

基于风险评价的岩溶隧道综合超前地质预报技术研究

葛颜慧^{1, 2}, 李术才¹, 张庆松¹, 李利平¹, 刘斌¹

(1. 山东大学岩土与结构工程研究中心, 山东 济南 250061; 2. 山东交通学院土木工程系, 山东 济南 250023)

摘要: 在岩溶地区隧道施工过程中, 涌水、涌泥(砂)已经成为隧道施工的第一大害。对岩溶水进行准确及时的超前地质预报, 是当前岩溶地区隧道设计与施工中亟待研究与解决的关键问题。应用地质学、岩溶学理论对隧道进行地质分析, 运用模糊数学模型对隧道不同段落进行突水风险评价, 进行风险分级。根据各种物探方法的优缺点和对岩溶水预报的敏感性, 结合综合超前地质预报方法、原则, 优化了综合超前地质预报的预报方案和流程, 提高了岩溶水位探查的准确性, 并在沪蓉西高速公路乌池坝隧道予以实施。施工过程中, 严格实施综合超前地质预报技术: 通过地质分析和模糊数学模型, 把乌池坝隧道划分为具有不同地质灾害风险等级的地段, 在不同风险等级地段, 制定了不同的预报方案。通过实施该综合超前地质预报方案, 成功预报了隧道掌子面前方的岩溶水, 证实了该方案的科学性和可行性。

关键词: 风险评价; 风险分级; 岩溶隧道; 综合地质预报; 乌池坝隧道

中图分类号: P642

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2010)07-1124-07

作者简介: 葛颜慧(1979-), 男, 山东潍坊人, 博士研究生, 从事岩土工程理论及现场监测方面的研究工作。E-mail: nepenthes@163.com。

Comprehensive geological prediction based on risk evaluation during tunneling in karst area

GE Yan-hui^{1, 2}, LI Shu-cai¹, ZHANG Qing-song¹, LI Li-ping¹, LIU Bin¹

(1. Research Centre of Geotechnical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China; 2. Department of Civil Engineering,

Shandong Jiaotong University, Jinan 250023, China)

Abstract: During the construction of tunnels in karst mountain, water inrush and gushing mud (sand) disaster has ranked the first in all the disasters. The exact and timely geological prediction is the critical problem most needed to be studied and solved in the design and construction of tunnels in karst zone. The theories of geology and karstology are used for the geological analysis of the tunnel. A fuzzy mathematical model is put forward to evaluate the risk of different parts along the tunnel, and the risk rank is given. According to the advantages and disadvantages of various geophysical methods and the sensitivity of forecasting karst water, and with the method and principle of the comprehensive geological prediction, the forecast program and process of comprehensive geological prediction are optimized and the accuracy of the position exploration of karst water is improved greatly. And the forecast technology is used during the construction of the Wuchiba tunnel of Shanghai-Chendu Expressway west. During the construction of the tunnel, the comprehensive geological prediction technology is implemented strictly. Through analyzing the geology and the fuzzy mathematical model, different risk rating parts of geological disasters along the tunnel are divided. In different risk rating zones, different programs are enacted. Based on the programs, the karst water is successfully forecast, and the scientificity and feasibility are validated.

Key words: risk evaluation; risk ranking; karst tunnel; comprehensive geological prediction; Wuchiba tunnel

0 引言

随着中国西部大开发战略的深入开展和实施, 在地形、地貌及地质背景极其复杂的西部地区, 将修建越来越多的长大隧道(数量多、长度大、大断面、大埋深)。长大隧道将是中国隧道工程发展的总趋势^[1], 由于埋深大(有的甚至超过 2000 m 以上)、洞线长(有

的长达几十公里), 致使施工前期的勘查工作十分困难, 难以全部查清隧道沿线的工程、水文地质条件,

基金项目: 国家自然科学基金项目(50539080; 50874068); 国家 973 计划项目(2007CB209407)

