

村镇低层砖混商铺房屋振动台试验与有限元分析

周铁钢, 王宇恒, 赵世超

(西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055)

摘要: 村镇低层砖混商铺房屋由于施工粗糙、抗震构造措施不齐全, 往往在遭遇地震时破坏严重. 为了研究该类型房屋的抗震性能, 根据典型调查, 制作了 1/2 缩尺房屋模型, 进行模拟振动台试验. 试验表明: 模型的破坏集中于背立面底层墙体和两侧面墙体底部, 其中窗间墙及窗洞角部破坏最为严重; 8.5 度设防水准地震作用下, 一层窗间墙严重开裂, 其 X 向层间位移角增大明显; 模型基本满足 7 度设防“小震不坏、中震可修、大震不倒”的抗震设防要求, 但建议对 8 度及以上地区已建房屋的薄弱部位进行有效加固, 对新建房屋在背立面设置构造柱. 其次, 通过 ANSYS/LS-DYNA 有限元软件对原型结构进行了不同设计条件下的地震反应分析, 以便探索此类房屋能够满足抗震安全性能的基本设计要求. 结果表明: 提高砂浆强度能有效提高模型的抗震性能; 针对不同设防烈度地区应合理规定开洞率限值, 以避免过度削弱墙体; 构造柱能有效约束住墙体, 增强结构的整体性, 但应避免第二层背立面设置的构造柱刚度过大.

关键词: 村镇商铺房屋; 振动台试验; 有限元分析; 抗震设计

中图分类号: TU361 TU317.1

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2017)06-0796-08

Shaking table test and numerical study on rural low brick-concrete storefront

ZHOU Tiegang, WANG Yuheng, ZHAO Shichao

(School of and Engineering Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China)

Abstract: The rural low brick concrete storefront was often damaged severely in earthquake due to its rough construction and incomplete seismic structural measures. In order to study its seismic capacity, according to the typical survey, 1/2 scale model was made and shaking table seismic simulated test was carried out. Shaking table test results show: The destruction of the model is focused on the back wall of the first layer and the bottom of the two side walls, but the most serious damage occurs in wall between windows and corner of the windows. The wall between windows cracked severely under the 8.5 intensity fortification earthquake along with more increase of its “X” story drift. The model can help achieve the design objective of “operational under small earthquakes, repairable damage under medium earthquakes, and collapse prevention under severe earthquakes” under the magnitude 7 earthquake. However, it is suggested that effective reinforcement measures should be taken for the weakness area of existing building under 8 degree and above and tie columns be made in the back wall of new building. Moreover, the prototype structure was analyzed under different design conditions by ANSYS/LS-DYNA so as to explore the basic design requirement of rural low brick-concrete storefront which can satisfy safety demands of seismic resistance. Results show: Improving the strength of mortar can effectively improve the seismic performance of the model. According to different earthquake magnitude, the ratio of holes should be limited reasonably to avoid excessive damage to the wall. The structural column can restrain the wall and enhance the integrity of the structure, but the structural column of the back wall in the second layer should avoid larger rigidity.

Key words: rural storefront; shaking table test; finite element analysis; seismic design

村镇低层砖混商铺房屋由于兼具商业、出租等功能, 在我国村镇街区、交通沿线分布广泛. 这种建筑底层一般采用大空间、大门洞, 门洞两侧用混凝土柱或砖柱承重, 后背墙采用砖承重, 二层分割成小隔间用于居住, 前立面外挑 0.6~1.2 m, 既增加二层居住空间又兼做雨棚. 由于此类房屋多为村民自建, 其结构布置不合理, 往往

“前柔后刚”、“下柔上刚”, 加上施工质量难以保证, 因而在历次地震中损坏严重、倒塌较多.

目前, 国内外的相关研究多集中于城镇底框砌体房屋, 而有关这种典型村镇房屋抗震性能的研究较少. 为减少人员伤亡和经济损失, 定性了解此类房屋的抗震性能, 本文依据课题组的实地调研, 制作了一个典型的房屋模型进行振动台试

验, 了解此类房屋在不同抗震设防烈度下的震害特点和动力特性, 并运用 ANSYS/LS-DYNA 有限元软件对原型结构进行分析, 以研究不同设计条件下模型的地震反应, 希望为此类房屋的设计提供合理的建议。

1 模拟地震振动台试验

1.1 模型设计与构造

1.1.1 模型设计

课题组依据相关规范^[1-2]及村镇砖混商铺房屋的实际情况, 制作了一个典型的二层砖混商铺房屋模型, 如图 1。模型比例为 1/2 缩尺, 双开间对称结构, 面宽 3.42 m, 进深 2.82 m, 屋面高 3.30 m。前立面开有 1 500 mm×1 650 mm 门洞和 1 350 mm×900 mm 窗洞, 背立面窗洞尺寸为 750 mm×750 mm。

