

黄艺,王睿喆.墙体开洞影响下房屋砖砌体结构地震易损性分析[J].地震工程学报,2019,41(3):574-580.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2019.03.574
HUANG Yi, WANG Ruizhe. Seismic Vulnerability Analysis of Brick Masonry Structures with Wall Openings[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2019, 41(3): 574-580. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2019.03.574

墙体开洞影响下房屋砖砌体结构地震易损性分析

黄 艺¹, 王睿喆²

(1. 绵阳职业技术学院, 四川 绵阳 621000; 2. 西南石油大学, 四川 成都 610500)

摘要: 为获取可靠的墙体开洞影响下房屋砖砌体结构地震易损性分析结果,采用 ABAQUS 有限元分析软件构建房屋砖砌体结构墙体模型,设置合理的墙体模型参数和数值模拟参数;对比模拟数值与以往研究的测试值,证明所构建模型参数取值合理;将截取的峰值段江油地震波作为上述模型的地震动输入,根据测得的房屋砖砌体结构的力学变化数据,分析房屋砖砌体结构的地震易损性。分析结果表明:地震情况下,随着墙体开洞率的增加,墙体荷载能力下降、墙体水平承载力增长幅度降低、墙体相对刚度退化率增加;墙体开洞数量越多,房屋砖砌体结构侧向刚度下降越快。因此分析得出墙体开洞率大、墙体开洞数量多,房屋砖砌体结构的地震易损性越显著。

关键词: 地震; 墙体开洞; 有限元分析; 荷载; 房屋; 砖砌体结构; 易损性

中图分类号: TU365

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2019)03-0574-07

DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2019.03.574

Seismic Vulnerability Analysis of Brick Masonry Structures with Wall Openings

HUANG Yi¹, WANG Ruizhe²

(1. Mianyang Vocational and Technical College, Mianyang 621000, Sichuan, China;

2. Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, Sichuan, China)

Abstract: To study the seismic vulnerability of brick masonry structures with openings in their walls, we used ABAQUS finite-element-analysis software to construct a model of the walls of a brick masonry structure, and established reasonable wall-model and numerical-simulation parameters. Comparing our simulated values with the test values obtained in previous research, we verified that the model parameter values were reasonable. Using measured mechanical change data, we analyzed the earthquake vulnerability of a brick masonry structure. The analysis results show that with increases in the number of wall openings, the load capacity of the wall decreases, the horizontal bearing capacity increases, and the relative degradation rate of the wall stiffness increases. The more openings there are in a wall, the faster the lateral stiffness of the brick masonry structure decreases. Therefore, the seismic vulnerability of a brick masonry structure is more obvious as the number of wall openings increases.

收稿日期: 2018-12-23

基金项目: 国家自然科学基金 (41602157)

第一作者简介: 黄 艺(1982-),男,四川绵阳人,硕士,副教授,研究方向:房屋建筑工程技术、房屋建筑工程管理。

E-mail: hy648746840@163.com。

Keywords: earthquake; opening on wall; finite element analysis; load; house; brick masonry structure; vulnerability

0 引言

砖砌体房屋是古老的建筑结构之一,在建筑中的应用范围较广。我国房屋建筑中采用砖砌体作为结构的房屋高达 88%以上,房屋建筑楼层从 1 层到 8 层不等,各地区情况存在差异^[1]。砖砌体结构的房屋具有材料易获取、使用期限长、防火性能优以及保温节能效果好等优势^[2],在施工过程中采用常规技术与设备即可完成建筑任务^[3],因此砖砌体房屋逐渐成为中小城市与乡镇的主要建筑结构。

