



北京地区典型砖木结构农宅抗震加固性能研究

王满生¹, 赵晓敏¹, 纪晓东², 赵作周²

(1. 北京市房地产科学技术研究所, 北京 100021;

2. 清华大学土木工程系, 土木工程安全与耐久教育部重点实验室, 北京 100084)

摘要:根据北京地区农村住宅调研结果,选取最典型的砖木(前檐砖柱支撑)结构,进行了加固前后的振动台试验。针对北京地区农村住宅砖木结构(砖柱支撑)未加固模型的振动台试验结果,提出了抗震加固措施,包括:加设钢筋混凝土窗框,增大前纵墙的抗侧刚度;采用水泥砂浆面层加固两面山墙、砖柱和窗下墙,提高墙体的承载和变形能力;加设钢圈梁,提高结构的整体牢固性。分析了模型加固前后振动台试验的损伤情况、频率和阻尼、加速度动力系数、位移和滞回曲线等结构动力特性参数。上述加固措施显著提高了此类砖木结构农宅的抗震能力,加固模型达到了“小震不坏、中震可修、大震不倒”的抗震设防目标。

关键词:砖木结构、振动台试验、抗震性能、抗震加固

中图分类号: TU361 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2015)06-0062-08

Earthquake resistant behavior on seismic strengthening of typical rural brick-wood structure in Beijing

Wang Mansheng¹, Zhao Xiaomin¹, Ji Xiaodong², Zhao Zuozhou²

(1. Beijing Institute of Real Estate Science and Technology, Beijing 100021 P. R. China; 2. Key Laboratory of Civil Engineering Safety and Durability of China Education Ministry, Department of Civil Engineering,

Tsinghua University, Beijing 100084 P. R. China)

Abstract: Comparison of resistant behavior was made between two kinds of seismic strengthening methods for the single-story brick-wood structure with brick columns representative of existing rural buildings in Beijing, through shaking table tests on large-scale models. According to the seismic damages of unreinforced model test, the seismic strengthening measures were proposed, which included: (1) addition of a concrete window frame to increase the lateral stiffness of front longitudinal wall, (2) strengthening the walls, brick columns and under-window walls by using cement mortar to increase the carrying and deformation capacity, (3) addition steel ring beam to enhance the robustness of the structure. The results of testing damage and the dynamic characteristics parameters, such as, dynamic frequency, structural damping, acceleration dynamic coefficient, hysteresis curve etc., showed that the reinforcement measures significantly increased the seismic resistance of this kind of brick-wood structure. At same time, the reinforcement measures could achieve the seismic design target of “operational under minor earthquakes,

收稿日期: 2015-07-30

基金项目:北京市科委课题(D141100002614002);北京市财政资助(PXM2010—161102—096238)

作者简介:王满生(1972-),男,博士,教授级高工,主要从事地震工程研究,(E-mail)moonwms@sohu.com.

Received: 2015-07-30

Foundation item: The Key Project Supported by Beijing Municipal Commission of Science(No. D141100002614002); The Project Supported by Beijing Finance (No. PXM2010—161102—096238)

Author brief: Wang Mansheng (1972-), PhD, main research interest: earthquake engineering, (E-mail) moonwms@sohu.com.

repairable damage under design basis earthquakes, and collapse prevention under rare earthquakes.”

Key words: brick-wood structure, shaking table test; seismic performance; seismic reinforcement

近年来,汶川地震和玉树地震等频发的地震给农村既有住宅导致灾难性破坏,也给了人们很大的警示与教训^[1-2]。北京地区地处燕山地震带与华北平原中部地震带的交汇处,紧邻汾渭地震带和郯庐深大断裂地震带,是一个地震多发区,历史上曾遭受过多次强烈地震的破坏和影响,大部分地区属于8度抗震设防。地震危险是北京建设发展中必须考虑的一个重要因素。北京农村住宅调研结果^[3-4]指出,北京农村的民宅均为自建房且多为单层砖砌体结构,建国以来一直没有被纳入政府的监管体系中。受经济条件的限制和农村传统风俗、建筑习惯的影响,加之农居建设法律法规和技术标准不健全,总体来看,北京农宅抗震设防状况令人担忧。北京地区既有农宅大部分为单层砖砌体结构,对砖砌体结构,利用振动台试验或低周往复荷载试验等来分析砌体结构的整体抗震性能,相关文献^[5-15]中有所涉及,但是针对农村单层住宅结构进行大比例尺寸模型的振动台试验抗震性能的相关研究较少^[10-12]。

