

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2025.05.015

UHP-ECC 加固极低强度砂浆的砖砌体柱轴压 试验及施工技术分析

刘宇

(福建福州市质量监督检查站, 福建 福州 350000)

摘要: 部分既有砖砌体柱由于环境影响、材料老化特别是砂浆强度极低等因素导致受压承载力严重不足等问题,在灾害作用下极易发生脆性破坏,亟待进行加固以确保建筑物继续安全使用。提出采用超高性能工程用水泥基复合材料(UHP-ECC)对砖砌体柱进行面层加固。通过对10根砖柱试件进行轴压性能试验,其中6根为UHP-ECC厚度15 mm的面层加固砖柱,4根未加固为对照组,研究极低砂浆强度为M0.4和M1的砖柱的破坏形态和受力性能。结果表明:所制备的UHP-ECC具备优异的力学性能,UHP-ECC面层对砖柱形成了有效约束,有效改善了其脆性破坏特性。加固试件的开裂荷载提升了140%~155%,峰值荷载提升了113%~123%,峰值压应变提升了98%~126%。UHP-ECC具有良好的和易性,采用面层加固人工施工上墙操作方便;不需要界面处理。加固时应应对砖柱进行临时维护和保护;面层内构造的铁丝网与栓钉有效连接;人工抹压保证面层紧密贴合;养护阶段需控制湿度并达到材料龄期要求。

关键词: 砖砌体柱;超高性能工程用水泥基复合材料(UHP-ECC);面层加固;轴压试验;施工技术

中图分类号: TU362

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2025)05-0106-07

Axial Compression Test and Construction Technology Analysis of UHP-ECC Reinforced Low Strength Mortar Brick Masonry Columns

LIU Yu

(Fuzhou Quality Supervision and Inspection Station, Fuzhou, Fujian 350000, China)

Abstract: In certain existing brick masonry columns, issues such as a severe deficiency in compressive bearing capacity have emerged. This is primarily attributed to factors including environmental impacts, material aging, and particularly the extremely low strength of mortar. Under the influence of disasters, these columns are highly susceptible to brittle failure. Thus, there is an urgent need for reinforcement to guarantee the continued safe operation of buildings. In this work, an approach of using Ultra-High Performance Engineering Cementitious Composite (UHP-ECC) for surface reinforcement of brick masonry columns is proposed. Axial compression performance tests were conducted on twelve brick column specimens, in which six brick columns were surface-reinforced with UHP-ECC at a thickness of 15 mm, while the other six remained unreinforced as the control group. The tests aimed to investigate the failure patterns and mechanical behaviors of brick columns with mortar strengths as low as M0.4 and M1. The results indicate that the UHP-ECC surface layer exerts a substantial confining effect. This leads to a significant enhancement in both the bearing capacity and deformation ability of the brick columns. Moreover, it effectively mitigates the brittle failure characteristics of the brick columns. The fabricated UHP-ECC exhibits outstanding mechanical properties. The construction technique of using UHP-ECC for surface reinforcement of brick columns is straightforward and practical. This method involves manual plastering. Prior to construction, only the surface of the bricks needs to be cleaned and no special interface treatment is required. Overall, the construction process features good workability.

Keywords: brick masonry column; UHP-ECC; overlay strengthening; compressive behavior; construction technology

收稿日期:2025-06-21

修稿日期:2025-07-27

基金项目:福建省建设科技研究开发项目(2023-B-8)

作者简介:刘宇(1978—),男,高级工程师,主要从事建筑施工技术和工程质量检测。E-mail:44663256@qq.com

砖砌体结构因取材容易、施工简单,在国内外得到了广泛应用。砖砌体墙(柱)为结构中的竖向承重构件,黏土混合砂浆强度普遍在 M2.5 ~ M7.5,然而,在实际工程中,部分低层民宅仍存在部分砂浆强度极低的砖柱,其砂浆强度仅为 M1 左右甚至更低,由于建造年代早,存在材料老化特别是砂浆强度极低导致受压承载力严重不足等问题^[1],在荷载作用下极易发生脆性破坏。同时,既有结构的设计标准往往低于现行规范要求,在建筑功能改变或荷载增加的情况下,原有砖柱和承重墙的受压性能难以满足使用需求,亟待进行加固,以确保建筑物继续安全使用。

