

# 多因素作用下承重墙刚度退化伪静力试验研究

汪澜涯, 彭斌

(上海理工大学 环境与建筑学院, 上海 200093)

**摘要:** 为研究砂浆强度、开洞率和高宽比3个因素对砌体承重墙刚度退化的影响,以3层砌体房屋的底层承重墙为原型,设计4片1:2的缩尺试件进行伪静力试验。试验结果表明:在加载初期,各因素影响类似,刚度退化均较快;试件开裂后,刚度退化均放缓,各试件在开裂、极限和破坏等特征点的刚度退化系数在76%、20%和16%左右。砂浆强度愈低,砂浆粘结性能较差,试件初始刚度愈小,开裂后刚度退化稍缓,试件塑性变形小。开洞率愈大,初始刚度愈小,开裂后刚度退化加剧,试件塑性变形最小。高宽比愈大,初始刚度愈小,开裂后刚度退化幅度最小。研究成果可为深入探讨各因素对砌体墙刚度退化的研究提供参考。

**关键词:** 砌体承重墙; 砂浆强度; 开洞率; 高宽比; 刚度退化; 伪静力试验

**中图分类号:** TU502.6      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1672-643X(2015)05-0197-06

## Study on pseudo static test of stiffnessdegeneration of bearing wallunder role of multi factors

WANG Lanya, PENG Bin

(School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

**Abstract:** To study the effect of three aspects such as mortar strength, of opening rate and ratio of height and width on the stiffness degradation of masonry bearing walls, the paper took the bottom walls of a 3-story masonry structure as prototype, and designed four scaled wall specimens to carry out pseudo static test. The results show that the stiffness degenerates quickly at the preliminary stage of loading. The influence of every factor is similar. The stiffness degradation slows down after cracking of test-piece. The coefficient of stiffness degradation at some feature points such as crack load, ultimate load and failure load is respectively about 76%, 20% and 16%. The lower the mortar strength, the poorer the viscosity of mortar. The less the initial stiffness, the slower the stiffness degrades after cracking, the plastic deformation of test-piece is small. The larger ratio of openings, the smaller initial stiffness. The stiffness degradation intensify after cracking. The plastic deformation is the minimum. The larger the ratio of height and width, the less the initial stiffness, the stiffness degradation is the minimum. The result can provide reference for further research of effect of every factor on stiffness degeneration of masonry wall.

**Key words:** masonry bearing wall; mortar strength; ratio of openings; ratio of height and width; stiffness degeneration; pseudo-static test

我国地震多发,其中汶川地震已造成巨大损失<sup>[1]</sup>。地震作用时,房屋的地震响应与自身刚度密切相关<sup>[2]</sup>,因此刚度退化的研究显得尤为重要。在部分砌体房屋中,砌体墙作为主要竖向承重构件和抗侧力构件,其受力复杂且受多种因素作用,其中主要有砂浆强度、开洞率和高宽比等<sup>[3]</sup>。目前国外大多试验及

理论分析<sup>[4-5]</sup>已获得诸多具有工程实用价值的结论,然而我国既有砌体房屋现状不同<sup>[6]</sup>,为保证砌体房屋的安全性,分析各因素的影响,需进行专门的砌体墙刚度退化研究。其中伪静力试验是主要研究手段之一。为反映砂浆强度、开洞率和高宽比对砌体墙刚度退化的影响,结合我国既有砌体房屋现状,考虑上述

收稿日期:2015-05-05; 修回日期:2015-07-06

基金项目:国家自然科学基金项目(51208300);上海市专业学位研究生基地项目(10252085213);2015年度上海理工大学研究生核心课程建设项目

作者简介:汪澜涯(1990-),男,湖南桑植人,硕士研究生,研究方向:砌体结构。

通讯作者:彭斌(1977-),男,广东廉江人,副研究员,主要从事砌体结构的教学科研工作。

3种因素设计伪静力试验方案并进行试验。通过整理各试件的滞回以及骨架曲线,计算墙体刚度,归纳刚度退过程,最后分析各因素下对刚度退化的影响。

## 1 墙体伪静力试验

统计发现,全国范围内典型地区多层砌体房屋中2~3层较为普遍,墙体材料多采用烧结普通砖<sup>[7]</sup>。据以上现状,在试验方案设计时以3层砌体房屋为原型,选取底层承重墙为研究对象,设计缩尺比例为1:2的试验模型。

