

文章编号:1009-3087(2013)01-0044-05

低周反复水平力作用下加气混凝土填充墙的开裂试验研究

王甲春¹, 曾 骥¹, 张照华²

(1. 厦门理工学院 土木工程与建筑系, 福建 厦门 361024; 2. 集美大学 工程技术学院, 福建 厦门 361021)

摘 要: 为了提高加气混凝土填充墙体的抗震能力, 通过加气混凝土砌块的力学性能测试和加气混凝土填充墙体在低周反复水平力作用下的开裂试验, 分析了加气混凝土砌块的受力破坏特征及框架梁与加气混凝土之间的竖向连接钢筋对加气混凝土填充墙体的抗剪承载能力和变形能力的影响。结果表明: 加气混凝土砌块受压时的开裂荷载为破坏荷载的 80% 左右, 砌块开裂后还可以承受一定的压力, 延性较好, 受弯和受拉时加气混凝土砌块呈现出脆性破坏的特征; 在水平荷载作用下, 加气混凝土填充墙体与梁采用砂浆连接时, 砂浆层受剪破坏, 填充墙体沿水平灰缝开裂; 墙与梁竖向连接钢筋后, 钢筋与砂浆层共同作用, 可以明显提高加气混凝土填充墙体的屈服强度和延性, 竖向连接钢筋会使加气混凝土受拉开裂。

关键词: 加气混凝土; 填充墙; 框架结构; 水平荷载

中图分类号: TU522.3

文献标志码: A

Experimental Study on Cracking of Aerated Concrete Filling Wall Under the Low Cyclic Horizontal Force

WANG Jia-chun¹, ZENG Ji¹, ZHANG Zhao-hua²

(1. Dept. of Civil Eng., Xiamen Technol. Univ., Xiamen 361024, China; 2. School of Eng. Technol., Jimei Univ., Xiamen 361021, China)

Abstract: In order to improve the seismic capacity of the aerated concrete infill walls, the mechanical properties of aerated concrete block and low cyclic horizontal force experiment of aerated concrete infill walls were studied. The bearing capacity and deformation ability of aerated concrete filling wall were investigated through the vertical connection of steel bar between the frame beam and aerated concrete block. The results showed that the cracking load of the aerated concrete block is about 80% of its compression failure load, and the aerated concrete block can withstand a certain pressure and ductility after compression cracking. When the aerated concrete block is bended and tensile, its brittle fracture characteristic is showed. When aerated concrete infill walls and beams are connected by mortar, the mortar layer is failure by shear, filling the wall cracking along the horizontal mortar joint. When the filling walls and beams are connected with the vertical steel bar, the yield strength and ductility of the filling walls are obviously improved owing to steel bar and mortar, thus the aerated concrete is cracked by the bar pulling.

Key words: aerated concrete; filling wall; frame structure; horizontal load

近年来,随着混凝土框架结构的建筑不断增加,加气混凝土墙体作为节能墙体也被推广,并有不断增加的趋势。国内外地震震害表明,尽管填充墙体作为“非结构”构件,但参与承担了地震作用,在中等地震作用下,主体框架结构还没有破坏,填充墙已遭受严重破坏^[1]。填充墙的破坏不仅影响建筑的使用功能,增加修复费用,严重的甚至危及生命安全

或影响紧急疏散。填充墙与框架结构之间存在复杂的相互作用,填充墙对主体结构的梁、柱产生约束效应,填充墙的刚度效应是填充墙框架区别于空框架的主要特点之一^[2]。加气混凝土砌块作为新型的节能墙体材料,应用的范围越来越广泛,文献[3-4]研究了加气混凝土承重墙体的抗震性能。文献[5]研究加气混凝土砌块钢框架填充墙,给出了钢框架结构抗震弹性层间位移角的建议取值。文献[6]通过比例模型的静、动力试验认为,填充墙开裂对结构刚度的影响很大,而对结构承载能力的影响不大。为了改善加气混凝土墙体的抗震性能,文献[7-8]研究了 RC 加气混凝土组合墙体,文献[9-10]研究了密肋加气混凝土墙体的抗震性能和刚度

