

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2025.06.003

UHP-ECC 嵌缝加固清水砖柱轴压性能 及其施工技术

林淑瑾¹, 苏忠高², 吴应雄³

(1. 福州市建筑工程质量监督站, 福建 福州 350007; 2. 福建博海工程技术有限公司, 福建 福州 350009;
3. 福州大学 土木工程学院, 福建 福州 350108)

摘要: 既有清水砖砌体柱因服役年限长、材料老化、设计标准低等导致承载力不足, 亟待进行加固以确保建筑物继续安全使用。采用超高性能工程用水泥基复合材料(UHP-ECC)对砖砌体柱进行嵌缝加固, 通过对4根砖柱试件进行轴压性能试验, 其中2根UHP-ECC嵌缝深度为20 mm的加固砖柱, 2根未加固为对照组, 研究清水砖砌体柱的破坏形态和受力性能, 并根据试验结果, 提出了保证UHP-ECC嵌缝加固砖柱施工质量的具体措施。试验结果表明: UHP-ECC嵌缝加固后砖柱破坏荷载较未加固砖柱提升17%~25%, 破坏过程和裂缝发展过程与未加固试件类似, 但各阶段的破坏机理存在差异; 基于试验结果, 着重提出了工程加固中设置临时支撑和基层处理等施工关键措施, 可确保砖柱加固施工安全可靠。

关键词: 清水砖砌体柱; UHP-ECC; 嵌缝加固; 轴压性能; 施工工艺

中图分类号: TU362

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2025)06-0017-06

Construction Methods and Mechanical Performance Analysis of UHP-ECC Joint Reinforcement for Clear Water Brick Columns

LIN Shujin¹, SU Zhonggao², WU Yingxiong³

(1. Fuzhou Construction Engineering Quality Supervision Station, Fuzhou, Fujian 350007, China;
2. Fujian Bohai Engineering Technology Co., Ltd., Fuzhou, Fujian 350009, China;
3. College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350108, China)

Abstract: Existing fair-faced brick masonry columns face issues such as insufficient bearing capacity due to increased service life, material aging, and lower design standards in the past, making reinforcement urgently needed to ensure the continued safe use of the building. It is proposed to use ultra-high-performance cement-based composite materials (UHP-ECC) for joint filling reinforcement of brick masonry columns. Axial compression tests were conducted on four brick column specimens, including two reinforced columns with a 20 mm UHP-ECC joint fill depth and two unreinforced columns as controls, to analyze the failure modes and mechanical performance of fair-faced brick columns. Based on the test results, specific measures to ensure the construction quality of UHP-ECC joint-filled reinforced brick columns were proposed. The test results indicate that after UHP-ECC joint reinforcement, the failure load of the brick columns increased by 17%~25% compared to unreinforced columns. The process of failure and crack development was similar to that of the unreinforced specimens, but the failure mechanisms at each stage differed. Based on the test results, key construction measures such as setting temporary supports and treating the base layer during engineering reinforcement were particularly emphasized to ensure safe and reliable brick column reinforcement construction.

Keywords: clear water brick masonry column; UHP-ECC; joint reinforcement; axial compression performance; construction technology

收稿日期: 2025-07-09

修稿日期: 2025-08-11

基金项目: 福建省建设科技研究开发项目(2023-B-8)

作者简介: 林淑瑾(1975—), 女, 正高级工程师, 主要从事建筑施工技术和质量监督工作。E-mail: 770900765@qq.com

通讯作者: 吴应雄(1969—), 男, 博士, 教授, 主要从事砌体结构抗震加固研究工作。E-mail: WYXFD2006@fzu.edu.cn

砖砌体结构是国内外主要的建筑结构形式之一。由于建造年代久远、砂浆强度低和建设标准低,导致其使用安全性降低。砖柱是砖砌体中主要竖向承重构件,必须对现有砖柱采用必要的加固措施以满足现代使用功能和安全性要求。

