

尚家湾强岩溶隧道突水突泥伴生灾害源综合分析

袁永才¹, 李术才¹, 李利平¹, 张乾青¹, 孙柏林², 石少帅¹

1. 山东大学 岩土与结构工程研究中心, 山东 济南, 250061;
2. 湖北省保宜高速公路建设指挥部, 湖北 宜昌, 444200

摘要: 通过采用长期预报和短期预报相结合的方式, 准确预报尚家湾强岩溶隧道突水突泥伴生灾害源的规模与空间位置, 结合超前钻探建立综合超前预报体系。针对发生的 3 次突水突泥灾害, 通过现场踏勘和水文地质分析, 查明突水突泥伴生灾害源的来源, 揭示尚家湾隧道突涌灾害源的赋存特征、致灾模式及其致灾机理, 提出突涌灾害是由压力水、泥砂相结合的伴生灾害源和突涌通道 2 部分组成, 伴生灾害源是内在源动力, 突涌通道是灾害源的优势运移路径。同时, 建立集内外结合(隧道内部揭露围岩与地表环境)、综合预报、“循环推进, 交叉评价”、动态补探、综合治理相结合的伴生灾害源探测及防治技术, 提出相应的治理原则、治理方案及后续施工的预防措施。

关键词: 岩溶隧道; 突水突泥; 灾害源; 综合预报

中图分类号: U452

文献标志码: A

文章编号: 1672-7207(2017)01-0203-09

Comprehensive analysis on disaster associated by water inrush and mud gushing in Shangjiawan karst tunnel

YUAN Yongcai¹, LI Shucui¹, LI Liping¹, ZHANG Qianqing¹, SUN Bolin², SHI Shaoshuai¹

1. Research Center of Geotechnical and Structural Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China;
2. Baoyi Expressway Construction Headquarters of Hubei Province, Yichang 444200, China)

Abstract: By combining the application of long-term prediction and short-term prediction in the Shangjiawan Tunnel, the spatial scale and location of associated disaster sources were accurately predicted. A comprehensive prediction system based on advanced drilling results was established. For the three occurring water inrush disasters, detailed hydrogeology analysis and site survey were carried out to identify the source of inrush water, and the distribution and occurrence characteristics of inrush disaster sources and their inrush mode were successfully revealed. The water inrush disaster was composed of associated disaster sources and inrush channel. Associated disaster sources were the source of power and inrush channel was the dominant migration path of disaster source. Furthermore, a set of associated disaster sources detection and prevention technology were established including the internal and external integration (combined the exposing situation of tunnel surrounding rock and the external environment of tunnel site), comprehensive prediction, cycle forward, cross-evaluation, dynamic detection and comprehensive treatment. The corresponding treatment principles, treatment scheme and preventive measures of the subsequent construction aiming at inrush disasters were presented.

Key words: karst tunnel; water inrush and mud gushing; disaster sources; comprehensive prediction;

收稿日期: 2016-01-24; 修回日期: 2016-03-18

基金项目(Foundation item): 国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2013CB036000); 国家自然科学基金重点资助项目(51139004); 国家自然科学基金面上资助项目(51479106) (Project(2013CB036000) supported by the National Basic Research Development Program (973 Program) of China; Project(51139004) supported by the Key Program of the National Natural Science Foundation of China; Project(51479106) supported by the General Program of the National Natural Science Foundation of China)

通信作者: 袁永才, 博士研究生, 从事地质灾害超前预报与防治研究; E-mail: yuanyc924@163.com

随着水利水电工程、交通工程等国家基础设施工程建设的不断推进,在岩溶山区尤其在西部岩溶山区将产生数量众多的深长岩溶隧道^[1]。突水突泥成为岩溶隧道主要灾害地质灾害之一,随着隧道和地下工程规模的不断扩大,突水突泥灾害日益严重^[2-3]。隧道工程中发生突涌灾害的基本条件为:充足的水源(部分含有泥砂),水源与隧道间形成了顺畅的运移通道。白明洲等^[4]基于齐岳山隧道,立足于研究岩溶形成控制性因素,分析了岩溶突水发生发展的规律,为后期隧道施工提供了指导;李晓昭等^[5]研究了导致突水事故发生的断层变形活化机制,得到突水与断层活化之间的时空效应特征;杨兵^[6]基于马鹿箐隧道发生的突水灾害,通过采用水文地质分析方式查明了发生突水灾害时水的来源。近年来,研究者针对岩溶隧道突水突泥机制进行了大量研究,李围^[7]通过识别突水通道的形成特点,研究了突水通道的形成过程和隧道突水发生模式;GISBERT 等^[8]通过研究隧址区水文地质特征及降雨对突水灾害的影响,得到优势运移路径的判别方法;COLI 等^[9]研究了岩体的渗透性、表征单元和非连续性,总结了隧道涌水量估算方法。近几年人们关于岩溶隧道突水突泥灾害的研究主要集中在对岩溶隧道突涌灾害的风险评价^[10-12]、超前地质预报^[13-15]、隧道突涌灾害治理^[16-18]等方面,而针对发生突涌灾害时伴生灾害源方面研究甚少,在综合考虑外部环境与隧址区岩溶地质方面未进行细致研究,缺少一种集内外结合(内部隧道施工揭露地质与外部隧址区环境)、综合预报、“循环推进,交叉评价”、动态补探、综合治理相结合的突水突泥伴生灾害源探测及防治技术。为此,本文作者通过对保宜(保康—宜昌)高速公路尚家湾隧道工程地质资料进行分析,采用综合超前地质预报的方法准确预测了伴生灾害源空间位置,经过现场踏勘,查明突涌水的来源及汇集方式;同时,阐述灾害源的赋存特征与突涌模式,分析突涌水发生机理;针对尚家湾隧道突水突泥灾害,建立集内外结合(隧道内部施

