

砌体墙抗震性能伪静力试验研究

彭 斌¹, 汪澜涯¹, 王冬冬¹, 王卓琳²

(1. 上海理工大学 环境与建筑学院, 上海 200093; 2. 上海市建筑科学研究院(集团)有限公司, 上海 200032)

摘要: 考虑了砂浆强度等级、开洞率和高宽比3种因素, 对3层砌体房屋的底层墙进行抗震性能的伪静力试验. 分析了破坏形态、滞回耗能、抗震承载力、刚度退化和墙体侧移情况. 结果表明, 砂浆强度等级和高宽比对破坏形态的影响类似, 而开洞率稍有不同; 砂浆强度等级愈低、开洞率愈大或高宽比愈大时, 墙体的耗能能力及抗震承载力愈小, 其中开洞率的影响更为显著. 开裂前, 各因素下刚度退化均较快, 且趋势一致; 开裂后, 开洞率大的试件刚度退化最快; 达到极限荷载时, 各因素下的刚度退化较大, 为初始刚度的20%左右. 开裂后, 开洞率大的墙肢薄弱, 墙高方向的侧移分布曲线明显外凸.

关键词: 砌体墙; 砂浆强度; 开洞率; 高宽比; 伪静力试验

中图分类号: TU 362; TU 317 **文献标志码:** A

Pseudo-Static Tests on the Seismic Performances of Masonry Walls

PENG Bin¹, WANG Lanya¹, WANG Dongdong¹, WANG Zhuolin²

(1. School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China; 2. Shanghai Research Institute of Building Sciences (Group) Co., Ltd., Shanghai 200032, China)

Abstract: Considering the factors such as mortar strength, ratio of openings and aspect ratio, Pseudo-static tests on the seismic performances of the bottom walls of a 3-story masonry structure were conducted. The damage models, hysteretic properties, aseismic capacities, stiffness degradations and lateral displacements of walls were analyzed. The results show the damage models are significantly influenced by the ratio of openings, and not obviously affected by the mortar strength or aspect ratio. The hysteretic properties and aseismic capacities are unfavorable under lower mortar strength, larger ratio of openings and larger aspect ratio. The ratio of openings significantly affects the aseismic capacity. Before cracking, the influence of each factor on the speed of stiffness degradation is almost the same and the degradation is rather fast. While after cracking, the ratio of openings is the most prominent factor and the specimens with larger ratio of openings degradate faster. The residual stiffness is about 20% of the initial stiffness when the specimens reach their limit load state. The distribution of lateral displacement of the specimens with lager ratio of openings exhibits an outer convex curve after cracking.

Keywords: masonry wall; mortar strength; ratio of openings; aspect ratio; pseudo-static test

收稿日期: 2015-06-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51208300)

第一作者: 彭 斌(1977-), 男, 副研究员. 研究方向: 砌体结构. E-mail: BinPeng@usst.edu.cn

砌体墙作为砌体房屋中主要承重及抗侧移构件,地震作用时,部分墙体因抗震性能差而破坏,已给人类生命财产造成极大损失^[1].基于此,砌体墙的抗震性能研究显得尤为重要.一方面,砌体墙受力状态复杂且受多种因素影响,如砂浆强度等级、开洞率和高宽比等^[2],给抗震性能研究带来一定困难.另一方面,虽国外学者做过大量的试验及理论研究^[3-4],但我国既有砌体墙的使用现状较国外存在差异^[5],其因素水平不尽相同.为此,需结合我国砌体墙实际情况进行抗震性能研究.

考虑砂浆强度等级、开洞率和高宽比3种因素,实施伪静力试验.通过观察墙体的破坏形态,获得相应的破坏模式.对比滞回曲线,分析墙体的滞回耗能及抗震承载力特点.归纳了墙体刚度退化的过程,并进行了刚度退化因素分析.最后,指出了沿墙高方向侧移分布墙体,旨在为我国砌体结构的抗震性能研究提供参考.

