

软岩富水隧道突涌水等级判识及整治关键技术

罗世刚

(中国水利水电第七工程局有限公司, 四川 成都 610213)

摘要:在隧道及地下工程建设过程中,不良地质环境下突涌水的防范及应急处置十分重要,其涉及到隧道的施工进度、环境保护以及公共安全等多个方面。对突涌水的判识通常是从水量、压力、频率和强度等方面进行评估,结合地质勘察报告及水文气象资料等准确判断可能存在的风险。对于突涌水的整治,其首要任务是确定涌水点的位置、规模、压力以及可能影响的范围;其次需要根据隧道及地下工程的结构特点及施工条件等制定出相应的整治方案。阐述了通过总结某软岩富水洞段掌子面对突涌水整治采用的关键施工技术,如洞渣反压回填、掌子面混凝土封闭、增设泄水孔、增设套拱补强初支、加强超前支护及初支段径向加固等措施联合使用,有效地解决了软岩段突涌水整治的难题。

关键词:软岩富水;突涌水;等级判识;隧道

中图分类号:[U25];U215.7

文献标志码: B

文章编号:1001-2184(2024)05-0051-04

Key Technology for Water Inrush Identification and Remediation of Grade in Soft Rock Water-rich Tunnels

LUO Shigang

(Sinohydro Bureau 7 Co., Ltd., Chengdu Sichuan 610213)

Abstract: During the construction process of tunnels and underground engineering, the prevention and emergency treatment of undesirable geological water inrush are very important. It involves many aspects such as the construction progress of the tunnel, environmental protection and public safety. The identification of water inrush is usually evaluated from the aspects of water volume, pressure, frequency and intensity, combined with geological survey reports and hydrometeorological data, so as to accurately judge the possible risks. For the remediation of water inrushes, the first task is to determine the location, scale, pressure and possible scope of influence of the water inrush point. Then, according to the structural characteristics and construction conditions of the tunnel and underground engineering, the corresponding remediation plan needs to be formulated. In this paper, by summarizing the key technologies for the remediation of the inrush of the tunnel face of a water-rich section of soft rock, the measures of backfilling of the slag, concrete sealing of the tunnel face, the addition of drainage holes, the addition of arch reinforcement of the primary support, the strengthening of the advanced support and the radial reinforcement of the primary support section are used together, which effectively solves the problem of water inrush remediation in the soft rock section and provides experience for similar projects in the future.

Key words: Soft rock and rich water; Sudden water surges; Grading discrimination; Tunnel

1 概述

与普通富水隧道和软岩隧道不同,软岩富水隧道为两者结合,比之前两者具有更大的施工难度及风险。软岩富水隧道发生涌水突泥灾害具有突发性强、演变速度快、易引发次生灾害的特点^[1]。在这种地质条件下其导水通道发育、地表水和地下水丰富、人工开挖破坏掌子面的水体平

衡等因素共同作用下,掌子面渗水失稳、形成出水通道并迅速演变扩展,继而发生涌水突泥、地表塌陷等地质灾害。突涌水灾害具有突然性、巨大性,易造成人员伤亡多、经济损失大的特点,对其必须加以高度重视。

某铁路隧道存在软岩、突泥涌水、断层等不良地质条件,其洞身主要穿越绢云母板岩夹千枚岩、炭质板岩、砂砾岩等软质围岩。该地块发育多条

收稿日期:2024-03-03

断层,岩体节理裂隙极为发育,围岩整体破碎,层间黏聚力小,遇水强度变化较大,存在较强的软化性。地下水以构造裂隙水和碳酸盐岩、碎屑岩互层岩溶裂隙水为主,其次为风化带网状裂隙水与孔隙水。其地下水主要以泉的形式沿结构面或地形低洼处排泄。该隧道已发生的最大涌水量达 $1.4 \text{万 m}^3/\text{d}$ 。

2 突涌水发生的情况及原因分析

该隧道施工采用微台阶工法,掌子面开挖揭示围岩为炭质板岩,围岩级别为V级,为一级大变形隧道。在上台阶右侧施工锁脚锚杆时孔内突发承压水喷出,初始水量约为 $600 \text{ m}^3/\text{h}$,喷出距离约为 $5\sim 6 \text{ m}$,施工现场立即启动应急预案,人员紧急撤离并立即组织抽排水,水位最高时淹没至距掌子面 156 m ;连续涌水 3 d 后,掌子面的水量约为 $350 \text{ m}^3/\text{h}$,呈无压流出,此时水位已抽排降至仰拱衬砌端头,安全风险得到控制。经对现场监控量测数据进行分析得知:仰拱初支未封闭成环段落的围岩变形速率有明显增大,初支侵限风险高。

