

文章编号:1001-4810(2009)03-0281-07

# 基于AHP的岩溶隧道涌水专家评判系统及其应用

杜毓超, 韩行瑞, 李兆林

(中国地质科学院岩溶地质研究所, 广西 桂林 541004)

**摘要:**为了将评判系统定性描述的各影响因子定量或半定量,以便直观而有效地进行隧道地质灾害防治,在已有的岩溶涌水专家评判系统基础上,采用层次分析技术(AHP)建立模型,将隧道岩溶涌水多因素量化集成,并导出隧道岩溶涌水综合指标( $S_{karst}$ ),用于评判不同岩溶水文地质条件下隧道涌水的风险性。应用该模型对乌池坝隧道岩溶涌水进行评价,结果为:ZK259+890~ZK258+500段和ZK255+405~ZK253+182段属低风险区段, $S_{karst} \leq 0.24$ ;ZK256+300~ZK255+405段和ZK258+500~ZK257+500段为中等风险区段, $0.24 < S_{karst} \leq 0.70$ ;ZK257+500~ZK256+300段为高风险区段, $S_{karst} > 0.70$ 。

**关键词:**AHP;隧道;岩溶涌水;评判系统

**中图分类号:**U456.3+3 **文献标识码:**A

## 0 引言

隧道岩溶涌水的预测是非常复杂的问题,目前在预测工作方面经常出现错误,其预测精度也远远不够<sup>[2~4]</sup>,韩行瑞教授提出的“岩溶隧道涌水专家评判系统”,系统分析了隧道岩溶涌水的机理并构建了评判模型,在我国铁路、公路隧道建设中得到了广泛应用。本文以“岩溶隧道涌水专家评判系统”为依据,采用层次分析法<sup>[5~7]</sup>(AHP)技术将岩溶隧道涌水有危险性的决策思维过程数字化,通过一系列数学方法对多层次、多方案系统做出综合评价,从而为方案的决策提供依据。层次分析法是基于系统论中的系统层次性原理建立起来的,它遵循认识事物的规律,把人的主观判断用数量的形式表达和处理,是一种较新的将定性和定量分析相结合的多因素评价方法,是一种将决策者对复杂系统的决策思维过程模型化、数量化的过程。因此,根据AHP的原理及评价步骤,计算隧道岩溶涌水风险性评价因子的权重系数,在一定程度上

克服了人为主观性。

## 1 模型的建立

### 1.1 控制因子的选取

影响隧道岩溶涌水的因子很多,根据韩行瑞教授“岩溶隧道涌水专家评判系统”,概括起来可分为:区域岩溶层段、岩溶层段中的岩溶水系统及类型、隧道洞身所处岩溶水动力分带、隧道洞身岩溶及岩溶结构面发育强度及空间位置等5大类(图1)具体如下:

#### ①隧道洞身揭露的区域岩溶层段

西南扬子地台区和华南褶皱带的强岩溶层均具有广泛的区域分布,尽管有岩相变化但基本都具有厚度大、分布广、质地纯的特点,地下河系统多分布在这些岩层中。因此,隧道洞身是否揭露这些岩溶层,揭露宽度多少,是判断突水的首要条件。

#### ②岩溶层段中的岩溶水系统及类型

在岩溶隧道涌突水研究中,对岩溶发育规律及涌

基金项目:所控项目“深埋隧道岩溶涌水预测及其机理研究”(2007)和湖北沪蓉西高速公路指挥部项目“湖北沪蓉西高速公路隧道岩溶水文地质专题研究”(2006)

第一作者简介:杜毓超(1974-),男,工程师,2001年毕业于吉林大学水文地质与工程地质专业,长期从事岩溶水文工程地质研究工作,E-mail:dyckarst@126.com。

