刘老涧新闸混凝土力学特性与耐久性分析

吕晓波[1],周子琦[1],蔡 建[2],王明辉[3],张小童[1]
(1. 江苏省骆运水利工程管理处,江苏 宿迁 223600; 2. 宿迁市水务勘测设计研究有限公司,江苏 宿迁 223600;
3. 宿迁市水务工程建设管理中心,江苏 宿迁 223600)

摘要:为揭示既有水工结构在典型河湖调蓄环境下的耐久性退化模式,基于刘老涧新闸5个关键区段开展现场取样,系统检测其抗压强度、碳化深度、氯离子扩散系数、孔结构、抗渗与抗冻性能等指标,对结构建成多年后的材料状态进行全面评估。相关研究成果不仅明确了老旧水工建筑在复杂水文气候背景下的关键退化机制,也为类似水闸和河湖调控建筑的耐久性评估、运行维护与加固设计提供了工程依据。

关键词:水工建筑物; 力学特性; 混凝土; 耐久性; 刘老涧新闸
中图分类号:TV66 **文献标识码:**A **文章编号:**1007-7839(2026)04-0059-0004

Analysis of mechanical properties and durability of concrete for Liulaojian New Sluice

LYU Xiaobo[1], ZHOU Ziqi[1], CAI Jian[2], WANG Minghui[3], ZHANG Xiaotong[1]
(1. *Luoyun Hydraulic Project Management Division of Jiangsu Province, Suqian* 223600, *China*;
2. *Suqian Water Survey, Design and Research Co., Ltd., Suqian* 223600, *China*;
3. *Suqian City Water Conservancy Engineering Construction Management Center, Suqian* 223600, *China*)

Abstract: To reveal the durability degradation mode of existing hydraulic structures in typical river and lake regulation and storage environments, on-site sampling was carried out at five key sections of the Liulaojian New Sluice. Indicators including compressive strength, carbonation depth, chloride ion diffusion coefficient, pore structure, impermeability, and frost resistance were systematically tested, and the material state of the structure after many years of construction was comprehensively evaluated. The relevant research results not only clarify the key degradation mechanisms of aging hydraulic structures under complex hydrological and climatic conditions, but also provide engineering basis for the durability assessment, operation and maintenance, and reinforcement design of similar sluices and river-lake regulation structures.

Key words: hydraulic structures; mechanical properties; concrete; durability; Liulaojian New Sluice

1 概 述

水工建筑混凝土在湿干循环、水位涨落、高湿环境以及冬季低温干燥等耦合作用下易产生结构老化,其耐久性退化过程具有显著的环境敏感性与空间差异性[1]。关于水工混凝土碳化、氯离子侵蚀、冻融损伤及孔结构演化的研究已较多[2-4],但这些成果多基于试验构件、实验室暴露试验或单一环境条件下的劣化分析,对实际工程中多环境共存作用下的服役劣化模式尚缺乏系统性认知。对于通航、行洪与区域供水系统中的控制性建筑物,尤其是河湖交互环境中的闸门工程,其长期安全运行直接关系到区域防洪调度、航运保障及水资源安全[5]。因此,明确不同服役环境区段(如水上干燥区、水位变动

收稿日期: 2025-12-03
作者简介: 吕晓波(1987—),男,高级工程师,本科,主要从事水利工程建设与管理工作。E-mail:313447522@qq.com

区、水下饱水区等)的混凝土性能演变特征,是准确评估老龄闸门结构耐久性与制定加固策略的重要前提。然而,现有文献多聚焦于老旧水闸的结构病害调查[6]、局部构件破损识别[7]或水下损伤检测[8],对混凝土材料在复杂水文气候条件下的分区劣化规律揭示不足,特别是缺少基于实际构件长期服役状态的系统材料测试与机制分析。

刘老涧水利枢纽新闸建成于1976年,是京杭大运河宿豫段的重要控制节点,同时承担沂沭泗地区行洪调度、骆马湖水量安全保障及区域供水等多重功能[9]。本研究围绕老龄闸门结构的材料耐久性开展系统研究,针对不同环境区段开展原位取样与多指标材料测试,以获取结构在长期服役条件下的真实劣化特征。根据检测结果归纳出具有普适性的老旧水工建筑混凝土劣化模式以及主导结构退化的核心机制,并据此提出适用于同类工程的运行维护建议。

