

引用本文:李 超,郭 猛. 小开洞砌体墙抗震性能研究[J]. 建筑科学与工程学报, 2023, 40(3): 92-101.

LI Chao, GUO Meng. Investigation on seismic behavior of masonry walls with small openings[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2023, 40(3): 92-101.

DOI:10.19815/j.jace.2022.03008

## 小开洞砌体墙抗震性能研究

李 超, 郭 猛

(中国建筑科学研究院有限公司, 北京 100013)

**摘要:**为研究小开洞砌体墙的抗震性能,设计了 3 片小开洞砌体墙试件和 1 片无洞口砌体墙试件,并进行了低周往复加载试验;介绍了砌体墙试件的主要破坏过程及破坏机理,对比分析了各片砌体墙承载力、抗侧刚度及延性等抗震性能差异;基于试验建立有限元模型,研究了开洞率及洞口位置对砌体墙抗震性能的影响。结果表明:小开洞砌体墙破坏机理较实体墙发生了显著改变,无洞口墙表现为明显的转动破坏特征,小开洞墙主要表现为典型的脆性剪切破坏;开单个小洞口会削弱砌体墙的水平承载力和抗侧刚度,大幅降低墙体的延性;增加洞口数量或高度可适当提高小开洞砌体墙的抗震性能;随着开洞率的增大,墙体承载力和初始刚度逐渐下降,延性性能表现为先降低后提高的趋势;竖直方向上,洞口越往下,墙体抗震性能越差,水平方向上,洞口宜居中布置。

**关键词:**砌体结构;砌体墙;小开洞;低周反复荷载试验;有限元分析;抗震性能

中图分类号: TU362

文献标志码: A

文章编号: 1673-2049(2023)03-0092-10

## Investigation on seismic behavior of masonry walls with small openings

LI Chao, GUO Meng

(China Academy of Building Research, Beijing 100013, China)

**Abstract:** In order to study the seismic performance of masonry walls with small openings, three masonry walls with different small openings and a masonry wall without opening were designed for low cycle cyclic loading test. The main failure process and failure mechanism of masonry wall specimens were introduced, and the differences of seismic performance such as bearing capacity, lateral stiffness and ductility of each wall were compared and analyzed. In addition, based on the test, finite element models were established to study the effects of opening rate and opening location on the seismic performance of masonry walls. The results show that the failure mechanism of masonry walls with small openings have changed significantly compared with the masonry wall without opening. The wall without opening shows obvious rotational failure characteristics, but walls with small openings mainly show typical brittle shear failure. A single small opening will weaken the horizontal bearing capacity and lateral stiffness of the masonry wall, and greatly reduce the ductility of the wall. Increasing the number or height of openings can appropriately improve the seismic performance of the masonry wall with small opening. With the

收稿日期: 2022-03-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(51778594)

作者简介: 李 超(1993-), 男, 工学硕士研究生, E-mail: leechaor@foxmail.com.

通信作者: 郭 猛(1982-), 男, 工学博士, 研究员, E-mail: guomeng673@163.com.

increase of opening rate, the bearing capacity and initial stiffness of the wall gradually decrease, and the ductility first decreases and then increases. In the vertical direction, the lower the opening, the worse the seismic performance of the wall. In the horizontal direction, the opening should be arranged in the middle.

**Key words:** masonry structure; masonry wall; small opening; low cycle cyclic loading test; finite element analysis; seismic performance

# 0 引言

根据建筑进出、采光等使用功能需要,砌体房屋墙体常开有门窗等洞口,而开洞会削弱墙体的承载力和刚度<sup>[1]</sup>。砌体结构震害调研结果表明<sup>[2-4]</sup>,强震作用下开洞砌体墙应力状态复杂,破坏模式多样,震害破坏程度较实体墙更为严重,是抗震的薄弱环节,应予以足够的重视。

部分学者对配筋砌体墙、混凝土砌块墙体组合墙等多种类型砌体墙进行低周往复加载试验,结合有限元分析,主要研究了开洞率及洞口位置对抗震性能的影响,结果表明:开洞会改变墙体的破坏模式,降低砌体墙的抗震性能;开洞率越大,墙体承载力和刚度越低;洞口位置下移且偏置时,墙体抗震性能更差<sup>[5-8]</sup>。Kayrga 等<sup>[9]</sup>对3栋具有不同开洞尺寸的全尺寸砌体房屋进行拟静力试验和数值模拟研究,结果表明房屋开洞面积越大,极限承载力越低,侧向刚度越小。

国内外学者采用有限元、离散元等数值模拟方法对开洞砌体墙的抗震性能进行了大量的研究,内容包括洞口尺寸、数量、位置及排列不规则等,主要研究结论与上述试验结果基本一致<sup>[10-16]</sup>。

目前砌体墙抗震试验和数值模拟分析对实体砌体墙的研究较多,而对开洞砌体墙抗震性能的试验研究相对较少,且多针对常规尺寸的窗洞和门洞。墙体的门窗洞口开洞率一般较大,小开洞砌体墙抗震性能试验研究相对更少。

实际砌体结构房屋中,存在大量砖墙开小洞口或开洞率与墙体立面相比较小的情况,如带窗山墙、厕所小窗处的墙体、带配电箱洞口墙体、带壁橱洞口墙体、带通风洞口墙体等,在地震作用下,洞口角部因应力集中而更易开裂,此类小开洞砖墙的震害也较严重<sup>[2,4]</sup>,但抗震设计时,存在忽视小洞口削弱砌体结构抗震能力的现象。探讨开小洞口对砌体墙抗震性能的影响,对减轻小洞口砌体墙震害、进一步提高砌体结构抗震能力有着重要的实际意义。

本文设计了3片小开洞砌体墙试件和1片无洞

口砌体墙试件,通过低周往复加载试验,对比研究小开洞、洞口数量及洞口高度对其抗震性能的影响。在低周往复加载试验的基础上,基于 ABAQUS 建立砌体墙有限元模型,验证了所建数值分析模型的适用性,并利用所建模型研究了开洞率及洞口位置对砌体墙抗震性能的影响。