收稿日期:2008-12-05

水水源的判断应分清是岩溶泉系统还是地下河系统，而后者才是造成重大和特大涌突水的根源。因此，隧

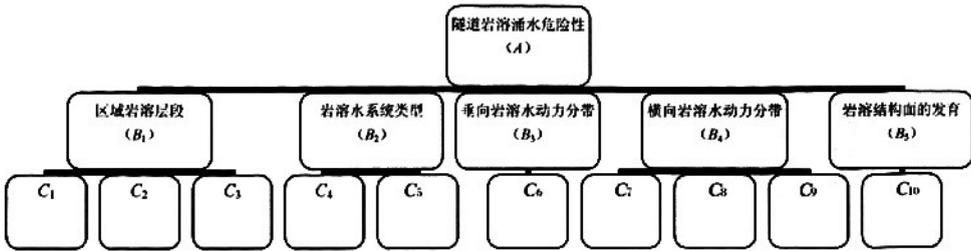


图1 岩溶涌水影响因子体系框图

Fig. 1 Framework for impacting factors system of karst gushing

C<sub>1</sub>: 区域强岩溶地层; C<sub>2</sub>: 区域中等岩溶地层; C<sub>3</sub>: 弱岩溶地层及层间岩溶; C<sub>4</sub>: 地下河系统或泉域补给面积 (km<sup>2</sup>); C<sub>5</sub>: 岩溶管道与隧道的距离 (m); C<sub>6</sub>: 枯水期水头 (m); C<sub>7</sub>: 位于排泄带; C<sub>8</sub>: 位于补给径流带; C<sub>9</sub>: 位于补给区; C<sub>10</sub>: 可能揭露溶洞直径或溶隙宽度 (m)

道洞身揭露地下河系统也是形成大型至特大型岩溶涌水的必要条件之一。本文以地下河系统或泉域的补给面积为评价指标。

③ 隧道洞身所处岩溶水动力分带

隧道洞身所处岩溶水动力带的不同,发生岩溶涌水的可能性及涌水特征就有所不同,必须通过钻孔水文地质观测,确定洞身所处的水动力分带,这是决定涌水特征及涌水量评价方法的重要因素。本文以枯水期水头高为评价指标。

④ 隧道洞身岩溶及岩溶结构面发育强度及空间位置

由于岩溶发育的不均一性,隧道发生岩溶涌水也具有机遇性,隧道洞身岩溶及岩溶结构面发育强度及空间位置主要是判定隧道岩溶涌水的可能性及涌水规模的关键要素之一。必须通过综合调查、岩溶结构面三维分析及深岩溶研究判断隧道可能揭露溶洞、溶隙的规模、位置。本文以隧道可能揭露溶洞直径或溶隙宽为评价指标。

在岩溶隧道涌水中,地下河系统是造成重大和特大涌突水的根源<sup>[1]</sup>。地质构造可切穿多个岩溶含水层,在地质构造的关键部位,如褶皱核部及断裂作用区,顺断裂和裂隙延伸方向发育大的岩溶管道(溶洞)可能性非常大<sup>[6~7]</sup>,也是发生涌水可能性极大的部位。

1.2 模型的构建

首先,采用多项式来综合考虑各因素的影响,建立评价模型,即:

$$S_{karst} = A_1 \cdot X_1 + A_2 \cdot X_2 + \dots + A_n \cdot X_n$$

式中, S<sub>karst</sub> 为岩溶涌水风险性分析结果, X<sub>i</sub> 为各影响因素, A<sub>i</sub> 为权重。

采用层次分析法(AHP)来确定各影响因素的权重。每一层次的因素相对于上一层次某一因素的相对重要性权值的确定可简化为一系列成对因素的判断比较,为了将比较判断定量化,通过专家咨询,引入1~9比率标度法<sup>[8~9]</sup>(表1)。

表1 岩溶涌水风险性影响因子重要性比较标度表

Tab. 1 Scaled table for the comparison of the importance of different impacting factors for the risk of karst gushing

重要性比较标度值	定义	包含的内容
1	同样重要性	两个因素对隧道岩溶涌水的影响相当
3	稍微重要	一个因素对隧道岩溶涌水的影响比另一个因素稍大
5	明显重要	一个因素对隧道岩溶涌水的影响比另一个因素明显重要
7	重要得多	一个因素对隧道岩溶涌水的影响比另一个因素重要得多
9	极端重要	一个因素对隧道岩溶涌水的影响比另一个因素极端重要
2, 4, 6, 8	两相邻判断的中值	上述两相邻判断的中值
上述各列的倒数	反比较	若因素 I 与因素 j 比较得判断 b <sub>ij</sub> , 则因素 j 与因素 I 比较的判断 b <sub>ji</sub> = 1/b <sub>ij</sub>

其次,组建判断矩阵,确定各层次及各影响因素的权重根。

依据建成的各影响因素重要性比较标度表,对前述选定的隧道岩溶涌水影响因子的层次结构及相关

关系进行判断比较,分别组建A-B、B<sub>1</sub>-C、B<sub>2</sub>-C、B<sub>3</sub>-C、B<sub>4</sub>-C和B<sub>5</sub>-C的判断矩阵,用方根法计算出各矩阵的最大特征根及特征向量,并进行一致性检验。

①组建A-B判断矩阵(如下)计算B<sub>1</sub>、B<sub>2</sub>、B<sub>3</sub>、B<sub>4</sub>和B<sub>5</sub>对A的权重

