

土石坝施工技术优化与质量控制策略分析

吴俊兴

新疆兵团水利水电工程集团有限公司 新疆 乌鲁木齐 830011

摘要: 土石坝作为水利工程中应用最为广泛的坝型之一,其施工质量直接关系到工程安全、运行寿命及下游人民生命财产安全。随着我国水利水电事业的快速发展,对土石坝建设提出了更高要求——不仅要保障结构安全,还需兼顾施工效率、资源节约与环境友好。本文系统梳理了土石坝施工的关键环节,深入分析当前施工中存在的主要技术难点与质量隐患,结合现代工程管理理念与智能建造技术,提出了一系列施工技术优化路径与全过程质量控制策略。研究表明,通过压实工艺精细化控制、填筑料级配优化、数字化施工平台构建以及全过程动态监测体系完善,可显著提升土石坝施工质量与效率。研究成果对推动土石坝工程高质量发展具有重要理论价值与实践指导意义。

关键词: 土石坝; 施工技术; 质量控制; 压实工艺; 智能建造; 全过程管理

引言

土石坝是以当地土料、石料或混合料为主要建筑材料,经分层填筑、碾压而成的挡水建筑物。因其就地取材、适应性强、抗震性能好、施工简便等优点,在全球范围内被广泛应用于水库、防洪、灌溉、发电等水利工程中。然而,土石坝也存在潜在风险,如1975年河南“75·8”板桥水库溃坝事件,造成重大人员伤亡和经济损失,其根本原因之一即为施工质量控制不严。进入新时代,随着“双碳”目标推进、智慧水利建设加速以及极端气候频发,传统土石坝施工模式面临严峻挑战:一方面,施工效率低、资源浪费大、环境扰动强;另一方面,质量控制依赖经验、过程监管滞后、数据孤岛严重,难以满足高标准、高质量工程建设需求。因此,亟需从施工技术优化与质量控制两个维度出发,系统研究土石坝建设的现代化路径。

1 土石坝施工关键技术环节分析

1.1 料场选择与材料控制

料场是土石坝的“粮仓”。优质、充足的填筑料是保证施工连续性和坝体质量的前提。料场选择需综合考虑储量、运距、开采条件、材料物理力学性质(如颗粒级配、含水率、塑性指数、渗透系数等)。实践中常出现料场勘察不足、材料变异性大等问题,导致后期填筑参数频繁调整,影响施工节奏。

1.2 坝基与岸坡处理

坝基处理是确保坝体整体稳定的基础。常见处理措施包括清基、削坡、齿槽开挖、帷幕灌浆等。若清基不彻底,残留腐殖土、树根等有机物将降低坝基承载力;岸坡未按设计坡比削坡或存在倒坡,易引发滑坡或渗流集中。

1.3 分层填筑与压实工艺

填筑施工采用“分层上料—摊铺—洒水(或晾晒)—碾压—检测”循环作业模式。压实度是衡量填筑质量的核心指标,直接影响坝体强度、变形模量及抗渗性能^[1]。传统施工中,碾压遍数、行进速度、激振力等参数多凭经验设定,缺乏实时反馈,易出现漏压、欠压或过压现象。

1.4 防渗系统施工

现代土石坝多采用心墙、斜墙或复合土工膜等防渗结构。以黏土心墙为例,其施工需严格控制含水率(通常在最优含水率 $\pm 2\%$ 范围内)、压实度($\geq 98\%$)及接缝处理。心墙与坝壳料同步上升时,若高差控制不当,易产生剪切破坏;土工膜铺设则需防止刺破、褶皱及焊接缺陷。

1.5 排水与反滤系统

排水棱体、褥垫排水、贴坡排水等设施用于降低浸润线、排出渗水。反滤层(通常由2~3层不同粒径砂砾组成)需满足“保土、透水、防堵”三原则。施工中若级配混乱、层间混杂,将丧失反滤功能,引发管涌或流土。

2 当前土石坝施工中的主要问题与挑战

尽管我国土石坝建设经验丰富,但在实际工程中仍存在诸多共性问题:(1)施工机械化与智能化水平不足:多数工程仍依赖人工指挥、目测判断,缺乏对压实设备运行状态的实时监控。碾压轨迹重叠率、遍数统计误差大,质量验收滞后于施工进度。(2)质量控制依赖“事后抽检”:现行规范要求每填筑一定方量或面积后进行干密度、含水率等指标检测。但抽检点位有限,代表性不足,难以反映整体质量分布。一旦发现不合格,返工成本高昂。(3)材料变异性管理困难:天然土石料

受地质成因影响,空间变异性显著。同一料场不同区域材料性质差异大,若未建立动态配比调整机制,易导致局部压实效果不达标。(4)环境因素干扰大:降雨、高温、冻融等气候条件直接影响填筑料含水率与压实效果。雨季施工易造成表面积水、料场泥化;冬季低温则使黏性土难以压实。(5)全过程数据整合缺失:施工日志、检测报告、影像资料等分散于不同部门,缺乏统一数据平台,难以实现质量追溯与智能分析。

