

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2016.02.002

# 开洞大小对短肢剪力墙抗震性能影响的试验研究

贺晶方, 蒋隆敏, 刘 星

(湖南工业大学 土木工程学院, 湖南 株洲 412007)

**摘 要:** 通过对1个未开洞的短肢剪力墙和2个开洞直径分别为120, 160 mm的短肢剪力墙的低周反复荷载试验, 研究洞口大小对短肢剪力墙抗震性能的影响。试验结果表明: 随着洞口尺寸的增大, 试件的开裂荷载、屈服荷载、极限荷载有所下降, 但延性提高, 滞回环更加饱满, 耗能能力增强, 试件越来越接近框架特性; 试件的破坏形式均为弯曲破坏, 破坏时, 腹板端纵筋屈服, 翼缘端纵筋偶有屈服, 腹板端、翼缘端箍筋均未屈服, 腹板端混凝土压碎。

**关键词:** 短肢剪力墙; 开洞; 低周反复荷载试验; 抗震性能

中图分类号: TU375.2

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2016)02-0008-05

## Experimental Study on the Effect of Opening Size on the Seismic Performance of Short-Pier Shear Wall

HE Jingfang, JIANG Longmin, LIU Xing

(School of Civil Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

**Abstract:** Based on a low-cyclic loading experiments on three specimens of short-pier shear wall, one without opening and the other two with openings of 120 and 160 mm, analyzed the effects of the size of opening on the seismic performance of short-pier shear wall. The result indicates that the cracking load, yield load and ultimate load of specimens decrease with the opening size increasing, and its ductility improves, the hysteresis loop is fuller and the energy dissipation capacity enforces. In addition, as the size of opening increases, the specimens is more close to the frame characteristics, and the failure modes of the specimens are flexural failure. When the specimen fails, the web longitudinal reinforcement yields, the flange end longitudinal reinforcement sometimes yields, the web and flange end hoops do not yield, and the web concrete crushes.

**Keywords:** short-pier shear wall; opening; low-cyclic loading test; seismic performance

## 0 引言

短肢剪力墙结构是一种较新型的高层住宅结构体系, 于20世纪90年代由荣柏生院士首次提出<sup>[1]</sup>。该体系具有结构布置灵活、抗侧刚度大、自重小、工程造价低等优点。通过十多年的工程实践, 目前已得到

十分广泛的应用。近年来, 国内外对短肢剪力墙性能的研究主要集中于轴压比、截面形状、加设暗支撑、不同连梁形式、孔洞位置等对短肢剪力墙性能的影响上<sup>[2-9]</sup>。目前, 尚没有关于洞口大小对短肢剪力墙抗震性能影响的研究。根据我国相关规范, 短

收稿日期: 2016-01-12

基金项目: 湖南省教育厅科学研究基金资助重点项目(10A024)

作者简介: 贺晶方(1988-), 男, 河北邯郸人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为新型材料及其在结构加固中的应用,

E-mail: [hejingfangwx@163.com](mailto:hejingfangwx@163.com)

肢剪力墙是不允许在墙肢上开设孔洞的。但在实际使用过程中,因安装管线、开窗等原因,短肢剪力墙结构经常需要开设洞口,而洞口对短肢剪力墙的承载力、延性、抗侧刚度、破坏形态等均有影响。因此,就开洞对短肢剪力墙抗震性能的影响进行试验研究具有一定的现实意义。为此,本文通过低周反复荷载试验,研究洞口大小对短肢剪力墙抗震性能的影响。

