

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2020.06.019

# 岩溶隧道突水突泥致灾构造评判方法研究

俞 剑

(中铁十六局集团 铁运工程有限公司, 河北 保定 074000)

**摘 要:** 针对岩溶地区隧道工程建设广泛面临的突水、突泥灾害风险, 提出一种集成地质识别、物探解译和钻探揭露的突水、突泥致灾构造评判方法。结合岩溶发育及其工程地质特征, 提出突水、突泥构造在地质识别、地质雷达法等勘探手段中的典型判据。以重庆石柱至黔江高速公路七曜山隧道为案例, 阐述该评判方法的实施流程及原则。结果表明: 岩层倾角及其组合方式、地质构造、地表形态等地质因素显著影响突水、突泥的发育及发生过程, 且上述因素在地质雷达探测及钻探揭露过程中存在明显征兆及典型判据; 岩溶隧道突水、突泥致灾构造评判方法以“地质先行, 物钻协作, 贯穿全程, 动态反馈”为实施原则, 能够有效提高致灾构造的识别准确度。

**关键词:** 岩溶隧道; 致灾构造; 地质识别; 物探解译

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2020)06—0109—06

## Evaluation Method for Geological Structures of Water-bursting and Mud-bursting Disasters in Karst Tunnel

YU Jian

(China Railway 16th Bureau Group Railway Engineering Co., Ltd., Baoding, Hebei 074000, China)

**Abstract:** Focusing on the risk of water – bursting and mud – bursting disasters in tunnel construction in karst area, a method for evaluating their geological structures which integrates geological identification, geophysical interpretation and drilling exposure was proposed in this paper. Combined with the karst development and its engineering geological characteristics, the typical criteria of water – bursting and mud – bursting disasters in geological identification and geological radar method were analyzed. Taking the Qiyaoshan Tunnel of Shizhu ~ Qianjiang Expressway in Chongqing as an example, the implementation process and principles of the evaluation method were described. The results are as follows. Geological factors such as dip angle and its combination mode, geological structure and surface morphology significantly affect the development and occurrence process of water and mud bursting, and there are obvious symptoms and typical criteria in the process of geological radar detection and drilling exposure. Based on the principle of "Geology first, material drilling cooperation, throughout the whole process, dynamic feedback", the method can effectively improve the identification accuracy of water – bursting and mud – bursting structures.

**Keywords:** karst tunnel; disaster causing structure; geological identification; geophysical interpretation

隧道修建过程需穿越各类复杂地质条件, 引发突水、突泥、塌方、大变形等一系列灾害现象。根据统计, 突水、突泥约占到隧道各类灾害发生比例的30%, 是隧道建设面临的典型难题。其中, 岩溶地层

是突水、突泥的高发地层, 具有水压力大、突发性强、影响范围广的特点<sup>[1-3]</sup>。因此, 建立突水、突泥灾变判识方法对岩溶地区隧道安全建设具有重要意义。

针对岩溶隧道突水、突泥的诱发因素, 钱七

虎<sup>[4]</sup>指出工程影响因素主要包括开挖、岩爆、注浆等,地质因素主要包括地下水、结构面、岩层产状、剥蚀面、地形地貌等。蓄水结构是突水、突泥的关键物源条件,林传年等<sup>[5]</sup>将岩溶隧道致灾构造划分为断层岩溶蓄水形式、地下河与岩溶管道蓄水形式、裂隙岩溶蓄水形式、溶腔溶潭蓄水形式、层间岩溶蓄水形式、组合型蓄水形式等。罗雄文<sup>[6]</sup>进一步将突水和突泥分开统计与分析,指出突水致灾构造分为富水压性断层破碎带、富水张性断层带、富水顺层错动破碎带、充水岩溶和向斜储水构造。针对岩溶隧道突水、突泥的发生机制,李术才等<sup>[7]</sup>基于边坡稳定性分析的条分法原理,对隧道-岩溶充填物-岩溶管道进行抽象概化,建立岩溶蓄水构造内部充填物的条分解析计算模型,推导岩溶蓄水构造的最小安全厚度计算公式。针对岩溶隧道突水、突泥过程发生特征,何发亮等<sup>[8-9]</sup>按时间特性可分为突发性、滞后性和阵发性,空间特性包括涌水位置与隧道在岩溶地下水动力剖面分带中的位置相关性。上述研究基本摸清了岩溶隧道突水、突泥的致灾机理及发生特征。

