



图 1. 智能化协同管理流程

4 高速公路机电系统数字化管理的实施

4.1 积极构建数字化管理平台

高速公路机电系统的数字化管理实施中，要想实现全面且精细的管理目标，就应跟随全寿命周期管理理念的指引，基于对大数据、物联网等技术的综合利用，保障多方协同的数字化管理平台得到有效构建，同时平台要能够与机电前端智能感知设备实现联动，确保以智能化的方式来采集设备数据，进而在与厂商、互联网等多维度数据相融合的情况下，达到自动检测、及时报警和快速处置设备故障的目的，如此一来，机电设备全生命周期精细化、透明化管理目标也能实现^[1]。

4.2 以流程再造重构组织协同范式

从传统的高速公路机电系统管理工作开展情况看，一般是依据设备出现问题 - 一线人员上报 - 部门逐层审批 - 安排维修这一流程来进行，其中涉及大量的环节，也会耗费较长的时间。而数字化管理模式下的流程再造，指的是推动这一串联式流程向并联式发展，即将设备运行数据向数字化平台方面进行实时传送，而平台预警可自动触发，并向运维、调度等有关部门进行推送，改变过去人工逐层传递的情况。如在门架设备出现故障的情况下，平台会向运维组、物资组同步传送故障信息、设备部位以及历史维修记录，此时运维组可直接带着适配备件前往故障点位进行维修，而物资组也可实现对耗材的提前储备，这种情况下，无需等运维申请再准备相应耗材^[2]。不仅如此，流程中也可增设跨部门同步反馈的环节，即到达现场的维修人员，依靠平台就维修进度进行实时更新，而其他部门则依靠平台来随时查看，使互相之

间的重复沟通问题得到规避。以上重构并不是完全推翻了旧的流程，而是从实际工作出发进行优化和改进，既使得一线人员现场判断权得到了保留，同时也依靠平台实现了各部门、人员之间“信息堵点”问题的解决，能促进各部门的协同配合与及时响应，确保设备停机时长有效减少。

4.3 完善复合型人才培养体系

数字化机电系统管理对管理人才也提出了更高要求，此种情况下，相关单位在实施数字化管理模式时，也不应忽视对复合型人才的培养。这一培养工作的开展，离不开相应体系的支持与指导。一方面，在岗实操，具体可安排维修人员跟随平台运维员共同参与对设备预警的处理，由平台运维员现场讲解如何借助平台观察设备实时参数、故障代码等信息，进而与现场设备拆解相结合，帮助维修人员意识到平台数据、设备具体故障之间的关联性。另一方面，定期练兵，可定期组织实操考核，通过对故障场景的模拟，使相关人员操作利用平台调出对应设备历史数据，并阐述现场排查的步骤和流程，在操作和阐述合格且达标的情况下，方可正式进行对应设备的维护与维修。需注意，有关单位针对现有人才进行培养的同时，也应引入高端技术人才，该方面高速公路机电管理部门、组织等可以与本地学校建立合作关系，实施协同育人举措，通过“机电+数字化”课程的开设，面向学生群体讲授有关高速公路机电设备、智能化管理平台的一些基础操作。而针对毕业学生，高速公路相关单位可直接引进，并将其安排在运维辅助岗，这既有助于人才培养成本的大幅降低，也能使人才缺口问题得到良好解决。

5 结语

高速公路机电系统管理面临诸多的难点问题，主要表现为存在较高故障率、较强系统性等，为实现对此类难点问题的有效应对，尤为必要的就是推动管理向数字化的转型。而要想保障数字化管理效能的最大化发挥，既要引入数字化管理的诸多关键技术手段，也要系统化进行数字化管理体系的构建，促进数字化管理水平的根本上提升。

参考文献

- [1] 王秋,王强,胡永恺,等. 高速公路机电系统数智化运维管理探讨[J]. 公路交通技术,2025,41(3):197-204.
- [2] 孟斌. 高速公路机电系统智能化管理与维护研究[J]. 运输经理世界,2025(2):142-144.
- [3] 岳葵. 高速公路机电设备数字化管理关键技术分析[J]. 交通企业管理,2025,40(3):79-81.

Research on Dam Curtain Grouting Construction in Reservoir Reinforcement Project

Lihong Deng

SINOHYDRO BUREAU 7 CO., Ltd., Chengdu, Sichuan, 611130, China

Abstract

As a commonly used method for dam foundation seepage prevention and compaction treatment in reservoir reinforcement, curtain grouting construction directly affects the seepage resistance efficiency and long-term operational safety of the dam. Based on the engineering practice of China's reinforcement projects, this paper systematically discusses five aspects: the layout of the curtain grouting borehole network, drilling and sealing, slurry mix design and grouting techniques, pressure and grouting control, as well as post-grouting consolidation and volume stabilization. The study not only summarizes operational construction details but also proposes implementation points that can be easily promoted under complex geological and hydrological conditions, providing engineering and practical references for the construction organization and technical management of similar projects.