收稿日期:2012-06-20

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51108396);厦门市科技资助项目(3502Z20113033);福建省教育厅科技资助项目(JA12256;JA12202)

作者简介:王甲春(1972—),男,副教授,博士。研究方向:节能砌体材料及其力学性能。E-mail:jchwang@xmut.edu.cn

退化模型。

目前普通加气混凝土填充墙大量应用于框架结构中,加气混凝土填充墙体与梁之间仅靠砌筑砂浆或者斜砌填充,实现两者之间的紧密接触,这时填充墙与梁两者之间只有摩擦力,在地震作用时,楼板的荷载会作用在梁上,因此梁受到的外力比较集中,而墙体在自重作用下摆动,梁对填充墙几乎没有约束,填充墙容易倒塌。《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)^[1]中指出“填充墙长大于 5 m 时,墙顶与梁宜有拉结”。作者从加强梁与填充墙之间的联系入手,采用竖向连接钢筋的方法,分析竖向连接钢筋后加气混凝土填充墙体在低周循环水平力作用下的开裂规律和延性特征。

1 试验部分

1.1 原材料

矿渣硅酸盐水泥国道牌 PSA32.5,产地厦门,其化学组成、物理性能分别如表 1、2 所示。

表 1 矿渣硅酸盐水泥化学组成的重量百分比

Tab. 1 Chemical composition of slag Portland cement

%							
SiO ₂	CaO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	SO ₃	烧失量
22.80	64.04	2.82	5.05	2.75	0.35	2.90	4.89

表 2 矿渣硅酸盐水泥的物理性能

Tab. 2 Physical properties of slag Portland cement

初凝时间/ min	终凝时间/ min	安定性	28 d	
			抗压强度/MPa	抗折强度/MPa
100	275	合格	39.5	5.5

河砂是中砂,细度模数 3.0。砂浆强度标号 M5.0,实测强度 6.2 MPa。钢筋为二级钢 HRB335,直径为 12 mm。

加气混凝土砌块是厦门长青树建材有限公司生产的 A5.0,抗压强度 5.5 MPa,规格为 600 mm × 240 mm × 200 mm。钢筋混凝土梁混凝土的强度等级为 C30。

1.2 试件设计和制作

试验选取 1:2 比例的 3 片墙体,填充墙尺寸为 1 230 mm × 780 mm × 240 mm,梁尺寸为 1 400 mm × 300 mm × 250 mm,墙体 1 与梁砂浆连接。墙体 2 与梁砂浆连接,同时竖向连接钢筋,钢筋在梁内的长度为 100 mm,在墙内含砂浆层长度为 150 mm。墙体 3 与梁砂浆连接,同时竖向连接钢筋,钢筋在梁内长度 100 mm,在墙内含砂浆层长度为 255 mm。墙体试件尺寸和钢筋布置如图 1~3 所示。

