

新拌修补砂浆与基体水分交换行为及其对复合体性能的影响

郭 旗¹, 薛善彬¹, 荆峰杰¹, 张 鹏^{1,2}, 曲新鹏¹

(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)

摘 要: 在基体上浇筑新拌砂浆是常见的修补与加固措施。当新拌砂浆与基体含水状态差异较大时, 会发生水分交换改变修补砂浆配合比, 并影响修补砂浆水化进程、微观特征、渗透性以及修补材料与基体间的粘结性能。对此, 利用称重法研究了新拌普通砂浆、应变硬化水泥基复合材料(SHCC)与不同初始含水饱和度旧砂浆基体(0%、30%、70%和 100%)粘结时的水分交换过程, 分析了修补砂浆类型和基体初始含水饱和度对水分交换速度、修补砂浆最终水胶比等的影响。通过力学试验、低场核磁共振技术和称重法进一步研究了水分交换对标准养护后修补砂浆与基体粘结强度、修补砂浆微结构和吸水性能的影响规律。结果表明: 在水分交换早期, 非饱和基体单位面积吸水质量与时间平方根存在良好的线性关系。基体含水饱和度为 0 时, SHCC 或普通砂浆与基体间的界面剪切强度最高。SHCC 作为修补材料与基体间的界面剪切强度普遍大于普通砂浆。随着基体饱和度的增大, 普通砂浆的孔隙率、小孔体积分数、毛细吸水系数逐渐增大, 中孔和大空隙的体积分数逐渐减小。随着基体饱和度的增大, SHCC 孔隙率、中孔和大空隙的体积分数逐渐减小, 小孔体积分数和毛细吸水系数变化幅度较小。

关键词: 修补砂浆; 水分交换; 粘结强度; 微观结构; 毛细吸水

中图分类号: TU528 文献标志码: A 文章编号: 0454-5648(2023)05-1115-11

网络出版时间: 2023-03-29



Moisture Exchange Between Fresh Repair Mortar and Old Mortar and Its Effect on Performance of Composite

GUO Qi¹, XUE Shanbin¹, JING Fengjie¹, ZHANG Peng^{1,2}, QU Xinpeng¹

(1. College of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266525, Shandong, China; 2. Cooperative Innovation Center of Engineering Construction and Safety in Shandong Blue Economic Zone, Qingdao University of Technology, Qingdao 266525, Shandong, China)

Abstract: Pouring fresh mortar on the substrate is a common repair and reinforcement measure. The water exchange occurs when the moisture degree of the new mortar and the old mortar is different, thus changing the mixing ratio of the repair material, and affecting the hydration process, microscopic characteristics, permeability and bonding performance between the repair material and the old mortar. In this paper, the water exchange process among fresh ordinary mortar, strain hardening cementitious composites (SHCC), and old mortar with different moisture degrees (i.e., 0%, 30%, 70% and 100%) was investigated by a weighing method. The influences of the type of fresh repair mortar and the initial moisture degree of the old mortar on the rate of water exchange and the final water-binder ratio of the repair mortar were analyzed. The effect of the water exchange on the bond strength between the repair mortar and the old mortar, the microstructure of the repair mortar and the water absorption properties was investigated via the mechanical tests, low field nuclear magnetic resonance and weighing method. The results show that there is a good linear relationship between the mass of water absorbed per unit area of the unsaturated matrix and the square root of time in the early stage of water exchange. The shear strength between SHCC or ordinary mortar and substrate is maximum at 0% moisture degree of the substrate. The shear strength between SHCC as a repair material and the substrate is greater than that of ordinary mortar. The porosity, micropores volume fraction and capillary absorption coefficient of ordinary mortar gradually increase and the volume fraction of mesopores and large voids gradually decrease as the moisture of old mortar increases. The volume fraction of SHCC porosity, mesopores and large voids gradually decrease as the moisture degree of old mortar increases, and the volume fraction of micropores and capillary absorption coefficient change slightly.

收稿日期: 2022-07-26。 修订日期: 2022-08-20。

基金项目: 国家自然科学基金(U2106220, 52008222, 51922052); 国家重点研发计划项目(2021YFB2600704); 山东省杰出青年基金(ZR2021JQ17)。

第一作者: 郭 旗(1997—), 男, 硕士研究生。

通信作者: 张 鹏(1981—), 男, 博士, 教授。

Received date: 2022-07-26.

Revised date: 2022-08-20.

First author: GUO Qi (1997—), male, Master candidate.

E-mail: gq15174908114@163.com

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

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

Keywords: repair mortar; water exchange; bond strength; microstructure; capillary water preoccupation

在荷载、温湿度交替等因素作用下,水泥基材料难免出现劣化,影响结构安全和使用寿命,对劣化混凝土结构的修补和加固是土木工程领域的重点工作之一^[1-3]。在水泥基材料表面涂抹或浇筑修补砂浆是混凝土结构常用的修补和加固手段。基体与修补材料间的粘结性能是评价修补效果的重要指标之一。在海洋等严酷环境下,干湿交替和有害离子侵蚀可加速混凝土劣化^[4]。对于修补后的混凝土结构,侵蚀性离子伴随水分可通过修补材料传输至粘结界面,在外部温湿度变化的情况下产生冻融、盐类结晶等现象,破坏界面微结构,从而影响修补的长效性。因而,修补材料的抗渗性同样是评价修补效果的重要指标^[5]。

修补材料与旧水泥基材料基体间的粘结性能受诸多因素的影响,包括修补材料组分和配合比、基体表面粗糙度、基体初始含水状态等^[6-8]。目前关于基体初始含水状态对界面粘结性能的影响规律尚未有较为统一的研究结论。Zhou 等^[9]通过直接拉伸试验研究了水泥净浆与混凝土基体间的粘结性能并发现:当基体初始含水率较低时,界面粘结强度更高。Varga 等^[10]通过拉拔试验研究了水泥砂浆与混凝土基体的粘结性能,结合界面区背散射电镜图像发现:基体初始含水率较高时,修补材料水化程度更高,界面区的孔隙率更低,界面抗拉强度更高。Bentz 等^[11]研究了基体含水状态对新旧混凝土粘结强度的影响,通过开展直接拉伸试验和斜面剪切试验发现:基体初始含水率较高时,界面抗拉强度更高,但界面抗剪强度更低;并通过分析中子与 X 射线图像发现:水泥颗粒伴随水分从修补材料向界面处的迁移导致界面区更为致密是造成上述现象的主要原因。

新拌修补材料与基体间的水分交换行为会改变修补材料水胶比,并影响修补材料水化进程、微结构特征及其与基体的粘结性能^[12-14],研究水分交换对粘结强度和修补材料抗渗性的影响规律是提高混凝土结构修补效果的关键。不同种类修补材料保水性能存在差异,应变硬化水泥基复合材料(SHCC)与不同含水状态基体的水分交换行为及其对界面粘结性能、其自身微结构和渗透性的影响规律仍值得进一步研究。

针对上述问题,本工作利用称重法、直接剪切试验和劈裂拉伸试验分别研究了旧砂浆基体初始含水饱和度、修补材料类型对修补材料与基体间水分

交换行为和界面粘结强度的影响。借助低场核磁共振技术和称重法研究了修补材料微结构和吸水特征,为混凝土结构补强和加固方案设计提供一定的理论支撑。

1 实验

1.1 样品制备

1.1.1 原材料及配合比 水泥为山东山水集团有限公司生产的 P·O 42.5 水泥;粉煤灰为河南铂润材料有限公司生产的 I 级粉煤灰,主要化学成分见表 1。骨料:粒径小于 4.75 mm 且细度模数为 2.86 的河砂与粒径为 0.1~0.2 mm 的石英砂(河砂为青岛大沽河的天然河砂,石英砂为宁夏泰峰环保材料有限公司生产的高纯石英砂),普通砂浆基体与普通修补砂浆均采用天然河砂,SHCC 采用石英砂。聚乙烯醇纤维(PVA, kuralon K-II fiber RECS15×12),纤维长度为 12 mm,直径为 39 μm,拉伸强度为 1 482 MPa。减水剂为江苏苏博特新材料股份有限公司生产的聚羧酸高效减水剂,减水率为 30%,固体质量分数为 50%。

表 1 水泥和粉煤灰的化学组成

Table 1 Chemical composition of cement and fly ash w/%

Material	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃	MgO	Others
Cement	57.5	22.9	7.4	3.1	1.5	4.1	3.5
Fly ash	8.1	52.0	28.7	4.5	1.1	1.2	4.4

w is mass fraction.