## 1 试验概况

### 1.1 试件设计

影响短肢剪力墙性能的主要因素包括混凝土的强度等级、钢筋的配筋率、截面形式、轴压比、洞口大小等。本文主要考虑洞口大小对短肢剪力墙抗震性能的影响,因此试件的截面形状、混凝土强度等级、钢筋布置等其它参数均相同。试件共3个,缩尺比例为1:2。短肢剪力墙试件、腹板及翼缘高度分别为1 400, 700, 300 mm,截面厚度均为100 mm,其中有一个试件腹板不开设洞口,另外2个试件腹板开设洞口,洞口直径分别为120, 160 mm,洞口中心均在同一位置。为了有效模拟楼板对墙体的约束作用,方便在试验中对试件施加荷载和将试件锚固在地面上,在剪力墙试件顶部与底部分别设计一个矩形加载梁和基础梁。3个试件都采用细石混凝土浇筑,设计强度等级为C20,所采用纵筋和箍筋均为 $\Phi 4$ 钢筋。为保证浇筑质量,浇筑试件时采用机械振捣与人工振捣相结合的方式。钢筋与混凝土材料性能指标分别如表1和表2所示。

3个试件编号分别为LKD000, LKD120, LKD160,试件编号含义以LKD120为例:LK表示试件为开设洞口的L形截面短肢剪力墙,剪力墙洞口直径为120 mm。L形短肢剪力墙试件如图1所示,L形试件的配筋如图2所示。

表1 钢筋性能指标  
Table 1 Properties of steel

| 钢筋规格     | 屈服强度 / MPa | 极限强度 / MPa | 延伸率 / % | 弹性模量 / MPa        |
|----------|------------|------------|---------|-------------------|
| $\Phi 4$ | 619        | 690        | 3.8     | $2.0 \times 10^5$ |

表2 混凝土性能指标  
Table 2 Properties of concrete

| 试件编号   | 极限抗压强度 / MPa | 轴心抗压强度 / MPa |
|--------|--------------|--------------|
| LKD000 | 18.97        | 12.69        |
| LKD120 | 19.16        | 12.81        |
| LKD160 | 18.38        | 12.29        |

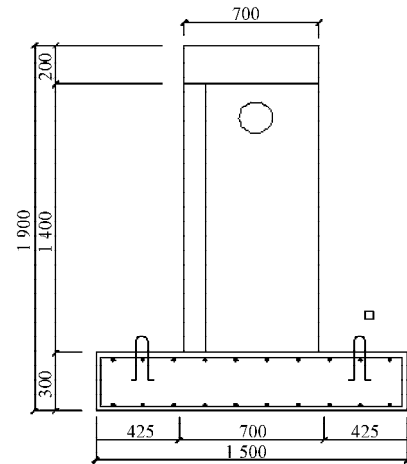


图1 L形短肢剪力墙试件

Fig. 1 The L-shaped short-pier shear wall specimen

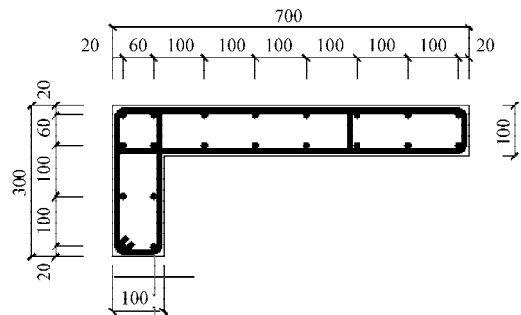


图2 L形短肢剪力墙试件配筋图

Fig. 2 Reinforcements arrangement of L-shaped specimen

### 1.2 试验方法与试验过程

研究试件的抗震性能主要有3种试验方法:拟静力试验、拟动力试验、振动台试验。3种方法中,振动台试验能够较真实地模拟结构所受到的地震作用,结构的受力性能、破坏形态较接近实际情况;但其试验过程较短,难以详细记录试验数据、观察裂缝的发展形态。对于拟动力试验,同样存在此类问题。故本次试验采用拟静力试验法来研究开洞短肢剪力墙的抗震性能。

