

# 超声无损检测技术在水利工程混凝土质量控制中的应用

周 信

新疆生产建设兵团建设工程质量检测中心有限责任公司 新疆 乌鲁木齐 830000

**【摘要】**：新疆地域辽阔、气候恶劣，水利工程是保障农业灌溉和防洪减灾的关键工程，混凝土施工作为水利工程的基础环节，其质量优劣决定着工程结构的整体安全性、耐久性及使用寿命。实际工程中，原材料选择、配合比设计以及施工过程控制等多方面因素共同影响着混凝土施工质量，使其表现出动态波动，进而诱发工程裂缝、渗漏等潜在风险，威胁结构安全。本研究以新疆水利工程建设为例，通过对超声无损检测技术工作原理与应用场景进行系统性梳理，分析了新疆水利工程混凝土超声无损检测应用的问题，并对其应用策略进行了探讨，以期建立与新疆特殊条件相适应的超声检测技术体系，为地方水利工程混凝土质量的精确控制奠定基础。

**【关键词】**：水利工程；混凝土质量控制；超声无损检测技术；应用策略

DOI:10.12417/3083-5526.25.05.029

新疆干旱少雨、冬季漫长寒冷、昼夜温差大，属于大陆性气候，局部地区的水土流失严重，水利工程混凝土结构在这种恶劣的条件下，容易发生冻融损伤和内部孔隙发育等质量问题，严重制约水利工程的正常运行，也加大运维成本和增加安全隐患。新疆水利基础设施的快速发展及阿尔塔什水利枢纽等重点项目的相继投入应用，对混凝土的质量控制提出了更高的要求。该方法利用声波在混凝土内部的传播速度及频率变化等特性，可以对混凝土强度及密实度等进行无损检测，该方法具有适用范围广、检测结果可视化等优点，已经被广泛用于水利工程混凝土的检测和运维评估中。

## 1 超声无损检测技术核心原理和在水利工程中的应用场景

### 1.1 技术原理

无损检测技术利用声波在混凝土中的传输原理，将高频超声脉冲从发射换能器中传输至混凝土内部，由接收换能器采集并获取声波在混凝土中的时间、幅值和频率等关键参量，从而实现混凝土结构质量的实时检测。混凝土是一种多相复合材料，其内部密实度及强度等级等对弹性波传播特性有直接影响。当有裂纹和夹杂等缺陷时，超声会发生反射和散射等现象，从而降低声波的传播速度，延长声波的传播时间，并加剧能量的衰减。按照《水电工程混凝土试验仪器设备校验规程》（NB/T11889.20-2017）规定，超声波检测器的最小取样间距不得超过  $0.1\mu s$ ，声时取样的相对偏差小于  $\pm 1.0\%$ ，同时取样时间的稳定度优于  $0.5\mu s$ ，保证检测结果的可靠性（如图1）。



图1 超声无损检测技术

### 1.2 主要的技术种类和应用场景

超声无损检测技术可用于坝体、渡槽等存在对立临空面等混凝土结构，可用于混凝土强度和压实度的检测。对测技术是指在结构的两端分别设置传感器，精确地检测超声的穿透时间，并通过计算波速，评价整个工程的质量。平面法适合于单一临空面的结构，通过在地表放置两个传感器，结合时间差和距离计算波速，通过激振锤敲击，激发弹性波，主要应用于裂隙深度检测<sup>[1]</sup>。弹性波 CT 技术通过在结构表层布设密集激振点和接收点，获取弹性波传播信号，采用层析成像算法，对混凝土内部波速进行分析，获得可视化 CT 图像，从而实现缺陷位置的精确定位。该技术可用于大坝等大型混凝土结构的质量检测。实践证明，弹性波 CT 能对  $5\text{ cm}$  以上的内含物和  $0.2\text{ mm}$  以上的裂纹进行高效识别，为施工修复工作提供准确数据支持。利用超声回弹综合法利用超声检测和回弹法技术的优点，建立混凝土波速、回弹值和抗压强度三者之间的多元回归模型，以克服单一检测手段的不足。新疆地区气温差异大，且混凝土表层的硬度受到外界温度的明显影响，单一的回弹法检测结果存在较大偏差，采用超声波回弹的方法能以波速度来反映混凝土的内部压实度，并与回弹量相融合评价其表层硬度，