工揭露围岩与地表环境)、综合预报、“循环推进,交叉评价”、动态补探、综合治理相结合的突水突泥伴生灾害源探测及防治技术,提出合理的治理建议和预防措施,以便为今后类似工程灾害提供借鉴。

1 工程概况

尚家湾隧道为保宜高速公路襄阳段中的一座分离式隧道,左线长 3 865 m,右线长 3 859 m。隧道洞身地层为上白垩系罗镜滩组石灰质砾岩,地表岩溶发育,分布大量的洼地、落水洞、漏斗,大气降水直接通过落水洞、漏斗灌入地下,并通过地下河流向深切河谷,为典型强岩溶隧道,施工风险极大。

隧址区断裂构造发育,存在主体构造规模巨大的通城河断裂带。该断裂带始于后坪,经马良、通城河向南延伸,基本与通城河相伴平行展布,系由一组宽为 1~2 km 的断裂带组成。地貌上沿断裂带普遍见由远安地堑所形成的负地形,断裂沿线断层陡崖和断层三角面发育,断层显示上盘下降的正断层,断层倾向东或北东。

隧址区还发育北东向曾家沟断裂、尚家湾断裂,北西向的任家沟断裂。其中,主要影响隧道的断裂为尚家湾断裂,如图 1 所示。

2 综合超前预报

传统的超前地质预报技术单一,难以准确预报隧道掌子面前方灾害源,同时未形成长期与短期相结合的综合预报技术体系。对此,尚家湾隧道在施工过程中采用长期超前预报(tunnel seismic prediction, TSP)与短期超前预报(地质雷达)相结合的方法,同时施作超前钻探真实有效的揭露危险灾害源,避免突涌灾害发生。

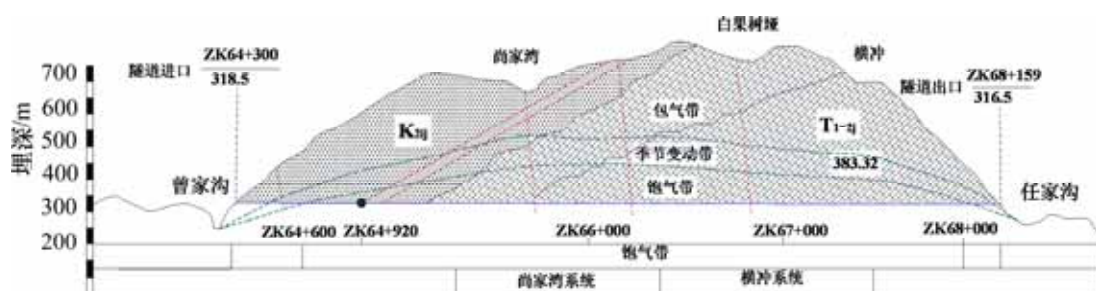


图 1 尚家湾隧道地质剖面图

Fig. 1 Geological section of the Shangjiawan Tunnel

2.1 TSP 探测

TSP 是基于 TSP win 软件, 通过对传感器接收的人造地震波信号进行处理, 记录隧道前方不同岩体级别的 P 波和 S 波。TSP203 plus 确定掌子面前方围岩波速的理论和数据处理过程, 以及波场分离、侧向回波滤处, 具体参见文献[19-21]。同时计算预报范围内岩石的力学参数、波速、泊松比、弹性模量、抗压强度等^[19-21]。

设 R 为地震波在岩层波阻抗面上的反射系数, A_i 和 A_r 分别为入射波和反射波的振幅, ρ_1 和 ρ_2 分别为介质的密度, v_1 和 v_2 为地震波在介质中的传播速度, 则反射系数可表示为

$$R = \frac{\rho_2 v_2 - \rho_1 v_1}{\rho_2 v_2 + \rho_1 v_1} \quad (1)$$

反射波振幅表示为

$$A_r = R A_i \quad (2)$$

地震波以 P 波和 S 波的形式进行反射, 其在均匀介质中的传播速度可表示为

$$\begin{cases} v_p = \sqrt{E/\rho} \\ v_s = \sqrt{G/\rho} \end{cases} \quad (3)$$

式中: v_p 为 P 波波速; v_s 为 S 波波速; E 为传播介质的压缩模量; G 为传播介质的剪切模量。

据此, 反射波振幅越大, 反射系数和波阻抗的差别越大, 岩性差异也越大; 若 P 波波速下降, 则裂隙密度或空隙度增加。

2013-05-18, 地质预报单位采用最新型号的隧道地质超前预报系统(TSP203 plus)对保宜高速公路尚家湾隧道进口段左线进行了超前地质预报, 预报里程桩号为 ZK64+855~ZK64+980。在成果解译中, 以反射层提取图以及岩石物性参数等一系列成果进行解译, 结合式(1)~(3)的分析结果, 并遵循以下准则:

- 1) 在硬岩地层中呈现正反射振幅, 在软岩地层中呈现负反射振幅;
- 2) 饱和岩层中, S 波的反射强度比 P 波的反射强度高;
- 3) 在赋存流体区域内, v_p/v_s 和泊松比 δ 会突然增大;
- 4) 某一区域内岩体裂隙增多, 岩体呈破碎状, 则 v_p 降低。