### 1.1 因素水平选取

由《砌体结构设计规范》(GB 50003-2011)<sup>[8]</sup>可知,墙体的抗震性能与砂浆强度密切相关,为体现这一因素对刚度退化的影响,采用砂浆强度等级分别为M5和M7.5。由于砌体房屋底层的建筑功能需求各异,其开间及层高可灵活变动,则墙体的高宽比随之变化。为体现这一变化,同时结合某重点试验室现有条件(反力墙锚孔间距),采用高宽比分别为0.75和1.25。根据汶川地震的震害经验,《建筑抗震设计规范》(GB 50011-2010)<sup>[9]</sup>对开洞面积限值作了明确规定:6、7度时不宜大于墙面面积的55%(即开洞率),8、9度时不宜大于墙面面积的50%。因此,开洞率的确定应满足相应规范要求,同时兼顾少砌砖来保证墙体完整和砌筑方便的目的,最终开洞率确定为0和11%。

### 1.2 试件设计及制作

根据上述3因素设计4片墙体试件,编号为Q1~Q4,因素水平见表1。

表1 试件因素及水平

试件编号	砂浆强度等级	高宽比	开洞率/%	尺寸/mm (高×宽×厚)
Q1	M5	0.75	0	1490×1990×240
Q2	M7.5	0.75	0	1490×1990×240
Q3	M7.5	0.75	11	1490×1990×240
Q4	M7.5	1.25	0	2490×1990×240

表1中试件宽度在原型开间(3900mm)、缩尺比例(1:2)的基础上,兼顾砌筑方便取整为1990mm。试件高度根据两种高宽比取整为1490和2490mm。对于开洞墙体Q3,其开洞位置居中,开洞尺寸为760×630mm(洞高×洞宽)。试件均采用烧结普通砖砌筑,砖尺寸为240mm×115mm×53mm。因视该试验为平面内问题,试件厚度不作缩尺,取为240mm。

砌筑墙体前需预制钢筋混凝土底梁,底梁上预

留吊装孔和螺栓孔,以便吊装就位,见图1。图1为开洞试件Q3示意图,不开洞试件的底梁、顶梁做法相同。试件由同一工人砌筑,砌筑方式为一丁一顺,灰缝厚度为10mm。砌筑的同时制备砖和砂浆的材性试件,用于后续的抗压强度试验。对于Q3,过梁采用预制钢筋混凝土梁,按构造要求取支撑长度为240mm。砌筑完墙体后,在墙顶浇筑一钢筋混凝土顶梁,以便水平荷载和竖向荷载的施加。为防止水平加载时墙体与底梁(或顶梁)间产生通缝破坏,在梁上预留混凝土块,以嵌固墙体。

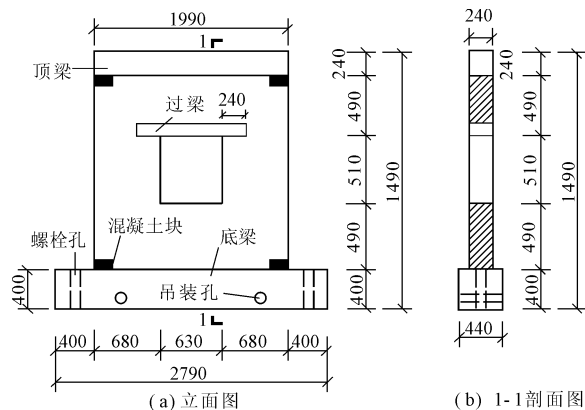


图1 Q3墙体试件示意图(mm)

### 1.3 测点布置

位移计通常安装在试件外,水平加载时若底梁产生滑移,则实测的位移包含底梁的滑移部分。为消除这种影响,将位移计安装在试件上,具体措施为在试件底梁两端垂直底梁方向上设计两固定板,位移计安装在固定板上,见图2。