收稿日期: 2009-04-08

在施工过程中经常出现塌方、涌水、涌泥等地质灾害,给施工带来极大困难,甚至造成巨大的财产损失和人身伤亡事故。2006年1月21日,宜万铁路马鹿箐隧道突水,死亡9人;2007年8月5日,野三关隧道突水,死亡10人。能否对岩溶水进行准确预报是防止类似重大事故的关键。因此,在风险评价的基础上对岩溶隧道实施综合超前地质预报技术研究,可以针对重点区段制定预报方案,有重大的理论与现实意义。

自隧道地质预报作为施工中的必要工序^[1]后,TSP^[6],地质雷达^[4, 9],瞬变电磁^[10, 12],陆地声纳^[11],红外探测仪^[5]等结合超前钻在隧道地质预报方面日趋成熟且各有特长,但预报方法比较单一。实践证明,单一方法预报岩溶水的精度不够。隧道施工综合超前预报技术^[7, 13]已经提出,但不够系统,李术才^[2-3]提出基于风险分级的综合超前地质预报技术,但风险分级基于定性判断且未形成按风险分级的岩溶水预报方案,亟需开展岩溶水探查的综合超前地质预报技术研究。

1 突水风险评价

1.1 岩溶隧道突水的主控因素

(1) 岩组

岩组是决定岩溶发育的重要影响因素,含水层一般按照岩性分为强岩溶含水层、中等岩溶含水层、微弱岩溶含水层和非可溶岩相对隔水层4类。

中国南方约5000 m的碳酸盐岩沉积剖面中有寒武系石龙洞灰岩、三游洞灰岩,奥陶系南津关灰岩,泥盆系融县灰岩,石炭系黄龙马平灰岩,二叠系茅口灰岩,三叠系嘉陵江灰岩等8~9个强岩溶含水层。

二叠系栖霞灰岩、长兴灰岩和三叠系大冶灰岩,在多数地区属中等岩溶含水层,个别地区有时为强岩溶含水层;多数白云岩属中等或微弱岩溶含水层;含泥质灰岩岩组多数属微弱岩溶含水层。碳酸盐岩剖面中,非可溶岩组一般均属于相对可靠隔水层。

(2) 地下水

地下水是构成岩溶隧道突水的根本要素。年最高地下水位与隧道底板的高差,即地下水头的大小决定突水的危害程度。据专家经验,如果含水构造空腔中充填的碎屑堆积物尚未固结或固结十分微弱,地下水水头高于隧道底板60 m时,隧道瞬时突水迅猛,突水突泥量极大,突水会造成重大人员伤亡和财产损失,风险最高,定为Ⅰ级;地下水水头 $30\text{ m}<h<60\text{ m}$ 时,风险次之,定为Ⅱ级;地下水水头 $0\text{ m}<h<30\text{ m}$ 时,引起突水的细粒充填物质的渗蚀过程很长,涌水涌泥突发性大大减弱,定为Ⅲ级;地下水水位低于隧道底

板时,不会造成涌水,定为Ⅳ级风险,风险等级最低。

(3) 地质结构面

岩体中各种原生地质结构面(断层、裂隙、节理、层面)是地下水的主要运移通道,次生溶蚀管道主要沿这些结构面发生。其中沿张扭性断层和巨裂隙、层面裂隙、岸边卸荷裂隙往往发育巨大洞穴系统。构造断裂结构面对洞穴管道和强烈岩溶发育带方位的贡献率超过层面。

(4) 岩层产状

受岩体各向异性的影响,水平产出的岩层入渗条件差,岩溶发育受到抑制。直立产出的岩层,因地表汇水面积小,岩溶分异反馈环中水交替一直较弱,导致岩溶发育较弱。最利于岩溶发育的岩层产状是倾角 $20^\circ\sim60^\circ$ 的单斜(向斜或背斜的翼部)。

(5) 沉积期古剥蚀面

沉积期古剥蚀面指可溶岩地层剖面中的沉积间断面。间断期沉积物抬到海水面以上,遭受风化,产生古岩溶。古剥蚀面包括间断面本身、间断面以上的陆相沉积和间断面以下的古溶蚀带。在中国按陆相沉积性质不同有3种类型的古剥蚀面:铁铝剥蚀面、磷酸盐剥蚀面、煤系剥蚀面。