1 砌体墙伪静力试验

1.1 试件设计及制作

据文献[6]的统计,烧结普通砖具有就地取材、造价低廉的优点,由其砌筑的2~3层的砌体房屋在我国典型地区的村镇广泛存在.设计试验方案时以3层砌体房屋底层墙为对象,设计4片1:2缩尺墙体试件.试件考虑砂浆强度等级、开洞率和高宽比3种因素.其中,砂浆强度等级取M5和M7.5;根据《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)^[7]关于开洞率(即开洞面积占墙体面积比值)的限值,结合砌筑方便的目的,取开洞率分别为0(即不开洞)和11%;由于底层开间和层高根据功能需求可灵活调整,结合某重点试验室条件,最终取高宽比为0.75和1.25.试件编号为W1,W2,W3,W4,其中W3开洞位置居中,试件因素及水平见表1.

表1 试件因素及水平

Tab.1 Influential factors and levels of specimens

试件编号	砖强度等级	砖尺寸/mm (高×宽×厚)	砂浆强度等级	高宽比	开洞率/%	开洞尺寸/mm	试件尺寸/mm (高×宽×厚)
W1	MU10	240×115×53	M5	0.75	0	0	1490×1990×240
W2	MU10	240×115×53	M7.5	0.75	0	0	1490×1990×240
W3	MU10	240×115×53	M7.5	0.75	11	760×510	1490×1990×240
W4	MU10	240×115×53	M7.5	1.25	0	0	2490×1990×240

制作试件时,在底梁上预留吊装孔和固定底梁所需的螺栓孔,见图1.各试件由同一工人采用一丁一顺的方式砌筑,灰缝厚度10 mm.砌筑各试件时,制备材料抗压强度试验所需的砖、砂浆和砌体试件.图1(a)和图1(b)分别为不开洞和开洞时的试件示意图.其中开洞试件W3,为保证连续砌墙,过梁采

用预制钢筋混凝土梁,支撑长度按构造要求取240 mm.为模拟试件在竖向承重和水平抗剪的受力状态,需制作钢筋混凝土顶梁来施加相应荷载.水平加载时,由于墙体与底梁(或顶梁)易发生通缝破坏,为此,采用凿毛梁体和预留嵌固墙体的混凝土块等措施.W4的底梁和顶梁做法与上述各试件相同.

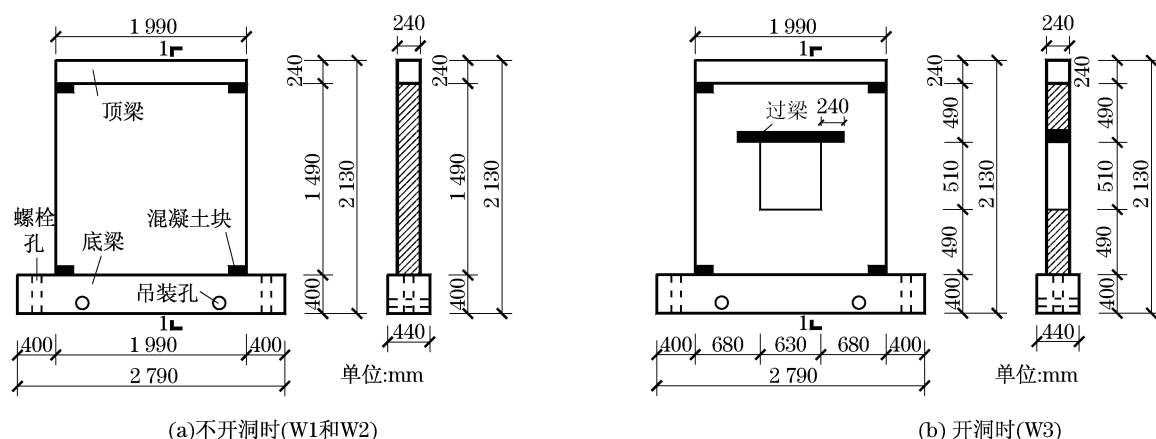


图1 墙体试件示意图

Fig.1 Schematic of the specimen of masonry wall

1.2 位移测点布置

墙体平面内的侧移是评定其抗震性能的基础数据,目前多通过安装在底梁外的位移计测得.由于水平加载时底梁易发生滑移,则位移计实测位移包含底梁滑移部分,进而影响抗震性能的合理评价.为此,在底梁两端连接两竖直的位移计固定板,将位移计置于位移计固定板上,见图2.此时位移计随底梁的滑移而移动,则位移计所测位移即为墙体的位移.

