

水电施工土石方填筑压实度快速检测方法

刘继承

中国水利水电第七工程局有限公司

DOI:10.32629/btr.v8i10.5085

[摘要] 水电工程土石方填筑施工中,压实度是控制工程质量的核心指标。传统检测方法存在时效性差、检测点位有限等问题,难以适应大规模连续施工的质量管控需求。本文系统分析了环刀法、灌砂法、核子密度仪法等常规检测技术的适用性与局限性,重点探讨了基于现场振动监测的连续压实检测技术、时域反射技术及地质雷达快速检测技术的原理与应用方法。连续压实检测技术结合少量传统验证点,可实现填筑压实度的全过程、全断面快速评估,检测效率显著提升。本文成果可为水电工程土石方填筑质量管控提供技术参考。

[关键词] 土石方填筑; 压实度; 快速检测; 连续压实; 无损检测

中图分类号: TV52 文献标识码: A

Rapid Detection Methods for Compaction Degree of Earth-Rock Fill in Hydropower Construction

Jicheng Liu

Sinohydro Bureau 7 Co., Ltd.

[Abstract] In earth-rock fill construction for hydropower projects, compaction degree is a key indicator for quality control. Traditional testing methods suffer from limitations such as low efficiency and limited sampling points, making them difficult to meet the quality control requirements of large-scale continuous construction. This paper systematically analyzes the applicability and limitations of conventional testing methods, including the ring cutter method, sand replacement method, and nuclear density gauge method. It focuses on the principles and application methods of continuous compaction control technology based on field vibration monitoring, time-domain reflectometry technology, and ground-penetrating radar rapid detection technology. By combining continuous compaction control technology with a limited number of traditional verification points, rapid assessment of compaction quality throughout the entire filling process and across the full section can be achieved, significantly improving detection efficiency. The findings of this study provide technical references for quality control of earth-rock fill construction in hydropower projects.

[Key words] Earth-Rock Fill; Compaction Degree; Rapid Detection; Continuous Compaction; Non-Destructive Testing.

引言

水电工程大坝、围堰、场平等建设中,土石方填筑工程量巨大,填筑质量直接关系工程安全。压实度作为衡量填筑质量的关键指标,需要在施工过程中及时检测与控制。传统压实度检测方法以环刀法、灌砂法为代表,这些方法虽然准确可靠,但操作流程繁琐、检测周期较长,单个测点获得结果需要较长时间,难以满足大规模填筑施工对检测效率的要求。近年来,随着传感器技术和信号处理技术的发展,多种快速检测方法逐渐应用于土石方填筑压实度检测领域。

1 传统压实度检测方法及其局限性

1.1 环刀法

环刀法是测定土体密度的经典方法,其基本原理是用已知容积的环刀采取原状土样,称量土样质量后计算湿密度,再通过烘干法测定含水率,最终计算干密度和压实度。该方法操作相对简单,设备成本低廉,结果准确可靠,压实度测量误差可控制在±1.5%以内。然而,环刀法的局限性同样明显。一是取样过程对土层有扰动,环刀压入时可能压缩土体,现场试验表明环刀法测量值较真实值偏高0.5%至2.0%。二是检测周期较长,现场取样后需送回实验室烘干,通常需要8至12小时才能获得最终结果,无法满足现场实时调控的需要。三是检测深度有限,环刀一般只能

采取表层10至20cm深度的土样,难以反映填筑层中下部30至50cm处的压实情况。

1.2 灌砂法

灌砂法是现场测定土体密度的常用方法,尤其适用于粗粒土和碎石土。其原理是在填筑面挖出一定体积的试坑,用标准砂填充试坑,根据消耗砂量计算试坑体积,再结合挖出土样的质量计算密度。灌砂法适用于多种土质,不受土体成分限制,检测深度可根据试坑深度灵活调整,最大检测深度可达50cm。但该方法同样存在效率问题,单个测点从挖坑、称量、灌砂到计算完成通常需要40至60分钟,熟练工也仅能缩短至30分钟左右。此外,灌砂法对操作人员技能要求较高,不同操作者的检测结果差异可达±3.0%。在大型水电工程填筑施工中,每日填筑量可达2至3万立方米,按规范要求需检测200至300个点位,传统方法仅能完成30至50个,检测覆盖率不足0.02%。

1.3 核子密度仪法

核子密度仪法利用放射性同位素发射的射线与土体物质相互作用的原理,可快速测定土体密度和含水率。该方法属于无损检测范畴,单个测点检测时间仅为1至3分钟,不破坏填筑面,可进行连续检测。某水电工程应用数据显示,核子密度仪与灌砂法的对比测量偏差约为±2.0%,满足施工质量控制要求。然而,核子密度仪法存在放射源安全管理的特殊要求,操作人员需经过专业培训并持证上岗,设备存放、运输、使用均需符合严格的辐射防护规定^[1]。同时,仪器需要针对不同土质进行标定,标定工作通常需要2至3天。由于放射源管理的复杂性,该方法在工程中的推广率不足30%。

