

文章编号: 1000-4750(2017)06-0198-12

我国农村典型砖砌体墙片拟静力试验研究

姚新强^{1,2}, 孙柏涛³, 王明振⁴, 杨在林¹, 陈宇坤², 杨绪连², 付占岭², 周 强⁵

(1. 哈尔滨工程大学航天与建筑工程学院, 哈尔滨 150001; 2. 天津市地震局, 天津 300201; 3. 中国地震局工程力学研究所, 哈尔滨 150008;
4. 重庆文理学院建筑工程学院, 重庆 402160; 5. 南昌大学建筑工程学院, 南昌 330031)

摘 要: 农村房屋抗震是我国防震减灾工作的重要内容。砖砌体结构作为农村房屋的主要结构形式, 如何提高其抗震能力具有重要研究意义。为研究砂浆强度、构造措施和窗洞口对砖砌体抗震性能的影响, 该文首先对农村砖砌体房屋常用的几种砂浆和砖砌体进行了抗压强度试验, 得到了相应材料及构件的强度参数; 然后对不同砂浆强度、不同构造措施和开洞的12个墙片进行了拟静力试验, 对比分析了不同因素对墙体力学性能影响。试验结果表明, 砂浆强度影响最大, 构造措施和开洞影响次之。最后依据试验分析结果为我国农居防震减灾工作提出建议。该文相关研究可为农居的抗震设防、标准制定以及施工提供参考。

关键词: 农居; 砖砌体; 抗震; 拟静力试验; 滞回曲线

中图分类号: TU317+.1 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2016.08.0617

STUDY ON THE PSEUDO-STATIC TESTS OF TYPICAL BRICK MASONRY WALLS IN RURAL CHINA

YAO Xin-qiang^{1,2}, SUN Bai-tao³, WANG Ming-zhen⁴, YANG Zai-lin¹,
CHEN Yu-kun², YANG Xu-lian², FU Zhan-ling², ZHOU Qiang⁵

(1. College Aerospace and Civil Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China;

2. Earthquake Administration of Tianjin Municipality, Tianjin 300201, China;

3. Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin 150008, China;

4. College of Architecture Engineering, Chongqing University of Arts and Sciences, Chongqing 402160, China;

5. School of Architectural Engineering, Nanchang University, Nanchang 330031, China)

Abstract: The protection of rural housing is an important aspect in earthquake prevention and mitigation in China. To improve the aseismic capacity of brick masonry structures, a dominant structure format of rural housing in China, hence becomes very significant. To study the influence of different mortar strength, construction measures and window openings on seismic performance of brick masonry structure, this study firstly introduced the compressive strength test of several normal mortar and brick masonry used in brick masonry buildings. Subsequently, with different mortar strength, different construction measures and openings in the walls, pseudo static tests of twelve walls were conducted and the influence of different factors on the wall mechanical properties

收稿日期: 2016-08-16; 修改日期: 2017-01-04

基金项目: 天津市自然科学基金项目(17JCQNJC07000); 中国地震局地震科技星火计划项目(XH15002Y); 国家自然科学基金项目(51608249)

通讯作者: 周 强(1983—), 男, 江西人, 讲师, 博士, 从事结构抗震及灾场仿真研究(E-mail: zhouqiang@ncu.edu.cn).

作者简介: 姚新强(1981—), 男, 山东人, 工程师, 博士, 从事工程抗震、灾害学研究(E-mail: yxqtjj@126.com);

孙柏涛(1961—), 男, 黑龙江人, 研究员, 博士, 中国地震局工程力学研究所所长, 从事工程抗震、灾害学研究(E-mail: sunbt@iem.net.cn);

王明振(1987—), 男, 山东人, 研究员, 博士, 从事工程抗震、灾害学研究(E-mail: wmqz917@126.com);

杨在林(1971—), 男, 河北人, 教授, 博士, 哈尔滨工程大学航天与建筑工程学院副院长, 从事地震工程、弹性波动研究(E-mail: yangzailin@hrbeu.edu.cn);

陈宇坤(1970—), 男, 甘肃人, 研究员, 博士, 从事工程地震、地震地质研究(E-mail: tsb-cyk@126.com);

杨绪连(1979—), 男, 山东人, 高工, 本科, 从事工程抗震、地理信息系统研究(E-mail: whuyxl@163.com);

付占岭(1986—), 男, 天津人, 工程师, 硕士, 从事工程抗震、灾害学研究(E-mail: lingquehu@126.com).

was analysed. The test results showed that the mortar strength has greater effects than the construction measures and open hole. Finally based on the experimental analysis results, the suggestions on earthquake disaster preparedness and mitigation for rural housing were proposed. This study is expected to provide guidance for seismic fortification, standard formulation, and construction of residential housing in rural China.

Key words: rural residence; rick masonry; seismic; pseudo static test; hysteretic curve

历次地震震害表明,农村地区是我国防震减灾的薄弱环节。据统计,我国地震平均 50%以上的经济损失和 60%的人员伤亡发生在农村,农村地区一直存在“小震大灾、大震巨灾”现状。例如,1998 年张家口 6.2 级地震造成 13.6 万间农居倒塌,其中有 26.4 万间严重损坏,49 人死亡,受伤人数为 11479,直接经济损失达 23.9 亿元^[1];1983 年山东菏泽 5.1 级地震造成 108.6 万间房屋破坏,其中倒塌 5.6 万间;1989 年山西燕北地区发生的 6.1 级地震造成 6.5 万间房屋损坏,其中有 4.4 万间房屋倒塌;2005 年江西省九江 5.7 级地震导致大量房屋受损严重,其中遭受损坏的有 600 万平方米,1.8 万间倒塌^[2];2008 年发生的四川汶川地震中大量农居发生破坏甚至倒塌,损失极其惨重^[3]。

我国农居中约有 80%为以砖木和砖混结构为主的砖砌体结构^[4]。东部地区农居以砖混和砖木结构居多,并且经济越发达的地区砖混结构的比例越大,西部地区以土木和砖木结构类型为主,其中土木结构占比较大^[5-6]。西部地区随着经济的发展,农居有逐渐由土木结构为主向抗震能力较好的砖木、砖混结构过渡的趋势^[7-8]。因此,如何提高我国农村地区砖砌体房屋的抗震能力是防震减灾工作的主要内容。

目前国内外学者对砌体墙片的研究主要集中在以下几个方面:① 砌体基本力学性能的研究,包括砌体受压受拉本构关系的研究、砌体材料受力后裂缝发展过程的研究、砌体材料弹性模量的研究等;② 砌体墙片剪切破坏的相关研究,包括砌体剪切破坏的各种形态及抗震性能,砌块和砂浆的类型及抗压强度等级、试件的高宽比、轴压比、水平钢筋及竖向钢筋的布置和配筋率、构造柱的布置、洞口大小及位置等对砌体抗剪承载力的影响等;③ 砌体墙片弯曲破坏形态的相关研究,包括砌体弯曲破坏的各种抗震性能指标的研究、砌体弯曲破坏形态的抗震优势分析等;④ 砌体墙片各部分的协调作用研究,包括墙体间的相互作用及墙、圈梁、板的相互作用等。但目前针对考虑不同砌筑砂浆、构

造措施并在我国量大面广存在的农村民居抗震能力问题,尚缺乏系统的研究。

砖砌体房屋的主体承重构件为墙体,而影响墙体抗震能力的主要因素有砂浆强度、墙体开洞和构造措施^[5]。因此,为研究不同砂浆强度、构造措施和有窗洞口对砖砌体抗震性能的影响,本文在型号为 SHT4106 的微机控制电液伺服万能试验机上首先对农村砖砌体房屋常用的几种砂浆和砖砌体进行了抗压强度试验,得到了相应材料及构件的强度参数;然后对不同砂浆强度、不同构造措施和开洞的 12 个墙片进行了拟静力试验,对比分析了不同砂浆材料、有窗洞口以及有无抗震构造措施等因素对墙体力学性能影响;最后,根据试验结果合理地提出了针对我国农居设计和施工过程的意见和建议。

