

水利水电土石方填筑施工压实检测技术研究

王洋

浙川县水利技术指导中心, 中国·河南 南阳 473000

摘要: 水利水电工程土石方填筑压实质量直接关系到工程结构安全与长期运行稳定性, 是工程质量管控的核心环节。当前检测技术呈现传统与新型并存格局, 传统技术(环刀法、灌砂法等)精度可靠但存在破坏性、效率低、点检测局限, 新型技术(压实计法、探地雷达法等)具无损、高效优势, 但在复杂工况适配性与数据校准方面仍需完善。本文通过系统梳理两类技术特性, 开展对比试验与数据分析, 构建“智能实时监测+面检测筛查+点检测校准”的优选方案及全流程质量控制体系, 提出技术优化与信息化管理路径, 为工程高效精准管控提供理论与实践支撑。

关键词: 土石方填筑; 压实质量; 检测技术; 质量控制

Research on Compaction Testing Technology for Earthwork and Rockfill Construction in Water Conservancy and Hydropower Projects

Wang Yang

Xichuan County Water Conservancy Technical Guidance Center, China Henan Nanyang 473000

Abstract: The compaction quality of earthwork and rockfill in water conservancy and hydropower projects directly affects the structural safety and long-term operational stability of the project, serving as a critical component of quality control. Current testing technologies exhibit a coexistence of traditional and novel approaches. Traditional methods (e.g., ring knife method, sand injection method) offer reliable precision but suffer from destructiveness, low efficiency, and limitations in point detection. Novel technologies (e.g., compaction meter method, ground-penetrating radar method) demonstrate non-destructive and high-efficiency advantages, yet require further refinement in adapting to complex conditions and data calibration. This study systematically compares the characteristics of both technologies, conducts comparative experiments and data analysis, and establishes an optimized solution integrating "intelligent real-time monitoring + surface detection screening + point detection calibration" with a comprehensive quality control system. It proposes technical optimization and information management pathways to provide theoretical and practical support for efficient and precise project management.

Keywords: Earthwork filling; Compaction quality; Testing technology; Quality control

1 绪论

水利水电工程作为国家基础设施建设的核心组成部分, 承担着防洪减灾、水资源调配、清洁能源供给等多重战略任务, 而土石方填筑工程是堤坝、坝体、堤防等核心构筑物的基础施工环节, 其施工质量直接决定工程整体安全性能与长期运行稳定性。压实作业作为土石方填筑的关键工序, 通过外力作用减少填筑材料孔隙率、提升颗粒密实度, 不仅能增强结构承载能力与抗变形能力, 更直接影响工程防渗性能——若压实质量不达标, 易引发不均匀沉降、渗漏、滑坡等重大工程隐患。因此, 系统研究水利水电工程土石方填筑施工压实质量检测技术, 梳理传统与新型技术的应用特性, 优化检测方案与质量控制体系, 对于提升工程质量管理水平、降低安全风险、推动水利工程施工技术智能化升级具有重要的理论价值与工程实践意义。

2 水利水电工程土石方填筑施工传统压实质量检测技术

2.1 环刀法检测技术

基于体积-质量法原理, 通过环刀切割填筑体获取原状土样, 测算密度与压实度。操作流程为选点、切取土样、称量、计算, 适用于黏性土及粉土。检测精度较高(误差 $\leq 2\%$), 但属破坏性检测, 操作繁琐, 且不适用于含碎石的填筑体。某水库大坝施工中, 采用环刀法抽检黏性土填筑层, 需避开碎石集中区, 确保取样代表性。

2.2 灌砂法检测技术

需配套标准砂、灌砂筒、天平设备, 试验步骤包括标定砂密度、开挖试坑、灌砂、测算体积与密度。误差控制核心在于试坑形状规整、砂粒均匀且无遗漏, 适用于砂性土、碎石土等无黏性土。其优势是对粗颗粒材料适配性强, 但检测耗时较长, 且受填筑面平整度影响较大。

2.3 灌水法检测技术

利用水的不可压缩性,通过标定容器向试坑注水,测量坑内水体积推算土样体积,进而计算密度。操作要点为保证试坑壁垂直、密封防漏水,对填筑面平整度要求较高,适用于黏性土、砂性土及含少量碎石的填筑体。与灌砂法相比,无需标准砂,成本更低,但检测速度较慢,不适用于含水率过高的土体。

2.4 核子密度仪法检测技术

基于放射性元素(如铯-137)发射的射线与土体相互作用,测量射线衰减程度推算密度与含水量。设备需定期校准,现场检测前需用标准块标定。其核心优势是快速高效(单测点 ≤ 3 分钟),但存在辐射风险,需操作人员佩戴防护装备,且对含大块碎石的填筑体检测精度下降,校准不当易产生误差。

