

文章编号:1673-2049(2018)01-0051-08

低轴压比下自保温无砂浆配筋砌体剪力墙抗震性能

黄 靓¹, 王启明¹, 陈 伟², 王 路³

(1. 湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082; 2. 长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114;
3. 荣盛房地产发展股份有限公司, 湖南 长沙 410000)

摘要:提出了一种自保温无砂浆配筋砌块砌体剪力墙,解决了传统砌体剪力墙砌筑需要砂浆砌筑和需要做内墙或外墙保温层实现墙体保温的问题。通过3片不同轴压比试件的低周反复荷载试验,研究了不同轴压比下该墙体的抗震性能和破坏机理,以及轴压比对墙体的破坏形态、滞回曲线、承载力、延性、刚度、耗能性能的影响;根据试验现象及分析结果对墙体的施工和设计提出了建议。结果表明:墙体破坏形态与传统配筋砌体剪力墙基本相似,破坏区域主要集中在墙底4皮砌块范围内,墙体在破坏时能够保持较好的整体性;随轴压比增大,墙体承载力增大,破坏模式由弯曲破坏逐渐变为弯剪破坏;墙体承载力试验值与规范计算值吻合较好。

关键词:剪力墙;轴压比;抗震性能;自保温;无砂浆配筋砌体

中图分类号:TU365

文献标志码:A

Low Axial Compression Ratio on Seismic Behavior of Self-insulation Mortarless Reinforced Masonry Shear Walls

HUANG Liang¹, WANG Qi-ming¹, CHEN Wei², WANG Lu³

(1. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, Hunan, China; 2. School of Civil Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, Hunan, China;
3. Risesun Real Estate Development Co., Ltd., Changsha 410000, Hunan, China)

Abstract: The self-insulation mortarless reinforced masonry shear wall was proposed, and the problems of traditional masonry shear wall which needed mortar and needed to do internal or external insulation layer to make wall insulation were solved. Three specimens with different axial compression ratios were tested under quasi-static low cyclic loads to investigate the seismic behavior, failure mechanism, and the influences of axial compression ratio on failure modes, hysteretic curves, bearing capacity, ductility, stiffness and energy dissipation. According to the experimental phenomena and analysis results, the suggestions for construction and design of wall were given. The results show that the failure modes of specimens are similar to those of common masonry shear walls, and the damage area is mainly concentrated in the range of four leather building blocks. The walls are able to maintain good integrity when they are broken. The bearing capacity of walls increases with the increasing of axial compression ratio, and the failure mode turns from flexural failure to shear failure. The bearing capacity of test wall is in good agreement with the calculated values.

Key words: shear wall; axial compression ratio; seismic behavior; self-insulation; mortarless re-

收稿日期:2017-07-09

基金项目:国家自然科学基金项目(51378193, 51408063)

作者简介:黄 靓(1974-),男,湖南株洲人,副教授,博士研究生导师,工学博士,E-mail:huangliangstudy@126.com。

inforced masonry

0 引言

目前,传统的砌体结构砌筑时采用砂浆,其在实际使用中一直存在以下问题:采用砂浆砌筑施工工艺复杂;掉落的砂浆会降低砌体施工质量;墙体受施工环境影响较大;对养护的要求较高;砂浆砌筑所需的人工成本也明显提高并且加大了工程成本。国外 Nguyen 等^[1-2]对无砂浆砌体进行了研究。

经过多次地震,配筋砌块砌体剪力墙结构表现出了良好的抗震性能,并且改变了无配筋砌体强度低、延性差的缺点^[3]。与传统剪力墙相比,该类墙具有节约钢材、模板、工程造价的经济优势^[4],王凤来等^[5]研究了轴压比对配筋砌体剪力墙抗震性能的影响,高翔^[6]对复合节能墙体抗震性能进行了研究。Priesley 等^[7-10]对配筋砌块砌体剪力墙结构的试验和理论进行了研究。

传统外墙外保温系统存在保温材料强度低、耐久性差,并且保温系统需定期维护,节能投资成本较高,外装修材料容易脱落,使用寿命短等问题。外墙内保温系统也存在占用房屋套内使用面积、二次装修可能破坏保温效果等问题。

针对这些问题,本文提出了自保温无砂浆配筋砌块砌体剪力墙结构体系,该体系是将配筋砌体体系、无砂浆砌体体系与墙体自保温体系的优点进行结合。砌块集承重和保温于一体,把外墙保温层与砌块结合起来,在施工主体结构的同时完成外墙保温层施工,从而形成自保温无砂浆配筋砌块砌体剪力墙体系。该体系能够发挥无砂浆施工速度快的优势,同时实现墙体自保温等优点,随着装配式和工业化的发展,该体系具有广泛应用前景。

