

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20220519005

HFMRPC 加固不同高宽比砌体窗间墙抗震性能 试验研究*

王欣^{1,2}, 高永超¹, 陈浩¹, 栾学立², 任显², 苏哲²

(1. 山东建筑大学土木工程学院, 山东 济南 250101;

2. 山东建筑大学工程鉴定加固研究院有限公司, 山东 济南 250114)

摘要: 目前广大农村地区拥有大量不符合抗震要求的砌体结构房屋, 因此, 针对老旧砌体结构房屋进行加固是一门值得研究的课题。为了研究混杂纤维改良活性粉末混凝土(HFMRPC)加固不同高宽比砌体窗间墙的抗震性能, 对1面作为对照组的未加固砌体墙和3面不同高宽比的面层加固砌体墙进行了低周往复荷载试验。对比分析了4面墙体的破坏模式、滞回曲线和骨架曲线等抗震性能指标。试验结果表明: HFMRPC 面层加固能够有效提高墙体的承载能力, 峰值荷载提高约42%; HFMRPC 面层对砌体窗间墙具有良好的约束作用, 能够有效提升墙体的延性, 延性系数提升约199%; HFMRPC 面层加固后墙体耗能能力显著提升, 累积耗能约提升98%; 高宽比是影响墙体破坏模式的重要因素, 随着高宽比的减小, 砌体墙的承载能力提高, 试件的破坏模式趋向于脆性破坏, 相反随着高宽比的增大, 砌体墙的耗能能力提高, 试件趋向于延性破坏。根据试验结果进行了墙体抗剪、抗弯承载力计算分析, 并提出了适用于HFMRPC 面层加固的抗剪承载力计算公式, 可为实际工程应用提供理论基础。

关键词: 砌体结构; 混杂纤维改良活性粉末混凝土; 不同高宽比; 面层加固; 抗震性能

中图分类号: TU362 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2023)05-1057-10

Experimental Study on Seismic Behavior of Masonry Walls with Different Height-Width Ratio Strengthened by HFMRPC

WANG Xin^{1,2}, GAO Yongchao¹, CHEN Hao¹, LUAN Xueli², REN Xian², SU Zhe²

(1. School of Civil Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, China; 2. Engineering Research Institute of Appraisal and Strengthening of Shandong Jianzhu University Co., Ltd, Jinan 250014, China)

Abstract: At present, there are a large number of masonry structures that do not meet the seismic requirements in the vast rural areas, so it is a topic worth studying to strengthen the old masonry structures. In this paper, low-cycle reciprocating load experiments were carried out on one unreinforced masonry wall as a control group and three reinforced masonry walls with different height-width ratios. The seismic performance of reinforced masonry walls with different height-width ratios was studied us-

* 收稿日期: 2022-05-19; 修回日期: 2022-08-03

基金项目: 山东省自然科学基金面上项目(ZR2022ME164)、山东省重点研发计划(重大科技创新工程)(2021CXG011204)、山东建筑大学工程鉴定加固研究院有限公司课题(H19230Z)资助

作者简介: 王欣(1973—), 男, 教授, 硕导, 硕士。主要从事工程结构安全性诊断与加固改造方面的研究。

E-mail: wangxin@sdjzu.edu.cn

通讯作者: 苏哲(1998—), 男, 本科, 助理工程师。主要从事建筑结构与加固抗震研究。E-mail: ackerman520@163.com

ing HFMRPC. Seismic performance indexes such as failure mode, hysteresis curve, and skeleton curve were compared and analyzed for the four walls. The test results show that HFMRPC surface layer has good bonding ability with the masonry wall, and the surface layer can effectively improve the bearing capacity of the wall. After HFMRPC surface reinforcement, the ductility of the wall was significantly enhanced, resulting in a better seismic reinforcement effect. The ductility coefficient is increased by about 199%. After the reinforcement of the HFMRPC surface layer, the energy dissipation capacity of the wall was significantly increased, and the cumulative energy consumption was increased by about 98%. The failure pattern of the wall was influenced by the aspect ratio. When the height-width ratio decreases, the brittle failure of the wall occurs. With a decrease in the height-width ratio, the wall develops towards brittle failure. As the aspect ratio increases, the wall has better ductility. In this paper, the shear and flexural bearing capacity of the wall were calculated and analyzed, and the formula of shear bearing capacity for HFMRPC surface reinforcement was proposed, which can be provided a theoretical basis for practical engineering applications.

Keywords: masonry structure; modified reactive powder concrete; different aspect ratios; surface strengthening; seismic performance

0 引言

地震是我国最主要的自然灾害之一,自建国以来造成了重大人员伤亡以及经济损失^[1]。随着我国建筑产业规范化、标准化的持续进步,混凝土结构建筑的抗震性能均有所提高。但在广大的农村地区,大量自行建造的房屋并未经过专业设计,且使用的结构类型多为传统的砌体结构。砌体结构具有建造年代久远、抗震措施不规范等特点,此类建筑在地震中稳定性差,易发生整体垮塌^[2]。因此,必须对现有砌体结构房屋进行改造和加固,使其满足建筑物安全和正常使用的要求。目前,国内外对于砌体墙主要的加固方式有:钢筋网水泥面层加固^[3]、打包带加固^[4]、纤维增强复合材料(fibres reinforced polymer,简称FRP)加固^[5-7]以及高延性水泥基复合材料(engineered cementitious composite,简称ECC)面层加固^[8-9]等。其中,采用钢筋网水泥面层加固和打包带加固能够提高墙体承载力和墙体变形能力,但施工较为复杂且面层厚度较大;采用FRP加固后墙体的延性和承载能力均有较大提升,但FRP材料最终剥离墙体,材料的抗拉性能并没有充分发挥;采用ECC面层加固施工过程简单便捷,加固后墙体抗侧承载力以及耗能能力有很大提升,但ECC面层与墙体粘结性能较差。

