

砌块整浇墙骨架曲线影响因素分析

赵 艳^{1,2}, 王凤来¹, 张 厚³, 丁向奎¹, 李利刚¹

(1. 哈尔滨工业大学 土木工程学院, 150090 哈尔滨; 2. 佳木斯大学 建筑工程学院, 154007 黑龙江 佳木斯;
3 黑龙江省建设集团有限公司, 150046 哈尔滨)

摘 要: 为确定 290 mm 厚砌块整浇墙在不同破坏模式下的抗剪性能和变形能力, 完成了 10 片足尺 290 mm 厚全灌芯配筋砌块砌体剪力墙低周往复荷载试验. 试验中采用 1 000 kN 千斤顶施加竖向力, 630 kN 液压伺服水平作动器施加水平力, 研究墙体在压弯剪共同作用下的抗震性能. 利用试验记录提出的骨架曲线, 研究了竖向压应力、水平配筋、竖向配筋等参数对该种墙体骨架曲线的影响. 试验结果表明: 在一定范围内, 随着竖向压应力提高, 墙体受剪承载力和变形能力都有提高; 水平配筋对墙体抗剪性能的影响与墙体破坏模式有关, 当墙体发生剪切破坏时具有较高水平配筋率的墙体抗剪能力较高但延性较差, 而墙体发生弯曲破坏时延性却较好; 竖向配筋对墙体抗剪承载力影响显著, 对墙体延性的影响与所受竖向压应力大小有关.

关键词: 配筋砌块砌体; 砌块整浇墙; 骨架曲线; 低周往复试验; 足尺试验

中图分类号: TU365 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2013)08-0016-07

Analysis of influencing factors on the skeleton curve for fully grouted reinforced concrete masonry shear walls

ZHAO Yan^{1,2}, WANG Fenglai¹, ZHANG Hou³, DING Xiangkui¹, LI Ligang¹

(1. School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, 150090 Harbin, China; 2. College of Architecture and Civil Engineering, Jiamusi University, 154007 Jiamusi, Heilongjiang, China; 3. Heilongjiang Province Construction Group Co., LTD, 150046 Harbin, China)

Abstract: To determine the shear-resistance performance and deformability of 290 mm-width fully grouted reinforced concrete masonry (FGRM) shear walls under different failure modes, ten full-scale walls were tested firstly under low cyclic reversed lateral loads simulated by a 1 000 kN jack providing constant axial load and a 630 kN servo controlled hydraulic actuator producing low cyclic reversed lateral loads. The seismic performance of walls bearing compress, shear and flexure is studied. Meanwhile, the skeleton curves of FGRM shear walls based on the data recorded in the tests are investigated considering different factors including the axial compressive stress, the horizontal reinforcement, the vertical reinforcement, et al. It is demonstrated that, firstly, both the shear and deformation capacity can be improved as the axial compressive stress increases within a certain range. Secondly, the impact of horizontal reinforcement on the shear-resistant performance of walls is related to failure modes of the wall. Compared with the flexural failure mode, a much higher shear capacity but a worse ductility is derived in a shear failure mode when the walls are confirmed with higher horizontal reinforcement. Finally, the wall shear capacity is influenced significantly by the vertical reinforcement whose effects on ductility are associated with the applied axial stress.

Key words: reinforced block masonry; fully grouted reinforced concrete masonry shear walls; the skeleton curves; low cyclic reversed test; full-scale test

收稿日期: 2012-12-07.

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2011BAE14B05-03); 住房和城乡建设部研究开发项目(2010-k2-1); 黑龙江省建设集团有限公司联合科研项目(MH20100436).

作者简介: 赵 艳(1976—), 女, 博士研究生, 副教授;
王凤来(1971—), 男, 教授, 博士生导师.

通信作者: 王凤来, wflai@sina.com.

砌块整浇墙是在配筋砌块砌体剪力墙基础上提出的一种新型结构形式, 其主要特征是采用预制的孔洞率不低于 45% 的混凝土空心砌块, 在保

证对孔率不低于 90% 的前提下经砂浆砌筑而成的墙体. 该种墙体在水平和竖直方向均配置钢筋, 孔洞内全部采用专用的混凝土 100% 灌实, 其完整定义在文献[1]中有详细阐述.

