

水库土石坝填筑碾压施工质量控制要点

金育辉

新疆北方建设集团有限公司 新疆 奎屯 833200

【摘要】：土石坝填筑碾压施工是保证大坝长期安全的关键工序，压实质量好坏决定坝体变形控制、防渗体系是否有效、整体结构是否稳定。本文从土石坝填筑碾压施工全过程入手，对碾压参数的确定和优化、填筑施工过程控制、特殊部位处理、压实质量检测与评定、智能化监控技术应用等主要环节的质量控制要点进行了系统的分析。研究表明，土石坝填筑碾压质量控制要形成“事前试验确定参数、事中严格过程控制、事后全面检测验证”的闭环控制体系，以碾压试验确定的合理施工参数为基准，以全过程实时监控为手段，以压实质量检测为验证，保证坝体填筑质量达到设计要求。根据不同的填料类型（黏性土、砂砾料、堆石料）的压实特性，采取相应的质量控制措施，加强坝体与岸坡、混凝土结构物等结合部位的处理，消除薄弱环节，保证大坝长期安全运行。

【关键词】：土石坝；填筑碾压；压实质量；碾压参数；质量控制

DOI:10.12417/3083-5526.25.11.012

1 引言

土石坝是世界上应用最广的坝型之一，依靠当地材料筑坝、对地基条件适应性强、施工机械化程度高等特点，在水利水电工程中占有重要的地位^[1]。压实质量是土石坝施工质量的主要指标，对坝体的密实度、强度、变形和渗透稳定性都有影响。土石料欠碾会造成坝体密实度不足，引起变形过大、防渗体失效等不良后果，超碾不但会增加施工成本，还会对土料造成过度破碎等不利影响^[2]。

碾压式土石坝施工技术经过长时间的发展已经日趋成熟。2025年发布的《碾压式土石坝施工规范》（SL/T 848-2025）在原规范的基础上增加了智能建造技术的推广应用等内容，给土石坝施工质量控制提供更加系统的技术依据^[3]。土石坝碾压施工过程实时监控技术规范发布，说明碾压质量控制正在由原来的数字化、智能化发展。系统整理土石坝填筑碾压施工质量控制要点，创建起贯穿施工全过程的闭环质量控制体系，对保证大坝施工质量及长久运行安全有着十分重要的意义^[4]。

2 碾压参数的确定与优化

2.1 碾压试验的核心地位与实施要点

碾压试验是确定合理的施工参数，保证坝体填筑质量的前提性工作。土石坝施工前必须根据施工图纸规定碾压机械种类、重量及行驶速度，进行铺料厚度、碾压遍数及填筑含水量的比较试验。对于黏性土料要通过击实试验来确定最大干密度和最优含水率，然后用碾压试验来验证并优化施工参数。对砂砾料、堆石料应做碾压试验，确定铺层厚度、碾压遍数、洒水量、振动碾振动频率、行走速度等参数^[5]。

碾压试验应包括设计使用的各种坝料，即防渗土料、反滤料、过渡料、堆石料等。黏性土压实含水量应取土料的塑限，并上下浮动一定范围进行试验，确定最优施工含水率。砂砾料的不同含泥量对碾压效果影响较大，当含泥量达到一定程度的

时候，填筑含水量对压实质量的提高作用不大。碾压试验结束后要整理出试验成果报告，确定各种坝料的施工参数及质量控制标准。

2.2 关键碾压参数的确定方法

铺料厚度属于决定压实质量的首要因素。铺层过厚，下部土料不能充分压实；铺层过薄，施工层数增多、工期延长。碾压试验要比较不同铺料厚度下压实效果，得出最优铺层厚度。研究表明，铺料厚度为30~35cm时压实效果最好，铺料过薄时碾压遍数过多会扰动土料，使压实效果变差。

碾压遍数影响压实能量的多少。碾压遍数不够会造成压实度不合格，而碾压过度会增大成本并使土料颗粒过于破碎。碾压试验要建立碾压遍数和干密度、沉降率的关系曲线，来确定经济合理的碾压遍数。含水率属于黏性土压实的重要控制指标。黏性土的压实质量同含水率有密切关系，在最佳含水率附近可以获得最大的干密度。施工时要严格控制土料含水率，使其保持在最佳含水率附近允许的波动范围内。

碾压机械参数的选取也不能忽略。振动碾的振动频率、激振力、行走速度等参数都会影响到压实效果。对不同的坝料类型要选择合适的碾压机械和合理的运行参数。砂砾料、堆石料碾压时应根据实际情况调整洒水量，以改善颗粒间润滑、密实效果。

