

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2024.06.005

薄层 UHP-ECC 与既有砖墙界面粘结性能研究

郑国清

(中晟汇创建设发展有限公司,福建福州 350003)

摘要: 超高性能工程用水泥基复合材料(UHP-ECC)加固修复既有砖砌体墙工程中,UHP-ECC与砖墙之间的粘结性能是保证加固效果的关键。为探究 UHP-ECC-砖界面的粘结性能,通过双面剪切试验探究界面粗糙度、界面湿润度和有机纤维掺量对界面粘结性能的影响。结果表明:当扣缝深度为 25 mm 时,界面粘结剪切强度提高了 75.31%;界面湿润度的增加使界面粘结剪切强度呈现先增大后减小的趋势,其中湿润状态的界面粘结性能最好;当纤维掺量为 2% 时,自然面和扣缝 5 mm 界面粘结剪切强度分别提升了 20.05% 和 29.22%。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。

关键词: 既有砖砌体墙;结构加固;超高性能工程用水泥基复合材料(UHP-ECC);双面剪切;界面粘结性能
中图分类号: TU362 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1144(2024)06-0030-07

Interface Bonding Property of Thin Layer UHP-ECC with Existing Brick Wall

ZHENG Guoqing

(Zhongsheng Huichuang Construction Development Co., Ltd., Fuzhou, Fujian 350003, China)

Abstract: In the reinforcement and repair of existing brick masonry walls by ultra-high performance concrete (UHP-ECC), the excellent bonding performance between UHP-ECC and brick walls is the key to ensuring the reinforcement effect. Therefore, in order to explore the bonding performance of UHP-ECC-brick interface, the effects of interface roughness, interface wettability and organic fiber content on interface bonding performance were investigated by double-sided shear test. The results show that the 25 mm buckle seam increases the interface shear strength by 75.31%. The increase of interfacial wettability makes the interfacial bonding shear strength increase first and then decrease, and the interfacial bonding performance in the wet state is the best. When the fiber content is 2%, the bond shear strength of the natural surface and the 5 mm interface of the buckle joint is increased by 20.05% and 29.22%, respectively. The way of buckle seam can improve the interface roughness, so as to improve the interface bonding performance.

Keywords: existing brick masonry walls; structural reinforcement; ultra-high performance engineered cementitious composites(UHP-ECC); double-sided shearing; interfacial bonding property

我国既有砖砌体结构量大且面广,由于建造年代普遍较早,存在材料老化、设计标准低、缺乏构造措施等问题,在地震作用下建筑物容易发生破坏甚至倒塌。因此,为使砖砌体结构满足继续使用的要求,需对其开展抗震加固工作。目前,国内外对于砌体结构常用的加固方法主要有钢筋网水泥砂浆面层加固法、粘贴纤维复合材加固法、置换砂浆加固法等加固方法^[1],但这些方法普遍存在加固面层厚度

大、施工工艺繁琐等问题,无法大量适用于既有砖砌体结构的加固,因此需要选用合适的材料和工艺进行加固处理^[2]。随着新材料的发展,超高性能工程用水泥基复合材料(Ultra-High Performance Engineered Cementitious Composites,简称 UHP-ECC)作为一种新型的水泥基材料,具有优异的强度、延性和耐久性^[3-4],在工程建设领域有良好的应用前景,且已经开始涉及工程加固改造领域。

收稿日期:2024-08-20

修稿日期:2024-09-20

基金项目:福建省建设科技研究开发项目(2023-B-8;2023-k-45;2023-k-47)

作者简介:郑国清(1976—),男,高级工程师,国家注册一级建造师,主要从事工程施工与管理技术研究工作。E-mail:459837341@qq.com

加固材料与基体的界面粘结性能是保证加固效果的关键,以往学者进行了许多界面粘结性能的试验研究^[5-6],研究发现界面粘结性能受界面粗糙度、湿润度和纤维掺量等因素影响。吴香国等^[7]发现界面粗糙程度的增大不仅可以增加界面间的接触面积,以此获得更高的黏聚力,同时还可以提高界面上的机械咬合力。然而 Safrit^[8]表明过度处理基体界面会增大基体损伤,导致界面粘结性能不升反降。De 等^[9]发现界面湿润度的提高对界面间分子黏聚力存在积极影响,进而提升界面粘结性能。纤维通过减小 UHP-ECC 收缩以及增加 UHP-ECC 抗裂性能、韧性来提升 UHP-ECC 的界面粘结性能和界面稳定性^[10]。安宁^[11]通过劈裂抗拉试验,证明纤维可以减小 UHP-ECC 的收缩,降低 UHP-ECC 的开裂风险,减弱 UHP-ECC 内部结构孔隙之间的应力集中现象,使得界面的稳定性及抗裂能力得到提高。

