

第三系半成岩富水隧道突涌机理及治理措施研究

冯柴微,丁国鹏,刘刚

(中铁隧道局集团有限公司,广东佛山528000)

摘要:为探究第三系富水半成岩隧道突涌灾害的致灾机理及治理措施,以云南王家寨隧道为对象,通过地质特性分析、现场监测与施工实践,结合地层结构、水文条件及施工扰动因素,系统研究突涌灾害的形成机制。结果表明:富水半成岩砂层细颗粒含量高、含水率大,施工扰动下易软化形成流塑状态,导致围岩自稳能力骤降;突涌灾害源于粘土夹砂岩体能量积存、围岩能量释放及施工扰动共同作用下的地下水渗流失衡。采用“地表-洞内综合排水、四台阶五步交错开挖、超前管棚及注浆加固”等协同控制技术,可显著降低突涌风险,提高施工效率。

关键词:第三系半成岩;富水隧道;突涌灾害;致灾机理;协同控制

中图分类号:U455

文献标识码:A

文章编号:1672-1144(2025)03-0086-06

Outburst Disasters Mechanisms of Water-rich Tunnels in Tertiary Semi-morphic Rocks and Control Measures

FENG Chaiwei, DING Guopeng, LIU Gang

(China Railway Tunnel Group Construction Co., Ltd., Foshan, Guangdong 528000, China)

Abstract: To explore the disaster-causing mechanism and control measures of outburst disasters in Tertiary water-rich semi-diagenetic tunnels, this work took the Wangjiazhai Tunnel in Yunnan Province as the research object, through geological characteristic analysis, on-site monitoring and construction practice, combined with stratum structure, hydrological conditions and construction disturbance factors, the formation mechanism of outburst disasters was systematically analyzed. The results are as follows. The water-rich semi-diagenetic sand layer has a high content of fine particles and a large water content. Under construction disturbances, it is prone to soften and form a fluid plastic state, resulting in a sudden drop in the self-stabilization ability of the surrounding rock. Surge disasters result from the imbalance of groundwater seepage caused by the combined effect of the accumulation of energy in clay-sandstone intercalation, the release of energy in surrounding rock and construction disturbances. By adopting coordinated control technologies such as "comprehensive drainage from the surface to the tunnel, four-step and five-step staggered excavation, advanced pipe shed and grouting reinforcement", the risk of sudden gushing can be significantly reduced and the construction efficiency can be increased.

Keywords: tertiary semi-morphic rocks; water rich tunnel; catastrophe; disaster-causing mechanism; cooperative control

随着交通基础设施不断向西部山区推进,隧道穿越富水地层等复杂地质条件越来越多,建设过程中极易发生突泥涌水等灾害,危害施工安全^[1-3]。隧道突涌水是隧道掘进破坏含水层结构,围岩力学平衡状态发生改变,导致地下水储存能量以流体形式瞬间释放而产生的动力破坏现象^[4-5]。

对于隧道突涌灾害方面,相关学者做了大量的研究。李勇等^[6]以狮子山隧道为研究对象,研究表明,不良地质构造突泥突水致灾机制为构造向斜上盘节理裂隙密集带储水构造使下位凝灰岩裂隙扩展发育崩解软化、泥化,连接上部储水构造体导致突涌。温时雨等^[7]研究表明,隧道致灾构造是地质

灾害发生的内在条件,决定了隧道施工灾害的范围、危害程度。董家兴等^[8]研究了富水砂化白元岩突水涌砂机理,并提出了止浆墙施作、围岩固结灌浆的主要处置措施。晏启祥等^[9]依据近年来隧道突涌水典型案例,采用多元回归理论方法,得出了防突岩体最小安全厚度影响因素。