3 坝体填筑施工过程质量控制

3.1 填筑前的准备与坝料质量控制

坝体填筑施工前要完成坝基和岸坡的处理验收工作，保证基底符合设计要求。料场复查和开采规划是坝料质量控制的基础，要对各种坝料场的储量、质量、级配等进行全面复查。黏性土、砾石土、砂砾石料和岩石料均要按照规范要求做详细的检查。

坝料开采、加工和运输过程中要严格控制质量。防渗土料

超径颗粒含量要控制好，含水率要均匀；反滤料、过渡料要严格按设计级配加工。运输过程中坝料要防止分离、污染、含水率变化过大。不同的坝料要分区堆放，不能混杂。

3.2 铺料与碾压施工控制

坝体填筑应分段流水作业，保证碾压层次清楚。铺料前应检查下层碾压面是否合格，合格后才能进行上层铺料。铺料应均匀、平整，厚度偏差在允许范围内。铺料完毕后，要检测含水率，如果与最优含水率有偏差，就要采取相应的调整措施。

碾压施工属于填筑质量控制的关键环节。碾压方向应平行于坝轴线，相邻碾压带之间要有足够的搭接宽度（一般为10~20cm），保证无漏压、欠压区。碾压速度要均匀，不能过快也不能过慢。振动碾的振动频率、激振力要处于设计参数内。对防渗体碾压面要检查有无光面，及时刨毛。

3.3 不同坝料类型的差异化控制

黏性土（防渗料）压实质量控制主要以压实度、含水率为主要指标。高坝压实度一般为98%~100%。施工时要严格控制含水率在最佳含水率附近，防止产生“弹簧土”或者碾压不实。

砂砾料、堆石料的压实质量用相对密度或者孔隙率来控制。施工时要控制铺料厚度、级配均匀，防止细料流失、粗料集中。对于砂砾料，要重视含泥量对压实效果的影响。

反滤料、过渡料的施工质量控制标准比反滤料要高。反滤料应按设计级配加工，铺筑时控制厚度并交替压实。反滤料和防渗料的犬牙交错带宽度不能大于防渗土料层厚的某一定值。

4 特殊部位与关键环节的质量控制

4.1 坝体与岸坡、混凝土结构物的结合部位处理

结合部位是土石坝最容易出现问题的薄弱环节。防渗体与混凝土面或者岩石面结合处填筑应做特别处理，保证结合面密实、连续。岸坡结合部应清除松动岩块，必要时做削坡处理。防渗体和岸坡之间应涂刷黏土浆或者铺设高塑性黏土垫层，增强结合效果。

坝体及混凝土泄洪闸、溢洪道等结构物之间的连接部位，在填筑前应将混凝土表面清理干净、磨光。该部位填筑宜用高塑性黏土分层碾压，碾压遍数可适当增加。

4.2 心墙与反滤层的平起施工控制

心墙（或斜墙）与反滤层、部分坝壳料的平起施工，是保证坝体整体性的重要条件。防渗体和反滤料同时上升，保证大致相同的高程，防止防渗体过高导致侧向挤压破坏，或者反滤层过高造成防渗体约束不足。平起施工时要严格控制各层高程差，保证设计断面的准确实现。

4.3 雨季和冬季施工的特殊质量控制

雨季施工要做好坝面排水、防雨工作。降雨前对已经碾压

的坝面进行覆盖，防止雨水进入碾压层。雨后复工时要对坝面进行处理，清除表面积水及软化层，必要时重新碾压。冬季施工要控制土料含水率，防止土料冻害。黏性土在负温下不能施工，必须采取保温防冻措施。

4.4 临时施工道路对坝体质量的影响控制

心墙区临时施工道路属于施工过程中容易被忽略的施工质量隐患。施工道路不能直接布置在心墙防渗体上，如果必须穿过心墙，必须采取可靠保护措施。道路使用完成后，应对路面以下填筑层做压实质量检查，必要时返工处理，保证防渗体的完整性。

5 压实质量检测与评定

5.1 检测方法与检测频率要求

压实质量检测属于检验坝体填筑质量的手段。黏性土压实度检测用环刀法，砂砾料和堆石料用灌水法或者灌砂法检测干密度和孔隙率。检测点布置要有代表性，要包括各个部位和高程。检测频率要符合规范及设计要求，施工时应按填筑进度及质量变化情况随时调节检测频次。

5.2 压实质量评定标准

压实质量评定以设计规定的压实度、干密度或者孔隙率为依据。评定标准根据坝料种类、坝体部位、坝的等级不同而不同。高坝的防渗料压实度一般大于中低坝。评定结果要同碾压参数加以对比分析，从而判定施工参数是否合理。

