

深埋隧洞涌水突泥应急处置中的封堵设计与应用——以香炉山隧洞桩号 DLI14+285.3 涌水突泥为例

甘同慰¹ 郭勇²

1 云南省滇中引水有限公司, 云南昆明, 650000;

2 云南省滇中引水工程建设管理局, 云南昆明, 650000;

摘要: 本次研究香炉山隧洞桩号 DL I 14+285.3 涌水突泥为背景, 在分析涌水突泥特点及风险后, 创新性地采用隧洞改线方案, 设置多道封堵体并结合灌浆技术进行治疗。首先设置临时封堵体快速响应突泥涌水, 后续依次施作多道堵头, 通过不断优化调整, 形成完整的封堵体系。实践证明, 该封堵设计与应用方案成功遏制了灾害进一步恶化, 为后续隧洞施工创造安全稳定环境, 可为类似复杂地质条件下的地下工程建设提供重要参考和借鉴, 推动涌水突泥灾害防治技术发展。

关键词: 滇中引水; 香炉山隧洞; 涌水突泥; 堵头; 封堵体; 灌浆

DOI: 10.69979/3060-8767.26.01.048

1 工程概况

滇中引水工程是国务院确定的172项节水供水重大水利工程中的标志性工程, 也是中国西南地区规模最大、投资最多的水资源配置工程, 是中国在建最大引水工程之一。香炉山隧洞是滇中引水工程最长的深埋隧洞, 拥有“横断山脉地质博览馆”之称, 也是总干渠的关键控制性工程。隧洞设计断面为圆形, 采用无压输水, 设计流量 135m³/s, 设计纵坡 1/1800, 设计水深 6.3m~6.4m, 采用“钻爆法+TBM”施工, TBM 段Ⅲ类围岩洞段衬后直径 8.5m, Ⅳ、Ⅴ类围岩洞段衬后直径 8.4m, 钻爆段隧洞除穿越活动断裂洞段衬后直径为 8.8m/10.0m 外, 其余钻爆洞段衬后直径为 8.3m。

2023年9月15日, 香炉山隧洞开挖至桩号 DLI14+285.3 时发生较大规模涌水突泥, 规模约 1400m³/h (初期 100m³/h~300m³/h, 随后增至 800m³/h~1000m³/h, 最大达 1400m³/h)。

2 总体处置思路

2.1 涌水突泥治理特点

本次涌水事前无预兆, 涌水量较大, 水流快速在洞内汇集, 现场无法及时观察涌水洞段的具体情况, 按涌水洞段围岩性状与涌水规模分析, 洞室可能已经发生一定规模的垮塌, 出水点可能已与西侧的白汉场槽谷形成一定的水力联系, 存在水压击穿洞壁安全岩盘继而诱发更大规模涌突水的风险。后续地下水流可能会向掌子面

前方发生溯源侵蚀, 进而引发洞内突发性的突泥涌水灾害。另外, 积水洞段未施作二衬的Ⅳ、Ⅴ类围岩洞段长期受浸水影响也存在初衬围岩的变形稳定问题。

若按照隧洞原线路进占方案 (超前灌浆堵水+超前排水+循环开挖), 则突涌体回淹约 125m, 循环开挖施工中突涌体内水压积聚问题难以有效解决, 存在引发进一步突泥涌水事故的风险, 且掌子面附近空腔处理难度大。

因此最终采用隧洞改线方案, 即不清挖突涌体, 改线后“超前排水泄压+超前注浆循环掘进”, 排堵结合, 具有一定可行性; 同时与涌水突泥洞段上游掌子面 (穿 F10-2) 统筹考虑, 使调线后方案与 F10 活动断层大角度相交。

隧洞改线首先应设置封堵体。根据现场实际涌水情况, 在永久堵头施工前, 在 DLI14+413.5~DLI14+423.5 浇筑 C30 临时封堵体, 临时封堵体不设置插筋和回填管路, 以满足快速施作要求, 为永久堵头施工创造条件。永久堵头设计考虑封堵体抗滑稳定, 同时线路调整段隧洞与原线路之间的安全岩体厚度应不小于 2~3 倍洞径, 确定堵头布置在 DLI14+423.5~DLI14+502.5, 其中, DLI14+423.5~DLI14+458.5 为标准柱形封堵体, DLI14+458.5~DLI14+502.5 为原线路与调整后线路交汇区异形封堵体。

为规避隧洞前方突泥涌水孕体, 自 DLI14+502.5 向右侧 (面向上游) 偏转, 线路向山脊侧偏移 200m, 至

上游桩号 DL I BK0+989.066, 改线后线路长 2269.414m, 相比原线路增加 114.43m。

2.2 总体思路

将“确保安全”放在第一位, 综合考虑“安全、投资、环水保、工期”等因素, 做到“科学、节约、有效”, 为隧洞转入正常施工工序创造安全环保的环境。

根据国内外工程经验, 灌浆处理是隧洞涌水突泥灾害最常用的治理技术。塌腔及突涌口的封堵需用到充填灌浆技术, 洞周的安全加固和外水封堵需用到固结灌浆和帷幕灌浆技术, 洞内突涌泥渣(含钢模台车和挖掘机)的安全清挖和原掌子面加固需用到固结挤密灌浆技术。结合现代施工设备的应用, 灌浆治理方法又可分为洞内灌浆处理和地面灌浆处理两类方案, 要根据现场地质条件、施工条件、灌浆技术进行合理选择, 在确保安全前提下, 选用技术适用可行、质量有保障、工期可控、经济合理的方案。

