

水利工程混凝土质量检测技术方法探析

于海歌 邢 锋

通辽市水利规划设计研究院有限公司 内蒙古 通辽 028000

摘 要: 水利工程混凝土须满足强度、抗渗、抗冻、抗腐蚀等严苛标准, 兼顾结构安全与耐久。受材料、工艺及环境影响, 易产生多种病害。本文阐述质量标准与成因, 分析破损、无损及耐久专项检测技术的原理与水利适配性, 指出工况错配、操作不规范、老旧结构精度不足等问题, 提出多场景优化选型与管控流程, 并展望智能检测技术, 为水工混凝土质控提供参考。

关键词: 水利工程; 混凝土质量; 检测技术方法

引言: 混凝土是水利枢纽、渠道、护坡等构筑物核心主材。工程中干湿交替、冻融冲刷、化学侵蚀等特殊工况显著增加质量管控难度, 并对设计阶段材料选型与防护措施提出更高要求。当前运维中病害频发, 传统检测技术贴合工况不足、误差突出, 难以满足长效服役需求。为此, 依托行业规范, 系统梳理检测技术优劣, 补齐现场检测短板, 优化全流程质控方案, 对保障工程稳定性、延长服役年限具有重要工程价值。

1 水利工程混凝土质量核心要求及质量病害分析

1.1 水利工程混凝土专属性能质量标准

(1) 强度管控。混凝土强度须满足设计标号, 常用C20~C40, 大坝、溢洪道等关键部位不低于C30, 按承载能力极限状态确定安全储备。28d抗压强度合格率100%, 任一试件不低于设计值85%; 现场回弹法、钻芯法抽检, 强度变异系数 ≤ 0.15 。(2) 抗渗抗冻。抗渗等级不低于W6(水头大时W8~W12), 逐级加压法检测。抗冻等级依最冷月均温确定, 严寒地区F300以上, 快冻法后相对动弹模量 $\geq 60\%$, 质量损失率 $\leq 5\%$ ^[1]。设计据水位变幅和冻融环境选定等级并配构造措施。(3) 抗碳化抗腐蚀。50年使用期内碳化深度 $\leq$ 钢筋保护层厚度, 控制 $\leq 25\text{mm}$ (28d快速碳化试验)。沿海或盐碱地区, 抗硫酸盐腐蚀等级 $\geq \text{KS120}$, 氯离子扩散系数 $\leq 1.5 \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$, 水胶比 ≤ 0.45 ; 设计结合侵蚀介质附加防腐层或掺合料。

1.2 水利工程混凝土常见质量病害类型

(1) 表层病害: 裂缝、蜂窝麻面、露筋缺陷。裂缝包括干缩裂缝(宽度0.1~0.3mm)和温度裂缝(贯穿性); 蜂窝麻面表现为表面缺浆、骨料外露; 露筋缺陷常因保护层垫块移位或振捣不足导致钢筋裸露。(2) 内部病害: 空洞、密实度不足、骨料离析问题。空洞多出现在钢筋密集区或下料过高处, 超声波检测可识别; 密

实度不足表现为声速偏低($\leq 4000 \text{m/s}$); 骨料离析则使粗骨料集中, 砂浆包裹不均, 降低整体均质性。(3) 服役期病害: 水蚀冻融损伤、酸碱腐蚀破损。高速水流冲刷形成冲磨坑; 反复冻融导致表面剥落、内部微裂缝发展; 酸雨或酸性污水腐蚀使表面砂浆溶解, 碱骨料反应产生网状裂缝, 严重时可导致结构失稳。设计时若未针对水位变动区设置抗冲耐磨面层或排水系统, 会加剧上述病害发展。

2 水利工程主流混凝土质量检测技术分类与应用原理

2.1 破损类混凝土质量检测技术

(1) 钻芯法检测原理与操作流程: 原理是从混凝土中钻取芯样, 通过芯样表观观察(骨料分布、裂缝、空洞、离析)及室内抗压试验, 直接评定强度与内部质量。操作流程: 钢筋检测仪避开主筋确定取芯位置→固定钻机并通水冷却→匀速钻进→取出芯样→切割两端并打磨平整→进行抗压试验。芯样直径一般为 $\Phi 75 \text{mm}$ 或 $\Phi 100 \text{mm}$, 高径比1:1。该方法结果直观, 常用于质量仲裁, 且取芯位置应结合设计图纸避开应力集中区和主要受力钢筋。(2) 拔出法强度检测技术要点: 通过拉拔预埋或后装的锚固件使局部混凝土产生锥形破坏, 根据极限拔出力换算抗压强度。后装法要点: 钻孔→扩槽→安装锚盘→锚固深度精确控制(约25mm)→缓慢连续加载→记录峰值拔出力^[2]。测点间距不小于150mm, 避开钢筋或边缘。需建立专用测强曲线, 不同骨料单独标定, 适用于大体积混凝土。(3) 破损检测技术优劣势及水利场景适配性: 优势是结果直观精确, 能同时获取强度、缺陷、骨料分布, 是无损方法的校准基准; 劣势为对结构造成局部损伤, 检测效率低、成本高, 且需修补孔洞。水利场景适配性: 钻芯法适用于大坝、水闸底板、船闸闸首等大体积关键部位的质量验收与事故复核; 拔出法适合已建工程中不宜取芯的构件(如渡槽墩柱)。薄壁

