

纤维增强水泥基材料与不同基体间界面剪切强度及其吸水性能

薛善彬¹, 荆峰杰¹, 王 丹¹, 张 鹏^{1,2}, 高小建³

(1. 青岛理工大学土木工程学院, 山东 青岛 266525; 2. 青岛理工大学, 山东蓝色经济区工程建设与安全协同创新中心, 山东 青岛 266525; 3. 哈尔滨工业大学土木工程学院, 哈尔滨 150001)

摘 要: 纤维增强水泥基材料具有优异的韧性和抗渗性, 在劣化混凝土结构修复和破碎岩体加固工程中有着广阔的应用前景。本研究研究了聚乙烯醇(PVA)或玄武岩纤维增强水泥基材料与普通水泥砂浆、混凝土、砂岩、花岗岩间界面剪切强度的影响因素, 包括纤维增强水泥基材料配合比、基体初始饱和度、基体表面切槽形式变化等。此外, 通过称重法研究了与不同含水饱和度、不同类型基体粘结的纤维增强水泥基材料的毛细吸水性能。结果表明: PVA 或玄武岩纤维增强水泥基材料与砂浆基体间的界面剪切强度均随基体饱和度的降低而升高; 粉煤灰掺量的增加能够提高 PVA 纤维增强水泥基材料与砂浆间的界面剪切强度, 但会降低玄武岩纤维增强水泥基材料与砂浆间的界面剪切强度。基体表面切槽数量的增加对于 PVA 或玄武岩纤维增强水泥基材料与基体间的界面剪切强度有提升作用, 且对于 PVA 纤维增强水泥基材料更为显著。PVA 纤维增强水泥基材料与混凝土、砂浆间的界面剪切强度高于同饱和度的砂岩与花岗岩。与干燥基体粘结的纤维增强水泥基材料的毛细吸水系数总体略低于预湿基体; 粉煤灰掺量的增加使纤维增强水泥基材料的毛细吸水系数显著提高; 当粉煤灰掺量较低时, PVA 纤维增强水泥基材料的毛细吸水系数显著高于玄武岩纤维增强水泥基材料。

关键词: 纤维增强水泥基材料; 界面剪切强度; 饱和度; 表面切槽; 毛细吸水性能

中图分类号: TU528 文献标志码: A 文章编号: 0454-5648(2024)11-3606-11

网络出版时间: 2024-04-25



近年来, 以应硬化水泥基复合材料和超高性能混凝土为代表的纤维增强水泥基材料因具备优异的韧性与抗渗性能而得到了越来越广泛的关注^[1-3], 其在劣化混凝土结构修复、隧道围岩与破碎岩质边坡加固等工程中具有广阔的应用前景。纤维增强水泥基材料与不同类型基体间的粘结性能及其粘结后的抗渗性能是其在混凝土结构修复、岩体加固工程领域应用中的重要评价指标。已有研究表明^[4-8], 水泥基材料与基体间的粘结性能受到多种因素的影响, 包括水泥基材料配合比、基体饱和度、基体表面粗糙度以及界面剂的使用等。直接拉伸、直接剪切、斜面剪切等不同类型的力学试验被用于水泥基材料与基体粘结性能的评价中^[9-10]。

关于基体含水饱和度对基体与水泥基材料间粘结性能的影响规律和机理尚未形成一致的结论。Beushausen 等^[11]通过直接剪切试验研究了旧混凝土

基体初始含水状态对新旧混凝土间粘结性能的影响并发现: 基体的预湿并不会提高界面剪切强度, 甚至有负面影响, 可能的原因是基体表面的水分会导致界面过渡区孔隙率的增加。Dale 等^[12]通过斜剪和拉拔试验研究了普通砂浆与不同饱和度混凝土基体间的粘结性能, 结果表明: 砂浆与干燥混凝土基体间界面剪切强度较高, 而砂浆与饱水混凝土基体间的界面抗拉强度更高。Zhang 等^[13]通过斜剪、劈拉及直接拉伸试验研究了超高性能混凝土与混凝土基体间的界面粘结强度, 结果表明: 不论采用哪种测试方法, 超高性能混凝土与预湿混凝土基体间的界面粘结强度均为干燥基体的 1.27~1.58 倍。作者团队^[14-15]前期的研究发现: 旧普通砂浆基体饱和度对其与新水泥基材料间粘结性能的影响规律与新水泥基材料的配合比有关, 而标准养护后的 PVA 纤维增强水泥基材料与干燥旧砂浆基体间的界面剪切

收稿日期: 2023-09-27。 修订日期: 2023-11-10。

基金项目: 国家自然科学基金(U2106220, 52008222); 国家重点研发计划(2021YFB2600704); 山东省杰出青年基金(ZR2021JQ17)。

第一作者: 薛善彬(1990—), 男, 博士, 副教授。

通信作者: 张 鹏(1981—), 男, 博士, 教授。

Received date: 2023-09-27. Revised date: 2023-11-10.

First author: XUE Shanbin (1990—), male, Ph.D., Associate Professor.

E-mail: xueshanbin@qut.edu.cn

Correspondent author: ZHANG Peng (1981—), male, Ph.D., Professor.

E-mail: peng.zhang@qut.edu.cn

强度较高。基体初始含水状态影响基体与新拌水泥基修补材料间的水分交换行为, 进一步影响修补材料的水胶比、胶凝材料水化和收缩变形等, 并最终影响界面力学性能。关于不同类型基体含水饱和度变化对其与不同配合比纤维增强水泥基材料间界面粘结性能的影响需要进一步研究。

已有研究表明, 适当增加旧水泥基材料、岩石基体的表面粗糙度是提高其与水泥基材料间粘结性能的有效方法^[16-20]。粗糙度会增加水泥基材料与基体间的机械咬合力, 因此对界面粘结性能有较明显的提升作用。需要注意的是, 利用水力切割等方法对基体表面进行粗糙化处理时可能会对基体造成损伤, 因此过度的粗糙化处理不利于界面粘结性能的提高^[21]。不同类型岩石微结构以及表面物理化学特征存在差异, Shen 等^[19]的研究表明花岗岩的亲水性会影响其与混凝土间的粘结性能。Jiang 等^[22]通过界面法向荷载作用下的剪切试验研究了砂岩与混凝土间的粘结性能, 并发现界面剪切强度主要受法向荷载和混凝土强度的影响。与普通砂浆相比, 纤维增强水泥基材料中的粉煤灰等辅助胶凝材料掺量较高, 且纤维的增韧效果显著, 纤维增强水泥基材料与具有不同表面粗糙特征的不同类型基体间的粘结性能值得进一步研究。

水泥基修补材料一般涂覆于既有基体表层, 其抗渗性对于修复和加固的长效性至关重要。一般而言, 水泥基材料的水分传输性能受到其微结构的控制, 微结构的形成和发展则受材料配合比、养护条件等因素的影响^[23-25]。对于水泥基修补材料而言, 其水胶比和微结构特征还受到其与基体间跨界面水分交换过程的影响^[26-28]。与不同类型、不同初始含水状态基体粘结的纤维增强水泥基材料的水分传输性能值得进一步研究。

基于上述分析, 通过力学性能测试, 系统研究了纤维类型、粉煤灰掺量、基体初始含水饱和度、基体表面切槽形式等因素对纤维增强水泥基材料与普通水泥砂浆、混凝土、花岗岩、砂岩 4 类基体间界面剪切强度的影响。通过称重法研究了与不同初始含水饱和度、不同类型基体粘结的纤维增强水泥基材料的毛细吸水性能。相关结果可为劣化混凝土结构修复、破碎岩体加固工程设计与实践提供参考。