3 土石坝施工技术优化路径

针对上述问题,土石坝施工技术的优化应聚焦于材料、装备、数字平台与绿色工艺四个维度,推动传统施工向智能精益建造跃升。

3.1 填筑料级配与含水率智能调控

建立料场三维地质模型,结合无人机航测与地质雷达探测,精准划分料区。利用近红外光谱或微波传感器在线检测运输车辆中填筑料含水率,自动匹配洒水或翻晒方案。对于级配不良料,可通过掺配机制(如粗细料混合)优化颗粒分布,提高压实效率。通过高密度勘探与空间插值技术,可构建料场内材料物理力学参数的三维分布图,实现“按质分区、按需开采”。在运输环节,车载传感器可在卸料前实时测定含水率,并将数据上传至中央控制系统。系统根据预设阈值自动触发洒水车定点补水或指令摊铺后晾晒,确保材料始终处于最佳压实窗口^[2]。对于天然级配不理想的料源,可在拌和站实施工厂化掺配,将粗骨料与细粒土按设计比例混合,形成稳定、均匀的人工级配料,从而显著提升压实均匀性与效率,减少对单一优质料源的依赖。

3.2 智能压实技术应用

推广智能碾压系统(IC),在振动碾上集成GPS定位、加速度传感器、温度传感器及无线传输模块。系统可实时记录碾压轨迹、遍数、速度、激振频率,并通过压实计(CMV/CCV值)评估压实质量。当某区域压实度未达标时,系统自动报警并引导补压,实现“过程即验收”。智能压实系统通过高频采集振动响应信号,计算出反映土体刚度的压实计量值,该值与传统干密度具有高度相关性。结合厘米级定位技术,系统可生成全作业面的压实质量热力图,直观显示欠压、过压或漏压区域。管理人员可通过移动终端实时查看,指挥设备精准补压。更重要的是,所有碾压数据自动关联时间、位置、材料批次等元信息,形成不可篡改的电子履历,为后续质量追溯提供完整证据链。该技术将压实从“经验作业”转变为“数据驱动”的标准化过程,从根本上解决了传统压实质量控制滞后与不均的问题。

3.3 数字孪生驱动的施工模拟与调度

构建土石坝数字孪生模型,集成BIM(建筑信息模型)、GIS(地理信息系统)与IoT(物联网)数据。通过仿真模拟不同施工方案下的填筑进度、设备配置、料场消耗,优化施工组织设计。同时,基于实时施工数据动态更新模型,实现“虚实映射、动态调控”。数字孪生平台以BIM模型为几何载体,融合地质、水文、材料、设备等多源信息,构建虚拟坝体。在施工前,可通过仿真推演不同填筑顺序、设备数量、运输路线对工期与成本的影响,优选最优方案。施工中,通过IoT设备实时采集填筑高程、压实质量、材料用量等数据,自动更新孪生模型状态,实现“物理坝体”与“数字坝体”的同步生长。当实际进度偏离计划时,系统可自动预警并推荐调整策略。这种“先模拟、再施工、边执行、边优化”的模式,大幅提升了施工组织的科学性与应变能力,是实现土石坝智能建造的核心支撑。

3.4 防渗系统精细化施工技术

采用专用心墙摊铺机,确保厚度均匀;设置激光找平系统控制高程;心墙与坝壳交界面预留台阶,加强结合。使用自动焊接机器人,配备热熔焊缝质量在线检测仪;铺设前对基层进行平整度扫描,避免尖锐物刺穿。针对黏土心墙施工,专用摊铺设备可精确控制铺土厚度与边缘线形,配合激光找平系统将高程误差控制在厘米级以内。心墙与坝壳上升高差通过自动化监测系统实时反馈,确保同步均衡。对于土工膜防渗方案,铺设前采用三维激光扫描仪对基层进行毫米级平整度检测,自动标记凸起或凹陷区域并指导整平。焊接作业由机器人完成,焊接参数全程记录,并同步进行电火花或气压检漏,确保焊缝100%密封。这些精细化技术手段,将防渗系统这一关键隐蔽工程从“依赖工人手艺”转变为“依靠装备精度”,显著提升了防渗可靠性。

3.5 绿色施工与资源循环利用

推广“零废弃”理念,将开挖弃料、筛分尾料用于坝体填筑或道路基层;采用太阳能洒水车、电动装载机降低碳排放;实施水土保持措施,减少施工对生态环境的扰动。土石坝工程土方量巨大,若能实现内部物料平衡与循环利用,可大幅减少外购材料与弃渣处置。例如,坝基开挖的岩石可用于堆石体填筑,筛分系统产生的细料可作为反滤层材料。在能源使用方面,推广新能源施工机械不仅降低碳排放,还可减少噪音与尾气污染,尤其适用于生态敏感区^[3]。同时,在料场、施工便道、边坡等区域同步实施植被恢复、沉沙池、排水沟等水土保持工程,做到“施工一片、恢复一片”。绿色施