在南方二叠系茅口灰岩顶部普遍发育煤系剥蚀面(在沪蓉西表现为吴家坪组底部煤系地层),在该剥蚀面以下大部分地区都发现了溶洞发育带。古剥蚀面被上覆沉积埋藏后,次生充填在深部相对微弱,当返回地表附近时经常有黄铁矿氧化引发次生溶蚀的迹象。

(6) 地貌

地表岩溶形态是地下河系统的地表形迹,洼地、漏斗、落水洞都是地下河系统的输入点,输入水量取决于各输入点的地表汇水面积。大型输入点如洼地、地下河入口的地下延伸就是暗河高级别支流的河道。

竖井、落水洞主要发育在包气带,除溶蚀作用外,还有重力坍塌和水流侵蚀作用。

(7) 降雨

隧道施工期处于雨季或有较大降雨,管道流地段,由于地表水的补给,水量迅速增多,水位升高,突水的可能性就变大;对于渗流、裂隙流地段,地表水虽入渗相对缓慢,但在一定时间内也会汇集到溶洞或暗河里,成为地下水的重要补给源,增加突水的可能性。

岩溶隧道突水影响因素各指标见表1。

1.2 突水风险评价模型

(1) 影响因素

确定影响因素,即因素集 $D=\{D_1, D_2, \dots, D_n\}$ 。

岩溶隧道突水影响因素主要有 D_1 为岩组, D_2 为地下水, D_3 为地质结构面, D_4 为岩层产状, D_5 为沉

表 1 岩溶隧道突水影响因素指标
Table 1 Indices of water inrush into karst tunnel

影响因素等级	岩组 D_1	地下水 D_2	地质结构面 D_3	岩层产状 D_4	古剥蚀面 D_5	地貌 D_6	降雨 D_7
I	强	>60 m	强	20° ~60°	强烈溶蚀带	大型负地形	雨季大场雨
II	中等	30< h <60 m	中等	0° < a <20°	中等溶蚀带	中等负地形	雨季小场雨
III	微弱	0< h <30 m	较弱	60< a <90	有弱溶蚀带	较小负地形	旱季
IV	不发育	低于底板	无	垂直 水平	无	无	旱季

表 2 岩溶隧道突水风险分级指数表

Table 2 Risk rank indices of water inrush into karst tunnel

影响因素等级	岩组 D_1	地下水 D_2	地质结构面 D_3	岩层产状 D_4	古剥蚀面 D_5	地貌 D_6	降雨 D_7	P_i 值
I	19.25	17.5	14.875	13.125	11.375	7.875	3.5	87.5
II	13.75	12.5	10.625	9.375	8.125	5.625	2.5	62.5
III	8.25	7.5	6.375	5.625	4.875	3.375	1.5	37.5
IV	2.75	2.5	2.125	1.875	1.625	1.125	0.5	12.5

积期古剥蚀面, D_6 为地貌, D_7 为降雨。 $D=\{D_1, D_2, \cdots, D_7\}$ 。

(2) 评价集

将突水风险等级分为 4 级: V_1 为 I 级风险; V_2 为 II 级风险; V_3 为 III 级风险; V_4 为 IV 级风险。评价集 $V=\{V_1, V_2, V_3, V_4\}$ 。

(3) 突水风险的数学模型

每一个突水影响因素有 4 个指标或状态集, 记作 V_1, V_2, V_3, V_4 , 其中 $V_i=\{V_{i1}, V_{i2}, V_{i3}, V_{i4}, V_{i5}, V_{i6}, V_{i7}\}$ ($i=1, 2, 3, 4$), 表 1 可用矩阵表示为

$$V=V_{ij}\begin{bmatrix} V_{11} & V_{12} & \mathbf{L} & V_{17} \\ V_{21} & V_{22} & \mathbf{L} & V_{27} \\ \mathbf{M} & \mathbf{M} & \mathbf{L} & \mathbf{M} \\ V_{41} & V_{42} & \mathbf{L} & V_{47} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中, V 为隧道突水风险状态矩阵或指标矩, 视为隧道突水风险的数学模型。 V 的行向量为级别向量, 列向量为状态向量。

