

付开隆, 周羽, 韦正雄. 贵南高铁朝阳隧道出口平导 6.10 突水突泥事件分析[J]. 中国岩溶, 2022, 41(6): 895-904.
DOI: 10.11932/karst20220604

贵南高铁朝阳隧道出口平导 6.10 突水突泥事件分析

付开隆, 周羽, 韦正雄

(中铁二院工程集团有限责任公司, 四川 成都 610031)

摘要: 2018年6月10日, 朝阳隧道出口平导发生岩溶突水突泥, 持续时间约1 h, 突水突泥总量约 $1.6 \times 10^6 \text{ m}^3$ 。为完善施工掘进方案及排水方案, 需分析突水突泥产生原因, 评价后续施工带来的突水突泥风险, 计算隧道涌水量。文章分析了隧道位置的地形地貌、工程地质、水文地质条件, 阐述了发生突水突泥的平导掌子面超前地质预报实施情况及突水突泥发生过程, 补充调查了灾害影响范围的工程地质、水文地质条件, 完成了长达1年的平导涌水量—降雨量关系动态观测。平导突水突泥掌子面前方有水头高达84 m的巨型溶腔及管道系统, 施工开挖揭穿溶腔底部后, 填充于整个岩溶水系统的有压水流携带泥砂快速涌入平导并以较大动能冲出洞外, 导致了6.10突水突泥事件的发生。隧道出口段岩溶水系统接受降雨入渗补给且径流通畅, 洞内涌水对应的汇水面积为 6.423 km^2 , 计算极端暴雨后平导最大涌水量 $5 \times 10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 。突水突泥发生后山体内部的静储量已得到充分释放, 地下水位已降至平导底板高程, 后续施工中再遭遇突水突泥的风险低。

关键词: 突水突泥; 溶腔; 暗河; 原因分析; 涌水量; 朝阳隧道

中图分类号: U453 **文献标识码:** A

文章编号: 1001-4810(2022)06-0895-10

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



0 引言

岩溶系统的发育与分布在很大程度受地层、构造、地形和地貌条件等因素的综合控制与影响^[1]。在我国西部强岩溶地区, 很多长大深埋隧道存在潜在突水、突泥的风险。由于隐伏岩溶水体位置、规模以及体量的不确定性, 突水模式与类型异常复杂, 隧道掌子面的突水风险系数极高^[2]。

突水突泥灾害的形成和发生必须具备四个基本条件: 一是以特殊的地质构造为基础, 二是有足够的填充物质为条件, 三是有丰富的地下水源为影响因素, 四是人为的开挖被扰动激活^[3]。隧道突水灾害由灾害源、突水通道与隔水阻泥结构三部分组成: ①灾害源是源动力, 即由一定空间内的水体、堆积体及空腔构成的混合物, 具有明显的储能特征, 灾害源是突

水灾害发生的首要因素; ②突水通道是灾害源的优劣势运移通道, 即地下水、泥砂等混合物耦合演化的运移途径场所, 突水通道是突涌水灾害发生的必要条件; ③隔水阻泥结构是灾害源进入隧道的最后屏障, 即最终突水破裂口所在结构, 其破裂突水是由前端灾害源运移和掌子面施工扰动共同诱发的动力破坏过程^[4]。根据岩溶发育形态和规模不同, 岩溶类致灾构造可分为3种型式, 即溶蚀裂隙型、溶洞溶腔型、管道及地下暗河型^[5]。

随着“西部大开发”战略的实施, 我国隧道建设逐渐向地形、地质条件极端复杂的西部山区与岩溶地区转移, 岩溶突水突泥灾害也日趋严重。据统计, 仅21世纪的前10 a间, 我国大型基础设施项目建设过程中, 突水突泥及其诱发的地质灾害占隧道工程重大安全事故总数的77.3%^[5]。如宜万铁路野三关、

第一作者简介: 付开隆(1971—), 男, 教授级高级工程师, 主要从事铁路工程地质勘察与地质灾害研究工作。E-mail: 442406287@qq.com。

收稿日期: 2021-11-02

马鹿箐、齐岳山等隧道施工过程中揭露溶腔,在高压水作用下最终连通隧道上方的岩溶管道,并袭夺地下暗河,发生大规模突水突泥灾害,造成巨大经济损失和人员伤亡。贵南高铁朝阳隧道 6.10 事件是在出口平导开挖揭露溶腔后造成的规模巨大的岩溶突水突泥灾害,并造成了 2 人死亡。本文从事件的致灾条件、形成机理到后期风险预评的全过程,详细地分析了这一典型突水事件的独特性和工程教训,并重点分析今后如何规避类似灾害事故的再次发生。

1 概况

1.1 工程概况

贵南高铁为连接贵阳与南宁之间的双线高速铁路,设计速度目标值 $350 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$,线间距 5 m。朝阳隧道位于贵州省东南部,为双线单洞隧道,进口里程 DK159+802,出口里程 DK172+536,全长 12 734 m,最大埋深 386 m,隧道净空 100 m^2 。隧道轨面高程 782~468 m,由进口到出口逐渐下降,采用 22.7‰~25‰的单面下坡。全隧采用“2 横洞+2 平行导坑+1 斜井”的辅助坑道方案,平导位于正洞左侧,平导中线与左线线路相距 30 m,低于正洞 3 m,采用无轨单车道运输,内净空尺寸为 5.0 m(宽) \times 6.0 m(高)。隧道于 2016 年初开工建设,2022 年贯通。隧道辅助坑道设置见图 1。

1.2 地质概况

1.2.1 地形地貌

朝阳隧道位于贵州荔波县城以西,地处贵州高

原南部斜坡向广西盆地过渡的地带,大地构造单元为扬子准地台,地势总体 NE 高、SW 低。隧道区域为 NNE 向背斜、向斜的相间排列,对地貌类型的空间分布起着控制作用,山脉和水系均顺应褶皱构造走向呈 NNE 向发育,地貌整体呈山岭与槽谷相间分布的特点;同时,受横张裂隙控制,存在一系列切穿主构造线的横向沟谷。