第三系泥质富水砂岩作为一种典型的软弱围岩,其内部孔隙率高,水稳定性差,随着含水率上升岩石会迅速软化;此外,还具有弱胶结、低强度的特点,主要分布于云南、贵州、甘肃等中西部地区。在该类地层施工,极易发生突泥、涌水、掌子面变形失稳等灾害,给工程施工带来严重的安全问题^[10-13]。针对第三系地层施工,马志富等^[14]依托牡蛎铁路双丰隧道,建立了“立体探查、泄水降压、超前加固、支护紧跟、全面监测”的技术路线;秦正贵等^[15]依托蒙华铁路中条山隧道系统总结了第三系地层岩性特点,并提出隧道建设中存在的主要风险及建议措施;王锋^[16]针对桃树坪隧道的水文地质条件通过现场施工实践和数值模拟,对富水粉细砂地层的施工提出了不同的降水和开挖方案;王庆林等^[17]、张学文^[18]、雷林等^[19]、熊春庚^[20]依托桃树坪隧道、胡麻岭隧道,对第三系岩层工程特性展开了研究,并总结了隧道降水与超前加固技术。

综上所述,前人对于隧道突涌灾害的研究取得了丰硕的成果,针对第三系富水半成岩隧道主要采用降水施工和超前加固等措施降低开挖风险。但隧道突涌灾害的成因复杂,对于突涌灾害形成机制还未形成统一认识。因此,本文以云南王家寨第三系富水半成岩隧道为研究对象,分析隧道现场突涌灾变过程,并提出不同处治措施,以期为后续类似工程提供参考。

1 工程概况

王家寨隧道位于云南省临沧市临翔区境内,全长8 040 m,最大埋深1 022 m,隧道起止点桩号为K21+440—K29+480,是云南临清高速重点控制工程。隧区位于云贵高原西南边缘,横断山脉南段,地形高差大,地表切割严重,地形复杂。

富水半成岩段主要位于K21+410—K23+840,长约2 260 m,围岩以砂岩夹粘土岩为主,岩质极软、呈碎裂结构,围岩自稳定性差,为V级围岩,如图1所示。残积粉质粘土及砂岩夹粘土遇水易产生软化、崩解,受工程扰动及地下水影响时,容易产生流土现象,处理不当可能产生较大规模坍塌,甚至冒

顶,施工难度大。

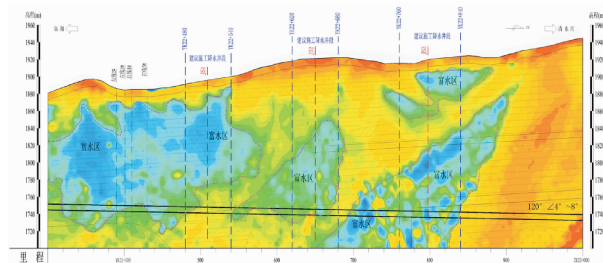


图1 富水区物探图

2 富水半成岩隧道突涌灾害分析

2.1 隧道岩层特性分析

王家寨隧道所在地区山体高程落差大,地形坡度较陡,地表水分散排泄速度快,区域内地下水的主要补充方式为大气降水,通过降雨形成的片流和地表径流,经由孔隙、裂隙及节理渗透补给。在雨季,大量地表水渗入地下,主要在砂岩层中积聚,长时间积累导致砂岩层地下水接近饱和状态,同时,砂岩层和粘土层因长期受地下水浸泡而较为软化,如图2所示。

隧道进口段位于山脉坡脚处,穿过第三系富水砂性半成岩地层,该类地层岩体结构松散、孔隙占比高、水稳性差、含水量大、围岩自稳能力较差,隧道开挖形成临空面后在动水压力作用下极易发生流动,从而引起突发性涌水、突泥、坍方、冒顶等事故。



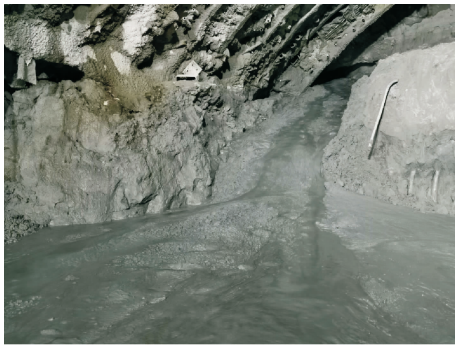
图2 第三系半成岩砂岩

2.2 突泥涌水灾害情况

王家寨隧道临翔端自K22+000后逐步进入富水半成岩地段,第三系半成岩粉细砂岩段粒径2 mm以下粉细砂颗粒占比高达80%左右,地层含水率常年超过24%。隧道开挖扰动后,容易发生软化,并进入流塑状态,引起隧道涌水突泥、掌子面失稳等事

