

富水隧道塌腔快速处治技术及工程应用

宋黎明 冯江* 王煜杰 徐林 邓泽旭

四川省交通建设集团有限责任公司

DOI:10.32629/etd.v7i2.18963

[摘要] 隧道施工中,涌水与塌腔已成为最具破坏性的地质灾害之一。本文以泸定至石棉高速公路海螺沟隧道为工程背景,针对富水破碎围岩段多次发生的涌水与塌腔问题,开展施工工艺与工序的系统创新,提出一套“防-治-控”一体化的综合处治技术体系。通过掌子面动态回填、地下水导排与迁移、初期支护加固、塌腔注浆回填及全过程变形-渗水监测等关键技术的集成应用,实现了在节理密集、岩脉发育、围岩破碎且富水地质条件下隧道塌腔的快速稳定与安全穿越。该技术体系显著提升了涌水与塌腔等灾害的处治效率,在保障施工安全与工程质量的同时,有效节约了工期与成本,具有较高的工程应用价值与推广前景。

[关键词] 桥梁与隧道工程; 隧道施工工艺; 涌水和塌腔处治技术; 涌水; 塌腔

中图分类号: U455.1 **文献标识码:** A

Rapid Treatment Technology for Water-Rich Tunnel Cavities and Its Engineering Application

Liming Song Jiang Feng* Yujie Wang Lin Xu Zexu Deng

Sichuan Transportation Construction Group Co., Ltd.

[Abstract] During tunnel construction, water inrush and cavity formation have emerged as one of the most destructive geological hazards. This paper takes the Hailuogou Tunnel of the Luding-Shimian Expressway as the engineering background. In response to the repeated occurrences of water inrush and cavity issues in water-rich fractured surrounding rock sections, systematic innovations in construction techniques and procedures were carried out. A comprehensive treatment technology system integrating "prevention, treatment, and control" was proposed. Through the integrated application of key technologies, such as dynamic backfilling of the tunnel face, groundwater drainage and diversion, reinforcement of initial support, grouting and backfilling of cavities, and full-process deformation and seepage monitoring, rapid stabilization and safe traversal of tunnel cavities under geological conditions characterized by dense joints, developed dikes, fractured surrounding rock, and abundant groundwater were achieved. This technology system significantly improves the efficiency of treating hazards like water inrush and cavities. While ensuring construction safety and project quality, it effectively reduces construction time and costs, demonstrating substantial engineering application value and broad prospects for promotion.

[Key words] Bridge and Tunnel Engineering; Tunnel Construction Technology; Water Inrush and Cavity Treatment Technology; Water Inrush; Cavity

前言

随着我国高速公路网络的快速扩展,山区隧道工程日益增多,其所穿越的地质条件日趋复杂。隧道施工中常遭遇坍塌、涌水、岩爆等地质灾害,严重影响施工安全、工程进度与长期稳定性^[1-5]。特别是在富水破碎围岩段,地下水侵蚀与围岩自稳能力差相互作用,易引发掌子面塌方甚至突水突泥,传统处治方法往往效果有限、周期长、风险高。

在隧道施工过程中多次穿过小规模、不规则的节理密集或

岩脉发育段,如施工措施不到位,容易引发掌子面小规模~大规模塌方,甚至涌水突泥风险,施工安全难以保证,对施工工序转换以及施工组织要求较高,同时也会增加施工成本及施工工期。

正如宜万铁路马鹿箐隧道在施工期间发生累计发生19起特大涌水事件,直接导致15人死亡^[6,7]。江西吉莲高速钟家山隧道发生塌方、涌水事故共计14次^[8]。而随着我国对环境保护、节能减排、低碳经济和绿色能源政策的实施,隧道建设施工技术的要求也越来越高^[9]。如何解决隧道节理密集、岩脉和裂隙发育、

围岩破碎段、小规模~大规模塌方等问题已成为当下施工的热点。近年来,国内外学者在隧道地质灾害预警与处治方面开展了大量研究,冯柴微等^[10]提出“地表-洞内综合排水+多台阶开挖+超前支护”协同控制技术;严少洋等^[11]针对深埋富水断裂带提出成套防控工艺;姜赫和杨艳娜^[12,13]分别基于属性识别理论与统计方法对突涌水风险进行评估。这些研究为本课题提供了重要参考,但在富水破碎围岩塌腔的动态处治与快速恢复施工方面,仍缺乏系统、可操作的工艺体系。

综上所述,隧道涌水事故已成为隧道建设中最易发生、最具有破坏性的灾害之一,严重影响了隧道施工安全和工程进度。因此本文以海螺沟隧道实际塌腔事件为案例,系统总结了一套涵盖“探、填、排、固、测”的集成化施工工法,强调动态调整与实时反馈机制,旨在为类似地质条件下的隧道灾害应急处治提供技术借鉴。