隧道出口段为倾斜状中低山溶蚀峰丛地貌区,地形起伏较大,山顶高程 1 105 m,相对高差最大达 700 m,自然坡度一般 $20^\circ\sim 55^\circ$,局部形成陡崖,植被较发育。地表洼地、落水洞、溶洞极为发育。隧道出口外为荔波县城所在的樟江向斜谷地区,樟江高程约 400 m,谷地延伸方向 $N30^\circ E$,宽约 4 km,谷底平缓。

1.2.2 地质构造及地层岩性

隧道穿越区域性的宽缓对称背斜—水利背斜,背斜轴向 $N30^\circ E$,同隧道方向交角约 70° ,隧道的进出口分别位于水利背斜的北西翼和南东翼。背斜轴部地带形成分水岭,位于隧道中部,岩性为石炭系下统大塘阶旧司段(C_1d^1)泥灰岩夹页岩、炭质页岩、砂岩。两翼分别为大塘阶上司段(C_1d^2)厚层灰岩、石炭系中统黄龙组(C_2hn)灰岩、上统马平组(C_3mp)灰岩,二叠系下统梁山组(P_1l)石英砂岩、砂岩、页岩夹煤层,下统栖霞组(P_1q)中厚层状灰岩,下统茅口组(P_1m)厚—巨厚层状灰岩,上统长兴+吴家坪组(P_2w+c)中厚层状灰岩、硅质岩、页岩夹煤层。隧道地质纵断面见图 2。

1.2.3 水文地质条件

大塘阶旧司段(C_1d^1)和梁山组(P_1l)均为非可溶

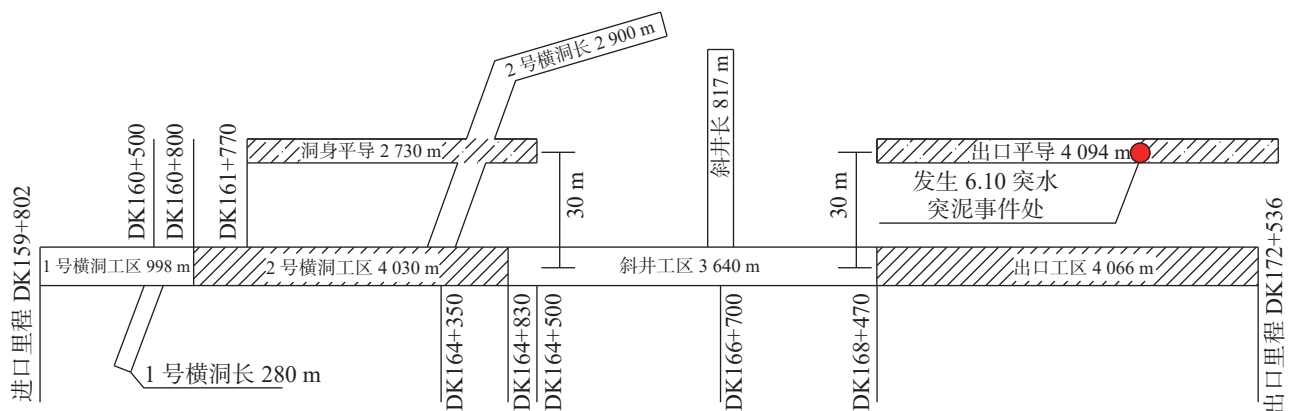


图 1 朝阳隧道辅助坑道设置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of auxiliary tunnel of Chaoyang tunnel

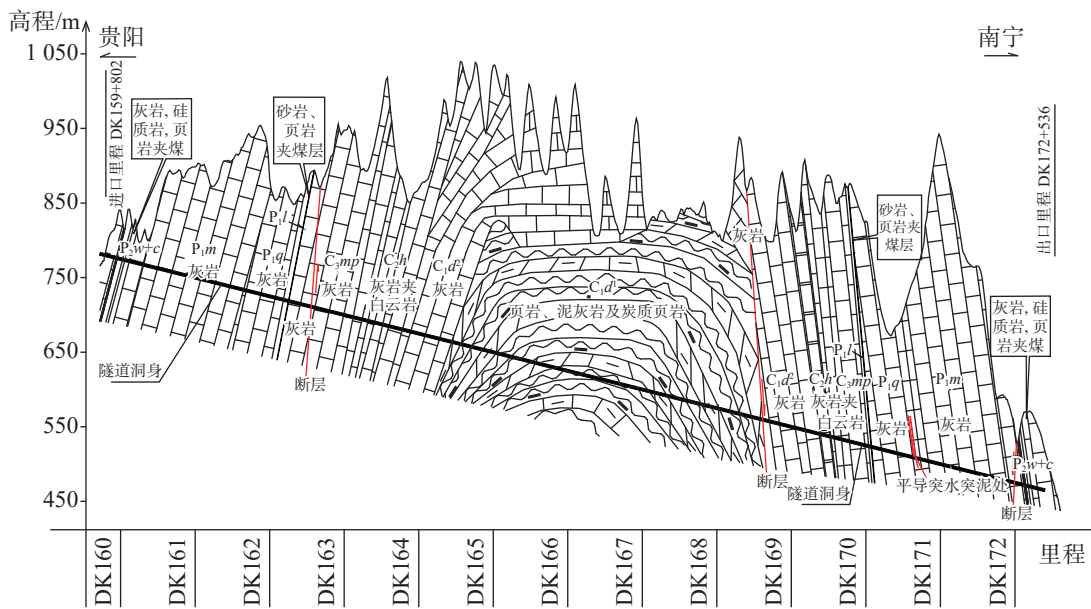


图 2 朝阳隧道地质纵断面图

Fig. 2 Geological profile of Chaoyang tunnel

岩地层：大塘阶旧司段(C_1d^1)位于背斜核部，地层巨厚，具备充分的隔水能力，加之岩层缓倾，形成了天然的地表及地下分水岭；梁山组(P_1l)岩层较薄，受横向构造切割影响，局部位置不具备隔水能力，因而地下暗河系统可局部穿过该地层。

