

融合 AHP 法-PC 法-可拓法的 两阶段隧道风险评估

郝德亮^{1*}, 安永林², 李佳豪², 岳健², 曾贤臣², 周进²

(1. 中铁十六局集团路桥工程有限公司, 北京 密云 101500;

2. 湖南科技大学 土木工程学院, 湖南 湘潭 411201)

摘要:为对隧道风险进行评估,在隧道现场调查的基础上,对隧道风险进行识别,基于层次分析法对各风险进行了排序,获得了隧道的主要风险.然后提出对于一般风险采用一阶段法评估,即直接用风险矩阵法进行评估;而对于重大风险采用两阶段法评估,即采用风险矩阵 PC 法进行初步评估后,再应用多级可拓法进行详细的综合评估.结果表明:隧道主要风险为坍方和洞口进洞风险;隧道整体坍方风险为 I 级极高风险;准则层中地质风险为 I 级极高风险,其次支护为 II 级高度风险.所以控制隧道坍方风险应从地质和支护两个角度进行预防和应对.

关键词:隧道工程;风险评估;可拓法;风险矩阵法;层次分析法

中图分类号:U495.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-9102(2019)03-0038-08

Tunnel Risk Identification and Assessment Based on AHP-Risk Matrix-Extension Method

Hao Deliang¹, An Yonglin², Li Jiahao², Yue Jian², Zen Xianceng², Zhou Jing²

(1. China Railway 16th Bureau Group Road and Bridge Engineering Co., Ltd., Miyun 101500, China;

2. School of Civil Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

Abstract: Risks of tunnel are identified based on the on-spot investigation. The main risk is gotten by sort of risk using the AHP. For the general risks, the risk matrix is applied to assess risk directly; for significant risks, two-stage is adopted, that is the preliminary risk assessment was conducted using risk matrix method, then a detailed assessment is conducted by using the extension theory. Risk index system is established and the classification criteria is discussed. The main risks are tunnel entrance hole and collapse, and the whole risk of tunnel collapse is very high. In rule hierarchy, risk of geological and support structure are very high. Some measures should be taken from the view of geology and support structure.

Keywords: tunnel engineering; risk assessment; extension assessment; risk matrix method; AHP

在地质复杂、围岩软弱破碎地层,隧道施工常会发生塌方,如何评估隧道施工安全风险,是设计、施工所关注的^[1,2].目前隧道风险的评估多是应用软科学方面的评估方法来获得隧道的风险等级,如 AHP 层次分析法、FAT 故障树法、Fuzzy 模糊综合评估法、Monte-Carlo 法、敏感性分析法等^[3-6],笔者曾应用可拓法评估了隧道塌方风险,并结合人机环境系统分析隧道施工安全风险,开发了水下隧道施工风险管理软件,其结合现场监测数据,应用功效系数进行了评估^[5-7].应用相邻学科的方法对隧道风险进行评估或预测,

必须要结合隧道工程学科自身的特点才行,也必须从隧道施工实际出发,否则只能是高校做科研,而施工单位及具体的施工中很难获得指导、应用及产生效益,出现科研-施工两张皮现象^[8]。隧道风险评估落在实处或在工程中的实际应用还是存在一定差距的。

隧道工程是一门半经验半理论的艺术性学科。隧道风险评估中不确定的因素太多,施工还应以半经验半定量的风险评估方法为主,本文依托亭子坝隧道,研究提出对于一般风险直接用风险矩阵法进行评估;而对于重大风险采用两阶段法评估,即采用风险矩阵法进行初步评估后,再应用可拓法进行详细评估(此部分可以召开重大风险的研讨,请多方参与,高校/施工结合是很方便解决的),并对风险评估指标的分级做了探讨,根据评估结果,提出了风险防控的重点。

1 隧道工程概况及风险识别

1.1 工程概况及现场调查

亭子坝隧道位于厦门至成都国家高速公路第 23 合同段湖南汝城-郴州段上的一座隧道。隧道设计为上下行分离的平行双洞,左右洞线间距 26.0~35.3 m,隧道净空面积 76.76 m²,纵向设约为-3%的单向坡。设计时速 80 km/h,双洞全长 980 m;其中左洞长 470 m,起讫里程 ZK106+940~ZK107+410;右洞长 540 m,起讫里程 YK106+885~YK107+395。