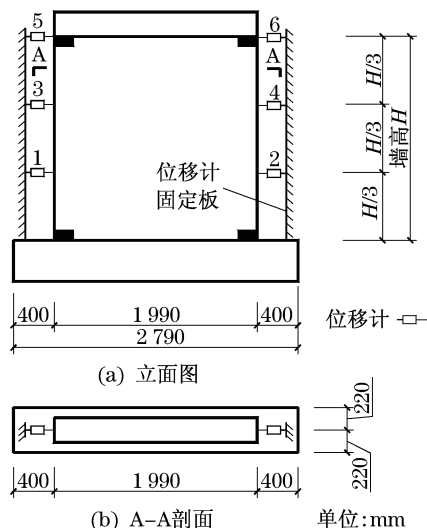


图2 试件测点布置示意图

Fig.2 Schematic of the transducers distribution on specimen

图2中位移计为拉线式位移计,在试件左右两侧对称布置,以便数据校核.位移计测点编号为1~6,其中测点1,2位于墙高的1/3位置,测点3,4位于墙高的2/3位置,以测量沿墙高方向的水平位移变化.测点5,6用来测量墙体的最大水平位移.开洞试件W3的测点布置方法与此相同.

1.3 加载装置及加载制度

根据3层砌体房屋原型,计算底层墙的竖向荷载,此时轴压比水平为0.3.竖向荷载采用两竖向千斤顶施加,由钢梁以及顶梁分配给墙体,试验过程中维持轴压比水平稳定.水平荷载通过作动器施加,装置见图3.

水平加载分为两阶段.第一阶段是预加载,即先正向(作动器前进方向)加载至5 kN,后卸载至0后反向(作动器后退方向)加载至5 kN,最终卸载至0.此过程主要检查作动器、位移计和数据采集等设备是否工作正常.第二阶段是正式加载,即力-位移混合加载,见图4.其中 V_0 为初始载荷; X_c 为开裂位移.力-位移混合加载过程为:先进行力控制至墙体开裂,此时每级荷载循环一周;接着进行位移控制,



图3 加载装置(W4)

Fig.3 Devices of loading (W4)

以获得骨架曲线的下降段,即2倍开裂位移下循环两周,下一级位移加载递增一倍开裂位移.当骨架曲线上荷载下降至峰值荷载的85%后,认为墙体已破坏,停止加载.

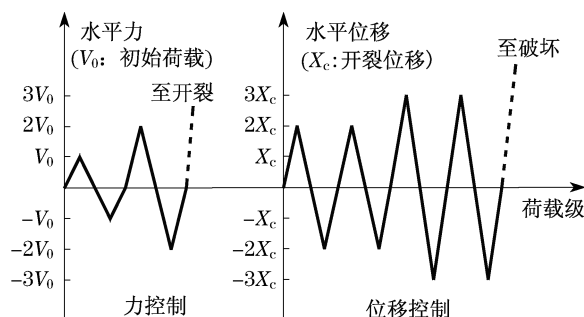


图4 力-位移混合加载制度

Fig.4 Force-displacement mixed control of loading

2 试验结果及分析

2.1 材料抗压强度试验

砌筑过程中,据《砌墙砖试验方法》GB/T 2542—2003的要求,各随机预留一组烧结普通砖试件进行抗压强度试验.W1,W2,W3,W4烧结普通砖抗压强度平均测值分别是16.3,14.5,16.0,14.1 N/mm².同样,按《建筑砂浆基本性能试验方法标准》JGJ/T 70—2009相关要求,W1,W2,W3,W4在拌制砂浆过程中预留A,B两组砂浆试件.A组养护28 d,W1,W2,W3,W4砂浆抗压强度平均值分别为4.4,7.4,7.3,8.3 N/mm².B组养护至墙体伪静力试验当天,W1,W2,W3,W4养护天数分别为31,32,35,36 d,其强度平均值分别为4.7,7.5,7.7,8.5 N/mm².由于B组砂浆较A组养护周期长,其抗压强度较A组呈现出不同程度的增长,因此用B组评定