传统的砖柱加固方法包括钢筋混凝土面层加固法、粘贴纤维复合材料加固法、外包角钢加固法等^[1-2]。上述方法虽能有效提高砌体承载力,但存在施工复杂、耐久性差等问题,且不可避免地会改变建筑原貌。为不改变建筑原貌,魏智辉等^[3]采用 M6 和 M8 加固砂浆勾缝加固砖柱,表明了勾缝加固试件抗压承载力提高的幅度与勾缝深度、加固砂浆强度有关。石建光等^[4]通过置换砂浆加固砖柱,研究表明在未替换竖缝砂浆的情况下,无论是单面还是双面置换砂浆,置换后试件的抗压强度均降低。在应用纤维增强水泥基复合材料方面,周长东等^[5]提出采用 ECC 嵌缝加固砖砌体的剪切性能试验研究(ECC)嵌缝加固古建砖砌体,试验表明,ECC 能提升试件的抗剪承载力和破坏时的整体性。陈伟宏等^[6]通过压剪试验探究 ECC 加固无筋砌体墙的抗剪性能,结果表明,无论单双侧加固,试件的开裂剪切强度、极限剪切强度与开裂剪切模量的提升比例均最高。余江滔等^[7]采用超高延性混凝土(UHDC)面层加固砌体墙,试验表明,UHDC 面层加固改变了砌体墙的脆性破坏状态,试件呈延性破坏模式,同时随着面层厚度的增加更有利于提高构件的极限承载力。

超高性能工程水泥基复合材料(UHP-ECC)作为一种新型的水泥基复合材料具有应变硬化和多缝

开裂的特征^[8]。已有相关研究表明 UHP-ECC 具备良好的施工性能,其抗压强度可达到 80 MPa,极限拉应变约 1%^[9-10]。郑国清^[11]通过双面剪切试验研究 UHP-ECC 与砖墙间的粘结性能,发现采用扣缝的界面处理方式可提高界面粗糙度,从而提升界面粘结性能。张德和等^[12]采用 UHP-ECC 加固砖墙,表明 UHP-ECC 面层加固能改善墙体破坏模式,延性和耗能能力显著提升。基于该材料优异的力学性能和参考历史建筑的保护原则^[13],本文提出采用 UHP-ECC 对砖柱进行嵌缝加固,将 UHP-ECC 应用于既有砖砌体柱的抗震加固,开展 2 组嵌缝砖柱试件的静力试验中,其中 2 根加固砖柱和 2 根未加固对比试件,研究 UHP-ECC 嵌缝加固清水砖柱的破坏形态和轴压性能。基于试验结果对施工过程进行详细分析提出具体施工措施,确保 UHP-ECC 嵌缝加固技术有效实施,成果可为清水砖柱加固技术的应用提供依据。

1 试验材料与方法

1.1 砌筑材料制备

砌筑材料使用泉州市当地露天存放 12 年以上的砖块和低强度的黏土混合砂浆。砖块强度为 MU10,砖块尺寸平均为 236 mm × 111 mm × 51.5 mm。根据《砌墙砖试验方法》^[14](GB/T 2542—2012),实测砖块平均抗压强度 13.81 MPa。砂浆的原材料包括水泥(P. O. 32.5R)、黏性土和细砂。根据《建筑砂浆基本性能试验方法标准》^[15](JGJ/T 70—2009)制作边长为 70.7 mm 的立方体试块进行抗压试验,平均抗压强度见表 1。

表 1 砖和砂浆抗压强度

单位:MPa

砌筑材料	试块编号										平均值
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
砖块	10.76	15.29	13.07	14.85	15.20	15.33	13.24	11.61	12.27	14.90	13.81
砂浆	2.96	3.07	3.42	3.01	3.10	3.34	—	—	—	—	3.15

1.2 加固材料 UHP-ECC 制备

试验中采用的 UHP-ECC 加固材料参考了 Huang 等^[16]提出的配合比设计,并综合考虑 UHP-ECC 的力学性能与施工和易性要求。通过对比试验分析,选用体积掺量为 2% 的聚丙烯(PP)纤维与聚乙烯(PE)纤维用于制备 UHP-ECC。UHP-ECC 原材料由硅酸盐水泥(P. II 52.5)、硅灰、石灰石粉、石英砂及聚羧酸减水剂组成。加固材料制备流程如下:首先将粉体材料投入搅拌机中干拌 3 min,随后