(4) 权值

由于突水诸影响因素在突水风险中所处的地位和作用不同, 分配其权数应有所不同。即 $A=(a_1, a_2, \cdots, a_n)$ 。根据各突水影响因素的优劣性质及其内在联系, 对诸地质因素的权数分布如下。

D_1 是突水风险的首位因素, 故分配其权数量最大, 即 $a_1=1$, 由 D_2, D_3, D_4 这 3 个因素是影响水的存储与运移的因素, 一般把岩组视为岩溶发育的主要因素, 同时结构面对突水的影响也较大, 岩层产状也是控制因素之一, 确定 $(a_2, a_3, a_4)=(0.9, 0.8, 0.7)$, D_5 对突水的影响也较重要, $a_5=0.6$, D_6, D_7 为辅助因素, $(a_6, a_7)=(0.4, 0.2)$ 。将 a_n 值代入上式得: $A=1/D_1+0.9/D_2+0.8/D_3+0.7/D_4+0.6/D_5+0.4/D_6+0.2/D_7$, 把它归一化后, 用向量表示, 得 $(a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6,$

$a_7)=(0.22, 0.20, 0.17, 0.15, 0.13, 0.09, 0.04)$ 。

可见, D_1 所得的权数最大, 占总权数的 22%, 即岩组因素是主要的因素。如果把 $D_1\sim D_5$ 的权数累加, 占总数的 87%, 可见突水风险主要由这 5 个因素构成。

(5) 模糊综合评判模型

为反映突水风险, 引入以下模糊关系:

$$V=\begin{bmatrix} a_1p_1 & a_2p_1 & \mathbf{L} & a_7p_1 \\ a_1p_2 & a_2p_2 & \mathbf{L} & a_7p_2 \\ a_1p_3 & a_2p_3 & \mathbf{L} & a_7p_3 \\ a_1p_4 & a_2p_4 & \mathbf{L} & a_7p_4 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中, V 称为隧道突水风险分级指数矩。

P_i 可由经验判断或专家评定。这里, P_i 值采用 1/8 与 3/8 的差值约为 0.25 的等差数列与之对应, 扩大 100 倍, 成为百分制的分值, 得到 4 级突水风险等级的 P_i 值如下: $P_1=87.5, P_2=62.5, P_3=37.5, P_4=12.5$ 。经计算, 其结果列于表 2。

根据隧道区段各项影响因素, 计算表 2 中各项对应的分量, 求得各指数之和, 即综合评定的岩溶隧道突水风险的分值, 也是确定定出突水风险等级的依据: 风险等级为 I, II, III, IV, 分值分别为 $(75,100]$, $(50,75]$, $(25,50]$, $[0,25]$ 。其中, 突水风险等级 I 级最高, IV 级最低。

2 高风险岩溶隧道综合超前地质预报技术体系

2.1 综合超前地质预报技术

地质预报方法一般分为地质分析法和物探类方法。地质分析法: 工程地质调查法、超前导洞(坑)法、超前钻孔法、经验法等; 物探类方法: TSP 超前地质探测、地质雷达法、瞬变电磁法、激发极化法等。不同预报方法的适用范围和优缺点如表 3, 4。

表 3 超前地质预报方法及适用范围
Table 3 Methods and scope of geological prediction

预报方法	预报距离	技术原理	适用范围
工程地质法	全洞段	地质知识	围岩类别, 富水带, 断层, 地温, 高地应力, 有害气体等
经验法	前方一定距离	工程地质经验	富水带, 断层, 岩爆, 高地应力, 有害气体等
超前钻探	前方 30 m	勘探法	围岩类别, 富水带, 断层, 高地应力, 有害气体等
TSP	前方 150 m	地震波法	围岩类别、岩性变化, 断层, 溶洞及富水带位置
地质雷达	10~25 m	电磁波	断层, 溶洞和富水带位置和规模
红外探水	30 m	红外线法	含水构造
瞬变电磁法	50 m	电磁法	充水断层, 充水充泥溶洞, 充水充泥破碎带的位置和规模
激发极化法	30~50 m	电法	预测富水带的位置和规模, 在隧道中还未应用

