

Research on grouting consolidation of water conservancy project foundation

Fangjing Shao

Chengdu Hydroelectricity Construction Engineering Co.,Ltd., ofSinohydro Bureau No.7 Company, Chengdu, Sichuan, 611130, China

Abstract

With the continuous expansion of large-scale water conservancy projects in China and the increasing complexity of dam foundation geological conditions, consolidation grouting technology has become a critical factor in ensuring project safety and extending dam service life. This paper explores the construction techniques of dam foundation consolidation grouting in China, beginning with the concept of dam foundation consolidation. Through domestic typical engineering practices, it elaborates on the meaning, applicable scenarios, and structural characteristics of dam foundation consolidation. Subsequently, the paper focuses on key technical aspects of dam foundation consolidation grouting construction, proposing five feasible technical measures for rock mass conditions in reservoirs and dams. These measures include borehole layout planning, grouting material mix design and injection, pressure control with dynamic adjustments, auxiliary pipeline installation and reinforcement grouting, as well as sealing of fissure flow channels in rock masses and densified secondary grouting.

Keywords

water conservancy engineering; dam foundation consolidation; grouting construction technology; key points; research

水利工程坝基固结灌浆施工技术研究

邵方敬

中国水利水电第七工程局成都水电建设工程有限公司, 中国·四川 成都 611130

摘 要

随着我国大型水利枢纽工程数量的持续增长与坝体基础地质条件复杂化, 坝基固结灌浆技术已成为确保工程安全与延长坝体服役寿命的关键环节。本文围绕我国水利工程坝基固结灌浆施工技术展开研讨, 从坝基固结概念入手, 结合国内典型工程实践, 阐述坝基固结的含义、适用情形及其构成特征。随后重点分析坝基固结灌浆施工技术要点, 提出五项针对我国水库、大坝基础岩体条件下可行的施工技术措施, 涵盖钻孔布置、灌浆材料配比与充注、压力控制与动态调整、辅助管道引管及补强灌浆、岩体裂隙导流通道封堵与二次灌浆加密。

关键词

水利工程; 坝基固结; 灌浆施工技术; 要点; 研究

1 引言

水利工程建设过程中坝基固结灌浆作为重要施工内容, 其主要价值可以概括为三点: 首先, 固结灌浆能够让岩石的性能更加符合施工要求, 尤其是整体性能以及均质性能; 其次, 通过固结灌浆, 岩石的抗压强度更加突出, 其弹性模量也高于灌浆之前; 最后, 固结灌浆之后, 岩石不会出现严重的变形, 也极少会出现不均匀沉降。正是由于固结灌浆具有上述优势, 其才能够保证坝基的整体性能, 从而保证水利工程的顺利施工。有鉴于此, 文章将围绕于水利工程坝基固结灌浆施工技术进行研究, 以供参考。

2 水利工程坝基固结概述

在我国水利工程建设中, 坝基固结主要指通过机械手段灌注化学或水泥浆, 使大坝基础岩体或岩-土组合体内的裂隙、节理、破碎带及松弛变形带获得加固、填充与密封, 从而改善岩体整体性、降低渗透通道、抑制变形增大、提升承载及变形协调条件^[1]。坝基固结常见于大型混凝土重力坝、拱坝或复合坝的基础开挖面、基岩裂隙密集及浅埋软弱结构区, 其主要构成包括固结帷幕、引管灌浆系统、补强灌浆孔网等。国内工程如乌东德水电站坝基无盖重固结灌浆案例即通过对开挖后岩体松弛特征分析, 开展裸岩裂隙封闭材料与成套工艺, 形成“全坝无盖重”固结灌浆技术体系。坝基固结不仅涉及地质工程视角, 而且要求施工组织、设备配备、工艺流程紧密配合。此外, 固结工程还需适配具体地质、施工阶段、坝型及基础开挖结构状态, 固结时序、孔位布设、