活性粉末混凝土^[10](Reactive Powder Concrete,简称为RPC)凭借其高强度、高韧性的优点,近年来

被广泛应用于工程加固领域。本课题组在此基础上,提出了一种混杂纤维改良活性粉末混凝土(Hybrid Fibers Modified Reactive Powder Concrete,简称HFMRPC),HFMRPC是在RPC的基础之上,合理改善水泥、河砂、矿粉、硅灰和粉煤灰粒径级配,以钢纤维和聚丙烯纤维作为增强体,加入高效减水剂,通过改变减水剂掺量和水胶比,降低其流动性,使其具有良好的可塑性。本课题组已对HFMRPC面层加固砌体结构的抗震性能进行了试验研究,将其加固或修复构造柱约束的砌体墙^[11-14],并研究了门式加固、交叉条带式加固、窗间墙加固以及单双面加固等不同加固方式对抗震性能的影响^[15]。试验结果表明:HFMRPC面层可以有效抑制墙体的开裂和破坏,改善砖墙的脆性破坏模式,其中窗间墙加固方式可以显著提高砌体结构延性,具有研究意义。

窗间墙是砌体结构主要的竖向受力构件,在地震中如果发生破坏将会导致结构的整体坍塌,需对其进行加固处理。不同的高宽比决定了墙体不同的破坏形式,从而也影响HFMRPC面层对于砌体窗间墙的加固效果,因此本文进行了不同高宽比下HFMRPC面层加固构造柱约束的砌体窗间墙的抗震性能试验,对比分析了不同高宽比下墙体的承载能力、延性、耗能能力等抗震性能指标,并且结合试验结果对砌体墙进行了抗剪承载力、抗弯承载力计算分析。

1 试验概况

1.1 材料参数

本试验墙体采用MU10烧结普通砖与M2.5低强度砂浆砌筑而成,地梁、圈梁、构造柱均采用C30混凝土,墙体灰缝厚度10 mm。采用的HFMRPC面层加固材料配合比为水泥:河砂:硅灰:矿粉:粉煤灰=1:2.08:0.3:0.3:0.4,水胶比为0.29,PC-1701型减水剂的体积掺量为0.1%,纤维材料为钢纤维和聚丙烯纤维,体积掺量分别为1.5%和0.5%。纤维材料的各项性能指标如表1所示,试件材料实测强度如表2所示。

表1 钢纤维和聚丙烯纤维的各项性能指标

Table 1 Performance indicators of steel fiber and pp fiber

纤维名称	长度/mm	直径/ μm	抗拉强度/ MPa	密度/ (g·cm ⁻³)
钢纤维	13	200	2895	7.85
聚丙烯纤维	18~20	48	>400	0.9

表2 试件材料强度实测数值

Table 2 Measured values of specimen material strength

材料名称	抗压强度/MPa	抗拉强度/MPa
HFMRPC 面层	49.0	3.1
地梁、圈梁、构造柱	37.9	/
M2.5 砌筑砂浆	3.3	/

1.2 试件设计

本试验设计了4面带构造柱的砌体窗间墙,采用1:2缩尺模型。墙体设置圈梁和构造柱,下方设置带有150 mm凹槽的地梁进行锚固。HFMRPC面层施工前,对构造柱和圈梁进行人工凿毛处理,对砌体窗间墙进行抠缝并剔除表面松散砂浆,用鼓风机吹净表面灰尘,将墙体湿润后进行抹面,自然条件下养护。试件W-1作为对照组,W-2、W-3和W-4仅高宽比不同,其余变量均保持不变。试件编号及加固情况如表3所示,试件尺寸及配筋如图1所示,试件加固方式如图2所示。

1.3 加载制度

试件的加载装置分为竖向和水平两部分,竖向加载装置采用液压千斤顶,水平加载装置采用MTS

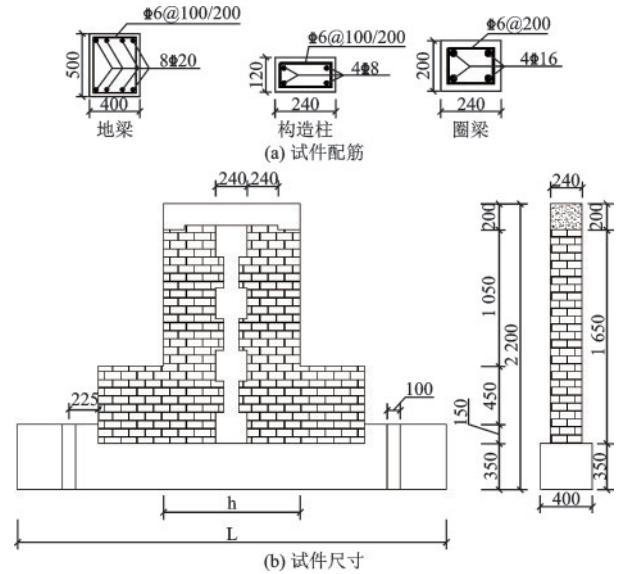


图1 试件尺寸及配筋示意

Fig.1 Schematic diagram of specimen size and reinforcement

注:图中W-1、W-2、W-3、W-4墙体宽度h分别为:1 050、1 300、1 050、750 mm;地梁长度L分别为:3 100、3 600、3 100、3 100 mm

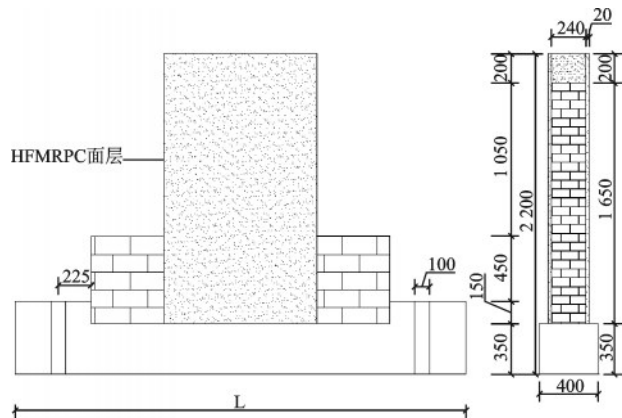


图2 试件加固方式示意

Fig.2 Schematic diagram of specimen reinforcement method

表3 试件编号及加固情况

Table 3 Specimen number and reinforcement

试件编号	高宽比	加固方式
W-1	1.0	未加固
W-2	0.8	双面加固;面层20 mm
W-3	1.0	双面加固;面层20 mm
W-4	1.4	双面加固;面层20 mm

