

UHPC 灰缝加固整毛石墙体静力试验研究

翁志英¹, 吴应雄², 许昊³

(1. 福州职业技术学院, 福建 福州 350108;

2. 福州大学 土木工程学院, 福建 福州 350108;

3. 福建农林大学 交通与土木工程学院, 福建 福州 350002)

摘要: 福建省沿海地区现存大量石砌体建筑, 其石砌体墙采用干砌甩浆的砌筑方式, 砂浆饱满度低以及低强度黏土混合砂浆导致石砌体墙抗剪性能差。基于已有超高性能混凝土(UHPC)对整毛石墙灰缝嵌缝加固的成果, 提出采用 UHPC 对整毛石墙灰缝进行点状嵌缝加固, 对 18 个整毛石墙水平灰缝点状加固试件进行抗剪性能试验, 以竖向压应力水平和加固方式为主要研究参数, 对比分析加固前后整毛石墙体灰缝的破坏特征和受力机理等。结果表明: 与未加固石墙试件相比, UHPC 加固后的整毛石墙灰缝抗剪承载力显著提升; 在 UHPC 点状加固平面面积相近的基础上, 改变点状 UHPC 的加固位置和数量对整毛石墙灰缝的抗剪承载力基本没有影响, 因此采用两点点状嵌缝的加固方式, 施工简单且满足安全要求。

关键词: 既有整毛石墙体; 抗剪性能; 超高性能混凝土; 点状墙体嵌缝

中图分类号: TU363

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2025)01-0048-07

Static Force Test on UHPC Mortar Joint Reinforcement of Solid Stone Wall

WENG Zhiying¹, WU Yingxiong², XU Hao³

(1. Fujian Building Science Research Institute Co., Ltd., Fuzhou, Fujian 350108, China;

2. College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350108, China;

3. College of Transportation and Civil Engineering, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou, Fujian 350002, China)

Abstract: There were a large number of stone masonry buildings in the coastal areas of Fujian Province. The stone masonry walls are usually built by dry masonry and mortar throwing, which results in low mortar fullness and poor shear performance due to the use of low-strength clay mixed mortar. Based on the existing achievements of using ultra-high performance concrete (UHPC) to reinforce the mortar joints of whole rubble walls, a point like reinforcement method using UHPC was proposed. Shear performance tests were conducted on 18 horizontal mortar joint point like reinforcement specimens of whole rubble walls, with vertical compressive stress level and reinforcement method as the main research parameters. The failure characteristics and stress mechanisms of the mortar joints of whole rubble walls before and after reinforcement were compared and analyzed. The results showed that compared with the unreinforced stone wall specimens, the shear bearing capacity of the mortar joints in the whole rubble stone wall reinforced with UHPC was significantly improved. With similar surface area of UHPC point reinforcement, changing the reinforcement position and quantity of point UHPC has little effect on the shear bearing capacity of the entire masonry wall mortar joint. Therefore, the reinforcement method of two-point point filling is adopted, which is simple to construct and meets safety requirements.

Keywords: existing long pieces of stone walls; shear resistance performance; ultra-high performance concrete; dot-embedded in stone wall mortar joint

收稿日期: 2024-10-12

修稿日期: 2024-11-10

基金项目: 福州职业技术学院课题(LX-2024-HX-004); 福建省建设科技研究开发项目(2023-B-8; 2023-k-45)

作者简介: 翁志英(1989—), 女, 讲师, 主要从事结构抗震与加固、建筑材料相关研究工作。E-mail: 13400560093@163.com

通讯作者: 吴应雄(1969—), 男, 教授, 主要从事结构抗震与加固相关研究工作。E-mail: WYXFD2006@fzu.edu.cn

福建省沿海地区村镇存在数量庞大的石砌体民宅,结构形式通常分为:①纯石结构房屋:其承重墙、楼板、梁和柱、甚至楼梯等构件皆采用料石制作;②石混结构房屋:其承重墙采用整毛石砌筑,楼盖采用 RC 楼板或木楼板;③“下石砌,上砖混”结构房屋:其是在原有 1-2 层纯石结构房屋基础上加盖 1-2 层的砖混结构。这些石砌体民宅采用当地盛产质地坚硬的花岗岩建造,花岗岩经过人工开采和简易加工成为粗料石,房屋的墙体采用块状粗料石即整毛石,当地俗称“条石”,其截面尺寸约为 210 mm × 210 mm,长度通常为截面尺寸的 2~5 倍。目前,福建闽南地区石砌体房屋普遍老龄化,且由于其材料特性、结构组成和当地约定俗成的砌筑方式,导致房屋整体性差、抗震性能极差^[1]。