对于隧道突水、突泥灾害预测方法,工程地质条件是基本的评估依据,地球物理勘探方法也较为常用,包括地质雷达法、瞬变电磁法、地震波法等,可探明前方地层岩性与富水情况<sup>[10]</sup>。同时,一些数学分析方法也被引入突泥灾害风险评估研究中,例如赖永标<sup>[11]</sup>基于宜万铁路岩溶隧道及其他案例分析,建立隐伏溶腔隧道计算模型,将大型隐伏济腔简化为简支梁、固支梁、悬臂梁、固支板以及悬臂板五种模型,以此推导出最小安全厚度公式。此外,孙谋等<sup>[12]</sup>基于突变理论建立折叠式突变模型,推导岩溶隧道掌子面岩层断裂突水的临界条件。总体而言,对岩溶隧道施工突水、突泥灾害研究多集中在灾变过程、地质构造特征及致灾机理、防控措施、致灾构造明确前提下的解析预测等方面,而对突水、突泥致灾构造预报成套方法尚缺乏系统研究。

针对上述问题,本文提出一种集成地质识别、物探解译和钻探揭露的突水、突泥致灾构造评判方法,并阐述上述各类方法的实施内容及适用性,以及突水、突泥构造在地质识别、地质雷达法等各类勘探手段中的典型判据。在此基础上,以重庆石柱至黔江高速公路七曜山隧道为例,进行隧道突水、突泥致灾构造的辨识,验证该方法的实用性。

## 1 岩溶隧道突水、突泥致灾机理

岩溶隧道突水、突泥现象的发生是大量水或泥

水混合物等灾害物源积聚,岩溶地区内部裂隙、溶洞、地下暗河等不良地质构造以及地下工程活动等因素综合作用的结果。

### 1.1 灾害物源积聚

岩溶隧道突水、突泥灾害发生的首要因素是灾害源的不断积聚,即水体或泥水混合物在气候、地质变化以及人为活动等因素的影响下不断累积,为灾害的发生提供物源条件<sup>[13]</sup>。

灾害物源的积聚主要表现为:

(1) 在岩体的破碎带中往往存在丰富的高水压地下水,为突水现象的发生提供动力基础。尤其在雨季期间,水压骤然增加,发生突水、突泥现象的可能性会迅速增大。

(2) 隧道中的断层破碎带,节理密集区等较薄弱区域存在较多的砂、碎石、块石等角砾石,这些颗粒的黏聚力很低,在水力作用下极易形成散砂状流体,产生坍塌现象,为突泥现象提供物质基础。

因此,为了避免突水、突泥现象的产生,首先应从灾害物源的角度出发,采取合理措施,降低或消除灾害物源的积聚现象。

### 1.2 不良地质构造

地下岩体中常常存在着不同形式的空隙含水层,例如松散沉积物孔隙、坚硬岩层裂隙和岩溶结构均会形成含水层<sup>[14]</sup>。上述空隙含水层的数量、尺寸、走向、贯通情况和分布特征会影响水体的分布和运动特征。地下水对可溶沉积岩的软化和溶蚀作用会造成含水围岩的物理性质发生改变,减弱岩体强度,降低其自稳能力,甚至发生塌方事故,加剧地下空间工程突水、突泥现象的发生。因此,岩体的含水率越低,结构越完整,其所能承受的水压越大,越能更好地降低灾害现象的发生概率。

### 1.3 地下工程活动

隧道的开挖工程使得围岩应力在一定程度上得以释放,可能导致地质构造原本的平衡状态被打破,开挖面与积水空腔区域的距离、角度以及掌子面的开挖速度都会影响到水体或泥水混合物的压力梯度,从而增加突水、突泥发生的可能性。

## 2 突水、突泥致灾构造评判方法

### 2.1 致灾构造综合评判方法

本文提出的岩溶隧道突水、突泥致灾构造综合评判方法的实施流程如图 1 所示。地质识别提供先验信息,指导物探的实施和解译,物探指导钻探施工,地质、物探、钻探有机结合与相互印证,识别过程