电液伺服作动器。将试件通过地锚螺栓锚固在试验台上,顶部安装分配钢梁,将千斤顶对准钢梁中心,施加竖向荷载模拟竖向均匀压应力。水平加载采用位移控制,正向和负向位移分别为推向和拉向,每级加载循环两次。预加开裂位移值的20%并

反复推拉2次,检查仪器的采集是否正常,并上紧所有锚杆,当试件的承载力下降到峰值荷载的85%时停止加载。位移计W1用于测量MTS作动器施加的水平位移;W2用于测量窗间墙底部的水平位移;W3用于监测地梁相对于实验室地板产生的滑移;W4用于测量墙体平面外位移。试件加载装置示意图如图3所示。

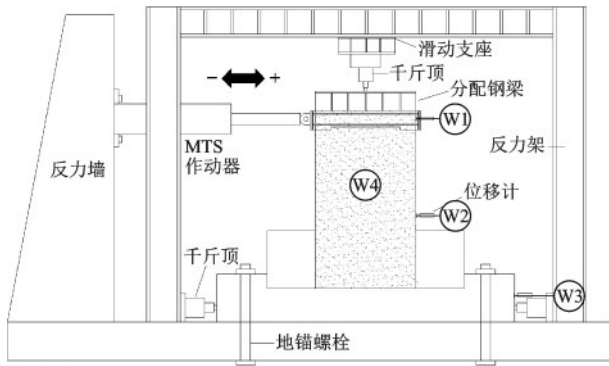


图3 加载装置示意

Fig.3 Schematic diagram of loading device and displacement measuring point

2 试验结果与分析

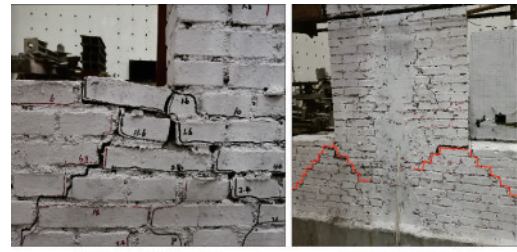
2.1 试验现象与墙体破坏形态

2.1.1 未加固砌体墙 W-1

当加载至+0.8 mm时,未加固砌体墙 W-1窗角处首先出现裂缝,随着位移的增加,裂缝沿砂浆灰缝呈阶梯状向构造柱发展。同时窗间墙中部出现水平裂缝,并随加载向构造柱延伸。当加载至+1.6 mm时,窗角处窗间墙出现贯通两面的水平裂缝,长约30.0 cm。当加载至+4.0 mm时,窗下墙出现新的阶梯状裂缝,并随加载沿砂浆灰缝向外呈阶梯状发展。当加载至+6.8 mm时,窗下墙上部砖块翘起,裂缝最宽处达2.5 mm。随着加载的继续,窗间墙出现竖向裂缝,窗角处砖被压裂,砂浆剥落。当墙体到达破坏阶段时,窗角处阶梯状裂缝发展成为主裂缝,向内延伸至构造柱,向外延伸至墙边缘,墙体中部水平裂缝发展至构造柱。墙体的破坏形态如图4所示。

2.1.2 高宽比0.8双面加固砌体墙 W-2

当加载至+1.4 mm时,窗下墙底部与地梁交界处首先出现水平裂缝,长约20.0 cm,窗角处面层出现水平裂缝。当加载至+1.6 mm时,窗下墙顶部起



(a)窗下墙裂缝形态 (b)整体破坏形态

图4 未加固砌体墙 W-1墙体破坏形态

Fig.4 Failure mode of unreinforced wall W-1

第二至第五皮砖出现阶梯状裂缝,面层水平裂缝继续发展。当加载至+2.8 mm时,窗间墙底部面层与地梁之间开裂。随着加载的继续,窗下墙阶梯状裂缝持续发展,窗角处面层水平裂缝持续延伸。当加载至+14.8 mm时,窗下墙从上往下第二至第六皮砖被压裂,窗下墙底部与地梁交界处裂缝宽度达10.0 mm。当加载至+15.6 mm时,墙体达到峰值荷载,窗角处砖块翘起,窗下墙阶梯状裂缝和底部水平裂缝发展为主裂缝,窗下墙损伤严重,墙体破坏。墙体的破坏形态如图5所示。



(a)窗下墙裂缝形态 (b)整体破坏形态

图5 高宽比0.8砌体墙 W-2墙体破坏形态

Fig.5 W-2 Failure mode of wall with aspect ratio 0.8

2.1.3 高宽比1.0双面加固砌体墙 W-3

当加载至+1.2 mm时,窗下墙底部与地梁交界处出现水平裂缝,长约35.0 cm。当加载至+1.6 mm时,窗间墙底部面层与地梁交界处出现水平裂缝。当加载至+1.8 mm时,窗间墙窗角处出现水平裂缝并向面层发展。当加载至+4.2 mm时,窗下墙上部出现阶梯状裂缝。随着荷载的增加,窗角处面层水平裂缝持续发展,阶梯状裂缝向下发展至窗下墙底部,并与地梁交界处水平裂缝交汇。当加载至-13.8 mm时,窗下墙底部砖翘起,且砂浆不断剥落。当加载至+18.6 mm时,墙体达到峰值荷载,窗下墙阶梯状裂缝发展迅速且宽度不断增大,面层与地梁交界处水平裂缝砂浆剥落严重,墙体破坏。墙体的破坏形态如图6所示。