A	B1	B2	B3	B4	B5
B1	1	1/7	1/9	1/3	1/5
B2	7	1	1/6	5	3
B3	9	6/1	1	7	5/1
B4	3/1	1/5	1/7	1	1/3
B5	5	1/3	1/5	3	1

②求矩阵A中各行元素之乘积:  $M_i = \prod_{j=1}^m b_{ij} (i = 1, 2, 3, \dots, m)$

③计算M<sub>i</sub>的m次方根β<sub>i</sub>,得向量β<sub>0</sub>,即β<sub>i</sub> =  $M_i^{1/m} \beta_0 = (\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_m)^T$

④对向量β<sub>0</sub>作标准化处理,即令α<sub>i</sub> =  $\beta_i / \sum_{k=1}^m \beta_k (k = 1, 2, 3, \dots, m)$

从而得另一个向量:α = (α<sub>1</sub>, α<sub>2</sub>, ..., α<sub>m</sub>)<sup>T</sup>,此即为所求特征向量。经计算A-B矩阵的特征向量为:

$\alpha = (0.03160039, 0.220488738, 0.562433476, 0.061089306, 0.124388091)^T$ ,即为B<sub>1</sub>、B<sub>2</sub>、B<sub>3</sub>、B<sub>4</sub>和B<sub>5</sub>分别对A的权重。

⑤计算矩阵A的最大特征根:  $\lambda_{max} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{(A\alpha)_i}{\alpha_i}$ ,代入得λ<sub>max</sub> = 5.4285。

⑥权重的检验,即判断矩阵A的随机一致性比率:CR=CI/RI≤0.10时,表明判断矩阵A具有满意的一致性。其中:CI(CI=(λ<sub>max</sub>-m)/(m-1))表示判断矩阵A的一致性指标,计算得:0.107127;RI表示同阶判断矩阵的平均随机一致性指标。

同理,可组建相应的判断矩阵B<sub>1</sub>-C、B<sub>2</sub>-C、B<sub>3</sub>-C、B<sub>4</sub>-C和B<sub>5</sub>-C。

求出相应的特征向量(即权重值)分别为:b<sub>1</sub> = (0.6370, 0.2583, 0.1047)<sup>T</sup>;b<sub>2</sub> = (0.2500, 0.7500)<sup>T</sup>;b<sub>3</sub> = (1)<sup>T</sup>;b<sub>4</sub> = (0.7306, 0.1884, 0.0810)<sup>T</sup>;b<sub>5</sub> = (1)<sup>T</sup>。

CI值分别为:0.0192, 0.0000, 0.0000, 0.0324, 0.0000;CR值分别为:0.033199, 0.0000, 0.0000, 0.055938, 0.0000,均≤0.10,表明判断矩阵B<sub>1</sub>、B<sub>2</sub>、B<sub>3</sub>、B<sub>4</sub>和B<sub>5</sub>具有满意的一致性。

⑦层次C对层次A的权值计算,即α·b<sub>i</sub>,见表2。

表2 各层次之间的权值排序

Tab.2 The weight values sequences of different layers

层次	B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>	B <sub>3</sub>	B <sub>4</sub>	B <sub>5</sub>	C层对A层的权值(A <sub>i</sub> )
C <sub>1</sub>	0.03160039	0.220488738	0.562433476	0.061089306	0.124388091	0.0201
C <sub>2</sub>	0.6370					0.0082
C <sub>3</sub>	0.2583					0.0033
C <sub>4</sub>	0.1047	0.2500				0.0551
C <sub>5</sub>		0.7500				0.1654
C <sub>6</sub>			1			0.5624
C <sub>7</sub>				0.7306		0.0446
C <sub>8</sub>				0.1884		0.0115
C <sub>9</sub>				0.0810		0.0049
C <sub>10</sub>					1	0.1244

## 2 应用案例

### 2.1 乌池坝隧道的地质背景

研究区出露地层<sup>[10]</sup>有志留系下、中统,泥盆系中上统、石炭系、二叠系、三叠系下统及第四系,三叠系碳酸盐岩组在本区出露面积最大(图1)。志留系下中统岩性为页岩、粉砂岩;泥盆系呈条带状分布,与下伏

志留系地层呈平行不整合接触,岩性以灰白色层状石英砂岩为主;石炭系小片出露,岩性为白云岩夹少量石英砂岩、粉砂岩;二叠系主要为一套碳酸盐岩建造,局部夹碎屑岩,假整合于石炭系或泥盆系之上,在乌池坝隧道进口端硐身窄条带状出露,主要为下统栖霞组(P<sub>1q</sub>)和茅口组(P<sub>1m</sub>),上统吴家坪组(P<sub>2w</sub>)和长兴组(P<sub>2c</sub>)。栖霞组底部为石英砂岩,上部为厚层灰岩,

