

# 基于吸水动力学方法的水溶性渗透结晶材料吸收饱和度及养护时间优化研究

李杨<sup>1</sup>, 曹亚<sup>1</sup>, 钟聚光<sup>2</sup>, 周世华<sup>1</sup>, 齐立亮<sup>3</sup>

(1. 长江水利委员会长江科学院材料与结构研究所, 湖北 武汉 430010; 2. 湖南平江抽水蓄能有限公司, 湖南 岳阳 414500; 3. 北京易晟元环保工程有限公司, 北京 100010)

**摘要:**以水利工程中常用的 C25 混凝土为研究对象, 采用吸水动力学方法试验研究了混凝土对水溶性渗透结晶(WCCW)材料的吸收特性, 并分析了 WCCW 材料吸收饱和度及养护时间对混凝土吸水率、吸水动力学参数的影响。结果表明:混凝土对 WCCW 材料的吸收遵循吸水动力学规律, 2 h 内吸收饱和度的增加速度较快, 8 h 的吸收饱和度可达 94%; 随着 WCCW 材料吸收饱和度的增加或养护时间的延长, 混凝土饱和吸水率降低, 而吸水动力学参数  $\alpha$  减小, 参数  $\lambda$  增加。吸水动力学参数与 WCCW 材料吸收饱和度、养护时间之间存在幂函数关系; 优化的 WCCW 材料吸收饱和度为 60% 时经济性较好, 并且混凝土吸收 WCCW 材料 8 h 后可初次养护, 比较合理的养护时间是 7 d, 过短的养护时间难以保证作用效果。

**关键词:**渗透结晶材料; 水溶性; 吸收率; 养护; 吸水动力学

中图分类号: TV431

文献标志码: A

文章编号: 1006-7647(2023)05-0094-06

**Optimization of absorption saturation degree and curing period of water-soluble infiltration capillary/crystalline waterproof material based on water absorption kinetic method//LI Yang<sup>1</sup>, CAO Ya<sup>1</sup>, ZHONG Juguang<sup>2</sup>, ZHOU Shihua<sup>1</sup>, QI Liliang<sup>3</sup> (1. Institute of Materials and Structure, Changjiang River Scientific Research Institute of Changjiang Water Resources Commission, Wuhan 430010, China; 2. Hunan Pingjiang Pumped Storage Power Station Co., Ltd., Yueyang 414500, China; 3. Beijing Yishengyuan Environmental Engineering Co., Ltd., Beijing 100010, China)**

**Abstract:** The commonly used C25 concrete was selected as the research object and the water absorption kinetic method was employed to investigate the absorption characteristics of concrete to the water-soluble infiltration capillary/crystalline waterproof (WCCW) material. Moreover, the influences of absorption saturation degree and curing period on water absorption rate and water absorption kinetic parameters were examined. The results reveal that absorption process of concrete to WCCW material conforms to the water absorption law, in which the absorption saturation degree increases rapidly during the initial 2 h, and it can reach 94% after immersion for 8 h. With the rising of absorption saturation degree and elapse of curing periods, the saturated water absorption rate decreases, while the water adsorption kinetics parameter  $\alpha$  reduces and  $\lambda$  increases. Power law relationship exists between absorption saturation degree of WCCW material and water absorption kinetic parameters or the curing period. The economical absorption saturation degree after optimization is 60%. Concrete needs to be cured after absorbing WCCW material for 8 h. A more reasonable curing period is 7 d and shorter curing period is doubtful to the final quality.

**Key words:** infiltration crystalline material; water-soluble; absorption rate; curing; water absorption kinetics

混凝土表面开裂和孔结构劣化是构筑物出现耐久性损伤的重要诱因<sup>[1]</sup>, 而表层混凝土也是结构抵御外部水分渗透和离子侵蚀的首道屏障。渗透结晶材料能够修复混凝土表层的微细裂纹, 堵塞小尺寸毛细孔, 提高基体密实程度, 并增强裂后自愈合能

力<sup>[2]</sup>, 从而提升整体的防护水平和健康状况。

常用的渗透结晶材料包括有机硅烷类材料<sup>[3]</sup>和无机金属盐类材料<sup>[4]</sup>, 而无机金属盐类材料又可分为水泥基类渗透结晶(cement-based infiltration capillary/crystalline waterproof, CCCW)材料<sup>[5]</sup>和水