利用 TSP win 软件对采集的数据进行处理, 获得反射层提取图以及岩石物性参数等一系列成果, 如图 2 和图 3 所示。

通过对成果解译可知: ZK64+910~916 范围内围岩泊松比增大, 反射层提取图中负反射强烈, 同时 P

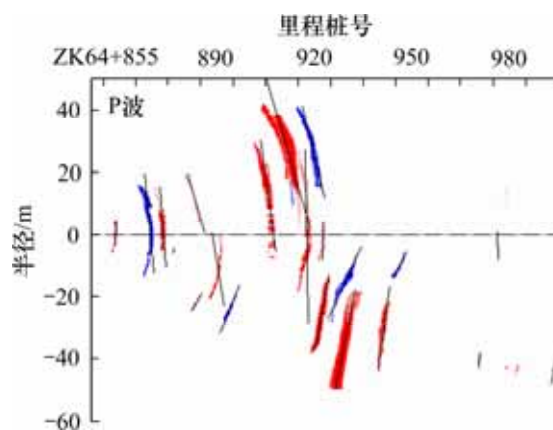
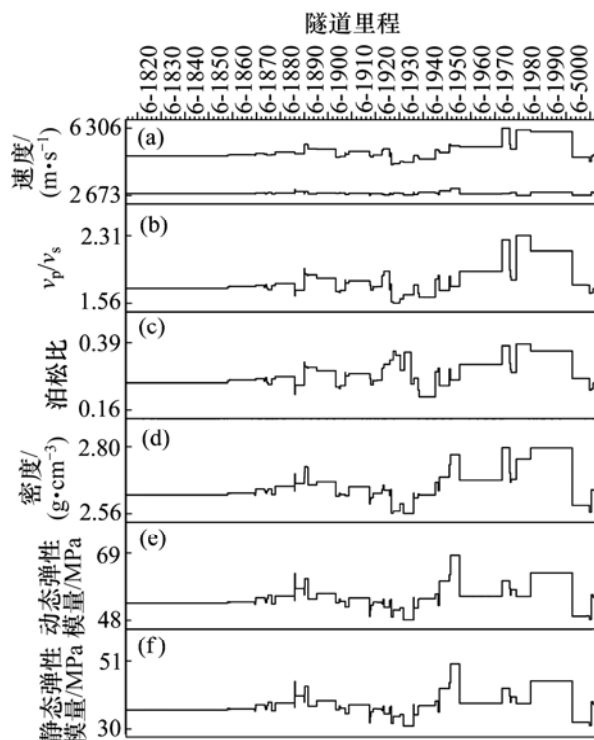


图 2 反射层提取图

Fig. 2 Reflector extraction diagram



(a) 速度; (b) v_p/v_s ; (c) 泊松比; (d) 密度; (e) 动态弹性模量; (f) 静态弹性模量

图 3 岩石物性参数

Fig. 3 Physical properties of rock mass

波波速下降, 且 S 波的反射强度比 P 波的反射强度高, 由此表明该范围内围岩节理裂隙发育, 岩体间赋存裂隙水, 充填物丰富。ZK64+916~946 范围内地震波在围岩中传播时的波速显著下降, 反射层提取图中负反射强烈。特别是在 ZK64+916~926 范围内密度也出现显著降低, v_p 降低, 表明该范围内围岩风化程度较高, 含水量较高, 且蚀变软弱结构面发育。

2.2 超前钻探

针对现场施工揭露围岩岩体裂隙水逐渐增多现

象, 结合前期 TSP 预报结果, 为防止大型突水事故的发生, 2013-05-31 对尚家湾隧道进口左线 ZK64+916 掌子面开展了一次短距离超前钻探工作。现场布设 3 个钻孔, 钻孔位置布设于掌子面中部及两侧, 如图 4 所示, 距离地面约 1.2 m 处, 每根钻杆长度为 1 m。

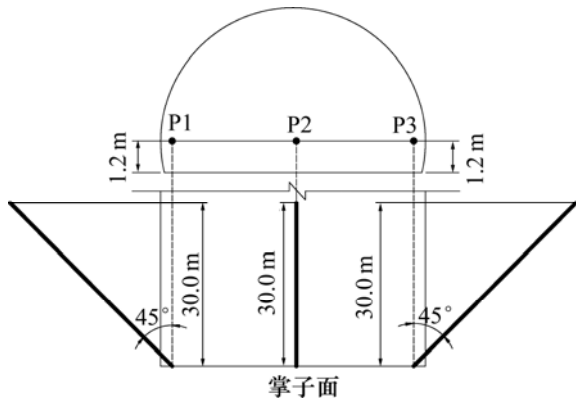
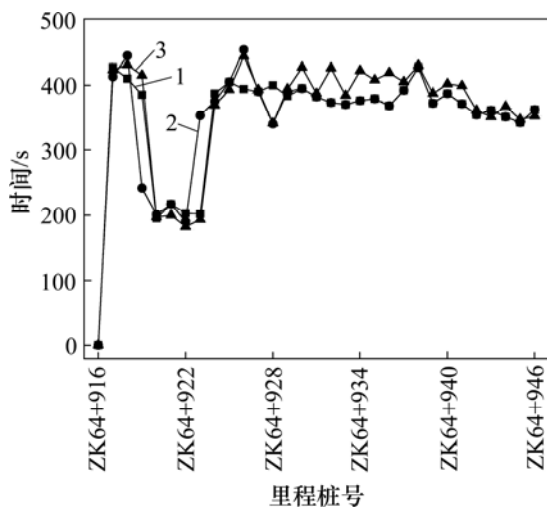


图 4 钻孔布设示意图

Fig. 4 Distribution of drill holes (P1, P2, P3) on tunnel face

根据现场钻杆钻进记录情况可得: 钻至 ZK64+918~920 时, 钻探声音较小, 钻进速度较快, 且钻杆存在突进现象, 掌子面有水流出, 推测此段围岩较破碎, 可能存在含水溶腔; 钻至 ZK64+920~922 时, 钻探声音小, 钻探速度快, 钻进过程中钻杆出现多次明显突进, 钻孔流水继续增大, 推测此段围岩可能存在含水夹泥溶腔, 岩体破碎。