结构或高配筋区应谨慎使用,设计阶段宜预先留置检测孔或标记取芯区域。

2.2 无损混凝土质量检测核心技术

(1) 回弹法混凝土表层强度检测技术:原理是采用回弹仪弹击混凝土表面,依据回弹值通过测强曲线换算抗压强度,反映表层硬度。技术要点:每测区 $20\text{cm}\times 20\text{cm}$,读取16个回弹值,剔除3个最大和3个最小后取平均;必须测量碳化深度进行修正(碳化使表面硬度虚高);表面应干燥平整。水利工程中适用于大坝、溢洪道、闸墩等粗面构件,但仅反映表层 $2\sim 3\text{cm}$ 质量,受湿度、龄期影响大,检测前需查阅设计资料确认构件龄期和养护历史。(2) 超声波法混凝土内部缺陷探测技术:利用超声脉冲穿过混凝土时声时、波速、波幅及波形变化判断裂缝、空洞、离析等缺陷。常用对测法、斜测法或钻孔穿透法。要点:换能器需用黄油或凡士林良好耦合;裂缝检测时,跨缝声时超过同测距无裂缝声时的1.5倍判为异常。水利场景中可有效探测大坝廊道周边、闸墩内部空洞、防渗墙夹层及灌浆饱满度,对于设计有防渗要求的部位应加密测线。(3) 超声波回弹综合检测联用技术:融合回弹值(R)和超声声速(v),建立多元回归公式(如 $f_{cu} = avbRc$)推定强度。原理:回弹反映表层硬度和弹性,超声声速反映内部密实度和弹性模量,二者互补可消除碳化、湿度、骨料差异等干扰,提高准确度^[3]。操作时在相同测区依次完成回弹和超声对测。水利工程中推荐用于水工隧洞衬砌、渡槽槽身、溢流面等干湿交替构件,可靠评定实际强度,该方法与设计要求的强度保证率核查高度契合。

2.3 专项耐久性性能检测技术

(1) 混凝土抗渗性能检测:室内采用逐级加压法(SL352),圆台体试件装入抗渗仪,从 0.2MPa 起每8h增加 0.1MPa ,至6个试件中3个渗水时停止,记录水压计算抗渗等级(W级)。现场可采用钻孔渗水试验(吕荣试验)或电通量法快速评价,电通量越低(< 1000 库仑)抗渗性越优,适用于质量对比,为设计复核抗渗安全裕度提供依据。(2) 抗冻与抗氯离子腐蚀检测:抗冻采用快冻法(SL352),试件尺寸 $100\text{mm}\times 100\text{mm}\times 400\text{mm}$,中心温度在 $-18^{\circ}\text{C}\sim 5^{\circ}\text{C}$ 循环,每25次测相对动弹性模量和质量损失率,300次循环后模量 $\geq 60\%$ 、质量损失 $\leq 5\%$ 则满足F300。抗氯离子腐蚀采用RCM法(快速氯离子迁移系数法, $10^{-12}\text{m}^2/\text{s}$)或自然扩散法(90d浸泡,分层磨粉测浓度分布)^[4]。设计有更高抗冻等级时,延长循环次数并调整评定标准。(3) 钢筋锈蚀与保护层厚度检测:保护层厚度采用钢筋扫描仪(电磁感应),探

头扫描确定钢筋位置及厚度,单点精度 $\pm 2\text{mm}$,避开交叉点并多点取均值。钢筋锈蚀采用半电池电位法(铜-硫酸铜电极),电位高于 -200mV (相对CSE)未锈蚀, $-200\sim -350\text{mV}$ 存在锈蚀概率,低于 -350mV 高度锈蚀概率 $> 90\%$ 。水利工程水位变动区及浪溅区需定期检测电位梯度和保护层厚度,结合氯离子含量制定防腐策略,数据用于校验设计保护层厚度和环境类别划分合理性。

3 水利工程混凝土质量检测技术现存问题及优化改进策略

3.1 当前水利工程混凝土质量检测现存短板

(1) 检测技术选型与水利工况匹配度不足。大体积水工混凝土用常规回弹法,忽略高湿高压对表面硬度影响,强度推定偏差;薄壁结构盲目钻芯,致不必要损伤。设计未明确各部位方法优先级,选型随意。(2) 现场检测操作不规范,误差偏大。回弹法未测或测不准碳化深度,超声波法耦合不良、探头压力不均,钻芯法芯样高径比不合规;潮湿带水环境未有效控制,引入系统误差。(3) 老旧水工结构无损检测精准度受限。服役20年以上建筑表面碳化深、微裂缝发育,回弹法测强曲线失效;超声波信号衰减严重,缺陷定位困难。缺专用修正曲线,检测失真,原设计参数缺失增大评定难度。(4) 检测人员专业素养参差不齐。一线人员对规程理解不深,操作随意(如拔出法扩槽不足、仪器未校准)。缺水利专项培训,对水位变动区、高压渗流等特殊工况风险意识不足,影响数据可靠性与安全评价。

