水利水电工程土石坝填筑施工工艺优化与质量控制

高兴双

新疆兵团水利水电工程集团有限公司　新疆　乌鲁木齐　830000

摘　要：土石坝作为水利水电工程中应用最广泛的坝型之一，其填筑施工质量直接决定工程安全性与服役寿命。本文立足土石坝填筑施工的全工艺链条，系统分析了料场规划与开采、运输与铺筑、碾压压实等关键工艺环节的技术要点与控制难点，深入剖析了填料级配变异、含水量偏离最优、碾压参数失当及层间结合处理缺陷等质量问题的内在成因。在此基础上，从施工工艺参数协同优化、过程质量控制体系构建、数字化监测技术应用及人员组织管理强化等维度，提出了系统性工艺优化与质量控制策略。研究表明，土石坝填筑质量控制需要实现从单点参数控制向全流程联动控制、从事后检测向过程实时管控、从经验判断向数据驱动的三重转变，以保障填筑体的力学性能与防渗体系达到设计要求。

关键词：土石坝；填筑施工；工艺优化；压实质量；过程控制

引言

土石坝以其就地取材、适应地基变形能力强、结构安全可靠等突出优势，在全球水利水电工程建设中占据重要地位。我国已建和在建的大型水利枢纽中，土石坝类型占比超过半数，坝高记录不断刷新，覆盖层深厚、高地震烈度等复杂条件下的筑坝技术日趋成熟。然而，随着坝体高度不断增加和建设环境日趋复杂，土石坝填筑施工面临的质量挑战也愈发严峻——填筑体压实度不足、层间结合不良、渗透稳定性欠缺等问题时有发生，轻则影响工程验收进度，重则构成渗流失控甚至溃坝风险。填筑施工是土石坝建设中最核心、工程量最大的环节，其工艺水平与质量控制能力直接塑造坝体的物理力学特性。当前，土石坝施工虽然已形成较为成熟的工艺规范，但实际作业中仍然存在工艺参数选取粗放、过程控制手段滞后、质量检测覆盖面不足等问题，难以适应高标准建设要求。

1 土石坝填筑施工工艺体系与关键环节

1.1 填筑施工的工艺链条构成

土石坝填筑施工是一项多工序紧密衔接的系统工程，其完整工艺链条涵盖料场勘探与开采、填料加工与制备、运输与卸料、分层铺筑与平整、压实与检测、层间处理与接坡等主要环节。各环节之间相互制约、相互影响——上游料源品质是下游压实效果的物质基础，运输过程中的颗粒破碎和离析会影响铺筑层的均匀性，而铺筑厚度和压实参数的搭配则共同决定了压实质量的最终水平。这种链式耦合关系决定了工艺优化不能局限于某一孤立环节，而应基于全流程联动思维进行系统协调。

1.2 各主要工艺环节的技术要点

料场规划与开采是填筑施工的起点，其核心在于保证合格料源的数量充足、质量稳定和供应连续性。开采方式的选择需综合考虑料源地地形、岩性、水文地质条件及施工季节，常用的分层开采和台阶开采方式各有适用条件。开采过程中应严格控制超径石含量和含泥量，避免爆破震动对料源级配产生不利影响。运输与铺筑环节是连接料源和压实作业的中间纽带。运输设备的选型与道路布置直接影响供料效率，运输过程中的颗粒分离（尤其是粗料滚落堆积）是铺筑质量控制的重要风险点。铺筑作业要求将填料均匀摊铺至设计厚度，对于堆石料和过渡料，通常采用后退法卸料以避免粗细颗粒分离；对于细粒料，则多采用进占法或混合法作业[1]。铺筑厚度需根据碾压机具功能和填料性质综合确定，过厚将导致底部压实不足，过薄则降低工效。碾压压实是填筑施工中最核心的工艺环节，其质量控制参数主要包括碾压遍数、碾压速度、振动频率与振幅（对振动碾而言）、铺筑层厚度和含水量等。碾压作业应遵循“先轻后重、先慢后快、先边后中”的基本原则，对于不同分区（如心墙料、坝壳料、过渡料、反滤料）应采用差异化的碾压方案。碾压质量与各参数之间存在复杂的耦合关系，单一参数的达标并不足以保证整体压实效果，必须进行多参数协同控制。

1.3 工艺参数之间的内在关联

土石坝填筑的各个工艺参数并非独立变量，而是构成一个相互约束的参数系统。铺筑厚度与碾压遍数之间存在替代效应——适当减薄铺筑层可在较少碾压遍数下达到同等压实度，但会增加作业层数和施工时间。含水量与压实密度之间呈现典型的驼峰曲线关系，最优含水量下的压实密度最大，偏离最优值则压实效果显著下降，且不同填料类型对含水量的敏感程度差异较大。振动碾的激振力、频率与速度之间存在最优匹配区间，过高或过低的组合均可能导致能量浪费或表面碾压过度而深层压实不足。工艺优化的本质即是求解这一多变量、多约束系统中的最优参数组合，并在施工过程中保持其动态稳定。