砌块整浇墙的抗剪能力来源于几种机制, 如水平钢筋的拉力、竖向钢筋的销栓作用、施加的竖向压应力以及骨料间的咬合作用. 一些研究者^[2-4]认为墙体的抗剪能力并不是直接与水平配筋量成比例, 还受其他因素的影响. 若干试验^[5-7]研究表明, 以剪切破坏为主的墙体比以弯曲破坏为主的墙体更脆, 当承载力达到最大值后强度迅速衰减, 水平钢筋可有效防止墙体对角裂缝开展, 从而随着水平钢筋数量的增多可提高墙体延性, 但在文献[8-9]试验中, 墙体表现出的性质却与此不完全相同. 此种结构是由砌块、砂浆、钢筋和混凝土共同组成的混合体, 各种材料之间的作用机理非常复杂, 剪切开裂机制尚不清楚. 目前, 仍没有有效的分析方法和合理的设计标准来预估和防止发生脆性剪切破坏, 没有合理的公式能准确表示此种墙体的受剪承载力. 现阶段研究者^[10-13]多集中于 190 mm 厚或非全灌芯配筋砌块砌体剪力墙的研究, 而 290 mm 厚的砌块整浇墙还未涉及, 但随着此种结构体系大量应用于高层建筑, 此种块型的墙体应用越来越多, 而两种块型存在一定差别, 尤其是在孔洞率方面, 190 mm 厚砌块孔洞率约为 45% ~ 47%, 290 mm 厚砌块约为 53% ~ 56%, 二者的力学性能、变形能力等方面可能存在一定差别.

2011 年哈尔滨工业大学做了 10 片足尺

290 mm 厚砌块整浇墙的低周往复荷载试验^[8-9], 用于研究各个参数对此种墙体的承载力、变形、耗能、延性等性能指标的影响, 本文主要从竖向压应力、水平钢筋数量和分布、竖向钢筋数量以及不同砌筑方式 4 个方面来研究砌块整浇墙受剪性能和变形能力, 为建立 290 厚砌块整浇墙受剪承载力公式做基础, 也为我国首栋高度达到 100 m (檐口标高 98.2 m) 的砌块整浇墙结构高层建筑提供设计依据.

1 试验设计及参数

本次试验共设计 10 片足尺砌块整浇墙, 墙片尺寸为 1 400 mm × 2 200 mm × 290 mm, 底梁和顶梁尺寸见图 1. 本次试验主要研究墙体平面内各种力学性能, 所以要有良好的侧向支撑装置以防止平面外侧倾, 实际加载装置见图 2. 墙体所用砌块强度等级采用 MU20, 砌块孔洞率为 53%, 其中标准砌块尺寸为 390 mm × 190 mm × 290 mm, 辅助砌块尺寸为 190 mm × 190 mm × 290 mm, 见图 3, 所有孔洞全部用 Cb20 的专用细石混凝土灌浆, 砌筑砂浆采用 Mb10 混合砂浆. 从试验中墙体破坏模式可知, 10 片墙体中有 4 片发生剪切破坏, 墙体编号为 J1 ~ J4; 6 片发生弯曲破坏, 墙体编号为 W1 ~ W6. 本次试验采用低周往复荷载加载方式研究墙体在压弯剪复合受力状态下的破坏状态, 由于试件刚度较大, 采用力 - 位移混合控制加载规则, 在弹性阶段用力控制方法施加水平荷载, 当试件开裂后, 刚度有所下降, 采用位移控制施加水平荷载.