已有研究表明,作为竖向受力构件的条石墙体,由于其灰缝砂浆强度极低,粘土混合砂浆的抗压强度介于 0.40 MPa~1.5 MPa 之间,导致墙体抗剪强度低^[2]。柴振玲等^[2]、赵娜^[3]、方霄鹏等^[4]通过试验和有限元分析指出石砌体墙灰缝是石墙传递剪力的薄弱环节,破坏通常出现在墙体灰缝处。因此,深入研究石砌体墙灰缝的抗剪性能及受力机理具有重要意义。鉴于此,研究人员对石墙灰缝开展不同方式的加固研究。王兰等^[5]开展了石砌体结构中水泥砂浆灰缝抗震性能试验和有限元模拟分析,发现随竖向压应力水平和砂浆强度的提高,灰缝抗剪强度和总耗能量均有所增加。施养杭^[6]采用石材精加工所产生的石粉作为集料配置浆体,对石墙灰缝进行灌浆加固试验,试验结果表明,经灌浆加固后石砌体的抗剪强度显著提高。郭子雄等^[7]和刘小娟等^[8]提出钢筋-聚合物砂浆嵌缝加固石墙灰缝,发现石墙的开裂荷载、极限荷载、整体性和抗倒塌能力均显著提高。Hou 等^[9]对石砌体墙灰缝采用 ECC (高延性水泥基复合材料)嵌缝加固,发现灰缝进入粘结滑移破坏后 ECC 嵌块并未发生碾压碎裂破坏,而是作为完整的一块“钢板”嵌在灰缝之间。

上述加固技术均沿着石墙水平灰缝及竖向灰缝通长加固,虽能在一定程度上改善石墙灰缝的抗剪性能,但仍存在施工复杂、工程造价高等问题,难以在数量庞大的石砌体房屋中推广应用。随着新型材料的发展和应用,超高性能混凝土(Ultra-High Performance Concrete,简称“UHPC”)已逐步应用于工程加固中^[10-11]。近年来,UHPC 加固砌体墙的应用得到关注,吴应雄等^[12-13]、黄伟等^[14-15]开展了 UHPC 与石材界面粘结性能试验研究,结果表明 UHPC

与石材之间具有较高的界面粘结力,且两者能较好地协同工作。基于 UHPC 与石材之间优异的材结融合特点并考虑到上述几种加固方法中的灰缝通长嵌缝加固不易实施等因素,吴应雄等^[13]、朱远浩^[16]、施微丹等^[17]提出采用 UHPC 点状加固条石墙体灰缝,加固方式分别为两点点状和三点点状嵌缝加固。本文拟对采用 UHPC 点状加固后的石墙进行灰缝静力试验,研究石墙灰缝在单向水平荷载作用下的变形规律及破坏形态等,分析竖向压应力水平及加固方式对石墙灰缝抗剪性能的影响及其发展规律,以期对石砌体房屋加固提供参考。

1 试件材料与方法

1.1 试件材料

整毛石尺寸通常宽度和高度毛截面为 210 mm,长度为宽度的 2~5 倍,通常大于 3 倍。所以试验选取上下两皮整毛石,尺寸为宽×高×长=210 mm × 210 mm × 630 mm,为了便于试验加载,中间一皮整毛石长度为 840 mm,灰缝厚度按照常规为 30 mm。

两点点状嵌缝尺寸为 100 mm × 60 mm (宽度 × 深度),三点点状嵌缝尺寸为 70 mm × 60 mm (宽度 × 深度),灰缝位置根据施工现场实际情况任意选取。本次试验总共制作 18 个试件,其中未加固试件、双侧两点点状嵌缝加固试件和双侧三点点状嵌缝加固试件各 6 个。其中,未加固试件为基准试件。图 1 为既有整毛石墙体示意图,试件尺寸示意图见图 2,试件设计参数见表 1。表 1 中,石墙灰缝试件试验结束后测量灰缝多处 UHPC 深度并取平均值即为实际深度。

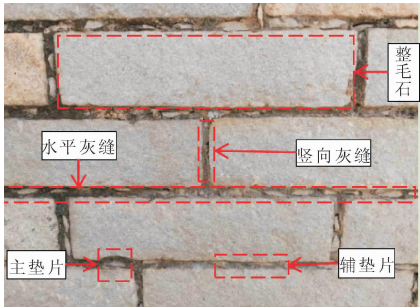


图 1 既有整毛石墙体

砌筑整毛石均取自福建省泉州市旧房屋拆下的整毛石,从整毛石中随机切割 6 个边长为 70 mm 的立方体试块确定石材的抗压强度,实测石材抗压强度范围处于 128.34 MPa~170.16 MPa 之间,石试块抗压平均强度为 152.42 MPa,变异系数为 11.39%,属于坚硬的花岗岩^[2]。

