

文章编号:1001-4810(2010)02-0183-07

隧道岩溶突水、突泥危险性评价初探

毛邦燕^{1,2}, 许 模², 蒋良文¹

(1. 中国中铁二院工程集团有限责任公司, 四川 成都 610071;

2. 成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家专业实验室, 四川 成都 610059)

摘 要:通过对渝怀线圆梁山隧道等近20座隧道岩溶突水、突泥机制的深入研究, 在充分考虑方法可操作性、适用性, 定性与定量评价相结合的基础上, 提出了“隧道突水、突泥危险性分级体系”。建立起了以可溶岩的物质结构、地质构造条件、场效应条件、其它条件因素为一级评价指标, 以断裂破碎带宽度、承压水压力条件、地形地貌特征、隧道埋深等13个影响因素为二级指标的评价体系。用层次分析法确定了各因素的权重, 采用定性、定量相结合的方法确立了各指标的隶属度, 并根据隧道突水、突泥危险级别制定了相应的防治措施。最后以圆梁山隧道毛坝向斜段为例, 对隧道突水、突泥危险性进行了分级评价。结果表明, 毛坝向斜段隧道突水、突泥极危险区长度为992 m, 约占该段总长的54.07%。

关键词:岩溶隧道; 突水; 突泥; 层次分析法; 模糊综合评价; 防治措施; 重庆市圆梁山

中图分类号: U452.1⁺¹ 文献标识码: A

0 引言

隧道突水、突泥是岩溶地区常见的地质灾害。隧道岩溶突水、突泥问题主要包括两个方面, 即突水、突泥量和水头压力, 这两方面的问题是水文地质学中重要的理论问题, 也一直是业内人士不断努力探求的科学难题。(较)大规模突水、突泥的过程中过高的水头压力不仅直接威胁施工人员及设备安全, 而且严重影响隧道施工, 甚至, 造成灾害事故。如2002年9月10日, 圆梁山隧道在毛坝向斜可溶岩段正洞下平导掘进至DK354+879时, 揭露出正洞3#溶洞并产生爆喷性突泥灾害, 瞬间涌泥4 200 m³, 塞满下导坑244 m空间, 突泥中还伴随有高压水, 据事后估计突出的瞬时压力水头可达到5 MPa^[1]。该突泥灾害不仅延误了整个施工工期, 而且造成了重大的人员伤亡, 给国家的财产和人民的生命安全带来了巨大的损失和危害。因

此, 开展岩溶隧道危险性涌水突泥预测与评价十分必要, 也显得更为迫切。

1 隧道岩溶突水、突泥危险性评价体系的提出

到目前为止, 对于岩溶隧道突水、突泥问题的研究已经形成了一系列的方法和体系, 如近似法、水理统计法、水平衡法、解析法(地下水动力学法)、比拟法、数值分析法、地下径流模数法、非线性理论方法、随机数学方法等等^[2]。但是这些方法和体系都有自己的优点和缺点, 同时还有各自特定的适用条件。

同时, 由于岩溶的形成、演化、发展与多种因素密切相关, 决定了岩溶突水、突泥问题的复杂性、多变性、模糊性, 势必给评价工作加深了难度。因此, 要正确的评价岩溶突水、突泥问题必须做到以下几点: ①对隧址区场地水文工程地质条件的深入掌握; ②不断

基金项目: 深部缓流带现代岩溶形成机制及工程适应性研究(国家自然科学基金40672175)

第一作者简介: 毛邦燕(1978-), 男, 博士, 主要从事工程地质、水文地质、环境地质方面的工作。E-mail: mbyan1998@163.com.

