

高延性混凝土加固砌块砌体墙抗震性能研究

邓明科¹, 张伟^{1†}, 李宁²

(1. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055;

2. 华陆工程科技有限责任公司, 陕西 西安 710065)

摘要:为改善混凝土空心砌块墙体的脆性破坏模式,提高墙体的抗震性能,提出采用高延性混凝土(HDC)加固混凝土空心砌块砌体墙.设计了3片无构造柱与3片带构造柱的砌块砌体墙,分别对这两类墙体采用单面HDC及双面HDC面层进行加固,通过拟静力试验,研究墙体的破坏形态、滞回性能、承载力及变形能力,为此类结构的加固设计提供试验及理论依据.试验结果表明:对于无构造柱墙体,HDC面层可有效限制墙体斜裂缝的开展,改善墙体的脆性破坏模式,提高墙体的承载力与变形能力;对于带构造柱墙体,HDC面层提高了试件的水平承载力,加固试件的残余承载力较高,内部墙体的损伤程度较小.通过理论分析,建立了各试件的受剪承载力计算公式,且计算结果与试验值吻合较好,可为HDC加固混凝土空心砌块墙体的抗剪承载力计算提供参考.

关键词:高延性混凝土;混凝土空心砌块砌体;加固;抗震性能;承载力

中图分类号:TU362

文献标志码:A

Study on Seismic Behavior of Concrete Block Masonry Walls Strengthened with High Ductile Concrete

DENG Mingke¹, ZHANG Wei^{1†}, LI Ning²

(1. School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture & Technology, Xi'an 710055, China;

2. Hualu Engineering & Technology Co Ltd, Xi'an 710065, China)

Abstract: To improve the ductile failure mode and seismic performance of concrete hollow block masonry walls, this study proposes techniques for strengthening these walls with high ductile concrete (HDC). Three unreinforced masonry walls (URM) and three confined walls were built, and then both types were strengthened using single-sided and double-sided HDC layers, respectively. Based on the cyclic loading tests, the failure mode, hysteretic behavior, shear strength and deformation capacity were studied to provide a theoretical basis for the design of such structural members. For the URM walls, HDC layer effectively restricted the development of diagonal cracks, improved the ductile failure mode of wall and increased the shear resistance and deformation capacity. For the confined masonry walls, the strengthened specimens had higher bearing capacity and residual strength, and the damage of the internal masonry walls was slighter. Based on relevant theory analysis, the formulas, for the shear capacity of tested specimens, were proposed. The calculated results matched well with the tested results. Therefore, it can be a reference for the calcula-

* 收稿日期:2019-07-09

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51878545), National Natural Science Foundation of China(51878545);住房和城乡建设部项目(2019-K-043), Ministry of Housing and Urban-Rural Development Project(2019-K-043)

作者简介:邓明科(1979—),男,四川南充人,西安建筑科技大学教授,工学博士

† 通讯联系人, E-mail: zhangemail@126.com

tion of the shear strength of the strengthened concrete block masonry walls.

Key words: high ductile concrete (HDC); concrete hollow block masonry; strengthened; seismic performance; shear strength

混凝土空心砌块具有自重轻、施工方便、节约土地资源等优势,因此在砌体结构中得到大量使用.由于混凝土空心砌块的抗拉强度低、墙体自重等特点,在强震作用下此类结构构件容易发生破坏,造成较大的人员伤亡和经济损失.因此对既有砌块砌体房屋进行有效的抗震加固具有重要意义.

砌体结构的传统加固方法有:钢筋混凝土面层加固法、混凝土板墙加固法及外加圈梁和构造柱加固法等^[1],这些方法可提高砌体结构的抗震性能,但存在施工难度大、工期长并且对原结构的扰动较大等缺点.近年来,新的加固方法也已应用于既有结构的加固中^[2-3],这些加固措施可显著提高构件的抗震性能并且克服传统加固方法中的不足,但耐久性较差、在潮湿低温环境下不便于施工等因素限制了此类材料在实际工程中的推广应用.

工程水泥基复合材料(Engineered Cementitious Composite, ECC)最早由美国 Michigan 大学的 Li 和 Leung^[4]提出,它在拉伸和剪切荷载作用下呈现出受拉应变硬化和多裂缝开展特征^[5,6].目前, ECC 已被应用于桥梁、公路及隧道等^[7,8]实际工程中,并取得了良好的效果.为推广 ECC 在加固工程中的应用,本课题组采用 ECC 设计理论制备了高延性混凝土(high ductility concrete, HDC),并将其应用于砖砌体墙与混凝土构件的加固修复^[9,10],且取得良好的加固效果.在此基础上,本文提出采用 HDC 面层加固混凝土空心砌块砌体墙,对 4 个 HDC 面层加固试件与 2 个对比试件进行低周反复荷载试验,研究各试件的破坏模式、滞回性能及承载力,为该类型结构的加固设计提供试验和理论依据.

1 试验概况

1.1 试验材料

本次试验墙体均采用 MU10 混凝土空心砌块, Mb7.5 混合砂浆砌筑,砌筑砂浆的厚度为 10 mm,采用饱满灰缝的砌筑方式.试验选用的混凝土块的尺寸为 390 mm×190 mm×190 mm,单排双孔,孔洞尺寸

为 130 mm×130 mm,孔洞率为 46%.选用的混凝土空心砌块辅助块型的尺寸分别为 290 mm×190 mm×190 mm, 190 mm×190 mm×190 mm.试件的加载梁及构造柱均采用 C25 细石混凝土浇筑,空心砌块的抗压强度(f_1)按照《混凝土砌块和砖试验方法》^[11]测定;砌块砂浆的抗压强度(f_2)及构造柱混凝土的抗压强度($f_{cu,m}$)分别采用边长为 70.7 mm 和 100 mm 的立方体试块测定.

