

土石坝施工技术在水利水电工程施工中的作用分析

李玖昌

四川路航建设工程有限公司，四川成都，610000；

摘要：土石坝施工技术在水利水电工程中具有重要作用，能够显著提高工程的安全性、经济性和使用寿命。本文结合案例详细的分析了土石坝施工技术的特点及其在实际工程中的应用方法。深入探讨了施工前的准备、填筑作业、碾压施工以及防渗体结合面施工等关键环节的技术要点，并提出了质量控制措施。研究表明，合理规划 and 严格执行施工技术是确保土石坝安全性和可靠性的关键。

关键词：水利水电工程；土石坝施工技术；填筑作业；碾压施工；防渗体结合面

DOI：10.69979/3060-8767.24.05.010

前言

随着我国社会经济的快速发展，水利水电工程在保障水资源安全、促进能源开发以及推动区域经济发展等方面发挥了至关重要的作用。作为水利水电工程建设的重要组成部分，土石坝施工技术涵盖了从前期准备到具体实施的多个关键环节，包括地质勘察、材料选择与加工、填筑作业、碾压施工、防渗处理及后期养护等。然而，在当前环保要求日益严格的背景下，如何在施工过程中最大限度地减少对生态环境的影响，已成为土石坝建设中亟待解决的问题。此外，随着工程规模的不断扩大和建设标准的不断提高，传统施工方法已逐渐难以满足现代工程的需求，迫切需要通过技术创新来提升施工效率和质量。本文通过对土石坝施工前准备、填筑作业、碾压施工、防渗体结合面施工等方面的深入分析，系统揭示了土石坝施工技术的核心要点及其在实际应用中的关键挑战，为推动土石坝施工技术的发展提供了重要参考。

1 工程背景

本案例以某大型水利枢纽工程为背景，水库设计坝高100m，坝顶长度500m，总填筑量约为800万立方米，是当地重要的基础设施建设项目。该程所在区域地质条件复杂，存在软弱地基和断裂带，同时受季节性降雨影响较大，施工过程中需克服渗漏问题和压实度不足等难点。在施工准备阶段，项目团队进行了全面的地质勘察，明确了地质构造、岩性和地下水分布情况，并合理规划了料场位置，确保材料满足水文地质条件及力学性能要求。施工中采用了机械开挖与人工开挖相结合的方式，提高了开挖效率和精度。填筑作业采用后退法与进占法相结合的综合卸料方式，有效减少了分离架空现象，保证了铺料层的均匀性和稳定性此外，为解决防渗

问题，工程设置了多道防线，包括混凝土防渗墙、帷幕灌浆以及反滤层等措施。

2 核心技术应用分析

2.1 坝体填筑技术

坝体填筑是土石坝施工的核心环节，其质量直接决定了坝体的稳定性和抗渗性。材料选择是确保坝体性能的基础。不同区域对填筑料的需求各异。例如，垫层区需要粒径较小、级配良好的材料以保证密实度和平整度，主堆石区则需要较大粒径的材料以满足强度和稳定性要求。在本案例中，项目团队通过现场试验确定了各区域填筑料的具体参数。此外，为确保材料质量，还对土石料进行了必要的加工处理，如清除表层不合格土壤并控制最优含水率。填筑材料的选择不仅涉及粒径大小，还包括含水率的调整。含水率过高或过低都会影响压实效果，因此必须通过洒水或晾晒等方式将其调整至最佳范围。具体操作步骤包括筛分分级和含水率调整。通过振动筛将土石料按粒径大小进行分类，确保各区域填筑料符合设计要求。同时，根据试验结果，通过洒水或晾晒等方式调整填筑料的含水率至最佳范围。

分区填筑技术是提高填筑效率并保证质量的关键方法之一^[1]。分区填筑需结合施工现场的地形特征，合理划分施工单元，并采用流水作业方式实现多区域同步施工。在本案例中，坝面被划分为多个独立的施工单元，每个单元均配备了专门的施工队伍和设备。区域划分根据坝体结构特点和施工条件进行，通常靠近两岸的区域优先施工，为主坝体争取足够的沉降时间。顺序施工按照“先粗后细”的原则进行，依次完成主堆石区、过渡层区和垫层区的填筑作业。同时，注意清理作业面上的粗粒径料，避免影响后续碾压效果。动态监测

引入了GPS碾压技术,增设动态碾压信息系统,实时记录每台碾压设备的工作轨迹,并结合现场测量数据评估填筑质量。例如,通过挖坑灌砂法和灌水法检测分区填筑的压实度,确保其达到设计要求。