1 抗压强度试验分析

1.1 砂浆抗压强度试验

我国农村砖砌体房屋常用砂浆类型包括水泥砂浆、炉渣砂浆、泥浆、石灰砂浆及混合砂浆等,根据农村房屋实际调查发现,前三种砂浆在农村具有较好的代表性。本文根据《建筑砂浆基本性能试验方法标准》(JGJ/T70-2009)相关规定和农居建造施工实际情况,对泥浆、炉渣砂浆、水泥砂浆三种标准砂浆试块进行了抗压强度试验,采用标准立方体试块,尺寸为 70.7 mm×70.7 mm×70.7 mm。表 1 给出了三种标准砂浆试块的基本信息,表 2 列出了每一试块的抗压强度最大值,以及根据抗压强度平均值给出的抗压强度等级。由结果可知,本文选择的三种农居常用砂浆中水泥砂浆强度最高,然后是炉渣砂浆,泥浆砂浆强度最低。

表 1 标准试块参数

Table 1 Parameters of standard test block

标准试块类型	配比	材料	数量(块)
水泥砂浆	1:6	普通硅酸盐水泥、中砂	6
炉渣砂浆	1:10	普通硅酸盐水泥、炉渣	6
泥浆	泥浆	粉质粘土	6

表 2 标准砂浆试块抗压强度测值 /MPa

试块类型	试块1	试块2	试块3	试块4	试块5	试块6	平均值	抗压强度等级
水泥砂浆	6.4	6.1	5.0	4.9	5.2	4.5	5.3	M5
炉渣砂浆	1.2	1.1	1.2	1.2	1.1	1.2	1.1	M1
泥浆砂浆	0.5	0.5	0.5	0.5	0.4	0.7	0.5	M0.5

表 3 标准砌体试块参数

Table 3 Parameters of standard masonry

试块类型	配比	材料	尺寸/mm	实测抗压强度值	规范计算抗压强度值	误差/(%)
水泥砂浆	1:6	普通硅酸盐水泥、中砂	240×370×430	3.21	3.33	3
炉渣砂浆	1:10	普通硅酸盐水泥、炉渣	240×370×430	2.91	2.64	10
泥浆	泥浆	粉质粘土	240×370×430	1.99	2.04	2

通过实测得到的水泥砂浆砌筑和泥浆砌筑的标准砌体轴心抗压强度值与式(1)规范计算值相比相差甚微,只有炉渣砂浆砌筑的标准砌体轴心抗压强度值与规范计算值相比相差较大。

$$f_m = k_1 f_1^a (1 + 0.07 f_2) k_2 \quad (1)$$

对于烧结普通砖 k_1 取 0.78, a 取 0.5, 当 $f_2 < 1$ 时, $k_2 = 0.6 + 0.4 f_2$, 其他情况下取 1。

2 砖砌体墙片拟静力试验分析

2.1 试验概况

为对比砂浆材料、门窗洞口和构造措施对砖砌体墙片抗震能力影响程度的大小,以强度等级为 MU10 的普通烧结砖为主要砌筑材料,砌筑高度和长度方向采用 1:3 缩尺比、厚度方向采用 1:2 缩尺比的 12 片不同的墙片,不同方向上采用不同的缩尺既能满足设备尺寸的要求,又能满足砖尺寸的缩尺要求,这种缩尺方式在缩尺方法上是允许的。砌筑而成的墙片尺寸为 1100 mm×1200 mm×185 mm,部分墙片窗洞尺寸为 350 mm×450 mm,且用顶圈梁代替窗过梁。考虑构造措施的墙片配筋砂浆强度 M7.5,根据以往缩尺模型试验,构造钢筋采用直径为 2 mm 的铁丝代替用在上下圈梁中。12 片墙片的编号、砌筑砂浆、窗洞设置情况、抗震构造措施设置情况,以及根据规范中相关公式,得到的各墙片抗压强度设计值、抗剪承载力最大值以及轴压比等参数均列于表 4,轴压比指柱(墙)的轴压力设计值与柱(墙)的全截面面积和混凝土轴心抗压强度设计值乘积之比值^[9-10]。为模拟实际墙片竖向压应力状况,需要通过竖向千斤顶提供压应力,按照实际受力情况,有窗的墙片竖向压应力为 0.11 MPa,无窗的竖墙片竖向压力应力为 0.10 MPa。对于无筋砌体构件受压墙片的承载力:

1.2 标准砌体轴心抗压强度试验

分别以水泥砂浆、炉渣砂浆、泥浆砂浆为砌筑砂浆,以强度等级为 MU10 的烧结普通砖为砌块,制作了砌体轴心抗压强度试验标准试件,表 3 给出了标准砌体抗压强度标准试验参数及试验结果。

$$N \leq \varphi f A \quad (2)$$

式中: N 为轴向力设计值; φ 为高厚比 β 和轴向力的偏心距 e 对受压构件承载力的影响系数; f 为砌体的抗压强度设计值; A 为截面面积。

对于配筋砖砌体构件,墙片的受压承载力:

$$N \leq \varphi_n f_n A \quad (3)$$

$$f_n = f + 2 \left(1 - \frac{2e}{y} \right) \rho f_y \quad (4)$$

$$\rho = \frac{(a+b)A_s}{abs_n} \quad (5)$$

式中: N 为轴向力设计值; φ_n 为高厚比和配筋率以及轴向力的偏心距对网状配筋砖砌体受压构件承载力的影响系数; f_n 为网状配筋砖砌体的抗压强度设计值; A 为截面面积; e 为轴向力的偏心距; y 为自截面重心至轴向力所在偏心方向截面边缘的距离; ρ 为体积配筋率; f_y 为钢筋的抗拉强度设计值,当 $f_y > 320$ MPa 时,仍采用 320 MPa; a 、 b 为钢筋网的网格尺寸; A_s 为钢筋的截面面积; s_n 为钢筋网的竖向间距。

对于砖砌体和钢筋混凝土构造柱组合墙的轴心受压承载力:

$$N \leq \varphi_{com} [fA + \eta(f_c A_c + f_y' A_s')] \quad (6)$$

$$\eta = \left[\frac{1}{\frac{l}{b_c} - 1} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (7)$$

式中: φ_{com} 为组合砖墙的稳定系数; η 为强度系数; l 为沿墙长方向构造柱的间距; b_c 为沿墙长方向构造柱的宽度; A 为扣除孔洞和构造柱的砖砌体截面面积; A_c 为构造柱的截面面积。

普通砖无筋墙体的截面抗震受剪承载力:

$$V \leq f_{VE} A / \gamma_{RE} \quad (8)$$

式中： V 为考虑地震作用组合的墙体剪力设计值； f_{VE} 为砖砌体沿阶梯形截面破坏的抗震抗剪强度设计值； A 为墙体横截面面积； γ_{RE} 为承载力抗震调整系数。

对于水平配筋的墙体，截面抗震受剪承载力：

$$V \leq \frac{1}{\gamma_{RE}} (f_{VE} A + \zeta_s f_{yh} A_{sh}) \quad (9)$$

式中： ζ_s 为钢筋参与工作系数； f_{yh} 为墙体水平纵向钢筋的抗拉强度设计值； A_{sh} 为层间墙体竖向截面的总水平纵向钢筋面积，其配筋率不应小于 0.07% 且不大于 0.17%。