各钻孔内钻杆的钻进时间记录如图 5 所示。其中在 ZK64+919~920 段, 流出水量最大, 存在突水现象, 如图 6 所示。



1—P1; 2—P2; 3—P3。

图 5 钻进时间记录

Fig. 5 Time records of advanced drilling

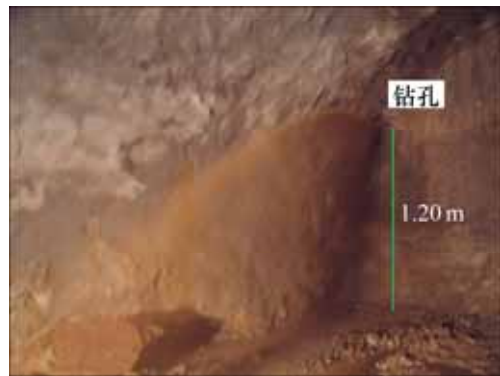


图 6 钻孔突水

Fig. 6 Phenomenon of water inrush from drill hole

2.3 地质雷达探测

2013-05-31 T01:00, 尚家湾隧道施工至 ZK64+918 时, 掌子面施作炮孔钻探过程中, 左侧拱肩处炮孔发生涌水, 水质浑浊, 水压达 2 MPa, 涌水量约为 200 m³/h。为准确探清掌子面前方是否存在大型岩溶含水构造, 对 ZK64+918 掌子面开展了一次短距离地质雷达超前探测。

1) 雷达测线布置。地质雷达天线频率为 100 MHz, 采集样本点为 512。测线布置如图 7 所示。

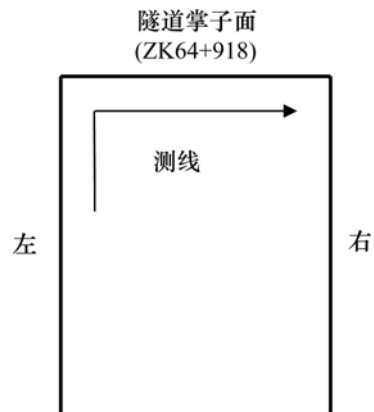


图 7 地质雷达测线

Fig. 7 Survey line of geological radar

2) 探测分析。地质雷达探测范围为 ZK64+918~938。根据雷达测试结果如图 8 所示: 1) 左边墙后方 3~6 m 范围内, 雷达信号反应强烈, 且下方信号突然减弱, 主频降低, 同相轴出现异常, 据此推测该处含水量较高, 可能存在导水裂隙; 2) 掌子面前方 ZK64+922~ZK64+936 段雷达反射信号反应强烈, 下方信号逐渐减弱, 同相轴出现不连续现象, 波形出现反向位特征, 据此表明该段围岩节理裂隙发育, 含水量较高, 根据隧道掌子面涌水情况, 分析该处裂隙含水, 且夹泥量较多。

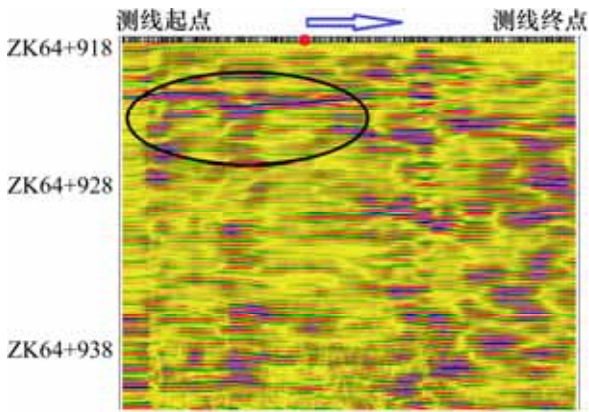


图8 地质雷达探测结果

Fig. 8 Detection results of geological radar

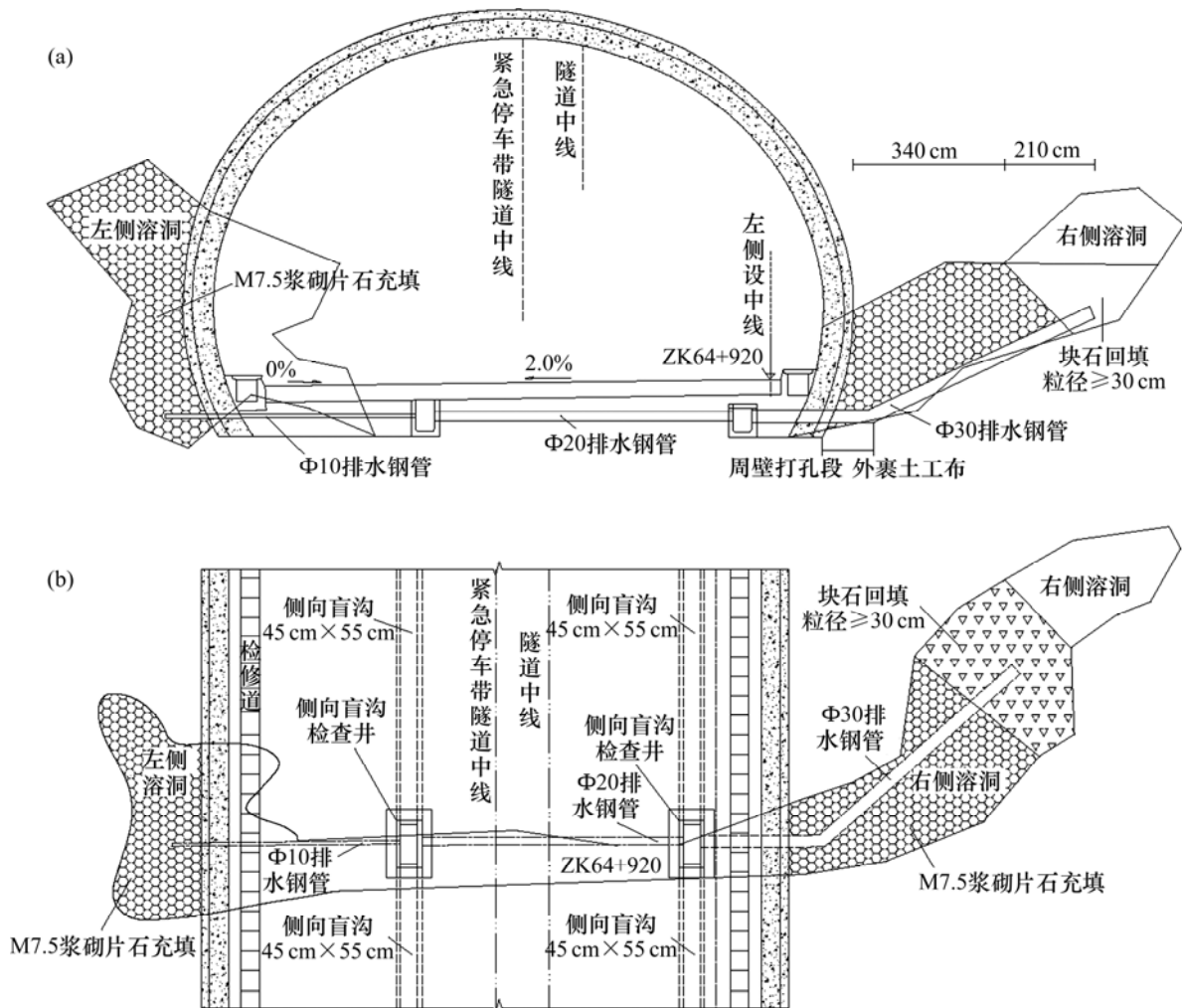
同时, 建议施工单位密切观察涌水情况: 水质是否变清; 水量是否逐渐减小; 若出现强降雨, 涌水量

