

基于数字化施工技术的土石坝填筑质量控制体系设计与实践

葛云龙

河北省水建水电工程有限公司, 河北 保定 071000

[摘要]土石坝的填筑质量对工程结构的安全性、稳定性、使用寿命有着直接的影响, 如何实现土石坝填筑质量的管控是大型水利工程施工中的重难点问题。传统土石坝填筑质量控制主要依赖于人工的现场检测以及技术人员的经验判断, 存在人工操作的主观性较强、检测效率极低, 未能全面精准地反映填筑的质量状况。数字化技术以其信息化、智能化的优势, 打破了传统质量控制模式。文章深入探究了基于数字化施工技术的土石坝填筑质量控制体系设计, 并围绕实际工程施工案例进行实践应用, 对该体系的实用性以及可行性进行验证, 以此为大型土石坝填筑质量的管控提供参考。

[关键词]数字化施工; 土石坝; 填筑质量; 控制体系; 监测感知

DOI: 10.33142/hst.v9i4.19602

中图分类号: TV642

文献标识码: A

Design and Practice of Quality Control System for Earth Rock Dam Filling Based on Digital Construction Technology

GE Yunlong

Hebei Shuijian Hydropower Engineering Co., Ltd., Baoding, Hebei, 071000, China

Abstract: The filling quality of earth and rock dams has a direct impact on the safety, stability, and service life of engineering structures. How to control the filling quality of earth and rock dams is a key and difficult problem in the construction of large-scale water conservancy projects. The quality control of traditional earth and rock dam filling mainly relies on manual on-site inspection and the experience judgment of technical personnel. There is a strong subjectivity in manual operation and extremely low detection efficiency, which fails to fully and accurately reflect the quality status of the filling. Digital technology, with its advantages of informatization and intelligence, has broken the traditional quality control mode. The article explores in depth the design of a quality control system for earth and rock dam filling based on digital construction technology, and applies it in practical engineering construction cases to verify the practicality and feasibility of the system, providing reference for the quality control of large-scale earth and rock dam filling.

Keywords: digital construction; earth rock dam; filling quality; control system; monitoring and sensing

引言

土石坝凭借其适应性强、取材便捷、造价经济、施工工艺简单的核心优势广泛应用于水利水电、防洪抗旱、水资源调配等工程中。在我国已投用或在建的水利枢纽工程中土石坝的占比较高。对于土石坝工程而言, 填筑的质量对大坝的结构稳定性、工程长期安全运行、防渗性能有着直接的影响, 若填筑的质量不合格, 容易引发重大安全隐患。长期以来我国土石坝填筑质量的控制一般采用传统的“事后检测”模式, 但是这种检测方法效率极低, 并且容易受人为操作误差的影响, 未能及时发现施工过程中的质量隐患。近年来伴随着人工智能、物联网、大数据等数字化技术的快速发展, 在土石坝填筑施工过程中通过应用数

字化施工技术进行管理, 能够实现施工数据的实时采集, 并且能够基于实际情况构建全方位、全流程的土石坝填筑质量控制体系, 可以有效提高填筑的质量, 提升施工效率, 在一定程度上降低工程的安全风险。

1 数字化技术支撑

土石坝填筑监测与施工管控存在效率低、精度差等问题, 但物联网技术正是实现实时监测与数据采集的核心支撑。施工区域内可部署压实度、含水量等各类传感器, 这些设备能够实时采集填筑施工关键参数, 再通过无线通信技术将数据传输至数据中心, 从而打破传统人工采集的诸多局限, 真正实现数据采集的自动化、实时化与规模化。而在设备作业管控方面, GNSS 定位技术可用于碾压设备