动态反馈。然后,依据隧道的地质构造特征与临灾前兆信息、地球物理响应特征及钻探揭露结果,评判致灾构造的类型、位置、规模和含水特性。

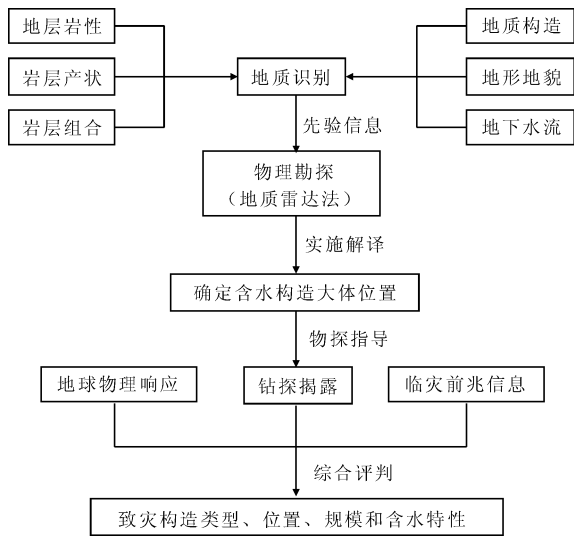


图1 隧道突水、突泥致灾构造识别流程

## 2.2 地质识别

(1) 地层岩性的不同会影响岩层溶解度。评判依据为岩溶发育程度随着岩层溶解度的增大和溶蚀速率的加快不断升高。

(2) 岩层倾角影响地下水补、径、排和入渗条件。评判依据为岩层倾角 $25^{\circ} \sim 65^{\circ}$ 最有利于岩溶发育; $10^{\circ} \sim 25^{\circ}$ 、 $65^{\circ} \sim 80^{\circ}$ 中等有利岩溶发育; $80^{\circ} \sim 90^{\circ}$ 弱有利于岩溶发育; $0^{\circ} \sim 10^{\circ}$ 微有利于岩溶发育。

(3) 岩层的组合效应,例如可溶岩与非可溶岩接触带易发育大型岩溶。评判依据为随着可溶岩层数量的增多,岩溶发育程度逐渐增强。

(4) 地质构造控制岩溶发育方向和规模。评判依据为岩溶在褶皱核部的发育概率大于翼部;背斜倾伏端、向斜挠起端容易发育岩溶;张性断层相比压性断层容易发育岩溶,扭性断层岩溶发育深度一般较大,往往形成大规模的溶洞和廊道。

(5) 地表形态、汇水面积等入渗条件影响着水源补给量,也会影响岩溶发育。评判依据为地表汇水面积和汇水量越大,溶沟、溶槽分布越密集,岩溶水下渗促使深部岩体溶洞溶腔强烈发育。

(6) 流动的地下水可以提供足够的侵蚀性 $\text{CO}_2$ ,降低水中 $\text{CaCO}_3$ 浓度,使地下水有较大的溶蚀能力。评判依据为地下水运动活跃部位,岩溶发育强烈;地下水运动缓慢部位,岩溶发育较弱;地下水停滞部位,岩溶基本不发育。

当隧道所处围岩符合上述突水、突泥地质孕灾

条件时,前兆标志一般包括:(1) 掌子面附近裂隙溢出泥质充填物,或有水沿裂隙渗出,且水流中含有细小岩粒或土粒;(2) 钻孔或炮孔中涌水量大幅增加,持续时间较长,且含泥沙或小砾石,水质有清浊变化;(3) 岩层出现明显的湿化和软化,隧道壁有水滴附着或出现渗水、淋水现象。

## 2.3 物探解译

物探解译方法主要包括TSP地震波法、高密度电法和地质雷达法等。其中,TSP地震波法根据地震波反射特性不同对突水、突泥致灾构造进行判识,但其需要专门的炸药,且分辨率低。地质雷达法也称为电磁波反射法,工作原理是当雷达发射的高频短脉冲电磁波传至被探测物体时,电磁波遵循反射定律,反射波由地质雷达接收信号形成雷达图像,原理如图2所示。地质雷达法具有快速无损、异常图像直观、分辨率高等优点,多应用在隧道超前地质预报中的短距离(15 m ~ 30 m)预报。

