材料科学

水库溢洪道混凝土泄槽面板的氯盐侵蚀性能研究

Study on the Chloride Erosion Performance of Concrete Spillway Panel in Reservoir Spillway

刘 君

（临朐县沂山水库运行维护中心，潍坊 262613）

摘 要：探讨水库溢洪道混凝土泄槽面板在氯盐侵蚀环境下的性能变化，以揭示不同浓度氯盐溶液及侵蚀时间对混凝土耐久性的影响。制备掺有钢纤维的水库溢洪道混凝土泄槽面板试件，将其置于氯盐干湿循环试验箱中进行模拟环境试验。设定四种不同氯化钠溶液浓度。在设定的测试周期内，对混凝土试件的抗压强度、质量变化率以及表面形貌进行定期检测。结果表明：氯盐侵蚀对水库溢洪道混凝土泄槽面板的耐久性具有显著影响，通过优化混凝土配比、提高抗氯盐侵蚀能力或采取防护措施，可以有效减缓氯盐侵蚀对混凝土性能的损害。成果可为相关工程提供参考。

关键词：水库溢洪道；混凝土泄槽面板；氯盐；侵蚀性能；力学性能

中图分类号：TU521.3 **文献标志码**：A **文章编号**：1005-8249（2025）03-0054-04

DOI：10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2025.03.010

LIU Jun

（Yishan Reservoir Operation and Maintenance Center in Linqu Country, Weifang 262613, China）

Abstract: Explore the performance changes of concrete spillway panels in chloride salt erosion environments for reservoir spillways, in order to reveal the effects of different concentrations of chloride salt solutions and erosion times on the durability of concrete. Prepare the concrete spillway panel specimens of the reservoir spillway mixed with steel fibers and place them in a chloride salt wet dry cycle test chamber for simulated environmental testing. Set four different concentrations of sodium chloride solution. The experimental results showed that Chloride erosion has a significant impact on the durability of concrete spillway panels in reservoirs. By optimizing concrete mix proportions, improving resistance to chloride erosion, or taking protective measures, the damage of chloride erosion to concrete performance can be effectively mitigated. The findings may serve as a reference for relevant engineering projects.

Key words: reservoir spillway; concrete spillway panel; chloride salt; erosion properties; mechanical properties

0 引言

水库溢洪道泄槽面板的混凝土处于干湿交替的恶劣环境中，这会加剧氯盐侵蚀，进而促进了氯离子渗透和扩散，最终导致混凝土内部物理化学损伤的累积，反复的干湿循环导致混凝土性能逐渐劣化[1]。因此，深入研究氯盐侵蚀性能对保障水利工程长期安全运行至关重要[2]。

近年来，国内外学者在氯盐侵蚀对混凝土性能影响方面开展了大量研究，取得了显著进展。陈国良[3]研究了环氧树脂-地聚物复合涂层对混凝土抗氯盐侵蚀性能的作用，发现复合涂层能有效提高混凝土的抗氯盐侵蚀能力，为混凝土结构的防护提供了新的思路；汪伟等[4]分析了机制砂与特细砂抗氯盐侵蚀混凝土的制备及性能，结果表明通过合理的

