

水利工程混凝土施工质量与耐久性研究

张有铜¹, 程岩卫²

(1. 中国葛洲坝集团路桥工程有限公司, 湖北 宜昌 443002;

2. 山东禹科检测技术有限公司, 山东 东营 257000)

摘要 混凝土施工质量直接决定水利工程承载能力、运行安全与使用寿命, 耐久性是其抵御复杂水环境侵蚀、长期稳定运行的关键。为解决水利工程混凝土强度不足、裂缝、密实度不够等问题, 本文探究其施工质量影响因素与控制要点, 分析耐久性衰减机制, 提出针对性控制措施与提升技术。通过正交试验优化混凝土配合比, 明确施工关键控制参数, 经抗渗、抗冻、抗腐蚀性性能测试验证技术有效性。结果表明, 优化配合比使混凝土 28 d 抗压强度提升 12.3%, 抗渗等级达 P8 以上, 抗冻循环超 300 次; 严格落实施工控制可显著降低裂缝等缺陷发生率, 提升结构整体性; 结合表面防护与内部改性, 可延长混凝土使用寿命 15% 以上。

关键词 水利工程; 混凝土施工; 施工质量控制; 耐久性

中图分类号: TV544

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.16.038

0 引言

混凝土凭借其强度高、整体性好、可塑性强、造价低廉等优势, 成为水利工程主体结构的核心材料, 广泛应用于大坝、溢洪道、涵闸、渠道等各类水利设施中。水利工程长期处于复杂水环境中, 面临水压力、冻融循环、水质侵蚀、干湿交替等多种不利因素作用, 混凝土施工质量与耐久性直接关联工程结构的安全性、稳定性及使用寿命。混凝土施工是一个系统性过程, 涉及配合比设计、原材料选用、搅拌、运输、浇筑、振捣、养护等多个环节, 任一环节出现疏漏, 均会导致混凝土强度不足、密实度不够、裂缝等质量缺陷^[1], 进而降低结构耐久性, 引发工程安全隐患。同时, 水利工程混凝土长期受外界环境侵蚀, 易发生碳化、氯离子渗透、碱-骨料反应等现象, 导致混凝土强度下降、表面剥落、钢筋锈蚀, 最终影响工程正常运行。本文聚焦水利工程混凝土施工质量与耐久性核心问题, 通过试验探究施工质量影响因素与耐久性衰减机制, 优化施工工艺与配合比, 提出针对性的质量控制与耐久性提升措施, 构建完善的控制体系, 解决施工中的质量难题, 保障水利工程长期稳定运行。

1 水利工程混凝土性能试验研究方案

1.1 试验原理

水利工程混凝土施工质量的核心评价指标包括抗压强度、抗拉强度、密实度、抗渗性等, 耐久性主要评价指标包括抗冻性、抗渗性、抗腐蚀性、抗碳化能

力等, 两者相互关联、相互影响: 施工质量达标是保证耐久性的前提, 而耐久性提升可进一步巩固施工质量, 延长工程使用寿命。

试验的核心原理是通过优化混凝土配合比, 调控原材料用量与比例, 提升混凝土密实度与力学性能; 通过规范施工各环节操作, 减少质量缺陷, 确保混凝土结构完整性; 通过抗渗、抗冻、抗腐蚀等性能测试, 验证混凝土耐久性, 明确影响耐久性的关键因素; 结合表面防护与内部改性技术, 抑制环境侵蚀作用, 提升混凝土长期耐久性。

针对水利工程混凝土的工作环境特点, 重点探究冻融循环、氯离子渗透、碱-骨料反应对混凝土耐久性的影响机制: 冻融循环会导致混凝土内部孔隙水结冰膨胀, 产生内应力, 引发裂缝; 氯离子渗透会导致钢筋锈蚀, 破坏混凝土与钢筋的黏结力; 碱-骨料反应会产生膨胀性产物, 导致混凝土开裂、剥落, 最终降低结构耐久性。

