

超声回弹综合法在闸站混凝土水工建筑物强度检测中的应用研究

潘兴迅

海南省水利水电勘测设计研究院有限公司 海南 海口 570100

【摘要】：闸站混凝土水工建筑物检测存在单一检测方法局限性大、潮湿环境干扰数据精度、异形结构测点布设不规范、通用检测标准针对性不足等问题，难以满足水工结构精准检测要求。为解决上述水工检测技术难题，本文采用超声回弹综合法，结合水工工况特征，通过技术互补、优化作业流程、规范测点布设、构建专项测强体系等方式优化检测工艺。工程实践表明，该检测方法检测数据偏差较小、稳定性较高，可无损、精准反映混凝土表层及内部真实强度，有效规避环境与结构干扰，可为闸站水工建筑物质量评定、安全运维提供重要技术依据。

【关键词】：闸站水工建筑物；混凝土强度；超声回弹综合法；无损检测；工况适配

DOI:10.12417/2811-0536.26.08.100

引言

闸站混凝土水工建筑物长期暴露于高湿、水流冲刷及轻微化学侵蚀的复杂工况中，结构混凝土易出现表层碳化、疏松及内部密实度衰减等病害，直接影响工程结构安全与服役寿命。无损检测是水利构筑物质量核查与运维监测的核心技术手段，但传统单一检测方式受水工特殊环境、异形结构及通用标准局限，检测误差较大、代表性不足，难以满足精细化检测要求。为提升闸站混凝土强度检测的专业性与精准度，引入超声回弹综合法开展检测应用研究，针对性优化水工场景检测工艺，为水利闸站结构安全检测与质量评定提供技术参考。

1 闸站混凝土水工建筑物强度检测现存技术问题

1.1 单一检测方法适配水工特殊工况局限性突出

闸站水工混凝土构筑物持续承受潮湿水汽、水位往复变动、水体磨蚀与轻度化学介质侵蚀多重外界作用，传统混凝土强度单项检测手段难以适配现场复杂服役环境，回弹检测仪可获取构件表层三十毫米深度硬度参数，构件长期干湿循环催生表层碳化、疏松剥落缺陷会干扰实测数据稳定程度，内部密实状态与实际力学性能也无法依靠该手段完整判定。超声检测过程易受构件内部含水状态、浸水区域、内部微孔洞及内部钢筋排布带来多重干扰，声波传播速率与波形形态容易产生偏移失真，构件整体力学等级判定存在明显误差。两类独立检测手段均难以同步捕捉表层及内部实体质量状态，实测数值离散程度偏高，达不到闸站水工构筑物精细化强度判定及常态化安全管护对应的检测规范基准。

1.2 闸站潮湿侵蚀环境干扰检测数据精准度

闸站水工建筑物长期处于高湿、水体微侵蚀环境，

采用超声回弹综合法检测混凝土强度易产生明显系统性测量偏差。回弹检测时，构件湿润表层形成水膜，吸收耗散冲击锤碰撞能量，弱化刚性冲击作用，回弹实测值整体偏低，偏差幅度随表层含水率上升呈非线性扩大。超声检测方面，混凝土孔隙饱水后介质密度上升，声波传播速度相较干燥试件明显偏高；表层水膜还会引发声阻抗不匹配，造成首波能量损耗、波形畸变，增大波形识别判读难度。含水率对两项检测指标造成反向误差：回弹值偏低、声速值偏高，两类误差在强度换算公式内形成非线性叠加，导致推定强度偏离真实值的偏移方向与误差量级无法精准量化，大幅降低检测结果在闸站水工建筑物安全评估中的可靠参考作用。

1.3 水工结构特殊构造导致测点布设规范性不足

闸站水工建筑物包含闸墩、胸墙、启闭机梁板、防渗底板等异形特殊构造，复杂的结构形态大幅提升超声回弹检测测点布设的难度^[1]。多数水工构件存在曲面、倒角、变截面等特殊结构形态，构件有效检测平面面积狭小，无法满足规范要求的测点间距与布设范围，极易出现测点重叠、布设偏移等问题。部分承重水工构件内部密布锚固钢筋、预埋管线及加固型钢，可用于合规布设测点的有效区域大幅缩减，测点选取被迫偏离标准检测位置。结构高低错落、临水立面狭窄的布局特征，也会造成测点分布不均匀，检测点位无法全面覆盖构件受力核心区域，彻底降低检测取样的规范性与代表性。