作者简介：刘 君（1986—），女，本科，工程师，研究方向：水利工程。

收稿日期：2024-12-27

配合比设计，可以制备出具有良好抗氯盐侵蚀性能的混凝土；吴波等[5]聚焦于掺有成孔碎渣的再生骨料混凝土的抗压及抗氯盐侵蚀性能，结果表明成孔碎渣的掺入对再生骨料混凝土的抗压强度影响不大，但能显著提高混凝土的抗氯盐侵蚀性能；葛文杰等[6]对氯盐侵蚀作用后钢－BFRP 复合筋混凝土梁的受弯性能进行了深入研究，发现氯盐侵蚀会降低混凝土梁的受弯承载力，但钢－BFRP 复合筋的使用能有效提高梁的耐久性；马晓彤[7]通过试验研究了废弃玻璃水工混凝土抗氯盐侵蚀性能，结果显示废弃玻璃的掺入能显著提高混凝土的抗氯盐侵蚀能力；蒋加森等[8]对路基工程用纤维混凝土的抗氯盐侵蚀性能进行了研究，发现纤维的掺入能显著提高混凝土的抗氯盐侵蚀性能；冯博等[9]对高性能混凝土在氯盐侵蚀和冻融循环作用下的耐久性进行了分析，研究表明高性能混凝土在氯盐侵蚀和冻融循环作用下的耐久性优于普通混凝土；李时媛[10]研究了牛粪灰对水工混凝土抗氯盐侵蚀性能的影响，发现牛粪灰的掺入能有效提高混凝土的抗氯盐侵蚀能力；金浩等[11]对含横向裂缝混凝土氯盐侵蚀所致锈裂面的细观分析表明，氯盐侵蚀会导致混凝土内部产生裂缝，进而加速混凝土的破坏；寇佳亮等[12]对氯盐－干湿侵蚀下高延性混凝土的力学性能试验及强度衰减模型进行了研究，为混凝土结构的寿命预测提供了依据；鲍玖文等[13-14]分别研究了干湿交替作用下碱激发混凝土和持压荷载与干湿循环作用下再生混凝土的氯盐侵蚀性能，研究表明，碱激发混凝土和再生混凝土在氯盐侵蚀环境下的性能表现良好；李钟等[15]研究了氯盐环境下粉煤灰对混凝土中钢筋的损伤度影响，发现粉煤灰的掺入能有效降低氯盐对混凝土中钢筋的损伤度，为粉煤灰在抗氯盐侵蚀混凝土中的应用提供了理论依据。

针对水库溢洪道泄槽面板这一特定工程部位相关研究较少，结合其实际工作环境和受力特点，系统研究了氯盐侵蚀对混凝土性能的影响，填补了该领域研究的空白。通过模拟实际工作环境，设计了干湿交替条件下的氯盐侵蚀试验，以此测试出所制备出的混凝土试件在不同氯盐侵蚀程度下的性能表现。

1　试验材料

试验选用的水泥为 P·O 42.5 硅酸盐水泥，具体力学性能指标见表 1，化学性能指标见表 2。

表 1　水泥力学性能参数

Table 1　Mechanical performance indicators of cement

抗压强度/MPa		抗折强度/MPa		凝结时间/min	
3 d	28 d	3 d	28 d	初凝	终凝
28.5	49.2	5.6	8.1	45	600

表 2　水泥化学成分含量

Table 2 Chemical composition content of cement　/%

SO_3	CaO	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	不溶物	烧失量	氯离子含量
2.8	65.2	20.5	5.1	3.0	0.5	2.9	0.01

试验所选用的粉煤灰适用于 F 类Ⅱ级混凝土，满足水库溢洪道泄槽面板的强度需求。具体物理性能指标见表 3，化学成分见表 4。

表 3　粉煤灰物理性能指标

Table 3　Physical performance indicators of fly ash

细度（45μm 筛余）/%	烧失量/%	含水量/%	需水量比/%	密度/(g/cm^3)	比表面积/(cm^2/g)
12.0	3.5	0.8	95.0	2.2	3000

表 4　粉煤灰主要化学成分含量

Table 4　Main chemical composition content of fly ash　/%

SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	TiO_2	K_2O	Na_2O	P_2O_5
52.0	25.5	8.0	5.0	1.5	1.0	0.8	1.2	1.0	0.5

试验所选用的矿渣粉等级为 S95，28 d 条件下的活性指数为 63.1，此外还选取了活性指数为 10% 的硅灰和粒径为 0.2 μm 的石英粉用于制备水泥溢洪道泄槽面板的混凝土样品。选用液体含固量不低于 40% 的减水剂作为外加剂。试验所采用的水库溢洪道混凝土泄槽面板配合比见表 5。