基体和普通修补砂浆的灰砂比为 1.0:2.7,水胶比为 0.6,不添加其它掺合料和外加剂。SHCC 的水胶比为 0.25,水泥、粉煤灰和石英砂的质量比为 1.0:1.2:1.0,减水剂按照水泥质量 0.8%与水拌合使用,纤维体积掺量为 1.5%。

1.1.2 基体制备 将水泥和砂子分别倒入搅拌锅中干拌 120 s,再将水倒入搅拌锅中搅拌 120 s,停止搅拌后将拌合物倒入 70.7 mm×70.7 mm×70.7 mm 模具中并在振动台上振捣 30 s。为防止拌合物失水,用保鲜膜将其覆盖。将试样和模具在 20 ℃环境中静置 24 h 后拆模,并将成型试块放入温度为(20±2) ℃、相对湿度大于等于 95%的标准养护室中养护 10 个月。

将养护至龄期的部分旧砂浆切割成 30 mm×30 mm×30 mm 的立方体,筛选出吸水性接近的试块,作为水分交换试验中的基体。将另一部分旧砂浆切割成 70.7 mm×70.7 mm×35 mm 的长方体样品作为力学试验和微观试验的基体。上述基体准备完

成后, 制备不同含水饱和度的基体。为了使基体充分干燥, 将基体置于 105 °C 进行烘干处理。值得注意的是, 105 °C 烘干处理可能会造成样品微结构发生一定改变^[15], 从而影响修补砂浆与基体间的粘结强度。首先, 将所有基体置于 105 °C 烘箱中进行干燥 48 h 直至恒重, 进一步获得: 1) 目标饱和度为 0 的基体 (105 °C 干燥后); 2) 目标饱和度为 100% 的基体 (待基体干燥冷却后, 再将其重新浸入水中约 48 h, 直至恒重); 3) 目标饱和度为 30% 和 70% 的基体, 首先记录 105 °C 干燥后基体的质量 m_d , 将其室温冷却后浸水至恒重, 并记录砂浆的饱和质量 m_w 。根据公式(1)可计算出该基体目标饱和度所对应的质量 m_i , 再次将基体放入 105 °C 烘箱中进行干燥, 使基体达到目标饱和度所对应的质量 m_i (30% 饱和度砂浆再次烘干时长为 8~9 h, 70% 饱和度砂浆再次烘干时长约 3 h)。最后将所有基体密封并置于室内储存。

$$S = \frac{m_i - m_d}{m_w - m_d} \times 100\% \quad (1)$$

式中: S 为基体的饱和度(%); m_w 为基体饱和质量(g); m_d 为基体干燥质量(g); m_i 为基体目标饱和度所对应的质量(g)。

1.1.3 复合体制备 将不同含水饱和度的砂浆基体放入 70.7 mm×70.7 mm×70.7 mm 的立方体模具中, 将新拌修补材料倒入模具的另一半, 振捣约 30 s 后覆盖保鲜膜, 在 20 °C 的环境中静置 24 h 后拆模。将成型复合体放入温度为 (20±2) °C, 相对湿度大于等于 95% 的标准养护室中养护 28 d。普通修补砂浆的拌合过程与砂浆基体相同, SHCC 的拌合过程如下: 1) 将水泥、粉煤灰和石英砂加入搅拌机, 搅拌 3 min; 2) 将水、减水剂加入搅拌机, 搅拌 5 min; 3) 加入 PVA 纤维, 搅拌 3 min, 保证混合均匀。

1.2 水分交换试验

利用称重法研究基体与新拌修补材料间水分交换过程。将 2 种新拌修补砂浆分别倒入预先准备好的硅胶模中并适当振捣, 再将基体试块轻放在修补砂浆上, 最后在不同时间点取下平行试验中的某个基体试块称其质量变化。为防止基体试块中水分蒸发对试验结果造成影响, 试验期间用塑料薄膜包裹整个硅胶试模。

通过基体吸水质量计算修补材料中水分流失的质量占其初始水分总质量的百分数(失水百分比)和剩余水分质量与胶凝材料质量的比值(最终水胶比)。

1.3 力学性能测试

采用直接剪切试验和劈裂拉伸试验测试基体与

修补材料间的粘结强度, 试件受力示意图如图 1 所示^[16-18]。

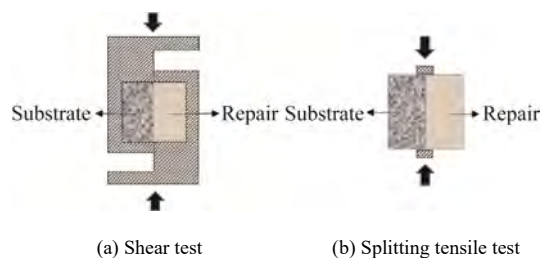


图 1 试件示意图

Fig. 1 Schematic representation of specimens

直接剪切试验的加载速度为 2.5 kN/s; 劈裂拉伸试验的加载速度为 0.08 MPa/s。根据式(2)可计算界面剪切强度; 根据式(3)可计算界面劈裂拉伸强度。每组 3 个试件, 以平均值作为测试结果。

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

式中: τ 为界面剪切强度(MPa); P 为最大施加载荷(N); A 为粘结界面面积(mm²)。

$$T = \frac{2P}{\pi A} \quad (3)$$

式中: T 为界面劈裂拉伸强度(MPa)。

经测试, 旧砂浆基体的抗压强度为 40.23 MPa, 剪切强度为 4.07 MPa, 劈裂拉伸强度为 2.31 MPa。对 28 d 龄期修补材料进行抗压试验, 普通砂浆的抗压强度为 32.74 MPa, SHCC 的抗压强度为 53.30 MPa。

1.4 微观结构试验

基体的含水状态可通过影响修补材料与基体的水分交换过程, 进一步影响修补材料硬化后的微观结构。低场核磁共振具有无损检测饱水后材料孔径分布特征的能力^[19-21]。本次试验采用低场核磁共振技术表征修补材料的微观结构, 在龄期为 28 d 的粘结复合体上切割核磁试验的样品。