在持续搅拌过程中,缓慢加入水与减水剂搅拌 10 min,最后分多次、缓慢加入 PP 和 PE 纤维,继续搅拌至充分混合,具体制备流程如图 1。材料制备完成后,将 UHP-ECC 快速放入模具中,成型后覆盖塑料膜,静置 24 h 后,拆除模具,养护 28 d 进行力学试验。参照相关规范的要求^[17],对 UHP-ECC 进行了力学性能测试,测得的均值结果见表 2,极限拉应变均值达 1.10%,具有优异的力学性能且明显的拉伸硬化特性,其中一条受拉应力-应变曲线如图 2 所示。

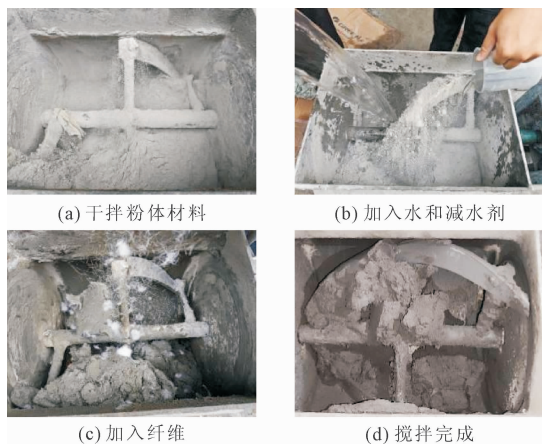


图 1 UHP-ECC 现场制备过程

表 2 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	极限抗拉强度/MPa	极限拉应变/%
85.6	77.80	40.10	5.10	1.10

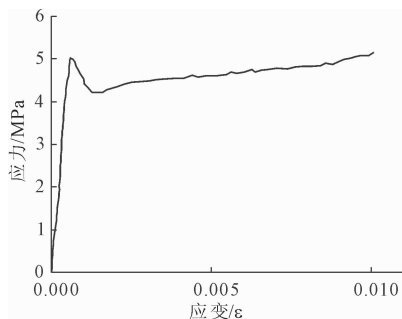


图 2 UHP-ECC 轴心拉伸应力-应变曲线

1.3 砖砌体柱试件制作

试件采用 M2.5 低强度砂浆和已有 MU10 黏土烧结实心砖进行砌筑。依据《砌体基本力学性能试验方法标准》^[18],所有试件均按照 240 mm × 370 mm × 720 mm 的尺寸进行制作,如图 3 所示。为研究清水砖砌体柱的 UHP-ECC 嵌缝加固效果,综合考虑了已有文献对嵌缝加固深度的常用取值范围^[3-4],以及实际工程中为确保施工安全对嵌缝深度的限制(掏缝深度过大可能导致施工中砖柱稳定性不足,进而导致砖柱破坏倒塌),故设定四面清水嵌缝 20 mm,不考虑嵌缝深度作为参数研究。试验共设计了 2 组砖柱(每组两个试件),其中,未加固砖柱作为基准对照组,标记为“C”;采用嵌缝加固的砖柱试件记为“AGF”,具体参数详见表 3。

表 3 试件设计信息

试件编号	砂浆强度	加固方案	个数
C	M2.5	未加固,对比试件	2
AGF	M2.5	20 mm 嵌缝加固	2

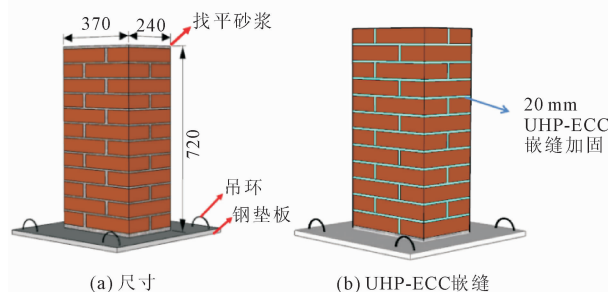


图 3 砖砌体柱试件尺寸及构造示意(单位:mm)

