

土石坝压实度现场快速检测方法对比与优化

王多财

新疆水利水电勘测设计研究院有限责任公司 新疆 乌鲁木齐 830000

摘要: 土石坝作为水利工程中重要的坝型,其压实质量直接关系到坝体的稳定性与安全性。土石坝压实度的现场快速检测是确保施工质量的关键环节。本文对当前常用的土石坝压实度现场快速检测方法,如环刀法、灌砂法、核子密度仪法、瞬态瑞利波法、探地雷达法等进行了详细对比分析,探讨了各方法的优缺点及适用范围。在此基础上,提出了一系列优化检测方法的策略,包括改进检测设备、优化检测流程、结合多种检测方法以及利用新兴技术等,旨在提高土石坝压实度现场快速检测的准确性、效率与可靠性,为土石坝工程建设提供有力的技术支持。

关键词: 土石坝;压实度;现场快速检测;方法对比;优化策略

1 引言

土石坝是利用当地土料、石料或混合料,经过抛填、碾压等方法堆筑成的挡水坝。由于其具有就地取材、造价低、施工简便等优点,在国内外水利工程中得到了广泛应用。然而,土石坝坝体材料的松散性使得其压实质量成为影响坝体安全稳定的关键因素。压实度是衡量土石坝压实质量的重要指标,它反映了坝体材料在压实后的密实程度。若压实度不足,坝体在运行过程中可能出现渗透破坏、沉降变形等问题,严重威胁土石坝的安全运行。传统的土石坝压实度检测方法,如室内试验等,虽然精度较高,但存在检测周期长、无法及时反映现场压实情况等缺点,难以满足施工过程中的质量控制需求。因此,发展土石坝压实度现场快速检测方法具有重要的现实意义。现场快速检测方法能够在短时间内对土石坝压实质量进行评估,及时发现压实不合格区域,以便施工人员进行返工处理,确保土石坝的压实质量符合设计要求。

2 常用土石坝压实度现场快速检测方法对比

2.1 环刀法

环刀法是用已知容积的环刀切取土样,称取土样质量,通过计算土样的干密度与最大干密度的比值来确定压实度。具体操作时,将环刀垂直压入土中,直至环刀内充满土样,然后削平环刀两端土样,称取环刀与土样的总质量,减去环刀质量得到土样质量,再通过烘干法测定土样的含水量,进而计算干密度。环刀法操作相对简单,仪器设备成本较低,对于细粒土的压实度检测结果较为准确,在工程实践中应用广泛。缺点是检测速度较慢,每个测点需要一定时间完成取样、称重、烘干等步骤,难以满足大面积快速检测的需求。同时,环刀法对土样的扰动较大,可能会影响检测结果的准确性。此

外,对于粗粒土或含有较大颗粒的土体,环刀难以顺利切入,导致取样困难,检测结果代表性不足。主要适用于细粒土土石坝压实度的现场检测,对于砂砾石土等粗粒土土石坝,其应用受到一定限制。

2.2 灌砂法

灌砂法是通过测定一定体积的试坑中灌入标准砂的质量,来计算试坑的容积,进而根据试坑中取出土样的质量与含水量,计算土样的干密度,最终确定压实度。具体操作时,先在检测部位挖出试坑,将灌砂筒置于试坑上方,打开开关让标准砂灌入试坑,直至灌砂筒内的砂不再下落,称取灌入试坑的标准砂质量,同时测定试坑中取出土样的含水量,计算干密度与压实度。灌砂法是一种较为传统的压实度检测方法,检测结果相对可靠,对于各种土质都有一定的适用性。它不受土样颗粒大小的限制,能够较好地反映土体的实际压实情况^[1]。缺点是操作过程较为繁琐,需要挖试坑、灌砂、称重等多个步骤,检测效率较低。而且,在挖试坑过程中可能会对周围土体造成扰动,影响检测结果的准确性。此外,灌砂法对操作人员的技术要求较高,需要严格按照规范进行操作,否则容易出现较大误差。

2.3 核子密度仪法

核子密度仪是利用放射性同位素(如铯-137、钼-241等)发射的 γ 射线穿透土体时,与土体中的原子核发生相互作用,导致 γ 射线强度衰减,通过测量衰减后的 γ 射线强度来计算土体的密度和含水量,进而确定压实度。根据测量原理不同,核子密度仪可分为直接透射法和背散射法。直接透射法是将放射源和探测器分别置于土体两侧,测量 γ 射线穿透土体后的强度;背散射法则是将放射源和探测器置于土体同一侧,测量被土体散射回来的 γ 射线强度。核子密度仪法检测速度快,能够在短时