综上,现有界面粘结性能研究所涉及的基体材料多为单一混凝土,对复合型材料为基底的研究较少,尤其是未有关于 UHP-ECC-砖墙的界面粘结剪切强度的研究。而 UHP-ECC 与砖墙间界面粘结性能是确保 UHP-ECC 面层与砖墙共同受力的关键。因此拟开展针对 UHP-ECC-砖墙的界面粘结性能研究,通过进行不同界面粗糙度、界面湿润度、纤维掺量三种变量的双面剪切试验,获得界面粘结剪切强度及荷载-位移曲线,以探究 UHP-ECC 与砖墙之间的界面粘结性能,以期对砖墙体面层加固提供参考依据。

1 试验概况

1.1 材料性能

1.1.1 砖材

砖材采用既有的烧结实心黏土砖,砖材尺寸为 240 mm × 115 mm × 53 mm,强度等级依据《砌墙砖试验方法》(GB/T 2542—2012)^[12]进行测定,最终结果如表 1。

表 1 砖材抗压强度

编号	P/kN	R_p/MPa	编号	P/kN	R_p/MPa
1	112.32	11.23	6	137.87	13.78
2	115.67	11.56	7	106.43	10.64
3	94.54	9.45	8	123.36	12.33
4	82.60	8.26	9	98.93	9.89
5	76.93	7.69	10	122.31	12.23

注: P 为最大破坏荷载; R_p 为抗压强度。

根据规范计算平均值,所取试样平均值为 10.67 MPa,标准差为 1.81,依照《烧结普通砖》(GB/T 5101—2017)^[13]可判断砖材强度等级为 MU10。

1.1.2 砂浆

实际工程中,砖墙界面处的灰缝的存在会对界面粘结强度产生影响。灰缝的存在涉及到灰缝扣缝深度大小以及灰缝中砂浆材料的影响,而灰缝处砂浆材料强度的影响相比于灰缝处的扣缝产生的销栓力可忽略不计,如图 1。

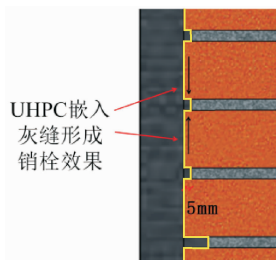


图 1 销栓效应示意

因灰缝内砂浆强度对界面粘结强度的影响可忽略不计,在不影响界面粘结性能的前提下适当提高砌筑砂浆的强度,选用抗压强度为 5.0 MPa 的混合砂浆,以保证砖墙基体不在界面破坏前抢先破坏,保证试验的顺利进行。砂浆的配合比如表 2。

表 2 砂浆配合比 单位:kg/m³

原材料	水泥	石灰	细砂	减水剂	水
配合比	192	48	1450	20	230

1.1.3 UHP-ECC

UHP-ECC 的原材料有 P. II 52.5 硅酸盐水泥、硅灰、石灰石、石英砂、减水剂、聚甲醛 (Polyoxymethylene, POM) 纤维。P. II 52.5 水泥物理性能和化学成分如表 3、表 4。其中,硅灰优选比表面积为 12 000 m²/kg 的灰硅灰。采用 40~400 目级配的石英砂。

表 3 P. II 52.5 硅酸盐水泥物理性能

密度 / (g · cm ⁻³)	比表面积 / (m ² · kg ⁻¹)	初凝时间 / min	终凝时间 / min	抗压强度 (3 d) / MPa	抗折强度 (3 d) / MPa
3.06	333.82	184	245	31.94	6.57

表 4 P. II 52.5 硅酸盐水泥化学组成 单位:%

CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	Cl ⁻	SO ₃
69.86	21.52	2.84	2.35	1.06	0.25	0.17	0.04	2.38

