

堆石坝坝体填筑工艺优化及运行安全管理分析

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】：堆石坝在水利水电工程项目中应用，因为其具有良好的适应性，抗震能力强，在我国水利水电工程项目中应用广泛。而随着坝高日益增加，施工环境日益复杂，对于堆石坝坝体填筑施工、运行管理提出了严格的要求。因此，分析堆石坝坝体填筑工艺技术手段，基于现有技术以及工艺流程，探究优化模式，强化运行安全管理，对于我国水利水电工程建设具有重要的影响。基于此，文章重点分析了堆石坝坝体填筑工艺优化以及运行安全管理路径，以供参考。

【关键词】：堆石坝；坝体填筑工艺；运行安全管理

DOI:10.12417/3083-5526.26.02.029

堆石坝是一种基于对堆石体为主体结构、混凝土面板结构、土工膜等作为核心的防渗结构，在水利工程项目中应用广泛。此种技术不仅施工便捷，对于地基适应性也相对较强，具有较为显著的抗震性能。但是，在堆石坝建设中还是受到工艺、材质以及技术等多种因素的影响。因此，在现代水利工程建设领域中，要重点分析堆石坝坝体填筑工艺，基于实际状况探究优化工艺与实施路径，了解关键技术特征，方可对相关工程建设提供技术参考。

1 堆石坝坝体结构特征与工程适应性

1.1 结构特征

沥青混凝土心墙面板堆石坝主要包括了堆石坝体与沥青混凝土心墙两个结构。在施工中，坝体分区主要就是从上游区域、下游区域诸多不同的区域。而心墙上游过渡层的厚度一般设置在2m左右，而下游过渡层的厚度设置在3m左右。利用此种分区设计的方式可以充分保障坝体结构的稳定性，也可以提高心墙与堆石体结构之间的协同能力。

1.2 技术优势与工程适应性

第一，堆石坝坝体结构性能显著，渗透系数为 10^{-8}cm/s 以下，其防渗效果显著。第二，柔性变形能力显著，可以有效适应坝体结构中出现的不均匀沉降影响，也可以抵消地震等多种因素产生的变形问题，有效降低渗漏通道产生的影响。第三，自愈能力显著。在微小裂缝出现的时候，主要就是利用材料流变特性进行自动处理，提高了整体的自愈能力。第四，部分心墙厚度相对较薄，在施工中无需较大的工程量，可以有效满足快速施工的应用需求。

2 堆石坝坝体填筑工艺核心技术路径与优化要点

堆石坝坝体填筑工艺直接影响施工质量水利工程整体效果，因此在施工中，要优化堆石坝提工艺，优化工艺技术与施工程序，其主要技术要点如下：

2.1 堆石坝坝体填筑工艺核心技术路径

2.1.1 基础处理

在坝体结构填筑作业之前，要根据要求重点做好坝体基础

结构的处理，保障各项工序符合技术标准要求。首先进行覆盖层开挖作业，根据技术标准、项目特征进行地质缺陷处理。在进行覆盖层基础开挖作业中，要重点做好深度为5-7m范围中腐殖土、土质透镜体以及相关问题的处理，要根据要求进行技术性处理，通过颗粒级配试验的放回分析覆盖层是否符合技术要求。在进行断层结构、裂隙密集带等地质缺陷位置进行处理中，要根据实际状况进行混凝土喷洒或者置换混凝土材质。最后，勘探平洞要应用混凝土封堵之后，根据技术标准进行回填灌浆作业，保障整体性能符合施工作业要求。

2.1.2 碾压试验

在坝体填筑施工作业之前，基于碾压试验确定经济合理性，明确施工压实参数以及技术标准。要确定铺层的厚度。碾压的遍数以及加水量等技术标准，应用的填筑设备以及相关工艺必须要符合就要求。

2.1.3 坝料开采与运输管理

坝料开料是填筑施工的基础，也是影响后续施工的关键所在。在料场开采中要基于分区开采以及分类施工的基础原则处理，基于坝体结构的分区特征、材料制定完善的开采技术方案。在进行坝料运输中，必须要根据实际状况合理设置，规划以及处理，充分保障运输稳定性，提高持续性。