目前,国内外对于砖砌体柱传统的面层加固法主要有钢筋网水泥砂浆面层、钢筋混凝土夹板墙、外包钢、粘贴纤维复合材等加固方法^[2-3]。刘新强^[4]探讨了不同 FRP 材料、高厚比等变量对砖柱轴压性能的影响规律,发现不同纤维增强材料对砌体柱的极限承载力增强效果具有相似性,指出了构件几何尺寸对 FRP 约束效应的影响可忽略不计。在应用水泥基复合材料上,邓明科^[5]系统研究了配筋 ECC 面层加固砖砌体柱的力学性能,研究表明,配筋 ECC 面层与基体具有较好的协同工作性能,可显著提升构件的承载力,有效改善其脆性破坏模式并增强结构整体性。

随着新材料的发展,纤维增强水泥基复合材料得到广泛应用,Ranade^[6]研究得到超高性能工程用水泥基复合材料(Ultra High Performance - Engineered Cementitious Composite,简称 UHP-ECC)。作为一种新型的水泥基材料,已有相关研究证实,UHP-ECC 不仅与砌体墙界面的粘结强度高,还具备良好的和易性^[7],已被应用于砌体结构加固的试点工程实践中^[8-9]。Billington^[10]研究 UHP-ECC 加固砌体填充墙的抗震性能,结果表明,UHP-ECC 改善了填充墙的破坏模式,墙体的峰值荷载和累积耗能分别提高了 157% 和 174%。

在既有砖柱加固技术的相关研究中,目前多面向砂浆强度不低于 M2.5 的砖柱加固场景,而针对砂浆强度极低的砖柱加固技术的系统性研究仍较为匮乏。基于此,本试验针对极低强度砂浆($\leq M1$)的砖柱进行轴压性能试验,研究其破坏形态和受力性能,结果可为 UHP-ECC 面层加固砖砌体柱提供理论支撑。

1 试验材料与方法

1.1 试件制作

本试验针对性设置 M0.4 和 M1 两种极低强度砂浆作为研究工况,共设计了 10 根砖柱,其中,未加固砖柱作为基准对照组,标记为“UC”;采用面层加固的砖柱试件记为“RC”,具体参数详见表 1。依据《砌体基本力学性能试验方法标准》^[11],试件统一设计为 240 mm × 370 mm × 720 mm 的尺寸规格,在钢板底座上砌筑砖柱(见图 1)。参照验收规范^[12]相关要求,测量所得的砖砌体柱垂直度偏差、水平灰缝厚度以及竖向灰缝宽度均符合规范要求。

表 1 试件设计参数

试件编号	砂浆强度	加固方案	数量
UC0	M0.4	未加固,对比试件	2
UC1	M1		2
RC0	M0.4	15 mm 面层加固	3
RC1	M1		3

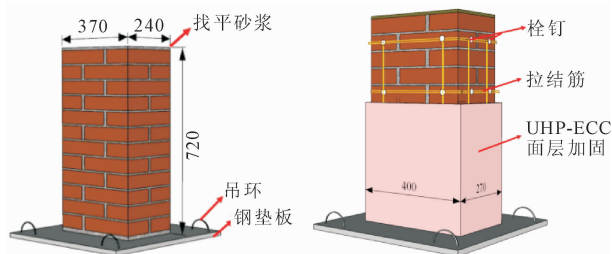


图 1 砖砌体柱试件尺寸及构造示意(单位:mm)