POM 纤维长度为 8 mm,直径为 0.1 mm,其抗拉强度、弹性模量和密度分别为 1 100 MPa、8.5 GPa

和 1.41 g/cm^3 。减水剂采用聚羧酸系高效减水剂,其含固量为 25%、减水效率 30%。工程中常用 2%~3% 纤维掺量(体积)的 UHP-ECC,为探究纤维掺量对界面粘结强度的影响,试验增设 0% 和 1% 纤维掺量的 UHP-ECC,以此来探究纤维掺量(体积)从 0%~3% 的变化对界面粘结强度产生的影响。试验所用 UHP-ECC 的配合比见表 5。纤维掺量为 0% 的 UHP-ECC 作为基准组制备完成并养护 28 d 后进行力学性能试验,结果如表 6。

表 5 UHP-ECC 配合比

表 5 UHP-ECC 配合比						单位: kg/m^3	
纤维掺量(体积)/%	水泥	硅灰	石灰石	石英砂	水	POM 纤维	减水剂
0						0.00	
1	620	280	500	830	217	14.10	28
2						28.20	
3						42.30	

表 6 UHP-ECC 基准组力学性能

抗压强度 /MPa	抗折强度 /MPa	弹性模量 /GPa	泊松比
91.45	5.89	32.88	0.18

1.2 试件设计及制作

为配合实际工程中多数砖砌体墙的砌筑形式,提高试验结果的准确性,保证基体试件强度,试验设计采用“三顺一丁”法砌筑的厚度为 240 mm 的砖砌体墙试件,其尺寸为 $490 \text{ mm} \times 240 \text{ mm} \times 315 \text{ mm}$,双侧进行 UHP-ECC 的加固,每侧 UHP-ECC 厚度为 40 mm,试件示意图如图 2。

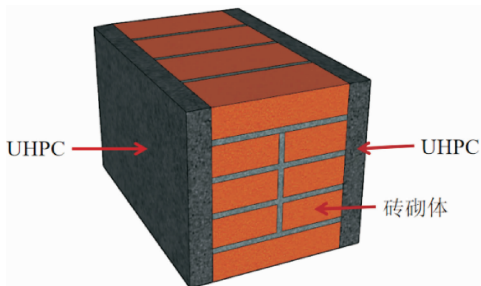


图 2 UHP-ECC 加固试件示意图

砖砌体抗压强度较低,若试验前不单独对砖砌体进行加固,可能会导致 UHP-ECC 与砖砌体脱粘前基体部分就发生破坏,造成无法准确测得界面粘结强度的情况。为提高基体的强度、抗裂能力及整体性,试验采用碳纤维布加固砖墙,参考《碳纤维片材加固混凝土结构技术规程》(CECS 146:

2003)^[14],将碳纤维布包裹在除两侧粘结面外的其余 4 个面上,但需要注意的是:碳纤维布不能触碰到界面交界处,以免对界面粘结强度造成扰动。

为增加试验结果的准确性,避免了弯曲应力对试验结果产生影响,选择双面剪切法进行试验^[15]。UHP-ECC-砖砌体试件共 12 组,每组 2 个试件,共 24 个试件,设计参数如表 7。

表 7 试验参数设计

编号	扣缝深度/mm	纤维掺量/%	湿润度
K0P0JS	0	0	
K0P1JS	0	1	湿润
K0P2JS	0	2	
K0P3JS	0	3	
K0P2GZ	0	2	干燥
K0P2BH	0	2	饱和
K5P0JS	5	0	
K5P1JS	5	1	
K5P2JS	5	2	湿润
K5P3JS	5	3	
K15P2JS	15	2	
K25P2JS	25	2	

注:K0、K5、K15、K25 表示扣缝深度为 0 mm、5 mm、15 mm、25 mm;P 表示纤维掺量;JS、GZ、BH 分别表示进行湿润、干燥、饱和处理的界面。

试件的具体制作流程如下:

① 用毛刷清理砖砌体表面,定制尺寸分别为 $495 \text{ mm} \times 325 \text{ mm} \times 320 \text{ mm}$,将成型好的砖砌体试件放入中间,两侧孔隙用于浇筑 UHP-ECC。试验需制作三种不同含水率的纯砖试件,分别为:含水率为 0 的干燥组、含水但未饱和的湿润组、含水率 100% 的饱和组。干燥组试件在试验前不做处理;湿润组试件在浇筑 UHP-ECC 前用湿抹布擦拭试件表面;饱和组试件需在试验前使基体处于饱和状态,因此将基体表面包裹土工布,并不断为模具内浇水,直到模具内充满水即可。

② 按配合比搅拌好 UHP-ECC 后倒入模具两侧空隙中,直至填满缝模具孔隙.保证 UHP-ECC 浆体表面与试件顶面处于同一水平线上后,在模具上部覆盖保鲜膜开始养护试件。需要注意的是:因养护地点在户外,需每天对试件进行洒水养护,防止 UHP-ECC 因失水而导致收缩过大影响粘结强度,试件在室外养护时间为 28 d。

③ 待 28 d 养护完成后,将模具拆开取出试件。

为防止加载面受力不均匀导致试验结果误差较大,对加载面的 UHP-ECC 进行磨平处理,使得加载面平整,试件受力均匀。待上述操作完成后,将砖砌体表面进行碳纤维布加固,加固完成后可开展双面剪切试验,试件制作流程如图 3。

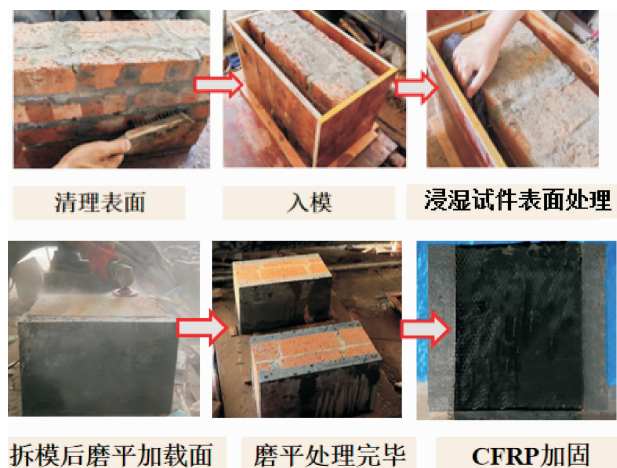


图 3 UHP-ECC - 砖墙试件制作流程图

1.3 试验加载

UHP-ECC-砖墙的双面剪切试验试验选用万能压力机进行。将处理好的砖墙试件放置在试验台中央 $490\text{ mm} \times 240\text{ mm} \times 120\text{ mm}$ 的钢块上,确定试件稳定后,在两侧 UHP-ECC 上分别放置两块尺寸为 $490\text{ mm} \times 40\text{ mm} \times 40\text{ mm}$ 的长钢条用于加载。试验全程采用 0.02 MPa/s 等速率加载。试验完成后记录极限荷载及界面相对位移情况,试验加载示意如图 4。

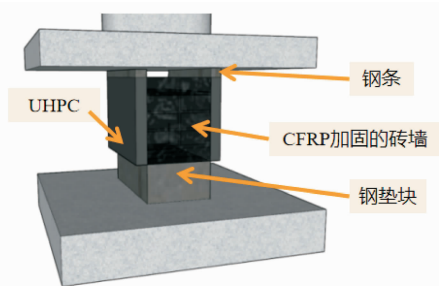


图 4 试验加载示意图

2 破坏模式

在 UHP-ECC 与砖墙的双面剪切试验中,界面的破坏模式受多种因素影响,纤维掺量、界面粗糙度等都是改变界面破坏模式的重要因素^[16]。根据 Al-Madani 等^[17]对界面粘结性能的研究,UHP-ECC 与