HDC 的主要成分为水泥、粉煤灰、砂、矿物掺合料和 PVA 纤维等,其配合比见表 1. PVA 纤维的体积参量为 2%,各项力学指标见表 2; HDC 的单轴抗拉强度($f_{t,HDC}$)采用 350 mm×50 mm×15 mm 的狗骨型拉伸试件测试,测试结果如图 1 所示;其抗压强度($f_{cu,HDC}$)采用边长为 100 mm 的立方体试块测得;所有试块与墙体同条件养护 28 d 以后测试,其结果见表 3.

表 1 HDC 的配合比

					kg/m ³
水泥	粉煤灰	砂	水	PVA 纤维	减水剂
593	593	427	344	26	8

表 2 PVA 各项性能指标

长度/mm	直径/ μm	抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa	伸长率/%	密度/(g·cm ⁻³)
12	39	1 600	40	7	1.3

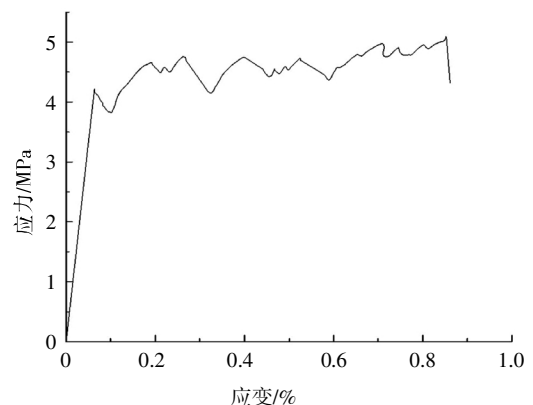


图 1 单轴拉伸试验应力-应变图

Fig.1 Stress-strain curve of uniaxial tensile strength

表 3 材料力学性能

Tab.3 Mechanical properties of material

f_t /MPa	f_2 /MPa	$f_{cu,m}$ /MPa	$f_{cu,HDC}$ /MPa	$f_{t,HDC}$ /MPa
14.83	10.49	37.81	54.14	5.13

注:表中各材料的力学性能指标为每组试验中试件的平均值.

1.2 试件设计

本次试验设计了 3 片无构造柱墙体及 3 片带构造柱墙体,分别对这两类墙体采用 HDC 面层进行单面与双面加固. 本次试验的竖向荷载均取为 0.8 MPa,以模拟实际工程中,部分多层砌块砌体结构底层空间较大,墙体数量较少,底部墙体承受竖向压应力较大的情况,并且通过与无筋砌体墙对比,分析构造柱对墙体破坏模式及加固效果的影响. 各试件编号及加固方式详见表 4.

表 4 试件加固方案

Tab.4 The retrofitted form of specimens

试件编号	加固方案	竖向荷载/kN
W-0	无构造柱未加固墙体	365
W-1	无构造柱单面 HDC 加固墙体	365
W-2	无构造柱双面 HDC 加固墙体	365
WG-0	带构造柱未加固墙体	365
WG-1	带构造柱单面 HDC 加固墙体	365
WG-2	带构造柱双面 HDC 加固墙体	365

为提高墙体与 HDC 面层的粘结性能,加固之前对砌体水平灰缝进行勾缝处理(剔凿灰缝,深度 8~10 mm),并在墙体表面涂抹界面剂,最后压抹 HDC 面层;单面加固采用的 HDC 厚度为 20 mm,双面加固采用的 HDC 厚度均为 15 mm. 在加固过程中, HDC 面层未涂抹至加载梁的顶面,水平荷载与竖向荷载均直接作用于加载梁上,未作用于加固面层,试验通过加固面层与墙体间的相互作用将力传递至 HDC 面层,使其参与受力.

试件长度和高度按 1:2 缩尺设计,墙厚为 190 mm,墙体的高宽比为 0.67,构造柱截面尺寸为 200 mm×190 mm,构造柱的纵筋为 4 ϕ 8,箍筋为 ϕ 6@200 mm,试件的详细尺寸如图 2 所示.

1.3 加载装置及测试内容

本次试验采用拟静力试验加载方法^[12],并采用荷载-变形双控制分级加载. 首先,在试件顶部施加竖向荷载并在试验过程中保持荷载恒定. 试验前先预先施加预估开裂荷载的 20%并且反复推拉两次,

以检查试验仪器是否可以正常运行,试件在加载初期采用荷载控制并分级加载,当荷载-位移滞回曲线明显弯曲以后改为位移控制,每级增加的位移值为 1 mm,直至墙体承载能力下降至极限荷载的 85%以下,停止试验加载. 试验加载装置如图 3 所示,在墙体加载梁中部布置一个位移计,测试墙体的顶点水平位移;在墙体底梁处布置一个位移计,以测试墙体的整体滑移;在墙面一侧沿对角线方向布置两个位移计,以测试墙体的剪切变形.