压实参数的优化是保证填筑质量的关键环节。压实参数主要包括碾重、铺层厚度和碾压遍数等。在本案例中,项目团队通过水压试验确定了最优压实参数,并根据不同位置的使用要求调整填料粒径。具体的优化措施包括碾重选择、铺层厚度控制和碾压遍数调整。根据填料特性和设计要求,选择合适的振动碾型号。对于黏性土料,优先选用羊角碾或气胎碾。对于非黏性土料,则选用振动碾或夯板。铺层厚度通过试验确定,垫层区通常控制在30~50cm之间,主堆石区可适当增加至80~100cm。碾压遍数根据填料类型和压实目标灵活调整,垫层区通常需要碾压8~10遍,主堆石区则只需4~6遍即可。

2.2 混凝土面板施工

混凝土面板是土石坝防渗系统的重要组成部分,其施工质量直接影响到坝体的整体防渗效果。材料配合比是确保混凝土物理性能的关键因素。合理的配合比不仅能够提高混凝土的抗拉强度和耐久性,还能有效减少裂缝的产生^[2]。在本案例中,项目团队通过实验室试验确定了混凝土的最佳配合比,并根据施工环境的变化适时调整。

水泥用量根据设计要求控制在350~400kg/m³范围内,以保证混凝土的强度和抗渗性。骨料选用级配良好的碎石和河砂作为骨料,确保其最大粒径不超过层厚的2/3。适量掺入减水剂和引气剂,改善混凝土的工作性能并降低水化热。滑模施工是混凝土面板浇筑的主要方法之一。滑模施工具有施工速度快、成型质量好等优点,但对模板精度和提升速度有较高要求。

滑模施工的具体操作步骤包括模板安装、提升速度控制和模板调整。在滑模对应位置打设模板孔,并严格按照设计图纸进行拼装。检查模板的尺寸和连接件是否符合要求。将滑模提升速度控制在1.5~2.5m/h范围内,避免因提升过快或过慢导致的面板流淌或鼓包问题。在滑模提升过程中,定期检查模板的垂直度和平整度,并及时进行调整,确保其始终处于理想状态。

振捣是保证混凝土密实度的重要环节。并根据施工部位的不同选择合适的振捣器型号。项目团队安排专人负责振捣工作,并通过试验确定了振捣深度和间距。在靠近止水片和侧模的位置,优先选用小型软管振捣器,以避免对模板造成

损伤。振捣深度通过试验确定,确保其能够深入新浇混凝土层底部5cm以下。振捣间距根据填料类型和施工条件灵活调整,通常控制在40cm以内。

混凝土面板的养护是保证其长期性能的关键环节。适当的养护措施可以有效减少干缩裂缝的产生。在本案例中,项目团队采取了二次抹面和覆盖养护相结合的方式,确保混凝土表面始终保持湿润状态。具体措施包括二次收面、覆盖养护和洒水保湿。在混凝土初凝前进行二次抹面处理,提高表面平整度和抗裂性能。使用塑料膜或草席对混凝土表面进行覆盖,防止水分蒸发过快。在养护期间,定期洒水保持混凝土表面湿润,养护时间不少于14天。

2.3 防渗与变形控制技术

防渗与变形控制是土石坝施工中的两大关键技术,直接关系到坝体的安全性和使用寿命。帷幕灌浆是土石坝防渗系统的重要组成部分,其目的是通过填充基岩裂隙形成连续的防渗屏障^[3]。帷幕灌浆的效果取决于钻孔布置、注浆压力和浆液配方等因素。在本案例中,项目团队通过详细的地质勘察确定了帷幕灌浆的具体参数。

钻孔布置根据基岩裂隙分布情况合理布置钻孔位置,确保帷幕灌浆的连续性和完整性。注浆压力通过试验确定,避免因压力过大导致基岩开裂或浆液流失。浆液配方根据基岩特性选择合适的浆液配方,通常采用水泥浆或化学浆液,必要时可掺入细砂或粉煤灰以改善流动性。防渗墙是另一种常见的防渗措施,其作用是阻止水流渗透至坝基或下游区域。

防渗墙的设计需综合考虑坝体高度、地质条件和施工难度等因素。在本案例中,项目团队在防渗层下方设置了混凝土防渗墙,并通过严格的施工管理确保其质量。槽孔开挖使用专用设备开挖槽孔,并清除孔内的松散物质。采用导管法进行混凝土浇筑,确保其密实度和平整度。在防渗墙与坝体结合处设置柔性止水带,增强其防渗效果。

变形模量是衡量土石坝抗变形能力的重要指标。通过调整填筑料的粒径分布和压实参数,可以有效提高坝体的整体密实度和稳定性。在本案例中,项目团队通过对填筑料的动态监测和实时调整,实现了变形模量的精准控制。具体措施包括粒径分布优化、压实参数调整和沉降观测^[4]。根据施工部位的不同,合理调整填筑料的粒径分布,确保其满足设计要求。通过试验确定最优压实参数,并根据不同位置的使用要求灵活调整。在施工过程中定期进行沉降观测,及时发现并处理潜在问题。

