

大坝填筑施工技术在水利水电工程中的应用

杨辉

四川路航建设工程有限责任公司，四川成都，610000；

摘要：大坝填筑施工技术是水利水电工程建设的核心环节，其施工技术直接影响工程安全性及可持续性。本文将系统分析大坝填筑施工技术的基本原理、工艺流程及质量控制要点，结合现代工程实践，探讨极端气候与复杂地质条件下的施工应对策略，提出利用科学选材、优化施工参数及强化质量监控等措施，提升大坝结构的稳定性，旨在为水利水电工程建设提供参考，推动行业技术革新。

关键词：大坝填筑施工技术；水利水电工程；施工工艺；质量控制

DOI： 10.69979/3060-8767.25.01.029

引言

水利水电工程是国家能源安全与水资源管理的重要支柱，而大坝作为工程枢纽，其结构稳定性直接影响水库防洪、发电及灌溉功能。随着全球气候变化加剧，高坝建设逐渐向地质复杂区域延伸，传统填筑技术面临材料性能不足、施工效率低下等挑战。现代填筑技术凭借适应性强等优势成为大坝建设的主流选择。近年来，新材料研发与智能化设备的应用推动该技术向高精度化、环保化方向迭代升级。无论是双江口水电站采用智能振动碾实现高精度控制施工流程，还是莆田西音水库所使用的低水泥用量筑坝工艺，均验证了技术革新的核心价值，为相关企业提供了新思路。

1 大坝填筑施工技术概述

大坝填筑施工是一个高度系统化的工程过程，涵盖基础处理、材料制备、分层填筑及压实检测等施工流程，各环节紧密衔接，形成完整技术链条。其中，基础处理需结合地质条件选择差异化方案，材料制备则需通过试验确定最优配比参数。以四川双江口水电站为例，施工前采用三维激光技术扫描建立料场数字模型，测算储量测算偏差率小于3%；填筑阶段通过优化流水作业方向，将坝面宽度控制在10-20米、长度限定为40-100米，既保障机械设备的作业效率，又实现填筑密实度的精准控制^[1]。在选择填筑材料时，需综合考虑防渗性、抗压强度及经济性。根据功能需求，大坝填料主要分为防渗土料、堆石料、反滤料等类别，每类材料均需通过室内试验与现场测试确定最优施工参数。传统土石坝多采用黏土心墙防渗，但存在施工周期长、受气候制约明显等缺陷。福建莆田西音水库创新应用胶凝砂砾石材料，将水泥掺量控制在3%-5%，利用天然沙砾石骨料占比达85%，形成抗压强度10MPa、弹性模量8GPa的复合结构，满足

中型水库坝体承载力要求。现场试验表明，胶凝砂砾石施工速度可达每日8000立方米，较常规混凝土坝工期缩短120天，具有显著经济效益。该技术不仅降低工程造价约50%，还将工期缩短三分之一，为中型水库建设提供了新思路。

2 大坝填筑施工技术分类与特点

2.1 土石坝填筑技术

土石坝填筑技术以天然土石料为主要建筑材料，其核心优势在于材料来源广泛、施工灵活性高。土石坝通常由防渗体与支撑体组成，两类材料的协同变形能力直接影响坝体长期稳定性。以某黏土心墙坝工程为例，施工方采用25吨振动碾对每层厚度0.8米的填筑料进行8遍碾压，干密度从初始1.65g/cm³提升至1.85g/cm³，渗透系数降低至 1×10^{-6} cm/s量级。针对特殊环境，施工中需针对性调整工艺参数。高原地区施工常面临低温冻融问题，某海拔3800米的水库工程中，施工团队在黏土料中掺入4%石灰粉，使材料冻胀率从12%降至3%以下。同时采用移动式保温棚覆盖作业面，维持填筑温度在5-10℃区间，避免形成冻土夹层^[2]。对于多雨区域，需设置排水盲沟与防雨篷布双重防护系统，将土料含水率波动范围控制在±1.5%以内。此外，智能化技术的引入显著提升了施工精度。例如激光自动找平系统可将层厚误差从人工操作的±5cm缩减至±1cm。土石坝的经济性优势在偏远地区尤为突出。某西南山区工程中，就地取材的片麻岩利用率达85%，减少外购材料运输成本1200万元。但需注意天然材料的性能局限性，如风化岩料的抗剪强度不足问题，需要掺加水泥或高分子固化剂进行改性。实验室数据显示，掺入2%硅酸盐水泥的风化料，其内摩擦角可从28°提升至35°，凝聚力由15kPa增至45kPa，满足高坝建设需求。