的精准定位与轨迹跟踪。施工方在碾压设备上安装定位终端后,便能实时获取设备运行信息,再结合预设的施工设计参数,精准控制碾压范围、行驶速度、碾压遍数等关键工艺指标,有效避免漏压、过压等施工问题。同时,无人机航测技术也能实时监测坝体填筑轮廓与填筑厚度,并以可视化方式呈现结果。无人机搭载专业航拍设备,可获取坝体三维点云与影像数据,据此生成三维数字化模型,计算实际填筑参数并与设计值进行对比,帮助现场及时发现施工偏差。不过面对海量监测数据,单纯收集汇总难以发挥数据价值,因此大数据分析技术可对监测数据进行深度挖掘。该技术通过构建专业数据模型,对填筑关键参数开展统计分析,挖掘施工规律、识别潜在质量隐患,既为智能预警与精细化施工控制提供支撑,也能实现对填筑质量的动态评价。在此基础上,人工智能技术进一步提升管控智能化水平。它借助机器学习算法构建质量隐患识别模型,不仅能自动识别异常数据并发出预警,还可根据现场情况智能调控施工参数。此外,数字化建模技术能够构建土石坝填筑三维数字化模型,将设计数据、施工过程数据与实时监测数据全面融入其中,实现全过程可视化管控。管理人员可通过模型实时查看填筑施工各项信息,为现场决策与质量管控提供有力参考。

2 基于数字化施工技术的土石坝填筑质量控制体系核心模块设计

2.1 质量控制指标体系设计

2.1.1 填料质量指标

填料是土石坝填筑的核心材料,其质量直接影响坝体的压实效果与稳定性,主要控制指标包括:

(1) 级配指标:包括填料的颗粒级配、不均匀系数、曲率系数等,需符合设计要求,确保填料具有良好的压实性能,避免出现颗粒过大或过小导致压实度不足的问题。

(2) 含水量指标:填料的含水量是影响压实效果的关键因素,需控制在最优含水量范围内(通常为最优含水量 $\pm 2\%$),含水量过高易导致坝体沉降、渗漏,含水量过低则难以压实,影响坝体强度。

(3) 含泥量指标:填料中含泥量过高会降低填料的强度与渗透性,需严格控制含泥量不超过设计标准(通常不超过 $5\% \sim 10\%$,具体根据填料类型确定)。

(4) 密度指标:填料的天然密度、干密度等指标需符合设计要求,为压实度计算提供基础数据。

2.1.2 填筑工艺指标

填筑工艺的合理性直接影响填筑质量的均匀性与稳定性,主要控制指标包括:

(1) 填筑厚度:每层填筑厚度需严格按照设计要求控制(通常为 $20 \sim 50\text{cm}$,具体根据碾压设备性能与填料类型确定),厚度过大易导致压实不充分,厚度过小则影响施工效率。

(2) 碾压参数:包括碾压速度、碾压遍数、碾压顺序等,碾压速度通常控制在 $2 \sim 4\text{km/h}$,碾压遍数根据填料类型与压实标准确定(通常为 $4 \sim 8$ 遍),碾压顺序需遵循“先轻后重、先慢后快、先边后中”的原则。

(3) 层间结合指标:层间结合面需进行刨毛、洒水处理,确保层间粘结力,避免出现层间滑动隐患,控制指标包括刨毛深度、洒水湿润度等。

2.1.3 压实质量指标

压实质量直接决定坝体的强度与稳定性,包括:

(1) 压实度:需达到设计要求(通常为 $95\% \sim 98\%$),压实度不足会导致坝体沉降、渗漏等问题。

(2) 孔隙率:填料压实后的孔隙率需符合设计要求,孔隙率过高会降低坝体的强度与抗渗性,通常控制在 $20\% \sim 30\%$ 。

表 1 土石坝填筑质量控制指标体系汇总表

控制维度	核心指标	控制标准(参考)	数字化监测方法
填料质量	级配指标	符合设计级配曲线,不均匀系数 ≥ 5 ,曲率系数 $1 \sim 3$	激光粒度分析仪、数字化筛分设备
	含水量	最优含水量 $\pm 2\%$	土壤水分传感器、便携式含水量测定仪
	含泥量	$\leq 5\% \sim 10\%$ (按填料类型调整)	数字化含泥量测定仪
	干密度	符合设计要求(通常 $\geq 1.6\text{g/cm}^3$)	密度传感器、核子密度仪
填筑工艺	填筑厚度	$20 \sim 50\text{cm}$ (按设计要求调整)	无人机航测、激光扫描、厚度传感器
	碾压参数	速度 $2 \sim 4\text{km/h}$,遍数 $4 \sim 8$ 遍,顺序符合规范	GNSS定位、碾压设备传感器
	层间结合	刨毛深度 $\geq 5\text{cm}$,洒水湿润度符合要求	高清摄像头、湿度传感器
压实质量	压实度	$95\% \sim 98\%$ (按坝体部位调整)	压实度传感器、核子密度仪
	孔隙率	$20\% \sim 30\%$	密度传感器、孔隙率测定仪
	干密度	符合设计要求	密度传感器、核子密度仪
坝体变形	沉降量	符合设计允许值(通常 $\leq 50\text{cm}$)	沉降计、无人机航测
	水平位移	符合设计允许值(通常 $\leq 30\text{cm}$)	位移计、GNSS定位
	沉降速率	$\leq 0.5\text{cm/d}$	沉降计、实时数据采集系统