地质调查以及勘探结果显示:隧道区出露的地层有第四系种植土、卵石夹粉质黏土、漂石夹粉质黏土、含砾粉质黏土和泥盆系中统棋子桥组灰岩等,隧道洞口与洞身段围岩为 V 级,地质条件差。

隧道区地下水为松散堆积层孔隙水和碳酸盐岩岩溶水。松散堆积层孔隙水为隧道主要地下水类型,含水层岩性为第四系坡洪积成因的含砾粉质黏土、卵石土、碎石土、漂石土等,地下水埋深变化较大,孔隙水以大气降水为主要补给来源。碳酸盐岩岩溶水主要赋存于岩溶裂隙、溶洞中,含水岩层为泥盆系灰岩。地下水的补给水源为通过上部松散堆积层渗入的大气降水及地表水。

鉴于隧道工程的复杂性以及目前勘测技术水平的局限性,亭子坝隧道风险识别中综合应用了现场地质调查法、专家法、核查表法等多种方法^[9];同时,项目组成员深入隧道施工现场进行调查,收集隧道施工一线的资料,下面 2 张照片是现场施工的情况。由于隧道地质条件差,隧道进洞施工后多次出现塌方、初期支护开裂下沉、二次衬砌开裂等现象,见图 1 所示。

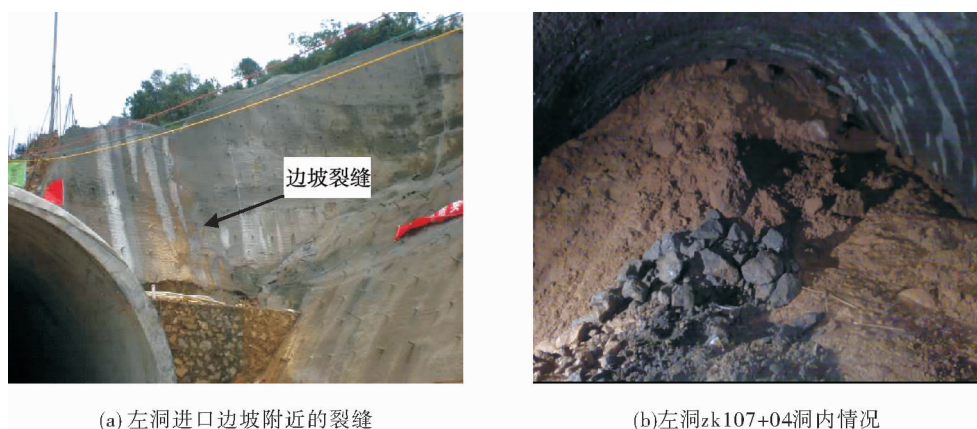


图 1 隧道施工现场照片

1.2 亭子坝隧道工程施工安全风险识别

应用上述现场地质调查法和核查表法等方法,可以识别出亭子坝隧道施工风险为边坡失稳风险、隧道洞口进洞施工风险、隧道洞内塌方风险、洞内施工涌突水风险、支护结构开裂破坏、施工质量风险等,其中洞口进洞施工风险会引起边坡失稳风险,所以重点分析洞口进洞施工风险,另外重大风险为隧道洞内塌方风险,由于此处不存在岩溶水,只是地表水(雨水),涌水的风险不会太大,为次要风险。具体风险识别的结

果如下:

1)隧道边坡失稳风险.亭子坝隧道穿越的地层为大型堆积体,边仰坡稳定性更差,极易发生边坡失稳风险.

2)隧道洞口段施工风险.隧道洞口段地质情况较差,埋深浅,往往还存在偏压,在开挖过程中容易产生坍塌冒顶、边仰坡开裂变形等风险事故.

3)隧道洞内塌方风险.亭子坝隧道围岩为散体状结构,成分复杂,结构较松软,易产生大面积坍塌,开挖时容易出现掌子面塌方、顶部塌方等风险,在覆盖层薄的地方还有可能出现大面积的塌方甚至冒顶.

4)洞内施工涌突水风险.隧道围岩裂隙较发育,地下水受地表水影响很大,雨季雨水容易沿裂隙渗入,造成洞内突涌水.另外,堆积体中也有可能存在封闭水体,施工时被扰动而发生突涌水.

5)支护结构开裂破坏风险.隧道处于堆积体中,围岩力学性质差,初期支护施作后,有可能产生较大变形,造成初期支护开裂破坏.