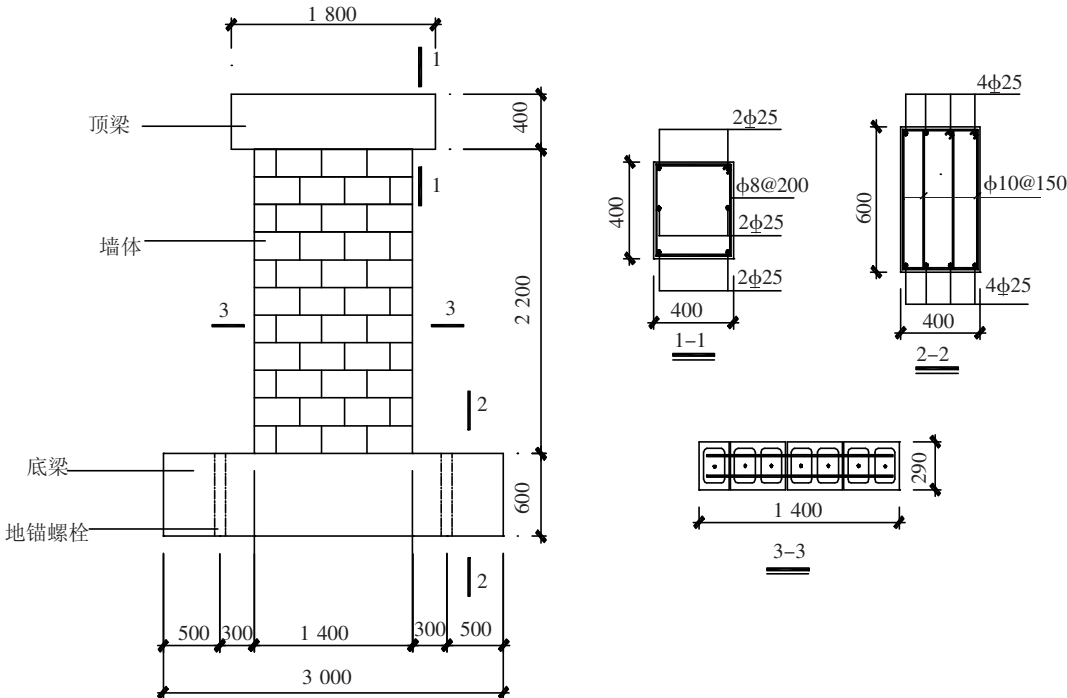


图 1 试验墙体尺寸 (mm)

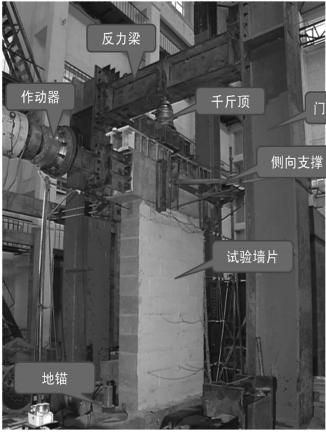


图 2 试验加载装置

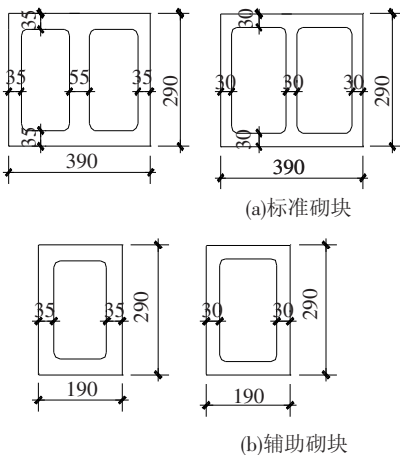


图 3 290 mm 厚混凝土标准砌块和辅助砌块尺寸

2 试验结果分析

通过 10 片砌块整浇墙低周往复荷载试验所得的滞回曲线提出墙体的骨架曲线,从竖向压应

力、水平配筋、竖向配筋以及不同砌筑方式 4 个方面详细分析各参数对此种墙体骨架曲线的影响,墙体具体参数见表 1.

表 1 试验墙体参数

试件编号	竖向压应力 σ / MPa	竖向配筋	竖向配筋率 $\rho_v / \%$	水平配筋	水平配筋率 $\rho_h / \%$
J1	1.5	6 Φ 25 + 1 Φ 16	0.775	2 Φ 8@200	0.174
J2	2.0	6 Φ 25 + 1 Φ 16	0.775	2 Φ 8@200	0.174
J3	2.0	6 Φ 25 + 1 Φ 16	0.775	2 Φ 10@400	0.135
J4	1.5	6 Φ 25 + 1 Φ 16	0.775	2 Φ 10@400	0.135
W1	1.5	6 Φ 14	0.230	2 Φ 12@200	0.390
W2	2.0	6 Φ 14	0.230	2 Φ 12@200	0.390
W3	1.5	6 Φ 16	0.300	2 Φ 12@200	0.390
W4	2.0	6 Φ 16	0.300	2 Φ 12@200	0.390
W5	2.0	6 Φ 14	0.230	2 Φ 12@200	0.390
W6	1.5	6 Φ 14	0.230	2 Φ 12@200	0.390