基体材料的界面破坏模式大致可分为三类:基体破坏、界面破坏、UHP-ECC 破坏。试验中仅存在基体破坏与 UHP-ECC 破坏,因此试验根据试验现象及前人研究的基础上进行扩展,将 UHP-ECC-砖墙的界面破坏界面主要的破坏模式分为 5 类,按照界面粘结强度由小到大排序分别为:A 型破坏-UHP-ECC 碎裂破坏;UHP-ECC 因未掺纤维而发生脆性破坏现象;B 型破坏-砖墙轻微破坏;UHP-ECC 未发生破坏,砖墙破坏时界面破坏程度较低,少量砖块与砂浆碎屑黏附于 UHP-ECC 上;C 型破坏-砖墙中等破坏;砖墙破坏程度有所提高,且较于 B 型破坏,UHP-ECC 上黏附的砖块与砂浆的碎屑较多;D 型破坏-砖墙严重破坏;砖墙墙面发生大块砖材剥落现象,墙面损坏程度较高;E 型破坏-UHP-ECC 断裂破坏;UHP-ECC 发生破坏并断裂在扣缝内,表现出显著的塑性破坏特征。具体破坏模式如图 5。

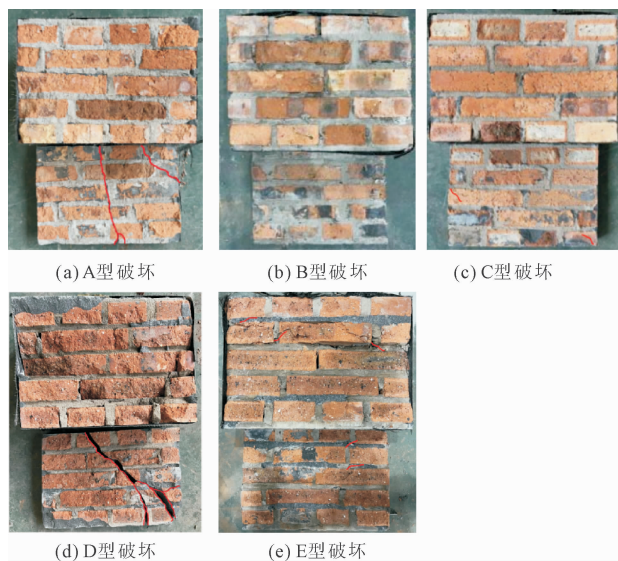


图 5 破坏模式

各试件双面剪切试验结果及破坏模式见表 8。A 型破坏中的 UHP-ECC 未掺入纤维,因此发生 UHP-ECC 碎裂破坏现象,并表现出明显的脆性破坏特征,其界面粘结强度是 5 类破坏模式中的最小值;当破坏模式从 A 型变化为 D 型时,界面粘结强度也随之提高,而砖墙界面的破坏程度也越来越大,其中 D 型破坏界面上的砖材存在较严重的剥落现象;当破坏模式为 E 型时,UHP-ECC 发生断裂现象,表现出显著的塑性破坏特征,其界面粘结强度是 5 类破坏模式中的最大值。

表 8 双面剪切试验结果

编号	破坏荷载/kN	平均强度/MPa	破坏模式
K0P0JS	234.64/171.87	0.68	A
K0P1JS	240.61/189.80	0.72	B
K0P2JS	265.42/217.60	0.81	C
K0P3JS	257.05/233.14	0.82	C
K0P2GZ	240.61/192.79	0.73	C
K0P2BH	245.70/209.83	0.76	C
K5P0JS	203.25/263.03	0.77	A + D
K5P1JS	248.09/283.96	0.89	D
K5P2JS	274.99/310.86	0.98	D
K5P3JS	274.99/298.90	0.96	D
K15P2JS	373.63/352.70	1.21	E
K25P2JS	418.46/436.39	1.42	E

