

doi: 10.11830/ISSN.1000-5013.201605010



# 开洞节能砌块隐形密框 复合墙体恢复力模型

黄端权, 李升才

(华侨大学 土木工程学院, 福建 厦门 361021)

**摘要:** 研究开洞节能砌块隐形密框复合墙体的抗震性能,对 6 片 1/2 缩尺的开洞密框复合墙体进行低周往复荷载作用下的拟静力试验,研究不同参数对结构构件受力性能的影响. 试验考虑了墙体的配筋率、开洞形式对构件的承载力、刚度、变形、延性耗能、破坏形态及刚度退化等的影响,得出相应的荷载-位移滞回曲线、骨架曲线等,并建立相应的开洞复合墙体恢复力模型. 研究表明:肋柱配筋率的增加有利于提高复合墙体承载力、延性变形性能,而肋梁配筋率的增加有利于约束后期横向滑移变形,变形性能较佳;随着墙洞比系数的减小,复合墙体的强度、刚度有所增加,滑移变形较少,极限位移变形较少,前期刚度退化较平缓,后期下降段强度变化较明显,滞回曲线相对饱满,延性耗能、抗震效果较好.

**关键词:** 开洞复合墙体; 滞回曲线; 骨架曲线; 恢复力模型; 节能砌块; 隐形密框结构

**中图分类号:** TU 399; TU 317.1      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-5013(2016)05-0576-07

## Restoring Force Model of Energy-Saving Block Masonry Composite Walls With Holes and Hidden Frame

HUANG Duanquan, LI Shengcai

(College of Civil Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

**Abstract:** In order to obtain the restoring force model which can reflect the important parameters of seismic performance of block masonry composite walls with holes and hidden frame, the quasi static test of 1/2 scale 6 walls under horizontal low-cyclic loading were conducted to study the influence of different test parameters on the structure performance. The influence of the reinforcement ratio and the hole forms in the walls on the bearing capacity, stiffness, deformation, ductility, energy dissipation, failure pattern and stiffness degradation were investigated. Based on the test and analysis results, the hysteretic loops and skeleton curves were obtained, the restoring force model of composite walls with holes was established. The research shows that, as the reinforcement ratio in rib columns increases, the composite wall deformation performance, bearing capacity and ductility are improved; and as the reinforcement ratio in rib beams increases, the deformation of lateral sliding decreases, the deformation performance is upgraded. As the ratio of hole in the wall increases, the composite wall strength, stiffness increase, slip deformation decreases, the ultimate displacement decreases, the initial stage of the stiffness degradation becomes gentle, but the strength changes obviously in later descending stage. The hysteretic loops are relatively full, ductility and energy consumption, seismic performance are enhanced.

**Keywords:** composite walls with holes; hysteretic loops; skeleton curves; restoring force model; Energy saving building block; hidden frame

**收稿日期:** 2015-11-10  
**通信作者:** 李升才(1960-),男,教授,博士,主要从事结构抗震方面的研究. E-mail:lsc50605@hqu.edu.cn.  
**基金项目:** “十二五”国家科技支撑计划项目(2015BAI07b04).

节能砌块隐形密框结构是在配筋砌体结构及混凝土小型空心砌块结构的基础上研制而成的轻型节能抗震结构体系<sup>[1]</sup>. 作为该结构体系的核心受力构件, 节能砌块隐形密框复合墙体是一种轻质高强、经济节能、受力性能及抗震性能良好、保温(隔热)隔音效果佳的新型承重墙体. 其独特、简单的施工工艺, 便于工业化生产, 适用于我国多层及中高层住宅建筑结构<sup>[2]</sup>. 该复合墙体是以截面及配筋较小的混凝土肋格作为骨架, 内嵌具有预留孔槽(便于形成用于浇筑十字交错密梁、柱肋格密框的孔道)的轻质砌块. 利用密布的梁、柱、轻质砌块及大外框形成具有共同工作性能的抗震受力体系. 其中, 砌块是以炉渣、粉煤灰等工业废料为主要原料的加气混凝土或轻质石膏块. 以往对对墙体的研究主要集中在有填充配筋砌块的复合墙体整片墙板的整体性试验<sup>[2-12]</sup>, 未能对由密布肋梁、肋柱、节能砌块组成的带门、窗洞口框格单元的隐形密框复合墙体的破坏机理及抗震性能进行深入研究. 本文对 6 片(SW1~SW6)带门、窗洞口的节能砌块隐形密框复合墙体进行试验研究, 建立相应的荷载-挠度恢复力模型.