收稿日期: 2010-01-13

分析、总结已有隧道案例,尽可能找出其中的规律,以掌握隧道突水、突泥的主要控制因素,为评价指标体系的提出提供依据;③做到多学科交叉融合。尝试利用其它学科的先进思路和方法来完善突水、突泥理论体系,以便科学的、合理的解决这一问题。

根据以上的思路,本文提出根据“隧道突水、突泥危险性分级体系”来进行隧道岩溶突水、突泥危险性评价。这一体系的特色与要点主要包括:①突破传统的定量评价,而采用定性评价与工程措施相结合的思路;②强调对隧址区岩溶地下水系统、地下水动力条件等相关信息的充分认识、了解和掌握;③强调对隧道岩溶发育机制、受控因素的充分掌握与了解。

2 隧道岩溶突水、突泥危险性评价模型的建立

对某一问题的评价不但要有正确的评价体系,而且还需要合理的、科学的评价方法或者评价模型。在地质学上危险性评价最早被运用在滑坡等地质灾害的评价上,如 Van Dijke J. J 等人基于 GIS 对山区地质

灾害进行分析,建立了一套完整的数据库,并建立了地质灾害分析评价模型^[3]。同时,国内也有不少的研究者提出了不同的危险性评价模型,如信息量法、逻辑信息法、综合判别分析法、模糊综合评判法、专家评分法、变形破坏指数法、危险概率分析法以及神经网络模型等^[4]。纵观所有的模型基本都采用不确定性数学方法来建立模型。综合考虑各种模型的适用条件、可操作性、数据的可获得性、分析结果的可靠性等多个方面的因素,结合岩溶突水、突泥的具体情况,选定“二级模糊综合评判模型”来进行隧道岩溶突水、突泥危险性评价。

2.1 指标体系的确定

2.1.1 指标体系层次结构的确定

综合岩溶发育的多种受控因素以及它们的相互影响、相互制约作用,隧道突水、突泥危险性分级体系主要考虑选取可溶岩的物质组成、地质构造条件、场效应条件、其它条件因素 4 个指标作为一级评价指标,每个一级指标再分别考虑若干个二级指标。整个评价体系指标构成如图 1 所示。

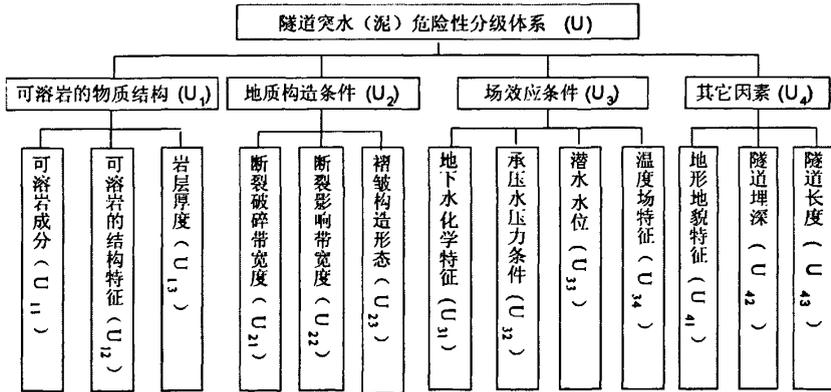


图 1 评价指标体系构成层次图

Fig.1 Graph of evaluation system

2.1.2 各指标的等级范围及影响程度分类

根据指标的选取原则确定了 4 个一级指标体系及 13 个二级指标体系^[5~9],采用定量、半定量及定性相结合的原则,提取各指标的有效信息。根据以往地质灾害危险性评价的成熟经验,将隧道涌突水危险性划分为五个等级,其危险程度从高到低分别为极危险区、高危险区、中危险区、较危险区、低危险区,相应的级别为 V、IV、III、II、I (表 1)。

2.2 权重的确定

指标体系权重的确定方法众多,有德尔菲法、区间统计法、环比法、AHP 法、模糊矩阵求递法等,这些方法各有各的优点和缺点,结合研究的实际问题,选择 AHP 法作为本次指标体系权重值的计算方法。AHP (Analytical Hierarchy Process) 是美国运筹学家 T. L. Saaty 于 20 世纪 70 年代提出的一种定量与定性相结合的系统分析方法。层次分析法是一种对复杂现象的决策思维进行系统化、模型化、数量化的方法,体现了人们决策思维的基本特征^[10~12]。