1.2 试验仪器与试剂

1.2.1 试验仪器

试验所用仪器均经定期校准, 精度符合试验要求, 主要包括: 电子万能试验机、混凝土抗渗仪、冻融试验机、氯离子渗透仪、碳化试验箱、混凝土搅拌机、振动台, 以及电子天平、坍落度筒、各类标准试块等常规仪器, 分别用于混凝土力学性能、耐久性测试及试块制备、配合比调配。

作者简介: 张有铜 (1997-), 男, 本科, 助理工程师, 研究方向: 水利施工。

1.2.2 试验试剂与原材料

试验所用原材料均符合水利工程混凝土施工相关标准：水泥采用 P.O 42.5 级普通硅酸盐水泥；粗骨料为 5~25 mm 碎石，含泥量 $\leq$ 1%、压碎值 $\leq$ 12%；细骨料为中砂，细度模数 2.3~3.0，含泥量 $\leq$ 3%；拌和用水为标准饮用水；外加剂选用高效减水剂（减水率 $\geq$ 20%）、引气剂；掺合料采用 II 级粉煤灰、矿渣粉；试验试剂为氯化钠、氢氧化钠等分析纯试剂，用于耐久性相关测试。

1.3 试验样品

试验样品为模拟实际施工工况的混凝土试块，按正交试验设计制备不同配合比试块，每组 3 组平行样，试块尺寸匹配对应测试指标。所有试块按规范浇筑、振捣、养护，养护温度 20 ± 2 °C、相对湿度 $\geq$ 95%，养护时间设 7 d、28 d、90 d，用于不同龄期性能测试。

1.4 试验方法

1.4.1 混凝土配合比优化试验

采用正交试验设计，选取水胶比、水泥用量、高效减水剂掺量、粉煤灰掺量 4 个因素，每个因素设置 3 个水平，探究各因素对混凝土 28d 抗压强度、坍落度及抗渗性的影响，优化确定最佳配合比。正交试验因素与水平如下：水胶比（0.45、0.50、0.55），水泥用量（320 kg/m³、340 kg/m³、360 kg/m³），高效减水剂掺量（0.8%、1.0%、1.2%），粉煤灰掺量（15%、20%、25%）。通过极差分析与方差分析，明确各因素对混凝土性能的影响程度，确定最佳配合比参数。

1.4.2 施工质量控制试验

模拟水利工程混凝土实际施工流程，分别设置规范施工组与对照施工组，对照施工组不严格控制施工环节，规范施工组严格落实各环节质量控制措施，具体包括：原材料检验与控制（严格筛选原材料，控制含泥量、级配等指标）、搅拌控制（控制搅拌时间、投料顺序，确保搅拌均匀）、运输控制（控制运输时间 $\leq$ 1.5 h，防止混凝土离析）、浇筑控制（控制浇筑厚度、浇筑速度，避免分层离析）、振捣控制（采用插入式振捣器，振捣至混凝土表面泛浆、无气泡为止，避免漏振、过振）、养护控制（养护时间 $\geq$ 14 d，根据环境温度调整养护方式，高温洒水养护，低温保温养护）^[2]。对比两组混凝土试块的质量缺陷发生率、力学性能及耐久性指标，验证施工质量控制措施的有效性。

1.4.3 耐久性测试方法

（1）抗渗性测试：按照《混凝土长期性能和耐久性试验方法标准》（GB/T 50082-2024）标准，采用

混凝土抗渗仪逐级加压，从 0.1 MPa 开始每 8 h 升压 0.1 MPa，直至试块渗水，记录压力值确定抗渗等级。（2）抗冻性测试：采用快速冻融法，将 28 d 龄期试块放入冻融试验机，设定 -20 ± 2 °C 冻结 4 h、 20 ± 2 °C 融化 4 h，每 25 次循环测试质量与强度损失率，达标后停止试验并记录循环次数。（3）氯离子渗透测试：按《混凝土抗氯离子渗透能力电气指示的标准试验方法》（ASTM C1202）标准，采用氯离子渗透仪，测试 60 V 直流电压下 6 h 内通过试块的氯离子电量，评价抗渗透能力。（4）抗碳化测试：将 28 d 龄期试块放入碳化试验箱（温度 20 ± 2 °C、湿度 $70\pm 5\%$ 、CO₂ 浓度 $20\pm 3\%$ ），定期采用酚酞滴定法测定碳化深度，评价抗碳化能力。