故,如图 3 所示。几次大型突涌事故如下:

2020 年 10 月 31 日,ZK22 + 296 处发生大型突涌灾害,此次突涌从渗水到整体坍塌破坏历时约为 4 h,灾害初期拱顶左侧出现“汗状”渗水,现场采用土工布堵塞;立架过程中,拱顶再次出现坍塌渗漏,呈小股状渗水,再次阻塞;喷射混凝土作业时,涌水量突增,冲出泥沙约 30 m^3 ,拱顶形成空腔。空腔形成后,掌子面发生间歇性突泥涌水,间隔时间 3 min ~ 50 min,持续时间约为 1 min ~ 3 min,缓慢涌泥约 2 h 后,掌子面发生大型涌水突泥破坏,积水淹没至距离掌子面约 146 m,淤泥拥堵至二衬台车处距离掌子面约 40 m,造成地表直径约 50 m 大型塌陷区,此次大型灾害涌泥量约 $5\,000 \text{ m}^3$,涌水量约 $3\,000 \text{ m}^3$ 。



(a) 掌子面突泥涌水



(b) 掌子面破坏

图 3 掌子面破坏情况

2021 年 8 月 6 日,ZK22 + 322 处发生突涌灾害,此次突涌从拱顶左侧股状涌水到掌子面失稳垮塌总体历时约 3 h,掌子面开挖初期,拱顶左侧呈现小股状涌水,出水量约 $2 \text{ m}^3/\text{h}$,现场采用反压回填进行堵水,约 30 min 后,掌子面涌水量突增,出水量约 $40 \text{ m}^3/\text{h}$,随着出水量的增多,掌子面出现间歇式涌泥现象,间隔时间约为 5 min ~ 8 min,最大单次涌泥量为 $200 \text{ m}^3/\text{h}$,间歇性涌泥约 2 h 后,掌子面失稳垮塌,发生大规模涌水突泥灾害。此次灾害累计涌泥量约为 $12\,000 \text{ m}^3$,泥水漫延至距掌子面约 227 m,致

使地表塔腔进一步扩大。

2022 年 1 月 9 日,ZK22 + 756.6 发生突涌灾害,此次突涌从上台阶右侧拱脚股状流水至掌子面右侧坍塌历时约 5 h,灾害初期上台阶右侧拱脚有股状水流出且夹带泥沙,采用喷射混凝土封闭掌子面并采用石笼封堵出水点,约 4 h 后,左侧掌子面出现多点间歇式股状出水,间歇式出水约 1 h 后,左侧掌子面出现垮塌,发生大规模涌水突泥,累计涌水突泥量约为 $6\,834 \text{ m}^3$ 。

2023 年 K22 + 731.7—K22 + 852 段落发生的突涌次数如图 4 所示,隧道开挖进尺约 120 m,进展十分缓慢。

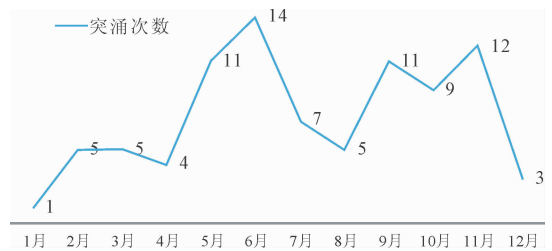


图 4 突涌次数统计

2.3 突泥涌水原因分析

通过对突涌灾害的资料分析可知,该富水半成岩粉细砂岩段突泥涌水灾害具有如下特征:灾害整体历时短,具有一定突发性、灾害影响范围广、破坏性大、多次形成大范围空腔。突涌灾害发生的主要影响因素是特殊的不良水文地质条件(如空腔、积水、地下结构反复变化等)在掌子面开挖受扰动后形成的。随着掌子面不断向前开挖,在地层高水头压力作用下,地下水渗流路径缩短,掌子面位置处水力梯度增大,原有地下渗流系统被破坏,引发富水粉砂层出现流沙、涌水状况,形成新的渗流路径;掌子面附近位置出现空腔,诱发粉细砂半成岩遇水软化,围岩松弛范围扩展,掌子面稳定性下降,当掌子面不足以抵抗地层内高水压力时,掌子面发生局部甚至是整体失稳情况,演变成规模性突涌灾害。