间内对大面积土石坝进行压实度检测,大大提高了检测效率。而且,该方法对土体的扰动小,操作相对简便,能够实现非破坏性检测。核子密度仪存在放射性危害,需要严格遵守辐射防护规定,操作人员必须经过专业培训并取得相应资质。同时,仪器价格昂贵,维护成本较高。此外,核子密度仪的检测结果受土体含水量、颗粒组成等因素影响较大,在不同土质条件下需要进行校准,以保证检测结果的准确性。适用于大面积土石坝压实度的快速检测,尤其对于施工进度要求较高的工程具有明显优势。但在放射性管理严格的地区,其应用可能会受到一定限制。

2.4 瞬态瑞利波法

瞬态瑞利波法是基于瑞利波在土体中的传播特性来检测土石坝压实度。瑞利波是一种沿介质表面传播的弹性波,其传播速度与介质的物理力学性质密切相关,包括密度、弹性模量等。通过在土石坝表面激发瞬态冲击力,产生瑞利波,利用传感器接收瑞利波信号,分析瑞利波的频散曲线,进而计算瑞利波的传播速度,根据瑞利波速度与压实度的相关性确定压实度。瞬态瑞利波法检测速度快,能够实现大面积连续检测,且对土体无破坏性。该方法不受土体含水量的显著影响,对于含水量变化较大的土石坝压实度检测具有一定的优势。此外,仪器设备相对便携,操作较为简便。缺点是瑞利波在土体中的传播受到土体结构、颗粒组成等多种因素的影响,导致瑞利波速度与压实度之间的关系较为复杂,需要进行大量的现场标定试验来确定两者之间的定量关系。而且,瞬态瑞利波法对检测环境要求较高,在存在较强干扰(如机械振动、电磁干扰等)的情况下,检测结果可能会受到较大影响。

2.5 探地雷达法

探地雷达通过发射天线向土石坝内部发射高频电磁波,电磁波在土体中传播时遇到不同介电常数的界面会发生反射,反射波被接收天线接收。根据反射波的旅行时间、振幅、相位等信息,分析土体内部的介质分布情况,进而推断土石坝的压实度。压实度不同的土体,其介电常数存在差异,导致反射波特征不同。探地雷达法检测速度快,能够实现非接触、大面积连续检测,对土体无破坏性。该方法可以获取土石坝内部一定深度范围内的压实度信息,对于发现深层压实缺陷具有独特优势^[2]。而且,探地雷达图像直观,便于对检测结果进行分析和解释。探地雷达法的检测结果受土体含水量、颗粒组成、电导率等因素影响较大,在不同土质条件下需要进行复杂的标定和数据处理。此外,探地雷达仪器价格较

高,对操作人员的技术水平要求较高,需要具备一定的电磁波理论和图像处理知识。

3 土石坝压实度现场快速检测方法优化策略

3.1 改进检测设备

提高设备精度与稳定性:针对现有检测设备存在的精度不足、稳定性差等问题,进行技术改进。例如,对于核子密度仪,研发更精确的辐射探测器和数据处理算法,降低放射性测量误差,提高密度和含水量测量的准确性。对于探地雷达,优化天线设计和发射接收系统,提高电磁波的分辨率和穿透能力,增强对不同土质条件下压实度的检测能力。

开发多功能一体化检测设备:将多种检测方法集成于一台设备中,实现多功能一体化检测。例如,开发同时具备环刀法、灌砂法、核子密度仪法等多种检测功能的综合检测设备,通过一次检测操作即可获取多种压实度检测数据,提高检测效率和数据的可靠性。同时,利用现代传感器技术和数据融合算法,对不同检测方法的数据进行综合分析和处理,进一步优化压实度检测结果。

增强设备便携性与易用性:改进检测设备的结构设计,使其更加轻便、易于携带和操作。例如,采用新型材料和紧凑化设计,减小设备的体积和重量;开发智能化操作界面,简化检测流程,降低对操作人员的技术要求,使现场检测人员能够更加方便、快捷地进行压实度检测工作。

3.2 优化检测流程

制定科学合理的检测计划:根据土石坝工程的施工进度、质量要求以及不同部位的压实特点,制定详细的检测计划。明确检测部位、检测频率、检测方法以及检测人员安排等内容,确保检测工作能够全面、有序地进行^[3]。例如,对于重要部位或压实质量容易出现问题的区域,增加检测频率,采用多种检测方法进行综合检测;对于一般部位,根据施工进度合理安排检测时间,提高检测效率。

规范现场检测操作:加强对现场检测人员的培训,使其熟悉各种检测方法的操作规范和注意事项。严格按照相关标准和规范进行检测操作,减少人为因素对检测结果的影响。例如,在环刀法检测中,确保环刀垂直压入土中,取样深度符合要求;在灌砂法检测中,准确挖出试坑,保证灌砂过程的规范性;在核子密度仪法检测中,正确放置仪器,严格按照辐射防护规定进行操作。