1 试验概况

1.1 试件的设计与制作

选用 6 片带门窗洞口的 1/2 缩尺试件进行拟静力试验, 其中, 带窗洞试件为 SW1~SW3, 墙体尺寸为 1.80 m×1.35 m×0.11 m, 窗口位于墙体中间(距顶梁 150 mm, 距底梁 450 mm), 洞口尺寸为 0.75 m×0.60 m; 带门洞试件为 SW4~SW6, 墙体尺寸为 2.70 m×1.35 m×0.11 m, 采用偏开洞方式布置门洞口(距左翼缘墙 95 mm), 洞口尺寸为 0.45 m×1.05 m, 均带底梁、顶梁及翼墙, 肋梁均为 50 mm×60 mm 矩形截面, 肋柱直径均为 60 mm 圆形截面. 试件配筋情况, 如表 1 所示. 节能石膏砌块的抗压强度为 1.84 MPa, 抗拉强度为 0.18 MPa, 干重度为 6.15 kN·m<sup>-3</sup>, 弹性模量为 1 950 N·mm<sup>-2</sup>. 试件先浇筑地梁, 再分层堆砌节能砌块, 并在对应肋孔处放置相应钢筋. 最后, 往孔道内浇灌自密实流动混凝土砂浆使孔道密实, 试件制作完成. 工艺方便快捷, 节省劳动成本及砌筑时间, 综合效益高, 适用于实际工程运用.

1.2 试验加载方案及结果

为了综合研究试件的抗震性能, 采用单向往复荷载作用下的拟静力试验研究方法. 运用变幅等幅混合的位移控制方法, 每级循环 1 次, 当开洞墙体试件达到屈服荷载后, 每级位移幅值循环 2 次(即相当于等幅加载), 直至荷载下降到极限荷载 85% 左右时, 停止继续加载, 试验装置如图 1 所示. 图 1 中: ① 为激光位移计; ② 为普通位移计; ③ 为钢板; ④ 为电液伺服作动器; ⑤ 为地梁固定端螺栓; ⑥ 为记录及显示装置; ⑦ 为液压源; ⑧ 为反力架; ⑨ 为 45 号高强度加载圆钢; ⑩ 为千斤顶. 加载制度如表 2 所示. 表 2 中: (2) 为相同位移幅值循环 2 次.

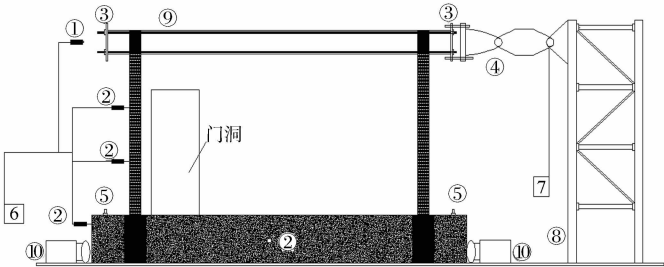


图 1 加载装置

Fig. 1 Loading device

表 2 加载制度  
Tab. 2 Loading system

试件	试件实际加载过程变幅情况
SW1	0.7, 1.0, 1.3, 1.8, 2.3(2), 3.45(2), 4.6(2), 6.9(2), 9.2(2), 13.8(2), 18.4(2), 23(2), ...
带窗洞 SW2	0.7, 1.0, 1.3, 1.8, 2.3(2), 3.45(2), 4.6(2), 6.9(2), 9.2(2), 13.8(2), 18.4(2), 23(2), 27.6(2), ...
SW3	0.7, 1.0, 1.3, 1.8, 2.3, 3.45(2), 4.6(2), 6.9(2), 9.2(2), 13.8(2), 18.4(2), 23(2), ...

续表

Continue table

mm

试件	试件实际加载过程变幅情况
SW4	0.8,1.8,2.8,3.8,4.8,6.8(2),8.8(2),10.8(2),12.8(2),16.8(2),20.8(2),...
带门洞 SW5	0.8,1.8,2.8,3.8,4.8,6.8(2),8.8(2),10.8(2),12.8(2),16.8(2),20.8(2),22.8(2)
SW6	0.8,1.8,2.8,3.8,4.8,6.8(2),8.8(2),10.8(2),12.8(2),16.8(2),20.8(2),24.8(2)

通过测量复合墙体内肋梁肋柱钢筋应变、墙板各分层水平位移,观测加载过程中的试件开裂、屈服、极限荷载及裂缝开展情况,进行试件破坏现象描述.开洞复合墙体在不同参数下的荷载-位移滞回曲线、骨架曲线,进一步研究其抗震耗能性能,建立相应的开洞复合墙体恢复力模型.试验加载过程中,各试件在各阶段临界点的推、拉平均荷载-位移试验结果,如表 3 所示.表 3 中: $P$  为荷载; $\Delta$  为位移.