2.2 混凝土面板堆石坝填筑技术

混凝土面板堆石坝填筑技术以堆石体为支撑结构，表面覆盖混凝土防渗面板，兼具安全性与经济性的特点。该技术的核心在于堆石体密实度控制与面板防裂处理。堆石料级配优化是保证压实质量的前提，某抽水蓄能电站工程采用四级破碎筛分工艺，将最大粒径控制在800mm以下，细料(<5mm)含量提升至18%，孔隙率从22%降至17%，显著提高坝体整体刚度。混凝土面板施工需重点解决温度应力与接缝防渗问题。在面板施工中，采用粉煤灰替代率30%+聚丙烯纤维 $0.9\text{kg}/\text{m}^3$ 这一“双掺技术”，可使混凝土极限拉伸值提升38%，有效抑制裂缝产生。接缝处理方面，采用“表层嵌填GB止水条+中部铜止水片+底层SR防渗盖片”的三重防渗体系，形成立体防渗网络。监测数据显示，该设计使接缝渗流量控制在 $0.5\text{L}/\text{s}$ 以下，达到国际领先水平。数字化技术的应用推动工艺革新^[3]。BIM模型在堆石体分区填筑中发挥重要作用，某工程通过三维模拟优化料物运输路径，使填筑效率提高25%，材料损耗率降低至1.2%。GPS监控系统实时追踪碾压轨迹，确保边角部位压实度达标。某案例显示，传统人工巡检发现的压实不足区域占比达7%，而自动化系统可将该数值压缩至0.5%以内。对于硬岩堆石料，冲击碾压技术展现独特优势，采用32kJ冲击夯对坝肩狭窄区域进行补强压实，可使相对密度从0.72提升至0.85以上。

3 大坝填筑关键施工技术分析

3.1 基础处理技术

坝基处理质量直接决定大坝服役性能，不同地质条件需采取差异化处理方案。岩基基础处理包括断层破碎带灌浆与表面整平两大任务。某花岗岩坝基工程中，施工团队采用高压旋喷桩加固宽度3.2米的断层带，注入水泥浆液压力达35MPa，使破碎岩体弹性模量从5GPa提升至15GPa。基面整平采用预裂爆破技术，爆破孔间距控制在0.8-1.2米，装药量 $0.35\text{kg}/\text{m}^3$ ，最终基面平整度误差 $\leq 3\text{cm}$ ，为后续填筑创造理想条件。软基处理则需综合运用换填与强夯技术，如某冲积层坝基深度达28米，施工方分三层实施处理：表层5米采用砾石换填，中间12米实施 $3000\text{kN}\cdot\text{m}$ 能级强夯，底层11米布置CFG桩复合地基。处理后地基承载力特征值从120kPa提升至320kPa，工后沉降量控制在5cm以内。岩溶区施工中，贵州某水库采用高密度电法与地质雷达联合探测定位溶洞，准确定位直径0.3-2.5米的溶洞27处，并采用模袋灌浆技术完成封堵，灌浆压力控制在0.3-0.5MPa，