**基金项目:**国家自然科学基金项目(U2040222); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金资助项目(CKSF2021456/CL); 水利部示范项目(SF-2021-02)

**作者简介:**李杨(1987—), 男, 工程师, 博士, 主要从事水泥基材料微观性能研究与调控研究。E-mail: liyangzhu@whu.edu.cn

溶性渗透结晶 (water-soluble infiltration capillary/crystalline waterproof, WCCW) 材料<sup>[6]</sup>。CCCW 材料和 WCCW 材料在物理性能、施工方法和辅料类型等方面存在差异<sup>[7-8]</sup>,但活性组分、修复机理和反应过程等基本相似<sup>[9]</sup>,其中活性物质渗透和结晶是保障两者作用效果的关键<sup>[6,10]</sup>。同时,WCCW 材料可在混凝土凝结硬化阶段进行喷涂,发挥保水、防裂、抑制泛碱和早期养护的效果。但大量实践表明,WCCW 材料作用效果与混凝土的吸收特性有关,而混凝土对 WCCW 材料的吸收特性也是制定实际施工工艺、确定具体技术参数的重要依据。

WCCW 材料的施工工艺主要包括材料用量、喷涂遍数、养护时长等。目前关于 WCCW 材料影响的研究主要集中在混凝土表层硬度、抗压强度、耐磨性能、抗渗透性能和抗离子侵蚀能力等方面<sup>[11-13]</sup>。前期研究<sup>[14]</sup>表明,WCCW 材料作用效果与混凝土强度等级有关,C20 混凝土的性能提升幅度超过 C40 混凝土。本文采用水利工程中常用的 C25 混凝土进行试验,根据吸水动力学方法<sup>[15]</sup>,在分析混凝土对 WCCW 材料吸收特性的基础上,研究 WCCW 材料吸收饱和度和养护时间对防渗效果的影响,以期为水工混凝土领域应用提供参考。

## 1 试验设计

### 1.1 试验材料

使用福建安砂水泥有限公司生产的 P·O 42.5 水泥进行试验,密度为 3.08 g/cm<sup>3</sup>,比表面积为 362 m<sup>2</sup>/kg。掺合料为漳州后石电厂生产的 F 类 II 级粉煤灰,需水量比为 101%,密度为 2.18 g/cm<sup>3</sup>,细度为 21.2%。水泥和粉煤灰主要氧化物含量的检测结果如表 1 所示。

表 1 水泥和粉煤灰的主要氧化物含量

材料	氧化物质量分数/%							
	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	SO <sub>3</sub>	R <sub>2</sub> O	烧失量
水泥	54.8	22.8	6.6	3.7	1.9	3.3	0.8	1.8
粉煤灰	2.7	43.4	29.8	11.1	0.5	1.3	2.0	1.4

注:R<sub>2</sub>O 为总的当量碱含量,为 N<sub>2</sub>O 质量分数与 0.658 倍的 K<sub>2</sub>O 质量分数之和。

试验选用的 WCCW 材料为透明碱性液体,密度为 1.21 g/cm<sup>3</sup>,pH 值为 11.8,固含量(质量分数)为 13%。WCCW 材料具有较好的耐热性和混凝土相容性,可在 160℃ 温度下保温 2 h 不出现表面粉化或裂纹,并在混凝土喷洒后不呈滚珠状掉落。现场 WCCW 材料使用时可直接喷洒在混凝土表面。

选用人工砂和二级配碎石作为骨料。人工砂的细度模数为 2.90,表观密度为 2.68 g/cm<sup>3</sup>,石粉含量为 7.3%,饱和面干吸水率为 1.62%。碎石由粒径

5~20 mm 的小石和 20~40 mm 的中石组成,表观密度为 2.73 g/cm<sup>3</sup>,饱和面干吸水率为 0.57%。

为改善混凝土拌和物和易性,使用缓凝型 PCA-I 聚羧酸高性能减水剂进行试验,同时添加 GYQ-I 引气剂调整混凝土孔结构特性。引气剂使用前需加水稀释,稀释倍数为 100。