根据北京农村住宅调研结果^[3-4],北京农宅共有

3类,一类为砖木结构(砖柱)。这类住宅多建造于20世纪80~90年代,双坡顶单层建筑,3~6开间,4开间居多,砖木结构,山墙为370 mm厚砖墙,后纵墙为240 mm或370 mm厚砖墙,一般不开门窗,前纵墙的门窗洞口大。木屋架(少量为钢屋架)的一端支承在后纵墙上,一端支承在前纵墙的木柱上,或支承在前纵墙的砖柱上。山墙为硬山搁檩。墙体与砖柱采用白灰砂浆或混合砂浆砌筑。这类农宅约占北京市现有农宅的70%左右。这类农宅的特点是前、后纵墙的抗侧刚度悬殊,没有任何抗震构造措施,抗震能力低。本文研究分析了砖木结构(前檐砖柱支撑)加固前后模型的振动台试验数据,通过对试验结果的对比分析,研究抗震加固措施的有效性与加固效果。

1 试验模型设计

1.1 未加固模型

未加固模型尺寸设计如图1所示。其平面尺寸为4.09 m×5.86 m,屋脊高度3.38 m,檐口高度

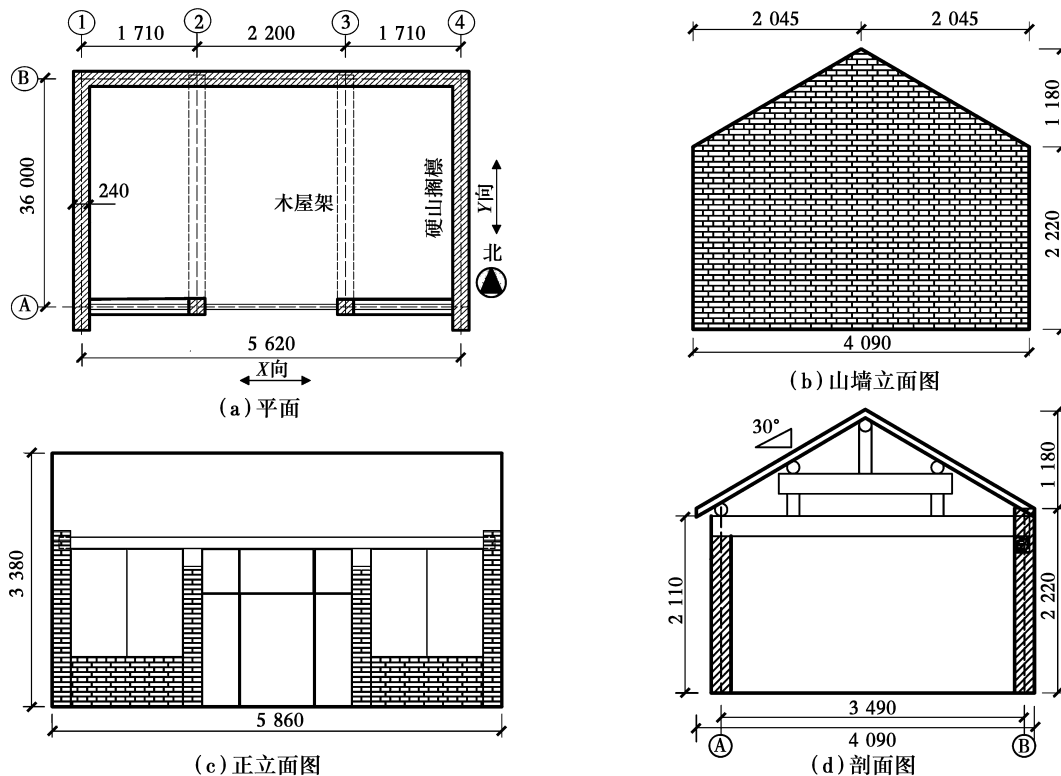


图1 未加固模型设计

Fig. 1 The initial model design

2.2 m, 外墙厚均为 240 mm, 前檐砖柱平面尺寸为 240 mm × 240 mm。前纵墙设置木门框和木窗框。墙体、砖柱均采用 MU7.5 的粘土砖砌筑, 粘土砖的尺寸为 240 mm × 115 mm × 53 mm, 砌筑砂浆为泥浆。屋盖采用木屋架、木檩条和木望板, 其中木屋架托梁直接搁置在后纵墙上和前檐砖柱顶部, 山墙采用硬山搁檩, 屋架木托梁、檩条与砖墙和砖柱没有拉结措施。