地震造成的灾害是毁灭性的,一方面表现在伤亡人数惨重、经济损失巨大,另一方面表现在地震发生后导致的次生灾害,如泥石流、洪涝灾害等^[4]。我国发生的几起重大地震灾害,大部分是建筑倒塌造成人员被困、甚至伤亡。墙体作为房屋的承重部位,墙体上的窗洞、门洞等洞口对墙体的承重能力产生一定影响,砖砌体承重结构一旦受到损坏,整个房屋就会倒塌^[5]。因此,分析墙体开洞影响下房屋砖砌体结构地震易损性是减轻地震灾害程度的重要依据,有利于提高砖砌体结构建筑的抗震性能^[6]。墙体开洞影响房屋砖砌体结构的地震易损性,主要表现在开洞大小、开洞数量、开洞位置、开洞高宽比等方面,本文从开洞大小、开洞数量角度分析房屋砖砌体结构地震易损性^[7]。对比构建的墙体模型和以往测试结果可知,该模型是有效的实验模型。采用本

文方法得到的墙体开洞影响下房屋砖砌体结构地震易损性分析结果科学、可靠,为提高房屋砖砌体结构的抗震性能、避免砖砌体结构房屋在地震中遭受破坏提供有效分析依据。

1 墙体开洞影响下房屋砖砌体结构地震易损性分析

采用 ABAQUS 有限元软件分析墙体开洞影响下房屋砖砌体结构地震易损性^[8],首先构建墙体开洞模拟模型,其次验证模型参数的有效性,最后设置地震动模拟输入。基于上述步骤研究地震动过程中受墙体开洞影响下房屋砖砌体结构的易损性。

1.1 房屋砖砌体结构墙体模型构建与数值模拟

本文采用 ABAQUS 有限元软件构建的墙体模型由 MU15 强度的烧结普通砖、M5 强度的水泥沙子混合物构筑而成^[9]。C20 混凝土是墙体圈梁、构造柱、墙洞过梁等构件的主材,选用 HRB324 等级钢筋作为墙体的受力钢筋、HPB224 等级钢筋作为箍筋与分布筋。选取 C50 混凝土作为加载梁的主材,设置有限元分析软件参数过程中,令加载梁仅在弹性阶段受力^[10]。本文采用的砖砌体房屋墙体模型尺寸与实际尺寸相同,墙体高度、厚度、宽度分别是 3 100 mm、250 mm、4 600 mm。墙体模型的详细参数如表 1 所列。

表 1 墙体模型参数

Table 1 Wall model parameters

墙体名称	是否具备圈梁构造柱	高宽比	开洞形式	开洞位置	开洞大小宽/mm×高/mm	水平加载位移/mm
C1	否	0.656	无	无	无	15
C2	否	0.656	窗洞	中心	1 100×1 400	15
C3	否	0.656	窗洞	中心	1 400×1 400	15
C4	否	0.656	窗洞	中心	1 700×1 400	15
C5	否	0.656	窗洞	中心	2 个 850×1 400	15

数值模拟中的圈梁、构造柱及过梁参数情况用表 2 描述,这些参数依据建筑抗震设计标准确定^[11],具有科学性与可靠性。

表 2 圈梁、构造柱及过梁参数

Table 2 Parameters of ring beam, structural column and lintel

构件名称	尺寸/(mm×mm)	混凝土强度	纵筋尺寸	箍筋/分布筋尺寸
圈梁	235×235	C20	4Φ14	Φ6@130/80
构造柱	235×236	C20	4Φ14	Φ6@130/80
过梁	235×115	C20	2Φ14	Φ6@130

1.2 模型参数验证

墙体开洞模拟模型构建完成后,需验证模型参数用于房屋砖砌体结构研究是否可靠^[12],对比模拟结果与以往研究的测试结果,得到两者的对比误差,如表 3 所列。

分析表 3 能够看出,从开裂荷载、极限荷载、破坏荷载角度而言,模拟值与测试值的误差均在 2%左右,误差较小,因此设置的模型参数可以作为分析墙体开洞影响下房屋砖砌体结构地震易损性的有效数据^[13]。

表 3 数值模拟值与测试值对比误差(单位:%)

Table 3 Comparison errors between numerical simulated and tested values (Unit:%)

	墙体名称	C1	C2	C3	C4	C5
开裂	墙体开裂荷载	1.8	1.9	1.9	2.1	2.0
	开裂荷载对应的位移	1.7	1.6	1.9	2.1	1.9
极限	极限荷载	2.2	3.6	2.5	2.6	2.3
	极限荷载对应的位移	1.9	1.6	2.3	2.1	1.2
破坏	破坏荷载	1.8	0.9	2.1	2.2	1.5
	破坏荷载对应的位移	1.2	1.3	1.5	2.0	1.6