鉴于砖砌体墙(柱)承载力不足时采用配筋网片以约束砖砌体横向变形提高承载力的思路^[13],提出了在砖柱表面布置铁丝网构造措施,参考已有采用铁丝网加固砖柱的研究^[14],当铁丝网间距控制在 250 mm 内时,轴压试验中 UHP-ECC 面层无剥离现象,结合砖柱宽面与窄面的实际尺寸,设置砖柱宽面与窄面的栓钉间距约为 200 mm × 200 mm 与 100 mm × 200 mm;同时为了更好约束砖砌体柱的横向变形,横向钢丝网采用双道钢丝,铁丝网参数见表 2。由于实际工程中砖柱加固量远少于砖墙,因此不考虑厚度作为参数研究,设定加固厚度为工程中常用 15 mm。在对砖柱试件实施加固作业前,先在砖柱两端架设模板,并在柱面进行打点冲筋操作,以此精准控制面层厚度。之后开展人工压抹 UHP-ECC 面层的工序,完成压抹后需对面层进行找平与压光处理。试件抹面施工完毕后,立即覆盖混凝土节水保湿膜,且每日进行三次以上浇水养护,持续养护

28 d,直至 UHP-ECC 达到规定的龄期要求。试件栓钉+铁丝网构造与 UHP-ECC 面层加固砖柱的过程如图 2 所示。

表 2 铁丝网参数

项目分类	相关参数	备注
横向铁线设置	双条拉结	—
铁丝网组成	1. 栓钉:直径 $\Phi = 6$ mm,长度 $l = 70$ mm 2. 14 号铁线:直径 $\Phi = 2$ mm	二者共同构成铁丝网
边缘栓钉间距	1. 距砖柱左右两端:60 mm 2. 距砖柱上下两端:30 mm	针对砖柱边缘位置的栓钉定位
宽面栓钉间距	250 mm \times 200 mm	指宽面方向上栓钉的横向与纵向间距
窄面栓钉间距	100 mm \times 200 mm	指窄面方向上栓钉的横向与纵向间距
栓钉拉结方式	栓钉之间采用 14 号铁线拉结	—
栓钉端头固定	采用 22 号铁线与 14 号铁线绑扎固定	确保栓钉端头稳定



图 2 试件制作过程

1.2 砌筑材料制备

为模拟既有砖柱,砌筑材料使用福建省泉州市永春县原机砖厂制得的露天存放 12 年以上的砖块和极低强度的黏土混合砂浆。砖块强度为 MU10,尺寸为 236 mm \times 113 mm \times 52 mm(略小于标准规格)。砌筑砂浆为 M0.4 和 M1 两种,砂浆的原材料包括水泥(P. O. 32.5R)、黏性土和细河砂,其中黏性土在当地常作为塑化剂使用,配合比见表 3。根

据《砌墙砖试验方法》(GB/T 2542—2012)^[15],制作非成型制样砖块试件,测得平均抗压强度 13.56 MPa,平均强度标准值为 9.55 MPa。根据《建筑砂浆基本性能试验方法标准》(JGJ/T 70—2009)^[16],制作边长为 70 mm 的立方体砂浆试件,测得砂浆的平均抗压强度见表 3。

表 3 砌筑砂浆配合比及强度

强度等级	水泥	红黏土	砂	水	实测砂浆强度 /MPa	变异系数 /%
M0.4	1	5	10	4.0	0.51	5.51
M1	1	4	8	3.4	1.41	7.63