表 4 常见的超前预报方法的特点
Table 4 Characteristics of geological forecast methods

预报方法	特点
地质分析法	宏观地质分析 随时进行, 不影响施工, 可推断和预报隧道工作面前方的工程、水文地质情况。结果较为粗略, 需与物探方法相结合。 地质素描 不占用施工时间, 预报的效果好, 能为整个隧道提供了完整的地质资料。缺点: 预报距离较短。
超前钻探法	可反映岩体概况, 结果比较直观。缺点: ①在复杂地质条件下预报效果较差, 很难预测到掌子面前方的的小断层和贯穿性大节理, 特别是较难预报与隧道轴线平行的结构面; ②无法反映钻孔与钻孔之间的地质情况。
TSP	可定量反应岩体参数, 对工作面前方遇到与隧道轴线近垂直的不连续体(节理、裂隙、断层破碎带等)的界面, 结果比较可靠。缺点: 对不连续体的界面形状不规则和水预报精度较差。
地质雷达	对于断裂带特别是含水、破碎带有较高的识别能力。缺点: 雷达记录易受干扰。
瞬变电磁或激发极化	能够探查掌子面前方的低阻体(含水体)。缺点: 在隧道中应用不成熟, 易受干扰。

高风险岩溶隧道综合超前地质预报技术, 就是在突水风险评价进行不同区段风险分级的基础上, 在不同等级的地段, 用地质分析和不同物探方法相结合预报掌子面前方地质情况的技术。

2.2 综合地质预报的原则

隧道综合超前地质预报应遵循“洞内外结合, 以洞内为主; 长短结合, 以短为主; 地质与物探结合, 不同物探方法结合”的原则。

2.3 综合地质预报的程序

综合超前地质预报实施程序:

(1) 实施宏观超前地质预报, 即通过区域地质资料和深入的地质调查, 通过地质分析方法, 进行风险评价和分级。

(2) 进行长期超前地质预报, 即采用多种方法的综合勘探技术手段, 定性和定量地预报距掌子面前方 50~200 m 范围内的不良地质体。

(3) 进行短期超前地质预报, 即预报距掌子面前方 50 m 范围内的不良地质情况。所采用的预报方法主要为物探仪器测试、超前钻探及经验法。综合超前地质预报的实施流程图 (图 1)。

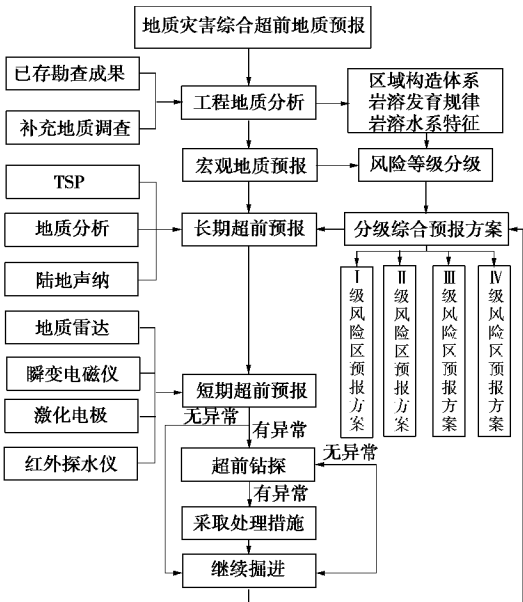


图 1 综合超前地质预报流程图

Fig. 1 Flow chart of comprehensive geological prediction

2.4 综合地质预报方案

根据风险评价, 对不同风险等级的区段制定不同的综合超前地质预报方案 (表 5)。

表 5 不同风险分级与对应的综合超前地质预报方案

Table 5 Comprehensive geological forecast programs

风险等级	综合预报方案	
	必备手段	辅助手段
I	TSP、超前钻探	地质雷达、瞬变电磁
II	TSP、超前钻探	地质雷达、陆地声纳
III	TSP	地质雷达、超前钻探
IV	TSP	—