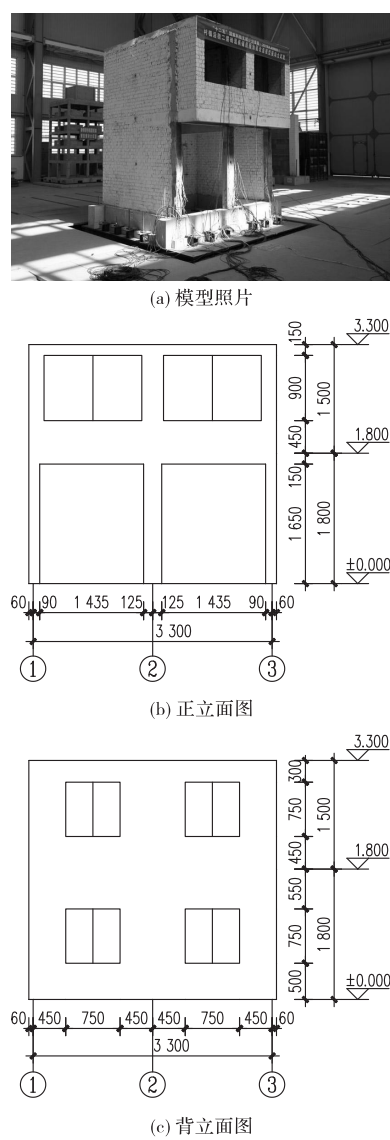


图 1 试验模型
Fig. 1 Test model

模型砖为普通烧结粘土砖加工而成, 尺寸为 115 mm×60 mm×53 mm, 强度为 MU10, 砌筑砂浆强度为 M5, 墙体厚 115 mm, 主要混凝土构件采用 C30 混凝土, 其尺寸及配筋见图 2 和表 1, 其中楼屋盖四周均设有圈梁, 且房屋前立面门、窗过梁兼做圈梁使用。

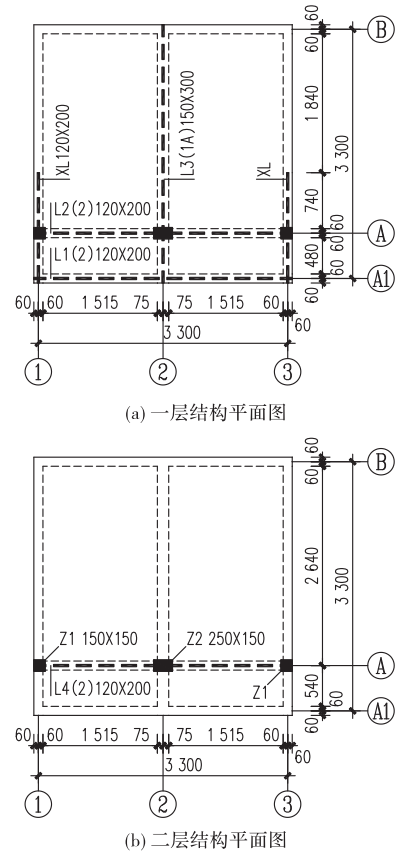


图 2 模型结构平面图
Fig. 2 Structure plan of model
表 1 钢筋混凝土构件配筋

Tab. 1 Reinforcement of reinforced concrete members		
构件	截面尺寸/mm	配筋
楼屋盖	60 厚	φ 8@100 双层双向
边柱 Z ₁	150×150	φ 6@50/100(2); 4 φ 12
中柱 Z ₂	150×250	φ 6@50/100(2); 6 φ 12
圈梁	120×90	φ 6@100(2); 4 φ 8
悬挑梁 XL	120×200	φ 6@50(2); 4 φ 8
底部大梁 L ₃	150×300	φ 6@50/100(2); 5 φ 10
门洞过梁 L ₂	120×200	φ 6@50/100(2); 4 φ 8
前窗洞过梁	120×150	φ 6@100(2); 4 φ 8
后窗洞过梁	120×60	φ 6@100(2); 2 φ 8
封边梁 L ₁	120×200	φ 6@50(2); 4 φ 8

1.1.2 模型相似关系

根据西安建筑科技大学振动台承载能力, 试验采用欠人工质量模型, 模型总重 19.81 t, 其中:

基座重 5.92 t, 房屋自重 12.78 t, 配重 1.11 t. 模型材料和原型材料相同($S_E=1$)且模型完全等比例缩小($S_L=0.5$), 根据动力相似理论^[3-5], 推导出模型与原型的相似关系如表 2

表 2 模型相似比

Tab. 2 Similitude ratios of model		
物理量	相似关系	相似比
长度	S_L	0.5
弹性模量	S_E	1
质量	S_m	0.136
刚度	$S_K=S_E S_L$	0.5
周期	$S_T=(S_m/S_K)^{0.5}$	0.522
压应力	$S_\sigma=S_m/S_L^2$	0.544
加速度	$S_a=S_L/S_T^2$	1.838
线位移	$S_x=S_L$	0.5

1.2 模型加载方案

1.2.1 传感器的布置

为尽可能监测房屋每一层的地震响应, 在振动台台面、模型底座、楼屋面以及每层 1/2 墙高处布置了 22 个加速计, 在台面、楼面、屋顶的中心处布置了 6 个位移计. 试验规定模型纵墙方向为 X 向, 横墙方向为 Y 向.

1.2.2 地震波的选择

本次试验选用三组地震波输入, 包括美国地震记录的 EL Centro 波、汶川地震记录的江油波, 和一条人工合成波, 其中人工合成波的最大峰值加速度 1 cm/s^2 、时间间隔 0.02 s 、地震波持时 40 s 、加速度峰值时刻为 6.36 s . 加载前将原始地震波按不同水准地震规范的规定进行加速度峰值调整, 再按相似关系对其加速度峰值、持续时间、时间间隔进行调整.

1.2.3 试验加载制度

模型台面峰值输入依次为: 110 gal 、 262 gal 、 335 gal 、 382 gal 、 335 gal , 分别相当于 6 度设防、7 度设防、7.5 度设防、8 度设防、8.5 度设防(由于此阶段是尝试性加载, 因而台面输入未达到设计峰值). 加载均为单向地震波输入, 按 El Centro 波、江油波、人工波分别对模型进行 X 向和 Y 向加载. 在每个工况加载前后, 对模型进行白噪声(0.05 g)扫描, 以得到模型结构阵型、频率和阻尼比等参数.

1.3 试验现象

模型结构的破坏主要集中于背立面一层窗间墙和两侧面墙体底部, 窗间墙上的“X”型裂缝均始

于窗洞四角, 侧面墙体在地震作用下底部裂缝发展明显, 模型结构在遭遇相当于 8.5 度设防地震作用后的裂缝分布如图 3, 其具体表现为:

(1)台面加速度峰值为 110 gal 时(相当于 6 度设防), 模型处于弹性阶段, 无裂缝产生.

(2)台面加速度峰值为 262 gal 时(相当于 7 度设防), 背立面一层窗间墙右侧与窗洞口角部均有细微裂缝产生, 少许裂缝延灰缝斜向发展.



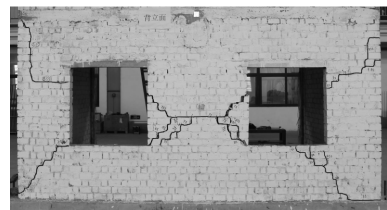
(a) 背立面与左立面内墙底部裂缝



(b) 背立面右侧窗洞口角部裂缝



(c) 右立面底部贯通水平裂缝



(d) 背立面裂缝

图 3 模型裂缝图

Fig. 3 Photographs of model cracks

(3)台面加速度峰值为 335 gal 时(相当于 7.5 度设防), 模型出现较多新裂缝, 背立面一层窗间墙上

产生的新裂缝与原有裂缝形成交叉裂缝, 贯通于墙内外; 东北角墙体在底部沿背立面和左立面均产生水平裂缝, 墙体欲脱离底座, 有倾覆趋势。

(4) 台面加速度峰值为 382 gal 时(相当于 8 度设防), 背立面窗间墙处交叉型裂缝形成的三角形块体有脱离倾向, 右侧窗洞的右上角裂缝延伸至墙角后沿水平方向发展; 左立面底梁处产生较长水平裂缝, 截止于构造柱处; 右立面内外墙沿底梁出现贯通的水平裂缝。

(5) 台面加速度峰值为 335 gal 时(相当于 8.5 度设防), 此阶段为尝试性加载, 由于模型头重脚轻, 二层较大的倾覆力使结构东北角与底梁脱落, 因而台面实际峰值加速度远小于设计加速度。结构反应表现为: 背立面一层左侧窗洞左上角延伸出一条陡峭的竖向裂缝, 直至圈梁拐角处, 右窗洞底部裂缝发展与原有裂缝贯通, 窗间墙两侧的三角形区域块体摇摇欲坠; 东北角倾覆趋势明显, 相应墙体与底梁一张一合。