建立检测数据管理系统:利用信息化技术,建立土石坝压实度检测数据管理系统,对检测数据进行实时采集、存储、分析和处理。通过数据管理系统,能够及时

掌握土石坝压实质量的动态变化情况,对压实不合格区域进行快速定位和预警。同时,利用数据挖掘和统计分析技术,对检测数据进行深入分析,为优化施工工艺、调整压实参数提供依据。

3.3 结合多种检测方法

优势互补:不同检测方法具有各自的优缺点和适用范围,通过结合多种检测方法,可以实现优势互补,提高压实度检测的准确性和可靠性。例如,将核子密度仪法与环刀法或灌砂法相结合,核子密度仪法能够快速对大面积土石坝进行初步检测,确定压实质量的大致情况;对于核子密度仪法检测结果异常或重点关注的区域,再采用环刀法或灌砂法进行详细检测,以验证检测结果的准确性。

综合评价压实质量:利用多种检测方法获取的数据,从不同角度对土石坝压实质量进行综合评价。例如,结合瞬态瑞利波法检测的压实度分布情况与探地雷达法检测的内部压实缺陷信息,全面评估土石坝的压实质量状况,及时发现潜在的压实质量问题,为采取相应的处理措施提供科学依据。

建立多方法联合检测标准:制定多方法联合检测的标准和规范,明确不同检测方法在联合检测中的角色和作用,以及检测结果的综合判定准则。通过建立统一的标准,确保多方法联合检测工作的规范化和标准化,提高检测结果的可比性和可信度。

3.4 利用新兴技术

引入人工智能与机器学习技术:利用人工智能和机器学习算法对大量的压实度检测数据进行分析,建立压实度预测模型。通过输入土石坝的材料特性、施工参数、环境条件等信息,模型能够预测土石坝的压实度分布情况,为施工过程中的质量控制提供提前预警和指导。同时,利用机器学习算法对检测数据进行异常检测,及时发现检测数据中的异常值,提高检测结果的准确性。

应用物联网技术:通过在土石坝施工现场布置传感器网络,实时采集压实度检测数据以及与压实质量相关的其他参数(如含水量、压实机械参数等),并将数据传输至云端服务器。利用物联网技术实现数据的远程传输和共享,使施工管理人员能够随时随地掌握土石坝压实质量情况,及时进行决策和调整^[4]。此外,结合大数据

分析技术,对物联网采集的数据进行深度挖掘,为优化土石坝施工工艺和管理提供数据支持。

探索虚拟现实与增强现实技术在检测中的应用:利用虚拟现实(VR)和增强现实(AR)技术,将土石坝压实度检测数据以直观的三维模型形式呈现出来。检测人员可以通过佩戴VR或AR设备,身临其境地查看土石坝内部的压实情况,对压实缺陷进行更准确的定位和分析。同时,AR技术还可以在现场检测过程中为检测人员提供实时的操作指导和数据提示,提高检测工作的效率和准确性。

结语

土石坝压实度现场快速检测是确保土石坝施工质量的重要环节。本文对环刀法、灌砂法、核子密度仪法、瞬态瑞利波法、探地雷达法等常用土石坝压实度现场快速检测方法进行了详细对比分析,结果表明各方法在原理、优缺点和适用范围上存在明显差异。在实际工程中,应根据土石坝的土质特点、施工进度要求以及检测精度需求等因素,合理选择检测方法。为进一步提高土石坝压实度现场快速检测的准确性、效率与可靠性,本文提出了一系列优化策略,包括改进检测设备、优化检测流程、结合多种检测方法以及利用新兴技术等。未来,应进一步加强多学科交叉融合,深入开展检测方法的基础研究和技术创新,推动土石坝压实度检测技术向智能化、自动化、精准化方向发展,为保障土石坝工程的安全稳定运行提供坚实的技术保障。

参考文献

- [1]吴龙梁,江辉煌,彭新平,等.土石坝压实质量连续检测指标影响因素分析[J].水资源与水工程学报,2021,32(03):203-209.
- [2]王友乐,缪正建,丁长栋,等.基于小样本检测的土石坝料压实均匀性快速评估[J/OL].人民长江,1-8[2025-05-08].
- [3]翟翠莲.土石坝工程土工试验检测技术分析[J].石材,2024,(05):107-109+143.
- [4]安可君,刘斯宏,胡存宝,等.一种快速质量检测方法在高土石坝施工中的应用[C]//土石坝技术2020年论文集.华能澜沧江水电股份有限公司;河海大学水利水电学院,;2022:254-264.