试验加载装置如图3所示。正式试验前,先施加10 kN的水平荷载,检查试验装置、数据采集仪器等试验设备是否正常工作,然后卸掉荷载,准备正式加载。

对试件施加220 kN竖向荷载,其大小在试验过程中保持不变,加载位置在截面形心。水平方向施加低周反复荷载:腹板边缘纵筋屈服前采用荷载控制,以10 kN为增量,每级荷载进行1个循环;腹板边缘纵筋屈服后采用位移控制,以屈服时的水平位移进行控制,每级荷载进行3个循环。直至试件承载力下降至最大承载力的85%,即认为试件破坏。

试验过程中以水平加载器对腹板施加推力为正向加载,以水平加载器对翼缘施加推力为反向加载。

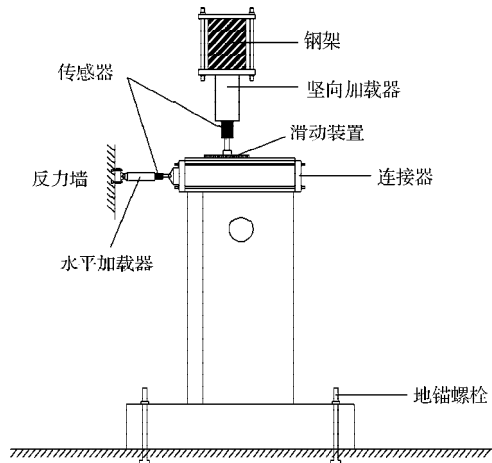


图3 试验加载设备示意图

Fig. 3 Schematic of experiment loading set-up

## 2 试件破坏特征与试验结果分析

### 2.1 试验现象与破坏特征

开洞短肢剪力墙在低周反复荷载作用下,从开始受力到最终破坏可分为开裂阶段、屈服阶段与破坏阶段。各试件破坏分析如下。

#### 1) 试件LKD000

当正向加载至20 kN时,腹板底部出现水平裂缝;反向加载至25 kN时,距翼缘底部85 mm处出现水平裂缝;当正向加载至31 kN时,在距腹板底部180 mm处出现一条水平裂缝;正向加载至41 kN时,腹板端部纵筋屈服。屈服后,水平方向由荷载控制改为位移控制。此后,在反复循环荷载中,腹板及翼缘部分水平裂缝继续延伸、变宽,腹板中下部出现多条斜向裂缝。反向加载至51 kN时,腹板与翼缘交界面处的斜裂缝延伸发展至和腹板端部出现的斜裂缝相交;正向荷载继续增加,腹板端部的混凝土有少量剥落;正向加载至88 kN时,腹板边缘大量混凝土被压碎、剥落,试件承载力下降到最大承载力的85%以下,试验结束。

试验结束时,腹板处纵筋屈服,混凝土压碎,翼缘处纵筋未能屈服,以水平裂缝为主,腹板及翼缘处箍筋均未屈服,试件LKD000破坏形式为弯曲破坏。最终破坏形态如图4所示。

#### 2) 试件LKD120

开洞试件LKD120与LKD160的破坏情况类似,仅以LKD120为例叙述破坏过程。

当正向加载至17 kN时,腹板底部出现长度较短的水平裂缝;反向加载至25 kN时,距翼缘底部75 mm处出现水平裂缝;正向加载至49 kN时,腹板端部纵筋屈服,水平方向由荷载控制改为位移控制。之后腹板中下部斜裂缝进入快速发展阶段,腹板处水平裂

缝延伸形成斜裂缝,并向翼缘与腹板交界面处发展。正向加载至57 kN时,洞口斜向上45°出现一条细小裂缝;正向荷载继续增加,腹板端部的混凝土有少量剥落;正向加载至84 kN时,腹板边缘大量混凝土被压碎、剥落,试件承载力急剧下降至峰值承载力的85%以下,试件发出“啪啪”响声,试验结束。