1.4 试验结果分析

1.4.1 模型结构动力特性

在初始加载和各级加载工况后, 通过白噪声历次扫描获得的模型结构自振频率如表 3, 由于试验时传感器数据采集仪不足, 所以未在屋顶四角布置传感器, 无法通过处理数据获得扭转频率。由表可知: 模型结构的初始自振频率为 10.938 Hz (X 向平动)、16.142 Hz (Y 向平动); 由于 X 向有

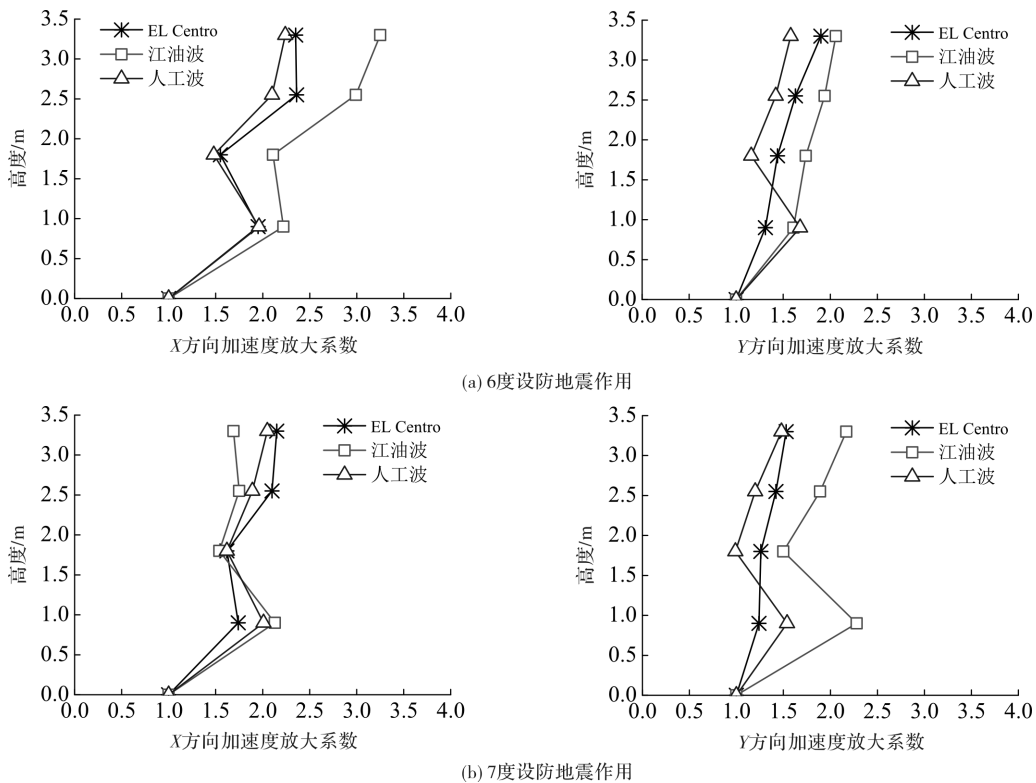
较多洞口, 而 Y 向为完整的实心砖墙, 因而 X 向刚度较 Y 向小, 使得 X 向自振频率相对较小; 随着输入地震动峰值的增大, 墙体裂缝不断增多, 模型刚度逐渐退化, 自振频率随之降低。

表 3 模型的自振频率
Tab. 3 Natural frequencies of model

序号	一阶(X 向平动)		二阶(Y 向平动)	
	频率/Hz	降幅/%	频率/Hz	降幅/%
1	10.938	—	16.142	—
2	10.547	3.57	15.609	3.30
3	8.203	25.00	12.793	20.75
4	7.109	35.01	12.07	25.23
5	6.719	38.57	11.563	28.37
6	6.055	44.6	10.938	32.24

1.4.2 模型结构加速度反应

图 4 表示模型 X 向和 Y 向的动力放大系数, 反应了模型一层 1/2 墙高、楼面、二层 1/2 墙高、屋顶处加速度相对底座的放大系数。由图可知: 在相同地震动输入下, 模型的加速度放大系数从底部到屋顶成放大趋势, 屋顶加速度反应较为强烈; 由于墙体中点处无水平构件, 其平面外的刚度较小, 在随结构整体振动时受局部振动影响较大, 因而测得的墙体中点处加速度反应比较混乱; 模型动力放大系数随台面输入的增加呈下降趋势, 表明结构裂缝不断开展增多, 房屋整体刚度逐渐



