

# 基于疏水剂处理的 混凝土水闸耐久特性研究

张文浩, 李海洲, 孟 龙

(江苏淮源工程建设监理有限公司, 江苏 淮安 223001)

**摘要:**通过探讨硅烷疏水处理对水工混凝土耐久性性能的影响,解决混凝土水闸在潮湿、含氯环境中的耐久性问题。选择江苏淮安市清江水闸作为研究对象,采用不同水胶比的混凝土试件,进行硅烷疏水处理,并通过氧气渗透性指数(OPI)、水吸附性指数(WSI)和氯离子导电性指数(CCI)等耐久性指标进行评估。结果表明,硅烷疏水处理有效减少了混凝土的毛细吸水性、氯离子扩散性和氧气渗透性,显著提高了混凝土的耐久性。研究结果为水利工程中混凝土结构的耐久性保护提供了理论依据和实践指导。

**关键词:**硅烷疏水剂; 水胶比; 氯离子扩散; 水工混凝土; 耐久性

**中图分类号:**TV663 **文献标识码:**B **文章编号:**1007-7839(2025)04-0065-0004

## Study on the durability characteristics of concrete sluices based on hydrophobic agent treatment

ZHANG Wenhao, LI Haizhou, MENG Long

(Jiangsu Huaiyuan Engineering Construction Supervision Co., Ltd., Huai'an 223001, China)

**Abstract:** By exploring the influence of silane hydrophobic treatment on the durability performance of hydraulic concrete, the durability problem of concrete sluices in humid and chlorine-containing environments is solved. The Qingjiang Sluice in Huai'an City, Jiangsu Province is selected as the research object. Concrete specimens with different water-binder ratios are subjected to silane hydrophobic treatment and evaluated through durability indexes such as the oxygen permeability index (OPI), water sorption index (WSI), and chloride ion conductivity index (CCI). The research results provide theoretical basis and practical guidance for the durability protection of concrete structures in hydraulic engineering.

**Key words:** silane hydrophobic agent; water-binder ratio; chloride ion diffusion; hydraulic concrete; durability

随着全球气候和环境条件的变化,水工混凝土结构在长期使用中面临着越来越多的挑战。特别是在一些高湿度、含氯离子的水域环境中,混凝土的耐久性问题尤为突出<sup>[1-2]</sup>。氯离子通过混凝土的

毛细孔渗透,导致钢筋的锈蚀和混凝土的劣化,严重影响水利设施的安全性和使用寿命<sup>[3]</sup>。为此,如何提高水工混凝土结构的耐久性,尤其是抗氯离子侵入、抗水渗透性和抗气体渗透性,已经成为当前

收稿日期: 2024-12-09

作者简介: 张文浩(1994—),男,中级工程师,本科,主要从事水利工程监理工作。E-mail:2772821275@qq.com

水利工程领域研究的热点问题。

近年来,表面处理技术作为一种有效的防护手段,得到了广泛关注。特别是硅烷类疏水剂的应用,因其成本低、效果显著,成为提高混凝土耐久性的一个重要方向。硅烷类疏水剂能够渗透混凝土表面,通过改变其微观结构,减少水分和氯离子的渗透,从而降低钢筋的腐蚀风险并延长结构的使用寿命<sup>[4]</sup>。然而,大多数相关研究主要集中在实验室条件下对标准混凝土的测试,而对于特定环境下的水工建筑物,特别是像水闸等长期暴露于含氯水体的混凝土结构,其应用效果仍不明确。因此,探索硅烷疏水剂在水工混凝土结构中的应用,尤其是在淮安地区具有典型水文环境的清江水闸中的应用,是当前亟待解决的问题<sup>[5]</sup>。

本文以江苏淮安市清江水闸为研究对象,探讨硅烷疏水处理对水工混凝土耐久性的影响。通过实验室的系列测试,包括氧气渗透性、氯离子扩散性、水吸附性等指标,评估硅烷疏水处理对混凝土耐久性提升的效果。研究结果不仅为类似水工设施的防护提供了科学依据,也为提高水利工程结构的长期稳定性和安全性提供新的技术手段。