夹炭质灰岩;茅口组为厚层状泥灰岩含燧石结核或条带微晶灰岩;吴家坪组为厚层含燧石结核微晶灰岩、炭质页岩夹煤层;长兴组中厚层生物碎屑灰岩、白云岩,含燧石团块;三叠系为一套碳酸盐岩为主夹碎屑岩地层。乌池坝隧道出口端洞身围岩大部分为大冶组( $T_1d$ ),厚度约400 m,以灰色薄—厚层微晶灰岩为主,局部夹泥灰岩,下部薄层灰岩夹黄绿色泥页岩,底部为深灰色中—厚层微晶灰岩夹砂屑灰岩。

本区位于恩施盆地与利川盆地之间的隆起地带,属新华夏系联合弧形构造带的次一级构造单元,以发育于三叠系中的一系列次级褶皱组成的复向斜为特征。主要包括金子山向斜、白果坝背斜、四方洞向斜

等,轴线方向总体为 $NE30^{\circ}\sim 60^{\circ}$ 。乌池坝隧道位于白果坝背斜的北西翼、四方洞向斜南东翼的单斜地层中。主要发育两组节理裂隙:一组为 $NE(30^{\circ}\sim 70^{\circ})$ 走向,倾角 $80^{\circ}\sim 90^{\circ}$ ;另一组 $NW(300^{\circ}\sim 360^{\circ})$ 走向,倾角 $60^{\circ}\sim 80^{\circ}$ 。隧道附近局部还发育断层( $F_1, F_2$ ),其中 $F_1$ 断层产状为 $180^{\circ}\angle 70^{\circ}$ , $F_2$ 断层产状为 $315^{\circ}\angle 78^{\circ}$ 。

根据地质构造、岩溶发育及分布特征、岩溶含水介质、岩溶水流场特征等,研究区可分为白岩坝以及小溪河两个区域地下河系统,与隧道关系最为密切的地下河系统为白岩坝和小溪河地下河系统的次级系统——龙潭地下河与毛田地下河<sup>[11]</sup>(图2)。