表 3 各试件试验结果

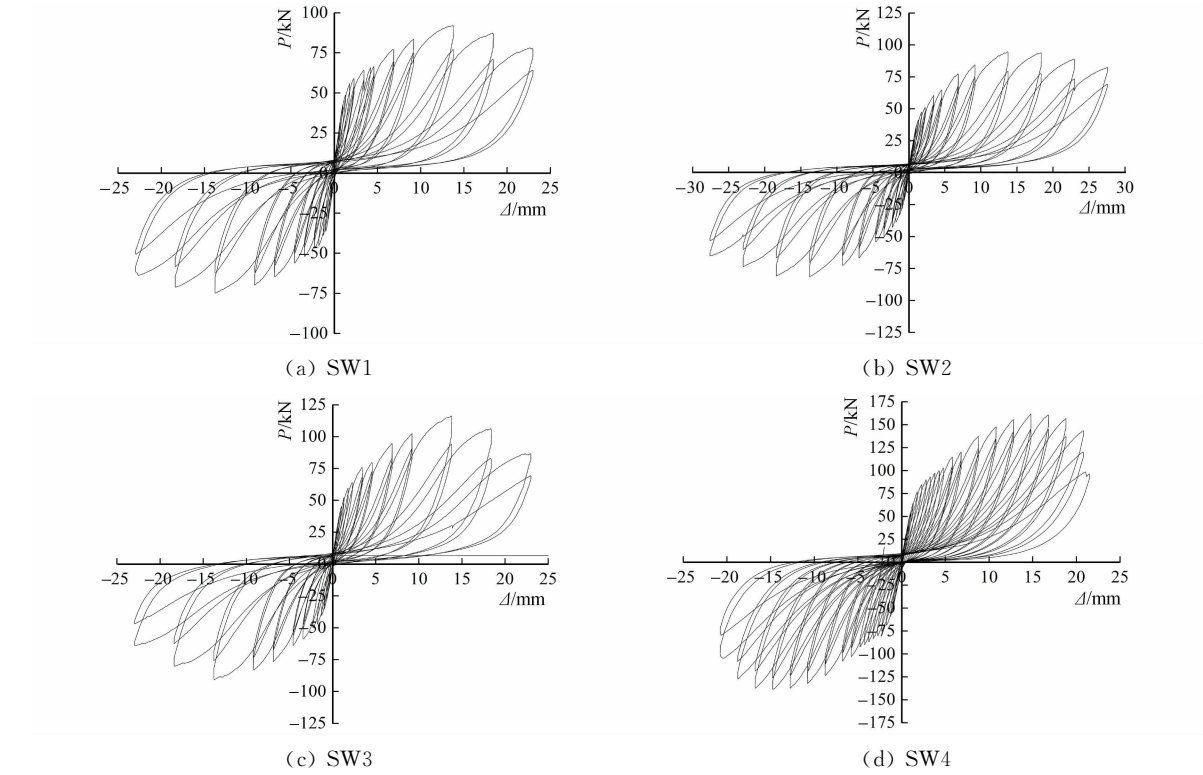
Tab.3 Test results of specimens

试件名称	开裂点		屈服点		极限荷载点		极限位移点	
	$P_c/\text{kN}$	$\Delta_c/\text{mm}$	$P_y/\text{kN}$	$\Delta_y/\text{mm}$	$P_u/\text{kN}$	$\Delta_u/\text{mm}$	$P_m/\text{kN}$	$\Delta_m/\text{mm}$
SW1	37.55	1.29	66.41	4.55	92.34	13.73	78.49	22.93
SW2	52.93	1.79	77.63	6.92	94.65	13.65	80.45	28.99
SW3	53.45	1.79	94.66	6.97	116.21	13.80	98.78	22.66
SW4	72.49	1.76	120.31	7.53	150.27	14.79	127.72	20.44
SW5	94.18	1.74	131.12	5.45	162.54	14.80	136.16	22.16
SW6	72.58	1.26	137.15	6.72	162.91	13.84	138.47	21.12

2 试验结果分析

2.1 试件滞回特性

通过对 6 片带门窗洞口复合墙体试件进行试验,荷载-位移滞回曲线,如图 2 所示.