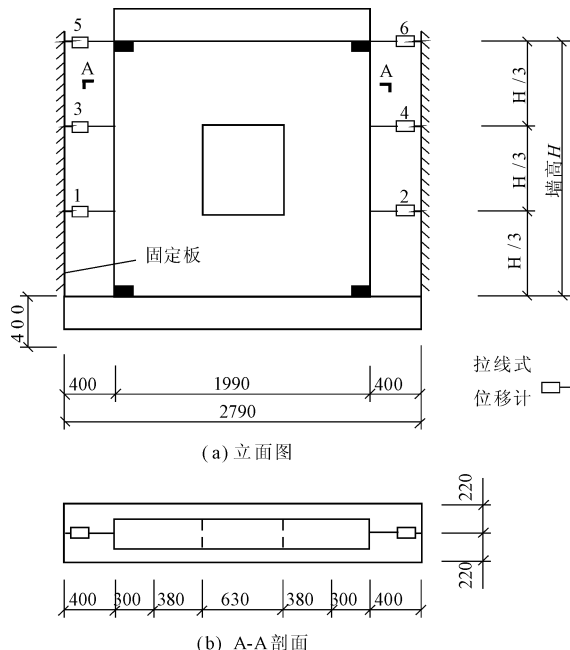


图2 Q3试件测点布置示意图(mm)

进行测点布置时,为校核数据,遵循左右对称布置原则,测点编号为 1~6。其中 1(2)、3(4) 分别位于墙高的 1/3 和 2/3 处,用于测量水平位移沿墙高的变化。测点 5、6 位于墙顶,用于测量墙体的最大位移。图 2 为开洞试件 Q3 测点布置示意图,其余试件布置方法相同。

### 1.4 加载制度

为模拟原型中底层墙承重一定的状态,对试件施加维持不变的竖向荷载,竖向荷载根据原型计算,此时对应轴压比水平为 0.3。水平预加载时,水平力大小 5 kN,正反方向(对应作动器推和拉)各循环两次,以检查设备是否正常,该循环不计入滞回曲线。水平正式加载时,为获取开裂荷载及骨架曲线的下降段,采用力-位移混合加载制度,具体加载过程及加载装置见图 3、图 4。

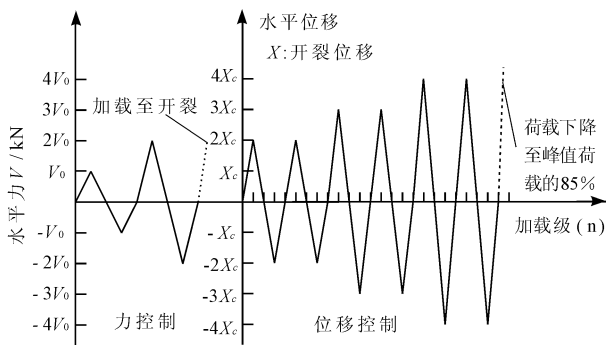


图 3 力-位移混合加载制度



(a) 不开洞墙体(Q2) (b) 开洞墙体(Q3)

图 4 加载装置

## 2 试验结果及分析

### 2.1 材料力学性能

根据《砌墙砖试验方法》(GB/T 2542 - 2003) 和《建筑砂浆基本性能试验方法标准》(JGJ /T70 - 2009) 相关要求,各墙体制备一组烧结普通砖试件及两组砂浆试件,第一组砂浆试件养护 28 d,第二组养护至伪静力试验当天,然后进行抗压强度试验,其强度实测值如表 2 所示。

从表 2 可知,各墙体烧结普通砖抗压强度较接近。由于各墙体用砖为同批材料,其抗压强度视为

相等,取均值为 15.2 N/mm<sup>2</sup>。伪静力试验当天的砂浆抗压强度  $f_2$  较 28 d 的  $f_{2,0}$  略有增长,增长幅度在 7% 以内。为合理评定墙体的真实状态,宜用试验当天的砂浆抗压强度。

表 2 试件材料抗压强度, N/mm<sup>2</sup>

试件编号	砖 $f_1$	砂浆 $f_{2,0}$ (28 d)	砂浆 $f_2$ (养护天数)	增长幅度/%
Q1	16.3	4.4	4.7(31)	6.8
Q2	14.5	7.4	7.5(32)	1.3
Q3	16.0	7.3	7.7(35)	5.5
Q4	14.1	8.3	8.5(36)	2.4