## 1 试验概况

### 1.1 试件设计

本次试验共设计了4片砌体墙试件,宽度及高度均为2000 mm,厚度为240 mm,试件尺寸及立面形状详见图1,各试件之间的差异对比见表1。本文中小开洞砌体墙的定义与2016年版的《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)<sup>[17]</sup>第7.2.3条中设置构造柱的小开口墙段一致,指水平截面开洞率不大于30%的墙体。

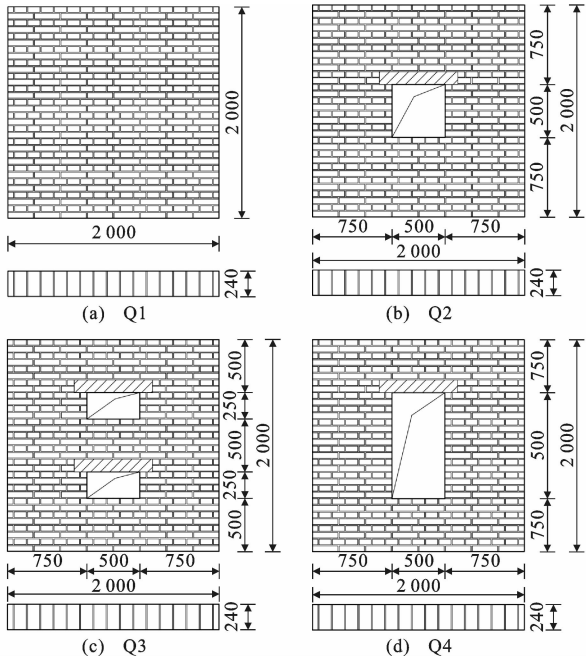


图1 砌体墙试件形状及尺寸(单位:mm)

Fig. 1 Shape and dimension of masonry wall specimens (unit:mm)

试件 Q1 为无洞口墙;试件 Q2 在实体墙中部开单个正方形小洞口,水平开洞率为 25%;试件 Q3 将

表 1 砌体墙试件对比

Table 1 Comparison of masonry wall specimen

试件 编号	墙体尺寸	洞口尺寸	开洞率/%	
			水平	立面
Q1	2 000 mm×2 000 mm	无	0	0.00
Q2	2 000 mm×2 000 mm	500 mm×500 mm	25	6.25
Q3	2 000 mm×2 000 mm	500 mm×250 mm(双洞)	25	6.25
Q4	2 000 mm×2 000 mm	500 mm×1 000 mm	25	12.50

正方形小洞口分为 2 个上下平行布置的长方形小洞口,水平及立面开洞率与试件 Q2 相同;试件 Q4 洞口高度为试件 Q2 的 2 倍,水平开洞率保持不变。

试件墙体洞口上方设置混凝土过梁,过梁高度及搁置长度均为 120 mm,宽度同墙厚。试件所用的烧结普通砖实测抗压强度平均值为 12.65 MPa,标准值为 8.55 MPa;砌筑砂浆为预拌混合砂浆,强度实测平均值为 3.61 MPa。砌体墙试件由实验室工人按“一顺一丁”法砌筑,确保砖上下错缝、内外搭砌,砌筑过程中随时用靠尺等工具检查墙体竖向是否垂直、水平高度是否一致。

1.2 加载方案

本次试验加载装置见图 2。竖向荷载由液压千斤顶提供,通过分配梁使得作用点置于洞口两侧墙体的中间,避免直接作用于洞口正上方,最后通过加载梁分配至墙体顶部。试验时首先施加竖向荷载,竖向荷载分级施加至设计值,并在整个试验过程中保持竖向荷载不变。

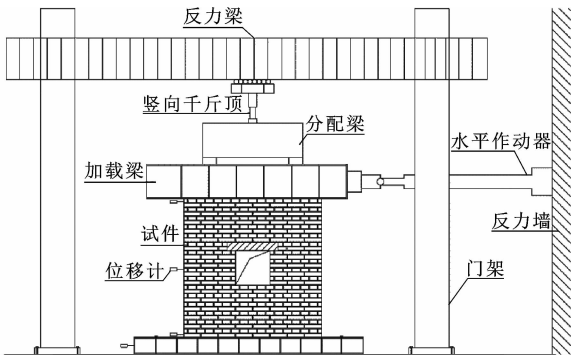


图 2 加载装置

Fig. 2 Loading device

4 层砖砌体住宅楼底层墙体承担上部荷载,按开间 2.7 m 计算得到的未开洞横墙平均轴压应力约为 0.5 MPa。试验中竖向荷载设计值取 230 kN,按整截面换算得到的平均轴压应力为 0.48 MPa,按洞口两侧墙体净截面换算得到的平均轴压应力为 0.64 MPa,符合实际结构中墙体的竖向受力情况。

水平加载采用低周往复加载方案,按照位移控

制施加水平荷载。加载初期采用 1 mm 的倍数加载,往复循环 2 次;加载后期根据试件变形和破坏情况以 2 mm 的倍数加载,往复循环 1 次。当水平荷载下降到最大荷载的 85%或出现不适宜加载的破坏时,结束试验。在正式施加水平荷载前,进行预加载,施加水平荷载 2 次,检查相关仪器设备后正式进行加载试验。

试验主要记录荷载-位移曲线、试件顶底部及中部水平位移、试件开裂、变形和破坏情况。水平力方向向左(推)为正向加载,向右(拉)为负向加载。

2 试验结果及分析

2.1 破坏过程

各试件裂缝分布及破坏情况见图 3,实线代表正向加载裂缝,虚线代表负向加载裂缝。

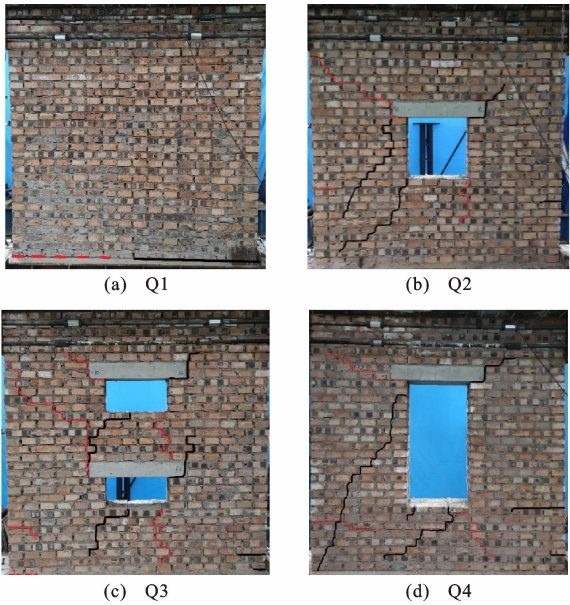


图 3 试件裂缝分布

Fig. 3 Fracture distribution of specimens

各试件主要破坏过程为：

(1)试件 Q1 正向和负向加载至±3.2 mm 左右时,墙体底部两侧与底梁之间出现水平裂缝,继续加载至±5.1 mm 时,底部 2 条水平裂缝相交,形成通缝。当加载至±11 mm 水平位移时,底部水平裂缝最大宽度已达到 10 mm,水平荷载下降,停止加载。