2 压实度快速检测技术原理与方法

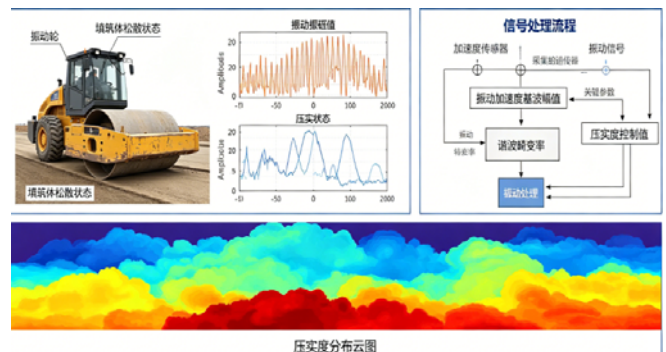
2.1 连续压实检测技术原理与参数

当压路机振动碾压时,填筑体的压实程度变化会改变振动轮的响应特性。填筑体较松散时振动能量被吸收较多,振幅约为0.3至0.5mm;压实程度提高后填筑体刚度增大,振幅增大至0.8至1.2mm。连续压实检测系统通过在振动轮上安装加速度传感器实时采集振动信号,采样频率可达1000Hz,经算法计算得到连续压实检测值,该值与压实度的相关系数可达0.85至0.95。关键参数包括振动加速度基波幅值、谐波畸变率、压实度控制值等。基波幅值反映填筑体整体刚度,变化范围在5g至20g之间;谐波畸变率反映非线性特征,合格填筑体一般小于15%;压实度控制值需通过现场标定试验建立与常规检测方法的相关关系,标定样本量不少于30组。该系统可在压路机作业过程中以10cm×10cm的空间分辨率实时显示压实度分布云图,操作人员可据此调整碾压参数。

2.2 时域反射技术原理与适用条件

时域反射技术通过发射电磁脉冲信号至插入土体的探针,根据反射波形测定土体介电特性,进而间接测定压实度。土体介电常数主要受含水率、密度影响,干密度每增加0.1g/cm³,介电常数约增加0.5至1.0。该技术优势在于检测速度快、无辐射危害,单点检测时间不超过30秒,且不破坏填筑面,可重复测量。适

用于不含大量导电物质的土体,对电阻率大于100Ω·m的土体测量精度可达±2.0%。对于高含盐量(超过0.5%)或高含水率(超过25%)的土体,精度下降至±5.0%以上。局限性在于探针插入深度有限(一般不超过30cm),且对于粒径超过5cm的粗粒土,探针插入困难,测量代表性不足。



连续压实检测技术原理与参数示意图

2.3 地质雷达快速检测技术

地质雷达技术利用高频电磁波在土体中的传播特性探测填筑体内部结构。电磁波传播速度通常为0.07至0.12m/ns,通过测量双程走时可反演介电常数和密度。地质雷达采用连续扫描方式,纵向分辨率可达5cm,横向分辨率可达20cm,单条测线扫描速度可达每小时5至8公里,检测效率是传统方法的100倍以上。可探测层间结合不良、空洞等隐蔽缺陷,探测深度为2至5m。局限性在于含水率超过20%时电磁波衰减明显,探测深度降至1m以内。数据解译较为复杂,需专业人员分析,目前更适用于初步筛查和异常区域识别,异常识别准确率约为80%至85%。

2.4 各种快速检测方法的适用性比较

上述三种快速检测方法各有特点和适用场景,连续压实检测技术最适合大面积连续填筑施工的质量过程控制,可在碾压作业的同时完成检测,实现“边碾压、边检测、边反馈”。该技术需要压路机安装专用检测系统,前期投入较大,但长期运行成本较低。时域反射技术适用于小范围、高密度检测需求,设备便携、操作简单,是传统点式检测的有效补充。地质雷达技术适用于填筑体内部结构探查和隐蔽缺陷识别,在大范围快速筛查方面具有独特优势^[2]。在实际工程应用中,建议采取“连续压实检测为主、点式验证为辅”的检测策略,即采用连续压实检测技术进行全断面覆盖检测,在异常区域采用时域反射或传统方法进行验证复核,兼顾检测效率与准确性。

3 工程应用与效果分析

3.1 连续压实检测系统应用实例

选取一处大型水电工程大坝填筑施工案例,采用连续压实检测系统对坝体堆石区进行压实质量全过程监控。该工程填筑总量约500万立方米,高峰期每日填筑量超过2万立方米。传统灌砂法单个测点需50分钟,每日最多完成30个测点,检测覆盖率严重不足。引入连续压实检测系统后,每台振动碾在碾压过程中实时采集数据,以20cm×20cm的网格分辨率生成压实度分布云图。