1.3 加固材料 UHP-ECC 的制备

试验加固材料 UHP-ECC 参考 Huang^[17]提出的配合比,原材料由硅酸盐水泥(P. II 52.5)、硅灰、石灰石粉、石英砂和聚羧酸减水剂组成。采用纤维体积参量 2% 的聚丙烯(PP)纤维和聚乙烯(PE)纤维使材料具有良好的施工和易性。UHP-ECC 由转速为 61.5 rpm 的滚筒搅拌机进行制备,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,多次、缓慢加入 PP 和 PE 纤维,并搅拌 5 min。材料制备完成后,在模具内养护 24 h,脱模后养护 28 d 进行力学性能试验。参照相关规范^[18]要求,对 UHP-ECC 进行力学性能测定,试验测得 UHP-ECC 力学性能如表 4,极限拉应变达到 1.06%,具有优异的力学性能且拉伸应变硬化效应明显,受拉应力-应变曲线如图 3 所示。值得注意的是,搅拌机制备的 UHP-ECC,其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、流动性损失加剧,表现为“发黏、板结”,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、开裂。

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	抗拉强度 /MPa
83.38	59.19	38	6.21

1.4 试验方法

试验采用电液伺服压力试验机,试验于 2024 年 12 月福州大学结构馆完成,试验加载如图 4 所示。为避免试件承压面与试验机压板接触不均匀而影响试验结果,试件在安装时,试验前先清除承台和钢垫

板上表面杂物。随后在试件的顶部放置一块钢板用水平仪观察平整度,在不平齐区域用少量石英砂找平保证试件受压均匀。参照试验基本力学性能试验规范^[16]规定,实施分级预压制度:首先施加预估极限荷载10%~20%的轴向压力进行3次循环预压;随后完全卸载并开始记录数据,加载速率严格控制在0.2 mm/min~0.5 mm/min范围内。通过实时监测试验机中荷载-位移曲线,当荷载值下降至峰值荷载的85%时,判定试件丧失承载能力。为采集试件荷载与位移曲线的下降段数据,待试验机位移值无法上升时停止加载。

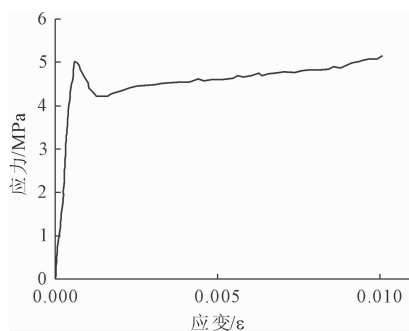


图3 UHP-ECC 轴心拉伸应力-应变曲线

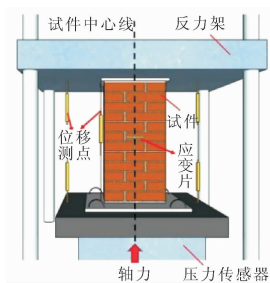


图4 轴心受压试验

2 试验结果与分析

2.1 试验现象

2.1.1 未加固试件

为方便对试验柱体竖向四个面的描述,以试验柱体初始放置位置为基准,选面向正对观测者的柱体表面为A面,沿柱体顺时针90°为B面,顺时针180°(与A面相对)为C面,顺时针270°(与B面相对)为D面。

UC0未加固对比试件在轴心受压作用下表现出典型的脆性破坏特征,可分为三个阶段。加载初期,试件无裂缝出现,处于弹性工作阶段。当荷载增至90 kN时,试件A面开始出现细微裂缝,同时伴随轻微声响,此时判定为试件的开裂荷载。进入带裂缝

工作阶段后,随着荷载继续增加至120 kN,C面形成一条贯穿4皮砖的纵向主裂缝,其余三个表面相继出现多条不连续分布的竖向微裂缝。当荷载加到196 kN(峰值荷载的80%~90%)后,试件进入快速破坏阶段,表现为前期裂缝宽度不断扩展并纵向延伸,新裂缝不断产生并贯通,试件开裂声明显。最终在252 kN极限荷载作用下,砖柱被分为几个独立的细长小砖柱,C面砖块局部轻微鼓出,B面第一皮砖灰缝掉落,砖柱很快丧失承载能力急剧下降至155 kN,试件的裂缝发展形态如图5(a)所示。