由于目前设计的自保温无砂浆配筋砌块砌体剪力墙结构主要应用于低烈度地震区中的中高层结构体系,将其应用于高层、高烈度地震区还有待进一步的研究,因此本文设计 3 片不同轴压比的自保温无砂浆配筋砌块砌体剪力墙进行抗震性能研究。

1 试验概况

1.1 材性试验

自保温无砂浆配筋砌块砌体剪力墙墙体灌孔时采用的混凝土抗压强度平均值为 33.72 MPa。试验所用钢筋的材料性能参数见表 1。

表 1 钢筋材料性能参数

Tab. 1 Material Property Parameters of Rebars

钢筋	屈服强度/MPa	极限强度/MPa	弹性模量/ 10^5 MPa
φ10	477.58	615.74	2.06
φ14	493.68	634.18	2.01

1.2 试件设计与制作

试验设计了 3 片墙体,其主砌块如图 1 所示,尺寸为 400 mm×270 mm×200 mm,试件的尺寸为 1 800 mm×1 200 mm,厚度为 270 mm,该砌块是经打磨的高精度砌块。剪跨比为 1.5,砌块强度等级为 MU15,灌孔混凝土强度等级为 Cb30,灌孔率为 100%,灌孔砌体强度为 13.9 MPa^[11],水平配筋为 2φ10@400,竖向配筋为 4 φ14,墙体具体参数如表 2 所示。



图 1 主砌块
Fig. 1 Main Block

表 2 试验墙体参数

Tab. 2 Parameters of Test Walls

试件编号	水平配筋率/%	竖向配筋率/%	竖向力/kN	压应力/MPa	轴压比
W-1	0.17	0.19	165	0.52	0.037
W-2	0.17	0.19	270	0.85	0.061
W-3	0.17	0.19	365	1.16	0.126

试件顶梁的宽度为 270 mm,地梁的宽度为 400 mm。自保温无砂浆配筋砌块砌体剪力墙主要由砌块、保温材料(聚苯乙烯泡沫板)、水平钢筋、竖向钢筋以及灌孔混凝土组成。试验墙体构造如图 2 所示。

试件制作步骤主要包括:①绑扎钢筋笼;②现浇钢筋混凝土地梁并养护;③放线,确定墙体位置;④进行砌块打磨,并严格控制砌块的精度;⑤在墙体砌筑同时对墙体垂直度和平整度进行监测;⑥墙体进行灌孔,并且每孔振捣并检查灌浆质量;⑦试件养

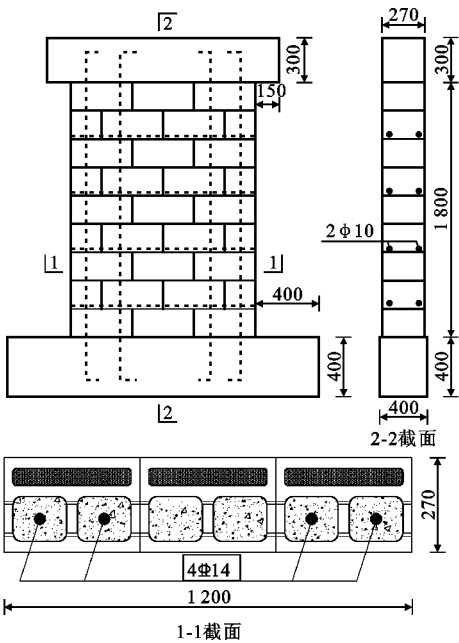


图 2 墙体尺寸和形状(单位:mm)

Fig. 2 Sizes and Shapes of Walls (Unit:mm)

护。试件制作现场如图 3 所示。



图 3 试件制作现场

Fig. 3 Specimen Production Site

1.3 加载装置

整个试验装置主要由水平加载装置(MTS)、竖向加载装置(千斤顶)以及侧向支撑装置三部分组成,水平荷载通过 500 kN 的电液伺服加载系统 MTS 施加,墙体竖向荷载通过 500 kN 的液压千斤顶施加在分配梁上,并通过滚轴与墙体连接,以减小摩擦,使墙顶在水平方向自由移动。该试验加载制度如图 4 所示,加载装置如图 5 所示。