将切割好的样品在 45 °C 烘箱中烘干至恒重 m_1 。利用真空饱水仪对样品饱水 12 h, 并记录饱和质量 m_2 , 利用排水法得到样品体积 V 。根据公式(4)得到修补材料的孔隙率。将饱水修补材料样品放入核磁共振仪中, 得到横向弛豫时间曲线。核磁试验参数如表 2 所示。

$$p = \frac{m_2 - m_1}{\rho_w V} \times 100\% \quad (4)$$

式中: p 表示试样的孔隙率(%); m 表示试样的质量(g); ρ_w 表示水的密度(g·cm⁻³); V 表示试样体积(mL)。

表 2 低场核磁共振(LF-NMR)测试参数
Table 2 Testing parameters of the LF-NMR measurement

Magnetic field intensity/MHz	Numbers of scans	Number of echo	Echo time/ μ s	Waiting time/ms
6.825	256	16 000	100	4000

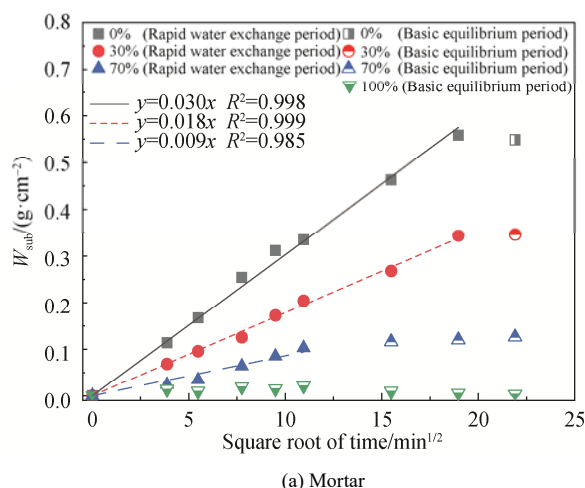
1.5 毛细吸水试验

利用微观试验的样品进行毛细吸水试验。将修补材料置于 45 °C 烘箱中烘至恒重,再用铝箔胶带密封试件四周。在吸水过程中,保持液面高出试件底面 2~3 mm,间隔一定时间测定试件吸水质量。

采用毛细吸水系数评估修补材料吸水性能,在不考虑重力影响的情况下,水泥基材料单位面积毛细吸水质量与时间平方根呈线性关系^[22],如公式(5)所示:

$$\Delta W = A\sqrt{t} \quad (5)$$

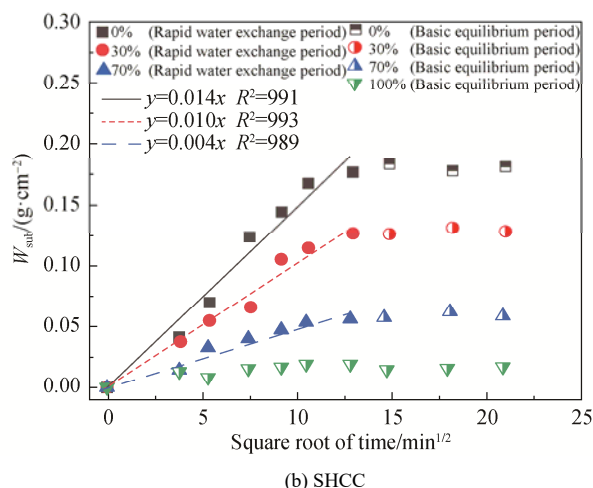
式中: ΔW 为试件单位面积毛细吸水质量($\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$); A 为毛细吸水性系数($\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{min}^{-1/2}$); t 为吸水时间(min)。



2 结果和讨论

2.1 水分交换试验结果分析

利用称重法监测不同初始含水饱和度基体与新拌修补材料水分交换过程,得到基体单位面积吸水质量(W_{sub} , g/cm^2)随时间平方根的变化数据如图 2 所示。其中,图 2a 和图 2b 对应的修补材料分别为普通砂浆与 SHCC。根据试验数据,将水分交换过程分为快速交换期与基本平衡期,在图中分别以实心符号与半实心符号表示。利用线性函数对快速交换期的数据进行拟合,发现基体单位面积吸水质量与时间平方根存在良好的线性关系,定义该线性函数的斜率为水分转移系数,用于评价基体与修补材料间早期水分交换速度。



SHCC is strain hardening cement-based composites; y is water transfer; x : square root of time; R^2 is goodness of fit; W_{sub} is water transfer

图 2 不同含水饱和度砂浆与修补材料水分交换图

Fig. 2 Water absorption of mortar with different moisture degree

水分在毛细管压力驱动下在基体与新拌修补材料间进行流动,由毛细管负压低的部分向毛细管负压高的部分传输,而毛细管压力又是含水率的函数。随着基体不断的吸水,其含水率逐渐增大,毛细管负压逐渐减小;对于新拌修补材料来说,随着修补材料的水化耗水和水分流失,其含水率逐渐减小,毛细管负压逐渐增大。当修补材料毛细管负压与基体相近时,水分交换进入基本平衡期。

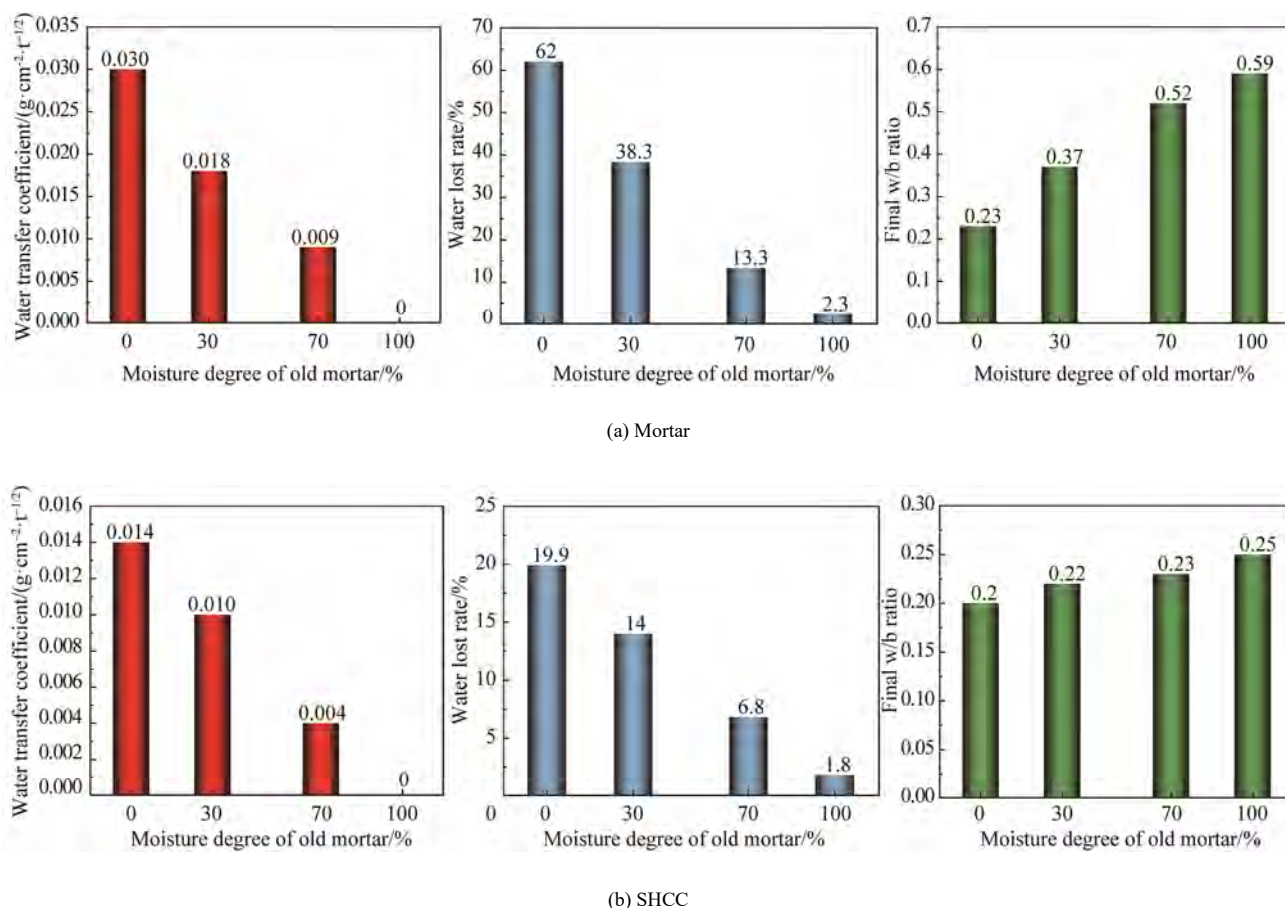
当普通砂浆作为修补材料,其与基体水分交换数据如图 3a 所示。由图 2a 和图 3a 可见,基体含水

