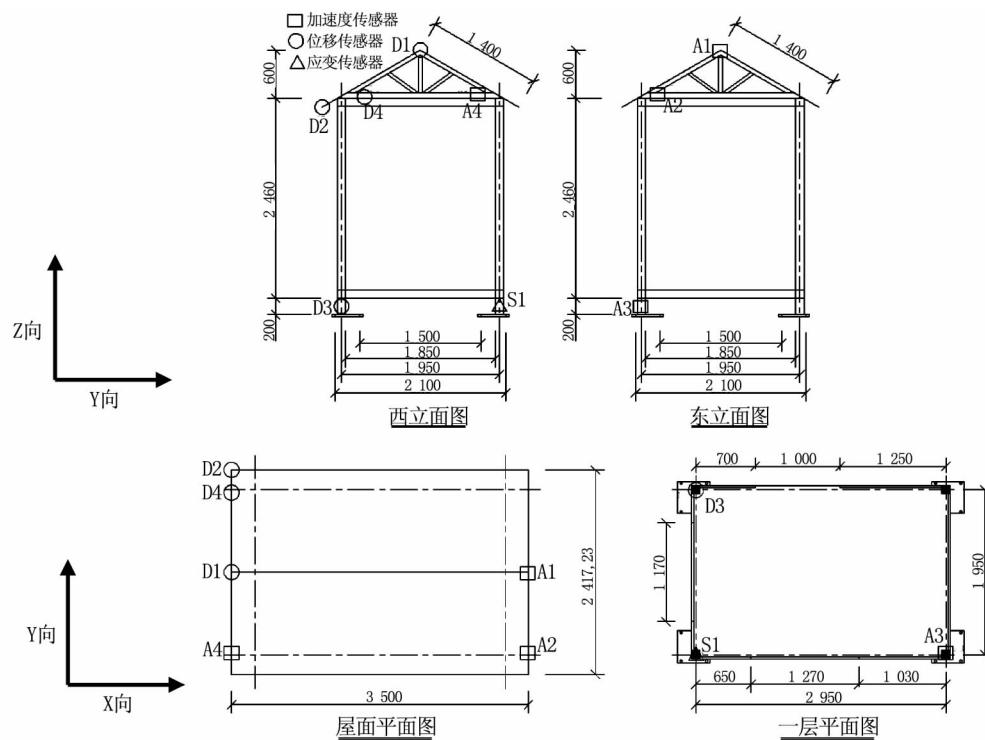


图3 试验测点布置示意图

Fig. 3 Sensor arrangement of testing point

El - Centro 波,为 1940 年 5 月 18 日美国 IMPERIAL 山谷地震记录,持时 53.73 s;最大加速度:南北方向 341.7 cm/s²,东西方向 210.1 cm/s²,竖直方向 206.3 cm/s²;场地土属Ⅱ~Ⅲ类,震级 6.7 级,震中距 11.5 km,属于近震,原始记录相当于 8.5 度地震。SanFernando 波,为 1971 年 2 月 9 日美国 SanFernando 地震记录,持续时间 49.39 s;最大加速度:南北方向为 137.86 cm/s²,东西方向为 238.83 cm/s²,竖直方向为 148.21 cm/s²;场地土属于Ⅱ~Ⅲ类,震级为 6.4 级,震中距 40.5 km,属于近震,原始记录相当于 8 度地震。Chichi 地震波,为 1999 年台湾 921 集集大地震记录。上海人工地震波 SHW2,该地震波为《上海建筑抗震设计规程》推荐的人工拟合的地震波。

1.6 试验步骤

试验加载工况按照 7 度、8 度和 9 度的顺序分三个阶段对模型结构进行模拟地震试验。在不同水准地震波输入前后,对模型进行白噪声扫频,测量结构的自振频率、振型和阻尼比等动力特征参数。在进行每个试验阶段的地震试验时,由台面依次输入 ElCentro 波、SanFernando 波、ChiChi 波和 SHW2 波。地震波持续时间为原始记录的长度,输入方向分为 X 单向输入和三向输入,三向输入时各

加速速度峰值比为 X : Y : Z = 1 : 0.85 : 0.65。各水准地震下,台面输入加速度峰值均按有关规范的规定进行调整,以模拟不同水准地震作用。

2 试验结果分析

2.1 试验现象

由于由企业提供的房屋外表面附有装饰层,试验进行中无法直接看到墙体、柱节点等结构部位在试验过程中出现的损伤情况,但经仔细观察其试验现象主要如下:

(1) 试验过程中,随着地震加速度增大,历经各工况,房屋外观整体始终无明显变形、散架等现象发生。

(2) 房屋的局部部件无破坏。地震加速度达 1.0 g 后,门窗依旧完好,并可以正常开启和闭合,包括门窗套角等应力集中处没有脱胶、开裂或松动等现象发生。

(3) 试验过程中,没有发现有固体样碎渣、粉末等掉落,证明房屋材料没有破碎现象发生,但大震过程有液体从房屋四边墙体滴落,经过确认液体是运输过程中,房屋墙体吸收的雨水,分析认为雨水对房屋的抗震性能无影响。

表 1 结构自振周期及阻尼比
Tab. 1 Natural periods and damping ratios of structural model

工况表	X 向				Y 向				备注
	一阶		二阶		一阶		二阶		
	频率/Hz	阻尼/%	频率/Hz	阻尼/%	频率/Hz	阻尼/%	频率/Hz	阻尼/%	
1	15.19	6.46	31.46	3.54	13.80	6.27	20.81	4.70	初始状态
9	14.71	7.84	31.04	4.89	13.55	6.38	20.55	5.30	历经 7 度基本地震
17	14.83	7.25	30.87	4.08	13.48	6.45	20.44	4.79	历经 7 度罕遇地震
25	14.36	7.52	29.75	5.68	13.29	6.34	20.34	5.30	历经 8 度罕遇地震
37	13.38	8.57	28.20	4.95	11.23	8.44	17.65	5.89	历经 1.0 g 地震加速度
最大改变幅度	-12%	33%	-10%	60%	-19%	35%	-15%	25%	

(4) 在震动加速度达 0.8 g 时, 观察到室内放置的一把椅子倾倒, 说明椅子受到了由房屋地板传递来的地震作用力十分强烈。

(5) 试验结束拆除装饰层后, 未发现结构件有明显变形。

2.2 自振频率和阻尼比

在白噪声作用下, 得到结构各测点加速度传感器测试信号, 采用 NExT - ITD 法、有理式多项式法等多种模态分析技术进行分析和辨识, 得到结构的自振频率、阻尼比和振型等动力特性^[3-4], 如表 1 所示。虽然 X 向开有门窗洞口, 但结构在 X 方向的尺寸比 Y 向大, 即结构在绕 Y 轴的抗弯刚度强于绕 X 轴, 整体表现出结构的 X 方向频率较 Y 向略大。其中, 结构的 X 向一阶平动的自频率在 13.38 ~ 15.19 Hz 之间, Y 向一阶平动频率在 11.23 ~ 13.8 Hz 之间。各阶频率随历经各级地震后呈缓慢下降趋势, 尤其是在 0.1 g 地震加速度后频率下降最为显著。

阻尼比是反映结构物耗能性能的重要指标, 从数据分析看, 各项阻尼比变化较明显, 普遍随地震破坏数值持续增加, 提示结构内部有轻微损伤发生。

2.3 加速度反应

结构的加速度反应与地震波频谱特征、结构的自振周期以及结构的阻尼比有关^[5]。图 4 在 X 单向地震作用下, 结构不同高处的加速度放大系数。从图中可以看出, 同一工况下 1 楼楼顶反应最大, 底部最小。同一峰值下, 总是 SanFernando 波的反应最小, 而 EL - Centro 波和上海人工波的反应均较大, 由地震动波谱中可以得知, EL - centro 波和 SHW2 波主要能量涵盖了 1 ~ 15 Hz 的范

围, 而 SanFernando 波能量主要集中在 0 ~ 3 Hz 范围, 而结构的自振频率为 11 ~ 15 Hz, 当结构的自振周期和地震波的主周期比较接近时, 结构将产生类共振现象^[5]。

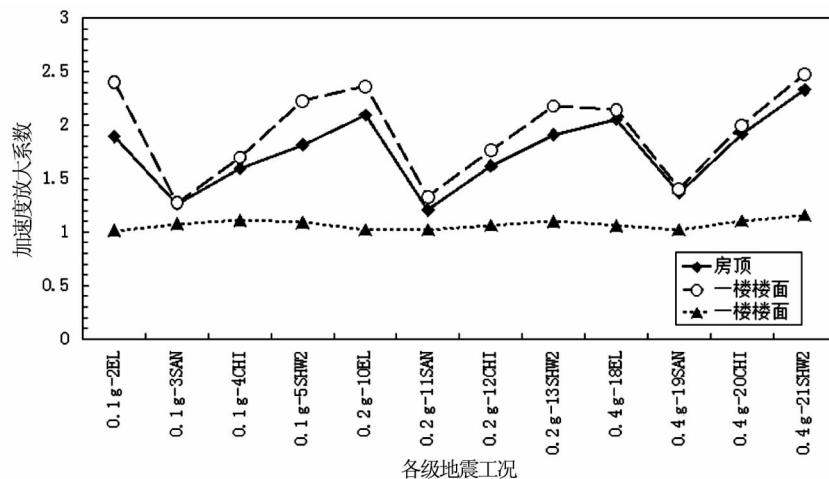
一般来说, 随着地震强度的增加, 结构出现一定程度的破坏后, 结构刚度逐渐退化、阻尼比增大, 动力放大系数会逐渐降低。但本次试验中, 随着地震动强度的增大, 各点动力放大系数并未降低。处于较低高度的一楼地面的数值甚至后来略有增加。由此说明结构随历经较大震动, 但未显著破坏。