2 土石坝填筑施工质量问题的类型与成因

2.1 填料质量变异及其根源

填料质量是决定填筑体质量的第一道关口。实践中常见的填料质量问题包括超径石含量超标、细粒含量偏离设计范围、含泥量过高等，其根源可追溯至料场地质条件变化、开采方式不当、料源混存或加工筛分环节失控。更为隐蔽的问题是填料级配曲线的批次波动——即便各项指标均在规范允许范围内，但级配的持续漂移仍会导致压实特性改变，使前期确定的碾压参数不再适用。这种渐进式变异在施工中往往难以被及时察觉，却会累积为压实质量的不均匀性。

2.2 压实质量缺陷的类型化分析

压实质量缺陷主要表现为压实度（或相对密度）不达标、层间结合强度不足和渗透系数超标三种形式。压实度不足通常由铺筑超厚、碾压遍数不够、含水量控制不当或碾压机具选型不合理造成，其后果是坝体变形量增大、抗剪强度降低。层间结合处理是土石坝施工中极易出现薄弱环节的部位，若结合面未进行有效处理（如洒水湿润、刨毛或涂刷泥浆），新填层与已压实层之间可能形成光滑界面，成为坝体内潜在的滑动面和渗流通道[2]。渗透系数超标主要出现在防渗体部位，与填料中细料含量不足、碾压不密实或颗粒定向排列有关。

2.3 质量问题的深层成因解析

从系统论视角审视，上述质量问题的发生绝非孤立的技术失误，而是多重因素叠加的结果。在工艺层面，施工参数多依据前期试验段成果确定，但试验段条件与实际大规模施工往往存在差异（如气候条件变化、料源批次变异、施工速度不同等），参数动态调整机制缺失导致偏差累积。在管理层面，质量检测采用事后抽样方式，检测频率和代表性有限，难以全面反映填筑体的空间变异性；施工进度压力下，“重进度、轻质量”的倾向可能导致工艺执行走样。在技术层面，对填料压实特性的认识不够深入，不同填料种类、不同压实条件下的力学行为规律尚未完全掌握，使工艺优化缺乏充分的理论指导。

3 施工工艺的系统优化路径

3.1 料源规划与级配控制优化

工艺优化应从源头着手，建立料源全生命周期的品质管控体系。在料场勘探阶段，应加密勘探网格，准确查明料源储量、级配范围、天然含水量及物理力学指标的空间分布规律，为开采规划提供精细地质模型。开采作业中推行分区分层定点开采制度，对不同品质的料源进行分类堆放和标识，防止优质料与次优料混杂。对于级配要求严格的防渗料和反滤料，应设置专门的加工系统，通过筛分、破碎和掺配工艺实现级配的精准调控。建立料源品质预警机制，定期对出料级配进行检测并与设计区间比对，当检测值接近控制边界时提前采取掺配或调整开采部位等措施，避免批量不合格填料进入填筑面。

3.2 铺筑与碾压参数的协同优化

铺筑与碾压参数的优化应基于填料压实特性试验，但更重要的是建立参数之间的定量响应关系。建议在正式施工前开展系统的碾压试验，采用正交设计或均匀设计方法，系统考察铺筑厚度、含水量、碾压遍数、振动频率等因素对压实效果的单独影响和交互影响，据此确定各参数的有效控制区间和最优匹配组合。施工过程中，应根据料源变化、气候条件和碾压设备状态等实时信息，动态调整碾压参数，而不是机械固守试验段数据[3]。例如，当填料含水量略低于最优值时，可适当增加碾压遍数或降低振动频率以延长有效压实时间；当检测发现压实度富余量较大时，在保证质量的前提下可适度放宽参数以提升工效。

3.3 特殊部位与不利工况下的工艺适配

土石坝不同分区对填筑工艺的要求存在显著差异。心墙防渗料对压实度和渗透系数要求最高，应采用薄层铺筑、高频振动的精细化压实方案，碾压遍数宜适当增加；坝壳堆石料则以大粒径石料为主，铺筑厚度可适当增大，主要依靠振动碾的激振力实现颗粒重排和咬合，对含水量要求相对宽松。过渡料和反滤料的级配介于两者之间，其压实易受细料含量的显著影响。在雨季施工时，应重点做好填筑面的排水和防雨覆盖，控制填料含水量不超过允许上限；冬季低温条件下，应防止填料冻