3 富水半成岩隧道突涌机制

3.1 突涌形成机制

(1) 粘土夹砂岩体的能量积存

突泥涌水处位于粘土岩夹砂岩互层中,粘土层隔水性能好,含水性差,但遇水易软化;砂岩作为半成岩,结构较松散,具有一定赋水空隙,似带状含水层。地下水水量丰富、水压高,具有较大的能量积存于岩土体中,这些潜藏的能量在发生突涌灾害时随

同岩土体的固液能量进入隧道。

(2) 地下水作用与围岩的能量释放

动水压力与静水压力都能引诱岩体劈裂,增强岩体渗透能力,砂岩层软化进入流塑状态,破坏岩层结构,围岩强度和自稳能力减弱,逐步形成富水区与掌子面之间水的通道,易发生突涌灾害。

(3) 施工活动的诱发

隧道开挖和衬砌改变了地下水的渗流条件,破

坏了地下水平衡,导致地下水暂时聚集,形成较大的地下水压力,当掌子面不足以抵抗压力时,产生突发性涌水涌泥现象。

3.2 突涌灾害破坏过程

第三系半成岩富水砂岩地层掌子面失稳破坏过程大致为渗水软化阶段、流塑阶段、突涌阶段以及坍塌阶段四个阶段,如图5所示。

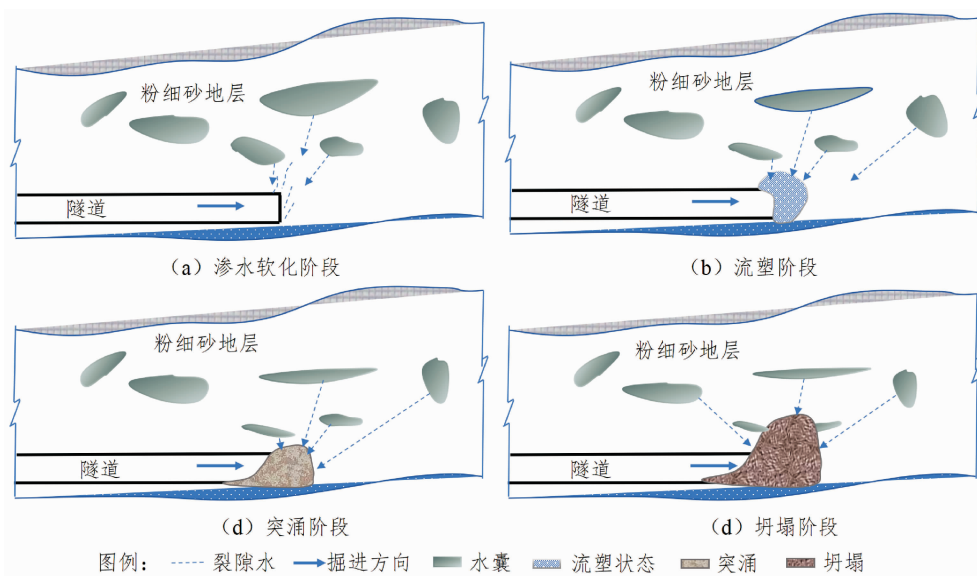


图5 掌子面失稳破坏阶段

3.2.1 渗水软化阶段

隧道未开挖前,粉细砂岩地层地下水在各向应力作用下处于平衡状态或稳定渗流状态,土颗粒之间处于相对平衡状态。随着隧道的开挖,围岩应力得到释放,原有应力场被破坏,使得临空面的法向应力状态为零。由于掌子面的开挖,掌子面成为新的自由水面,掌子面附近孔隙水压力骤降为零,使得掌子面孔隙水压力与掌子面前方土体孔隙水压力具有一定的压力差,在压力差作用下,地下水逐步向掌子面方向渗流,临空面呈现渗水状态。随着渗水量的逐渐增大,掌子面周边土体逐步呈现液化状态,当掌子面液化区域土颗粒的重力大于水体张力时,土颗粒随着水流的作用逐步向下流淌,掌子面在渗流作用下被软化,如图5(a)所示。