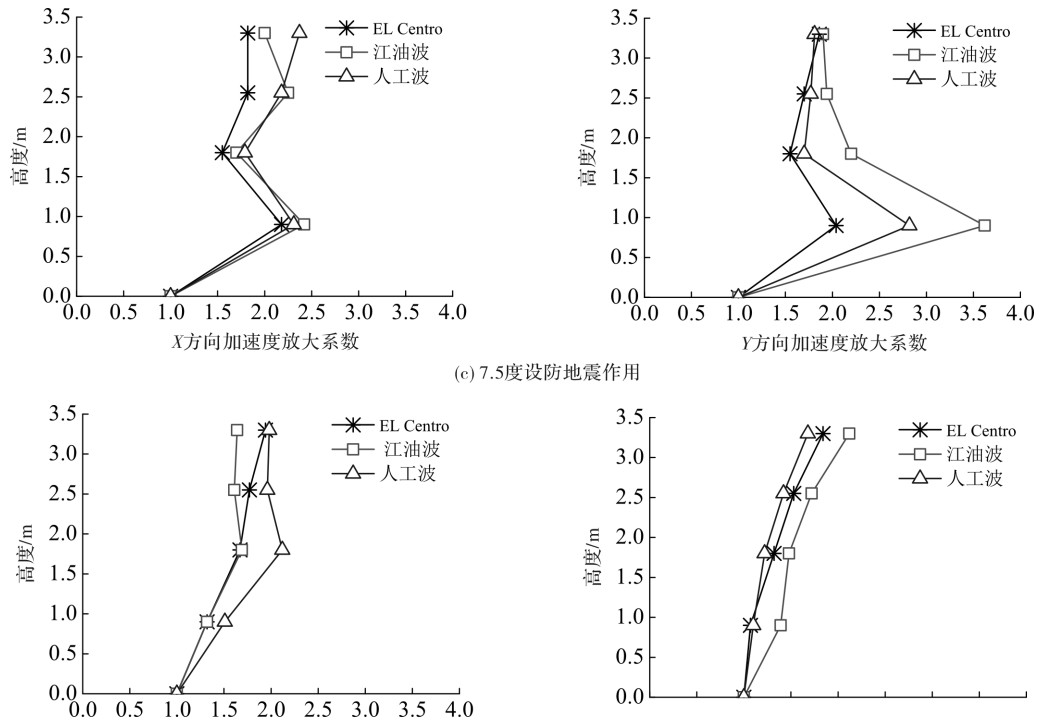


图 4 模型动力放大系数

Fig. 4 Dynamic magnification factors of model

退化,表中系数偶尔突增,这是由于模型自振频率与输入地震波的卓越频率相接近引起的.

1.4.3 模型结构位移反应

本试验各级加载下的模型层间位移角见表 4.

表 4 层间位移角

Tab. 4 Inter-story drift angles of model

加载级数			1	2	3	4	5
台面加速度/gal			110	262	335	382	335
El·C波	一层	X向	1/1 867	1/971	1/754	1/792	1/225
		Y向	1/4 053	1/2 065	1/1 709	1/1 119	—
	二层	X向	1/2 318	1/1 165	1/912	1/956	1/622
		Y向	1/3 916	1/1 930	1/1 621	1/1 149	—
江油波	一层	X向	1/3 294	1/1 587	1/906	1/463	—
		Y向	1/7 170	1/4 214	1/2 137	1/968	—
	二层	X向	1/4 677	1/3 044	1/1 970	1/1 233	—
		Y向	1/6 584	1/4 101	1/2 403	1/946	—
人工波	一层	X向	1/2 658	1/1 276	1/801	1/550	—
		Y向	1/4 926	1/3 062	1/1 908	1/1 147	—
	二层	X向	1/3 832	1/2 084	1/1 279	1/1 187	—
		Y向	1/3 710	1/2 110	1/1 596	1/1 392	—

由表中数据可知:模型各层的层间位移角基本随加载级数的增加而增大,而 X 向相对位移角要大于 Y 向,这是因为 Y 向是完整的实心砖墙,其刚度较 X 向要大;在 8.5 度设防水准地震作用下,由于一层窗间墙的严重开裂,模型 X 向层间

位移角明显增大;虽然试验时未在屋顶四角布置传感器,但由于模型“前柔后刚”,且二层前立面外挑 600 mm,使得整体刚度中心与质量中心不重合,在 X 向水平地震作用下必然产生一定的扭转,影响结构的承载能力.