长兴+吴家坪组(P_2w+c)的岩性可分上下两段：下段以灰岩为主，与茅口组(P_1m)灰岩接触；上段岩性为硅质岩、页岩夹煤层，岩层较厚，具备隔水能力。由背斜核部流向樟江的地下水一般于长兴+吴家坪组(P_2w+c)上、下段接触带以泉或暗河的形式排泄于地表。

背斜两翼广泛分布的大塘阶上司段(C_1d^2)、黄龙组(C_2hn)、马平组(C_3mp)、栖霞组(P_1q)、茅口组(P_1m)厚~巨厚层状灰岩，岩质纯，地表漏斗、洼地、落水洞、溶洞等岩溶现象极为发育，为表水下渗汇集径流提供了非常有利条件，可溶岩段无长流地表水系。

降雨发生后，非可溶岩段的汇水主要通过可溶岩与非可溶岩接触带入渗，可溶岩段的汇水则直接通过地表负地形下渗进入地下岩溶系统^[6-7]。受地形地貌及横向断裂控制，除局部地段地下水渗流方向是顺构造线方向以外，入渗地下水以基本垂直于背斜轴向并分别向北西翼(隧道进口端)的地表河和南东翼(隧道出口端)的漳江排泄为主，因而形成了一系列切穿主构造线的横向沟谷及地下暗河。地表河

及漳江分别为隧道进、出口端地下水的排泄基准面。隧道区水文地质平面图见图 3。

2 突水突泥过程

2.1 掌子面探索情况

2018 年 5 月 30 日，出口平导开挖到 PDK170+674 处。掌子面超前钻孔发现前方存在异常情况，便暂停掘进，开展了 10 余天的加强超前探索。具体情况如表 1 所示。

5 月 30 日，平导 PDK170+674 掌子面实施超前炮孔后，底板附近的 1 个炮孔先喷射浑浊水流后停止出水，在 1 号孔近旁补充钻孔继续喷出浑水，喷射距离达 15~20 m，持续流水至 6 月 3 日凌晨后全部钻孔都停止出水。超前炮孔探索距离为 5~6 m，掌子面上部未出水而下部涌出有压泥水，说明掌子面上部距溶腔较下部远。掌子面底部的第 1 个超前炮孔停止出水后，在其旁边补充实施的超前炮孔却涌出泥水且喷射距离达 20 m，说明第 1 个炮孔停止出水的原因不是水流干了，而是炮孔被泥土或碎块石堵住了。6 月 3 日上午爆破开挖后存在先喷出有压泥水而后停止出水的现象，也说明原炮孔被泥土或碎块石堵住了。

6 月 3 日上午，现场实施爆破开挖，掌子面里程推进至 PDK170+671 处。开挖后，在掌子面底部见

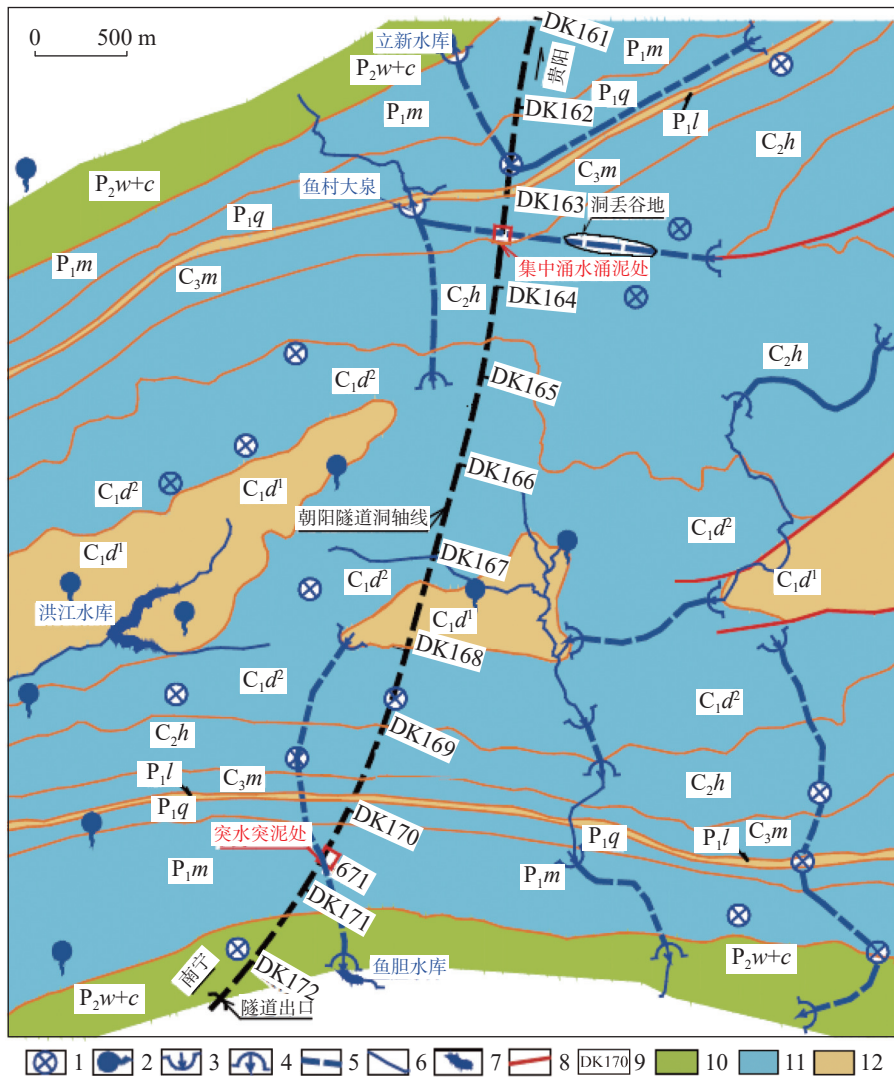


图3 朝阳隧道区水文地质平面图

P_{2w+c}-长兴吴家坪组 P_{1m}-茅口组 P_{1q}-栖霞组 P_{1l}-梁山组 C_{3m}-马平组 C_{2h}-黄龙组 C_{1d²}-大塘阶上段 C_{1d¹}-大塘阶旧段 1.消水洞 2.泉水
 3.暗河进口 4.暗河出口 5.暗河 6.地表水系 7.水库 8.断层 9.隧道里程 10.岩溶弱发育 11.岩溶强发育 12.非可溶岩