## 1 研究方法

### 1.1 研究背景

江苏淮安地处中国东部的平原水网地区,位于京杭大运河的下游,是长江水系的重要组成部分。淮安市内的水利设施众多,尤其是位于淮河流域的多座水闸,它们承担着防洪、灌溉、调水等多重任务。淮河流域自古以来就具有复杂的水文环境,季节性洪水、盐碱化土壤以及水质变化都给水利设施

带来极大的耐久性挑战。特别是混凝土水闸,在长期的水流冲刷和氯化物渗透作用下,容易出现钢筋腐蚀、混凝土裂缝及局部劣化等问题。

本文选择位于淮安市清江浦区的清江水闸作为研究对象。该水闸长期处于水流冲刷和水质腐蚀环境中,尤其是周围水域盐度较高、氯离子浓度较大,给混凝土结构带来了巨大的耐久性挑战,因此迫切需要采取有效的保护措施来延长混凝土结构的使用寿命。

在这一背景下,本文通过对清江水闸混凝土进行硅烷(疏水剂)处理,探讨其对混凝土耐久性的影响。通过实验室测试,结合氧气渗透性指数(OPI)、水吸附性指数(WSI)以及氯离子导电性指数(CCI)等指标,评估硅烷浸渍处理对水闸混凝土的防护效果。研究结果不仅有助于提升该水闸的使用寿命,也为淮安及类似环境下的水工建筑防护提供了重要的技术支持。

### 1.2 配合比设计

选择2种水胶比( $w/b=0.45$ 和 $w/b=0.60$ )和4种胶凝材料类型(水泥1CEM I 52.5N、水泥2CEM III/B 42.5N、粉煤灰(FA)和粒化高炉渣(GGBS))。因此,总共使用了8种混凝土配合比。混凝土试件在浇筑后24 h脱模,用塑料薄膜包裹并放置在环境室中(温度 $23\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,相对湿度 $63\pm 2\%$ )。7d后,移除塑料薄膜,在上述控制的环境条件下对试件进行空气养护,直到56 d,配合比设计见表1。

相对于硅氧烷分子(直径为 $1.5\times 10^{-6}\sim 7.5\times 10^{-6}\text{ mm}$ ),纯硅烷产品通常能获得更大的渗透深度,然而较小的分子尺寸与较高的挥发性相关,因此,纯硅烷通常用于凝胶状的一致性,这使得可以在垂

表1 式样配合比设计

设计 指标	水胶比 ( $w/b$ )	水泥 2/ ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	水泥 1/ ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	FA/ ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	GGBS/ ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	细骨料 (碎砂)/ ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	细骨料 (沙丘砂)/ ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	粗骨料 (19-mm)/ ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	水/ ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	胶凝 材料/ ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	粉煤灰 含量/ %	矿渣粉 含量/ %	坍落 度/mm	抗压 强度/ $\text{MPa}$
配比 1	0.45	—	411	—	—	426	426	1 040	185	411	—	—	70	66.7
配比 2	0.60	—	308	—	—	472	472	1 040	185	308	—	—	60	47.7
配比 3	0.45	—	288	123	—	406	406	1 040	185	411	30	—	90	55.3
配比 4	0.60	—	216	93	—	457	457	1 040	185	308	30	—	65	35.6
配比 5	0.45	—	206	—	206	419	419	1 040	185	411	—	50	75	63.1
配比 6	0.60	—	154	—	154	467	467	1 040	185	308	—	50	60	49.2
配比 7	0.45	411	—	—	—	413	413	1 040	185	411	—	—	70	58.5
配比 8	0.60	368	—	—	—	463	463	1 040	185	308	—	—	70	45.4

直表面上涂抹厚层的防水产品而不会下垂或塌陷。

1.3 硅烷处理

硅烷处理在 28 d 进行,将试件表面涂抹一种基于硅烷的防水浸渍霜,使用量为 400 g/m<sup>2</sup>。然后将处理过的试件放置 在环境室中(温度保持在(23±2)℃,相对湿度(63±2)% )56 d。