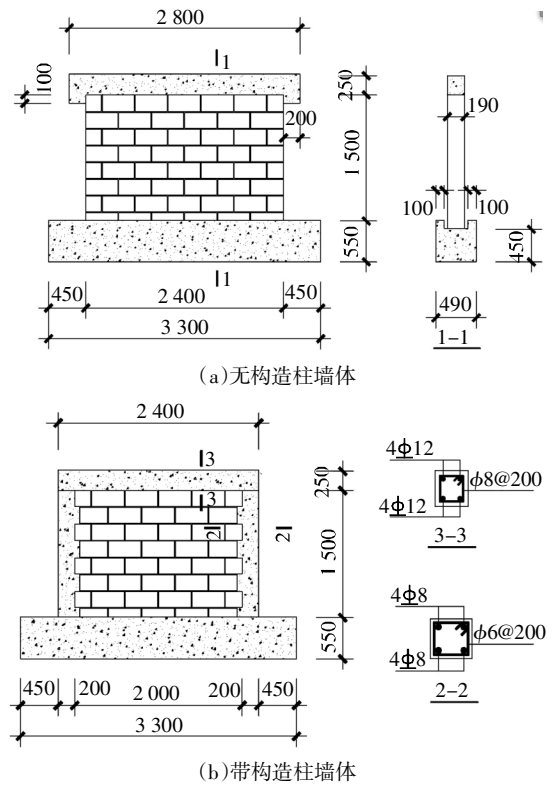


图 2 试件尺寸(mm)

Fig.2 Details of specimens

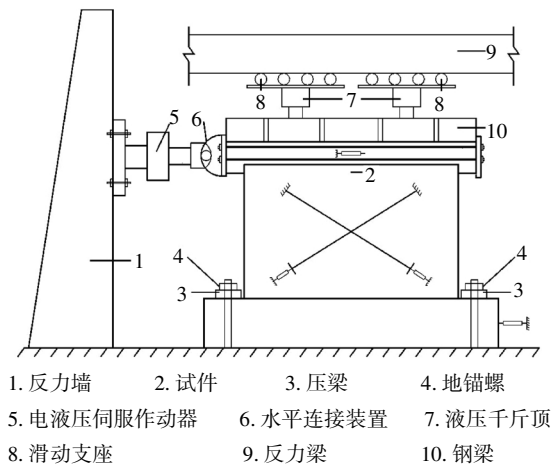


图 3 加载装置

Fig.3 Test set-up

2 试验结果及分析

2.1 破坏过程

为便于试验现象描述,规定试件加载过程的荷载与位移在推方向上为正值,在拉方向上为负值.

2.1.1 无构造柱墙体

1)试件 W-0(未加固)

当试件加载至-60 kN 时,试件底部出现长约 250 mm 的水平裂缝;加载至 200 kN 时,墙体的荷载-位移曲线明显弯曲,此后试件按位移控制加载.

当试件加载至 2 mm 时,墙面出现阶梯形裂缝,墙体根部出现数条受压裂缝;加载至 3 mm 时,试件达到峰值荷载,墙体的主斜裂缝与根部受压裂缝变宽;试件加载至 5 mm 时,墙体主斜裂缝宽度达到 6 mm,根部砌块压碎、剥离,此时试件停止加载.见图 4.

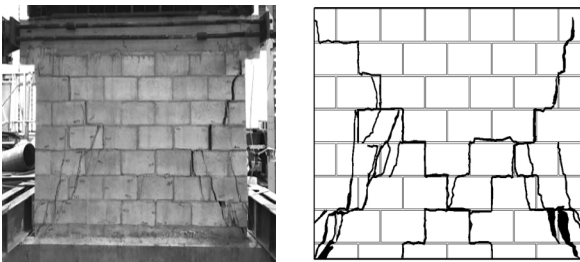


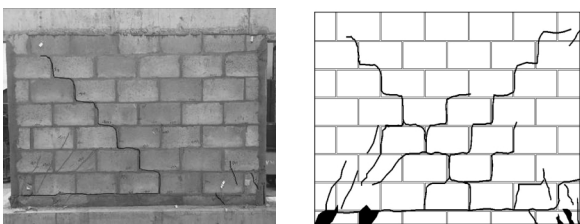
图4 试件 W-0 破坏形态

Fig.4 The failure mode of specimen W-0

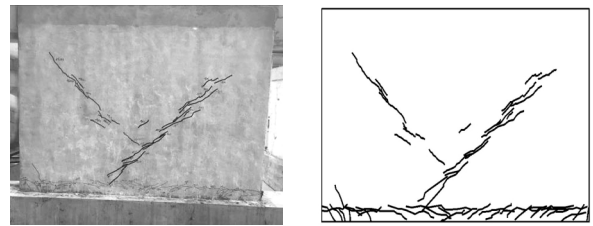
2)试件 W-1(单面 HDC 加固)

当加载至 120 kN 时,墙体底部出现水平裂缝;加载至 260 kN 时,未加固墙面出现阶梯形裂缝,此后,试件按位移控制加载.

加载至 3 mm 时,未加固墙面根部出现受压裂缝,两侧水平裂缝延伸至中和轴附近;加载至 4 mm 时,试件达到峰值荷载,未加固墙面两侧斜裂缝相交,HDC 面层出现多条细密剪切斜裂缝;加载至 6 mm 时,墙体底部水平裂缝宽度达到 5 mm,且墙体根部 HDC 面层局部剥落,随后试件停止加载.见图 5.