3.2.2 流塑阶段

王家寨隧道第三系富水粉细砂岩具有低液塑限的特征,当砂岩含水率达到10%时,半成岩粉细砂岩由半固态向塑性状态转化,当含水率达到16%时,半成岩粉细砂岩由塑形状态逐步向流砂状态转变,如图5(b)所示。

3.2.3 突涌阶段

随着渗流状态的逐步发展,掌子面周边土体进一步软化崩解,结合该区域强富水情况,当掌子面暴露一定时间后,随着地下水的汇集,掌子面周边逐步达到突涌涌水破坏的临界水力梯度,此时掌子面以及初支薄弱处往往会出现股状水,出水通道形成后,细颗粒砂土迅速通过涌水通道带出,随着夹杂的泥沙量增多,股状出水通道逐渐扩大,在高压水作用下产生临界破坏,更多的泥沙随着地下水涌出,形成突涌,如图5(c)所示。

3.2.4 坍塌阶段

随着突涌的进一步扩展,掌子面强度进一步降低,掌子面支撑结构被破坏,管状流沙逐步连通扩展至面状突涌,当涌水涌泥量范围达到临界值时,围岩丧失自稳能力,掌子面变形突增,呈现为大范围的掌子面破坏以及坍塌灾害,如图5(d)所示。

4 富水半成岩隧道突涌控制措施

4.1 预探预报判断突涌风险

在隧道施工期间,进行超前地质预探预报。采

用地质雷达法、地表高密度电法物探、掌子面超前水平钻孔预测,采用洞内外结合调查、多维度探测预报、短中长距离预报等手段,了解围岩情况,对于掌子面 50 m 范围内富水地层情况全面掌握,判断突涌风险。

4.2 综合超前降排水措施控制突涌

在隧道突涌灾害初期,处置措施遵循以堵为主、限量排放原则,发生涌水突泥灾害后采用帷幕注浆、水平高压旋喷桩及超强管棚支护等措施,在开挖前采用超前钻孔排泄方式对掌子面前方地下水进行排泄。该治理措施在隧道建设初期是行之有效的,因为在隧道建设初期开挖段富水性较弱,当突泥涌水灾害发生后,地下水得到一定排放,此时堵水加固效果良好。但随着隧道开挖至富水区域,地下水补给能力增强,在突泥涌水灾害发生后,灾害区域地下水能够快速补充,此时采用堵水注浆效果大打折扣。

第三系半成岩的复杂地层是隧道建设难点,且该类隧道多处于富水状态,采用合理的降排水方案是隧道建设的关键性问题。由于该隧道地层结构复杂,为有效地对隧道掌子面进行降排水从而有利于隧道施工,采用综合超前降排水措施,即隧道洞内深井降水、超前导洞降水、超前地表深井降水及超前钻孔排水等。

(1) 超前地表深井降水

在掌子面前方地表一点范围内打设降水井,降水井一般打设至隧道仰拱以下,井深一般在 100 ~ 200 m 范围内,在地表井内采用抽水泵抽取掌子面前方地下水。该类降水方式不影响洞内施工,可提前进行大范围降水。

(2) 隧道洞内深井降水

采用在掌子面后方隧底两侧打设深井的方式进行降水,条件允许情况下可在仰拱中部布置,对于隧底重力真空降水,降水井深度应深入透水层 5 m 左右,钻孔深度应不低于降水深度,布置间距 10 ~ 15 m。