1.4 实验研究

对每种配合比的 3 个立方体(100 mm)进行抗压强度测试。耐久性指数(DI)测试在切割表面(用于配合比表征)和未切割表面(用于评估硅烷浸渍对毛细水吸收和氯离子导电性等传输性能的影响)上进行。氧气渗透性指数(OPI)、水吸附性指数(WSI)和氯离子导电性指数(CCI)测试分别按照 GB/T 17671—2021《水泥细度、抗压强度测试方法》、GB/T 50082—2009《普通混凝土长期性能和耐久性试验方法》和 JC/T 495—2005《混凝土氯离子渗透性测试方法》进行。

疏水(硅烷)浸渍深度在处理 后 4 周测量。对 2 个硅烷处理的混凝土立方体(100 mm)进行间接劈裂抗拉试验,并在内部表面喷洒 水。疏水处理的混凝土部分排斥水,而未处理部分由于吸水显示出较深的颜色。

根据 GB/T 50082—2009《普通混凝土长期性能和耐久性试验方法》,在 56d 时开始进行整体扩散测试。每种配合比使用 6 个试件(3 个处理,3 个未处理)。在氯化物暴露期结束后,从盐溶液中取出试件,并按适当的增量切片。这些切片被粉碎并研磨成约 10 g 的粉末样品。使用电位滴定仪测定酸性氯离子含量,按照 GB/T 50081—2019《普通混凝土力学性能试验方法》进行。

2 结果与讨论

2.1 耐久性指数

2.1.1 切割表面

为了配合比表征,对切割表面进行耐久性指数测试(氧气渗透性指数 OPI、水吸附性指数 WSI 和氯离子导电性指数 CCI)。所有混凝土配合比(配合比 1~8)均达到了 OPI 值范围为 9.90~10.67,WSI 值范围为 4.2~7.8 mm/h<sup>0.5</sup>,CCI 值范围为 0.16~1.09 mS/cm (表 2)。OPI 随着水胶比的增加而降低,而 WSI 和 CCI 值则普遍增加,这是由于水泥浆体微观结构的孔隙率增加以及孔隙间连接数量的增加,这些孔隙在水泥浆体中起到流动通道的作用。这使得氧气、液体的毛细吸收和氯离子的迁移更加容易。

表 2 耐久性指数测试结果(切割表面)

混合物编号	胶凝材料	w/b	OPI	WSI/(mm/h <sup>0.5</sup> )	CCI/(mS/cm)	孔隙率/%
配比 1	CEM I	0.45	10.54	5.7	0.58	9.0
配比 2	CEM I	0.60	9.95	6.8	1.09	11.9
配比 3	30% FA	0.45	10.06	7.8	0.66	9.5
配比 4	30% FA	0.60	10.04	7.5	0.98	10.9
配比 5	50% GGBS	0.45	10.34	4.2	0.16	7.3
配比 6	50% GGBS	0.60	9.90	5.5	0.25	8.8
配比 7	CEM III/B	0.45	10.67	7.1	0.16	7.7
配比 8	CEM III/B	0.60	10.32	7.2	0.28	9.8

2.1.2 未切割表面

在未切割(模板)表面评估疏水处理对 DI 值的影响,以代表现场条件。根据结果,相对于硅烷处理的混凝土,未处理的混凝土测试出较低的 WSI 值(图 1)和 CCI 值(图 2)。疏水(硅烷)浸渍通过化学修饰混凝土的近表面区域,减少了毛细吸水。由于硅烷分子与毛细壁结合并覆盖,后者变得没有离子电荷,极性分子如水不再被吸引到混凝土表面。因

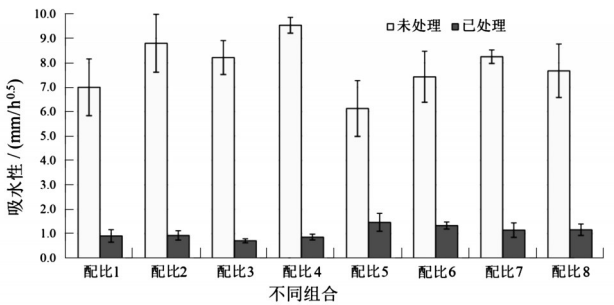


图 1 耐久性指数测试结果(未切割表面-WSI)

