

中小型水库大坝土石方碾压施工工艺及质量控制技术研究

李 晨

鄂北地区水资源配置工程建设与管理局（筹），湖北 武汉 430000

[摘要] 中小型水库是基层水利防洪、灌溉、供水的核心基础设施，土石坝填筑碾压质量直接决定坝体结构稳定性与防渗安全性。为解决中小型水库施工场地受限、填料波动大、现场管控薄弱、压实不均匀等常见问题，本文结合水利工程施工规范，系统梳理土石方碾压标准化施工流程，优化填料预处理、分层摊铺、碾压作业、接缝处理等关键工艺，深入分析碾压施工质量缺陷成因，构建事前、事中、事后全过程精细化质量控制体系。结合工程实践验证，该工艺与管控方案可有效提升坝体压实均匀度，降低沉降、渗漏病害概率，对中小型水库大坝标准化施工具有较高的推广应用价值。

[关键词] 中小型水库；土石坝；土石方碾压；施工工艺；质量控制

DOI: 10.64635/ja.2026.1534

中图分类号: TV541

文献标识码: A

Research on Earth-Rock Compaction Construction Technology and Quality Control Techniques for Small and Medium-Sized Reservoir Dams

Li Chen

Construction and Management Bureau (Preparatory) of the North Hubei Water Resources Allocation Project,
Wuhan, Hubei 430000, China

Abstract: Small and medium-sized reservoirs are core infrastructure for grassroots water conservancy functions such as flood control, irrigation, and water supply, and the quality of earth-rock dam filling and compaction directly determines the structural stability and seepage control safety of the dam body. To address common problems in the construction of small and medium-sized reservoirs, such as limited construction sites, large fluctuations in filling materials, weak on-site control, and uneven compaction, this paper systematically reviews the standardized construction process of earth-rock compaction in combination with water conservancy engineering construction specifications. It optimizes key procedures such as filling material pretreatment, layered spreading, compaction operations, and joint treatment, deeply analyzes the causes of quality defects in compaction construction, and constructs a refined whole-process quality control system covering pre-construction, in-process, and post-construction stages. Engineering practice verifies that the proposed technology and control scheme can effectively improve the uniformity of dam compaction and reduce the probability of settlement and seepage defects, showing high promotion and application value for standardized construction of small and medium-sized reservoir dams.

Keywords: small and medium-sized reservoir; earth-rock dam; earth-rock compaction; construction technology; quality control

引言

土石坝凭借取材方便、造价经济、地形适应性强等优势，广泛应用于我国中小型水库工程。土石方碾压填筑是土石坝施工的核心工序，碾压施工工艺不规范、质量管控不到位，极易造成坝体压实不足、分层脱空、不均匀沉降及局部渗漏等隐患，直接影响水库运行安全。相较于大型水利工程，中小型水库施工条件简陋、工期紧张、设备配置有限、技术管理力量薄弱，碾压施工质量更为突出。为有效提升中小型水库大坝填筑施工质量，本文结合现场施工经验，优化标准化碾压施工工艺，建立精细化质量控制体系，

为同类工程施工提供技术参考。

1 中小型水库大坝施工特点及质控要求

1.1 工程施工特点

中小型水库土石坝施工具有明显的工程局限性。一是施工作业空间狭小，大型碾压设备无法充分展开作业，多采用中小型机械施工，碾压均匀性难以保证；二是筑坝填料多采用现场就近取材，土体颗粒级配、含水率稳定性差，受季节天气影响显著；三是施工窗口期集中在枯水期，工期紧凑，现场普遍存在抢工期、简化工序的现象；四是中小型项目技术、质检人员配置不足，一线作业人员专业能力参差不齐，多凭借经

验施工, 标准化作业水平较低, 隐蔽质量隐患较多。

同时, 多数中小型水库除险加固工程建设标准偏低、原有坝体老化病害多, 新旧填筑结合部位施工难度大, 对碾压工艺精度和过程管控提出了更高要求。若施工管控不严, 极易出现局部压实薄弱区, 后期在水压力、土体自重作用下诱发坝体变形、渗漏等病害, 严重威胁水库汛期运行安全。

1.2 施工质量控制标准

依据《碾压式土石坝施工规范》(SL/T 848-2025)、《小型水利水电工程碾压式土石坝设计规范》(SL 189-2013) 相关标准, 中小型水库坝体填筑压实指标具有明确管控限值。黏性土防渗体填筑压实度不得低于 95%, 坝壳砂砾料相对密度不低于 0.85; 填筑土体含水率需严格控制在最优含水率 $\pm 2\%$ 区间, 避免土体过湿翻浆、过干松散。施工中需严格控制分层松铺厚度、碾压遍数、碾压行驶速度, 保证坝体整体压实均匀。边坡、施工接缝、坝体转角、防渗体周边等薄弱部位, 需重点加强碾压与检测, 杜绝漏压、欠压问题。