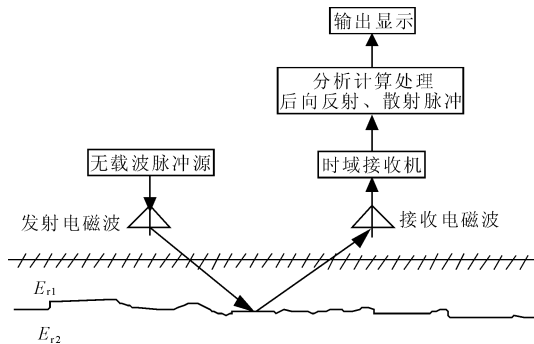


图2 雷达探测原理示意图

地质雷达法的解译依据为雷达仪发射的高频短脉冲电磁波在地质体中的传播速度和衰减率由岩石的导电特性所决定,并且对岩石类型的变化和裂隙含水情况异常敏感。在电磁波传播过程中,当遇到两种介电常数不同的介质分界面(如:界面、空洞、破碎带等)时,可能使部分透射波反射。评判依据为当电磁波反射波信号平静,无明显反射信号,能量呈正常衰减趋势时,说明岩层完整;当有明显的电磁波反射信号,反射信号同相轴较连续,并且反射的电磁波信号较强,则可能存在不良地质体。

## 2.4 钻探揭露

钻探揭露是获取掌子面前方及隧洞周围地质信息的最直接方法。因此,为了使物探地质解译更加准确,在通过地质识别与物探识别确定含水构造的大概位置分布后,还应开展钻探识别进行钻探揭露。钻探判别依据包括:

(1) 当钻速快但破坏能低时,说明岩体质软、破

碎;若钻速突然加快,可能遭遇岩溶充填物或软弱夹层;若破坏能突然增高,说明岩体强度变高;若钻速与破坏能高低变化频繁,说明岩体软硬交替,岩性多变。

(2) 当出现卡钻时,说明围岩破碎,多为裂隙发育的破碎带;当出现跳钻时,说明围岩含软弱夹层,可能存在溶洞;当出现坍孔时,一般为泥土、泥岩、碎屑岩等软弱岩层,或为充填型溶洞。

(3) 根据钻孔出水量、水压、水质清浊来判断掌子面前方含水体的压力大小和连通情况。当超前钻探有突进现象,且钻孔开始向外喷水,钻孔水压较高、水量较大且持续时间长,说明致灾构造中含有较高水压,地下水静储量较大;若钻孔涌水浑浊或时喷时停,且水中夹带泥沙或砾石,说明该致灾构造可能为大型充水充泥沙溶洞或地下河等大型岩溶致灾构造,揭露后极易发生突水、突泥灾害。

### 3 案例应用

#### 3.1 七曜山隧道简介

七曜山隧道为重庆石柱—黔江高速公路全线单洞最长的隧道,全长 5 400 m,也是全线重点控制性工程,如图 3 所示。该隧道位于重庆市石柱县,存在穿越煤层瓦斯地段、岩溶、破碎断裂带等多种不良地质。

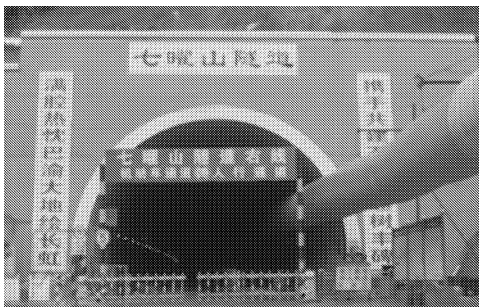
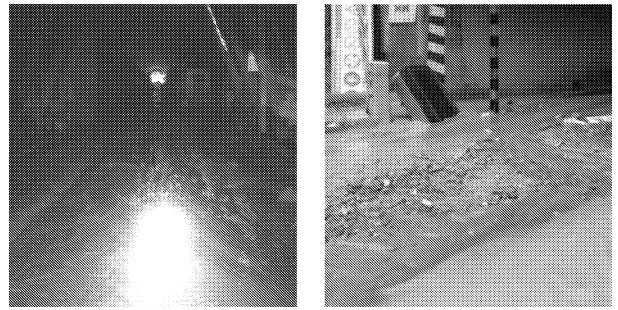


图 3 七曜山隧道洞口

在七曜山隧道施工过程中,多点、多次发生较大型( $1\ 000 \sim 10\ 000\ \text{m}^3/\text{h}$ )和特大型( $>10\ 000\ \text{m}^3/\text{h}$ )突水、突泥,日均涌水量高达  $23\ 000\ \text{m}^3$ 。以最具代表性的左洞 Z4 涌水点(K20+962)处第二次涌水为例,2018 年 6 月 12 日 8:30 开始出现突水、突泥,持续时长 1 h 20 min,共计涌出量约  $10\ 000\ \text{m}^3$ ;13:27 再次出现突水、突泥,持续时长 40 min,涌出量约  $8\ 000\ \text{m}^3$ 。涌出物呈黄褐色、棕红色,部分夹带有机质(腐木),含少量的碎石、砂石颗粒,此次突水、突泥后洞内沉积物  $2\ 000\ \text{m}^3$ ,如图 4 所示。