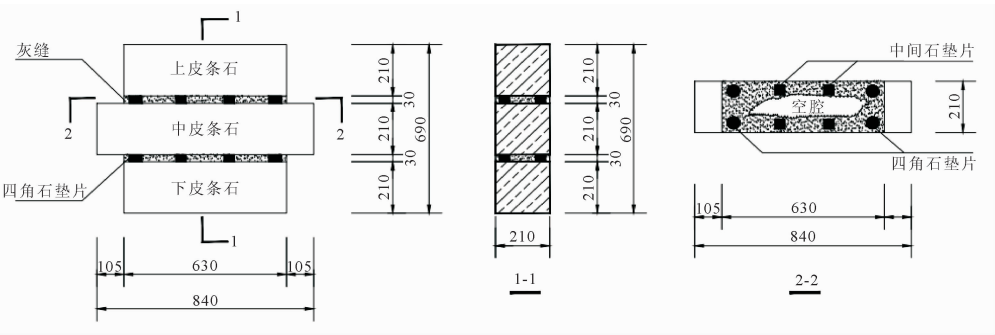


图2 整毛石墙体灰缝试件尺寸(单位:mm)

表1 试件设计参数

组号	试件编号	σ /MPa	加固方式	尺寸备注/mm
SMQT1	SMQT1-0.20a	0.20	未加固	基准试件
	SMQT1-0.20b			
	SMQT1-0.40a	0.40		
	SMQT1-0.40b			
	SMQT1-0.60a	0.60		
	SMQT1-0.60b			
SMQT2	SMQT2-0.20a	0.20	双侧两点 点状加固	100(宽度) ×60(深度)
	SMQT2-0.20b			
	SMQT2-0.40a	0.40		
	SMQT2-0.40b			
	SMQT2-0.60a	0.60		
	SMQT2-0.60b			
SMQT3	SMQT3-0.20a	0.20	双侧三点 点状加固	70(宽度) ×60(深度)
	SMQT3-0.20b			
	SMQT3-0.40a	0.40		
	SMQT3-0.40b			
	SMQT3-0.60a	0.60		
	SMQT3-0.60b			

试验砌筑砂浆采用既有石砌体房屋使用的黏土混合砂浆,并考虑既有石墙现有砂浆强度低的特性,进行黏土混合砂浆配合比调制及相关的力学性能测试,最终确定低强度混合砂浆的配合比为水泥:红土:砂:水=1.0:4.0:8.0:3.34,其中水泥使用的是32.5级硅酸盐水泥。从砌筑砂浆中随机选取部分砂浆制成边长为70.7 mm的立方体试块,养护至28 d进行抗压强度试验,试验结果如表2所示。根据文献^[11,18-19]得出:砂浆的弹性模量可以用 $E_2=1057f_2^{0.84}$ (f_2 为砂浆的抗压强度)来表达,据此公式计算出的砂浆抗压强度 f_2 介于0.607 MPa~0.87 MPa之间,弹性模量 E_2 介于755.05 MPa~940.31 MPa之间。

UHPC点状加固条石墙体灰缝,采用POM纤维代替钢纤维掺入UHPC进行一系列研究,最终确定

了基于加固石砌体结构的POM-UHPC配合比,具体配合比见表3。

表2 试块抗压强度

试件编号	实测砂浆试块强度/MPa	平均强度/MPa	变异系数
1	0.607	0.77	0.092
2	0.760		
3	0.790		
4	0.870		
5	0.710		
6	0.810		

表3 UHPC配合比 单位:kg/m³

水泥	硅灰	石灰石	石英粉	70~140目石英砂	40~70目石英砂	POM纤维	减水剂	水
580.00	193.30	515.60	72.57	217.71	435.42	28.20	20.00	165.40

参照《超高性能混凝土(UHPC)技术要求》^[11](T/CECS 10107—2020)的有关规定对UHPC的力学性能进行测定。UHPC实测抗压强度平均值 f_c 为115.32 MPa,弹性模量平均值 E 为41 GPa,抗折强度平均值为10.70 MPa,极限拉应变平均值 ε 为1.08%,满足试验设计要求。

1.2 试件制作

试件均由同一批成熟的工匠采用干砌甩浆进行砌筑,整毛石墙灰缝砌筑完成后自然养护14 d,此时砂浆强度基本达到设计强度,进行掏缝并嵌缝加固处理,继续养护至28 d并进行静力试验,试件加固做法见图3。砌筑试件的过程和质量满足建筑施工规范要求,其中两点点状嵌缝尺寸为100 mm×60 mm(宽度×深度),三点嵌缝尺寸为70 mm×60 mm(宽度×深度),通常根据现场条件确定点状位置,但是保证点状平面面积基本相等。