1 实验

1.1 原材料及配合比

采用的砂岩和花岗岩基体由供应商提供。普通

砂浆、混凝土基体和纤维增强水泥基修补材料通过实验室制备, 所使用的原材料包括: 山东山水集团生产的 P·O 42.5 普通硅酸盐水泥; 粒径小于 4.75 mm 的天然河砂作为普通砂浆和混凝土的细骨料; 粒径 4.75~19.00 mm 的花岗岩作为混凝土的粗骨料; 普通自来水; 河南省巩义市龙泽净水材料有限公司生产的 I 级粉煤灰; 四川省成都泰峰雪科技有限公司生产的高纯石英砂作为制备纤维增强水泥基材料的骨料, 其粒径为 70~120 目; 日本可乐丽公司生产的聚乙烯醇纤维, 型号为 kuralon K-II (PVA) fiber RECS15×12, 其长度为 12 mm, 直径为 39 μm, 拉伸强度为 1 482 MPa; 惠民县泰利化纤制品有限公司生产的玄武岩纤维, 其长度为 6 mm, 直径为 15 μm; 山东烟台莱阳市宏祥建筑外加剂厂生产的聚羧酸高效减水剂。水泥基材料基体配合比见表 1。

表 1 水泥基材料基体配合比
Table 1 Mix proportions ρ of cement-based materials substrate $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$

Substrate	Cement	Coarse aggregate	Fine aggregate	Water
Mortar	500		1 350	300
Concrete	375	1 125	750	200

根据表 1 配合比制备砂浆和混凝土基体。砂浆基体的制备流程为: 称取相应质量的水泥、砂、水, 先将水泥和砂倒入砂浆搅拌机中干拌 2 min, 再将称好的水倒入搅拌好的干料中继续搅拌 3 min, 得到拌合物。混凝土基体的制备流程为: 先将粗细骨料倒入搅拌机中搅拌 2 min, 然后加入水泥继续干拌 3 min, 最后加水搅拌 3 min, 得到拌合物。将得到的拌合物装入尺寸为 70.7 mm×70.7 mm×70.7 mm 模具中并置于振动台上充分振捣密实, 而后用保鲜膜密封。基体浇筑成型 24 h 后拆模, 并将试件放在温度为 (20±2)℃, 相对湿度≥95% 的标准养护室中养护 90 d。

根据表 2 中的配合比称取所需物料质量制备纤维增强水泥基材料, 具体流程为: 先将水泥、粉煤灰、石英砂倒入搅拌机中干拌 2 min, 称取相应质量的水、减水剂, 待混合均匀后倒入搅好的干料中继续搅拌 3 min, 最后加入 PVA 或玄武岩纤维搅拌 3 min, 保证混合均匀。1.2P 和 1.2B 分别表示粉煤灰与水泥质量比为 1.2:1.0 的 PVA 纤维和玄武岩纤维增强水泥基材料。同时对纤维增强水泥基材料 28 d 抗压强度进行了测试, 1.2P、1.8P、1.2B、1.8B 的抗压强度分别为 49.3、39.8、43.5 MPa 和 35.5 MPa。

表 2 纤维增强水泥基材料配合比

Table 2 Mix proportions of fiber reinforced cement -based materials (FRCM)

Group	Mix proportion $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$				$w(\text{SP})/\%$	Fiber type	$\phi(\text{Fiber})/\%$
	Cement	Fly ash	Quartz sand	Water			
1.2P	550	650	550	360	0.5	PVA	2
1.8P	430	770	550	360	0.5	PVA	
1.2B	550	650	550	360	0.5	BF	0.2
1.8B	430	770	550	360	0.5	BF	

Note: SP denoted superplasticizer and its mass *i.e.* $w(\text{SP})$ was 0.5% of cementitious materials. The content of PVA and basalt fiber *i.e.* $\phi(\text{Fiber})$ was 2.0% and 0.2% of the volume of the slurry, respectively.

1.2 基体饱和度及表面切槽形式控制

1) 基体饱和度控制

对养护至 90 d 龄期的水泥基材料基体和砂岩基体进行饱和度控制, 如图 1 所示。50%饱和度基体的目标质量可由式(1)计算, 将制备至预期饱和度的基体用保鲜膜密封备用。对于干燥速度较快的少数砂岩基体, 一旦其在烘干箱中水分蒸发过多, 则需用湿毛巾补充少量水分, 以准确控制其饱和度。相较于砂浆、混凝土以及砂岩, 花岗岩微结构较为致密。经真空饱水法测得本试验用花岗岩的孔隙度仅为 0.009, 而砂浆的孔隙度可达 0.230。考虑到干燥花岗岩与饱水花岗岩的含水量差别较小, 即饱和度对界面剪切强度的影响较为有限, 本工作仅以经 105 °C 干燥后的花岗岩作为基体进行研究。

$$m_o = \frac{m_w - m_d}{2} + m_d \quad (1)$$

式中: m_o 为试件的目标质量, g; m_d 为烘干后的质量, g; m_w 为泡水至质量恒定后的质量, g。

2) 砂浆基体表面切槽形式控制

首先, 利用切割机将尺寸为 70.7 mm×70.7 mm×

70.7 mm 的砂浆基体从中间切开。之后, 利用角磨机对切割面上进行切槽处理, 以改变基体与纤维增强水泥基材料间的联结方式。制备了“十”字凹槽和“井”字凹槽 2 种形式, 并控制每条凹槽的宽度和深度为 5 mm, 分别记为 RA 和 RB, 切槽处理的基体再预制为不同的饱和度。

1.3 粘结复合体制备及界面剪切强度测试

首先把尺寸为 70.7 mm×70.7 mm×35.0 mm 的基体放入模具中, 在基体旁浇筑新拌纤维增强水泥材料后进行充分振捣, 并用保鲜膜密封复合体 24 h 后拆模, 最后放入温度为 $(20\pm 2)^\circ\text{C}$, 相对湿度 $\geq 95\%$ 的标准养护室中养护 28 d。达到养护龄期后沿粘结复合体界面处进行界面剪切强度测试。试验加载速度为 2.5 kN/s, 界面剪切强度根据式(2)计算, 选取 3 个试件的测试平均值作为该组的界面剪切强度测试结果。

$$\tau = \frac{P}{S} \quad (2)$$

式中: τ 为直接剪切强度, MPa; S 为试件受力面积, mm^2 ; P 为复合试件的破坏荷载, N。

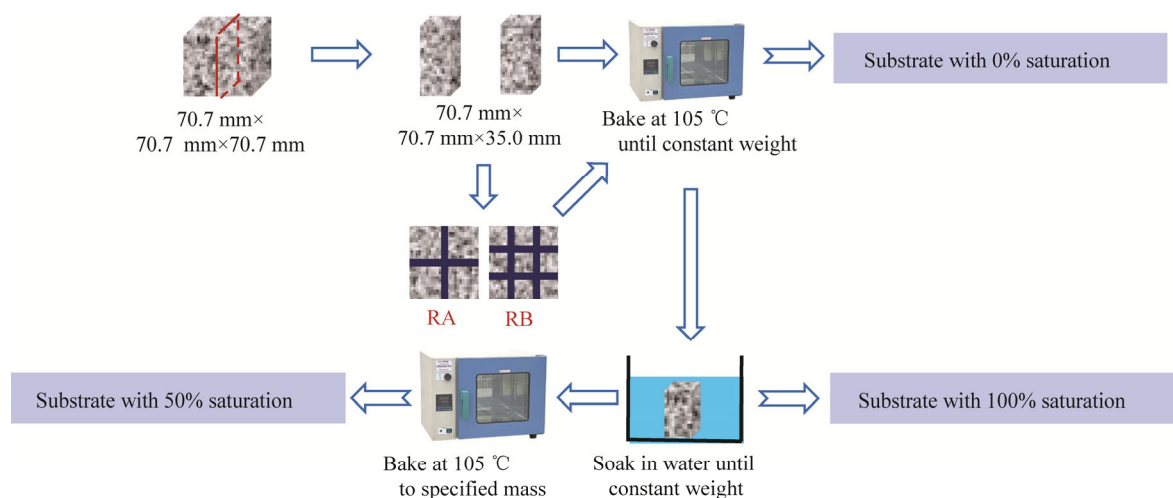


图 1 基体饱和度控制流程

Fig. 1 Substrate saturation control process

1.4 毛细吸水试验

每组取 3 块养护至 28 d 龄期的粘结复合体, 放在 45 °C 烘箱中烘干至质量恒定, 用铝箔胶带将试件四周密封。纤维增强水泥基材料底部浸入自来水中(5±1) mm, 分别在不同时间点记录试件质量变化。根据式(3)确定试件单位面积累计吸水质量, 计算 3 块试件单位面积累计吸水质量的平均值并记录其随着时间的变化规律。