注:  $f_1, f_{2,0}, f_2$  和  $f_m$  均为强度实测的平均值;令增长幅度为  $(f_2 - f_{2,0})/f_{2,0}$ ,表示超过 28 d 后砂浆强度的增长情况。

### 2.2 刚度退化

2.2.1 滞回曲线及骨架曲线 试件 Q1、Q2 和 Q4 裂缝发展过程类似,首批裂缝均出现在墙角且最终发展成对角斜裂缝。而 Q3 首批裂缝出现在洞角,最终洞角至墙角出现对角斜裂缝外,墙肢也出现了斜裂缝,见图 5。



(a) Q2首批裂缝形态 (b) Q2最终裂缝形态 (c) Q3首批裂缝形态 (d) Q3最终裂缝形态

图 5 试件裂缝形态

为直观观察各墙体的滞回曲线,统一坐标轴的刻度比例(见图 6)。开裂前,各试件位移较小,滞回曲线狭长,各级循环基本保持直线,表明试件处于弹性阶段。开裂后,随着水平荷载的增加,墙顶位移逐步增大,卸载至零时产生残余变形,表明试件进入弹塑性阶段。达到极限荷载后,试件虽承载力下降,但仍能承受较大变形,试件处于塑性阶段。

图 6 中,各试件正反加载至极限荷载时,反向位移较正向的略小,其中 Q2 和 Q4 稍明显。推测原因是:反向加载时,用于连接作动器与试件的加载螺杆

受拉变形,位移计实测位移小于作动器的位移,试件 Q2 和 Q4 反向极限荷载较大,受拉变形更甚,反向位移误差更明显。试验过程中为了描绘裂缝,加载至某级时通常会持荷一段时间。此时裂缝可能继续