### 1.2 配合比

选择水利工程中较为常见和用量较大的 C25 泵送混凝土进行试验。骨料为二级配,控制中石、小石组合的质量比为 45%:55%,粉煤灰掺量为 20%,砂率为 42%,坍落度为 160~180 mm,减水剂掺量为 0.8%,引气剂掺量为 0.006%,用水量为 150 kg/m<sup>3</sup>。实测混凝土 28d 抗压强度为 32.7 MPa。

混凝土原材料使用卧轴强制式搅拌机拌和,外加剂预溶于水并搅拌均匀。先将粉料和骨料干拌 2 min,然后倒入水和外加剂继续湿拌 2 min。整个拌和过程持续 4 min,结束后将拌和物倒出并装入边长为 150 mm 的立方体试模,保湿静置 24 h 后拆模移入养护室,在标准环境下养护至 28 d 龄期进行试验。

### 1.3 评价指标

以吸水率和吸水动力学参数作为评价指标,采用吸水动力学方法研究混凝土对 WCCW 材料的吸收特性,分析吸收饱和度和养护时间对 WCCW 材料作用效果的影响,其中吸收饱和度是指混凝土对 WCCW 材料瞬时吸收量与结束时最终吸收量的比值,反映了混凝土吸收 WCCW 材料的饱和程度;养护时间是指混凝土吸收 WCCW 材料后的再养护时长,相应的养护环境为标准条件。

#### 1.3.1 吸水率和 WCCW 材料吸收率

混凝土吸水率或 WCCW 材料吸收率的计算公式如式(1)所示。试验前先将 28 d 龄期的混凝土试件置于 105℃ 电热鼓风干燥箱中持续干燥不少于 24 h,待质量稳定后取出并浸泡于水或 WCCW 材料中,经不同浸泡时间后取出,用湿毛巾擦干试件表面并称量质量,然后利用初始干燥质量和浸泡后的质量计算混凝土吸水率或 WCCW 材料吸收率。

$$\omega_t = \frac{m_t - m_0}{m_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中: $\omega_t$ 为试件浸泡  $t$  时刻的吸水率或 WCCW 材料吸收率; $m_0$ 为初始的干燥试件质量; $m_t$ 为浸泡  $t$  时刻的试件质量。

#### 1.3.2 WCCW 材料吸收饱和度

混凝土对 WCCW 材料吸收饱和度的计算公式如式(2)所示。试验中控制混凝土对 WCCW 材料的吸收饱和度分别为 100%、80%、60%、40% 和

20%。试件在 WCCW 材料浸泡后取出并擦干表面,接着再次在标准环境下养护 28 d 后进行吸水动力学试验,考察混凝土吸水率和吸水动力学参数的变化情况,相应的试件分别用“XS100”“XS80”等形式表示,数字表示混凝土对 WCCW 材料的吸收饱和度。未吸收 WCCW 材料的空白试验组用“XC00”表示。

$$P_t = \frac{\omega_t}{\omega_{\max}} \times 100\% \quad (2)$$

式中: $P_t$ 为  $t$  时刻混凝土吸水或吸收 WCCW 材料的饱和程度; $\omega_{\max}$ 为混凝土饱和吸水率或 WCCW 材料饱和吸收率,即混凝土吸水或吸收 WCCW 材料达到饱和状态时的吸收率。

为研究浸泡后再养护时间的影响,基于前步优化的 WCCW 材料吸收饱和度结果制备试件,并分别将试件标养 3、7、14、28 d 后进行吸水动力学试验,相应的试件分别用“YH3”“YH7”等形式表示,数字表示再养护时间。

### 1.4 混凝土吸水动力学

混凝土渗透性能和液体吸收特性与自身孔结构有关。勃罗赛尔根据典型混凝土的吸水率曲线特点,提出了如式(3)的吸水动力学模型<sup>[15]</sup>。

$$\omega_t = \omega_{\max}(1 - e^{-\lambda t^\alpha}) \quad (3)$$

式中  $\alpha$ 、 $\lambda$  为与混凝土孔结构特性相关的动力学参数。WCCW 材料为液体状态,通过渗透作用侵入到混凝土内部。因此,混凝土对 WCCW 材料的吸收特性可借助吸水动力学方法研究。

吸水动力学模型参数  $\alpha$  与孔径尺寸分布均匀程度有关,参数  $\lambda$  与孔径尺寸大小有关<sup>[16]</sup>。陈健中<sup>[15]</sup>指出  $\lambda$  还受到液体动力学黏度、表面张力和毛细孔中弯液面半径等因素影响,并推导了  $\alpha$  和  $\lambda$  的求解方法。本文利用文献<sup>[15]</sup>的方法计算吸水动力学参数。