1.2 抗震加固模型制作

根据前期研究, 针对砖木结构农宅的结构特点, 提出了一系列的抗震加固措施, 并进行了一系列的抗震试验研究^[10-14]。其中王满生等^[10]对砖木结构(前檐木柱支撑的情况)的抗震性能进行了研究, 通过单层 3 开间木柱支撑砖木结构原型进行了振动台试验, 分析了该结构的抗震能力及该类型房屋的抗震薄弱点, 为该类型农宅的抗震加固方案提供依据; 纪晓东等^[11]对砖木结构(前檐砖柱支撑的情况)的未加固以及采用增加钢门窗框和钢板圈梁等加固措施模型的抗震性能对比研究; 杨威等^[12]对砖木结构(前檐砖柱支撑的情况)的未加固模型抗震性能进行了研究, 通过单层 3 开间砖柱支撑砖木结构振动台试验, 得出该类型农宅的抗震性能, 为加固措施的制定提供依据。主要针对北京地区砖木结构农宅(前檐砖柱支撑)提出采用混凝土窗框、水泥砂浆单面加固等加固措施进行振动台实验研究, 并与未加固模型进行抗震性能对比分析。本文中的抗震加固振动台模型尺寸与未加固模型相同, 采用了如下主要的抗震加固措施:

1) 在原窗框洞口加设钢筋混凝土窗框, 并与四周的墙体、砖柱、木卧檩加强拉接。钢筋混凝土窗框宽度为 80 mm, 厚度同墙同厚。在窗框左右两边分别布设 3 根 Φ10 穿墙钢拉杆, 分别与山墙和砖柱连接, 在窗框上下端分别布设 2 根 Φ10 钢拉杆, 与卧檩和窗下墙连接。

2) 两面山墙采用水泥砂浆面层单面加固。分层抹水泥砂浆面层, 水泥砂浆强度等级为 M5, 厚度为 20 mm。

3) 钢板圈梁的钢板厚 6 mm、高 100 mm, 设置穿墙拉结螺杆@800 mm, 将钢板与砖墙固定。后纵墙上的钢板圈梁与木托梁同高, 钢板圈梁在山墙前檐口处通过钢筋拉杆和 U 形卡与卧檩连接, 前檐两根卧檩之间采用钢钎钉连接。两端山墙及后纵墙的

钢板与卧檩形成闭合圈梁。此外, 通过钢筋拉杆和圆形卡加强后纵墙上木托梁端部与钢板圈梁的拉结, 防止木托梁拔出。图 2 所示为抗震加固模型制作的照片。



图 2 抗震加固模型照片

Fig. 2 The strengthened model

2.3 加载制度

未加固模型、抗震加固模型试验均按图 3 所示进行加载, 包括 X 向 8 度小震、X 向 8 度中震、Y 向 8 度中震和 X 向 8 度大震。

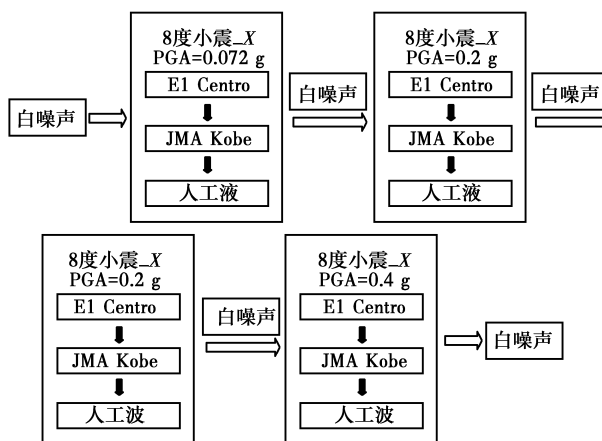


图 3 试验加载工况

Fig. 3 Testing loading conditions

试验中, 未加固模型 Y 向 8 度中震后, 模型已严重破坏, 拆除了加速度计和位移计, 未测到 X 向 8 度大震的地震反应数据, 仅记录了模型损伤和裂缝发展。X 向 8 度小震工况时实测台面加速度峰值为 0.073~0.076 g, X 向 8 度中震工况时实测台面加速度峰值为 0.17~0.22 g, Y 向 8 度中震工况时实测台面加速度峰值为 0.18~0.21 g。

抗震加固模型 X 向 8 度大震后, 还进行了 8 度 XY 双向 JMA Kobe 波加载, 为防止量测仪器被损

坏,此工况加载时拆除了加速度传感器,因此未记录此工况的试验数据。X向8度小震工况时实测台面加速度峰值为0.073~0.079 g,X向8度中震工况时实测台面加速度峰值为0.19~0.23 g,Y向8度中震工况时实测台面加速度峰值为0.22~0.24 g,X向8度大震工况时实测台面加速度峰值为0.39~0.42 g。

