

超声回弹综合法在水利混凝土结构强度检测中的优化与精度验证

李小娜

河南百川工程质量检验有限公司 河南新乡 453000

DOI: 10.32629/ems.v8i2.18508

[摘要] 水利混凝土结构强度直接决定工程安全与耐久性, 超声回弹综合法因无损便捷被广泛应用, 但其在水利高湿、侵蚀等复杂环境下精度不足。本文针对水利混凝土特性, 从检测参数、检测面处理、修正模型三方面优化检测方法, 通过室内试块与现场实体试验验证精度。结果显示优化后检测误差降低 15%~22%, 可精准适配水利混凝土检测需求, 为工程质量评估提供可靠技术支持。

[关键词] 超声回弹综合法; 水利混凝土; 强度检测; 参数优化; 精度验证

引言

水利工程是国民经济的核心基础设施, 大坝、水闸等重要结构大多依靠混凝土浇筑, 混凝土强度是决定结构承载能力、抗渗抗冻性的关键指标, 混凝土强度的检测精度直接影响工程质量评定和安全运维决策。水利混凝土长期处在水流冲刷、干湿交替、冻融循环等恶劣的环境当中, 强度容易衰减, 必须准确检测以保证安全。传统破损检测存在损伤结构、效率低等缺点, 超声回弹综合法由于无损、高效、适用范围广成为主流, 但是传统方法基于普通建筑混凝土建立, 不能适应水利混凝土复杂的特性, 检测精度偏差较大。因此优化超声回弹综合法适配水利场景, 验证其精度, 对提高水利工程检测的可靠性有重要的现实意义。

1 超声回弹综合法检测原理与水利场景适配难点

1.1 超声回弹综合法核心原理

R_{vfcu} 超声回弹综合法基于混凝土材料特性与力学指标的相关性实现强度检测, 核心逻辑为“双指标协同评定”。回弹法是用回弹仪测量混凝土表面的回弹值, 间接反映混凝土表面的硬度, 而混凝土的硬度与抗压强度有明显的正相关关系; 超声法是用超声波检测仪发射高频弹性波, 测量波速在混凝土内部传播的速度, 表征混凝土内部的密实度、孔隙率等特性, 同样与抗压强度密切相关^[1]。与单一回弹法容易受到表面缺陷的影响、单一超声法对表层强度不敏感相比, 综合法利用回弹值、超声声速、混凝土抗压强度的多元拟合模型, 将表面和内部特性结合起来, 对混凝土强度进行更准确的评定, 基本公式可以表示为

$$f_{cu} = a \cdot v^b \cdot R^c + d$$

式中 (a、b、c、d 为与混凝土类型匹配的拟合系数)。

1.2 水利混凝土检测场景适配难点

水利混凝土结构的服役环境及构件特性, 给传统的超声回弹综合法带来三个适配难题。第一, 环境湿度影响较大, 水利结构多处于水下、半水下或者高湿环境, 检测面容易附着水分, 水分会增大回弹仪弹击杆和混凝土表面的接触阻尼, 使回弹值偏低; 水分还会降低超声波传播过程中的能量衰减, 使声速测量值偏高, 两种偏差叠加影响检测精度。其二, 构件的种类繁多, 水利工程既有大体积大坝混凝土 (厚度超过 10m), 又有薄壁渡槽 (厚度不到 0.5m), 大体积混凝土内部温度梯度、水化热残留会影响声速传播路径, 薄壁构件容易出现超声波反射干扰, 都会造成检测误差, 水利混凝土常掺加粉煤灰、矿渣等掺合料, 配合比波动大, 进一步削弱传统拟合模型的适用性。第三, 侵蚀环境造成结构劣化, 水流携带的氯离子、硫酸盐等介质会侵蚀混凝土, 形成疏松层、裂缝等缺陷, 使回弹值和声速不能真实反映核心区域强度, 传统方法没有考虑劣化层的影响, 容易造成强度误判^[2]。

2 超声回弹综合法在水利混凝土检测中的优化策略

2.1 检测参数优化: 适配水利环境的参数阈值确定

根据水利工程高湿度、构件种类繁多的特点, 从弹击角度、超声探头间距、检测点三个方面来优化检测参数。弹击角度的优化中, 传统做法多采用垂直弹击 (90°), 但是水利结构中的大坝坝坡、水闸侧墙等都是倾斜面, 垂直弹击容易因为回弹仪受力不均产生误差。通过试验确定适配角度阈值:

倾斜角度 $\leq 30^\circ$ 时,保持垂直弹击; $30^\circ <$ 倾斜角度 $\leq 60^\circ$ 时,采用 45° 弹击,并引入角度修正系数 $k\theta$ ($k\theta = 1 - 0.005 \times (\theta - 30)$);倾斜角度 $> 60^\circ$ 时,采用平行于构件表面弹击,修正系数 $k\theta = 1 - 0.008 \times (\theta - 60)$ 。超声探头间距优化上,根据水利构件厚度特性,建立间距与构件厚度的匹配关系,对厚度 $\geq 2\text{m}$ 的大体积混凝土(大坝坝体)探头间距取 $500\sim 800\text{mm}$,保证超声波穿透核心区域;厚度 $0.5\sim 2\text{m}$ 的构件(水闸闸墩)探头间距取 $300\sim 500\text{mm}$;厚度 $< 0.5\text{m}$ 的薄壁构件(渡槽侧壁)探头间距取 $200\sim 300\text{mm}$,采用双探头对测方式,减少表面反射干扰。检测点数优化,针对传统单点检测随机性大的问题,提出分区多点检测方案,将检测区域分成 $500\text{mm} \times 500\text{mm}$ 的网格,每个网格内布置3个检测点,取回弹值和声速的平均值参与强度计算,保证数据的代表性,网格数量根据构件尺寸来定,最小检测区域不少于3个网格^[3]。

2.2 检测面处理优化:高湿与侵蚀环境的预处理工艺

检测面状态对检测精度起着决定性的影响,针对水利混凝土检测面高湿、附着污垢、存在侵蚀劣化层等问题,制定出三步预处理工艺。第一步表面清洁除污,用高压气流吹扫检测面,清除浮尘、砂粒等松散杂质,如果有油污、青苔等附着物,用中性洗涤剂擦拭,再用清水冲洗,最后自然风干到表面无明显水渍(防止高温烘干造成混凝土表层开裂)。第二步高湿面除湿处理,对于水下或者刚脱离水环境的检测面,用吸水海绵反复擦拭后,覆盖透气吸水棉布30min,吸附表层水分,使检测面含水率控制在 $8\%\sim 12\%$ (试验验证该含水率区间对回弹值和声速的影响最小);若检测面有积水,先用排水槽引流,再做除湿处理。第三步为劣化层剔除,对受侵蚀产生疏松层、粉化层的检测面,用小型电锤轻轻剔除劣化层,直至露出坚实的混凝土基体,剔除深度根据劣化程度确定,一般为 $5\sim 20\text{mm}$;剔除后用细砂纸打磨检测面,使表面平整度误差 $\leq 2\text{mm}$,防止凸起或凹陷造成回弹仪弹击不充分、超声波传播路径偏移。预处理完成后,需在检测面标记检测点,确保弹击点与超声探头测点重合,减少定位偏差^[4]。

2.3 强度修正模型优化:基于水利混凝土特性的拟合模型构建

传统的超声回弹综合法强度模型是用普通硅酸盐混凝土建立起来的,没有考虑到水利混凝土中掺合料、服役环境的影响,需要针对性地进行优化。首先选取水利工程常用混凝

土配合比制备标准试块,包括不同强度等级(C20~C50)、不同粉煤灰掺量(0%、15%、30%、45%)、不同矿渣掺量(0%、20%、40%),共制备试块120组,每组3块,模拟水利混凝土的材料特性。其次,对试块做不同的环境老化处理,即冻融循环(0、50、100、200次)、硫酸盐侵蚀(浸泡28d、90d、180d),模拟水利混凝土服役劣化状态。然后用优化后的检测参数和预处理工艺,对每组试块的回弹值(R)、超声声速(v)进行测量,再通过压力试验机测得其抗压强度(f_{cu}),得到原始数据样本库^[5]。最后根据多元线性回归分析,建立适合水利混凝土的强度修正模型:

$$f_{cu} = 0.012 \cdot v^1 \cdot 85 \cdot R^{0.92} - 0.56 \cdot w + 0.38$$

wR^2R^2 粉煤灰和矿渣总掺量占比为(粉煤灰掺量+矿渣掺量)/(粉煤灰掺量+矿渣掺量+水泥掺量)。经过显著性检验,该模型的相关系数为0.94,比传统模型($=0.82$)的拟合度高很多,可以很好地抵消掺合料和环境劣化对检测结果的影响。

3 优化方法的精度验证试验

3.1 试验方案设计

为了检验优化后的超声回弹综合法的精度,用室内标准试块试验和现场实体结构试验两种方式来验证。室内试验选择C25、C35、C45三种常见的水利混凝土强度等级,每种等级制备20组试块,其中10组做冻融循环50次处理,10组自然养护,分别用传统方法和优化方法测量回弹值、声速,计算强度推定值,与压力机实测值对比,评价误差水平。现场试验选取某在建水库大坝(混凝土强度等级C30~C40)、某运行10年的水闸(混凝土强度等级C25~C35)作为试验对象,在大坝坝体中部、水闸闸墩、渡槽侧壁等6个典型检测区域,每个区域划分10个检测网格,分别用传统方法和优化方法进行检测,在每个区域钻取3个芯样(直径100mm,高度200mm),用芯样实测强度校准检测结果,计算两种方法的相对误差、绝对误差,验证优化方法的现场适配性。试验过程中严格控制检测环境的温度($15^\circ\text{C}\sim 25^\circ\text{C}$)、湿度($40\%\sim 60\%$),避免环境因素影响试验结果^[6]。

