

深埋隧洞断层破碎带突泥涌水灾害机理与综合控制技术 研究——以滇中引水工程香炉山隧洞桩号 DL I 3+570~ 3+680 涌水突泥为例

和超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: 随着我国西部大开发与“十四五”水利规划的实施, 深埋长隧洞工程在复杂地质条件下的建设日益增多, 突泥涌水灾害成为制约工程安全与进度的关键难题。本文以香炉山隧洞 DL I 3+570~3+680 段突泥涌水事件为工程背景, 系统开展了断层破碎带地质条件下突泥涌水灾害机理分析, 提出了“地质预报先行、清淤封闭同步、灌浆固结为主、排水降压为辅、结构加固协同、动态调控贯穿”的综合治理技术体系。通过超前地质探测、分段高压灌浆、反滤排水系统、止浆墙结构优化及智能监测等手段, 实现了高压富水断裂带条件下隧洞围岩稳定与渗流控制。工程实践表明, 该体系在突泥涌水治理中表现出良好的适用性、可靠性与经济性, 可为类似深埋隧洞地质灾害防治提供理论支持与技术参考。

关键词: 深埋隧洞; 突泥涌水; 断层破碎带; 灌浆固结; 动态调控; 灾害治理

DOI: 10.69979/3060-8767.26.02.031

1 引言

1.1 研究背景与意义

近年来, 随着我国水利水电、交通、能源等重大基础设施向西南高山峡谷区域延伸, 深埋长隧洞工程面临的地质条件日趋复杂。突泥涌水作为隧洞施工中最具破坏性的地质灾害之一, 具有突发性强、水量大、携渣量大、持续时间长、治理难度高等特点, 严重威胁施工人员安全、设备安全与工程进度。据统计, 我国近五年在建隧洞工程中, 约 30% 遭遇过不同程度的突水突泥灾害, 其中断层破碎带、岩溶通道、富水软弱围岩段是灾害高发区。因此, 开展深埋隧洞突泥涌水灾害机理与综合治理技术研究, 具有重要的理论价值与工程实践意义。

1.2 国内外研究现状

国内外学者在突水突泥机理、预测预报、治理技术等方面开展了广泛研究。在机理方面, 多聚焦于水力劈裂、渗透失稳、颗粒迁移等物理过程; 在预报方面, 超前地质钻探、物探技术(如 TSP、地质雷达)、微震监测等逐步成熟; 在治理方面, 灌浆堵水、排水降压、结构加固等传统方法不断优化, 注浆材料、工艺参数、智能调控等方面也取得新进展。然而, 针对高压富水断层破碎带这一特殊地质条件, 仍缺乏系统性的治理技术体系与动态调控机制, 尤其在工程实践中如何实现“预报

—治理—监测—调整”一体化流程, 仍需进一步探索。

1.3 研究内容与方法

本文以香炉山隧洞突泥涌水治理工程为案例, 采用理论分析、现场试验与工程验证相结合的方法, 开展以下研究:

- (1) 分析断层破碎带地质特征与突泥涌水成因机制;
- (2) 构建“预报—治理—监测”三位一体的综合治理技术体系;
- (3) 阐述关键工艺参数与施工控制要点;
- (4) 通过效果检测与工程反馈, 验证治理效果并提出优化建议。

2 工程概况与地质条件分析

2.1 工程背景

香炉山隧洞为某调水工程关键线路, 地质条件极端复杂, 2021 年 2 月 26 日, 1#支洞下游掌子面 DL I 3+681.5 处发生突泥涌水, 初始为渗水, 随后发展为持续性涌水携渣, 最大涌水量约 120m³/h, 携带碎屑物约 800m³, 导致掌子面坍塌、设备淹埋, 施工中断。

2.2 地质条件与灾害特征

该段段围岩为灰白~灰黄色大理岩, 微风化, 岩质较坚硬; 围岩呈厚~中厚层结构, 局部次块状结构, 岩

体总体较完整,局部因陡倾裂隙切割,完整性差,部分岩体较破碎,有轻微掉块现象;洞室总体呈潮湿状,局部渗滴水或线状出水;该段围岩类别为III2类。掌子面揭露一次级断层,主断带宽约1m,断层带物质成分为碎裂岩~碎块岩夹碎粉岩,原岩为大理岩及石英片岩,受构造挤压迹象明显,局部有泥化现象,围岩性状差,地下水沿断层破碎带产生渗透破坏,造成突泥涌水及围岩垮塌。

2.3 灾害成因初步判断

(1) 地质因素: 断层破碎带物质松散、胶结差,为突泥提供物源;

(2) 水文因素: 富水断裂带形成高压水头,水力梯度大;

