

# 顶管施工对水库运行安全的影响及应对措施分析

## ——基于大坟坑水库加固工程实践

钟凯园

武义县水务局 浙江 金华 321200

**摘要:** 随着我国中小型水库除险加固工程的持续推进,施工技术的创新与应用日益广泛。顶管施工作为一种非开挖技术,因其对地表扰动小、施工效率高、环境影响低等优势,逐渐在水库加固改造工程中得到应用。然而,顶管施工过程对水库坝体结构稳定性、渗流安全及整体运行安全可能带来潜在风险,亟需系统研究与科学应对。本文以浙江省武义县大坟坑水库加固改造工程为案例,深入分析顶管施工在放水涵管新建过程中的技术特点、施工难点及其对水库运行安全的影响机制,并结合工程实际,提出针对性的应对措施与管理策略。研究表明,通过科学选线、精准控制、实时监测与全过程风险管理,可有效降低顶管施工对水库安全的不利影响,保障工程顺利实施与水库长期安全运行。本研究可为类似中小型水库除险加固工程中顶管技术的应用提供理论支撑与实践参考。

**关键词:** 顶管施工; 水库安全; 渗流稳定; 除险加固; 大坟坑水库; 风险控制

### 引言

我国现有众多建于20世纪50—70年代的中小型水库,因当时技术等限制普遍存在安全风险问题,近年来国家持续推进病险水库除险加固工程,在此背景下,如何高效安全完成加固改造任务成为重要课题。传统开挖式施工在水库作业时有诸多弊端,而顶管施工技术作为非开挖地下穿越方法优势明显,虽部分水库加固工程已尝试采用,但相关研究薄弱,尤其缺乏对施工过程与水库安全耦合关系的系统分析<sup>[1]</sup>。本文以武义县大坟坑水库加固改造工程为实证案例,聚焦顶管施工在放水涵管改造中的应用,分析其对水库运行安全的影响路径并提出应对措施,具有重要工程价值与社会意义。

### 1 工程概况与问题识别

#### 1.1 大坟坑水库基本情况

大坟坑水库位于浙江省武义县泉溪镇白草村,是一座以灌溉为主的小(2)型水库。根据《水利水电工程等级划分及洪水标准》(SL252-2017),工程等级为V等,主要建筑物为5级。水库集雨面积0.97km<sup>2</sup>,正常蓄水位329.38m,总库容10.91万m<sup>3</sup>,设计灌溉面积350亩。

#### 1.2 安全鉴定结论与主要问题

2020年8月,武义县水务局组织编制《大坟坑水库大坝安全技术认定报告书》,认定该水库为“二类坝”,主要存在一系列安全隐患。其中,最为突出的是坝体结构老化问题,上下游坝坡杂草丛生,迎水面的块石护坡因长年风化而变得松散,空隙较大,防护功能显著下降。更为严重的是,输水涵管为老旧的瓦涵管(管径

0.3m),年久失修,涵管周围土体长期处于潮湿状态,存在明显的渗漏现象,这直接威胁到大坝的渗流稳定性。此外,启闭机启闭不灵活,关闭不严,进一步加剧了渗水问题。整个工程缺乏现代化的监测手段,未安装水雨情自动测报系统,使得安全状况难以实时掌握。综合来看,原放水涵管的渗漏问题是威胁大坝安全的核心隐患,亟需通过彻底更换来根除风险。

#### 1.3 加固改造方案概述

根据初步设计报告,本次加固改造的核心内容包括对大坝进行套井回填防渗及帷幕灌浆,整治上下游坝坡并进行护坡,拆除并重建溢洪道底板,以及增设水雨情自动测报系统及安全监测设施。在诸多改造措施中,最关键的一项是封堵存在严重渗漏隐患的原左岸放水涵管,并在右岸新建一条放水涵管。值得注意的是,这项新建工程摒弃了传统的开挖方式,创新性地采用了顶管法施工。这一技术选择既是本工程的技术亮点,也因其在水库环境中的特殊性而成为安全风险管控的重点和难点。

### 2 顶管施工技术特点及其在水库工程中的适用性

#### 2.1 顶管施工基本原理

顶管施工是一种不开挖或少开挖地表的地下管道敷设技术。其基本原理是在工作井内利用液压千斤顶将预制管节沿设计轴线顶入土层,同时在顶进过程中进行出土、纠偏和注浆,最终形成连续的地下管道。该技术适用于穿越道路、河流、建筑物及重要基础设施区域,其核心优势在于能够最大限度地减少对地表结构和周边环境的干扰。