(a) 洞内情况

(b) 洞外情况

图 4 Z4 涌水点第 2 次突水、突泥

#### 3.2 综合地质评判结果

在七曜山隧道突水、突泥灾变地质超前预报中,遵循“地质先行、贯穿全程、物钻协作、补充印证、有机结合与动态反馈”原则。

##### 3.2.1 地质识别结果

以相关工程地质和水文地质资料为基础,结合洞外地质调查、示踪试验等补充探测方法,获得地质识别结果。七曜山隧址区地层主要为碳酸盐类岩层,岩溶发育条件良好。岩层倾角  $50^\circ \sim 70^\circ$ ,产状稳定,隧道洞身段岩层产状  $310^\circ \sim 325^\circ \angle 40^\circ \sim 63^\circ$ ,适合岩溶发育;隧址区背斜核部出露最老地层震旦系地层,两翼由寒武系、奥陶系、志留系、泥盆系、二叠系及三叠系地层组成。根据 2.2 节地质识别判据可知,岩层倾角越大,围岩水压越大,水力作用越强,隧址区岩层呈高陡倾状产出,是致灾关键因素之一。七曜山位于老厂坪背斜北西翼与石柱向东南翼之间,地质构造为单斜构造,但洞身段岩层发育二组裂隙,导水构造发育;地表汇水面积较大,双岔河、夏秋水河河床中存在 5 个落水洞,1 号落水洞如图 5 所示,隧道地下水运动活跃。根据土质及级配分析,隧道突泥物与地表河底沉积物系同源物质,且监测发现突水对降雨反应迅疾,说明隧道围岩导水构造贯通且与地表连通。



图 5 1 号落水洞

### 3.2.2 物探解译结果

采用地质雷达法对七曜山隧道出口进行超前地质预报,以里程为 YK21 + 053 处掌子面超前预报为例,预报范围为 YK21 + 073—YK21 + 057,共计预报 16 m。当前掌子面所揭露的围岩主要为中-厚层状灰岩,岩体较破碎,裂隙发育,地下水发育,掌子面底部存在大量涌状出水现象。地质雷达测线分布如图 6 所示,纵向测线 1、2 距掌子面 4 m 处存在积水情况,横线测线 3、4、5 距隧道中线约 4 m 处存在涌状出水情况,仪器无法探测。

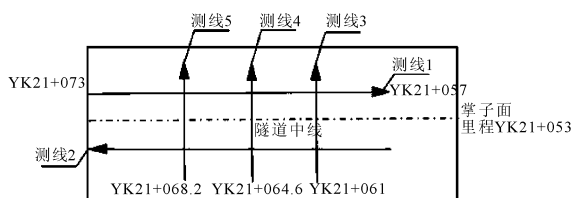
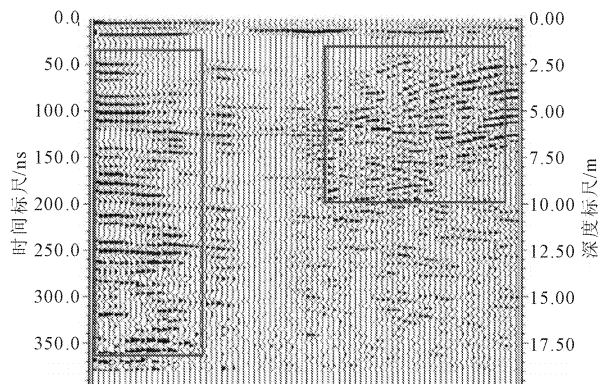


