

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2025.06.013

# UHP-ECC 加固砖砌体墙抗震性能 试验研究及应用

张 静

(福州市房地产开发有限责任公司,福建 福州 350005)

**摘要:** 为探究超高性能工程用水泥基复合材料(UHP-ECC)对砖砌体墙的面层加固效果,选取了3片240 mm厚砖墙进行拟静力试验,其中2片为面层厚度10 mm的加固砖墙试件,1片未加固作为对照组,并在试验基础上,以某工程为背景,分析了面层加固施工技术。结果表明:加固面层对墙体形成了约束,有效抑制墙体开裂和破坏,加固后墙体开裂荷载与峰值荷载分别提升了148%与125%。工程应用表明,制备的UHP-ECC具有优异的力学性能以及和易性,人工施工上墙操作方便;UHP-ECC材料成本适中,面层加固方法综合效益好。

**关键词:** 超高性能工程用水泥基复合材料(UHP-ECC);面层加固;拟静力试验;施工技术

中图分类号: TU362

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2025)06-0093-07

## Experimental Study and Application on Seismic Performance Brick Masonry Wall with UHP-ECC

ZHANG Jing

(Fuzhou Real Estate Development Co., Ltd., Fuzhou, Fujian 350005, China)

**Abstract:** To explore the surface layer reinforcement effect of ultra-high performance engineering cement-based composite material (UHP-ECC) on brick masonry walls, three 240 mm thick brick walls were selected for pseudo-static tests, among which two were brick masonry wall specimens with a surface layer thickness of 10 mm, and one was not reinforced as a control group. Based on the test, the surface layer reinforcement construction technology was analyzed with a certain project as the background. The results show that the reinforced surface layer constrains the wall, effectively inhibits the cracking and failure of the wall, and the cracking load and peak load of the wall after reinforcement increase by 148% and 125% respectively. The engineering application shows that the prepared UHP-ECC has excellent mechanical properties and workability, and is convenient for manual construction and application on the wall; the material cost of UHP-ECC is moderate, and the comprehensive benefit of the surface layer reinforcement method is good.

**Keywords:** UHP-ECC; surface layer reinforcement; pseudo-static test; construction technology

既有砖砌体结构房屋存量巨大,这类房屋结构存在建设时设计标准低、通常没有设置抗震构造措施、建造年代久从而材料强度劣化等问题<sup>[1-2]</sup>,砖墙作为承重结构和抵抗水平地震作用的构件,亟需进行加固以继续使用。

传统的砖砌体结构面层加固方法包括钢筋网水泥砂浆面层加固法、RC面层加固法、钢丝绳网-聚

合物砂浆面层加固法与纤维编制网增强混凝土面层加固法等<sup>[3]</sup>。许清风等<sup>[4]</sup>研究钢筋网水泥砂浆面层加固后墙体的抗压和抗剪性能,发现双侧加固抗压承载力提高121%以上,抗剪承载力提高250%以上;付洁等<sup>[5]</sup>采用自密实RC面层加固砖砌体墙,研究表明,加固后墙体的抗剪承载力提升了80%~160%,抗侧刚度和延性均明显提升。以上这些方法

收稿日期:2025-06-24

修稿日期:2025-08-09

基金项目:福州大学横向课题“高性能混凝土(UHP-ECC)面层加固既有砖砌墙体试验与数值研究”(0050249993)

作者简介:张 静(1970—),女,硕士,高级工程师,主要从事工程管理和结构抗震技术相关研究工作。E-mail:835121292@qq.com

在一定程度上能提高墙体的承载能力,但存在施工复杂、耐久性不足、影响建筑净面积等局限<sup>[6]</sup>。

在纤维增强水泥基复合材料的应用中,邓明科等<sup>[7]</sup>与刘海平等<sup>[8]</sup>针对既有砖墙提出采用高延性纤维增强水泥基复合材料(ECC)面层法进行加固。结果表明,ECC材料有效抑制了墙体的裂缝发展并提高了耗能性能。此外,吴孝鑫等<sup>[9]</sup>提出采用超高延性混凝土(UHDC)对空斗墙进行加固,结果表明,加固后墙体的承载能力提升了223%以上,峰值位移提升了471%以上,显著改善了空斗墙脆性破坏特征。