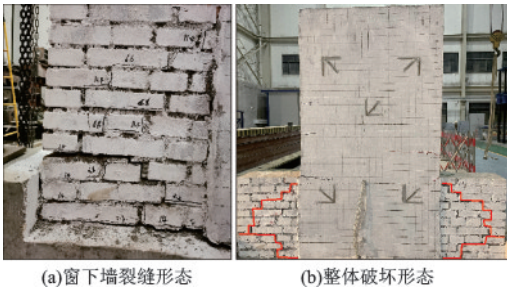


图6 高宽比1.0砌体墙W-3墙体破坏形态

Fig.6 W-3 Failure mode of wall with aspect ratio 1.0

2.1.4 高宽比1.4双面加固砌体墙W-4

当加载至+0.4 mm时,窗下墙与地梁交界处出现水平裂缝。当加载至+1.6 mm时,窗下墙底部出现水平裂缝,长约20.0 cm。当加载至+2.0 mm时,窗角处面层出现水平裂缝,长约8 mm,窗间墙面层底部与地梁交界处出现水平裂缝,长约10 cm。当加载至-3.6 mm时,窗下墙上部出现阶梯状裂缝。随着荷载的增加,面层水平裂缝均持续发展,窗下墙阶梯状裂缝向下发展,并与窗下墙底部水平裂缝交汇。当加载至+19.2 mm时,墙体达到峰值荷载,面层水平裂缝均延伸至构造柱处,窗下墙阶梯状裂缝砂浆剥落严重,墙体破坏。墙体的破坏形态如图7所示。



图7 高宽比1.4砌体墙W-4墙体破坏状态

Fig.7 W-4 Failure mode of wall with aspect ratio 1.4

2.2 试验现象分析

未加固墙体W-1的破坏模式为典型的剪切破坏,破坏时以窗角处发展的剪切斜裂缝为主。在加载初期,墙体经历短暂的弹性阶段,随着加载的进行,墙体出现裂缝,进入到弹塑性阶段。墙体由于受到水平剪切力与竖向荷载的共同作用,砖块与砂浆之间的粘结力小于墙体内部所受拉应力,因此在应力集中的墙角处最先开裂,且裂缝沿所受荷载合力的法线方向发展。当裂缝宽度发展到一定程度后,砂浆剥落严重,砖砌体逐渐退出工作,荷载主要

由构造柱承担,因此承载力并没有明显下降,最终因墙体破坏严重而停止试验。

加固后的墙体由于窗角处是应力集中部位,因此阶梯状裂缝从此处开始向窗下墙底部延伸。由于对窗间墙进行了HFMRPC面层加固处理,因此窗间墙未发生明显损坏,窗下墙由于未进行加固处理,窗角处阶梯状裂缝发展至窗下墙底部,导致窗下墙最终受剪破坏。其次,随着高宽比的增大,窗间墙底部与地梁接触处的裂缝随之增大。这是由于高宽比越大,墙体受弯作用越强,面层对墙体具有约束作用,使窗间墙具有较好的整体性,墙体破坏模式为窗下墙的剪切破坏和窗间墙的弯剪破坏。

由于HFMRPC面层与砖墙之间具有良好的粘结性,两者协同工作,因此与未加固试件相比,加固后墙体裂缝出现的时间较晚,且窗间墙未出现阶梯状裂缝。加固面层中的混杂纤维能够抑制裂缝的发展,其中钢纤维主要作用于裂缝开展初期提高窗间墙的刚度和开裂荷载,PP纤维主要作用于裂缝发展后期,通过自身桥接作用和变形减小裂缝宽度。窗间墙类似于框架结构中的“柱子”,窗下墙类似于“梁”,加固后墙体窗下墙先于窗间墙破坏,在窗下墙出现了类似于梁的塑性铰机构,符合“强柱弱梁”的结构抗震原则。

2.3 滞回曲线

各试件的滞回曲线如图8所示。四面墙体滞回曲线均呈现反“S”形,其中未加固墙体捏缩效应较为严重,加固后墙体滞回曲线更加饱满。

由滞回曲线可以看出,各墙体经历了三个阶段。第一阶段为弹性阶段,此时墙体未出现裂缝,滞回曲线为一条过原点的直线。之后墙体开裂,进入弹塑性阶段,此时滞回曲线开始弯曲,滞回环的面积增大,墙体发生塑性变形,卸载后无法恢复原状。最后,墙体进入破坏阶段,墙体产生较大位移。与未加固墙体相比,高宽比为1.0的墙体W-3,在经面层加固后,滞回曲线更加饱满;高宽比为0.8的墙体W-2滞回曲线具有明显的“滑移”现象,说明墙体发生了脆性破坏,但随着高宽比的增大,试件W-3和试件W-4的滞回曲线逐渐趋于饱满,“滑移”现象逐渐改善,说明墙体具有更好的变形能力,延性性能逐渐提高。