UC1与UC0试件破坏过程相似,在初始加载阶段处于弹性变形状态。当荷载达到120 kN时,A面第12皮砖出现宽度小于1 mm的初始裂缝,标志着试件进入带裂缝工作阶段。随着荷载持续增大,试件各立面相继形成纵向裂缝,这些裂缝沿竖向不连续分布。当荷载达到极限荷载的70%~80%区间时,裂缝呈现加速扩展趋势,具体表现为主要裂缝贯通和砖块表层局部片状剥落。接近峰值荷载时,构件D面与C面中上部砖块向外鼓出,试件横向变形较大,被裂缝分割为多个小立柱而压溃或丧失稳定。试件的最终的破坏形态如图5(b)所示。



图5 UC组试件破坏形态

2.1.2 加固试件

RC0在加载初期阶段,试件处于弹性工作状态;当轴向荷载达到190 kN时,试件B面面层首先出现了两条宽度极其细微的初始裂缝。随后荷载继续增加至273 kN,C面也产生新的裂缝,并沿竖向方向发展延伸。随着荷载持续增加,加固面层陆续出现新的裂缝,同时既有裂缝呈现宽度和长度同时扩展趋势,试件内部伴随清晰的材料断裂声响。当荷载加至493 kN时,裂缝开展加快且宽度变大,相邻的裂

缝有贯穿的趋势; B 面上端部转角处裂缝明显变宽, 并迅速向下延伸, 同时位移计所采集的位移值较明显上升。试件接近破坏荷载时, 转角处裂缝持续变宽, 荷载-位移曲线不再上升, 试件临近破坏。在加载后期面层与砖柱出现轻微局部界面剥离现象, 加固面层处形成若干细长裂缝, 但此时试件整体性保持良好, 具备较好的完整性, 试验最终的典型破坏状态如图 6(a) 所示。

RC1 破坏状态与 RC0 表现出相似特征。当荷载达到极限荷载的 45%~60% 时, 在试件上端部区域以主裂缝为核心的辐射状裂缝, 均由上而下发展, 裂缝分布密度较高且宽度较小。试件加载进程后期, 荷载持续上升, UHP-ECC 面层 A 面从侧面仔细观察可发现开始出现中部轻微凸出, 裂缝不断延伸, A 面中部出现间 UHP-ECC 局部鼓胀, 继续加载时, 鼓起处形成一条横向主裂缝, 其周围裂缝呈树根状分布; 试件当达到极限荷载后仍保持部分承载能力, 荷载-位移曲线呈现缓慢下降趋势。当承载力降至峰值荷载的 80% 时终止加载, 此时面层中部鼓出变形最为明显, 破坏形态较理想。试件的裂缝分布和最终的破坏形态如图 6(b) 所示。

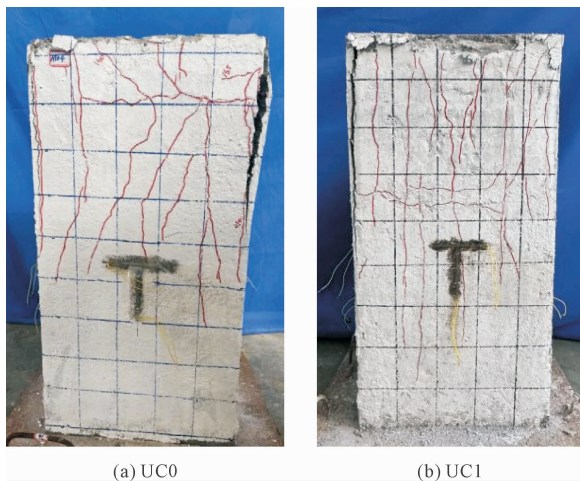


图 6 RC 破坏形态

2.2 荷载-位移曲线

试验中每组试件的三组荷载-位移曲线数据都比较相近, 取其中一条作为代表, UC 组和 RC 组的试件的荷载-位移曲线如图 7 所示。

未加固砖柱存在刚度偏小、变形能力弱的问题, 塑性变形几乎可忽略。当荷载达到峰值后, 其承载力会急剧下降, 呈现出典型的脆性破坏特征。而采用 UHP-ECC 面层加固后, 砖柱的初始刚度得到了显著提升, 其中四面加固的砖柱刚度提高效果更为