表1 指标及其突水危险性分级标准
Tab.1 Index and standard of the inrush risk grading

一级指标	二级指标	突水危险性级别				
		I	II	III	IV	V
可溶岩的物质组成	可溶岩成分 ^① /%	0~10	10~25	25~50	50~75	75~100
	岩石的结构	微晶	细晶	粉晶	亮晶	泥晶
	岩性特征	薄层不纯碳酸盐岩与碎屑岩互层	中厚不纯碳酸盐岩与碎屑岩互层	中薄层灰岩白云岩与不纯碳酸盐岩互层	中厚层灰岩夹白云岩	厚层块状灰岩及白云岩
地质构造条件	断裂破碎带宽度/m	<0.2	0.2~5	0.5~1.0	1.0~1.5	>1.5
	断裂影响带宽度/m	<1.5	1.5~3	3~5	5~8	>8
	褶皱构造形态	其它	缓倾开阔褶皱翼部	陡倾紧密褶皱翼部	缓倾开阔褶皱核部	陡倾紧密褶皱核部
场效应条件	地下水化学特征 ^②	<0	0~0.1	0.1~0.30	0.35~0.65	>0.65
	承压水压力条件/MPa	<0.3	0.3~0.5	0.5~1.0	1.0~1.5	>1.5
	潜水水位/m	<30	30~50	50~90	90~140	>140
	温度场特征/℃	>60 或者 <0.5	0.5~17	17~25	25~40	40~60
其它条件因素	地形地貌特征 ^③ /%	<5	5~20	20~40	40~60	>60
	隧道埋深/m	<50	50~100	100~200	200~300	>300
	隧道长度/km	<2	2~7	7~11	11~14	>14

备注:①指方解石的百分含量,②指SIC值,③为地表出露封闭负地形面积比。

按照图1的层次结构可得:

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: $a_{ij} = 1/a_{ji} (i \neq j)$, $a_{ij} = 1 (i = j)$, a_{ij} 的值由 T. L. Saaty 提出的 1~9 比较标度法标定。

AHP 计算中的和积法:

(1) 将矩阵 $A = (a_{ij})_{n \times n}$ 的每一列向量进行归一化:

$$\bar{a}_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^n a_{ij}} (i, j = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (2)$$

(2) 对每一列归一化后的判断矩阵按行求和

$$\bar{W}_i = \sum_{j=1}^n \bar{a}_{ij} (i, j = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (3)$$

(3) 将归一化的向量 $\bar{W} = [\bar{W}_1, \bar{W}_2, \bar{W}_3, \dots, \bar{W}_n]$ 归一化

$$W = \frac{\bar{W}_i}{\sum_{j=1}^n \bar{W}_j} (i, j = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (4)$$

所得到的 $W = [W_1, W_2, W_3, \dots, W_n]^T$ 即为所求的权重向量

(3) 由矩阵理论可知其有最大特征根:

$$\lambda_{\max} = \sum_{i=1}^n \frac{(AW)_i}{nW_i} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\sum_{j=1}^n a_{ij}W_j}{W_i} \quad (5)$$

通过计算所得到的各因子权重值是否真实、客观地反映因子本身的重要性,主要取决于判断矩阵的可靠性和真实性。因此,必须对判断矩阵的满意度进行一致性评价。

(4) 一致性检验

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad CR = \frac{CI}{RI}$$

式中: CI ——一致性指标; CR ——一致性比率; RI ——平均随机一致性指标,可以通过表2查得。

表2 平均随机一致性指标 RI 查询表 (Saaty, 1980)

Tab.2 Query table of RI (Saaty, 1980)

因子数(n)	1	2	3	4	5	6	7	8	9
相应取值	0.00	0.00	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45

若 $CR < 0.1$, 判断矩阵满足一致性, 否则, 需对判断矩阵进行调整, 直到满意为止。

根据以上权重值计算方法, 对一级指标和二级指标分别进行判断矩阵的建立, 在此基础上计算出各因子在该级中的权重值, 并计算 CR 进行检验。各因子在相应层次的权重分配见表 3。

表 3 指标因子权重分配综合表

Tab. 3 The weight of the index

一级指标因素	二级指标因素	权重值	
		二级权重值	一级权重值
可溶岩的物质结构	可溶岩成分	0.575	0.493
	可溶岩的结构特征	0.082	
	岩层厚度	0.343	
地质构造条件	断裂破碎带宽度	0.360	0.350
	断裂影响带宽度	0.128	
	褶皱构造形态	0.512	
场效应条件	地下水化学特征	0.103	0.106
	承压水压力条件	0.553	
	潜水水位	0.302	
其它条件因素	温度场特征	0.041	0.051
	地形地貌特征	0.444	
	隧道埋深	0.472	
	隧道长度	0.084	