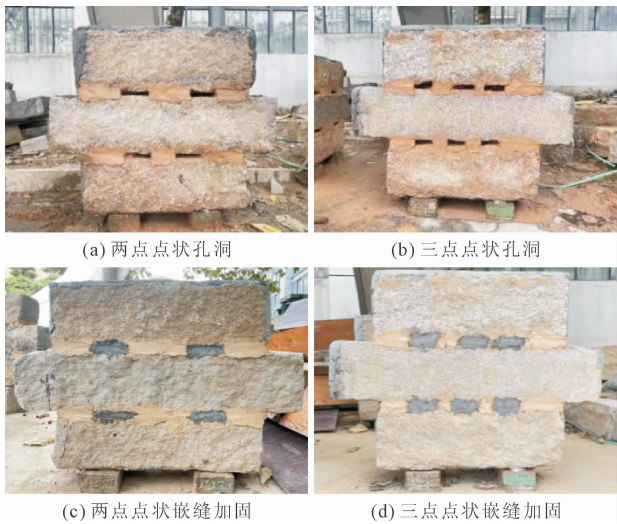


图 3 整毛石墙体双侧嵌缝加固图

1.3 试验加载方案

基于已有条石抗震性能试验研究的结果^[16],竖

向压应力水平取 0.20 MPa、0.40 MPa、0.60 MPa(分别对应一层、二层、三层石砌体房屋第一皮条石处的应力值),同一应力值试件分别制作 *a*、*b* 两个同参数试件。

根据吴应雄等^[13]、朱远浩^[16]提出的采用 UHPC 点状加固条石墙体灰缝,加固方式分别为两点点状和三点点状嵌缝加固。试验按双侧两点点状及双侧三点点状嵌缝加固方式。

试验采用静力加载,其中混凝土支墩和钢架由锚杆固定在地面上。钢架通过螺杆和配套件限制第一、三皮整毛石条石水平方向位移和转动。竖向荷载和水平荷载分别通过千斤顶(200 t)施加。竖向荷载作用于构件中轴线上,分别加载至 0.20 MPa、0.40 MPa、0.60 MPa 时再进行水平荷载的加载。水平荷载的初始值为 0 kN,以 5 kN 进行逐级加载。当灰缝与上下相邻条石的任意粘结面发生剪切破坏即视为试件破坏。加载装置及试验构件示意图如图 4。



图 4 加载装置及试验构件示意图

2 试验结果与分析

2.1 试验过程描述

18 个整毛石墙灰缝试件在静力试验过程中均发生灰缝砂浆与石材界面的粘结滑移破坏,破坏过程类似。加载初期,水平位移增加较小,荷载增加较快,水平荷载-位移曲线呈线性关系,灰缝近似处于弹性阶段。持续加载到灰缝开裂后,未加固试件在砂浆层开裂后立即进入下一阶段,UHPC 加固试件在黏土混合砂浆开裂后,位移-荷载曲线仍能保持近似线性关系。未加固试件开裂荷载值介于其峰值荷载 69%~75%之间,水平位移平均值为 1.01 mm;灰缝下表面最早开始出现砂浆脱粘,试件发出轻微声响,下灰缝出现裂缝,同时有粉末状砂浆从灰缝处掉落。加固试件的开裂荷载值介于其峰值荷载 23%~50%之间,水平位移平均值为 0.51 mm;初始破坏主要包括点状 UHPC 与砂浆层脱粘、灰缝下表

面出现水平裂缝等。随着竖向压应力的增大,开裂荷载及其对应的水平位移也随之增大,压应力为 0.40 MPa 的未加固试件破坏形态如图 5 所示。

随着水平荷载持续增加,未加固试件灰缝上下表面都出现新的裂缝,并随着水平荷载的增加不断开展,灰缝砂浆的剥落面积随着水平荷载的增加而不断增大,构件灰缝下表面出现水平贯穿裂缝(试件平均水平位移值为 3.33 mm~4.20 mm),此时水平荷载达到峰值。UHPC 点状加固试件在此阶段不断出现新的裂缝(UHPC 与条石界面水平裂缝和灰缝斜向剪切裂缝)并持续开展,但裂缝数量明显少于未加固试件,且灰缝的高度变化不明显。当水平荷载加载至峰值荷载的 80% 时,试件发出崩裂声响,点状 UHPC“拉断”,并出现竖向裂缝。随后黏土混合砂浆逐渐小面积开始剥离脱落,但相对于未加固试件,砂浆剥离现象明显缓解,灰缝下表面出现水平贯穿裂缝(构件水平位移值为 2.34 mm~3.68

mm)时,水平荷载达到峰值荷载。压应力为 0.40 MPa 的加固试件破坏形态如图 6 所示。

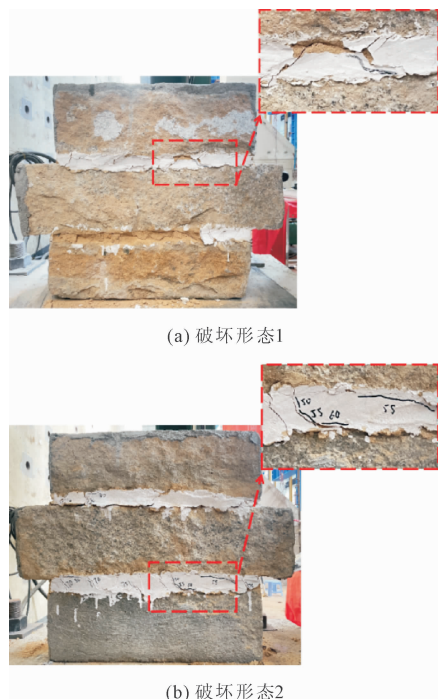


图 5 未加固试件破坏形态(压应力 0.40 MPa)