1.4 现有检测标准适配闸站专项检测针对性欠缺

国内现行混凝土无损检测标准多针对房建、普通市政混凝土结构制定，条款内容偏向通用化检测要求，未结合水利闸站水工建筑物的服役特性制定专项检测

细则。通用检测标准未考量闸站长期浸水、干湿交替、水流冲刷的特殊服役环境，对潮湿混凝土基体、受轻微侵蚀混凝土的强度换算修正参数存在空白。标准体系中缺乏针对闸站大体积水工混凝土、抗渗抗冻特种混凝土的专用测强曲线，统一通用换算公式无法匹配水工混凝土特殊配合比与力学性能^[2]。现有规范未明确闸站异形构件、叠合浇筑结构的测点布置、仪器校准及数据修正要求，导致现场检测流程缺乏专项依据，检测结果公信力不足。

2 超声回弹综合法检测闸站混凝土强度的优化解决策略

2.1 融合双技术优势弥补单一检测方法性能缺陷

超声回弹综合法的技术内核在于将回弹值与声速值两项独立物理参数纳入同一数学模型进行协同解算（见图1）。回弹值主要反映混凝土表层约30mm范围内的塑性硬度特征，其数值变化与表层碳化深度、骨料硬度及施工抹面质量直接关联；声速值则表征超声波在混凝土内部介质中的传播速率，与构件内部密实度、孔隙率及微裂缝发育程度密切相关。两项参数分别从表层和深层两个维度对混凝土质量进行独立表征，将二者代入同轴强度换算方程后，实测强度值由双参数共同约束，测点代表性远超单一参数推定模式。该解算机制能够有效抑制表层异常碳化或内部局部缺陷造成的单向数据漂移，使推算强度更趋近于构件整体真实强度值，从数据融合算法层面克服单一检测手段的先天不足，为闸站水工混凝土强度判定提供更为可靠的数据基础。

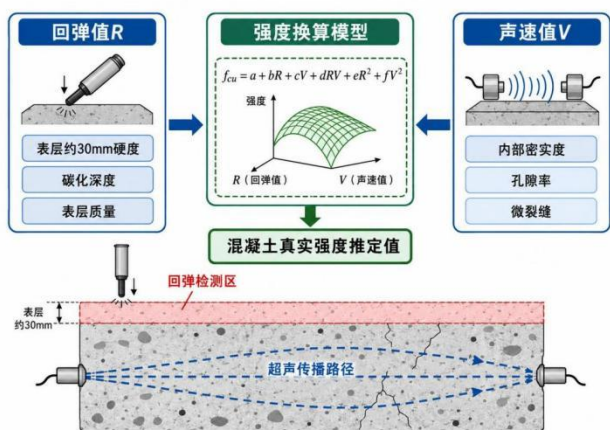


图1 超声回弹综合法双参数协同测强机制

2.2 适配水工潮湿环境优化检测参数与作业流程

针对闸站水工建筑物长期高湿、水汽侵蚀的特殊服役环境，可通过针对性调整超声回弹检测核心参数

与标准化作业流程，消除环境因素对检测数据的干扰。检测前需对混凝土构件表层积水、潮湿水渍进行专项干燥处理，清理表层附着的水汽薄膜与泥沙杂质，保证检测工作面平整干爽，规避表层含水引发的回弹数值失真。结合水工潮湿环境的声波传播特性微调超声检测参数，优化换能器耦合介质适配类型，选用适配潮湿基面的专用耦合剂，提升换能器与混凝土表层的贴合度，减少声波传播过程中的能量损耗与数据波动。同步细化现场作业流程，调整测点布设密度与检测角度，规避潮湿区域混凝土孔隙含水带来的声速偏差，依据闸站不同潮湿程度的构件区域划分检测标准，实现检测参数与作业模式的环境适配性优化。