1.4 加载与测量方案

按照《建筑抗震试验方法规程》(JGJ 101—96)^[12]规定在试验前进行 2 次预加载来检验试验装置和测量装置是否正常。在正式试验开始前,首先

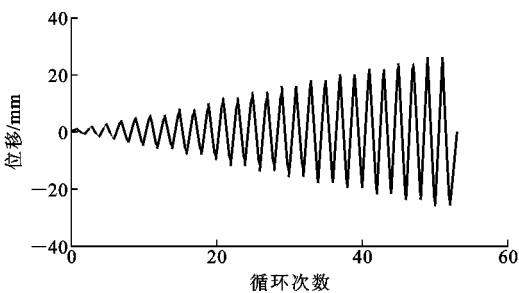


图 4 加载制度

Fig. 4 Loading System

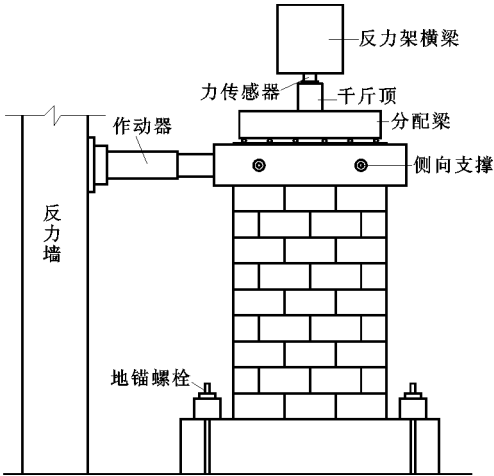


图 5 试验加载装置

Fig. 5 Test Loading Setup

按设计轴压施加竖向荷载维持不变。水平荷载采用位移加载方式,墙体屈服前,每级 1 mm 加载,每级荷载下循环 1 次,当墙体屈服后,每级 2 mm 加载,并且在每级荷载下循环 2 次。一直加载至峰值荷载的 80% 以下停止试验。

通过墙体顶部布置 200 mm 位移计测量墙体顶部位移,在底部布置 100 mm 位移计来测量地梁位移,墙体中部布置 2 个 100 mm 位移计测量墙体位移。通过在墙体两端的竖向钢筋上各布置 5 个应变片测量试验过程中钢筋应变的变化。测量装置如图 6 所示。

2 试验结果

2.1 试验现象

当试件 W-1(轴压比为 0.037)的位移为 3 mm 时,水平荷载为 112.4 kN,墙体第 2 皮与第 3 皮砌块之间出现一条水平裂缝;此后随着荷载增加,水平裂缝不断发展,墙体破坏时裂缝主要集中在第 1 皮与第 2 皮之间;随着荷载增大,裂缝变宽,钢筋屈服,端部部分砌块压碎,最终墙体发生弯曲破坏。墙体

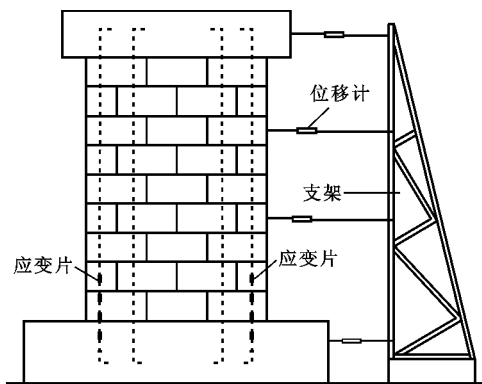


图 6 测量装置

Fig. 6 Measuring Setup

弯曲破坏形态如图 7(a)所示。

当试件 W-2(轴压比为 0.061)的位移为 3 mm 时,墙体第 4 皮与第 5 皮之间出现裂缝,此时水平荷载为 112.2 kN;此后随着荷载增加,水平裂缝充分发展,裂缝主要集中在底部 4 皮,当位移为 10 mm 时,墙体砌块与砌块之间产生竖向裂缝。随着荷载增大,裂缝变宽,竖向钢筋屈服,端部砌块局部压碎,墙体最终破坏,如图 7(b)所示。

当试件 W-3(轴压比为 0.126)的位移为 4 mm 时,水平荷载为 149.4 kN,墙体第 3 皮与第 4 皮之间出现水平裂缝;此后随着荷载增大,墙体水平裂缝充分发展,墙体以弯曲裂缝为主,有部分剪切裂缝,裂缝主要集中于墙体底部,在水平荷载达到一定值时,根部受拉区沿砌块交接处出现水平裂缝。随着水平荷载的增大,试件两端产生斜向弯剪斜裂缝,墙体最终破坏呈现弯剪破坏形态,如图 7(c)所示。