1 工程概况

泸定至石棉高速公路TJ4标段海螺沟隧道为分离式双车道隧道,设计速度80 km/h。隧道穿越区受泸定-得妥断裂影响,岩体以碎裂结构为主,辉绿岩岩脉侵入导致裂隙发育,叠加构造裂隙水作用,围岩稳定性差。

施工至右线K39+383段时,掌子面围岩实际状况较设计预期显著恶化,由原III级围岩变更为IV级。爆破排险后揭示:岩性为闪长岩与花岗岩交错,左侧拱顶为镶嵌碎裂结构,岩体软化、裂隙无序发育,地下水丰富,局部呈股状涌出。随即发生塌方,形成约5 m(高)×5 m(宽)×3.5 m(深)的塌腔,且在水流冲刷下持续扩展(如图1)。

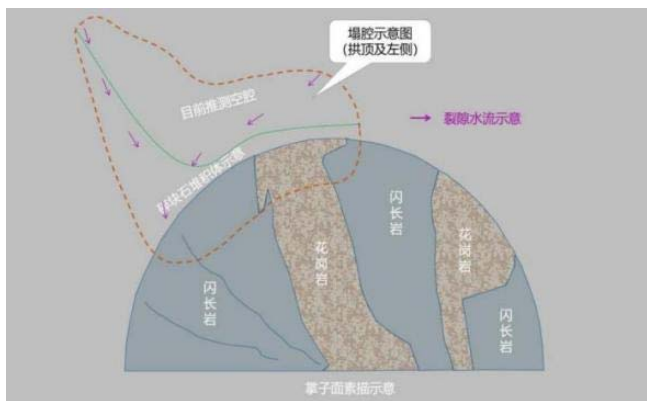


图1 掌子面塌方示意图

2 治理措施及施工工艺流程

2.1 处治原理及施工工艺

本工法的核心原理为“固结围岩、导排降水、动态调控、稳步推进”。通过注浆加固塌腔周边松散岩体,设置系统排水通道避免水压集聚,结合实时监测数据动态调整工艺参数,最终在超前支护保护下安全、快速通过灾害段。

整体流程包括:塌腔封闭与反压→排水系统布设→支护加固与注浆→塌腔混凝土回填→全过程监测→超前预报与支护(图2)。各环节循环反馈,实现动态优化。

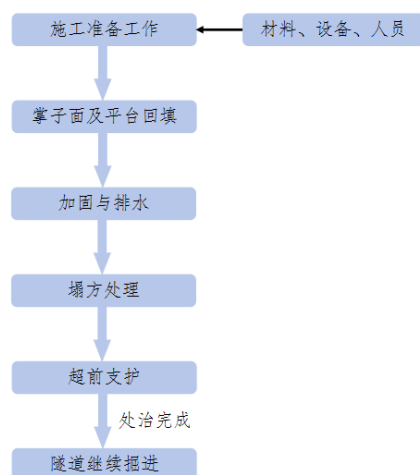


图2 防治施工流程

2.1.1 掌子面回填及反压平台施工

根据塌腔位置、规模大小和出水量情况,分别采用不同的施工工艺对掌子面、地下水及施工平台进行处理,具体方式如下:

反压平台:采用吨袋装碎石堆码,兼具反压拱脚与施工平台功能,同时具有良好的透水性(图3)。

(1) 掌子面:采用洞渣或透水材料(级配碎石和透水砂袋等)对掌子面进行回填,要求回填材料具有一定的强度,不产生泥化现象,拱顶部分采用砂袋封顶,同时埋设多组排水管,后喷浆封闭,使掌子面形成密闭空间,形成临时稳定结构与排水通道,防止塌腔规模继续扩大。

(2) 地下水处理:塌腔地下水通过预埋的排水管及回填的透水材料导出,防止积水压力冲击回填体。

(3) 反压施工平台:采用碎石吨袋堆码回填,兼具反压拱脚与施工平台功能,同时具有良好的透水性,保证稳定性的同时滤出塌腔及掌子面渗出的地下水(如图3)。



图3 反压及操作平台碎石吨袋堆码

2.1.2 支护加固与径向注浆

(1) 锁脚锚管加强:塌腔影响范围内每榀钢拱架增设4根 $\phi 42 \times 4\text{mm}$ 锁脚锚管,倾角 30° ,其他参数与注浆钢花管保持一致。

(2) 径向注浆: 采用 $\phi 42 \times 4$ mm 钢花管, 梅花形布置, 注浆材料为水泥-水玻璃双液浆, 配合比根据渗水量动态调整(水泥浆:水玻璃=1:0.5~0.8, 水灰比1:1)。注浆压力0.5~1.0 MPa, 顺序自下而上、由后向前。