1.4 砌体柱砌筑注意事项

为方便砌筑定位和后期可移动性,在 18 mm 厚带吊钩刚性垫板上砌筑砖柱。砌筑前通过精确弹线确定砖块摆放区域,并使用 1:3 水泥砂浆进行找平。施工过程中严格控制砌体垂直度和灰缝厚度在 8 mm ~ 12 mm,同时避免出现中心通缝。试件顶部最终采用 10 mm 厚 1:3 水泥砂浆进行找平处理,全过程符合规范要求。试件砌筑完成后,根据试件砌筑质量检查结果参照验收规范^[19]相关要求,测量所得的垂直度偏差、水平灰缝厚度以及竖向灰缝宽度均符合要求。

基于对建筑保护的最小干预原则、可识别性原则及可逆性,最大限度地减少对砌体结构的扰动和破坏,对清水柱采用 UHP-ECC 嵌缝加固。UHP-ECC 嵌缝加固清水柱顺序如下:①将原清水柱灰缝平均掏缝 25 mm;②对掏除部分上下的砖块表面进行清理;③嵌入 20 mm 深 UHP-ECC,凹进去 5 mm。试件嵌缝施工完成后,应立即覆盖养护膜,每天浇水养护三次以上,持续养护 28 d。试件 UHP-ECC 嵌缝加固砖柱的过程如图 4 所示。

1.5 试验方法

本项试验于 2024 年 12 月在福州大学结构馆开展。加载设备采用电液伺服压力试验机对试件施加荷载,具体试验装置布置如图 5 所示。在安装试件前,预先清除下承台杂物。随后,在试件上表面安放一块钢板,并使用水平仪检测其平整度;对存在间隙的部位,采用快硬水泥膏进行局部填补,以确保受力均匀。试验加载过程参照《试验基本力学性能试验规范》^[20](GB/T 50129—2011)规定,试验加载前先施加预估极限荷载 10% ~ 20% 的轴向压力,重复三次,预压后完全卸荷。正式加载时,采用位移控制加载,加载速度为 0.5 mm/min,当破坏阶段荷载降低到峰值的 85% 时停止加载。

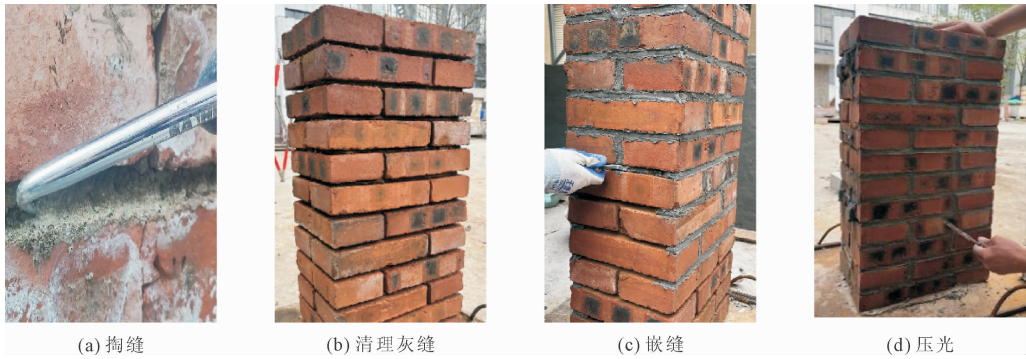


图 4 清水柱试件加固过程

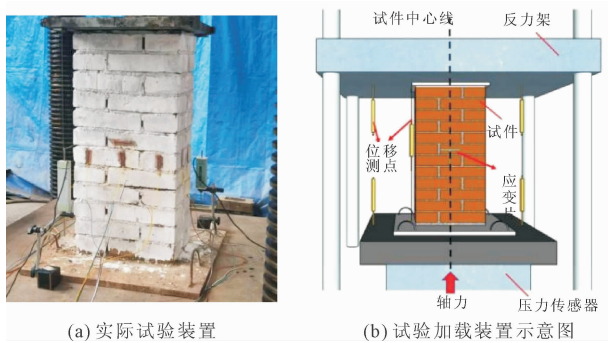


图 5 轴心受压试验图

2 轴压试验结果与分析

2.1 试验现象

2.1.1 未加固试件

C 组为 2 个未加固对比试件,其破坏过程基本一致,破坏形态如图 6 所示。在轴向压缩荷载作用下,未加固试件最终呈现出典型的脆性破坏模式,在初始受力阶段,试件基本处于线弹性阶段,表面未观察到裂纹的产生。随着荷载持续增加,试件各立面相继产生裂缝,并呈现宽度渐进增大的发展趋势。