(a)未加固墙面裂缝分布



(b)HDC 加固面层裂缝分布

图5 试件 W-1 破坏形态

Fig.5 The failure mode of specimen W-1

3)试件 W-2(双面 HDC 加固)

当试件加载至 180 kN 时,底部出现水平裂缝;加载至 280 kN 时,荷载-位移曲线明显弯曲,此后试件按位移控制加载.

当加载至 1 mm 时,试件底部水平裂缝延伸至中和轴附近;加载至 5 mm 时,试件达到峰值荷载;随后位移增加,墙体产生明显的滑移,加载至 8 mm 时,底部水平裂缝宽度约为 8 mm,根部 HDC 面层局部剥落,此时,荷载明显下降,试件停止加载.见图 6.



图6 试件 W-2 破坏形态

Fig.6 The failure mode of specimen W-2

2.1.2 带构造柱墙体

1)试件 WG-0(未加固)

当试件加载至-280 kN 时,构造柱底部开裂,墙体出现阶梯形裂缝,随后试件按位移控制加载.

当试件加载至 1 mm 时,构造柱沿高度方向出现数条水平裂缝,墙体沿灰缝出现多条新的阶梯形裂缝;加载至 2 mm 时,原有的斜裂缝沿墙体对角线方向延伸,并且相交;此后位移增加,构造柱根部出现受压裂缝,当加载至 7 mm 时,试件达到峰值荷载,墙体中部的斜裂缝变宽;当试件加载至-11 mm 时,承载力明显下降,试件停止加载.见图 7.

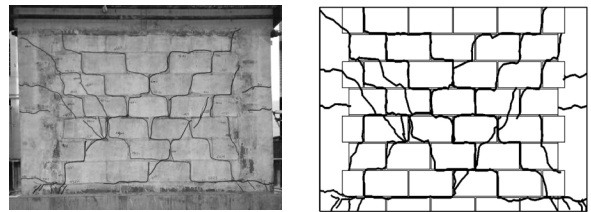


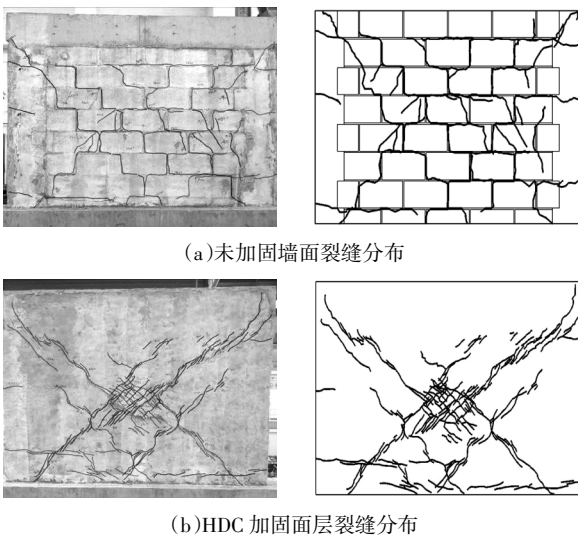
图7 试件 WG-0 破坏形态

Fig.7 The failure mode of specimen WG-0

2) 试件 WG-1(单面 HDC 加固)

当试件加载至-260 kN 时, 墙体底部出现长约 100 mm 的水平裂缝; 加载至-320 kN 时, 未加固墙面出现阶梯形裂缝, 随后试件按位移控制加载。

当试件加载至 2 mm 时, 未加固墙面形成 X 型交叉斜裂缝, HDC 加固层出现细微的斜裂缝; 加载至 4 mm 时, 试件达到峰值荷载, HDC 加固层的斜裂缝增多并不断延伸, 形成数条交叉斜裂缝; 试件在加载后期, 未加固墙面的裂缝变宽, HDC 加固层的主斜裂缝相交处面层局部外鼓、剥离; 当加载至 10 mm 时, 承载力明显下降, 试件停止加载。见图 8。



(a) 未加固墙面裂缝分布

(b) HDC 加固面层裂缝分布

图 8 试件 WG-1 破坏形态

Fig.8 The failure mode of specimen WG-1

3) 试件 WG-2(双面 HDC 加固)

当试件加载至 360 kN 时, 墙体底部出现长约 200 mm 的水平裂缝。当加载至 460 kN 时, 荷载-位移曲线明显弯曲, 随后试件按位移控制加载。

加载至 1.5 mm 时, 试件达到峰值荷载; 加载至 -2 mm 时, HDC 面层出现了细微剪切斜裂缝, 随后斜裂缝延伸; 加载至 8 mm 时, 墙体底部的水平裂缝宽度约为 8 mm, 此时, 墙体产生明显的滑移, 荷载明显下降, 试验停止加载。见图 9。



图 9 试件 WG-2 破坏形态

Fig.9 Failure mode of specimen WG-2

2.2 破坏形态分析

根据试件的破坏过程, 对其破坏形态进行分析, 可得以下结论:

1) 试件 W-0 由于抗主拉应力不足, 墙面出现阶梯形斜裂缝; 随后荷载增加, 墙体的主斜裂缝变宽, 并且延伸至墙体根部, 致使根部砌块出现压碎、剥离现象, 最终试件发生剪压破坏, 表现出明显的脆性破坏特征。