是否有增大趋势等信息。此外, 施工单位应结合地质预报结果, 进行超前水平钻探工作, 查明左边墙及掌子面前方含水情况、涌水通道情况。探清该段地质情况后, 再进行施工。

2.4 开挖揭露

尚家湾隧道 ZK64+920 掌子面左侧溶洞高 1.6~3.5 m, 宽 1.5~4.0 m, 纵深达 10 m, 淤泥较厚, 无明显出水口, 内壁光滑; 掌子面右侧溶洞高 1.6~3.5 m, 宽 1.5~4.0 m, 纵深达 30 m 以上, 水流一直向前延伸, 但由于掉落石块堵塞通道, 人员无法继续向前通行, 洞内淤泥较多, 内壁光滑, 为常流水通道, ZK64+920 处溶洞发育情况如图 9 所示。

同时揭露了尚家湾隧道右线 YK64+957 掌子面溶洞从左侧拱腰部位一直延伸至左线溶洞处。左右线溶洞揭露情况表明, 此处为一大型岩溶管道。



(a) 隧道横断面图; (b) 平面图

图9 溶洞发育情况及其治理示意图

Fig. 9 Diagrams of development situation and treatment of karst cave

3 突水突泥伴生灾害源

3.1 突涌灾害简况

1) 第 1 次突水突泥。2013-06-04T09:30 放炮结束,对掌子面检查,溶洞暴露,与之前估计位置基本相符,没有增加新的涌水点,继续进行出渣;13:05 掌子面右下部出渣中有泥水流出,为新增涌水点,随即停止出渣,迅速通知洞内作业人员全部撤离,随即涌泥量增加,流速增大;13:12 人员全部撤离出洞,涌泥同时迅速涌至洞口,涌泥涨落高度为 30~60 cm,同时部分流入隧道两侧水沟中,通过之前在洞口埋设的直径为 60 cm 钢管排出;瞬间突水、突泥量达到 7 700 m³,50 cm 深的泥水顷刻间涌出洞口。

2013-06-07,洞内清淤后,对掌子面溶洞进行勘察,左线右侧溶洞内仍有大量的淤泥,水、泥夹杂砂粒往外流出。

2) 初步处置方案。结合溶洞情况,经建设单位、设计单位、监理单位、施工单位联合研究决定,对左线洞身两侧溶洞进行混凝土回填封堵,预留直径为 10 cm 钢管排水,引入隧道边沟,对 ZK64+919~ZK64+923 段拱底溶腔通道,采用 C10 混凝土进行回填封闭,溶洞段 ZK64+919~ZK64+931 原设计 ST3 复合衬砌,调整二衬厚度为 50 cm,增设二衬钢筋。

3) 第 2 次突水突泥。2014-04-20T03:00 尚家湾隧道进口左线 ZK64+920 处溶洞再次发生突水突泥,泥水从浆砌挡墙中间的预留排水管中喷出,水压较大,喷射距离达 5 m,涌水较为浑浊,携带大量细质泥沙;2014-04-21 水量有所增大,从溶洞顶侧壁边喷出;2014-04-22 水量有所减小;2014-04-23T21:00,大量泥沙及涌水从溶洞底部涌出,泥沙堵塞隧道路面,厚度达 1 m 左右;2014-04-24 泥水从溶洞底部预留排水管中排出,水量较小。

4) 第 3 次突水突泥。2014-08-24—2014-09-02,隧址区连续强降雨,导致尚家湾隧道 ZK64+920 处溶洞再次发生突水突泥事故。泥沙及涌水从溶洞底部涌出,泥沙堵塞隧道路面,厚度为 1.0~1.2 m,泥水迅猛涌出,水压较高、流速较快,在隧道内形成小型水浪,迅速涌至隧道洞口,预先埋设的直径为 60 cm 排水管处于满管排水状态。