同时绘制 5 片墙体的压力-位移曲线,描述了模拟值与测试值的对比情况,经对比得知,5 片墙体的模拟值与测试值趋势基本吻合,符合程度较高。由于篇幅有限,仅列举 C1、C2 两片开洞墙的模拟值与测试值的对比情况,如图 1、图 2 所示。

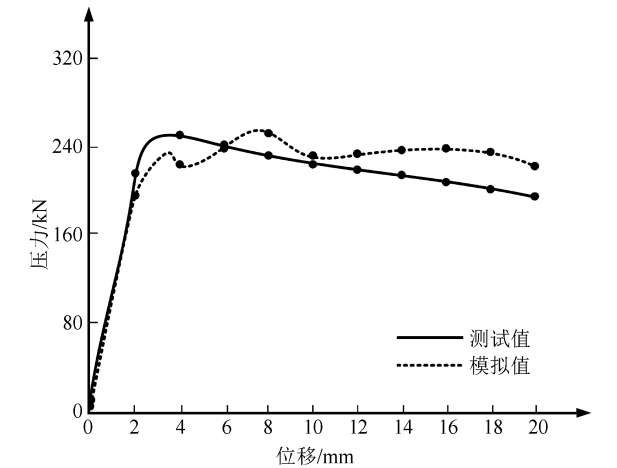


图 1 C1 的压力-位移对比结果

Fig.1 Pressure-displacement comparison results of C1

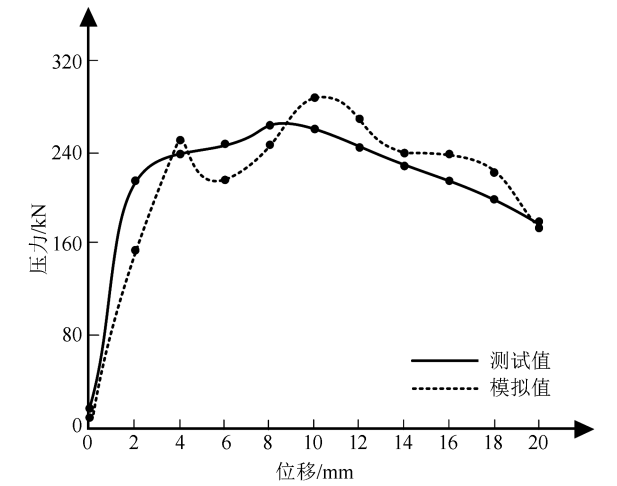


图 2 C2 的压力-位移对比结果

Fig.2 Pressure-displacement comparison results of C2

分析图 1、图 2 能够看出,墙体模型的模拟值与测试值基本一致,吻合程度较高,可作为有效的实验

模型参数使用。

1.3 地震动模拟输入

地震动模拟采用的地震输入为截取的峰值段江油地震波^[14],图 3 描述了该种地震波的加速度时程。采用显式求解器 ABAQUS/Explicit 获取墙体开洞影响下房屋砖砌体结构的地震反应^[15]。

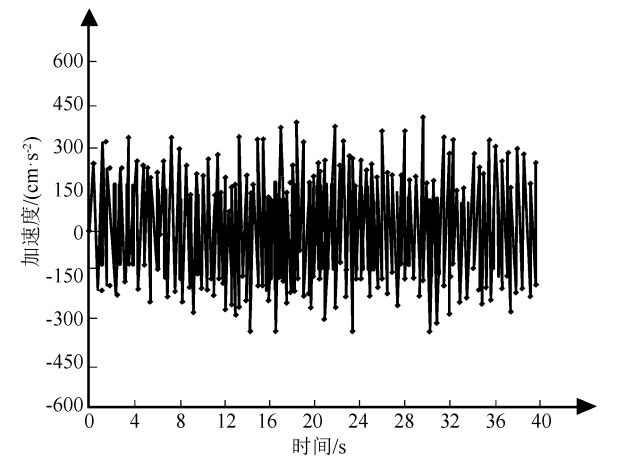


图 3 地震动加速度时程

Fig.3 Time history of ground motion acceleration

本文设置的墙体开洞模拟模型参数,经过验证可作为有效的实验参数使用。在此基础上,输入设置的地震波,获取地震状态下墙体开洞引起的力学变化结果,分析开洞大小、开洞数量对房屋砖砌体结构地震易损性的影响。