2 区域气候与工程概况

宿迁市位于暖温带半湿润季风区,四季分明,冬季寒冷干燥、夏季炎热多雨,具有典型的季风环流特征。多年平均气温约14 ℃,夏季(5–9月)降水集中,年均降水量达922 mm,蒸发量约1 050 mm。冬季长期处于低温干燥环境,极端高温和强降雨事件亦时有发生。相对湿度季节变化明显,夏季平均湿度可达84%。在此气候背景下,区域混凝土结构普遍面临湿干交替、季节性高湿及温度骤变等耐久性挑战。

刘老涧水利枢纽位于京杭大运河中运河宿豫段,由一站、二站及刘老涧新闸组成,是承担沂沭泗地区行洪下泄、保障骆马湖安全及维持区域航运与供水的重要控制节点。其中,新闸设计过水能力为400 m^3/s,是枢纽运行安全的核心工程。新闸建成于1976年,由反拱底板、预制薄壳闸墩、钢结构直升闸门及简支式交通桥组成,2019年水下检测显示闸底及局部结构存在剥蚀与破损。

3 混凝土力学性能分析

为掌握其建成近半个世纪以来的混凝土劣化规律与耐久性现状,本研究对新闸的工作桥、闸墩水上干燥区、闸墩水位变动区、闸墩水下部位和底板关键位置进行了现场取样,并对所得混凝土样品开展了系统的性能检测与分析。检测内容包括抗压强度、碳化深度、氯离子扩散系数、孔结构特征以及抗渗和抗冻性能等关键指标,以期从力学性能全面评估该结构在运行多年后的材料状况。

3.1 混凝土力学性能

3.1.1 抗压强度

新闸混凝土强度呈现显著的空间差异,如表1所示。其中,闸墩水位交替区与水上干燥区的强度分别为27.7 MPa和21.7 MPa,表明该部位可能受到早期施工质量与长期湿干循环以及轻微冻融累积损伤等多重因素的共同影响,导致材料性能下降。相比之下,闸墩水下部位与底板混凝土的强度显著高于设计值,闸墩水下部位更是达到44.9 MPa,完全满足C35要求,显示出良好的致密性与力学稳定性。2014年的检测结果[10]与本次测试高度一致,进一步证明闸墩水上和水位变动区处于材性弱化状态,而深水环境对混凝土强度的保持具有明显的保护作用。

表1 抗压强度试验结果

所在部位	抗压强度/MPa	混凝土强度等级最小值
工作桥	50.0	C40
闸墩水上干燥区	27.7	C20
闸墩水位变动区	21.7	C15
闸墩水下部位	44.9	C35
底板	44.0	C35

3.1.2 碳化深度

混凝土钢筋保护层厚度及碳化深度见表2,各部位的钢筋保护层厚度总体满足结构耐久性要求,但碳化深度在空间上呈现明显差异。工作桥的保护层厚度在20~32 mm之间,平均约28 mm;闸墩外壳混凝土的保护层厚度为28~37 mm,均处于合理范围。相比之下,各测点的碳化深度分布较为离散。闸墩水上部位的平均碳化深度达到19.3 mm,个别测点甚至达到31.5 mm,已逼近保护层最小厚度,表明碳化前沿正逐步接近钢筋界面。该部位碳化较深,可能与其内部较大的孔隙结构以及长期处于相

表2 混凝土钢筋保护层厚度及碳化深度

部位	钢筋保护层厚度均值/mm	碳化深度均值/mm
工作桥	28	1.7
闸墩水上	33	19.3
闸墩水位变动区	32	1.8
闸墩水下	34	0.7
底板	–	0.0

对湿度60~70%的适宜碳化环境有关，使闸墩水上部位与工作桥成为碳化敏感区域。

3.1.3　氯离子扩散系数

氯离子扩散系数测试如表3所示，结果表明闸墩水上区与水位变动区的扩散系数普遍偏大，反映其孔隙结构较为疏松，对外界侵蚀离子的抵抗能力较弱。尽管工程所在环境缺乏显著的氯盐来源，该结果仍表明这些部位更容易在长期服役过程中受到侵蚀性介质的影响。相比之下，底板和水下混凝土扩散性能稳定，体系致密性较高，侵蚀敏感性显著较低。总体来看，扩散系数分布与强度空间格局具有一致性。

表3　混凝土氯离子扩散系数

部位	氯离子扩散系数/(10^{-12} m²/s)
工作桥	10.6
闸墩水上	20.6
闸墩水位变动区	15.7
闸墩水下	12.1
底板	6.3

3.1.4　孔结构

孔结构与混凝土的一系列力学、耐久性能直接相关，压汞试验结果揭示出闸墩水上区与水位变动区的孔隙率分别为17.6%和19.1%。工作桥的孔隙率较低，但孔径偏大，为40.5 nm；而水下部位孔结构最为致密，整体性能良好。此外，孔隙结构差异与抗压强度、氯离子扩散系数空间变化趋势高度一致，分别如图1和图2所示，表明孔结构是决定现阶段混凝土耐久性分布格局的关键因素，其控制机制与服役环境长期影响密切相关。