6)施工质量风险.山岭地区施工,由于施工管理不方便,加上材料的供应和运输困难,容易发生施工质量问题.

7)其他不可预见风险等.

1.3 亭子坝隧道工程施工重大安全风险识别

应用 AHP 层次分析法^[5,6],建立亭子坝隧道重大风险识别的判断矩阵(见表 1),其中,1,3,5,7,9 表示风险因素两两相互比较的重要性.AHP 分析过程如下:对隧道基本风险进行分类;建立各种风险因素多级递阶结构模型;应用两两比较法构造风险因素判断矩阵;计算综合权重,对风险因素进行优先排序.

应用 Matlab 求解矩阵特征值的命令 eigs 函数(其是用迭代法求解矩阵的特征值与特征向量),可以求得最大特征值 $\lambda_{max} = 7.534$ 及其对应的特征向量,特征向量作归一化处理即为各因素的权重,见表 1.从中可以看出,重大风险为隧道洞口进洞风险和隧道洞内塌方,其次为边坡失稳、支护结构开裂和洞内涌水.

随机一致性比率 CR 检验:

$$CR = CI / RI.$$

式中:CI 为判断矩阵偏离完全一致性的指标($CI = (\lambda_{max} - m) / (m - 1)$ (m 为因子个数));RI 为判断矩阵的平均随机一致性指标,可查表 2.

把最大特征值 $\lambda_{max} = 7.534$ 和因子个数 $m = 7$ 代入,可以得到 $CI = 0.09$, $CR = 0.07 < 0.1$,满足一致性检验要求.表明所确定的权重是合理的.

表 1 亭子坝隧道重大风险识别判断矩阵

风险	R_1	R_2	R_3	R_4	R_5	R_6	R_7	权重
R_1	1	1/3	1/2	3	2	5	7	0.165
R_2	3	1	2	5	4	7	9	0.355
R_3	2	1/2	1	4	3	5	7	0.235
R_4	1/3	1/5	1/4	1	1/3	5	7	0.078
R_5	1/2	1/4	1/3	3	1	3	5	0.108
R_6	1/5	1/7	1/5	1/5	1/3	1	3	0.038
R_7	1/7	1/9	1/7	1/7	1/5	1/3	1	0.021

注: R_1 为边坡失稳风险; R_2 为隧道洞口段施工风险; R_3 为隧道洞内塌方风险; R_4 为洞内施工涌突水风险; R_5 为支护结构开裂破坏; R_6 为施工质量风险; R_7 为其他不可预见风险.标度 R_{ij} 含义表示指标 i 与指标 j 的相互重要程度,数值越大,表示 i 比 j 越重要,倒数表示相反

表 2 平均随机一致性比率指标 RI 值

m	1	2	3	4	5	6	7	8	9
RI	0.00	0.00	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45

2 隧道风险评估模型

2.1 隧道风险两阶段评估流程

针对隧道现场人员施工经验丰富,但对复杂的风险评估方法很难掌握及应用的问题,同时考虑隧道施工特别是地质情况具有很大不确定性,亭子坝隧道风险评估模型主要采用风险矩阵 PC 法和可拓法:对于一般风险采用一阶段法评估,即直接用风险矩阵法进行评估;而对于重大风险采用两阶段法评估,即采用 PC 风险矩阵法进行初步评估后,再应用可拓法进行详细评估(见图 2)。