2 试验结果分析

2.1 未加固模型的损伤与裂缝发展

图4所示为各工况加载后观察到的裂缝分布。

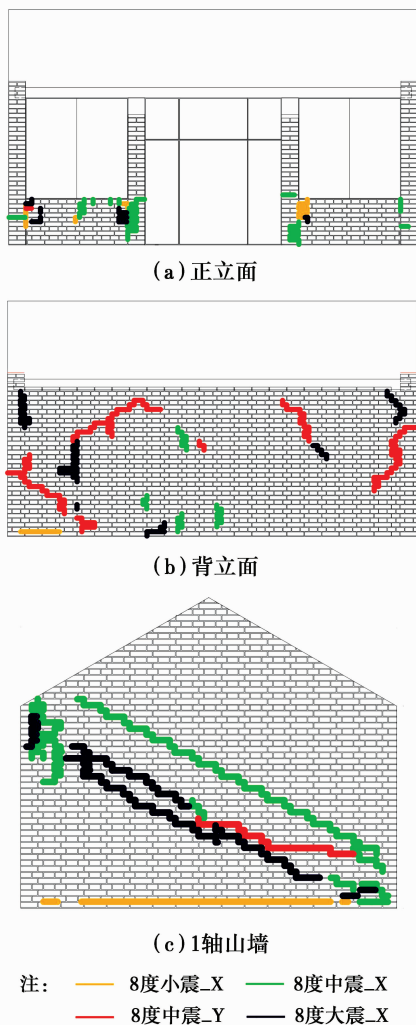


图4 未加固模型裂缝图

Fig. 4 The test cracking diagram of the initial model

根据文献[11]、[12]中对砖柱支撑的未加固模型振动台实验模型损伤情况的描述,主要表现在:1) X向8度小震下,山墙前檐口外闪,山墙底部出现水平裂缝,窗下墙与山墙连接交界处开裂,砖柱在窗下墙高度处出现斜裂缝,最大缝宽约0.2 mm。2) X向

8度中震下,山墙前檐口外闪剧烈,山墙出现贯穿的斜向裂缝;砖柱摇摆明显,砖柱上形成多条斜裂缝,在窗下墙高度处裂缝宽度达3 mm;后纵墙出现竖向裂缝。3) Y向8度中震下,后纵墙檐口中部平面外位移明显,后纵墙出现“八”字形和倒“八”字形斜向裂缝,部分斜向裂缝与两侧山墙上的裂缝连通。4) X向8度大震下,山墙前檐口外闪非常严重,砖柱剧烈摇摆;山墙上已有的斜向裂缝加宽,最大缝宽达8 mm,并出现新的斜向裂缝,裂缝两侧砖块发生局部错动,最大达10 mm,个别砖块表面受压剥落;砖柱在窗下墙高度破坏明显,部分砖块沿裂缝错动;木窗框和门框变形严重;木托梁在后纵墙支承处被拔出约10 mm。