Keywords

reservoir; reinforcement project; dam; curtain grouting; construction

水库除险加固工程中大坝帷幕灌浆施工探究

邓丽红

中国水利水电第七工程局有限公司, 中国·四川成都 611130

摘要

作为水库除险加固中常用的坝基防渗与密实处治手段,帷幕灌浆施工直接关系到坝体抗渗效能与长期运行安全。本文立足中国除险加固工程实践,基于工程勘察资料、设计规范与施工试验成果,围绕帷幕灌浆的孔网布置、钻孔与封口、浆液配比与注浆工艺、压力与注浆控制,以及灌浆后固结与体积稳定化五个方面展开系统探讨。本研究既总结可操作的施工细则,也提出便于在复杂地质与水文条件下推广的实施要点,以便为类似工程的施工组织与技术管理提供工程化、可落地的参考。

关键词

水库; 除险加固工程; 大坝; 帷幕灌浆; 施工

1 引言

水库作为江河防洪体系的关键部分,其不仅是洪涝、台风、旱灾防御的重要工程,与人民生命财产安全息息相关,同时更在灌溉、供水、防洪等方面发挥着重要作用。但水库大坝在投入使用后受到包括局部地区强台风、强降雨等极端气候频发等诸多因素影响严重威胁其安全。一旦出现大坝险情、垮坝失事、支流水位提升情况,将会淹没农田,损害下游地区,因此在水库除险加固工程中大坝帷幕灌浆施工就显得尤为重要^[1]。有鉴于此,下文通过查阅相关数据库文献资料、工程实例以及结合自身实践情况下针对水库除险加固工程中大坝帷幕灌浆施工展开探究,以供参考。

2 水库除险加固工程概述

水库除险加固工程是针对已建水库在安全鉴定或现场核查发现的病险隐患,按照“查明病因、消除险情、恢复功能”的原则实施的工程措施,其涵盖对现有水利枢纽在结构、坝基与配套设施方面的风险识别、隐患治理与工程性加固措施实施^[2]。而在除险加固工程中,大坝帷幕灌浆作为常用的防渗与固结技术,旨在通过在坝基或坝体下部布设连续或分排灌浆孔网,采用充填灌浆、压水试验引导和分层分序注浆,封堵岩体裂隙与孔隙,恢复或提高坝基渗透系数与承载性能。施工关键包括钻孔贯通主裂隙并冲洗清孔、分段压水试验确定渗流响应与注浆压力、选用水泥基或超细水泥及必要时掺入化学灌浆料以改善渗透填充效果、严格控制注浆注入量与压升速率以防胀裂或短路,及通过生产性试验验证设计参数。质量控制要求贯穿钻进、冲洗、灌浆与封口全过程,基于回浆量、注浆压力与浆液配比及时调整施工参数,同时应做好施工期废水收集沉淀与现场环境治理,确保工程技术

【作者简介】邓丽红(1983-),女,中国四川眉山人,本科,工程师,从事水利工程基础处理研究。

措施与环境保护协同实施。

3 水库除险加固工程中大坝帷幕灌浆施工探究

3.1 孔网布置与分序原则

大坝帷幕孔网布置方面,应以详查的地质剖面、裂隙走向与地下水位恢复曲线为依据划定功能区,针对断层、风化带与高渗脆弱段实施分级布孔,边缘带须三向密集并布置校核孔以保证平面与深度的封闭,中部孔列采取错排并在主要透水层增设贯通或回灌孔,孔径与套管形式由钻机能力、孔深和注浆材料适应性决定,布孔设计需经地质工程师与设计单位会审并形成施工图。分序注浆原则细化为深部先行形成初期堵塞、随后分段由下而上加密填充;首序采用低黏度示踪浆探通裂隙并以回浆量与注浆压曲线判定连通性,二序采用中稠度砂浆完成桥接封堵,终序采用高强度水泥基填充浆实现孔段固结与抗渗补强,注浆终止以在规定压力下停止吸浆并延时观测十分钟为判定依据。针对单排与多排帷幕施工,应实施排内由稀到稠、由小压到大压的梯度注浆策略,边排先行后中排补强,并在必要时先下游后上游顺序施作以降低浆液窜流风险,每一序次设置固定压时判定节点,异常时及时扫孔或增设旁孔^[3]。施工组织与质量控制要求将孔网布置与钻进偏差控制、套管定位、孔口密封、注浆设备与计量回浆系统一体化管理,现场配备大量程压力表与计量装置并按试验室校验的配比调整浆液性状,灌浆后按规范布置检查孔或取芯验收,注浆曲线、压力曲线、扫孔记录与取芯报告应归档存证以供监理与设计单位审查并用于后期维护与二次加固决策。施工人员应严格执行操作规程并由监理工程师逐段签认,并按规范要求验收记录与长期观测安排。