Fig. 3 Hydrogeological plan of the Chaoyang tunnel area

到小溶洞并涌水涌泥,至当日下午又停止涌水涌泥。分析在爆破开挖将掌子推进至 PDK170+671 后,掌子面底部已揭示了前方大溶腔的底部的极小区域,前方溶腔内的泥水快速涌出并淤积在平导内。6月5日平导内清淤结束,不再涌水涌泥,有可能是前方溶腔内的泥水已流干,也有可能是因为溶腔内所充填的卵石、碎石等较大颗粒物堵住了爆破揭示的小规模溶洞口,后续爆破开挖后的突水突泥过程证明实际情况属于后者。

2.2 突水突泥过程

6月10日9时56分,在 PDK170+671 掌子面左下角实施爆破后,平导内爆发了突水突泥。伴随着

空气压缩后推移的飕飕声和泥土与洞壁摩擦的隆隆声,大量的水夹泥以巨大能量喷涌而出。平导洞内开挖台架(距离洞口 1 800 m)、二衬台车(距离洞口 716 m)均被泥水冲出洞外,洞口三台风机、应急物资库及值班房被整体冲毁,钢构件库房及挡墙部分损毁。下游损毁耕地约 50 亩,污染下游群众住房约 20 户,污染道路约 3 km。持续大约 1 h 后出水量下降,平导内水(泥)痕高度 2.5 m,涌出含泥水总量约 160×10⁴ m³。正洞较平洞高 3 m,所以正洞内的设施未受影响。突水突泥后洞口施工场地毁损及下游河道淤积情况见图 4。

分析 6月10日于 PDK170+671 掌子面的爆破情况,说明掌子面下部已接近前方大溶腔底部,加

表1 突水突泥前掌子面异常情况及探查过程

Table 1 Abnormal condition of tunnel face and exploration process before water and mud inrush

序号	日期	时间	降雨情况	勘探情况	预报结论及异常情况
1	5月24日			地震物探	PDK170+724掌子面实施TSP法超前地质预报: PDK170+707、PDK170+683及PDK170+656附近、PDK170+624~+610段裂隙较发育或溶蚀夹泥, 局部含水
2	5月26日			超前钻探	PDK170+709掌子面进行超前地质钻探作业, 施作钻孔1个, 总钻长30 m; 冲洗液呈灰白色, 流量无变化, 冲击声清脆, 钻进无卡钻、突进现象, 无水, 岩性主要为灰岩, 岩质硬
3		4:30-8:30	无	超前炮孔	PDK170+674掌子面实施超前炮孔: 底板中心钻孔出现浑浊水流, 压力逐渐增大, 喷射约10 m, 6时许水由浊变清, 8时30分停止出水
4	5月30日	9:00-12:00	无	超前炮孔	PDK170+674掌子面补钻剩余超前炮孔: 底板中心偏右及右侧2个钻孔出现浑浊水流, 喷射约10 m, 至12点水色变清但水量、水压一直未减; 之后又在出水点上方水平钻孔探测, 共钻孔8个, 其中3个孔在底板上约40 cm处出浑浊水流, 喷射距离15~20 m, 涌水量 $744 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, 水量未见减小但有变清趋势
5	5月31日		持续降雨	地质雷达	PDK170+674掌子面实施了地质雷达探测: PDK170+669.5~+667段裂隙或溶蚀较发育—发育, 含水; PDK170+662附近及PDK170+652~+649段掌子面右侧裂隙或溶蚀较发育
6	5月31日~6月1日		持续降雨	无	PDK170+674掌子面: 5月31日上午, 洞内流量 $570 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$; 至6月1日, 逐步增大至 $1100 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 后趋于稳定
7		0:50	无	无	PDK170+674掌子面: 所有出水孔全部停止出水, 近段时间总出水量估算大约 $10 \times 10^4 \text{ m}^3$
8	6月3日	11:40-15:40	无	爆破开挖	现场实施爆破开挖, 开挖进尺为3 m, 掌子面推进至PDK170+671; 13时50分出碴结束时突发涌水涌泥(两小时内涌水涌泥约 $3 \times 10^4 \text{ m}^3$), 15时40分停止涌水涌泥, 仅剩少量水缓慢流出, 水量、水质稳定
9	6月5日—6月7日		无	清淤	PDK170+671掌子面: 6月5日12时开始清淤, 6月7日清出掌子面, 在底板右侧见一宽约2 m、高约0.5 m的溶洞, 有少量水缓慢流出, 无压力
10	6月8日		无	地质雷达	PDK170+671掌子面: 预报里程范围为PDK170+671~+641; PDK170+667~+663段及PDK170+660附近裂隙或溶蚀较发育, 局部含水
11	6月9日	21:12	无	超前钻孔	PDK170+671掌子面: 在底板上1 m位置进行超前水平钻孔, 向正洞方向夹角 45° 钻孔钻至5.5 m时, 夹钻无法继续钻进; 边墙位置向正洞方向钻孔, 钻至9 m时, 夹钻无法继续钻进
12	6月10日	8:30	无		PDK170+671掌子面: 掌子面出水点缓缓流水, 水量水质未变化, 无压力

之爆破用药量较大, 爆破揭露的空间直径超过了前方溶腔下部卵石、块石直径, 在高水头水压力的作



洞口施工场地毁损情况

下游河道淤积情况

图4 突水突泥后洞口施工场地毁损情况及下游河道淤积情况

Fig. 4 Damage to the construction site at the exit of the tunnel and the siltation of the downstream channel after water and mud inrush

用下, 前方溶腔内的大量泥水涌入平导洞, 速度快、能量大, 卵石及碎块石再不能堵住洞口, 突水突泥不可避免^[8]。

3 突水突泥机理分析

3.1 洞内调查及分析

出口平导涌水量变小并趋于稳定后, 现场组织人员进洞勘察。已开挖的平导内, 泥砂淤积极少, 尤其是靠近掌子面附近的平导底板及洞壁被冲刷得干干净净。说明掌子面前方溶腔内的泥砂类充填物位于下部, 突水突泥发生后, 底部含泥砂量较大的泥水先涌出, 之后周边岩溶系统内储集的岩溶水快速补