设置构造柱的墙体抗震受剪承载力：

$$V \leq \frac{1}{\gamma_{RE}} [\eta_c f_{VE} (A - A_c) + \zeta_c f_t A_c + 0.08 f_{yc} A_{sc} + \zeta_s f_{yh} A_{sh}] \quad (10)$$

式中： A_c 为构造柱的横截面面积； f_t 为构造柱的混凝土轴心抗拉强度设计值； A_{sc} 为构造柱的纵向钢筋截面总面积，配筋率不应小于 0.6%，大于 1.4% 时，取 1.4%； f_{yh} 、 f_{yc} 、为分别为墙体水平钢筋、构造柱纵向钢筋的抗拉强度设计值； ζ_c 为构造柱参与工作系数； η_c 为墙体约束修正系数； A_{sh} 为层间墙体竖向截面的总水平纵向钢筋面积。

表 4 砖砌体墙片模型参数

Table 4 The parameters of masonry walls

编号	砌筑砂浆	窗	抗震构造措施	受压强度设计值/MPa	抗剪承载力/kN	轴压比
1(1-M1)	泥浆(水泥砂浆勾缝)	有	无配筋砖圈梁，木过梁	0.34	5.62	0.31
2(2-M2)	泥浆(水泥砂浆勾缝)	无	无配筋砖圈梁	0.41	8.99	0.26
3(3-M3-RRBB1)	泥浆(水泥砂浆勾缝)	有	底层、顶层配筋砖圈梁	0.36	6.18	0.30
4(4-M4-RRBB2)	泥浆(水泥砂浆勾缝)	无	底层、顶层配筋砖圈梁	0.43	9.05	0.25
5(5-S1)	炉渣砂浆(水泥砂浆勾缝)	无	无配筋砖圈梁	0.66	12.21	0.16
6(6-S2-RRBB1)	炉渣砂浆(水泥砂浆勾缝)	有	底层、顶层配筋砖圈梁	0.53	8.20	0.21
7(7-S3-RRBB2)	炉渣砂浆(水泥砂浆勾缝)	无	有配筋砖圈梁	0.70	12.27	0.15
8(8-C1)	水泥砂浆	无	无配筋砖圈梁	1.02	24.18	0.11
9(9-C2-RRBB1)	水泥砂浆	有	底层、顶层配筋砖圈梁	0.64	15.68	0.17
10(10-C3-RRBB2)	水泥砂浆	无	底层、顶层配筋砖圈梁	1.07	24.23	0.10
11(11-C4-RBCC1)	水泥砂浆	有	底层、顶层混凝土圈梁、两侧端部构造柱	0.73	55.62	0.15
12(12-C5-RBCC2)	水泥砂浆	无	底层、顶层混凝土圈梁、两侧端部构造柱	1.20	66.70	0.09

墙片拟静力试验墙片固定、作动器以及反力架布置情况见图 1。

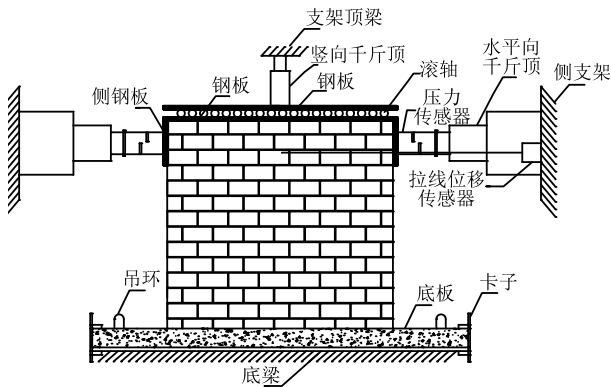


图 1 墙片拟静力试验简图

Fig. 1 Wall pseudo static test diagram

按照《建筑抗震试验方法规程》相关规定对本试验试件进行加载。本试验加载步骤：试加载→施加竖向荷载并保持恒定→力控制等变幅混合加载施加水平荷载→位移控制等变幅混合加载施加水平荷载→水平荷载卸载→竖向荷载卸载。

试验加载方案为：加载前期采用力控制方法进行加载，以预估极限荷载的 10% 位增量分级加载，每级加载一个循环，直到试件产生初裂。等到试验试件屈服以后即刻将力控制加载方法平稳地转化为位移控制加载制度。对于试件的位移控制加载，先以试件屈服位移的 3 倍、4 倍、5 倍等位移命令进行加载，直到加载到试件的极限荷载。达到试验试件的极限荷载下降到试件极限荷载的 85% 时停止位移加载，因为此时可以认为墙体当时承载能力达到破坏状态。

试验过程中，通过传感器和应变片观测砖砌体墙片的剪力、位移等物理量，以得到滞回曲线、骨架曲线、延性系数等参数。并通过人工观测获得墙片各阶段的裂缝开展情况、破坏形态等宏观现象。

2.2 试验结果

图 2~图 25 给出了 12 个墙片双面的拟静力试验墙体破坏照片及滞回曲线和骨架曲线。骨架曲线采用“三折线型”恢复力简化模型，其折线上的拐点分别反映墙片的开裂、极限和破坏转折点。下面就

不同试件的试验结果进行分析。

1-M1 试件整体抗剪能力最低。在水平推力荷载 6.64 kN 和水平位移 10.23 mm 时墙片窗下墙中部出现竖向通长裂缝；在水平推力荷载 8.37 kN 和水平位移 15.23 mm 时墙片窗间墙和窗下墙出现较多明显裂缝，且窗洞四角出现较多斜向裂缝；在水平推力荷载 7.24 kN 和水平位移 19.46 mm 时墙片出现较多较宽裂缝。



图 2 1-M1 墙体破坏照片
Fig.2 1-M1 wall damage photos

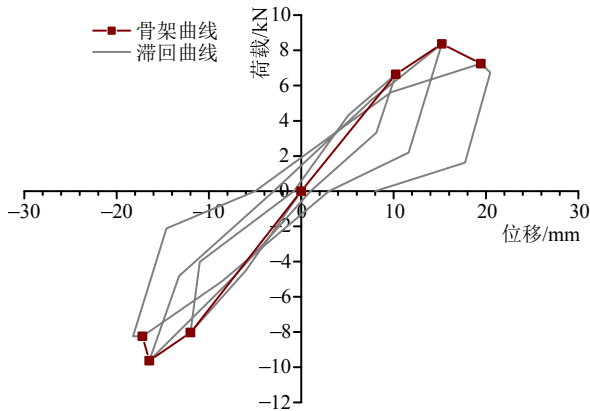


图 3 1-M1 墙体滞回曲线及骨架曲线
Fig.3 The hysteresis curve and skeleton curve of 1-M1 wall

2-M2 试件整体抗剪能力较低。在水平推力荷载 7.67 kN 和水平位移 9.22 mm 时从墙片中部开始到墙底角出现斜裂缝；在水平推力荷载 9.09 kN 和水平位移 15.34 mm 时墙片裂缝继续开展；在水平推力荷载 8.24 kN 和水平位移 19.51 mm 时墙片出现较多较宽裂缝。