基于UHPC的高抗压强度与ECC优异的延性,Ranade等<sup>[10]</sup>将其两者结合研发出超高性能工程用水泥基复合材料(Ultra High Performance-Engineered Cementitious Composite,简称UHP-ECC),此种材料具有优异的韧性、延性和耐久性。本文通过进一步优化材料配比,成功制备出兼具高强度与高延性,且可用于人工上墙抹面的UHP-ECC材料,其极限拉应变约为1%<sup>[11-12]</sup>。张德和等<sup>[13]</sup>针对180 mm厚砖墙,提出采用人工抹压8 mm厚UHP-ECC面层的方法进行加固,使得面层加固后的砖墙峰值承载力变为未加固墙体的两倍以上,同时延性系数也提升了60%以上。

在建筑工程中,常见的砖墙厚度为240 mm,广泛应用于多层和低层砖混结构,既适配普通粘土砖的标准规格又满足结构受力要求。本文以3片厚度为240 mm的砖砌体墙为对象开展拟静力试验,旨在进一步探究采用UHP-ECC面层加固方案对砖砌体墙抗震性能的影响。基于试验结果,对某砖砌体建筑工程制定了具体加固施工方案,并对加固材料的制备和施工工艺流程进行了详细的介绍,验证了试验加固方法能有效地在实际工程中推广应用,为同类工程加固提供参考。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 试件设计

本次试验采用三顺一丁的方式砌筑了3片240 mm厚墙体,其中1片未加固墙体作为对照组,记为UW;另外2片采用UHP-ECC面层加固的墙体作为试验组,分别定义为RW1与RW2,墙体试件参数如表1所示。墙体的尺寸为2 200 mm × 1 240 mm × 240 mm,高宽比为0.57。在墙体与上下加载梁的接触面之间铺设15 mm厚的M15水泥砂浆。在砖砌体墙砌筑并完成养护后开始进行面层加固施工,首

先在砖墙表面固定铁丝网,之后人工压抹UHP-ECC面层。基于前期预试验结论,10 mm厚的加固面层可使面层与墙体形成良好的协同工作状态<sup>[14]</sup>,因此本试验将面层厚度统一设定为10 mm。人工压抹完成后,覆盖薄膜并持续浇水养护28 d。墙体试件如图1所示,铁丝网布置如图2所示。

表1 墙体试件参数

试件	双面面层厚度	加固方法
UW	—	未加固
RW1	10 mm	双面加固
RW2		

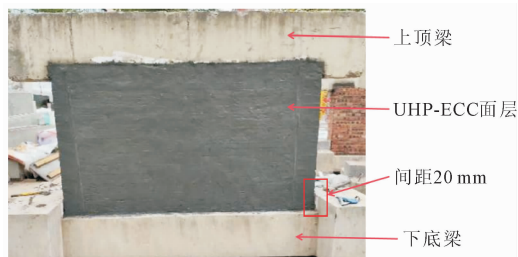


图1 墙体试件



图2 铁丝网布置

### 1.2 试验装置及加载制度

拟静力试验的加载装置由竖向加载系统与水平加载系统两部分组成,具体装置结构如图3所示。其中,竖向荷载的施加借助200 t液压千斤顶实现,水平滑动导轨随顶梁移动以固定加载点;荷载经分配钢梁中心传导,再通过顶梁上两块钢板均匀分配。水平向通过100 t MTS作动器施荷,加载点位于顶梁侧面挡板中心;试件底梁用千斤顶水平锚固防滑动。试验采用位移控制水平荷载,竖向荷载恒定为0.4 MPa。开裂前每级循环1次,位移增加0.2 mm;开裂后按位移角1/500(2.5 mm)、1/330(3.8 mm)、1/220(5.7 mm)、1/165(7.6 mm)、1/130(9.7 mm)对应的幅值各循环3次<sup>[15]</sup>。当试件的水平承载力下降至峰值荷载的85%以下,或出现严重变形现象时,即判定该试件已发生破坏,试验随即停止加载。



