

水利工程面板堆石坝坝体填筑施工技术研究

王亮亮

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】：面板堆石坝具有地形地质适应性强、工艺简单、造价较低、抗震性好等特点，广泛应用于现代水利工程领域。坝体填筑作为面板堆石坝项目施工的核心一环，其施工技术与质控效果关系到坝体长期运行安全与效益。基于此，本文系统分析坝体填筑施工准备，系统探究坝料开采与运输、分区填筑、碾压施工等核心技术，分析常见问题的处理措施，旨在为同类水利工程面板堆石坝坝体填筑作业提供参考信息。

【关键词】：水利工程；面板堆石坝；坝体填筑；碾压施工

DOI:10.12417/2811-0528.26.12.076

引言

在水利工程领域，面板堆石坝作为主流坝型之一，其坝体填筑施工涉及到坝料选型、分区摊铺、逐层碾压等相关工序，具有影响因素多、施工流程繁杂等特点，且不同填筑区对坝料性能、工艺要求存在一定差异性。施工中，若坝料不合格、填筑工艺不科学、碾压参数不匹配，均可能引发现坝体沉降、结构渗漏与失稳等安全风险。对此，需要结合项目地质条件、设计标准，对坝体填筑工艺持续优化，建立全流程质控体系，保障面板堆石坝施工整体质量、实现项目长效运行。

1 面板堆石坝坝体填筑施工准备

1.1 现场勘察与测量放样

现场勘察需全面掌握坝基、岸坡岩土性质、地下水分布、地质构造等信息，需重点排查不良地质问题，如软弱土层、溶洞、滑坡等，为后续坝基填筑施工方案制定提供信息支持。基于设计图纸，使用全站仪、GPS-RTK 等设备开展测量放样，包含坝体轴线、分区边界、填筑边界、高程控制点等，并作出明确标记，对垫层区、过渡区、主堆石区、次堆石区等精准划分，保证偏差达标、分区合理。

1.2 坝基与岸坡处理

将坝基、岸坡上的表面杂草、腐殖土、泥块、碎石、风化岩层清理干净，清理深度需达到设计规范要求，一般黏土基层清理深度 $\geq 0.5\text{m}$ ，岩基风化层清理深度 $\geq 0.3\text{m}$ 。软弱基础需采取碾压、逐渐、换填等方式强化处理，强化基础承载性能，要求地基承载力 $\geq 300\text{kPa}$ 。岸坡坡度修整中，土质岸坡坡度 $\leq 1:1.5$ ，岩石岸坡坡度为 $1:0.5\sim 1:1.5$ ，不得有陡坎、陡坡，保障坝体与岸坡结合性能。

1.3 坝料选型与试验

按照功能划分可将面板堆石坝划分为多个区域，不同区域

对坝料级配、强度、渗透性、压实度要求存在差异。选型阶段，主堆石坝区优选抗风化性强、质地坚硬、级配良好的石料，湿抗压强度 $\geq 30\text{MPa}$ ，粒径在 $300\sim 800\text{mm}$ 之间，小颗粒($< 5\text{mm}$)含量 $\leq 10\%$ ，渗透系数严控在 $1\times 10^{-3}\sim 1\times 10^{-4}\text{cm/s}$ 之间，保障坝体承载力、稳定性；过渡区坝料粒径通常在 $80\sim 300\text{mm}$ 之间，保持级配连续均匀性，小颗粒含量在 $15\sim 20\%$ ，用于应力、变形的平稳过渡；垫层区优选级配良好的砂砾料，粒径为 $5\sim 80\text{mm}$ ，要求小于 0.075mm 颗粒的含量 $\leq 8\%$ ，具备良好返滤性、压实性，为混凝土面板提供支撑。坝料入场前进行外观、数量、规格检测，检查合格后开展室内击实试验、颗粒级配试验、抗压强度试验、渗透试验，确定坝料最佳含水率、最大干密度、压实参数等。选取经典段进行碾压试验，明确各个区域坝料摊铺厚度、碾压参数、碾压遍数、行驶速度^[1]。