风险矩阵 P×C 法采用专家打分确定,见表 3 和表 4 所示^[9]。

可拓法的评估流程如图 3,为节省篇幅,具体原理见文献[5]。

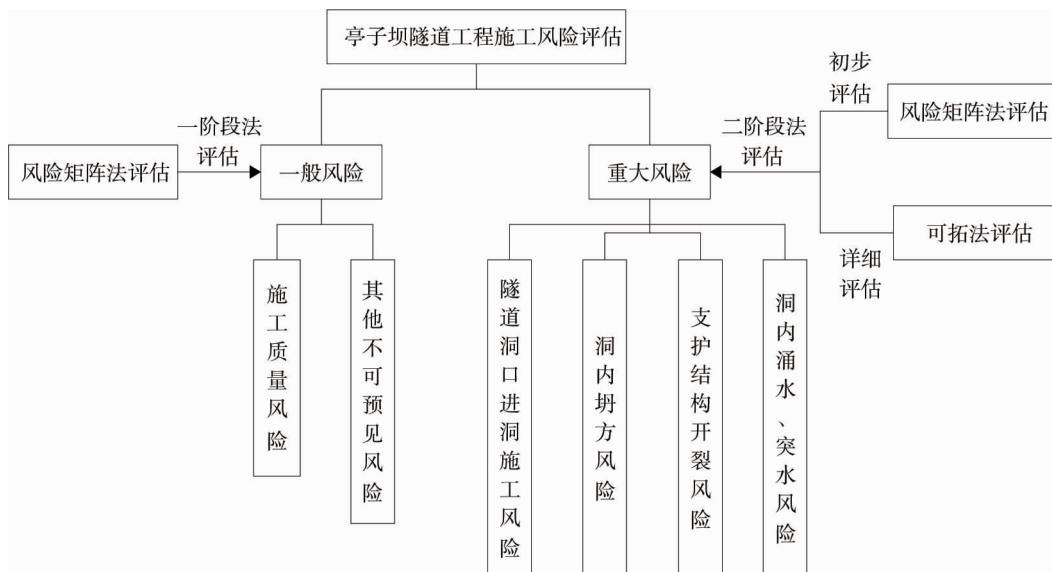


图 2 亭子坝隧道工程施工风险评估流程

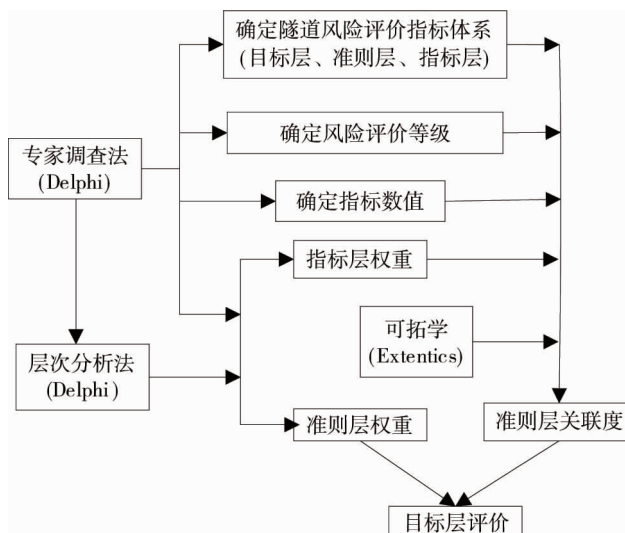


图 3 可拓法风险评估流程

表 3 风险概率等级和后果等级

概率定性描述	很可能	可能	偶然	不可能	很不可能
概率等级	5	4	3	2	1
后果定性描述	灾难性的	很严重的	严重的	较大的	轻微的
后果等级	5	4	3	2	1

表4 风险矩阵 P×C 法

后果等级	概率等级	轻微的	较大的	严重的	很严重的	灾难性的
		1	2	3	4	5
很可能	5	高度	高度	极高	极高	极高
可能	4	中度	高度	高度	极高	极高
偶然	3	中度	中度	高度	高度	极高
不可能	2	低度	中度	中度	高度	高度
很不可能	1	低度	低度	中度	中度	高度

2.2 多级可拓法综合评估模型

隧道坍方风险具有多层次和多影响因素性.本研究分为目标层、准则层和指标层,先对指标层进行评价,再对准则层进行综合评估,进而得出目标层隧道坍方风险所处的风险级别^[10].

$$Q = [R, C, V] = \{ [R_1, C_1, V_1], [R_2, C_2, V_2], \dots, [R_i, C_i, V_i], \dots, [R_n, C_n, V_n] \}; \tag{1}$$

$$s.t. R = R_1 \cup R_2 \cup \dots \cup R_i \cup \dots \cup R_n, \text{ 且 } R_i \cap R_j = \Phi (\forall i \neq j; i, j = 1, 2, \dots, n).$$

式中: $\{R_1, R_2, \dots, R_i, \dots, R_n\}$ 为 R 的风险子集; n 为划分的隧道坍方风险子集的个数; C_i 为风险评价指标, $i = 1, 2, \dots, n$; V_i 为评价指标 C_i 所确定的量值范围.