试验结束时,腹板纵筋屈服,混凝土剥落,翼缘处纵筋未屈服,试件箍筋未屈服,试件LKD120的破坏形式为弯曲破坏。最终破坏形态如图5所示。



图4 LKD000 最终破坏形态

Fig. 4 Failure mode of LKD000



图5 LKD120 最终破坏形态

Fig. 5 Failure mode of LKD120

### 2.2 主要试验结果与分析

#### 2.2.1 滞回曲线

根据试验所测数据,各试件在整个加载过程中的滞回曲线如图6所示,图中 $F$ 为水平荷载, $D$ 为墙顶水平位移。从图6可以看出,各试件滞回曲线不饱

满,呈现反S形,表明试件的耗能能力较差。这与试件制备时受条件所限,使用的混凝土强度等级较低、钢筋直径较小等因素有关,但仍可由滞回曲线分析各试件的性能。

1) 相较于没有开设洞口试件的滞回环,开设洞口试件的滞回环较饱满,耗能能力有所提升。这是因为未开洞短肢剪力墙的能量主要耗散在墙体裂缝的发展上,而开洞短肢剪力墙的能量主要耗散在墙体裂缝发展和屈服变形上,其所耗散能量更多。开洞短肢剪力墙后期耗能能力要好于未开洞短肢剪力墙。

2) 腹板洞口的存在及尺寸的增加降低了短肢剪力墙的初始抗侧刚度。剪力墙试件在达到屈服荷载前,在相同的水平荷载作用下,有洞口短肢剪力墙试件的侧向位移大于没有开设洞口的短肢剪力墙。

3) 3个试件的滞回曲线基本对称,但相较反向加载时的滞回环,正向加载时的滞回环稍大。这是由于在反复荷载作用下,虽然试件在正反两个方向上的初始刚度相同,但翼缘的刚度退化程度比腹板的刚度退化程度大,翼缘位于受拉区时的承载力高于腹板受拉时的承载力。

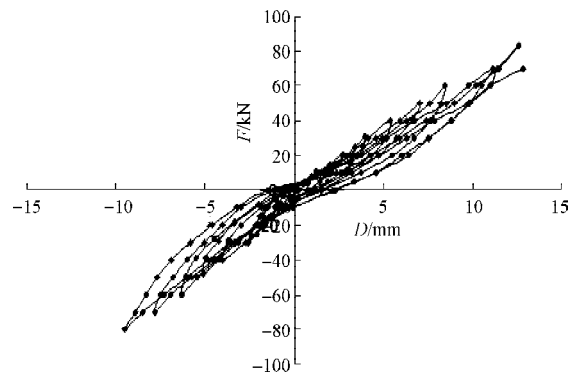
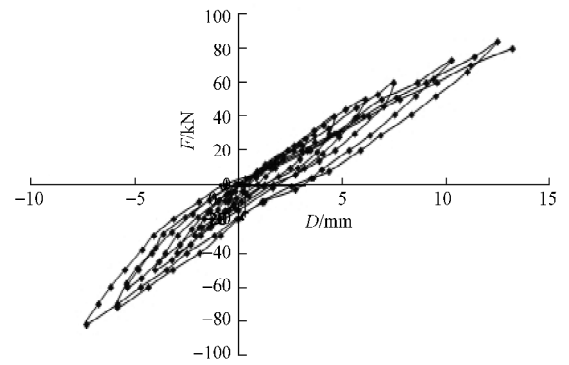
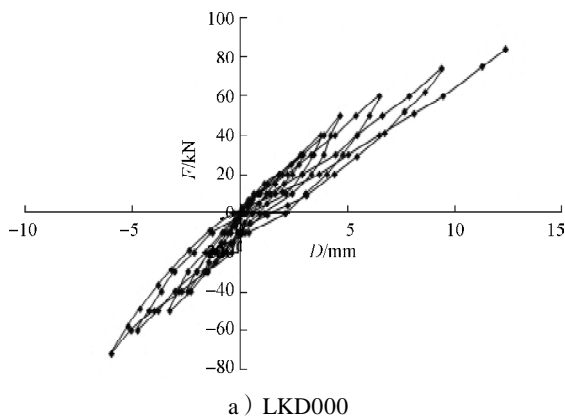