$$\frac{\Delta W}{A} = \frac{m_i - m_d}{A} \quad (3)$$

式中: ΔW 为累计吸水质量, g; A 为底面面积, cm^2 ; m_i 为 i 时刻试件的质量, g; m_d 为试件干燥质量, g。

2 结果与讨论

2.1 纤维增强水泥基材料与表面光滑砂浆基体间界面剪切强度

不同类型纤维增强水泥基材料与不同饱和度砂浆基体间的界面剪切强度测试结果如图 2 所示。图 2a 结果表明: 不同粉煤灰掺量的玄武岩纤维增强水泥基材料与砂浆基体间的界面剪切强度均随基体饱和度的增加而降低。当基体饱和度由 0% 增加至 50% 和 100% 时: 低粉煤灰掺量的纤维增强水泥基材料与基体间的剪切强度由 4.70 MPa 降低至 3.41 MPa 和 3.13 MPa, 分别降低 27.45% 和 33.40%; 高粉煤灰掺量的纤维增强水泥基材料与基体间的剪切强度则由 3.89 MPa 降低至 3.07 MPa 和 2.84 MPa, 分别下降 21.08% 和 26.99%。同时注意到: 相同基体饱和度条件下, 纤维增强水泥基材料中粉煤灰掺量越高, 界面剪切强度越低。当基体饱和度分别为 0%、50% 和 100% 时, 高粉煤灰掺量组相较于低粉煤灰掺量组的界面剪切强度分别低 17.23%、9.97% 和 9.27%。高粉煤灰掺量材料中的水泥含量较少, 可导致生成的水化产物减少, 自身强度降低, 从而对界面剪切强度产生不利影响^[29-30]。

PVA 纤维增强水泥基材料与基体间的界面剪切强度如图 2b 所示。结果表明: 不论纤维增强水泥基材料中的粉煤灰掺量如何变化, 界面剪切强度均随着基体饱和度的增加而减小。当基体饱和度由 0% 逐渐增加至 50% 和 100% 时: 低粉煤灰掺量组界面剪切强度由 4.05 MPa 分别降低至 3.20 MPa 和 2.90 MPa, 下降幅度分别为 20.99% 和 28.40%; 高粉煤灰掺量组界面剪切强度分别由 4.22 MPa 降低至 3.37 MPa 和 3.18 MPa, 降幅分别为 20.14% 和 24.64%。综合上述结果: 砂浆基体饱和度的增加不

利于其与玄武岩或 PVA 纤维增强水泥基材料的粘结, 当基体饱和度超过 50% 后, 饱和度对界面剪切强度的影响减弱。

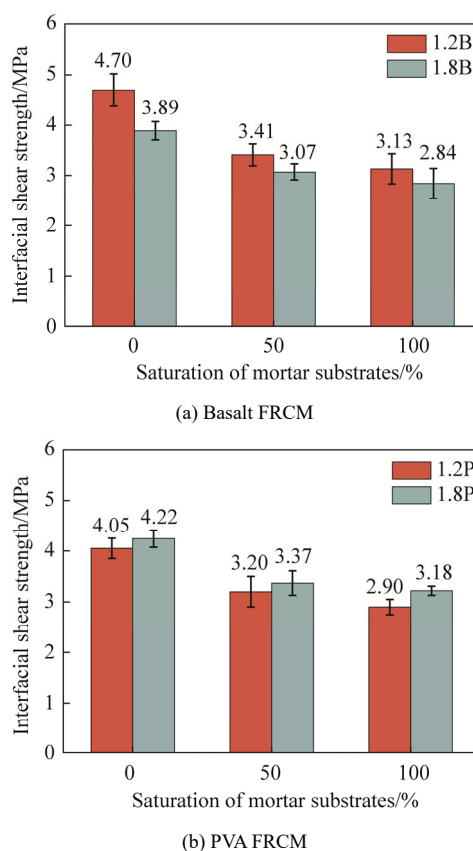


图 2 不同类型纤维增强水泥基材料与不同含水饱和度砂浆基体间界面剪切强度

Fig. 2 Interface shear strength between different types of FRCM and mortars with different water saturation

推测上述现象与修补材料和基体的间水分交换过程有关: 如图 3 所示, 当基体干燥时, 与之接触的新拌修补材料中的水分会携带水泥颗粒在毛细吸力的作用下向基体侧迁移, 这一跨界面的水分交换有利于修补材料与基体的贴合, 同时降低了界面处修补材料的水胶比, 提高了界面剪切强度^[28]。基体饱和度提高时, 修补材料与基体间的水分交换过程会显著降低, 甚至水分可能在界面处积聚, 提高了界面区的水胶比, 从而降低了界面剪切强度^[31]。

需要指出的是, 本工作所用纤维增强水泥基材料水胶比偏低, 且粉煤灰掺量高, 从而其浆体表现出良好的粘聚性和保水性。其与干燥基体粘结时不会失去过多的水分, 且水分流失后也不会留下过多空隙。此外, 纤维的存在也能够抑制材料早期塑性变形并减轻收缩。粉煤灰的形态效应使其能在新拌浆体中起到润滑作用, 有利于浆体工作性能的改善

及其与基体的粘结。同时粉煤灰一般活性偏低，粉煤灰的掺入可降低胶凝材料总体需水量。本工作采用了标准养护条件，高湿度环境能够为纤维增强水泥基材料中的胶凝材料水化提供水分和减轻收缩，这将对界面粘结性能产生重要影响。不同养护环境中纤维增强水泥基材料内部的湿度演化规律值得进一步研究。在实际工程中，待修补基体预湿与否需

要结合修补材料的配合比和养护条件综合判断。

新拌水泥基材料与不同类型基体间水分交换过程的追踪以及界面微结构的多尺度精准表征仍需深入研究。此外，上述水分交换过程可影响纤维增强水泥基材料的微结构形成与发展，从而影响其吸水性能，在本工作后续内容中将对该问题进行分析 and 讨论。

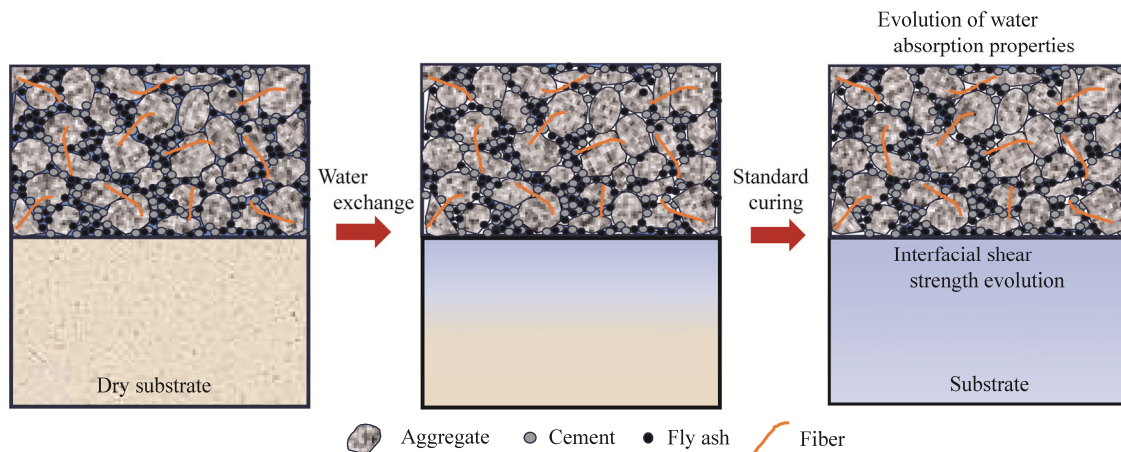


图3 纤维增强水泥基材料与干燥基体粘结过程示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the bonding process between FRCM and dry substrate