2) 试件 W-1 中, HDC 良好的拉伸变形能力提高了试件的抗主拉强度, 有效延缓了墙体斜裂缝的形成与延伸, 并且限制了墙体根部的压碎, 明显减轻了墙面的损伤; 峰值荷载时, HDC 面层出现剪切斜裂缝, 底部水平裂缝变宽并且延伸至中和轴附近, 最终试件发生弯剪破坏。

3) HDC 面层提高了试件 W-2 的抗主拉强度, 而使墙体底部形成受剪薄弱面; 随着试件水平荷载的增大, 墙体底部出现弯曲裂缝, 但 HDC 面层始终未出现斜裂缝, 最终由于弯曲裂缝的延伸, 致使试件底部抗剪强度不足而发生剪切滑移破坏。

4) 试件 WG-0 与 WG-1 的破坏形态相似, 构造柱底部首先出现水平裂缝, 墙体因为主拉应力的增加而产生阶梯型裂缝; 最终, 由于斜裂缝的开展而发生对角剪切破坏; 单面加固试件 WG-1 的 HDC 面层破坏严重, 并且在加载后期出现剥离现象, 但内部墙体相比试件 WG-0 损伤较小, 且构造柱的约束作用, 使墙体破坏时仍可保持良好的整体性。

5) 试件 WG-2 中, 双面 HDC 加固层提高了试件的对角剪切强度, 峰值荷载时墙面开裂, 且在整个加载过程中仅出现数条斜裂缝; 墙体由于抗弯强度不足, 使得底部出现水平裂缝且裂缝不断延伸、变宽, 临近破坏时试件沿底部水平裂缝产生滑移, 最终墙体发生弯剪破坏。

2.3 滞回曲线

图 10 给出了 6 个试件的荷载-位移滞回曲线, 由图 10 分析可得:

1) 墙体在开裂前, 荷载-位移曲线无明显变化, 基本成直线; 开裂后, 试件逐渐进入弹塑性变形阶段, 曲线的斜率开始逐渐减小。

2) 试件 W-0 的弹性变形能力较小; 峰值荷载以后, 试件的承载力迅速降低并且产生了较大的塑性变形, 试件的破坏现象较为严重, 残余变形较大, 且滞回环数量较少。

3) 加固试件 W-1 由于墙面斜裂缝及水平裂缝的不断开展, 试件的残余变形增加, 但 HDC 良好的

拉伸变形能力,有效限制了墙面斜裂缝的延伸,减缓了墙角的压碎,因此在加载后期,试件的残余变形相对较小,滞回环数量较多,其变形与耗能能力明显增强.

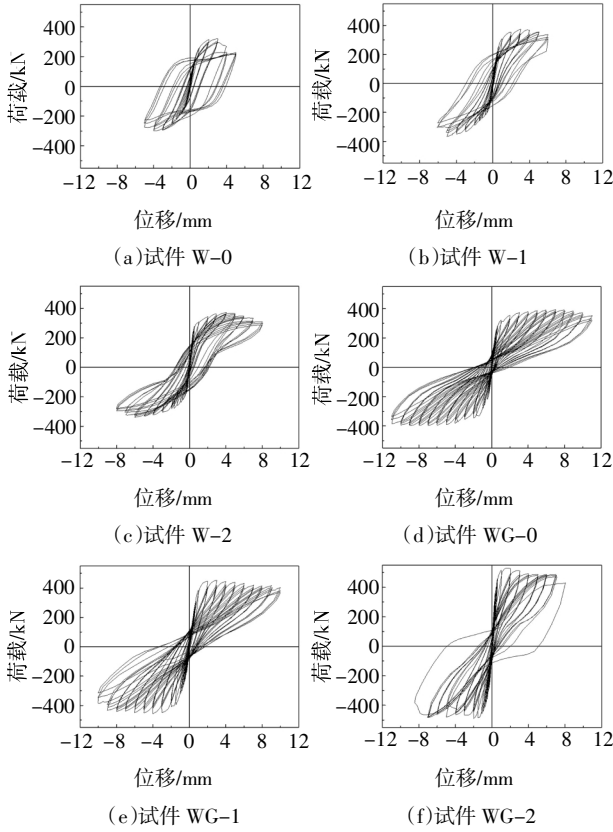


图 10 荷载-位移滞回曲线
Fig.10 Load-displacement hysteretic curves

4) 试件 W-2 在峰值荷载后沿底部水平裂缝产生滑移,并且在整个加载过程中,上部墙体未出现损伤;试件在卸载后的残余变形相比对比试件及单面加固试件有所减小,且滞回环的数量明显增加,表现出较好的变形和耗能能力.

5) 构造柱限制了墙体的滑移及墙面裂缝的开展,因此试件 WG-0 卸载以后残余变形较小;墙体在发生较大的剪切变形之后,滞回环出现捏拢现象,接近弓型;构造柱的约束作用使试件发生较大的剪切变形,时滞回环仍相对饱满.

6) 试件 WG-1, WG-2 由于构造柱与 ECC 面层的约束作用,在加载初期,墙体卸载以后的残余变形较小,滞回环基本呈直线;此后,由于裂缝的开展,试件的残余变形逐渐增加,滞回环出现捏拢现象;试件 WG-1 与 WG-0 的滞回特性相似,试件 WG-2 由于弯曲裂缝的开展导致墙体底部抗剪强度不足,墙体

在临近破坏时产生水平滑移,残余变形增大;产生滑移之后,荷载降到了极限荷载的 85%以下,试验停止加载,因此所能观察到的滞回环数量较少.