为了减少隧洞突涌风险和地下水环境影响, 同时为后续隧洞施工提供可靠的施工环境, 推荐临时封堵体设计方案, 在 DLI14+413.5~DLI14+423.5 浇筑 C30 临时封堵体, 封堵体前方(小桩号方向)设碎石袋反滤。临时封堵体与初支内表面衔接, 不设置插筋和回填管路, 以满足快速施作要求。同时, 结合改线方案, 进一步明确永久封堵体结构设计方案。永久封堵体紧接临时堵头, 布置在 DLI14+423.5~DLI14+502.5, 其中, DLI14+423.5~DLI14+458.5 为标准柱形封堵体, DLI14+458.5~DLI14+502.5 为原线路与调整后线路交汇区异形封堵体。

3 专项处置措施

3.1 第一道堵头

9 月 21 日, 施工单位抽调资源, 在距掌子面 16.7m 桩号 DLI14+302 位置往小桩号方向浇筑堵头, 桩号为 DLI14+302~DLI14+285.3。堵头采用 C30 混凝土浇筑, 最大厚度 16.7m, 最大高度 7.1m, 浇筑混凝土量为 498m³。

为保证堵头及反压体结构稳定, 在堵头浇筑完成后进行混凝土趾墙施工。趾墙浇筑 10m 长, 桩号为 DLI14+312~DLI14+302, 最大高度 3.17m, 趾墙大桩号方向外边缘坡比为 1:0.3。采用 C30 混凝土分两仓浇筑, 浇筑混凝土量为 91m³。

3.2 第二道堵头

至 2023 年 10 月 3 日, 3#施工支洞上游主洞段桩号

DLI14+302 位置堵头预埋排水管全部堵塞无法正常排水, 导致堵头内部水压持续增高, 涌水从堵头左侧底部涌出, 堵头出现开裂和下沉, 严重影响施工安全。2023 年 10 月 5 日, 施工单位在第一道堵头往大桩号方向 DLI14+305~DLI14+316 段浇筑第二道堵头, 堵头采用 C30 混凝土, 厚度 10m, 最大高度 10.5m。

2023 年 10 月 3 日, 现场进行堵头立模施工, 堵头内准备预埋 9m 长的 $\Phi 300$ PE 管+4.5m 长 $\Phi 300$ 钢管 3 根并配置 3 个 $\Phi 300$ 闸阀, 30m 长的 $\Phi 32$ PE 管(预埋灌浆管) 9 根并配置 9 个 PE 管接头, 12m 长 $\Phi 16$ 钢筋网 80 根共 1.517t。

2023 年 10 月 6 日下午 13 点左右, 涌水从第一道堵头后 DLI14+305 桩号顺水流方向右侧顶拱处涌出, 涌水冲刷出空腔并造成拱架变形, 距离第一道堵头约 20m 处喷混出现开裂。为保证施工安全, 施工人员全部撤出观察, 停止第二道堵头施工。

3.3 第三道堵头

由于第二道堵头无法施工, 2023 年 10 月 7 日, 参建四方再次召开会议, 决定在桩号 DLI14+335~DLI14+325 段浇筑第三道堵头。堵头采用 C30 混凝土, 厚度 10m, 最大高度 4.85m。

2023 年 10 月 7 日夜間, 在堵头顺水流方向右侧预埋两排 4 根 6m 长的 DN800 排水管, 在堵头中上部预埋 6 根 9m 长的 DN300 排水管, 位置根据现场情况布置。

2023 年 10 月 7 日夜間, 共完成长度 10m, 高度 2m, 共 110m³的第一仓混凝土浇筑, 2023 年 10 月 8 日早上 7 点, 现场正在进行堵头施工, DLI14+305 桩号右侧顶拱处发生突泥, 涌水夹带大量泥渣冲出, 泥渣量约 1500m³, 冲出约 30m 远, 导致施工材料及设备被埋无法取出, 为保证施工安全, 第三道堵头只浇筑完成 110m³混凝土, 剩余部分未能按计划施作。

3.4 第四道堵头

根据现场突涌发展过程及现状, 为了减少隧洞突涌风险和地下水环境影响, 同时为后续隧洞施工提供可靠的施工环境, 采用临时封堵体方案, 主要为: DLI14+413.5~DLI14+423.5 浇筑 C30 临时封堵体, 封堵体前方(小桩号方向)设碎石袋反滤。临时封堵体与初支内表面衔接, 不设置插筋和回填管路, 以满足快速施作要求。临时封堵体上部预埋 3 根 $\Phi 300$ mmPE 管作为排水孔, 临时封堵体中部预埋 3 根 DN300 \times 8mm 钢管并安装闸阀作为排水孔, 底部两侧分别预埋 1 根