另外，随基体饱和度的增加，PVA 纤维增强水泥基材料与基体间界面剪切强度的降低幅度低于玄武岩纤维增强水泥基材料。这可能与 PVA 纤维优异抗拉强度以及与浆体良好的结合性能有关。已有研究表明^[32–33]：同等条件下，掺加 PVA 纤维的应变硬化水泥基材料试件的抗压及拉伸性能显著优于掺加玄武岩纤维的试件。另外，本工作中 PVA 纤维较高的掺量也有利于水泥基材料韧性的改善。在界面剪切试验中，PVA 纤维增强水泥基材料多表现为韧性破坏，玄武岩纤维增强水泥基材料则多呈脆性破坏。但纤维类型对界面剪切强度的影响较为有限。

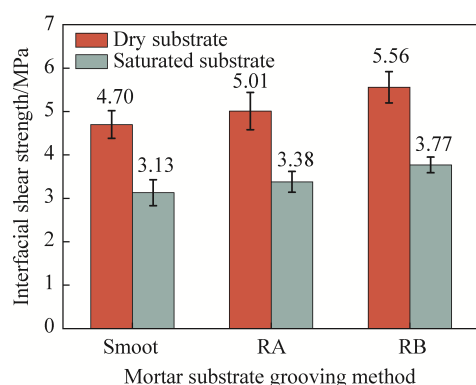
图 2b 表明，与玄武岩纤维增强水泥基材料不同的是，增加 PVA 纤维增强水泥基材料中的粉煤灰掺量对界面剪切强度有所提升。当基体饱和度为 0%，50%和 100%时，高粉煤灰掺量组的界面剪切强度分别比低粉煤灰掺量组高 4.20%、5.31%和 9.66%。由于粉煤灰具有火山灰效应与填充作用，纤维增强水泥基材料中粉煤灰掺量的增加有利于其形成更为致密的微结构，从而有助于其与基体的粘结；但粉煤灰对水泥基材料韧性的改善效果受到其与纤维协同作用的影响，当纤维自身力学性能与掺量较低时，过高的粉煤灰掺量可导致材料韧性的降低^[34]。PVA 纤维力学性能优异且掺量较高，其可与较高的粉煤

灰掺量发挥良好的协同作用，从而导致 PVA 纤维增强水泥基材料与基体间的界面剪切强度随粉煤灰掺量的提高而增长。而玄武岩纤维掺量较少，其可能不能与较高掺量的粉煤灰发挥良好的协同作用，从而导致玄武岩纤维增强水泥基材料与基体间界面剪切强度随着粉煤灰掺量的提高而降低。下一步可设置更多不同纤维掺量的水泥基复合材料作为对照组，并进一步研究纤维掺量及空间分布特征对界面剪切强度的影响。

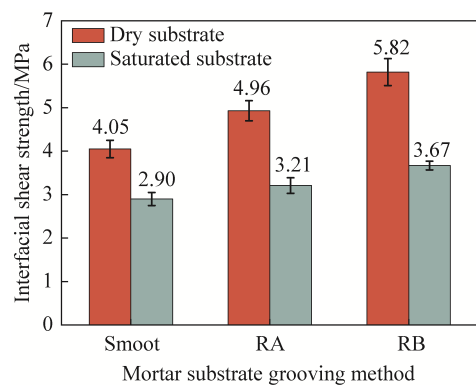
2.2 纤维增强水泥基材料与表面切槽砂浆基体间界面剪切强度

纤维增强水泥基材料与不同表面切槽形式、不同初始含水率的砂浆基体间的界面剪切强度如图 4 所示。其中，玄武岩纤维、PVA 纤维增强水泥基材料均选用粉煤灰掺量为水泥质量 1.2 倍的配合比，即表 2 中 1.2B 和 1.2P 所示配合比，玄武岩纤维、PVA 纤维的掺量分别为 0.2%和 2.0%。图 4a 表明：通过对干燥或饱水砂浆基体进行切槽，能够提高其与同配合比玄武岩纤维增强水泥基材料间的界面剪切强度，且该现象随切槽数量的增加而更为明显。对于干燥基体而言，界面剪切强度由光滑界面的 4.70 MPa 分别增加至 RA、RB 切槽方式时的 5.01 MPa 和 5.56 MPa，增幅分别为 6.60%和 18.30%；

对于饱水基体, 界面剪切强度可由光滑界面的 3.13 MPa 增加至 RA、RB 切槽方式时的 3.38 MPa 和 3.77 MPa, 增幅分别为 7.99% 和 20.45%。



(a) Basalt FRCM



(b) PVA FRCM

图 4 不同类型纤维增强水泥基材料与不同切槽方式及含水饱和度砂浆间界面剪切强度

Fig. 4 Interface shear strength between different types of FRCM and mortar with different groove forms and water saturation

图 4b 的结果表明: PVA 纤维增强水泥基材料与干燥或饱水砂浆基体间的界面剪切强度同样随基体表面切槽数量的增加而提高: 当基体干燥时, RA、RB 切槽方式时的界面剪切强度较光滑基体时的 4.05 MPa 分别提高 22.47%、43.70% 至 4.96 MPa 和 5.82 MPa; 当基体饱水时, RA、RB 切槽方式时的界面剪切强度较光滑基体时的 2.90 MPa 分别提高 10.69%、26.55% 至 3.21 MPa 和 3.67 MPa。

总结以上试验结果发现: 对于玄武岩或 PVA 纤维增强水泥基材料而言, 基体表面切槽数量的增加对于其与干燥基体间界面剪切强度的提高作用更为明显; 在基体干燥的情况下, 基体表面切槽数量的增加对于其与 PVA 纤维增强水泥基材料间界面剪切强度的提高作用优于玄武岩纤维增强水泥基材料, 这可能与 PVA 纤维增强水泥基材料优异的力学

性能有关。而玄武岩纤维增强水泥基材料抗压、抗拉强度较低, 其受到剪切力作用表现为明显的脆性破坏特征。如前所述, 当基体饱水时, 界面处可能因水分积聚而产生高孔隙度区域, 基体表面的切槽处理对基体与 2 类纤维增强水泥基材料间的界面剪切强度均未有显著的提升作用。

2.3 PVA 纤维增强水泥基材料与混凝土、岩石基体间界面剪切强度

选用粉煤灰掺量为水泥质量的 1.2 倍的 PVA 纤维增强水泥基材料作为修补材料, 分别研究了其与混凝土、砂岩、花岗岩基体间的界面剪切强度, 如图 5 所示。结果表明: 当基体为混凝土时, 随着基体饱和度由 0% 增加至 50% 和 100%, 界面剪切强度由 4.26 MPa 逐渐降低至 3.17 MPa 和 2.52 MPa, 分别降低了 25.59% 和 40.85%。总体而言, 基体饱和度变化对 PVA 纤维增强水泥基材料与混凝土基体间界面剪切强度的影响规律和砂浆基体类似。但对于同配比的 PVA 纤维增强水泥基材料: 其与干燥混凝土间的界面剪切强度比干燥砂浆基体高 5.45%, 这可能与混凝土基体强度高于砂浆基体有关; 其与 50% 饱和度的混凝土基体间的界面剪切强度则与 50% 砂浆基体相当; 其与饱水混凝土基体间的界面剪切强度则较饱水砂浆低 13.10%。