2.3 结合闸站结构特征规范化布设检测测点点位

闸站水工建筑物包含闸墩、胸墙、底板、翼墙等差异化受力构件，不同部位混凝土厚度、受力状态及损伤分布存在明显差异，检测点位布设需贴合结构实际形态完成规范化管控^[3]。针对闸墩等竖向承重主体结构，可依托构件截面尺寸划定检测区域，避开结构边角应力集中区域及表层修补区域，均匀划分测点网格以保障检测覆盖面的完整性。针对底板、护岸等大面水平水工构件，结合长期水流冲刷、基底渗压影响的结构特点，加密易磨损、易老化区域的测点密度，弱化完好区域的测点布设数量。严格管控单测区测点数量、测点间距及回弹测试角度，规避钢筋密集区、预埋管线区域对超声传播与回弹数值的干扰，通过标准化点位布设模式，消除人为布点随意性带来的检测误差，提升强度检测数据的代表性与真实性。

2.4 依托水工规范构建闸站混凝土专项测强体系

结合水利工程混凝土检测相关行业规范与闸站建筑物特殊服役属性，可针对性搭建适配潮湿侵蚀水工环境的专项测强换算体系，摒弃通用性建筑混凝土测强曲线的套用模式。结合闸站混凝土常用的水工配合比、特种骨料、抗渗抗冻外加剂等材料特性，采集不同龄期、不同损伤程度、不同干湿状态下的闸站实体混凝土超声声速与回弹数值样本数据。通过海量现场实测数据拟合校准专属测强曲线，修正潮湿环境下孔隙积水、表层侵蚀带来的数值偏差，严格按照水工建筑物检测标准划定不同构件的测点布置标准、仪器耦合要求及数据筛选规则。同时结合闸站闸墩、底板、防渗墙体等不同结构部位的受力特点与结构差异，细化分区测强判定标准，实现检测数据与水工混凝土真实强度的精准匹配。

3 超声回弹综合法在闸站水工检测中的应用实效分析

3.1 综合法检测数据准确性与稳定性验证分析

在闸站水工混凝土强度检测中,超声回弹综合法的数据准确性与稳定性可通过与钻芯法的对比验证得到有力佐证。以坡柳水闸安全检测为例,该工程对3#、4#、10#、11#等闸墩及排架柱同时采用了超声回弹综合法与钻芯法进行强度测试(见图2)。检测结果表明,在同一测区采用两种方法获得的混凝土强度换算值基本吻合,例如在4#闸孔脚墙部位,综合法测得强度为25.7MPa,钻芯法结果为26.3MPa,二者相对偏差约2.3%。这种良好的一致性印证了综合法在现场检测中的可靠性,其测值离散性较小、规律性明显的特点,使其能够稳定反映水工混凝土构件的实际强度状况。相关研究亦指出,基于超声回弹综合法建立的测强曲线,其相对误差绝对值可控制在5%以内,进一步验证了该方法在精度上满足水工建筑物强度评定的工程需求。综合来看,超声回弹综合法在闸站混凝土强度检测中具有较高的准确性与良好的数据稳定性。