图 4 2-M2 墙体破坏照片
Fig.4 2-M2 wall damage photos

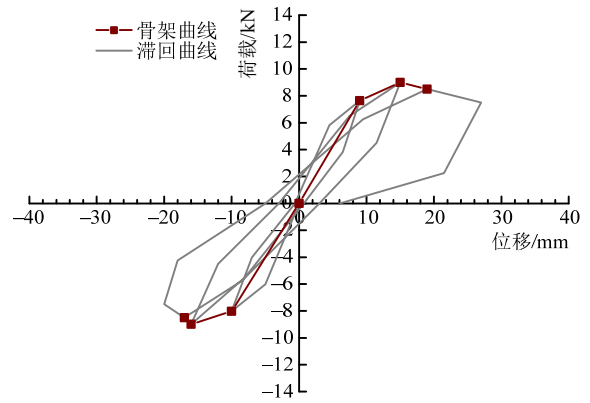


图 5 2-M2 墙体滞回曲线及骨架曲线

Fig.5 The hysteresis curve and skeleton curve of 2-M2 wall

3-M3-RRBB1 在水平推力荷载 9.27 kN 和水平位移 11.41 mm 时窗间墙出现裂缝较明显斜向裂缝；在水平推力荷载 11.50 kN 和水平位移 19.66 mm 时窗间墙和窗下墙出现较多明显斜裂缝；在水平推力荷载 10.62 kN 和水平位移 30.33 mm 时墙片在原有裂缝的基础上变宽变长。



图 6 3-M3-RRBB1 墙体破坏照
Fig.6 3-M3 wall damage photos

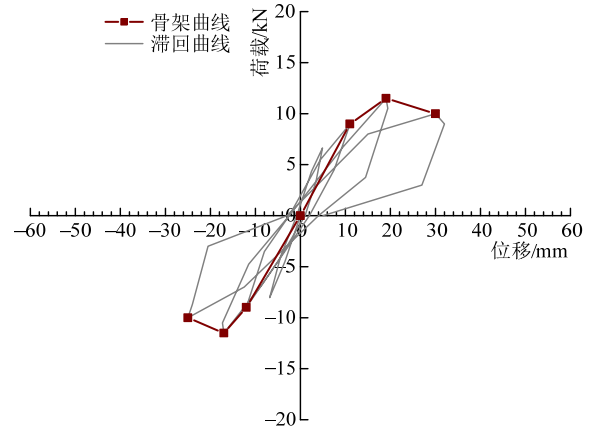


图 7 3-M3-RRBB1 墙体滞回曲线及骨架曲线

Fig.7 The hysteresis curve and skeleton curve of 3-M3 wall

4-M4-RRBB2 整体抗剪能力是四片泥浆砌筑墙片中最好。在水平推力荷载 9.20 kN 和水平位移 9.52 mm 时墙片中部开始到墙底角出现明显裂缝；在水平推力荷载 12.80 kN 和水平位移 19.61 mm 时墙片从上部 and 两端水平推力处出现多条明显斜裂缝开展到墙底部，裂缝分布较为均匀，这是因为墙

体上下两层布置了配筋砖圈梁，并且墙体无开洞，墙体强度较为均匀；在水平推力荷载 11.36 kN 和水平位移 30.25 mm 时墙片在原有裂缝的基础上变宽变长裂缝且裂缝分布均匀。

前四个墙片均用泥浆砌筑，从最终破坏情况和裂缝展布来看，裂缝较多、较深，且多为斜向交叉性和竖向贯穿性通透裂缝，墙片破坏严重。



图 8 4-M4-RRBB2 墙体破坏照
Fig.8 4-M4 wall damage photos

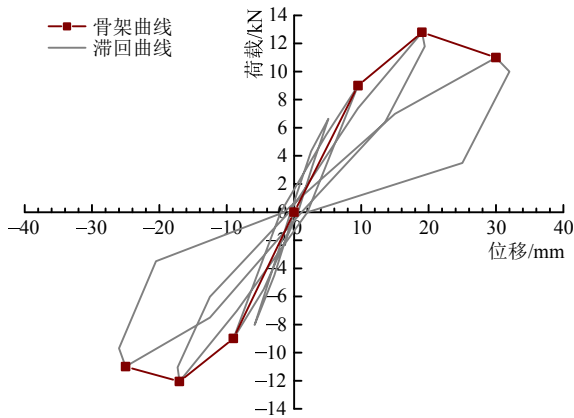


图 9 4-M4-RRBB2 墙体滞回曲线及骨架曲线
Fig.9 The hysteresis curve and skeleton curve of 4-M4 wall

5-S1 墙片抗剪能力优于泥浆砌筑墙片。在水平推力荷载 17.25 kN 和水平位移 15.28 mm 时墙片顶部中间位置开始到墙底角出现一条斜裂缝；在水平推力荷载 18.14 kN 和水平位移 25.23 mm 时墙片出现多条墙体顶层开始到墙底角的明显交叉斜裂缝；在水平推力荷载 15.41 kN 和水平位移 45.28 mm 时墙片在原有裂缝的基础上变宽变长裂缝且裂缝分布均匀。



图 10 5-S1 墙体破坏照
Fig.10 5-S1 wall damage photos

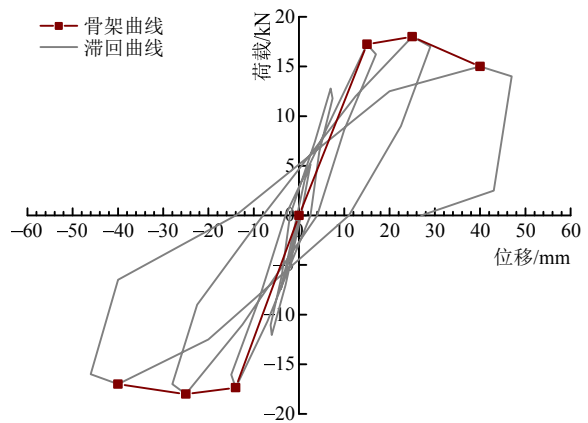


图 11 5-S1 墙体滞回曲线及骨架曲线
Fig.11 The hysteresis curve and skeleton curve of 5-S1 wall

6-S2-RRBB1 在水平推力荷载 17.23 kN 和水平位移 15.81 mm 时窗下墙洞口角部出现一条较宽斜裂缝；在水平推力荷载 19.12 kN 和水平位移 29.36 mm 时墙片出现窗洞四角部位较多明显斜裂缝；在水平推力荷载 18.58 kN 和水平位移 40.52 mm，裂缝主要在原有的基础上继续开展，裂缝变宽。



图 12 6-S2-RRBB1 墙体破坏照
Fig.12 6-S2-RRBB1 wall damage photos

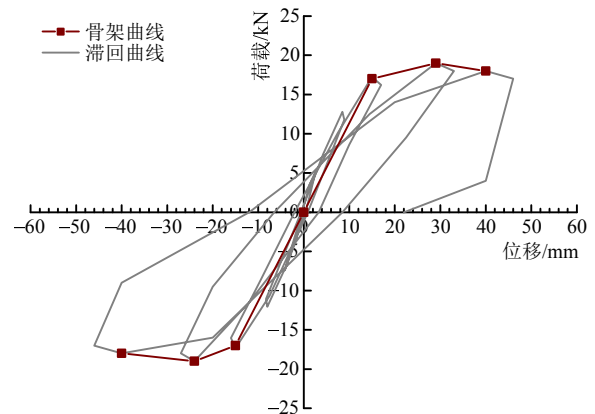


图 13 6-S2-RRBB1 墙体滞回曲线及骨架曲线
Fig.13 The hysteresis curve and skeleton curve of 6-S2-RRBB1 wall

7-S3-RRBB2 在水平荷载 17.28 kN 和水平位移 14.93 mm 时墙片中部开始到墙底角出现两条明显斜裂缝；在水平推力荷载 20.07 kN 和水平位移

30.76 mm 时墙片出现多条墙体中部开始到墙底角的明显交叉斜裂缝；水平荷载 19.32 kN、水平位移 48.19 mm 时墙片在原有裂缝基础上变宽变长裂缝。