当荷载达峰值的 70%~80% 时,试件出现竖向主裂缝并逐渐贯通,进入弹塑性阶段。荷载继续增加,试件破坏,裂缝迅速扩展,砌体表面有块状掉落现象(图 6(c)),被裂缝分割为多个小立柱,最终部分长裂缝形如阶梯状(图 6(d)),压力机数值快速回退,试件达到破坏状态。

2.1.2 UHP-ECC 嵌缝加固试件

AGF 组为两个轴心受压清水砖柱,采用 20 mm 深 UHP-ECC 四面嵌缝加固。加载初期,试件发出轻微开裂声;随荷载增大,内部压碎声加剧,UHP-ECC 出现竖向裂缝但未明显损坏。接近峰值荷载时,UHP-ECC 与砖皮共同鼓胀,主裂缝贯通多皮砖。峰值后砖皮脱落,中南、北面破坏严重,最终中上部发生破坏。AGF-2 初期行为类似,裂缝沿灰缝扩展并贯通,西面呈竖向延伸、中部宽两端窄。荷载达峰值 80%~90% 时,柱体外鼓,局部砖皮剥落。进入下降段后变形加速,承载力骤降,砌块表层逐层脱落,UHP-ECC 被挤出、脱粘,上端三皮砖塌落,因上端约束较弱导致找平砂浆压碎,内部砖块裂成多个小柱。AGF 组破坏形态如图 7 所示。