2.4 位移反应

图 6 为各测点相对于台面的最大位移。从图中可以看出: 在 0.4 g 加速度前, 结构基本保持整体稳定; 在 0.6 g 后层间变形显著增加; 当地震加速度为 1.0 g 时, 结构的最大位移反应峰值小于 20 mm, 即此时结构的层间位移变形小于 1/150, 没有超过 GB50011 - 2010 中对多高层钢结构弹性层间位移角限值的规定。

2.5 墙骨柱应力

随地震强度增大, 结构柱脚位置对应的 X、Y 应变均增大, 且 X 方向结构的应变反应峰值大于 Y 方向。根据钢材型号 Q235, 其弹性模量为 $2.06 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$, 屈服强度为 235 MPa, 则屈服应变为 $1140 \mu\epsilon$, 从表 2、表 3 中可以看出最大应变仅 $129 \mu\epsilon$, 大大小于屈服应变, 证明柱角部件仍旧处于弹性工作阶段。由于四根柱角是整个房屋最重要的受力部位, 负责承担竖向重力、竖向地震作用, 以及传递水平地震荷载的工作, 它在试验结束后, 仍处于弹性工作阶段, 说明结构能够经受地震加速度达到 1.0 g 的地震影响。



备注: EL指EL-centro波, SAN指SanFernando, CHI指chichi波(下同)。

图4 (0.1~0.4 g) X单向地震作用下各工况的加速度放大系数

Fig. 4 (0.1~0.4 g) acceleration ratio in X waves in tests

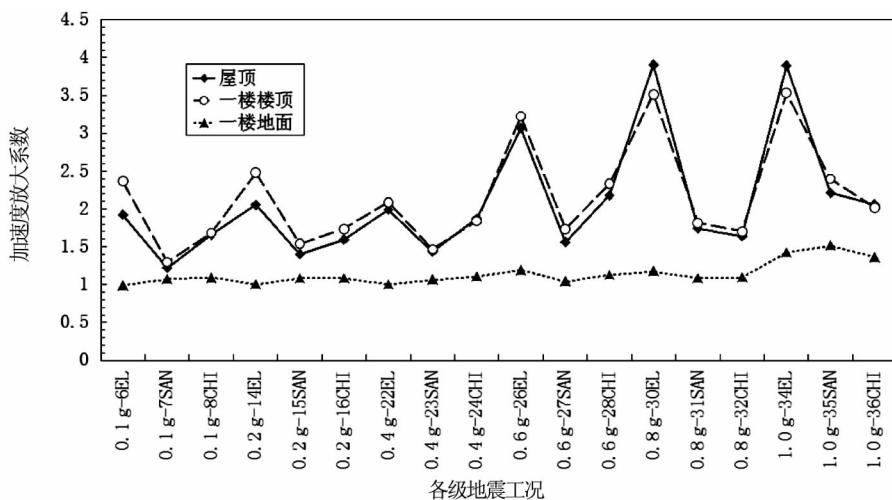


图5 (0.1~1.0 g) XYZ三向地震作用下各工况的X向加速度放大系数

Fig. 5 (0.1~1.0 g) acceleration ratio in XYZ waves in tests

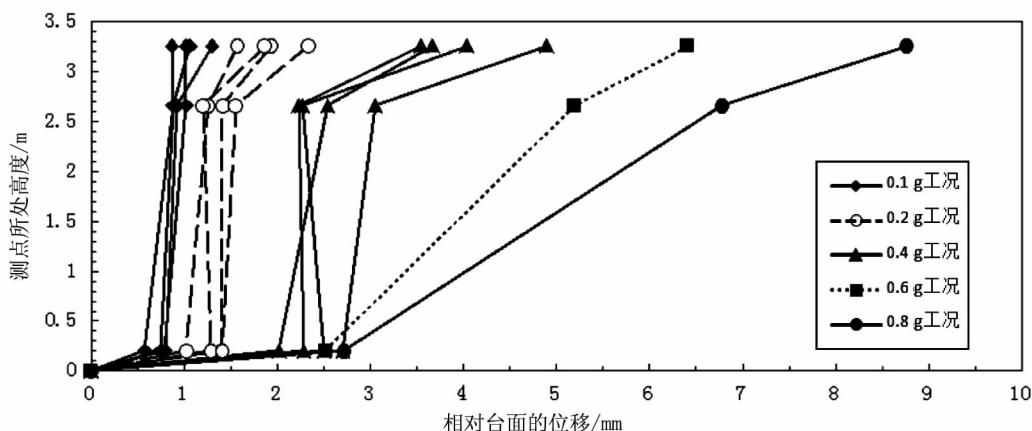


图6 点相对于台面的位移最大值

Fig. 6 Maximum drift of point to plat in tests

表 2 X 单向地震作用下柱脚部位应变反应峰值/ $\mu\epsilon$
Tab. 2 Maximum strain of column base in X waves