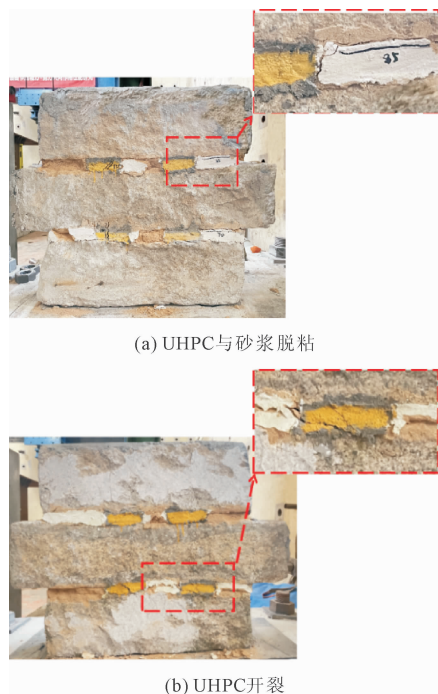


图 6 UHPC 加固试件破坏形态(压应力 0.40 MPa)

随后,整毛石沿着灰缝水平贯通裂缝滑移并摩擦耗能,此阶段的开始往往伴随着一声较大的声响,构件进入摩擦滑移阶段,并且声响随着压应力水平的提升而增大。此后灰缝与条石发生明显错动,并

伴随着石头相互碾磨的声响,混合砂浆大面积剥离脱落,部分垫片被碾碎,试件承载力逐渐丧失,位移增加快速,此时可视为破坏。

2.2 荷载-位移曲线

各石墙灰缝试件的荷载-位移曲线图如图 7 所示。图 7 中试件的荷载和位移值的代表值均采用平均值。

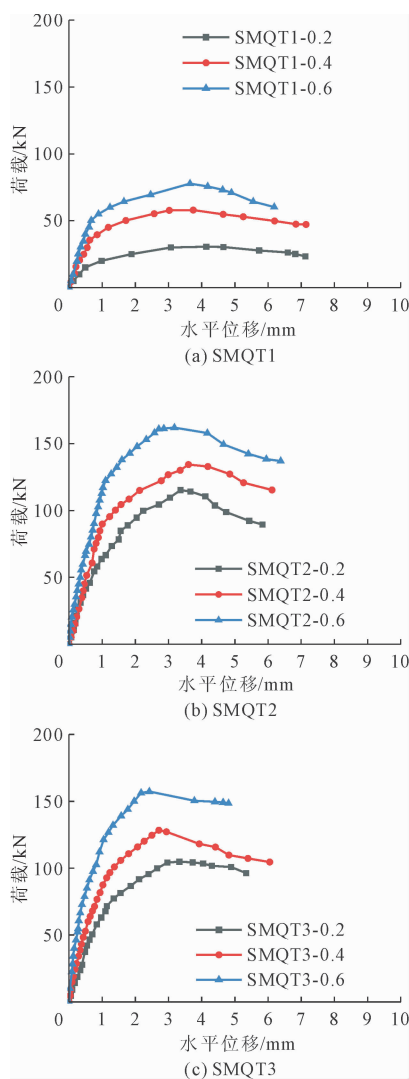


图 7 水平位移-荷载曲线

从图 7 中可以看出:①竖向压应力对试验试件抗剪性能有显著影响。伴随着竖向压应力的提升,荷载-位移曲线的弹性段延后,并延缓裂缝开展,裂缝数量稍有增加;灰缝内的垫片被压碎的数量,随着竖向压应力水平的提升呈略微增加的趋势;②UHPC 点状加固方法可显著提高整毛石墙灰缝的抗剪承载力。通过对比两点状加固试件(UHPC 嵌缝加固面积为 $24\,000\text{ mm}^2$)与三点点状加固试件(UHPC 嵌缝加固面积为 $25\,200\text{ mm}^2$)荷载-位移曲线可以得