2.1 竖向压应力对墙体骨架曲线影响

2.1.1 墙体发生剪切破坏

试验中 J1 ~ J4 墙体发生剪切破坏,4 片墙体的竖向配筋完全相同,水平配筋和竖向压应力不同,

其目的是研究该种墙体在发生剪切破坏时竖向压应力和水平配筋对墙体骨架曲线的影响.墙体破坏形态见图 4,墙体中下部发生多条平行且几乎等间距的“×”形交叉斜裂缝,裂缝角度略大于 45°.



(a) J2



(b) J4

图 4 J2 和 J4 墙片破坏形态

图 5(a)的水平配筋率较高($\rho_h = 0.174\%$),当竖向压应力从 J1 的 1.5 MPa 增加到 J2 的 2.0 MPa 时,侧向承载力最大值从 406 kN 增长到 430 kN,提高了 6%,并且,J2 开裂后延性较好,可见,增大竖向压应力能有效提高墙体抗剪能力和变形能力,这可用剪摩强度理论来解释,压力提高则砌块与砂浆之间的摩擦力提高,从而增大了抗剪能力,而水平配筋配置较多时也可增大承载能力和变形能力.

图 5(b)的水平配筋率较低($\rho_h = 0.135\%$),

当竖向压应力从 J4 墙的 1.5 MPa 增加到 J3 墙的 2.0 MPa 时,侧向承载力最大值从 388 kN 增长到 426 kN,提高了 10%,这与 Voon 等^[3]的结论相符,这可用主拉应力强度理论来解释,侧向力必须超过由竖向力而产生的压力才能导致墙体产生裂缝,压力增大延缓了初裂缝的出现,从而提高了侧向承载力.但 J3 开裂后的延性并没有增加,因为水平配筋率较低时,钢筋屈服后墙体发生脆性破坏,从而导致变形能力较差.

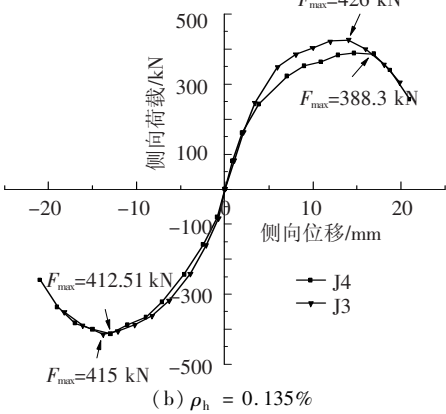
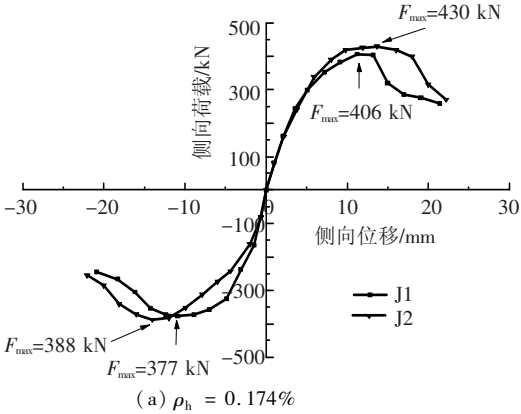


图 5 剪切破坏墙体荷载位移骨架曲线

从上述分析可知,竖向压应力对砌块整浇墙的骨架曲线有较大影响,当水平配筋率较低时,墙体容易发生脆性破坏,随着竖向压应力增大,墙体侧向承载力提高但延性降低;当水平配筋率较高时,随着竖向压应力增大,墙体侧向承载力和变形能力都相应提高.可见,我国《建筑抗震设计规范》规定混凝土砌块砌体抗震墙横向分布钢筋最小配筋率是合理的,但其值偏低.

2.1.2 墙体发生弯曲破坏

试验中 W1 ~ W6 墙体发生弯曲破坏,6 片墙体的水平配筋完全相同,竖向配筋和竖向压应力不同,其目的是研究此种墙体在发生弯曲破坏时竖向压应力、竖向配筋对墙体骨架曲线的影响.墙体在压弯剪共同作用下,呈现出纵向钢筋明显屈服、端部被压碎的破坏形态,见图 6.