(2)试件 Q2 加载至-2.9 mm 时,墙体洞口左上角及右下角灰缝开裂。正向和负向加载至±3.3 mm 左右时,洞口左下角及右上角出现斜裂缝,墙体第 10-11 层砖边缘出现水平裂缝。正向加载至+4.6 mm 时,墙体第 8-9 层砖边缘开裂。继续加载至+7.1 mm,洞口左侧墙体突然开裂,斜裂缝由洞口左上角

向左下延伸至距底部6层砖高度处,停止试验。

(3)试件 Q3 正向和负向加载至 $\pm 4.0$  mm 左右时,两洞口左下角及右下角开裂。加载至 $\pm 6.1$  mm 左右时,墙体第2-3层砖右侧与底层左侧均出现水平裂缝。继续加载至 $\pm 6.6$  mm 时,上洞口左上角开裂,墙体底层右侧及第6-7层砖左侧出现水平裂缝。继续加载至 $-13.7$  mm 时,洞口左侧墙体突然开裂,斜裂缝由下洞口左上角向左上延伸至墙体第26-27层砖左侧边缘,加载结束。

(4)试件 Q4 正向和负向加载至 $\pm 3.2$  mm 左右时,墙体洞口四角均出现斜裂缝,第6-7层砖左侧边缘开裂。正向加载至 $+4.1$  mm 时,墙体第8-9层砖右侧灰缝开裂形成水平裂缝。继续加载至 $+5.7$  mm 时,洞口右下角出现左下方向斜裂缝。加载至 $+14.3$  mm 时,洞口左侧突然开裂并贯通墙身,斜裂缝从洞口左上角延伸至墙体左下角,试验结束。

## 2.2 破坏机理

根据试验现象绘制砌体墙试件的裂缝开展示意图,用箭头表示裂缝延伸的大致方向,见图4。正向加载和负向加载对应的裂缝分布分别采用实心箭头和空心箭头来表示,虚线代表试件最终破坏时突然开裂的趋势。

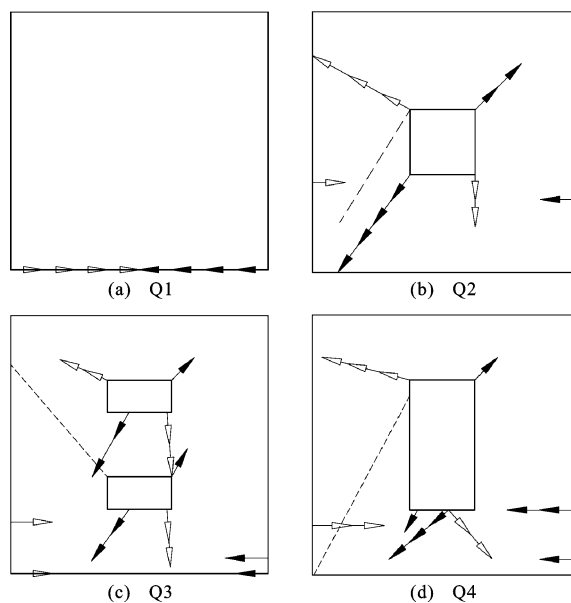


图4 试件裂缝开展示意图

Fig. 4 Sketch of crack development of specimens

无洞口墙试件 Q1 在试验过程中仅底部存在水平裂缝。开洞对砌体墙破坏机理影响显著,3片开洞墙试件破坏机理的共同特征表现为:加载初期,洞口角部应力集中,率先开裂,之后裂缝向外延伸,表现为弯剪型斜裂缝;随着位移和水平荷载的增大,洞

口角部裂缝持续向外开展并形成主斜裂缝,墙体边缘出现不同长度的水平裂缝;此后,裂缝宽度明显加大,试件承载力开始下降;最后,突然产生新的贯穿墙体的斜向裂缝,呈现为典型的剪切破坏形态。

可以看出,无洞口墙试件表现出明显的平面内整体转动破坏特征,其最终破坏模式为转动失效破坏。开洞试件主要表现为典型的脆性剪切破坏,同时伴随着不同程度的平面内转动变形。对于普通砌体墙,即使开设了很小的洞口,仍会改变其破坏模式。本次试验中,无洞口砌体墙为转动失效破坏,意味着其受剪模式对应的承载能力大于转动失效模式对应的承载能力;对于小开洞砌体墙,无论洞口大小和数量变化,均发生洞口两侧墙肢受剪破坏,意味着小开洞砌体墙其受剪模式对应的承载能力小于转动失效模式对应的承载能力。

对比分析试件 Q2~Q4 的破坏形态可见:开单个小洞口墙体(试件 Q2)水平开裂不明显,转动变形较小;洞口数量增加(试件 Q3)时,水平裂缝较长,墙体转动变形更加明显,加载过程中墙体产生的主裂缝数量也明显增加;洞口高度(试件 Q4)对小开洞砌体墙转动变形的影响最为显著,增加洞口高度可明显提高墙体转动变形的参与程度。

## 2.3 滞回曲线与骨架曲线

滞回曲线能够反映水平低周往复加载作用下试件的力学性能,是非线性分析和确定恢复力模型的重要依据。各试件滞回曲线见图5。

对滞回曲线分析可知,加载初始阶段,水平荷载较小,试件尚未开裂,变形处于弹性阶段,荷载与位移基本呈线性关系,滞回环所包围的面积较小。继续加载,随着试件开裂,滞回曲线轮廓出现明显弯曲,砌体墙进入弹塑性阶段,荷载增加变慢而变形增长加快,刚度逐渐退化,滞回环面积增加,开始出现残余变形。由于砌体材料本身的脆性性质,试件滞回曲线在位移0点附近存在捏拢现象,滞回环狭长。