相比于大型水利枢纽工程, 中小型水库无超高水头、超大库容工况, 因此施工规范对其压实冗余度要求相对适中, 但稳定性、抗渗性、耐久性底线标准不可降低。部分施工单位存在认知误区, 认为小型水库标准低、可适度放宽施工要求, 随意降低压实指标、简化试验流程、省略薄弱部位补强工艺, 是当前小型水库病害频发、服役年限缩短的核心人为原因。严格对标现行新规范、新标准开展精细化施工, 是杜绝工程质量隐患、延长坝体服役周期的根本保障。

2 土石方碾压标准化施工工艺

2.1 填料筛选与预处理

填料性能是决定碾压成型质量的根本因素。施工前期需完成料场核查与清理工作, 彻底清除料场表层腐殖土、植被、淤泥、软弱夹层及杂质土体, 避免不合格土料混入填筑体系。根据设计要求选取级配连续、结构稳定、可塑性适中的黏性土、砂砾土作为筑坝主材, 严禁冻土、杂质土、风化破碎岩土进场使用。

正式填筑前, 对填料开展系统土工试验, 精准测定土体最优含水率、最大干密度、颗粒级配、塑性指数等关键参数, 作为现场施工控制依据。针对含水率超标土体, 采用翻晒、通风晾晒方式降低水分; 含水率偏低土体采用均匀洒水加湿处理, 洒水后静置足够时间, 保证水分渗透均匀, 避免表层湿、内部干的分层现象。对于级配不良的砂砾石料, 通过掺配细骨料

优化颗粒骨架结构, 提升填料嵌锁密实性能, 从源头降低压实质量缺陷风险。

料场内需设置简易排水系统, 及时排走雨水, 防止料场土体大面积受潮软化。料场土体分层性质差异较大时, 采用分层开采、分区堆放模式, 保证上坝填料性能统一稳定。为进一步保障填料稳定性, 现场需建立土料动态抽检机制, 料场每开采一定范围、天气出现连续降雨或高温风干天气后, 必须重新取样检测, 动态调整含水率调控方案, 避免填料指标波动造成碾压质量不稳定。

2.2 分层摊铺与整平作业

土石坝填筑严格遵循“分层填筑、薄层摊铺、均匀平整、逐层压实”的施工原则, 禁止厚层一次性摊铺填筑。结合填料类型确定标准松铺厚度, 黏性土松铺厚度控制在 30 ~ 40 cm, 砂砾石料松铺厚度控制在 40 ~ 50 cm, 全程杜绝超厚摊铺。

现场采用推土机配合平地机联合摊铺, 优先选用进占法卸料, 有效减少粗细骨料离析现象, 避免出现局部粗料集中、架空松散问题。卸料完成后及时开展整平作业, 消除摊铺层凹凸起伏、局部堆料、坑槽等缺陷, 保证摊铺层面整体平顺均匀。针对坝体边坡、边角、防渗体周边等机械作业盲区, 采用人工辅助摊铺整平, 确保全断面摊铺厚度统一。

施工现场设置标高控制桩与厚度控制线, 摊铺完成后采用水准仪抽检复核厚度, 超厚区域及时削除, 厚度不足区域补料整平, 为后续标准化碾压作业奠定良好基础。摊铺整平环节必须做到随铺随平、当天摊铺当天碾压, 杜绝摊铺层隔夜裸露风干, 防止表层土体失水硬化, 导致上下层结合不紧密、碾压成型出现分层缝隙。

2.3 分层碾压施工工艺

碾压作业是坝体填筑施工的核心工序, 需根据填料类型匹配碾压设备与施工参数。中小型水库黏性土防渗体填筑选用 20 ~ 26 t 振动平碾或羊足碾, 砂砾料坝壳填筑选用重型振动碾压设备, 保障深层土体压实效果。

碾压作业严格执行标准化作业流程, 遵循“先轻后重、先慢后快、先边后中、重叠碾压”的基本原则。碾压行驶速度控制在 1.5 ~ 2.5 km/h, 匀速低速作业, 防止土体滑移、松散、推移变形。碾压顺序由坝体两侧向中间推进, 相邻碾压轨迹重叠宽度不小于 20 cm, 杜绝出现碾压空白带。