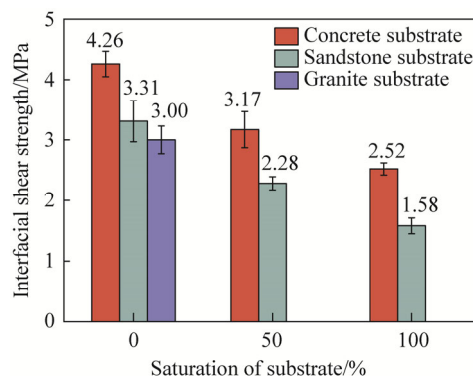


图 5 PVA 纤维增强水泥基材料与不同类型基体间的界面剪切强度

Fig. 5 Interfacial shear strength between PVA FRCM and different types of substrates

如图 5 所示, 当砂岩作为基体时, 当其饱和度由 0% 逐渐增加至 50% 和 100% 时, 界面剪切强度由 3.31 MPa 降低至 2.28 MPa 和 1.58 MPa, 降幅分别为 31.12% 和 52.27%。

当基体饱和度相同时, 砂岩基体与同配合比的 PVA 纤维增强水泥基材料间的界面剪切强度低于砂浆和混凝土基体: 当基体干燥时, 砂浆、混凝土组界面剪切强度分别是砂岩组的 1.22 倍和 1.29 倍; 当

基体饱和度为 50% 时, 砂浆、混凝土组界面剪切强度是砂岩组的 1.40 倍和 1.39 倍; 当基体饱和度为 100% 时, 砂浆、混凝土组界面剪切强度则是砂岩的 1.83 倍和 1.59 倍。可见, 基体饱和度越高, 砂岩组的界面剪切强度与砂浆、混凝土组的差距越大。花岗岩基体与 PVA 纤维增强水泥基材料间的界面剪切强度为 3.00 MPa, 低于其他 3 类基体处于干燥状态时的界面剪切强度, 但与另外 3 类基体处于 50% 饱和度时的界面剪切强度较为接近。值得指出的是, 本工作以界面剪切强度作为评价纤维增强水泥基材料与基体粘结性能的指标, 后续可采用界面抗拉强度等作为指标对基体饱和度等变化对纤维增强水泥基材料与基体粘结性能的影响作进一步评价。

2.4 与不同类型基体粘结的纤维增强水泥基材料吸水性能

1) 水泥砂浆基体

如前所述, 利用称重法监测了与基体粘结的纤维增强水泥基材料早期毛细吸水过程。其中, 与砂浆基体粘结的纤维增强水泥基材料 3 h 吸水过程中样品单位面积吸水质量随吸水时间平方根的变化规

律如图 6 所示, 利用线性函数对图中数据进行拟合。由于纤维增强水泥基材料渗透性较低且本次试验测试时间相对较短, 因此吸水数据主要反映纤维增强水泥基材料的毛细吸水性能, 图 6 中线性函数斜率被称为纤维增强水泥基材料的毛细吸水性系数。图 6a 为 PVA 纤维增强水泥基材料且粉煤灰质量为水泥质量的 1.2 倍时的毛细吸水试验结果, 结果表明: 其毛细吸水性系数为 0.018 9~0.021 4 g/(cm²·min^{0.5}), 且受基体饱和度变化的影响较小。

图 6b 为 PVA 纤维增强水泥基材料且粉煤灰质量为水泥质量的 1.8 倍时的毛细吸水试验结果, 表明: 基体饱和度变化对其毛细吸水性能的影响仍然不显著, 但其毛细吸水性系数变化范围为 0.026 7~0.033 0 g/(cm²·min^{0.5})。基体饱和度为 0%、50% 和 100% 时, 高粉煤灰掺量组 PVA 纤维增强水泥基材料的毛细吸水性系数分别是低粉煤灰掺量组的 1.70、1.56 倍和 1.25 倍。在 PVA 纤维增强水泥基材料中内掺较高量的粉煤灰虽然有助于其与基体间界面剪切强度的提高, 但其抗毛细水入渗性能显著下降, 这不利于对于海工混凝土结构的长期修复。