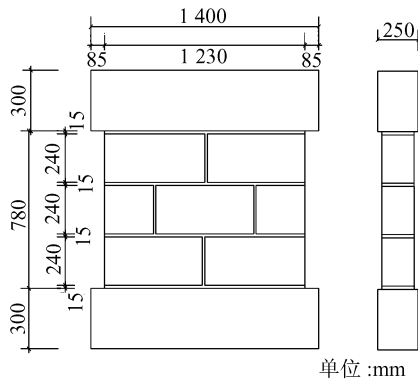


图 1 墙体 1 试件尺寸

Fig. 1 Size of wall 1

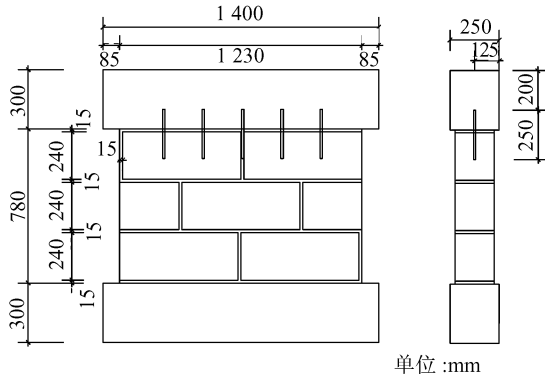


图 2 墙体 2 试件尺寸和钢筋布置

Fig. 2 Size and steel bar of wall 2

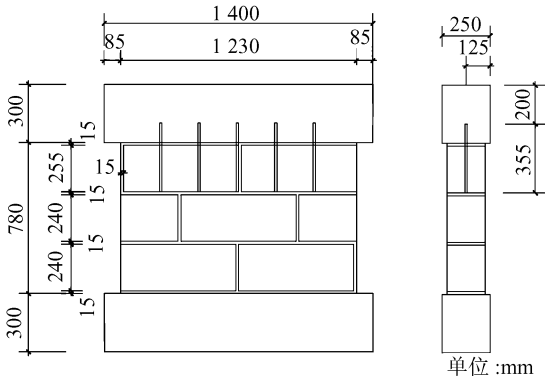


图 3 墙体 3 试件尺寸和钢筋布置

Fig. 3 Size and steel bar of wall 3

加载设备为杭州邦威机电有限公司生产的多通道电液伺服拟动力加载系统,力的作用点在梁端,水平加载 200 kN 作动器,垂直加载为 500 kN 作动器,试验力精度 ±0.5%,位移精度为 0.1 mm。

2 结果与分析

2.1 加气混凝土砌块的力学性能

加气混凝土砌块的抗压荷载、抗折荷载、劈裂抗拉荷载与位移的关系如图 4~6 所示。图 4 中砌块尺寸为 600 mm × 240 mm × 200 mm,受压面 600 mm × 200 mm,加载速率为 2 mm/min;图 5 中砌块尺寸

为 600 mm × 240 mm × 200 mm, 3 点抗折, 支座间距 400 mm, 受力截面高度 240 mm, 宽度 200 mm, 加载速率为 1 mm/min; 图 6 中砌块尺寸为 150 mm × 150 mm × 150 mm, 加载速率为 2 mm/min。