【作者简介】邵方敬(1984-), 男, 汉族, 四川省广安市人, 本科, 高级工程师, 从事水利水电工程技术施工与管理。

灌浆顺序均应依据设计与现场情况优化配置。

在我国多数水利枢纽中,坝基基岩常表现为强度较高但存在节理裂隙发育、岩面开裂、软化面、剥离带或淤积覆盖等特征。固结工程须在建基面形成前或同步进行,以确保基础受力状态与后续混凝土浇筑、坝体沉降协同控制。固结灌浆流程一般包括钻孔成孔、洗孔检验、压水试验、浆液注入、充注-停注-卸压、检测验收、补强灌浆等环节。整体而言,坝基固结作为基础处理措施,是保证坝基整体稳定、控制渗流通道及减小基础变形的关键施工模块。在实施过程中,应结合岩体工程地质条件、浆液选型、施工设备条件、环境水文状态、现场工期安排等多重因素,确保固结体系形成完善的加固单元。

3 水利工程坝基固结灌浆施工技术要点

3.1 钻孔布置与成孔流程优化

在坝基固结灌浆施工中,钻孔布置与成孔流程的优化应依据岩体构造、裂隙特征及建基面形态综合确定。布孔时应结合地质勘察结果,对节理走向、裂隙密度及破碎带分布进行系统分析,按水工建筑物地基处理设计规范采用梅花形布置,孔距与排距一般控制在2~4m,根据岩体完整性与渗透系数调整密度。裂隙发育或构造复杂区应增设定向孔,孔列沿裂隙主走向布置,钻孔倾角偏离垂直方向不超过5°以提高裂隙贯通率。钻进流程按“钻孔—洗孔—验孔—清孔—护管”顺序执行,钻孔完成后以高压清水反复冲洗孔底及孔壁,直至回水清亮,再进行压水试验以测定渗透性能并确认破碎带位置;沉渣清理后,必要时加装护管以防塌孔。钻机布置环节须确保钻屑排放、泥浆循环、地下水排降以及施工平台稳定四者兼顾,做到排水畅通、道路运输便捷。通常情况下,坝基固结成孔施工是先对覆盖层钻设预孔且一次灌浆,随后钻入基岩内分段钻进,每序孔进行依次灌浆,待上序孔凝固稳定后再进行下序孔灌浆作业,从而确保加固连续性。钻孔偏差控制严格按照测斜检测的要求执行,即孔位水平偏差 $\leq 10\text{cm}$,倾角偏差 $\leq 2^\circ$ 。同时在钻进过程中要随时使用定向导向装置,以达到钻孔纠偏的目的^[2]。孔壁稳定则通过及时支护、封孔来保证,并且孔底沉渣控制在20cm以内。最后,成孔后必须及时下放注浆管、安装测量仪器,并配合组建立好进、回浆系统,同时进行防水封闭以防止地表水倒灌。根据现场地质情况实时调整参数,按孔网与岩体渗透特性相适应的原则做好成孔、固结灌浆工作,以确保成孔和固结灌浆高质量。

3.2 灌浆材料选型与充注工艺控制

坝基固结灌浆施工在水利工程坝基开挖成形后就应考虑灌浆材料的选择和充注工艺的控制,具体为:根据岩体的裂隙宽度、连通性和地下水压力大小以及支护结构形式来选择灌浆材料,其中对于大裂隙($\geq 0.5\text{mm}$)、连通性好、地下水压力大的破碎岩体灌浆材料通常可采取水泥—

