

# 浅析水利工程土方夯填质量检测方法

果大林

河北省水利工程局集团有限公司 河北 石家庄 050021

**摘要：**水利工程土方夯填质量关乎工程安全与耐久性。检测需围绕压实度、含水率、均匀性等核心指标展开，传统方法如环刀法、灌砂法虽应用广泛，但存在效率低、破坏性大等局限。现代无损检测技术（探地雷达、无人机搭载传感器）与智能化技术（物联网、机器学习算法）的融合，可实现高效精准检测。检测需结合规范要求，强化多源数据融合与标准化流程，以保障工程质量。

**关键词：**水利工程；土方夯填质量；检测方法

引言：水利工程作为保障民生、促进经济发展的重要基础设施，其土方夯填质量直接关系到工程的抗渗性、结构稳定性及长期安全运行。然而，受土料特性、施工工艺及环境因素影响，夯填质量易出现不均匀、密实度不足等问题。传统检测方法虽成熟，但存在效率低、破坏性强等短板。因此，探索高效、精准且无损的检测技术，构建科学的质量控制体系，已成为提升水利工程夯填质量的关键，对保障工程安全具有重要意义。

## 1 水利工程土方夯填质量检测理论基础

### 1.1 土方夯填质量核心指标

（1）压实度：作为衡量土方夯填质量的关键指标，其计算公式为压实度 = （现场实测干密度/室内标准试验得出的最大干密度）×100%。最大干密度需通过击实试验确定，能反映土料在最优条件下的密实潜力；现场干密度通常采用环刀法、灌砂法等检测，二者比值直接体现土料实际密实程度，一般要求水利工程压实度不低于95%，重要部位需达98%以上。（2）含水率：土料含水率需严格控制最优含水率±2%范围内。最优含水率是土料达到最大干密度时对应的含水率，此时土粒间黏结力适中，易被压实；含水率过高会导致土料黏结性过强、压实后易出现“橡皮土”，过低则土粒摩擦力大、难以压实，需通过晾晒或洒水调节含水率，确保压实效果<sup>[1]</sup>。

（3）均匀性：包含层间结合与厚度偏差两方面。层间结合需清除下层表面浮土、洒水湿润，避免出现分层缝隙，防止雨水渗入引发渗透破坏；每层夯填厚度需符合设计要求，偏差应控制在±5cm内，厚度过大易导致下层密实度不足，过小则增加施工成本且影响整体结构连续性。

### 1.2 夯填质量对工程性能的影响

（1）抗渗性、抗剪强度与变形特性：压实度不足会使土体内孔隙率增大，雨水或渗水易渗透，降低工程抗渗性，可能引发管涌、流土等险情；密实度达标能增

强土粒间咬合力，提升抗剪强度，避免工程在水压力、荷载作用下发生滑动破坏；同时，良好的夯填质量可减少土料后期压缩变形，降低工程沉降量，保障结构稳定性。（2）长期稳定性：若夯填质量不均，如局部压实度不足、含水率超标，工程运行中易出现不均匀沉降。例如，堤坝若存在沉降差，可能导致坝体开裂，雨水渗入后加剧坝体损坏，严重时引发溃坝事故；渠道夯填质量不佳会导致渠底、边坡沉降不均，影响输水效率，甚至出现渠道渗漏、坍塌，威胁工程长期安全运行。

## 2 水利工程土方夯填质量传统检测方法与局限性

### 2.1 破坏性检测方法

（1）环刀法：原理是利用一定容积的环刀切割土样，通过称量土样质量并结合环刀体积，计算土样湿密度，再经烘干测定含水率后换算出干密度。操作步骤为：先清理检测点表面浮土，将环刀刀口向下置于测点，用锤子均匀敲击环刀顶部至完全嵌入土中，随后挖出环刀及土样，刮平环刀两端多余土料，称重并取部分土样烘干。适用于黏性土、粉土等细粒土检测，但存在误差：环刀取样时若土样扰动，易导致干密度测量值偏小；环刀与土样贴合度不足，也会影响数据准确性。

（2）灌砂法：以标准砂的密度为基准，通过向开挖的试坑内灌入标准砂，根据灌砂量计算试坑体积，再结合坑内挖出的土样质量与含水率，推算土样干密度。现场应用案例：在堤坝、渠道等粗粒土（如砂类土、砾石土）夯填检测中常用。精度受多因素影响，土料粒径过大时，试坑开挖易出现塌坑，导致灌砂量偏大，计算的试坑体积不准确；试坑孔洞率过高，标准砂易渗入孔洞缝隙，同样会使检测结果产生偏差<sup>[2]</sup>。（3）核子密度仪法：借助仪器发射的射线穿透土料，通过接收散射射线的强度，结合土料中水分对射线的吸收作用，同时测定土料密度与含水率。但存在放射性安全风险，仪器需由