2 不同设计条件下结构的地震反应

为了研究不同烈度下村镇低层砖混商铺房屋能够满足抗震安全性能的基本设计要求, 通过 ANSYS/LS-DYNA 有限元软件, 在参考相关原理与方法^[6-9]的基础上, 对振动台试验的原型变换参数, 设计了多个条件不同的房屋模型, 对其在不同烈度下的抗震性能进行对比分析. 考虑到主要研究房屋在地震作用下的薄弱部位、位移等宏观反应, 因而砌块和砂浆、混凝土与钢筋均采用整体式建模, 其中钢筋混凝土采用 LS-DYNA 发展的 96 号材料模型, 砌体采用 3 号非线性材料模型, 具体材料参数参考相应文献^[10-11]. 模型的建立采用 SOLID 164 单元, 该单元是用于三维的显示结构实体单元, 支持所有许可的非线性特性, 组建的有限元模型见图 5, 其变量条件见表 5, 其中模型 2 是模型 1、3、4、5、6 的基准算例, 模型 6 是模型 7 的基准算例, 模型 8 是模型 9 的基准算例.

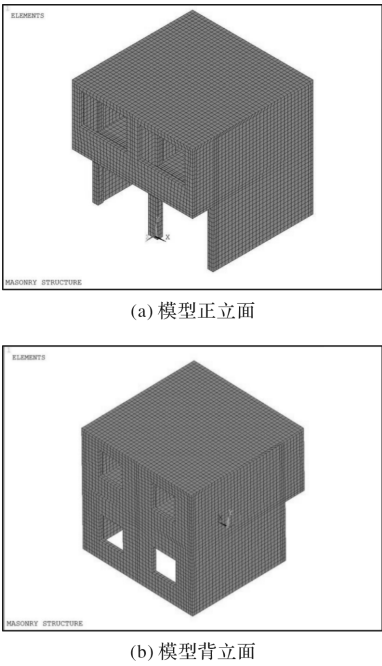


图 5 有限元模型

Fig. 5 Finite element model

表 5 中“构造”仅指模型背立面墙体构造柱的设置情况, 分为: ①未设置; ②仅第一层窗间墙处设置; ③仅第一层纵横墙交接处设置; ④第一二层纵横墙交接处均设置; ⑤仅第一层纵横墙交接处和窗间墙处设置; ⑥第一二层纵横墙交接处和窗间墙处均设置.

表 5 模型概况

Tab. 5 General situation of models

编号	砂浆强度	开洞率/%	窗洞尺寸/m	构造	分析因素
1	M2.5	20.7	1.5×1.5	①	砂浆强度
2	M5	20.7	1.5×1.5	①	基准算例
3	M7.5	20.7	1.5×1.5	①	砂浆强度
4	M5	16.5	1.2×1.5	①	开洞率
5	M5	20.7	1.5×1.5	②	第一层构造柱
6	M5	20.7	1.5×1.5	③	第一层构造柱
7	M5	20.7	1.5×1.5	④	第二层构造柱
8	M5	20.7	1.5×1.5	⑤	基准算例
9	M5	20.7	1.5×1.5	⑥	第二层构造柱

选用 El Centro 波南北分量的前 10 s 作为地震波输入, 且仅考虑沿结构第一振型(X 向)输入, 对每个算例模型均输入从 6~8 度(0.3 g)不同设防烈度的地震波, 其不同设防烈度下的最大层间位移角见表 6. 采用层间位移角作为砌体结构性能水准的评价指标, 并参考相关文献^[12]确定每一阶段对应的层间位移角限值.

表 6 不同设防烈度下的最大层间位移角

Tab. 6 Maximum inter-story drift angles under different magnitude

模型编号	6 度 0.05 g	7 度 0.1 g	7 度 0.15 g	8 度 0.2 g	8 度 0.3 g
1	1/4 371	1/2 068	1/1 216	1/129	1/92
2	1/5 217	1/2 589	1/1 621	1/297	1/97
3	1/5 806	1/2 880	1/1 674	1/558	1/267
4	1/6 000	1/3 079	1/1 773	1/1 188	1/258
5	1/6 000	1/3 000	1/1 773	1/326	1/97
6	1/4 864	1/2 448	1/1 773	1/317	1/193
7	1/4 736	1/2 400	1/1 722	1/197	1/101
8	1/5 217	1/2 608	1/1 739	1/233	1/111
9	1/5 070	1/2 553	1/1 706	1/211	1/96