(a) W1



(b) W4

图 6 W1 和 W4 墙片破坏形态

图 7(a)和(c)的竖向配筋率较小($\rho_v = 0.23\%$),当竖向压应力从 W1 的 1.5 MPa 增加到 W2 的 2.0 MPa 时,受剪承载力最大值从 359 kN 增长到 412 kN,提高了 15%,并且延性较好,与图 5 不同,其原因是,图 7 墙体的水平配筋较高,墙体发生弯曲破坏,可见,破坏模式的不同使竖向压

应力对其作用不同,竖向压应力对弯曲破坏墙体的影响更加显著,在承受较高压应力下墙体表现出更好的延性和更大的承载力.

图 7(b)的竖向配筋率较大($\rho_v = 0.30\%$),当竖向荷载从 1.5 MPa 增加到 2.0 MPa 时,受剪承载力最大值从 W3 墙的 358 kN 增长到 W4 墙

的 364 kN,提高了 2%,提高的幅度比较小,主要原因是由于 W4 安装时没有注意到墙体顶部的混凝土梁存在倾斜,导致墙体在竖向荷载作用下存

在一定程度的出平面弯矩,不能满足平面内均匀受压,从而导致墙体一面剪压破坏,另一面弯曲破坏,最终降低了墙体的受剪承载力和变形能力。

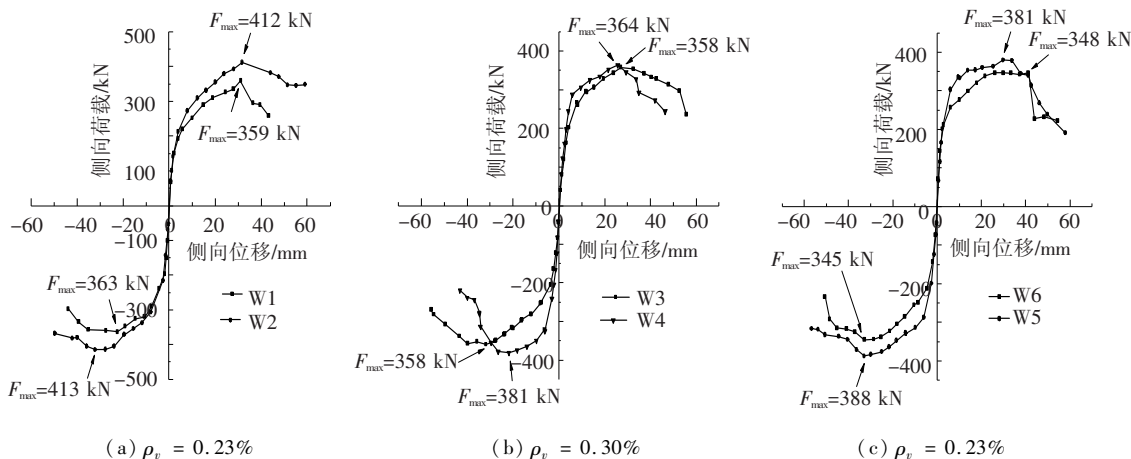


图7 弯曲破坏墙体荷载位移骨架曲线

2.2 水平配筋对墙体骨架曲线影响

分析在竖向压应力和竖向配筋相同时,水平配筋对墙体骨架曲线的影响.图8(a)墙体 J1、J4 的竖向压应力同为 1.5 MPa,竖向配筋率同为 0.775%,当水平配筋从 J4 墙的 2 ϕ 10@400 mm 增长到 J1 墙的 2 ϕ 8@200 mm 时,受剪承载力最大值在正向加载时从 388 kN 提高到 406 kN,提高了 5%,当反向加载时从 377 kN 提高到 412.5 kN,提高了 10%,可见,提高水平配筋率可提高墙体抗剪能力,但是,变形能力却没有提高,这与文献[3-4]的认识不同.在下降段 J1 承载力迅速衰减,试验结束后发现 J1 墙一侧端部的第三皮到第五皮之间的芯柱混凝土未灌实,从而影响了该侧

