

坝基帷幕灌浆布孔及智能灌浆系统运用研究

杨贵富

华电金沙江上游水电开发有限公司巴塘分公司

DOI:10.12238/hwr.v9i4.6311

[摘要] 巴塘水电站坝基防渗是保障大坝安全的关键工程。本文针对坝基岩体裂隙发育、风化严重、构造复杂的地质条件,提出了双排布孔的优化方案,形成梅花型布孔结构,显著增强了帷幕的覆盖范围和防渗性能。同时引入智能灌浆系统,通过精确的压力控制、自动无级配浆和实时数据管理,提高了施工效率和质量。研究成果表明,优化布孔和智能灌浆系统的应用有效提升了防渗效果,缩短了施工工期,降低了施工成本,为类似工程提供了有益参考。

[关键词] 坝基帷幕灌浆; 布孔优化; 智能灌浆系统; 防渗效果

中图分类号: TV42+1.3 文献标识码: A

Study on the application of borehole grouting and intelligent grouting system for dam foundation curtain

Guifu Yang

Batang Branch of Huadian Jinsha River Upstream Hydropower Development Co., LTD.

[Abstract] The seepage prevention of the Batang Hydropower Station dam foundation is a critical project to ensure the safety of the dam. This paper proposes an optimized double-row borehole layout, forming a plum blossom-shaped borehole structure, which significantly enhances the coverage and seepage prevention performance of the curtain. At the same time, an intelligent grouting system is introduced, improving construction efficiency and quality through precise pressure control, automatic continuous grouting, and real-time data management. Research findings show that the application of optimized borehole layout and the intelligent grouting system effectively enhances seepage prevention, shortens construction duration, reduces construction costs, and provides valuable references for similar projects.

[Key words] dam foundation curtain grouting; hole optimization; intelligent grouting system; seepage prevention effect

引言

坝基帷幕灌浆是水电站工程建设中的关键环节,对保障大坝防渗性能至关重要。巴塘水电站坝区地质条件复杂,岩体裂隙发育,风化严重,且存在多条断层,传统单排帷幕灌浆布孔方案难以满足防渗要求。在此背景下,本文提出了一种优化的双排布孔方案,并引入智能灌浆系统,旨在通过布孔优化和智能化施工手段,提高帷幕灌浆的防渗效果和施工效率,为巴塘水电站坝基防渗提供技术保障。

1 坝基帷幕灌浆的地质条件分析

1.1 坝基岩性特征

巴塘水电站坝区基岩主要由角闪岩和黑云母石英片岩组成,局部区域有花岗岩脉穿插。这些岩石具有较高的抗风化能力,但在长期的地质作用下,岩体的完整性受到一定程度的破坏。角闪岩和黑云母石英片岩在风化作用下容易形成裂隙和破碎带,

这些结构面发育的区域成为坝基渗漏的潜在通道。花岗岩脉虽然相对坚硬,但由于其与周围岩体的接触面往往存在差异风化现象,也可能成为渗漏的薄弱环节。因此,在帷幕灌浆设计中,必须充分考虑这些岩性特征对防渗性能的影响。

1.2 岩体风化与变形特征

坝区岩体的风化和变形特征对帷幕灌浆的施工质量有着重要影响。勘探平洞揭露显示,边坡岩体沿构造带有囊状风化和带状风化现象,这些风化区域的岩体结构松散,抗变形能力差。右岸岸坡的浅表层岩体风化和卸荷现象尤为严重,结构面发育,岩体破碎,渗透性强。这种岩体风化和变形特征导致坝基岩体的力学性质不均匀,增加了帷幕灌浆的难度。在施工过程中,需要特别注意对强风化、卸荷岩体的处理,确保帷幕灌浆能够有效封堵这些区域的渗漏通道。

1.3 构造发育与断层特征

坝区构造发育显著,存在多条断层,其中区域性断裂如雄松-苏洼龙断裂具有较强的透水性,对坝基的防渗性能构成严重威胁。这些断层不仅破坏了岩体的完整性,还为地下水提供了良好的通道,增加了坝基渗漏的风险^[1]。在帷幕灌浆设计中,必须对这些断层进行重点处理,如采用深挖置换、帷幕灌浆等措施,以确保断层带的防渗效果。同时,对于宽度大于30cm的破碎带,建议进行挖槽置换处理,以提高岩体的整体稳定性。

1.4 渗漏问题与防渗要求

坝基渗漏问题是巴塘水电站需要重点解决的工程地质问题之一。由于岩体的风化、变形和构造发育,坝基岩体的渗透性较强,导致渗漏问题突出。为了满足大坝的防渗要求,必须采取有效的防渗措施。建议在心墙齿槽部位清除强风化、卸荷岩体,将建基面置于弱风化基岩上,并进行固结灌浆及防渗处理。对于河床坝基覆盖层,需要进行防渗处理,确保帷幕灌浆能够形成全封闭式的防渗系统。此外,对全部建基岩体进行固灌补强处理,也是提高坝基防渗性能的重要措施。