5 号、6 号和 7 号墙片均用炉渣砂浆砌筑，砌筑强度略高于泥浆，从破坏情况和裂缝展布来看，裂缝数量较泥浆砌筑墙片明显减少，裂缝多为斜向贯穿性通透裂缝，墙片破坏依然较重。

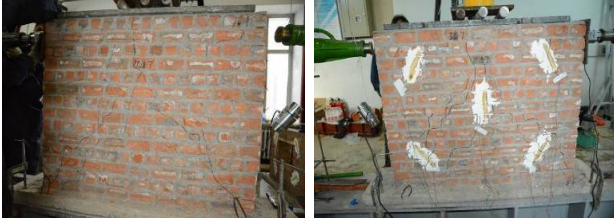


图 14 7-S3-RRBB2 墙体破坏照
Fig.14 7-S3-RRBB2 wall damage photos

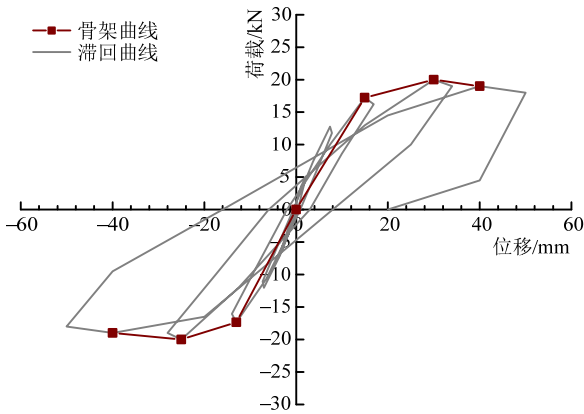


图 15 7-S3-RRBB2 墙体滞回曲线及骨架曲线
Fig.15 The hysteresis curve and skeleton curve of 7-S3-RRBB2 wall

8-C1 整体抗剪能力比泥浆和炉渣砂浆砌筑的墙体要好。在水平推力荷载 23.05 kN 和水平位移 17.82 mm 时墙片出现少量细裂缝；在水平推力荷载 27.25 kN 和水平位移 35.49 mm 时墙片细微裂缝增多，并出现多条明显的交叉斜裂缝；在水平推力荷载 25.65 kN 和水平位移 50.28 mm 时墙片出现较多较宽裂缝。



图 16 8-C1 墙体破坏照
Fig.16 8-C1 wall damage photos

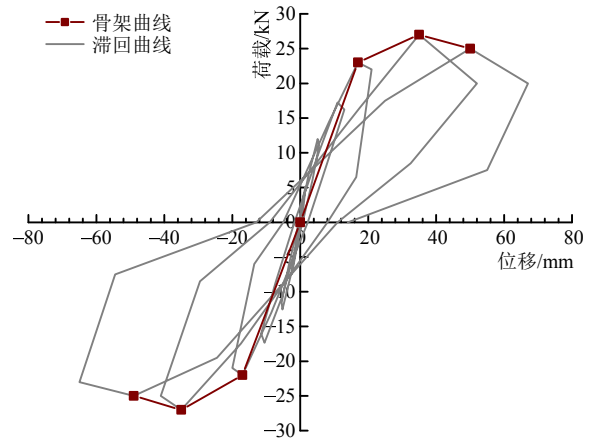


图 17 8-C1 墙体滞回曲线及骨架曲线
Fig.17 The hysteresis curve and skeleton curve of 8-C1 wall

9-C2-RRBB1 在水平推力荷载 24.28 kN 和水平位移 14.65 mm 时，窗下墙角部出现两条斜裂缝；在水平推力荷载 27.34 kN 和水平位移 30.13 mm 时窗间墙和窗洞四角出现较多明显斜裂缝；在水平推力荷载 26.38 kN 和水平位移 50.21 mm 时裂缝主要在前一步的基础上继续开展，裂缝变宽变长。



图 18 9-C2-RRBB1 墙体破坏照
Fig.18 9-C2-RRBB1 wall damage photos

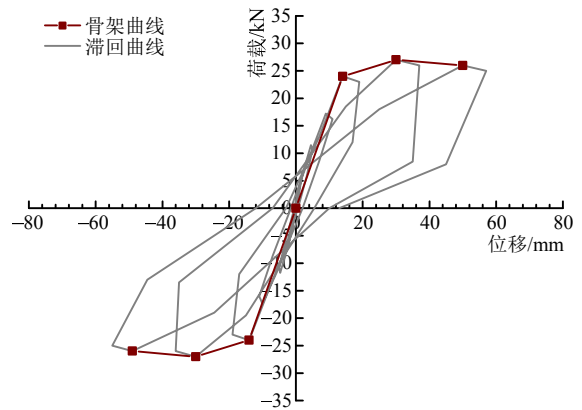


图 19 9-C2-RRBB1 墙体滞回曲线及骨架曲线
Fig.19 The hysteresis curve and skeleton curve of 9-C2-RRBB1 wall

10-C3-RRBB2 在水平推力荷载 24.15 kN 和水平位移 13.57 mm 是产生少数细微裂缝；在水平推力荷载 29.00 kN 和水平位移 30.18 mm 时，又增加

一条从侧端面水平推力处开展至墙底角的明显斜裂缝；在水平推力荷载 28.00 kN 和水平位移 48.72 mm 时原有裂缝变宽变长。

8 号、9 号和 10 号墙片均用水泥砂浆砌筑，砌筑强度均高于较上述墙片，裂缝数量、深度和长度均小于上述墙片。裂缝主要分布在开窗四角斜向展开，无开窗洞口主要为斜向交叉性裂缝。



图 20 10-C3-RRBB2 墙体破坏照
Fig.20 10-C3-RRBB2 wall damage photos

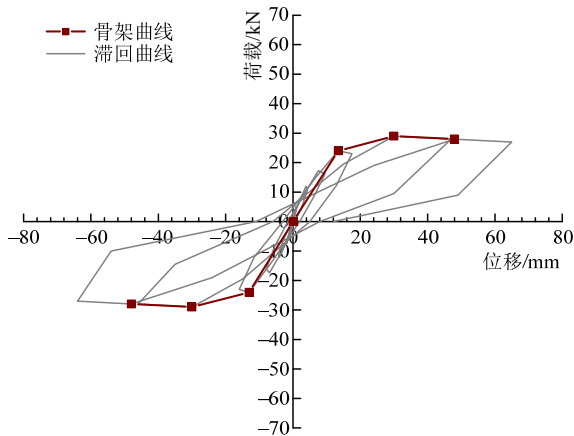


图 21 10-C3-RRBB2 墙体滞回曲线及骨架曲线
Fig.21 The hysteresis curve and skeleton curve of 10-C3-RRBB2 wall

11-C4-RBCC1 在水平推力荷载 29.04 kN 和水平位移 15.17 mm 时墙体出现少数细微裂缝值；在水平推力荷载 58.02 kN 和水平位移 40.29 mm 时窗洞四角出现较多明显斜裂缝；在水平推力荷载 45.54 kN 和水平位移 60.15 mm 时，裂缝主要在前一步的基础上继续开展，裂缝变宽变长。



图 22 11-C4-RBCC1 墙体破坏照
Fig.22 11-C4-RBCC1 wall damage photos

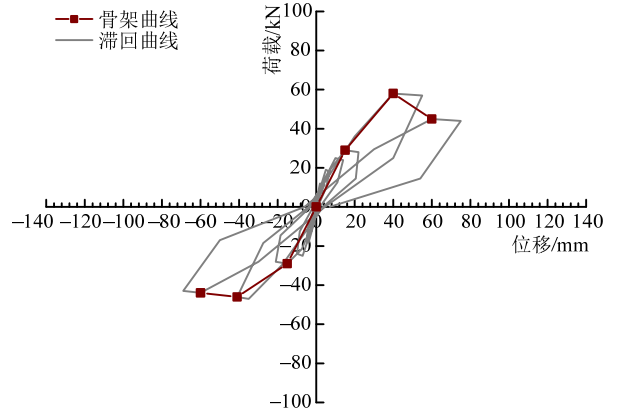


图 23 11-C4-RBCC1 墙体滞回曲线及骨架曲线
Fig.23 The hysteresis curve and skeleton curve of 11-C4-RBCC1 wall