将滞回曲线与试件裂缝开展过程进行对照可以看出,滞回曲线外轮廓线的弯曲点(荷载增幅明显减慢而位移增幅明显加快之处)往往对应主裂缝的形成及开展。转动变形越明显的试件接近极限阶段时滞回曲线越平缓,弹塑性阶段越长。

试件骨架曲线为滞回曲线的外包络线,能够反映出试件的延性和承载能力,也是确定恢复力模型特征点的基础,4片试件骨架曲线对比见图6。

可以看出,4个试件的骨架曲线在弹性阶段基本重合,在弹塑性阶段表现出明显的差异。试件 Q4

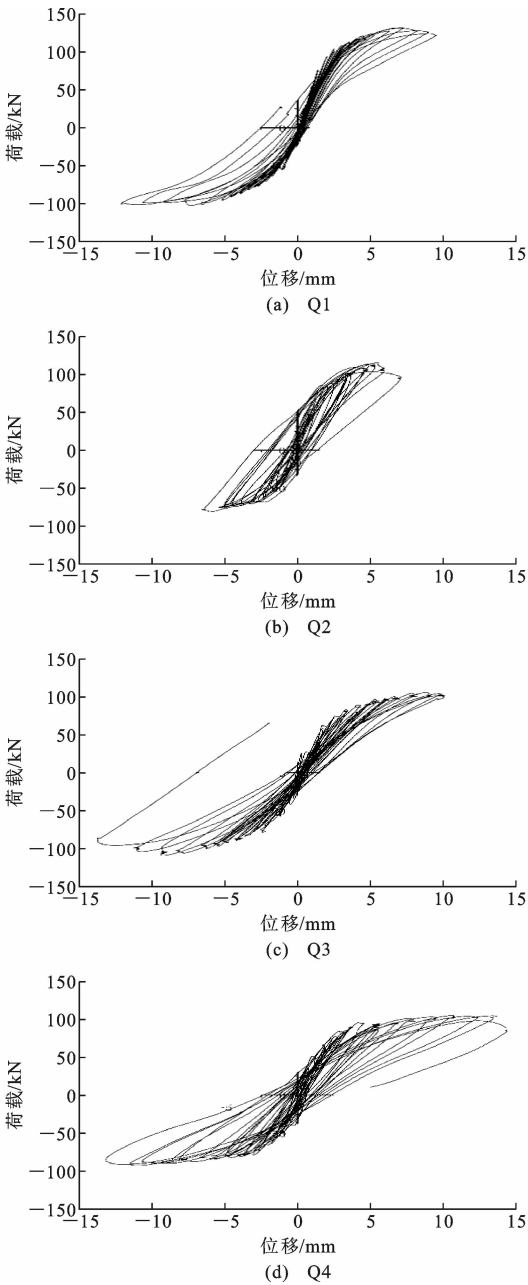


图 5 滞回曲线  
Fig. 5 Hysteretic curves

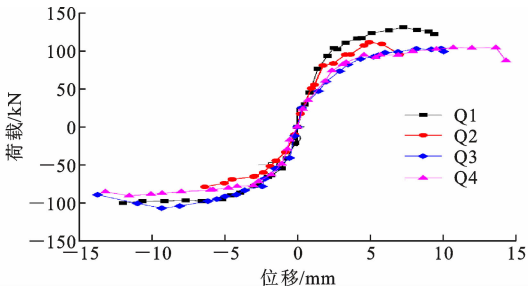


图 6 骨架曲线  
Fig. 6 Skeleton curve

骨架曲线在极限荷载点左右变化较为平缓,表现出

了一定的延性,试件 Q1、Q3 延性表现相对较差,而试件 Q2 水平荷载迅速达到极限值并迅速下降,脆性破坏明显。

从受力机理角度分析,对于试件 Q2 的小洞口布置,墙体由整体转动抵抗水平荷载机制转变为洞口两侧窗间墙受剪抵抗水平荷载,导致试件出现脆性破坏。对于试件 Q3、Q4 的小洞口布置,虽然试件的整体转动不明显,但形成了局部转动机制,且局部转动区域的高宽比相对较大,也使得其具有一定的延性性能。

2.4 承载力分析

试验记录了墙体在特征点处的荷载实测值,见表 2。各试件的名义开裂荷载、极限荷载和破坏荷载分别用  $F_{ci}$ 、 $F_{ui}$ 、 $F_{di}$  表示,开裂荷载与极限荷载均取正负向加载的平均值。需要说明的是,砌体墙在加载前期的裂缝可能分布在水平灰缝砂浆和砖块的界面处,裂缝细微不易观察,因此记录了砌体墙出现肉眼可见裂缝时对应的荷载与位移,称之为名义开裂荷载和名义开裂位移。

表 2 荷载实测值对比  
Table 2 Comparisons of measured load values

试件编号	$F_{ci}$ /kN	$F_{ui}$ /kN	$F_{di}$ /kN	$F_{ui}/F_{u1}$
Q1	94.4	117.1	111.3	1.00
Q2	79.9	98.3	95.3	0.84
Q3	86.5	107.4	94.4	0.92
Q4	81.0	98.4	87.2	0.84

分析各试件的名义开裂荷载和极限荷载,可得出开小洞口对砌体墙抗震承载力的影响。小开洞墙体的开裂荷载和极限荷载均小于实体墙的相应荷载。开单个洞口(试件 Q2、Q4)时,墙体极限承载力最低,相对无洞口墙(试件 Q1)下降了 16.1%。开洞率相同时,双洞口墙体(试件 Q3)比单个小洞口墙体(试件 Q2)名义开裂荷载提高了 8.3%,极限承载力提高了 9.3%。分析原因为双洞口墙体可避免应力集中在一个洞口的角部,主裂缝数量更多,每条裂缝的开展程度反而较小,从而提高了墙体的承载力。水平开洞率相同,洞口高度提高到 2 倍(试件 Q2、Q4)时,墙体开裂荷载和极限承载力几乎不变,可见在本次试验的洞口布置方式及高度范围内,洞口高度对小开洞砌体墙承载力的影响较小。