在相同的变形条件下,高宽比越小的墙体能够达到更高的承载力,即随着高宽比的减小,墙体的

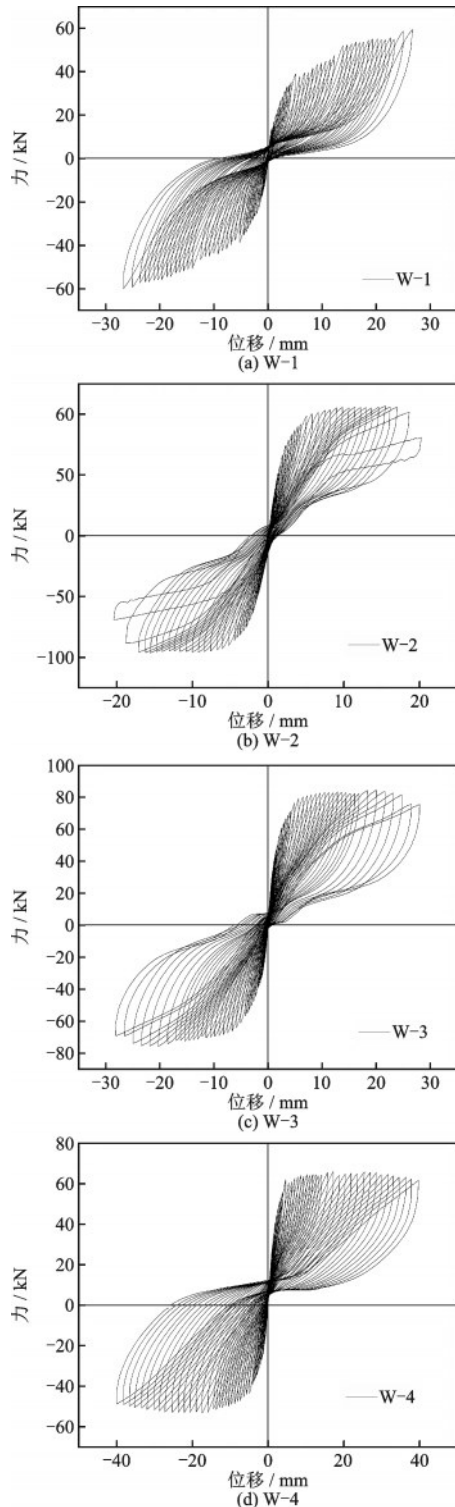


图8 各试件滞回曲线

Fig.8 Hysteresis curves of tested walls

承载能力随之提高,原因在于当高宽比减小时,试件的刚度增大,HFMRPC 面层与墙体之间能够更好地协调工作,墙体剪切破坏更加充分;从滞回曲线来看,在墙体达到峰值荷载之后,试件 W-2 曲线迅速下降,而试件 W-3、试件 W-4 并没有明显的下

降趋势,说明高宽比越大的墙体具有更好的变形能力,墙体的延性特征逐渐明显。这是由于随着高宽比的增大,窗间墙的受弯作用增强,HFMRPC 面层与窗间墙之间有着良好的粘结能力,面层的抗拉性能得到充分发挥,墙体的破坏模式由剪切破坏逐步发展为窗间墙弯剪破坏和窗下墙剪切破坏相结合的破坏模式。

2.4 骨架曲线

各试件骨架曲线如图 9 所示。其中未加固墙体 W-1 并未表现出承载力明显下降的现象,但试验时墙体已经严重受损,由于构造柱的约束成为“摇摆墙”,砖砌体已经逐渐退出工作,有可能出现突然的倒塌,因此加载提前停止。从骨架曲线可知:加载初期荷载与位移基本呈线性关系,试件出现了短暂的弹性阶段。随着加载的继续,曲线斜率逐渐减小,曲线变得平缓,试件进入弹塑性阶段。当进入破坏阶段时,试件 W-2 曲线迅速下降,说明高宽比为 0.8 的墙体发生了脆性破坏。结合试验现象来看,此时试件 W-2 墙体达到峰值荷载,由于高宽比较小,窗间墙刚度较大,而窗下墙未经加固,与窗间墙有较大的刚度差,窗下墙发生剪切破坏,从而表现出脆性破坏的特征。而试件 W-3、试件 W-4 骨架曲线并没有明显下降,一方面是因为 HFMRPC 面层与墙体具有良好的粘结能力,面层对墙体具有约束作用,从而提高了墙体的延性;另一方面是因为随着高宽比的增加,墙体的受弯作用增强,因此具有一定的塑性破坏的性质。

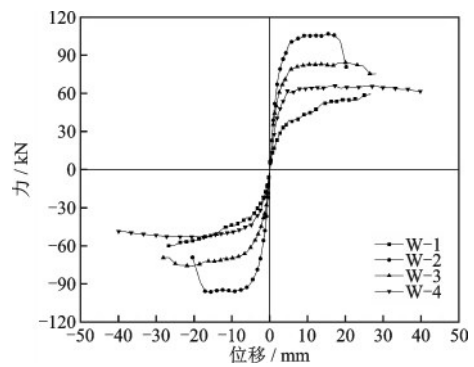


图9 各试件骨架曲线

Fig.9 Skeleton curves of tested walls

2.5 位移延性

位移延性是反应结构在地震作用下屈服变形

能力大小的重要参数,主要由延性系数来表示。延性系数越大说明试件的塑性变形能力越强,在强震作用下可以承受较大的塑性变形,在地震作用下能够耗散更多的能量。采用“Park法”、“能量法”、“画图法”三种计算方法的平均值作为墙体的屈服荷载与屈服位移;以骨架曲线上最大荷载点对应的荷载和位移确定峰值荷载及峰值位移;以荷载下降至峰值荷载的85%时所对应的位移定义为极限位移。

试件的特征点及位移延性如表4所示。试件

W-3较试件W-1屈服荷载提高51%,屈服位移减小64%,原因在于经HFMRPC面层加固后,窗间墙刚度显著提升,在刚度发生明显变化时,墙体能够承受更大的荷载且保持较小的屈服位移。延性系数排序依次为W-4>W-3>W-2>W-1,试件W-3较W-1,延性系数提高199%,说明经HFMRPC面层加固后,延性性能显著提升。试件W-3较W-2,试件W-4较W-3峰值荷载均减小了21%,延性系数分别提高55%和31%,说明高宽比越小墙体承载能力越高,高宽比越大墙体延性越好。

表4 试件特征点及延性比较

Table 4 Comparison of specimen characteristic points and ductility

试件编号	屈服荷载 P_y/kN	屈服位移 Δ_y/mm	峰值荷载 P_u/kN	峰值位移 Δ_p/mm	极限位移 Δ_u/mm	延性系数 $\mu=\Delta_u/\Delta_y$
W-1	46.05	10.88	59.33	26.71	26.71	2.45
W-2	90.62	4.14	106.81	15.52	20.28	4.73
W-3	69.57	3.89	84.27	20.11	28.11	7.33
W-4	57.72	4.18	65.99	17.30	39.87	9.59