发展,最终出现试件 Q2 所示的曲线转折情况,即反向加载至极限荷载后,墙体位移迅速增加,荷载突然下降。

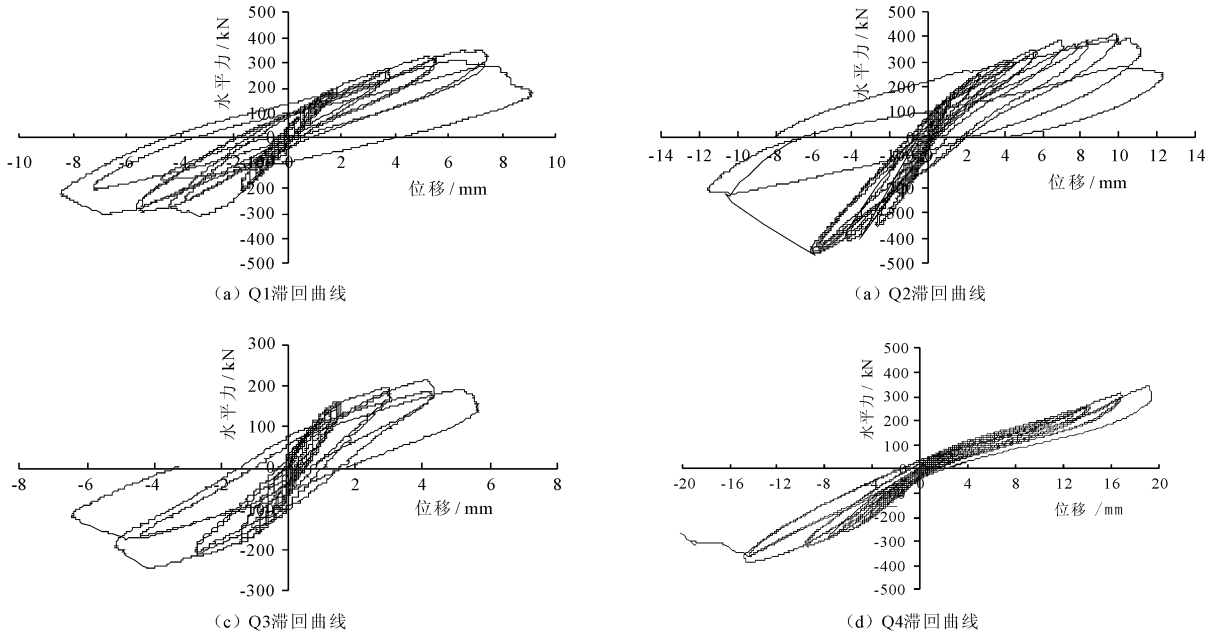


图6 试件滞回曲线

取滞回曲线上各加载级首次循环下峰值点的连线荷载-位移骨架曲线,见图7。

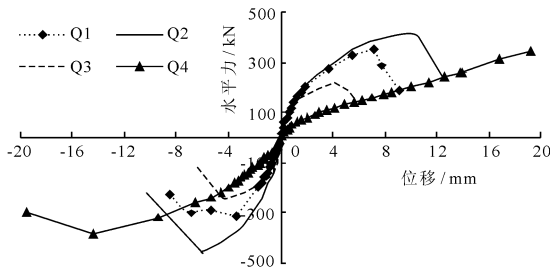


图7 试件骨架曲线

骨架曲线上各试件特征点(试件处于初始加载,开裂,极限荷载,破坏和最大位移时)的荷载与位移值见表3,如  $V_c$ 、 $X_c$  分别表示特试件开裂时的荷载与位移。为区分作动器加载方向,记反向加载时的荷载与位移为“-”(下同)。

2.2.2 刚度计算 墙体刚度表示墙顶发生单位侧移时的荷载大小,由于骨架曲线提取了墙体荷载-位移关系的主要特征,墙体的等效刚度取骨架曲线上的割线刚度,按下式确定:

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

式中:  $V_i$ 、 $x_i$  分别表示第  $i$  级加载时的水平荷载和墙

顶位移。据式(1)计算得荷载特征点的刚度值见表4。表中为消除墙高对墙顶位移的影响,将墙顶位移比上墙高,得到相应的层间位移角  $\theta$  (以‰表示),以此评价墙体的位移情况。刚度退化系数为  $\eta_i = K_i/K_0$ 。

从表4可知,初始加载时,试件处于弹性工作阶段,各试件层间位移角接近且很小。开裂前随着水平荷载的增加,试件内部微裂缝不断扩张发展直,刚度退化明显。由于微裂缝扩张发展能力有限,此时试件层间位移角仍较小,最小为0.62‰,最大为0.95‰,均值为0.76‰(在剪力墙层间位移角限值1‰内)。

开裂后随着水平荷载的增加,已有裂缝不断延伸,新裂缝不断出现,直到临界裂缝形成,试件达到极限荷载后,此时刚度退化至初始刚度的20%左右。此过程中,墙顶位移增加较快,平均层间位移角达到了5.2‰。达到极限荷载后,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,破坏时刚度退化至16%左右,最大位移处退化至最小,约为11%。

2.2.3 刚度退化因素分析 为更直观表述各因素下的刚度退化情况,将刚度退化结果整理如图8所示。

表 3 试件荷载位移结果 (kN、mm)

试件 编号	加载 方向	初始		开裂		极限		破坏		最大位移	
		$V_0$	$X_0$	$V_c$	$X_c$	$V_u$	$X_u$	$V_f$	$X_f$	$V_m$	$X_m$
Q1	正向	40.2	0.22	161.4	1.21	351.9	7.20	286.5	7.74	190.1	9.08
	反向	-40.2	-0.14	-158.8	-1.21	-301.8	-6.80	-264.3	-7.78	-226.3	-8.50
Q2	正向	40.2	0.18	180.6	1.41	412.8	9.76	396.6	10.55	243.3	12.35
	反向	-39.8	-0.05	-178.8	-0.95	-462.2	-5.92	-392.9	-7.20	-221.0	-10.37
Q3	正向	40.6	0.23	121.6	0.93	216.0	4.19	189.8	5.24	158.0	5.65
	反向	-39.6	-0.05	-119.1	-0.42	-245.6	-4.10	-194.6	-5.19	-119.5	-6.46
Q4	正向	20.0	0.28	70.6	1.59	316.1	16.77	313.6	17.56	345.0	19.21
	反向	-20.6	-0.14	-70.3	-0.94	-384.5	-14.37	-324.5	-16.15	-297.1	-19.44