3 界面粘结性能

3.1 界面粘结强度

3.1.1 界面粗糙度

界面粗糙度是影响界面粘结剪切强度的一个重要因素。通过对界面进行扣缝处理改变界面粗糙度。界面粗糙度对界面粘结剪切强度的影响如图 6 所示。

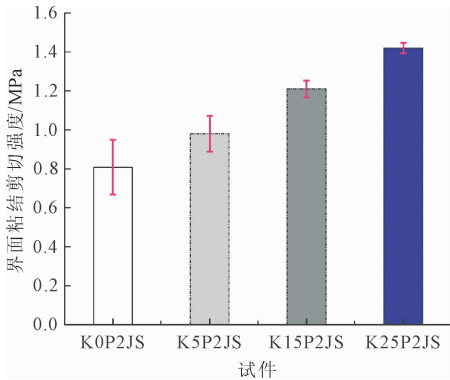


图 6 界面粗糙度影响

界面粗糙度的增加可以提高砖墙的界面粘结剪切强度:通过对比 4 种界面粗糙度的界面粘结强度,自然面、扣缝 5 mm、15 mm、25 mm 试件的界面粘结剪切强度分别为:0.81 MPa、0.98 MPa、1.21 MPa、1.42 MPa,相比于未处理试件,扣缝处理显著提升了 UHP-ECC-砖墙试件的界面粘结剪切强度。当扣缝深度为 25 mm 时,界面粘结强度提高了 75.31%,粘结强度大幅提高,说明扣缝处理对界面粘结性能存在显著的影响。变异系数也随之减小,试验结果更加准确。

其原因是界面粗糙度的提高增加了砖墙与

UHP-ECC 之间的接触面积,增加了界面上的黏聚力效果;粗糙度的提高增大了界面上的机械咬合力,砖墙与 UHP-ECC 间产生销栓作用,使得砖墙的剪切断裂承载力与 UHP-ECC 的剪切断裂承载力提供了大部分粘结强度。因此,提高界面粗糙度可显著改善界面粘结剪切强度。

3.1.2 纤维掺量

纤维掺量的提高不仅可以增大 UHP-ECC-砖墙的界面粘结剪切强度,还可以降低变异系数,使试验结果更加准确。纤维掺量对界面粘结剪切强度提升的作用机理如下:纤维掺量的增加可以降低 UHP-ECC 早期自收缩,减少 UHP-ECC 内部及粘结面上因自收缩而产生的缺陷与应力集中现象,延缓 UHP-ECC-砖墙界面在压力效应下开裂;纤维在 UHP-ECC 的内部形成了桥搭效应,当 UHP-ECC 上产生裂纹时,纤维与基体之间的拉拔应力提升了 UHP-ECC 开裂后的延性与抗裂性,降低界面上裂纹的发展速度。

纤维掺量对 UHP-ECC-砖墙的界面粘结剪切强度的影响如图 7 所示。当纤维掺量由 0% 增加至 3% 时,砖墙的自然面试件界面粘结剪切强度提升了 20.05%,扣缝 5 mm 试件的粘结剪切强度提升了 29.22%,说明扣缝 5 mm 的界面处理方式可以提高砖墙的界面粘结强度,而提高的这部分粘结强度主要来源于砖块的剪切断裂承载力。

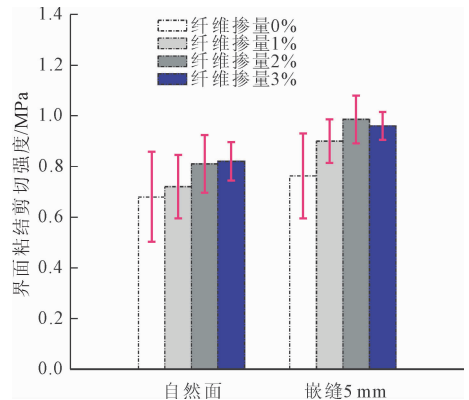


图 7 纤维掺量的影响

脱落的 UHP-ECC 加固层上可见被 UHP-ECC 剥离的砖材,此现象说明:扣缝 5 mm 的界面处理方式增大了界面的机械咬合力,砖块的边缘处因界面机械咬合力的增加产生了应力集中,界面上剪力的传递方式也因此发生改变,进而导致界面的粘结剪切强度提高,界面破坏时伴随有砖材剥离的现象。

3.1.3 界面湿润度

干燥、湿润、饱和这 3 种不同湿润程度下对 UHP-ECC-砖墙的界面粘结剪切强度的影响如图 8 所示。其粘结强度的关系是:湿润 > 饱和 > 干燥,最大值为 0.81 MPa,最小值为 0.73 MPa,变异系数范围在 11.14%~15.61% 之间。