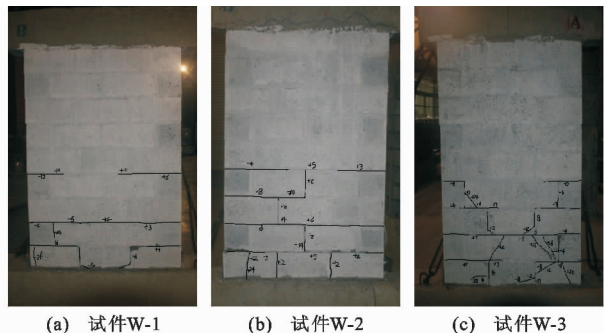


图 7 试件破坏形态

Fig. 7 Failure Modes of Specimens

对比 3 组试件发现,破坏区域主要集中在墙底 4 皮砌块范围内,在轴压比较小时,试件裂缝分布范围小,以水平裂缝为主,当轴压比增大时,试件水平裂缝充分发展,破坏时墙体出现弯剪裂缝,裂缝主要分布在底部。墙体普通面与保温面裂缝基本对称发展,保温面墙体没有外鼓、脱落,表明墙体保温面与

普通面能够很好地协调共同工作。

2.2 破坏机理

试验墙体均表现出弯曲破坏,墙体裂缝主要以水平裂缝为主。破坏过程可以分为 3 个阶段,弹性阶段试件位移-荷载曲线为一条直线,墙体出现水平裂缝。塑性阶段墙体位移-荷载曲线表现出明显的非线性,墙体耗能能力增强,裂缝发展迅速,并且裂缝逐渐变宽。软化阶段随着荷载增加,墙体承载力下降,钢筋屈服,墙体端部砌块压碎。从墙体破坏过程和形态来看,组成自保温无砂浆配筋砌块砌体剪力墙的几种材料相互协同工作,由于砌块很好地约束灌孔混凝土,初始砌块受力较大,随着灌孔混凝土承受荷载逐渐增大,水平钢筋和竖向钢筋开始承受荷载。试验中墙体的破坏具有整体性,砌块、灌孔混凝土和钢筋三者未出现分离和独立变形的现象,能够较好地协同工作。

3 试验结果分析

3.1 滞回曲线

试验墙体滞回曲线综合反映了试件在反复受力过程中的变形特征,并且是确定恢复力模型和进行非线性地震反应分析的依据。

W-1, W-2, W-3 三片墙体的滞回曲线如图 8 所示。从图 8 可以看出:试验墙体在弹性阶段表现出较好的整体性,加载与卸载曲线基本重合;随着试验的进行,试验墙体逐步进入弹塑性阶段,滞回曲线呈梭形,滞回环面积也随之增大,卸载后出现残余变形;加载位移不断增加,滞回曲线出现捏缩效应;加载位移继续增加,滞回曲线中滞回环的形状逐渐向反 S 形发展;试验加载到末期,滞回曲线呈 Z 形。

各试件不同轴压比下在初始阶段滞回特性基本相似,滞回环包围面积小;轴压比较小的墙体 W-1 滞回环面积较大,随着轴压比的增大,滞回环形状呈现弓形,墙体耗能能力降低,试验后期墙体呈现出滑移现象。

3.2 骨架曲线

根据墙体滞回曲线绘制出试件的骨架曲线,如图 9 所示,从图 9 可以看出:增大轴压比可以增加水平裂缝和斜裂缝之间的骨料咬合和摩擦作用,进而提高试验墙体的极限承载力,轴压比的增加对抗弯承载力的提高效果明显;轴压比最大的试件 W-3 较试件 W-1, W-2 破坏位移更大,轴压比偏低情况下,在合理范围内增大轴压比对保证结构的后期变形和承载力具有重要意义。