2.4 特殊工况应对

特殊工况下的施工管理是确保土石坝安全性和可靠性的重要保障。强降雨天气可能对施工进度和质量造成严重影响。制定完善的应急预案,并采取有效的防护措施是关键。在强降雨天气来临前,提前停止相关作业,并对已完成部分进行保护。在施工区域内设置临时排水沟,及时排除积水,防止其冲刷填筑料。对未使用的建筑材料进行覆盖处理,防止其受潮变质。高温环境可能导致混凝土面板出现干缩裂缝等问题。通过调整施工时间和加强养护措施来缓解高温影响。

尽量避开正午高温时段,选择早晚气温较低的时间段进行施工。在施工过程中定期洒水降温,保持混凝土表面湿润。在施工现场搭建遮阳棚,减少阳光直射对混凝土的影响。冬季施工面临的主要问题是低温环境下土石料容易冻结,影响其力学性能和施工质量。通过翻松表土和保温处理来解决这一问题。

选择适合冬季施工的专用料区,并对料场表土进行翻松和保温处理。在施工现场配备加热设备,对填筑料进行预处理,确保其温度适宜。根据天气预报合理安排施工计划,避免在极端低温条件下进行关键工序。这些措施有效保证了冬季施工的质量和进度。

3 技术创新与质量控制

3.1 技术创新

在混凝土面板堆石坝施工中,技术创新显著提升了工程效率与质量。信息化施工技术方面,采用GPS动态碾压系统实现压实轨迹实时监测,结合BIM模型模拟填筑过程,优化分区施工顺序,减少中心区沉降风险。无人机巡检与三维激光扫描技术生成高精度点云模型,累计修正填筑面偏差126处,沉降控制精度达 $\pm 3\text{mm}$ 。绿色施工技术中,通过渣料破碎筛分将85%开挖料转化为过渡层材料,减少弃渣12万 m^3 ,同时三级沉淀池废水回用率超90%,降低水资源消耗。新型材料与工艺方面,掺入5%纳米二氧化硅使面板混凝土抗渗等级提升至W12,滑模施工中采用激光导向仪控制轨道垂直度偏差 $\leq 5\text{mm}/10\text{m}$,并结合智能止水系统预埋光纤传感器,实时监测接缝变形精度达0.1mm,显著提升结构耐久性。

3.2 质量管控

质量控制体系贯穿施工全流程,确保工程高标准实施。填筑过程控制中,严格执行分层碾压,主堆石区每层铺料80cm,25t振动碾错距碾压8遍,干密度 $\geq 2.15\text{g}/\text{cm}^3$,过渡层含水量 $\leq 3\%$,超径石含量 $\leq 5\%$ ^[5]。混凝土质量管控方面,采用物联网跟踪系统监控混凝土运输温度与坍落度,拦截不合格料6车次。滑模施工中每仓埋设温度传感器,内外温差 $\leq 25^\circ\text{C}$,回弹仪抽检强度达标率98%。防渗体系专项控制中,铜止水片安装精度误差 $\leq 1\text{mm}$,周边缝闭气试验压降 $\leq 5\%$,帷幕灌浆采用无线记录仪调控水灰比,透水率 $\leq 1\text{Lu}$ 。环境与安全监测方面,布设噪声与PM2.5在线监测点,扬尘超标自动启动喷雾抑尘,GNSS位移监测预警边坡稳定性,水平位移速率 $\geq 3\text{mm}/\text{天}$ 即停工加固,实现施工全过程零安全事故。

4 结论

综上所述,混凝土面板堆石坝施工技术的创新与质量控制在现代水利水电工程中具有重要实践意义。通过融合信息化技术、绿色施工理念及新型材料工艺,实现了工程效率与结构性能的协同提升。同时基于动态模拟与智能监测的施工方法能够有效控制坝体沉降与变形,显著降低不均匀沉降风险,并应用精细化分区填筑与智能碾压技术的应用,确保了坝体密实度与稳定性,为高面板堆石坝的长期安全运行奠定基础。未来研究应着眼于全生命周期智慧化管理体系的构建、低碳材料研发及多尺度仿真技术的深化,以推动高坝工程向更高效、可持续发展的方向。

参考文献

- [1]周云生.水利水电施工混凝土面板堆石坝技术[J].中国房地产业,2024,21(25):178-181
- [2]刘晓刚.水利水电工程混凝土面板堆石坝施工技术[J].工程建设与设计,2024,11(20):190-192.
- [3]郭海峰,商洪彬.土石坝施工技术在水利水电工程施工中的有效应用分析[J].建筑与装饰,2024,30(20):151-153.
- [4]贾美亭.水利水电工程土石坝施工技术[J].中国住宅设施,2024,7(6):148-150.
- [5]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.