图3 拟静力试验

## 2 材料力学性能试验

### 2.1 UHP-ECC

配合比参考 Huang 等<sup>[16]</sup>的研究成果,原材料包括硅酸盐水泥(P. II 52.5)、硅灰、石灰石粉、石英砂、聚羧酸减水剂及有机纤维,水胶比为 0.18。有机混杂纤维体积掺量为 2%,包含聚丙烯(PP)纤维和聚乙烯(PE)纤维,两种纤维的具体参数详见表 2 和表 3。参照相关规范要求,对材料进行力学性能测定,试验测得的力学性能如表 4 所示,极限拉应变均值达到 1.01% (4 个试件有效),其中一条的受拉应力-应变曲线如图 4 所示。

表 2 PP 纤维物理性能

长度/mm	直径/mm	拉伸强度/MPa	弹性模量/GPa	极限拉应变/%
16	0.46	1000	8	20

表 3 PE 纤维物理性能

长度/mm	直径/mm	拉伸强度/MPa	弹性模量/GPa	极限拉应变/%
6	0.2	5000	100	4

表 4 UHP-ECC 力学性能

立方体抗压强度/MPa	轴心抗压强度/MPa	弹性模量/GPa	泊松比	抗拉强度/MPa
83.38	59.19	35.88	0.18	5.15

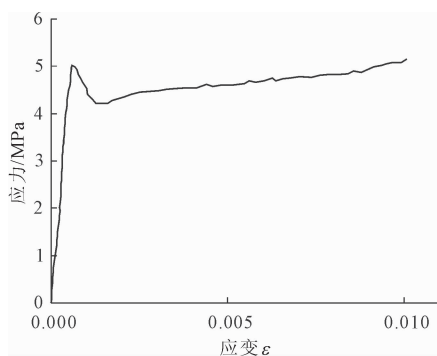


图 4 UHP-ECC 拉伸应力-应变曲线

### 2.2 砌筑材料

为模拟既有砖砌体墙,砌筑砖块使用强度等级为 MU10 的普通烧结实心砖和 M1 的黏土混合砂浆。标准砖平均尺寸测得为 235 mm × 113 mm × 52 mm。砂浆的原材料包括水泥(P. O. 32.5R)、红色黏性土和细河砂。

依据《砌墙砖试验方法》<sup>[17]</sup> (GB/T 2542—2012),对 10 块气干状态下的非成型制样砖块试件进行抗压强度测试,测得其平均抗压强度为 14.01 MPa,平均强度标准值为 9.72 MPa,变异系数为 6.27%;同时,参照《建筑砂浆基本性能试验方法标准》<sup>[18]</sup> (JGJ/T 70—2009),采用与砌筑现场相同的砂浆制成 6 个边长为 70 mm 的立方体试块并开展抗压强度试验,测得砂浆的平均抗压强度为 1.20 MPa,变异系数为 4.80%。

## 3 试验结果及分析

### 3.1 破坏模式

试件 UW 的破坏模式如图 5。试件水平位移加载至 1.20 mm 时,墙体左侧底部第一皮砖块上部的灰缝开裂,形成长度为 110 mm 初始裂缝;水平位移加载至 2.50 mm 时,墙体底部灰缝砂浆开裂加剧;水平位移加载至 3.80 mm 后,墙体少量砂浆脱落且底部原有裂缝变宽,裂缝延伸至墙体中部,形成“阶梯形”裂缝。水平位移加载至 5.70 mm 幅值后,墙体中部裂缝贯通成阶梯型斜裂缝,裂缝显著变宽。水平位移加载至 7.60 mm 时,大面积砂浆脱落,出现明显“X 形”剪切裂缝;水平位移加载至 9.7 mm 时,墙体破坏严重,水平承载力降至峰值荷载 85% 以下,停止加载。

