

doi:10.3969/j.issn.1672-4348.2022.03.001

基于未确知测度理论公路隧道塌方风险评价

吴波¹, 朱林萍¹, 刘聪¹, 李贻材², 张耀²

(1. 东华理工大学 土木与建筑工程学院, 江西 南昌 330013;
2. 中铁十一局集团第一工程有限公司, 湖北 襄阳 441104)

摘要: 公路隧道塌方是较为常见的工程安全事故, 预先进行科学有效的风险评价对于防控隧道塌方风险具有重要意义。根据规范、现有研究和公路隧道工程特点构建了公路隧道塌方风险评价指标体系。针对传统单一赋权风险评价方法会造成评价指标主客观权重被单方面强化的问题, 引入博弈论法进行组合赋权以综合主客观权重信息, 提出了基于组合赋权和未确知测度理论的公路隧道塌方风险评价模型。采用 3 标度层次分析法和熵值法确定评价指标主观权重和客观权重, 并运用博弈论法确定评价指标组合权重; 结合未确知测度理论得到评价对象的多指标测度综合评价向量, 并根据置信度识别准则确定隧道塌方风险等级。将提出的模型应用于福建鱼塘溪隧道 4 个典型施工区段风险分析中, 得出隧道洞口段塌方风险可能性最高, 与现场评估结果基本相符。

关键词: 公路隧道; 风险评价; 未确知测度理论; 组合赋权; 隧道塌方

中图分类号: U455.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-4348(2022)03-0205-08

Tunnel collapse risk assessment based on unascertained measure theory

WU Bo¹, ZHU Linping¹, LIU Cong¹, LI Yicai², ZHANG Yao²

(1. School of Civil and Architectural Engineering, East China University of Technology, Nanchang 330013, China;
2. The First Engineering Co., Ltd. of China Railway 11th Bureau Group, Xiangyang 441104, China)

Abstract: Highway tunnel collapse is a common engineering accident. Scientific and effective risk assessment in advance is of great significance for prevention and control of tunnel collapses. According to the code, existing researches and characteristics of highway tunnel engineering, the risk evaluation index system of highway tunnel collapse was constructed. Aiming at the problem that the subjective and objective weights of evaluation indexes were strengthened unilaterally by the traditional single weighting risk evaluation method, the game theory was introduced to synthesize the subjective and objective weight information, and the risk evaluation model of highway tunnel collapse was proposed based on the combined weighting and unascertained measure theory. Improved analytic hierarchy process (IAHP) and entropy method were used to determine the subjective weight and objective weight of the evaluation indicators, and the game theory method is used to determine the combination weight of the evaluation indicators. Combined with the unascertained measure theory, the multi-index measure comprehensive evaluation vector of the evaluation object was obtained, and the risk level of tunnel collapse was determined according to the confidence recognition criterion. The proposed model was applied to the risk analysis of four typical construction sections of Yutangxi Tunnel in Fujian Province, and it was concluded that the tunnel entrance section has the highest possibility of collapse risk, which is basically consistent with the field evaluation results.

Keywords: highway tunnel; risk assessment; unascertained measure theory; combination weighting; tunnel collapse

隧道塌方是隧道施工中的常见事故,多造成严重的人员伤亡和财产损失^[1],因此在隧道建设前实施科学有效的风险评价对于降低、预测和控制隧道塌方风险具有重要意义。2011 年《公路桥梁和隧道工程施工安全风险评估指南(试行)》^[2]出台,表明隧道风险评估的科学化与规范化越来越受到重视,同时也对风险评估方法科学性提出了更高的要求。

近些年,专家学者在隧道塌方风险方面做了大量的研究。戴世伟等^[3]综合分析隧道塌方事故案例,采用 N-K 耦合模型对隧道塌方事故进行多因素耦合关联评估。关晓吉^[4]通过可拓云模型理论对隧道塌方风险进行了评估。吕擎峰等^[5]综合采用模糊层次分析法和后果当量法定量评估了隧道塌方风险可能性。陈舞等^[6]将粗糙集理论和信息熵应用于山岭隧道塌方风险评价。王春河等^[7]基于综合核对表法和专家调查法评价了隧道改扩建工程塌方风险。在评估隧道塌方风险和提供基本风险控制策略方面,Wu 等^[8]提出了一种综合采用贝叶斯网络、云模型、支持向量机的多源信息融合方法。王婧等^[9]基于可变模糊集理论对铁路隧道塌方风险进行了评价。

评价指标权重确定是风险评价的基础工作,以上研究中采用的传统层次分析法等主观赋权法依赖专家经验,权重稳定性受到专家主观性和差

异性影响。熵值法、粗糙集理论和云模型等客观赋权法虽受人为因素影响较小,但对客观数据依赖性强,存在部分客观数据难以获取的问题。运用组合赋权法可综合主客观权重两方面的信息,评价指标权重值确定更为合理。隧道塌方风险发生可能性难以建立精确数学模型予以量化,而未确知测度理论可作为一种量化方法处理此类不确定性问题。因此,本文提出一种基于博弈论法组合赋权和未确知测度理论的公路隧道塌方风险评价模型,并依托实际公路隧道工程验证该模型的适用性和可靠性。