加速度 大小方向	0.1 g - X 单向						0.2 g - X 单向						0.4 g - X 单向						备注
	2EL	3SAN	4CHI	5SHW2	10EL	11SAN	12CHI	13SHW2	18EL	19SAN	20CHI	21SHW2							
传感器	101	5	4	5	5	9	7	9	9	30	15	22	31	柱脚部位	X 向应变				
编号	102	2	2	3	3	3	4	5	8	7	6	11	柱脚部位	Y 向应变					

表 3 XYZ 三向地震作用下柱脚部位应变反应峰值/ $\mu\epsilon$
Tab. 3 Maximum strain of column base in XYZ waves

加速度 大小方向	0.1 g - XYZ 三向						0.2 g - XYZ 三向						0.4 g - XYZ 三向						
	6EL	7SAN	8CHI	14EL	15SAN	16CHI	22EL	23SAN	24CHI										
传感器	101	7	5	6	13	11	12	26	25	25									
编号	102	5	5	5	10	9	8	23	15	16									
加速度 大小方向	0.6 g - XYZ 三向						0.8 g - XYZ 三向						1.0 g - XYZ 三向						
	26EL	27SAN	28CHI	30EL	31SAN	32CHI	34EL	35SAN	36CHI										
传感器	101	75	44	54	120	64	96	129	95	113									
编号	102	28	32	34	45	46	46	50	73	80									

2.6 结构的抗震能力评估

以上对钢樁结构各种地震反应的分析表明:在历经各级地震后,房屋的外观基本完好,无明显破损;房屋的结构主频出现了 12~19% 的下降,考虑到结构主体仍然完好,且最主要受力部位仍处于弹性阶段,判断主频的下降是由于结构的连接部位出现了松动导致,不影响房屋的正常使用。对试验数据的分析表明:房屋结构的刚度较大,其 X 向和 Y 向基频约为 13~15 Hz(初始状态),Z 向约 47 Hz,较普通房屋高。避开了大多数地震的能量最集中的低频部分,房屋本身能有效抵抗地震带来的影响。房屋在试验中的各项性能指标均处于规范限值以内,满足规范要求。

综上所述,本研究认为与本试验对象类似的钢樁结构集成房屋能够满足我国规范的 8 度抗震设防要求。

3 结论

1)作为结构主要特点的钢樁连接部位在地震中保持完整,震后检查外观完好,无破损和残余变形,数据分析显示所有接触件均处于弹性变形范围,证明该连接形式是安全可靠的,甚至富有余量。

2)该足尺“单层钢樁结构集成房屋”可以有效抵御 1.0 g 地震加速度的破坏,并整体完好无损。

作为整栋大房屋的一个单间,本次试验房屋的结论可以作为衡量整栋房屋的抗震性能的参考。

3)基于地震发生的概率和经济性的考量,建议生产单位可以适当削减材料用量,在有效降低房屋建造成本的同时而不损失安全性。

4)考虑地震对房屋内部设施的影响,建议使用减震隔震新技术,如通过橡胶支座、阻尼器等装置隔离、消耗地震能量,有效降低地震发生时对房屋内部人员和家具等设施的影响。

参考文献:

- [1]吕西林,程海江,卢文胜,等.两层轻型木结构足尺房屋模型模拟地震振动台试验研究[J].土木工程学报,2007(10):41~49.
- [2]薛建阳,赵鸿铁,张鹏程.中国古建筑木结构模型的振动台试验研究[J].土木工程学报,2004(6):6~11.
- [3]王济,胡晓.MATLAB 在振动信号处理中的应用[M].北京:中国水利出版社,2006.
- [4]曹树谦,张文德,萧龙翔.振动结构模态分析—理论、实验与应用[M].天津:天津大学出版社,2001.
- [5]ROY R,CRAIG J R,常岭,等.结构动力学[M].北京:人民交通出版社,1996.
- [6]杨树标,李荣华,刘建平,等.振动台试验模型和原型相似关系的理论研究[J].河北工程大学学报:自然科学版,2007,24(1):8~11.

(特约编辑 李军)