3.1.5　抗渗与抗冻性能

抗渗试验结果显示，工作桥、闸墩水下部位以及底板在逐级加压过程中均未出现透水现象，说明其孔隙结构致密、抗渗能力保持良好。本工程已服役多年且外界缺乏氯离子侵蚀源，现阶段的抗渗性能仍可满足耐久性需求。相较之下，闸墩水上区和水位变动区出现少量透水试件，抗渗性能明显偏弱，与其较低强度和较高孔隙率相一致。整体来看，长期湿干交替对材料致密性的削弱作用十分显著，而处于常年饱水环境的结构则因“天然养护”效应保持了更高的稳定性与致密性。

气泡参数分析（表4）进一步反映了混凝土的抗冻性能。各部位的含气量与气泡间距系数均满足抗冻要求的关键阈值，表明材料具备抵抗冻融循环的能力。结合宿迁地区冻融循环次数较少的气候条件，可推断该工程混凝土在服役过程中并未遭受显著的冻融损伤。尽管局部区域抗压强度偏低，但综合微观孔隙结构与环境作用分析可知，冻融并非导致其抗冻性能弱化的主导因素。

4　混凝土耐久性评价

碳化是影响本工程混凝土耐久性的最突出问题。碳化不仅降低混凝土碱度、破坏钢筋钝化膜，

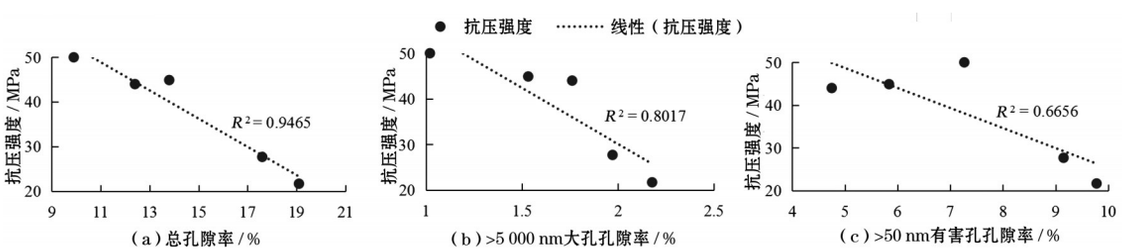

图1　不同孔隙率与抗压强度的相关性

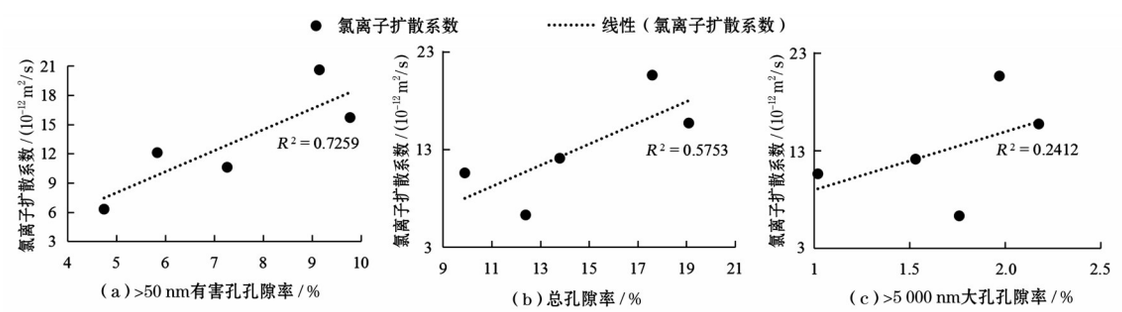

图2　不同孔隙率与氯离子扩散系数的相关性

表4 气泡参数试验结果

部位	含气量/%	气泡间距系数/mm
工作桥	3.2	0.17
闸墩水上	2.6	0.24
闸墩水位变动区	5.1	0.10
闸墩水下	1.2	0.19
底板	4.5	0.12

还可能诱发收缩，且其速率受孔结构与温湿度显著控制。检测结果显示，闸墩水上部位的碳化最为严重，这是由于其长期处于相对湿度40%~70%的最不利区间，同时温度较高，导致碳化反应加速。其次为水位变动区，该部位经历反复湿干循环，使CO_2容易侵入，碳化程度与工作桥相近。从孔结构参数来看，闸墩水上部位总孔隙率最高，工作桥的平均孔径和中位孔径最大，均不利于抵抗碳化发展，而常年处于饱水状态的底板几乎不发生碳化。尽管局部碳化较深，但混凝土强度整体未表现出明显劣化，与部分工程中出现的混凝土强度显著衰减现象不同。