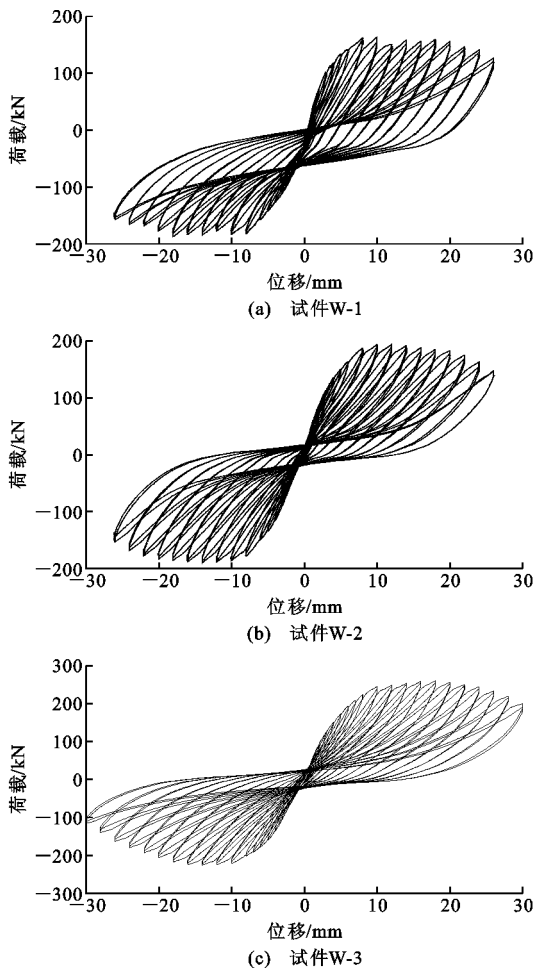


图 8 试件滞回曲线

Fig. 8 Hysteretic Curves of Specimens

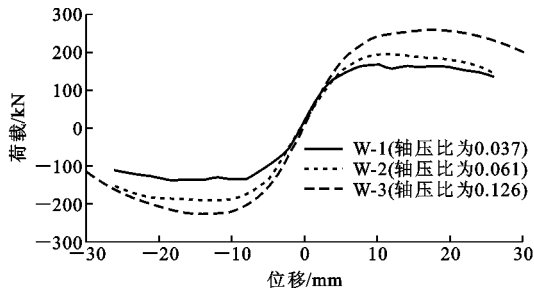


图 9 试件骨架曲线

Fig. 9 Skeleton Curves of Specimens

3.3 刚度分析

墙体在开裂前,水平荷载和顶点位移呈线性关系,可将加载初始阶段的配筋砌体剪力墙体视作弹性悬臂梁来计算^[13],因此可得墙体初始刚度 K_0 的计算公式,即

$$K_0 = \frac{E_w b}{3\lambda + 4\lambda^3} \quad (1)$$

式中: E_w 为墙体水平截面的弹性模量; λ 为墙体的高宽比; b 为墙体的水平截面宽度。

考虑到灌孔砌块砌体墙体具有明显的各向异性,水平方向加载时取截面的弹性模量 $E_w = 0.65E_m$, $E_m = 380f_{gm}^{2/3}$ (f_{gm} 为灌孔砌体的强度)。

初始刚度为

$$K_0 = \frac{247bf_{gm}^{2/3}}{3\lambda + 4\lambda^3} \quad (2)$$

开裂刚度 K_{cr} 为

$$K_{cr} = \frac{198bf_{gm}^{2/3}}{3\lambda + 4\lambda^3} \quad (3)$$

按照公式(2),(3)计算墙体初始刚度和开裂刚度,结果如表 3 所示。

表 3 墙体初始刚度和开裂刚度

Tab. 3 Initial Stiffness and Cracking Stiffness of Walls

试件编号	计算初始刚度/ (kN · mm ⁻¹)	实测初始刚度/ (kN · mm ⁻¹)	计算开裂刚度/ (kN · mm ⁻¹)	实测开裂刚度/ (kN · mm ⁻¹)
W-1	48.95	38.2	39.24	30.48
W-2	48.95	37.4	39.24	33.48
W-3	48.95	45.8	39.24	35.54

从表 3 可以看出,墙体按照公式(2),(3)计算所得初始刚度和开裂刚度比墙体实测的初始刚度和开裂刚度要高出 15% 左右,自保温无砂浆配筋砌体剪力墙的刚度较传统配筋砌体剪力墙的刚度低一点,随着轴压比增大墙体开裂刚度增大。

墙体抗侧刚度 K 在反复荷载作用下用平均割线刚度来表示,取值为每一加载循环时正、反向最大荷载绝对值之和与相应位移绝对值之和的比来表示^[14],如公式(4)所示

$$K = \frac{|F_i| + |-F_i|}{|X_i| + |-X_i|} \quad (4)$$

式中: F_i , $-F_i$ 分别为当墙体位移为 X_i 和 $-X_i$ 时作动器测得的反力。

通过公式(4)计算的墙体各阶段刚度来绘制墙体刚度退化曲线,如图 10 所示。从图 10 可以看出:

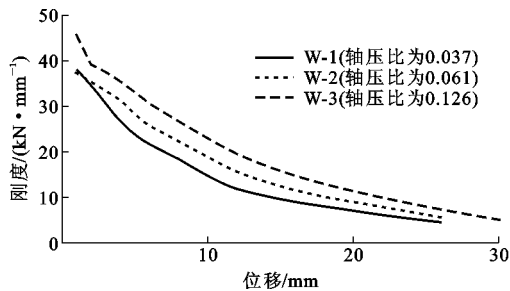


图 10 刚度退化曲线

Fig. 10 Stiffness Degradation Curves of Specimens

(1)在初始一段时间内 3 片墙体抗侧刚度下降较快,试验进行一段时间后抗侧刚度下降趋缓。

(2)各试件初始抗侧刚度不同,表明试验墙体参数对试件的初始抗侧刚度有很大影响。试验墙体抗侧刚度在试验末期下降速度十分缓慢,并且在墙体破坏时仍能维持一定的抗侧刚度。

(3)随着轴压比的增大,墙体在弹性阶段的初始刚度越大,刚度退化速度越快,轴压比对墙体刚度有显著的影响,但是在塑性阶段墙体刚度退化越来越缓慢,轴压比对这阶段墙体刚度影响很小。

3.4 耗能分析

试验墙体的耗能性能可以由滞回曲线中滞回环所包围的面积来衡量,等效黏滞阻尼系数计算示意图如图 11 所示,用构件的等效黏滞阻尼系数 ζ_e 来衡量构件的能量耗散能力^[15], ζ_e 计算如公式(5)所示

$$\zeta_e = \frac{1}{2\pi} \frac{S_{ABC} + S_{CDA}}{S_{\triangle OBE} + S_{\triangle ODF}} \tag{5}$$

式中: S_{ABC}, S_{CDA} 分别为曲线 ABC, CDA 所围成的面积; $S_{\triangle OBE}, S_{\triangle ODF}$ 分别为 $\triangle OBE, \triangle ODF$ 的面积。

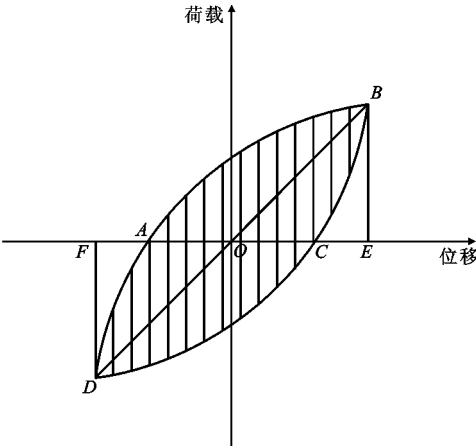


图 11 等效黏滞阻尼系数计算示意

Fig. 11 Calculation Schematic Diagram of Equivalent Viscous Damping Coefficient

按公式(5)计算的 3 片墙体最终状态等效黏滞阻尼系数如表 4 所示。从表 4 可以看出,当轴压比增大时,墙体等效黏滞阻尼系数减小,墙体耗能能力降低。试验表明,试件在位移较大的情况下承载力没有突然下降,能够吸收一定的非弹性应变能而不严重破坏,表现出较好的耗能能力。

表 4 等效黏滞阻尼系数

试件编号	W-1	W-2	W-3
ζ_e	0.134	0.128	0.121

3.5 位移延性与承载力

试件的延性是指试件在突破弹性阶段的极限后其承受弹塑性变形的能力。试件延性越优良,其在水平荷载作用下的塑性变形就越大,因此耗散的能量也就越多。试件延性是评估试件抗震性能的关键指标之一。位移延性系数是衡量试件延性性能的重要指标,采用试件极限位移和屈服位移的比值来计算试件位移延性系数 μ ^[16],如公式(6)所示。墙体的位移延性系数如表 5 所示。

$$\mu = \Delta_d / \Delta_y \tag{6}$$

式中: Δ_d 为试验墙体的极限位移,即承载力下降至最大荷载 80%时对应的位移; Δ_y 为试验墙体的屈服位移。

根据《砌体结构设计规范》(GB 50003—2011)^[17]中的公式[式(7),(8)]计算得到的配筋砌体剪力墙正截面偏心受压承载力和通过试验获得的试件极限承载力试验值见表 5。

$$N \leqslant f_g b x + f_y' A_s' - f_y A_s - \sum f_{yi} A_{si} \tag{7}$$

$$Ne_N \leqslant f_g b x (h_0 - \frac{x}{2}) + f_y' A_s' (h_0 - a_s') - f_y A_s - \sum f_{yi} S_{si} \tag{8}$$