2.1.4 摊铺作业

摊铺是整个施工的核心所在。坝料摊铺必须要合理控制摊铺厚度、平整度以及整体的分离度。一般状态下要通过推土机对其进行摊铺处理，保障行厚度均匀，表面平整，同时不会出现显著的颗粒集中等诸多问题。对于关键位置则严格控制厚度，保障其在允许的偏差范围中。而在智能化施工环境中，利用无人机等设备进行管理，可以有效保障摊铺精度。在施工最为关键的就是要做好分区填筑，协调变形等诸多问题。在施工中要同步填筑，行鳄梨控制高差，方可控制结合面陡峭等问题。同时，要合理设置沉降观测点，重点做好坝体结构的变形分析与动态管理，根据实际中到及时调控施工方案与技术流程。

碾压是坝体填筑的关键工序。主要碾压参数包括了碾压机械吨位、铺料厚度以及行走速度、振动状态等多种因素。基于工程试验以及技术标准,在多数的项目中主要就是应用25t振动碾分层碾压时,将铺料厚度控制在80~100 cm左右,碾压8~10遍,并且保障行走速度控制在2~3 km/h。

2.2 堆石坝坝体填筑工艺优化

2.2.1 坝体分区以及填筑作业精细化管理

坝体分区是堆石坝填筑作业的核心内容,科学合理的分区方案直接关系到坝体变形质量,也是维持结构稳定的关键所在。基于料源特性、坝料强度、渗透性、压缩性以及施工便利性等多种因素系统分析,要做好各个工艺的质量控制,基于功能特征强化控制。

第一,上游堆石区是面板或者心墙结构的主要支撑体,必须要重点做好变形模量的控制,保障与结构的过渡层、垫层区形成一个完善的梯度系统,方可有效避免邻近区域中因为刚度突变而出现的防渗体应力集中等问题的出现。如果垫层区域过渡区、主堆石区域之间出现显著的变形模量差异性,则坝体结构在蓄水荷载作用力之下会出现不同程度的差异性沉降问题,这样则会导致面板完全、应力超限或者心墙局部剪切变形等诸多问题。因此,要通过添加过渡层的方式,优化主要堆石区以及过渡区之间的区域,利用材料、级配等进行精细化调控,方可控制变量,缓解刚度突变等诸多问题。

第二,在施工中,优化填筑时序,强化分区控制,可以有效保障施工质量。坝体填筑要基于总体平衡上升的基础性原则开展,避免因填筑高差过大而出现内部应力分布不均匀等诸多问题。而在软岩料填筑区域,其蠕变特征显著,则可以应用薄层慢升工艺进行处理,根据实际状况,适当延长预沉降周期,使得软岩料在施工阶段中可以完成大部分的次固结变形,继而减少在周期运行中产生的附加沉降量等变化。其中,堆石体填筑层厚控制要基于材料的粒径进行综合分析,保障对最大粒径不得高于层厚的三分之二。在实践中,要根据现场碾压试验确定最近工艺。

2.2.2 碾压参数动态优化与智能压实技术

碾压是影响堆石坝填筑密实度、变形模块控制的关键所在。碾压参数直接关系到坝体结构质量。在传统的碾压作业中,主要就是利用现场碾压试验的方式确定,在施工中容易受到天气、作业条件等多种因素的影响。

第一,通过动态优化技术手段进行处理,构建碾压参数、压实效果的实时性反馈管理机制,可以综合实际状况进行智能调控。智能压实系统基于振动碾压,利用集成加速度传感器设备、高精度的定位模块进行数据信息采集,可以获得碾压机械数据信号,了解空间位置以及多种信息数据,通过计算之后可以形成分布图谱信息。而基于智能碾压设备,联合无人管理平

台,可以综合施工现场、工艺以及环节等多种因素系统分析,自动设计最佳碾压路径、速度以及遍数等信息数据。同时,系统在应用中可以支持作业系统进行自动监控、数据信息汇总、智能化分析,通过多个模块进行精细化管理,可以有效实现施工流程的全程化、系统化以及精细化管理。另外,在系统施工中,可以识别薄弱区域,形成碾压方案,基于施工数据构建质量预测管理模型,综合料源特性、气象条件等多种因素,确定最佳的碾压方案以及技术组合。

第二,连续压实控制指标。通过标准化方式进行管理,可以构建全面赋予的数据管理模块,继而在根本上解决了在碾压中出现的漏压、欠压以及抽检检测困难等诸多问题。智能碾压系统在应用中主要就是进行信息数据记录分析,基于数据对比的方式发现存在的超速、压实度不足等时机问题,可以根据实际状况发布信息数据,继而为驾驶人员提供纠偏操作引导模块。通过无人驾驶碾压技术进行处理,可以实现智能化控制,基于路径规划、环境感知以及碾压机械等多种方式进行自动融合,可以实现无人化操作,有效提高了碾压效果。