坍方风险子集 R_i 物元模型:

$$Q_i = [R_i, C_i, V_i] = \begin{bmatrix} R_i, & C_{1i}, & V_{1i} \\ & C_{2i}, & V_{2i} \\ & \vdots & \vdots \\ & C_{li}, & V_{li} \end{bmatrix}. \tag{2}$$

2.3 计算风险子集 R_i 等级的关联函数值

设 x_0 实数域 $(-\infty, +\infty)$ 上任意一点, $X_0 = (a, b)$ 为实数域上任意一区间, $\rho(x_0, X_0)$ 为点 x_0 与区间 X_0 之距, 则:

$$\rho(x_0, X_0) = [x_0 - (a+b)/2] - (b-a)/2. \tag{3}$$

初等关联函数^[6]:

$$K(x) = \rho(x, X_0) / [\rho(x, X) - \rho(x, X_0)]. \tag{4}$$

则 R_i 关于各风险级别的关联函数值为

$$K_j(v_{ki}) = \rho(v_{ki}, V_{kj}) / [\rho(v_{ki}, V_{ku}) - \rho(v_{ki}, V_{kj})]. \tag{5}$$

2.4 评估风险子集 R_i

设评判因素 c_{ki} 的权重系数为 a_{ki} , 且 $\sum_{k=1}^l a_{ki} = 1$, 则坍方风险子集 R_i 关于级别 j 的关联度为^[10]

$$K_j(R_i) = \sum_{k=1}^l a_{ki} K_j(v_{ki}). \tag{6}$$

$$K_{j_0} = \max \{ K_j(R_i) \}, (j = 1, 2, \dots, m). \tag{7}$$

则隧道坍方风险子集 R_i 属于等级 j_0 .

$$\text{令 } \bar{K}_j(R_i) = \frac{K_j(R_i) - \min_j K_j(R_i)}{\max_j K_j(R_i) - \min_j K_j(R_i)}; \tag{8}$$

$$j^* = \frac{\sum_{j=1}^m j \bar{K}_j(R_i)}{\sum_{j=1}^m \bar{K}_j(R_i)}. \tag{9}$$

则称 j^* 为坍方风险子集 R_i 的级别变量特征值.

2.5 隧道坍方风险的可拓综合评估

隧道坍方风险 R 评判变换矩阵为

$$K = \begin{bmatrix} K_1(R_1) & K_2(R_1) & \cdots & K_m(R_1) \\ K_1(R_2) & K_2(R_2) & \cdots & K_m(R_2) \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ K_1(R_n) & K_2(R_n) & \cdots & K_m(R_n) \end{bmatrix}. \quad (10)$$

设各坍方风险子集 $\{R_1, R_2, \dots, R_i, \dots, R_n\}$ 的权重分别为 $A = (a_1, a_2, \dots, a_n)$, 且 $\sum_{k=1}^l a_k = 1$, 则隧道坍方风险 R 的可拓综合评判模型为^[10]

$$B = AK = (B_1, B_2, \dots, B_m). \quad (11)$$

同理,根据式(7)~式(9),可得隧道坍方风险的综合评估等级 j_0 与级别变量特征值 j^* .

3 基于风险矩阵法的隧道风险初步评估

下面应用 PC 风险矩阵法对亭子坝隧道工程各施工风险事件进行评估,风险发生概率与后果等级取值标准见表 3,结合工程的实际情况进行打分,然后参照表 4,即可得到相应的风险等级,结果如表 5 所示,从中可以看出:(1)洞内坍方风险和洞口进洞风险为极高风险,必须高度重视并规避,并采取措施将风险降低;(2)支护结构开裂和洞内涌突水风险为高度风险,必须采取风险处理措施降低风险并加强监测;(3)施工质量风险和其他不可预见风险为Ⅲ级中度风险,风险应对措施是风险监测即可.

表 5 亭子坝隧道项目施工风险矩阵法评估结果

风险类别	风险评估		
	概率等级 P	后果等级 C	风险等级
洞内坍方风险	5	3	极高
进洞风险(坍方/山体开裂)	5	3	极高
支护结构开裂	4	2	高度
洞内涌水/突水风险	3	3	高度
施工质量风险	3	1	中度
其他不可预见风险	3	2	中度

4 基于可拓法的隧道重大风险详细评估

上述应用 PC 风险矩阵法对隧道各施工风险事件做了评估,下面以其中的坍方重大风险事件为例,应用多级可拓法进行详细评估.