突出; 当荷载接近峰值时, 试件荷载-位移曲线会出现明显弯曲的现象, 曲线斜率开始逐步减小, 此时砖柱表现出清晰的弹塑性变形特性; 持续加载直至峰值后, 曲线保持平缓走势, 承载力下降速率放缓。综合来看, UHP-ECC 面层能够大幅增强砖柱的初始刚度与变形能力, 有效改善了砖柱的脆性破坏问题。

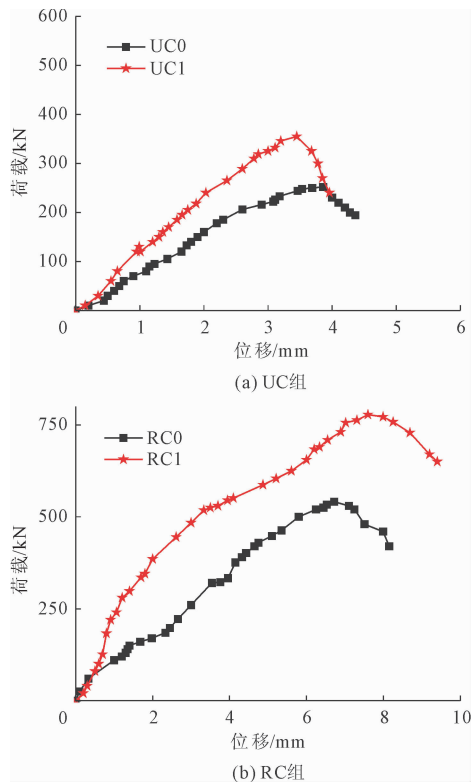


图 7 荷载-位移曲线

2.3 破坏机理

未加固砖砌体柱的破坏机理可概括为以下三个阶段: 在开裂前试件主要表现为线弹性变形行为。由于砖砌块表面平整度、砂浆层厚度及饱满度的不均匀性, 砖块在轴向荷载作用下处于压-弯-剪三向复合应力状态; 同时砖与砂浆的横向变形差异导致界面产生约束应力, 当砖体所受横向拉应力超过其抗拉强度时, 即诱发初始裂缝形成。进入带裂缝工作阶段后, 试件表面逐渐出现多条竖向裂缝, 其中竖向灰缝可能因施工缺陷或砂浆收缩效应形成应力集中区域, 促进裂缝扩展。荷载持续上升, 初始裂缝沿试件轴向快速延伸, 最终形成贯通性主裂缝。在接近峰值荷载时, 裂缝数量显著增加, 宽度急剧扩展, 部分角部砖块因水平灰缝粘结失效而发生外鼓、剥落甚至碎裂。承载力急剧下降, 破坏发现柱子内部砖柱被分成若干独立的细小柱体, 呈明显的脆性破坏特征。

“RC”组试件的破坏过程表明:在初始加载阶段,试件未呈现明显变形特征,砖柱与 UHP-ECC 加固层协同工作,共同承担外部荷载,整体受力性能表现稳定,此时加固面层的约束作用尚未发挥。随着荷载增加,当第一条微裂缝出现后扩展较为缓慢。当荷载增至峰值荷载的 80%~95% 范围时,角部区域出现应力集中现象,可能是由于砖柱几何截面特性或施工影响因素,在双向垂直拉应力共同作用下,加固层沿转角处发生外鼓开裂,并与内部砖柱产生局部脱粘。由于 UHP-ECC 材料具有较高的力学性能特性,面层的刚度明显大于内部砖砌体,荷载逐步由砖砌体向加固面层转移,导致局部脱粘区域的 UHP-ECC 层在压力作用下形成明显的横向裂缝。