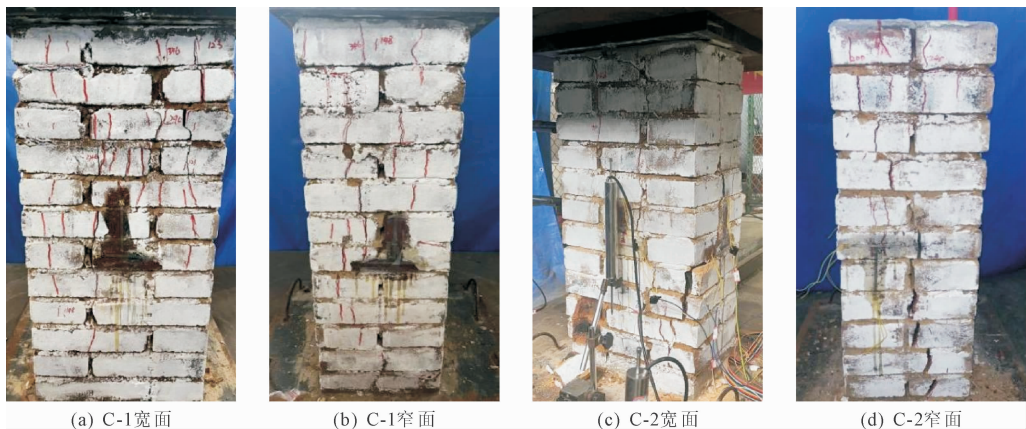


图 6 C 组试件破坏形态

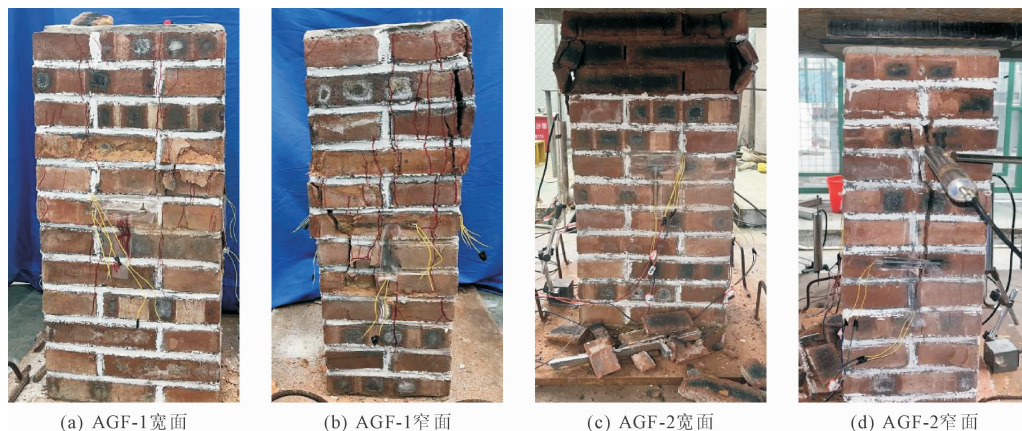


图7 AGF 组试件破坏形态

2.2 荷载位移曲线

各试件的荷载-位移曲线如图8所示,未加固砖柱在受压时表现出典型的脆性破坏,刚度较低、变形能力有限,几乎不产生塑性变形。UHP-ECC 嵌缝加固试件破坏规律与对比组基本一致:加载初期为弹性阶段,荷载-位移呈线性;随后进入塑性阶段,值得注意的是,嵌缝加固试件的塑性阶段产生的位移有所增大;峰值后荷载迅速下降。清水柱 AGF 试件极限荷载平均值为 473 kN,较未加固试件提高 21%,总体上整体抗压承载力提升幅度有限。分析认为,加载初期,原砌筑砂浆与嵌入 UHP-ECC 材料间存在不可避免的初始缝隙,在加载过程中容易导致应力分布不均匀,荷载主要由粘土砖和原砂浆承担。随着荷载增加,由于 UHP-ECC 材料强度较原砂浆高,UHP-ECC 对原砂浆起到一定的约束作用,提高了原砂浆的极限承载力。加载后期,在 UHP-ECC 参与共同受力后,应力逐渐由砂浆层向置换区域转移,极易产生应力集中导致砖皮鼓出最终破坏,UHP-ECC 本身性能未得到充分发挥,因此试件整体抗压承载力提升幅度有限。

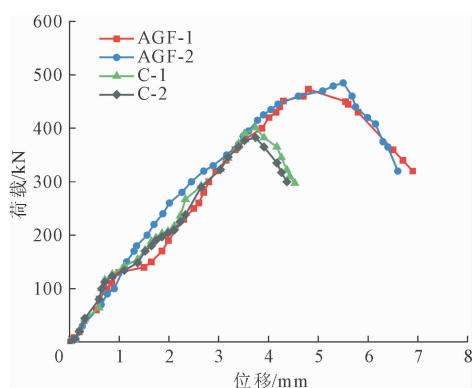


图8 荷载-位移曲线

此外,与已有研究相比^[3],UHP-ECC 嵌缝加固砖柱的承载力的提升幅度更高,表明 UHP-ECC 在抗压性能方面的具有优势,尽管最终破坏形态仍是脆性破坏,但能有效延缓了主裂缝的贯通,从而提高了试件的变形能力与残余承载力。

2.3 破坏机理

未加固砖砌体柱的破坏分为三个阶段:首先,在弹性受力阶段,砖体同时承受压力、弯矩及剪力的共同作用。材料间的变形不协调会引发界面约束效应,当横向拉应力超过限值,初始裂缝就会形成。随后,裂缝持续发展阶段竖向裂缝增多,灰缝处应力集中加速裂缝扩展并逐渐贯通。最终,临近峰值荷载时裂缝迅速增宽增多,角部砖块外鼓剥落,承载力急剧下降,砖体碎裂为多个小柱,发生脆性破坏。

采用 UHP-ECC 嵌缝加固的清水砖柱在轴心受压下的破坏过程分为三个阶段:弹性阶段中,初始空隙导致应力分布不均,UHP-ECC 应力滞后,裂缝始于砖内;弹塑性阶段,应力向高强度 UHP-ECC 转移,伴随表面外鼓和多裂缝扩展;破坏阶段时,主裂缝贯通、UHP-ECC 约束失效,最终砖体被分割压溃。该破坏现象出现主要归因于以下原因:①UHP-ECC 材料强度和砂浆强度差异大,在受力过程中,两者变形不协调,导致在界面处产生较大的剪切应力,进而引起砖皮向外鼓出;②UHP-ECC 与砖块之间虽通过仔细处理,界面粘结性能有所提升,但在高应力状态下仍可能出现脱粘现象,尤其在应力集中区域。加固试件与未加固试件破坏模式类似,但破坏机理差异显著。