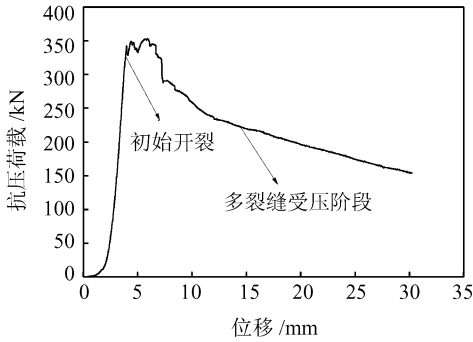


图4 加气混凝土砌块的抗压荷载与位移

Fig. 4 Compressive load and displacement of aerated concrete block

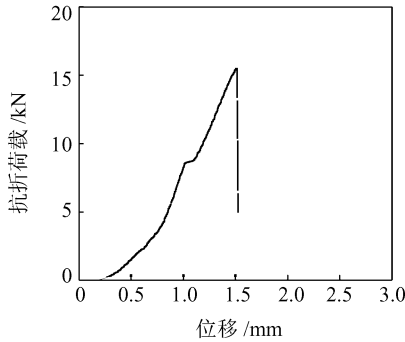


图5 加气混凝土砌块的抗折荷载与位移

Fig. 5 Bending load and displacement of aerated concrete block

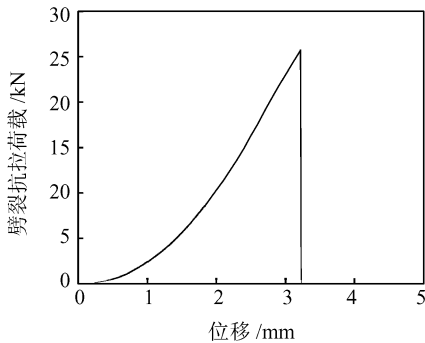


图6 加气混凝土砌块的劈裂抗拉荷载与位移

Fig. 6 Splitting load and displacement of aerated concrete block

加气混凝土砌块的强度值如表 3 所示, 抗折强度和抗拉强度明显低于抗压强度。

表 3 加气混凝土砌块强度

Tab. 3 Strength of aerated concrete block

抗压强度/MPa	抗拉强度/MPa	抗折强度/MPa
2.90	0.73	0.85

从图 4 可以看出, 在受压条件下, 初始开裂以后, 荷载值仍可以有一定的增加, 加气混凝土砌块的变形能力较大, 产生多条裂纹时, 仍然能够承担荷载, 这是由于加气混凝土属于多孔材料, 孔隙在压应力作用下不断扩展和闭合, 所以呈现出多裂纹破坏特征, 具有延性破坏的特征。从图 5 和 6 可以看出, 在抗折和劈裂条件下加气混凝土砌块的变形能力明显下降, 由于气孔不能承担弯曲应力和拉应力, 所以呈现脆性破坏。

2.2 加气混凝土墙体的开裂

试验时, 先在试验墙体上施加竖向的荷载 15 kN, 采用位移控制, 达到最大荷载值之后, 荷载峰值下降到最大荷载值的 0.85 左右时停止。

墙体 1 与梁之间是砂浆连接, 水平作用力作用在梁上, 梁与加气混凝土墙体之间产生摩擦力, 砌块层之间的砂浆层受剪切力, 当作用力超过弹性阶段后, 墙体中间出现了水平的裂缝。随着水平荷载的增加, 水平裂缝扩展和贯通, 荷载下降, 墙体 1 的墙趾部分形成贯通的水平裂缝, 墙体 1 试件受拉一侧墙趾部产生的弯曲拉应力大于预加轴向荷载产生的压力, 使试件受拉一侧截面受拉, 墙体 1 与底梁的砂浆层开裂, 墙体 1 直至破坏也没有产生新的裂缝。当墙体 2 和 3 这 2 片填充墙中竖向连接钢筋时, 填充墙体中钢筋受剪切和挤压作用, 通过钢筋的传力作用, 加气混凝土受拉应力作用, 由于加气混凝土的抗拉强度较低, 因此加气混凝土受拉开裂应为墙体的主要破坏原因。竖向连接钢筋均匀分布, 加气混凝土的受拉过程如图 7 所示, 加气混凝土内力最大的截面定为 1-1 截面, 其值定为 F_{\max} :

$$F_{\max} = \sigma_{\text{抗拉}} h(L - d) \quad (1)$$

式中: F_{\max} 为加气混凝土最大受拉荷载, N; $\sigma_{\text{抗拉}}$ 为加气混凝土的抗拉强度, N/mm²; h 为钢筋深度, mm; L 为加气混凝土墙体宽度, mm; d 为钢筋直径, mm。

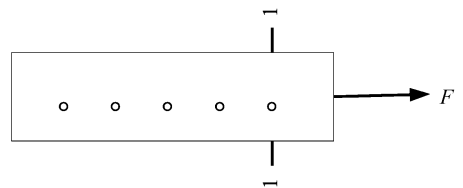


图7 加气混凝土墙体受力简图

Fig. 7 Force diagram of aerated concrete wall with steel bar

钢筋在钢筋混凝土梁中长度为 100 mm, 灰缝厚度 15 mm, 钢筋在加气混凝土砌块中的长度为 135

mm(可以根据加气混凝土的劈裂抗拉强度来进行计算),由于砂浆的强度与加气混凝土开裂破坏的极限荷载相近,砂浆的劈裂抗拉强度取值与加气混凝土相同。

实验中墙体 2 和 3 加气混凝土开裂的破坏极限荷载为 F_{2max} 、 F_{3max} ,可以得到:

$$F_{2max} = 0.73 \times 150 \times (200 - 12) \text{ N} = 20.6 \text{ kN};$$

$$F_{3max} = 0.73 \times 255 \times (200 - 12) \text{ N} = 35.0 \text{ kN}.$$

在水平作用循环力作用下,当钢筋传递的水平力达到加气混凝土的破坏极限值时,墙外侧钢筋位置处的加气混凝土开裂。

2.3 加气混凝土墙体的滞回曲线

滞回曲线(图 8)综合反映了试件在竖向荷载和水平往复荷载作用下,墙体的抗侧移承载力的退化情况。

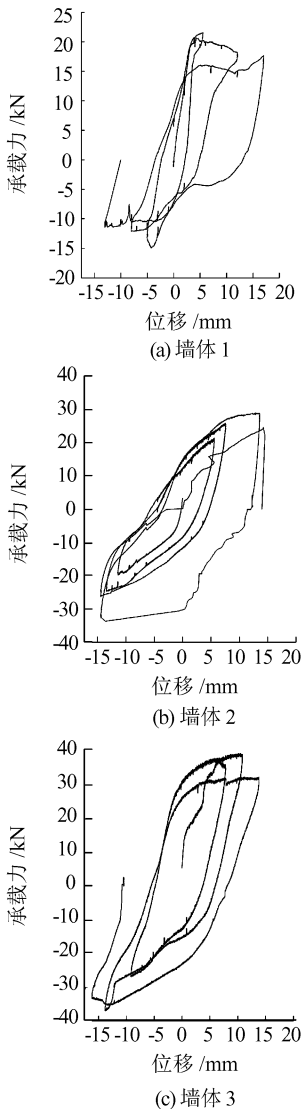


图 8 墙体滞回曲线

Fig. 8 Hysteretic curves of walls

从图 8(a)可以看出,墙体出现水平裂缝前,侧向位移较小,滞回曲线的残余应变较小,滞回环较为狭长、面积小,墙体处于弹性工作。当墙体出现水平裂缝之后,水平位移突然增大,荷载明显下降。从图 8(b)可以看出,墙与梁增加了竖向连接钢筋后,钢筋和砂浆层共同抵抗水平力的作用。通过计算可知,连接钢筋一般不会出现受剪破坏,墙体中的加气混凝土开裂后,荷载值会明显下降。

图 8(c)与(b)相比可以看出,竖向钢筋在加气混凝土墙体中的长度增加后,墙体的荷载峰值明显增加。从图 8 的滞回曲线可以看出,竖向连接钢筋后填充墙体与梁之间的传力模式明显改变,梁与砌筑砂浆层的摩擦力和钢筋传力的共同作用,使得加气混凝土的受拉破坏与砂浆层之间的剪切破坏同时出现。在实验中发现,加气混凝土受拉出现裂缝后,砂浆层的水平贯通缝也出现(见图 9),同时没有竖向钢筋的加气混凝土层出现剪切裂缝。墙体 2 的极限承载力为 27.0 kN,墙体 3 的极限承载力为 38.0 kN,两者都大于加气混凝土开裂的极限拉力值,这是由于梁与墙之间砂浆层的摩擦力抵抗了部分水平作用力。



图 9 墙体 3 裂缝分布

Fig. 9 Cracking distribution of wall 3

根据文献[12]的计算方法,计算所得骨架曲线如图 10 所示,墙体的延性系数如表 4 所示。

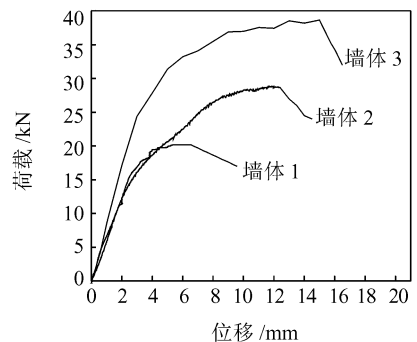


图 10 墙体骨架曲线

Fig. 10 Skeleton curves of walls

表4 墙体的延性系数

Tab.4 Coefficient of ductility of walls

	屈服荷载/ kN	屈服位移/ mm	极限位移/ mm	延性 系数
墙体1	17.5	3.0	9.0	3.0
墙体2	20.0	4.0	14.0	3.5
墙体3	25.0	4.0	16.0	4.0