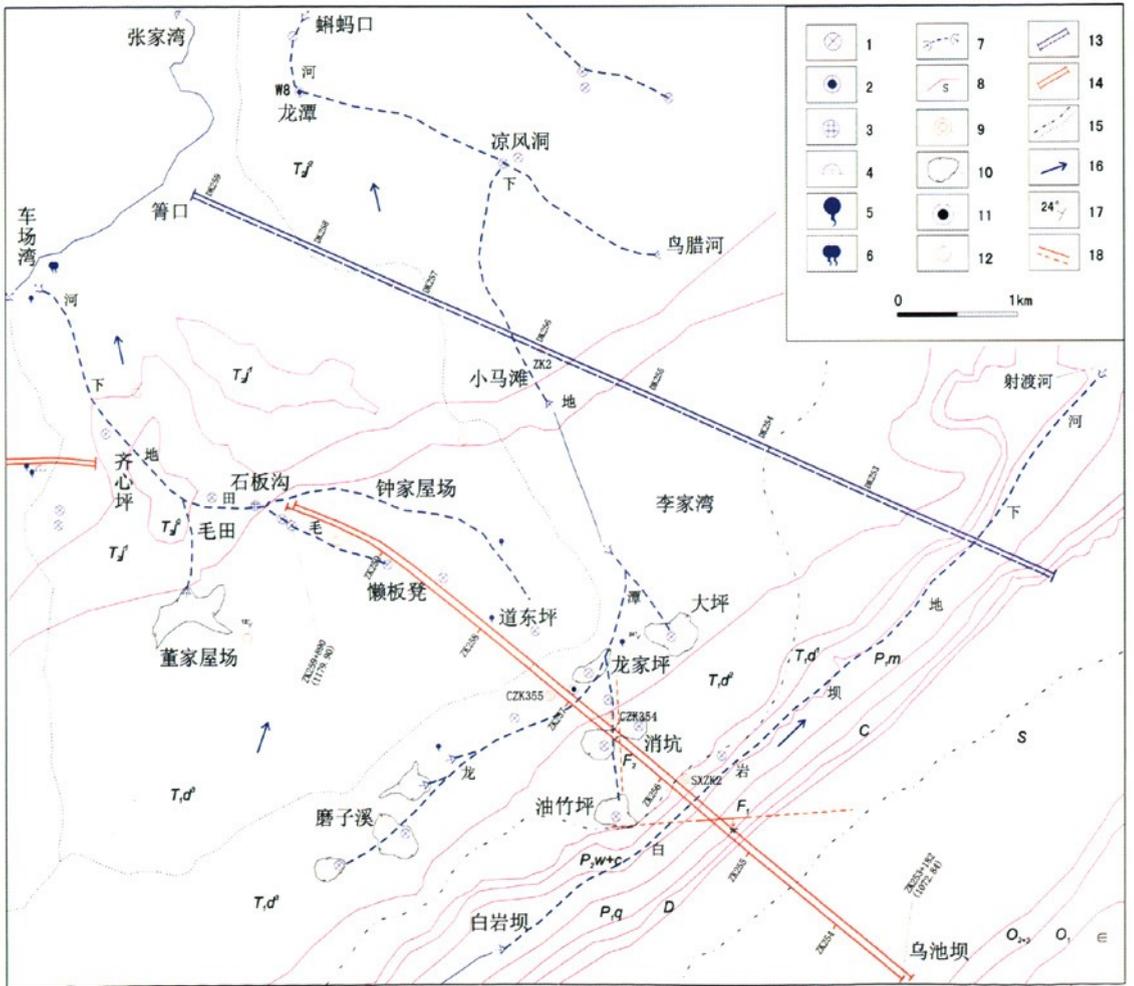


图2 乌池坝隧道岩溶水文地质图

Fig. 2 Karst hydrogeological map for the Wuchiba tunnel

1. 消(落)水洞; 2. 地下河天窗; 3. 岩溶竖井; 4. 溶洞; 5. 岩溶泉水; 6. 岩溶泉群; 7. 地下河及进、出口; 8. 地层界线及代号; 9. 钻孔;
10. 岩溶洼地; 11. 隧道通风竖井; 12. 地质点; 13. 铁路隧道线; 14. 公路隧道线; 15. 地下河系统及子系统边界; 16. 地下水流向;
17. 地层产状; 18. 断层及推测断层

白岩坝地下河系统位于团堡—金子山向斜的东南翼,总体沿地层走向(南西—北东)发育。补给源主要为季节性地表河流,隧道南侧汇水面积约10.5 km<sup>2</sup>,主要进水口位于白岩坝,标高1 250 m;出口位于射渡河水库内,以岩溶泉的形式排泄,枯季流量约350 L/s,雨季流量可达6 m<sup>3</sup>/s,标高为835 m。地下河长约7.2 km,平均水力坡度为57.6‰。

龙潭地下河系统平面展布呈树枝状。隧道南侧地下河的补给径流区汇水面积约9.1 km<sup>2</sup>。该地下河主要呈NE方向展布,自磨子溪,经龙家坪,于小马滩南约1.0 km处的溶洞(标高1 375 m)流出地表(枯季流量约为5.0 L/s,雨季流量约2.9 m<sup>3</sup>/s),又由小马滩落水洞伏流河谷之下,经凉风洞、龙潭到蝌蟆口(标高989 m)排出,长约7.5 km,其东侧发育一支流,自鸟腊河经凉风洞汇入龙潭地下河;毛田地下河系统呈NW展布,汇水面积约7.2 km<sup>2</sup>,主河道自董家屋场伏流口(标高1 165 m)、经毛田、齐心坪到箐口车坳湾溶洞(标高1 050 m)排出,枯季流量约为2.0 L/s,雨季流量约1.2 m<sup>3</sup>/s,长约3.0 km。该地下河发育两分支。其一分支,自懒板凳落水洞,经石板沟、于毛田汇入毛田地下河,长约1.5 km。另一分支,自道东坪消水洞,经钟家屋场、石板沟、于毛田汇入毛田地下河系统,长约3.0 km。

### 2.2 乌池坝隧道涌水风险预测

从区域地质、水文地质调查及典型剖面研究,隧道ZK259+890~ZK255+405段主要处于厚度较大,岩性较纯,地表、地下岩溶发育的二叠系下统栖霞组(P<sub>1q</sub>)、茅口组(P<sub>1m</sub>)和三叠系大冶组(T<sub>1d</sub>)强岩溶地层区,预测时模型中的“C<sub>1</sub>”取“1”,“C<sub>2</sub>”“C<sub>3</sub>”取“0”;ZK255+405~ZK253+182段处于志留系下、中统,泥盆系中上统、石炭系等的非岩溶地层,预测时模型中的“C<sub>3</sub>”取“1”,“C<sub>2</sub>”“C<sub>3</sub>”取“0”。