2 实验分析

2.1 开洞大小对房屋砖砌体结构地震易损性的影响

开洞大小影响房屋砖砌体结构地震易损性的实验中用到 4 片墙体,分别命名为 C1、C2、C3、C4,其中 C1 是没有开洞的墙体,其余为开洞的墙体;开洞大小用开洞率描述,开洞率越大、开洞越大;C2、C3、C4 的开洞率分别为:10.8%、13.7%、16.7%。墙体开洞模型如图 4 所示。

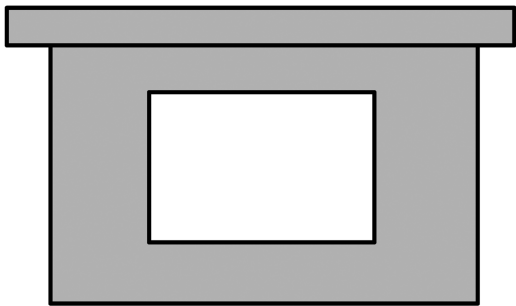


图 4 墙体开洞示意图

Fig.4 Diagram of wall openings

本文模拟的房屋砖砌体结构地震易损性实验采用的墙体为底层墙体,输入预先设置好的地震波,记录地震过程中开洞与未开洞墙体抗震性能数据,如表 4 所示。

表 4 开洞与未开洞墙体抗震性能数据
Table 4 Seismic performance data of walls with and without openings

墙体名称	C1	C2	C3	C4
开裂荷载/kN	240.75	130.88	107.42	78.58
开裂位移/mm	1.4	1.35	1.18	1.05
极限荷载/kN	387.8	265.36	241.35	213.13
极限位移/mm	8.12	9.33	8.5	8.28
破坏荷载/kN	328.06	224	203.48	180.5
破坏位移/mm	17.3	11.75	10.52	10.08

由表 4 可得,由 C1 至 C4,开裂荷载、极限荷载、破坏荷载数值下降的较快,未开洞墙体的开裂荷载为 240.75 kN,10.8%开洞率墙体 C2 的开裂荷载下降了 45.6%,13.7%开洞率墙体 C3 的开裂荷载下降了 55.4%,16.7%开洞率墙体 C4 的开裂荷载下降了 67.4%,因此墙体的开洞率越大、开裂荷载下降的程度越大;同理,随着墙体开洞率的增加,极限荷载、破坏荷载逐渐降低。由于墙体的荷载能力下降,房屋砖砌体结构容易遭到地震损坏,因此地震过程中墙体的开洞率越大,房屋砖砌体结构越容易遭到损坏。

记录实验过程中砖砌体墙体 C1、C2、C3、C4 的水平单调荷载-位移计算结果、刚度退化柱形图分别用图 5、图 6 描述。

分析图 5 可知,4 种柱形图的趋势均为先增长、后降低,不同的是,未开洞墙体 C1 的水平承载力增长幅度大,最高达到 440 kN 左右,开洞墙体的水平承载力增长幅度小,C2 的最大水平承载力约为

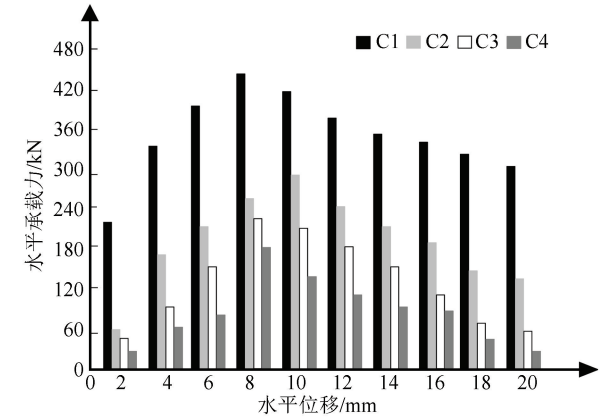


图 5 开洞墙体水平单调荷载-位移计算结果
Fig.5 Calculation results of horizontal monotonic load-displacement for wall with openings