试件 RW1、RW2 破坏模式相似,取 RW1 为例描述破坏过程。加载初期试件处于弹性阶段无裂缝出现;水平位移加载至 1.60 mm 时,墙体右侧底部 UHP-ECC 面层开裂形成初始裂缝;水平位移加载至 2.50 mm 时,墙体右侧底部初始裂缝扩展到底梁连接处致砂浆开裂;加载至 3.80 mm 时墙体底部出现水平裂缝,部分水平裂缝向上延伸;水平位移加载至 5.70 mm 时面层裂缝变宽伴随崩裂声,墙体底部出现少量竖向裂缝,栓钉被挤出;水平位移加载至 7.60 mm 时墙体摇摆幅度加大,左侧砂浆沿厚度方向开裂;水平位移加载至 9.70 mm 时右侧底部砖块压碎、面层局部脱粘,水平承载力降至峰值 85% 以下,停止加载,墙体的破坏模式如图 6。

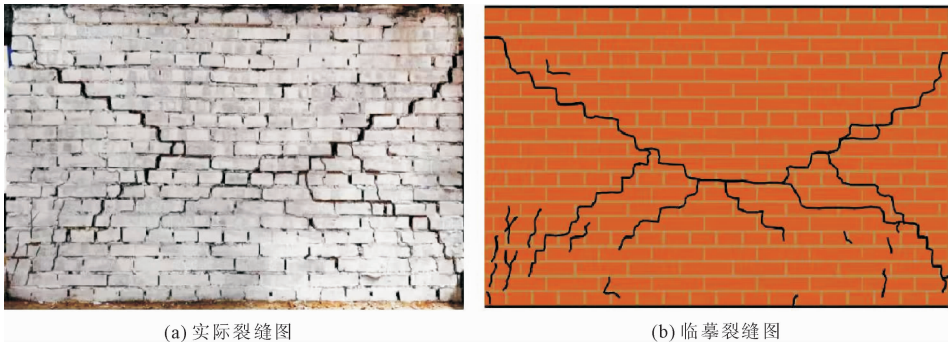


图 5 试件 UW 破坏现象

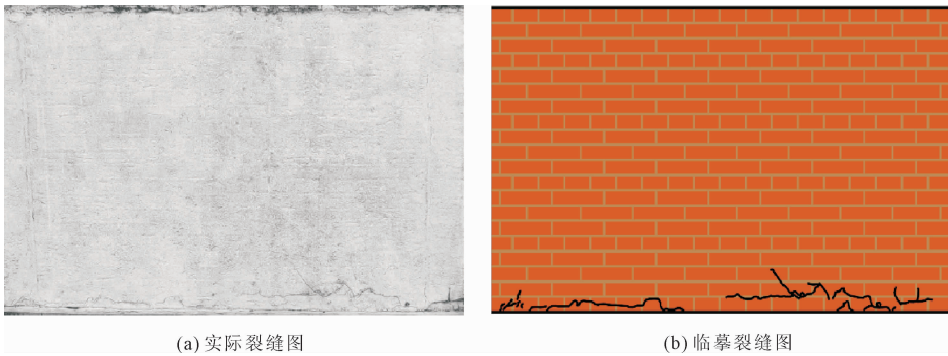


图 6 试件 RW 破坏现象

### 3.2 滞回性能

试件滞回曲线详见图 7。加载初期,各试件均处于弹性工作状态,加载与卸载过程满足线性关系,基本不存在残余变形,滞回曲线表现为狭长形态。试件开裂后进入弹塑性阶段,在该阶段内,随着加载位移的增大,滞回环面积逐步扩张,试件初始耗能能力得到提高;但加载位移进一步增大时,试件内部微裂缝持续扩展,损伤累积速率加快,导致滞回曲线斜率变小,刚度呈衰减态势。值得注意的是,在同一加载工况下,循环次数增加会造成试件荷载峰值逐步下降,与此同时,滞回曲线的面积也会相应缩减,体现出强度退化与耗能能力弱化的双重效应。最终未加固试件滞回曲线呈规则梭形,破坏模式以稳定的纯剪切破坏为主,在小位移、低循环次数的温和荷载场景下,能保持较好的耗能稳定性。