2.6 刚度退化

刚度退化曲线反映了试件开裂、损伤、破坏过程中刚度的变化规律和各阶段抵抗变形的难易程度。根据《建筑抗震试验规程》^[16]规定,墙体的刚度采用割线刚度,计算公式如下式所示:

$$K_i = \frac{|+P_i| + |-P_i|}{|+\Delta_i| + |-\Delta_i|} \quad (1)$$

$$K_i^+ = \frac{|+P_i|}{|+\Delta_i|} \quad (2)$$

$$K_i^- = \frac{|-P_i|}{|-\Delta_i|} \quad (3)$$

式中, $+P_i$ 、 $-P_i$ ——第*i*次正、负向峰值点的荷载值; $+\Delta_i$ 、 $-\Delta_i$ ——第*i*次正、负向峰值点的位移值; K_i^+ 、 K_i^- ——第*i*次正、负向循环滞回曲线对应的割线刚度即等效刚度。

刚度退化曲线取第一次循环的峰值荷载及位移,计算结果如图10所示。

由各试件的刚度退化曲线对比分析可得:经HFMRPC面层加固以后,在相同的位移条件下,加固墙体较未加固墙体的刚度均有大幅提升,且刚度退化较为缓慢,采用HFMRPC面层加固后,显著提高了墙体抵抗变形的能力;在相同的位移条件下,高宽比较小的墙体有着更大的刚度,且随着高宽比

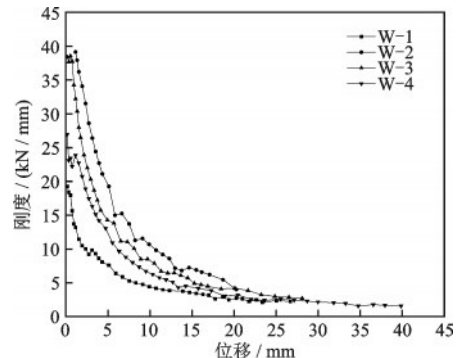


图10 各试件刚度退化曲线

Fig.10 Stiffness degradation curves of each wall

的增加,墙体的刚度退化变得缓慢,尤其在高宽比为1.4时,墙体的刚度退化比较平缓,并且后期逐渐趋于稳定,说明高宽比的增大在一定程度上改善了墙体脆性破坏的特征。

2.7 耗能能力

墙体的耗能能力由滞回环的面积来定义,表征了墙体在弹塑性状态下的抗震性能。试件初期的耗能通过裂缝的开展和闭合实现,中后期通过构件的局部损伤、塑性铰的旋转以及塑性变形来实现。各试件的耗能曲线如图11所示,单循环耗能定义为每个位移加载步第一个循环的滞回环面积,累积耗能定义为单循环耗能之和。墙体各阶段的累积耗能如

表5所示,表示墙体在不同特征点下的耗能能力。

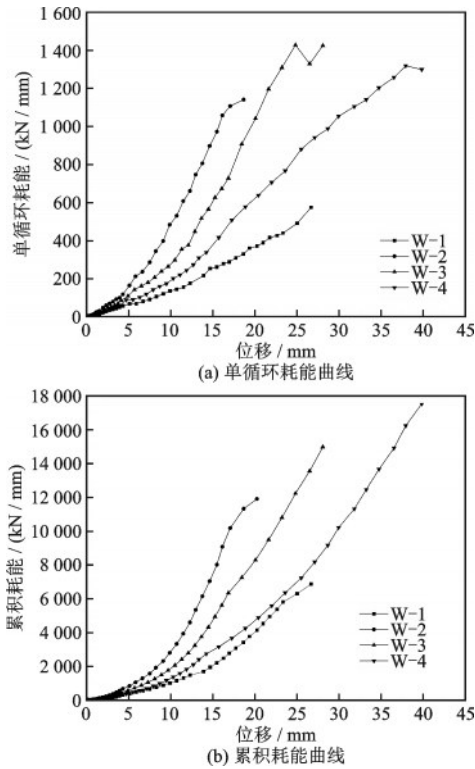


图11 各试件耗能曲线

Fig.11 Energy dissipation curves of all walls

从表5可知,墙体达到屈服位移时,试件W-1的单循环耗能和累积耗能均高于其他试件,原因在于试件W-1刚度低且变形能力差,达到屈服荷载时拥有更大的位移。墙体达到极限位移时,试件W-3较W-1单循环耗能提高141%,累积耗能较W-1提高98%。结合各试件的耗能曲线可以明显看出,试件W-3相较于W-1的单圈耗能和累积耗能均大幅提升,说明经HFMRPC面层加固后,试件的耗能能力显著增强,具有更好的抗震性能。其次,随高宽比的减小,试件的单圈耗能和累积耗能曲线增长越迅速,试件延性越差。

表5 试件各阶段累积耗能

Table 5 The cumulative energy dissipation in each stage of specimens

试件 编号	单循环耗能/(kN·mm)			累积耗能/(kN·mm)		
	屈服 位移	峰值 位移	极限 位移	屈服 位移	峰值 位移	极限 位移
W-1	166.97	596.77	596.77	1 354.64	7 580.09	7 580.09
W-2	98.50	972.01	587.40	554.93	8 007.51	11 899.11
W-3	68.20	1 040.98	1 437.44	375.54	8 285.28	14 978.77
W-4	57.43	506.65	1 298.68	289.57	3 656.96	17 522.42

3 承载力计算分析

3.1 砌体墙抗剪承载力计算分析

3.1.1 未加固砌体墙 W-1 抗剪承载力计算

根据试验现象,未加固砌体墙发生明显的阶梯状剪切破坏,墙体的抗剪承载力主要由砖与砂浆之间的粘结力提供。根据《砌体结构设计规范》^[17],中部设置构造柱的无筋砖砌体窗间墙抗剪承载力按下式进行计算:

$$V_m = \frac{1}{\gamma_{RE}} [\eta_c f_{vE} (A - A_c) + \varphi_c \zeta_c f_t A_c + 0.08 \varphi_c f_{yc} A_{sc}] \quad (4)$$