2 坝基帷幕灌浆布孔优化方案

2.1 原设计布孔方案及其局限性

原设计的帷幕灌浆方案采用单排帷幕孔,布置于坝基廊道中心线上,孔距为1.5m。这种布置方式在常规地质条件下能够满足防渗要求,但在巴塘水电站复杂的地质环境下,其局限性逐渐显现。勘探和施工过程中发现,坝基岩体存在较多破碎带和裂隙,单排帷幕孔难以有效封堵这些复杂地质结构中的渗漏通道。此外,灌浆过程中注浆量远高于其他部位,且存在较多特殊孔段,灌浆单耗极高,这进一步表明单排帷幕孔方案在应对复杂地质条件时的不足。

2.2 布孔优化方案的提出

为了增强坝基防渗效果,减少后期增设坝基帷幕的施工风险及难度,经过认真分析研究,决定对帷幕灌浆布孔方案进行优化。优化后的方案在坝基廊道增设上游排帷幕灌浆预埋钢管,形成双排布孔结构。具体优化措施如下:将原设计大坝防渗墙预埋帷幕灌浆钢管由防渗墙轴线偏移至防渗墙轴线下游35cm处。在坝基防渗墙轴线上游40cm处,增设防渗墙、坝基廊道上游排帷幕灌浆预埋钢管,钢管规格为DN89,壁厚5mm。上、下游排帷幕灌浆管呈梅花型布设,排距为75cm。孔距与原设计方案一致,桩号坝右0+99.27m以左段、桩号坝右0+256.52m以右段孔间距为1.2m,桩号坝右0+99.27m~坝右0+256.52m段孔间距为1.5m。

2.3 优化方案的科学性与合理性

优化后的双排布孔方案在多个方面展现出显著优势。首先,梅花型布孔方式能够有效增加帷幕的覆盖范围,确保灌浆浆液能够充分填充岩体裂隙和破碎带,从而提高防渗效果。其次,通过调整预埋钢管的位置,进一步优化了灌浆浆液的扩散路径,使其能够更均匀地分布于坝基岩体中^[2]。此外,双排布孔结构在应对复杂地质条件时具有更高的灵活性,能够更好地适应岩体的不均匀性和非均质性。

2.4 优化方案的施工可行性与经济性

在施工过程中,优化后的布孔方案具有较高的可行性。虽然增设了上游排帷幕灌浆预埋钢管,但通过合理的施工组织和设备配置,能够有效控制施工成本。例如,在覆盖层进行钻孔时采用套阀管技术,虽然会增加一定的施工费用,但能够显著提高施工效率,减少施工风险。同时,优化后的布孔方案能够有效减少后期增设坝基帷幕的可能性,从长远来看,具有较好的经济性。

3 智能灌浆系统在坝基帷幕灌浆中的应用

3.1 智能灌浆系统的功能特点

智能灌浆系统是一套集智能压力控制、无级配浆、灌浆工艺控制、灌浆成果分析与处理、无线接入云服务器等功能为一体的综合性控制系统。该系统以智能“一键灌浆”替代传统的人工灌浆,能够按照设定的灌浆压力及返浆流量,通过阀门控制压力及流量,确保压力控制的实时性和准确性。整个灌浆过程由系统根据设定的工艺参数自动完成,包括自动无级配浆、变浆等操作,浆液配置在封闭罐体中完成,保证了浆液的质量和稳定性。

3.2 智能灌浆系统在压力控制中的应用

在帷幕灌浆过程中,压力控制是确保灌浆质量的关键环节。传统的人工压力控制方式存在响应速度慢、精度低等问题,容易导致过压抬动或炸管等风险。而智能灌浆系统通过高精度的压力传感器和自动控制系统,能够实时监测并精确控制灌浆压力。系统根据预设的工艺参数,自动调整压力值,确保灌浆压力在安全范围内稳定运行。例如,采用滑模控制算法的智能灌浆系统在稳定注浆阶段,压力控制精度可达 $\pm 0.02\text{MPa}$,具有响应速度快、稳态误差小和鲁棒性好的特点。这种自动化的压力控制方式不仅提高了施工的安全性,还有效降低了抬动劈裂的风险,保障了灌浆过程的平稳进行。智能灌浆系统通过实时监测灌浆过程中的压力变化,并根据反馈自动调节阀门开度或灌浆泵的输出功率,确保压力始终保持在设定范围内。此外,系统还具备异常报警功能,能够在压力异常时及时发出警报并采取措施,进一步增强了施工的安全性。