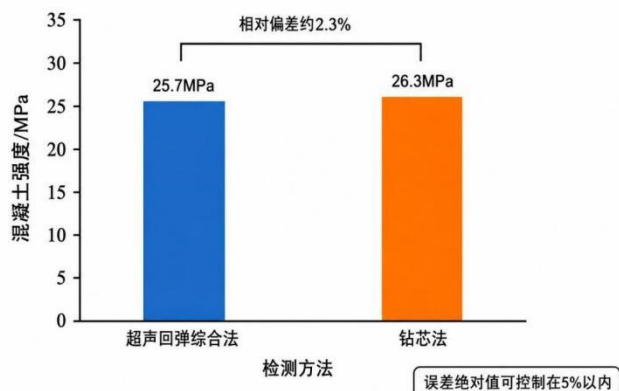


图2 综合法与钻芯法混凝土强度检测结果对比

3.2 闸站混凝土结构强度检测工程应用效果

超声回弹复合检测手段具备两类指标协同校验优势,能够适配闸站各类混凝土水工构件多样检测场景,弥补单项检测手段存在的应用局限,整套检测操作不会损伤闸墩、启闭机基座、防渗墙等核心受力结构,水利构筑物正常运转状态与结构完整度均可维持完整,满足闸站日常安全巡检工作标准。检测作业同步获取混凝土表层硬度指标与内部声波参数,同步判别构件表层老化损伤程度和内部密实状态,清晰分辨潮湿侵蚀环境造成的表层性能衰减与基体真实强度区别,多地闸站实地检测样本证明这套检测手段数据波动幅度更低,环境条件与内部配筋带来的检测偏差能

够得到抑制^[4]。推算得出的强度数值匹配构筑物实际服役状态,为闸站结构安全研判、缺陷治理及运维修护工作提供精准稳定的数据依据。

3.3 检测技术对水工建筑物质量评定的支撑作用

超声回弹综合法可同步采集混凝土表层硬度与内部声学参数,弥补单一检测技术的数据局限性,为闸站水工建筑物质量评定提供多维、精细化的数据支撑。该检测技术可适配闸站闸墩、启闭机基础、防渗墙体等不同核心构件的检测需求,精准捕捉结构表层损伤与内部密实度缺陷,为构件质量等级划分提供客观的数据依据。检测获取的连续化实测数据,能够完整反映水工混凝土强度的分布均匀性与整体服役状态,精准区分局部强度薄弱区域与整体结构质量差异,规避传统经验评定模式的主观性误差。实测所得参数可对接水利工程质量验收评定标准,为结构安全性复核、耐久性评估以及后续维修加固方案编制提供精准的数据支撑,保障闸站水工建筑物质量评定工作的规范性与精准性。

3.4 综合法相较于传统检测技术的应用优势

超声回弹综合法相较于传统单一检测手段,在闸站水工检测中展现出更优的场景适用性与数据可靠度。单一回弹法受碳化层、潮湿表层影响显著,测值往往偏离构件真实强度,单一超声法则因钢筋密布、内部裂隙及含水率波动导致声时测量失准。钻芯取样法虽可直观获取混凝土芯样抗压强度,但钻取过程切断受力钢筋、破坏防渗整体性,且取样数量有限、检测周期冗长,难以满足闸站大范围结构普查需求^[5]。超声回弹综合法引入回弹值与声速值二元综合推定机制,同步校正表层硬度与内部声学参数的相互偏差,有效消解高湿环境及局部缺陷对单一参数的影响权重。该技术全程无损作业,检测效率高、测点覆盖广,能系统呈现闸站不同构件、不同区域的强度分布全貌,其综合应用效能与数据代表性强于传统检测方式。

4 结语

超声回弹综合法可有效适配闸站混凝土水工建筑物的复杂服役与检测工况,能够妥善解决单一检测技术精度不足、环境干扰抗性弱、测点布设不规范及通用标准适配性差等多项行业检测难题。通过融合两项检测技术的核心优势、优化潮湿环境作业流程、规范异形结构测点布设、搭建水工专项测强体系,可大幅提升混凝土强度检测数据的精准度与稳定性。该技术具备无损、高效、适配性强的突出特点,可全面反映水工混凝土结构的表层与内部质量状态,为闸站建筑

物质量评定、安全运维及病害整治提供可靠技术支撑， 值。
在水利工程混凝土检测领域具备极高的推广应用价

参考文献:

- [1] 张牧,盛方斌.水利工程闸站水工建筑物变形监测方法探讨[J].工程技术研究,2025,10(3):170-172.
- [2] 刘玉兰,姜燕.水利闸站施工中的混凝土技术研究[J].水上安全,2025,(6):85-87.
- [3] 鲁德大.混凝土强度检测超声回弹综合法应用[J].水泥,2025,(12):122-124.
- [4] 李雪亮.超声-回弹综合法在混凝土抗压强度检测的应用[J].工程机械与维修,2022,(5):198-200.
- [5] 刘康,蔡一平,彭志芳.回弹法和超声回弹综合法在水利工程混凝土强度检测中的应用[J].中国高新科技, 2024,(1):59-61.