饱和度为 0 时,水分转移系数为 $0.03 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{min}^{-1/2}$,水分快速交换期时间为 6 h,失水百分比为 62%,最终水胶比为 0.23。当基体含水饱和度增为 30% 时,普通砂浆的水分转移系数减小为 $0.018 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{min}^{-1/2}$,但水分快速交换期时间仍为 6 h,失水百分比为 38.3%,最终水胶比为 0.37,此时新旧砂浆间的水分交换现象仍较为明显。当基体含水饱和度为 70% 时,水分转移系数减小为 $0.009 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{min}^{-1/2}$,水分快速交换期时长缩短为 2 h,失水百分比降至 13.3%,最终水胶比升至 0.52,可见较高的基体含水

饱和度可有效减少新拌砂浆中的水分流失。当基体含水饱和度为 100% 时, 基体砂浆质量变化较小, 即新拌普通砂浆几乎不与基体发生水分快速交换。

由图 2b 可见, 当修补材料为 SHCC, 基体含水饱和度为 0%、30% 和 70% 时, 水分快速交换期时长差别较小 (~3 h)。由图 3b 可见, 基体含水饱和度为 0% 时, 水分转移系数为 $0.014 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{min}^{-1/2}$, 失

水百分比为 19.9%, 最终水胶比为 0.20。相较于基体含水饱和度为 0% 的试件, 基体含水饱和度为 30% 和 70% 时, SHCC 的水分转移系数分别减小 28.6% 和 71.4%, 失水百分比分别减小 29.6% 和 65.8%, 而最终水胶比分别增加 10% 和 15%。当基体含水饱和度为 100% 时, 新拌 SHCC 几乎不与基体发生水分快速交换。



w/b ratio is water-binder ratio.

图 3 不同含水饱和度基体砂浆与新拌修补材料水分交换信息

Fig. 3 Information of water exchange between old mortar with different water saturation and fresh repairs material

总体上, 对于同一种修补材料来说, 基体含水饱和度越低, 修补材料失水越快, 失水量越大。这是因为基体含水率越低, 其毛细管负压越大, 水分向基体传输的速度也就越快。基体含水率越低, 其与修补材料达到毛细管压力平衡时的需水量就越大, 因此水分转移的量也就越多。同时, 修补材料种类也显著影响其与基体间的水分交换行为。如当初水胶比为 0.6 的普通砂浆作为修补材料, 基体初始含水饱和度为 30%、70% 和 100% 时, 新拌砂浆最终水胶比分别是基体含水饱和度为 0 时的 1.6、2.3、2.6

倍。当初水胶比为 0.25 的 SHCC 作为修补材料时, 即使基体初始含水饱和度以上述规律变化, 最终水胶比变化也未超过初始水胶比的 25%。上述现象与修补材料的保水性密切相关, 而保水性与材料初始水胶比、粉煤灰和纤维的掺入均密切相关^[23]。

2.2 修补材料与基体粘结性能

不同种类修补材料和基体界面粘结强度如图 4 所示。图 4a 为直接剪切试验结果, 图 4b 为劈裂拉伸试验结果。作为参考, 图中以虚线的形式分别表示出基体的剪切强度和劈裂拉伸强度。

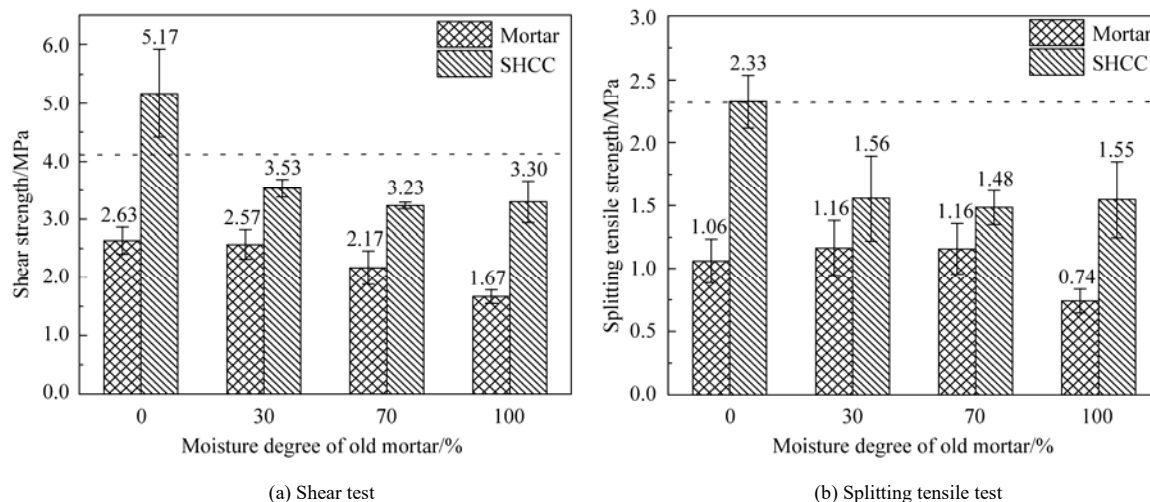


图4 界面粘结强度

Fig. 4 Results of bond strength

由直接剪切试验结果可知,当普通砂浆作为修补材料,基体含水饱和度为0%时,界面剪切强度为2.63 MPa,当基体含水饱和度增至30%、70%和100%时,界面剪切强度分别减小2.3%、17.5%和36.5%。当SHCC作为修补材料,基体含水饱和度为0%时,界面剪切强度为5.17 MPa,大于基体的抗剪强度4.07 MPa,此时修补材料与基体的界面粘结效果好,破坏出现在基体内部。当基体含水饱和度由0%增大到30%,SHCC与基体的粘结强度由5.17 MPa减小到3.53 MPa,减小了31.7%,变化幅度较大。相较于基体含水饱和度为30%的试件,基体含水饱和度为70%和100%时,界面剪切强度分别减小8.5%和6.5%,变化幅度较小。基体含水饱和度较低时,修补材料与基体的界面抗剪强度更高。当基体含水饱和度较低时,基体从新拌修补材料中吸收水分,降低了修补材料的水胶比,并且新拌修补材料中部分水泥颗粒可能会伴随水分交换向界面移动,造成粘结界面处的微观结构更加致密^[11]。

SHCC与基体的粘结抗剪强度约比砂浆高1.4~2.0倍,SHCC的水胶比较砂浆低,并且粉煤灰具有火山灰活性,其水化后微结构更加致密。此外,纤维可抑制SHCC的收缩,减小修补材料与基体的差异性收缩,有助于界面抗剪强度的提高^[24-25]。