工不仅是环保要求,更是提升工程可持续性与社会接受度的重要途径。

4 全过程质量控制策略构建

质量控制应贯穿“事前—事中—事后”全周期,形成闭环管理体系。

4.1 事前控制:标准先行,方案预控

制定《土石坝施工质量控制手册》,明确各工序控制要点与验收标准。开展工艺性试验(如碾压试验),确定最优施工参数(铺土厚度、碾压遍数、含水率范围等)。建立材料准入制度,对料场取样检测,合格后方可使用。事前控制的核心在于将质量要求前置到施工准备阶段。通过编制详细的质量控制手册,将设计意图、规范要求转化为可操作的工序标准,确保所有参建人员理解一致。工艺性试验是连接设计与施工的关键桥梁,通过现场试填试压,验证理论参数的可行性,并根据实际设备与材料特性微调施工方案。同时,建立严格的材料准入机制,对所有拟用料场进行系统取样与性能测试,只有满足设计指标的料源才允许开采使用。这种“标准—试验—准入”三位一体的事前控制模式,为后续施工奠定了坚实的质量基础。

4.2 事中控制:过程可视,动态纠偏

依托IC系统,生成压实质量云图,直观显示薄弱区域。对心墙、反滤层、坝基结合面等设置高清视频监控与传感器网络,实时采集位移、渗压、温度等数据^[4]。建立气象预警联动机制,雨前覆盖作业面,雨后检测含水率再复工。事中控制强调对施工过程的实时感知与即时干预。通过智能压实系统生成的可视化质量地图,管理人员可迅速定位压实不足区域并安排补压,实现“边施工、边验收”。对关键部位如心墙、反滤层等,布设多类型传感器与视频监控,形成“空—地—内”一体化监测网络,任何异常变形或渗流均可第一时间预警。同时,接入气象服务平台,当预报有强降雨时,自动启动应急预案,提前覆盖作业面;雨停后,必须重新检测表层含水率,确认满足压实条件后方可复工。这种动态、可视、联动的过程控制机制,有效防止了质量问题的累积与扩大。

4.3 事后控制:数据归档,持续改进

所有检测数据、影像资料、施工日志自动上传至云端质量平台,实现“一坝一档”。运用大数据分析技

术,挖掘质量缺陷与施工参数间的关联规律,优化后续施工方案。建立质量责任追溯机制,明确各参建方职责,强化问责。事后控制并非终点,而是新一轮质量提升的起点。通过统一数据平台,将施工全过程产生的结构化与非结构化数据自动归集,形成完整的数字档案,支持任意时段、任意位置的质量追溯。在此基础上,利用机器学习算法分析历史数据,识别导致压实不足、含水率超标等问题的关键影响因素,为后续类似工程提供参数优化建议。同时,建立清晰的质量责任链条,每一道工序均关联责任人、设备编号、时间戳,一旦出现质量问题可快速定位责任主体,强化质量终身责任制。这种“归档—分析—改进—追责”的闭环机制,推动质量管理水平螺旋式上升。

5 结语

本文系统分析了土石坝施工中的关键技术环节与质量控制难点,提出以“智能化、精细化、绿色化”为核心的施工技术优化路径,并构建了覆盖全生命周期的质量控制策略体系。研究表明,智能压实与数字孪生技术是提升施工质量与效率的关键突破口;全过程、全要素、全数据的质量管理模式可有效规避传统“抽检式”监管的局限性;而标准化、信息化、责任化的协同机制则是保障质量体系落地的基础。未来,随着人工智能、5G、边缘计算等技术的发展,土石坝施工将进一步向“无人化工地”“预测性质量控制”演进。建议行业加快制定智能施工标准,推动BIM+GIS+IoT平台在水利工程中的深度应用,同时加强复合型人才培养,为土石坝工程高质量发展注入新动能。

参考文献

- [1]李万银.水利工程土石坝坝体施工技术探析[J].全面腐蚀控制,2024,38(12):112-114+131.
- [2]李克华.水利施工中的土石坝施工技术[C]//广西网络安全和信息化联合会.2025年第六届工程领域数字化转型与新质生产力发展研究学术交流会议论文集.浙江省围海建设集团股份有限公司,;2025:231-233.
- [3]奚啟林.水利工程土石坝施工技术及其质量控制研究[J].水上安全,2025,(13):142-144.
- [4]黄炫博.水利工程中土石坝施工质量控制要点分析[J].城市建设理论研究(电子版),2025,(03):207-209.