(3) 超前导洞降水

在隧道底部以上掌子面下台阶处打设超前导洞,超前导洞因开挖面小,不易发生坍塌灾害,导洞施工完成后在导洞内每隔一定距离布置降水断面,沿超前导洞断面以一定外插角打设环向泄水管,泄水管端头深入隧道开挖轮廓线外 1 m 处,如图 6 所示。

(4) 超前钻孔排水

超强钻孔排水在掌子面后方一定距离上初支处呈辐射状向掌子面前方钻孔并安装带有过滤系统的

排水导管,在隧道贯通后。若富水区域有水源补给,可不封堵排水管。

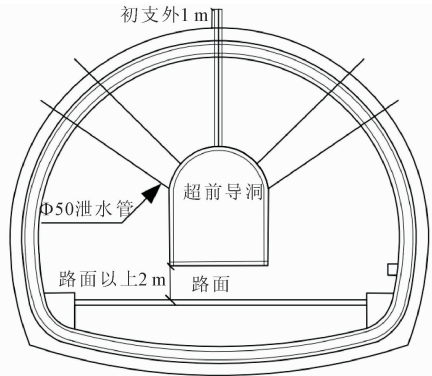


图 6 超强导洞降水示意图

4.3 施工控制措施与控制效果

按照上述降排水方法对突涌灾害进行控制,对王家寨隧道灾害进行处理。第三系富水半成岩粉细砂岩隧道,由于半成岩岩质软,胶结差,在富水情况下围岩强度迅速降低,极易发生涌水、突泥以及大范围坍塌等地质灾害。使用单一加固及支护措施难以发挥作用,隧道施工中灾害频发,逐步总结出穿越第三系富水半成岩粉细砂岩地层时要遵循“先降水、短进尺、弱扰动、快成环”的施工要求,并采用“地表-洞内综合排水、密管棚、小导管注浆补强、四台阶五步交错开挖法”的隧道涌水突泥防治措施。

4.3.1 隧道开挖措施

第三系富水半成岩粉细砂岩岩质软,围岩自稳能力差,在强富水情况下,掌子面周边受开挖扰动影响极易发生滑塌及规模性突涌灾害。应对此类 V 级围岩,传统施工方式采用三台阶七步预留核心土开挖法,但由于第三系半成岩遇水软化速度较快,该开挖法应用于第三系隧道仍存在开挖临空面过大,难以实现“开挖快支护封闭快”的目的。因此,采用四台阶五步交错开挖功法,进一步压缩开挖临空面和临空空间。开挖工艺流程图见图 7 所示。

4.3.2 洞内辅助超前排水措施

在经地表降水后,掌子面周边水头高度已达到安全水位,但由于第三系半成岩地质情况复杂,部分地段分布隔水层,在隔水层的作用下形成小型水囊。为避免开挖过程中小型含水体造成的小范围突涌,在进行超前支护及注浆后仍应进行超前钻孔辅助洞内排水,一方面可以探明前方地下水实际情况,另一方面可以作为辅助排水措施,在隧道洞内进行排水作业,降低后期施工开挖风险。

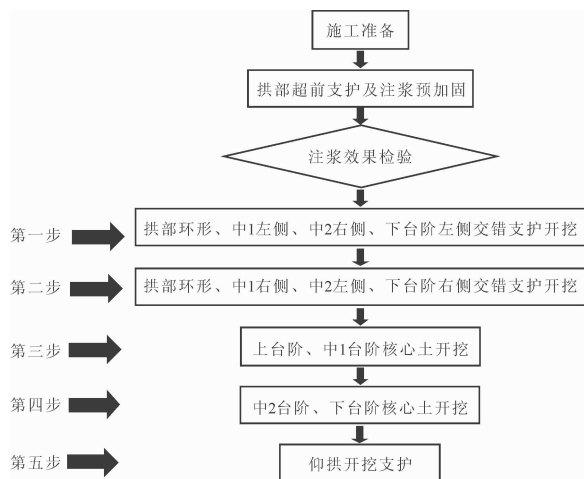


图7 四台阶五步开挖施工工艺流程图

4.3.3 超前支护措施

对于第三系富水半成岩粉细砂岩隧道,采用超前大管棚技术抗水压效果较好,但在采用该技术时仍应配以辅助超前加固措施弥补大管棚加固薄弱处,宜采用周边径向注浆补强+超前大管棚+密排小导管的综合超前支护方案。