充进入溶腔,使溶腔内的水变得越来越清,冲刷力也越来越强,把之前淤积在平导洞壁及底部的泥砂冲刷干净^[9-12]。

在 PDK170+671 掌子面左下角,顺爆破小洞前行约 2 m,即可进入前方岩溶大厅:PDK170+671 掌子面爆破后揭穿了溶腔底部,溶腔整体顺岩层层理发育(层理走向与平导方向大角度相交,倾向隧道出口端),顺层理倾向方向延伸约 60 m,左右侧宽约 40 m,平均高度约 5 m,可见容积约 $1.2 \times 10^4 \text{ m}^3$;在溶腔顶部,可以见到较多的溶蚀空洞或裂隙向上延伸,部分充填流塑状淤泥,部分为空洞;在溶腔两侧,可以看到厚约 4 m 的溶蚀充填带,沿左、右两侧顺着层理走向延伸;在溶腔底部,残存着厚 0.5~2 m 的淤泥,洞壁局部位置也残存少量流塑状淤泥。

溶腔内残存的淤泥进一步证实了隧道未开挖前溶腔下部是充满淤泥的,在 PDK170+674 掌子面实施的超前炮孔爆破后,揭穿了底部流塑状淤泥层,在较高水头的作用下,发生了水夹带淤泥涌出的现象,一旦溶腔内的碎块石等堵住了超前钻孔或揭示的小溶洞口,则涌水涌泥现象停止。

溶腔后缘底部(小里程端)见一处水潭,潭水清澈,水深 1~2 m,有水流自水潭后部的陡壁下流出,每小时流量 500 m^3 左右。经过后续观察,水潭后缘流出的水在雨后变浑,流量随降雨量增大而增加。在较大规模的降雨后,隧道顶部及周边的空溶洞也存在水流涌入平导的现象,说明雨季隧道周边整体补给范围很大,岩溶系统贯通性很好。进一步解释了突水突泥排泄体积($160 \times 10^4 \text{ m}^3$)远远大于掌子面前方溶腔容积($1.2 \times 10^4 \text{ m}^3$)的现象。

3.2 地表调查及分析

出口平导于 PDK170+671 掌子面发生突水突泥后,位于 DK171+520 左侧 828 m(距突水突泥掌子面 1 196 m)的鱼胆水库水源大泉(泉点高程 490 m),则发生了水流量大大减少甚至干涸的现象。隧道开工前,该泉点水量具有随降雨量变化暴涨暴跌的特征:2016 年 1 月旱季测得泉水流量为 $108 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$,水质清澈;雨季暴雨后每小时流量达到数万方,水质浑浊。泉点下方为 1964 年 1 月修建的“鱼胆水库”,水库拦水用作饮用水源及灌溉,水库容量 $12.5 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

分析认为,隧道出口平导开挖前与发生突水突

泥处属于同一水文地质单元,地下水系统排泄点为鱼胆水库水源大泉。故存在以鱼胆水库水源大泉为排泄点的地下水系统,该系统汇水、径流、排泄都直接与出口平导开挖过程中发生的突水突泥相关联^[13]。该地下水系统属于分散补给后集中排泄的类型,源头补给点位于可溶岩与非可溶岩分界线处,为非可溶岩段地表水汇集后的集中入渗点,长年有汇水流入。

平导发生突水灾害后,大泉水流量大大减少,平时基本断流,雨后也仅有少量浑水流出。进一步说明平导涌出的地下水,实际上是截流了鱼胆水库水源大泉的补给源,原来长期于大泉流出的岩溶水,在隧道施工后,直接从平导内流出。

3.3 突水突泥机理

勘察阶段在 PDK170+640 处深孔内测得雨季地下水稳定水位高程为 577 m,地下水位高于平导掌子面底面 84 m,溶腔底部静水压力达到 0.84 MPa。平导开挖至 PDK170+671 掌子面后,超前钻孔遇到了前方溶腔底部的高压含泥水,因此涌出含大量泥沙的浑水并喷射较远。由于超前钻孔孔径较小,溶腔底部充填的泥砂及碎块石容易堵塞钻孔,故掌子面钻探穿过溶腔后,钻探孔普遍存在先涌浑水,再涌清水,最后不再涌水的过程。当补充钻孔后,重复了打通一部分堵塞—全部堵塞这一过程。由于现场分析深度和细度不够,以为超前钻孔水量减少甚至不再出水的原因是钻孔前方溶腔内已无水,在准备不充分的情况下贸然放炮揭开溶腔,造成较大事故^[14]。

本次灾害属于溶洞溶腔型致灾,是隧道开挖过程中逐渐靠近致灾构造并最终直接将其揭露,导致致灾构造内水体和充填介质在重力和水压力作用下喷射而出,涌入隧道,发生突水突泥灾害,属于直接揭露型突水突泥^[5]。

掌子面前方所揭露的溶腔容积约 $1.2 \times 10^4 \text{ m}^3$,而突水后 1 h 内涌出水量达到 $160 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。突水后短时间内涌出水量远大于溶腔容积,说明突水水源不仅限于掌子面前方的溶腔,还来源于与溶腔相关联的整个岩溶水系统。掌子面前方岩溶极为发育,溶腔、管道之间彼此相通。掌子面开挖揭示溶腔并降低水位后,周边岩溶系统中的地下水迅速补充进入溶腔,直至整个岩溶系统中的地下水位下降到与掌

子面溶腔水位基本一致后,平导内的涌水量才稳定下来。

4 后续施工风险分析

4.1 出口平导对应地表汇水面积

岩溶地区洼地是流水溶蚀、侵蚀共同作用的产物。位于径流形成区的洼地,以圆形小洼地居多,其底部高程是流域中最高的,称为“高洼地带”;处于地表径流汇集和排泄带的洼地,规模一般较上游及两侧为大,形成多为长条形,其底部高程较低,称为“低洼地带”。许多实例表明,高洼地带的分布与地下水岭相关,其主峰连线表示地下水系的分水岭,而低洼地带的分布则与地下暗河相关,表示地下暗河所在^[15]。根据以上边界条件分析方法,确定隧道出口端平导对应地表汇水面积为6.423 km²。