## 2 结果与分析

### 2.1 混凝土对 WCCW 材料的吸收特性

混凝土对 WCCW 材料的吸收特性曲线如图 1 所示。从图 1 可知,混凝土对 WCCW 材料的吸收遵循式(3)规律,拟合曲线的相关系数可达 0.92 以上。混凝土对 WCCW 材料的吸收过程可分为快速期、减速期和稳定期 3 个阶段,浸泡早期吸水率的增加速度较快,然后逐渐降低、趋于平缓并最终保持不变。这符合混凝土对液体吸收的普遍特点<sup>[17]</sup>,也说明 WCCW 材料渗透与混凝土的孔结构特性密切相关。

整体上,混凝土对 WCCW 材料吸收主要集中在

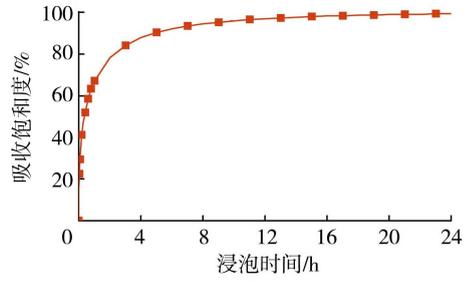


图 1 混凝土对 WCCW 材料的吸收特性曲线

浸泡开始的 2 h 内,而浸泡 8 h 后已基本完成。如浸泡 2 h 时,混凝土对 WCCW 材料的吸收饱和度为 78%,浸泡 8 h 时为 94%。因此,根据浸泡 0.25 h 和 1 h 的瞬时吸收率,以及 24 h 的饱和吸收率,可计算出混凝土吸收 WCCW 材料的动力学参数。同时,根据吸收率曲线,可分别在浸泡时间为 5 min、15 min、35 min、2.5 h 和 24 h 时制备出吸收饱和度约为 20%、40%、60%、80% 和 100% 的试件供后续试验。

实测的混凝土浸泡 5 min、15 min、35 min、2.5 h 和 24 h 的 WCCW 材料吸收率分别为 1.11%、1.67%、2.21%、3.07% 和 3.78%,相应的吸收饱和度分别为 29.3%、44.1%、58.4%、81.2% 和 100%。各试件对 WCCW 材料吸收饱和度的实测值与目标值存在差异,并且浸泡早期的差异较大,这主要与早期吸收率的增加速度较快、变化幅度较大有关。

### 2.2 WCCW 材料浸泡时间和吸收饱和度对混凝土吸水特性的影响

WCCW 材料浸泡时间对混凝土吸水率的影响如图 2 所示。通过控制混凝土在 WCCW 材料中的浸泡时间来制备不同 WCCW 材料吸收饱和度的试件,然后将试件标养 28 d 后再进行吸水性能试验。WCCW 材料吸收饱和度是实际吸收率与饱和吸收率的比值,确定较为合适的 WCCW 材料吸收饱和度有利于节省材料用量,并提高施工过程的经济性。

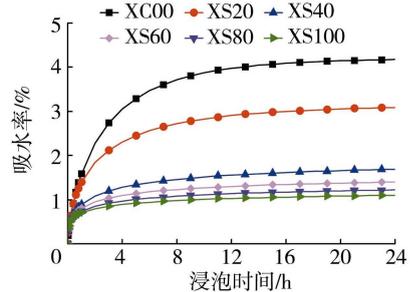


图 2 WCCW 材料浸泡时间对混凝土吸水率的影响

从图 2 可知,随 WCCW 材料吸收饱和度的增大,混凝土浸泡 24 h 时后最终的饱和吸水率降低,吸水率曲线在初始阶段更加陡峭,说明早期吸水量在整个吸水过程占比增大,表明试件的吸水过程更容易完成。如 XC00 试件的饱和吸水率为 4.21%,