渗透性作为混凝土的本质属性，是决定环境介质侵入能力的重要指标，与孔结构和氯离子扩散系数密切相关。试验表明，本工程各部位氯离子扩散系数整体偏大，但由于服役环境中不存在氯离子来源，该指标对氯盐侵蚀耐久性的影响有限。然而，偏大的扩散系数反映了砂浆孔结构的不足，使其抵御外界CO_2的能力下降，从而间接加剧碳化风险。

冻融环境对本工程的影响相对较弱。宿迁地区属少冻区，年当量冻融循环次数通常仅为2~6次，依据相关研究与规范，这一频次不足以对混凝土产生显著冻融破坏。气泡参数分析结果表明，各部位的含气量与气泡间距系数均满足抗冻耐久性的要求，说明其内部微结构具备抵御冻融损伤的能力。因此，在本工程中，冻融并非导致材料弱化的主导因素，仅可能对水位变动区造成轻微影响。

5 结论与建议

本研究通过对刘老涧新闸运行多年后的5个关键构件开展系统取样与多指标检测，全面评估了其混凝土的耐久性现状，并揭示了不同环境区段的劣化机理。结果表明，闸墩水上干燥区与水位变动区是整体耐久性较为薄弱的部位，其中混凝土碳化是主导结构退化的核心机制。碳化深度较大，与孔结构疏松、抗渗性能不足及长期湿干循环等因素密切相关。相比之下，处于持续饱水环境的水下部位和底板结构更为致密，表现出较好的耐久性。虽然各部位氯离子扩散系数较高，但环境中缺乏氯盐侵蚀源，因此未构成实际风险，冻融循环在当地气候条件下影响亦极为有限。总体来看，该工程的主要耐久性风险来源于碳化引发的钢筋锈蚀，其退化模式在类似河湖水工建筑中具有典型性。

鉴于碳化主导型退化在具有湿干交替显著、相对湿度适宜碳化且孔结构易劣化的水工构筑物中普遍存在，建议类似工程在运行阶段重点监测水上干燥区与水位变动区的碳化发展和钢筋锈蚀状况，建立包括碳化深度、孔结构特征和钢筋状态在内的长期监测体系。对碳化程度增大或保护层厚度不足的构件，应及时采取表面防护、加厚保护层或使用抑制碳化材料等措施进行预防性加固。对新建或改建工程，应从材料设计源头强化孔结构优化，提高混凝土致密性与抗渗性能，以提升结构在长期服役条件下的整体耐久性。本研究的结论与建议对老旧水工建筑的耐久性评估、寿命预测与维护管理具有一定的参考价值和工程适用性。

参考文献：

[1] 李雄润. 水工混凝土结构长期水压作用下强度退化机理研究[J]. 水利技术监督，2025(8)：164-168.

[2] 吕春雨. 水工混凝土抗碳化性能试验研究[J]. 黑龙江水利科技，2024，52(1)：9-11.

[3] 李文，高士岐，刘晓婷，等. 混凝土强度对冻融循环后十字形SRC柱抗震性能影响[J]. 沈阳大学学报(自然科学版)，2025，37(6)：505-512.

[4] 薛鹏波. 基于多级孔隙结构优化的透水混凝土力学性能与渗透性能研究[J]. 砖瓦，2025(11)：92-96.

[5] 薛拓，李玉臣，蔡殿卿，等. 北京市通州区小型水闸耐久性分析及应对措施[J/OL].北京水务，2025，12：1-6[2025-12-04]. https://doi.org/10.19671/j.1673-4637.2025.06.004.

[6] 谭彩，徐云乾，袁明道，等. 水闸水下结构病害探地雷达波场特征及瞬时属性分析[J]. 水电能源科学，2025，43(6)：153-157.

[7] 魏文杰. 水闸加固施工技术及应用案例浅析[J]. 山东水利，2025(8)：21-23.

[8] 杜超，李聪，谭勇. 闸阀门启闭机液压系统多通道运行状态检测装置研发应用[J]. 中国水运，2025(19)：105-107.

[9] 孙圣杰，伏杰，郭伟，等. 宿迁市刘老涧泵站加固改造工程水土保持效果评价[J]. 江苏水利，2025(1)：57-60.

[10] 陈伟，周文恒，李学德. 刘老涧新闸除险加固工程初步设计报告[R]. 南京：江苏省水利勘测设计研究院有限公司，2020：73.