图6 3个试件的滞回曲线

Fig. 6 Hysteretic curves of three specimens

### 2.2.2 承载力与延性

为了便于分析,统一认定试件腹板端部纵筋屈服即为剪力墙试件屈服,试件腹板端发生破坏即为剪力墙试件破坏,试件的屈服荷载、屈服位移、极限荷载、极限位移均以试件发生屈服、破坏时所测的结果为准。根据试件在屈服阶段、破坏阶段所测的屈服位移、极限位移,计算求得剪力墙试件的延性指标 $\eta$ , $\eta = \text{极限位移} / \text{屈服位移}$ 。表3为试验的主要数据。

表3 试验主要数据

Table 3 The experimental results

| 试件编号   | 孔洞率/% | 屈服荷载/kN | 屈服位移/mm | 极限荷载/kN | 极限位移/mm | 延性 $\eta$ | 轴压比  |
|--------|-------|---------|---------|---------|---------|-----------|------|
| LKD000 | 0     | 51.38   | 4.38    | 88.56   | 12.00   | 2.74      | 0.25 |
| LKD120 | 1.15  | 49.84   | 4.89    | 84.79   | 14.49   | 2.96      | 0.25 |
| LKD160 | 2.05  | 48.56   | 5.31    | 81.81   | 15.66   | 2.97      | 0.25 |

由表3可以看出,在其他因素不变的情况下,洞口尺寸大小对短肢剪力墙的承载力和延性均有影响:当试件孔洞率从0增加到1.15%,试件的屈服荷载、极限荷载略有下降,屈服荷载下降幅度为3.00%,极限荷载下降幅度为4.29%,极限荷载下降幅度比屈服荷载下降幅度大,而试件的延性有所增加,提高幅度为8.03%左右;随着试件孔洞率由0增

加到2.05%,试件的屈服荷载、极限荷载下降幅度相较孔洞率为1.15%时大,其中,屈服荷载下降幅度为5.49%,极限荷载下降幅度为7.62%,而试件的延性提高幅度为8.39%。

表3的数据表明,在混凝土强度、配筋率等其他因素不变的情况下,随着试件洞口尺寸的增大,试件的承载力下降,延性提高;无洞口试件的承载力最

大, 而其延性最小, 试件更加接近框架结构的特征。

### 2.2.3 刚度退化

刚度是结构位移计算、地震力分配、能量分析中的一个重要参数。在整个试验过程中, 由于混凝土的开裂和钢筋在屈服阶段时的非弹性能等原因, 导致刚度出现退化的现象。3个试件的刚度退化曲线如图7所示, 图中 $f$ 为试件水平位移,  $K$ 为试件所受荷载与对应位移之比。

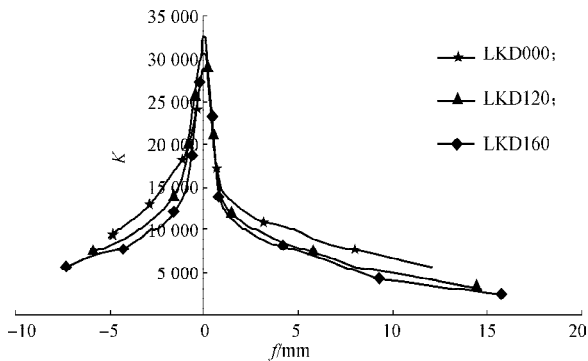


图7 试件刚度退化曲线

Fig. 7 Stiffness degradation curves of specimens

由图7可知: 1) 腹板开设洞口使得试件初始刚度降低, 洞口尺寸越大, 初始刚度下降越多; 在试件屈服前, 洞口尺寸越大, 试件刚度退化速率越快, 但在试件屈服后, 洞口尺寸越大, 试件刚度退化速率越缓慢。2) 试件屈服前, 正向加载时的刚度退化快于反向加载时的刚度退化; 屈服后, 反向加载时的刚度退化快于正向加载时的刚度退化。这是由于正向加载时腹板端部受拉混凝土面积小于反向加载时翼缘处受拉混凝土面积, 而在试件屈服后, 腹板端部受压混凝土面积小于翼缘受压混凝土面积。