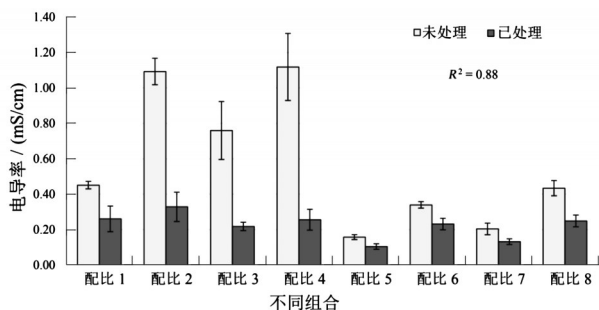


图2 耐久性指数测试结果(未切割表面-CCI)

为硅烷浸渍层内的毛细孔相对于未处理的混凝土含水量较低,氯离子的迁移减少。

## 2.2 硅烷渗透深度

结果显示,硅烷渗透深度随着水胶比的增加而增加(图3)。这归因于水泥浆微观结构的毛细孔隙率较高,使得防水产品的渗透更深。对于水胶比为0.60的混合物,由于误差条的重叠,胶凝材料类型的影响不明确,但对于水胶比为0.45的混合物,FA和GGBS的加入分别增加和减少了渗透深度。必须注意,所有混凝土配合比(配合比1-8)都使用了固定的硅烷消耗率( $400 \text{ g/m}^2$ )。对于原位结构,应进行初步试验以确定达到足够渗透深度(通常为5~6 mm)所需的消耗率。硅烷渗透深度也被发现与氧气渗透指数(OPI/对数尺度)高度相关,如图4所示。测得的OPI值范围约为9.90~10.67,表示渗透系数的负对数。由于对数尺度,OPI值为9.90的混凝土比OPI值为10.67的混凝土渗透性约高6倍。OPI与硅烷渗透深度之间的良好相关性可归因于产品渗透深度是近表面混凝土整体质量(孔隙的互连性、毛细孔结构的曲折度)的函数,而OPI测试评估了这些属性。

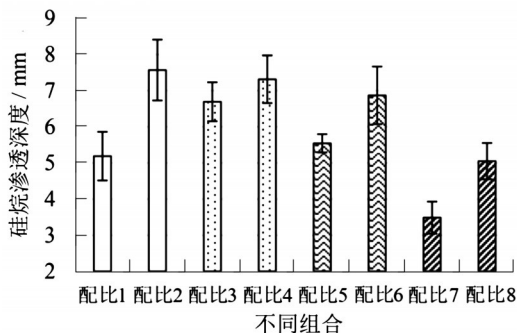


图3 硅烷渗透深度

## 2.3 体扩散

详细的体扩散结果包含在中。图5给出典型的氯离子侵入曲线的例子。总体而言,硅烷处理减少

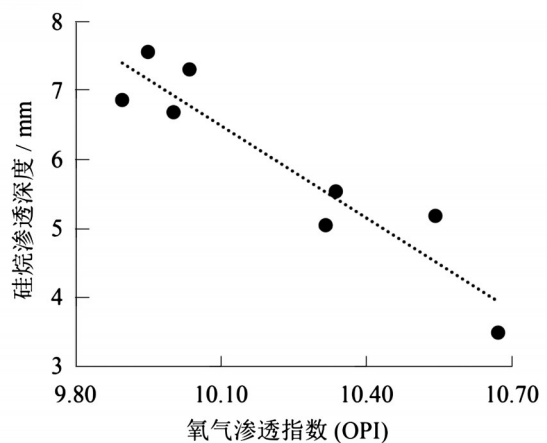


图4 硅烷渗透深度与OPI的相关性

了表面氯离子浓度,效果在FA、GGBS和CEM III/B混合物中最为明显。

同样,硅烷处理的混凝土相比未处理的混凝土具有较低的表观氯离子扩散系数。由于在近表面区域内氯离子的渗透和含量减少,可扩散到混凝土更深处的氯离子供应减少。由于毛细孔在硅烷浸渍(处理)混凝土中的饱和度较低,氯离子的扩散也显著减慢。