4.3.4 控制效果

通过采用四台阶五步交错开挖法、超前支护(大管棚+小导管+径向注浆)及超前钻孔动态排水等多维度,即“空间分层开挖+复合支护+动态排水”的协同控制,为富水特殊地层隧道施工提供了可行的解决方案,实现了“快挖快支、稳岩控水、立体支护、降本增效”的目标。掌子面突涌现象得到了明显的控制,处治效果如图8所示。采用上述治理措施后,2024年度完成了隧道施工难度最大的剩余段落(850 m左右)的开挖,2024年12月实现了左洞贯通,隧道单洞月均进尺较之前提升约16倍,掌子面月度最高进尺大幅提升,施工进度明显加快,施工效率提升。

5 结论

本文结合依托工程,对第三系半成岩隧道突涌灾害进行研究,主要结论如下:

(1) 第三系半成岩突水涌泥处位于粘土岩夹砂岩互层中,粘土层隔水好,渗水差,砂岩结构松散,具有富水孔隙。粘土夹砂岩体受地下水影响,潜藏能量大,灾害发生时具有突发性强、破坏性广的特点。

(2) 突水涌泥灾害的形成是粘土夹砂岩体的能量积存、围岩能量的释放和施工活动的扰动、地下水渗流失衡的结果;隧道破坏由于砂层在地下水的作

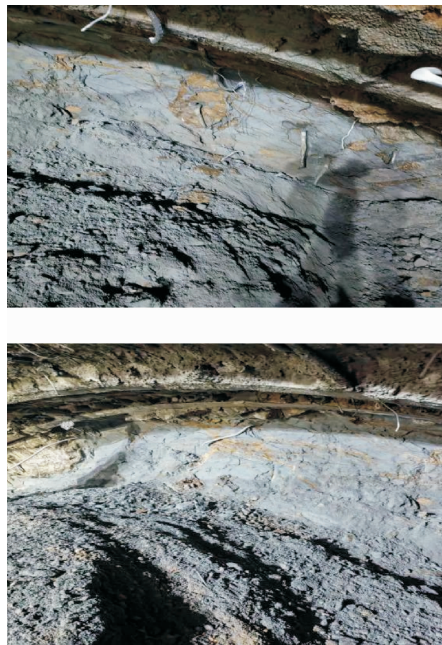


图8 突涌处治效果

用下向流塑状转变,富水区逐步与掌子面形成连接通道,从而导致突涌灾害发生。

(3) 采用“地表-洞内综合排水、密管棚、小导管注浆补强、四台阶五步交错开挖法”的隧道防治措施后,施工效率提升,进尺加快。

参考文献:

- [1] 刘家庆,林志,邸小勇,等.基于流-固-损伤全耦合模型的裂隙型岩溶突涌水数值模拟[J].科学技术与工程,2024,24(6):2276-2283.
- [2] 江新,陈婧,赵力,等.岩溶隧洞突涌水灾害风险评价研究[J].人民长江,2024,55(4):169-177.
- [3] 罗一鸣,成建梅,徐文杰,等.西南岩溶区深埋隧洞涌水条件分析及涌水量预测——以滇中引水工程大坡子隧洞为例[J].中国岩溶,2023,42(6):1224-1236.
- [4] 黄启艳.富水破碎砂岩隧道涌水预测及施工治理措施研究[J].铁道建筑技术,2024(7):166-168,185.
- [5] 朱杰兵,吕思清,汪斌,等.隧道突涌水灾害缩尺物理模型试验研究综述[J].长江科学院院报,2024,41(1):98-106,113.
- [6] 李勇,郝俊锁,刘俊峰,等.狮子山隧洞突涌介质特性与致灾模式[J].长江科学院院报,2022,39(12):26-32.
- [7] 温时雨,肖洋,秦云,等.滇中大引水隧洞典型致灾地质构造分析[J].现代隧道技术,2022,59(S1):719-726.
- [8] 董家兴,周志强,赵永川,等.滇中引水工程砂化白云岩隧洞围岩地质特征与破坏机制[J].岩石力学与工程学报,2024,43(S1):3464-3476.