2.4 骨架曲线

将试件滞回曲线中各级加载峰值的点相连,得到每个试件的骨架曲线,如图 11 所示.

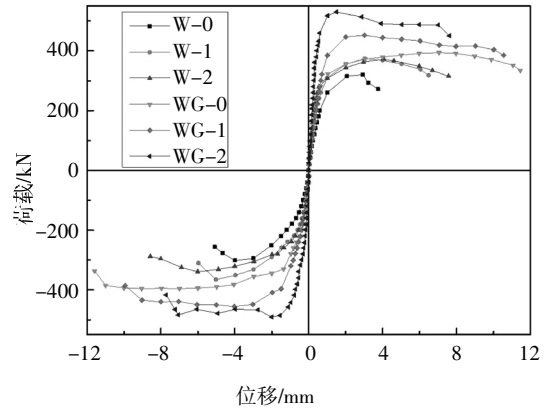


图 11 荷载-位移骨架曲线

Fig.11 Load-displacement skeleton curves

采用“能量等值法”确定墙体的屈服荷载与屈服位移;取试件出现第一条明显的可见裂缝时所对应的荷载和位移确定其开裂荷载和开裂位移;取试件在荷载下降到峰值荷载 85%时对应的位移确定其极限位移.各试件特征点的荷载、位移见表 5.

砌体墙属于脆性构件,墙体在出现裂缝以后其变形由沿裂缝间的摩擦变形所致,而不是全部来自试件本身的弹塑性变形或塑性变形^[13];并且剪切变形不存在准确的屈服点,因此本文中未采用延性系数来评价墙体的延性.根据图 11 和表 5,对 6 个试件的承载力和变形能力进行分析可得:

1) 顶梁与构造柱形成的框架限制了墙体的滑移与斜裂缝的延伸,并且承担部分竖向荷载,减缓了墙角的压碎现象,明显提高了墙体的承载力与变形能力;试件 WG-0 的开裂荷载为试件 W-0 的 4.67 倍,极限荷载与极限位移分别为试件 W-0 的 1.27 倍和 2.61 倍.

2) 对于无构造柱试件, HDC 面层提高了墙体的开裂荷载、极限荷载以及极限变形,改善了墙体的脆性破坏模式;加固试件 W-1、W-2 的开裂荷载分别为试件 W-0 的 2 倍和 3 倍,极限位移分别提高了 41%和 83%,承载力分别提高了 19%和 14.3%;由于材料间的离散性以及试件破坏形态的改变,双面加

表5 试件特征点试验结果

Tab.5 Test results at characteristic points of specimens

试件编号	开裂荷载 P_{cr}/kN	开裂位移 Δ_{cr}/mm	屈服荷载 P_y/kN	屈服位移 Δ_y/mm	极限荷载 P_u/kN	峰值位移 Δ_p/mm	极限位移 Δ_u/mm	位移延性 系数 μ	极限位移角 θ_u
W-0	60	0.14	254.59	1.54	310.95	3.46	4.42	2.92	1/367
W-1	120	0.23	306.89	1.61	369.94	4.03	6.23	3.70	1/261
W-2	180	0.31	297.01	1.53	355.54	5.04	8.07	5.27	1/201
WG-0	280	0.80	339.26	1.65	394.83	8.04	11.52	6.98	1/141
WG-1	320	0.85	396.63	1.35	453.95	3.52	10.23	7.58	1/159
WG-2	360	0.43	437.76	0.69	510.12	1.74	7.67	11.11	1/212

注:表中荷载、位移均取试件推、拉两个方向加载的平均值;位移延性系数 $\mu = \Delta_u/\Delta_y$;极限位移角 $\theta_u = \Delta_u/H$, H 为墙体加载点的高度。

固试件 W-2 的屈服荷载以及极限荷载相比试件 W-1 略有减小;加固试件 W-1、W-2 的极限位移角均有明显的增加。

3)带构造柱试件 WG-1、WG-2 的承载力相比试件 WG-0,分别提高了 15%和 29%,开裂荷载分别提高了 14.3%和 28.6%。表 5 中,试件 WG-1、WG-2 的峰值位移相比试件 WG-0 有较大幅度的降低,并且加固试件的极限位移分别减小了 11%和 33%,这主要是因为 HDC 面层增加了试件的刚度,而刚度的增加减小了墙体的变形,并且构造柱限制了墙体沿裂缝间的张开及滑移,因此峰值荷载所对应的位移以及极限位移都有所减小。

4)加固试件的骨架曲线中(如图 11),峰值荷载以后产生了较大的变形,这是由于 HDC 面层限制了内部墙体的损伤,使得承载力退化相对缓慢,而且 HDC 面层改变了墙体的脆性破坏模式,因此加固试件峰值荷载以后产生了相对较大的变形。

5)对于试件 W-1、W-2, HDC 面层增加了墙体的刚度,但其峰值位移相比试件 W-0 有所增加,这是由于无筋砌体墙缺乏一定的构造措施阻止墙体中裂缝的张开与墙体的滑移,所以在峰值荷载时,加固试件沿裂缝产生了不同程度的滑移,因此其峰值位移增加。