墙体中的砂浆强度更合理。

2.2 破坏形态

2.2.1 试验结果

为表述方便,在正向加载时的荷载和墙体位移前记“+”,反向时记“-”。由于各试件中的裂缝宽度小,所拍摄试验照片中的裂缝分布不便观察。为此,将实际裂缝重新描绘,结果见图5。

W1在水平加载至 -158.8 kN 时,墙体右下角第1,2层砖之间的砂浆出现水平通缝,长约一砖,宽

为 0.3 mm ,此时墙顶水平位移 -1.2 mm 。随着水平荷载的增加,初始裂缝不断沿墙体对角线发展,对角线上同时出现新裂缝,这些裂缝最终发展为临界裂缝。当水平位移加载至 $+7.20\text{ mm}$ 时,墙体达到水平极限荷载 $+351.9\text{ kN}$,此时裂缝基本出齐,最大裂缝宽度为 2.5 mm 。此后继续增加水平位移时,墙体水平荷载逐渐减小。当水平位移加载至 $+9.08\text{ mm}$ 时,水平荷载降至峰值荷载的85%以下,对角临界裂缝贯通,墙体宣告破坏。

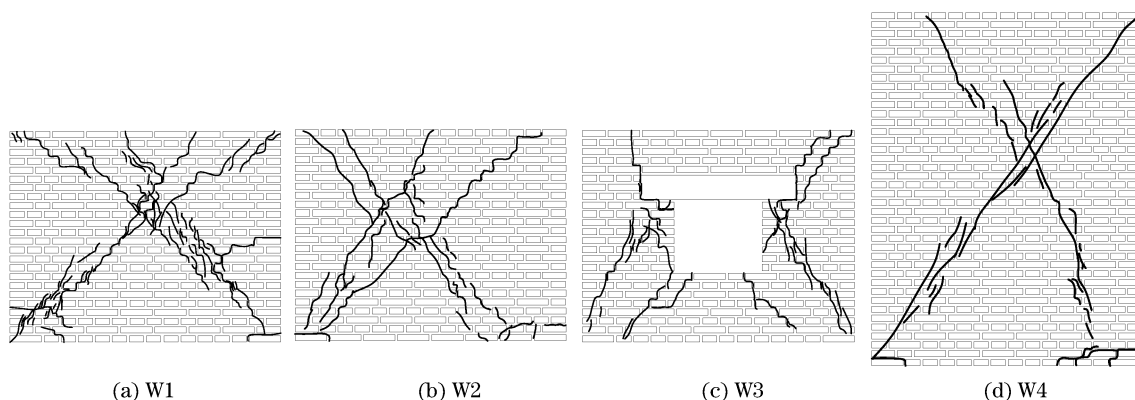


图5 试件裂缝分布

Fig.5 Cracks distribution on specimens

W2和W4的破坏过程与W1类似,此处不予赘述。试件W3则不同,表现为:首批裂缝出现在洞口左上角,竖向裂缝长约半砖,水平通缝长约一砖;在加载的过程中,除洞角至墙角出现对角斜裂缝外,墙肢也出现了斜裂缝。试件的特征点的荷载位移结果见表2,如 V_u 、 X_u 分别为骨架曲线峰值点水平力和水平位移。

表2 试件的荷载及位移

Tab.2 Loads and displacements of specimens

试件编号	开裂点		极限荷载点		最大位移点	
	V_c/kN	X_c/mm	V_u/kN	X_u/mm	V_m/kN	X_m/mm
W1	161.4	1.21	351.9	7.20	190.1	9.08
W2	180.6	1.41	462.2	9.76	243.3	12.35
W3	121.6	0.93	245.6	4.10	119.5	6.46
W4	70.3	0.94	384.5	14.37	297.1	19.44