两个加固试件滞回曲线相似,均呈现显著左右不对称特征,取 RW1 为例进行分析。曲线正向残余应变比负向高,是因为正向损伤累积更突出,且损伤修复能力弱于负向。当加载达到峰值荷载后,墙体破坏模式从传统纯剪切破坏转为摇摆破坏,裂缝在循环荷载下的“张开-闭合”运动,叠加墙体围绕底部约束点的往复转动,共同大幅提升耗能能力。加载过程中,因摇摆导致试件与基础界面产生间隙,滞

回曲线出现“捏缩”效应,后期滞回曲线呈弓形,面积较大。

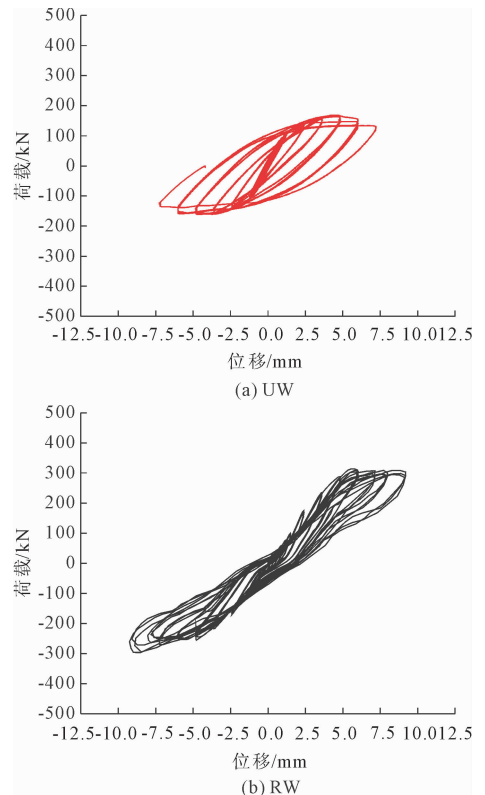


图 7 试件滞回曲线

如图 8 试件的骨架曲线主要分为弹性阶段、弹塑性阶段和破坏阶段三个阶段。曲线主要阶段和数据如表 5, 面层加固后墙体的开裂和峰值荷载均值为 263.50 kN 和 377.78 kN, 是 UW 试件平均值的 2.48 倍和 2.25 倍。

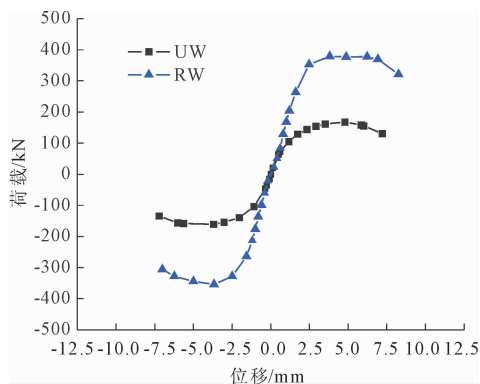


图 8 试件骨架曲线

表 5 骨架曲线阶段和数据

试件编号	开裂位移 /mm	开裂荷载 /kN	峰值位移 /mm	峰值荷载 /kN
UW	1.20	106.24	4.60	168.23
RW	1.60	263.50	6.23	377.78

## 4 工程面层加固施工技术

### 4.1 工程结构概况

办公楼建筑位于福州市, 该建筑约于 1980 建成并投入使用, 该工程为地上四层砌体结构(竖向承重墙体砖石混合布置)。底层建筑平面图如图 9。

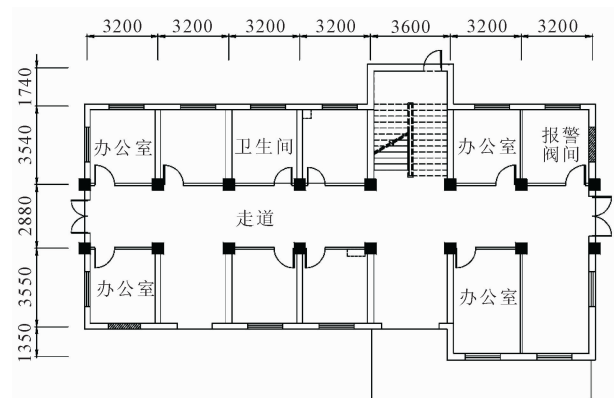


图 9 底层建筑平面图(单位:mm)