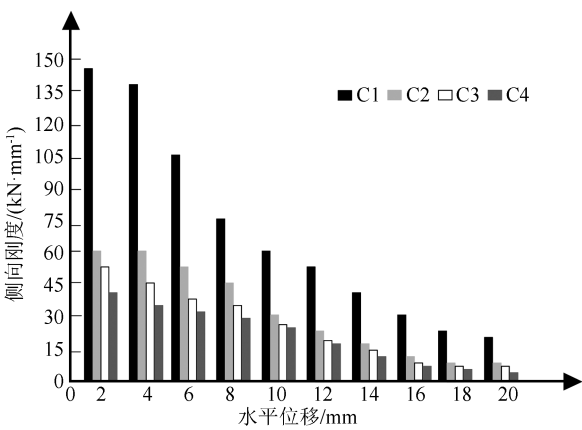


图 6 开洞墙侧向刚度退化计算曲线
Fig.6 Calculation curve of lateral stiffness degradation for wall with openings

300 kN,C3 的最大水平承载力约为 220 kN,C4 的最大水平承载力约为 180 kN,该数据表明,随着开洞率的增加,墙体水平承载力增长的幅度越小。地震过程中,砖砌体房屋结构水平承载力越小,房屋抗震性能越差,在地震中遭到损坏的现象越显著。

分析图 6 可知,未开洞墙体与开洞墙体的侧向刚度柱形图均随着水平位移的增加不断降低,区别在于未开洞墙体 C1 的侧向刚度下降趋势显著,由于开洞墙体的初始侧向刚度较低,所以侧向刚度下降的趋势相对缓慢;达到极限承载力时,C2、C3、C4 的侧向刚度趋于一致,均小于 C1 的侧向刚度。由于墙体的侧向刚度逐步降低,墙体抵抗地震破坏的能力较弱,这种结构更容易遭到地震灾害的破坏。

综合图 5、图 6 的实验结果可知,相同实验环境下,砖砌体墙体的开洞率越大,在地震中越容易遭到损坏。

为进一步分析墙体开洞影响下砖砌体结构的刚度退化性能,引入相对刚度退化率变量。地震中被测试构件的极限-破坏阶段中,墙顶的单位位移对应的刚度退化与构件开裂程度的比值可用相对刚度退化率描述,其计算方法为:

$$\epsilon = \frac{G_v - G_g}{G_d(\Delta_g - \Delta_v)}$$

(1)

式中:破坏位移、峰值位移分别用 Δ_g 、 Δ_v 表示;相对刚度退化率用 ϵ 表示;破坏位移、峰值位移、开裂位移三处的割线刚度分别用 G_g 、 G_v 以及 G_d 描述。

根据上述公式得到不同开洞墙体的相对刚度退化率,如表 5 所列。

表 5 不同开洞墙体的相对刚度退化率

墙体名称	C1	C2	C3	C4
峰值位移处的割线刚度/(kN·mm ⁻¹)	47.36	28.18	28.25	25.62
破坏位移处的割线刚度/(kN·mm ⁻¹)	17.31	17.16	17.34	16.08
开裂位移处的割线刚度/(kN·mm ⁻¹)	156.13	96.14	83.02	67.60
破坏位移/mm	17.30	11.75	10.52	10.08
峰值位移/mm	8.12	9.33	8.50	8.28
相对刚度退化率/(×10 ⁻² mm ⁻¹)	1.66	3.20	4.17	5.03