避免浆液扩散过远造成浪费。

3.2 坝料开采加工

坝料开采与加工是大坝填筑的基础环节，需根据材料特性与施工环境选择适宜工艺。防渗土料多采用立面分层开采法，机械分层取料能有效维持土料含水率的稳定性，尤其适用于气候干燥区域^[4]。平面开采法则借助推土机集料、装载机转运，更适合需要降低土料含水率的场景。堆石料开采则需结合地质条件优化工艺，横断山区某工程采用深孔梯段微差爆破技术，选取孔距1.5米、排距1.2米的布孔方案，使岩体破碎粒径80%处于30-80厘米理想区间。在特殊气候条件下，冬季施工需优先选择向阳背风区域进行开采，并对冻土层进行破碎筛分预处理；雨季则需加强排水系统建设，采用防渗膜覆盖料场，避免雨水渗入导致填料含水率超标。例如，冬季施工时，双江口水电站建立冻土预处理车间，采用热风循环系统将冻土温度升至 5°C 以上，破碎筛分后填料冻块含量低于1%。雨季则架设移动式防雨棚覆盖作业面，配合真空井点降水系统，使料场地下水水位始终低于开挖面3米。

3.3 填筑碾压技术

分层填筑过程中需遵循“先细后粗、均衡上升”原则，防渗料与反滤料利用“犬牙交错”法交替填筑，以保证不同材料接触面的密实度。以堆石坝施工为例，通常在填筑主堆石料前需先行铺设30厘米厚垫层料与60厘米过渡料，各分区协调上升以避免结构变形。碾压作业中，进退错距法凭借其操作简便、错距易控的特点，成为狭窄作业面的首选工艺。而圈转套压法则适用于大面积碾压，借助环形路线逐圈收缩实现全断面压实，但需严格控制碾压遍数以防止超压现象。此外，智能化碾压技术的应用提升了施工精度。例如双江口水电站引入装备GNSS定位模块与压力传感器的振动碾，可实时反馈激振力与行驶速度等参数，使堆石料孔隙率从22%降至18%，沉降量减少40%。对于狭窄作业面，采用进退错距法时错距严格控制在0.3-0.5米，碾压遍数通过车载计数器锁定为8遍，有效避免了漏压或超压现象。

3.4 接头处理

分段填筑形成的接坡需严格控制坡比，通常接坡坡度应缓于1:3，台阶式接头虽能简化施工流程，但需占用较大作业面；平坡式接头则要求坡比不陡于1:1.2，并采用液压夯机加强结合部压实。在检测质量时，除监测振动频率、碾压遍数等参数外，还需通过环刀法或核子密度仪测定填料干密度^[5]。例如，防渗料表层经光滑

振动碾压实后形成致密光滑面,可有效减少降雨吸水率,检测时需保证每500立方米取样不少于1组,压实度合格率需达95%以上。接坡处理质量关系坝体整体稳定性。台阶式接坡施工时,每级台阶高度控制在1.5米,宽度不小于2米,接合面采用3吨液压夯补压5遍。质量检测方面,某工程建立“双控体系”,一方面要求振动碾激振力不低于350kN,行驶速度限制在2-4km/h;另一方面采用瞬态面波法检测,保证填料剪切波速大于400m/s。此外,红外热成像技术可以通过温度场分布差异揭示压实不均区域。例如,某工程采用激光平整度仪检测防渗料表面,2米直尺范围内凹凸差小于3毫米,吸水率测试显示24小时浸泡增重不超过0.5%。在实际施工中,为进一步提升接坡质量,可结合高精度GNSS定位系统,实时监控碾压轨迹,保证均匀压实。