6)HDC 加固试件的水平荷载下降至峰值荷载的 85%时,试件停止加载,此时加固试件的残余承载力接近甚至超过了对比试件的峰值荷载;此外, HDC 加固试件发生剪切滑移破坏时,上部墙体的破坏程度较轻,在残余变形较小的情况下,这种破坏形态对砌体结构的抗震有利。

2.5 耗能分析

表 6 列出了各试件达到屈服荷载、峰值荷载和

破坏荷载时的累积耗能。

由表 6 分析可得:

1)对于无构造柱试件, HDC 面层改善了墙体的破坏模式,单面加固试件与双面加固试件的累计耗能分别提高了 56%和 111%。

2)对于带构造柱试件,加固试件的变形有所减小,而变形的减小限制了构造柱中钢筋参与耗能,因此加固试件的耗能能力未得到明显的改善;但是,加固试件的剩余承载力较高,墙体的变形与耗能能力并未得到充分发挥。

表6 试件的累积耗能

Tab.6 Cumulated energy consumed of specimens

试件 编号	累积耗能/(kN·mm)		
	屈服点	峰值点	破坏点
W-0	336	2 661	12 581
W-1	593	4 866	19 636
W-2	673	4 926	26 558
WG-0	499	15 006	35 143
WG-1	668	4 736	39 210
WG-2	1 071	2 355	31 310

3 承载力计算

本次试验中墙体的受剪承载力 V_u 主要由无筋砌体墙的受剪承载力 V_m , 构造柱的受剪承载力 V_c 及 HDC 面层的受剪承载力 V_{HDC} 组成:

$$V_u = V_m + V_c + V_{HDC} \quad (1)$$

3.1 无筋砌体墙的受剪承载力

对于沿通缝或沿阶梯形截面破坏的砌块砌体墙,其受剪承载力可按式计算^[14]:

$$V_m = (f_{v0,m} + \alpha\mu\sigma_0)A \quad (2)$$

$$\mu = 0.83 - 0.7 \frac{\sigma_0}{f_m} \quad (3)$$

式中: $f_{v0,m}$ 为砌块砌体抗剪强度平均值; α 为不同种类砌体的修正系数,取0.64^[15]; μ 为剪压复合受力影响系数,按式(3)计算; σ_0 为墙体的平均压应力; f_m 为砌块砌体抗压强度平均值; A 为砌块砌体墙的横截面面积。

3.2 构造柱的受剪承载力

由试验现象可得,峰值荷载时,约束墙体的构造柱根部仅出现了水平裂缝,因此受剪承载力的计算可忽略箍筋的影响,参考下式^[16]计算:

$$V_c = 0.7\psi f_{t,m} A_c + 0.1f_{y,m} A_s \quad (4)$$

式中: $f_{t,m}$ 为构造柱混凝土轴心抗拉强度平均值, $f_{t,m} = 0.395f_{cu,m}^{0.55}$ ^[17]; ψ 为混凝土柱的抗剪强度折减系数; A_c 为构造柱截面面积; $f_{y,m}$ 为构造柱纵筋的屈服强度平均值; A_s 为构造柱纵筋截面面积。

3.3 HDC 面层的受剪承载力计算

目前,对于HDC面层加固砌体墙的相关理论分析较少,本文参考《砌体结构加固设计规范》中用来加固砌体墙的混凝土面层的受剪承载力计算公式计算HDC面层的受剪承载力^[18],其公式如下:

$$V_{HDC} = 0.44\alpha_c f_{t,HDC} bh \quad (5)$$

式中: $f_{t,HDC}$ 为HDC轴心抗拉强度平均值; α_c 为HDC的强度利用系数,对混凝土小型空心砌块砌体取 $\alpha_c = 0.7$; b 为HDC面层厚度(双面加固取面层厚度之和); h 为墙体水平方向长度。

如表7所示,各试件的受剪承载力计算值与试验值基本吻合,但部分试件的计算值偏大,存在误差;加固后墙体的破坏形态有所改变,由于试件数量较少,文中未根据每个试件的破坏形态提出对应的承载力计算公式;因此,相关的试验以及理论分析将会在后期展开进一步的研究。

表7 计算值与试验值的比较

Tab.7 Comparison between calculated values and test values

试件编号	V_i /kN	P_i /kN	P_i/V_i
W-0	279.13	310.95	1.11
W-1	354.97	369.94	1.04
W-2	392.89	355.54	0.90
WG-0	380.08	394.83	1.04
WG-1	455.92	453.95	0.99
WG-2	493.84	510.12	1.03

注: V_i 为墙体受剪承载力计算值; P_i 为墙体的受剪承载力试验值。

4 结论

1)对于无筋砌块砌体墙,HDC面层可提高墙体的水平承载力、侧向刚度、变形与耗能能力,改善混凝土砌块墙体的脆性破坏模式;对于带构造柱墙体,加固试件的侧向刚度和承载力大幅提高;加固墙体的残余承载力接近甚至高于对比试件的峰值荷载,且墙体的损伤较小,有利于结构震后修复。

2)加固试件发生剪切滑移破坏时,上部墙体损伤较小,可保持较好的整体性;峰值荷载后墙体的强度退化相对缓慢,其破坏模式具有一定延性。在地震作用下,这种破坏形态不影响墙体承受竖向荷载。

3)构造柱的设置可增强砌体墙的整体性,提高墙体的抗震性能,并且构造柱与基础相连,提高了墙体的底部抗弯能力,限制了加固墙体发生滑移,使得加固试件的破坏向墙面转移,因此,HDC加固面层的利用率得到了提高。