分析表 5 可知,墙体开洞率与墙体的相对刚度退化率成正比例关系。C2、C3、C4 墙体的开洞率逐渐增加,三种墙体的相对刚度退化率分别为 $3.2\times 10^{-2}\text{ mm}^{-1}$ 、 $4.17\times 10^{-2}\text{ mm}^{-1}$ 、 $5.03\times 10^{-2}\text{ mm}^{-1}$,同样呈逐渐增加的趋势,墙体的相对刚度退化率增加说明砖砌体结构的墙体的刚度下降,支撑房屋结构的能力差,在地震作用下更容易受到损坏。由此可知,墙体开洞率越高,房屋砖砌体结构地震易损性越显著。

2.2 开洞数量对房屋砖砌体结构地震易损性的影响

基于建筑抗震性标准的限制,房屋砖砌体墙洞不宜过大,因此,用多个小墙洞代替不符合抗震标准的大墙洞,实验采用的双洞口墙体命名为 C5,如图 7 所示。另外,C5 与 C4 的开洞率相同。

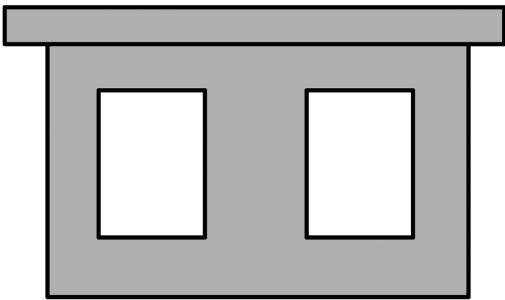


图 7 双洞口墙体示意图

Fig.7 Diagram of wall with double openings

根据上述设置,输入地震波,记录相关数据结果,计算得到不同开洞数量墙体的水平力-位移曲线、不同开洞数量墙体的刚度退化结果分别用图 8、图 9 描述。

分析图 8 可知,C4、C5 两种墙体的水平承载力-位移结果大致吻合,但在水平位移为 4~10 mm 期间两者的水平承载力有所不同,C4 的水平承载力相对高一些,由于 C4、C5 的开洞率相同,由此可判断,砖砌体墙体的开洞数量越少,墙体的承载力最大值越大,承受地震破坏的能力越强,在地震灾害中不易受到损坏。

分析图 9 能够看出,测试前期,C4、C5 两种墙体的侧向刚度下降趋势规律相似,下降速度较快;测试后期 C4 下降速度较慢,C5 下降速度较快,所以总体看来,C5 的侧向刚度下降速度更快一些,这种情况下的砖砌体结构越容易遭到地震灾害的损坏。综上所述,砖砌体房屋的墙体开洞数量越多,墙体的侧向刚度下降越快,房屋砖砌体结构地震易损性越显著。

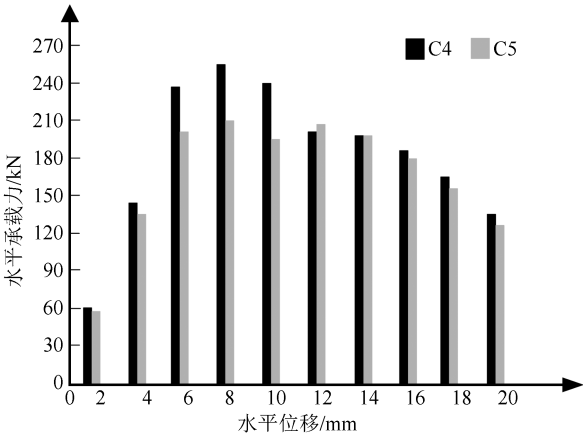


图 8 不同开洞数量墙体水平力-位移结果

Fig.8 Result of horizontal force-displacement of wall with different number of openings