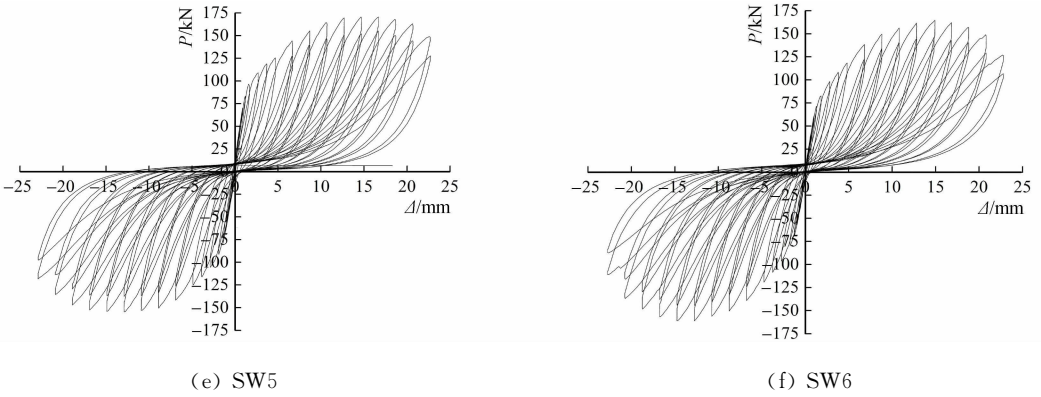


图 2 各试件荷载-位移滞回曲线

Fig. 2 Load-displacement hysteretic loops of specimens

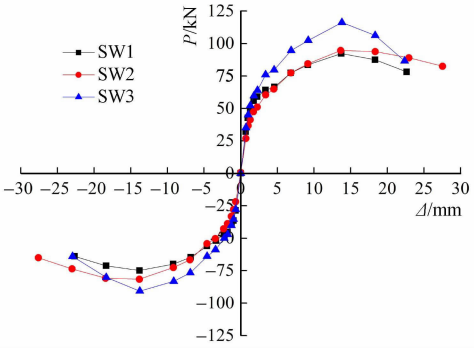
由图 2 可知:开裂前,加载、卸载曲线基本重合,以弹性变形为主,荷载-位移曲线呈线性发展;开裂后,滞回曲线出现较明显的拐点,试件刚度有所下降,但相对缓慢.随着荷载增加,曲线出现明显屈服点和下降段,“捏拢”及刚度退化现象明显,滞回曲线呈现反 S 形,表现出更多剪切变形和滑移变形,但总体延性提高,塑性增强,滞回面积较大,曲线图形虽靠近位移轴,仍表现出一定的耗能能力.

2.2 试件骨架曲线确定

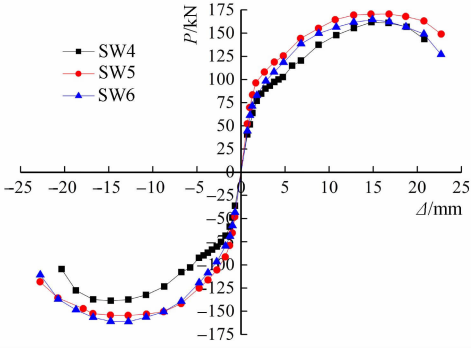
通过 6 片带门窗洞口节能砌块隐形密框复合墙体试件的试验结果,得到不同配筋及不同开洞形式下的 5 组骨架曲线,如图 3 所示.

由图 3 (a),(b)可知:随着肋柱配筋率的增加,试件承载力、刚度的提高效果显著,耗能效果较佳. SW2 开裂荷载比 SW1 提高最多达 41%,SW3 屈服荷载比 SW2 提高最多达 22%,SW3 极限荷载比 SW2 提高最多达 23%,SW5 初始刚度比 SW4 提高最多达 31.4%. 同时,相对于相同开洞形式的其他试件,SW3 与 SW2,SW6 与 SW5 的肋柱配筋率相差不大,但极限位移差别较大.随着肋梁配筋率的较大提高,对复合墙体的约束作用增强,试件的极限位移变形(即总变形)分别减小 22%和 5%,后期下降的强度、刚度变化加剧,反 S 形的滞回曲线图形更加明显,即肋梁配筋率对于试件后期横向滑移变形的约束效果明显.因此,提高肋梁肋柱的配筋率在一定程度上有利于改善复合墙体抗震性能,提高其承载力、刚度及延性耗能水平.