3.2 抗震加固模型的损伤与裂缝发展

图5所示为各工况加载后观察到的裂缝分布。

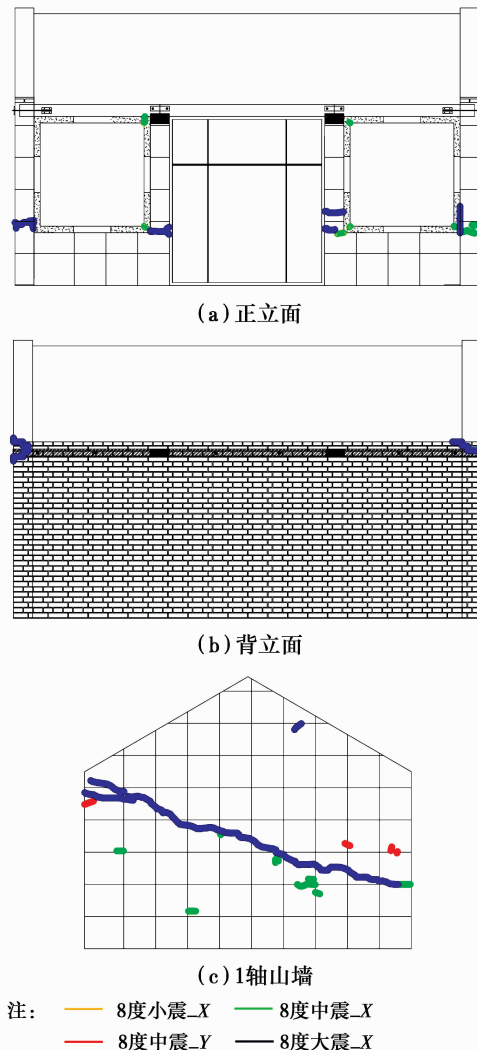


图5 抗震加固模型裂缝图

Fig. 5 The test cracking diagram of the strengthened model

各试验工况下抗震加固模型损伤情况:1)X 向 8 度小震下,结构反应很小,加载完成后未发现可见裂缝。2)X 向 8 度中震下,结构变形仍不明显;加载后在 4 轴山墙前端出一条裂缝。此外,在混凝土窗框角部和 1 轴山墙局部出现了一些细小裂缝,缝宽约 0.1 mm。3)Y 向 8 度中震下,后纵墙中部平面外位移小,后纵墙完好。结构整体裂缝略有发展。4)X 向 8 度大震下,JMA Kobe 和人工波加载时,结构反应加剧。山墙明显外闪,窗下墙高度以上部分变形较大;两侧山墙均出现一条由于外闪产生的斜向裂缝,从山墙前檐窗下墙顶高度处向山墙后檐钢圈梁位置延伸贯穿;砖柱变形明显,在窗下墙顶高度处出现水平贯通裂缝;钢筋混凝土窗框与山墙连接处出现少量竖向裂缝;后纵墙在两端钢圈梁约束处出现比较集中的裂缝。5)XY 双向 8 度大震下,模型山墙外闪明显,山墙绕斜向裂缝摇摆,砖柱变形明显,后纵墙檐口中中部平面外位移不明显。震后裂缝与 X 向 8 度大震时裂缝分布相同,部分裂缝的缝宽增大。

3.3 两模型损伤与裂缝发展对比

未加固模型、抗震加固模型试验结果对比表明:1)X 向 8 度小震时,抗震加固模型反应小,模型完好。2)X 向 8 度中震时,山墙外闪较未加固模型明显减小,结构仍基本完好;只是在 4 轴山墙前端出现一条裂缝。3)X 向 8 度大震时,山墙出现一条贯穿的斜向裂缝,砖柱在窗下墙顶高度出现水平裂缝,但裂缝宽度不大,对结构安全影响有限。4)Y 向 8 度中震加载时,后纵墙檐口中中部平面外变形明显得到控制,后纵墙基本完好。可见,抗震加固模型的刚度、承载力明显高于未加固模型,小震与中震水平激励下抗震加固模型的损伤轻微,大震下结构损伤可控,抗倒塌能力提高。

4 动力特性分析

4.1 频率与阻尼比

表 1 中比较了模型加固前后的频率和阻尼比参数。

表 1 模型的频率及阻尼比比较

Table1 the Comparison of model Frequency and damping

试验工况	X 向						Y 向					
	f / Hz		ξ / %		f 降低 / %		f / Hz		ξ / %		f 降低 / %	
	加固前	加固后	加固前	加固后	加固前	加固后	加固前	加固后	加固前	加固后	加固前	加固后
试验前	4.22	9.03	3.0	3.4	—	—	6.65	9.75	2.4	3.0		
X 向 8 度小震	3.97	8.81	3.9	3.7	5.9	2.4	6.43	9.63	2.5	3.7	3.3	1.2
X 向 8 度中震	3.01	7.59	4.8	5	28.7	16.0	5.59	9.09	5.1	3.7	15.9	6.8
Y 向 8 度中震	3.10	7.59	6.9	4.7	26.5	16.0	4.97	8.94	6.1	3.5	25.3	8.3
X 向 8 度大震		5.6		8.9		38.0		8.2		5.1		15.9

两模型的频率与阻尼比对比可知:1)抗震加固模型 X 向自振频率 9.03 Hz 比未加固模型 4.22 Hz 高 114%,Y 向自振频率 9.75 Hz 比未加固模型 6.65 Hz 高 46.6%。主要是由于砌筑采用水泥砂浆,且山墙与前檐表面抹水泥砂浆,并加设钢筋混凝土窗框与圈梁的抗震加固措施,显著地增大了结构的刚度。2)Y 向 8 度中震后,抗震加固模型的 X 向和 Y 向自振频率分别仅下降 16.0%和 8.3%,明显小于未加固模型频率下降的百分比,其中,X 向自振频率比未加固模型对应频率高 144.8%,Y 向自振频率比未加固模型对应频率高 79.9%。X 向 8 度大