式中, γ_{RE} 为承载力抗震调整系数,取0.9; η_c 为墙体约束修正系数,取1.0; f_{vE} 为砌体沿阶梯形截面破坏的抗震抗剪强度设计值; ζ_c 为中部构造柱混凝土抗剪贡献系数,取0.5; f_t 为构造柱混凝土轴心抗拉强度设计值; φ_c 为构造柱抗剪承载力折减系数,取0.28^[18]; A 、 A_c 分别为墙体横截面面积和中部构造柱的横截面面积; f_{yc} 为中部构造柱纵向钢筋抗拉强度设计值; A_{sc} 中部构造柱纵向钢筋截面总面积。

3.1.2 HFMRPC 面层加固砌体墙抗剪承载力计算

HFMRPC面层通过与砌体墙之间的粘结力与之形成良好的整体,通过试验现象来看,面层沿裂缝法向方向的拉应力为砌体墙提供抗剪承载力贡献。HFMRPC面层采用对角机制^[15]模拟计算,面层抗剪承载力计算公式为:

$$V_p = \alpha \beta f_{vp} A_p \quad (5)$$

式中, α 是面层拉应力分布系数,对于所有试件的取值均为0.7; β 为HFMRPC面层抗剪承载力贡献系数,按 $\beta = 1.417\lambda^2 - 3.55\lambda + 2.683$ 计算,其中 λ 为墙体高宽比; f_{vp} 为HFMRPC面层的抗拉强度,取3.1MPa; A_p 为面层沿裂缝方向开展的截面面积。

HFMRPC面层加固后带构造柱砌体窗间墙抗剪承载力由下式计算:

$$V_{max} = V_m + V_p \quad (6)$$

式中, V_{max} 为HFMRPC面层加固后带构造柱砌体墙的抗剪承载力; V_m 为带构造柱砌体墙的抗剪承载力; V_p 为HFMRPC面层为砌体墙提供的抗剪承载力。

3.1.3 抗剪承载力计算结果试验验证

试件W-1根据式(4)进行计算,试件W-2、W-3、W-4根据式(6)进行计算,试验值与计算值结果比较

如表6所示,由表中可以看出试件W-2、W-3和W-4试验值与计算值比较吻合,试件W-1由于窗下墙严重破损时便停止试验,窗间墙承载力并没有得到充分发挥,所以试验值小于计算值。

表6 抗剪承载力试验值与计算值结果比较

Table 6 Comparison between test values and calculated values

试件编号	试验值/kN	计算值/kN	计算值/试验值
W-1	59.33	65.10	1.10
W-2	106.81	101.62	0.95
W-3	84.27	82.04	0.97
W-4	65.99	63.12	0.96

3.2 砌体墙抗弯承载力计算分析

3.2.1 基本假定与抗弯承载力计算简图

采用等效矩形应力法,计算简图如图12所示。

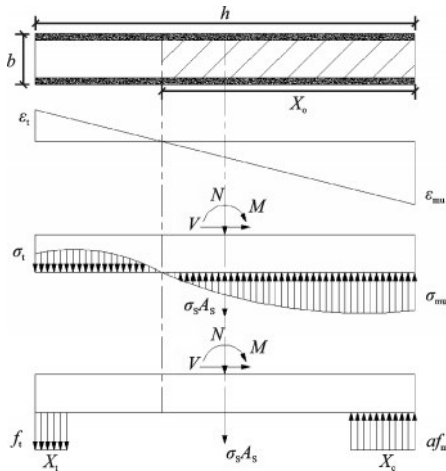


图12 抗弯承载力计算简图

Fig.12 Calculation diagram of flexural capacity

墙体进行抗弯承载力计算时满足以下假定:墙体在加载时横截面保持为平面,即符合平截面假定;抗拉强度仅考虑 HFMRPC 面层和构造柱纵筋做出的贡献,忽略中部构造柱混凝土的抗拉强度。

3.2.2 砌体墙抗弯承载力计算

试件W-1、W-2、W-3和W-4均按图12抗弯承载力计算简图进行计算,窗间墙发生破坏时,假设受压区砖砌体墙达到极限抗压强度,根据计算简图中力与力矩的平衡关系可得:

$$N_m = \alpha f_m b x_c - \sigma_s A_s \quad (7)$$

$$M_m = \alpha f_m b x_c \left(\frac{h}{2} - \frac{x_c}{2} \right) + f_t b_1 x_1 \left(\frac{h}{2} - \frac{x_1}{2} \right) \quad (8)$$

$$N_p = \alpha f_m b x_c - f_t b_1 x_1 - \sigma_s A_s \quad (9)$$

$$M_p = \alpha f_m b x_c \left(\frac{h}{2} - \frac{x_c}{2} \right) + f_t b_1 x_1 \left(\frac{h}{2} - \frac{x_1}{2} \right) \quad (10)$$

式中, α 为砖砌体等效矩形应力强度系数,所有墙体均取0.7; f_m 为砌体墙轴心抗压强度平均值,取3.04 MPa,试件W-2、W-3、W-4按 $f_m = \frac{f_{m1} b_1 + f_{m2} b_2}{b_1 + b_2}$ 计算加权平均值,取7.28 MPa,其中 f_{m1} 、 f_{m2} 分别为砖砌体墙、HFMRPC面层抗压强度平均值, b_1 、 b_2 分别为砖砌体墙、HFMRPC面层厚度; b 为墙体截面宽度,取280 mm; b_1 为HFMRPC面层厚度,取40 mm; h 为墙体截面高度; x_c 为受压区等效高度; x_1 为面层受拉区等效高度; f_t 为HFMRPC面层抗拉强度平均值,取3.1 MPa; σ_s 为构造柱纵筋抗拉强度; A_s 为构造柱纵向钢筋截面面积。