专业人员操作，且需定期进行辐射剂量检测，避免对人体造成伤害；数据校准问题突出，不同土料成分（如含有的矿物质、有机质）会影响射线传播，若未根据现场土料类型及时校准仪器参数，易导致检测数据失真。

## 2.2 局限性总结

(1) 效率低：传统检测方法需逐个点位开挖、取样、检测，单个点位完成检测通常需1-2小时，而水利工程夯填面积大，需布设大量检测点（如每100m<sup>2</sup>至少1个点），整体检测耗时久，难以快速反馈夯填质量，可能延误后续施工进度。(2) 破坏性：检测过程中需开挖试坑或切割土样，会破坏已夯填的土体结构，形成局部薄弱点，若后期未妥善回填处理，雨水易渗入这些部位，可能引发土体渗透破坏，影响工程整体稳定性。(3) 主观因素干扰：环刀法中土样刮平程度、灌砂法中试坑开挖尺寸控制、核子密度仪法中仪器摆放角度等，均依赖操作人员经验。经验不足者易出现操作不规范，如灌砂时未控制砂的流速导致灌砂量偏差，进而影响检测结果的可靠性。

## 3 水利工程土方夯填质量检测的现代无损检测技术与应用

### 3.1 基于物理特性的检测方法

(1) 探地雷达（GPR）：原理是通过发射高频电磁波（100MHz-2GHz）穿透土体，电磁波在不同密实度、含水率的土层界面发生反射，接收反射信号后经数据处理生成剖面图。分辨率受天线频率影响，高频天线（如1.5GHz）可识别5cm厚的薄层结构，低频天线（如100MHz）探测深度达3-5m，适用于层状结构识别，能清晰显示夯填层厚度、层间结合情况及土体内部空洞、裂缝等缺陷，但在高含水率、高含盐量土体中，电磁波衰减快，易降低检测精度。(2) 瞬态瑞利波法：原理是通过激振源（如锤击）产生瞬态瑞利波，波在土体中传播时，其波速与土体密实度正相关—压实度越高，土粒间连接越紧密，波速越大。通过布设传感器接收不同距离的波信号，计算波速后建立波速-压实度拟合模型，实现压实度间接检测。该方法检测深度可达10m，适用于深层夯填质量检测，但在不均匀土体中，波速传播易受干

扰，需通过多次激振减少误差<sup>[3]</sup>。(3) 电阻率法：原理是利用土体含水率不同导致电性参数（电阻率）差异—含水率越高，土体中导电离子越多，电阻率越低。通过向土体插入电极施加稳定电流，测量电极间电位差，计算电阻率值，再结合室内试验建立电阻率-含水率关系模型，反演土体含水率分布。该方法可实现大范围含水率连续监测，但受土料矿物成分、含盐量影响大，需针对不同土料校准模型参数。

### 3.2 智能化检测技术

(1) 无人机搭载传感器：通过无人机搭载毫米波雷达、高光谱相机等传感器，实现大面积快速扫描—毫米波雷达可获取土体表面高程数据，结合三维建模技术生成夯填体表面沉降变形图；高光谱相机通过分析土体反射光谱，反演含水率、有机质含量等指标。例如，在堤坝夯填检测中，无人机可在1小时内完成5000m<sup>2</sup>区域扫描，相比传统方法效率提升10倍以上，且能生成三维可视化模型，直观呈现质量分布差异。(2) 机器学习算法：通过收集传统检测数据（如环刀法结果）与无损检测数据（如GPR信号、电阻率值），构建数据集训练模型。支持向量机（SVM）可通过分类算法识别土体密实度等级，准确率达90%以上；神经网络（如BP神经网络）能融合多源数据（波速、电阻率、含水率），建立质量预测模型，实现压实度、含水率的同步预测，减少单一检测方法的局限性，但模型训练需大量样本数据，且对异常数据敏感，需提前进行数据清洗。(3) 物联网（IoT）技术：在夯填区域布设无线传感器网络（如土壤水分传感器、压力传感器），传感器实时采集含水率、土体压力等数据，通过LoRa、NB-IoT等通信技术传输至云平台，平台对数据进行实时分析，若发现指标超标（如含水率超出最优范围），立即向施工端发送预警信息，实现动态反馈。例如，渠道夯填中，IoT系统可实时监测边坡土体含水率，避免因含水率异常导致压实度不达标，保障施工质量<sup>[4]</sup>。