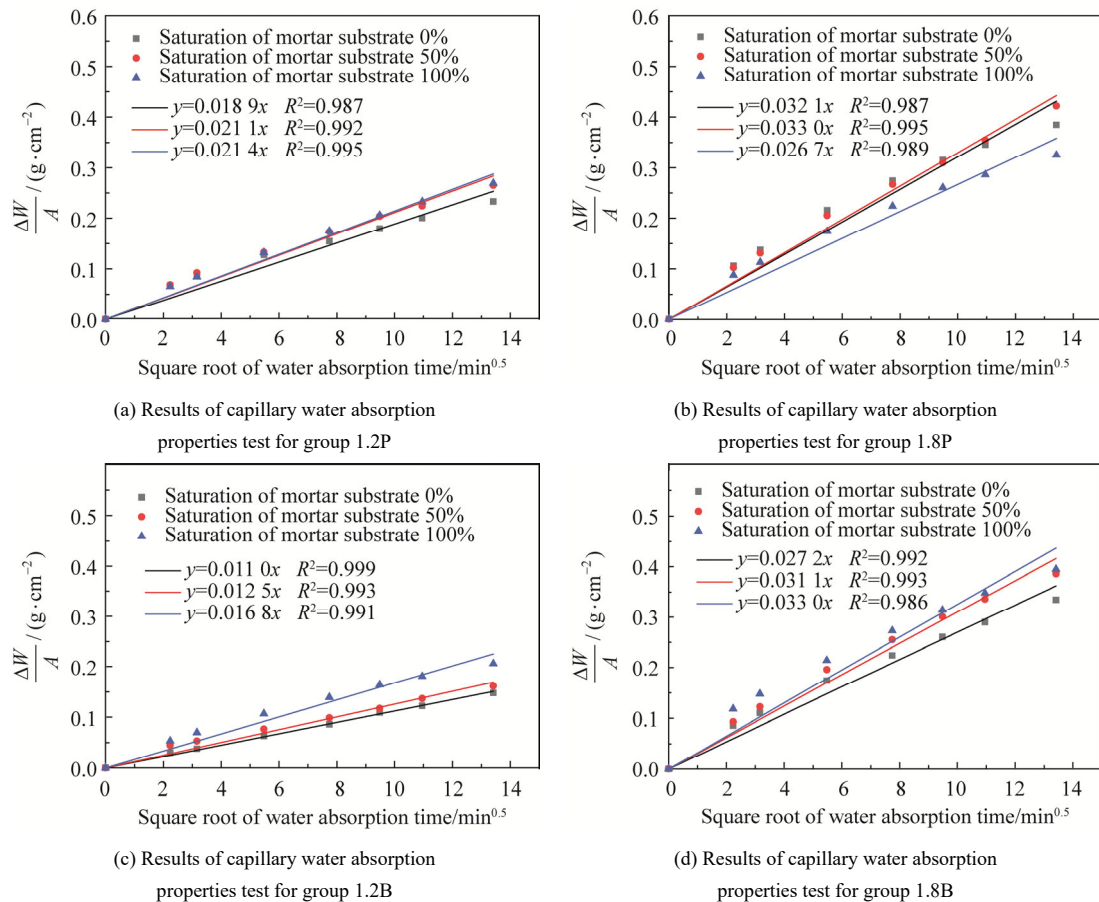


图 6 与砂浆基体粘结的纤维增强水泥基材料毛细吸水性能

Fig. 6 Capillary water absorption properties of FRCM bonded to mortar substrate

与不同饱和度砂浆粘结的玄武岩纤维增强水泥基材料毛细吸水性能测试结果如图 6c、图 6d 所示, 同样利用线性函数拟合获得其毛细吸水系数。图 6c 表明: 当玄武岩纤维增强水泥基材料中的粉煤灰与水泥质量比为 1.2 且基体饱和度从 0% 增加至 50% 和 100% 时, 其毛细吸水系数可从 $0.0110 \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{min}^{0.5})$ 分别增加 13.64% 和 52.73% 至 $0.0125 \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{min}^{0.5})$ 和 $0.0168 \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{min}^{0.5})$ 。图 6d 表明: 当玄武岩纤维增强水泥基材料中粉煤灰与水泥质量比为 1.8 时, 其与 0%, 50% 和 100% 饱和度基体粘结时的毛细吸水系数分别为 0.0272 、 $0.0311 \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{min}^{0.5})$ 和 $0.0330 \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{min}^{0.5})$, 是与相同饱和度基体粘结的低粉煤灰组毛细吸水系数的 2.47 倍、2.49 倍和 1.85 倍。可见, 粉煤灰掺量的增加能够显著提高与砂浆基体粘结的玄武岩或 PVA 纤维增强水泥基材料的毛细吸水性能。而基体饱和度变化对与之粘结的玄武岩纤维增强水泥基材料毛细吸水性能的影响不显著: 基体饱和度由 0% 增加至 50% 和 100% 时, 玄武岩增强水泥基材料毛细吸水系数分别增长 14.34% 和 21.32%。

对比图 6 中数据发现: 当修补材料中粉煤灰与水泥质量比均为 1.2 且基体饱和度为 0%、50% 和 100% 时, 玄武岩纤维增强水泥基材料的毛细吸水系数比 PVA 纤维增强水泥基材料分别低 41.80%、40.76% 和 21.50%, 这可能与 PVA 纤维自身较高的孔隙度有关。而当修补材料中粉煤灰与水泥质量比

均为 1.8 时, 玄武岩纤维增强水泥基材料与 PVA 纤维增强水泥基材料的毛细吸水系数差别不明显。可见, 较高的粉煤灰掺量可明显提升纤维增强水泥基材料的毛细吸水性能, 使纤维类型对修补材料毛细吸水性能的影响不再显著。PVA 纤维与玄武岩纤维及其界面过渡区微结构的多尺度、多方法综合表征对于分析其对材料传输与力学性能的影响至关重要, 值得系统研究。

2) 混凝土与岩石基体

不同类型基体的微结构特征和毛细吸水性能存在差异, 从而对其与新拌水泥基修补材料间的水分交换过程产生影响, 并进一步改变水泥基修补材料的毛细吸水性能。如图 7 所示, 测试了与混凝土、砂岩、花岗岩基体粘结的 PVA 纤维增强水泥基材料的毛细吸水数据, 并利用线性函数拟合获取其毛细吸水系数。图 7a 的结果表明: 当基体为 0%, 50% 和 100% 饱和度的混凝土时, PVA 纤维增强水泥基材料的毛细吸水系数分别为 0.0165 、 $0.0216 \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{min}^{0.5})$ 和 $0.0200 \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{min}^{0.5})$, 即与非干燥基体粘结的 PVA 纤维增强水泥基材料稍高。对比图 6a 中数据发现: 与混凝土、砂浆基体粘结的 PVA 纤维增强水泥基材料的毛细吸水系数较为接近。

图 7b 为与不同饱和度的砂岩基体粘结的 PVA 纤维增强水泥基材料的毛细吸水试验结果。从图 7b 可以看出: PVA 纤维增强水泥基材料的毛细吸水性

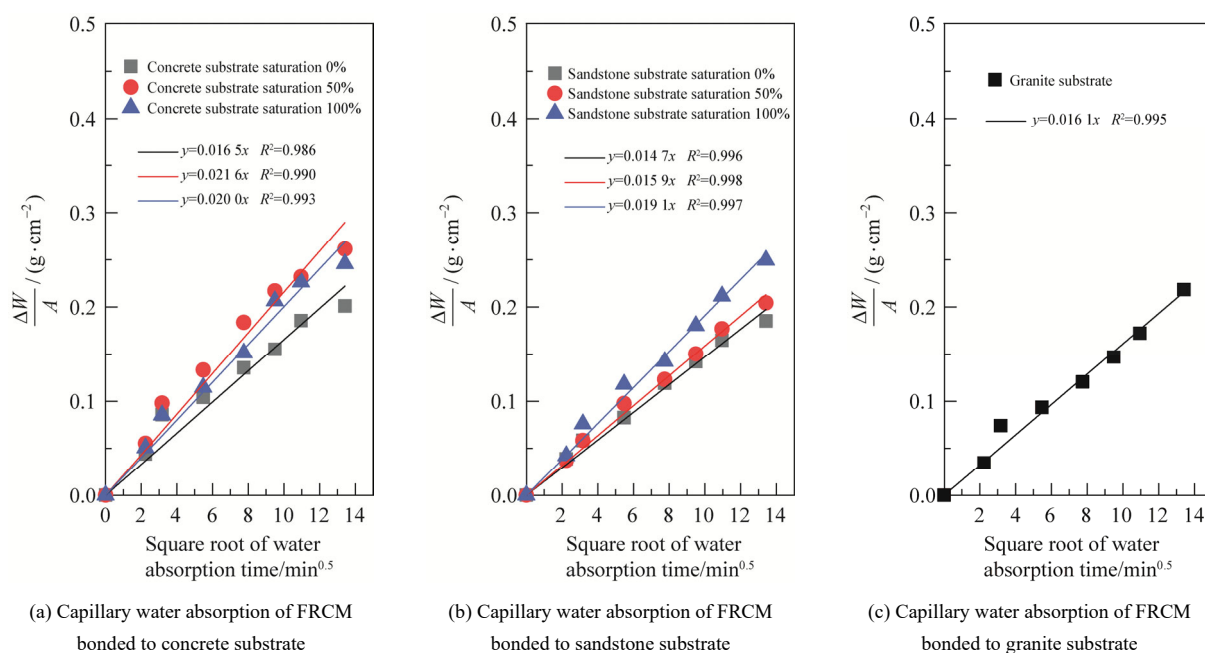


图 7 基体类型及饱和度对 PVA 纤维增强水泥基材料毛细吸水性能的影响

Fig. 7 Effect of substrates types and saturation on capillary water absorption properties of PVA FRCM

系数随砂岩基体饱和度的增加而有所增长。基体饱和度由 0% 增加至 50% 和 100% 时, 毛细吸水性系数由 $0.0147 \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{min}^{0.5})$ 分别增加 8.16% 和 29.93% 至 $0.0159 \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{min}^{0.5})$ 和 $0.0191 \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{min}^{0.5})$ 。其中, 与饱水砂浆、饱水混凝土粘结的 PVA 纤维增强水泥基材料的毛细吸水系数较为接近, 这可能与饱水基体与纤维增强水泥基材料间相似的水分交换过程有关。图 7c 表明: 与干燥花岗岩基体粘结的 PVA 纤维增强水泥基材料的毛细吸水性系数为 $0.0161 \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{min}^{0.5})$ 。由于花岗岩较为致密, 基体与 PVA 纤维增强水泥基材料之间几乎不会发生水分交换, 可认为该毛细吸水性系数主要由修补材料初始配合比和养护条件决定。

3 结论

1) PVA、玄武岩纤维增强水泥基材料与砂浆基体间的界面剪切强度均随基体饱和度的增加而减小。当砂浆基体饱和度不变时, 粉煤灰掺量的增加会提高 PVA 纤维增强水泥基材料与基体间的界面剪切强度, 但导致玄武岩纤维增强水泥基材料与基体间的界面剪切强度降低。

2) 基体表面切槽数量越多, 其与 PVA 或玄武岩纤维增强水泥基材料间的界面剪切强度越高。且该现象对于 PVA 纤维增强水泥基材料更为明显。干燥基体表面切槽对其与玄武岩或 PVA 纤维增强水泥基材料间界面剪切强度的提升作用较饱水基体更为明显。