(3) 施工因素: 开挖扰动打破围岩一水压平衡,诱发渗透失稳。

3 突泥涌水综合治理技术体系构建

3.1 治理原则与总体思路

坚持“以堵为主、堵排结合、先固后挖、动态调控”原则,形成以下治理流程:

地质预报→清淤封闭→灌浆固结→排水降压→结构加固→效果检测→补充治理

3.2 超前地质预报与风险评估

采用TSP303地震波探测与地质雷达扫描相结合,初步探明前方30m范围内岩体破碎程度与含水特征。根据预报结果,将DL I 3+680~3+720段划为高风险区,制定专项施工预案。

3.3 清淤与临时封闭技术

清淤采用“机械开挖+人工修整”方式,铺设洞渣道路,设专人监测涌渣体变形。在DL I 3+659处浇筑C30混凝土挡渣墙(宽2m、高3.1m),墙基与边墙设置砂浆锚杆($\phi 25\text{mm}$, $L=2\text{m}$),增强抗滑移与抗倾覆能力。渣体表面铺设 $\phi 6@15\times 15\text{cm}$ 双层钢筋网,喷射50cm厚C25混凝土,形成封闭壳层。

3.4 灌浆固结与排水降压系统

灌浆孔: $\phi 89\text{mm}$,孔深10~20m,孔距 $1.0\text{m}\times 1.0\text{m}$,梅花形布置;浆液类型:普通水泥浆(水灰比 $0.6\sim 1:1$)与水泥—水玻璃双浆液(体积比 $1:1$);注浆压力: $0.5\sim 1.0\text{MPa}$ (初期), $2.5\sim 5.0\text{MPa}$ (补充灌浆);分段长度: $5\sim 10\text{m}$,采用下行式分段注浆。

在拱顶与侧墙布置 $\phi 110\text{mm}$ 泄水孔,外偏 $20^\circ\sim 25^\circ$,孔内设反滤包与孔口阀门,将前方水体引至后方

排水沟,降低掌子面水压力。

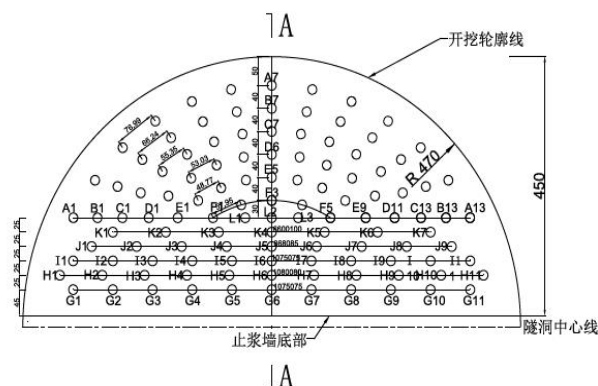


图 1DLI3+670 处钻孔灌浆布置示意图 (横断面)

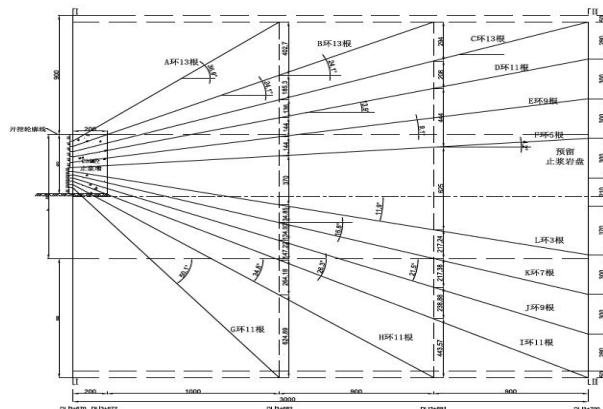


图 2DLI3+670 处钻孔灌浆布置示意图 (纵断面)

3.5 止浆墙结构优化与底板加固

在DL I 3+672处浇筑C30止浆墙(宽2m、高4.5m),墙后渣体表面采用0.5m厚C30混凝土封闭,防止浆液外漏。针对注浆过程中底板开裂问题,采用I20a工字钢($L=10\text{m}$,间距1m)与 $\phi 8@15\times 15\text{cm}$ 双层钢筋网加固,重新浇筑50cm厚C30混凝土。

3.6 灌浆效果检测与补充治理

通过 $\phi 91\text{mm}$ 取芯孔检测发现,隧洞下部围岩注浆效果不佳,存在富水断裂带。随即增设 $\phi 110\text{mm}$ 排水孔,拆除部分挡渣墙,在DL I 3+665~668段浇筑3m厚C30止浆墙(下墙),并进行扰动灌浆,压力提升至 $2.5\sim 5.0\text{MPa}$,确保下部围岩固结。