鉴于该隧道岩性主要为炭质板岩,通过对岩石取样成分分析得知:该种岩石的主要成分为黏土矿物,其具有较强的亲水性,导致初支段围岩内

部软化,且因破碎岩体本身成拱效应较差,岩石强度的降低进一步使围岩自承能力丧失,造成初期支护压力增大^[2],继而发生初支侵限。

3 突涌水等级判识的原则

隧道突涌水等级的识别是施工领域至关重要的技术指导标准,其主要用于科学合理地评估地下水水位上升或突然涌水可能对工程项目构成的风险与危害程度^[3]。突涌水等级判识的原则主要是依据两个核心指标:单位时间内地下水水位上升的速度和单位体积岩土体中涌水量的大小,并将以上两个参数划分为不同的等级区间。

对于地下水位的上升速度通常以 mm/d 或者 L/s 为单位,根据其所在地区的地理环境、气候条件以及地层特性等因素确定允许的警戒线和危险阈值。例如,在某些敏感地区,当观测到地下水位在较短的时间尺度内(如 24 h)上升至超过特定数值时,即会被视为潜在突涌水风险信号。

掌子面及前方突涌水风险发生概率为初始风险概率。掌子面及前方突涌水风险发生概率及等级的判识见表1。该判识原则适用于掌子面及其前方的超前地质情况预测。开挖后,当围岩和地下水环境变化后突涌水风险与预报不一致时,地质预报单位应补充预测预报。

表1 掌子面及前方突涌水风险发生概率及等级判识表

突涌水等级	围岩结构	地下水情况	突涌水发生的概率
I级		①无水或渗滴水(0%) ②股状或涌流状清水(3%) ③初期水质浑浊,48 h内水质变清,水量、水压明显衰减,未见堵水、串孔现象(3%~5%)	$P < 10\%$
II级	砂化带(囊)、大型溶槽或溶腔、风化带、蚀变带、断层破碎带、节理密集带(5%)	①股状或涌流状出水,初期水质浑浊,48 h内水质变清,水量、水压无明显变化,存在轻微堵水、串孔现象(5%~15%) ②股状或涌流状出水,水质持续浑浊,48 h后水量、水压略有衰减,存在较明显的堵水、串孔现象(15%~25%)	$P \leq 10\% < 30\%$
III级		①股状或涌流状出水,水质持续浑浊,48 h后水量、水压极不稳定,存在明显的堵水、串孔现象(25%~35%) ②出水持续浑浊,且携带大量泥沙或岩屑(25%~35%) ③穿过压扭性断层下盘进入富水、破碎的上盘部位(25%~35%)	$P \geq 30\%$

掌子面后方的突涌水风险发生概率为施工风险概率。掌子面及前方突涌水风险发生概率及等级的判识见表2。该判识原则适用于掌子面后方的突涌水风险判识。地下水和初支表象出现异常时,设计单位应判识突涌水等级及概率,并发送联系单或预警通知单明确风险和提示风险。

对于预报为突涌水风险II级及以上的段落,

必须加密变形监测断面,每 4 h 监控量测一次,必要时应加密监测频次,全过程高清视频监控。

监测过程视水位上涨速度提前布置好水泵和管路,随时准备抽排;在满足 $600 \text{ m}^3/\text{h}$ 抽排能力的条件下,为防止涌水量增大,在施工现场安装了2条管路、3台离心泵备用;为防止水中淤渣烧损水泵电机,采用吊装装置提升水泵高度。抢险过

表 2 掌子面及前方突涌水风险发生概率及等级判别表

突涌水等级	围岩结构	地下水情况	突涌水发生的概率
I 级		①水质清澈,喷混凝土无剥落或开裂,围岩监控量测正常(0%)	$P < 10\%$
II 级	① II、III 级围岩,围岩稳定(0%)	②初期水质浑浊,48 h 内水质变清,喷混凝土无剥落或开裂,围岩监控量测正常(3%)	$P \leq 10\% < 30\%$
	② IV 级围岩,围岩基本稳定(5%)	③水质持续浑浊,喷混凝土无剥落或开裂,围岩监控量测正常(8%)	
III 级	③ V、VI 级围岩,围岩稳定性差(8%)	④水质持续浑浊,出水点喷混凝土剥落,初支开裂,围岩监控量测异常(30%)	$P \geq 30\%$
		⑤存在堵水现象,水质持续浑浊,出水点喷混凝土剥落,初支开裂,围岩监控量测异常(30%)	
		⑥水质持续浑浊,带压涌水或存在反复堵水现象(30%)	