3) PVA 纤维增强水泥基材料与混凝土、砂岩基体间的界面剪切强度均随基体饱和度的增加而降低。当基体干燥时, PVA 纤维增强水泥基材料与混凝土间的界面剪切强度依次高于砂浆、砂岩和花岗岩; 当基体部分饱水时, PVA 纤维增强水泥基材料与混凝土、砂浆间的界面剪切强度相当且均高于砂岩; 当基体饱水时, PVA 纤维增强水泥基材料与砂浆间的界面剪切强度依次高于混凝土、砂岩。

4) 与干燥砂浆、混凝土和砂岩基体粘结的纤维增强水泥基材料的毛细吸水性系数总体低于同类型的预湿基体。与不同类型基体粘结的同配合比 PVA 纤维增强水泥基材料间的毛细吸水性系数未表现出显著差异。粉煤灰掺量的增加能够显著提高与基体粘结的纤维增强水泥基材料的毛细吸水系数。当粉煤灰掺量较低时, PVA 纤维增强水泥基材料的毛细吸水系数显著高于与同饱和度砂浆基体粘结的玄武岩纤维增强水泥基材料。

参考文献:

- [1] 王振波, 王鹏宇, 孙鹏. 高延性水泥基材料纤维分布及其影响因素研究进展[J]. 硅酸盐学报, 2022, 50(8): 2284–2295.
WANG Zhenbo, WANG Pengyu, SUN Peng. J Chin Ceram Soc, 2022, 50(8): 2284–2295.
- [2] YU J J, ZHANG B S, CHEN W Z, et al. Multi-scale study on interfacial bond failure between normal concrete (NC) and ultra-high performance concrete (UHPC)[J]. J Build Eng, 2022, 57: 104808.
- [3] QASIM M, LEE C K, ZHANG Y X. An experimental study on interfacial bond strength between hybrid engineered cementitious composite and concrete[J]. Constr Build Mater, 2022, 356: 129299.
- [4] LUO Q, QIN T, CHEN Z, et al. The influence of moisture and epoxy bonding agents on interfacial behavior between normal concrete substrate and ultrahigh performance concrete as a repair material: Experimental and molecular dynamics study[J]. Constr Build Mater, 2023, 372: 130779.
- [5] GUO S Y, ZHANG X, CHEN J Z, et al. Mechanical and interface bonding properties of epoxy resin reinforced Portland cement repairing mortar[J]. Constr Build Mater, 2020, 264: 120715.
- [6] JU Y Z, SHEN T, WANG D H. Bonding behavior between reactive powder concrete and normal strength concrete[J]. Constr Build Mater, 2020, 242: 118024.
- [7] FENG S, XIAO H G, ZHANG R L, et al. Bond performance between substrate concrete and repair mortar: Effect of carbon fiber and expansive agent[J]. Constr Build Mater, 2020, 250: 118830.
- [8] ZHANG Y, ZHANG C Y, ZHU Y P, et al. An experimental study: Various influence factors affecting interfacial shear performance of UHPC-NSC[J]. Constr Build Mater, 2020, 236: 117480.
- [9] MOMAYEZ A, EHSANI M R, RAMEZANIANPOUR A A, et al. Comparison of methods for evaluating bond strength between concrete substrate and repair materials[J]. Cem Concr Res, 2005, 35(4): 748–757.
- [10] ZANOTTI C, RANDL N. Are concrete-concrete bond tests comparable?[J]. Cem Concr Compos, 2019, 99: 80–88.
- [11] BEUSHAUSEN H. The influence of concrete substrate preparation on overlay bond strength[J]. Mag Concr Res, 2010, 62(11): 845–852.
- [12] BENTZ D P, DE LA VARGA I, MUÑOZ J F, et al. Influence of substrate moisture state and roughness on interface microstructure and bond strength: Slant shear vs. pull-off testing[J]. Cem Concr Compos, 2018, 87: 63–72.
- [13] ZHANG Y, ZHU P, LIAO Z Q, et al. Interfacial bond properties between normal strength concrete substrate and ultra-high performance concrete as a repair material[J]. Constr Build Mater, 2020, 235: 117431.
- [14] 孟繁强, 薛善彬, 张鹏, 等. 新旧水泥砂浆界面粘结性能试验研究[J]. 硅酸盐通报, 2020, 39(12): 3791–3798.
MENG Fanqiang, XUE Shanbin, ZHANG Peng, et al. Bull Chin Ceram Soc, 2020, 39(12): 3791–3798.
- [15] 郭旗, 薛善彬, 荆峰杰, 等. 新拌修补砂浆与基体水分交换行为及其对复合性能的影响[J]. 硅酸盐学报, 2023, 51(5): 1115–1125.
GUO Qi, XUE Shanbin, JING Fengjie, et al. J Chin Ceram Soc, 2023, 51(5): 1115–1125.
- [16] HE Y, ZHANG X, HOOTON R D, et al. Effects of interface roughness and interface adhesion on new-to-old concrete bonding[J]. Constr Build Mater, 2017, 151: 582–590.
- [17] ZHANG S H, LI Q Y, YUAN Q, et al. Effect of roughness on bonding performance between Portland cement concrete and magnesium phosphate cement concrete[J]. Constr Build Mater, 2022, 323: 126585.
- [18] FENG S, XIAO H G, GENG J S. Bond strength between concrete

- substrate and repair mortar: Effect of fiber stiffness and substrate surface roughness[J]. *Cem Concr Compos*, 2020, 114: 103746.
- [19] SHEN Y J, WANG Y Z, YANG Y, et al. Influence of surface roughness and hydrophilicity on bonding strength of concrete-rock interface[J]. *Constr Build Mater*, 2019, 213: 156–166.
- [20] CHEN Y, YANG J F, LI M H, et al. Effects of roughness on shear properties and acoustic emission characteristics of bonded Rock-Concrete interfaces[J]. *Constr Build Mater*, 2023, 398: 132405.
- [21] 王孟伟. ECC与既有混凝土粘结性能的影响因素研究[D]. 南京: 东南大学, 2018.
- WANG Mengwei. Research on factors affecting bonding behavior between existing concrete and ECC[D]. Nanjing: Southeast University, 2018.
- [22] JIANG Q, YANG Y, YAN F, et al. Deformation and failure behaviours of rock-concrete interfaces with natural morphology under shear testing[J]. *Constr Build Mater*, 2021, 293: 123468.
- [23] PIASTA W, ZARZYCKI B. The effect of cement paste volume and w/c ratio on shrinkage strain, water absorption and compressive strength of high performance concrete[J]. *Constr Build Mater*, 2017, 140: 395–402.
- [24] ZHAO H T, DING J, HUANG Y Y, et al. Investigation on sorptivity and capillarity coefficient of mortar and their relationship based on microstructure[J]. *Constr Build Mater*, 2020, 265: 120332.
- [25] TAYEH B A, ABU BAKAR B H, MEGAT JOHARI M A, et al. Mechanical and permeability properties of the interface between normal concrete substrate and ultra high performance fiber concrete overlay[J]. *Constr Build Mater*, 2012, 36: 538–548.
- [26] XUE S B, ZHANG P, LEHMANN E H, et al. Neutron radiography of water exchange across the interface between old and fresh mortar[J]. *Measurement*, 2021, 183: 109882.
- [27] XUE S B, MENG F Q, ZHANG P, et al. Influence of substrate moisture conditions on microstructure of repair mortar and water imbibition in repair-old mortar composites[J]. *Measurement*, 2021, 183: 109769.
- [28] LUKOVIC M, YE G. Effect of moisture exchange on interface formation in the repair system studied by X-ray absorption[J]. *Materials*, 2015, 9(1): 2.
- [29] 阎培渝. 粉煤灰在复合胶凝材料水化过程中的作用机理[J]. *硅酸盐学报*, 2007, 35(S1): 167–171.
- YAN Peiyu. J Chin Ceram Soc, 2007, 35(S1): 167–171.
- [30] 姚智高, 林常, 蔡舒, 等. 粉煤灰对PVA纤维/水泥基体界面作用及复合材料拉伸性能的影响[J]. *硅酸盐通报*, 2022, 41(7): 2327–2336.
- YAO Zhigao, LIN Chang, CAI Shu, et al. *Bull Chin Ceram Soc*, 2022, 41(7): 2327–2336.
- [31] BEUSHAUSEN H, HÖHLIG B, TALOTTI M. The influence of substrate moisture preparation on bond strength of concrete overlays and the microstructure of the OTZ[J]. *Cem Concr Res*, 2017, 92: 84–91.
- [32] 郭伟娜, 鲍玖文, 张鹏, 等. 基于数字图像方法的混掺纤维应硬化水泥基复合材料力学性能及变形特征[J]. *硅酸盐学报*, 2022, 50(5): 1401–1409.
- GUO Weina, BAO Jiuwen, ZHANG Peng, et al. *J Chin Ceram Soc*, 2022, 50(5): 1401–1409.
- [33] LI Z X, WANG X, YAN W L, et al. Physical and mechanical properties of gypsum-based composites reinforced with basalt, glass, and PVA fibers[J]. *J Build Eng*, 2023, 64: 105640.
- [34] BEHFOROUSH B, TAVAKOLI D, GHARGHANI M, et al. Bond strength of the interface between concrete substrate and overlay concrete containing fly ash exposed to high temperature[J]. *Structures*, 2023, 49: 183–197.