(3) 干密度：压实后的干密度需达到设计标准，是衡量压实效果的重要指标，与压实度密切相关。

2.1.4 坝体变形指标

坝体变形是反映填筑质量与坝体稳定性的指标，包括：

(1) 沉降量：坝体填筑过程中及填筑完成后的沉降量需控制在设计允许范围内，避免出现不均匀沉降导致坝体开裂。

(2) 水平位移：坝体的水平位移需符合设计要求，防止出现水平滑动隐患。

(3) 沉降速率：沉降速率需控制在合理范围内，若沉降速率过快，说明填筑质量存在问题，需及时调整施工参数。构建质量控制指标体系汇总表，如表 1 所示。

2.2 数字化监测感知体系设计

数字化监测感知体系由监测设备部署、数据采集、数据传输三个子模块构成。监测设备部署遵循“全面覆盖、重点突出、布局合理”原则，分填料质量、填筑工艺、压实质量、坝体变形监测设备四类部署。数据采集以自动化为主、人工辅助为辅，自动化采集依指标重要性及变化速率确定频率，数据自动存储上传；人工辅助采集部分难自动化指标，录入系统，采集时初步校验剔除异常数据。在数据传输方面，无线传输对移动和固定监测设备分别采用不同技术，加密后上传；有线传输用于数据量大、要求高的设备。数据处理与分析体系由数据预处理、存储、整合、分析四个子模块构成。数据预处理包括清洗、补全、标准化；数据存储采用“分布式存储+本地备份”，分类存储并建索引；数据整合统一格式、关联整合、融合处理；数据分析采用“基础统计分析+深度挖掘分析”，开展基础统计、相关性、趋势、异常识别分析。

2.3 智能预警与控制体系设计

预警阈值是智能预警的核心依据，预警阈值分为三级：一级预警（一般隐患）、二级预警（较大隐患）、三级预警（重大隐患），不同级别预警对应不同的处置措施。各指标的预警阈值汇总如表 2 所示。智能预警模块依据分析结果，对比监测数据与预警阈值识别隐患并预警。先实时监

测对比判断异常，再判定隐患等级，接着生成含隐患位置等信息的预警信息，通过多种方式推送，不同等级推送给不同人员。还建立预警跟踪处置机制，确保隐患有效处置。智能控制模块根据预警与分析结果调控施工参数，针对填筑工艺参数和施工设备调控，施工参数调整后实时验证控制效果，不达标则再次调整。

2.4 质量追溯与评价体系设计

为了实现土石坝施工全流程的精准管控，完善质量追溯与评价体系尤为关键，分为追溯与评价两个子模块。追溯模块主要是通过构建全链条数据机制，对土石坝施工全流程、人员、设备、质量数据进行全面的采集，并建立统一唯一追溯编码，实现“一物一码”精准关联。同时也配备了查询系统，以此能够实现和支持多维度的快速检索。另外，通过加密电子档案完成归档、备份与恢复，确保数据安全完整。评价模块采用“过程+结果”双维评价法，构建科学指标体系与分级标准，实施动态评价。评价结果分级应用：对优秀者推广经验；合格者限期优化；不合格者停工整改。该体系实现质量可查、可控、可追溯，为工程验收、优化及安全运行提供关键决策支撑。

3 基于数字化施工技术的土石坝填筑质量控制体系实践应用

3.1 工程概况

选取某大型水利枢纽工程中的土石坝项目作为实践应用对象，该土石坝为均质土坝，坝顶高程 128.5m，最大坝高 45m，坝顶长度 890m，坝顶宽度 10m，坝体填筑总量约 180 万 m³，填筑材料主要为粉质壤土，设计压实度不低于 98%，最优含水量控制在 18%~22%。