程中充分利用了现有的资源和设备,及时调动外部支援力量,制定了科学合理的抢险方案,分工明确,协作紧密,有效地控制了涌水的影响范围和程度^[4]。

当浑水流出量超过 $50 \text{ m}^3/\text{h}$ 、伴有异响、出泥水量突然增大、风险段落监控量测速率超过阈值等任一现象发生时,应立即撤人、撤设备并封锁现场。

发生突涌水后,必须杜绝盲目进洞。应通过观察记录、视频监控研判安全形势、确定进洞的时机。原则上:突涌水停止 48 h 或只出清水 48 h 后方可派人抵近观察,单次不超过 2 人;突涌水停止 96 h 或只出清水 96 h 后方可组织现场察看,单次不超过 9 人。

4 针对隧道突涌水采取的整治措施

隧道突涌水整治措施是在判别基础上的一系列工程技术,旨在确保隧道安全、快速地穿越软岩富水地带。

(1)反压回填。在围岩初支变形、水量、水质相对稳定的情况下,立即组织采用硬质石渣反压回填,以防止因洞内水量减少与围岩内部形成压力差而导致初支段发生收敛变形。回填范围为仰拱衬砌端头至掌子面上台阶,采用分层回填的方式,每层回填的高度为 1 m。回填形成坡度并在掌子面附近 10 m 范围形成作业平台,以便于机械设备的运行与操作。回填过程必须严格遵循装载机(挖掘机)和运渣车均不超过 1 台、作业人员(含司机)不超过 3 人的原则。采用硬质石渣反压回填的情况见图 1。

(2)掌子面封闭。反压回填完成后,立即对掌子面进行封闭,以确保有效地支撑围岩,防止掌子面围岩变形和坍塌。掌子面封闭采用 C30 早高强混凝土进行喷护,喷混凝土厚度为 8 cm。由于



图 1 采用硬质石渣反压回填照片

涌水后对围岩的扰动较强,可在初支段拱部预留 3 m 长、 $\Phi 125$ 泵管,采用 C30 常态混凝土泵送回填拱部空腔。

(3)增设泄水孔。采用探孔对塌腔和地下水进行探测以确定塌腔规模与形态及影响范围,再利用其中出水量较大的 2~3 个探孔作为泄水孔,以避免排水能力不足引起围岩含水量增大、水压升高对初期支护产生较大的压力。

(4)超前支护。对掌子面及前方拱部 132° 范围采用 $\Phi 89$ 大管棚进行支护,其环向间距为 0.3 m,单根长 9 m,将管棚前端加工成锥形,且其长度不小于 30 cm。注浆材料采用 1:1 的水泥浆,强度不小于 M10,每个钢管口处一定要安装止浆阀用于止浆,注浆机要求配有压力表,以便在注浆过程中控制压浆,注浆压力值为 1.0 MPa,稳压 5 min。

(5)径向注浆。对于掌子面至仰拱衬砌之间的段落,采用 4.5 m 长、 $\Phi 42$ 钢花管注浆工艺填充拱墙范围内的围岩缝隙可以减缓围岩的变形速率,提高围岩的自承能力。注浆过程中,监理人员需全过程旁站,现场技术人员应做好全程施工记录,包括注浆浆液浓度、压力、注浆量等。

注浆孔采用单臂钻开孔,开孔直径为 48 mm,终孔直径不得小于 42 mm,再埋入钢花管。注浆材料采用水灰比为 1:1 的水泥浆,将注浆压力控制在 1.2 MPa。待注浆达到结束条件后,利用

止浆阀或木塞将注浆孔口堵塞以保持孔内压力、直至浆液完全凝固,保证径向注浆的实施效果。

(6)更换拱架。待变形数据稳定后逐步清除回填的石渣,石渣清除完成后,采用 I22b 型钢拱架从掌子面方向往初支段方向依次更换靠近掌子面的三榀钢拱架,每次换拱的数量不能超过 1 榀,在上台阶与下台阶连接处分别设置两组 4 m 长的 $\Phi 42$ 锁脚锚管进行加强。钢架更换完成后,补打 $\Phi 25$ 低预应力树脂卷中空注浆锚杆,其环纵间距为 $1.2\text{ m}\times 0.8\text{ m}$,其中拱部锚杆长 4 m,边墙锚杆长 5 m。