Interfacial Shear Strength Between Fiber-Reinforced Cement-Based Materials (FRCM) and Different Substrates and Water Absorption Properties of FRCM

XUE Shanbin¹, JING Fengjie¹, WANG Dan¹, ZHANG Peng^{1,2}, GAO Xiaojian³

(1. School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266525, Shandong, China; 2. Qingdao University of Technology, Shandong Blue Economic Zone Engineering Construction and Safety Collaborative Innovation Center, Qingdao 266525, Shandong, China; 3. School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Extended Abstract

Introduction Fiber-Reinforced Cement-based Materials (FRCM) have excellent toughness and impermeability, and have a broad application in the repair of deteriorated concrete structures and the reinforcement of fractured rock mass. The bonding performance between the cement-based material and the substrate is affected by many factors, including the mix ratio of cement-based materials, the saturation of substrates, and the surface roughness of substrates. The initial water content of substrates affects the water exchange between substrates and fresh cement-based repair materials, further affects the water-binder ratio of repair materials, the hydration of cementitious materials and the shrinkage deformation of materials, etc., and ultimately affects the mechanical properties of the interface. Further research is needed on the effect of water saturation of different types of substrates on the interfacial bonding properties between them and FRCM with different mixing ratios. Appropriately increasing the surface roughness of old cement-based materials and rock substrates is an effective method to improve the bonding performance between them and cement-based materials. Compared with ordinary mortar, the content of fly ash and other auxiliary cementitious materials in FRCM is higher, and the toughening effect of fiber is remarkable. The bonding performance between FRCM and mortar substrates with different surface roughness is worthy of further study. Cement-based repair materials are generally poured on the surface of existing substrates, and the impermeability is crucial to the long-term effectiveness of repair and reinforcement. The water transport properties of FRCM bonded with different types of substrates with various initial water content are worthy of further study. In this work, the effects of fiber type,

fly ash content, initial water saturation of substrates, and grooving form of the substrate surface on the interfacial shear strength between FRCM and ordinary cement mortar, concrete, granite, and sandstone were systematically studied through mechanical performance tests. The capillary water absorption properties of FRCM bonded to different types of substrates with different initial water saturations were studied by weighing method.

Methods The dynamic quality monitoring method was used to control the saturation of the substrate to 0%, 50% and 100%, and an angle grinder was used to cut different forms of grooves on the surface of mortar substrates. FRCM was prepared with cement, fly ash, quartz sand, water, superplasticizer and fibers. The fiber types included PVA fiber and basalt fiber, and the fly ash content was 1.2 times and 1.8 times of the cement mass, respectively. After reaching the curing age of 28 d, three specimens were selected for interfacial shear strength test. Three 28 d old bonding composites in each group were subjected to capillary water absorption test.

Results and discussion The increase in the saturation of the mortar substrate was not conducive to its adhesion to basalt or PVA FRCM. It's speculated that the above phenomenon was related to the water exchange between repair materials and substrates. When the substrate was dry, the water in the fresh repair material can carry cement particles to the substrate under the action of capillary suction. The water exchange across the interface was beneficial to the adhesion of repair materials to substrates, and at the same time the decrease of water-binder ratio of the repair material at the interface improved the interfacial shear strength. The increase of fly ash content enhanced the interfacial shear strength between PVA FRCM and substrates, but lead to the decrease of interfacial shear strength between basalt FRCM and substrates. Due to the pozzolanic effect and filling effect of fly ash, the increase of fly ash content in FRCM was conducive to the formation of denser microstructure, which was beneficial to its bonding with substrates. However, the improvement of fly ash on the toughness of cement-based materials can be affected by its synergistic effect with fibers. When the mechanical properties and content of fibers were low, excessive fly ash can lead to the reduction of material toughness. In the case of dry substrates, the increase of the number of grooves on the substrate surface has a more significant effect on the interfacial shear strength between PVA FRCM than that of basalt FRCM, which may be related to the excellent mechanical properties of PVA FRCM.

The increase of fly ash content can significantly improve the capillary water absorption properties of basalt or PVA FRCM bonded to mortar substrates, while the change of substrate saturation has insignificant effect on the capillary water absorption properties of basalt FRCM bonded to mortar substrates. When the mass ratio of fly ash to cement in the repair material was 1.2 and the substrate saturation was 0%, 50% and 100%, the capillary water absorption coefficient of basalt FRCM was significantly lower than that of PVA FRCM, which may be related to the higher porosity of PVA fiber.

Conclusions The interfacial shear strength between PVA and mortar substrates, or basalt FRCM and mortar substrates decreased with the increase of substrates saturation. When the saturation of mortar substrates was constant, the increase of fly ash content enhanced the interfacial shear strength between PVA FRCM and substrates, but reduced the interfacial shear strength between basalt FRCM and substrates. The more the number of grooves on the substrate surface, the higher the interfacial shear strength between it and PVA or basalt FRCM. This phenomenon was more obvious for PVA FRCM. The effect of the grooves on the surface of dry substrates on the improvement of the interfacial shear strength between dry substrates and the basalt or PVA FRCM was more obvious than that of saturated substrate. The interfacial shear strength between PVA FRCM and concrete and sandstone substrates decreased with the increase of substrates saturation. When the substrates were dry, the interfacial shear strength between PVA FRCM and concrete was higher than that of mortar, sandstone and granite. When the substrates were partially saturated, the interfacial shear strength between PVA FRCM and concrete and mortar was equivalent or higher than that of sandstone. When the substrates were saturated, the interfacial shear strength between PVA FRCM and mortar was higher than that of concrete and sandstone. The capillary water absorption coefficient of FRCM bonded to dry mortar, concrete and sandstone substrates was generally lower than that of the same type of FRCM bonded to pre-wetted substrates. There was no significant difference in the capillary water absorption coefficient between PVA FRCM with the same mix ratio bonded to different types of substrates. The increase of fly ash content can significantly increase the capillary water absorption coefficient of FRCM bonded to substrates. When the content of fly ash was low, the capillary water absorption coefficient of PVA FRCM was significantly higher than that of basalt FRCM bonded to mortar substrate with same saturation.

Keywords fiber-reinforced cement-based materials; interface shear strength; saturation; cutting grooves on the surface; capillary water absorption properties