(1) 基于砂浆强度的对比分析

对比表 6 中模型 1、2、3 可知: 对于不满足现行规范砂浆强度 \geq M5 要求的模型 1 仍能满足 6 度(0.05 g)设防地区“小震不坏、中震可修、大震不倒”的抗震设防目标; 对于满足现行规范砂浆强度 \geq M5 要求的模型 2 和模型 3, 前者破坏形态完全符合 7 度(0.1 g)地区的设防目标, 后者基本符合 7 度(0.15 g)地区的设防目标. 由此可知, 结构的最

终破坏程度随着砂浆强度的提高而减轻,提高砂浆强度能够有效提高模型的抗震性能。

(2) 基于开洞率的对比分析

对比表6中模型2、4可知:开洞率为20.7%的模型2在8度(0.2 g)设防烈度地震作用下已严重破坏,而相同条件下开洞率为16.5%的模型4仅为中等破坏,说明随着开洞率的增加,墙体被削弱,其刚度和承载力明显减小,因而在设计时需将开洞率严格控制在一定限值内。

(3) 基于第一层构造柱的对比分析

对比表6中模型2、5可知:在第一层窗间墙处设置的构造柱能够减小结构的破坏程度,这是因为承担二层横墙的大梁一端放置在窗间墙上,导致窗间墙局压应力过大,墙体容易破坏,而构造柱能够有效约束住窗间墙,防止墙体完全破坏。

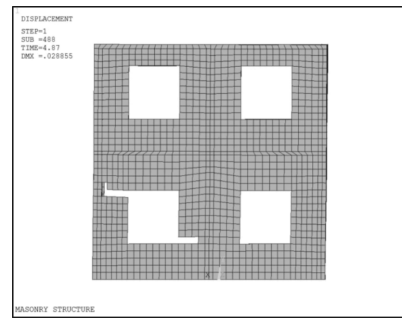
对比表6中模型2、6可知:在第一层纵横墙交接处设置构造柱的模型6,在低烈度地震作用下的最大层间位移角比未设置构造柱的模型2要大,这是由于构造柱约束了墙体随地震波的自由摆动,使得墙体出现裂缝的时间较未设置构造柱的模型要早,如图6反应的是模型2和模型6在8度(0.2 g)地震作用下初裂时间的对比。但随后在高烈度地震作用下,模型2的破坏较模型6更严重,这是因为构造柱限制了墙体开裂后的疏散脱落,大大增强了结构的整体性。

(4) 基于第二层构造柱的对比分析

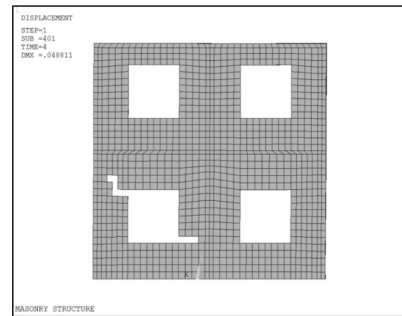
分别对比表6中模型6、7和模型8、9可知:模型6和8在模型7和9的基础上去除了第二层构造柱后,其破坏程度反而减轻,分析造成这种状况的原因是由于模型仅在背立面墙体设置构造柱,第二层过强的构造柱使结构前后刚度不均匀,导致模型受力复杂。图7反应了8度(0.2 g)和8度(0.3 g)设防烈度地震作用下模型的破坏情况,第二层较强的构造柱反而使模型7和模型9的抗震处于不利状态,故在设计时需要注意第二层背立面构造柱的设置,不能一味提高第二层构造柱的刚度。

3 结论

(1) 村镇低层砖混商铺房屋由于抗震构造措施不齐全,结构布置不合理,因而在低烈度地震作用下竖向承重墙体出现中等开裂,在高烈度地震作用下墙体发生严重破坏,建议对高烈度地区的

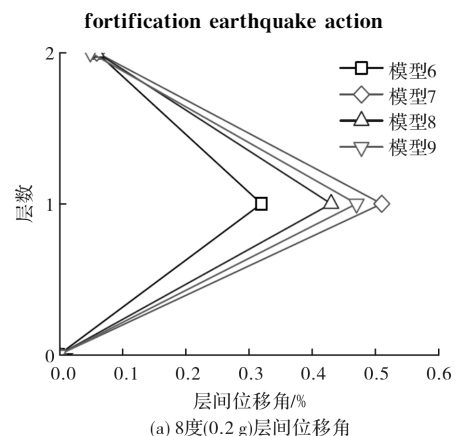


(a) 模型2初裂时间 $t=4.67$ s

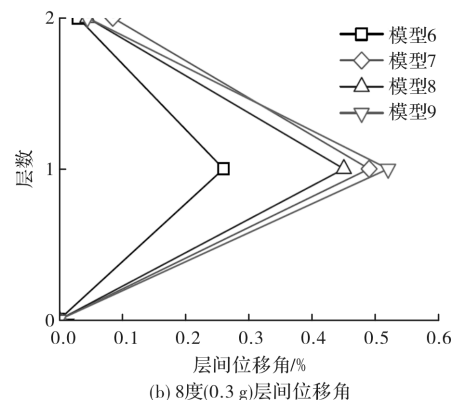


(b) 模型6初裂时间 $t=4$ s

图6 模型在8度(0.2 g)设防地震作用下的初裂时间
Fig. 6 Initial time of cracking occur in 8 degree (0.2 g)