试件在轴压作用下产生横向变形过程中,UHP-ECC 层对核心砖柱形成有效的侧向约束机制,使得核心砌体破坏后仍能维持一定的承载能力,最终试件以局部压碎的特征破坏,但整体结构仍保持较好的完整性。当荷载达到峰值后,试件的承载能力呈现缓慢衰减趋势,其破坏形态表现出显著的延性特征。这主要是因为 UHP-ECC 面层不仅仅有效约束了砖柱的横向变形,限制了裂缝的扩展,而且面层自身也能参与结构整体受力,从而使砖柱的破坏得到延缓,纵向塑性变形得到更好地发挥。值得注意的是,在峰值荷载阶段后,UHP-ECC 面层仅出现局部界面剥离,整体性保持良好,砖柱在面层约束作用下保持“立而不塌”的状态,表明了 UHP-ECC 与砖柱之间具有良好的协同工作性能,有效提升结构的整体性,这一现象证实了该加固的可靠性。

2.4 承载力及变形分析

各组试件的试验结果列于表 5,抗压韧性是评价材料抗损伤和控制变形能力的重要指标^[19],计算公式如下:

$$W_c = \frac{E_u}{Al} \quad (1)$$

式中: W_c 为抗压韧性指数, N/mm^2 ; E_u 为峰值荷载下降到 85% 时对应的荷载-位移曲线下的面积; A 为受压面积, mm^2 ; l 为试件高度, mm 。

(1) 采用 UHP-ECC 面层加固的砖柱开裂荷载提升了 140%~155%,极限荷载的提升了 113%~123%,说明 UHP-ECC 面层加固显著抑制砖砌体柱竖向裂缝的形成与扩展,并且使得砖柱的抗压承载力得到大幅度提升。表明这类极低强度砂浆的砖柱经过 UHP-ECC 面层加固同样可以和中等强度砂浆

(M2.5~M5)一样,可以显著提升其抗压性能。

(2) 采用 UHP-ECC 面层加固的砖柱峰值压应变提高幅度为 98%~126%,说明 UHP-ECC 加固对砖砌体柱约束效果明显,有效提升了其轴压状态下的变形能力,同时改善了构件的延性特征。

(3) RC 试件的抗压韧性、极限荷载以及峰值压应变均显著提升。主要得益于 UHP-ECC 加固面层对核心砖砌体柱的约束作用,使其处于三向应力状态,有效抑制试件的横向变形,不仅显著提高了砖柱的轴压承载力,还明显改善了构件的变形能力。

表 5 试验结果汇总

试件编号	开裂荷载 /kN	提升幅度 /%	峰值荷载 /kN	提升幅度 /%	峰值压应变	提升幅度 /%	W_c /MPa	提升幅度 /%
UC0	90	—	252	—	0.0058	—	0.0031	—
RC0	230	155	563	123	0.0115	98	0.0124	295
UC1	150	—	355	—	0.0056	—	0.0033	—
RC1	362	140	757	113	0.0127	126	0.0223	579

3 结论

(1) 极低强度砂浆的既有砖柱呈现明显脆性破坏特征。当达到开裂荷载时,砖柱裂缝快速发展,最终被分割成多个独立细长小柱体而失效。这个试验结论与以往的试验结果吻合。

(2) 制备的 UHP-ECC 具有优异的力学性能,极低强度砂浆的砖柱经过 UHP-ECC 面层加固可以显著提升其抗压性能。反映在加固后显著提高了砖柱的开裂荷载和峰值荷载。试件的开裂荷载提升 140%~155%,峰值荷载提升 113%~123%。

(3) UHP-ECC 面层加固后砖柱破坏模式为延性破坏。加固试件的峰值压应变提升了 98%~126%。面层很好的发挥了材料高强、高韧性的特点,砖柱的延性及变形能力得到显著提高。