表 5　水库溢洪道混凝土泄槽面板配合比

Table 5　Mix proportion of concrete spillway panel for reservoir spillway　/%

水泥	粉煤灰	硅灰	矿渣粉	减水剂	钢纤维	水胶比	砂胶比
1	20	25	20	4	2	0.2	1.5

2　试验方法

2.1　氯盐干湿循环侵蚀试验

对制备出的水库溢洪道混凝土泄槽面板试件，进行氯盐干湿循环试验。设定 NaCl 溶液浓度分别为 5%、10%、15% 以及对照组为未添加 NaCl 溶液的清水组。

对四组混凝土试件进行初始称重，记录质量数据。设定干湿循环试验箱的浸泡温度为（20 ± 2）℃，

材料科学

浸泡时间为 1 h；设定干燥温度为（60 ± 5）℃，干燥时间为 12 h。分别将混凝土试件放入装有四种不同浓度的 NaCl 溶液的容器中，保证溶液能够覆盖试件表面。清水组试件作为对照组，不进行氯盐干湿循环处理，但需在相同条件下进行养护和称重。将装有试件的容器放入干湿循环试验箱中，启动试验程序。试验箱将自动按照设定的参数进行浸泡和干燥循环。在每次循环结束后，取出试件，用湿布轻轻擦去表面残留溶液，然后进行称重。记录每次循环后的质量数据，计算质量损失率。

2.2 氯盐侵蚀后混凝土试件力学性能测试

将四组试件置于压力试验机，以 0.5 MPa/s 的恒定速率加载至破坏，记录最大荷载并计算抗压强度和质量变化率。

2.3 试件 SEM 测试

在干湿循环条件下，对试件进行不同溶液（5%、10%、15% NaCl 溶液及对照组）侵蚀至 60、180、360 d 的试验后，将试件表层的混凝土碾成粉末状并利用 SEM（扫描电子显微镜）获取混凝土表层的微观结构和形貌变化图像。

3 试验结果与分析

3.1 混凝土质量变化率结果分析

试件在不同浓度 NaCl 溶液干湿循环下的质量变化率测试结果见表 6。

表 6 试件质量变化率测试结果

Table 6 Test results of mass change rate of specimens /%

测试周期/d	A 组 5% NaCl	B 组 10% NaCl	C 组 15% NaCl	D 组（清水对照组）
0	0.00	0.00	0.00	0.00
30	−0.20	−0.30	−0.40	−0.10
60	−0.35	−0.55	−0.70	−0.15
90	−0.25	−0.45	−0.55	−0.10
120	0.10	−0.10	−0.20	0.00
150	0.30	0.10	−0.05	0.05
180	0.45	0.30	0.10	0.10
210	0.55	0.40	0.25	0.15
240	0.60	0.45	0.35	0.20
270	0.65	0.50	0.40	0.25
300	0.70	0.55	0.45	0.30
330	0.72	0.58	0.48	0.32
360	0.75	0.60	0.50	0.35
390	0.78	0.62	0.52	0.38

在干湿循环前期（0～90 d），各组试件的质量变化率均为负值，表明试件质量出现了负增长。但在随后的干燥过程中，部分溶液蒸发或排出，同时试件内部可能发生了微小的物理或化学变化，导致质量减小。从第 5 干湿循环周期（150 d）之后，质量变化率由负值转为正值，试件质量开始出现逐渐增大的趋势。15% NaCl 溶液的质量变化率最大，为 0.78%，对应的质量变化为 1.75 g。但总体来看，5% NaCl、10% NaCl、15% NaCl 组溶液中的混凝土试件质量损失率均很小，质量损失较小。