表 5 墙体的承载力和延性系数

试件编号	屈服位移/mm	极限位移/mm	墙体屈服荷载/kN	承载力计算值 F_1 /kN	正向推力试验值 F_2 /kN	反向拉力试验值/kN	延性系数 μ	F_2/F_1
W-1	5.83	25.95	110.38	158.9	167.6	-138.2	4.47	1.05
W-2	6.32	26.11	153.30	176.1	193.3	-190.5	4.13	1.10
W-3	7.91	30.01	208.40	235.6	260.3	-226.1	3.79	1.10

式中: N 为剪力墙计算截面轴向力设计值; f_g 为灌孔砌体的抗压强度设计值; f_y, f_y' 分别为竖向受拉、受压主筋的强度设计值; A_s, A_s' 分别为竖向受拉、受压主筋的截面面积; f_{yi} 为第 i 根竖向分布筋抗拉强度设计值; A_{si} 为第 i 根竖向分布筋的截面面积; h_0 为截面有效高度; S_{si} 为第 i 根竖向分布筋对竖向主

筋的面积矩; e_N 为轴向力作用点到竖向受拉主筋合力点之间的距离; a_s' 为受压区纵向钢筋合力点至截面受压边缘的距离。

试验表明:随着轴压比的增大,墙体延性减小;墙体承载力随着轴压比的增大逐渐增大,并且墙体承载力试验值与规范计算值能够较好吻合。

4 施工与设计建议

由于自保温无砂浆配筋砌块砌体剪力墙是一种新的结构体系,在试验基础上对自保温无砂浆配筋砌块砌体剪力墙的施工和设计过程提出建议,为进行后续研究提供参考:

(1)由于墙体施工中没有使用砂浆,所用的砌块必须经过严格打磨保证其精度和平整度,才能够保证墙体在施工过程中的垂直度和平整度,防止墙体在施加轴压和水平荷载作用下发生平面外破坏。

(2)墙体施工中水平钢筋应按照三点绑扎固定,2根水平钢筋的间距应该保持在60 mm;竖向钢筋的搭接长度不应小于 $40d$ (d 为钢筋直径),在灌孔浇筑后立即检查校核钢筋的位置,保证垂直钢筋的位置。

(3)灌孔混凝土必须要有足够的流动性,不仅能够灌满孔,还要能够保证在墙体水平方向流动灌满墙体。

(4)在进行自保温无砂浆配筋砌块砌体剪力墙设计时,墙体轴压比较低时,对于未设置边缘约束构件的自保温无砂浆配筋砌块砌体剪力墙试件,其破坏区域主要集中在剪力墙长度 L 范围内,墙体端部压碎,破坏较为严重,上端部分保持较为完整,因此在设计自保温无砂浆配筋砌块砌体剪力墙时应应对墙体底部进行加强处理,加强区域不应小于墙体宽度 L ,从而提高墙体的承载力和抗震性能。

(5)对于轴压比较高的自保温无砂浆配筋砌块砌体剪力墙设计时,按照规范要求应设置边缘约束构件,能够提高墙体的承载力和延性。

5 结 语

(1)从墙体破坏来看,裂缝主要集中在墙体底部4皮范围内,墙体普通面与保温面裂缝基本对称,表明墙体保温面与普通面能够很好地协调共同工作。随着轴压比的增大,墙体斜裂缝增加,构件的破坏形态逐渐由弯曲破坏转变为弯剪破坏。

(2)轴压比的增加对抗弯承载力的提高效果明显,轴压比增大,墙体延性降低,试件墙体轴压比偏小的情况下,在合理范围内增大轴压比对保证结构的后期承载力和变形具有重要意义。

(3)随着轴压比增大,墙体承载力增大,自保温无砂浆配筋砌块砌体剪力墙构件的承载力试验值与规范公式计算值吻合较好。

(4)本文仅通过轴压比对自保温无砂浆配筋砌

体剪力墙进行探索研究,应在此基础上进一步研究剪跨比、水平配筋以及竖向配筋等因素对自保温无砂浆配筋砌块砌体剪力墙抗震性能的影响。

参考文献:

References:

- [1] NGUYEN T M H, BLOND E, GASSER A, et al. Mechanical Homogenisation of Masonry Wall Without Mortar[J]. European Journal of Mechanics — A/Solids, 2009, 28(3): 535-544.
- [2] THANOON W A M, ALWATHAF A H, NOORZAEI J, et al. Finite Element Analysis of Interlocking Mortarless Hollow Block Masonry Prism[J]. Computers & Structures, 2008, 86(6): 520-528.
- [3] 施楚贤. 砌体结构理论与设计[M]. 3版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.
SHI Chu-xian. Masonry Structure Theory and Design [M]. 3rd ed. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014.
- [4] 黄 靛, 吴志维, 陈 良, 等. N式砌块配筋砌体剪力墙抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2012, 33(4): 128-136.
HUANG Liang, WU Zhi-wei, CHEN Liang, et al. Experimental Study on Seismic Behavior of N-type Block Reinforced Masonry Shear Walls[J]. Journal of Building Structures, 2012, 33(4): 128-136.
- [5] 王凤来, 赵 艳. 轴向压力对配筋砌体短肢剪力墙抗剪性能的影响[J]. 防灾减灾工程学报, 2014, 34(1): 91-95.
WANG Feng-lai, ZHAO Yan. Effect of Axial Pressure on Shear-resistant Performance of Reinforced Masonry Short-leg Shear Walls[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2014, 34(1): 91-95.
- [6] 高 翔. 灌孔砌块砌体基本力学性能与复合节能墙体抗震性能研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2010.
GAO Xiang. Research on Mechanical Properties of Concrete Block Masonry and Seismic Behavior of Reinforced Masonry Multiwythe Wall[D]. Changsha: Hunan University, 2010.
- [7] PRIESLEY M J N. Seismic Resistance of Reinforced Concrete Masonry Shear Walls with High Steel Percentages[J]. Bulletin of the New Zealand National Society for Earthquake Engineering, 1977, 10(1): 226-236.
- [8] PRIESLEY M J N. Seismic Design of Concrete Masonry Shearwalls[J]. ACI Journal Proceedings, 1986, 83(1): 58-68.

- [9] SHING P B, NOLAND J L, KLAMERUS E, et al. Inelastic Behavior of Concrete Masonry Shear Walls[J]. Journal of Structural Engineering, 1989, 115(9): 2204-2225.
- [10] SHING P B, SCHULLER M, HOUSKERE V S, et al. Flexural and Shear Response of Reinforced Masonry Walls[J]. ACI Structural Journal, 1990, 87(6): 646-656.
- [11] 黄 靛, 李晓希, 施楚贤, 等. 无砂浆灌孔砌块砌体的基本力学性能试验[J]. 武汉大学学报: 工学版, 2015, 48(3): 339-343.
HUANG Liang, LI Xiao-xi, SHI Chu-xian, et al. Experimental Study of Basic Mechanical Properties of Grouted Mortarless Masonry[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2015, 48(3): 339-343.
- [12] JGJ 101—96, 建筑抗震试验方法规程[S].
JGJ 101—96, Specification of Testing Methods for Earthquake Resistant Building[S].
- [13] 胡 嘉, 孙恒军, 程才渊. 混凝土小型空心砌块配筋砌体墙片抗弯性能的试验研究[J]. 建筑砌块与砌块建筑, 2006(3): 6-9.
HU Jia, SUN Heng-jun, CHENG Cai-yuan. Experimental Research on Bending Bearing Behavior of Reinforced Concrete Masonry Walls with Small Hollow Blocks[J]. Building Block & Block Construction, 2006(3): 6-9.
- [14] 章红梅, 曾 松. 不同轴压比下剪力墙抗震性能试验研究[J]. 结构工程师, 2014, 30(5): 165-173.
ZHANG Hong-mei, ZENG Song. Experimental Study on the Seismic Performance of Shear Walls Under Varied Axial Compression Ratios[J]. Structural Engineers, 2014, 30(5): 165-173.
- [15] 孙仁楼, 陈 柳, 叶燕华, 等. 节能剪力墙抗震性能试验研究[J]. 混凝土, 2011(5): 7-9, 12.
SUN Ren-lou, CHEN Liu, YE Yan-hua, et al. Experimental Study on Seismic Behavior of Energy Saving Superimposed Slab Shear Wall[J]. Concrete, 2011(5): 7-9, 12.
- [16] 蔡 勇, 施楚贤, 易思甜. 配筋混凝土砌块砌体剪力墙位移延性设计方法[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2005, 32(3): 52-55.
CAI Yong, SHI Chu-xian, YI Si-tian. Displacement Ductility Design Method of Reinforced Concrete Masonry Shear Walls[J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2005, 32(3): 52-55.
- [17] GB 50003—2011, 砌体结构设计规范[S].
GB 50003—2011, Code for Design of Masonry Structures[S].