震后,抗震加固模型 X 向和 Y 向自振频率分别下降 38.0%和 15.9%,仍然高于未加固模型的初始频率。

4.2 加速度反应

试验表明加固前后模型的加速度反应基本一致,X 向加载时,山墙后檐口的加速度反应与台面输入加速度相近,山墙前檐口和山墙尖的加速度反应明显大于台面输入加速度;Y 向加载时,两侧山墙檐口高度的加速度反应与台面输入加速度相近,后纵墙檐口中部的加速度反应明显大于台面输入加速度。图 6 所示为加固前后模型特征位置加速度反应

峰值及其动力系数。特征位置选取山墙尖部比较。

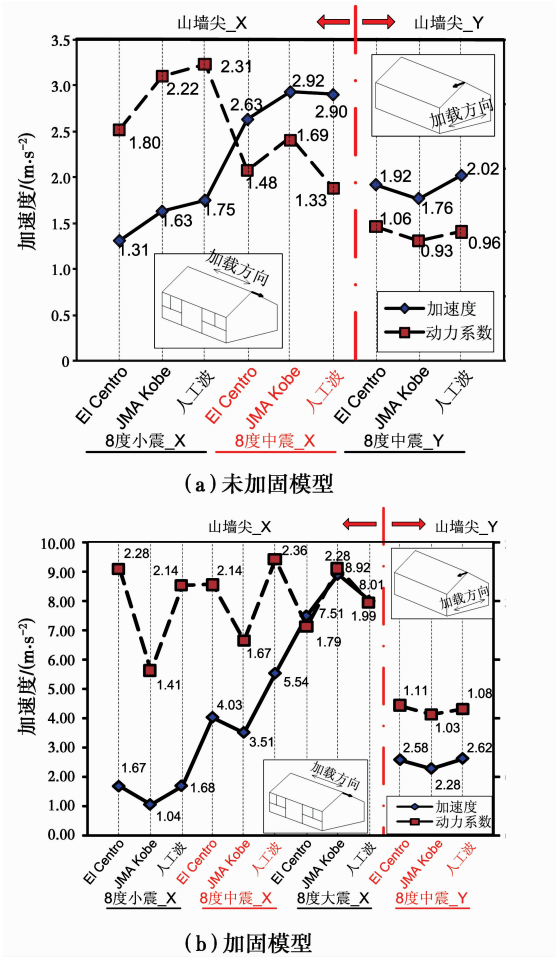


图6 模型加速度反应峰值及动力系数
Fig. 6 Model acceleration peak value and coefficient of dynamic force

图6比较可见,X向8度小震时,抗震加固模型与未加固模型的加速度反应差别不大;X向8度中震时,抗震加固模型的加速度反应明显高于未加固模型,但山墙尖的动力系数水平无明显变化,说明此时模型的刚度和承载力下降比较有限;Y向8度中震时,抗震加固模型与未加固模型的加速度反应差别不大。

4.3 位移反应

图7所示为未加固模型特征位置的侧向位移反应包络图,选取中震下的试验数据比较。

对比可知,X向加载时,抗震加固模型的山墙前檐口和山墙尖X向位移反应比未加固模型明显减小,Y向加载时,抗震加固模型位移反应也比未加固模型明显减小。但可以看出,X向加载时,抗震加固模型的山墙前檐口X向位移仍显著大于山墙后檐口X向位移;但屋脊纵剖面位移包络图的“尖山效