据隧道及其上覆岩层所处的水动力位置特征及枯水期水头高度,可将隧道分成6段(图3);即处于毛田地下河系统的包气带的ZK259+000~ZK259+890段,隧道洞身处于雨季水位以上;分别处于毛田地下河系统和白岩坝地下河系统的季节变动带的ZK258+500~ZK259+000段和ZK255+405~ZK256+300段,隧道洞身处于枯季水位以上,雨季水位以下;处于毛田地下河系统的浅饱水带(枯水期水头<100 m)的ZK257+500~ZK258+500段,隧道洞身处于枯季水位100 m以下;处于龙潭地下河系统的深饱水带(枯水期水头>100 m)的ZK256+300~ZK257+500,隧道洞身处于枯季水位100 m以上;处于非岩溶区的ZK255+405~ZK253+182段。

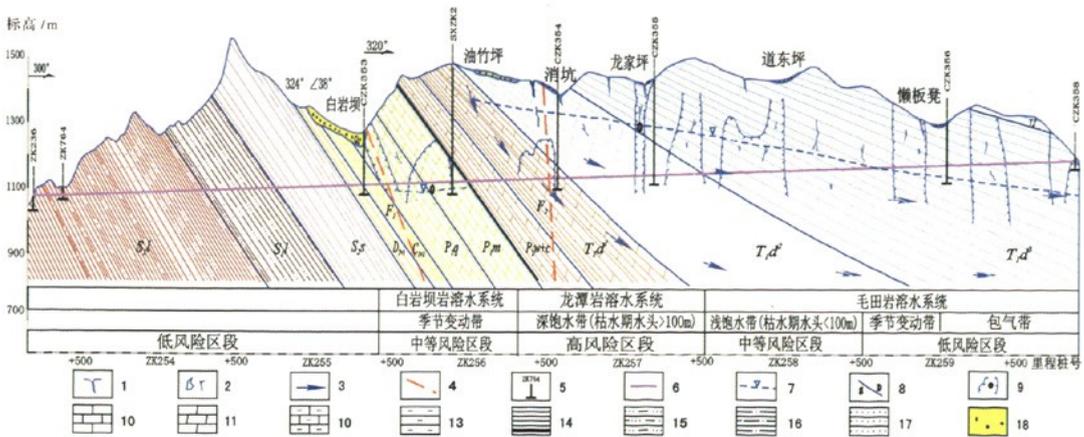


图3 乌池坝隧道涌水风险性分布图

Fig. 3 Distribution of the risk for tunnel gushing of Wuchiba

1. 消水洞; 2. 溶洞、溶隙; 3. 地下水流向; 4. 推测断层; 5. 钻孔及编号; 6. 隧道洞线; 7. 地下水位; 8. 地层界线及代号; 9. 物探异常区及地下河位置; 10. 灰岩; 11. 泥灰岩; 12. 泥质灰岩; 13. 泥岩; 14. 页岩夹煤线; 15. 泥质粉砂岩; 16. 粉砂质泥岩; 17. 砂岩; 18. 第四系

从构造上看,隧道ZK259+890~ZK259+000段与ZK258+500~ZK257+500段,岩溶结构面发育主要受节理裂隙的控制,推测地下岩溶中等发育,可能有岩溶管道(直径<80 cm)或溶隙(宽度<60 cm)通

过;ZK259+000~ZK258+500段,岩溶结构面发育主要受节理裂隙的控制,但地下岩溶不发育,未见结构面通过;ZK257+500~ZK255+405段,岩溶结构面发育主要受节理裂隙的控制,且有断层(F<sub>1</sub>、F<sub>2</sub>)发

育,推测地下岩溶强发育,可能有岩溶管道(直径>80 cm)或溶隙(宽度>60 cm)通过。

从岩溶水系统看,隧道 ZK259+890~ZK257+500 段与毛田地下河系统(补给面积 5~10 km<sup>2</sup>)有密切联系,隧道洞身位于地下河上方,其中隧道 ZK259+890~ZK259+000 段与 ZK258+500~ZK257+500 段处于补给径流区,预测时模型中的“C<sub>8</sub>”取“1”,“C<sub>7</sub>”“C<sub>9</sub>”取“0”,ZK259+000~ZK258+500 段处于补给区,预测时模型中的“C<sub>9</sub>”取“1”,“C<sub>7</sub>”“C<sub>8</sub>”取“0”;ZK257+500~ZK256+300 段立交于龙潭地下河系统下方约 100 m(补给面积≥10 km<sup>2</sup>),ZK256+300~ZK255+405 段立交于白岩坝地下河系统上方约 10 m(补给面积≥10 km<sup>2</sup>),且均处于补给径流区,上述两段预测时模型中的“C<sub>5</sub>”分别取“-100”和“+10”,“C<sub>9</sub>”取“1”,“C<sub>7</sub>”“C<sub>8</sub>”取“0”。