3 清水砖柱嵌缝加固施工工艺要点

UHP-ECC 嵌缝加固技术的可靠性已得到试验

证明,但其施工工艺和施工技术要点仍需要重点关注。基于试验,提出了 UHP-ECC 嵌缝加固砖柱的施工流程,包括施工准备、基层处理、嵌缝施工和养护四个主要阶段,具体施工工艺和技术要点介绍如下:

(1) 施工准备:施工前,为避免掏缝和嵌缝过程中对上部结构造成不利影响,必须严格遵循“先支撑后加固”的基本原则,对上部结构的受力构件设置可靠的支撑,将原有荷载部分或全部临时转移至该支撑体系,从而保障其在后续施工期间的稳定性^[21]。

(2) 基层处理:使用专用工具(钩刀)将灰缝砂浆剔除 25 mm。待完成掏缝工作后,使用电动钢丝刷对缝内砖块上下表面残留的砂浆进行清理,再用毛刷清理干净,从而确保 UHP-ECC 与砖块界面之间能够良好的粘接。基层处理如图 9 所示。



图 9 基层处理图

(3) 嵌缝施工:UHP-ECC 材料需严格按设计配合比采用机器拌制。施工时应采取分段和分两侧施工策略,即一根柱对称两侧同时施工,上下分两段分段施工。嵌缝过程中,使用专用工具将加固材料分多次、挤压填充进灰缝内。同时,还应立即用湿毛巾将残留在砖柱表面的 UHP-ECC 轻轻擦净,以防其硬化后附着,影响美观。

(4) 养护:加固施工结束后及时对 UHP-ECC 进行保湿养护,根据气候条件,通常 6 h 后开始浇水养护,确保其处于湿润状态。待 UHP-ECC 养护 7 d 后达到设计强度,可拆除临时支撑,UHP-ECC 和砖柱开始协同受力,此时加固体系开始正式起效并承受荷载。

4 结 论

(1) 试验结果表明,未加固砖柱表现出典型的脆性破坏模式,此现象与多数已有研究结论一致。具体表现为:加载初期,砖柱整体处于弹性阶段,材料间能协同工作;当达到开裂荷载时,构件裂缝急剧增多,被分割成多个小柱体,迅速丧失承载能力。

(2) 嵌缝加固后的试件破坏荷载比未加固试件均有一定程度提高,平均提升幅度为 21%,破坏形态和裂缝发展过程类似。

(3) 制备的 UHP-ECC 具有优异的力学性能和较好的工作度。加固人工施工操作方便,不需要特殊界面处理,直接嵌入灰缝内。

(4) 提出了 UHP-ECC 加固既有砖柱施工流程,以及工程加固施工时应设置临时支撑和基层处理等关键措施,确保嵌缝加固施工安全可靠,该技术可为既有砖砌体房屋加固提供参考。

参考文献:

- [1] 刘斌超. 某砖木结构历史风貌建筑加固修缮案例分析[J]. 中国建筑金属结构, 2024, 23(10): 109-111.
- [2] 欧阳煜, 刘能科. 外包钢加固轴心受压砖柱的受力性能分析[J]. 建筑结构, 2006, 36(11): 27-29.
- [3] 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]. 哈尔滨工业大学学报, 2017, 49(12): 184-188.
- [4] 谢益人, 石建光. 砂浆置换法加固砌体结构的技术要点[J]. 墙材革新与建筑节能, 2018(12): 55-58.
- [5] 周长东, 张晨, 景杰婧. ECC 嵌缝加固砖砌体的剪切性能试验研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2023, 50(11): 128-135.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] Li V C. On engineered cementitious composites (ECC): a review of the material and its application [J]. Journal of Advanced Concrete Technology, 2003, 1(3): 215-230.
- [9] Ye Binbin, Zhang Yaoting, Han Jianguo. Effect of water to binder ratio and sand to binder ratio on shrinkage and mechanical properties of high-strength engineered cementitious composite [J]. Construction and Building Materials, 2019, 226: 899-909.
- [10] 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.
- [11] 郑国清. 薄层 UHP-ECC 与既有砖墙界面粘结性能研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2024, 22(6): 30-36.
- [12] 张德和, 商昊江, 吴应雄, 等. UHP-ECC 加固 180 mm 厚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.