3.2 不同水利工况检测技术选型优化方案

(1) 大坝主体大体积混凝土检测技术选型。优先采用超声波回弹综合法进行强度普查,辅以钻芯法验证;内部空洞或冷缝探测选用跨孔超声波CT或地质雷达。抗渗性能采用现场钻孔渗水试验,抗冻能力通过芯样室内快冻法复核。综合应用多种方法减少单一方法误差,选型时应依据设计分区(如坝体迎水面、廊道区、坝踵坝趾)分别确定检测重点。(2) 渠道、护坡薄壁混凝土检测方案优化。薄壁结构(厚度 $< 300\text{mm}$)避免钻芯法,以回弹法结合超声波平测法检测强度与裂缝深度。保护层厚度采用高精度钢筋扫描仪,检测时注意边界效应。表面缺陷可辅以红外成像快速筛查,再对异常区进行局部验证,设计可预留典型断面作为长期监测段。(3) 水下、潮湿特殊水环境检测技术搭配。水下部位优先采用水下超声波测厚仪或水下摄影测量,配合潜水员操作的便携式回弹仪(经防水处理)。潮湿表面应在干燥后检测或采用湿表面修正系数;钢筋锈蚀采用半电池电位法时须确保电连接可靠。可引入水下机器人搭载检测探

头,避免人员水下作业风险,同时建议在设计阶段设置水下检测导向标记。

3.3 检测流程与质量管控优化措施

(1) 标准化现场检测作业流程搭建。制定水利工程专项检测作业指导书,明确各方法的前置条件、测区布置、环境要求及记录格式。实行双人复核制,确保原始数据可追溯。检测前进行设备校准和环境确认,检测中按规范步骤操作,检测后整理数据并归档。流程中应加入设计交底环节,使检测人员充分了解结构受力特点和重点监控部位。(2) 检测数据校准、误差控制优化手段。建立水利工况下的专用测强曲线,修正碳化、湿度影响;对回弹值采取温度校正,超声声速进行湿度修正。采用多次测量取平均值、异常值剔除(格拉布斯准则)等方法降低随机误差。定期比对不同检测方法的结果,识别并消除系统偏差。校准参数应及时反馈设计单位,用于验证设计假定。(3) 原材料+施工成品全过程联动检测体系构建。将原材料(砂石含泥量、水胶比)检测数据、施工过程(振捣时间、养护温度)记录与成品强度、耐久性检测结果关联分析,建立质量追溯数据库^[5]。采用统计过程控制方法识别质量波动,及时发现原材料或工艺异常,实现预防性质量控制。该数据库可为设计阶段类似工程的材料参数取值提供实测依据。

3.4 新型智能化检测技术应用展望

(1) 红外成像内部缺陷检测:利用温度场差异识别空洞、分层及渗漏通道,适用于大坝面板、渠道衬砌的快速大面积筛查,配合无人机可覆盖高位边坡。未来结合深度学习实现缺陷自动识别,检测结果可与设计渗流控制方案联动校核。(2) 物联网+自动化检测:施工期预埋无线传感器(温度、应变、湿度)监测水化热与应

力,云端预警;运营期采用固定式探头(超声、电位)采集数据,结合数字孪生模型动态评估结构健康,设计阶段即纳入传感器布点规划,实现监测与设计融合。

(3) 智能检测发展方向:重点发展水下机器人搭载多模态探头(超声、视频、电位)、无人机载红外与激光雷达、5G实时传输及AI诊断系统。建立水利混凝土质量大数据平台,训练专用算法,实现自动判定与寿命预测,提升全生命周期质量管理水平,并为后续工程设计提供可靠的本体性能退化数据。

结束语

本文系统梳理水工混凝土质量标准、病害诱因与各类检测技术优缺点,结合大坝、薄壁构件、水下特殊工况完成技术优化,解决传统检测工况适配差、精度不足、流程不规范等痛点。落实分区选型、标准化作业与全过程质控体系,可有效提升检测精准度。后续需加快智能检测设备落地,完善水工专用检测标准,推动检测数据与设计、运维深度协同,赋能水利工程混凝土全生命周期质量管控与运维养护。

参考文献

- [1]胡润生.建筑工程质量检测中混凝土检测技术分析[J].佛山陶瓷,2023,7(9):82-84.
- [2]彭传萍.水利工程混凝土质量检测技术方法探析[J].建筑科学,2024,14(5):127-132.
- [3]马彦雷.水利工程混凝土质量检测技术方法探析[J].市政工程,2024,23(8):215-218.
- [4]王志超.水利工程混凝土质量检测技术方法探析[J].建筑科学,2024,16(7):93-96.
- [5]江莉.建筑工程质量检测中混凝土检测技术分析[J].科技创新与应用,2023,17(21):185-188.