4 施工工艺与动态调控机制

4.1 分区分步施工组织

采用“竖向分层、横向分块”施工策略,先处理下部富水区,再逐步向上推进。每循环进尺不超过3m,全程实施变形与渗压监测。

4.2 灌浆工艺控制要点

(1) 钻孔顺序: 先外围后内部、先下部后上部;

(2) 浆液调配: 根据出水情况动态调整水灰比与胶凝时间;

(3) 压力控制: 采用“低压慢灌—逐步升压”模式, 避免劈裂围岩;

(4) 结束标准: 灌浆压力达到设计值且吸浆量小于 2L/min。

4.3 动态监测与预警系统

布设多点位移计、渗压计、视频监控装置, 实时采集围岩变形、水压变化与施工影像数据。设定变形速率 $\geq 2\text{mm/d}$ 、水压上升 $\geq 10\%$ 为预警阈值, 触发应急预案。

4.4 应急预案与协同决策机制

建立“项目部—监理—设计—勘察”四方应急联动机制, 遇异常情况立即停工、撤离、会商, 调整治理参数或工艺。

5 治理效果评价与工程启示

5.1 治理效果检测

通过取芯、压水试验与物探复测, 表明: 围岩完整性显著改善, 岩体波速提高 18%; 渗水量由 $120\text{m}^3/\text{h}$ 降至 $5\text{m}^3/\text{h}$ 以下; 掌子面稳定, 具备继续开挖条件。

5.2 技术经济性分析

本方案虽初期投入较大(灌浆材料、设备、人工), 但避免了长期停工与设备损失, 总体工期较传统方法缩短约 45 天, 经济效益显著。

5.3 工程启示与推广建议

(1) 深埋隧洞施工应强化超前地质预报与风险评估;

(2) 灌浆堵水需结合地质条件灵活选择浆材与工艺;

(3) 动态监测与多方协同是灾害治理成功的关键;

(4) 建议推广“智能灌浆系统”与“地质灾害预警平台”, 提升治理效能。

6 结论

本文以香炉山隧洞突泥涌水治理为例, 系统阐述了断层破碎带条件下突泥涌水灾害的成因机制, 构建了以“地质预报、灌浆固结、排水降压、结构加固、动态调控”为核心的综合治理技术体系。工程实践表明:

(1) 采用分段高压灌浆与反滤排水相结合, 能有效控制高压富水断裂带渗流;

(2) 优化止浆墙结构与底板加固措施, 可提升整体抗渗与承载性能;

(3) 全过程动态监测与协同决策机制, 是实现安全高效治理的重要保障。

该体系可为类似深埋隧洞突泥涌水灾害防治提供系统性的技术参考, 具有较好的推广应用价值。

参考文献

- [1] 吴辉, 张微, 徐鹏. 复合地层隧洞涌水突泥处置技术研究[J/OL]. 水利水电快报, 1-5[2025-12-13]. <https://link.cnki.net/urlid/42.1142.TV.20251031.1639.002>.
- [2] 郭悦宝. 高原隧道富水断层破碎带段突泥涌水分析及处治技术[J]. 铁道建筑技术, 2025, (09): 184-188.
- [3] 贺兴和. 水工隧洞断层破碎带坍塌处理技术研究[J]. 江西建材, 2025, (06): 262-264.
- [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] 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.
- [6] 戴澄, 余洁, 叶国平. 引水隧洞工程施工突涌水灾害处理技术研究[J]. 建筑安全, 2025, 40(08): 51-54.
- [7] 康与超, 王青松. 复合地层隧道突涌水灾害机理及治理研究[J]. 北方交通, 2025, (01): 91-94. DOI: 10.15996/j.cnki.bfjt.2025.01.023.
- [8] 喻久康, 童蕾, 严俊, 等. 深埋长隧洞穿越富水断层带涌水突泥风险预判与处理措施研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2024, 55(S2): 371-378. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2024.S2.058.
- [9] 钟黎阳. 隧道断层破碎带涌水突泥地质灾害处治技术研究[J]. 工程机械与维修, 2023, (05): 104-106.
- [10] 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.
- [11] 杨超, 邹永木, 李磊, 等. 深大断层破碎带隧道突水突泥机理研究[J]. 工业建筑, 2023, 53(03): 173-179. DOI: 10.13204/j.gyjzG22061409.
- [12] 马业钜. 断层破碎带隧道突水治理措施研究[J]. 西部交通科技, 2023, (02): 150-152+199. DOI: 10.13282/j.cnki.wccst.2023.02.045.

作者简介: 和超(1989.01), 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。

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。