作者简介：周信，1997.12.17，男，汉，新疆，本科，研究方向：水利工程试验检测。

从而大幅提高检测的准确性。

## 2 新疆水利工程混凝土超声无损检测应用中的问题

### 2.1 恶劣的条件限制检测的准确性

新疆地区冬天最低可达 $-30^{\circ}\text{C}$ 以上,夏天地表温度在 $40^{\circ}\text{C}$ 以上,这种极大的差异会导致混凝土的内、外应力发生明显变化,对超声的传播速度和能量的衰退产生重要影响。在冬季检测中,发现其表面冻结后的回弹值较高,且其内部含有孔隙,且其速度很慢,致使声波回弹合成方法测定的数据出现较大的误差;在夏天的炎热天气中,超声波传感器与混凝土界面的相互作用会降低,导致信号传递不平稳,使声波时间检测结果的偏差超过 NB/T11889.20-2025 规定的 $\pm 1.0\%$ 。新疆部分水利工程项目地处盐碱地区,其混凝土表层极易产生盐分沉积,并且其表层还会出现因盐晶体膨胀而产生的微观裂纹。在实际施工过程中,由于盐分的存在,会影响超声的渗透,增大信号的损耗,造成检测速度的降低,从而造成对混凝土质量的错误判断<sup>[2]</sup>。

### 2.2 技术适配性不足,脱离本地工程特点

超声波检测方法与当地原材料不一致,现有超声波检测方法主要以国内普通骨料混凝土构建,但由于新疆地区天然砂、骨料中含有丰富的碳酸盐岩及一些工程中使用的矿渣混凝土等特种材料,其混凝土波速及强度关系和标准模型有较大差异。例如,新疆伊犁河谷沿岸灌溉项目采用的是当地卵石骨料,其混凝土在同等强度下的速度比一般的碎石骨料低 200-300 m/s,如标准模型进行计算,其强度评估的偏差可能超过 10%。新疆水利工程大多涉及高边坡等复杂结构,如塔里木河灌区防渗墙等,传统的超声波检测方法受限于作业空间和水体的干扰,很难对其进行整体检测。在水下混凝土结构检测过程中,由于水中钢筋之间的声阻抗相差较大,且存在较大的超声波反射,造成水中损伤的严重程度较高,造成内部缺陷很难识别。高边坡的衬砌混凝土路面不平,传感器的耦合难度大,难以提高检测覆盖率。

## 3 新疆水利工程混凝土超声无损检测优化应用策略

### 3.1 根据极端环境和本地特点,对检测技术进行优化

根据新疆当地砂石骨料及掺合料的特点,进行不同配比和养护条件下的超声波参数与强度和耐久性的相关性实验,提出适用于当地的强度转换模式和缺陷评定标准。结合盐碱化区域的实际情况,完善盐含量与超声波参量之间关系等方面研究,采用预处理方法消除表层盐渍或校正检测参数,以提升识别精度。研发适合于冻融条件下的低温适配型耦合剂,并通过优化冬季检测程序,减少温度变化对检测结果的干扰。采用新型的水下超声检测技术,通过配置防水换能器和信号增强装置,对水下检测的信号滤波算法进行优化,提高对混凝土结构缺陷检测的准确性。针对高边坡和不规则结构,利用便携式超声波检

测仪和柔性耦合垫,并利用激光定位等方法,保证换能器排列精确、耦合紧密。在大坝坝体等大型水利工程中,应用弹性波 CT 技术,利用密集布点和三维层析成像,对缺陷进行精确定位和定量评价,为工程修复奠定基础。

### 3.2 标准化检测流程,提高数据检测的可信度和使用性能

按照 NB/T11889.20-2025 规定,对各检测机构进行超声波检测设备的周期校准,在校准之前,必须保证仪器和器具之间的等温达到至少 2 小时,并且校验环境温度偏差不超过 $2^{\circ}\text{C}$ 。建立新疆地区超声波检测技术规程,明确不同环境和构造类型下换能器布置间距、激振方式等方面的要求;强化操作监督检查,实行非标准操作行为追责机制。构建新疆水利工程中的超声波检测数据库,将检测数据、缺陷处理记录和运行监控结果进行集成,并对数据进行实时跟踪和分享;利用大数据分析方法,深入研究超声波参量与损伤演化之间的相关性,实现对其长期使用性能的准确评估。将超声波检测结果与实地勘察相结合,进行缺陷原因剖析,并进行技术改进,从而实现“检测-评估-维修-优化”闭环管理<sup>[3]</sup>。

### 3.3 加强技术培训,健全技术推广体系

通过与新疆农业大学等院校的协作,在水文地质条件下开设超声波检测方面的课程,并与本地工程案例结合进行实践教学,以培养综合型的专门技术人员。对在职人员进行现有的弹性波 CT 法等前沿技术理论和实践培训,提高从业人员的业务水平。改善薪酬待遇和工作条件等,构建完善的激励制度,让优秀的人才留在水利工程基层。选择阿尔塔什等典型项目,搭建超声无损检测技术平台,验证弹性波 CT 等方法在该项目中的实际运用,为其他类似项目的开展奠定基础。在新疆维吾尔自治区水利厅的带领下,通过举办相关的技术交流会,推动地方检验规范的制定和完善,促进建设和检验机构引进先进的工艺和设备,提高自治区水利工程混凝土质量检测能力。