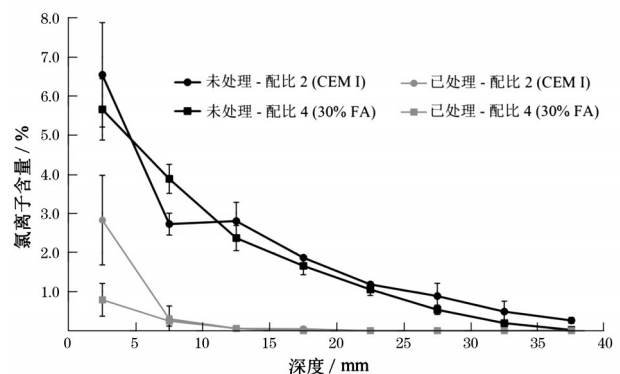


图5 CEM I和FA混合物扩散试验结果(w/b=0.60)

## 3 结 论

本文通过对江苏淮安市清江水闸混凝土的硅烷疏水处理,探讨了该处理方法对水工混凝土耐久性能的影响。研究表明,硅烷疏水处理显著改善了水闸混凝土的传输性能,延缓了氯离子和水分的渗透,从而提高了混凝土的耐久性。具体来说,硅烷处理有效减少了毛细水吸收,降低了混凝土的水吸附速率,显著抑制了氯离子在混凝土中的扩散,降低钢筋腐蚀的风险。此外,硅烷处理还显

(下转第72页)



- RC短柱轴压力学性能试验研究[J]. 建筑钢结构进展, 2024, 26(12): 24-34.
- [3] 姜逸群, 彭晖, 兰川云, 等. 端部嵌贴CFRP板加固钢筋混凝土结构的斜嵌段粘结性能试验[J]. 复合材料学报, 2024, 41(2): 871-883.
- [4] 何理, 邹春龙, 文周, 等. 碳纤维含量对碳纤维增强聚醚醚酮复合材料弯曲性能和失效行为的影响[J]. 塑料工业, 2024, 52(2): 120-127.
- [5] 肖冲, 吕辉, 罗靓. 柱端带肋方钢管混凝土柱抗震耗能分析[J]. 工程抗震与加固改造, 2024, 46(2): 121-129.
- [6] 强旭红, 陈岩松, 姜旭, 等. CFRP板纵向加固RC柱在水平低周循环荷载下的力学性能研究与应用[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2024, 51(7): 148-163.
- [7] 郭兴宴, 刘文杰, 张建成, 等. CFRP布粘贴角度对含裂隙无腹筋梁抗剪加固效果研究[J]. 山东建筑大学学报, 2024, 39(6): 47-54.

(上接第68页)

著减少了混凝土的氧气渗透性,进一步增强其对外界侵蚀物质的屏障作用。研究还发现,硅烷的渗透深度与水胶比之间存在密切关系,水胶比较高的混凝土表现出更深的硅烷渗透深度,从而提高了整体的防水性能。综上所述,硅烷疏水处理作为一种低成本、高效的表面处理方法,显著提高了水工混凝土的耐久性,特别适用于江苏淮安及类似环境下的水利设施。该方法不仅有效延长了水闸的使用寿命,还为其他水工建筑物保护提供了重要的技术参考。未来的研究应进一步探索不同类型疏水剂的效果及其在不同环境条件下的长期耐久性表现,以推动该技术在水利工程中的广泛应用。

#### 参考文献:

- [1] 甘文忠, 张曾, 王永峰. 长河坝水电站泄洪洞高标号抗冲磨硅粉混凝土温控施工技术[J]. 水力发电, 2016, 510(10): 83-86.
- [2] 李光伟, 马巧玲. 纤维对水工高性能混凝土抗冲耐磨特性的影响[J]. 水电站设计, 2013, 109(2): 87-91.
- [3] 凌春海. 高性能抗冲耐磨混凝土在南沙水电站的应用[J]. 人民珠江, 2014, 202(2): 54-56.
- [4] 郭维维. 玄武岩纤维对水工混凝土抗冲蚀性能影响研究[J]. 水利建设与管理, 2019, 309(4): 28-31.
- [5] 李光伟. 纤维素纤维在水工抗冲磨高性能混凝土中的应用[J]. 水利水电技术, 2011, 456(10): 124-127.