注：①使用必备手段探测后，应根据结果修正风险等级；②必备手段应大概确定需防范的岩溶灾害类型；③原则上应用地质雷达确认岩溶洞穴，用瞬变电磁确定较远水体，用地质雷达确定近端水体；④钻探是查清较大不良地质体的直接手段。

3 乌池坝隧道预报实例

3.1 工程概况

沪蓉西高速公路穿越鄂西南褶皱山区，该地区为岩溶山区，地势陡峻，冲沟发育，为构造剥蚀、溶蚀低中山地貌。乌池坝隧道是控制全线工期的难点工程之一，位于白果背斜的北西翼、金子山复向斜南东翼，呈现单斜构造特征。隧道区域发育白岩坝（A-8）和团堡一小溪（A-9）暗河系统（宜万铁路马鹿箐隧道也受这两个暗河系统的影响）两个规模较大的暗河系统（图 2），隧道发生涌水、涌泥灾害的可能性极大。

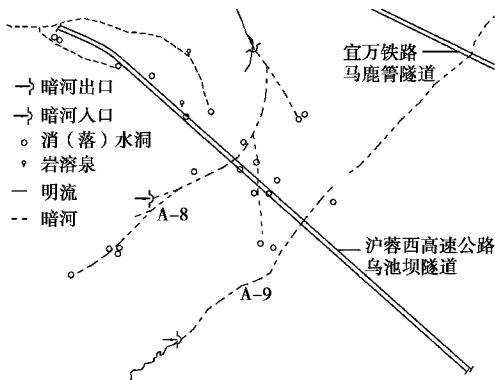


图 2 乌池坝隧道地质平面示意图

Fig. 2 Geological plan of Wuchiba tunnel

3.2 综合超前地质预报

(1) 突水风险评价

隧道 ZK256+620—ZK257+020 段为大冶组第二段薄层状灰岩，层理较发育，倾角 8°~10°，地下水位在隧道顶 150 m 左右，灰岩质地较纯，岩溶中等发育，地表为消坑大型岩溶洼地，雨季施工。

对该地段进行风险评价，该地段为突水风险为Ⅱ级（见表 6），因为逆坡施工，风险等级提高一级，故采用Ⅰ级风险对应的预报方案。

表 6 突水风险指标评价结果

Table 6 Results of risk rank indices of water intrush into karst tunnel

因素	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5	D_6	D_7	$\sum D_{ij}$
指标	中等	$h>60$	—	8~10	—	大型	雨季	
P_i	13.75	17.5	2.125	9.375	1.625	7.875	3.5	55.75

(2) 综合地质预报实施

采用表 3 中与Ⅰ级风险等级对应的预报方案。

a) TSP 超前地质预报

采用 TSP 进行长期预报，图 3、4 显示，ZK256+975—ZK256+889 段纵横波速度明显降低，纵横波速之比增加，泊松比突然增大，密度减小，动态杨氏模量也减小，且横波反射明显较纵波反射强，特别是 ZK256+937 附近反射强烈，表明该范围内围岩的强度降低，岩体质量和稳定性变差，且可能存在一定量岩溶裂隙水。