2.3 隶属度的构造

由以上各指标的等级划分范围来看, 一些指标因子的取值是定量的, 而另外一些指标因子的取值则是定性的, 如果统一采用定量的方法计算隶属度, 势必造成定性因子无法求取隶属度的问题, 这就给隶属度的确定增加了难度。鉴于此, 本次采用定性指标和定量指标分开求取隶属度。

2.3.1 定量指标隶属度确定

根据模糊数学中隶属度函数建立的基本原则, 以及指标信息情况, 对于定量化的因子, 本文拟采用岭形隶属函数作为确定隶属度的方法^[10-13], 构建如下隶属函数:

$$\begin{cases} 1 & x \leq a_1 \\ \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \sin \frac{\pi}{a_2 - a_1} (x - \frac{a_1 + a_2}{2}) & a_1 < x \leq a_2 \\ 0 & x \geq a_2 \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} 0 & x \leq a_1 \\ \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sin \frac{\pi}{a_2 - a_1} (x - \frac{a_1 + a_2}{2}) & a_1 < x \leq a_2 \\ 1 & a_2 < x \leq a_2 \\ \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \sin \frac{\pi}{a_2 - a_1} (x - \frac{a_1 + a_2}{2}) & a_3 < x \leq a_4 \\ 0 & x \geq a_4 \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} 1 & x \leq a_3 \\ \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sin \frac{\pi}{a_4 - a_3} (x - \frac{a_3 + a_4}{2}) & a_3 < x \leq a_4 \\ 1 & a_4 < x \leq a_5 \\ \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \sin \frac{\pi}{a_6 - a_5} (x - \frac{a_5 + a_6}{2}) & a_5 < x \leq a_6 \\ 0 & x \geq a_7 \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} 0 & x \leq a_5 \\ \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sin \frac{\pi}{a_6 - a_5} (x - \frac{a_5 + a_6}{2}) & a_5 < x \leq a_6 \\ 1 & a_6 < x \leq a_7 \\ \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \sin \frac{\pi}{a_8 - a_7} (x - \frac{a_7 + a_8}{2}) & a_7 < x \leq a_8 \\ 0 & x \geq a_8 \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} 1 & x \leq a_7 \\ \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sin \frac{\pi}{a_8 - a_7} (x - \frac{a_7 + a_8}{2}) & a_7 < x \leq a_8 \\ 0 & x \geq a_8 \end{cases} \quad (10)$$

式中: $a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, a_7, a_8$ 为评价因素相对应级别上、中、下限值 (a_8 为各因子的上限值, a_1 为各因子的下限值, 其余为中间值), 形成的区间与评价结果相对应, 分别为很严重 (v_5)、严重 (v_4)、一般 (v_3)、轻微 (v_2) 和无影响 (v_1) 5 个档次。

2.3.2 定性指标隶属度确定

在本次的评价体系中某些因子无法用具体的数字来量化, 如可溶岩的结构特征、褶皱构造形态等。这些因子本身具有不可量化性, 且其划分标准非常明显, 就可溶岩的结构特征来说, 本次将其划分为微晶、细晶、粉晶、亮晶、泥晶等五类, 对已经划分的隧道某段岩体来说, 如果属于泥晶, 就属于第五级, 其隶属度取 5, 就不存在隶属度的区间值了。同样, 其它定性指标隶属度的确定也采用此方法。

3 典型实例研究

3.1 圆梁山隧道毛坝向斜段隧道概述

圆梁山隧道位于重庆市酉阳县城以北约 30 km 处,总长 11.068 km。隧道地处川东鄂西褶皱山地与贵州高原的接壤地带,穿越乌江与沅江水系分水岭毛坝—圆梁山地区,为中、低山中等深切河谷地貌,地形相对高差 500~800 余米。隧道进口位于细沙河东岸的瞻家坝,进口里程 DK351+465、路肩设计标高 549.16 m。出口位于属麻旺河源头的炭厂河西岸,出口里程 DK362+533、路肩设计标高 503.74 m。隧道最大埋深约 780 m。