3.2 混凝土抗压强度变化结果分析

不同浓度 NaCl 溶液侵蚀下，混凝土试件的抗压强度变化如图 1 所示。

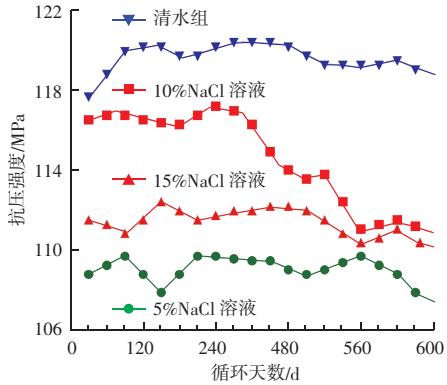


图 1 抗压强度变化结果

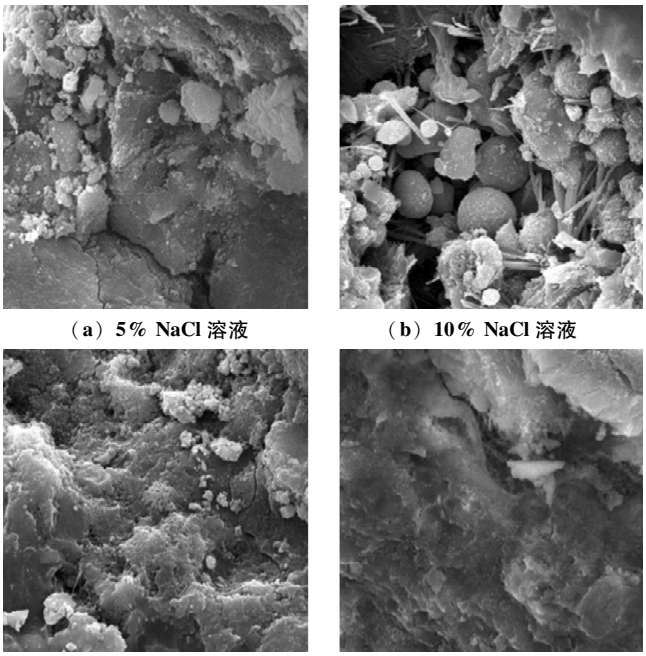
Fig. 1 Result of compressive strength change

在 0～90 d 的测试周期内，5%、10% 和 15% 的 NaCl 溶液中试件的抗压强度均呈现增长趋势。自 90 d 起，三组试件的抗压强度开始呈现下降趋势，并且随着 NaCl 溶液浓度的提升，强度的降低幅度也随之加剧。这表明氯盐对混凝土的侵蚀作用逐渐显现，导致混凝土内部结构受损，抗压强度降低。对比不同浓度的 NaCl 溶液，可以发现浓度越高，对混凝土的侵蚀作用越强。10% NaCl 的抗压强度下降幅度大于 5% NaCl，15% NaCl 的下降幅度则更大。其中 C 组在第 6 个干湿循环中的抗压强度变化率达到了最大值，为 −3.48%，对应的增量为 4.18 MPa。

3.3 SEM 电镜扫描结果

360 d 侵蚀下的水库溢洪道混凝土泄槽面板试件的 SEM 扫描结果如图 2 所示。

在 360 d 的干湿循环侵蚀后，5% NaCl 溶液中混凝土试件的孔隙分布率约为 12%（未侵蚀前的基准孔隙率 8%）。孔隙边缘略显粗糙，表明有轻微的盐结晶导致的侵蚀痕迹。水化产物形态基本保持完整，



（a）5% NaCl 溶液　（b）10% NaCl 溶液

（c）15% NaCl 溶液　（d）对照组

图 2　360 d 侵蚀条件下微观形态扫描结果

Fig. 2　Microscopic morphology scanning results under 360 day erosion conditions

但部分区域出现微小的裂缝，这可能是由于盐结晶产生的内应力所致。10% 的 NaCl 溶液中混凝土试件的孔隙率显著增加至约 18%，表明氯盐侵蚀作用较强。孔隙形态变得不规则，且边缘更加粗糙，伴有明显的盐结晶痕迹。水化产物形态受到较大影响，部分区域出现明显的剥落和破损，说明氯盐侵蚀已对混凝土的结构完整性造成了破坏。此外，还观察到较多的盐结晶颗粒填充在孔隙中，进一步加剧了混凝土的劣化。15% 的 NaCl 溶液中的孔隙率高达 25%，几乎覆盖了整个观察区域。孔隙形态极度不规则，且伴有大量的盐结晶颗粒。水化产物形态几乎完全丧失，此外还观察到大量的盐结晶颗粒堆积在孔隙和裂缝中，形成了明显的盐渍层。