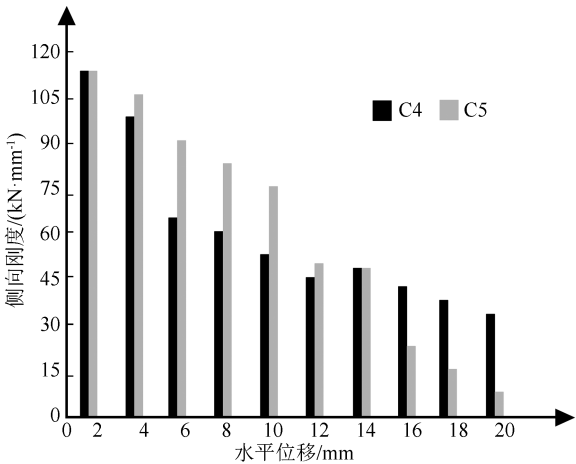


图 9 不同开洞数量墙体刚度退化结果

Fig.9 Results of wall stiffness degradation with different number of openings

3 结论

为得到有效的墙体开洞影响下房屋砖砌体结构地震易损性分析结果、提高建筑工程中房屋的抗震性能,采用 ABAQUS 有限元分析软件构建开洞墙体模型,设置地震动输入,模拟墙体开洞影响下房屋砖砌体结构变化情况,根据测得的房屋砖砌体结构的力学变化数据,分析房屋砖砌体结构的地震易损性。

所提分析方法存在以下两种优点:

(1) 采用 ABAQUS 有限元分析软件构建的墙体尺寸与实际建筑工程中的墙体尺寸一致,这种做法得到的砖砌体结构抗震性能参数可靠性较强,能够准确体现现实中砖砌体结构在地震中的真实变化情况。因此构建与实际一致尺寸的墙体模型为获取科学的实验结果提供可靠的数据基础。

(2) 实验从墙体开洞大小、开洞数量两方面研究房屋砖砌体的结构易损性。通过获取不同开洞率墙体的单调荷载-位移结果、相对刚度退化率等数据,有效分析房屋砖砌体结构在不同开洞率情况下的地震易损情况;通过分析不同开洞数量墙体的水平力-位移结果、刚度退化结果,研究房屋砖砌体结构的地震易损性能。

主要结论为地震时随着墙体开洞率的增加,墙体荷载能力下降、墙体水平承载力增长幅度降低、墙体相对刚度退化率增加;墙体开洞数量越多,房屋砖砌体结构侧向刚度下降越快。因此,分析得出墙体开洞率大、墙体开洞数量多,房屋砖砌体结构的地震易损性越显著,文中给出了数量结果。

鉴于论文篇幅所限,完成时间有限,有关详细的技术环节没有能做更多详述,有兴趣的读者可与作者联系讨论。作者水平有限,文中遗漏之处及错误难免,望批评指正为盼。

参考文献(References)

- [1] 张敏强,刘保东,李玉忠,等.农村典型砌体结构房屋安全及抗震检测与鉴定[J].工程抗震与加固改造,2016,38(3):124-129.
ZHANG Minqiang, LIU Baodong, LI Yuzhong, et al. Safety and Seismic Performance Detection and Identification of Typical Masonry Structure Building in Rural Areas[J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2016, 38(3): 124-129.
- [2] 李佳.多层砌体住宅建筑抗震实例分析[J].林产工业,2017,44(7):59-62.
LI Jia. Seismic Instance of a Multistory Masonry Building[J]. China Forest Products Industry, 2017, 44(7): 59-62.