2.5 刚度退化分析

随着位移的增大,墙体割线刚度会不断下降(图 7),采用式(1)计算试件第  $i$  次循环的割线刚度  $K_i$ 。

$$K_i = \frac{|F_{i+}| + |F_{i-}|}{|\Delta_{i+}| + |\Delta_{i-}|}$$

(1)



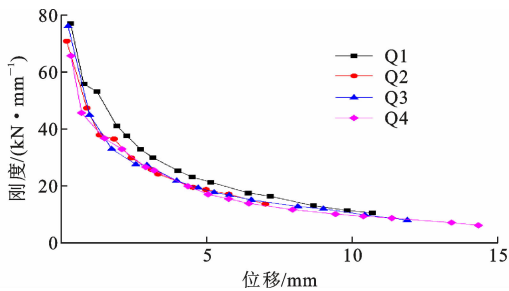


图 7 刚度退化曲线

Fig. 7 Curves of stiffness degradation

式中: $F_{i+}$ 和 $F_{i-}$ 分别为第*i*级正、负向水平荷载峰值; $\Delta_{i+}$ 和 $\Delta_{i-}$ 分别为第*i*级正、负向水平位移值。

4 个试件的抗侧刚度退化过程基本相似,大致可总结为:加载初期,墙体处于弹性阶段,变形较小,刚度退化较快;随着加载的继续,墙体开裂,变形逐渐变大,刚度退化逐渐变缓。加载过程中无洞口墙试件的抗侧刚度最大,小开洞会降低墙体的刚度。加载前期,3 个小开洞试件刚度基本一致;加载后期,试件 Q2 迅速破坏,试件 Q4 刚度最小,退化速率最慢。

分析可知,相较于开单个小洞口,增加洞口数量或高度时,墙体在弹塑性阶段刚度的有利贡献越大,其变形能力也会越强。

### 2.6 位移与延性分析

与脆性破坏相比,延性破坏具有明显的破坏前兆,砌体墙延性性能指墙体进入弹塑性阶段后,在承载力无明显下降时的变形能力,一般用延性系数表示,延性系数 $\mu$ 的计算方法见式(2)。

$$\mu = \frac{\Delta_u}{\Delta_y} \tag{2}$$

式中: $\Delta_u$ 为试件极限荷载对应的位移; $\Delta_y$ 为试件等效屈服位移。

等效屈服位移 $\Delta_y$ 的计算方法较多,常见的有几何作图法、等能量法、Park 法等,本文采用等能量法计算,即采用包络面积相等的理想弹塑性二折线代替原来的骨架曲线,将二折线拐点的位移作为等效屈服位移<sup>[18]</sup>。

根据实测骨架曲线数据计算可得各试件水平位移特征点及延性系数,见表 3,其中 $\Delta_{ci}$ 、 $\Delta_{yi}$ 、 $\Delta_{ui}$ 分别为各试件的名义开裂位移、等效屈服位移和极限位移,均取正反向加载的平均值。各试件严重破坏时的位移及延性系数分别用 $\Delta_{di}$ 、 $\mu_i$ 表示。

对比表 3 的等效屈服位移和名义开裂位移,两组数据差别较小,即砌体墙出现肉眼可见裂缝时,已接近屈服阶段。

表 3 水平位移及延性系数

Table 3 Horizontal displacement and ductility coefficient

试件编号	$\Delta_{ci}$ /mm	$\Delta_{yi}$ /mm	$\Delta_{ui}$ /mm	$\Delta_{di}$ /mm	$\mu_i$	$\mu_i/\mu_1$
Q1	3.2	3.6	7.2	10.7	2.00	1.00
Q2	3.1	3.4	5.8	7.0	1.71	0.86
Q3	4.0	4.6	9.0	11.9	1.96	0.98
Q4	3.2	4.3	11.4	14.3	2.65	1.33

从水平位移来看,试件 Q2 的等效屈服位移、极限位移和严重破坏位移均小于其他试件,在墙体正中间开单个小洞口会削弱砌体墙的变形性能。增加洞口数量或洞口高度有助于提高小开洞砌体墙的变形能力,洞口高度越大,砌体墙则越接近双肢墙的形式,变形性能越好。

从延性系数来看,所有试件的延性系数均小于 3,符合砌体墙的脆性性质。其中,试件 Q2 的延性系数最低,较试件 Q1 降低了 14.5%,试件 Q3 延性系数与试件 Q1 基本一致,试件 Q4 延性系数最大,较试件 Q2 提高了 55.0%,比试件 Q1 提高了 32.5%。

因此,对于高宽比不小于 1 的砌体墙,开单个小洞口会明显降低砌体墙的延性,增加洞口数量可以适度改善小开洞墙体的延性。而增加洞口高度时,砌体墙形式更接近双肢墙,其延性性能得到大幅提高。

## 3 数值模拟分析

### 3.1 模型建立与验证

以砌体墙试件 Q1 作为分析对象,在 ABAQUS 中采用整体式模型进行有限元分析。本文采用混凝土损伤塑性模型来建立砌体材料的本构关系,在 ABAQUS 有限元分析软件中,混凝土损伤塑性模型采用的是双参数 DP 破坏准则。砌体材料受压本构模型采用考虑损伤演化得到的本构关系<sup>[19]</sup>;砌体材料受拉本构关系参照文献<sup>[20]</sup>。

文献<sup>[21]</sup>研究表明,采用 ABAQUS 对墙体单向施加位移荷载和双向反复施加位移荷载所得的荷载-位移曲线基本相似,仅采用单向位移加载控制所得骨架曲线基本可以模拟试验所得骨架曲线,并可以节省计算时间和数据处理时间。因此本文在墙体模型中施加单向位移分析步,位移大小控制为等间隔变化,以 0.5 mm 的增量施加。数值模拟结果与试验结果的荷载-位移曲线见图 8。