1.4 施工设备与人员准备

选用液压挖掘机、装载机开采坝料，配置 $20\sim 50\text{t}$ 的自卸汽车负责运输，推土机、平地机用于摊铺，选用 $20\sim 30\text{t}$ 自行式振动碾进行碾压作业，狭窄、边角等区域由人工使用小型手扶式振动碾、平板振动器补夯，配备破碎锤、洒水车等辅助设施。所有设备提前进行维护、调试。另外，组建专业项目团队，及时对现场施工人员、管理人员开展技术交底工作，确定施工流程、技术标准、质控要求、安全要点，提高施工人员专业能力、质量与安全意识。

2 面板堆石坝坝体填筑核心施工技术

2.1 坝料开采与运输

基于料场岩石性质开采坝料，优选深孔微差爆破工艺，精细设计炮孔间距、排距、装药量，严控爆破石料粒径，减少超径石、针片状石料的生成量，超径石含量严控在 $\leq 5\%$ ，确保坝料级配达标。开采期间严格按照试验结果参数设定级配比例，采用分层分段开采方案，以防石料级配失衡。采用自卸汽

车用于运输坝料,提前规划好运输路线,做好道路压实、平整工作,以防运输路线颠簸造成石料分层。运输前做好覆盖工作,以防石料散落、扬尘污染,切要选择晴天作业,以防雨水影响其含水率。采用进占法卸料,自卸汽车从填筑区一端向另一端推进卸料,可防止在已铺筑区间多次碾压、坝料颗粒分离,提高摊铺均匀度。

2.2 坝体分区填筑施工

面板堆石坝坝体填筑严格遵循“水平分层、分区同步、依次填筑”施工原则,施工顺序为:垫层区→过渡区→主堆石区→次堆石区,各个区域施工保持紧密衔接以及填筑质量均匀度。其中,垫层区与混凝土面板衔接,施工精度要求高,采用“机械+人工”配合摊铺法,摊铺厚度为0.3-0.5m,摊铺中将超径石料剔除,保持料层平整性、级配均匀性,摊铺平整度偏差 $\leq \pm 5\text{cm}$ 。完成卸料后及时调整含水率,要求实际含水量在最佳含水率 $\pm 2\%$ 之间,确保后续碾压质量。过渡区具有承上启下作用,与垫层区同步开展填筑,铺料厚度为0.4-0.6m,使用推土机摊铺作业,与垫层区、主堆石坝区有清晰的界面划分,不得使用混合坝料填筑,界面错误误差 $\leq 10\text{cm}$ 。完成摊铺后及时平整场地,避免形成较大的堆料高低差。主堆石区作为坝体承载核心,铺料厚度在0.8-1.2m之间,次堆石区铺料厚度在1.0-1.5m之间。使用推土机、平地机联合摊铺作业,保持铺料厚度均匀度,平整度偏差 $\leq \pm 10\text{cm}$,若存在局部大粒径石料集中区,则由施工小组人员分散处置,以防存在“架空点”。相邻填筑层进行刨毛处理(深度3-5cm),用于强化层间粘结力,且要防止层间分离。各个分区填筑施工中严控界面平整度,相邻区填筑高差 $\leq 0.5\text{m}$,填筑面横向排水坡度为2-3%,促进积水快速排出,以防积水影响坝料质量^[2]。

2.3 碾压施工技术

碾压作业是提高坝体密度、减少沉降的核心工序,施工需严格遵循“先轻后重、先慢后快、均匀碾压”标准流程。碾压作业中,主堆石区、次堆石区优选大吨位振动碾,振动频率、振幅分别设定为20-30Hz、1.5-3.0mm,持续碾压6-8遍,压路机运行速度为2-3km/h。垫层区、过渡区优选中小型振动碾,持续碾压8-10遍,时刻观察碾压状态以防过度碾压导致细颗粒流失。碾压方向与坝轴线平行,采取进退式碾压法,相邻碾压重叠宽度 $\geq 1/3$ 轮宽,杜绝出现欠压、漏压问题。针对大型碾压设备无法涉及的区域,如坝体与岸坡结合区、边角区、分区界面等,使用小型手扶式振动碾、平板振动器等设备,开展多遍、薄层减压,铺料厚度 $\leq 30\text{cm}$,碾压10-12遍,确保压实度达标。坝体分段施工衔接部位使用跨缝碾压法,碾压搭接长度 $\geq 1.5\text{m}$,将接缝薄弱区消除,确保坝体密实性、整体性。另外,在碾压期间严控含水率,碾压期间对坝料含水率实时监