3.2.3 抗弯承载力计算结果试验验证

试件W-1的抗弯承载力按式(7)、式(8)计算,试件W-2、W-3、W-4的抗弯承载力按式(9)、式(10)计算,试验值与计算值结果比较见表7。

表7 抗弯承载力试验值与计算值结果比较

Table 7 Comparison between test values and calculated values

试件编号	试验值/(kN·m)	计算值/(kN·m)	计算值/试验值
W-1	68.23	66.60	0.98
W-2	122.83	172.67	1.41
W-3	96.91	124.47	1.28
W-4	75.89	73.57	0.97

注:试验值=峰值荷载×窗间墙底部至作动器加载点之间距离

由表7可以看出,试件W-1计算值与试验值比较吻合,试件W-2、W-3和W-4计算值与试验值比值随高宽比规律变化。结合试验现象来看,随高宽比的增加,窗间墙逐渐向弯曲破坏发展。试件W-2、W-3墙体破坏时面层和窗间墙并没有达到极限抗弯承载力,破坏模式以剪切破坏为主,因此试件W-2和W-3计算值偏大,而试件W-4受高宽比的影响,窗间墙发生弯曲破坏,HFMRPC面层抗拉强度得到充分发挥,试件W-4计算值与试验值比较吻合。

4 结论

通过对1面未加固砌体窗间墙和3面不同高宽

比HFMRPC双面加固砌体窗间墙进行低周往复荷载试验,得到以下结论:

(1)采用HFMRPC面层加固砌体窗间墙,面层与墙体之间具有良好的粘结能力,加固后墙体较未加固墙体承载力提升42%,延性系数提升199%,累积耗能提升98%,抗震性能显著提升。

(2)高宽比越小,墙体承载能力越高,高宽比越大墙体延性越好,试件W-3较W-2、W-4较W-3峰值荷载均减小了21%,延性系数分别提高55%、31%。

(3)高宽比是影响墙体破坏模式的重要影响因素,当高宽比减小时,墙体往脆性破坏的方向发展,当高宽比增加时,墙体具有塑性破坏的性质。

(4)提出了HFMRPC面层加固砌体窗间墙抗剪承载力计算公式,通过计算值与试验值对比,公式具有良好的精度,可为实际工程提供理论依据。

参考文献:

- [1] 李曼,邹振华,史培军,等.世界地震灾害风险评价[J].自然灾害学报,2015,24(5):2-11.
Li M, Zou Z H, Shi P J, et al. World earthquake disaster risk assessment [J]. Journal of Natural Disasters, 2015, 24(5): 2-11. (in Chinese)
- [2] 徐建,梁建国,石柳,等.我国砌体结构发展的若干问题探讨[J].建筑结构,2016,46(15):91-97.
Xu J, Liang J G, Shi L, et al. Discussion on some problems of development of masonry structures in China [J]. Building Structure, 2016, 46(15): 91-97. (in Chinese)
- [3] Kadam S B, Singh Y, Li B. Out-of-plane behaviour of unreinforced masonry strengthened using ferrocement overlay [J]. Materials and Structures, 2015, 48: 3187-3203.
- [4] 周强,赵文洋,杨凌宇,等.打包带加固村镇砌体墙抗震性能试验研究[J].建筑结构学报,2020,41(1):307-314.
Zhou Q, Zhao W Y, Yang L Y, et al. Study on seismic performance of masonry wall with polypropylene packing band reinforcement [J]. Journal of Building Structures, 2020, 41(1): 307-314. (in Chinese)
- [5] Capozucca R, Magagnini E. Experimental response of masonry walls in-plane loading strengthened with GFRP strips [J]. Composite Structures, 2020, 235(1): 111735.
- [6] Reboul N, Mesticou Z, Larbi A S, et al. Experimental study of the in-plane cyclic behaviour of masonry walls strengthened by composite materials [J]. Construction and Building Materials, 2018, 164(10): 70-83.
- [7] 褚少辉,赵士永,梁耀哲,等.玄武岩纤维布加固砌体墙抗震性能试验研究与数值分析[J].建筑结构,2020,50(9):133-136.
Chu S H, Zhao S Y, Liang Y Z, et al. Experimental research and numerical analysis on seismic performance of masonry walls with externally bonded BFRP sheets [J]. Building Structure, 2020, 50(9): 133-136. (in Chinese)
- [8] 邓明科,樊鑫森,高晓军,等.ECC面层加固受损砖砌体墙抗震性能试验研究[J].工程力学,2015,32(4):120-129.
Deng M K, Fan X M, Gao X J, et al. Experimental investigation on seismic behavior of damaged brick masonry wall strengthened with ECC splint [J]. Engineering Mechanics, 2015, 32(4): 120-129. (in Chinese)
- [9] 邓明科,杨铄,梁兴文.高延性混凝土单面加固构造柱约束砖砌体墙抗震性能试验研究[J].土木工程学报,2018,51(4):11-18.
Deng M K, Yang S, Liang X W. Experimental studies on seismic behavior of confined masonry walls strengthened with single HDC layer [J]. China Civil Engineering Journal, 2018, 51(4): 11-18. (in Chinese)
- [10] 郑文忠,吕雪源.活性粉末混凝土研究进展[J].建筑结构学报,2015,36(10):44-58.
Zheng W Z, Lyu X Y. Literature review of reactive powder concrete [J]. Journal of Building Structures, 2015, 36(10): 44-58. (in Chinese)
- [11] 王欣,卜凡洋,陈海强,等.改性活性粉末混凝土面层加固砌体墙抗震性能试验研究[J].工业建筑,2019,19(6):32-38.
Wang X, Bu F Y, Chen H Q, et al. Experimental research on seismic behavior of masonry wall reinforced by MRPC surface layer [J]. Industrial Construction, 2019, 19(6): 32-38. (in Chinese)
- [12] 王欣,王菲,卜凡洋.MRPC不同加固方式下砌体墙抗震性能试验研究[J].建筑结构,2020,50(6):51-56.
Wang X, Wang F, Bu F Y. Experimental study on seismic performance of masonry wall under different reinforcement methods of MRPC [J]. Building Structure, 2020, 50(6): 51-56. (in Chinese)

(本文编辑:苏泽云)

(下转第1111页)