3.2 体系应用部署

结合工程实际与体系设计方案，完成各核心模块部署调试：一是构建质量控制指标体系，明确填料含水量 18%~22%、含泥量≤8%、填筑厚度 30~40cm、碾压速度 2~3km/h、碾压遍数 6~8 遍、压实度≥98%、坝体沉降量≤45cm、沉降速率≤0.5cm/d 等控制标准。

表 2 各质量控制指标预警阈值表

控制指标	一级预警（一般隐患）	二级预警（较大隐患）	三级预警（重大隐患）
压实度	95%~96%（设计 98%）	94%~95%	<94%
含水量	最优含水量±1%~±2%	最优含水量±2%~±3%	最优含水量±>3%
填筑厚度	设计厚度+5cm~+10cm	设计厚度+10cm~+15cm	设计厚度+>15cm
沉降量	设计允许值的 70%~80%	设计允许值的 80%~90%	设计允许值的>90%
沉降速率	0.3cm/d~0.5cm/d	0.5cm/d~0.8cm/d	>0.8cm/d
含泥量	设计值+1%~+2%	设计值+2%~+3%	设计值+>3%

二是部署数字化监测感知体系,在料场、摊铺区、碾压设备、填筑区及坝体关键部位布设多类监测设备,数据实时上传。三是搭建数据处理分析体系,采用分布式存储与备份,完成数据预处理及多维度分析。四是建立智能预警体系,分级设定压实度、含水量等预警阈值,多渠道推送预警并联动智能调控。五是构建质量追溯评价体系,建立唯一编码,实现数据追溯与全过程质量评价。

3.3 应用效果分析

该数字化质量控制体系应用于土石坝工程后,有效解决传统管控痛点,实现填筑质量精准化、智能化、全流程管控。通过运用数字化质量控制体系可以提高监测效率、控制精度,提升施工效率,通过分级预警实时处理,可以避免重大质量隐患的发生。此外,数字化质量控制体系的应用促使质量追溯便捷,也可降低施工成本。实践表明,该体系可行实用,可推广应用于同类土石坝工程。

4 结论

本文围绕数字化施工技术在土石坝填筑质量控制中的应用展开研究,构建了“监测-采集-分析-预警-控制-追溯”全流程质量控制体系,可实现精准、智能、可追溯管控,有效解决传统质控痛点,提升管控效率与精度,降低成本、减少隐患,显著提高坝体稳定性与安全性,为同类工程提供参考。未来,随着新技术的不断发展与应用,均质土石坝施工工艺将在提高效率、降低成本等方面实现更大突破,为水利工程可持续发展奠定更为坚实的基础。

[参考文献]

[1]梁静波,蒋克昌,钱丹,杜儒林,车政,孙长江.基于智能监

控系统的堤防碾压施工技术[J].人民黄河,2023,45(11):121-122.

[2]邓磊.浅谈数字化施工技术在机场水稳层施工中的应用[J].四川水泥,2018(5):120-120.

[3]李宁.碾压数字化施工管理系统在土石方工程中的应用研究[J].工程与建设,2025,39(4):976-980.

[4]张社荣,金磊,王超,梁礼绘,严磊.基于数据交换技术的土石坝施工质量管控系统研发[J].水力发电,2021,47(6):70-74.

[5]栾清华,王月,李阳,裴梦桐,李彦苍.水利工程质量监督全过程全方位定量评价模型构建[J].南水北调与水利科技(中英文),2024,22(1):148-157.

[6]张玉建.水利施工中土石坝施工技术的运用研究[J].科技资讯,2025,23(20):166-168.

[7]胡婷婷,胡汛训,侯晓林.浅析信息化在水利风险管理中的应用[J].中国水运,2023,11(11):146-149.

[8]李子龙,刘磊,马瑞鑫.智能建造技术在水运工程软基施工管控中的应用研究[J].水道港口,2021,42(3):384-391.

[9]穆创国.土石坝坝体填筑质量影响因素分析[J].砖瓦,2021(7):126-127.

[10]倪仕文,彭卫平,王蝉,史宏波,郝耘庆,田刚卫.土石坝填筑碾压施工质量实时监控系统研究与应用[J].水力发电,2019,45(7):80-84.

作者简介:葛云龙(1999—),毕业于商丘工学院城市地下空间工程专业,就职于河北省水建水电工程有限公司,助理工程师。