注:各特征点正向与反向的荷载及位移在同级循环下取值。其中初始点为首次循环的荷载峰值点,由于 Q4 高宽比大,在首次循环时荷载较小;开裂点为试件首次出现明显裂缝时刻;极限点取骨架曲线中荷载绝对值最大时刻。破坏点为极限荷载的 85% 左右;最大位移点为墙体位移绝对值最大时刻,主要体现滞回曲线的完整性。

表 4 试件特征点刚度以及刚度退化系数

试件 编号	初始			开裂			极限			破坏			最大位移		
	$K_0$	$\theta_0$	$\eta_0$	$K_c$	$\theta_c$	$\eta_c$	$K_u$	$\theta_u$	$\eta_u$	$K_f$	$\theta_f$	$\eta_f$	$K_m$	$\theta_m$	$\eta_m$
Q1	224	0.15	1.00	132	0.81	0.59	47	4.83	0.21	35	5.19	0.16	24	6.09	0.11
Q2	352	0.12	1.00	152	0.95	0.43	56	6.55	0.16	44	7.08	0.13	20	8.29	0.06
Q3	289	0.16	1.00	179	0.62	0.62	56	2.81	0.19	37	3.52	0.13	23	3.79	0.08
Q4	97	0.11	1.00	56	0.64	0.58	23	6.73	0.23	19	7.05	0.20	17	7.71	0.17
均值		0.14	1.00		0.76	0.56		5.23	0.20		5.71	0.16		6.47	0.11

注:刚度单位 kN/mm,层间位移角单位‰。

(1)砂浆强度。试件 Q1 与 Q2 的开洞率与高宽比相同,Q1 砂浆强度比 Q2 降低了 37.3%,初始刚度相应减小了 36.3%,说明低强度的砂浆更易发生侧移,与烧结普通砖的粘结性能较差。在加载初期至开裂过程中,试件内部微裂缝均在发展,其刚度退化趋于一致。由于低强度的砂浆降低了砌体的抗剪强度,从而 Q1 提前开裂和达到极限荷载,开裂时 Q1 层间位移角及开裂刚度较小。试件开裂后, Q1 刚

度退化曲线在 Q2 上方,其刚度退化较缓,这跟 Q1 初始刚度较小密切相关。结合表 4 发现,Q1 在破坏和最大位移时刻,其刚度退化系数较大,而相应层间位移角更小,刚度退化曲线出现交汇分叉,显示出低砂浆强度的墙体塑性变形有限。Q2 刚度退化曲线末端出现转折,其刚度退化加快,这与其滞回曲线上出现荷载突降有关。