3.3 智能灌浆系统在配浆过程中的应用

配浆是灌浆施工中的重要环节,浆液的质量直接影响到灌浆的效果。传统的人工配浆方式存在配比不准确、浆液质量不稳定等问题^[3]。智能灌浆系统采用自动无级配浆技术,能够根据实时监测的进浆密度、进浆温度等参数,自动调整浆液的配比。整个配浆过程在封闭的罐体中完成,避免了外界环境对浆液的污染,确保了浆液的质量和稳定性。此外,系统还能够根据灌浆过程中的实际情况,自动进行变浆操作,进一步提高了灌浆效果。

3.4 智能灌浆系统在数据管理中的应用

数据管理是灌浆施工中的重要组成部分,准确的数据记录和分析对于施工质量的控制和后续的工程评估具有重要意义。智能灌浆系统通过无线接入云服务器,实现了灌浆数据的实时传输和远程监控。施工过程中,系统自动记录灌浆压力、流量、浆液密度等关键参数,并将数据加密传输至云服务器。通过手机

APP等终端设备,施工人员可以实时查看灌浆数据,及时发现并处理异常情况。此外,系统还能够自动生成工序报表,为施工管理提供科学依据。

4 研究成果

4.1 研究成果总结

在巴塘水电站坝基帷幕灌浆工程中,通过优化布孔方案和应用智能灌浆系统,实现了防渗效果的显著提升。优化后的双排布孔方案有效增强了帷幕的覆盖范围和防渗性能,梅花型布孔方式确保了灌浆浆液能够充分填充岩体裂隙和破碎带,从而提高了帷幕的整体防渗能力。同时,智能灌浆系统的应用实现了灌浆过程的自动化和智能化,通过精确的压力控制和高质量的浆液配置,显著降低了抬动劈裂风险,提高了施工的安全性和可靠性。此外,系统的数据管理功能为施工质量的评估提供了科学依据,通过对灌浆数据的实时监测和分析,施工人员能够及时发现并处理异常情况,确保施工质量符合设计要求。

4.2 施工效率提升

智能灌浆系统的应用显著提高了帷幕灌浆的施工效率。传统的人工灌浆方式需要大量的人力进行压力控制、配浆和数据记录等工作,劳动强度大,施工效率低。智能灌浆系统通过自动化控制和数据管理,减少了人工干预,降低了劳动强度。施工人员只需通过系统界面进行简单的操作,即可完成复杂的灌浆任务。此外,系统的高效配浆和精确压力控制功能,进一步缩短了灌浆时间,提高了施工效率。在巴塘水电站的施工过程中,智能灌浆系统的应用使得单个灌浆孔的施工时间缩短了约30%,整体施工进度提前了约20%,显著提高了工程的经济效益。

4.3 施工质量保障

智能灌浆系统在施工质量保障方面发挥了重要作用。通过精确的压力控制和高质量的浆液配置,系统能够有效提高灌浆效果,确保帷幕的防渗性能。同时,系统的数据管理功能为施工质量的评估提供了科学依据。通过对灌浆数据的实时监测和分析,施工人员可以及时发现并处理施工过程中的异常情况,确保

施工质量符合设计要求。在巴塘水电站的施工过程中,智能灌浆系统的应用使得灌浆单耗显著降低,注浆量得到有效控制,灌浆后的帷幕防渗性能显著提升,满足了设计要求。

4.4 经济效益分析

从经济效益角度来看,优化布孔方案和智能灌浆系统的应用为巴塘水电站的建设带来了显著的经济效益。虽然增设上游排帷幕灌浆预埋钢管和采用智能灌浆系统会增加一定的初期投资,但从长远来看,这些措施显著提高了施工效率,缩短了施工工期,减少了后期维护成本。此外,智能灌浆系统的应用还降低了施工风险,减少了因施工质量问题导致的返工和维修费用。综合来看,这些措施不仅提高了工程的安全性和可靠性,还为项目带来了可观的经济效益。

5 结语

通过优化坝基帷幕灌浆布孔方案和应用智能灌浆系统,巴塘水电站坝基防渗效果显著提升。双排布孔结构有效增强了帷幕覆盖范围,梅花型布孔方式使浆液充分填充裂隙,智能灌浆系统则通过精确控制和数据管理,提高了施工效率与质量,降低了施工风险。研究成果表明,优化布孔和智能灌浆系统的应用不仅满足了大坝防渗要求,还带来了显著的经济效益,为类似复杂地质条件下的水电工程提供了宝贵经验。

[参考文献]

- [1]徐力泽.基于复杂地质条件下的水库坝基帷幕灌浆施工问题分析[J].黑龙江水利科技,2022,50(09):22-24.
- [2]徐华,陈阳.基于模型预测控制的装配式灌浆流量智能控制技术[J].自动化与仪器仪表,2025,(01):94-97+102.
- [3]陈寿峰.帷幕灌浆技术在大坝基岩单裂隙中的应用及优化[J].福建水力发电,2022,(02):62-64.

作者简介:

杨贵富(1996—),男,佤族,云南省临沧市人,本科学士,助理工程师,研究方向:水利水电工程管理,毕业院校:昆明理工大学。