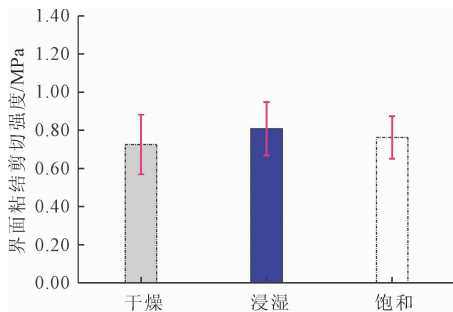


图 8 界面湿润度的影响

由图 8 可知,对砖砌体界面进行适当但未饱和的润湿处理可以一定程度提高界面粘结剪切强度。这是由于未湿润处理的砖与低强度砂浆均为高吸水性能的材料会吸取 UHP-ECC 中大量的自由水,降低了界面过渡区域的水胶比,提高了界面上的孔隙率,同时 UHP-ECC 的水分降低后,强度及抗裂性能也会受到负面影响,导致界面粘结性能减弱。适当浸湿处理可以使砖砌体表明存在更多自由水,降低了砖块与砂浆对 UHP-ECC 中水分的吸取效果,进而提高了粘结强度。然而饱和处理会使得低强度砂浆吸附过多的自由水,界面因此遭到削弱,在压力效应下界面更容易产生破坏,界面粘结强度不升反降。另外,过多的自由水会填补砖材上的孔洞,使得 UHP-ECC 无法进入砖材的缝隙中,进一步减小了 UHP-ECC 对砖墙的黏附能力。

3.2 荷载-滑移曲线

分析五种破坏模式的荷载-滑移曲线,并拟合各曲线在弹性变形阶段的斜率得到各试件的界面刚度值,A—D 型破坏曲线规律相近,限于篇幅,仅以 A 型与 E 型破坏模式下荷载-滑移曲线为例,如图 9 所示。

由图 9 可知,除 E 型破坏外,其余破坏模式的荷载滑移曲线只存在弹性阶段,大致发展规律分为起始阶段与弹性阶段。起始阶段的界面上荷载较低,界面相对滑移为 0;随着荷载增加,界面开始进入弹性阶段,界面相对滑移随着荷载的增加而增加,两者基本呈线性发展趋势;当荷载达到极限剪切力时,砖墙与 UHP-ECC 的粘结面之间立即发生脱开,

相应的界面破坏模式为脆性破坏。而 E 型破坏试件组在弹性变形阶段结束后,因界面的扣缝深度较大,UHP-ECC 提供的剪切断裂承载力会使得界面进入塑性阶段。塑性阶段的荷载发展变缓,而界面的相对滑移量却大幅增加,当荷载达到峰值时,界面发生破坏,表现出塑性破坏。

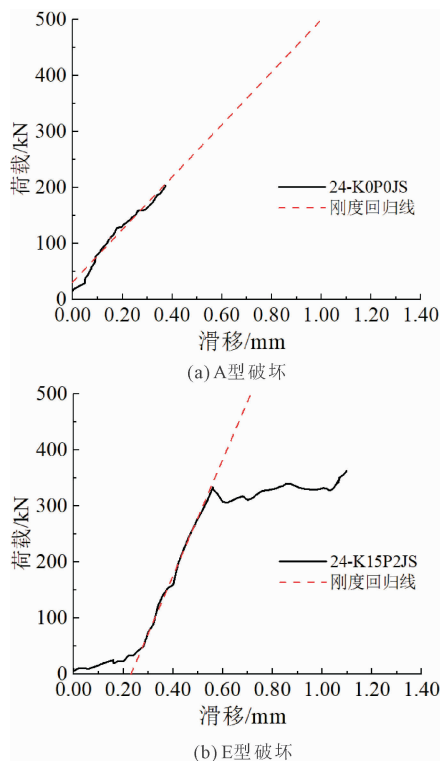


图 9 荷载-滑移曲线

各型号试件的极限滑移量、界面刚度如表 9 所示。当界面发生破坏时,UHP-ECC 纤维掺量越大,破坏时的极限荷载与相对滑移量就越高;界面扣缝深度越大,破坏所需的极限荷载与界面相对滑移量

表 9 界面相对滑移及其界面刚度

编号	位移/mm	刚度/(MPa·mm ⁻¹)
K0P0JS	0.37	3.11
K0P1JS	0.39	3.17
K0P2JS	0.45	3.51
K0P3JS	0.47	3.64
K0P0GZ	0.41	3.44
K0P0BH	0.43	3.48
K5P0JS	0.46	3.43
K5P1JS	0.49	3.25
K5P2JS	0.59	3.86
K5P3JS	0.56	3.81
K15P2JS	1.09	5.62
K25P2JS	1.22	6.06