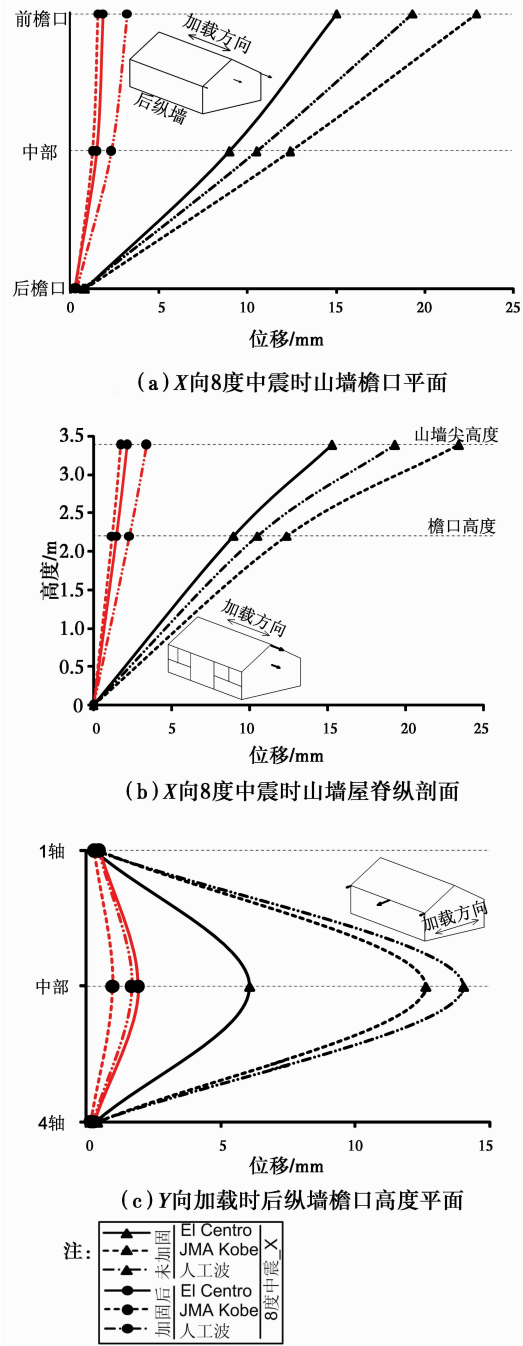


图7 模型位移反应包络图
Fig. 7 Model displacement envelope

应”并不明显。Y向加载时,由后纵墙檐口高度的平面外的位移曲线呈明显外凸形,两端位移很小,中部位移稍大。

4.4 加速度-位移滞回曲线

图8所示为抗震加固模型在X向8度小震和中震JMA Kobe波加载时,山墙尖X向的加速度-位移滞回曲线。抗震加固模型的滞回曲线平均斜率显著高于未加固模型,刚度提高明显。8度中震加载时,加固模型滞回曲线仍为线性,表明此时模型尚处

于弹性。对比可知,抗震加固模型的滞回曲线平均斜率显著高于未加固模型,刚度提高明显。

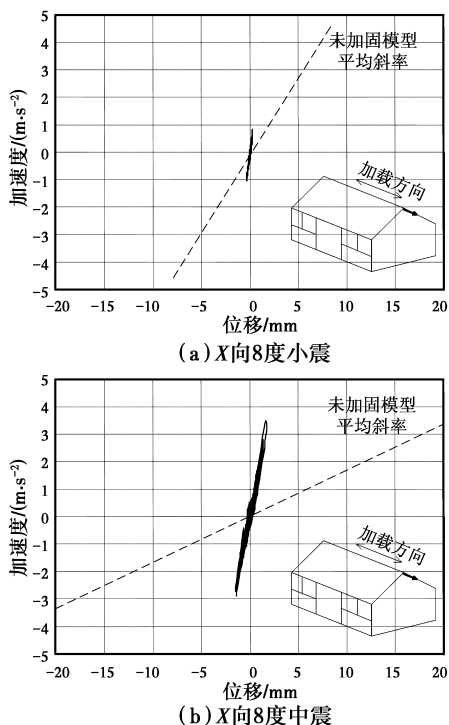


图 8 加速度-位移滞回曲线

Fig. 8 Acceleration-Displacement hysteresis curve

5 结 论

本文分析比较了砖木结构(前檐砖柱支撑)模型的加固前后振动台试验数据,通过分析比较了模型试验后的损伤破坏形式、加速度动力系数、位移、加速度-位移滞回曲线等动力参数,得出如下结论:

1)未加固模型在 8 度小震下开裂,8 度中震下损伤严重,8 度大震下濒于倒塌,不能满足《建筑抗震设计规范》GB 50011—2010^[16]规定的“小震不坏、中震可修、大震不倒”的抗震设防目标。

2)试验表明提出的抗震加固措施能够明显提高模型的抗侧刚度。模型 X 向自振频率提高了 114.0%,X 向加载时山墙前檐口和山墙尖平面外位移减小了约 85%;模型 Y 向自振频率提高了约 46.6%,Y 向加载时后纵墙檐口中部位移减小 82.6%。

3)钢板圈梁提高了模型的整体牢固性,X 向 8 度大震时模型变形已较大,但各构件拉结有效,模型损伤有限。

4)抗震加固模型在 8 度小震下完好,8 度中震

下损伤轻微,8 度大震下损伤不严重,满足《建筑抗震设计规范》GB 50011—2010^[16]规定的建筑结构“小震不坏,中震可修,大震不倒”的抗震设防目标。

5)建议的加固措施为北京地区农宅抗震加固提供了一种有效的加固措施。

参考文献:

- [1] 汶川地震建筑震害调查与灾后重建分析报告[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2008:3-188.
- [2] 王成. 玉树 4·14 地震建筑结构震害调查与分析[J]. 建筑结构,2010, 40(8):106-109.
- [3] Wang C. Investigation and analysis of building structure damage in Yushu earthquake [J], Building Structure, 2010,40 (8): 106-109 (in Chinese)
- [4] 王满生,杨威,陈俞,等. 北京地区农村住宅抗震性能调查研究[J],建筑结构. 2013,43(18):96-99.
- [5] Wang M S, Yang W, Chen Y, et al. Seismic performance research on rural building in Beijing [J]. Building Structure, 2013,43(18):96-99.
- [6] 钱稼茹,赵作周,纪晓东,等. 北京市既有农村住宅结构现状调查报告[R]. 北京,清华大学,2012:68-70.
- [7] 朱德才. 砖木结构振动台试验研究[J]. 山西建筑, 2008,34(33):88-89.
- [8] Zhu D C. The shaking table test in vestigation for brick-timber structure [J]. Shanxi Architecture, 2008, 34(33):88-89. (in Chinese)
- [9] 法冠喆,王全凤. 砖木结构抗震性能初探[J]. 福建建筑, 2010,140(2):52-53.
- [10] Fa G Z, Wang Q F. The post and panel structure earthquake resistance performance initially searches[J]. Fujian Architecture & Construction,2010, 140(2): 52-53. (in Chinese)
- [11] Shahzada K, Khan A N, Amr S, et al. Shake table test of confined brick masonry building [J]. Advanced Materials Research, 2011,255-260:689-693.
- [12] Bothara J K, Dhakal R P, Mander J B. Seismic performance of an unreinforced masonry building: An experimental investigation[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics,2010,39(1): 45-68
- [13] Michel C, Zapico B, Lestuzzi P, et al. Quantification of fundamental frequency drop for unreinforced masonry buildings from dynamic tests [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2011, 40 (11): 1283-1296.
- [14] 王满生,杨威,赵作周,等. 北京地区农村砖木结构振动台试验研究[J]. 地震工程与工程振动,2012,32(1):

- 128-133.
- Wang M S, Yang W, Zhao Z Z, et al. Shaking table test of a typical Beijing rural area brick-timber structure model [J]. *Earthquake Engineering and Vibration*, 2012, 32(1): 128-133. (in Chinese)
- [11] 纪晓东,马琦峰,赵作周,等. 北京市既有农村住宅砖木结构加固前后振动台试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2012, 33(11): 53-61.
- Ji X D, Ma Q F, Zhao Z Z, et al. Shaking table test study on seismic strengthening of brick-wood structures (with wood columns) representative of existing rural building in Beijing [J]. *Journal of Structural Building*, 2012, 33(11): 53-61 (in Chinese)
- [12] 杨威,王满生,陈俞,等. 农村典型砖砌体结构房屋抗震性能试验研究[J]. *地震工程与工程振动*, 2013, 33(2): 150-155.
- Yang W, Wang M S, Chen Y, et al. The experimental study on shaking table test of rural brick structure in Beijing [J]. *Earthquake Engineering and Vibration* 2013, 33(2): 150-155. (in Chinese)
- [13] 杨威,朱尔玉,郝节,等. 开洞砖砌体两种加固方法的抗震对比试验[J]. *北京交通大学学报*, 2013, 37(1): 62-66.
- Yang W, Zhu E Y, Hao J, et al. Seismic test research of two reinforcement methods about windowed brick masonry [J]. *Journal of Beijing Jiaotong University*, 2013, 37(1): 62-66 (in Chinese)
- [14] 王满生,刘辉. 钢筋网水泥砂浆加固砖墙的抗侧承载力和刚度的计算[J]. *工程抗震与加固改造*, 2011, 33(6): 116-120.
- Wang M S, Liu H. The computation of resistance to lateral load and lateral Stiffness about reinforced brick wall with steel mesh mortar [J]. *Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting*, 2011, 33(6): 116-120 (in Chinese)
- [15] 周铁钢,王庆霖,胡昕,等. 新疆砖木结构民居抗震试验研究与对策分析[J]. *世界地震工程*, 2008, 24(4): 120-124.
- Zhou T G, Wang Q L, Hu X, et al. Seismic test research and countermeasures analysis of brick-wood structural dwellings in Xinjiang [J]. *World Earthquake Engineering*, 2008, 24(4): 120-124. (in Chinese)
- [16] GB 50011—2010 建筑抗震设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2010.

(编辑 胡玲)