- [3] 吕大刚,金国庆,于晓辉.考虑倒塌概率修正的钢筋混凝土框架结构地震易损性分析[J].建筑结构学报,2016,37(9):26-32.
LÜ Dagang, JIN Guoqing, YU Xiaohui. Modified Seismic Fragility Analysis of Reinforced Concrete Frame Structures in Consideration of Collapse Probability[J]. Journal of Building Structures, 2016, 37(9): 26-32.
- [4] 易伟建,孙雯.近场地震下框架剪力墙高层结构地震易损性分析[J].建筑科学与工程学报,2015,32(5):17-24.
YI Weijian, SUN Wen. Seismic Fragility Analysis of Frame-wall High-rise Structures Under Near-fault Ground Motions[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2015, 32(5): 17-24.
- [5] 杨理臣,卢宁,樊光洁,等.青海玉树7.1级地震灾后重建地区房屋地震易损性研究[J].地震工程学报,2016,38(增刊2):314-318.
YANG Lichen, LU Ning, FAN Guangjie, et al. The Analysis of Vulnerability of Reconstruction Buildings in the Area Stricken by Yushu 7.1 Earthquake, Qinghai[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2016, 38(Sup2): 314-318.
- [6] 赵吉坤,张慧清,黄书君.基于 Push-over 的农村砌体房屋地震响应分析[J].南京农业大学学报,2016,39(2):341-348.
ZHAO Jikun, ZHANG Huiqing, HUANG Shujun. Seismic Response Analysis of Rural Masonry Building Based on Push-over[J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2016, 39(2): 341-348.
- [7] 蒋欢军,刘小娟,薄俊晶.钢筋混凝土框架结构地震易损性分析[J].结构工程师,2015,31(3):114-121.
JIANG Huanjun, LIU Xiaojuan, BO Junjing. Seismic Fragility Analysis of RC Moment-Resisting Frames[J]. Structural Engineers, 2015, 31(3): 114-121.
- [8] 刘科元,李海滨.地震引起建筑结构损伤可靠性预测仿真[J].计算机仿真,2017,34(1):423-426.
LIU Keyuan, LI Haibin. Prediction and Simulation of Damage Reliability of Building Structure Caused by Earthquake[J]. Computer Simulation, 2017, 34(1): 423-426.
- [9] 王飞剑,刘如山,马朝晖.独立式窑洞在地震作用下损伤指标的分析[J].科学技术与工程,2018,18(15):281-286.
WANG Feijian, LIU Rushan, MA Zhaohui. Damage Measures Analysis of Independent Cave Dwelling under Earthquake[J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(15): 281-286.
- [10] MAVROULI O, GIANNOPOULOS P G, CARBONELL J M, et al. Damage Analysis of Masonry Structures Subjected to Rockfalls[J]. Landslides, 2017, 14(3): 891-904.
- [11] 刘也,戴益民,雷静敏,等.墙体开洞及建筑间距对串联低矮建筑屋面易损区影响[J].湖南科技大学学报(自然科学版),2016,31(4):57-64.
LIU Ye, DAI Yimin, LEI Jingmin, et al. Influence of Opening and Distance on Vulnerable Areas of Tandem Low-rise Buildings[J]. Journal of Hunan University of Science & Technology (Natural Science Edition), 2016, 31(4): 57-64.
- [12] 温留汉·黑沙,张永山,汪大洋.工程结构地震易损性与经济

损失评估研究现状[J].建筑科学与工程学报,2015,32(6):17-29.

WENLIU HAN Heisha,ZHANG Yong-shan,WANG Day-ang.Review on Seismic Vulnerability and Economic Loss Assessment of Engineering Structures[J].Journal of Architecture and Civil Engineering,2015,32(6):17-29.

[13] MORANDI P,MAGENES G,GRIFFITH M.Second Order Effects in Out-Of-Plane Strength of Unreinforced Masonry Walls Subjected to Bending and Compression[J].Australian Journal of Structural Engineering,2008,8(2):133-144.

[14] 宗莉娜,杜东升,王曙光,等.楼板不规则开洞结构抗震性能研究[J].建筑科学,2015,31(3):102-109.

ZONG Lina,DU Dongsheng,WANG Shuguang,et al.Seismic Performance Analysis of Structure with Opening Slab Irregularity[J].Building Science,2015,31(3):102-109.

[15] 魏利军,王向阳,罗艾民,等.基于 Probit-Bayes 方法的储罐地震易损性研究[J].中国安全生产科学技术,2017,13(11):17-21.

WEI Lijun,WANG Xiangyang,LUO Aimin,et al.Investigation on Seismic Vulnerability of Storage Tanks Based on Probit-Bayes Method[J].Journal of Safety Science and Technology,2017,13(11):17-21.

(上接第 560 页)

[20] 建筑抗震规范:GB 50011-2010[S].北京:中国建筑工业出版社,2016.

Code for Seismic Design of Buildings:GB 50011-2010[S].Beijing:China Architecture and Building Press,2016.

[21] 中国建筑标准设计研究院.SAP2000 中文版使用指南[M].北

京:人民交通出版社,2012.

China Institute of Building Standard Design & Research Co., Ltd.Guide of the Chinese Version of SAP2000[M].Beijing: China Communications Press,2012.