(下转第 78 页)

~60.9%,各项指标均满足设计要求,杂填土密实度与均匀性显著改善。

(2) 针对类似大厚度杂填土地基,建议采用超高能级强夯(20 000 kN·m~25 000 kN·m),夯击次数8~9次/遍,夯点间距按能级动态调整。施工前需通过试夯确定区域适应性参数,并以夯沉量稳定性和多方法检测结果作为质量控制依据。

参考文献:

- [1] 王家磊,韩进宝,马新岩,等.高能级强夯加固深厚杂填土地基现场试验研究[J].地下空间与工程学报,2021,17(4):1154-1163,1189.
- [2] 王铁宏,水伟厚,王亚凌,等.10000 kN·m高能级强夯时的地面变形与孔压试验研究[J].岩土工程学报,2005(7):759-762.
- [3] Wei Yingjie, Yang Yuyou, Wang Jintai, et al. Performance evaluation of high energy dynamic compaction on soil-rock mixture geomaterials based on field test [J]. Case Studies in Construction Materials, 2023, 18: e01734.
- [4] 韩晓雷,席亚军,水伟厚,等.15000 kN·m超高能级强夯法处理湿陷性黄土的应用研究[J].水利与建筑工程学报,2009,7(3):91-93.
- [5] 詹金林,水伟厚,何立军,等.18000 kN·m能级强夯处理深厚填海碎石土的试验[J].工业建筑,2010,40(4):96-99.
- [6] 何立军,秦劭杰,刘增华,等.25000 kN·m高能级强夯地基标贯和动探试验对比研究[J].地基处理,2023,5(4):271-278.
- [7] 史光富,雷渊,贺建虎,等.25000 kN·m超高能级强夯处理大厚度填土地基现场试验研究[J].地基处理,2023,5(S2):12-18.
- [8] 王孝健,谢锦波.超高能级强夯加固深厚抛石填海地基工艺试验研究[J].中国港湾建设,2025,45(1):55-61.
- [9] 于健,刘江,郭玉彬,等.超高能级强夯法现场试验分析[J].中国港湾建设,2017,37(12):42-46.
- [10] 建筑地基处理技术规范:JGJ79—2012[S].北京:中国建筑工业出版社,2012.
- [11] 朱建民,董宝志,于永堂,等.杂填土斜坡场地强夯振动传播规律与影响参数分析[J/OL].土木与环境工程学报(中英文),1-11[2025-05-30].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1218.TU.20250225.1121.004.html>.
- [12] Fu Jianbao, Zhang Ruiqi, Liu Aimin. Filed test on 25000 kN·m ultra high energy level dynamic consolidation on large thickness gravel foundation[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2018,439(5):1-6.
- [13] 工程岩体分级标准:GB/T 50218—2014[S].北京:中国计划出版社,2014.
- [14] 《工程地质手册》编委会.工程地质手册(第五版)[M].北京:中国建筑工业出版社,2018.
- [15] 建筑地基检测技术规范:JGJ 340—2015[S].北京:中国建筑工业出版社,2015.
- [16] 秦振华.软土地基平板载荷试验稳定标准的研究[J].岩土工程学报,2017,39(S2):87-90.

(上接第 22 页)

- [13] 王永维,罗苓隆,吴体,等.优秀历史建筑保护的基本原则[J].四川建筑科学研究,2010,36(3):1-4.
- [14] 砌墙砖试验方法:GB/T 2542—2012[S].北京:中国建筑工业出版社,2012.
- [15] 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.
- [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] 超高性能混凝土(UHPC)技术要求:T/CECS 10107—2020[S].北京:中国标准出版社,2020.
- [18] 砌体基本力学性能试验方法标准:GB/T50129—2011[S].北京:建筑工业出版社,2011.
- [19] 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.
- [20] 试验基本力学性能试验规范:GB/T 50129—2011[S].北京:住房和城乡建设部,2011.
- [21] 刘宇.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[J].水利与建筑工程学报,2025,23(5):106-112.