4　结论

通过研究氯盐溶液浓度与侵蚀时间对混凝土耐久性的影响，具体得出了以下结论：

（1）NaCl 溶液浓度的增加和侵蚀时间的延长均对混凝土试件产生了显著影响。在高浓度氯盐（15% NaCl 溶液）环境下，混凝土试件表现出更大的质量变化率，最高达 0.78%，这揭示了氯盐侵蚀导致的混凝土内部损伤和物质累积的效应；

（2）抗压强度变化率的显著增加。在第 6 个干湿循环周期中达到 -3.48%，进一步证实了氯盐侵蚀对混凝土力学性能的负面影响。

这些发现为理解和改善水库溢洪道混凝土泄槽面板在氯盐环境下的耐久性提供了重要依据。

参　考　文　献

[1] 陶志仁，龙煜，廖鹏飞，等. 干湿交替环境下氯盐侵蚀混凝土徐变试验研究 [J]. 公路交通科技，2024，41（10）：112 - 119.

[2] 陆逸辉，孙丛涛，孙明，等. 氯盐侵蚀作用下纳米碳酸钙对海砂混凝土结合氯离子性能的影响 [J]. 腐蚀与防护，2024，45（9）：29 - 37.

[3] 陈国良. 环氧树脂 - 地聚物复合涂层对混凝土抗氯盐侵蚀性能的作用 [J]. 水利科学与寒区工程，2024，7（3）：40 - 42.

[4] 汪伟，赖增成，谭鹏，等. 机制砂与特细砂抗氯盐侵蚀混凝土的制备及性能研究 [J]. 硅酸盐通报，2024，43（6）：2121 - 2129.

[5] 吴波，丁金鹏. 掺有成孔碎渣的再生骨料混凝土的抗压及抗氯盐侵蚀性能 [J]. 华南理工大学学报（自然科学版），2023，51（9）：120 - 128.

[6] 葛文杰，张素康，张志文，等. 氯盐侵蚀作用后钢 - BFRP 复合筋混凝土梁受弯性能 [J]. 建筑结构学报，2023，44（8）：170 - 184.

[7] 马晓彤. 废弃玻璃水工混凝土抗氯盐侵蚀性能试验研究 [J]. 水利科学与寒区工程，2023，6（3）：53 - 55.

[8] 蒋加森，王文金，陈毕良，等. 路基工程用纤维混凝土抗氯盐侵蚀性能研究 [J]. 合成纤维，2023，52（2）：57 - 60，65.

[9] 冯博，刘青，钱永久. 高性能混凝土在氯盐侵蚀和冻融循环作用下的耐久性分析 [J]. 西南交通大学学报，2023，58（5）：1083 - 1089.

[10] 李时媛. 牛粪灰对水工混凝土抗氯盐侵蚀性能的影响研究 [J]. 水利技术监督，2022（12）：183 - 185.

[11] 金浩，李政，余朔. 含横向裂缝混凝土氯盐侵蚀所致锈裂面的细观分析 [J]. 应用力学学报，2022，39（3）：572 - 582.

[12] 寇佳亮，张卓越，景国强，等. 氯盐 - 干湿侵蚀下高延性混凝土力学性能试验及强度衰减模型研究 [J]. 自然灾害学报，2022，31（3）：199 - 212.

[13] 鲍玖文，张心钰，张鹏，等. 干湿交替作用下碱激发混凝土氯盐侵蚀性能 [J]. 硅酸盐学报，2022，50（6）：1607 - 1615.

[14] 鲍玖文，王云伟，牟新宇，等. 持压荷载与干湿循环作用下再生混凝土氯盐侵蚀行为 [J]. 复合材料学报，2023，40（2）：1015 - 1024.

[15] 李钟，邹挺. 氯盐环境下粉煤灰对混凝土中钢筋的损伤度影响测试 [J]. 粉煤灰综合利用，2023，37（6）：81 - 87.