

# 堆石坝碾压施工质量控制技术与压实效果优化研究

王永祥

云南省水利水电工程有限公司 云南昆明 650000

**摘要：**堆石坝工程是水利工程的重要组成部分，其工程质量对整个工程的安全稳定运行有直接影响。而碾压施工作为堆石坝工程的重要工序，对于保障坝体稳定性，防止不均匀沉降具有重要作用。因此，为了保证堆石坝碾压施工质量，在施工阶段需要引入全面、有效的质量控制技术，实现对施工质量的全面控制，提高压实效果和工程施工管理水平。鉴于此，本文结合某堆石坝工程实例，从填料质量控制、料场爆破参数优化、碾压过程智能化监管及碾压参数优化等多个方面着手，深入分析施工质量控制技术的应用要点，并进一步分析压实效果。结果显示，通过采用全面、有效的施工质量控制技术，能够实现对施工全周期的质量控制，保证施工质量，提高工程效率。

**关键词：**堆石坝；碾压施工；质量控制技术；压实效果

堆石坝是水利工程的关键设施，其以石料填筑作为主体，是一种搭配防渗体的土石坝类型，坝体堆石占比高，因为使用天然石料，所以具备较强的适应性和抗震性能，具有重要的防洪和蓄水作用。堆石坝施工质量对水利工程整体质量、安全有直接影响。其中碾压是堆石坝工程施工的重要一环，旨在通过机械压实石料等工艺，保障坝体综合性能。现今随着水利工程施工技术、工艺水平的提高，越来越多的新型坝体结构得到应用，施工的专业性与复杂程度也明显增加，在此背景下，加强堆石坝碾压施工的质量控制尤为重要。因此，深入探究施工质量控制技术的应用要点具有重要意义，通过加强施工质量控制，全面优化压实效果，以保障工程施工质量，维护水利工程的安全、稳定运行。

## 一、工程概况

某大型水利工程在堆石坝施工建设方面应用高混凝土面板堆石坝，在施工过程中，受地基岩性、填料级配等因素影响，坝体局部区域存在超标准沉降和填筑压实度不符合设计要求等问题。当填筑至一定高程后，安排专业人员进行系统的检查，明确工程施工存在的质量问题。具体包括某一断面平均沉降速率大于规范值，不符合设计要求；部分测点的最大孔隙率偏高，超过规范标准中的20%；渗流破坏试验结果显示，粗颗粒流失量较大，不符合设计要求；不同料源区含水量存在较大差异，

导致局部软化等异常情况。针对以上施工质量问题，本工程采用施工质量控制技术，从多个方面出发，加强对施工质量的控制，并综合评价压实效果。

## 二、施工质量控制技术的应用

### （一）强化填料质量控制

填料质量控制是堆石坝碾压施工质量控制的关键基础，需要从岩体强度管控、含水率控制等方面出发，保障填料质量符合工程施工要求。

在岩体强度管控方面，需要做好前期勘查工作，通过系统的地质勘查，明确岩体的物理性质、力学特性，并对不同性质岩体进行科学的划分，采用针对性质量控制措施。例如，针对高强级的岩体，需要关注其结构、裂缝发育等情况；针对较低级岩体，则要采取灌浆等工艺，进一步增强岩体的抗剪强度。为了提高质量控制效果，还需要全面分析岩体力学参数，建立功能完备的监测系统，实现对岩体应力应变值等关键指标变化情况的全方位监测，并在前期勘查中引入先进探测技术方法，全面分析数据变化规律，分析原因，为后续碾压施工提供可靠依据<sup>[1]</sup>。本工程在堆石坝碾压施工前，安排专业团队进行全面的地质勘查作业，主要应用钻孔取芯等技术方法，对料场等级实施合理划分，最终明确主堆石料应用A级料，过渡层应用B级料，并采用爆破试验等方法，严格控制块石粒径。