在大地构造上,本区位于扬子准地台东南部,属上扬子台坳;台坳的基底由环绕川中的结晶地块增生的中元古界组成,由于加里东运动,使上扬子台地区隆升,台坳大部分地区缺失泥盆和石炭系。出露的地层主要为嘉陵江组(T_{1j})、大冶组(T_{1d})、长兴组(P_{2c})、吴家坪组(P_{2w})、茅口栖霞组(P_{1m+q})。地质构造异常复杂,穿越的主要地质构造为毛坝向斜与桐麻岭背斜向北西凸出的弧形构造部位及其伴生或次生断裂等构造。

3.2 隧道突水、突泥危险性模糊评价及分析

信息提取后,利用以上方法,计算出各段最终的危险性等级,见表 4。

表 4 圆梁山隧道毛坝向斜段隧道突水、突泥危险性模糊评判结果表

Tab. 4 Table of fuzzy comprehensive evaluation on the intrush risk of the tunnel at Maoba syncline

分段里程	I	II	III	IV	V	评价等级
DK353+360~DK353+579.5	0.249 6	0.041 1	0.433 3	0.139 9	0.136 1	3
DK353+579.5~DK353+825	0.253 2	0.005 6	0.210 5	0.242 4	0.288 3	5
DK353+825~DK353+925	0.067 3	0.032 1	0.178 6	0.389 2	0.332 9	4
DK353+925~DK354+95.3	0.258 8	0.000 3	0.178 3	0.255 7	0.307	5
DK354+95.3~DK354+254	0.237 7	0.021 1	0.011 3	0.461 6	0.268 3	4
DK354+254~DK354+300	0.247 4	0.011 3	0.011 3	0.296 2	0.433 7	5
DK354+300~DK354+461.7	0.141 1	0	0.011 3	0.320 3	0.527 2	5
DK354+461.7~DK354+502.2	0.258 8	0	0.011 3	0.485 7	0.244 2	4
DK354+502.2~DK354+730.6	0.226 7	0.032 1	0.011 3	0.485 7	0.244 2	4
DK354+730.6~DK354+860	0.226 8	0.032	0.043 2	0.320 3	0.377 7	5
DK354+860~DK354+970	0.233 3	0.025 5	0.043 4	0.320 1	0.377 7	5
DK354+970~DK355+028.5	0.232 1	0.030 6	0.039 3	0.307 9	0.390 1	5
DK355+028.5~DK355+297	0.226 7	0	0.330 2	0.236 2	0.206 9	3

评价结果表明,圆梁山隧道毛坝向斜段共有 7 个极危险区,占总段数的 53.85%; 4 个高危险区,占总数的 30.77%; 2 个中危险区,占总数的 15.38%; 无较危险区、低危险区。如果根据隧道长度来统计,隧道总长 1 834.5 m,其中 V 级长度为 992 m,约占总长度的 54.07%; IV 级长度为 618 m,约占总长度的 33.69%; III 级长度为 224.5 m,约占总长度的 12.23%; 无 II 级和 I 级(图 2、3)。

3.3 隧道施工隧道突水、突泥危险性对比分析

目前,圆梁山隧道毛坝向斜段已经施工完毕,为

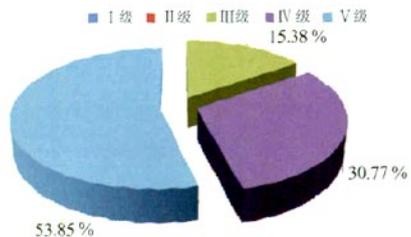


图 2 圆梁山隧道毛坝向斜段隧道突水、突泥危险性等级结果统计图(按级别统计)

Fig. 2 Chart of assessment on water and mud intrush risk of the Yuanliangshan karst tunnel(based on rank)

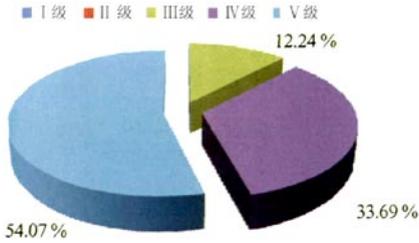


图3 圆梁山隧道毛坝向斜段隧道突水、突泥危险性等级结果统计图(按长度统计)