由劈裂拉伸试验结果可知,当基体含水饱和度在0~70%时,砂浆与基体的界面抗拉强度变化幅度在1.06~1.16 MPa,大于含水饱和度为100%时的0.74 MPa。当基体含水饱和度在30%~100%时,SHCC与基体的界面抗拉强度在1.48~1.56 MPa范围内变化,小于含水饱和度为0%时的2.33 MPa。基

体含水饱和度为0%时,SHCC与基体间的劈裂拉伸强度略大于基体自身的抗拉强度2.31 MPa。SHCC与基体的粘结抗拉强度约比砂浆作为修补材料时高1.3~2.2倍。基体含水饱和度较低时,修补材料与基体的粘结抗拉强度更高。已有研究成果表明^[12],修补砂浆浇筑于饱和基体的0~4 h内,靠近界面处的砂浆含水率增大,28 d标准养护后,修补砂浆与基体的粘结界面处存在不连续情况。

2.3 修补材料微结构特征

修补材料的孔隙率如图5所示。图5a中标记为“Mortar”与图5b中标记为“SHCC”的数据来自未与基体粘结的修补材料对照组。当砂浆作为修补材料,基体含水饱和度为0%时,孔隙率为0.152。当基体含水饱和度增至30%、70%和100%时,普通砂浆孔隙率分别增加12.5%、22.4%和29.6%。当SHCC作为修补材料,基体含水饱和度为0%时,孔隙率为0.104。当基体含水饱和度增至30%、70%和100%时,SHCC孔隙率分别减小4.8%、7.7%和11.5%,总体变化幅度较小。基体含水饱和度为100%时,与基体粘结的2种修补材料的孔隙率均与对照组相近。

水泥基材料孔隙率受水胶比的影响^[26]。图6为不同种类修补材料最终水胶比和孔隙率之间的关系。从图6可以看出,当普通砂浆作为修补材料时,基体含水饱和度越小,修补材料的最终水胶比越低,孔隙率也越低。Zhou等^[9]也得到了相似的结果:当基体干燥时,水泥净浆失水会导致其更低的孔隙率。较高水胶比的水泥浆材料在水化结束后会有部分水化未消耗的水分存在材料中,并最终形成孔隙。

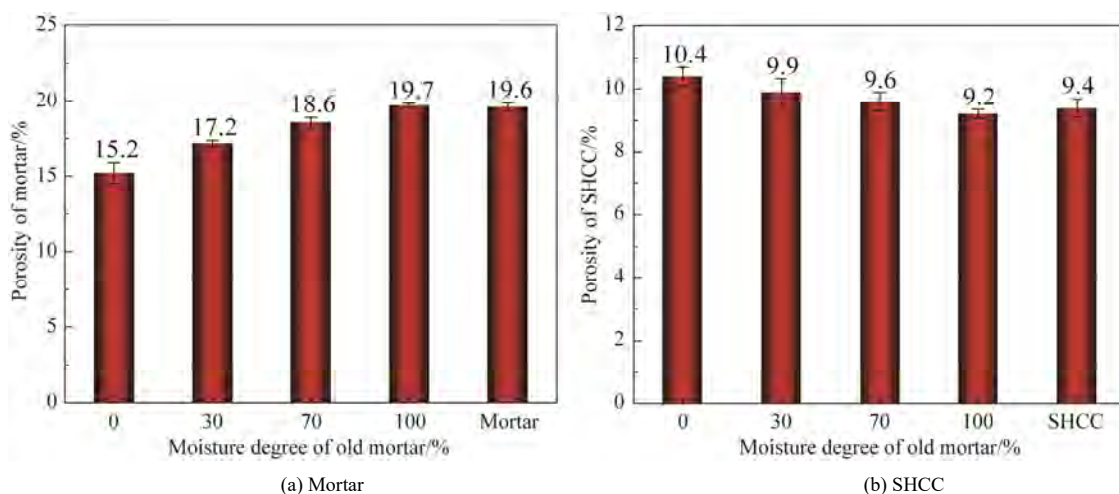


图 5 修补材料的孔隙率

Fig. 5 Porosity of repair materials

当 SHCC 作为修补材料时, 基体含水饱和度越小, 修补材料最终水胶比也越小, 但孔隙率反而增大。由于 SHCC 初始水胶比较小, 仅为 0.25, 失水可导致材料内部出现较多的收缩裂纹, 孔隙率升高。此外, SHCC 中的粉煤灰具有火山灰活性, 当基体含水饱和度较高时, 充分水化的 SHCC 将为二次水化提供足量的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$, 这也促进了二次水化产物对孔

隙的填充^[27-28], SHCC 失水会增大其孔隙率^[29]。由图 4a 可见, 基体饱和度为 0% 时, 粘结强度最大, 正如前文所述, 邻近界面处的 SHCC 由于水分交换可能会被压实, 其与基体砂浆的粘结强度也更大。

因此, 与基体相粘结的 SHCC 硬化后的孔隙率与基体初始含水饱和度呈正相关, 而与基体粘结的普通砂浆则相反。

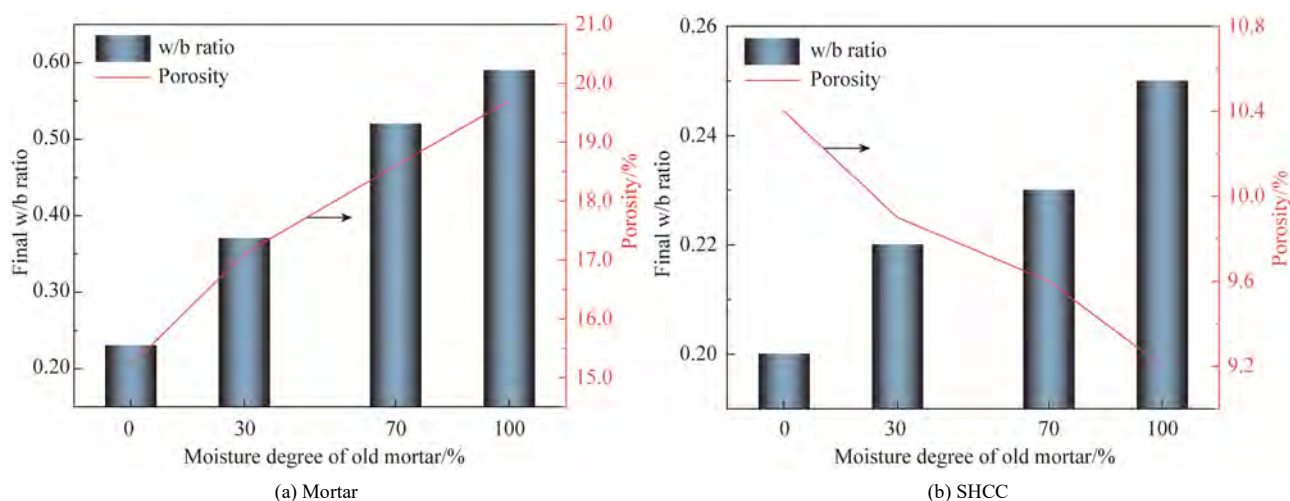


图 6 旧砂浆初始含水率对最终水胶比与孔隙率的影响

Fig. 6 Effect of initial moisture degree of old mortar on final water-binder ratio and porosity