常规黏性土填筑采用“2 遍静压 + 6 遍振压 + 1

遍静压收光”的组合碾压方式，总碾压遍数控制在 6~8 遍；砂砾石料采用高频低幅振动碾压模式，碾压遍数控制在 8~10 遍，保障骨料充分嵌锁密实。针对机械无法覆盖的施工盲区，采用小型冲击夯、平板夯人工补压，补压遍数不少于 4 遍，彻底消除压实质量死角。

碾压施工参数严格按照试验段确定的标准执行，严禁施工人员随意加快碾压速度、减少碾压遍数、加大摊铺厚度，避免人为造成压实质量隐患。施工管理人员全程跟踪碾压轨迹，杜绝漏压、跳压、快速碾压等违规作业行为，保证每一层填筑断面碾压均匀、密实统一。

2.4 施工接缝与边坡处理

施工接缝、边坡位置是土石坝填筑最易出现质量缺陷的薄弱区域。分层填筑施工中，尽量缩短上下层施工间隔时间，减少填筑层裸露风干、污染开裂问题。若施工间隔较长，复工前需对旧填筑层表层进行凿毛、清杂、洒水湿润处理，增强新旧土体层间结合强度，防止出现分层脱空裂缝。

横向施工接缝统一设置台阶式搭接结构，台阶宽度不小于 1m，禁止垂直搭接施工，保证接缝部位咬合紧密、整体性良好。坝体边坡采取随填随压、随压随修整的施工方式，为规避压路机边坡压不到位的问题，采用超宽 30~50cm 填筑碾压，成型后再按设计坡比精准削坡，保证边坡压实度与坝体中部保持一致，杜绝边坡松散、滑移、渗漏隐患。

在实际工程中，多数渗漏隐患均集中在施工接缝与边坡位置，主要原因是搭接处理粗糙、补压不到位、削坡后表层松散未处理。因此在施工管控中，必须将接缝、边坡列为重点专项管控区域，实行专人负责、专项验收，未达标严禁继续上层填筑。

2.5 成型面防护处理

单层填筑碾压完成并检测合格后，及时开展上层填筑施工，减少成型面裸露时间。遇阴雨天气、长期停工时，采用土工布全覆盖防护，防止雨水冲刷、积水浸泡导致土体软化、翻浆、起拱破坏。雨后复工必须彻底清除表层软弱软化土层，重新整平碾压，复检合格后方可继续填筑施工。

高温大风天气下，填筑表层水分蒸发速度快，易产生干缩裂缝，需缩短摊铺碾压间隔时间，必要时采取洒水保湿措施，保障填筑层整体完整性。对于停工超过 24 小时的成型面，复工前必须全面刨毛、洒水湿润，恢复土体结合性能，保障坝体整体性。

3 碾压施工常见质量问题及成因分析

3.1 常见质量缺陷

结合中小型水库工程施工现状，土石方碾压施工主要存在压实度不足、土体含水率失衡、填筑层不均匀沉降、坝体表层裂缝、施工接缝渗漏、边坡压实薄弱等质量问题。上述缺陷隐蔽性强、累积性高，初期不易发现，水库蓄水运行后易逐步发展为渗漏、变形、塌陷病害，严重威胁工程安全稳定运行。

压实度不足会直接降低坝体整体刚度，长期在水压力作用下产生持续性沉降变形；含水率超标引发的弹簧土问题，会造成填筑层内部孔隙率偏大、土体结构性差，后期极易形成贯通性渗漏通道；裂缝病害会破坏坝体整体性，加剧雨水入渗和坝体内部侵蚀，大幅缩短水库服役年限。

3.2 主要成因分析

一是填料管控不严。部分施工现场料场管理粗放，未严格开展填料试验检测，不合格土体、含水率超标土体直接上坝填筑，碾压后出现弹簧土、松散土，压实指标难以达标。

二是施工参数失控。为追赶施工工期，现场随意加大松铺厚度、减少碾压遍数、加快碾压速度，导致深层土体压实不足、整体密实度不均匀。碾压重叠宽度不足、局部漏压，形成大面积压实薄弱区。

三是薄弱部位管控缺失。施工接缝、边坡、转角补压不到位，新旧土层结合处理不规范，形成结构性薄弱带，后期易产生裂缝和渗漏通道。

四是试验段施工流于形式。部分项目未根据本工程填料特性开展碾压试验，直接套用其他工程施工参数，施工参数与填料适配性差，大面积填筑质量不稳定。

五是现场质量管理体系不完善。中小型工程三检制度落实不到位，质检点位布设不合理，不合格部位整改不彻底，质量隐患层层累积。

4 全过程精细化质量控制措施

4.1 施工事前预控

施工前完成技术交底与碾压试验段施工，结合现场填料特性确定最优松铺厚度、含水率区间、碾压遍数、行驶速度等核心参数，编制专项施工方案并严格执行。对所有操作人员、管理人员开展岗前培训与技术交底，明确质量标准与岗位职责。