XS100 试件为 1.26%，混凝土饱和和吸水率明显降低,说明 WCCW 材料能够有效提升混凝土的抗渗性能。

图 3 为 WCCW 材料吸收饱和度对不同浸泡时间混凝土吸水率的影响。整体上,相同浸泡时间的混凝土吸水率随 WCCW 材料吸收饱和度的增加而降低,两者为幂函数关系。随 WCCW 材料吸收饱和度的增加,混凝土吸水率早期下降幅度较快,后期趋于平缓,特别是 WCCW 材料吸收饱和度超过 60% 后,混凝土吸水率的降幅较小。如 WCCW 材料吸收饱和度从 0 增加到 60% 时,浸水 24 h 后的混凝土的饱和吸水率从 4.21% 降低至 1.52%,降低幅度为 63%;而 WCCW 材料吸收饱和度从 60% 增加到 80% 时,浸水 24h 后的混凝土饱和吸水率仅从 1.52% 减小至 1.32%,降低幅度仅为 13%,这说明 WCCW 材料存在较优的用量范围,该范围内使用的效果较好,超过后经济性降低。

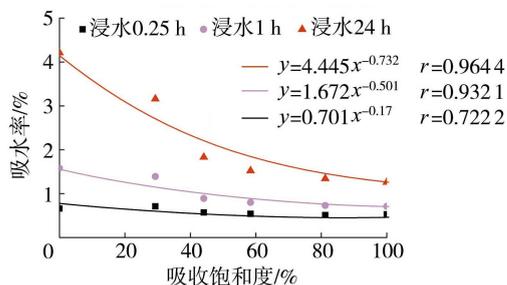


图 3 WCCW 材料吸收饱和度对混凝土吸水率的影响

图 4 为 WCCW 材料吸收饱和度对混凝土吸水动力学参数的影响。随着 WCCW 材料吸收饱和度的增加,混凝土吸水动力学参数  $\alpha$  减小,而参数  $\lambda$  增加。WCCW 材料吸收饱和度变化早期, $\alpha$  的下降幅度和  $\lambda$  的增加幅度都较大,而两者后期变化幅度都减小。如 WCCW 材料吸收饱和度从 0 提高到 60% 时, $\alpha$  从 0.73 减小至 0.38,降低幅度为 48%, $\lambda$  从 0.47 增大至 0.75,增加幅度为 60%;而 WCCW 材料吸收饱和度进一步提高到 100% 时, $\alpha$  减小至 0.29,降低幅度仅为 24%, $\lambda$  增大至 0.82,增加幅度仅为 9%。这说明 WCCW 材料对混凝土吸水动力学参数的影响存在效应递减的特点。

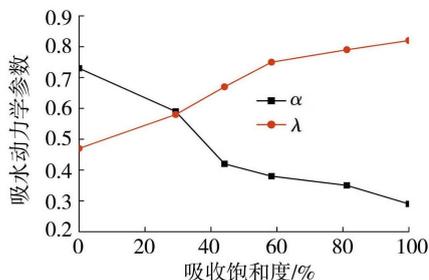


图 4 WCCW 材料吸收饱和度对混凝土吸水动力学参数的影响

吸水动力学参数与混凝土孔结构特性有关。 $\alpha$  值越大,表明孔径分布的不均匀程度越高; $\lambda$  值越大,说明平均孔径的尺寸越大<sup>[15]</sup>。试验结果表明,提高 WCCW 材料吸收饱和度,有利于改善混凝土孔径分布的均匀性,并减少小尺寸孔隙的含量,这主要与 WCCW 材料活性物质功能的发挥有关。

WCCW 材料主要通过结晶-沉淀反应、络合-沉淀反应的方式发挥作用<sup>[18]</sup>,其活性物质可激活、催化未水化的水泥颗粒,并与胶凝材料水化产物发生反应<sup>[5]</sup>,从而堵塞小尺寸毛细孔、修复微细裂纹,达到混凝土表层封闭、损伤愈合及密实度提高的效果。但 WCCW 材料对大尺寸孔和宽度超过 0.4 mm 的裂缝作用能力有限<sup>[19]</sup>。因此,混凝土吸收 WCCW 材料后,总孔隙含量中小尺寸孔占比的降低幅度较大,而大孔尺寸占比的降低程度较小,总的孔隙率减少,导致平均孔径向大尺寸孔方向偏移,从而出现  $\alpha$  减小但  $\lambda$  增大的局面。同时,混凝土吸水也表现出饱和和吸水率降低、吸水容易达到饱和的特点。