为了进一步研究基体含水饱和度对修补材料微观结构的影响, 利用核磁共振技术得到硬化修补材料经饱水后的 T_2 谱分布曲线如图 7 所示。低场核磁共振试验可通过饱水多孔介质横向弛豫时间分布特征表征其孔径分布^[30-31]。图 7 中 T_2 谱包含 3 个主峰, 根据 3 个主峰波谷所对应的弛豫时间, 将修补材料的孔隙分为 3 类: 1) T_2 值在 0~30 ms 时, 其对应的孔为小孔; 2) T_2 值在 30~300 ms 时, 其对应的孔为中孔; 3)

T_2 值在 300~1000 ms 时, 其对应为大空隙。由图 7 可见, 与不同饱和度基体粘结的修补材料在第 3 个主峰处有明显的不同, 对比未参与粘结的对照组可知, 第 3 个主峰由水分交换造成。因此, 判断大空隙可能为修补材料因失水而形成的收缩裂纹。此外, 修补材料和对照组的第 1 个主峰峰貌相似, 所对应的弛豫时间相同, 因此可判断小孔主要为毛细孔。根据 T_2 谱曲线分布计算不同类型孔隙体积占

比可基本实现水分交换对修补材料孔隙特征影响的研究。目前文献中提出的快交换模型、表面弛豫率测定方法为基于样品 T_2 谱曲线对样品真实孔

径进行估算提供了重要参考^[32]。根据此方法,测试修补材料表面弛豫率进而对其等效孔径进行估算的工作值得进一步开展。

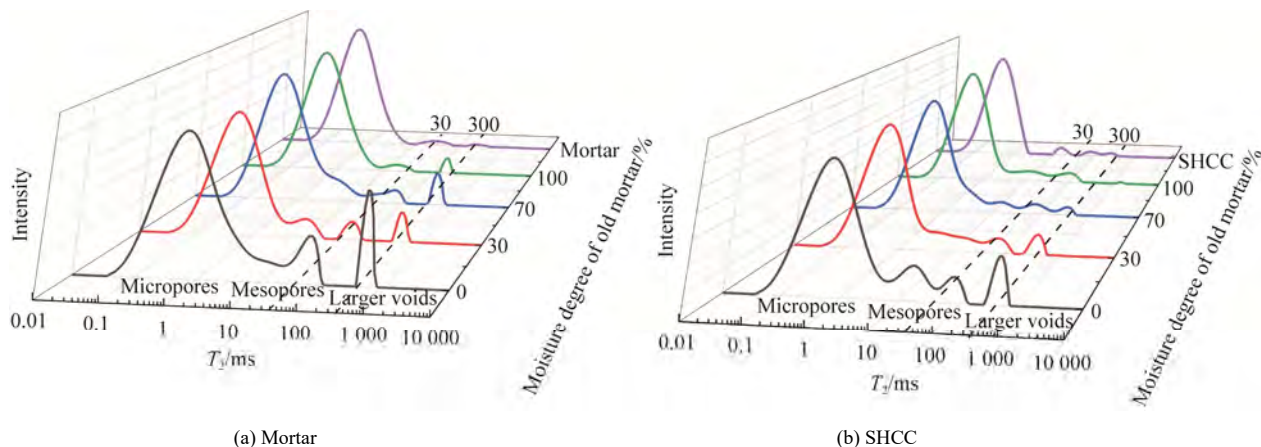


图 7 修补材料的 T_2 分布曲线
Fig. 7 T_2 spectrum of repair materials

根据图 5 和图 7 可得到修补材料中不同类型空隙体积分数如图 8 所示。当普通砂浆作为修补材料, 基体含水饱和度为 0 时, 小孔体积分数为 0.129, 大空隙体积分数为 0.012。相较于基体含水饱和度为 0 的试件, 基体含水饱和度为 30%、70%和 100%时, 普通砂浆的小孔体积分分别增大 24%、34.1%和 49.6%; 而大空隙体积分分别减小 50%、41.7%和 100%。总体而言, 当基体含水饱和度增大时, 失水百分比降低, 修补材料大空隙和中孔的占比减小。修补材料水分流失越多, 中孔和大孔占比就越大, 这可能是修补材料收缩

开裂造成的。

当 SHCC 作为修补材料, 基体含水饱和度为 0% 时, 大空隙体积分数为 0.006。相较于基体含水饱和度为 0 的试件, 基体含水饱和度为 30%、70%和 100% 时, SHCC 的大空隙体积分分别减小 66.7%、83.3% 和 100%。SHCC 小孔体积分受基体含水饱和度的影响并不显著。此外, SHCC 的小孔体积分和大空隙体积分均小于砂浆, 如前所述, SHCC 的低水胶比以及粉煤灰的二次水化产物的填充作用会减少小孔体积, 而纤维可以抑制收缩产生的微裂纹从而减少大孔隙体积分。

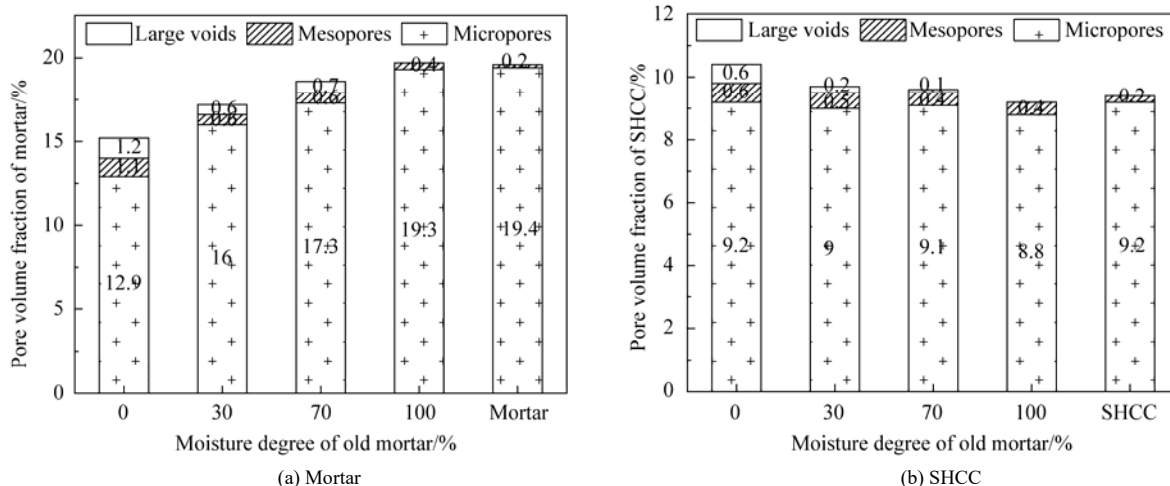


图 8 修补材料的孔隙体积分
Fig. 8 Pore volume fraction of repair materials

2.4 修补材料毛细吸水性能

利用称重法得到不同种类修补材料的毛细吸水特征如图 9 所示, 利用线性函数对修补材料毛细吸

水 10 h 内的数据进行拟合。

当普通砂浆作为修补材料, 基体含水饱和度为 0 时, 毛细吸水系数为 $0.0103 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{min}^{-1/2}$ 。相较

于基体含水饱和度为 0 的试件, 基体含水饱和度为 30%、70% 和 100% 时, 普通砂浆的毛细吸水系数分别增大 20.4%、34% 和 49.5%。SHCC 作为修补材料时, 随着基体含水饱和度的改变, 毛细吸水系数变化幅度较小, 即 SHCC 毛细吸水系数受基体含水饱和度影响不显著。总体上, 普通砂浆的毛细吸水系数是 SHCC 的 1.3~1.8 倍。