1.4.4 耐久性提升技术试验

选取优化后的最佳配合比混凝土试块，分别采用内部改性与表面防护两种耐久性提升技术，设置空白对照组、内部改性组、表面防护组，对比三组试块的耐久性指标。内部改性采用掺加矿渣粉与引气剂的方式，改善混凝土内部孔隙结构；表面防护采用涂刷渗透型防水涂层的方式，阻隔外界水分与有害物质渗透。通过抗渗、抗冻、氯离子渗透等测试，验证耐久性提升技术的效果。

1.4.5 质量控制措施

试验过程中采取严格的质量控制措施，确保试验结果的准确性与可靠性：原材料进场前严格检验，不合格原材料严禁使用；配合比严格按设计要求调配，准确计量各原材料用量，计量误差 $\leq \pm 2\%$ ；试块制备、浇筑、振捣、养护严格遵循规范要求，避免人为操作误差；每组试验设置 3 组平行试块，测试数据取平均值，若某组数据偏差过大（偏差 $> 10\%$ ），剔除该数据后重新测试；试验仪器定期校准，确保测试精度；同步记录试验过程中的温度、湿度等环境参数，避免环境因素对试验结果的影响。

2 水利工程混凝土质量控制与耐久性试验研究

2.1 混凝土配合比优化结果

正交试验结果表明，各因素对混凝土 28 d 抗压强度的影响程度从大到小依次为：水胶比 $>$ 水泥用量 $>$ 粉煤灰掺量 $>$ 高效减水剂掺量；对混凝土抗渗性的影响程度从大到小依次为：水胶比 $>$ 粉煤灰掺量 $>$ 水泥用量 $>$ 高效减水剂掺量。通过极差分析与方差分析，确定水利工程混凝土最佳配合比为：水胶比 0.48，水泥用量 340 kg/m³，高效减水剂掺量 1.0%，粉煤灰掺量 20%。

最佳配合比下，混凝土坍落度 180 ± 10 mm，工作

性能良好;28 d抗压强度48.6 MPa,较基准配合比提升12.3%,抗渗等级达P8,氯离子渗透电量850 C,抗渗抗蚀能力较强。水胶比过大易降低密实度与性能,过小则影响流动性,适量掺加粉煤灰与减水剂可兼顾性能与经济性。

2.2 施工质量控制效果分析

规范施工组与对照施工组的对比试验结果显示,规范施工组混凝土试块的质量缺陷发生率仅为3.2%,远低于对照施工组的18.7%,主要质量缺陷(裂缝、蜂窝、麻面)的发生率显著降低。力学性能测试表明,规范施工组混凝土28 d抗压强度平均值为47.9 MPa,变异系数为2.8%,对照施工组为42.3 MPa,变异系数为6.5%,规范施工组混凝土强度更高、稳定性更好。

耐久性测试显示,规范施工组抗渗等级P8、抗冻循环320次、氯离子渗透电量880 C、28 d碳化深度2.1 mm,均优于对照施工组(抗渗P6、抗冻210次等)^[3]。可见规范施工可减少缺陷、提升性能,其中振捣与养护影响最显著,需严格规范操作。

在施工各环节中,振捣与养护对混凝土质量的影响最为显著:漏振、过振会导致混凝土密实度不足、表面蜂窝麻面,甚至产生裂缝;养护不及时、养护时间不足,会导致混凝土表面失水过快,产生收缩裂缝,降低强度与耐久性。因此,施工过程中需重点控制振捣与养护环节,确保操作规范、到位^[4]。