2.2.2 破坏形态因素分析

从图5可知,开洞率对破坏形态影响显著。图中对于开洞率为0的试件W1,W2和W4,其裂缝均为对角斜裂缝,呈现出明显的压剪破坏形态;而对于开洞率为11%的墙体W3,由于开洞使得洞口角部应力集中,同时墙肢薄弱,导致洞角首先出现裂缝并最终呈现出墙肢上的压剪破坏形态。

比较W2和W1,W4可知,改变砂浆强度等级或高宽比对裂缝形态的分布无明显影响,但影响具体破坏过程。从表3可知,当提高砂浆强度时,会增强抵抗开裂与破坏的能力,延迟墙体的开裂与破坏;相反,当增大高宽比时,则会加速墙体的开裂与破坏。

2.3 滞回耗能及抗震承载力

2.3.1 滞回曲线

通过整理各试件墙顶位移与水平力的数据,得到滞回曲线,见图6(见下页)。由于各试件滞回曲线中位移幅值不同,为方便比较,坐标轴取同一比例。图6中各试件开裂前滞回曲线基本呈直线,滞回面积小。开裂后,墙顶位移不再随荷载线性增长,卸载时产生残余变形。达到极限荷载后,随着位移的增加,试件裂缝迅速开展,承载力下降,宣告试件破坏。

2.3.2 滞回耗能及抗震承载力因素分析

a. 砂浆强度等级

对比试件W1和W2,两者的滞回曲线呈“弓”形,有“捏拢”现象。砂浆强度愈低,滞回曲线面积愈小,耗能能力愈小。同时,极限荷载和极限位移分别减小了23.9%和26.2%,承载变形能力变小。