(4) UHP-ECC 具有良好的和易性。面层加固人工施工上墙操作方便;不需要界面处理,直接抹压于既有砖柱上。工程中砖柱加固时,应对砖柱进行临时维护和保护;构造铁丝网纵横向与栓钉连接;人工抹压保证面层紧密贴合;养护阶段控制湿度并达到材料龄期要求。

(5) 试验表明,这类极低强度砂浆既有砖柱承载力低,存在安全隐患。结构加固作业时应遵循“先支撑后加固”的原则,对上部结构受力构件进行有效支撑,或将原结构荷载临时转移至支撑体系,确保其在加固过程中保持稳定,防止因施工扰动引发

结构失稳或坍塌。

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(S2): 71-84.
- [2] 魏智辉,潘毅,邱洪兴,等. 勾缝加固砖砌体墙的抗压性能试验[J]. 哈尔滨工业大学报,2017,49(12): 184-188.
- [3] 陈伟宏,罗劲,韩春晖,等. ECC面层加固URM墙抗剪性能研究[J]. 东南大学学报(自然科学版),2025,55(5):1426-1434.
- [4] 刘新强,刘明,由世岐. FRP加固实心黏土砖短柱轴心受压试验研究[J]. 土木工程学报,2009,42(10):1-7.
- [5] 邓明科,李彤,范丽玮. 钢筋网高延性混凝土加固砖柱偏心受压性能试验及计算方法研究[J]. 工程力学,2021,38(5):61-71.
- [6] Ranade R, Stults M D, Li V C, et al. Development of high strength high ductility concrete [C]//2nd International RILEM Conference on Strain Hardening Cementitious Composites. Rio de Janeiro, Brazil, 2022:1-8.
- [7] 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.
- [8] 吴应雄,郑新颜,黄伟,等. 超高性能混凝土-既有普通混凝土界面粘结性能研究综述[J]. 材料导报,2023,37(16):144-154.
- [9] 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[J]. 南昌大学学报(工科版),2024,46(4):420-428.
- [10] Billington S, Kyriakides M. Cyclic response of nonductile reinforced concrete frames with unreinforced masonry infills retrofitted with engineered cementitious composites [J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 2014, 140(2):441-454.
- [11] 砌体基本力学性能试验方法标准:GB/T 50129—2011[S]. 北京:建筑工业出版社,2011.
- [12] 砌体结构工程施工质量验收规范:GB 50203—2011[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2012.
- [13] 张德和,商吴江,吴应雄,等. UHP-ECC加固180mm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] 胡海楠. UHP-ECC加固既有砖砌体柱受压性能试验研究[D]. 福州:福州大学,2024.
- [15] 砌墙砖试验方法:GB/T2542—2012[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2012.
- [16] 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.
- [17] Huang W, Kazemi-Kamyab H, Sun W. 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.
- [18] 高延性纤维增强水泥基复合材料力学性能试验方法:JC/T 2461—2018[S]. 北京:中国建材工业出版社,2018.
- [19] Deng Mingke, Han Jiao, Liu Haibo, et al. Analysis of compressive toughness and deformability of high ductile fiber reinforced concrete[J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2015,2015:1-7.

(上接第52页)

- [21] Alimohammadi Hassan, Bavani Ali Reza Massah, Rozbahani Abbas. Mitigating the impacts of climate change on the performance of multi-purpose reservoirs by changing the operation policy from SOP to MLDR [J]. Water Resources Management, 2020, 34(4): 1495-1516.
- [22] Ngamsert Ratsuda, Kangrang Anongrit. Applying of marine predators algorithm linked with reservoir simulation model considering sedimentation for reservoir operation [J]. Advances in Civil Engineering, 2022,2022:1-15.
- [23] Zolghadr-Asli Babak, Bozorg-Haddad Omid, Enayati Maedeh, et al. Sensitivity of non-conditional climatic variables to climate-change deep uncertainty using Markov Chain Monte Carlo simulation [J]. Scientific Reports. 2022,12(1):1813.