结构鉴定结果表明: 墙体砖块的强度等级为 MU10, 红黏土混合砂浆的抗压强度为 1.03 MPa。主体结构的墙体抗压承载力满足要求, 但墙体抗剪承载力不满足要求, 结构安全性等级评定为 D<sub>su</sub> 级。

工程采用 10 mm 厚的 UHP-ECC 面层加固墙

体。经结构计算分析验证, 该加固方案能显著提升结构的抗震性能, 且结构各项指标均符合设计规范的相关要求; 限于文章篇幅, 本文不对结构加固设计环节展开深入分析, 仅聚焦面层加固施工技术进行探讨。经专家论证评估, 此加固面层施工后对原建筑正常使用功能影响较小, 且整体工程造价处于合理区间, 因此最终确定采用该方案开展墙体加固作业, 本文核心也将围绕该面层加固技术展开分析。

### 4.2 UHP-ECC 制备

首先将粉体材料依次倒入搅拌机中干拌 3 min, 其次在持续搅拌的过程中, 缓慢加入水和减水剂, 搅拌 5 min 或直至拌合物呈现流动状态。最后, 加入纤维并搅拌 5 min, 具体制备过程见图 10。值得注意的是, UHP-ECC 初凝前的有效使用时长通常需严格控制在 30 min 内, 否则会导致砂浆内部水分蒸发, 同时促使胶凝材料水化反应速率大幅提升, 导致砂浆稠度快速增大、流动度损失加剧, 表现为“发黏、板结”现象, 无法正常摊铺、找平或与砖块表面有效结合, 强行施工会造成面层空鼓和开裂等问题。

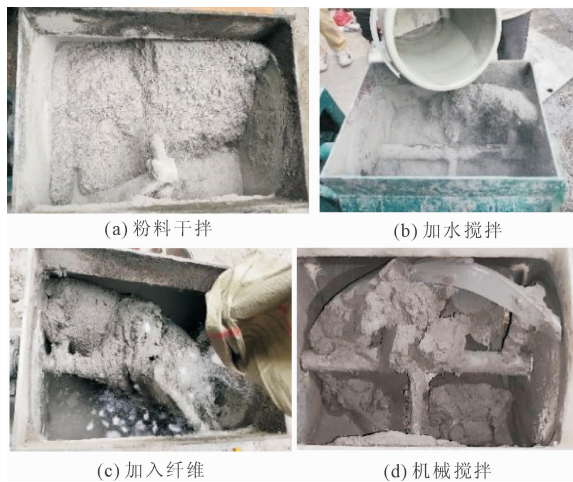


图 10 UHP-ECC 制备

此外, 利用加固施工现场相同的 UHP-ECC 材料, 制作了 3 组(每组 6 个试件) UHP-ECC 试块开展力学性能测试, 结果显示: 材料平均抗压强度为 88.12 MPa, 抗拉强度均值为 5.76 MPa; 在极限拉应变上, 基于 4 个有效试件计算得出的均值达 1.13%, 表明所制备的 UHP-ECC 材料具有优异的力学性能。

### 4.3 UHP-ECC 面层加固

现场施工采取与试验时 UHP-ECC 面层加固砖墙相同的方法, 加固前对墙体布置铁丝网构造措施, 施工步骤如图 11 所示: 在墨线标定的位置上用直径

为 7 mm 的冲击钻钻孔;用小型吹风机吹出孔中粉末,清孔完成后,用锤子将栓钉轻轻敲入孔洞内,并控制栓钉露出墙面的距离;栓钉之间采用 14 号铁丝拉结,栓钉端头采用 22 号铁丝与 14 号铁丝绑扎。在墙体两端冲筋找平并设立模板以控制面层厚度后,开始人工压抹 UHP-ECC 面层,10 mm 厚面层一遍



图 11 界面构造措施施工



图 12 UHP-ECC 面层加固

#### 4.4 墙体承载力验算

参考规范<sup>[19]</sup>,砖墙竖向抗压承载力按式(1)计算:

$$N = \varphi_{\text{con}} (f_{\text{mo}} A_{\text{mo}} + \alpha_c f_c A_c) \quad (1)$$