2.2.3 堆石料上坝运输与加水控制的系统优化

堆石料从料场开采坝面碾压到运输的整个过程中,都会直接影响填筑质量,施工效率。在运输管理过程中,容易受到材料离析、含水量变化、粉尘等多种因素的影响,出现诸多的质量隐患问题。为了有效解决此种问题,通过系统优化进行规范化管理,可以充分保障施工质量。

第一,堆石料加水可以有效保障碾压质量,是提高密实度的重要技术手段。堆石料在振动碾压作业中,充足的水分可以提高颗粒之间的密实性能。而应用传统的加水量控制技术手段,管理模块过于粗放,此种方式容易出现加水不均匀、细颗粒流失、水量无法精准控制等诸多问题。第二,而通过堆加水控制流程优化处理,主要就是在料场运输之前、运输途中添加,根据技术要求进行料场的爆破料的预湿处理,可以有效避免运输扬尘,也可以提高渗透质量。在皮带运输机械或者卸料口运输中,要基于实际状况设置定量加水装置,基于速度以及实际状况进行自动调控,可以实现精细化控制。同时,基于料源岩性质、级配特性等多种因素进行分析,确定最佳含水量,可以有效避免因为加水不足而出现问题。

3 堆石坝坝体填筑运行安全管理要点

重视堆石坝坝体填筑工艺优化及运行安全管理,可以充分保障水利工程项目质量,在实践中是其管理要点如下:

3.1 变形监测与渗流监测技术体系构建

在堆石坝坝体施工中,最为关键的就是要做好变形监测,充分保障堆石坝坝体长期运行安全性。因此,基于GB/T 45530-2025《土石坝安全监测技术规范》的要求,安全监测要基于实际状况,构建动态监测管理系统,强化验收管理,通过

设置全生命周期的动态技术监控柜台体系,方可有效满足坝体结构、坝基等各个结构符合技术标准,实现标准化的安全监测管理。

变形监测是堆石坝安全监测的核心与重点所在。在应用中,主要包括了表面变形以及内部变形两个方面的内容。其中表面检测主要就是基于全球导航卫星系统,全站仪等多种技术手段进行处理,在应用中通过 InSAR 技术进行库区边坡结构监测分析,确定监测自动化系统的标准以及技术要求。而内部变形监测就是通过传感器、沉降仪等多种设备进行持续性监控。

其中,渗流监测是对防渗系统工程、状态特征、渗透稳定性等多种因素进行评估的核心所在。监测项目要根据实际状况进行坝体浸润线、坝基础渗流压力等多种方式实现持续性、动态化的管理。而对于面板堆石坝等结构,重点就是垫层了渗透压力。因此,在实践中一般量程主要控制在 0.5 MPa。蓄水期坝基渗流控制效果评价是大坝安全评价的核心所在,必须要基于实际状况进行持续性、动态的监控分析。

3.2 安全预警指标体系构建

传统安全监测的重点就是通过分析数据趋势、变化特征,

阈值参数等多种因素进行系统分析,对于复杂环境中的运行安全、安全预应具有一定的限制与影响。而构建动态安全合理的安全预警指标体系,可以有效提高堆石坝运行管理能力。

而基于动态仿真模拟技术进行数据预测分析,联合物联网、数字孪生等多种技术手段,可以实现对大坝全周期安全监测与智能风险预警。

4 结语

堆石坝是我国水利水电工程的主要结构之一,在施工中要明确工艺流程、优化路径以及运行安全管理核心。其中要合理应用多种现代化技术手段与工艺流程,重点做好碾压控制,通过分区填筑、变形控制等多种方式进行持续性、动态管控。最后,在运行管理中,要重点做好变形监控与渗流监测,通过现代化技术进行持续性动态管理,方可有效提高堆石坝施工质量。在今后的发展中,水利水电工程项目要融合多种智能施工设备、自动监控模块,通过全生命周期持续性监控,方可有效保障堆石坝施工质量、继而为水利工程项目长期安全运行提供坚实的技术支撑。

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] 杜瑞卓,费文平.基于 ANSYS APDL 二次开发的狭窄河谷高混凝土面板堆石坝静力特性及安全性研究[J/OL].吉林水利,1-7.
- [3] 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.
- [4] 成柳.基于混凝土面板堆石坝坝体填筑施工技术与质控检测[J].中国水泥,2025,(11):97-100.
- [5] 葛道明.水利工程中面板堆石坝坝体填筑施工技术分析[J].科学技术创新,2025,(17):125-128.