到,在近乎同等嵌缝加固面积下,改变点状加固的位置和数量对试件的抗剪承载力并无明显影响^[17-18]。

2.3 试验结果

18 个整毛石墙试件的加载过程及破坏规律类似,限于篇幅,仅列出竖向应力 $\sigma_0 = 0.40\text{ MPa}$ 工况的试验数据,如表 4 所示。为了便于计算水平抗剪强度,按照灰缝全截面进行计算,运用抗剪强度进行比较可有效地避免由于试件尺寸所带来的误差。表 4 中, P_{cr} 表示试件开裂的水平荷载; Δ_{cr} 表示开裂荷载所对应的位移; P_{max} 表示试件的峰值荷载; Δ_{max} 表示试件的峰值荷载所对应位移; τ 表示试件达到峰值荷载所对应计算得到的界面剪切强度; τ_{avg} 表示界面抗剪强度的平均值。竖向压应力对试件抗剪强度影响如图 8 所示。

表 4 石墙体灰缝静力试验数据

试件编号	σ_0 /MPa	P_{cr} /kN	Δ_{cr} /mm	P_{max} /kN	Δ_{max} /mm	τ /MPa	τ_{avg} /MPa
SMQT1-0.40a	0.40	40	1.120	55.25	3.64	0.408	0.405
SMQT1-0.40b		45	0.609	63.25	3.33	0.402	
SMQT2-0.40a		40	0.406	133.75	3.62	1.010	1.030
SMQT2-0.40b		40	0.401	138.25	3.80	1.050	
SMQT3-0.40a		40	0.402	121.25	3.14	0.920	0.980
SMQT3-0.40b		50	0.209	135.75	2.34	1.030	

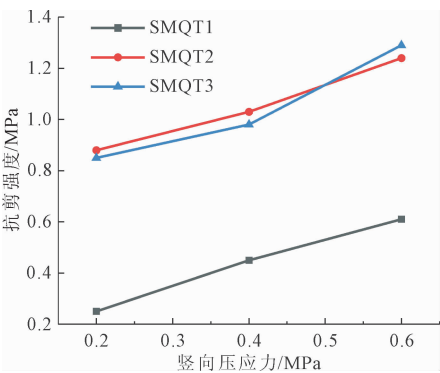


图 8 竖向压应力对试件抗剪强度影响

根据表 4 及图 8,进行对比分析,可以得知,经 UHPC 点状加固后的整毛石墙试件灰缝抗剪承载力显著提高,表现为其开裂荷载和峰值荷载均有较大幅度提高。值得注意的是,随着压应力水平的提升,试件灰缝的抗剪强度近乎呈现线性增长,在竖向压应力为 0.40 MPa 和 0.60 MPa 时,UHPC 加固试件的灰缝抗剪强度比 0.20 MPa 竖向压应力时分别提升了 15.29%~17.04% 和 40.9%~51.76%。此外,在试验设计的 3 种竖向压应力水平中,经 UHPC 两点加固和三点加固的试件灰缝抗剪强度相差较小,

可见在 UHPC 置换面积相同的基础上,改变竖向压应力对三点和两点加固试件灰缝对于石墙的抗剪承载力影响微弱^[19]。

表 5 所示为抗剪强度提升幅度,由表 5 可知,伴随着竖向压应力水平的提升,两种加固方式对石墙试件的抗剪强度提升幅度反而逐渐减小;两点加固和三点加固的提升幅度相近,进一步证明在 UHPC 置换砂浆表面积相同的情况下,改变点状嵌缝加固点的数量和位置对试件灰缝的抗剪强度没有明显影响。表 5 中, $K = (\text{构件加固后抗剪强度} / \text{基准构件抗剪强度}) - 1$ 。

表 5 抗剪强度提升幅度

试件编号	σ_0 /MPa	τ_{avg} /MPa	K
SMQT1-0.20	0.20	0.205	—
SMQT2-0.20		0.88	252%
SMQT3-0.20		0.85	240%
SMQT1-0.40	0.40	0.405	—
SMQT2-0.40		1.03	129%
SMQT3-0.40		0.98	118%
SMQT1-0.60	0.60	0.601	—
SMQT2-0.60		1.24	103%
SMQT3-0.60		1.29	111%