由上述条件,可建立预测模型: $S_{karst} = A_1 \cdot X_1 + A_2 \cdot X_2 + \dots + A_n \cdot X_n$ 。即: $S_{karst} = 0.0201 \cdot C_1 + 0.0082 \cdot C_2 + 0.0033 \cdot C_3 + 0.0551 \cdot C_4 + 0.1654 \cdot C_5 + 0.5624 \cdot C_6 + 0.0446 \cdot C_7 + 0.0115 \cdot C_8 + 0.0049 \cdot C_9 + 0.1244 \cdot C_{10}$

具体做法如下:

首先,据前述选定的隧道岩溶涌水影响因子的类别,从相关地质资料中选取各段隧道的影响因子值,大多数影响因子的数值都是以 2006 年的调查结果为准。

其次,对各影响因子的实际值按下式进行归一化处理,使其值介于 0~1 间,即:

$$\bar{c} = \frac{c - c_{\min}}{c_{\max} - c_{\min}}$$

(其中枯水期水头: $c_{\max} = 200 \text{ m}$ 、 $c_{\min} = -50 \text{ m}$ ;补给面积: $c_{\max} = 20 \text{ km}^2$ 、 $c_{\min} = 0 \text{ km}^2$ ;溶洞直径或溶隙宽: $c_{\max} = 5 \text{ m}$ 、 $c_{\min} = 0 \text{ m}$ ;地下河或岩溶管道与隧道洞身的距离: $c_{\max} = \pm 200 \text{ m}$ 、 $c_{\min} = 0 \text{ m}$ (由于此影响因子对目标产生负面影响,故隧道上方取负值,下方取正值)。因此,本评价模型适用于隧道处于枯水期水头在 -50~200 m 间;地下河系统或泉域的补给面积 0~20 km<sup>2</sup> 间;溶洞直径或溶隙宽在 0~5 m 间;地下河或岩溶管道与隧道洞身的距离 200 m 以内。)

从而得出各影响因子的相对标准值。

最后,将各段影响因子的相对标准值(表 3)与相应的权值(表 2)相乘叠加,即得隧道各段岩溶涌水的危险度值  $S_{karst}$ 。

表 3 乌池坝隧道各段风险性计算结果表

Tab. 3 List showing the calculating results of the different sections' risk of the Wuchiba tunnel

因子取值(X <sub>i</sub> )	隧道分段	ZK259+890~	ZK259+000~	ZK258+500~	ZK257+500~	ZK256+300~	ZK255+405~
		ZK259+000	ZK258+500	ZK257+500	ZK256+300	ZK255+405	ZK253+182
C <sub>1</sub>		0.020 1	0.020 1	0.020 1	0.020 1	0.020 1	0.000 0
C <sub>2</sub>		0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0
C <sub>3</sub>		0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.003 3
C <sub>4</sub>		0.020 7	0.018 2	0.009 9	0.075 2	0.086 8	0.000 0
C <sub>5</sub>		0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.013 8	0.028 9	0.000 0
C <sub>6</sub>		0.045 0	0.090 0	0.258 7	0.562 4	0.099 0	0.135 0
C <sub>7</sub>		0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0
C <sub>8</sub>		0.011 5	0.000 0	0.000 0	0.011 5	0.011 5	0.000 0
C <sub>9</sub>		0.000 0	0.004 9	0.004 9	0.000 0	0.000 0	0.000 0
C <sub>10</sub>		0.014 9	0.007 5	0.000 0	0.019 9	0.024 9	0.000 0
S <sub>karst</sub>		0.10	0.13	0.29	0.71	0.27	0.14
风险性		低	低	中	高	中	低

2.3 预测结果及分析

通过上述评判乌池坝隧道可分为三个岩溶涌水风险性区段(图 3),具体如下:低风险区段( $S_{karst} \leq 0.24$ )包括处于包气带的 ZK259+890~ZK259+000 段、季节变动带的 ZK259+000~ZK258+500 和处于非碳酸盐岩的 ZK255+405~ZK253+182 段。隧道区裂隙发育,可能发生小型涌水,容易塌方,在严格按照

新奥法施工的情况下,一般不会产生安全事故,不影响隧道施工。中等风险区段( $0.24 < S_{karst} \leq 0.070$ )包括处于季节变动带的 ZK256+300~ZK255+405 段和处于浅饱水带的 ZK258+500~ZK257+500 段。隧道区有小型地下河系统(补给面积 5~10 km<sup>2</sup>),枯水期水头小于 100 m,岩溶发育,有断层,发育溶洞(直径<80 cm)或溶隙(宽度<60 cm)通过洞身,可能发