4.2 出口平导涌水量观察

为进行隧道出口涌水量观测,专门在隧道出口采用半自动涌水量监测仪。原则上每隔2 h监测一次,监测时间自2018年7月6日开始,至2019年12月31日结束。出口平导雨季涌水量一般为500~5 000 m³·h⁻¹,暴雨后极端最大涌水量达38 329 m³·h⁻¹;旱季一般涌水量为100~500 m³·h⁻¹,最小涌水量为50 m³·h⁻¹。经统计,2018年7月6日至2019年12月31日累计涌水量689.7万m³。

为进行降雨观测,在隧道顶部架设了雨量自动监测系统。降雨量每隔1 h自动监测一次,监测时间自2018年7月6日开始,至2019年12月31日结束。监测期间累计降雨量2 138.93 mm,小时最大降雨量41.2 mm,日最大降雨量91.4 mm。结合隧道出口端对应的地表汇水面积6.423 km²考虑,监测期间出口平导汇水对应实际降雨量为1 373.8万m³。结合相同时间内出口平导累计涌水量分析,降雨入渗后转化为地下径流并经出口平导排除洞外的水量占降水总量比重为689.7÷1 373.8=0.5,这里可以理解为本区域降雨入渗系数为0.5。

4.3 后续施工突水风险分析

在为期1年的观察周期内,雨季一般涌水量为500~5 000 m³·h⁻¹,旱季一般涌水量为100~500 m³·h⁻¹;暴雨后测量到的极端最大涌水量达38 329 m³·h⁻¹,长

时间未降雨后测量到的最小涌水量为50 m³·h⁻¹。

隧道出口段属于基本上没有覆盖层的岩溶地下水系统,地表漏斗、落水洞及地表河流与地下暗河连通性好,雨后降水通过落水洞直接灌入地下暗河,管道流响应快速,流量在雨后骤然增大数倍至数十倍。短时间内的集中降雨输入对于含水系统来说就是一个脉冲信号,它必然会引起系统的快速响应,通过连续数月的降雨量及出口平导涌水量加密观测(每小时1次)资料分析,主要管道流对暴雨响应的滞后时间一般仅10~24 h(图5)。

突水后山体内部的静储量已得到充分释放,掌子面地下水位已降至平导底板高程。后续隧道开挖过程中,所遭遇的地下水水头较小,因而隧道开挖风险较低,在保证排水通畅的前提下不会再遭遇大规模涌突水灾害^[16]。

5 结 论

(1)朝阳隧道出口平导突水突泥属于溶腔型为主的突水灾害,突水过程得到了周边岩溶水系统的及时补给,突水量达160×10⁴ m³,远大于掌子面附近的大溶腔容积;

(2)出口平导开挖至PDK170+671处时,揭露了半充填型饱水溶腔,地下水水面与平导底部高差达84 m,岩溶系统含水量大,水头高差较大,所以突水规模大,破坏严重;

(3)在平导掌子面超前钻孔钻至含泥饱水溶腔后多次出现涌水-堵水-疏通后再涌水-再堵水的过程,说明溶腔下部淤积很严重,排水不畅通。在饱水溶腔地下水未有效排放的情况下贸然爆破开挖,势必会产生严重的突水灾害;

(4)通过分析研究隧道出口端水文地质条件,明确隧道出口段地下水汇水面积为6.423 km²。突水后山体内部的静储量已得到充分释放,掌子面地下水位已降至平导底板高程。后续隧道开挖过程中,所遭遇的地下水水头较小,因而隧道开挖风险较低,在保证排水通畅的前提下不会再遭遇大规模涌突水灾害;