3.2 伴生灾害源的赋存特征

通过对近 50 年 100 余例隧道突涌案例的统计分析,将突水突泥伴生灾害源划分为裂隙蓄水型、断层蓄水型、溶洞蓄水型、岩溶管道蓄水型和地下暗河蓄

水型^[2-3, 17, 22-28]。

尚家湾隧道地表岩溶发育,分布大量的洼地、落水洞、漏斗,大气降水直接通过落水洞、漏斗灌入地下,并通过地下河流向深切河谷,受北东向尚家湾断裂带影响,地下形成暗河与岩溶通道。隧道地貌区出露地层为白垩纪系紫褐红色厚层砂岩、砂砾岩、砾岩、泥岩、钙质泥灰岩。由于砾岩多为泥质胶结的石灰质砾岩,气候温和多雨有利于岩溶、垂直与水平管道发育,漏斗、溶洞、落水洞、地下河常连成一体。结合尚家湾隧道施工现场揭露情况可判定,此突涌灾害源为岩溶管道与地下暗河复合蓄水型。

隧址区发育的溶洞、岩溶管道及地下暗河,受施工开挖影响改变了其原有泥水流动方式,产生伴生突涌灾害。

3.3 突涌灾害模式

突涌灾害是由伴生灾害源、突涌通道两部分组成。伴生灾害源主要为水与泥砂相伴而成,有压水裹挟泥砂喷涌而出,是内在源动力;隧道开挖扰动引起围岩应力重分布,改变了围岩应力状态和地下水的流动状态,打破了原有地表水下渗和地下水径流的通道,加速了水循环,揭露的岩溶管道成为最有利于水源运移的通道和路径,因此,突涌通道是灾害源的优势运移路径。

突涌灾害发生过程是含水介质系统、水动力系统以及围岩力学平衡状态因隧道开挖而发生急剧变化,存贮在地下的水体能量瞬间释放,以流体的形式携带泥砂、岩屑等高速地向开挖临空面内运移的一种动力破坏模式。其中,瞬间释放的水体裹挟泥砂、岩屑形成复杂介质的伴生灾害源,由伴生灾害源引发的灾害为伴生灾害。

3.4 突涌灾害机理

2013-05-31 发生突涌灾害前 2 d 内曾出现强降雨,涌出泥砂中含有松子,推测该处突水涌泥水源的一部分来源于地表。2014-04-10—2014-04-19 和 2014-08-24—2014-09-02,尚家湾隧道隧址区均出现持续强降雨现象。3 次突涌灾害都是发生在强降雨后,同时随着降雨结束,突涌水量减小,进一步说明突涌灾害源的一部分来源于地表。

从水文地质特征看:尚家湾隧道地下岩溶水系统主要以岩溶管道为储存空间和运移通道,接受大气降水补给,其补给方式为:大气降雨—岩溶洼地汇集—岩层间裂隙灌入—地下岩溶水体,且径流排泄畅通,流量季节性变化明显。同时,位于尚家湾断裂带地表处,存在一特大型洼地,降雨时,周围各处水流都汇聚于此,通过洼地补给地下径流,导致地下水流量大

幅度增加。

外因则为尚家湾隧道的开挖扰动,隧道爆破开挖导致隔水阻泥层强度与整体性降低,打破了该处岩溶管道原有的流动模式,积蓄已久的泥水伴生灾害源发生能量释放,向隧道内运移造成突涌灾害。

4 治理与预防措施

4.1 治理

隧道工程中突遇岩溶管道时,常常采用引排水法、堵填法、跨越法、绕避法等对岩溶管道进行治理。治理过程遵循以下原则:1)管道型突涌水治理与伴生裂隙涌水治理相结合;2)治理过程中应特别注意生态环境保护,避免对地下水生态环境造成污染和危害;3)限量排放与跟踪监控相结合。

尚家湾隧道左线 ZK64+920 处岩溶管道水流主要来源于大气降水的汇集,持续强降雨水是导致隧道岩溶管道突水突泥的主要原因,属于季节性强补给型岩溶管道。

针对季节性强补给大型岩溶管道发生突水涌泥灾害时压力高,流量大,突水过程中夹杂大量泥砂、块石,容易形成成分复杂的伴生灾害源,且其水量补给广,与当地环境联系紧密的特点,采取引排为主,拦排结合的治理方案。

首先,保持利用好原岩溶管道的排泄管道,不能随意封堵。隧道采用跨越法穿过岩溶管道区,并在与岩溶管道相交的隧道底板处设置大孔径排泄管道,以维持原有岩溶地下水的流动方式。

其次,在隧道岩溶管道内设置缓冲层,拦截大粒径块石,防止引起排泄管道堵塞及地表塌陷,保证山岭隧道址区生态环境。

再次,岩溶管道与左、右隧洞相交处施作混凝土挡墙,使岩溶水不能通过下游管道流向左、右线洞内,减小岩溶水对隧洞的危害。

最后,采取岩溶管道防护层、结构保护层、初支加强层等综合措施治理。

对于地下水与地表水有直接水力联系的隧道,由于地下水水量及水压随降雨量变化,施工中应尽快将围岩自身承载力、初期支护和二次衬砌有机地结合起来,共同抵御水压,避免各工序间隔时间过长,造成单一支护方式抵抗水压。此外,当二次衬砌不能紧跟时,应考虑提高初期支护强度。

尚家湾隧道左线 ZK64+920 处岩溶管道的治理方案,如图 9 所示,其中:

1) 采用疏通方案,将溶腔内岩溶水引排至路基侧向盲沟内排出至洞外。

2) ZK64+917~931 段由 ST3b 复合式衬砌调整为 ST3a 复合式衬砌。

3) 在 ZK64+920 路基两侧增设盲沟检查井,检查井需定期清淤。

4) 直径为 30 cm 排水钢管打孔段布置与衬砌拱脚处,打孔段长约 1 m,孔径为 4 cm,梅花形布置,打孔段钢管外裹 350 g/m² 无纺布。

4.2 预防措施

1) 内外结合(隧道内围岩揭露情况与外部隧址区环境相结合)。在隧道施工过程中,动态分析围岩变化情况,根据地质勘查资料全面把握掌子面前方围岩可能存在的灾害源赋存环境。

2) 综合预报。在隧道开挖过程中,采用长期与短期相结合的综合物探技术进行连续超前地质预报。针对灾害源赋存明显区域开展超前钻探,提高灾害源辨识度。采用激发极化法和瞬变电磁法探测隧道前方含水构造的位置和规模,提高对含水水体水量的辨识度。

3) 循环推进,交叉评价。仔细研究施工前方地质勘查资料,结合最新的超前物探资料,采用循环推进、交叉评价的层位及构造探控方式,进一步查明施工前方的地质构造情况,重点评价地质构造异常区、物探解释的灾害源赋存区,保证施工安全。

4) 动态补探。在发现灾害源赋存后,及时采取补探,以明确灾害源走势与规模。准确判定灾害源的三维空间位置,便于提前采取预防措施。

5) 综合治理。建立一套完整的灾害防治技术,针对发生的突涌灾害进行综合治理。

5 结论

1) 尚家湾隧道突涌灾害源主要来自地表降水汇集,隧道施工开挖扰动和持续强降雨水是导致隧道岩溶管道发生突涌灾害的主要原因,属于季节性强补给型岩溶管道突涌灾害。

2) 揭示了尚家湾隧道突涌灾害源的赋存特征,同时提出了突涌灾害是由伴生灾害源、突涌通道两部分组成。伴生灾害源是内在源动力,突涌通道是灾害源的优势运移路径。

3) 施工采用的综合超前地质预报手段是可靠有效的,准确预报了灾害源的位置与走势。

4) 针对突涌灾害事故,提出了相应的治理原则、治理建议、治理方案及后续施工的预防措施。

参考文献:

- [1] 余诗刚, 林鹏. 中国岩石工程若干进展与挑战[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(3): 433-457.
SHE Shigang, LIN Peng. Some developments and challenging issues in rock engineering field in China[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(3): 433-457.
- [2] 李利平, 路为, 李术才, 等. 地下工程突水机理及其研究最新进展[J]. 山东大学学报(工学版), 2010, 40(3): 104-118.
LI Liping, LU Wei, LI Shucui, et al. Research status and developing trend analysis of the water inrush mechanism for underground engineering construction[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2010, 40(3): 104-118.
- [3] 李利平, 李术才, 张庆松. 岩溶地区隧道裂隙水突出力学机制研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(2): 523-528.
LI Liping, LI Shucui, ZHANG Qingsong. Study of mechanism of water inrush induced by hydraulic fracturing in karst tunnels[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(2): 523-528.
- [4] 白明洲, 许兆义, 王连俊, 等. 复杂岩溶地区隧道施工突水地质灾害研究[J]. 中国安全科学学报, 2006, 16(1): 114-118.
BAI Mingzhou, XU Zhaoyi, WANG Lianjun, et al. Study on water outburst geological disaster of tunnel construction at complicated karst zone[J]. China Safety Science Journal, 2006, 16(1): 114-118.
- [5] 李晓昭, 罗国煜, 陈忠胜. 地下工程突水的断裂变形活化导水机制[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(6): 695-700.
LI Xiaozhao, LUO Guoyu, CHEN Zhongsheng. The mechanism of deformation and water conduction of fault due to excavation in water inrush in underground engineering[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24(6): 695-700.
- [6] 杨兵. 宜万铁路马鹿箐隧道岩溶灾害的工程处治技术[J]. 地下空间与工程学报, 2011, 7(3): 581-586.
YANG Bing. Treatment techniques for karst disaster of Maluqing tunnel on Yichang-Wanzhou railway[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2011, 7(3): 581-586.
- [7] 李围. 岩溶山区公路隧道施工突水的机理和模式分析[J]. 贵州大学学报(自然科学版), 2009, 26(6): 125-128.
LI Wei. Analysis on mechanisms and modes of water inflow behavior with highway tunnel constructed in karst mountainous areas[J]. Journal of Guizhou University (Natural Sciences), 2009, 26(6): 125-128.
- [8] GISBERT J, VALLEJOS A, PULIDO-BOSCH A. Environmental and hydrogeological problems in karstic terrains crossed by tunnels: a case study[J]. Environmental Geology, 2009, 58(2): 347-357.
- [9] COLI M, PINZANI A. Tunneling and hydrogeological issues: a short review of the current state of the art[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2014, 47(3): 839-851.
- [10] 周宗青, 李术才, 李利平, 等. 岩溶隧道突涌水危险性评价的属性识别模型及其工程应用[J]. 岩土力学, 2013, 34(3): 818-826.
ZHOU Zongqing, LI Shucui, LI Liping, et al. Attribute recognition model of fatalness assessment of water inrush in karst tunnels and its application[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(3): 818-826.
- [11] 许振浩, 李术才, 李利平, 等. 基于风险动态评估与控制的岩溶隧道施工许可机制[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(11): 1715-1725.
XU Zhenhao, LI Shucui, LI Liping, et al. Construction permit mechanism of karst tunnels based on dynamic assessment and management of risk[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(11): 1715-1725.
- [12] 刘超, 唐春安, 李连崇, 等. 基于背景应力场与微震活动性的注浆帷幕突水危险性评价[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(2): 366-372.
LIU Chao, TANG Chunan, LI Lianchong, et al. Analysis of probability of water inrush from grout curtain based on background stress field and micro seismicity[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(2): 366-372.
- [13] 李术才, 刘斌, 李树忱, 等. 基于激发极化法的隧道含水地质构造超前探测研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(7): 1297-1309.
LI Shucui, LIU Bin, LI Shuchen, et al. Study of advanced detection for tunnel water bearing geological structures with induced polarization method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(7): 1297-1309.
- [14] 刘斌, 李术才, 李树忱, 等. 电阻率层析成像法监测系统对矿井突水模型试验中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(2): 297-307.
LIU Bin, LI Shucui, LI Shuchen, et al. Application of electrical resistivity tomography monitoring system to mine water inrush model test[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(2): 297-307.
- [15] 王鹰, 陈强, 魏有仪, 等. 红外探测技术在圆梁山隧道突水预报中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(5): 854-857.
WANG Ying, CHEN Qiang, WEI Youyi, et al. Application of infrared acquisition technology in prediction of water gushing in Yuanliangshan tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(5): 854-857.
- [16] 张梅, 肖广智, 赵西民, 等. 张集铁路旧堡隧道 F3 断层带突水突泥处治技术[J]. 现代隧道技术, 2011, 48(4): 1-5.
ZHANG Mei, XIAO Guangzhi, ZHAO Ximin, et al. Water and mud outburst treatment for F3 fault of the Jiubao Tunnel on the Zhangjiako-Jining Railway[J]. Modern Tunnelling Technology, 2011, 48(4): 1-5.
- [17] 李利平, 李术才, 崔金声. 岩溶突水治理浆材的试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 32(12): 3642-3648.
LI Liping, LI Shucui, CUI Jinsheng. Experimental research on