(3) 作用: 固结破碎岩体, 挤压排水至预定排水通道, 提高围岩整体性与初支稳定性。

(4) 其他事项: 注浆过程中利用未注浆空管观察注浆量及地下水的迁移与变化情况, 同时监测初支的变形情况, 以便及时应对处理, 注浆参数可根据现场情况调整。

2.1.3 塌腔回填

因塌腔中地下水发育, 塌腔顶可能发生持续掉块、坍塌现象, 且塌腔位置会一定程度向上迁移, 回填前首先检查埋设的砼泵送管, 保持泵管管口伸至塌腔顶部, 以便回填砼能充填整个塌腔。泵送砼前, 需调整原排水管的高度或另增设排水管, 以便塌腔砼回填时能正常引排塌腔内的地下水; 砼采用分层填筑, 以逐渐稳定隧道初支主体结构受力。

2.1.4 变形监测与渗水全过程监测

在隧道塌腔处理过程中为确保施工安全与工程质量, 需对初支进行全过程变形监控。设置系统监测网络, 包括拱顶沉降、周边收敛、围岩压力、渗流量与水压等(表1)。监测数据实时反馈, 指导工艺调整。

表1 监测项目汇总表

序号	监测项目	监测仪器	测试精度	监测频率	监测目的
1	初支监测	拱顶下沉	全站仪	1.0mm	掌握塌腔处理过程中初支结构变化情况及规律
2		周边位移	收敛计	1.0mm	
3		拱脚下沉	全站仪	0.5mm	
4		围岩压力	压力盒	0.01MPa	
5	渗水监测	流量监测	流量计	0.1m ³ /h	掌握塌腔处理过程中渗水量的变化及渗水点的变化情况
6		渗水压力	渗压计	0.01MPa	
7		水位变化	现场观察	-	
8		颜色观察	现场观察	-	

注: 监测项目及频率等可根据现场实际条件进行调整, 监控数据信息及时反馈至现场施工人员, 以便动态调整现场处治方案及应对措施。

2.1.5 超前地质预报

采用TSP结合超前钻探, 探明前方至少30 m围岩与水文条件。必要时设置 $\phi 108$ 管棚或超前小导管注浆, 形成预支护体系。

2.2 材料设备及人员组织

面临海螺沟隧道突发涌水塌腔事件, 项目部迅速组建34 专 人进行主持和处治。处治作业所需主要材料见表2, 关键设备包括注浆泵、混凝土泵、钻机、监测仪器等。人员组织应体现专业化与应急性, 设总指挥、技术组、作业组与监测组。

表2 材料汇总表

序号	材料名称	材料规格	技术指标
1	水泥	P042.5	注浆水泥
2	水玻璃	35~40Be	注浆材料
3	喷射砼	C25	掌子面封闭、初支补喷
4	泵送砼	C25	塌腔回填
5	钢管	$\phi 42 \times 4$ mm 无缝钢管	注浆管、锁脚
6	管棚	$\phi 108 \times 6$ mm 无缝钢管	超前支护
7	钢拱架	I18、I20	临时仰拱、换拱

2.3 工程质量控制标准

2.3.1 质量控制标准

严格执行《公路隧道施工技术规范》(JTG/T 3660-2020)^[14] 及《公路工程质量检验评定标准》(JTG 2182-2020)^[15] 执行。

2.3.2 质量保障措施

(1) 掌子面及平台回填施工: 采用高强度透水性材料, 如块状洞渣、片碎石等; 严禁采用泥化洞渣及低强度洞渣回填。

(2) 塌腔范围内排水、加固小导管施工: 采用梅花形布设, 管体溢浆孔间距不大于: 10cm, 保证后期浆液扩散; 注浆采用水泥-水玻璃双液浆与水泥净浆相互交叉压注, 保证堵水及引排水的同时固结松散结构围岩。

(3) 注浆施工: 自下而上进行注浆, 过程中随时观察总水量的变化, 确认塌腔裂隙水是否引排至拱顶预埋的排水管, 以便随时调整注浆工艺及参数。

(4) 锁脚锚杆施工: 塌腔范围内拱架增设的锁脚锚杆打设角度向下约30°, 根据现场条件可增设临时初支仰拱, 以进一步保证原初支的稳定。

(5) 塌腔范围内回填混凝土施工: 分层分次填筑, 过程中观察拱顶预埋排水管水量变化以及该段总渗水量的变化, 以便调整导排水口位置及回填混凝土的工序, 回填混凝土坍落度可控制在220mm以内以保证混凝土的流动性。

(6) 超前支护施工: 下一步掘进前根据实际情况进行超前支护施工, 采用小导管(钻机顶进工艺)、管棚(跟管工艺)、自进式锚杆等方式, 管/杆体保持外插角不大于5°, 超前支护注浆根据渗水情况选用双液浆或单液浆, 以起到固结松散岩体及堵水的作用(根据需要)。