修补材料的毛细吸水系数与其孔结构密切相关^[33]。图 10 为不同种类修补材料小孔体积分数与毛细吸水系数之间的关系。对于普通砂浆来说, 小孔体积分数越小, 其吸水速度越慢。在与基体的粘结过程中, 修补砂浆中水分的流失减少了硬化后砂浆的小孔体积分数, 继而降低了其吸水速率。当 SHCC 作为修补材料时, 小孔体积分数随基体含水饱和度的变化不明显, 毛细吸水系数的变化也较小。SHCC 的小孔体积分数小于砂浆, 其毛细吸水系数也小于砂浆, 吸水速率较慢, 这更有利于海

洋等严酷环境下修补和加固的长效性。在实际修复工程中, 建议对待修补的混凝土结构进行适当干燥处理, 并在施工条件允许的情况下选择水胶比较低 SHCC 作为修补材料。Xue 等^[13]利用中子成像技术对标准养护后的普通修补砂浆与旧砂浆复合体吸水过程进行了可视化研究, 其中普通修补砂浆底面为吸水面, 试验结果表明: 与含水饱和度为 0 的基体粘结的修补砂浆比与含水饱和度为 100% 的基体粘结的修补砂浆吸水更快, 与本工作中标准养护后的修补材料吸水规律存在差异。这种现象产生的原因是: 在之前研究中, 与不同含水饱和度基体粘结的修补砂浆层较薄, 易出现更多的干缩裂纹, 使其毛细吸水更快。此外, 前述已有研究结论基于中子成像技术对新老砂浆复合体吸水过程中的润湿锋位置进行连续追踪得出^[13]。因此, 基体与修补砂浆的尺寸对修补砂浆毛细吸水和微结构的影响规律及其机理值得利用更多先进技术开展进一步研究。

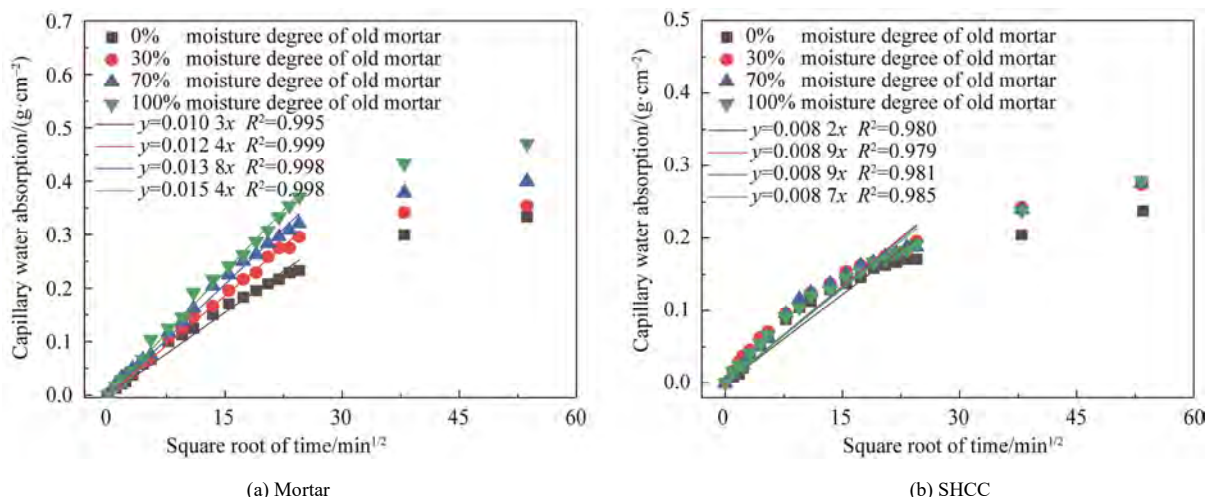


图 9 修补材料的毛细吸水

Fig. 9 Capillary water absorption of repair materials

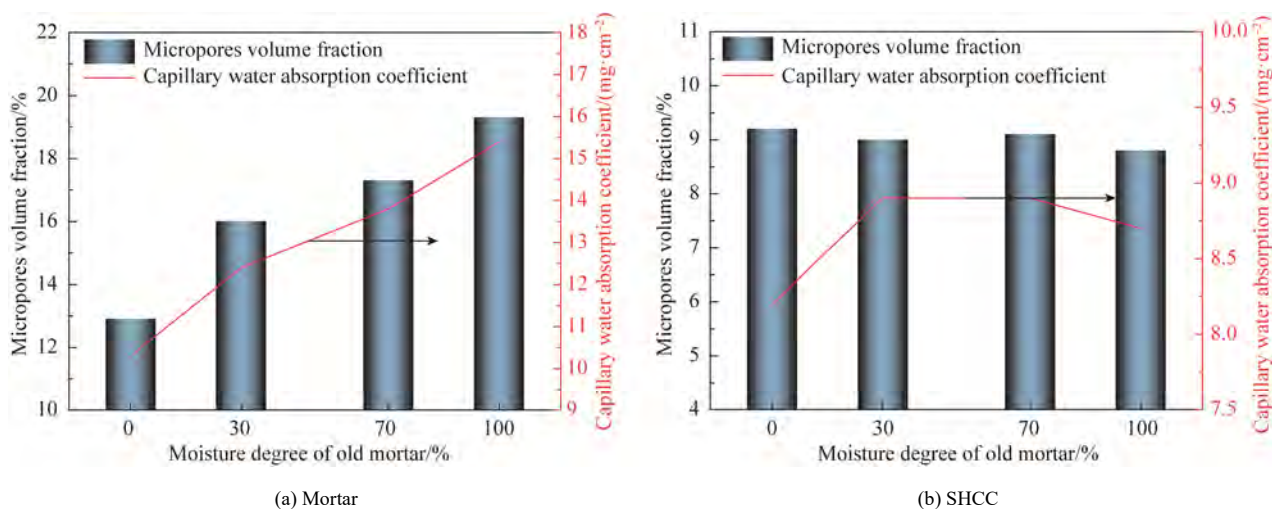


图 10 小孔体积分数和毛细吸水系数的关系

Fig. 10 Relationship between micropores volume fraction and capillary water absorption coefficient

3 结论

本工作研究了水胶比为 0.60 的普通砂浆和水胶比为 0.25 的 SHCC 作为修补材料的情况下, 基体含水率对修补材料与基体粘结时的水分交换过程以及标准养护后的界面粘结强度、修补材料孔隙特征和吸水的影响规律, 得到以下结论:

1) 在水分交换早期, 非饱和基体单位面积吸水质量与时间平方根间存在良好的线性关系。随基体含水饱和度的增大, 修补材料的水分转移系数、失水百分数逐渐减小, 而最终水胶比逐渐增大, 并且普通砂浆与基体水分交换过程受基体含水饱和度的影响更显著。

2) 当普通砂浆作为修补材料, 旧砂浆含水饱和度和按照 0、30%、70%、100% 的顺序变化时, 界面的剪切强度逐渐减小; 旧砂浆含水饱和度按照 30%、70%、0、100% 的顺序变化时, 界面的劈裂拉伸强度逐渐减小。当 SHCC 作为修补材料, 旧砂浆含水饱和度按照 0、30%、100%、70% 的顺序变化时, 界面的剪切强度和劈裂拉伸强度均逐渐减小。

3) 对于普通砂浆来说, 随基体含水饱和度的增大, 孔隙率、小孔体积分数逐渐增大, 中孔和大孔隙的体积分数逐渐减小, 孔隙率与最终水胶比呈正相关关系。对于 SHCC 来说, 随基体含水饱和度的增大, 孔隙率、中孔和大孔隙的体积分数逐渐减小, 小孔体积分数变化幅度较小, 孔隙率与最终水胶比呈负相关关系。