- chemical grout for treating waer intrush in rock mass[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 32(12): 3642–3648.
- [18] 张民庆, 孙国庆. 隧道工程突泥突水灾害处治技术[J]. *现代隧道技术*, 2011, 48(6): 117–123.
ZHANG Minqing, SUN Guoqing. Technology for treating mud and water bursts in tunneling[J]. *Modern Tunnelling Technology*, 2011, 48(6): 117–123.
- [19] 周文峰. 地震反射波法(TSP)在隧道地质超前预报中的应用研究[D]. 成都: 成都理工大学地球物理学院, 2009: 47–49.
ZHOU Wenfeng. The application and research of seismic reflection wave method (TSP) in the tunnel geological prediction[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology. School of Geophysics, 2009: 47–49.
- [20] 许振浩, 李术才, 张庆松, 等. TSP 超前地质预报地震波反射特性研究[J]. *地下空间与工程学报*, 2008, 4(4): 640–644.
XU Zhenhao, LI Shucai, ZHANG Qingsong, et al. Reflection characteristic of seismic wave in TSP advance geological prediction[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2008, 4(4): 640–644.
- [21] 薛翎国, 李术才, 张庆松, 等. TSP203 超前预报系统探测岩溶隧道的应用研究[J]. *地下空间与工程学报*, 2007, 3(7): 1187–1191.
XUE Yiguo, LI Shucai, ZHANG Qingsong, et al. Application of TSP203 advanced prediction to tunnel in karst areas[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2007, 3(7): 1187–1191.
- [22] 周军伟. 白云隧道突水、突泥段施工技术[J]. *隧道建设*, 2011, 31(4): 504–509.
ZHOU Junwei. Coping with mud/water bursting in tunnel construction: case study on Baiyun Tunnel[J]. *Tunnel Construction*, 2011, 31(4): 504–509.
- [23] 许文锋. 海底隧道突水涌泥机理及对策研究[J]. *海洋技术*, 2009, 28(2): 73–76.
XU Wenfeng. Study on mechanism and countermeasure of water intrush and burst mud in subsea tunnel[J]. *Ocean Technology*, 2009, 28(2): 73–76.
- [24] 刘宝臣, 向志坤, 林玉山, 等. 锦屏二级水电站隧洞工程岩溶涌突水机理[J]. *桂林工学院学报*, 2008, 28(4): 484–488.
LIU Baochen, XIANG Zhikun, LIN Yushan, et al. Karst tunnel water gushing mechanism in Jinping stage 2 hydropower station[J]. *Journal of Guilin University of Technology*, 2008, 28(4): 484–488.
- [25] 姜云, 王兰生. 深埋长大公路隧道高地应力岩爆和岩溶涌突水问题及对策[J]. *岩石力学与工程学报*, 2002, 21(9): 1319–1323.
JIANG Yun, WANG Lansheng. Problems of high stress rock burst and water outburst and countermeasures in deep and long tunnels[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2002, 21(9): 1319–1323.
- [26] 陈绍林, 李茂竹, 陈忠恕, 等. 四川广(安)—渝(重庆)高速公路华釜山隧道岩溶突水研究与整治[J]. *岩石力学与工程学报*, 2002, 21(9): 1344–1349.
CHEN Shaolin, LI Maozhu, CHEN Zhongshu, et al. Study and treatment on karst water outburst in Huangyingshan Tunnel for Anyu expressway from Guangan of Sichuan to Chongqing[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2002, 21(9): 1344–1349.
- [27] 余林辉. 隧道涌突水的原因和预测预报方法[J]. *隧道建设*, 2012, 32(2): 164–168.
SHE Linhui. Causes for water inflow/bursting in tunneling and its prediction methods[J]. *Tunnel Construction*, 2012, 32(2): 164–168.
- [28] 王国斌, 晏鄂川, 杨文东. 乌池坝隧道岩溶发育特征与突水机理研究[J]. *武汉理工大学学报*, 2008, 32(8): 152–156.
WANG Guobin, YAN Echuan, YANG Wendong. Research on development and water burst mechanism of karst in Wuchiba Tunnel[J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2008, 32(8): 152–156.

(编辑 杨幼平)