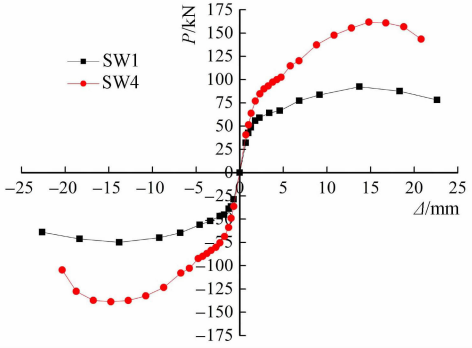
由图 3 (c)~(e)可知:在相同配筋情况下,不同开洞形式复合墙体的抗震性能明显不同.结合表 3 的试验结果分析对比可知:SW1~SW3 平均初始刚度为  $29.51 \text{ kN} \cdot \text{mm}^{-1}$ ; SW4~SW6 平均初始刚度为  $50.97 \text{ kN} \cdot \text{mm}^{-1}$ .而图 3(c)~(e)也正确地反映了偏开门洞复合墙体初始刚度、强度较大,但极限位移比正开窗洞复合墙体小的特点.同时,与文献[2]中 3 片同类型的不开洞完整墙体相比,文中试件偏开门洞复



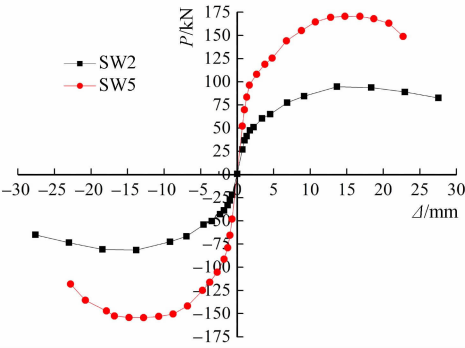
(a) 不同配筋正开窗



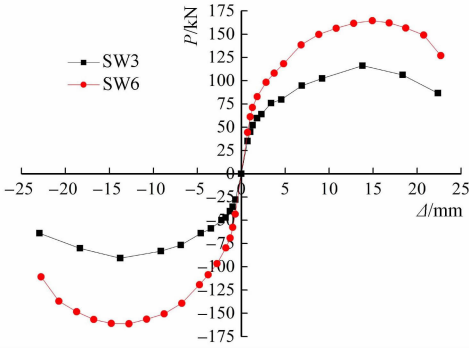
(b) 不同配筋偏开门



(c) 同配筋不同开洞形式



(d) 同配筋不同开洞形式



(e) 同配筋不同开洞形式

图 3 不同复合墙体的骨架曲线

Fig. 3 Comparison of skeleton curves of specimens

合墙体 SW4~SW6 的极限承载力分别相对削弱了约 28%,36%,40%,对应平均初始刚度相对削弱了约 31%。这表明开洞将大大削弱复合墙体的承载力及刚度,抗震性能减弱。不同开洞形式体现在位置和尺寸,理论上试件洞口越大、越远离中性轴,对抗弯刚度的削弱越大,抗震性能越差。

由图 2,图 3 (c)~(e)可知:远离中和轴的偏开门洞 SW4~SW6 滞回曲线相对较饱满,循环次数较多,耗能性能较好,而 SW1~SW3 却表现出更多的滑移变形,曲线与位移轴更接近,后期下降段强度变化较不明显,耗能相对较差的特点,故可以定性认为是由于正开窗洞口尺寸比门洞大的结果,其对于复合墙体抗震性能的削弱更大。

文中通过墙洞比系数  $\alpha_1$  考虑开洞形式尺寸的影响(门洞的  $\alpha_1$  系数较小)。由文献[2]及 SW1~SW6 这 3 类不同开洞形式墙体可知:随着肋梁肋柱配筋的增加,有无开洞及墙洞比系数的减小(即墙体越完整),复合墙体的初始刚度相应提高。综上所述,不同开洞形式和肋梁肋柱配筋对墙体抗震性能有较大影响,尤其对复合墙体初始刚度的削弱影响显著。

2.3 刚度的确定及刚度退化特征

针对开洞复合墙体试验研究结果的荷载-位移变化特点,提出下降段的 4 折线型简化等效骨架曲线模型,并定义试件的开裂点 A、屈服点 B、极限荷载点 C、极限位移点 D,即 OA 段处于弹性阶段,AB 段和 BC 段处于强化段,CD 段未软化段,模型如图 4 所示。图 4 所示的开洞复合墙体的骨架曲线模型各阶段刚度均采用割线刚度,即各特征点间的连线刚度, $K=\Delta P/\Delta U$ 。其中: $\Delta P$  为相邻两特征点各自荷载平均值之差; $\Delta U$  为相邻两特征点各自位移平均值之差。由此得到弹性段刚度  $K_1$ ,强化段刚度  $K_2$  和  $K_3$ ,以及软化段刚度  $K_4$ 。