从图 8 可以看出:采用 ABAQUS 模拟得到的墙体荷载-位移曲线与试验得到的荷载-位移曲线在上升段吻合较差,但总体趋势较为接近;极限荷载模

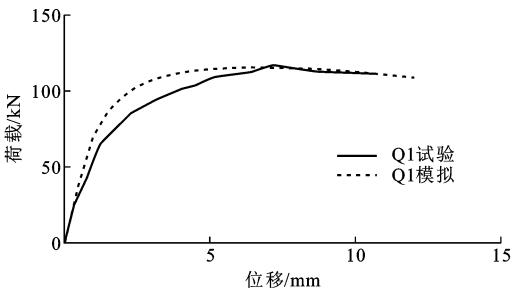


图 8 墙体荷载-位移曲线

Fig. 8 Load-deformation curves of walls

拟值与试验值相差不多,模拟的可信度较高,模拟结果可以接受。

3.2 模型设计

为进一步研究开洞率及小洞口位置对砌体墙抗震性能的影响,在试验基础上,通过 ABAQUS 建立 12 片砌体墙有限元模型,主要从极限承载力、刚度退化和延性系数 3 个方面展开分析。

墙体轮廓尺寸、材料及荷载等信息与本文墙体试件保持一致,有限元墙体模型编号、开洞率和洞口位置等信息见表 4。以 Wa-5 和 Wb-2 为例,墙体模型的立面尺寸见图 9。Wa 组墙体除开洞大小不一样外,其余均相同;Wb 组墙体保持开洞率一致,洞口位置发生改变,其中墙体 Wb-3 洞口离侧向荷载更近,墙体 Wb-4 洞口离侧向荷载更远。

表 4 墙体参数

Table 4 Parameters of walls

墙体编号	洞口尺寸	洞口形心位置	水平开洞率/%
Wa-0	无		0
Wa-1	200 mm×200 mm	居中	10
Wa-2	400 mm×400 mm	居中	20
Wa-3	600 mm×600 mm	居中	30
Wa-4	800 mm×800 mm	居中	40
Wa-5	1 000 mm×1 000 mm	居中	50
Wa-6	1 200 mm×1 200 mm	居中	60
Wb-0	500 mm×500 mm	居中	25
Wb-1	500 mm×500 mm	距墙底 1 350 mm	25
Wb-2	500 mm×500 mm	距墙底 650 mm	25
Wb-3	500 mm×500 mm	距左端 650 mm	25
Wb-4	500 mm×500 mm	距右端 650 mm	25

3.3 开洞率对砌体墙抗震性能的影响

模型 Wa 组模拟结果见表 5。分析表 5 数据可知:墙体 Wa-1 的极限荷载及延性系数与 Wa-0 基本一致,Wa-6 极限荷载最低,相较 Wa-0 降低了 60.1%。随着水平开洞率的增大,砌体墙的极限位移、屈服位移及延性系数呈先减小后增大的趋势,墙体 Wa-3 的极限位移和延性系数最小,较 Wa-0 分别

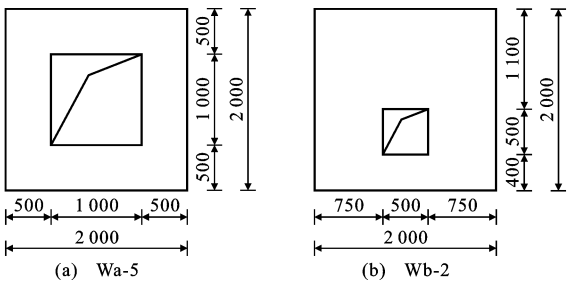


图 9 墙体模型立面尺寸(单位:mm)

Fig. 9 Facade dimension of model walls (unit:mm)

表 5 Wa 组墙体模拟结果

Table 5 Simulation results of group Wa walls

墙体编号	极限荷载/kN	极限位移/mm	屈服位移/mm	延性系数
Wa-0	115.36	5.99	2.73	2.19
Wa-1	115.36	5.99	2.76	2.17
Wa-2	100.55	3.52	1.93	1.82
Wa-3	85.49	3.00	1.97	1.52
Wa-4	76.41	3.99	2.58	1.55
Wa-5	64.20	6.02	3.68	1.64
Wa-6	46.06	9.99	5.07	1.97

减小了 49.9%和 30.6%。

图 10 为 Wa 组墙体荷载-位移曲线和刚度退化曲线。由图 10 可以看出:墙体 Wa-1 与 Wa-0 的荷载-位移曲线及刚度退化曲线基本重合,但 Wa-1 后期破坏更早。随着水平开洞率的增大,墙体的极限荷载及刚度降低,其中 Wa-2 和 Wa-3 的刚度退化速率明显更快,Wa-6 的刚度退化曲线最为平缓。

以上分析说明:开较小洞口(水平开洞率为 10%)对砌体承载力等抗震性能的影响较小,可以忽略。水平开洞率达到 20%时,墙体极限荷载、刚度及延性性能明显降低,此时洞口对墙体抗震性能的影响不可忽略。随着水平开洞率的增大,墙体极限荷载及初始刚度逐渐下降,而延性性能呈先降低后提高的趋势,水平开洞率在 30%左右时,砌体墙延性最差。

3.4 小洞口位置对砌体墙抗震性能的影响

模型 Wb 组模拟结果见表 6。分析表 6 数据可知:墙体 Wb-1 极限荷载和延性系数较 Wb-0 分别提高了 2.1%和 8.0%;墙体 Wb-2 极限荷载和延性系数较 Wb-0 分别降低了 3.5%和 7.4%;墙体 Wb-3 极限荷载较 Wb-0 提高了 5.8%,延性系数较 Wb-0 降低了 15.0%;墙体 Wb-4 极限荷载和延性系数较 Wb-0 分别提高了 3.2%和 37.5%。