2.4 试验后处理

试验结束后,将 18 个整毛石墙中石材抬起拆除,选用透明亚克力板(网格为 10 mm × 10 mm)测量灰缝的饱满度,如图 9 所示。

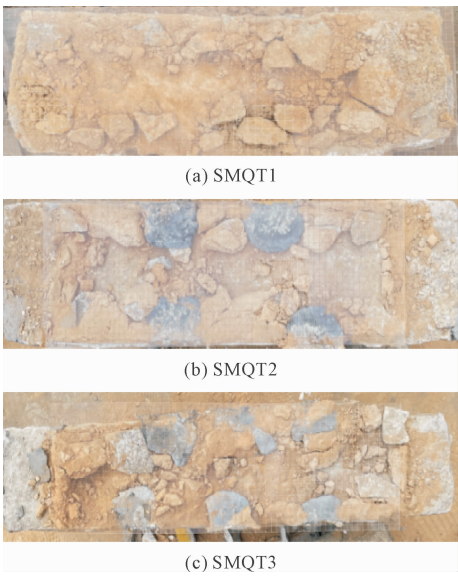


图 9 各试件灰缝饱满度测量

从图 9 可以发现,采用干砌甩浆法砌筑的整毛

石墙灰缝饱满度较低;且传统砌筑采用砂浆强度很低的黏土混合砂浆,这是导致整毛石砌体墙灰缝的抗剪强度低的主要因素。通过对灰缝饱满度进行统计,可知未加固整毛石墙体灰缝砂浆平均饱满度为 62.04%,两点点状加固和三点点状加固石砌体墙灰缝砂浆饱满度分别为 75.26%、74.87%,可见,采用 UHPC 嵌缝加固不仅能置换灰缝中部分低强度砂浆,提高灰缝的整体粘结力,还能有效提高灰缝的饱满度。

2.5 石墙体灰缝受力机理分析

水平荷载位移-特征曲线($P-\Delta\mu$)如图 10 所示。试验结果表明,整毛石墙体灰缝的抗剪强度不仅受砌筑材料的力学性能影响,同时也与竖向压应力水平、石材界面的粗糙程度等因素有关,按加载阶段,结合图 10 特征曲线,分析其破坏机理。

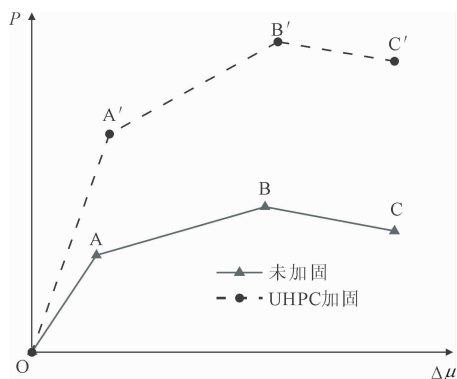


图 10 水平荷载位移-特征曲线($P-\Delta\mu$)

(1) 试验初期,即图 10 对应的 OA 段(OA'段),试件所承受的水平荷载主要由灰缝砂浆与石材界面的粘结力和静摩擦力提供。当荷载低于粘结力和静摩擦力时,此时试件灰缝处于近似弹性阶段。UHPC 加固后的试件,由于 UHPC 的抗压强度远大于黏土混合砂浆,当黏土混合砂浆开裂时,UHPC 与石材界面还未发生开裂,所以试件仍然处于弹性阶段;直到 UHPC 与石材界面产生开裂,试件进入弹塑性阶段。

(2) 继续加载,即图 10 对应的 OB 段(OB'段),水平荷载的不断增加,灰缝裂缝加剧开展,塑性变形增加,试件刚度较开裂前有所下降,水平荷载由灰缝与石材界面的粘结力和动摩擦力承担。当出现界面裂缝后,试件达到峰值荷载,界面裂缝主要是由灰缝与石材界面粘结破坏造成。在竖向压应力较大时,个别角部石垫片在复合应力的作用下,因为应力集中而被局部压裂。加固后的试件竖向变形相较于未加固试件较不明显,这一现象是由于 UHPC 的超高抗压强度限制了石材竖向位移导致的,根据此现象

可以得出 UHPC 加固可以在一定程度上代替石垫片的存在。

(3) 达到峰值荷载后,即图 10 对应的 OC 段(OC'段),未加固试件灰缝砂浆和 UHPC 与石材界面的粘结力完全破坏,水平荷载主要由破坏后的灰缝滑移摩擦力承担。随着水平位移幅值的急剧增加,灰缝与整毛石产生较为明显的相对滑动,灰缝中的砂浆和石垫片在上下条石凹凸界面的剪切和挤压作用下发生碾压破坏。破坏后的砂浆脱落,角部垫片在上下整毛石的碾压过程中产生微小滚动,在应力集中的影响下进一步被碾碎,而加固后的整毛石墙灰缝发生粘结破坏后其石垫片并未发生碾压破坏,而是直接进入摩擦滑移破坏。

3 结 论

(1) 加固后的整毛石墙灰缝抗剪承载力显著提升,表现为其开裂荷载和峰值荷载均有较大幅度提高;抗剪承载力与竖向压应力近乎呈线性增长关系,但增加幅度随压应力的增加而降低。

(2) 加固后的整毛石墙灰缝发生粘结破坏后其石垫片并未发生碾压破坏,而是直接进入摩擦滑移破坏。UHPC 加固后的试件达到峰值荷载后承载力下降较大,是因为 UHPC 与石材粘结强度高,对承载力贡献较大,进入滑动摩擦阶段后 UHPC 与石材粘结力丧失而导致的。

(3) UHPC 点状加固平面面积相近的基础上,改变点状加固位置和数量对试件的抗剪承载力基本没有影响。三点点状嵌缝加固施工较为复杂,且不一定具备施工可行性,推荐采用两点点状嵌缝加固方式,供今后石砌体墙体抗震加固参考使用。