4) 随着基体初始含水饱和度的增大, 与之粘结的普通砂浆的毛细吸水系数逐渐增大, 且与其小孔体积分数呈现良好的正相关性。当 SHCC 作为修补材料时, 毛细吸水系数受基体含水饱和度影响较小, 并且整体低于普通砂浆。

参考文献:

- [1] TIAN Jun, WU Xiaowei, ZHENG Yu, et al. Investigation of damage behaviors of ECC-to-concrete interface and damage prediction model under salt freeze-thaw cycles[J]. Constr Build Mater, 2019, 226(30): 238–249.
- [2] 邢秉元, 程鹏宇, 唐继朋, 等. 冻融循环作用下饱水砂浆孔结构的演变规律[J]. 硅酸盐学报, 2021, 49(2): 331–339.
- [3] XING Binyuan, CHENG Pengyu, TANG Jipeng, et al. J Chin Ceram Soc, 2021, 49(2): 331–339.
- [4] GAO Shulin, ZHAO Xiaochong, QIAO Jinlin, et al. Study on the bonding properties of Engineered Cementitious Composites (ECC) and existing concrete exposed to high temperature[J]. Constr Build Mater, 2019, 196(30): 330–344.
- [5] 陈伟康, 刘清风. 干湿交替下混凝土中水分和多离子耦合传输的数值研究[J]. 水利学报, 2021, 52(5): 622–632.
- [6] CHENG Weikang, LIU Qingfeng. J Hydraul Eng (in Chinese), 2021, 52(5): 622–632.
- [7] BALOCH W L, SIAD H, LACHEMI M. A review on the durability of concrete-to-concrete bond in recent rehabilitated structures[J]. J Build Eng, 2021, 44: 103315.
- [8] 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): 3792–3798.
- [9] MENG Fanqiang, XUE Shanbin, ZHANG Peng, et al. Bull Chin Ceram Soc (in Chinese), 2020, 39(12): 3792–3798.
- [10] FENG Shuo, XIAO Huigang, LI Hui. Comparative studies of the effect of ultrahigh-performance concrete and normal concrete as repair materials on interfacial bond properties and microstructure[J]. Eng Struct, 2020, 222(1): 111122.
- [11] HE Yan, ZHANG Xiong, RD Hooton, et al. Effects of interface roughness and interface adhesion on new-to-old concrete bonding[J]. Constr Build Mater, 2017, 151(1): 582–590.
- [12] ZHOU Jian, YE Guang, VAN BREUGEL K. Cement hydration and microstructure in concrete repairs with cementitious repair materials[J]. Constr Build Mater, 2016, 112(1): 765–772.
- [13] VARGA D I, MUNOZ J F, BENTZ D P, et al. Grout-concrete interface bond performance: effect of interface moisture on the tensile bond strength and grout microstructure[J]. Constr Build Mater, 2018, 170(10): 747–756.
- [14] BENTZ D P, VARGA D I, JOSE 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.
- [15] XUE Shanbin, ZHANG Peng, LEHMANN E H, et al. Neutron radiography of water exchange across the interface between old and fresh mortar[J]. Measurement, 2021, 183: 109882.
- [16] XUE Shanbin, MENG Fanqiang, ZHANG Peng, 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.
- [17] LUKOVIC M, YE G. Effect of moisture exchange on interface formation in the repair system studied by X-ray absorption[J]. Materials, 2016, 9(2): 1–17.
- [18] SNOECK D, VELASCO L F, MIGNON A, et al. The influence of different drying techniques on the water sorption properties of cement-based materials[J]. Cem Concr Compos, 2014, 64: 54–62.
- [19] CRISTINA Z, NORBERT R. Are concrete-concrete bond tests comparable?[J]. Cem Concr Compos, 2019, 99: 80–88.
- [20] FENG Shuo, XIAO Huigang, MA Minglei, et al. Experimental study on bonding behaviour of interface between UHPC and concrete substrate[J]. Constr Build Mater, 2021, 311(13): 125360.
- [21] 郭伟娜, 鲍玖文, 张鹏, 等. 基于数字图像方法的混掺纤维应变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.
- [22] GUO Weina, BAO Jiuwen, ZHANG Peng, et al. J Chin Ceram Soc, 2022, 50(5): 1401–1409.
- [23] SHEN Yanjun, WANG Yongzhi, WEI Xin, et al. Investigation on meso-debonding process of the sandstone-concrete interface induced by freeze-thaw cycles using NMR technology[J]. Constr Build Mater, 2020, 252(20): 118962.
- [24] ZHAO Haitao, XIAO Qin, LIU Jiaping, et al. Pore structure

- characterization of early-age cement pastes blended with high-volume fly ash[J]. *Constr Build Mater*, 2018, 189(20): 934–946.
- [21] 谢恩慧, 周春圣. 利用低场磁共振弛豫测孔技术预测水泥基材料的水分渗透率[J]. *硅酸盐学报*, 2020, 48(11): 1808–1816.
XIE Enhui, ZHOU Chunsheng. *J Chin Ceram Soc*, 2020, 48(11): 1808–1816.
- [22] HANŽIČ L, ILIĆ R. Relationship between liquid sorptivity and capillarity in concrete[J]. *Cem Concr Res*, 2003, 33(9): 1385–1388.
- [23] MALAYA C, SREEDEEP S. Critical evaluation of the drying water retention characteristics of a class F indian fly ash[J]. *J Mater Civ Eng*, 2012, 24(4): 451–459.
- [24] ZHOU Jian. Performance of Engineered Cementitious Composites for Concrete Repairs[D]. Delft University of Technology, 2010.
- [25] CRISTINA Z, NEMKUMAR B, GIOVANNI P. A study of some factors affecting bond in cementitious fiber reinforced repairs[J]. *Cem Concr Res*, 2014, 63: 117–126.
- [26] 郑玉飞. 低水胶比复合胶凝材料的水化程度及孔结构研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2018.
ZHENG Yufei. Study on Hydration Degree and Pore structure of Low Water/Binder Ratio Cementitious Composites. (in Chinese, dissertation). Beijing: Beijing Jiaotong University, 2018.
- [27] 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.
- [28] NEDUNURI S, SERTSE S, MUHAMMAD S. Microstructural study of Portland cement partially replaced with fly ash, ground granulated blast furnace slag and silica fume as determined by pozzolanic activity[J]. *Constr Build Mater*, 2020, 238(30): 117561.
- [29] HANS B, BJÖRN H, MARCO T. 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.
- [30] SCRIVENER K, SNELLINGS R, LOTHENBACH B. A Practical Guide to Microstructural Analysis of Cementitious Materials[M]. London: CRC Press, 2016.
- [31] YAO Yanbin, LIU Dameng, CHE Yao, et al. Petrophysical characterization of coals by low-field nuclear magnetic resonance(NMR)[J]. *Fuel*, 2010, 89(7): 1371–1380.
- [32] 杨振丽, 周春圣. 饱水水泥砂浆孔结构的低场磁共振测试分析[J]. *硅酸盐学报*, 2022, 50(5): 1391–1400.
YANG Zhenli, ZHOU Chunsheng. *J Chin Ceram Soc*, 2022, 50(5): 1391–1400.
- [33] ZHANG Jianchao, LIN Chen, DONG Biqin, et al. Inverse modeling deduction of pore distribution in cement materials from capillary absorption features[J]. *Cem Concr Compos*, 2020, 109: 103557.