为得到开洞复合墙体的初始理论刚度  $K_0$ ,可假定其为悬臂板,且弹性阶段刚度为总变形的一阶倒数  $1/\delta$ ,其中, $\delta$  包含弯曲变形  $h^3/(3EI)$  及剪切变形  $\mu h/(GA)$ 。结合试验结果及分析,考虑到开洞形式及配筋等对初始刚度的影响,文中提出修正的初始刚度理论计算式为

$$K_0 = \frac{\alpha(1-\alpha_1)^{1/\alpha_1}(1+\rho_1)(1+100\rho_2)}{\frac{h^3}{3EI} + \frac{\mu h}{GA}} \tag{1}$$

式(1)中: $\alpha$  为修正系数,综合考虑除配筋、墙洞比外的其他如开洞位置等因素对初始刚度的影响程度,结合  $1/\delta$  与试验实测值  $K_1$  的对比分析结果, $\alpha$  取 0.68; $\alpha_1$  为墙洞比系数,指洞口截面面积与墙腹板截面面积的比值; $\rho_1, \rho_2$  分别是复合墙体横、纵向配筋率; $h$  为墙体高度; $I$  为试件全截面惯性矩; $\mu$  为剪应力分布不均匀系数,工字型截面  $\mu=A/A', A'$  为腹板毛截面面积,  $A'=Lt, t, L$  分别为腹板厚度和长度; $E$  为墙体弹性模量; $G$  为墙体剪切模量,  $G=0.4E$ 。

由式(1),计算各试件的初始刚度,如表 4 所示。由表 4 可知:各试件采用式(1)计算得到的理论初始刚度  $K_0$  与试验所得的实测线弹性段刚度  $K_1$  较接近,与试验结果较吻合,故该公式对于同类型的开洞

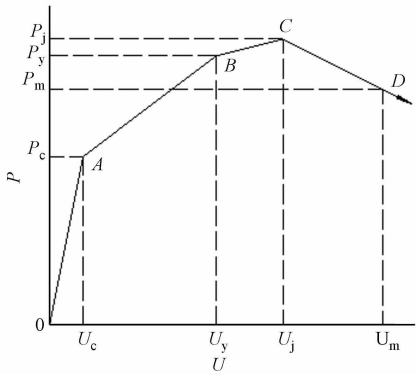


图 4 开洞复合墙体骨架曲线模型  
Fig. 4 Skeleton curves model  
of composite walls

复合墙体结构的理论初始刚度计算具有一定参考价值.

表 4 恢复力模型相关参数  
Tab. 4 Parameters of restoring force model

编号	$K_0/\text{kN}$	$K_1/\text{kN}$	$K_2/\text{kN}$	$K_3/\text{kN}$	$K_4/\text{kN}$	$K_1/K_0$	$K_2/K_0$	$K_3/K_0$	$K_4/K_0$	$P_c/P_u$	$P_y/P_u$	$P_m/P_u$
SW1	27.16	29.11	8.85	2.82	-1.51	1.07	0.33	0.10	-0.06	0.41	0.72	0.85
SW2	30.25	29.57	5.60	2.53	-0.93	0.98	0.19	0.08	-0.03	0.56	0.82	0.85
SW3	31.17	29.86	7.96	3.16	-1.97	0.96	0.26	0.10	-0.06	0.46	0.82	0.85
SW4	47.14	41.19	8.29	4.13	-3.99	0.87	0.18	0.09	-0.08	0.48	0.80	0.85
SW5	52.51	54.13	9.96	3.36	-3.58	1.03	0.19	0.06	-0.07	0.58	0.81	0.84
SW6	54.11	57.60	11.83	3.62	-3.36	1.06	0.22	0.07	-0.06	0.45	0.84	0.85
平均值						1.00	0.23	0.08	-0.06	0.49	0.80	0.85

根据试验荷载-位移数据,各开洞复合墙体试件的刚度退化特征曲线,如图 5 所示.由图 5 可知:各试件刚度随着加载过程中位移的增大而退化,初始刚度越大的试件刚度退化速率越快,且前期刚度退化较快,曲线较陡;后期刚度退化变化趋于平缓,即试件的变形越大,刚度退化速率越慢;而达到极限荷载后试件强度下降越加明显,刚度变为负数;当试件加载达到极限位移即破坏,完全丧失承载力.