图 6 七曜山隧道出口端右洞地质雷达测线布置示意图

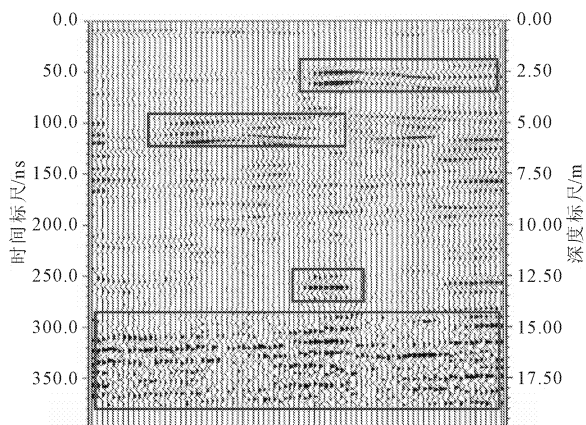
此次七曜山隧道出口端右洞超前地质预报的部分地质雷达波形图如图 7 所示。从图 7 可以看出,电磁波反射强,同相轴错断,局部连续,信号振幅较强。根据超前地质预报的地质雷达波形图分析,推测里程段 YK21 + 073—YK21 + 057 范围内围岩的地质情况如下:测线 2 处的岩体较破碎,地下水发育, YK21 + 073—YK21 + 064 段,深度 2.5 m ~ 10.5 m 范围内可能存在岩溶、溶蚀裂隙发育;测线 3 所测 2.5 m ~ 6.0 m 和 12.5 m ~ 17.5 m 处裂隙发育,裂隙水发育。结果表明隧道围岩部分区域雷达反射信号振幅增强、同相轴连续性差,但波形狭窄、振荡程度相对较低,说明岩溶含水介质以溶蚀裂隙和小型岩溶管道为主,未形成大型的岩溶地下暗河系统,但是岩溶管道畅通<sup>[1]</sup>。

### 3.2.3 钻探揭露结果

钻探揭露时出现明显的跳钻现象,根据钻探揭露的判别依据可知,围岩含软弱夹层或断裂破碎带和(充填型)溶洞,这为地下水的运移网络构成提供了先决条件。出现跳钻现象的主要原因在于七曜山隧道主要发育二组裂隙,岩层交汇处岩溶发育,由此产生多处导水构造;受断裂构造影响,岩溶管道沿构造方向发育。因此,地表水沿落水洞、层面裂隙带,向下径流,流到构造断裂带内的岩溶管道后,沿岩溶管道排泄,隧道开挖揭露岩溶通道后容易引起突水、突泥现象的产生。



(a) 测线2距隧道中线右侧约1.5 m处纵向测线



(b) 测线3距掌子面约8.0 m处横向测线

图 7 超前地质预报的部分地质雷达波形图

### 3.3 基于致灾构造综合评判方法的分析评价

通过本文提出的岩溶隧道突水、突泥致灾构造综合评判方法和综合地质评判结果可知:七曜山隧道易发生“与地表相通的溶蚀裂隙型与岩溶管道型涌水”。其主因是受控于动态河水流入落水洞中,通过导水构造、岩溶管道和岩层层面裂缝,流入隧道围岩临空面,发生突水、突泥;次因是导水构造网络系统将隧道周边围岩岩溶水静储量同步导入掌子面,发生突水、突泥。综上所述,隧道突水、突泥致灾构造发育于一定的地质环境条件下,其围岩性质、含水及充填情况具有独特的地球物理响应特征。因此,研究致灾构造的发育规律、地球物理响应特征和钻探揭露特征,确定其类型、位置和规模,对隧道安全快速施工具有重要的意义。

借助该综合评判方法,较为准确地判定出致灾构造所在位置及其特点,通过对比多种突水、突泥防控措施的优点,制定了“以排为主,新建泄水洞排水”的治理方案,极大地提高了隧道的排水能力,引排岩溶水一劳永逸,干净彻底。同时,保障了隧道的施工质量,减小了不必要的经济损失。

## 4 结 论

(1) 岩溶隧道突水、突泥一般是由灾害物源的不断积聚、不良的地质构造和地下工程活动等因素综合作用下引起的。本文提出一种有机结合地质识别、物探解译和钻探揭露的隧道突水、突泥灾害预测方法,并提出了各类评判方法的指标内容及典型判据,建立了“地质先行,贯穿全程,物钻协作,补充印证,有机结合与动态反馈”的实施原则,能够有效提高致灾构造的识别准确度。

(2) 采用本文方法成功识别出七曜山隧道岩层倾角多呈高陡倾状产出,隧道围岩溶蚀裂隙和小型岩溶管道发育,导水构造密集且与地表连通,隧道围岩水压高且突泥物与地表沉积物同源。突水、突泥病害主要由与地表相通的溶蚀裂隙型与岩溶管道型涌水引起,降雨是该隧道突水、突泥突石的主要动力。相关成果为突水灾害预防和处置提供了有益依据,表明该方法具有一定的可靠性和实用性。

### 参考文献:

- [1] 钟明文,喻自祥,汪红武,等.富水公路隧道地质灾害探测反演与防治研究[J].水利与建筑工程学报,2019,17(6):221-225.
- [2] 朱汉华.公路隧道设计与施工新法[M].北京:人民交通出版社,2019.
- [3] 黄鑫,许振浩,林鹏,等.隧道突水、突泥致灾构造识别方法及其工程应用[J].应用基础与工程科学学

报,2020,28(1):103-122.