(7) 初支侵限施工: 初支侵限部位的换拱, 要求逐单元、逐榀的进行, 并随时监控初支的沉降与变形数据, 以保证安全和及时调整方案(如有)。

(8) 平台及掌子面回填料的拆除施工: 分部分区域进行, 并留核心土, 以保证掌子面及塌腔部位的初支稳定, 初支的引排水口须通过土工布包裹的排水管接支拱脚, 后期通过二衬排水体排至洞外。

3 治理效益分析

本工艺在海螺沟隧道塌腔段应用中, 处治周期较传统方法缩短约40%, 初支变形控制在允许范围内, 未发生次生灾害。通过快速恢复施工, 减少工期延误带来的间接成本, 经济效益显著。与类似工艺相比, 本技术强调渗水导排与固结同步、监测反馈与动态调整, 具备更好的适应性与控制精度, 适用于各类富水破碎围岩隧道灾害应急处治。

4 结论

本文提出的富水破碎围岩塌腔综合处治工法, 集成“回填-排水-注浆-监测-预报”多项技术, 形成动态可控的施工体系, 适用于节理密集、岩脉发育、富水破碎地层中的隧道塌腔快速处治。

(1) 采用吨袋碎石反压平台兼具稳定结构与排水功能, 水泥-水玻璃双液浆可实现围岩固结与地下水迁移的双重目的。

(2) 全过程变形与渗水监测是实现动态调控的核心, 为处治工艺参数优化提供依据。

(3) 本工艺在保障安全与质量的前提下, 显著提升处治效率, 具有较高的工程推广价值。

[基金项目]

项目名称: G5京昆高速公路汉中至广元段(四川境)扩容工程LJ7项目部。

[参考文献]

[1] Yanbin Luo, Jianxun Chen, Yi Chen, et al. Longitudinal deformation profile of a tunnel in weakrock mass by using the back analysis method[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018, 71: 478-493.

[2] Yanbin Luo, Jianxun Chen, Pei Huang, et al. Deformation and mechanical model of temporary support sidewall in tunnel cutting partial section[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2017, 61: 40-49.

[3] Shucai Li, Zongqing Zhou, Liping Li, et al. Risk assessment of water inrush in karst tunnels based on attribute synthetic evaluation system[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2013, 38: 50-58.

[4] Jianxun Chen, Qingsong Wang, Jiaqi Guo, et al. Mechanical

Properties and Acoustic Emission Characteristics of Karst Limestone under Uniaxial Compression[J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2018, 2018: 1-14.

[5] Tai Tien Wang, Wen Li Wang, Ming Leng Lin. Harnesing the catastrophic inrush of water into new Yungchuen Tunnel in Taiwan[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2004, 19(4-5): 418.

[6] 张民庆, 黄鸿健, 张生学, 等. 宜万铁路马鹿箐隧道1·21突水突泥抢险治理技术[J]. 铁道工程学报, 2008(11): 49-56.

[7] 黄雄军. 宜万铁路马鹿箐隧道+978溶腔预测预报[J]. 现代隧道技术, 2011, 48(1): 128-132.

[8] 范威, 王川, 金晓文, 等. 吉莲高速公路钟家山隧道涌突水条件分析[J]. 水文地质工程地质, 2015, 42(02): 38-43+51.

[9] 罗雄文, 何发亮. 深长隧道突水致灾构造及其突水模式研究[J]. 现代隧道技术, 2014, 51(1): 21-25, 53.

[10] 冯崇微, 丁国鹏, 刘刚. 第三系半成岩富水隧道突涌机理及治理措施研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2025, 23(3).

[11] 严少洋, 高富强, 王齐, 等. 富水花岗岩质混合岩深埋隧道突涌水灾变机制及防治措施[J]. 公路, 2025, 4(4).

[12] 姜赫, 齐国庆, 王涛. 基于属性识别理论的隧道突涌水危险性评价[J]. 公路, 2024, 10(10).

[13] 杨艳娜. 西南山区岩溶隧道涌突水灾害危险性评价系统研究[D]. 成都理工大学, 2009.

[14] JTG/T3660—2020公路隧道施工技术规范[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2020.

[15] JTG2182—2020公路工程质量检验评定标准第二册机电工程[S]. 北京: 人民交通出版社, 2020.

作者简介:

宋黎明(1986--), 男, 汉族, 四川成都人, 工程师, 本科, 研究方向: 复杂地质条件下隧道施工技术。

*通讯作者:

冯江(1995--), 男, 汉族, 四川成都人, 工程师, 本科, 研究方向: 复杂地质条件下隧道施工技术。