2024,36:055152.

- [22] Xu Bin, Liu Xingyu, Liu Keyang, et al. Numerical investigation of thermodynamic effect on cavitation performance and cavitation-vortex interaction in an inducer [J]. *Ocean Engineering*, 2024,312:119127.
- [23] Norwegian University of Science and Technology. Experimental data for a high head francis turbine model at several operating [EB/OL]. [2024-06-27]. <https://www.ntnu.edu/nvks/f99-test-case2>.
- [24] Mao Xiuli, Liu Ze, Li Ting, et al. A brief review of numerical solving methods for internal fluid of pumped storage unit [J]. *International Journal of Energy Research*, 2020,39(8):95-102.
- [25] Zhao Minsheng, Wan Decheng, Gao Yangyang. Comparative study of different turbulence models for cavitation flows around NACA0012 hydrofoil [J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2021,9(7):742.
- [26] Ebrahim G, Mohammad H. A, Rickard E, et al. A comparative study between numerical methods in simulation of cavitating bubbles [J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2019,111:339-359.
- [27] Chen Ping, Liu Zhenming, Xu Rongwu, et al. Comparative investigation and test verification of cavitation and turbulence models of injector control ball valve [J]. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2024,109:109557.
- [28] 刘超群. Liutex-涡定义和第三代涡识别方法 [J]. *空气动力学学报*, 2020,38(3):413-431,478.

(上接第 91 页)

- [9] 晏启祥,刘琛尧,孙润方,等. 基于离散-连续耦合的岩溶隧道防突岩体安全厚度预测 [J]. *中国铁道科学*, 2024,45(2):90-100.
- [10] 李 尧,朱豪洋,罗彦斌,等. 基于离散元理论的第三系半成岩隧道破坏分析 [J]. *铁道工程学报*, 2022,39(7):74-79.
- [11] 丁 祥,侯宗政,朱永全,等. 第三系富水弱胶结砂岩隧道施工方案对比 [J]. *铁道建筑*, 2023,63(11):102-106.
- [12] 池建军,刘登学,丁秀丽,等. 第三系泥岩隧洞围岩大变形成因及应对措施 [J]. *长江科学院院报*, 2022,39(10):88-96.
- [13] 朱 举,乔春生,宋 仪,等. 颗粒特性对第三系弱胶结砾岩抗剪强度的影响 [J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2019,51(5):100-109.
- [14] 马志富,杨昌贤. 第三系高压富水砂泥岩地层隧道技术研究——以牡绥铁路双丰隧道为例 [J]. *隧道建设* (中英文), 2018,38(3):434-442.
- [15] 秦正贵,陈 勇. 蒙华铁路中条山隧道第三系地层工程地质特征研究 [J]. *隧道建设*, 2014,34(12):1163-1167.
- [16] 王 锋. 第三系富水粉细砂地层大断面隧道综合施工技术研究 [D]. 西安:西安建筑科技大学, 2018.
- [17] 王庆林,刘晓翔. 桃树坪隧道、胡麻岭隧道第三系富水粉细砂层围岩含水率与稳定性关系浅析 [J]. *现代隧道技术*, 2012,49(4):1-5,16.
- [18] 张学文. 桃树坪隧道穿越富水粉细砂地层塌方处治施工技术 [J]. *隧道建设* (中英文), 2018,38(2):308-315.
- [19] 雷 林,华永利,李冠鹏,等. 兰渝铁路胡麻岭隧道盲管堵塞病害分析与处理 [J]. *现代隧道技术*, 2020,57(6):149-153.
- [20] 熊春庚. 第三系富水泥质弱胶结粉细砂岩隧道施工关键技术 [J]. *兰州交通大学学报*, 2017,36(4):60-66.