严格落实填料进场检验制度，每批次土体进场前检测含水率、颗粒级配，不合格填料一律清场。提前检修调试碾压、摊铺设备，保证机械设备性能稳定，

避免设备故障造成施工质量偏差。试验段成果必须经监理、设计复核确认，作为全场唯一施工依据，杜绝经验施工。

4.2 施工事中动态管控

施工全过程严格执行自检、互检、专检的三检制度，上道工序不合格严禁进入下道工序。现场安排专人盯控摊铺厚度、碾压速度、碾压遍数、重叠宽度，杜绝随意更改施工工艺。

每日实时监测土体含水率，根据气温、干湿情况动态调整洒水、翻晒工艺，始终将含水率控制在最优区间。重点加密边坡、接缝、转角等薄弱区域的施工管控与检测频次，确保薄弱部位压实达标。

严格规避恶劣天气施工，雨天禁止一切土石方填筑作业，雨后彻底清理软弱层、晾晒达标后方可复工，从过程中杜绝质量缺陷产生。推行工序签证制度，每一层填筑、碾压、检测全部验收合格签字后，方可进入下一工序。

4.3 施工事后检测与闭环整改

每层碾压成型后及时开展质量检测，黏性土采用环刀法检测干密度与压实度，砂砾料采用灌砂法检测相对密度。检测点位均匀布设，薄弱区域加密取样，保证检测数据真实全面。

对压实不合格区域立即标记、彻底挖除返工，重新摊铺碾压、复检合格，严禁局部修补、敷衍整改。建立质量检测台账，完整记录施工参数、检测数据、整改情况，实现施工质量可追溯、问题可闭环。所有检测资料同步归档，作为工程验收、质量评定、后期运维的重要依据。

4.4 完善现场管理制度

建立岗位质量责任制，明确施工、技术、质检、班组人员质量职责，落实终身质量责任制度。完善施工现场质量巡查机制，定期排查工艺执行、设备运行、填料质量存在的问题，及时纠偏整改。通过制度化、标准化管控，全面提升中小型水库大坝碾压施工质量水平。

5 工程应用效果

本文研究的碾压施工工艺与精细化质控体系，应用于某小型水库除险加固均质土坝填筑工程。工程严格按照标准化流程开展填料处理、分层摊铺、碾压作业和薄弱部位专项处理，严格落实全过程质

量管控措施。

施工完成后，坝体填筑压实度抽检合格率达 99% 以上，含水率、干密度等指标全部满足设计及规范要求。坝体整体成型平整密实，无不均匀沉降、裂缝、渗漏等质量缺陷。经过汛期蓄水运行观测，坝体渗流、沉降数据稳定正常，工程施工质量效果良好。实践证明，该套施工工艺和质控措施适配中小型水库施工条件，能够有效提升填筑质量、降低病害风险，具有良好的工程推广价值。

6 结论

土石方碾压施工质量是保障中小型水库大坝安全稳定运行的核心环节。针对中小型水库施工条件有限、填料稳定性差、现场管控薄弱等难题，本文优化了土石方碾压标准化施工工艺流程，系统分析施工常见质量缺陷及成因，构建了覆盖施工前期、施工过程、成型检测的全过程精细化质量控制体系。

通过规范填料预处理、分层摊铺、碾压参数控制、接缝边坡处理等关键工艺，强化全过程动态管控与闭环整改，可显著提升坝体填筑密实均匀性，有效规避沉降、裂缝、渗漏等常见质量问题，大幅提升中小型水库大坝施工质量与运行稳定性。该技术方案操作简便、适用性强，完全适配中小型水利工程施工特点，可为同类水库大坝土石方碾压施工提供可靠技术参考。

【参考文献】

- [1] 水利部 .SL/T 848-2025 碾压式土石坝施工规范 [S]. 北京：中国水利水电出版社，2025.
- [2] 水利部 .SL 189-2013 小型水利水电工程碾压式土石坝设计规范 [S]. 北京：中国水利水电出版社，2013.
- [3] 住房和城乡建设部 .GB/T 50123-2019 土工试验方法标准 [S]. 北京：中国计划出版社，2019.
- [4] 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.
- [5] 尤臻 . 碾压式土石坝施工技术要点研究 [J]. 黑龙江水利科技，2022，50(10)：76-78.
- [6] 黄光艳 . 小型水库土石坝填筑碾压施工质量控制 [J]. 水利科技与经济，2026，32(02)：89-92.

作者简介：李晨（1993.10—），男，汉族，湖北宜都人，大学本科，初级职称，水利水电工程。