图 11 为 Wb 组墙体荷载-位移曲线和刚度退化曲线。从图 11 可以看出:洞口竖向位置越往下,墙

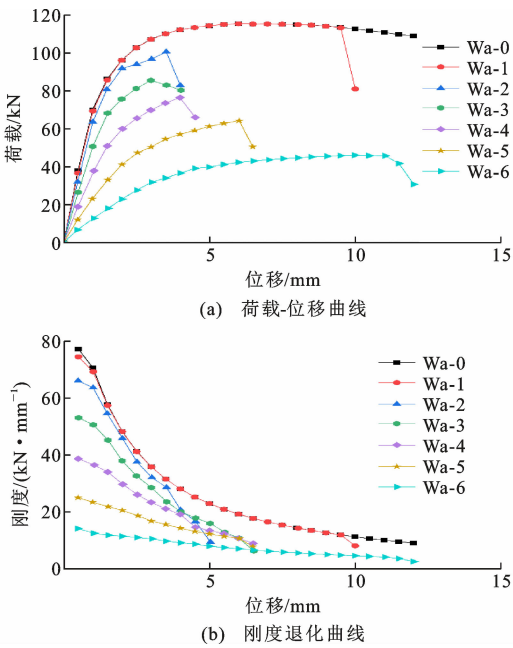


图 10 Wa 组墙体荷载-位移曲线和刚度退化曲线  
Fig. 10 Load-deformation curve and stiffness degradation curve of group Wa walls

表 6 Wb 墙体模拟结果

Table 6 Simulation results of group Wb walls				
墙体编号	极限荷载/ kN	极限荷载对应 位移/mm	屈服位移/ mm	延性系数
Wb-0	95.59	3.51	2.00	1.76
Wb-1	97.56	3.50	1.84	1.90
Wb-2	92.29	3.01	1.85	1.63
Wb-3	101.11	3.00	1.96	1.53
Wb-4	98.64	6.50	2.69	2.42

体承载力越低,侧向刚度更低,延性更差。洞口位置靠近侧向荷载时,墙体承载力有所提高,初始刚度增大,但延性性能降低,极限位移更小;洞口位置远离侧向荷载时,初始刚度下降明显,但延性得到较大改善,极限位移明显增大。

以上分析表明:洞口竖向位置越往下,砌体墙抗震性能越差。洞口在水平方向上居中布置时,墙体承载力更低;洞口在距侧向荷载更近的一侧时,墙体受力性能更好,但延性变差;洞口在距侧向荷载较远的一侧时,墙体延性明显提高,但初始刚度下降明显。

3.5 讨论

根据本次试验结果,在砌体墙正中间开设小洞口(试件 Q2)的抗震性能弱于实体砌体墙,符合人们的认知,但 Q2 的抗震性能等同甚至弱于洞口数量更多的 Q3 和洞口高度更大的 Q4,这和人们的既有认知似乎并不相符。

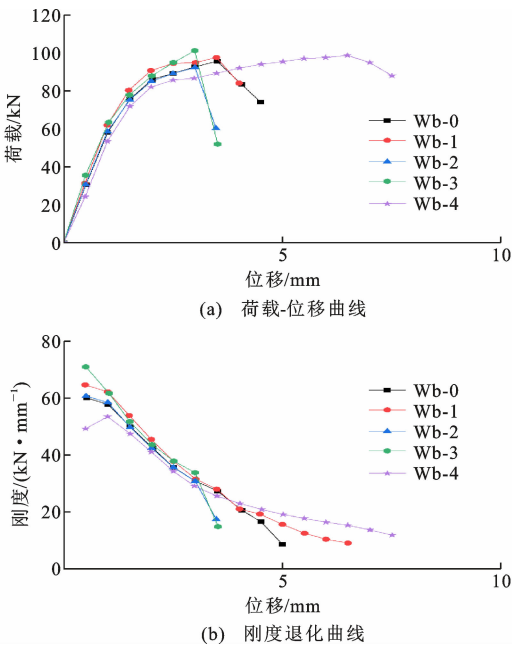


图 11 Wb 组墙体荷载-位移曲线和刚度退化曲线  
Fig. 11 Load-deformation curve and stiffness degradation curve of group Wb walls

从受力角度分析,试件 Q2 洞口两侧窗间墙区域的高宽比小于 1,属于矮墙,其受剪破坏具有脆性性质。试件 Q3、Q4 洞口两侧窗间墙在发生受剪破坏前存在较长阶段的转动变形过程,使得延性高于试件 Q2,但承载力仍与 Q2 大致相当。

根据有限元模拟结果,水平开洞率为 10%(Wa-1)时,墙体抗震性能与未开洞墙(Wa-0)几乎一致,区别为 Wa-1 由于开小洞口,在后期破坏更突然。随着开洞率的增大,墙体极限荷载及初始刚度逐渐下降,但延性性能呈先降低后提高的趋势,可见小洞口墙延性性能弱于大洞口墙,脆性破坏更加突出。

洞口位置方面,在竖直方向上,墙体洞口位置越往下,抗震性能越差;在水平方向上,尽管洞口位置居中时墙体极限承载力更低,但延性性能和初始刚度等抗震性能表现相较于洞口偏置更好,同时考虑到实际结构中墙体受力方向未知,因此洞口位置在墙体水平方向上宜居中。

普通砌体住宅或办公楼中,对于小窗洞、配电箱洞口、壁橱洞口、通风洞口等较普通门窗尺寸更小的洞口,存在设计人员忽视小洞口对砌体墙抗震能力影响的现象。对于钢筋混凝土墙而言,通过水平与竖向钢筋在小洞口边缘连续设置等方式,能够弱化小洞口的不利影响,但对于砌体墙几乎不会单独配置钢筋以弱化小洞口的不利影响,往往按照开洞率简化计算,无形中降低了墙体的抗震能力。



从本次试验结果来看,不应简单认为洞口越大对砌体墙抗震能力影响越大和洞口越小对砌体墙抗震能力影响越小。试件 Q2、Q3 的立面开洞率仅为 6.25%,但对砌体墙抗震能力的削弱程度并不弱于立面开洞率 12.5%的试件 Q4,有限元模拟结果也表明相较于大开洞墙体,小开洞墙体的脆性破坏更加突出。综上,小开洞对砌体墙抗震性能的影响应引起设计和研究人员的重视,继续开展相关的试验研究和理论分析工作。

## 4 结 语

(1)开小洞口对砌体墙破坏机理影响显著。洞口角部因应力集中而更易开裂,开洞墙体最终破坏均呈现为典型的剪切破坏形态。本次试验中,砌体墙在加载过程中均伴有不同程度的平面内转动变形现象。其中,无洞口墙表现为明显的整体转动破坏特征,开单个小洞口墙体转动变形最小;增加洞口数量或高度可提高墙体转动变形的参与程度。