b. 开洞率

对比试件W3和W2,W3的滞回曲线面积明显

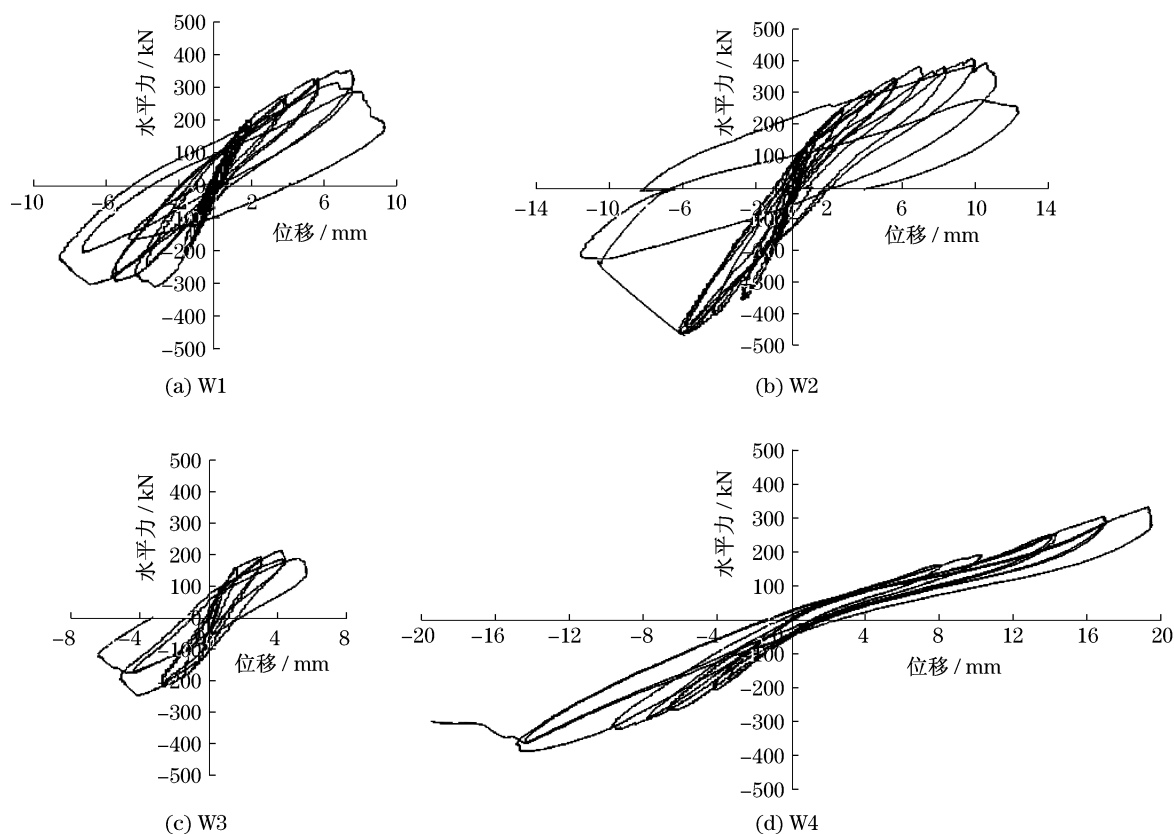


图6 试件滞回曲线

Fig.6 Hysteretic curves of specimens

小于 W2, 极限荷载和极限位移相应减小了 46.9% 和 58.0%. 表明增加开洞率会减小耗能及承载变形能力, 且较明显.

c. 高宽比

对比试件 W4 和 W2, W4 的滞回曲线正向推时与 W2 不同, W4 呈反“S”形, 曲线形状不如 W2 饱满, 极限荷载减小了 16.8%, 表明增大高宽比会减小耗能及承载能力. 极限位移增加了 46.5%, 这与墙体更高有关.

对比以上 3 种因素可知: 降低砂浆强度和增加高宽比时, 墙体的抗震承载力分别减小了 23.9% 和 16.8%; 而增加开洞率时, 抗震承载力减小了 46.9%, 幅度最大, 表明开洞率对墙体的抗震承载力影响较为显著.

2.4 刚度退化

2.4.1 割线刚度计算

结构损伤时, 其刚度势必发生变化^[8]. 为获得试件刚度, 先提取出滞回曲线上各加载级首峰值点, 然后连线成骨架曲线. 表征骨架曲线上某点的刚度时, 表征方法有切线刚度和割线刚度. 由于很难直接从试件骨架曲线上获得切线刚度, 通常用割线刚度表

征, 其计算式为^[9]

$$K_i = \frac{+V_i + -V_i}{+X_i + -X_i} \quad (1)$$

式中: K_i 为试件第 i 级时的割线刚度; V_i , X_i 分别为荷载第 i 级时的水平荷载和墙顶位移. 此处割线刚度表征试件抵抗侧移能力^[10], 刚度越大, 抵抗位移能力越强. 为评价各试件刚度退化情况, 引入无量纲变量刚度退化系数 η_i :

$$\eta_i = K_i / K_0 \quad (2)$$

式中, K_0 为试件首级加载时的割线刚度. 此时, 试件处于弹性工作阶段, 刚度不退化, 即刚度退化系数 $\eta_0 = 1$.

各特征点的割线刚度结果见表 3. 由于砌墙时, 灰缝处不能保证充分饱满, 灰缝不饱满处不可避免的存在初始损伤. 加载时, 初始损伤处微裂缝不断扩张发展, 微裂缝发展成可见裂缝时刚度退化明显, 各试件平均刚度退化系数为 0.56. 此后随着临界裂缝的形成, 试件达到极限荷载, 刚度进一步退化, 各试件平均刚度退化系数为 0.20. 达到最大位移时, 裂缝并未完全贯通墙体且裂缝两侧相互咬合, 此时试件尚残留一定的刚度, 各试件平均刚度退化系数为 0.11.