5.3 检测结果的应用与反馈

压实质量检测结果应及时反馈到施工现场，指导以后的施工。当检测结果不能达到设计要求时，要分析原因，采取相应的措施。常规采用的事后试坑抽检存在检测周期长、抽检点代表性差的缺点。因此应该把检测结果同碾压施工参数（碾压遍数、行走速度等）联系起来，形成检测数据和施工参数之间的对应关系，给实时质量判断赋予依据。

6 智能化监控技术在碾压质量控制中的应用

6.1 实时监控系统的的基本架构与功能

《土石坝碾压施工过程实时监控技术规范》（T/CSPSTC 99-2022）的出台，给碾压施工过程的数字化监控赋予了技术支撑。实时监控系統采用北斗定位和物联网技术，对碾压轨迹、碾压遍数、行走速度、振动频率等重要参数实行自动采集。系统可以实时显示碾压情况，当碾压轨迹偏离或者碾压遍数不够时，会发出提示信息给操作人员。

6.2 智能碾压设备的应用与效果

无人驾驶振动碾、碾压数字化监控系统应用，正在改变传统的碾压质量控制方式。采用北斗定位、5G技术对碾压遍数、行走速度、激振力等重要的参数进行实时监测，再通过平台可视化的方式对施工全过程实施动态监控。推土机和智能碾压机

的配合工作，有效地加快了施工进度，也保证了工程质量。采用分层碾压、实时监测、动态调整的方式，保证每层填筑料压实度、平整度均大于设计值。为了方便工程实践中质量控制的进行，表 1 给出了不同种类坝料关键碾压控制参数及质量指标。

表 1 土石坝不同坝料类型碾压质量控制标准对比

坝料类型	主要控制指标	常用碾压机械	铺料厚度(cm)	碾压遍数	特殊控制要求
黏性土（防渗料）	压实度、含水率	羊足碾、凸块振动碾	25~35	6~10	含水率控于最优值附近；碾压面须刨毛
砂砾料	相对密度、孔隙率	振动碾	40~60	6~8	控制含泥量；适当洒水助碾
堆石料	孔隙率、沉降率	重型振动碾	60~80	6~10	控制最大粒径；沉降率须达标
反滤料	级配、相对密度	振动碾	30~40	6~8	严格按设计级配加工；与防渗料平起施工
过渡料	级配、孔隙率	振动碾	40~50	6~8	控制粒径过渡关系；防混杂

表中参数为一般参考值，具体的施工参数要通过现场碾压试验来确定；高坝压实度一般要求为 98%~100%。

7 结论

第一碾压试验为合理施工参数的确定提供依据。铺料厚度、碾压遍数、含水率以及碾压机械参数等重要参数要经由系统的碾压试验来确定，不同的坝料类型需要采取不一样的试验办法和控制准则。

第二，坝体填筑施工过程控制要包含坝料质量、铺料均匀性、碾压规范性等各个方面。防渗体、反滤层、过渡料、堆石料应根据各自的压实特性采取不同的控制措施，保证每一层填筑质量符合设计要求。

第三，坝体与岸坡、混凝土结构物的结合部位、心墙与反滤层的平起施工为质量控制的重点。结合部位处理不当会成为坝体薄弱环节，应采取专门的处理措施，并且要对质量控制标准做出更高要求。

第四，压实质量检测要综合使用环刀法、灌水法等检测方法，还要和碾压施工参数进行关联分析。智能监控技术把质量控制节点提前到了碾压的过程中，由原来的抽检转向了过程控制。伴随着《碾压式土石坝施工规范》（SL/T 848-2025）的出台以及智能建造技术的普及，土石坝填筑碾压施工质量控制也向着数字化、智能化方向不断前进。

参考文献：

[1] 王致为.水库土石坝防渗墙施工质量控制对除险加固效果的影响[J].城市周刊,2025(45).

[2] 刘进友.小型水库施工中的土石坝填筑施工技术[J].城市建设理论研究(电子版),2025(25):145-147.

[3] 周伟,王俊,杨灶坤.碾压式砾石土心墙风化料坝施工质量控制技术分析[J].人民珠江,2024,45(S01):141-144.

[4] 潘辉,刘臻祥,陈艺.沥青混凝土心墙坝现场摊铺及碾压试验研究[J].四川水利,2026(2):31-34.

[5] 王瑞,方程,吕秀红.水利工程土坝填筑材料选择与施工质量控制策略研究[J].地下水,2025(4).