(5)根据隧道出口段降雨—流量观测数据计算分析,出口岩溶强烈发育段降雨入渗系数为0.5,对于岩溶强烈发育地区的岩溶隧道涌水量计算,该数据具有重要的参考意义。

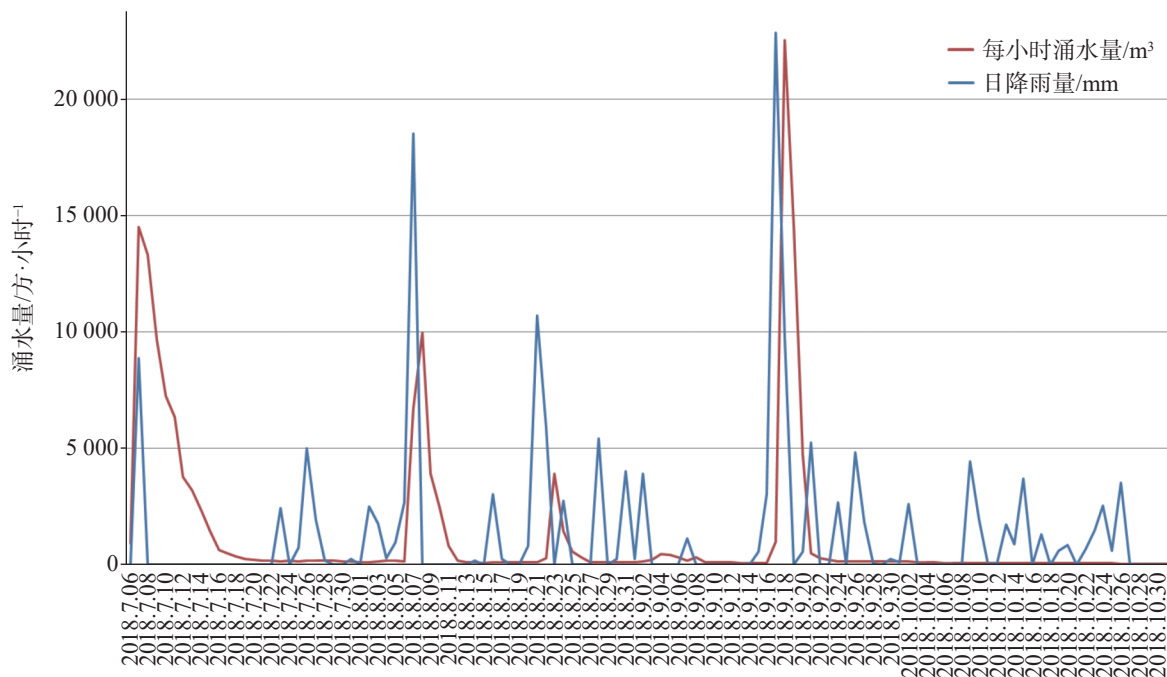


图 5 降雨量与隧道出口涌水量随时间反映曲线图

Fig. 5 Plot of rainfall and water inflow at tunnel exit over time

参考文献

- [1] 陈宏峰, 张发旺, 何愿, 夏日元, 邹胜章, 苏春田, 罗书文. 地质与地貌条件对岩溶系统的控制与指示[J]. 水文地质工程地质, 2016, 43(5): 42-46.
CHEN Hongfeng, ZHANG Fawang, HE Yuan, XIA Riyuan, ZOU Shengzhang, SU Chuntian, LUO Shuwen. Geological and geomorphologic settings acting as the controlling factors and indicators for karst systems[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2016, 43(5): 42-46.
- [2] 孙谋, 刘维宁. 高风险岩溶隧道掌子面突水机制研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(4): 1175-1180.
SUN Mou, LIU Weining. Research on water inrush mechanism induced by karst tunnel face with high risk[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(4): 1175-1180.
- [3] 资谊, 马士伟. 岩溶隧道涌突水灾害发生机理与工程防治[J]. 铁道工程学报, 2011(2): 84-89.
ZI Yi, MA Shiwei. Occurrence mechanism and prevention of water-bursting hazard for karst[J]. Journal of Railway Engineering society, 2011(2): 84-89.
- [4] 李术才, 王康, 李利平, 周宗青, 石少帅, 柳尚. 岩溶隧道突水灾害形成机理及发展趋势[J]. 力学学报, 2017, 49(1): 22-29.
Li Shucui, Wang Kang, Li Liping, Zhou Zongqing, Shi Shaoshuai, Liu Shang. Mechanical mechanism and development trend of water-inrush disasters in karst tunnels[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2017, 49(1): 22-29.
- [5] 李术才, 许振浩, 黄鑫, 林鹏, 赵晓成, 张庆松, 杨磊, 张霄, 孙怀凤, 潘东东. 隧道突水突泥致灾构造分类、地质判识、孕灾模式与典型案例[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(5): 1041-1069.
LI Shucui, XU Zhenhao, HUANG Xin, LIN Peng, ZHAO Xiaocheng, ZHANG Qingsong, YANG Lei, ZHANG Xiao, SUN Huafeng, PAN Dongdong. Classification, geological identification, hazard mode and typical case studies of hazard-causing structures for water and mud inrush in tunnels[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(5): 1041-1069.
- [6] 李芳涛, 李华明, 胡志平, 陈南南, 晏长根. 峨汉高速廖山隧道岩溶发育规律及其工程效应浅析[J]. 中国岩溶, 2020, 39(4): 592-603.
LI Fangtao, LI Huangming, HU Zhiping, CHEN Nannan, YAN Changgen. Features of karst development and geotechnical effects in the Liaoshan Tunnel on the E-Han Expressway[J]. Carsologica Sinica, 2020, 39(4): 592-603.
- [7] 任亚楠, 万军伟, 黄琨, 何欣慰. 云南万寿山地区岩溶水系统特征及隧道选线研究[J]. 中国岩溶, 2020, 39(4): 604-613.
REN Yanan, WAN Junwei, HUANG Kun, HE Xinhui. Study on the characteristics of karst water system and tunnel route selection in Wanshoushan area, Yunnan Province[J]. Carsologica Sinica, 2020, 39(4): 604-613.
- [8] 张桥. 小三峡岩溶隧道围岩防突层安全厚度有限元分析[J]. 中国岩溶, 2020, 39(4): 614-621.
ZHANG Qiao. Finite element analysis on safety thickness of the inrush prevention layer in rock beds of the Small Three Gorges karst tunnel[J]. Carsologica Sinica, 2020, 39(4): 614-621.
- [9] 李潇, 漆继红, 许模. 西南典型狭窄褶皱小尺度浅层岩溶水系统特征及隧道涌水分析[J]. 中国岩溶, 2020, 39(3): 375-383.
LI Xiao, QI Jihong, XU Mo. Analysis on the characteristics of

- small-scale shallow karst water systems in typical tight-narrow folds and tunnel water inrush in Southwestern China[J]. *Carsologica Sinica*, 2020, 39(3): 375-383.
- [10] 贺华刚. 深埋特长隧道的突涌水危险性评价研究[J]. *中国岩溶*, 2020, 39(3): 384-390.
HE Huagang. Assessment of water inrush risk in deep buried long tunnels[J]. *Carsologica Sinica*, 2020, 39(3): 384-390.
- [11] 郑克勋, 裴熊伟, 朱代强, 吴述彧, 郭维祥. 岩溶地区地下水位变动带隧道涌水问题的思考[J]. *中国岩溶*, 2019, 38(4): 473-479.
ZHENG Kexun, PEI Xiongwei, ZHU Daiqiang, WU Shuyu, GUO Weixiang. Thoughts on tunnel water inrush in changing zones of groundwater level in karst areas[J]. *Carsologica Sinica*, 2019, 38(4): 473-479.
- [12] 何桥, 朱代强, 郑克勋, 朱建耘, 黄勇. 深埋特长隧道岩溶高压涌水灌浆封堵技术研究与实践[J]. *中国岩溶*, 2019, 38(4): 488-495.
HE Qiao, ZHU Daiqiang, ZHENG Kexun, ZHU Jianyun, HUANG Yong. Application of grouting sealing technology on karst high-pressure water inrush in a deep-buried extra-long tunnel[J]. *Carsologica Sinica*, 2019, 38(4): 488-495.
- [13] 庄旭峰, 孙东. 实例分析隧道建设对岩溶水的影响[J]. *中国岩溶*, 2016, 35(6): 681-687.
ZHUANG Xufeng, SUN Dong. Influence of tunnel construction on karst water: Case analyses[J]. *Carsologica Sinica*, 2016, 35(6): 681-687.
- [14] 张可能, 张岳, 廖阳, 万浩然, 许培浩, 张云毅. 贵阳某地铁站岩溶发育特征及突水模式分析[J]. *中国岩溶*, 2018, 37(2): 300-306.
ZHANG Keneng, ZHANG Yue, LIAO Yang, WAN Haoran, XU Peihao, ZHANG Yunyi. Analysis on karst development and water burst in a subway station[J]. *Carsologica Sinica*, 2018, 37(2): 300-306.
- [15] 陈国亮. 岩溶工程地质[M]. 北京: 中国铁路出版社, 1984: 86-93.
CHEN Guoliang. Karst engineering geology[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1984: 86-93.
- [16] 毛邦燕, 许模, 蒋良文. 隧道岩溶突水、突泥危险性评价初探[J]. *中国岩溶*, 2010, 29(2): 183-189.
MAO Bangyan, XU Mo, JIANG Liangwen. Preliminary study on risk assessment of water and mud inrush in karst tunnel[J]. *Carsologica Sinica*, 2010, 29(2): 183-189.