## 2.2 在水库放水涵管改造中的优势

在大坟坑水库工程中,采用顶管法新建放水涵管具有多方面的显著优势。首先,它能有效减少对坝体结构的扰动。传统的大开挖方式需要在坝体上开挖深沟,这不仅会破坏坝体原有的应力平衡,还可能引发边坡失稳,而顶管施工则完全避免了这一问题,尤其适用于已投入运行、结构敏感的水库近坝区作业。其次,顶管施工有助于控制渗漏风险。现代顶管普遍采用钢筋混凝土管材,接口处使用橡胶圈或钢套环进行密封,整体性和

密封性远优于老旧的瓦涵管,从源头上杜绝了渗漏的可能性<sup>[2]</sup>。再次,顶管施工效率高,工期短,可以在非汛期的有限窗口期内快速完成,最大限度地减少对水库正常调度和灌溉功能的影响。最后,该技术环境友好,施工过程中产生的噪音和粉尘较少,对库区的生态环境影响微乎其微,符合现代水利工程绿色发展的理念。

## 2.3 潜在风险识别

尽管优势明显,但顶管施工在水库环境中仍存在以下潜在风险:

表1 顶管施工潜在风险

风险类型	具体表现	可能后果
施工扰动风险	顶进过程中对坝体土体的挤压、扰动	引发局部沉降、裂缝,影响坝体整体稳定性
渗流路径改变	顶管周围注浆不密实或管节接缝渗漏	形成新的渗流通道,加剧坝体渗漏
施工精度偏差	轴线偏移、高程误差	导致涵管出口高程不符,影响放水功能
地下水影响	顶进过程中扰动地下水位	引发坝体内部孔隙水压力变化,影响渗流稳定
监测盲区	顶管位于坝体内部,难以直接观测	隐蔽工程质量问题难以及时发现

## 3 顶管施工对水库运行安全的影响机理分析

### 3.1 对坝体结构稳定性的影响

顶管施工对坝体结构稳定性的影响主要源于施工过程中的机械扰动。当液压千斤顶将管节强力顶入坝体土层时,会对周围土体产生显著的挤压作用。在土石坝这种由松散颗粒构成的结构中,这种挤压效应可能导致局部区域的应力急剧升高。如果该区域的土体抗剪强度不足以抵抗这种新增的应力,就可能产生微小的裂缝或发生局部的塑性变形。这种扰动效应在顶管轴线附近尤为明显,并可能沿着应力传递路径向四周扩散。持续的顶进作业还可能导致坝体产生不均匀沉降,特别是在坝基存在软弱夹层或靠近原有破损涵管等薄弱部位时,这种风险会进一步放大。此外,如果顶管线路设计过于靠近坝坡,施工过程中产生的振动和挤压还可能扰动护坡结构,导致块石松动甚至局部滑移,从而削弱坝坡的防护能力。

### 3.2 对渗流安全的影响

对于土石坝而言,渗流稳定是其安全生命线,而顶管施工恰恰可能对这一核心安全要素构成挑战。其影响机理主要体现在三个方面。其一,顶管本身可能成为新的渗漏源。如果管节之间的橡胶密封圈安装不到位,或者顶进完成后管周空隙的同步注浆未能完全填充密实,就会在高水头压力下形成一条贯穿坝体的渗流通道。其二,顶管的引入会改变坝体内部原有的渗流场分布。作为一条刚性的、低渗透性的结构,顶管会迫使水流绕行,从而改变渗流路径,可能导致某些局部区域的渗透坡降异常增大,超过土体的允许值。其三,这种改

变后的渗流场可能诱发渗透变形<sup>[3]</sup>。根据大坟坑水库的调洪计算成果,其校核洪水位高达330.77米,坝体承受的水头压力相当可观。在此条件下,若顶管周围的回填土料级配不良,细颗粒很容易被渗流水带走,从而发生管涌或流土,最终危及大坝的整体安全。

### 3.3 对水库调度与应急管理的影响

顶管施工不仅是一个技术过程,更是一个需要与水库整体运行管理深度协同的系统工程。为了最大限度地降低施工风险,通常需要在枯水期将库水位降至安全高程以下,这本身就对水库的年度调度计划提出了挑战,可能会影响到下游的灌溉供水保障。更为严峻的是,施工过程中一旦发生突发性险情,如因顶进扰动导致坝体内部出现塌陷,或因密封失效引发突发性渗漏,将直接威胁大坝安全,必须立即启动应急预案。因此,顶管施工方案的制定必须与水库的防洪调度预案、应急管理体系紧密结合,确保在任何突发情况下都能迅速响应、有效处置,将风险控制在萌芽状态。

## 4 应对措施与技术保障体系构建

### 4.1 设计阶段:科学选线与结构优化

应对顶管施工风险,必须从源头抓起,在设计阶段就构建起坚实的安全屏障。大坟坑水库工程首先在选线上进行了精心考量,将新建涵管布置于大坝右岸,主动避开了已知存在严重渗漏问题的左岸区域以及坝体的其他潜在薄弱部位,从空间上隔离了风险源。涵管的轴线设计力求平直,以减少施工过程中的纠偏难度和对土体的额外扰动。在结构设计上,选用了内径不小于0.5米的钢筋混凝土顶管,其接口采用F型钢承口配合橡胶圈的密