3.2 钻孔、孔口封闭与套管

在大坝帷幕灌浆钻孔作业中,应实施严格的分层钻进与同步清孔制度,分层深度依地层物性与设计帷幕厚度确定,每层钻进后即时采用高压水冲或气举进行孔底泥砂清除并实施终孔验收,清孔液须达透明标准且回流量、含砂率与浊度有记录,若指标超限应复钻或增设清孔循环以确保起始注浆条件。针对软弱、塌孔或高水头地段,应采用跟进套管护孔并在下入套管前以泥浆护壁结合低速置换法置换孔内液体,同时对套管外壁实施预灌水泥浆或低压固结注浆以恢复承载能力,套管材质、壁厚与接头形式按设计压差与施工振动选型,套管与地层间宜留 3 至 10 毫米可控通道以利注浆嘴定位与回浆观测。孔口封闭宜采用预埋孔口管配合可拆卸止浆帽,并根据现场渗流特征选用孔口砂封、改性快凝水泥浆或单组分速凝注浆料分段成圈封堵,封口前必须核验清水回流且进行短时充压试验以确认孔底连通性与封口工况,封口构件应便于施工中分段拔管、补浆与更换操作且能抵抗振动与冲刷影响。套管锚固与抗浮控制在施工方案中需明确锚固深度与机械连接方式,应采用卡箍、焊接或化学锚栓等

复合锚固措施,并按分段拔套、逐层补浆原则实施,拔套时保持注浆嘴距孔底 200 至 500 毫米以避免形成空洞,钻孔质量检验包括孔位坐标复测、孔径与净深核实、套管垂直度与密封性试验并留设检测孔以开展压水与回灌试验,水下或高水头区还应采用浮筒支撑防水平台与潜孔钻机,并在孔口设置护帽与防冲刷裙体以抵抗波浪扰动,所有施工参数、套管出厂证明与试验记录应归档以便质量追溯。

3.3 浆液配方与注浆工艺控制

水库除险加固工程大坝帷幕施工中浆液配方与注浆工艺控制要点在于以下几个方面:浆液配方必须以现场钻孔岩性描述、颗粒级配与室内渗透系数试验为依据,先制定多套候选配方并通过标准化小试确定水灰比与掺合料比例,裂隙性基岩宜采用水泥-粉煤灰-膨润土复配体系,推荐粉煤灰掺量占水泥质量的 50% 至 80% 以调节可泵性并用膨润土改善触变与密封性,同时编制速凝剂与减水剂添加量表并在施工环境温度下做凝结与强度时效小试以明确现场调整区间与换算系数,并提供配方转换表以适配制浆设备。注浆工序采用由稀及稠、由细及粗的分级换浆体系,起始以高水灰比探测浆穿透未知裂隙以测定吸浆曲线、回浆率与压力响应,依据回浆清晰度、吸浆突增及压升速率逐级转入中稠度桥接浆与低流动性膏体封堵浆,换浆以定量置换法实施并以泵压突变、回浆成分与耗浆量作为换浆和停注的现场判据,换浆操作需双人复核并采用标准化记录表单。注浆工艺控制细化为单孔最大注浆量、分段长度与稳压维持时长,现场以实时压升曲线、孔内水位与回浆比重设定可操作阈值,必要时采用闭式孔内循环以减少地层水扰动,采用脉动或低压多次注浆提高裂隙占据率并采取限流与减压措施以防止地层冲刷与井内空洞形成,对关键孔位实施人工核查并结合回压试验确认封堵效果。另外,质量保障由到场材料检验、配比计量与稠度测试、凝结与泵送性能现场小试以及批次化回浆化学分析构成,建立浆液批次登记、注浆参数曲线与回浆数据库,规定每孔必录项包括称量明细、换浆时间戳、压升曲线及回浆样品化验结果,现场试验不合格按阈值复配或停工处理,所有数据定期由专业试验室复核并记录处置^[4]。

3.4 压力控制、注浆参数与现场判据

针对大坝帷幕灌浆施工中压力控制、注浆参数与现场判据,核心在于:注浆压力确立与动态规控,根据压水试验、孔隙渗压响应与地质报告初定稳压上限,并以灌浆管孔口表压为控制基准,同时在首孔试注中采用逐步加载法验证地层承载界限,若压升速率超出预定阈值即实施回退并改用低频脉动注浆以降低冲击,施工记录需逐段登记峰值与稳压曲线以便汇总分析,必要时依据现场变形监测调整设计压力。注浆参数细化与段段管理,将灌浆工作细化为独立段落管理,段长按岩体完整性与规范建议取 5~6 米为常规值,遇完整岩体可适当延长但不宜超过 10 米,单孔单段最大注浆量及最大允许压力应由工程地质与注浆专业复核并书面下达,浆