受拉钢筋的锚固,搭接钢筋错动引起承载力陡降,最终发生脆性破坏。

图8(b)墙体 J2、J3 竖向压应力同为 2.0 MPa,竖向配筋率同为 0.775%.在正向加载时受剪承载力比较接近,反向加载时差别较大,当水平钢筋从 J3 的 2 ϕ 10@400 mm 增长到 J2 的 2 ϕ 8@200 mm 时,受剪承载力最大值从 415 kN 降低到 388 kN,降低了 7%,与通常的认识不同,这是由于竖向荷载过大反而使水平钢筋没有被充分利用,墙体发生脆性破坏,从而导致承载力降低.在正向加载时,J2、J3 延性基本相近,反向加载时 J2 开裂后的变形能力比 J3 好,表现出水平配筋率高延性好的性质。

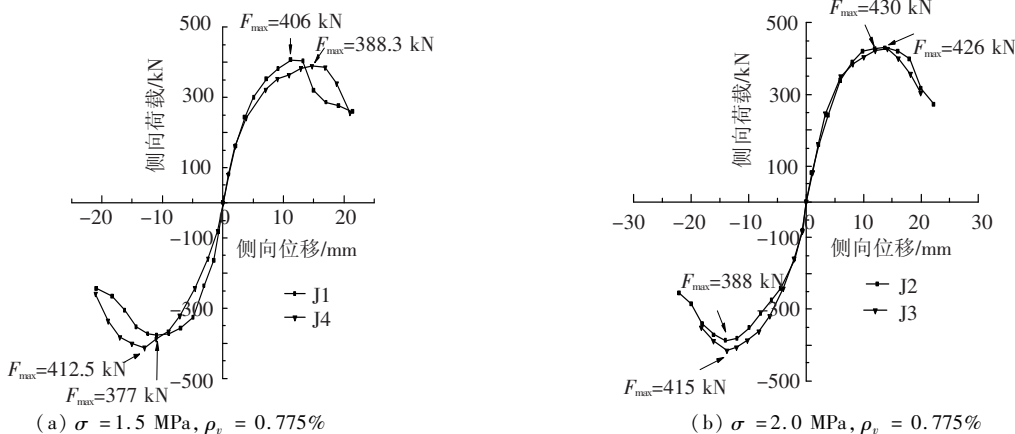


图8 不同水平配筋时荷载位移骨架曲线

2.3 竖向配筋对墙体骨架曲线影响

本节分析在竖向压应力和水平配筋相同时,竖向配筋对墙体骨架曲线的影响.图9(a)、(b)中,当竖向压应力为 1.5 MPa 时,竖向钢筋配置不同,墙体受剪承载力最大值比较相近,但延性相差较大,如 W3 墙体 ($\rho_v = 0.29\%$) 开裂后受剪承载

力降低速度比 W1、W6 ($\rho_v = 0.23\%$) 缓慢很多,延性更好,可见,竖向钢筋对墙体开裂后变形能力影响显著,提高竖向配筋率可提高墙体延性。

图9(c)、(d)中,当竖向压应力为 2.0 MPa 时,墙体受剪承载力从 W5 ($\rho_v = 0.23\%$) 的 412 kN 变化到 W4 ($\rho_v = 0.29\%$) 的 364 kN,降低

了 13%,且承载力衰减较快,说明高的竖向配筋并没有提高墙体受剪承载力和延性,而是起到了相反的作用,与图 9(a)、(b)表现出相反的特征,与图 8(b)相似。究其原因,在竖向压应力较高时,

如果竖向钢筋配置较多,钢筋没有达到屈服,使混凝土首先被压碎而导致脆性破坏,最终导致墙体受剪承载力和延性都降低,可见,我国《砌体结构设计规范》中限制竖向荷载的大小是合理的。