结合上述试验结果,考虑经济和成本因素,将优化的 WCCW 材料吸收饱和度定为 60% 比较合适。

### 2.3 WCCW 材料养护时间对混凝土吸水特性的影响

WCCW 材料作用效果与环境温度和湿度、活性物质含量和反应速率、喷涂后养护时间等因素有关。图 5 为养护时间对混凝土吸水率的影响。各试验组 WCCW 材料吸收饱和度均为 60%。混凝土吸收 WCCW 材料后的再次养护时间分别为 3、7、14、28 d,吸水率根据试件浸水后 0.25、1、24 h 的质量变化情况计算。从图 5 可知,混凝土吸水率与养护时间之间为幂函数关系,吸水率随养护时间的延长而降低,特别是浸水 24 h 时饱和吸水率的下降效果最为明显,但养护早期和后期的下降幅度均较小,养护 3~7 d 的降幅较大。这说明 WCCW 材料存在一个较合理的养护时间范围,养护时间不足难以保证效果,而养护时间过长又不利于经济性。

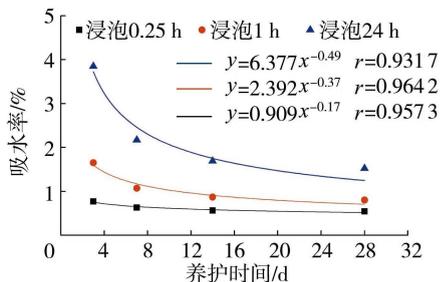


图 5 养护时间对混凝土吸水率的影响

图 6 为养护时间对混凝土吸水动力学参数的影响。整体上,吸水动力学参数与养护时间之间为幂函数关系,这与吸水率的变化规律一致。但  $\alpha$  随养护时间的延长而减小, $\lambda$  随养护时间的延长而增大。

如养护 3 d 时, YH3 试验组的  $\alpha$  为 0.66,  $\lambda$  为 0.56; 而养护 7 d 时, YH7 试验组  $\alpha$  为 0.49,  $\lambda$  为 0.68, 表明随养护时间的延长, 混凝土孔径分布的均匀程度提高, 但平均孔径增大。养护时间从 3 d 增加至 7 d 时,  $\alpha$  降低了 26%,  $\lambda$  增大了 21%, 说明 WCCW 材料活性物质在养护 3~7 d 时反应比较强烈。

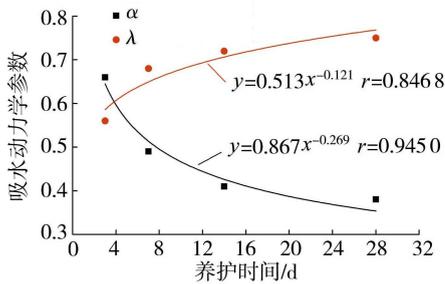


图 6 养护时间对混凝土吸水动力学参数的影响

WCCW 材料能够提高混凝土的自愈合能力, 其作用发挥与活性物质的化学反应和产物生成有关。养护时间过短, 活性物质未能充分反应, 产物的生成量不足, 导致混凝土性能的改善效果有限; 而养护时间过长, 活性物质的反应程度较高, 新增产物的数量较少, 导致混凝土性能进一步提升的空间减小。综合上述试验结果, 考虑施工周期和进度, 将优化的养护时间定为 7 d 较为合适。

### 3 结论

a. 混凝土对 WCCW 材料的吸收特性遵循吸水动力学规律, 早期吸收较快, 中期逐渐变缓并在后期趋于稳定。WCCW 材料吸收主要集中在浸泡开始的 2 h 内, 8 h 的吸收饱和度可达 94%。C25 混凝土在 WCCW 材料中浸泡 8 h 即可获得较好的吸收效果。

b. 随 WCCW 材料吸收饱和度的增加, 混凝土吸水率降低, 吸水动力学参数  $\alpha$  减小, 而参数  $\lambda$  增大。WCCW 材料吸收饱和度与混凝土吸水率之间存在幂函数关系, 并且吸水率的变化幅度随吸收饱和度的增加而减小。经济性较好的 WCCW 材料吸收饱和度是 60%。

c. 混凝土吸收 WCCW 材料后需要合理的养护时间, 养护时间过短难以保证质量效果, 而长期养护的经济性降低。综合效果较好的养护时间是 7 d。

#### 参考文献:

[ 1 ] EDVARSDEN C. Water permeability and autogenous healing of cracks in concrete[J]. ACI Materials Journal, 1999, 96(4):448-454.  
 [ 2 ] RAVITHEJA A, REDDY T C S, SASHIDHAR C. Self-healing concrete with crystalline admixture: a review[J].