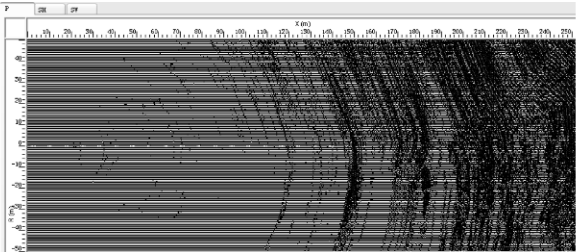


图 3 深度偏移图

Fig. 3 Depth migration

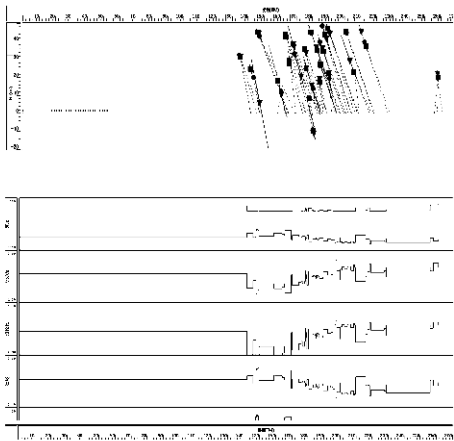


图 4 预报结果 2D 视图

Fig. 4 2D view of predicted results

b) 红外探水仪预报

TSP 预报水的准确性较差，为了进一步确定是否有水，采用红外探水仪进行短期超前预报。红外辐射曲线上升或下降均可以判定有水，其他情况判定无水。红外探水仪探测结果（图 5）表明，自 ZK256+954 开始，曲线发生突变，说明掌子面前方 30 m 范围内可能存在含水水体，但无法确定水体的具体位置和规模。

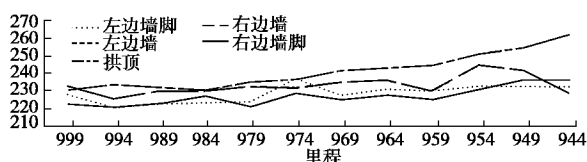


图5 红外探水成果图

Fig. 5 Infrared water detecting

c) 地质雷达预报

为进一步确定岩溶水的位置,采用 SIR-3000 地质雷达进行短期预报。探测结果(图6)表明 ZK256+944 和 ZK256+932 位置出现强负反射,且高频成分被大量吸收,反射波优势频率明显降低。因水体和围岩的介电常数相差较大,导致反射系数较大、振幅增强、反射强烈,判断该位置有水存在。

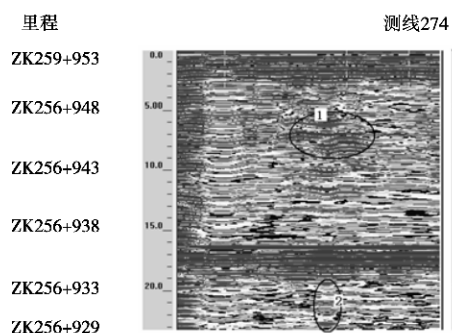


图6 地质雷达解译成果图

Fig. 6 Results of GPR

d) 超前钻探预报

在 TSP、红外探水仪和地质雷达预报均确认前方有裂隙水,为确保施工安全和制定合理的施工方案,进行超前地质钻探,在 ZK256+931 左右有水涌出,水质清澈,在整个过程中水质无变化且水压不大,如图7所示。



图7 超前钻孔涌水图

Fig. 7 Water inrush from the drilling

e) 钻孔窥测仪探测

为确认前方是否存在溶洞,采用钻孔窥测仪对钻孔进行录像,最终确定为裂隙水,且看清了钻孔内部

裂隙的分布位置(图8)。

在乌池坝隧道实施突水 I 级风险综合超前地质预报技术:首先通过风险评价判定突水风险等级,确定所要采取的综合预报手段;然后用 TSP 方法和红外探测仪确定了可能含水的关键段落,进而使用地质雷达法探明了水体的具体位置,最后使用超前钻探和钻孔窥测仪对含水体的位置、规模和水量进行了精确探查。可见,该技术体系能成功预报掌子面前方的岩溶裂隙水,为施工提供依据,确保施工安全。



图8 钻孔岩壁裂隙图

Fig. 8 Crack of the drilling

4 结 论

(1) 岩溶地区隧道施工期间能否准确预报岩溶水,是保证岩溶隧道安全施工的关键。本文提出的基于风险评价的综合超前地质预报技术的方法、原则及预报优化方案和程序具有较好的可行性与实用性。

(2) 综合超前地质预报,必须遵循“洞内外结合,以洞内为主;长短结合,以短为主;地质与物探结合”的原则。以风险评价为基础,对隧道不同风险等级区段,制定不同预报方案,以提高预报精度。在超前地质预报实施过程中,先实施长期预报,发现有不良地质体时,按既定预报方案,实施短期预报,准确预报水的位置、性质和规模。

(3) 应用基于风险评价的综合超前地质预报技术体系,对乌池坝隧道实施了超前地质预报,实践证明,探查岩溶水的综合超前地质预报技术能准确的判断岩溶水的位置和来源。

参考文献:

- [1] 王梦恕. 对岩溶地区隧道施工水文地质超前预报的意见[J]. 铁道勘察, 2004, 1: 7 - 10. (WANG Meng-shu. Hydrologic and geological forecast of tunnel construction in the karst district[J]. Railroad Survey, 2004, 1: 7 - 10. (in Chinese))
- [2] 李术才, 薛翊国, 张庆松, 等. 高风险岩溶地区隧道施工地

- 质灾害综合预报预警关键技术研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, **27**(7): 1297 - 1307. (LI Shu-cai, XUE Yi-guo, ZHANG Qing-song, et al. Key technology study on comprehensive prediction and early warning of geological hazards during tunnel construction in high-risk karst areas[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, **27**(7): 1297 - 1307. (in Chinese))
- [3] 李术才, 李树忱, 张庆松, 等. 岩溶裂隙水与不良地质情况超前预报研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, **26**(2): 217 - 224. (LI Shu-cai, LI Shu-chen, ZHANG Qing-song, et al. Forecast of karst-fractured groundwater and defective geological conditions[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, **26**(2): 217 - 224. (in Chinese))
- [4] 吴俊, 毛海和, 应松, 等. 地质雷达在公路隧道短期地质超前预报中的应用[J]. 岩土力学, 2003, **24**(增刊): 154 - 157. (WU Jun, MAO Hai-he, YING Song, et al. Application of ground probing radar to short-term geological forecast for tunnel construction[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, **24**(S): 154 - 157. (in Chinese))
- [5] 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): 855 - 857. (WANG Ying, CHEN Qiang, WEI You-yi, 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): 855 - 857. (in Chinese))
- [6] 刘志刚, 刘秀峰. TSP在隧道隧洞超前预报中的应用与发展[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, **22**(8): 1399 - 1402. (LIU Zhi-gang, LIU Xiu-feng. TSP application and development in tunnel forecast[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, **22**(8): 1399 - 1402. (in Chinese))
- [7] 曲海峰, 刘志刚, 朱合华. 隧道信息化施工中综合地质预报技术[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, **25**(6): 1246 - 1251. (QU Hai-feng, LIU Zhi-gang, ZHU He-hua. Technique of synthetic geologic prediction ahead in tunnel informational construction[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, **25**(6): 1246 - 1251. (in Chinese))
- [9] 白冰, 周健. 探地雷达测试技术发展概况及其应用现状[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, **20**(4): 527 - 531. (BAI Bing, ZHOU Jian, Advances and applications of ground penetrating radar measuring technology[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, **20**(4): 527 - 531. (in Chinese))
- [10] 李貅, 郭文波. 瞬变电磁法在煤田矿井涌水通道勘察中的应用[J]. 西安工程学院学报, 2000, **22**(3): 35 - 38. (LI Xiu, GUO Wen-bo. Application TEM to exploration of water gushing channel way in coal field[J]. Journal of Xi'an Engineering University, 2000, **22**(3): 35 - 38. (in Chinese))
- [11] 钟世航. 陆地声纳法的原理及其在铁路地质勘测和隧道施工中的应用[J]. 中国铁道科学, 1995, **16**(4): 48 - 55. (ZHONG Shi-hang. The principle and application of landsonar method in railway geological survey and tunnel construction[J]. China Railway Science, 1995, **16**(4): 48 - 55. (in Chinese))
- [12] 吴有信. 宜万铁路马鹿箐隧道瞬变电磁法勘察效果[J]. 工程地球物理学报, 2007, **4**(1): 21 - 26. (WU You-xin. The transient-electromagnetic method investigate application in yichang-wanxian railway maluqing tunnel[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2007, **4**(1): 21 - 26. (in Chinese))
- [13] 刘志刚. 概论岩溶或地质复杂隧道隧洞地质灾害超前预报技术[J]. 铁道建筑技术, 2003(2): 1 - 5. (LIU Zhi-gang. On advance geological forecast of tunnels on karst or varied geological conditions[J]. Railway Construction Technology, 2003(2): 1 - 5. (in Chinese))