测,若含水量低于标准区间需洒水补水,反之则翻晒处理降低含水率,确保碾压效果达标。

3 坝体填筑质量控制

3.1 原材料质量控制

建立原材料入场质量验收制度,各批次材料入场前均开展颗粒级配、强度、含泥量、风化度等指标检测,石料含泥量 $\leq 3\%$,风化料含量 $\leq 5\%$,针片状颗粒含量 $\leq 15\%$,不合格材料严禁入库或使用。特殊材料,如过渡料、垫层料等,还需检测其压实性、渗透性指标。

3.2 施工流程质量控制

施工全过程均要有专人负责质量管控,着重检查铺料厚度、平整度、含水率、碾压参数、分区界面指标是否满足项目标准。摊铺厚度偏差 $\leq \pm 5\text{cm}$ 、含水率偏差 $\leq \pm 2\%$,全程记录碾压遍数、碾压速度,与试验参数的差值 $\leq 5\%$ 。质量管理员对关键工序旁站监督,一旦发现问题及时纠正错误。设置智能压实监控系统,在碾压设备上安装定位器、压感器,实时采集碾压速度、遍数、压实度,动态监控施工质量,数据采集频率 ≥ 1 次/s,定位精度误差 $\leq 5\text{cm}$ 。

3.3 压实度检测

坝体采用分层碾压法,每层填筑完成碾压后均要开展压实度检测,重点检测密实度、干密度、孔隙率。基于《混凝土面板堆石坝施工规范》(DL/T 5128-2018)标准,主堆石区压实度 $\geq 95\%$ 、孔隙率为20-25%、干密度 $\geq 2.2\text{g}/\text{cm}^3$ 。垫层区、过渡区压实度 $\geq 96\%$ 、孔隙率为18-22%、干密度 $\geq 2.3\text{g}/\text{cm}^3$ 。次堆石区压实密度 $\geq 93\%$ 、孔隙率25-28%。采用灌砂法、灌水法、核子密度仪进行检测,按照规范标准布设检测点,要求 ≥ 1 点/1000m²,每个填筑单元 ≥ 3 点,要求检测合格率为100%,不合格区域二次碾压直至符合标准^[3]。

3.4 施工排水与防护

填筑施工阶段做好现场排水工作尤为重要,填筑面横向设置2-3%的横向排水坡,及时开挖排水沟(30cm \times 40cm),及时排出施工水、雨水,以防积水问题导致坝料软化、降低密度。若为雨季作业,则应暂停填筑施工,完成铺筑但未碾压区域覆盖防水布,晴天后复工前重新检测坝料含水率,直至将含水率调节至最佳含水率 $\pm 2\%$ 以内,并再次复核压实度,合格后再继续作业,以防自然天气影响最终的施工质量。

4 常见施工问题及处理对策

4.1 坝料颗粒分离

在坝料运输、卸料、摊铺期间,可能出现粗细颗粒分离现

象,分离区粗颗粒含量 $\geq 30\%$,造成局部级配失衡、压实度不达标。针对此类问题,需项目组提前做好运输路线优化工作,最大限度降低运输颠簸度,严控卸料落差 $\leq 2\text{m}$ 。采用进占法卸料,严禁集中卸料形式,堆料高度 $\leq 3\text{m}$ 。摊铺期间的大颗粒石料由人工分散开避免堆积,局部级配不良区域补充5-10%的细颗粒料,采用小型拌和装置重新搅拌均匀后再进行碾压施工,完成碾压后对压实度重新复核,直至达标为止^[4]。