式中: $N$ 为构件加固后的轴心压力设计值; $\varphi_{\text{con}}$ 为轴心受压构件的稳定系数; $f_{\text{mo}}$ 为原构件砌体抗压强度设计值; $A_{\text{mo}}$ 为原构件截面面积; $\alpha_c$ 为砂浆强度利用系数; $f_c$ 为 UHP-ECC 轴心抗压强度设计值,取 80 MPa; $A_c$ 为新增砂浆面层的截面面积。

加固前主体结构的墙体抗压承载力  $R_n$  为 838.17 kN, $N$ 为 821.74 kN, $R_n/N$ 为 1.02,因此加固前主体结构的墙体抗压承载力满足要求。由此可知,墙体加固后抗压承载力同样满足要求。

抗剪承载力按式(2)计算:

$$V \leq V_{\text{ME}} + V_{\text{sj}}/\gamma_{\text{RE}} \quad (2)$$

式中: $V$ 为考虑地震组合的墙体剪力设计值; $V_{\text{ME}}$ 为原砌体抗震受剪承载力; $V_{\text{sj}}$ 为采用 UHP-ECC 面层加固后提高的抗震受剪承载力; $\gamma_{\text{RE}}$ 为承载力抗震调整系数。

加固前墙体抗剪承载力为 69.68 kN/m;加固后墙体抗剪承载力为 197.54 kN/m,加固后抗剪承载

成活,最后进行面层找平和压光。抹面完成后,在面层表面喷水并覆盖水凝膜养护 28 d,如图 12 所示。

工程应用表明:实际墙体砖块的强度等级和混合砂浆的抗压强度同上述试验的试件基本接近;现场制备的 UHP-ECC 具有良好的和易性,力学性能同上述试验的试件基本接近。

力远大于加固前抗剪承载力,可见面层加固的高效。

经过墙体抗震加固复核算,墙体受压承载力和抗剪承载力显著提高、满足规范要求。

## 5 结 论

(1) UHP-ECC 面层改善了墙体的破坏模式。未加固墙体试件的破坏形式为纯剪切脆性破坏,而加固后墙体试件则主要表现为延性的摇摆破坏,表明面层能够与砖墙协同工作,延缓墙体的开裂与刚度退化。

(2) UHP-ECC 面层加固能显著提高墙体的抗震性能。对比未加固墙体,加固后墙体的开裂荷载和峰值荷载分别提升了 148% 与 125%。

(3) 工程应用表明,制备的 UHP-ECC 具有优异的力学性能以及和易性,人工施工上墙操作方便;面层加固对基层处理、铁丝网构造、面层抹压和养护进行精心施工,确保了施工质量。最后经过结构验算,加固后墙体的抗剪承载力显著提高。

**致谢:** 本文的试验得到了福州大学结构实验室和相关教授们的支持,在此表示感谢。

#### 参考文献:

- [1] 潘毅,任宇,李路,等. 积石山 6.2 级地震村镇建筑震害调查与分析[J]. 建筑结构学报, 2024, 45(2): 71-84.
- [2] 潘毅,陈齐,汪瀛,等. 定日 6.8 级地震村镇建筑震害调查与分析[J/OL]. 土木工程学报, 1-18 [2025-10-09]. <https://doi.org/10.15951/j.tmgxb.25050297>.
- [3] 朱伯龙,吴明舜,蒋志贤. 砖墙用钢筋网水泥砂浆面层