(a) 8度(0.2 g)层间位移角



(b) 8度(0.3 g)层间位移角

图7 不同设防烈度下层间位移角的对比

Fig. 7 Comparison of inter-story drift angles under different fortification intensity

此类房屋采取加固措施。

(2) 模型在试验过程中的破坏主要集中于一层背立面墙体和两侧面墙体底部,窗间墙及窗洞角

部破坏尤为严重. 因此, 对于已建房屋, 应针对薄弱部位进行有效加固; 对于新建房屋, 则需完善抗震构造措施, 在背立面增设构造柱.

(3) 提高砂浆强度能有效提高模型的抗震性能; 针对不同设防烈度地区应合理规定开洞率限值, 以避免过度削弱墙体; 构造柱能够有效约束住墙体, 增强结构整体性, 但第二层背立面设置的构造柱应避免刚度过大.

参考文献 References

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 建筑抗震设计规范: GB50011-2010(2016年版)[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Code for seismic design of buildings: GB50011-2010 (2016 Edition) [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2016.
- [2] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 镇(乡)村建筑抗震技术规程: JGJ 161-2008[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical Seismic technical specification for building construction in town and village: JGJ 161-2008[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008.
- [3] 周颖, 吕西林. 建筑结构振动台模型试验方法与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
ZHOU Ying, LÜ Xilin. Method and technology for shaking table model test of building structures[M]. Beijing: Science Press, 2012.
- [4] 黄维平, 邬瑞锋, 张前国. 配重不足时的动力试验模型与原型相似问题的探讨[J]. 地震工程与工程振动, 1994, 4(14): 65-70.
HUANG Weiping, WU Ruifeng, ZHANG Qianguo. Study on the analogy between scale models with less ballast and their prototypes under shaking table test [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1994, 4(14): 65-70.
- [5] 郑山锁. 动力试验模型在任意配重条件下与原型结构相似关系[J]. 工业建筑, 2000, 30(3): 35-39.
ZHENG Shansuo. Analogical ratio between scale models with less ballast and their prototypes under shaking table test [J]. Industrial Construction, 2000, 30(3): 35-39.
- [6] 张冬茵, 金星, 丁海平, 等. ANSYS/LS-DYNA 在地震工程中的应用[J]. 地震工程与工程振动, 2005, 25(4): 170-173.
ZHANG Dongyin, JIN Xing, DING Haiping, et al. Application of ANSYS/LS-DYNA in earthquake engineering [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2005, 25(4): 170-173.
- [7] 王达论, 武建华. 砌体 RVE 均质过程的有限元分析[J]. 重庆建筑大学学报, 2002, 24(4): 35-39.
WANG Daquan, WU Jianhua. Finite element analysis of masonry RVE homogenization procedure [J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2002, 24(4): 35-39.
- [8] 王新敏. ANSYS 工程结构数值分析[M]. 北京: 人民交通出版社, 2007.
WANG Xinmin. Numerical analysis of engineering structure by Ansys [M]. Beijing: China Communication Press, 2007.
- [9] 徐珂. ANSYS 建筑结构分析应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.
XU Ke. Analysis and application of building structure [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2006.
- [10] 刘桂秋, 颜友清, 施楚贤. 砌体受压本构关系统一模型的研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2009, (11): 6-9.
LIU Guiqiu, YAN Youqing, SHI Chuxian. Research on the unified model of compressive constitutive relations of masonry [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2009, (11): 6-9.
- [11] 刘桂秋. 砌体结构基本受力性能的研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2005.
LIU Guiqiu. The research on the basic mechanical behavior of masonry structure [D]. Changsha: Hunan University, 2005.
- [12] 苏启旺, 许浒, 吴昊, 等. 砖砌体结构层间位移角的探讨[J]. 土木工程学报, 2013, 46(S1): 111-116.
SU Qiwang, XU Hu, WU Hao, et al. Research on inter-story displacement angle of brick masonry structures [J]. China Civil Engineering Journal, 2013, 46(S1): 26-32.

(编辑 吴海西)