4.2 压实度不足

铺料过厚、碾压参数不匹配、含水率超标等问题均可能影响最终的压实度,检测压实度付不满足设计标准、孔隙率超出上限,进而造成坝体结构沉降、开裂、渗漏等问题。针对此类问题,需严控铺料厚度,专人手持激光测厚仪全程监测厚度参数,施工小组严禁擅自增加厚度。基于试验参数标准开展碾压工作,不得有少压、漏压现象,若发现漏压则需补压2-3遍。坝料含水率需实时监测、实时调节,含水率超标区翻晒值最佳含水率范围内。针对已经出现压实度不达标区域,应采用薄层补压,或将压实度不足区挖除30-50cm厚料层,重新进行摊铺、碾压作业,复检合格后再开展下一道工序。

4.3 坝体不均匀沉降

坝体不均匀沉降主要因坝基处理不当、坝料质量不均、填筑工艺不规范造成的结果。施工期间未实时监测坝体沉降速率,若沉降速率 $\geq 5\text{mm/d}$ 、累积沉降量 $\geq 0.5\%$ 坝高,会严重影响坝体结构稳定性。针对此类问题,需做好岸坡处理、强化坝基,将不良地质层彻底清理干净,软弱地基换填厚度 $\geq 1\text{m}$,基础碾压后的承载力 $\geq 300\text{kPa}$ 。严控坝料质量,确保级配均匀

度,不达标材料及时清除现场,以防被误用。规范开展分层填筑、分层碾压施工,填筑高度 $\leq 2\text{m/d}$,以防局部填筑速率过高、压实度不达标。施工期间按照1次/3d的频率监测沉降量,一旦沉降量超出标准立即暂停作业,对沉降区域采取加固措施直至沉降稳定后再继续施工^[5]。

4.4 层间结合不良

层间清理不彻底、未刨毛处理均会导致层间结合松散问题,存在层间渗漏通道,渗漏系数 $> 1 \times 10^{-3}\text{cm/s}$,层间黏结力不达标。针对此类问题,待至上层填筑验收达标后、下层正式填筑前,及时进行表层深度刨毛,清理表面的杂物、保持整洁,不得有松散料。使用洒水车向层间均匀洒水湿润,严控层间的最佳含水率,强化层间的黏结性能。严控层间填筑间隔时长,岩石料层时间间隔 $\leq 7\text{d}$,垫层料层时间间隔 $\leq 3\text{d}$,避免间隔过长导致表面风化。针对结合不良段需重新刨毛、清理、补压,直至层间紧密度达标。

5 结语

综上所述,面板堆石坝坝体填筑工艺复杂,需同时做好施工准备、坝料管控、分区填筑、碾压作业等各项工作。在实际施工中,结合施工场地自然条件以及设计标准,严格执行分区填筑、标准化碾压工序标准要求,组件专人团队负责施工现场质量管控,针对已经出现的各类问题及时采取处理措施,限期整改,确保坝体密实度、防渗性、稳定性达标。同时,还要紧跟时代发展步伐,积极投入智能化、绿色化施工工艺与设备,进一步提高施工效率、质量、安全、效益,为推动水利基础事业发展提供蓬勃动能。

参考文献:

- [1] 杨以荣,谢红强.深厚覆盖层下心墙堆石坝渗流特性及静力响应分析[J].四川水利,2026,47(01):1-7.
- [2] 马红利,李小东,李兆宇,等.玛尔挡堆石坝坝体填筑分期快速施工方案与技术应用[J].陕西水利,2025,(12):116-119.
- [3] 成柳.基于混凝土面板堆石坝坝体填筑施工技术 with 质控检测[J].中国水泥,2025,(11):97-100.
- [4] 杨韬.混凝土面板堆石坝坝体填筑施工技术[J].水科学与工程技术,2025,(04):57-59.
- [5] 赵金凤.基于面板堆石坝坝体填筑施工技术研究[J].黑龙江水利科技,2025,53(06):167-171.