在含水率控制方面，需要充分结合室内击石等试验方法，明确各种级配条件下石料的含水量，绘制含水率与容重的关联性曲线。本工程通过试验结果发现，含水

**作者简介：**王永祥（1975—），男，汉族，云南曲靖人，本科，高级工程师，研究方向：水利水电工程施工。

率对压实度的影响明显,随着含水率的逐步提升,干容重也会随之增加,当含水率超出标准规范时,因为孔隙内水压明显升高,可能导致压实度不足,难以达到设计密度要求,从而影响坝体稳定性。本工程最终明确最佳含水率为2.1%。同时,在施工阶段严格控制含水率,设定允许误差区间为 $\pm 0.5\%$ ,避免对坝体结构性能造成影响。另外,因为含水率对压实效果的影响显著,本工程在开采前,安排专业技术人员进行岩石的含水率检测,基于检测结果优化开采计划,确保填料含水率始终处于合理区间;在填料运输方面,需要采取适当的遮盖措施,降低水分蒸发的影响,确保含水率稳定;为了提高填筑效果,需要将现场划分为若干个网格单元,根据数据监测结果绘制含水率分布热力图,当某一或多个网格的含水率过低时,进行局部补充,含水率过高时则进行翻晒等处理<sup>[2]</sup>。同时,本工程在施工现场配置多个微波传感器,基于电磁反射原理全面监测30m深度范围的含水率,及时发现异常并处理。现场使用雾化洒水系统,利用管网喷洒,发现异常后在短时间内稳定含水率,使堆石料在最佳含水率时进行碾压施工,有效防止含水率不均引发的一系列质量问题。

### (二) 优化现场爆破参数

现场爆破是堆石坝碾压施工的重点,通过制定合理的施工方案,可以提高山体岩石开采效率,获得符合粒径要求的石料,并有效处理含水率较低的石料,降低后续施工难度。因此,在施工质量控制方面,还需要重视现场爆破方案的优化,并加强施工参数控制<sup>[3]</sup>。本工程在施工前,充分结合工程施工要求及现场地质情况,共拟定三种爆破方案,对不同方案进行综合对比与系统分析,选择最优方案,保障施工质量。三种方案具体包括台阶爆破、预裂爆破和缓冲爆破,通过试验对不同方案的块石合格率、细料含量、超径石比例等关键参数进行对比,评估不同方案的施工效果。通过综合比选能够发现,预裂爆破+缓冲爆破的综合施工方案效果最佳,能够有效提高块石合格率,最终确定在主堆石区开采施工中使用这一方案。除此之外,在堆石坝碾压施工过程中还需要重视级配的控制,以保障施工质量和效率。本工程在完成现场爆破作业后,系统分析石料级配参数,应用高性能筛分站点对填料级配进行全面监测,在具体监测过程中,若监测到d60与d10的比值超出7这一阈值,系统将自动启动细料掺配程序,按照要求掺入粒径为5-20mm的碎石。同时,对掺量进行准确计算,公式如下:

$$Q=0.15 \times (C_u \text{实际检测值} - C_u \text{设计值}) \times V$$

上式中Q表示掺量,  $C_u$ 表示填料不均匀系数, V表示填料体积。基于计算结果,合理添加粒径碎石,有效降低 $C_u$ 值。因此,通过加强对级配的控制,能够保证填料级配与设计要求相符,从而提高施工效果。

### (三) 建立智能化监管平台

因为堆石坝碾压施工周期短,工期相对紧张,与高标准质量控制存在明显冲突。既往施工质量控制以旁站监管方式为主,容易影响机械作业,导致施工效率下降。同时,因为缺乏全面、高效的监测手段,导致碾压填筑施工容易受其他因素影响,施工质量控制伴随诸多盲点,施工参数控制难度较大。另外,堆石坝碾压施工的常规质量控制以事后检测为主,难以及时发现质量问题并高效处理,并且试坑检测等事后检测手段容易影响工程效率和进度,整体应用效果不理想。为了弥补常规质量控制的不足,本工程在施工期间引入前沿智能化、信息化技术方法,旨在实现对施工质量的全面监测,发现问题并处理。在具体实践中,在机械设备上安装高性能的GNSS接收设备,能够实现对压实参数的实时监测,且具备反馈功能,便于工作人员及时调整施工参数。同时,在施工现场使用高清晰度的视频监控系统,能够实现对碾压设备运行轨迹、速率及状态等参数的全面监测,并通过可视化页面直观呈现碾压频率、厚度等关键参数,且具备实时查询的功能。监控系统还具备完备的数据统计和分析功能,可以对不同施工区的参数进行自动统计,生成相应的报告,完成自动存档<sup>[4]</sup>。当施工过程中,出现参数超出设计规范的情况时,系统能够发出预警信号,帮助工作人员及时掌握参数不合格的施工位置,便于及时调整或返工。当施工完成并经检测压实合格后,系统自动生成施工报告,以图表等形式直观呈现碾压遍数、压实厚度等重要参数,为施工质量的综合评价提供可靠依据。