4.1 亭子坝隧道工程施工风险评价指标体系

通过收集专家和工程技术人员的调查意见,并结合《铁路隧道风险评估与管理暂行规定》和《地铁及地下工程建设风险管理指南》,可以得到亭子坝隧道坍方重大风险事故的评价指标体系,如表 6 所示(R 为评价准则层或顶层, C 为评价指标层).

地质复杂程度.对于隧道和地下工程而言,地质是关键,也是基础.而水又是造成塌方的另一重要原因,且大多数的隧道坍方都和地下水相关.对于地应力,因为本隧道埋深不深,可不考虑高地应力的影响.

隧道特征.主要包括隧道断面大小和隧道埋深,通常情况下隧道埋深越浅,则围岩越难形成有效的承载拱,容易发生冒顶坍方.

开挖情况.如开挖进尺过大,不能及时封闭成拱,导致掌子面土体坍塌、隧道失稳等;开挖工序不当,工法与地质条件不适应;隧道超挖严重,局部应力较集中,爆破没有采用控制爆破,围岩损伤严重等都可导致

隧道坍方.

支护及衬砌情况.初期支护没跟进,不能及时闭合受力,初期支护强度不足.

超前地质预报与监控量测情况.监测与地质预报是新奥法的支柱之一,在未及时预报,不清楚地质情况下施工,以及未有监测信息的反馈指导,很有可能发生隧道坍塌.

施工技术和管理水平.目前施工的“包而不管”或“以包代管”等做法,极易造成工程质量问题,从而引发坍方.

表6 亭子坝隧道坍方风险评价指标体系与指标分级

目标层	准则层	指标层	指标分级			
			1级低度	2级中度	3级高度	4级极高
坍 方 风 险 R	地质情况 R_1	围岩级别 C_{11}	I, II	III, IV	V	VI
		地下水发育程度 C_{12}	不发育	发育	丰富	很丰富
		地质复杂程度 C_{13}	不复杂	一般	复杂	很复杂
	隧道特征 R_2	埋深 C_{21}/m	$>3D$	$2D \sim 3D$	$D \sim 2D$	$<1D$
		跨度 C_{22}/m	<9	9~14	14~18	>18
	开挖情况 R_3	开挖方式 C_{31}	很合理	合理	一般	不合理
		循环进尺 C_{32}/m	<1	1~2	2~3	>3
		地下水处理 C_{33}	很完善	完善	一般	未处理
		爆破方法 C_{34}	很好	好	一般	未控制爆破
		隧道超挖情况 C_{35}/cm	<10	10~20	20~30	>30
	支护及衬砌情况 R_4	支护刚度 C_{41}	很强	适宜	一般	很弱
		超前支护 C_{42}	非常好	好	一般	没有
		地层加固与改良 C_{43}	非常好	好	一般	没有
		支护时机与闭合情况 C_{44}	很适宜	适宜	不适宜	严重滞后
	超前地质预报 与监控量测情况 R_5	超前地质预报情况 C_{51}	精度准确	一般	效果差	未做
		掌子面稳定情况 C_{52}	很稳定	稳定	不稳定	很不稳定
		监测信息反馈及处理 C_{53}	非常及时	及时	不及时	无反馈
	施工技术和管理水平 R_6	辅助工法的掌握与应用 C_{61}	很丰富	良好	一般	很差
		施工队伍状况与施工质量 C_{62}	优秀	良好	一般	较差
		培训情况和应急预案情况 C_{63}	很齐全	齐全	不齐全	没有

注: D 为隧道跨度

4.2 评价指标分级标准

评价指标分级标准见表6所示,其中:

1) 围岩级别和开挖跨度参照由隧道坍方统计及《公路隧道施工技术细则》而得.

2) 埋深是根据开挖跨度而相应确定的,具体是(h 为埋深, D 为隧道跨度): $h < D$,坍塌风险很大; $D < h < 2D$,坍塌风险大; $2D < h < 3D$,坍塌风险一般; $h > 3D$,坍塌风险很小;即埋深越大,越易形成围岩承载拱.

3) 对于开挖进尺,一般围岩越软弱,进尺越短越合理.

4) 对于开挖方法,应综合考虑围岩级别、跨度、埋深、地下水等综合考虑适宜的开挖方法,所以分级是用定性语言描述.

5) 地下水、施工技术和管理水平为定性因素,分级是用定性语言描述的,具体如表6所示.