表3 试件刚度及刚度退化系数

Tab.3 Stiffness and stiffness degeneration coefficients of specimens

试件编号	初始点		开裂点		极限荷载点		最大位移点	
	$K_0/(\text{kN} \cdot \text{mm}^{-1})$	η_0	$K_c/(\text{kN} \cdot \text{mm}^{-1})$	η_c	$K_u/(\text{kN} \cdot \text{mm}^{-1})$	η_u	$K_m/(\text{kN} \cdot \text{mm}^{-1})$	η_m
W1	224	1	132	0.59	47	0.21	24	0.11
W2	352	1	152	0.43	56	0.16	20	0.06
W3	289	1	179	0.62	56	0.19	23	0.08
W4	97	1	56	0.58	23	0.23	17	0.17
均值		1		0.56		0.20		0.11

2.4.2 刚度退化因素分析

由于试件 W4 高度大于 W1、W2 和 W3,不便直接用墙顶水平位移评价试件的变形能力.为此将墙顶位移除以墙高,得到无量纲变量层间位移角 θ ,各试件随层间位移角的刚度退化情况见图 7.进行刚度退化因素分析时,均以 W2 作为参照.

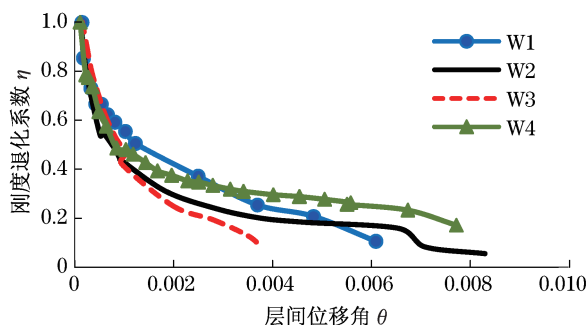


图7 试件刚度退化曲线

Fig.7 Stiffness degeneration curves of specimens

a. 砂浆强度等级

试件 W1 与 W2 主要差别是砂浆强度, W1 砂浆强度比 W2 低 37.3%. 初始加载时, W1 砂浆与烧结普通砖间的粘结性差, 其初始刚度较 W2 小 36.3%. 开裂时, 两试件层间位移角较小, 工作状态由弹性转为塑性, 前期退化趋势一致. 开裂后, 由于 W1 初始刚度比 W2 小, W1 刚度退化较缓, 其曲线在 W2 上方.

b. 开洞率

试件 W3 与 W2 主要差别是开洞率. 试件 W3 开洞后, 墙体横截面刚度减小, 应力传递路径复杂, 洞角存在应力集中现象, W3 初始刚度较 W2 小 17.9%, 塑性变形能力小, 刚度退化快.

c. 高宽比

试件 W4 与 W2 主要差别是高宽比. 高宽比大的试件 W4 易侧移, 其初始刚度比 W2 减小了 72.4%. 开裂后, W4 裂缝开展过程缓慢, 在达到破坏之前墙面裂缝分布较少. 这意味着墙面更为完整,

刚度退化趋势较缓, 刚度退化曲线在 W2 之上.

2.5 墙体侧移情况

试验过程中, 将所有位移计记录的侧移数据进行整理, 得到各特征点时墙体侧向位移随墙高的变化趋势, 见图 8.