3.2 室内试验结果与分析

室内试验结果表明,传统超声回弹综合法的强度推定误差随混凝土强度等级、老化程度的不同而变化较大,优化方法的检测误差明显减小,具体的误差对比见表2。

表1 传统方法与优化方法相对误差分析表

混凝土强度等级	养护/老化状态	传统方法平均相对误差 (%)	优化方法平均相对误差 (%)
C25	自然养护	12.8	8.2
C25	冻融循环 50 次	18.6	12.3
C35	自然养护	10.5	6.9
C35	冻融循环 50 次	16.3	10.1
C45	自然养护	9.2	5.7
C45	冻融循环 50 次	14.8	8.6

误差降低的主要原因是优化的预处理工艺消除了高湿、劣化层对检测信号的干扰；修正模型加入了掺合料掺量因素，提高了对不同配合比混凝土的适配性。另外，通过方差分析可知，优化方法的检测数据离散性更小（方差 ≤ 0.86 ），比传统方法

（方差 ≥ 1.32 ）稳定性更好，说明优化方法的检测重复性更好。

3.3 现场试验结果与分析

现场试验结果与室内试验趋势一致，不同检测区域两种方法的误差对比如下表所示：

表 2 不同检测区域两种方法的误差对比

检测区域	传统方法平均相对误差 (%)	优化方法平均相对误差 (%)	误差降低幅度 (%)
大坝坝体中部	17.2	11.5	18
水闸闸墩	19.5	13.2	20
渡槽侧壁	21.3	15.6	22

从表可知，各个现场区各种优化方法得到的绝对误差都在 2.5MPa 之内，满足水利工程混凝土强度检测的精度要求（允许绝对误差 ≤ 3 MPa）。

完善优化方案的适用范围。

结语

本文针对超声回弹综合法在水利混凝土检测中精度不够的问题，提出的全链条优化策略可以提高检测的可靠性，试验结果表明优化后误差明显减小，可以准确地适应水利复杂的环境。可以进行进一步研究，将物联网技术与检测设备相结合，完成混凝土结构检测数据的实时传输和分析；对寒区、盐碱区等特殊水利环境，制定更加详细的优化方案；创建全场景下混凝土结构检测技术体系，给水利工程混凝土结构长期安全运行提供更好的技术保障。

与钻芯法实测值对比可知，优化方法的强度推定值与芯样实测值的相关系数 $R^2=0.93$ ，比传统方法的 0.78 要高，说明优化方法更能反映水利混凝土实际强度状态。在渡槽薄壁构件的检测过程中，采用优化的探头间距、双探头对测的方式可以减少超声波反射的干扰，误差比传统方法小 22%，说明参数优化对复杂的构件是适用的。

4 讨论

优化后的超声回弹综合法在参数调整、检测面预处理、模型修正之后，能够较好地提高水利混凝土强度检测的精度，但是其应用还需要注意以下几点，预处理工艺的规范性，高湿面除湿时间、劣化层剔除深度要严格按照标准执行，否则容易因为处理不彻底而造成误差反弹，检测参数的动态适配，对于特殊的水利构件（如水下深埋构件），需要进一步调整探头防护措施和弹击角度，避免水环境直接干扰检测设备，修正模型的地域适配，不同地区的水利混凝土原材料（砂石、水泥）特性存在差异，需要针对当地材料补充试验，微调模型系数，提高本地化适配性。相对于现有研究而言，本文的优化策略更注重水利场景的主要问题，采用工艺、参数、模型全链路的优化方法，实现从实验室到现场的精准匹配，试验覆盖新建和运行中的两种水利工程，结果更具有工程实践意义。但是研究还存在不足，没有考虑极端低温（ -20°C 以下）环境下的检测优化，后续可以对寒区水利工程进行补充研究，

[参考文献]

[1]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. DOI: 10.13739/j.cnki.cn11-1899/tq.2025.12.040.

[2]张宇. 超声回弹综合法中使用距离卡尺对声速的影响[J]. 中国设备工程, 2025, (18): 149-151.

[3]雷光虎. 超声回弹综合法评定桥梁长龄期混凝土强度分析[J]. 交通科技与管理, 2025, 6 (14): 52-54.

[4]帖少娟,张雪梅. 水利工程施工中混凝土温控防裂技术创新研究[J]. 水上安全, 2025, (10): 166-168.

[5]薛维培. 高水压下井壁混凝土及其结构耦合承载机理研究[M]. 武汉理工大学出版社: 202109: 203.

[6]张景奎,刘长顺,罗居刚,等. 农田水利工程装配式薄壁混凝土结构强度检测方法研究[J]. 混凝土世界, 2021, (06): 61-63.