4.3 定性指标量化及归一化处理

对于围岩级别,规定 I、II 为(0.5~2.5); III、IV 为(2.5~4.5); V 为(4.5~5.5); VI 为(5.5~6.5).评价时直接用数字 1~6 代表罗马数字 I~VI 即可.

对于地下水发育程度:规定(90~100)为地下水相当丰富;(80~89)为地下水丰富,有少量涌水;(70~79)为地下水发育;(60~69)为地下水不发育.

其他定性指标的规定类似于地下水发育程度的规定.

4.4 评价各准则层及目标层的坍方风险

亭子坝隧道洞内地段的原始指标数据:围岩 V 级,开挖跨度约 12 m,地下水发育,地质碎石土,结构较松散,易产生大面积坍塌,施工技术和管理水平很高。

结合隧道的实际情况以及可拓法评估原理,可以得到各准则层的坍方风险关联度($K_i(p)$ 为关于风险等级 i 的关联度),并由 AHP 层次分析法确定各准则层的权重,从而可得目标层的坍方风险评估结果,如表 7 所示,从中分析可知:

1) 隧道坍方风险的最终评估结果为 4 级,属于极高风险。

2) 地质因素为极高风险,支护因素和监测情况为高度风险.所以控制隧道坍方风险应从地质和支护 2 个角度进行预防与应对,并应加强地质预报与信息化施工。

表 7 隧道坍方风险可拓法详细的评估结果

	项目	权重	$K_1(p)$	$K_2(p)$	$K_3(p)$	$K_4(p)$	风险等级
准则层	地质情况 R_1	0.451	-0.766	-0.592	-0.188	0.247	4 极高风险
	隧道特征 R_2	0.040	-0.304	0.280	-0.152	-0.427	2 中度风险
	开挖情况 R_3	0.267	-0.304	0.251	-0.064	-0.437	2 中度风险
	支护情况 R_4	0.140	-0.492	-0.161	0.216	-0.258	3 高度风险
	地质预报与监测情况 R_5	0.073	-0.627	-0.441	0.119	-0.011	3 高度风险
	培训和应急情况 R_6	0.030	-0.245	0.455	-0.259	-0.506	2 中度风险
目标层	隧道坍方风险 R		-0.561	-0.230	-0.077	-0.075	4 极高风险

5 结论

1) 亭子坝隧道施工风险为边坡失稳风险、洞口进洞施工风险、洞内塌方风险、洞内施工涌突水风险、支护结构开裂破坏、施工质量风险等。

2) 应用 AHP 层次分析法可以确定亭子坝隧道主要风险为坍方和洞口进洞风险。

3) 亭子坝隧道整体坍方风险为极高风险;准则层中地质风险为极高风险,其次支护为高度风险.所以控制隧道坍方风险应从地质和支护两个角度进行预防和应对。

参考文献:

- [1] 安永林,欧阳鹏博,岳健.基于强度折减法的隧道掌子面稳定性及破坏形态研究[J].矿业工程,2018,33(1):39-44.
- [2] 安永林,曾贤臣,赵丹,等.不同富水程度以及饱水时间对隧道掌子面稳定性的影响[J].铁道科学与工程学报,2019,16(5):1260-1265.
- [3] 李忠,魏嘉,朱彦鹏.大断面城市隧道施工全过程风险管理模式研究[J].岩石力学与工程学报,2014,33(10):2084-2094.
- [4] 平自要,李玉梅.基于 OWA-BP 神经网络的公路隧道施工风险评估[J].筑路机械与施工机械化,2018,35(4):118-121.
- [5] 安永林,彭立敏,吴波,等.隧道坍方突发性事件风险可拓法综合评估[J].中南大学学报(自然科学版),2011,42(2):514-560.
- [6] 安永林,黄勤,彭立敏,等.隧道施工风险-人-机环境系统综合评估[J].中南大学学报(自然科学版),2012,43(1):301-307.
- [7] 安永林,彭立敏,李智.水底隧道施工安全风险评估软件开发初步研究[J].湖南交通科技,2016,42(1):122-125.
- [8] 李广信.岩土工程 50 讲:岩坛漫话(2 版)[M].北京:人民交通出版社,2010.
- [9] 中华人民共和国铁道部.TB040-2007 铁路隧道风险评估与管理暂行规定[S].2007.
- [10] 安永林,彭立敏.地铁火灾风险性的多级可拓综合评估[J].防灾减灾工程学报,2009,29(5):566-571.