12-C5-RBCC2 在水平推力荷载 56.19 kN 和水平位移 19.76 mm 时出现较多分布均匀的细微裂缝；在水平推力荷载 83.62 kN 和水平位移 50.72 mm 时墙片细微裂缝继续增加；在水平推力荷载 80.69 kN 和水平位移 90.36 mm 时墙片原有细微裂缝扩展，墙体形成均布斜裂缝，较为明显的几条裂缝为墙体上部中间位置开裂至墙片底部。

11 号、12 号墙片均为水泥砂浆砌筑，并且采用圈梁构造柱，从最终破坏情况看，裂缝细而密，多为斜向展布，并且裂缝一般没有贯穿。



图 24 12-C5-RBCC2 墙体破坏照
Fig.24 12-C5-RBCC2 wall damage photos

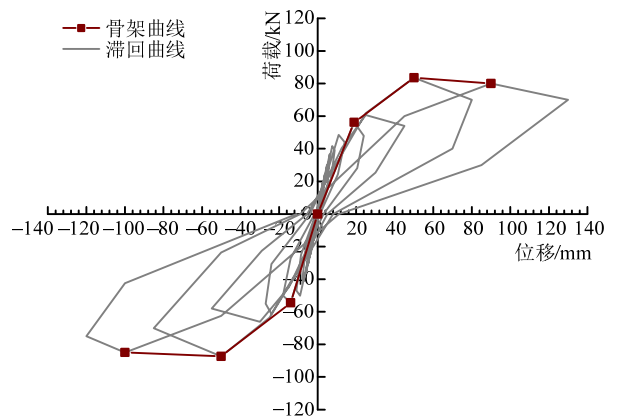


图 25 12-C5-RBCC2 墙体滞回曲线及骨架曲线
Fig.25 The hysteresis curve and skeleton curve of 12-C5-RBCC2 wall

通过 12 个墙片的破坏情况、滞回曲线和骨架曲线可以看出,砂浆强度对墙体的影响最大,砂浆强度越大,同等往复力下,墙片破坏越轻,滞回曲线的往复次数也越多,骨架曲线值也越高;其次影响较大的是钢筋混凝土圈梁和构造柱,可以通过 12 号墙片与 10 号墙片、11 号墙片与 9 号墙片的对比看出;然后是开洞对墙体抗震能力的影响次之,可以通过 12 号与 11 号墙片、10 号与 9 号墙片、7 号墙片与 6 号墙片、4 号与 3 号墙片、2 号与 1 号墙片的对比可以看出;最后是配筋砖圈梁对墙体抗剪能力的影响最小。

2.3 墙片抗震性能分析

根据试验所得到的滞回曲线,将循环荷载下每次循环顶点的割线刚度定义为等效刚度 K_i 。

$$K_i = \frac{|P_i| + |-P_i|}{|\Delta_i| + |-\Delta_i|} \quad (11)$$

式中: P_i 为第 i 次水平荷载值; $-P_i$ 为反向荷载值; Δ_i 为 P_i 时的位移值; $-\Delta_i$ 为 $-P_i$ 时的位移值。

每一墙片的骨架曲线可转化为包括弹性阶段、弹塑性阶段和破坏阶段的一条三折线恢复力特性模型。此处以极限位移与开裂位移的比值作为延性系数^[7]。

通过上述公式给出了 12 个墙片在开裂、极限及破坏阶段的刚度,以及 12 个墙片的延性系数。图 26 给出了 12 个墙片的开裂、极限和破坏刚度变化曲线。图 27 给出了墙片的延性系数变化曲线。

通过刚度退化曲线来看,12 个墙片的开裂刚度随砌筑砂浆强度的提高而提高,刚度退化曲线末端出现了翘尾现象,这是因为 12 号墙片无窗、有圈梁构造柱,墙片的开裂刚度得到了大幅提高。

1 号~4 号墙片为泥浆砌筑的墙片。达到开裂刚度时,开裂刚度值的排列顺序为 4 号>2 号>3 号>1 号,说明此时开洞率对墙片刚度的影响比配筋率要大;达到极限刚度时,极限刚度值的排列顺序为 4 号>3 号>2 号>1 号,说明水平砖配筋圈梁开始起作用并且大于开洞率的影响;达到破坏刚度时,破坏刚度值的排列顺序为 2 号>1 号>4 号>3 号。通过滞回曲线来看,1 号和 2 号墙片无筋,砌筑泥浆强度很低,在位移较小的情况下,很容易达到破坏状态;3 号和 4 号墙片有配筋,达到破坏状态时,和 1 号、2 号墙片相比位移值有了一定的增加。这就说明当砌筑砂浆强度较低时,配筋对墙片破坏剪力值提高作用不大。

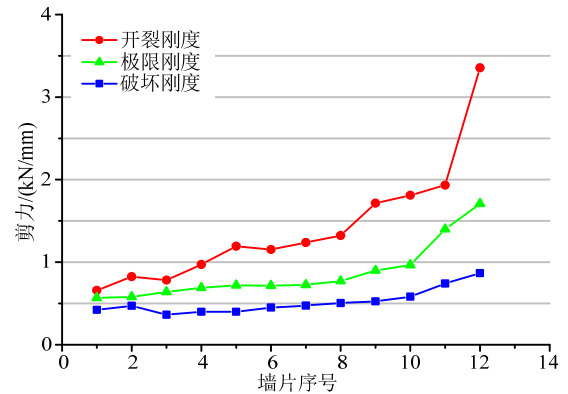


图 26 墙片刚度退化曲线

Fig.26 Stiffness degradation curve of wall

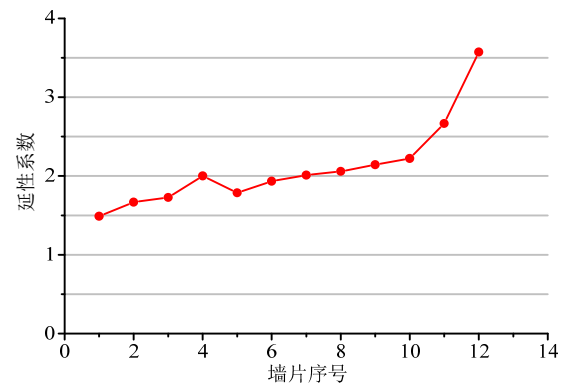


图 27 墙片延性系数曲线

Fig.27 Curve of wall ductility coefficient

5 号~7 号为炉渣砂浆砌筑的墙片。达到开裂刚度时,开裂刚度值的排列顺序为 7 号>5 号>6 号,说明开洞率对墙体开裂刚度的作用最大,配筋率对墙体开裂刚度的作用次之;达到极限刚度时,极限刚度值的排列顺序为 7 号>5 号>6 号,三个墙片的极限刚度值的规律与开裂刚度时一致;达到破坏刚度时,破坏刚度值的排列顺序为 7 号>6 号>5 号,说明在这种情况下,说明配筋率对墙体开裂刚度的作用最大,开洞率对墙体开裂刚度的作用次之。