封形式,这种结构不仅强度高,而且密封性能可靠。针对管周空隙这一潜在渗漏通道,设计了同步注浆方案,明确采用水泥-水玻璃双液浆,这种浆液凝结速度快、强度高,能有效填充空隙,形成一道可靠的防渗帷幕。同时,对涵管出口高程进行了精确计算和控制,确保其与原有放水系统完美衔接,保障自流放水功能的正常发挥。

#### 4.2 施工阶段:精细化控制与过程管理

进入施工阶段,精细化的过程控制是确保安全的核心。工程将整个顶管作业划分为若干长度不超过30米的施工段,这种分段顶进的方式便于实时监测和及时纠偏,有效控制了施工精度。施工中采用了先进的激光导向系统,每顶进1米就对轴线进行一次精确测量,一旦发现偏差立即通过调整千斤顶的推力分布进行纠正,将最终的轴线偏差严格控制在规范允许范围内。同步注浆是另一个关键控制点,注浆作业与顶进同步进行,注浆压力被精确控制在0.2至0.3兆帕之间,既能保证浆液充分填充空隙,又避免了因压力过大而对坝体土体造成破坏。整个施工被严格安排在每年11月至次年3月的枯水期进行,并将库水位预先降至325米以下,大幅降低了施工期间的水头压力,为安全作业创造了有利条件。此外,现场还配备了速凝水泥、膨胀止水条等应急堵漏材料,并制定了详细的应急预案,确保一旦出现任何异常情况都能得到快速、有效的处置。

#### 4.3 监测阶段:多维度安全监控

为了对顶管施工的全过程进行无死角监控,工程建立了一套多维度的安全监测体系。在坝体表面,沿顶管轴线两侧布设了精密的沉降观测点,通过定期水准测量,严密监控施工引起的坝体变形。在坝体内部,于新建涵管的上下游关键位置埋设了渗压计,实时监测孔隙水压力的变化,这是判断渗流状态是否正常最直接的依据<sup>[4]</sup>。顶管施工完成后,还引入了CCTV管道机器人,对管内壁的完整性和接口的密封状况进行了全面的内窥检测,确保了隐蔽工程的质量。所有这些监测数据,连同施工期间的库水位信息,都被实时接入新建成的水雨情自动测报系统,实现了数据的自动采集、传输和预警,为科学决策提供了坚实的数据支撑。

#### 4.4 管理阶段:全过程风险管控

除了技术和监测手段,健全的管理体系是风险防控

的最终保障。在项目启动前,组织了由水利、岩土等领域专家组成的评审组,对顶管专项施工方案进行了严格论证,重点审查了各项安全措施的可执行性和有效性。施工许可制度被严格执行,任何作业都必须在获得水库管理单位及上级行政主管部门的双重审批后方可进行。为了确保工程质量的客观公正,工程委托了独立的第三方检测机构,运用超声波、地质雷达等无损检测技术,对顶管的壁厚、内部缺陷及管周注浆饱满度进行了全面检测。在工程完工后,并未立即宣告结束,而是设定了为期一年的运行后评估期,通过持续的观测数据来验证顶管工程的长期安全性和可靠性,形成了一个完整的闭环管理。

## 5 结语

本文基于大坟坑水库加固工程实践,剖析顶管施工对水库运行安全的潜在影响并构建应对措施体系,得出顶管施工虽优势显著,但在水库环境中对坝体结构稳定性和渗流安全的潜在风险不容忽视,通过设计、施工、监测、管理各阶段采取相应措施可有效降低风险,且工程实践验证了其应用于中小型水库除险加固的可行性与有效性。展望未来,顶管技术在水利工程中应用前景广阔,值得深入探索的课题众多,如研究其对不同类型坝体影响机理差异以形成针对性指南,构建基于BIM与GIS融合的数字化管控平台实现动态管理,建立运行期监测与评估方法保障水库长治久安等,随着非开挖技术发展 and 标准体系完善,顶管施工将在水利基础设施更新改造中发挥重要作用。

## 参考文献

- [1]洪海华.淡坑水库输水涵洞顶管施工工艺设计及控制技术分析[J].水利科技与经济,2025,31(03):151-156.
- [2]李青.顶管施工在水库除险加固工程输水涵管重建中的运用分析[J].黑龙江水利科技,2018,46(11):148-149+185.
- [3]蒋建华.水利工程中顶管施工技术的应用分析——以民兵水库涵管更换施工为例[J].珠江水运,2021,(21):33-34.
- [4]谷明.观洞水库主坝输水涵管工程顶管设计与施工要点分析[J].黑龙江水利科技,2021,49(07):125-128.