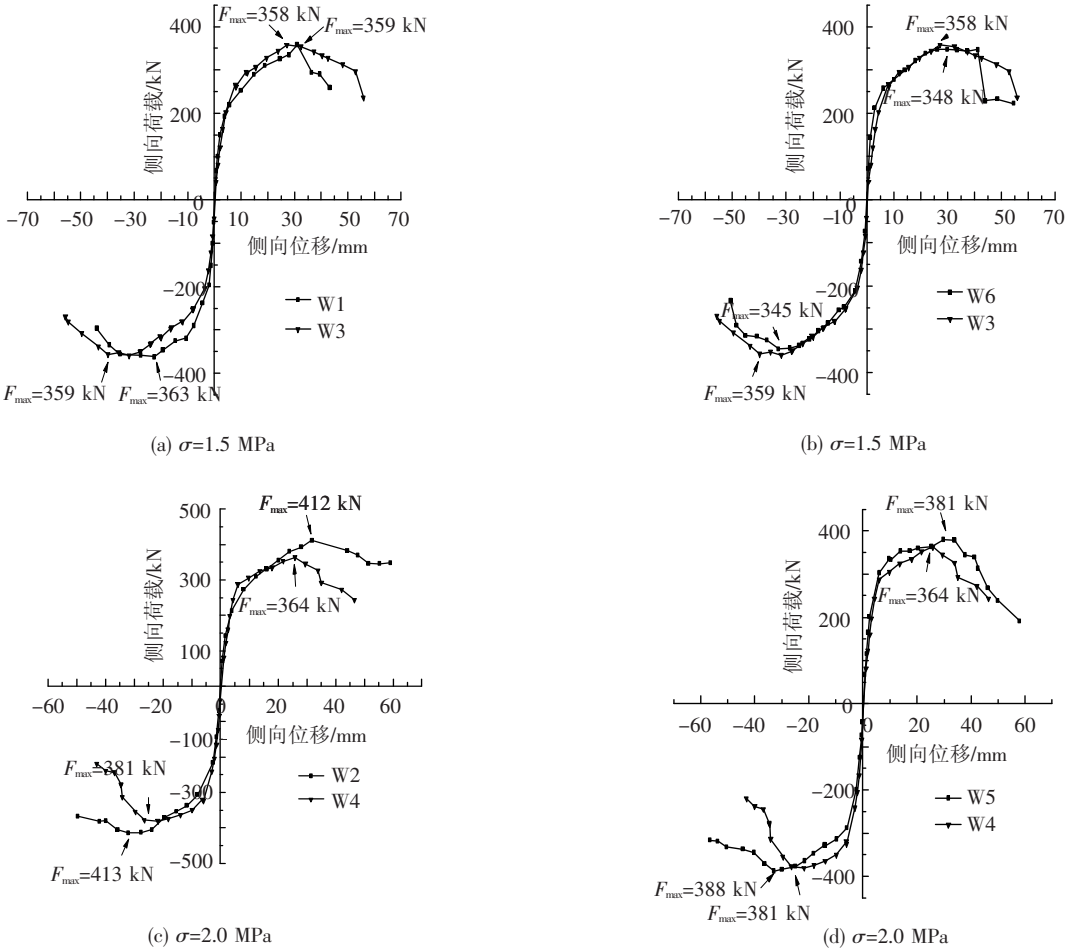


图 9 不同竖向配筋时荷载位移骨架曲线

2.4 砌筑方式对墙体骨架曲线影响

W1 和 W6、W2 和 W5 配筋方式和施加的竖向荷载完全相同,只是砌筑方式不同,W1、W2 墙体的最下一层端部用现浇混凝土代替砌块,而 W5、W6 全部都用砌块砌筑而成。图 10 对比砌筑方式不同对墙体骨架曲线的影响。图 10(a)墙体

竖向压应力为 1.5 MPa,图 10(b)是 2.0 MPa,两图的骨架曲线形状相似,尤其在反向加载时形状更加相似,只是图 10(b)在正向加载时有些差别,可见,砌筑方式不同对骨架曲线形状影响不大,可以忽略。