(4) 根据本文试验研究,下一步研究将提出 UHPC 点状加固石砌体墙灰缝的抗剪承载力计算公式,为今后石砌体墙灰缝加固设计提供参考。

参考文献:

- [1] 福建省建筑科学研究院. 福建省石砌体结构加固技术规程:DBJ/T13-264-2017[S]. 福州:福建省住房和城乡建设厅,2017.
- [2] 柴振岭,郭子雄,胡奕东,等. 干砌甩浆砌石墙通缝抗剪强度试验研究[J]. 建筑结构学报,2010,31(S2): 340-344.
- [3] 赵娜. 东南地区粗料石墙抗震性能的试验研究[D]. 南京:东南大学,2013.
- [4] 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.

- intelligent transportation system based on two-dimensional discrete wavelet transform[J]. International Journal of Communication Systems, 2021,34(10):e4809.
- [7] 李 媛,王海云,王维庆,等. 基于 Hanning 和 Nuttall 的混合卷积窗谐波分析方法[J]. 太阳能学报,2018,39(12):3363-3370.
- [8] 杨 旭,孙宏凯,许佳胜. 浅析 Nyquist-Shannon 采样定理[J]. 中国新通信,2020,22(2):168.
- [9] 温术来,张 磊,于树永,等. 基于 Blackman 窗四谱线插值 FFT 的轨道电路信号分析[J]. 铁道通信信号,2023,59(1):14-20.
- [10] 姜恩华,周建芳,邹 锋,等. FIR 数字滤波器综合实验设计[J]. 曲阜师范大学学报(自然科学版),2023,49(1):64-68.
- [11] Mallat S G. A theory for multiresolution signal decomposition; the wavelet representation[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1989,11(7):674-693.
- [12] 戴 婷,张榆锋,章克信,等. 经验模态分解及其模态混叠消除的研究进展[J]. 电子技术应用,2019,45(3):7-12.
- [13] Jiang Y, Tang B, Qin Y, et al. Feature extraction method of wind turbine based on adaptive morlet wavelet and svd[J]. Renewable Energy, 2011,36(8):2146-2153.
- [14] 刘振华,任艺鹏,叶忠勤,等. 基于小波包分解-模糊神经网络的混凝土路面路基沉降预测[J]. 混凝土与水泥制品,2018(6):81-84.
- [15] 任海军,韦 冲,谭志强,等. 基于 CEEMDAN-IAWT 方法的滚动轴承振动信号降噪[J]. 振动与冲击,2023,42(13):199-207,268.
- ~~~~~
- (上接第 54 页)
- [5] 王 兰,郭子雄,叶 勇,等. 石墙灰缝抗震性能与受力机理试验研究[J]. 土木工程学报,2018,51(12):63-71.
- [6] 施养杭,林建华. 新型灌浆材料在砌体抗震加固中的应用及其可靠性研究[J]. 建筑结构学报,2005,26(4):117-122.
- [7] 郭子雄,柴振岭,胡奕东,等. 嵌缝加固条石砌筑石墙抗震性能试验研究[J]. 土木工程学报,2010,43(S1):136-141.
- [8] 刘小娟,郭子雄,胡奕东,等. 聚合物砂浆嵌缝加固石墙灰缝抗剪性能研究[J]. 地震工程与工程振动,2010,30(6):106-111.
- [9] Hou Wei, Dai Xinghua, Yang Zheyu, et al. Seismic Behavior of stone masonry joints with ECC as a filling material[J]. Materials, 2021,14(21):6671-6671.
- [10] 陈宝春,季 韬,黄卿维,等. 超高性能混凝土研究综述[J]. 建筑科学与工程学报,2014,31(3):1-24.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] Wu Yingxiong, Zheng Xingyan, Huang Wei, et al. Experimental and numerical analysis of shear bonding behavior of interface between stone and Ultra-High Performance Concrete made with POM fiber[J]. Engineering Structural,2023,286:116142.
- [14] 黄 伟,黄雅莹,陈雪莉,等. 超高性能混凝土-花岗岩石材界面粘结性能试验研究[J]. 硅酸盐通报,2024,43(2):397-406,417.
- [15] 王 耀,黄 伟,郑新颜,等. 超高性能混凝土-花岗岩石材界面的抗剪性能研究[J]. 材料导报,1-23 [2025-02-17]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1078.tb.20240425.1859.002.html>.
- [16] 朱远浩. UHPC 加固既有干砌甩浆石墙抗震性能试验研究[D]. 福州:福州大学,2022.
- [17] 施微丹,施建日,林环周,等. UHPC 石墙嵌缝加固的福建典型石结构抗震性能模拟与分析[J]. 应用基础与工程科学学报,2024,32(3):824-838.
- [18] 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.
- [19] 砌体结构设计规范:GB 50003—2011[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2011.