8 号~10 号墙片为水泥砂浆砌筑的墙片,达到开裂刚度时,开裂刚度值的排列顺序为 10 号>9 号>8 号,说明配筋率对墙体开裂刚度的作用最大,开洞率对墙体开裂刚度的作用次之这是因为水泥砂浆强度较高,达到开裂时,配筋已经开始发挥作用了;达到极限刚度时,极限刚度值的排列顺序为 10 号>9 号>8 号,三个墙片的极限刚度值得规律与开裂刚度时一致,刚度之间的差值逐渐缩小;达到破坏刚度时,破坏刚度值的排列顺序为 10 号>9 号>8 号,三个墙片的极限刚度值得规律与开裂刚度时一致,刚度之间的差值进一步缩小。

11号~12号为水泥砂浆砌筑有混凝土圈梁构造柱的墙片,达到开裂刚度时,12号墙片的开裂刚度值远远大于11号墙片,说明在砂浆强度较高的情况下,开洞率对墙片的开裂刚度影响较大;达到极限刚度时,12号墙片的开裂刚度值大于11号墙片,但是差距有所减小,圈梁和构造柱起的作用越来越大,圈梁构造柱的作用大于开洞率对墙片的极限刚度影响;达到极限刚度时,12号墙片的开裂刚度值大于11号墙片,差距进一步减小,圈梁构造柱的作用远远大于开洞率对墙片的极限刚度影响。

通过12个墙片的刚度退化曲线可以发现如下特征:1) 砌筑砂浆的强度对墙片的刚度影响最大,随着刚度的降低,这种影响越来越小;2) 在用水泥浆和炉渣砂浆砌筑的墙片中,达到开裂刚度时,因为砂浆强度低,墙片开裂强度低,水平配筋还发挥作用较小,墙片刚度主要受开洞率的影响,达到极限刚度后,水平配筋才开始发挥较大作用,并且其作用大于开洞率,而在水泥砂浆砌筑的墙体中,因为砂浆强度比较高,墙片开裂剪力值较大,达到开裂刚度时,水平配筋发挥的作用大于开洞率,也就是说,砌筑砂浆强度越高,钢筋越早发挥作用;3) 有混凝土圈梁构造柱的墙片开裂刚度得到了大幅提高,通过11号、12号墙片可以看出,在3个阶段开洞率对墙片的刚度均有影响,随着刚度值的降低,这种影响越来越小。

根据图27可知,墙片的延性随着砌筑砂浆强度的提高而提高。当采用水泥砂浆砌筑时,墙片的延性得到了较大的提高;墙片的延性随着配筋率的提高而提高,尤其是对于混凝土圈梁构造柱墙片,延性得到了大幅提高,当砂浆强度相差不是很大时,配筋对墙片延性的影响甚至大于砂浆强度,比较典型是4号墙片和5号墙片,虽然4号墙片采用泥浆砌筑,但是墙片有上下两层配筋,而5号墙片采用炉渣砂浆砌筑无任何配筋,4号墙片的延性大于5号墙片;通过12个墙片还可以看出,开洞对墙片的延性影响要小于配筋和砂浆强度。

2.4 墙片能量损耗和阻尼比分析

计算力-位移滞回曲线下的面积可以求出各种墙体的变形能。以循环荷载下滞回环面积来计算墙体构件的能量损耗 $E_d^{[11-12]}$:

$$E_d = A / (A + B) \quad (12)$$

式中: A 为加载与卸载曲线包围的空白面积; B 为卸载曲线与坐标轴形成的阴影面积。

通常以阻尼比表示结构的能量吸收能力:

$$\lambda = A / 2\pi(A + B) \quad (13)$$

为了清晰的表达墙片耗能、阻尼比与变形的关系。图28以12号墙体12-C5-RBCC2为例画出了破坏阶段力与位移的曲线图。

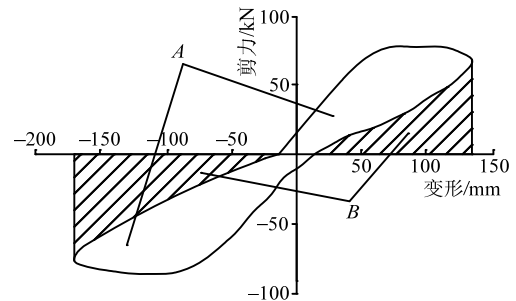


图28 耗能、阻尼比与变形的关系

Fig.28 The relationship between energy dissipation, damping ratio and deformation

通过12个墙片的能量损耗值可以看出,见表5,无论在开裂阶段、极限阶段还是破坏阶段,墙片的能量损耗,随砌筑砂浆强度的提高而降低,在开裂阶段,泥浆和炉渣砂浆砌筑的墙片能量损耗就达到了50%,而水泥砂浆砌筑的墙片能量损耗只有40%;在极限阶段,泥浆和炉渣砂浆砌筑的墙片能量损耗就达到了70%,而水泥砂浆砌筑的墙片能量损耗只有60%,采用圈梁构造柱的墙片甚至只有50%多;在破坏阶段,泥浆和炉渣砂浆砌筑的墙片能量损耗就达到了80%,而水泥砂浆砌筑的墙片能量损耗只有70%,采用圈梁构造柱的墙片甚至只有60%多;水平配筋对能量损耗的影响在砂浆强度较低的泥浆和炉渣砂浆墙片的开裂阶段并不明显,而是到了极限阶段和破坏阶段,水平配筋对能量损耗的影响才比较明显,而采用水泥砂浆砌筑的墙片中,水平配筋在开裂阶段作用就比较明显,这和刚度退化现象分析得出的结论是一致的。开裂阶段对于采用砂浆强度较低的泥浆和炉渣砂浆墙片,开洞率对能量损耗的影响要大于水平配筋的影响,而在极限和破坏阶段,开洞率的影响要小于水平配筋;对于水泥砂浆砌筑的墙片,无论在开裂阶段,极限阶段还是破坏阶段,开洞率对能量损耗的影响均小于水平配筋的影响^[13-14],这也和墙片刚度退化分析时得出的结论是一致的。

通过阻尼比的计算公式可以看出,阻尼比和能量损耗的值只是相差一个 2π 的关系,所以说阻尼比的变化规律和能量损耗是完全一致的^[15]。

表 5 墙片耗能及阻尼比
Table 5 Wall energy and damping ratio

墙片编号	开裂		极限		破坏	
	E_d	λ	E_d	λ	E_d	λ
1	0.53	0.084	0.73	0.116	0.87	0.139
2	0.48	0.076	0.70	0.111	0.83	0.132
3	0.52	0.083	0.71	0.113	0.85	0.135
4	0.49	0.078	0.67	0.107	0.79	0.126
5	0.47	0.075	0.69	0.110	0.82	0.131
6	0.49	0.078	0.68	0.108	0.84	0.134
7	0.46	0.073	0.67	0.107	0.79	0.126
8	0.43	0.068	0.65	0.104	0.77	0.123
9	0.42	0.067	0.64	0.102	0.75	0.119
10	0.42	0.067	0.62	0.099	0.73	0.116
11	0.41	0.065	0.58	0.092	0.67	0.107
12	0.38	0.061	0.55	0.088	0.61	0.097

3 结论与建议

根据我国农居抗震情况调查可知,农居墙体砌筑用的砂浆主要有泥浆、炉渣砂浆、水泥砂浆、石灰砂浆及混合砂浆等。本文对泥浆、炉渣砂浆、水泥砂浆 3 种农居常用砂浆进行了抗压强度试验,得到了 3 种砂浆的抗压强度等级。并对 3 种砂浆材料砌筑的标准砖砌体试件进行了轴心抗压强度试验,测定了砖砌体的抗压强度值。对 3 种砂浆材料的 12 组墙片进行了拟静力试验,得到了墙片的滞回曲线、骨架曲线刚度退化、延性系数等结果,主要分析了砂浆强度、抗震构造措施和开洞对墙体抗震性能的影响。综合对比分析 12 个墙片拟静力试验结果,可得以下结论:

(1) 砂浆强度是影响墙体抗剪能力的最重要因素。泥浆砌筑的墙片抗剪能力最差,炉渣砂浆砌筑的墙片次之,水泥砂浆砌筑的墙片抗剪能力最好。

(2) 开洞是影响墙体抗剪能力的一个重要因素。随着墙体的开裂,开洞对墙体的抗剪能力影响越来越明显。当砂浆强度相同时,抗震措施相同的情况下,开洞越大,墙体的抗剪能力越差,并且随着墙体进入弹塑性阶段至破坏阶段,越来越明显。当砂浆强度不同时,砂浆强度越低,抗震构造措施越少,开洞对墙体抗剪能力的影响越明显。

(3) 配筋率和抗震构造措施是影响墙体抗剪能力的一个重要因素。配筋率越低,抗震构造措施越少,墙体抗剪能力越差。在开裂阶段,除炉渣砂浆砌筑的墙片外,采用相同砌筑砂浆,开洞相同而配筋率和抗震构造措施不同的墙片,配筋率和抗震构造措施的作用明显,当剪力达到极限荷载值时,配

筋率和抗震构造措施的作用最明显。应该说配筋率在适当范围内越高,抗震构造措施越有利,墙体抗剪荷载值越高,抗剪能力越好。

基于墙片试验结论,可对农居设计和施工提出以下建议:

(1) 墙体的砌筑砂浆强度不宜过低,过低时,墙体的开裂剪力比较小,在墙体的初始破坏阶段水平配筋无法发挥作用;

(2) 墙片的开洞是影响墙体抗剪能力的一个关键因素,墙体强度越高,抗震措施越好,开洞的影响越明显;

(3) 水平配筋砖圈梁和圈梁构造柱都可以提高墙片的抗剪能力,但是圈梁构造柱的作用更加明显,水平配筋砖圈梁即使在低强度砂浆墙体中亦能起到防倒塌的作用;

(4) 在强度相同的情况下,采用比重较小的砌筑材料,提高墙体的轴压比来增强墙体的抗剪能力;

(5) 提高砌筑砂浆强度,并采用水平配筋砖圈梁,条件允许的情况下可以采用圈梁构造柱,可以大幅提高墙体的抗剪能力;

(6) 减小墙体的开洞对墙体抗剪是有利的,开洞越大,墙体的抗剪能力越弱。

需要指出的是,本文介绍的墙片试验只是单一的构件试验,忽略了构件之间的连接问题,并不能代表结构的整体性能,未来研究过程中应对考虑纵横墙连接的多墙片进行相应试验研究,以弥补本文研究存在的不足。

参考文献:

- [1] 赵少飞. 6 度区农村住宅的抗震设防[J]. 工程抗震, 2000, 22(1): 43-44.
Zhao Shaofei. Seismic fortification of rural residential buildings in the 6 degree area [J]. Engineering Earthquake Resistance, 2000, 22(1): 43 - 44. (in Chinese)
- [2] 刘东柏. 关注农村民居建筑抗震防灾让农民共享科技阳光[J]. 中外建筑, 2007, 13(3): 1-3.
Liu Dongbai. Pay attention to the rural residential building earthquake resistance and disaster prevention for farmers to share the science and technology of the sun [J]. Chinese and Foreign Architecture, 2007, 13(3): 1-3. (in Chinese)
- [3] 方冬慧, 王清远, 刘永杰. 砌体结构房屋在汶川地震中的损坏特征[J]. 四川建筑, 2009, 39(5): 118-119.
Fang Donghui, Wang Qingyuan, Liu Yongjie. The damage characteristics of masonry structures in Wenchuan earthquake [J]. Sichuan Architecture, 2009,

- 39(5): 118—119. (in Chinese)
- [4] 王瑛, 史培军, 王静爱. 中国农村地震灾害特点及减灾对策[J]. 自然灾害学报, 2005, 14(1): 82—89.
Wang Ying, Shi Peijun, Wang Jingai. China rural characteristics of the earthquake disaster and disaster mitigation strategies [J]. Journal of Natural Disasters, 2005, 14(1): 82—89. (in Chinese)
- [5] 姚新强, 孙柏涛, 陈宇坤, 杨绪连. 天津市小洋楼民居抗震有限元分析[J]. 世界地震工程, 2015, 31(3): 170—177.
Yao Xinqiang, Sun Baitao, Chen Yukun, Yang Xulian. Tianjin small villas residential earthquake finite element analysis [J]. World Earthquake Engineering, 2015, 31(3): 170—177. (in Chinese)
- [6] 姚新强, 孙柏涛, 陈宇坤, 杨绪连, 周强, 朱宏. 基于震害预测的动态震害矩阵方法研究[J]. 地震工程学报, 2016, 38(2): 318—322.
Yao Xinqiang, Sun Baitao, Chen Yukun, Yang Xulian, Zhou Qiang, Zhu Hong. Study on dynamic earthquake damage matrix method based on earthquake damage prediction [J]. Journal of Earthquake Engineering, 2016, 38(2): 318—322. (in Chinese)
- [7] 施楚贤. 砌体结构理论与设计[M]. 第3版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013: 51—57.
Shi Chuxian. Masonry structure theory and [M]. 3rd ed. Beijing: China Building Industry Press, 2013: 51—57. (in Chinese)
- [8] 姚新强. 天津农居易损性与抗震能力分布研究[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2016.
Yao Xinqiang. Analysis of Tianjin rural residential vulnerability and seismic capacity distribution [D]. Harbin: China Earthquake Administration Institute of Engineering Mechanics, 2016. (in Chinese)
- [9] 尹攀, 易伟建, 胡其高. 结构整体抗震性能评估新方法[J]. 工程力学, 2010, 27(3): 123—131.
Yin Jiang, Yi Weijian, Hu Qigao. The new method for estimating seismic performance of structures [J]. Engineering Mechanics, 2010, 27(3): 123—131. (in Chinese)
- [10] 彭斌, 刘卫东, 杨伟波. 在役历史建筑砌体承重墙抗震性能试验研究[J]. 工程力学, 2009, 26(12): 112—126.
Peng Bin, Liu Weidong, Yang Weibo. Experimental investigation on seismic behaviors of load-bearing masonry walls in in-service historical architecture [J]. Engineering Mechanics, 2009, 26(12): 112—126. (in Chinese)
- [11] 曹万林, 张勇波, 董宏英, 周中一, 张建伟. 村镇建筑抗震节能结构体系研究与应用[J]. 工程力学, 2015, 32(12): 1—12.
Cao Wanlin, Zhang Yongbo, Dong Hongying, Zhou Zhongyi, Zhang Jianwei. Research and application on aseismic energy-saving structural system for rural buildings [J]. Engineering Mechanics, 2015, 32(12): 1—12. (in Chinese)
- [12] Ang A H-S, Leon D D. Determination of optimal target reliabilities for design and updating of structures [J]. Structural Safety, 1997, 19(1): 91—103.
- [13] Richard S Olson, Robert A Olson. Urban heavy rescue [J]. Earthquake Spectra, 1987, 3(4): 645—658.
- [14] Nagarajaiah S, Narasimhan S, Johnson E. Structural control benchmark problem (Phase II): Nonlinear smart base-isolated building subjected to near-fault earthquakes [J]. Structural Control and Health Monitoring, 2008, 15(5): 653—656.
- [15] Di S L, Chioccarelli E, Cosenza E. Seismic response analysis of an irregular base isolated building [J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2011, 1(1): 1—30.