### 3.4 加强政策和技术支持,健全保障机制

新疆维吾尔自治区水利厅与有关单位共同制订超声无损检测技术应用专项管理办法,对检验机构的资质要求和检验流程等进行详细的规定;进一步完善水利工程混凝土施工质量检验规范,并将局部超声波检测的参数模式引入该规范中,为该方法的推广提供决策支持。加强对检测造假和违规操作的处罚,保证检测工作的公正性。设立新疆水利工程项目建设项目基金,扶持科研院所购买先进仪器,并进行本土化技术研究;支持企业和研究机构联合研制适合新疆特殊条件的超声波检测仪器和分析程序,提高我国在该领域的技术水平。对于应用先进超声波检测方法,且在质量管理方面有明显成效的工程,进行财政补助和表彰奖励,以调动各方的积极性<sup>[4]</sup>。

## 5 案例分析——萨尔托海水利枢纽工程

新疆阿勒泰地区萨尔托海水利枢纽是我国重要的农业和

畜牧业、农业和防洪的重要工程，坝顶长度 186 m，坝高 42 m，地处我国北方寒冷、严重盐渍化的特殊地带，其混凝土结构将受到强烈的冻融和盐分侵蚀的影响。将单孔声波检测和弹性波 CT 成像等方法应用于大坝基础注浆和帷幕注浆的质量检测中，对注浆质量进行精确控制。在检测前，通过对当地含砾集料的特殊检测，修正波速和灌浆密实度之间的对应关系；在冬天检测中，选了抗冻融的偶合剂，并在检测前 2 小时将超声波检测器置于检测环境中，以保证检测的准确性<sup>[5]</sup>。采用单孔声波检测技术，在坝体周围布置 86 个钻孔，检测成果表明，在注浆之前，大坝的基础速度是 2800 米/s，而在注浆结束后，其速度增加 12.5%；注浆之前的平均速度为 3000 米/s，在注浆结束后达到 3210 米/s，增幅为 7%，达到了预期的效果。该项目单孔检测中，发现 3 处波速异常，利用弹性波 CT 成像方法，在大坝基础上布设 24 个激振点和 32 个接收点，获得方向的弹性波资料，构建三维波速 CT 图像，识别该地区为注浆不紧造成的储层孔隙堆积，最大孔隙区域面积为 2.8 m<sup>2</sup>，深度为 1.2m<sup>[6]</sup>。根据检测的成果，施工企业针对性地进行灌浆加固，并在灌注结束后进行检测，发现异常区域波速超过 3400 m/s，满足工程的要求（如表 1）。

表 1 灌浆质量超声检测数据统计表

灌浆类型	检测阶段	平均波速 (m/s)	波速提高率	检测孔数量 (个)	备注
固结灌浆	灌浆前	2800	12.5%	86	检测孔覆盖坝基全范围，用单孔声波检测
	灌浆后	3150			

参考文献:

[1] 董文昌,王瑞锋.水利工程施工中商品混凝土的质量控制方法[J].建材发展导向,2025,23(23):4-6.  
 [2] 郭亚萍,刘晓亚.水利工程施工中商品混凝土质量控制研究[J].水上安全,2025,(22):121-123.  
 [3] 邱剑.水利工程中砂石混凝土施工质量控制方法研究[J].工程技术研究,2025,10(20):137-139.  
 [4] 程有锋,陈攀峰.水利工程混凝土施工过程中的技术要点与质量控制方法研究[J].水上安全,2025,(19):160-162.  
 [5] 郑建花,娄军委.水利工程水下混凝土浇筑施工工艺改进与质量控制[J].智慧中国,2025,(09):48-49.  
 [6] 张燕娥.水利工程中混凝土施工管理及其质量控制措施[J].中国水泥,2025,(08):95-97.

灌浆类型	检测阶段	平均波速 (m/s)	波速提高率	检测孔数量 (个)	备注
帷幕灌浆	灌浆前	3000	7%	86	同固结灌浆检测孔布置
	灌浆后	3210			
异常区域补灌浆	补灌前	低于设计标准 (波速异常)	/	/	异常区域为孔隙聚集,深度 1.2m, 面积 2.8 m <sup>2</sup>
	补灌后	≥3400			补灌后检测达标, 质量符合标准

6 结论

总之，新疆水利工程施工中，超声无损检测技术发挥着重要的作用，但其施工结果受到极端环境和检测流程规范性等多种因素的制约。目前，新疆水利工程超声无损检测技术存在着与之匹配不足等问题，严重影响其准确性和应用范围。通过构建局部检测参数模型、规范检测流程、完善保障机制策略，可以提高超声波检测的适应性和准确性，为项目的质量控制提供强有力的支持。以萨尔托海水利枢纽工程为例，该方法可以应对新疆地区恶劣的气候条件，达到对混凝土质量控制的精确控制。在我国建设“智慧水利”的背景下，迫切需要将超声无损检测技术与大数据、遥感等技术相结合，研制智能化的检测仪器和数据分析平台，以达到对混凝土质量进行在线检测和动态预警的目的。