Fig. 3 Chart of assessment on water and mud inrush of the Yuanliangshan karst tunnel(based on length)

了检验评价结果的可靠性,收集了隧道施工过程中揭露现代深部岩溶发育段与评价结果作比较。施工过程中揭露的现代深部岩溶以及隧道突水、突泥情况见表5所示。

表5表明,利用隧道突水、突泥危险性分级系统对现代深部岩溶发育段进行评价,其评价结果较真实的反应出了现代深部岩溶区段本身的危险程度。如圆梁山隧道“9.10”事故发生段DK354+879,在危险性评价分段中位于DK354+860~DK354+970,其评价的最终结果为5级,属于极危险区,吻合较好。

表5 施工揭露现代深部岩溶及涌水突泥情况与评价结果对比表
Tab. 5 Comparison of evaluation results to the real situation

里程	施工揭露情况	涌突水情况简述	评价等级	备注
DK354+255~+285	揭露2个充满型岩溶腔体	涌水量约50~70 m ³ /h	5级	
DK354+461~+492	充填溶洞	DK354+475右侧下导坑边墙底发生涌水涌砂,总涌水量达68 000 m ³ /d左右。	4级	含砂量50%~60%
DK354+580~+840	节理裂隙发育,相对密集,呈张开状	DK354+580~+610段裂隙水多处沿拱顶层面及节理面流出,最大流量约1.0 L/s。	5级	清水
DK354+870~+920	形成大型的岩溶管道	DK354+879掌子面右下方瞬间爆突出大量硬塑~可塑状粘土及粘两状泥浆约4 200 m ³ 。	5级	9.10事故发生点

4 隧道突水、突泥灾害防治措施

隧道突水、突泥评价不是最终的目的,而是一种手段,一种划分出隧道危险性区段的手段。它可以为最终的目的——隧道突水、突泥灾害防治措施的设计、实施提供依据。

根据目前隧道超前预报措施及注浆堵水等施工技术,在隧道突水、突泥危险性评价结果基础上,制定出如表6的隧道突水、突泥的防治措施^[11]。

表6 不同危险级别的岩溶涌突水的防治措施
Tab. 6 Protecting measures for different risk grade of inrush

评级等级	I	I	II	IV	V	备注	
危险程度	低危险区	较危险区	中危险区	高危险区	极危险区		
超前预报措施	地质素描	地质素描、TSP202地质预报系统	地质素描、TSP202地质预报系统、红外线探水仪、超前水平钻孔探测	地质素描、TSP202地质预报系统、地质雷达、红外线探水仪、超前水平钻孔探测	地质素描、TSP202地质预报系统、地质雷达、红外线探水仪、超前水平钻孔探测、R24型工程地震仪		
施工措施	一般措施	根据需要进行后注浆	后注浆	局部预注浆,钻孔排水	超前预注浆;钻孔排水,水量大(动储量>静储量>5×10 ⁵ m ³)采用泄水洞排水	径向超前预注浆、大管棚超前支护;钻孔排水,水量大(动储量>静储量>5×10 ⁵ m ³)采用泄水洞排水	IV和V还可根据堵水效果进行补注浆和填注浆。
	溶洞处理措施	拱部	帷幕注浆、大管棚结合小导管注浆,截断施工				
		边墙	管棚注浆				
	隧底	开挖换填5.0 m深或采用跨越结构通过					

5 小结

(1)根据岩溶突水、突泥问题的复杂性、多变性、模糊性以及已有评价方法体系存在的问题,提出了“隧道突水、突泥危险性分级体系”;建立了以可溶岩的物质组成、地质构造条件、场效应条件、其它条件因素为一级指标,以可溶岩成分、可溶岩的结构特征、岩层厚度、断裂破碎带宽度、断裂影响带宽度、褶皱构造形态、地下水化学特征、承压水压力条件、潜水水位、温度场特征、地形地貌特征、隧道埋深、隧道长度为二级指标的评价体系。