生大型或重大型涌水、涌泥等地质灾害,但不会产生大的安全事故,会影响隧道施工。高风险区段( $S_{karst} > 0.70$ )包括处于深饱水带的ZK257+500~ZK256+300段。隧道区有大型地下河系统(补给面积 $\geq 10 \text{ km}^2$ ),枯水期水头大于100 m,岩溶发育,有断层,发育溶洞(直径 $> 80 \text{ cm}$ )或溶隙(宽度 $> 60 \text{ cm}$ )通过洞身,可能发生较为严重的重大型或特大型突水、突泥地质灾害,可能导致重大安全事故,严重影响隧道施工。目前隧道已经贯通,虽然未发生大型涌水,但乌池坝隧道高风险区段ZK257+500~ZK256+300段出现大型充填溶洞,但未见股状水流。原因是此段深层岩溶管道单一,易被充填物充实堵塞。

### 3 结论

基于层次分析法的岩溶涌水专家评判系统,能从定性的地质模型向定量的数学模型转化;从预测模型看,隧道区有大型地下河系统、洞体岩溶发育并有溶洞(直径 $> 80 \text{ cm}$ )或溶隙(宽度 $> 60 \text{ cm}$ )通过是引起隧道岩溶涌水的决定性因素;从预测结果看,乌池坝隧道处于深饱水带的ZK257+500~ZK256+300段是发生岩溶涌水的高风险区段。本次评价对隧道的划分,影响因子类别的选择,风险性级别的划分也具有主观性。但以长年从事岩溶研究的专家打分为基

础,减少了主观性带来的偏差。评价结果表明,总体上能客观反映隧道的现状,为有关施工部门提供宏观依据,以便合理而有效地进行隧道地质灾害防治。

### 参考文献

- [1] 韩行瑞. 岩溶隧道涌水及其专家评判系统[J]. 中国岩溶, 2004, 23(3): 214-217.
- [2] 蒙彦, 雷明堂. 岩溶区隧道涌水研究现状及建议[J]. 中国岩溶, 2003, 22(4): 287-292.
- [3] 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.
- [4] 郭玉法, 鲍庆煜. 岩溶隧道涌水量的预测方法研究[J]. 铁道勘察, 2007(5): 73-75.
- [5] Saaty, T. L. The Analytic Hierarchy Process[M]. Mc Graw Hill, New York, 1980.
- [6] 赵焕臣, 许树柏, 和金生. 层次分析法[M]. 北京: 科学出版社, 1986.
- [7] 许树柏. 层次分析原理[M]. 天津: 天津出版社, 1988.
- [8] 徐则民, 黄润秋, 罗杏春. 特长岩溶隧道涌水预测的系统辨识方法[J]. 水文地质工程地质, 2002, 4: 50-54.
- [9] 王鹰, 陈强, 魏有仪, 等. 岩溶发育区深埋隧道水岩相互作用机理[J]. 中国铁道科学, 2004, 25(4): 55-58.
- [10] 沈继方, 李焰云, 徐瑞春, 等. 清江流域岩溶研究[M]. 地质出版社, 1996.
- [11] 杜毓超, 李兆林, 韩行瑞, 等. 沪蓉高速公路乌池坝隧道区岩溶发育特征及其涌水分析[J]. 中国岩溶, 2008, 27(1): 11-17.

## Professional evaluating system for karst tunnel gushing based on AHP and its application

DU Yu-chao, HAN Xing-rui, LI Zhao-lin

(Institute of Karst Geology, CAGS, Guilin, Guangxi 541004, China)

**Abstract:** For the purpose of quantitative and semiquantitative description of impacting factors of the evaluating system for karst tunnel gushing, which will help us to predict the geological disasters directly and effectively, the paper has adopted Analytic Hierarchy Process (AHP) to quantitatively integrate multi-factors of tunnel gushing, with synthetic index ( $S_{karst}$ ) for judging karst tunnel gushing being concluded, which will be used to evaluate the risk for tunnel gushing under different karst hydrogeological conditions. A case study of tunnel gushing by applying AHP has been operated in Wuchiba, and we have concluded the results as follows: the sections of ZK259+890~ZK258+500 and ZK255+405~ZK253+182 are the places with low risk for tunnel gushing, whose  $S_{karst}$  is lower than 0.24 (including 0.24); the sections of ZK256+300~ZK255+405 and ZK258+500~ZK257+500 are the places with middle-class risk for tunnel gushing, whose  $S_{karst}$  is in the range of 0.24~0.70(excluding 0.24, but including 0.70); the sections of ZK257+500~ZK256+300 is the place with high risk for tunnel gushing, whose  $S_{karst}$  is higher than 0.70 (excluding 0.70).

**Key words:** AHP; tunnel; karst gushing; evaluating system