### 3.3 方法对比与适用性分析

(1) 精度、成本、操作复杂度对比表

检测方法	精度（压实度误差）	单次检测成本（元）	操作复杂度
探地雷达（GPR）	±1.5%	3000-5000	中等（需专业软件处理）
瞬态瑞利波法	±2.0%	2000-3500	较高（需激振与信号同步）
电阻率法	±2.5%（含水率）	1500-2500	较低（电极布设简单）
无人机+传感器	±2.0%	8000-12000	中等（需飞行与建模配合）
IoT实时监测	±1.0%（动态数据）	10000-15000（含设备）	较高（需网络与平台维护）

(2) 不同工程场景下的技术选型建议：①狭小空间（如闸门基础、管道周边夯填）：优先选用电阻率法，其电极体积小、布设灵活，无需大面积作业空间；②深层夯填（如堤坝心墙、路基深层处理）：选择瞬态瑞利波法，探测深度可达10m，能满足深层质量检测需求；③大面积快速筛查（如渠道边坡、平原水库堤坝）：推荐无人机搭载传感器，高效完成大范围扫描，快速识别质量异常区域；④长期运行监测（如已建堤坝、输水渠道）：采用IoT实时监测技术，实现24小时动态数据采集，及时预警风险；⑤高精度检测（如重要枢纽工程夯填）：结合探地雷达与机器学习算法，通过多源数据融合提升检测精度，保障关键部位质量。

#### 4 水利工程土方夯填质量检测方法优化与标准化建议

##### 4.1 技术优化方向

(1) 多源数据融合：单一检测方法易受土体特性干扰，多源数据融合可实现优势互补。例如，地质雷达能精准识别层间缺陷，电阻率法可反演含水率分布，含水率传感器实时获取点位水分数据，将三者数据通过数据融合算法（如加权融合、卡尔曼滤波）整合，能同时确定压实度、含水率及内部结构缺陷，减少单一方法误差。如在堤坝检测中，融合后的数据可更全面反映夯填质量，避免因单一数据偏差导致的误判，提升检测结果可靠性。(2) 自动化检测设备研发：针对传统设备操作复杂、依赖人工的问题，研发便携式智能设备。此类仪器可集成多种检测功能，如内置雷达模块、电阻率探测模块，能自动采集数据并实时计算压实度、含水率，通过显示屏直观呈现结果，无需人工繁琐计算。同时，设备可搭载定位系统，自动记录采样点位置，减少人为记录误差，且便携设计适合野外作业，提升检测效率，满足施工现场快速检测需求。

##### 4.2 标准化与规范化建议

(1) 检测流程标准化：明确不同工程类型的采样点

间距标准，如堤坝工程每50m<sup>2</sup>布设1个检测点，渠道工程每30m布设1个点，避免因间距随意导致的检测盲区。统一数据校准方法，规定无损检测设备需每月用标准块校准，传统检测方法需同步进行平行试验验证，确保不同检测机构、不同人员的检测流程一致，减少流程差异引发的结果偏差，保障检测数据可比性<sup>[5]</sup>。(2) 行业规范完善：当前无损检测技术应用混乱，需设定准入门槛，要求设备需通过国家权威机构性能认证，操作人员需持专业证书上岗，具备设备操作、数据处理能力。同时，明确无损检测结果在工程验收中的权重，规范检测报告格式，统一数据呈现方式，避免因规范缺失导致的技术滥用，推动无损检测技术在水利工程中有序、合规应用。

##### 结束语

水利工程土方夯填质量检测是保障工程安全运行的基石。传统检测方法奠定了质量把控的基础，而现代无损与智能化检测技术的兴起，为高效、精准检测提供了新路径。未来，需持续推动多源数据融合与自动化设备研发，完善检测标准与规范，强化技术培训与监管。唯有如此，才能全面提升水利工程夯填质量检测水平，为水利事业高质量发展筑牢坚实屏障。

##### 参考文献

- [1]李炜.水利工程施工中土方填筑施工技术探析[J].工程建设与设计,2024,(02):164-166.
- [2]田锋.高速公路工程土方路基施工技术研究[J].运输经理世界,2023,(29):28-30.
- [3]方群.水利工程施工中土方填筑施工技术探析[J].大众标准化,2023,(13):52-54.
- [4]李积云.浅析水利工程土方夯填质量检测方法[J].水上安全,2024,(08):71-73.
- [5]刘美玲.水利工程土方填筑施工技术探讨[J].水上安全,2024,(06):169-171.