系统运行期间累计采集有效数据约2000万组,实现了对全部填筑区域的全覆盖检测。应用效果表明,该系统可有效识别欠压区和过压区,操作人员根据系统提示及时补充碾压,避免了后期返工处理。与传统方法对比,连续压实检测值与灌砂法压实度的相关系数达到0.85以上,经标定后两者偏差不得超过1.5%。采用该系统后,检测效率由每日不足30个测点提升至全断面实时监控,减少了停工等待时间,施工进度明显加快。

3.2 综合检测方案与效率对比

结合多种快速检测技术,可形成分层的综合检测方案。第一层级为连续压实检测系统,安装在每台振动碾上,实现碾压过程全覆盖监控。第二层级为时域反射快速抽检,由质量管理人员携带便携设备,对连续压实检测系统提示的异常区域进行复核确认^[3]。第三层级为传统灌砂法验证检测,按照规范要求的抽检频率进行,用于标定连续压实检测参数和最终质量评定。表1汇总了各层级检测方法的效率对比数据。

表1 不同压实度检测方法的效率对比

检测方法	单点检测时间	检测覆盖范围	是否破坏填筑面	适用阶段
环刀法	8小时以上	点状	破坏	事后验收
灌砂法	40至60分钟	点状	破坏	事后验收
核子密度仪法	1至3分钟	点状	无损	中间抽检
时域反射法	30秒	点状	微损	中间抽检
连续压实检测	实时	全断面覆盖	无损	过程控制
地质雷达法	连续扫描	线状或面状	无损	专项排查

4 快速检测方法实施要点

4.1 设备标定与相关性建立

快速检测方法需通过标定试验建立与常规方法的相关关系。标定试验应在施工前进行,选取代表性土料和碾压工况,设置5至8个不同压实程度的试验点位,每点重复试验3次。先采用快速检测系统采集数据,立即在同一位置(偏差不得超过20cm)用灌砂法测定压实度,建立数学关系模型,相关系数应达0.85以上。标定样本不少于30组,覆盖压实度92%至105%的完整范围。某工程标定结果显示,连续压实检测值与灌砂法压实度的回归方程为 $Y=0.72X+28.5$,相关系数 $R^2=0.82$,标准误差1.3%。当土料性质、碾压设备或工艺发生明显变化时需重新标定,一般每2至3个月或每填筑50万立方米后复核一次。

4.2 检测频率与验收标准

建议采用“快速普检结合传统抽检”的方式。连续压实检

测系统应对每个碾压层进行全过程监控,数据记录间隔不超过 $1m \times 1m$ 。传统验证检测频次为每填筑一层或每500至2000平方米设置一个验证点,较传统规范要求可减少50%至70%,验证点优先选择在快速检测显示压实度偏低的区域。验收标准方面,设计压实度为98%时,连续压实检测控制值一般设为95至102之间,同时规定同一填筑层内压实度极差不超过5%,变异系数不超过3%。实测数据显示,采用该验收标准后,填筑体整体压实合格率由传统方法的92%提升至97.5%。

4.3 异常区域处理流程

异常区域需及时处理,处理时限一般不超过2小时。根据异常程度分级处置:对于压实度低于标准0.5%至1.5%且范围不超过 $50m^2$ 的区域,继续碾压1至2遍后复测;对于低于标准1.5%以上或范围超过 $100m^2$ 的区域,应分析原因,采取调整含水率、增加碾压遍数(由6遍增至8遍)等措施后重新碾压;对于压实度异常偏高(超过设计值5%以上)的情况,需验证是否存在填料混入大块石或系统故障^[4]。工程统计显示,异常区域一次处理合格率达85%,二次处理合格率达98%。所有处理过程应记录存档,形成质量追溯链条。

5 结束语

水电工程土石方填筑压实度检测正从传统点式抽检向连续、全断面检测方向发展。本文系统分析了传统检测方法的局限性,阐述了连续压实检测、时域反射、地质雷达等快速检测技术的原理与方法。研究表明,以连续压实检测技术为核心、辅以传统验证点的综合检测方案,可在保证检测准确性的前提下显著提升检测效率。未来随着传感器技术和人工智能算法的发展,压实度检测将向智能化、自动化方向迈进,进一步提升水电工程施工质量管控水平。

[参考文献]

- [1]张述涛,付晖,罗小斌.土石方填筑体密度检测的瞬态面波法研究[J].土工基础,2022,36(3):462-465.
- [2]叶田娇.基于EVD的一种土石方填筑压实度快速检测方法研究[J].交通科技与管理,2021,(15):219-220.
- [3]李振江,姜梦圆.浅析土石坝水库填筑黏土料压实度超百现象[J].水利建设与管理,2024,44(1):23-26.
- [4]朱桂权.土石混合填筑体压实质量无损检测的适用边界研究——以大坑底水库为例[J].江西水利科技,2026,52(1):64-68.