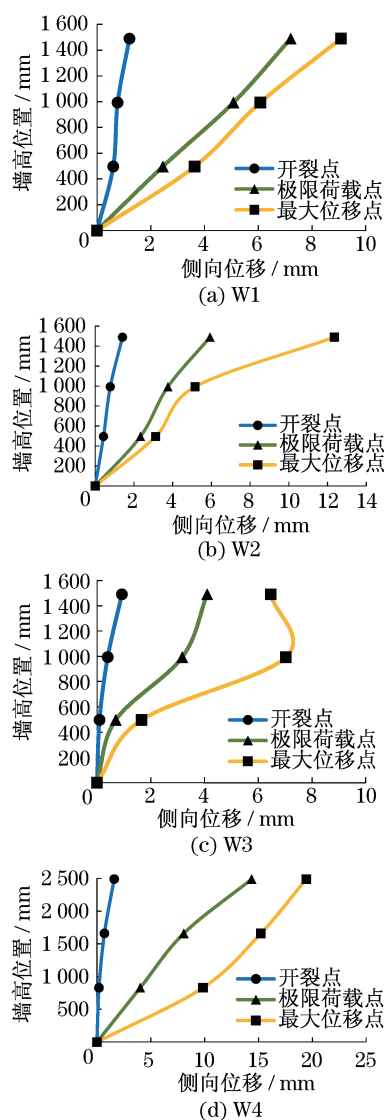


图8 试件侧移情况

Fig.8 Lateral displacement of specimens

图8中,各试件处于开裂点时,墙体侧移较小,且沿墙高方向的侧移分布基本呈线性,再次说明开裂前试件处于弹性工作状态,变形以剪切变形为主.此后,随着荷载的增大,墙体侧移分布不再呈线性分布.试件W3的非线性分布尤为明显,这主要是由于W3存在开洞,开洞处墙肢侧向外鼓,从而出现顶端位移小于墙高位移的情况.观察图9(a)和图9(b)发现,极限荷载点与最大位移点的曲线较为接近,说明试件一旦达到极限承载能力后,其侧移能力将变得有限.

3 结 论

通过考虑多种因素的砌体墙伪静力试验,从破坏形态、滞回耗能、抗震承载力、刚度退化和墙体侧移等方面进行分析,可得出以下结论:

a. 由于洞角应力集中及墙肢薄弱,开洞率大的墙肢上的压剪破坏形态明显,而砂浆强度等级和高宽比对破坏形态无明显影响.

b. 当降低砂浆强度等级,增大开洞率或增加高宽比时,墙体滞回曲线面积愈小,且曲线形状越不饱满,其耗能能力和抗震承载力愈差.

c. 降低砂浆强度等级、增大开洞率和增加高宽比时,墙体的初始刚度减小.加载至开裂过程中,各因素下刚度退化均较快.此后,增大开洞率时刚度退化最快,其次是降低砂浆强度等级时,增加高宽比能放缓刚度的退化.

d. 墙体加载至极限荷载时,各因素下墙体刚度退化均较大,约为初始刚度的20%.加载至最大位移时,由于未开裂墙体和处于剪磨状态的裂缝仍能承受部分水平内力,刚度并未完全退化.

e. 开裂前,各因素下的试件均处于弹性工作阶段,墙体侧移沿墙高呈直线分布.开裂后开洞率大的试件墙肢薄弱,墙体侧移分布呈外凸曲线.

参考文献:

- [1] 高惠瑛,别冬梅,马建军,等.汶川地震区砖砌体住宅房屋易损性研究[J].世界地震工程,2010,26(4):73-77.
- [2] 刘桂秋,施楚贤,吕伟荣.砌体剪力墙的受剪性能及其承载力计算[J].建筑结构学报,2005,26(5):81-90.
- [3] Madan A, Hashmi A K. Analytical prediction of the seismic performance of masonry infilled reinforced concrete frames subjected to near-field earthquakes [J]. Journal of Structural Engineering, 2008, 134(9): 1569-1581.
- [4] Chaimoon K, Attard M M. Modeling of unreinforced masonry walls under shear and compression [J]. Engineering Structures, 2007, 29(9): 2056-2068.
- [5] 施楚贤.砌体结构理论与设计[M].3版.北京:中国建筑工业出版社,2013.
- [6] 郑士举,王卓琳,蒋利学,等.既有村镇住宅结构现状调查分析[J].建筑结构,2011,41(S1):1229-1234.
- [7] 建筑抗震设计规范[M].北京:中国建筑工业出版社,2010.
- [8] 周奎,宁娜娜,林杰.基于频率响应的悬臂工字型钢梁的结构损伤分析[J].上海理工大学学报,2014,36(5):497-501.
- [9] 汪澜涯,彭斌.多因素作用下承重墙刚度退化伪静力试验研究[J].水资源与水工程学报,2015,26(5):197-202.
- [10] 郑山锁,商效瑀,张奎,等.冻融循环作用后再生混凝土砖墙体抗震性能试验研究[J].建筑结构学报,2015,36(3):64-70.

(编辑:董 伟)