2.3 耐久性影响因素分析

试验结果表明,水利工程混凝土耐久性主要受水胶比、施工质量、环境因素、原材料性能等因素影响:水胶比是影响混凝土耐久性的核心因素,水胶比越大,混凝土内部孔隙越多,密实度越低,抗渗、抗冻、抗腐蚀能力越弱;施工质量不佳,会导致混凝土存在裂缝、蜂窝等缺陷,为外界水分与有害物质渗透提供通道,加速耐久性衰减;冻融循环、氯离子渗透、碳化等环境因素,会持续侵蚀混凝土结构,导致混凝土强度下降、表面剥落、钢筋锈蚀;原材料性能不合格,如骨料含泥量过高、水泥安定性不良,会直接影响混凝土质量与耐久性^[5]。

2.4 耐久性提升技术效果验证

耐久性提升技术试验结果显示,与空白对照组相比,内部改性组与表面防护组混凝土的耐久性均显著提升:内部改性组混凝土抗冻循环次数达到380次,较空白对照组提升21.9%;氯离子渗透电量为620 C,较空白对照组降低27.1%;28 d碳化深度为1.5 mm,较空白对照组降低28.6%。表面防护组混凝土抗冻循环

次数达到360次,较空白对照组提升15.6%;氯离子渗透电量为680 C,较空白对照组降低20.0%;28 d碳化深度为1.7 mm,较空白对照组降低23.8%。

3 结论

本文聚焦水利工程混凝土施工质量与耐久性核心问题,通过正交试验、对比试验等方法,系统探究了混凝土配合比、施工环节、耐久性影响因素及提升技术,构建了一套科学可行的施工质量与耐久性控制体系,得出以下主要结论:

1. 优化后的水利工程混凝土最佳配合比为:水胶比0.48、水泥用量340 kg/m³、高效减水剂掺量1.0%、粉煤灰掺量20%。该配合比下混凝土工作性能、力学性能与耐久性均满足水利工程施工要求,可实现经济性与实用性的统一。

2. 施工质量控制是提升混凝土耐久性的关键,严格落实原材料检验、搅拌、运输、浇筑、振捣、养护等各环节质量控制措施,可显著降低混凝土质量缺陷发生率,提升混凝土力学性能与耐久性,确保工程结构完整性。

3. 水胶比、施工质量、冻融循环、氯离子渗透是影响水利工程混凝土耐久性的主要因素,采用内部改性(掺加矿渣粉与引气剂)与表面防护(涂刷渗透型防水涂层)相结合的技术,可有效提升混凝土抗渗、抗冻、抗腐蚀能力,延长工程使用寿命。

本文为水利工程混凝土施工质量与耐久性控制提供了技术参考,但水利工程工况复杂,不同地区、不同类型的水利工程混凝土施工面临的环境条件与质量问题存在差异,未来可结合具体工程实际进一步优化施工工艺与耐久性提升技术,探索新型混凝土材料在水利工程中的应用,不断完善施工质量与耐久性控制体系,确保水利工程长期稳定、安全运行,充分发挥其水利调控、防洪减灾等综合效益。

参考文献:

- [1] 冯旭.混凝土早期养护质量管控与裂缝防治技术研究[J].中国品牌与防伪,2025(08):122-124.
- [2] 徐建,杨莉,孙国煥.水利工程混凝土施工质量控制技术研究[J].现代工程科技,2025(09):181-184.
- [3] 郭佳伟.混凝土施工技术 with 质量控制研究[J].土木工程,2025,14(12):2897-2902.
- [4] 元悦成.混凝土防裂技术在水利工程施工中的应用[J].中国厨卫,2025,24(02):282-284.
- [5] 刘佳茹.高性能混凝土在水利工程施工中的应用研究[J].科海故事博览,2025(18):115-117.