Analysis of 6.10 water and mud inrush incident in the exit of parallel pilot tunnel of Chaoyang tunnel of Guiyang-Nanning high-speed railway

FU Kailong, ZHOU Yu, WEI Zhengxiong

(China Railway Eryuan Engineering Group Co. Ltd, Chengdu, Sichuan 610031, China)

Abstract A high-speed railway running $350 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ is being built between Guiyang in Guizhou Province and Nanning in Guangxi. Chaoyang tunnel is a double-track single-hole tunnel located in southeastern Guizhou. The tunnel clearance is 100 m^2 with the total length of 12,734 m (including more than 7-km-long soluble rock), and its maximum burial depth is 386 m. The railroad track elevation of the tunnel is 782-468 m, and it gradually decreases from the entrance to the exit, with a slope of -22.7% to -25% . An auxiliary tunnel scheme of "2 transverse tunnels +2 parallel pilot tunnels +1 inclined shaft" has been adopted, with the parallel pilot tunnel on the left side of the main tunnel. The midline of the parallel pilot tunnel is 30 m away from the main tunnel, and 3 m lower than the main hole. The inner headroom size is 5.0 m (width) \times 6.0 m (height).

Construction of the tunnel began in early 2016 and will be completed in 2022. On June 10, 2018, karst water and mud inrush, lasting about 1 hour, occurred at the exit of parallel pilot tunnel of Chaoyang tunnel. The total amount of water and mud inrush was about $1.6 \times 10^6 \text{ m}^3$. In order to complete the construction tunneling scheme and drainage scheme, it is necessary to analyze the causes of water and mud inrush, evaluate its risk in the subsequent construction, and calculate the water inflow of the tunnel. In this study area, the exit section of the tunnel is in the sloping medium-and-low mountainous area, belonging to the karst peak cluster landform, and the terrain fluctuates greatly. The tunnel passes th exit section of the tunnel is in the sloping medium and low mountainous area, belongs to the karst peak cluster landform with relatively sharp topographic relief. The tunnel passes through a regionally wide and gentle symmetrical anticline, and the exit of the tunnel is located on the southeastern wing of the anticline widely distributed by thick-to-extremely-thick bedded limestone with pure rock texture. Extreme development of surface karst funnels, dissolution basins, karst drop holes, karst caves and other phenomena provides favorable conditions for the collection,

infiltration and runoff of surface water, but there is no long-term water system on the surface. After rainfall, the catchment of the non-soluble rock segment is mainly infiltrated through the contact zone between the soluble rock and the non-soluble rock, but the water catchment of the soluble rock section penetrates directly into the underground karst water system through the surface negative topography. Controlled by topography, geomorphology and transverse faults, except for the direction of groundwater seepage along the tectonic line in some sections, the infiltration groundwater is mainly discharged from the Zhangjiang river, which is basically perpendicular to the axis of the anticline and to the southeast wing (the exit of the tunnel). As a result, a series of transverse gullies and underground rivers cutting through the main structural lines were formed.

The present study is mainly focused on the following aspects: analyzing the topography, engineering geology and hydrogeology of the tunnel, introducing the implementation of advance geological prediction on the face of the parallel pilot tunnel, and describing the process of water and mud inrush. In this study, the engineering geology and hydrogeology conditions in the area affected by the disaster were investigated and a one-year dynamic observation of the relationship between water inflow and rainfall was also completed.

The research finding shows that a huge cavity and pipeline system with a water head of up to 84 m in front of the tunnel face caused the water and mud inrush. After excavation and exposing the bottom of the cavity, the pressurized water flow filling in the whole karst water system carried mud and sand rapidly into the tunnel face and rushed out of the parallel pilot tunnel with a large kinetic energy, resulting in the water and mud inrush event on June 10. In the process of this event, the surrounding karst water system was supplied in time, and the amount of water and mud inrush was much larger than the volume of large dissolution cavity near the tunnel face. The process of "water gushing-water shutoff-water gushing-water shutoff after dredging" occurred many times, indicating that the deposition in the lower part of the cavity is very serious and the drainage is not unobstructed. If the groundwater in the saturated cavity is not discharged effectively, the blasting excavation will cause serious water and mud inrush disaster. Long-term rainfall and water inflow monitoring shows that the karst water system at the exit of the tunnel receives rainfall infiltration recharge and the runoff is unobstructed. The catchment area corresponding to the water inrush to the tunnel is 6.423 km², and the maximum water inrush in the tunnel after the extreme rainstorm is 5×10⁴ m³·h⁻¹. After the occurrence of water and mud inrush, the static reserves in the mountain body have been fully released, and the groundwater level has dropped to the elevation of the tunnel floor. On the premise of ensuring the unobstructed drainage during the tunneling process, the risk of encountering water and mud inrush in the subsequent construction is low.

Key words water and mud inrush, karst cavity, karst underground river, cause analysis, water inflow, Chaoyang tunnel

(编辑 张玲)