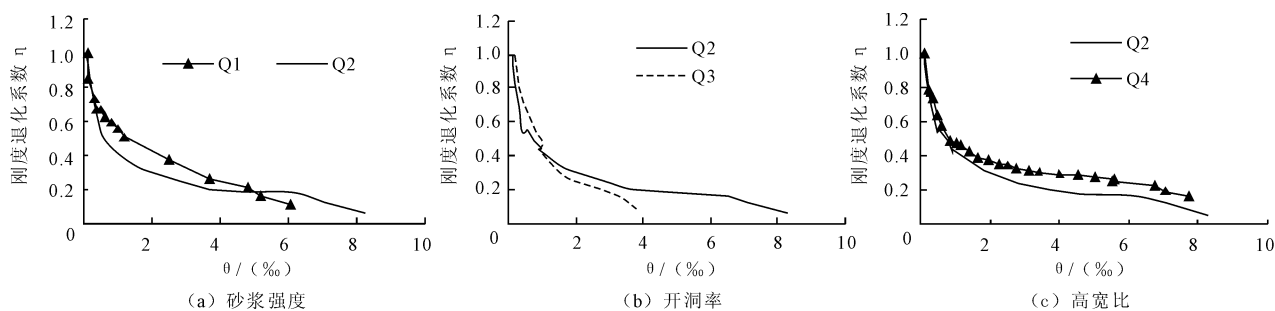


图 8 试件各因素刚度退化对比

(2)开洞率。试件 Q2 与 Q3 两者的主要区别是开洞率不同,分别为 0% 和 11%。对于开洞率较大的 Q3,其墙体横截面面积减小,墙体截面刚度削弱,

初始刚度减小了 17.9%。加载初期,Q3 与 Q2 层间位移角均较小,刚度退化过程类似,刚度退化幅度较大。在压剪复合状态,Q3 受开洞影响,墙体传力复

杂、应力分布不均,在洞角位置因应力集中而先开裂,此时其层间位移角最小。图8中,当Q3与Q2刚度退化曲线的交汇点约在Q2开裂时刻,明显提前于Q1与Q2的交汇点,此时说明在影响刚度退化的因素中,开洞率的影响程度大于砂浆强度。Q3在开裂后,由于裂缝开展较快,墙体承受水平荷载能力低,塑性变形远小,当层间位移角增至3.52‰时墙体宣告破坏。

(3)高宽比。试件Q2与Q4两者砂浆强度相近、开洞率相同,主要区别是高宽比,Q4高宽比大于Q2。因Q4高宽比大,墙体更高,在初始加载时墙顶更容易发生侧移,故其初始刚度更小,比Q2减小了72.4%。开裂前,Q4与Q2的刚度退化曲线基本重合,说明两者刚度退化过程相似。随着荷载的增加,墙体水平位移逐渐增加,高宽比更大的Q4其重力二阶效应更明显,附加弯矩引起一定的水平位移,使得墙底某侧受拉,加速墙体的开裂,开裂时,其层间位移角比Q2减小了32.6%。开裂后,Q4墙面上裂缝分布较少,墙体更为完整,此时仍具有一定承载能力,其刚度退化曲线位于Q2上方,刚度退化趋势较缓。

### 3 结 语

通过4片砌体墙的伪静力试验,考虑砂浆强度、开洞率和高宽比3种不同因素,对比分析了各因素下的刚度退化过程,可得出以下结论:

(1)初始加载时,墙体内部微裂缝扩张发展,各试件刚度退化幅度明显。试件出现明显裂缝后,层间位移角逐渐增大,刚度退化放缓。当临界裂缝形成后,未开裂墙体与处于剪磨状态的裂缝仍能承受水平荷载,试件在极限、破坏和最大位移等特征点的平均刚度退化系数依次为20%、16%和11%。

(2)当砂浆强度的降低时,砂浆与烧结普通砖的粘结性能较差,试件初始刚度相应减小,但在开裂前刚度退化趋于一致。砂浆强度更低的墙体开裂后,其刚度退化较缓,由于砌体抗剪强度较低,试件提前开裂并达到极限荷载,刚度退化曲线出现交汇。

(3)当开洞率增大时,墙体横截面面积减小,截面刚度削弱,试件初始刚度相应减小。加载初期,两者刚度退化过程类似,刚度退化幅度较大。开洞率大的墙体其传力复杂,洞角应力集中,试件提前开裂。开裂后,开洞率大的刚度退化速度更快。

(4)当高宽比增加时,墙顶更易发生侧移,其初始刚度更小。加载初期,刚度退化无明显差别,均较快。随着荷载的增加,高宽比大者受重力二阶效应影响,加速墙体的开裂。开裂后,裂缝分布少的墙体刚度退化趋势较缓。

### 参考文献:

- [1] 任晓崧,翁大根,吕西林. 四川灾区砌体结构房屋震害与中小学建筑的抗震设计[J]. 工程抗震与加固改造, 2008, 30(4): 71-76.
- [2] 刘鑫,刘伟庆,苗启松,等. 砌体加层隔震体系下部结构刚度退化后的抗震性能试验研究[J]. 工程力学, 2013, 30(9): 117-124.
- [3] 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+117.
- [4] 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, 2014, 134(9): 1569-1581.
- [5] Chaimoon K, Attard M M. Modeling of unreinforced masonry walls under shear and compression[J]. Engineering Structures, 2007, 29(9): 2056-2068.
- [6] 施楚贤. 砌体结构理论与设计[M]. (第三版)北京:中国建筑工业出版社, 2014.
- [7] 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.
- [8] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 50003-2011. 砌体结构设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2011.
- [9] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 50011-2010. 建筑抗震设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2010.