### (四) 优化碾压参数

堆石坝碾压施工过程中涉及参数较多,如振动频率、碾压速度、铺层厚度等,加强对相关参数的优化控制是工程施工质量控制的要点。本工程对关键施工参数应用正交试验设计方法,引入极差法全面分析试验结果,通过结果可知,振动频率、碾压速度和铺层厚度的极差值分别为4.1、1.9和3.1。提示振动频率对压实效果的影响最大,碾压速度的影响最小。根据结果进一步调整施工参数,最终明确振动频率为30Hz,碾压速度为2km/h,

铺层厚度设定为1m。通过参数优化,填料压实度得到明显提高,且渗透系数处于合理范围,满足设计要求。

在碾压遍数的控制方面,本工程结合振动碾压实度试验结果发现,前六遍碾压过程中压实度呈快速增长趋势,第六遍到第八遍碾压过程中压实度趋于稳定,而十遍以上碾压容易出现骨料破碎等问题。因此,根据试验结果优化碾压方案,合理控制遍数区间,最终明确进行七次碾压,不但可以确保压实度处于合理范围,又能够避免骨料破碎等质量问题,保障施工质量的同时提高施工效率<sup>[5]</sup>。除此之外,为了最大限度减少质量问题的发生,还需要重视振幅等参数的控制,本工程应用高频小振幅的碾压施工方案,严格控制碾压速度,有效防止质量问题的发生。

### 三、压实效果分析

为了进一步评价堆石坝碾压施工质量控制技术的应用效果,对最终压实效果展开综合评价。在具体实践过程中,本工程引入长短期记忆神经网络,建立压实度的预测模型,同时依据碾压速度、遍数等影响压实效果的关键参数,将相关参数作为自变量,对碾压施工阶段的压实度实施精准预测。在模型中输入相关参数,模型能够自动生成压实度数值,为工程施工管理提供可靠依据。模型预测结果显示,通过应用全面的施工质量控制技术,本工程堆石坝平均压实度明显提高,渗透系数等其他参数均符合设计要求<sup>[6]</sup>。

另外,进一步进行正交试验,明确最佳碾压施工方案中的各项参数,结果显示,当干密度值为 $2.50\text{g}/\text{cm}^3$ 时,最大压实度高达99.1%。上述结果提示,通过采取集料级配优化等质量控制措施,堆石坝的抗渗系数明显降低,显著优化结构的抗渗性能。同时,本工程在施工质量监测方面充分利用智能化监测平台,引入数字成像等前沿技术方法,使施工质量检查的工作效率得到明显提升,弥补传统人工抽检等方式的不足<sup>[7]</sup>。因此,通过运用全面、有效的施工质量控制技术,能够保障堆石坝碾压施工质量,减少质量问题和安全隐患的发生,为水

利工程的安全稳定运行提供重要保障。

### 结语

堆石坝碾压施工质量关乎水利工程的整体质量与安全,在施工过程中需要充分利用施工质量控制技术,以保障施工质量,提高施工效率。在质量控制实践中,可从强化填料质量控制、优化料场爆破参数、建立智能化监管平台及优化碾压参数等多个方面出发,实现对工程施工质量的全方位控制,从而保障坝体整体结构稳定、性能优异,延长使用寿命。另外,在堆石坝碾压施工实践过程中,相关工作人员还需要重视质量控制技术创新,充分结合工程具体情况,持续优化与完善质控方案,并重视大数据、人工智能等前沿技术的应用,及时发现施工阶段存在的问题并有效处理,为工程可持续发展奠定坚实基础。

### 参考文献

- [1] 李国儒, 康建峰. 夹岩水利枢纽工程数字大坝与堆石坝碾压质量实时监控技术[J]. 水利水电快报, 2023, 44(6): 111-117.
- [2] 刘亨凡, 周伟, 樊晓燕, 等. 蓄集峡面板堆石坝垫层料和过渡料的碾压参数试验分析[J]. 水利技术监督, 2024(10): 216-219, 319.
- [3] 胡松. 面板堆石坝填筑材料碾压试验对填筑标准及参数的研究[J]. 建筑技术开发, 2024, 51(11): 128-131.
- [4] 熊启文. 混凝土面板堆石坝主、副堆石料碾压试验研究[J]. 云南水力发电, 2023, 39(10): 314-318.
- [5] 刘国中. 黄家湾水利枢纽工程堆石坝填筑碾压过程监控系统设计[J]. 陕西水利, 2021(4): 155-156.
- [6] 李成. 水利水电工程堆石坝极硬岩填料重型碾压技术探究与实践[J]. 建筑与施工, 2025(24).
- [7] 崔博, 张慧高, 王佳俊, 等. 基于施工全过程参数的堆石坝掺砾土心墙压实质量实时评价[J]. 水利水电技术, 2021, 052(002): 109-118.