2.5 传统检测技术的综合对比与应用局限

综合来看,环刀法与灌砂法精度较高,但速度慢、属破坏性检测;核子密度仪法快速便捷,却有辐射隐患;灌水法成本低但适配性有限。传统技术均为“点检测”模式,难以反映大面积填筑体的压实均匀性,且检测效率普遍较低(单日单设备检测 ≤ 30 点),在大体积、高填筑速度的水利工程中,易因检测滞后影响施工进度,同时破坏性检测会损伤填筑结构,难以满足全过程质量管控需求^[1]。

3 水利水电工程土石方填筑施工新型压实质量检测技术

3.1 面波法检测技术

面波法通过激振源激发瑞利波,利用传感器接收波速信号,压实度越高则波速越大,二者呈正相关。现场按网格布置激振点与接收点,经锤击激发后记录波传播数据,通过频谱分析与波速反演处理。其核心优势为无损检测,避免结构破坏,且实现面状覆盖,相较于点检测更全面反映压实均匀性,适用于大面积快速筛查。

3.2 探地雷达法检测技术

基于高频电磁波传播原理,电磁波遇介质界面反射,其速度与填筑材料介电常数相关,进而反映压实质量。应用中可精准测定压实层厚度,通过反射波连续性判断孔隙分布,凭信号振幅评估均匀性,检测时需适配填筑材料调整天线频率与移动速度,聚焦内部缺陷精细化探测。

3.3 压实计法(智能碾压监测法)

由车载传感器、数据终端及定位系统组成,实时采集激振力、碾压速度、遍数等参数,基于振动响应与压实度的关联模型实现动态监测。可闭环管控碾压过程,避免漏压、过压,实时反馈质量状态,显著提升施工效率,适配大型工程全过程质量管控。

3.4 无核密度仪法检测技术

采用电磁感应原理,通过电磁波相位变化推算材料密

度与含水量,相较核子密度仪无辐射、操作简便。现场需用标准试样校准,适用于黏性土、砂性土等多种材料,尤其适配辐射敏感区域及中小型工程快速抽检。

3.5 新型检测技术的性能分析与适用场景

面波法快且覆盖广,探地雷达法精度高,压实计法实时可控,无核密度仪法便捷环保。精度上压实计法与探地雷达法最优,速度上面波法与无核密度仪法占优,成本与操作难度各有差异。实际应用可组合搭配:大型工程以压实计法为主,结合面波法筛查、探地雷达法精测、无核密度仪法抽检,构建全方位检测体系。

4 土石方填筑压实质量检测技术对比试验与数据分析

4.1 试验工程概况

选取某大型水库大坝加高扩容工程为试验载体,工程位于长江中游支流,填筑总量约86万 m^3 ,主要填筑材料为粉质黏土、级配砂砾石及风化岩碎石。施工采用分层碾压工艺,分层厚度30-50cm,压实机械选用20t振动压路机,质量控制要求压实度 $\geq 95\%$ (黏性土)、 $\geq 96\%$ (砂砾石),渗透系数 $\leq 1 \times 10^{-4} cm/s$ 。

4.2 试验方案设计

对比技术涵盖传统(环刀法、灌砂法、核子密度仪法)与新型(面波法、探地雷达法、压实计法、无核密度仪法)共7类。在大坝主坝段选取3个典型试验区,每个试验区布设20个检测点位(网格间距5m \times 5m),每层填筑完成后同步开展多技术平行检测,累计检测频次120组。数据采集需记录干密度、压实度、检测耗时等指标,分析标准参照《水利水电工程压实度检测规程》SL 176-2007。

4.3 试验数据采集与处理

采集各技术实测干密度、压实度数据,剔除异常值后采用SPSS软件进行统计分析。通过计算均值、标准差、变异系数评估数据离散性,采用相关性分析验证不同技术检测结果的关联性,误差分析以环刀法(黏性土)、灌砂法(砂砾石)检测结果为基准,计算其他技术的相对误差。

4.4 试验结果对比分析

结果显示,新型技术与传统基准技术检测结果一致性良好,压实计法、探地雷达法相对误差 $\leq 3\%$,面波法、无核密度仪法相对误差 $\leq 5\%$ 。检测效率方面,压实计法、面波法单日检测量达传统技术的5-8倍,无核密度仪法单测点耗时仅传统技术的1/3。适用性上,新型技术更适配大面积、高节奏施工,传统技术在关键部位精准抽检中仍具优势,验证了新型技术的可靠性与高效性。

4.5 检测技术适配性结论

黏性土填筑区推荐“压实计法+环刀法”组合,压实计法全程动态监测,环刀法关键点位抽检;砂砾石填筑区采用“探地雷达法+灌砂法”,探地雷达法探测厚度与均

匀性,灌砂法校准密度;大面积快速施工阶段优先选用面波法、压实计法,竣工验收阶段结合无核密度仪法与传统技术复合检测。新型技术主导全过程管控,传统技术补充验证,形成“动态监测-精准抽检-复合验证”的互补应用模式,兼顾效率与精度^[2]。