(7)掌子面掘进。换拱完成后,在掌子面上设置了一个 30 m 深的超前水平钻孔,在上台阶掌子面顶部左右各增加了两组 5 m 长的探孔,角度为斜向上 $10^\circ\sim 20^\circ$,其搭接长度不低于 1.5 m,待无异常情况时方可采用机械开挖进行掌子面掘进,期间安排专职安全员进行盯控,若有涌水、溜塌迹象,立即疏散掌子面附近的施工作业人员。

5 结 语

根据隧道开挖揭示的情况:富水、高地应力软岩、砂化、差异性风化等多种不良地质条件并存甚

(上接第 11 页)

速度也慢。总的来说,在整个振冲碎石桩施工过程中,孔隙水应力产生消散的也较快,对整个施工过程几乎不产生较大影响,且其冲击造成的土体位移为厘米级并均在合理范围内,符合工程的实际情况。

参考文献:

- [1] 关万彬. 基于二维有限元法的土坝渗流分析研究[J]. 黑龙江水利科技, 2021, 49(8): 1-3, 12.
- [2] 黄伟, 贾铭. 基于 ABAQUS 的地铁深基坑开挖渗流场变化的三维有限元分析[J]. 南通职业大学学报, 2022, 36(3): 100-104.
- [3] 陈玉茹. 基于土石坝渗流和坝坡稳定的二维有限元分析[J]. 浙江水利水电学院学报, 2014, 26(4): 13-15.

(上接第 16 页)

- [9] 李金云, 张爱卿, 单炜. 基于简易贯入低液限黏土路基压实度确定方法[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2017, 48(10): 2732-2737.
- [10] 王德银, 唐朝生, 李建, 骆晓伟, 施斌. 干湿循环作用下膨胀土的贯入特性试验研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(1): 57-65, 75.
- [11] 于永堂, 郑建国, 刘争宏, 等. 基于贯入阻力与含水率联测

至叠加,同时还存在常规手段难以准确预测、突破传统经验认知等特点。该隧道突涌水灾害发生后,项目部工程技术人员基于现场调研、技术资料收集、对涌水灾害地质勘察报告进行综合分析^[5],对突涌水等级进行了判识并采取了适当的整治措施,通过反压回填、掌子面及时封闭、超前支护及径向注浆等多种措施联合实施,消除了突涌水灾害的威胁。

参考文献:

- [1] 何均云. 岩溶地层下穿采空区段隧道施工涌水及变形整治技术[J]. 路基工程, 2024, 30(2): 1-6.
- [2] 罗玉虎, 李丹, 刘亮. 摩天岭隧道涌水原因分析及处治措施[J]. 地下空间与工程学报, 2011, 38(2): 408-412.
- [3] 杜义欣. 断层溶蚀带突水涌泥治理施工技术[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(9): 10-14.
- [4] 卿三惠. 高压富水地层超深埋特长隧道施工技术研究[J]. 铁道工程学报, 2009, 9(1): 86-91.
- [5] 姚云晓. 青山隧道渗涌水原因分析及治理措施[J]. 岩土工程界, 2004, 31(10): 66-70.

作者简介:

罗世刚(1987-),男,重庆市人,分局副总工程师,副高级工程师,学士,从事建设工程施工技术与管理管理工作。

(编辑:李燕辉)

- [4] 宋子亨, 杨强, 刘耀儒. 考虑孔隙水应力作用的岩土体弹塑性模型及其有限元实现[J]. 岩土力学, 2016, 37(增刊 1): 500-508.
- [5] 俞伟, 苏枋, 唐新军. 碎石桩加固软土地基处理的有限元分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2013, 11(5): 114-117, 168.

作者简介:

何英建(1994-),男,重庆荣昌人,项目工程部主任,助理工程师,学士,从事水利水电工程施工技术与管理管理工作;

喻健(1990-),男,四川眉山人,项目经理助理,助理工程师,从事水利水电工程施工技术与管理管理工作;

何鑫(1998-),男,四川绵阳人,项目工程部副主任,助理工程师,学士,从事水利水电工程施工技术与管理管理工作;

王盛(1999-),男,江苏常州人,在读硕士研究生,研究方向:水工结构。

(责任编辑:李燕辉)

的黄土填方压实度检测方法[J]. 长江科学院院报, 2018, 35(3): 129-134, 143.

作者简介:

廖茂权(1975-),男,四川眉山人,项目总工程师,副高级工程师,从事水利水电及市政工程施工技术与管理管理工作;

孟运庭(1990-),男,湖南长沙人,项目副总工程师,工程师,从事水利水电及市政工程施工技术与管理管理工作。

(责任编辑:李燕辉)