- 加固的抗震能力研究[J]. 地震工程与工程振动, 1984, 4(1):70-81.
- [4] 许清风,江欢成,朱 雷. 钢筋网水泥砂浆加固旧砖墙的试验研究[J]. 土木工程学报, 2009, 42(4):77-84.
- [5] 付 洁, 王志浩. 自密实混凝土板墙加固低强度砂浆砖砌体的试验研究[J]. 建筑结构, 2007, 37(3):49-52.
- [6] 耿 丽. 砖砌体面层加固技术发展综述[J]. 施工技术(中英文), 2024, 53(23):94-102.
- [7] 邓明科,杨 铎,王 露. 高延性混凝土加固无筋砖墙抗震性能试验研究与承载力分析[J]. 工程力学, 2018, 35(10):101-111, 123.
- [8] 刘海平,董方园,蒋芳明,等. 纤维增强水泥基复合材料(ECC)面层加固砌体墙的压剪性能研究[J]. 工程力学, 2024, 41(12):201-214.
- [9] 吴孝鑫,谢 群,赵 鹏,等. 超高延性混凝土加固砌体墙抗震性能研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2024, 44(4):859-869.
- [10] Ranade R, Stults M, Li V, et al. Development of high strength high ductility concrete[Z]. 2nd International Rilem Conference on Strain Hardening Cementitious Composites (SHCC2 - RIO). 2011:1-8.
- [11] 方霄鹏,陈善权,金 捷,等. 两层双开间既有石砌体结构振动台试验研究[J]. 南昌大学学报(工科版), 2024, 46(4):420-428.
- [12] 翁志英,胡海楠,耿 丽,等. 考虑材料组分影响因素的 HP-FRCC 流动性能及力学性能[J]. 水利与建筑工程学报, 2024, 22(5):125-133.
- [13] 张德和,商吴江,吴应雄,等. UHP-ECC 加固 180 mm 厚砖砌体墙抗震性能试验研究及应用[J]. 工程抗震与加固改造, 2025, 47(2):166-174.
- [14] 陈 煦. 薄层 UHP-ECC 加固既有砖砌体墙抗震性能试验研究[D]. 福州:福州大学, 2024.
- [15] 蒋利学,王卓琳,张富文. 多层砌体结构的损坏程度与层间位移角限值[J]. 建筑结构学报, 2018, 39(S2):263-270.
- [16] Huang Wei, Kazemi-Kamyab H, Sun Wei. Effect of cement substitution by limestone on the hydration and microstructural development of ultra - high performance concrete (UHPC) [J]. Cement & Concrete Composites, 2017, 77:86-101.
- [17] 砌墙砖试验方法:GB/T 2542—2012[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2012.
- [18] 建筑砂浆基本性能试验方法标准:JGJ/T 70—2009[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2009.
- [19] 超高性能混凝土(UHPC)技术要求:T/CECS 10107—2020[S]. 北京:中国工程建设标准化协会, 2020.

(上接第 84 页)

- [4] 赵卫全,周建华,熊基丞,等. 松散回填层及深厚淤泥地基联合灌浆加固技术研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2020, 18(1):10-15, 21.
- [5] 李 林,张会林. 某住宅楼裂缝事故的检测鉴定及坑式静压桩托换[J]. 建筑结构, 2006, 36(12):102-103, 108.
- [6] 逯焕波,刘俊生,陈昌师,等. 软土地区锚杆静压桩地基加固应用实例研究[J]. 地基处理, 2020, 2(2):137-142.
- [7] 姜伯宵. 静压注浆法在既有建筑物地基加固中的应用[J]. 地基与基础, 2021, 48(15):135-136.
- [8] 薛丽影,杨文生. 注浆加固法在处理建筑物不均匀沉降中的应用[J]. 建筑结构, 2011, 41(S2):399-401.
- [9] 陈 冲,刘卫东,闫雪明. 土体固结粉在软土地基加固中的应用研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2017, 15(3):169-172.
- [10] 既有建筑地基基础加固技术规范:JGJ 123—2012[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2012.
- [11] 建筑地基基础设计规范:GB 50007—2011[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2011.
- [12] 陈大川,曹荣伟,施楚贤,等. 某底框结构房屋地基不均匀沉降事故原因及加固处理[J]. 建筑结构, 2015, 45(9):43-47, 34.
- [13] 多道瞬态面波勘察技术规程:JGJ/T 143—2017[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2017.
- [14] 高国朋,颜可珍. 软土地基加固检测评价的瑞利波法[J]. 水利与建筑工程学报, 2010, 8(3):113-116.
- [15] 建筑基桩检测技术规范:JGJ 106—2014[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2014.
- [16] 建筑变形测量规范:JGJ 8—2016[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2016.