2.4 试件的滞回规则

根据已有试验结果,可以确定开洞复合墙体的恢复力模型具有如下 2 点滞回规则.

1) 开洞复合墙体在低周往复荷载拟静力试验过程中,达到屈服荷载前,推、拉加载下的刚度均保持一致.达到开裂荷载前,试件加载路径与卸载路径基本重合,曲线基本呈现线性,可近似以线性关系表示该阶段,卸载刚度为  $K_1$ .达到开裂荷载而未达到屈服阶段,刚度有所衰减,加载路径与卸载路径不再完全重合,卸载路径仍近似取单线性,其变形可恢复,卸载到荷载 0 时,变形也基本为 0,卸载刚度为  $K_i$ (对应卸载点与原点连线刚度).

2) 当开洞复合墙体达到屈服荷载后,其刚度退化明显,随着推、拉加载位移的不断增大而逐渐减小,且随着加载循环次数的增加及加、卸载位移的增大,刚度退化速率加快.同时,随着位移的增大和加载循环次数的增加,卸载刚度的衰减更显著,用两折线表示卸载路径曲线更加合理,而重新加载曲线接近线性.具体的两折线卸载规则有如下 2 点:第一,卸载刚度取弹性段刚度  $K_1$ ,卸载到开裂荷载  $P_c$ ;第二,卸载刚度取  $K_i$ ,卸载到荷载 0,具体的滞回规则曲线,如图 6 所示.按 1-2-3-4-5-6-7-8-9-3-10-11...的顺序加、卸载循环.

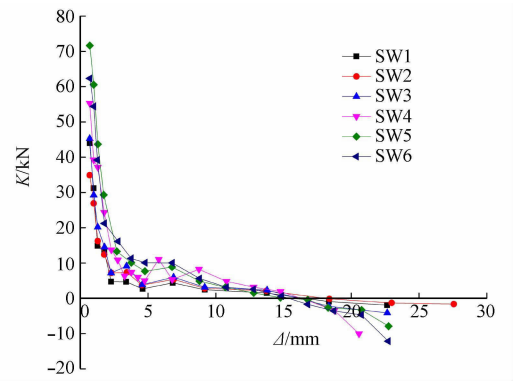


图 5 各试件刚度退化比较  
Fig. 5 Comparison of stiffness degradation

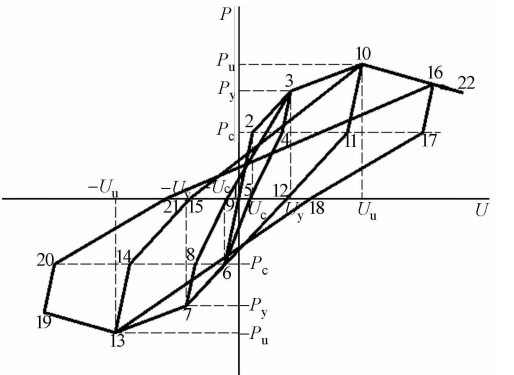


图 6 开洞密框复合墙体恢复力模型  
Fig. 6 Restoring force model of composite walls with holes and frame column

3 开洞复合墙体的恢复力模型

通过对 6 个开洞复合墙体试件试验结果、滞回曲线、骨架曲线及刚度退化现象等的分析研究,提出该结构的恢复力模型,即退化四线型.同时,根据表 4 关于恢复力模型,各阶段刚度、特征点强度、位移的计算公式分别为

$$K_1 = K_0, \quad K_2 = 0.23K_0, \quad K_3 = 0.08K_0, \quad K_4 = -0.06K_0 \tag{2}$$

$$P_c = 0.49P_u, \quad P_y = 0.80P_u, \quad P_m = 0.85P_u \tag{3}$$

$$\left. \begin{aligned} U_c &= P_c/K_1, & U_y &= (P_y - P_c)/K_2 + U_c, \\ U_u &= (P_u - P_y)/K_3 + U_y, & U_m &= (P_m - P_u)/K_4 + U_u. \end{aligned} \right\} \tag{4}$$

式(4)中:理论初始刚度  $K_0$  可以通过式(1)得到,而极限荷载  $P_u$  通过相应承载力公式可以求得.