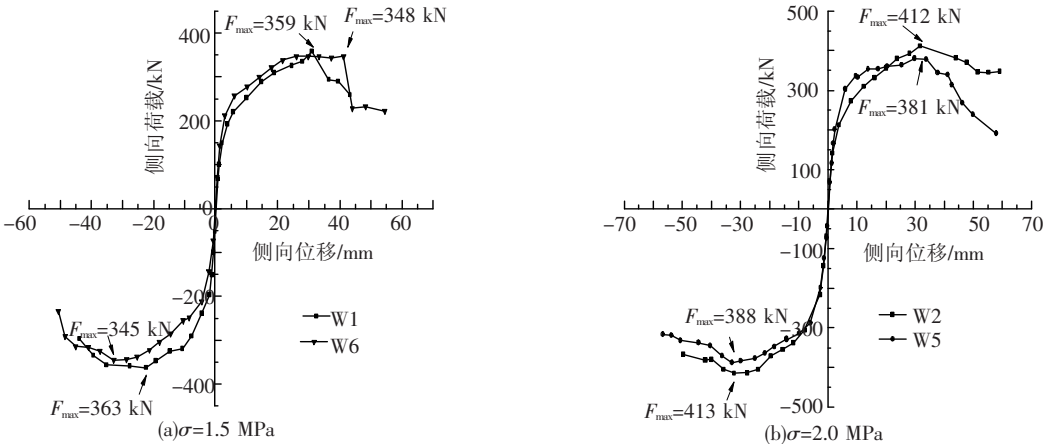


图 10 不同砌筑方式时荷载位移骨架曲线

3 结 论

1) 竖向压应力对砌块整浇墙平面内抗剪性能有很大影响, 随着竖向压应力增大, 墙体侧向承载力提高. 竖向压应力对墙体延性影响与水平配筋率有关, 当水平配筋率较低时, 竖向压应力增大, 延性降低; 当水平配筋率较高时, 延性提高.

2) 水平配筋率对墙体骨架曲线形状的影响与竖向压应力有关, 当竖向压应力较小时 (1.5 MPa), 随着水平配筋率提高, 墙体侧向承载力提高但变形能力降低; 当竖向压应力较大时 (2.0 MPa), 随着水平配筋率提高, 墙体侧向承载力降低但变形能力却有提高.

3) 竖向配筋对墙体受剪承载力和变形能力的影响与其所承受的竖向压应力有关, 当竖向压应力较小时 (1.5 MPa), 提高竖向配筋可以提高墙体抗剪能力和变形能力; 当竖向压应力较大时 (2.0 MPa), 却与之相反, 可见, 过多的竖向配筋不能充分发挥作用, 最终是砌块被压碎而导致墙体发生脆性破坏.

4) 砌筑方式不同对骨架曲线形状影响不大, 侧向承载力和变形能力都比较接近.

参考文献

- [1] 王凤来, 张厚, 唐岱新. 论我国墙用混凝土砌块产业发展的教训和砌块整浇墙技术[J]. 建筑砌块与砌块建筑, 2010, 6: 4-9.
- [2] SHING P B, SCHULLER M, HOSKERE V S. In-plane resistance of reinforced masonry shear walls[J]. Journal of Structural Engineering, 1990, 116(3): 619-640.

- [3] VOON K C, INGHAM J M. Experimental in-plane shear strength investigation of reinforced concrete masonry walls[J]. Journal of Structural Engineering, 2006, 132(3): 400-408.
- [4] VOON K C, INGHAM J M. Design expression for the in-plane shear strength of reinforced concrete masonry[J]. Journal of Structural Engineering, 2007, 133(5): 706-713.
- [5] MARWAN T S, ROBERT G D, WAEL W D. Behavior of fully grouted reinforced concrete masonry shear walls failing in flexure: experimental results[J]. Journal of Structural Engineering, 2008, 134(11): 1754-1767.
- [6] MARWAN T S, WAEL W D. Behavior of fully grouted reinforced concrete masonry shear walls failing in flexure: analysis[J]. Journal of Structural Engineering, 2009, 134(11): 2032-2044.
- [7] MARWAN T S, WAEL W D. Seismic performance parameters for reinforced concrete-block shear wall construction[J]. Journal of Structural Engineering, 2010, 24(1): 4-18.
- [8] 丁向奎. 低周往复荷载下 290 厚砌块整浇墙剪切破坏模式试验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
- [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.
- [10] 姜洪斌. 配筋混凝土砌块砌体高层结构抗震性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨建筑大学, 2000.
- [11] 杨伟军, 施楚贤. 配筋砌块砌体剪力墙抗剪承载力研究[J]. 建筑结构, 2001, 31(9): 25-27.
- [12] 吕伟荣. 砌体基本力学性能及高层配筋砌块砌体剪力墙抗震性能研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2007.
- [13] 王凤来, 许祥训. 配筋砌块短肢砌体剪力墙抗剪性能及承载力试验研究[J]. 建筑结构, 2009, 39(6): 98-101.

(编辑 赵丽莹)