(2)开小洞口会削弱砌体墙的水平承载力,降低墙体的承载能力储备和抗侧刚度。洞口高度对小开洞砌体墙承载力的影响较小,洞口数量增加可一定程度上分散应力集中,使得承载力小幅提高。

(3)开单个小洞口会大幅降低墙体的延性,墙体达到水平极限荷载后迅速破坏,脆性破坏明显。增加洞口数量或高度可适当提高墙体的延性。

(4)较小洞口对砌体墙承载力等抗震性能的影响较小,随着开洞率的增大,墙体极限荷载及初始刚度逐渐下降,延性性能呈先降低后提高的趋势。在竖直方向上,洞口位置越往下,墙体抗震性能越差;在水平方向上,洞口宜居中布置。

## 参考文献:

## References:

- [1] YANG L H. Impact of wall openings on the seismic performance of brick masonry structure[J]. Advanced Materials Research, 2013, 804: 307-310.
- [2] 李思齐,于天来,张 明. 不同烈度区砌体结构震害调研及易损性分析[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2020, 59(2): 77-85.  
LI Siqi, YU Tianlai, ZHANG Ming. Seismic damage investigation and vulnerability analysis of masonry structures in different intensity zones[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2020, 59(2): 77-85.
- [3] 李碧雄,谢和平,王 哲,等. 汶川地震后多层砌体结

构震害调查及分析[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2009, 41(4): 19-25.

LI Bixiong, XIE Heping, WANG Zhe, et al. Wenchuan earthquake field reconnaissance and analysis on multi-story masonry structure buildings [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2009, 41(4): 19-25.

- [4] 周铁钢,赵 冬.“5·12”地震绵竹城区砌体结构房屋震害调查与分析[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2008, 40(5): 613-618.

ZHOU Tiegang, ZHAO Dong. Investigation and analysis on the damage of masonry buildings in the urban area of Mianzhu during “5·12” Earthquake[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition), 2008, 40(5): 613-618.

- [5] YANEZ F, ASTROZA M, HOLMBERG A, et al. Behavior of confined masonry shear walls with large openings[C]//WCEE. Proceedings of the 13th world conference on earthquake engineering. Vancouver: WCEE, 2004: 03438.

- [6] VOON K C, INGHAM J M. Experimental in-plane strength investigation of reinforced concrete masonry walls with openings[J]. Journal of Structural Engineering, 2008, 134(5): 758-768.

- [7] 李升才,林 强,郭 霖. 不同洞口位置节能砌块隐形成框墙体抗震性能[J]. 西南交通大学学报, 2020, 55(2): 299-309.

LI Shengcai, LIN Qiang, GUO Lin. Seismic behavior of energy-saving block & invisible multi-ribbed frame composite walls with different opening positions[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2020, 55(2): 299-309.

- [8] 姚新强,孙柏涛,王明振,等. 我国农村典型砖砌体墙片拟静力试验研究[J]. 工程力学, 2017, 34(6): 198-209.

YAO Xinqiang, SUN Baitao, WANG Mingzhen, et al. Study on the pseudo-static tests of typical brick masonry walls in rural China[J]. Engineering Mechanics, 2017, 34(6): 198-209.

- [9] KAYRGA O M, ALTUN F. Investigation of earthquake behavior of unreinforced masonry buildings having different opening sizes: experimental studies and numerical simulation [J]. Journal of Building Engineering, 2021, 40: 102666.

- [10] ONA VERA M Y, METELLI G, BARROS J, et al. Effects of new openings on the in-plane behavior of unreinforced brick masonry walls[C]//MILANI G, TALIERCIO A, GARRITY S. Proceedings of the

- 10th International Masonry Conference, Milan:IMC, 2018;1-13.
- [11] LIU Z, CREWE A. Effects of size and position of openings on in-plane capacity of unreinforced masonry walls[J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2020, 18(10):4783-4812.
- [12] 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.
- LIU Guiqiu, SHI Chuxian, LÜ Weirong. Shear behavior and calculation of load-bearing capacity of masonry shear wall[J]. Journal of Building Structures, 2005, 26(5):81-90, 117.
- [13] 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.
- HUANG Yi, WANG Ruizhe. Seismic vulnerability analysis of brick masonry structures with wall openings[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2019, 41(3):574-580.
- [14] BAGHERI H, SAFI M. A numerical study on optimizing the geometry and location of the openings in masonry walls using finite element method[J]. Journal of Engineering and Applied Sciences, 2017, 12(9):2402-2414.
- [15] GHANEM G. Effect of openings on the behavior of reinforced masonry shear walls using nonlinear finite element analysis[C]//CMS. Seventh Canadian Masonry Symposium, Hamilton:CMS, 1995:263-273.
- [16] PARISI F, AUGENTI N. Seismic capacity of irregular unreinforced masonry walls with openings[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2013, 42(1):101-121.
- [17] 建筑抗震设计规范:GB 50011—2010[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2010.
- Code for seismic design of buildings:GB 50011—2010 [S]. Beijing:China Architecture & Building Press, 2010.
- [18] PARK R. State of the art report-ductility evaluation from laboratory and analytical testing[C]//WCEE. Proceedings of the 9th World Conference on Earthquake Engineering. Tokyo:WCEE, 1988:605-616.
- [19] 杨卫忠. 砌体受压本构关系模型[J]. 建筑结构, 2008, 38(10):80-82.
- YANG Weizhong. Constitutive relationship model for masonry materials in compression[J]. Building Structure, 2008, 38(10):80-82.
- [20] 肖遥,底欣欣,黄河. 砖砌体单轴压缩与拉伸应力应变关系[J]. 世界地震工程, 2019, 35(1):210-219.
- XIAO Yao, DI Xinxin, HUANG He. Stress-strain relationships of brick masonry under uniaxial compression and tension[J]. World Earthquake Engineering, 2019, 35(1):210-219.
- [21] 郑妮娜. 装配式构造柱约束砌体结构抗震性能研究[D]. 重庆:重庆大学, 2010.
- ZHENG Nina. Research on seismic behavior of masonry structures with fabricated tie-columns [D]. Chongqing:Chongqing University, 2010.