对式(4)进行推广,得到加载到退化四线型上各阶段任意点的位移,即

$$\left. \begin{aligned} U_{c,i} &= P_{c,i} / K_1, & U_{y,i} &= (P_{y,i} - P_c) / K_2 + U_c, \\ U_{u,i} &= (P_{u,i} - P_y) / K_3 + U_y, & U_{m,i} &= (P_{m,i} - P_u) / K_4 + U_u, \end{aligned} \right\} \tag{5}$$

式(5)中: $U_{c,i}, U_{y,i}, U_{u,i}, U_{m,i}$  和  $P_{c,i}, P_{y,i}, P_{u,i}, P_{m,i}$  分别别是各阶段上任意点的位移和荷载,且  $P_{c,i}$  不大于  $P_c, P_{y,i}$  不大于  $P_y, P_{u,i}$  不大于  $P_u, P_{m,i}$  不大于  $P_m$ .

根据加载到任意点的荷载  $P_i$ 、位移  $U_i$ ,可得对应的卸载刚度  $K_i$ ,即

$$K_i = P_i / U_i. \tag{6}$$

开洞墙体恢复力模型的建立,对于指导同类结构进行非线性分析及抗震设计具有一定的参考价值.

4 结 论

- 1) 滞回曲线和骨架曲线均可以看出:开洞节能砌块隐形密框复合墙体仍具有一定的延性及耗能能力,适当增加横、纵向配筋有利于提高该类结构抗震性能,而且开洞会大大削弱其体性能,横、纵向钢筋配筋率,且开洞形式对试件刚度影响显著,而横向配筋对结构变形(尤其是滑移变形)的约束作用明显.
- 2) 开洞复合墙体初始刚度越大,刚度退化越快,且前期退化快,后期退化慢,达极限荷载后刚度变负,随着结构变形的增大,刚度退化速率减慢,但承载力降低不大,结构表现出一定的延性及抗震性能.
- 3) 提出的开洞复合墙体的理论初始刚度计算公式与试验计算结果较吻合,对同类结构的理论初始刚度确定有一定借鉴价值.同时,确定的带下降段的退化四折线型骨架曲线模型能反映试验过程中试件分阶段的刚度退化特点,对模拟同类型结构进行非线性有限元分析有一定的参考意义.
- 4) 针对开洞复合墙体的滞回曲“捏缩”现象明显的特点,提出适用于模拟该结构类型的滞回规则及恢复力模型的确定方法,开裂前以卸载刚度  $K_1$  单线型卸载,屈服前以卸载刚度  $K_i$  单线型卸载,达屈服荷载后的卸载段以两折线型表示,为工程设计和理论分析提供了一定参考.

参考文献:

[1] LI Shengcai, ZENG Zhixing. Research on an energy-saving block and invisible multi-ribbed frame structure[C]// Proceedings of the 3rd Specialty Conference on the Conceptual Approach To Structural Design. Singapore: [s. n.]. 2005:119-124.

[2] 董建曦. 节能砌块隐形密框结构墙板抗震性能研究[D]. 泉州: 华侨大学, 2008:14-90.

[3] 李宏男, 李兵. 钢筋混凝土剪力墙抗震恢复力模型及试验研究[J]. 建筑结构学报, 2004, 25(5): 35-42.

[4] 姚谦峰, 黄炜, 田洁, 等. 密肋复合墙体受力机理及抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2004, 25(6): 1-5.

[5] 李升才. 带框复合墙体恢复力模型研究[J]. 建筑结构学报, 2009(增刊 2): 74-79.

[6] 姚谦峰, 侯莉娜, 黄炜, 等. 不同填充材料生态节能复合墙体破坏模式研究[J]. 建筑结构学报, 2009(增刊 2): 7-12.

[7] 王凤来, 陈再现, 王煥定, 等. 底部框支配筋砌块短肢砌体剪力墙结构抗震性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2009, 42(11): 71-78.

[8] 张亮. 240 厚砌块整浇墙抗震性能试验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010:14-24.

[9] 李利刚. 低周往复荷载下 290 厚砌块整浇墙弯曲破坏模式试验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011:18-35.

[10] 郭猛, 姚谦峰, 袁泉, 等. 框架-密肋复合墙体抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2011, 32(3): 50-56.

[11] 郭猛, 袁泉, 常鹏, 等. 基于水平薄弱层破坏准则的密肋复合墙受剪承载力计算[J]. 建筑结构学报, 2012, 33(9): 148-153.

[12] 王凤来, 赵燕, 谢礼立. 配筋砌块砌体短肢剪力墙恢复力模型[J]. 建筑结构学报, 2014, 35(1): 103-110.

(责任编辑: 陈志贤 英文审校: 方德平)