5 水利水电工程土石方填筑压实质量检测技术优化与质量控制体系构建

5.1 现有检测技术的优化措施

针对传统检测技术,环刀法优化取样流程,采用双环刀取样减少扰动,对含少量碎石的土体先筛除粗颗粒再检测;灌砂法改进试坑开挖工具,采用定型模板保证坑壁规整,同时增加标准砂含水率实时监测,修正密度计算值。新型技术方面,面波法引入多频激振技术,结合地质雷达数据优化波速反演算法,提升不同深度压实度评估精度;压实计法升级传感器精度,增加温度补偿模块,建立针对不同填筑材料的振动参数校准库,减少环境因素对数据的影响。无核密度仪法优化现场校准流程,采用同批次材料的标准压实试样进行多点标定,构建区域化校准曲线,提升检测数据的稳定性。

5.2 检测技术的组合应用策略

构建“传统点检测+新型面检测+智能实时监测”的三维组合检测体系。施工准备阶段,采用探地雷达法进行填筑基底平整度与缺陷探测;分层碾压阶段,以压实计法实现全程实时动态监测,同步采用面波法进行大面积压实均匀性筛查(每3层检测1次);关键部位(如坝体防渗体、坝肩结合部)增设环刀法、灌砂法精准抽检(抽检比例不低于5%);竣工验收阶段,采用无核密度仪法进行快速全覆盖检测,结合传统技术进行重点复核。针对黏性土填筑区,侧重压实计法与环刀法组合;砂砾石填筑区,强化探地雷达法与灌砂法联动,实现效率与精度的平衡。

5.3 压实质量全流程检测与控制体系构建

以施工工艺为核心,构建全流程闭环管控体系。材料进场检验环节,检测填筑材料的颗粒级配、含水率、最大干密度等指标,不合格材料严禁入场;分层碾压过程中,实时监测碾压遍数、速度、激振力等施工参数,结合压实质量检测数据,建立“检测数据-施工参数”联动调整机制,当检测压实度不达标时,自动反馈并调整碾压参数(如增加遍数、调整激振力);成型质量验收环节,综合多技术检测结果,出具分层质量评估报告,未达标层严禁进行下一层填筑。同时,明确各环节检测责任主体与时限要求,确保管控流程高效运转。

5.4 检测数据信息化管理平台设计

基于工程质量管控需求,设计集数据采集、存储、分

析、预警于一体的信息化管理平台。核心功能包括:数据采集模块支持传感器实时上传、人工录入等多种方式数据接入,兼容不同检测技术的格式标准;存储模块采用云数据库架构,实现检测数据的安全存储与历史追溯;分析模块内置压实质量评价模型,自动生成压实度分布云图、趋势分析曲线,识别质量薄弱区域;预警模块设置压实度、施工参数等关键指标的阈值,当数据超标时实时推送预警信息至相关责任人。平台支持Web端与移动端同步访问,实现检测数据可视化展示与工程质量动态管控,为决策提供数据支撑^[3]。

6 结论与展望

本文系统梳理了水利水电工程土石方填筑传统与新型压实质量检测技术的原理、应用特性及优劣。研究表明,传统技术(环刀法、灌砂法)检测精度高,适用于关键点精准抽检;新型技术(压实计法、探地雷达法等)具无损、高效、面检测优势,适配大面积动态管控。提出“智能实时监测+面检测筛查+点检测校准”的优选方案:施工过程以压实计法为主导,结合面波法/探地雷达法全覆盖检测,关键部位用传统技术抽检验证。质量控制需强化全流程闭环管理,重点把控材料进场检验、碾压参数联动调整及检测数据信息化追溯。

上述研究存在一定局限性,对比试验选取的填筑材料以粉质黏土、砂砾石为主,对高含水率、大块石含量高的特殊填筑体检测适配性研究不足;试验数据样本量集中于单一工程,不同气候、地质条件下的技术性能验证不够充分;对新型技术长期稳定性及复杂工况下的误差修正模型研究有待深化。

随着水利工程智能化发展,未来将聚焦三大方向:一是融合AI算法构建智能数据分析模型,实现检测数据的质量隐患自动识别与预测;二是推进多技术融合监测,整合面波、雷达、压实计数据,提升全域质量评估精度;三是研发无人机搭载、机器人自主导航的无人化检测设备,适配复杂作业环境;同时需开展不同工程场景的长期试验,完善技术标准体系,助力工程质量管控智能化升级。

参考文献:

- [1] 彭飞. 水利工程中面板堆石坝坝体填筑施工技术研究[J]. 珠江水运, 2024(06).
- [2] 聂培, 周娟. 水利工程混凝土面板堆石坝坝体填筑施工技术[J]. 水上安全, 2024(04).
- [3] 刘振路, 李臻. 水利工程中面板堆石坝坝体填筑施工技术分析[J]. 中国新技术新产品, 2021(04).

作者简介:王洋(1995.01-),男,河南省南阳市人,汉族,大专,研究方向:水利水电工程。