硅灰复合浆液,水灰比为2:1~1:1,30%~50%的硅灰或活性矿物掺合料,具有流动性好、强度高的特点;而对于0.2~0.5mm宽的裂隙、地下水压力中等的岩体,灌浆材料可以使用湿磨水泥浆,水灰比取0.8:1~0.5:1,砂浆掺量为40%~60%;针对小裂隙($< 0.2\text{mm}$),可采取掺加膨润土或纳米硅的微细密封浆液灌浆封堵。在充注工艺控制环节,重点在于严格控制浆液配比、温度、黏度、注浆顺序、监测指标等。其中浆液配比应保证流变性能与凝结时间合理,施工中泵送压力宜 $\leq 1.0\text{MPa}$,浆液温度 $\leq 30^\circ\text{C}$ 、黏度 $\leq 0.020\text{Pa}\cdot\text{s}$,以确保渗透扩散。注浆顺序一般采用“低压预充—高压主充—封闭补充”模式,低压阶段0.3~0.5MPa用于填充主裂隙,高压阶段逐级提升至1.0~2.0MPa,按2:1、1:1、0.8:1、0.5:1分级水灰比逐步细化注入裂隙。施工中须同步监控回浆量、冒浆现象、压力稳定期及换浆情况,依据压力—时间曲线判断裂隙吸浆状况。当流量下降或压力接近设计值时应及时停浆,防止过压劈裂。停浆后应以2~3倍孔内容积的清水冲洗残浆,以防封闭不均。回浆量低于注浆量10%或冒浆消失时可判定裂隙封闭完成^[3]。

3.3 灌浆压力动态控制与阶段调整

在坝基固结灌浆施工中,实现灌浆压力的动态控制与阶段调整需围绕岩体条件、裂隙结构特征及注浆响应状态开展。首先,在预充阶段,应选择低于正式设计压力的初级压力水平(如0.3~0.5MPa),用于冲洗孔隙、排除孔内水气及消除松散岩体,在本阶段注浆液量宜维持较低、注入速率逐渐趋稳,同时观察回浆量、注入压力与流量曲线的变化。若流量变化迅速下降或回浆率降低,应即时判断孔隙已被初步闭合,可进入下一阶段施工。其次,在主充阶段,应根据设计与试验结果,依次提升注入压力至中高压区间(如1.0~2.5MPa),并在隔序孔或裂隙发育严重区可适当采用较高压力(例如3.0MPa),以生成一定的压裂作用或促使浆液更深渗透。期间应严格监测压力—体积—时间曲线,识别瓶颈期(即压力上升而流量或增量显著下降)、稳定期(压力与体积变化趋于平稳)及卸压期(注浆完成后压力回降)。遇到压力突增但流量不变、回浆异常或孔壁启裂迹象时,应立即启动应急措施,比如停浆、减压、换孔或调整序孔注浆顺序。最后,在阶段转换与压力提升过程中,应采用“自上而下分段”或“自下而上分段”综合灌浆法,根据岩层穿透深度及裂隙发展态势逐级递增压力,并实时记录每孔段注入量、累计压力、回浆量与流速变化。若某孔段表现异常,例如回浆量骤增或压力持续上升而流量未下降,则应停泵查看裂隙走向、调整钻孔位置或分段细化注浆细节。

3.4 辅助引管系统与补强灌浆措施

在坝基固结灌浆施工中,对浅层未密实、接触面裂隙发育或建基面检测不合格部位,须采用辅助引管系统实施补强灌浆。施工前应依据钻探及渗透试验成果确定补强孔孔位、孔深及“三孔一引”循环管路布置,并通过“岩石盖重”

设置预留层以增强管路稳定性。进浆管与回浆管应分设于钻孔内,并由外部管道与灌浆平台连接形成循环通道,保证管路畅通及压差可控。进/回浆压差宜维持在设计范围内,通过压力监测仪动态控制流态平衡,防止浆液倒灌或环空渗漏。补强灌浆前须实施高压反循环清孔,排除孔底残渣并压实孔壁,再安装固定管路并采用预埋型孔口封闭器锁定位置^[4]。安装完成后对管口及接口处采用水泥砂浆或环氧灌浆料密封,防止浆液沿管外渗漏。灌浆过程中须将引管系统纳入主固结灌浆质量控制体系,实时记录进浆量、压力-时间曲线及浆液特性,并依据现场反应适时调整注浆参数。施工中应防范浆液泄漏、管头变形及接头松脱等问题,必要时设置稀浆饱和度监测与压力报警系统。灌浆完成后应开展压水试验或渗透系数复测,确认补强效果并进行二次注浆修复。最终应切除外露管段、封闭孔口并以细骨料混凝土或岩石置换方式恢复坝基表面,使引管系统与主坝基形成整体密实结构,所有数据与检测成果纳入施工质量档案管理。