也越高。因界面的扣缝深度较大, K15P2JS、K25P2JS 在弹性变形阶段结束后, UHP-ECC 提供的剪切断裂承载力会使得界面进入塑性阶段。塑性阶段的荷载发展变缓, 而界面的相对滑移量却大幅增加, 当荷载达到峰值时, 界面发生破坏。

4 结 论

(1) 提高既有砖墙界面粗糙度可以显著提升界面的粘结强度。相比于自然面, 增大界面粗糙度最高可提升 75.31% 的界面粘结强度, 这是由于界面键槽的销栓作用增强了界面间的剪力传递, 使得 UHP-ECC 与砖材的断裂承载力贡献了大部分抗剪承载力, 显著提高了 UHP-ECC-砖墙的界面粘结剪切强度。

(2) UHP-ECC-砖墙的界面粘结强度随着纤维掺量的增加而提高。在自然面上, 当纤维掺量由 0% 增加至 3% 时, 自然面的粘结强度增长了 20.05%; 在扣缝 5 mm 界面上, 界面粘结强度随纤维掺量的提高增长了 29.22%, 提高的这部分粘结强度主要来源于分子黏聚力以及砖块的断裂承载力。

(3) 界面粘结强度随着界面湿润度的增加呈现先增大后减小的趋势。砖墙在干燥、湿润、饱和 3 种不同湿润程度下的界面粘结强度关系是: 湿润 > 饱和 > 干燥, 干燥、湿润、饱和界面的界面粘结强度分别为 0.73 MPa、0.81 MPa、0.79 MPa, 这表明对砖砌体界面进行不饱和的润湿处理可以最大程度提高界面粘结强度。

致谢: 本文试验设计和写作得到了福州大学土木工程学院课题组吴应雄等老师的帮助, 在此表达谢意!

参考文献:

- [1] 砌体结构加固设计规范: GB 50702—2011[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- [2] 陈伟恩. 某既有砖砌体墙的 UHPC 抗震加固的制备与施工研究[J]. 福建建筑, 2021(12): 111-115.
- [3] 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.
- [4] 王德辉, 史才军, 吴林妹. 超高性能混凝土在中国的研究和应用[J]. 硅酸盐通报, 2016, 35(1): 141-149.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 吴香国, 张孝臣. 预制超高性能混凝土修复层与既有混凝土界面黏结短期性能研究[J]. 建筑结构学报, 2018, 39(10): 156-163.
- [8] Safritt M. Bond Interface Strength between Ultra High Performance Concrete and Normal Concrete[R]. USA: Virginia Center for Transportation Innovation and Research, 2015.
- [9] De l V I, Haber Z B, Graybeal B A. Enhancing shrinkage properties and bond performance of prefabricated bridge deck connection grouts: material and component testing[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2018, 30(4): 04018053. 1-04018053. 12.
- [10] Jang H O, Lee H S, Cho K, et al. Experimental study on shear performance of plain construction joints integrated with ultra-high performance concrete (UHPC) [J]. Construction and Building Materials, 2017, 152: 16-23.
- [11] 安 宁. UHPC-NC 界面特性对粘结性能的影响研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2018.
- [12] 砌墙砖试验方法: GB/T 2542—2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- [13] 烧结普通砖: GB/T 5101—2017[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.
- [14] 碳纤维片材加固混凝土结构技术规程: CECS 146: 2003[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.
- [15] Hussein H H, Walsh K K, Sargan D S M, et al. Interfacial properties of ultrahigh-performance concrete and high-strength concrete bridge connections[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2016, 28(5): 04015208. 1-04015208. 10.
- [16] 黄 伟, 黄雅莹, 陈雪莉, 等. 超高性能混凝土-石材界面黏结性能试验研究[J]. 硅酸盐通报, 2024, 43(2): 397-406, 417.
- [17] Al-Madani M K, Al-Osta M A, Ahmad S, et al. Interfacial bond behavior between ultra high performance concrete and normal concrete substrates[J]. Construction and Building Materials, 2022, 320: 126229.