从图10、表4可以看出,梁与填充墙竖向连接钢筋后,墙体的屈服强度、承载能力和延性系数都有明显的增加。竖向钢筋长度的增加,有利于增加墙体的屈服荷载。

3 结论

通过研究加气混凝土砌块的力学性能以及填充墙体与梁竖向连接钢筋后在水平往复力作用下的开裂规律,可以发现:加气混凝土砌块受压状态下呈现延性破坏的特征;抗折和劈裂抗拉状态下呈现脆性破坏。填充墙与梁砂浆连接时在水平作用力下,呈现出水平灰缝开裂,当竖向连接钢筋后,填充墙体的屈服荷载和承载能力都有明显的增加。钢筋的作用使加气混凝土受拉和砂浆层受剪同时存在,加气混凝土砌块受拉开裂,梁与墙之间形成水平贯穿裂缝,没有钢筋的加气混凝土层受剪开裂。当竖向连接钢筋的长度增加时,填充墙体的延性和承载能力也会增加。

参考文献:

- [1] Guo Zixiong, Wu Yibin, Huang Qunxian. Research and development in seismic behavior of infilled-frame structures [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2008, 28(6): 172 - 177. [郭子雄, 吴毅彬, 黄群贤. 砌体填充墙框架结构抗震性能研究现状与展望[J]. 地震工程与工程震动, 2008, 28(6): 172 - 177.]
- [2] Ghassan A C, Mohsen L, Steve S. Behavior of masonry infilled nonductile reinforced concrete frames [J]. ACI Structure Journal, 2002, 136(4): 347 - 356.
- [3] Zhao Quanbin, Yu Jinghai. Experimental study on anti-seismic performance of load-bearing masonry work of restraint autoclaved aerated concrete block [J]. New Building Materials, 2008(5): 35 - 37. [赵全斌, 于敬海. 约束加气混凝土承重砌体抗震性能的试验研究[J]. 新型建筑材料, 2008(5): 35 - 37.]
- [4] Zhao Chengwen, Zhang Liang, Gao Lianyu, et al. Experimental study on seismic performance of autoclaved aerated con-

crete block bearing walls [J]. Journal of Shenyang Jianzhu University, 2009, 25(3): 426 - 432. [赵成文, 张亮, 高连玉, 等. A类蒸压加气混凝土砌块墙体抗震性能试验[J]. 沈阳建筑大学学报, 2009, 25(3): 426 - 432.]

- [5] Liu Yushu, Li Guoqiang. Experimental and theoretical research on lateral load resistance of steel frames with infilled walls [J]. Journal of Building Structures, 2005, 26(3): 78 - 85. [刘玉姝, 李国强. 带填充墙钢框架结构抗侧力性能试验及理论研究[J]. 建筑结构学报, 2005, 26(3): 78 - 85.]
- [6] Henderson R C, Fricke K E, Jones W D, et al. Summary of a large and small scale unreinforced masonry infill test program [J]. Journal of Structural Engineering, 2003, 129(12): 1667 - 1675.
- [7] Liu Pei, Yuan Quan, Guo Meng, et al. Seismic performance of composite walls of RC autoclaved aerated concrete blocks [J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2012, 43(3): 1107 - 1113. [刘佩, 袁泉, 郭猛, 等. RC加气混凝土砌块组合墙的抗震性能[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2012, 43(3): 1107 - 1113.]
- [8] Guo Meng, Yuan Quan, Li Pengfei, et al. Seismic performance experimental research for multi-ribbed composite wall strengthened with aerated concrete blocks [J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2011, 43(1): 51 - 57. [郭猛, 袁泉, 李鹏飞, 等. 加气混凝土砌块置换加固受损密肋复合墙抗震性能试验研究[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2011, 43(1): 51 - 57.]
- [9] Shedid M, Drysdale R G, El-Dakhkhni W. Behavior of fully grouted reinforced concrete masonry shear walls failing in flexure; Experimental results [J]. Journal of Structural Engineering, 2008, 134(11): 1754 - 1767.
- [10] Li Shengcai, Dong Jianxi, Li Lifeng. Experimental hysteretic behavior of in-plane loaded reinforced grouted multi-ribbed aerated concrete blocks masonry walls [J]. Structural Engineering and Mechanics, 2012, 41(1): 95 - 112.
- [11] 中国建筑科学研究院. GB50011—2010 建筑抗震设计规范 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [12] Shedid M, Drysdale R G, El-Dakhkhni W. Behavior of fully grouted reinforced concrete masonry shear walls failing in flexure analysis [J]. Engineering Structures, 2009, 31(9): 2032 - 2044.