4 特殊条件下的施工技术应用

4.1 极端气候应对

在低温环境中,传统施工易因填料冻结导致压实度不足。双江口水电站研发智能制冷系统,将填筑温度实时调控在-5℃至5℃区间,同时将单循环作业时间压缩至4小时内,最大限度减少热量散失。某海拔3800米电站冬季施工时,研发填料保温输送系统,自卸车配备双层加热舱体,使填料温度维持在5℃;摊铺后立即覆盖复合保温膜,采用热风炮对作业面持续加热。温度监测数据显示,填筑层内部24小时温降不超过3℃,冻胀量控制在0.1%以内。雨季施工则需建立气象预警机制,降雨后及时刮除表层10-15厘米湿土,对临时边坡喷撒乳化沥青或水泥砂浆防护,防止雨水冲刷引发滑坡。多雨区域则需构建三级排水体系,坡顶截水沟引导地表径流,坝面排水盲管间距5米布置,结合强排水泵站,保证50mm/h降雨时作业面无积水。针对高温干旱区域,新疆某水库工程采用雾化喷淋降温技术。在填筑面布置高压雾化喷嘴,每间隔10米设置一组,每日定时启动4次,使坝料表面温度下降8-10℃。同时采用遮阳网覆盖运输车辆,减少填料水分蒸发。检测结果表明,含水率损失率从常规施工的15%降至5%以下。强风环境下,内蒙古风电配套水库工程研发防风抑尘网,网孔密度80目,高度4米,沿填筑面周边连续布置,有效抑制沙尘污染,使填料含泥量稳定在3%设计标准内。

4.2 复杂地质环境

针对横断山区等地质破碎带,石料开采需采用深孔梯段微差爆破技术,优化药包间距与起爆时序,可使岩

体破碎粒径均匀满足填筑要求。双江口水电站建设中,施工方在460米高边坡区域部署800余台重型设备,结合三维地质建模技术动态调整开挖方案,最终实现月填筑强度突破百万立方米,且边坡位移监测值始终小于设计允许范围。在地质断层带施工时,双江口水电站采用预应力锚索加固技术。每间隔3米布置100吨级锚索,钻孔深度达40米,注浆压力维持在2-3MPa,使破碎岩体抗剪强度提升60%。填筑过程中布置600个光纤监测点,实时感知坝体应力应变,数据显示最大不均匀沉降仅12毫米,远低于30毫米设计阈值。喀斯特地貌区施工面临溶洞渗漏风险。贵州某水库工程建立地质雷达扫描系统,采用100MHz天线进行三维探测,定位直径大于0.5米的溶洞132处。处理时先灌注C20细石混凝土封堵主通道,再注入水玻璃-水泥双液浆体填充裂隙,最终渗流量从初始的120L/s降至5L/s以下。对于深厚覆盖层地基,西藏某电站创新应用冲击碾压联合强夯工艺:使用32吨冲击碾进行10遍普压后,换用600kN·m能级强夯机补强,使地基承载力从150kPa提升至300kPa,满足300米级高坝建设要求。

5 结束语

大坝填筑施工技术的持续革新,深刻反映了我国水利水电工程领域的技术演进轨迹。从传统碾压式土石坝到胶凝砂砾石坝的跨越,从经验主导施工到智能化管控的转型,技术创新不断突破地理环境与工程规模的限制。双江口水电站的毫米级压实控制、莆田西音水库的低碳筑坝实践,为解决高寒冻土、岩溶渗漏等全球性问题提供了中国方案。未来,随着低碳建材的推广应用与数字孪生技术的深度融合,大坝填筑将朝着更高效、更环保、更智能的方向发展。

参考文献

- [1]刘德平.大坝填筑技术在水利工程施工中的应用[J].水上安全,2025,(01):10-12.
- [2]田志秀,李金花.水利工程中大坝填筑碾压施工技术研究[J].水上安全,2024,(20):139-141.
- [3]王大志.基于混凝土防渗填筑技术的水利大坝工程施工设计研究[J].工程建设与设计,2024,(16):182-184.
- [4]丁丹.大坝填筑施工技术在水利水电工程中的应用[J].科技资讯,2024,22(07):123-125.
- [5]赵永锋.灌浆技术在水利水电工程大坝施工中的应用分析[J].水电站机电技术,2021,44(06):79-81.