4)HDC面层加固混凝土空心砌块砌体墙的施工简便、节省工期,通过进一步的研究,可作为提高墙体抗震性能的一种有效加固措施在地震区推广应用。

5)通过设置芯柱或构造柱可提高混凝土空心砌块墙体的抗震性能,且构造方式、构造柱的间距、砌筑材料的强度及竖向应力等均对墙体的力学性能有影响。本文只研究了以上部分因素对墙体抗震性能及HDC面层加固效果的影响,其他因素的影响将在后续研究中陆续开展。

参考文献

- [1] JGJ 116-2009 建筑抗震加固技术规程[S].北京:中国建筑工业出版社,2009:10-14.
JGJ 116-2009 Technical specification for seismic strengthening of building[S]. Beijing:China Architecture Industry Press,2009:10-14. (In Chinese)
- [2] 曾令宏,蒋朝阳. HPFL加固受火RC梁刚度及挠度研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2017,44(5):37-43.
ZENG L H,JIANG C Y. Study on reinforced concrete beam stiffness and deflection strengthened with high-performance ferrocement laminate after the fire[J]. Journal of Hunan University(Natural Sciences),2017,44(5):37-43. (In Chinese)
- [3] 徐梅芳. HPFL加固混凝土空心砌块砌体抗压与抗震性能研究[D].长沙:湖南大学土木工程学院,2011:27-57.
XU M F. Experimental study on compressive and seismic performance of concrete of small-sized hollow block masonry reinforced

- with HPFL [D]. Changsha: College of Civil Engineering, Hunan University, 2011: 27—57. (In Chinese)
- [4] LI V C, LEUNG C K Y. Steady-state and multiple cracking of short random fiber composites [J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 1992, 118(11): 2246—2264.
- [5] LI V C. On engineered cementitious composites (ECC)[J]. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 2003, 1(3): 215—230.
- [6] LI V C, WANG S, WU C. Tensile strain-hardening behavior of polyvinyl alcohol engineered cementitious composite (PVA-ECC) [J]. *ACI Materials Journal—American Concrete Institute*, 2001, 98(6): 483—492.
- [7] KUNIEDA M, ROKUGO K. Recent progress on HPRCC in Japan [J]. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 2006, 4(1): 19—33.
- [8] 徐世焯, 李贺东. 超高韧性水泥基复合材料研究进展及其工程应用[J]. *土木工程学报*, 2008, 41(6): 45—60.
XU S L, LI H D. A review on the development of research and application of ultra high toughness cementitious composites [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2008, 41(6): 45—60. (In Chinese)
- [9] 邓明科, 潘姣姣, 韩剑, 等. 高延性混凝土加固剪力墙抗震性能试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2019, 40(11): 45—55.
DENG M K, PAN J J, HAN J, *et al.* Experimental study on seismic behavior of shear wall strengthened with high ductile concrete [J]. *Journal of Building Structures*, 2019, 40(11): 45—55. (In Chinese)
- [10] 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): 10—19.
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): 10—19. (In Chinese)
- [11] GB/T 4111—2013 混凝土砌块和砖试验方法[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013: 14—17.
GB/T 4111—2013 Test methods for the concrete block and brick[S]. Beijing: China Architecture Industry Press, 2013: 14—17. (In Chinese)
- [12] JGJ/T 101—2015 建筑抗震试验方法规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015: 10—18.
JGJ/T 101—2015 Specification of testing methods for earthquake resistant building [S]. Beijing: China Architecture Industry Press, 2015: 10—18. (In Chinese)
- [13] 王欣. 纤维复合材料加固砌体墙片的抗震试验研究 [D]. 上海: 同济大学土木工程学院, 2003: 13—31.
WANG X. Experimental study on seismic behavior of masonry walls strengthened with fiber reinforced composites [D]. Shanghai: College of Civil Engineering, Tongji University, 2003: 13—21. (In Chinese)
- [14] 施楚贤. 砌体结构理论与设计[M]. 第3版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014: 76—78.
SHI C X. Masonry structure theory and design[M]. 3rd ed. Beijing: China Architecture Industry Press, 2014: 76—78. (In Chinese)
- [15] JGJ/T 14—2011 混凝土小型空心砌块建筑技术规程 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011: 28—29.
JGJ/T 14—2011 Technical specification for concrete small-sized hollow block masonry buildings[S]. Beijing: China Architecture Industry Press, 2011: 28—29. (In Chinese)
- [16] 梁建国, 张望喜, 郑勇强. 钢筋混凝土-砖砌体组合墙抗震性能 [J]. *建筑结构学报*, 2003, 24(3): 61—69.
LIANG J G, ZHANG W X, ZHENG Y Q. Seismic performance of composite walls made of reinforced concrete and brick masonry [J]. *Journal of Building Structures*, 2003, 24(3): 61—69. (In Chinese)
- [17] GB 50010—2010 混凝土结构设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010: 286—288.
GB 50010—2010 Code for design of concrete structures [S]. Beijing: China Architecture Industry Press, 2010: 286—288. (In Chinese)
- [18] GB 50702—2011 砌体结构加固设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011: 25—26.
GB 50702—2011 Code for design of strengthening masonry structures[S]. Beijing: China Architecture Industry Press, 2011: 25—26. (In Chinese)