结，必要时调整施工时段或采取保温措施。对于岸坡结合部、坝体与混凝土建筑物连接段等特殊部位，由于边界约束和变形协调要求高，应采用小型压实机具辅助碾压，并增加检测频次。

4 质量控制体系优化策略

4.1 构建施工全过程质量控制框架

建议构建“事前预防—事中控制—事后检验”三级质量控制框架。事前预防阶段，重点做好填料质量预检、碾压设备校准、施工方案技术交底和试验段验证，确保所有资源要素在进入填筑作业前处于受控状态。事中控制阶段，将质量控制的关注点从最终压实效果延伸至各工序的工艺参数合规性，推行工序交接验收制度——上道工序不经验收合格不得进入下道工序，形成层层把关的质量控制链条。事后检验阶段，除常规的试坑检测和核子密度仪检测外，还应加强对检测数据的统计分析和趋势研判，及时发现质量的异常波动并追溯原因。

4.2 压实质量检测方法的综合运用与改进

传统试坑法检测精度较高但代表性有限且耗时较长，核子密度仪检测速度快但存在辐射安全问题和边界效应，两种方法应相互补充而非彼此替代。建议推行“快速检测普筛+精准检测验证”的分级检测模式：每层填筑完成后，首先采用核子密度仪进行网格化快速检测，点位覆盖率应显著高于规范最低要求，快速识别压实薄弱区域；对快速检测结果存疑或处于临界状态的区域，再采用试坑法进行精确校核[4]。对于重要部位（如心墙、坝体与岸坡结合带），应加密检测断面和检测频次。此外，应积极探索无损检测技术在压实质量评价中的应用方向，为未来实现全过程连续质量监测积累经验。

4.3 数字化技术在质量控制中的应用

数字化、智能化技术的引入为土石坝填筑质量控制提供了新的技术手段。全球定位系统（GPS）与实时动态差分（RTK）技术可对碾压轨迹、碾压遍数和行进速度进行实时监控与自动记录，有效防止漏碾和超速现象。压实质量连续监测系统通过安装在振动碾上的加速度传感器，实时采集振动轮与填料相互作用时的响应信号，建立振动加速度与压实度之间的数学模型，实现压实质量的实时评估与可视化显示。填筑施工管理系统可将料源信息、摊铺参数、碾压记录、检测结果等数据集成于统一平台，支持质量数据的追溯查询和多维度统计分析，为质量管理人员提供全面的决策支持信息。数字化手段的应用不仅提升了质量控制的覆盖面和时效性，更为重要的是改变了质量控制从“事后评价”到“实时纠偏”的内在逻辑。

4.4 人员组织与制度保障措施

应建立健全填筑施工的质量责任制度，明确项目经理、技术负责人、质检员、施工员和作业班组长各层级的质量职责，将质量目标逐层分解到岗位和个人。施工前必须进行详细的技术交底，确保一线操作人员理解工艺要求、质量标准和操作规范。建立质量奖惩与绩效考核挂钩的激励机制，对严格执行工艺规程、质量表现优异的班组给予正向激励，对违规操作、质量失职的行为进行责任追究。同时，应注重培养和稳定技术工人队伍，尤其是压实机械操作手等关键岗位人员，其操作经验对压实质量具有不可忽视的影响，频繁的人员更替可能导致工艺执行水平的显著波动。

5 结语

土石坝填筑施工是复杂系统工程，需建立全流程、全要素、全参与方的系统化管控思维。本文梳理工艺链条，揭示填料变异、压实不足及层间缺陷等质量问题的深层成因，提出料源精细化控制、参数协同匹配及特殊工况差异化处理等优化路径，并构建包含过程框架搭建、检测分级组合、数字化赋能及人员制度保障的多维质量控制策略。其核心在于推动质量控制实现三大转变：由离散参数检查转向联动工艺过程控制，由终检抽样转向全流程实时管控，由经验判断转向数据驱动科学决策。唯有落实上述举措，方能在复杂建设条件与高标准要求下，确保填筑体长期安全稳定，为水利水电工程可靠运行奠定坚实基础。

参考文献

[1] 陈祖煜, 汪小刚, 张丙印. 高土石坝填筑压实质量控制技术研究进展 [J]. 岩土工程学报,2023,45(4):613-627.

[2] 张宗亮, 杨泽艳, 徐泽平. 基于连续压实检测技术的堆石坝压实质量实时控制方法 [J]. 水利学报,2022,53(9):1023-1034.

[3] 吴梦喜, 李广信, 介玉新. 粗粒土压实特性与填筑参数优化试验研究 [J]. 岩土力学,2023,44(7):1955-1966.

[4] 邓铭江, 周创兵, 李锦辉. 深厚覆盖层上土石坝填筑施工关键技术及质量控制体系 [J]. 水力发电学报,2022,41(5):1-14.