(2)用AHP法确定了各因素的权重,其中可溶岩的物质组成、地质构造条件、场效应条件、其它条件因素权重值分别为0.493、0.350、0.106、0.051;采用定量评价的方法对可量化指标建立了隶属度函数,利用定性指标数值化方法确定了定性指标的隶属度。

(3)利用隧道突水、突泥危险性分级体系对圆梁山隧道毛坝向斜段进行了评价。评价结果表明,圆梁山隧道毛坝向斜段共有7个极危险区,长度为992 m,约占总长度的54.07%;4个高危险区段,长度为618 m,约占总长度的33.69%;2个中危险区,长度为224.5 m,约占总长度的12.23%。把评价结果与圆梁山隧道毛坝向斜段施工过程中揭露的隧道突水、突泥位置、突水、突泥情况进行对比分析,结果表明,评价结果与实际吻合较好,能够比较真实的反映隧道岩溶突水、突泥的危险性,从而为岩溶隧道的设计、施

工以及隧道突水、突泥的防治提供科学依据。

参考文献

- [1] 蒋良文,王科. 圆梁山隧道毛坝向斜段深部承压岩溶水系统浅析[J]. 成都理工学院学报, 2001, 28(2): 126-129.
- [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): 287-291.
- [3] Van Dijke J J, Van Westen C J., Rockfall hazard: A geomorphological application of neighbourhood analysis with ILWIS[J]. ITC Journal, 1990, (1): 40-44.
- [4] 向喜琼. 区域滑坡地质灾害危险性评价与风险管理[D]. 2005, 成都:成都理工大学.
- [5] 袁道先. 中国岩溶学[M]. 北京:地质出版社, 1994, 1-148.
- [6] 中国科学院地质研究所岩溶研究组. 中国岩溶研究[M]. 北京:科学出版社, 1979, 1-159.
- [7] 李茂秋. 向斜盆地区域动力水流模型[J]. 中国岩溶, 1985(3): 231-239.
- [8] 聂跃平. 黔南地区碳酸盐岩的溶蚀试验初探[J]. 中国岩溶, 1984(1): 31-46.
- [9] 张世从. 黔南岩溶发育规律的探讨[J]. 中国岩溶, 1989, 3(2): 34-47.
- [10] 赵焕臣,许树柏. 层次分析法——一种简易的新决策方法[M]. 北京:科学出版社, 1986, 30-45.
- [11] 毛邦燕. 现代深部岩溶形成机理及其对越岭隧道工程控制作用评价[D]. 成都:成都理工大学, 2008.
- [12] 毛邦燕,许模,张世殊,等. 矿区水库渗漏影响评价问题模糊综合评价研究[J]. 人民长江, 2007, 38(6): 103-106.
- [13] 肖盛蹇,王平义. 模糊数学在土木与水利工程中的应用[M]. 北京:人民交通出版社, 2004, 29-46.

Preliminary study on risk assessment of water and mud inrush in karst tunnel

MAO Bang-yan^{1,2}, XU Mo², JIANG Liang-wen¹

(1. China Railway Eryuan Engineering Group CO. LTD, Chengdu, Xichuang 610071, China;

2. National Laboratory of Geological Hazard and Engineering Geological Environment Protection,

Chengdu University of technology, Chengdu, Xichuang 610071, China)

Abstract: Through analysis of more than 20 karst tunnels a risk classification system for water and mud inrush is put forth by means of qualitative and quantitative analysis on the condition that fully considering the operability and applicability of the methods used in the analysis. The 1st-order evaluation index involves the material components of the soluble rocks and geo-tectonic conditions as well as field effect conditions; the 2nd-order evaluation index involves 13 influencing factors such as the width of the faults and pressure of the confined water and the landform as well as the buried depth of the tunnel. In addition, the weights are determined with ATP and the degree of membership by means of qualitative and quantitative method, and the corresponding protect measures is drafted in light of the risk of water or mud inrush in the tunnel. The results show that the very risky part of water or mud inrush in Maoba syncline is 992 m long that accounting for 54.7% of the total tunnel.

Key words: karst tunnel; water inrush; mud inrush; analytic hierarchy process; fuzzy comprehensive evaluation; protect measures; Yuanliangshan in Chongqing