[ 3 ] 蒋正武, 孙振平, 王培铭. 硅烷对海工高性能混凝土防腐性能的影响[J]. 中国港湾建设, 2005(1):26-30. (JIANG Zhengwu, SUN Zhenping, WANG Peiming. Effects of silane on anti-corrosion properties of high-performance marine concrete [J]. China Harbour Engineering, 2005(1):26-30. (in Chinese))  
 [ 4 ] TENG Liwei, HUANG Ran, CHEN Jie, et al. A study of crystalline mechanism of penetration sealer materials[J]. Materials, 2014, 7(1):399-412.  
 [ 5 ] ZHANG Yiteng, ZUO Lian, YANG Jinchao, et al. Effect of cementitious capillary crystalline waterproofing coating on the gas permeability of mortar [J]. Structural Concrete, 2019, 20(5):1763-1770.  
 [ 6 ] 姜骞, 穆松, 刘建忠, 等. 水性渗透结晶材料对混凝土性能提升研究及机理分析[J]. 新型建筑材料, 2016, 43(3):49-52. (JIANG Qian, MU Song, LIU Jianzhong, et al. Research and mechanism analysis of influence of deep penetration sealer on performance of concrete [J]. New Building Materials, 2016, 43(3):49-52. (in Chinese))  
 [ 7 ] 中华人民共和国工业和信息化部. 水性渗透型无机防水剂: JC/T 1018—2020[S]. 北京: 中国建材工业出版社, 2020.  
 [ 8 ] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 水泥基渗透结晶型防水材料: GB 18445—2012[S]. 北京: 中国标准出版社, 2013.  
 [ 9 ] LI Guangyan, HUANG Xiaofeng, LIN Jiesheng, et al. Activated chemicals of cementitious capillary crystalline waterproofing materials and their self-healing behaviour [J]. Construction and Building Materials, 2019, 200:36-45.  
 [ 10 ] 匡亚川, 欧进萍. 混凝土的渗透结晶自修复试验与研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2008, 5(1):6-10. (KUANG Yachuan, OU Jinping. Experiment and research on permeable crystallization self-repairing performance of concrete [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2008, 5(1):6-10. (in Chinese))  
 [ 11 ] 黄波, 邓德华, 陈蕙玉. 深度渗透密封剂(DPS)对混凝土抗硫酸盐侵蚀性能的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2011, 42(12):3858-3863. (HUANG Bo, DENG Dehua, CHEN Huiyu. Effect of deep penetration sealer (DPS) on concrete resistance to sulfate attack [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2011, 42(12):3858-3863. (in Chinese))  
 [ 12 ] 邢李进, 姚志华, 张保立, 等. 渗透型防水涂料对混凝土抗盐冻性的影响[J]. 水利与建筑工程学报, 2010, 8(1):69-70. (XING Lijin, YAO Zhihua, ZHANG Baoli, et al. Influence of capillary waterproofing materials on anti-sulfate and anti-chloride frost resistance of concrete [J]. Journal of Water Resources and Architectural