3.5 岩-体裂隙导流通道封堵与二次灌浆加密

对于基础岩体中存在发育较为严重的裂隙群、破碎带、节理网络或界面渗流通道,在固结灌浆的第一遍主灌过程中若发现浆液主动进入通道后回浆迅速、压力升高缓慢或者存在“吃水不吃浆”、窜浆行为,应立即启动裂隙导流通道封堵及二次加密灌浆程序。首先,通过钻探、冲洗及摄像探孔(或波速检测)确认裂隙扩展区域与通道走向及渗流特征;然后根据裂隙宽度、渗流流量和开挖状态选定适宜的堵浆材料(如超细水泥浆、硅灰-水泥浆、微膨胀水泥浆或化学灌浆材料)配合低流量、低压预充方式,将堵浆材料优先注入主通道节点;当堵浆初步形成后,再转入正常灌浆程序并将孔距、行距加密达到设计要求的1/2至2/3,以避免残余通道留置^[5]。其次,针对二次灌浆加密环节,应注意控制注浆阶段的停注-卸压-复注循环,一方面观察堵浆效果,另一方面则防止由于注浆高压长时间作用造成新裂隙产生或使

孔壁受压破碎。同时注入时要注意对所测参数的变化过程予以详细记录,包括每个孔位的注入量以及压力-体积曲线、流量的变化情况、浆液返浆量 and 有无窜浆等;一旦出现浆液返浆量大幅度增加或压力梯度突降现象,则要立即停止该处孔位的注浆工作,并且检查是否出现了新的通道。另外,孔段在加密灌浆结束之后72小时内开展压水试验或回水试验,对照灌浆前的基准渗透系数,判断是否超过限度值。如果超过了则进行灌浆补灌,或者转为进行化学灌浆处置。

4 结语

综上所述,在现代水利工程中,坝基固结灌浆是一项常见的施工技术,通过向岩层中压灌水泥浆液,可以有效填充岩层孔隙裂缝,起到提高岩体弹性模量、增强坝基岩体抗压强度的作用,对水利大坝运行效果的改善有着重要意义。有鉴于此,上文基于水利工程坝基固结灌浆施工实际以及结合典型工程案例、施工经验情况下,针对该技术应用探讨了包括钻孔布置、材料充注、压力控制、引管补强、岩-体裂隙导流通道封堵与二次灌浆加密等五项技术要点,从而确保水利工程坝基固结良好质量。今后,水利工程大坝基础受力状况日趋复杂的岩体条件下,应继续做好固结灌浆工序并完善其质量控制程序来保证坝基的稳定和抗渗能力要求。

参考文献

- [1] 孙磊.水利工程坝基固结灌浆施工技术质量控制研究[J].建筑工
程技术与设计,2021(21).
- [2] 刘晨亮.水利水电工程水库大坝坝基固结灌浆施工技术研究[J].
产业创新研究,2024(24).
- [3] 胡道萍.水利水电工程水库大坝坝基固结灌浆施工技术研究[J].
工程建设与技术,2025(5).
- [4] 程杨.水利工程坝基固结灌浆施工技术质量控制研究[J].建筑工
程技术与设计,2021(22).
- [5] 张鹤.水利水电工程水库大坝坝基固结灌浆施工技术研究[J].中
文科技期刊数据库(全文版)工程技术,2021.