## 3 结论

通过对不开洞和开洞大小不同的短肢剪力墙的低周反复荷载试验研究, 可以得出以下结论。

1) 开洞短肢剪力墙随着洞口尺寸的增大, 试件的开裂荷载、屈服荷载、极限承载力等有所下降, 延性提高, 滞回环更加饱满, 耗能能力增强, 试件特性越来越接近框架。没有开设洞口的短肢剪力墙, 其初始刚度与极限承载力在3个试件中最大。随着洞口尺寸的增加, 试件初始刚度与极限承载力降低。

2) 由于洞口是圆形洞口, 导致其洞口周边应力集中现象不明显, 洞口周边仅有少许较短裂缝, 试件的裂缝主要出现在腹板中下部与翼缘处。在纵筋

屈服前, 裂缝以水平裂缝为主; 纵筋屈服后, 斜裂缝开始出现。

3) 短肢剪力墙试件的破坏形式均为弯曲破坏: 破坏时, 腹板端纵筋屈服, 翼缘端纵筋偶有屈服, 腹板端、翼缘端箍筋均未屈服, 腹板端混凝土压碎。

4) 开设洞口试件的裂缝均主要集中出现在腹板端部与洞口周边, 而翼缘处裂缝较少。可以对腹板端部及洞口周边采用HPFL加固措施, 以提升试件刚度, 增强试件的使用性能。

### 参考文献:

- [1] 容柏生. 高层住宅建筑中的短肢剪力墙结构体系[J]. 建筑结构学报, 1997, 18(6): 14-19.  
RONG Baisheng. Short-Leg Shear Wall Structural System Used in Tall Residential Buildings[J]. Journal of Building Structures, 1997, 18(6): 14-19.
- [2] 蔡全智, 高湛, 李华, 等. 短肢剪力墙低周反复试验及其ANSYS分析[J]. 武汉理工大学学报, 2005, 27(12): 49-52.  
CAI Quanzhi, GAO Zhan, LI Hua, et al. Experiment of SLW Under Monotonic and Cyclic Reversed Loading and Its ANSYS Analysis[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2005, 27(12): 49-52.
- [3] 李青宁, 李晓蕾, 雷伟宁. T形与L形短肢剪力墙破坏规律及刚度延性研究[J]. 建筑结构, 2010, 40(2): 37-39, 44.  
LI Qingning, LI Xiaolei, LEI Weining. Study on Destruction Law and Stiffness Ductility of T-Shaped and L-Shaped Short Shear Wall[J]. Building Structure, 2010, 40(2): 37-39, 44.
- [4] 曹万林, 董宏英, 胡国振, 等. 钢筋混凝土带暗支撑双肢剪力墙抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2004, 25(3): 22-28.  
CAO Wanlin, DONG Hongying, HU Guozhen, et al. Experimental Study on Seismic Behavior of RC Coupled Shear Wall with Concealed Bracings[J]. Journal of Building Structures, 2004, 25(3): 22-28.
- [5] 李奎明, 孙春毅, 李杰. 高性能混凝土双连梁短肢剪力墙试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2006, 26(3): 121-123.  
LI Kuiming, SUN Chunyi, LI Jie. Experimental Study on HPC Short-Leg Shear Wall with a Pair of Beams[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2006, 26(3): 121-123.
- [6] 刘星, 杨晓华, 陈端云, 等. 单调荷载下开洞短肢剪力墙力学性能的有限元分析[J]. 湖南工业大学学报, 2015, 29(2): 14-20.  
LIU Xing, YANG Xiaohua, CHEN Duanyun, et al. Finite

(下转第20页)