- Engineering,2010,8(1):69-70. (in Chinese)
- [13] TENG Liwei, HUANG Ran, HSU H M, et al. The research of concrete sealer penetrating depths [J]. Advanced Materials Research,2014,1025-1026:703-708.
- [14] 钟聚光, 耿必君, 任鑫, 等. 水溶性渗透结晶(WCCW)材料对混凝土性能影响研究[J/OL]. 长江科学院院报. (2022-12-26). <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1171.TV.20221223.1019.006.html>. (ZHONG Juguang, GENG Bijun, REN Xin, et al. Influence of water-based infiltration capillary/crystalline waterproof (WCCW) material on properties of concrete [J/OL]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute. (2022-12-26). <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1171.TV.20221223.1019.006.html>. (in Chinese))
- [15] 陈健中. 用吸水动力学法测定混凝土的孔结构参数[J]. 混凝土及加筋混凝土, 1989(6):9-13. (CHEN Jianzhong. Determination of pore structure parameters based on absorption kinetic method [J]. Concrete and Reinforced Concrete, 1989(6):9-13. (in Chinese))
- [16] 陈景, 兰聪, 刘永道, 等. 基于吸水动力学法研究砂浆孔结构对其力学性能与软化系数的影响[J]. 混凝土与水泥制品, 2016(10):14-18. (CHEN Jing, LAN Cong, LIU Yongdao, et al. Effects of mortar pore structure on its mechanical properties and softening coefficient based on absorption kinetic method [J]. China Concrete and Cement Products, 2016(10):14-18. (in Chinese))
- [17] TEGGUER A D. Determining the water absorption of recycled aggregates utilizing hydrostatic weighing approach [J]. Construction and Building Materials, 2012, 27(1):112-116.
- [18] 李广彦. 水泥基渗透结晶型防水材料制备及其自修复性能[D]. 广州:华南理工大学, 2018.
- [19] FERRARA L, KRELANI V, MORETTI F. On the use of crystalline admixtures in cement based construction materials: from porosity reducers to promoters of self healing [J]. Smart Materials and Structures, 2016, 25(8):084002.

(收稿日期:2022-10-31 编辑:俞云利)

(上接第93页)

- [14] 徐颖, 王伟, 李艳玲, 等. 高土石坝双防渗墙渗流特性研究[J]. 人民长江, 2022, 53(7):181-186. (XU Ying, WANG Wei, LI Yanling, et al. Seepage features for high earth-rockfill dam with double cutoff walls [J]. Yangtze River, 2022, 53(7):181-186. (in Chinese))
- [15] 王正成, 毛海涛, 彭钰洁, 等. 多元结构坝基双排防渗墙控渗效果试验研究[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2019, 41(3):32-40. (WANG Zhengcheng, MAO Haitao, PENG Yujie, et al. Experimental study on seepage control using double cut-off walls on multiple-structure dam foundation [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2019, 41(3):32-40. (in Chinese))
- [16] 李炎隆, 张敬华, 张再望, 等. 基于正交试验法的高模量区 E-B 模型参数敏感性分析[J]. 水利水电科技进展, 2019, 39(1):34-38. (LI Yanlong, ZHANG Jinghua, ZHANG Zaiwang, et al. Sensitivity analysis of E-B model parameters in high modulus zone based on orthogonal test method [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2019, 39(1):34-38. (in Chinese))
- [17] SUN Y Q, SHEN Z Z, XU L Q, et al. Sensitivity study of the computational parameters for the deformation of Homogeneous Earth Dams [J]. Mathematical Problems in Engineering, 2021, 2021:2216366.
- [18] 冯亚新, 王润英, 孙丹, 等. 深厚覆盖层上面板堆石坝渗流敏感性分析[J]. 中国农村水利水电, 2023(3):191-198. (FENG Yaxin, WANG Runying, SUN Dan, et al. An analysis of the seepage sensitivity face of the rockfill dam with deep overburden [J]. China Rural Water and Hydropower, 2023(3):191-198. (in Chinese))
- [19] 金洪杰, 甘磊, 沈振中, 等. 某船闸枢纽主要分区渗透参数敏感性反演分析[J]. 水资源与水工程学报, 2022, 33(3):149-155. (JIN Hongjie, GAN Lei, SHEN Zhenzhong, et al. Sensitivity and inversion analysis of permeability parameters in main zones of a ship lock hub [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2022, 33(3):149-155. (in Chinese))
- [20] 张文兵, 任杰, 杨杰, 等. 基于正交试验土石坝热-流耦合模型参数的敏感性分析[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2019, 47(1):147-154. (ZHANG Wenbing, REN Jie, YANG Jie, et al. Sensitivity analysis of thermal-hydro coupling model parameters in earth rock dam based on orthogonal test method [J]. Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition), 2019, 47(1):147-154. (in Chinese))
- [21] 姜媛媛, 索慧敏, 伍小玉. 长河坝深厚覆盖层防渗布置分析[J]. 水电站设计, 2014, 30(2):86-88. (JIANG Yuanyuan, SUO Huimin, WU Xiaoyu. Analysis on anti-seepage layout of deep overburden layer of Changhe Dam [J]. Design of Hydroelectric Power Station, 2014, 30(2):86-88. (in Chinese))

(收稿日期:2022-09-16 编辑:刘晓艳)