- [4] 钱七虎.地下工程建设安全面临的挑战与对策[J].岩石力学与工程学报,2012,31(10):1945-1956.
- [5] 林传年,李利平,韩行瑞.复杂岩溶地区隧道涌水预测方法研究[J].岩石力学与工程学报,2008,27(7):1469-1476.
- [6] 罗雄文.深长隧道突水、突泥致灾构造及其致灾模式研究[D].北京:中国铁道科学研究院,2014.
- [7] 李术才,林鹏,许振浩,等.基于条分法原理的充填型岩溶蓄水构造突水、突泥最小安全厚度[J].岩土力学,2015(7):1989-1994,2002.
- [8] 何发亮,张玉川.隧道施工地质灾害与不良地质体及其预报[M].四川:西南交通大学出版社,2011.
- [9] 何发亮,李苍松,陈成宗.岩溶地区长大隧道涌水灾害预测预报技术[J].水文地质工程地质,2001(5):21-23.
- [10] 刘海东.隧道典型突水、突泥致灾构造超前探测响应特征与解释方法[D].济南:山东大学,2018.
- [11] 赖永标.隐伏溶洞与隧道间安全距离及其智能预测模型研究[D].北京:北京交通大学,2012.
- [12] 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.
- [13] 袁永才,李术才,李利平,等.尚家湾强岩溶隧道突水、突泥伴生灾害源综合分析[J].中南大学学报(自然科学版),2017,41(1):203-211.
- [14] 周宗青.隧道充填型致灾构造突水、突泥灾变演化机理及工程应用[D].济南:山东大学,2016.

(上接第 72 页)

可能出现集中突水的洞段主要为引水隧洞与断裂相遇地段,预测最大涌水量  $1\ 260.6\ \text{m}^3/\text{d} \sim 18\ 166.5\ \text{m}^3/\text{d}$ 。V类围岩都有可能发生轻微的大变形;断层破碎影响带存在大变形问题。采取必要措施后引水隧洞傍山浅埋地质条件基本可实现成洞。

### 参考文献:

- [1] 孙铁蕾,杨莉,王洁,等.引汉济渭输配水干线工程总体布局方案研究[J].水利规划与设计,2019(8):137-142.
- [2] 杨晓茹.陕西省引汉济渭调水工程受水区水资源优化配置研究[D].西安:西安理工大学,2006.
- [3] 曹正浩,闫弈博,毛文耀.引汉济汉工程水量调度方案初步研究[J].人民长江,2018,49(13):70-73.
- [4] 王兵,朱记伟,魏徐良.某电站引水隧洞施工方案研究与应用[J].水利与建筑工程学报,2017,15(1):30-34.
- [5] 刘媛,马清瑞.引汉济渭二期工程南干线3#输水隧

洞施工方案分析[J].陕西水利,2018(5):151-152.

- [6] 蒋锐,焦振华.引汉济渭工程主要工程地质问题[J].水利规划与设计,2019(6):133-136.
- [7] 段文硕,张治强,唐烈先,等.引汉济渭秦岭隧洞5号支洞岩爆微震响应研究[J].人民长江,2020,51(3):167-173.
- [8] 蒋锐,杨耿,焦振华.引汉济渭二期工程11#勘探试验洞涌水情况分析[J].陕西水利,2019(2):167-168.
- [9] 李宏伟,刘刚,宋晓峰.长距离输配水工程水土保持措施体系研究——以陕西省引汉济渭二期工程为例[J].水利技术监督,2019(2):136-139.
- [10] 康斌,雷龙.引汉济渭秦岭输水隧洞硬岩TBM掘进施工技术[J].人民黄河,2020,42(2):103-108.
- [11] 郭熹,柴军瑞.引汉济渭秦岭隧洞突涌水原因及涌水量预测[J].人民长江,2019,50(1):113-117.
- [12] 水利水电工程地质勘察规范:GB 50487—2008[S].北京:中国计划出版社,2008.