DN300×8mm 钢管并安装闸阀作为排水孔。根据前期地质资料 DLI14+420~DLI14+430 为Ⅳ类围岩(灰岩、碳质灰岩),层面裂隙发育,局部有溶蚀风化加剧现象,为封闭可能存在的渗流通道。对临时堵头后方(大桩号方向)边顶拱 240° 范围内施做 3 排、间排距 2m、深度 8 米的径向固结灌浆。永久封堵体紧接临时堵头,布置在 DLI14+423.5~DLI14+502.5,其中,DLI14+423.5~DLI14+458.5 为标准柱形封堵体, DLI14+458.5~DLI14+502.5 为原线路与调整后线路交汇区异形封堵体。堵头模板共安装 183×91cm² 的层板 97 块, 4m 长的 50×100mm 方木 145 根。四道堵头共浇筑 C30 混凝土 577m³。

4 结论及展望

本次涌水突泥应急处置工作,通过科学合理的封堵设计与严谨高效的施工应用,成功遏制了涌水突泥灾害的进一步恶化,为后续隧洞施工创造了安全稳定的环境,具有重要的现实意义和借鉴价值。

此次应急处置充分证明了定制化封堵方案在复杂地质条件下应对涌水突泥灾害的可行性与有效性。从第一道堵头的及时浇筑到第四道堵头的精准实施,每一道工序都紧密结合现场实际情况,不断优化调整,形成了一套完整的封堵体系。第一道堵头快速响应,阻挡了初期涌水突泥的冲击;第二、道第三道堵头虽受现场复杂情况影响未能完全按计划实施,但为后续方案调整提供了宝贵经验;第四道堵头则凭借临时封堵体与永久封堵体的有机结合,成功实现了泄压与封堵功能,确保了隧洞的安全稳定。同时,灌浆技术的综合应用,包括塌腔及突涌口的充填灌浆、洞周的安全加固与外水封堵固结灌浆和帷幕灌浆、洞内突涌泥渣清挖及原掌子面加固的固结挤密灌浆等,有效封堵了地下水通道,加固了周边岩体,提升了封堵体的整体性和稳定性。此外,整个处置过程中,始终将施工人员安全置于首位,遵循“安全、投资、环水保、工期”综合考量原则,实现了安全环保施工,未对地下水环境造成严重破坏,也为类似工程的灾害处置提供了成功范例。

展望未来,随着地下工程建设规模的不断扩大和地质条件的日益复杂,涌水突泥等灾害的防治将面临更多挑战。在技术研发方面,需进一步深化对复杂地质条件下地下水赋存规律和涌突机理的研究,借助数值模拟、物理模拟等先进手段,提高对灾害的预测精度,为封堵

方案设计提供更科学的依据。同时,应加强新型封堵材料和工艺的研发,如高强、抗渗、快硬的混凝土材料以及智能化的注浆技术,以满足快速、高效封堵的要求。在工程实践方面,建立健全的应急预案体系和快速反应机制至关重要。施工前应加强对地质勘察工作的重视,详细查明不良地质体和地下水情况,提前制定针对性的处置方案,并进行演练,确保在灾害发生时能够迅速、有序地开展应急处置工作。此外,不同地区、不同类型地下工程之间的经验交流与合作也应加强,分享成功案例和失败教训,共同推动涌水突泥灾害防治技术水平的提升,为地下工程的安全建设保驾护航,确保国家基础设施建设的稳步推进和人民生命财产安全。

参考文献

- [1] 闵洋,任宇翔,等.滇中引水工程香炉山隧洞 3#施工支洞上游主洞涌水突泥专项处置报告 R.长江勘测规划设计研究有限责任公司 2023 年.
- [2] 李建贺,牛利敏,王帅,等.深埋隧洞穿高压富水断层涌水突泥分析与处置技术[J].长江科学院院报,2024,41(10):149-156.
- [3] 杨正远.隧道涌泥处治方案研究[J].交通世界,2025,(12):129-132. DOI:10.16248/j.cnki.11-3723/u.2025.12.056.
- [4] 徐传江.引水隧洞突泥涌水灾害处理施工技术研究[J].四川水利,2025,46(02):60-63.
- [5] 焦艳彬,王照英,陈建安,等.藏区某水工隧洞涌泥成因分析及处理方案[J].云南水力发电,2024,40(07):110-113.
- [6] 段江鹏,舒建梅,李培富,等.隧洞突泥涌水灾害处理施工[J].云南水力发电,2023,39(04):136-140.
- [7] 郭晋汶.隧洞涌水段堵水技术方案研究[J].山西水利,2022,(08):52-54+57.
- [8] 徐晗.隧道施工涌水突泥专项处理技术——以南龙铁路荆西隧道为例[J].科技,2021,134(10):134-137.

作者简介:1.甘同慰(1985.06-),男,云南维西人,工程师,本科,主要从事水利水电工程建设管理工作。2.郭勇(1987.01-),男,云南镇雄人,高级工程师,本科,主要从事水利水电工程建设管理工作。