1 公路隧道塌方风险辨识

公路隧道塌方风险因素众多,风险评价指标选取既要充分反映评价对象的重要风险因素,也要便于分析和计算。通过对当前研究成果^[10-11]和公路隧道工程特点的综合分析,归纳出隧道塌方风险的主要影响因素包括围岩 BQ 值、断裂破碎带、偏压角度、地下水、年降雨量、隧道埋深、隧道跨度、施工方法、勘察设计等。将上述 9 个主要影响因素确定为二级指标,并进行归类得到三个准则层一级指标分别为工程地质、水文气象、勘察设计与施工。规范^[2]给出的公路隧道塌方风险接受准则见表 1,由此确定隧道塌方风险评价指标具体分级标准见表 2。

表 1 塌方风险接受准则

Tab.1 Criteria for acceptance of collapse risk

风险等级	风险描述	接受准则	处理措施
I 级	极低	忽略	正常施工,日常管理
II 级	较低	可忽略	不采取风险处理措施和监测
III 级	一般	可接受	可以不采取风险处理措施但要进行监测
IV 级	较高	不期望	采取风险处理措施及监测,同时控制风险措施成本
V 级	极高	不可接受	高度重视,采取规避措施,加强监测,把风险降至可接受程度以下

表 2 公路隧道塌方风险评价指标与分级标准

Tab.2 Road tunnel collapse risk evaluation index and grading standard

目标层	准则层	指标层	极低 (Ⅰ级风险)	较低 (Ⅱ级风险)	一般 (Ⅲ级风险)	较高 (Ⅳ级风险)	极高 (Ⅴ级风险)
公路 隧道 塌方 风险	工程地质	围岩 BQ 值 X ₁	>550	450~550	350~450	250~350	<250
		断裂破碎带/m X ₂	<2	2~20	20~40	40~60	>60
		偏压角度/(°) X ₃	<10	10~20	20~30	30~40	>40
	水文气象	地下水 X ₄	不发育	较发育, 有滴渗现象	发育且有线状 流水现象	丰富且有少 量涌水现象	很丰富且有大量涌水现象
		年降雨量/mm X ₅	<600	600~1 200	1 200~1 700	1 700~2 100	>2 100
	勘察设计与施工	隧道埋深/m X ₆	>68	48~68	28~48	8~28	<8
		隧道跨度/m X ₇	<6	6~9	9~12	12~15	>15
		施工方法 X ₈	完全适合地质条件	较适合地质条件	基本适合地质条件	部分适合地质条件	不适合地质条件
		勘察设计 X ₉	地质勘查细致,设计合理	地质勘查细致,设计较合理	地质勘查和设计均一般	地质勘查较粗略,设计不合理	地质勘查粗略,设计不合理
定性指标赋值		1	2	3	4	5	

表 2 中定量指标以数值范围形式描述所属风险等级,包括围岩 BQ 值、断裂破碎带、偏压角度、年降雨量、隧道埋深和隧道跨度 6 个定量指标。定性指标以定性描述的形式定义相应风险等级状态,并通过赋以分值实现量化,包括地下水、施工方法和勘察设计 3 个定性指标。

2 公路隧道塌方风险评价模型

2.1 未确知测度理论基本原理

设有 n 个被评价的公路隧道施工段,则待评价的公路隧道施工段空间向量可表示为 $\boldsymbol{R} = \{r_1, r_2, \cdots, r_n\}$ 。各被评价隧道施工段 $r_i (i = 1, 2, \cdots, n)$ 有 m 个评价指标空间,即 $X = \{x_1, x_2, \cdots, x_m\}$,则可构成 m 维观测向量 $\boldsymbol{R}_i = \{r_{i1}, r_{i2}, \cdots, r_{im}\}$,其中 r_{ij} 表示公路隧道施工段 r_i 的第 j 个评价指标观测值。将观测值 r_{ij} 划分为 p 个风险等级,则 $U = \{C_1, C_2, \cdots, C_p\}$ 为 r_{ij} 的评价空间。若 $C_k > C_{k+1}$ 或 $C_{k+1} > C_k$,则称 $\{C_1, C_2, \cdots, C_p\}$ 为评价空间的

一个有序分割类。

2.1.1 单指标测度评价向量

设 $\mu_{ijk} = \mu(r_{ij} \in C_k)$ 表示观测值 r_{ij} 属于第 k 个风险等级 C_k 的程度,若 μ 满足式(1),则称 μ 为未确知测度。

$$\begin{cases} 0 \leq \mu(r_{ij} \in C_k) \leq 1 \\ \mu(r_{ij} \in \bigcup_l^k C_l) = \sum_{l=1}^k \mu(r_{ij} \in C_l) \\ \mu(r_{ij} \in U) = 1 \end{cases} \quad (1)$$

式中: $i = 1, 2, \cdots, n; j = 1, 2, \cdots, k$ 。

根据未确知测度定义, $\mu(r_{ij} \in C_k)$ 为隧道塌方风险评价单指标测度函数,各评价指标测度值 μ_{ijk} 构成的单指标测度评价矩阵可表示为

$$(\mu_{ijk})_{m \times p} = \begin{bmatrix} \mu_{i11} & \mu_{i12} & \cdots & \mu_{i1p} \\ \mu_{i21} & \mu_{i22} & \cdots & \mu_{i2p} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mu_{im1} & \mu_{im2} & \cdots & \mu_{imp} \end{bmatrix} \quad (2)$$

2.1.2 单指标测度函数

根据表 2 中评价指标取值范围以及单指标测

度函数定义绘制单指标测度函数图,如图 1、图 2 所示。

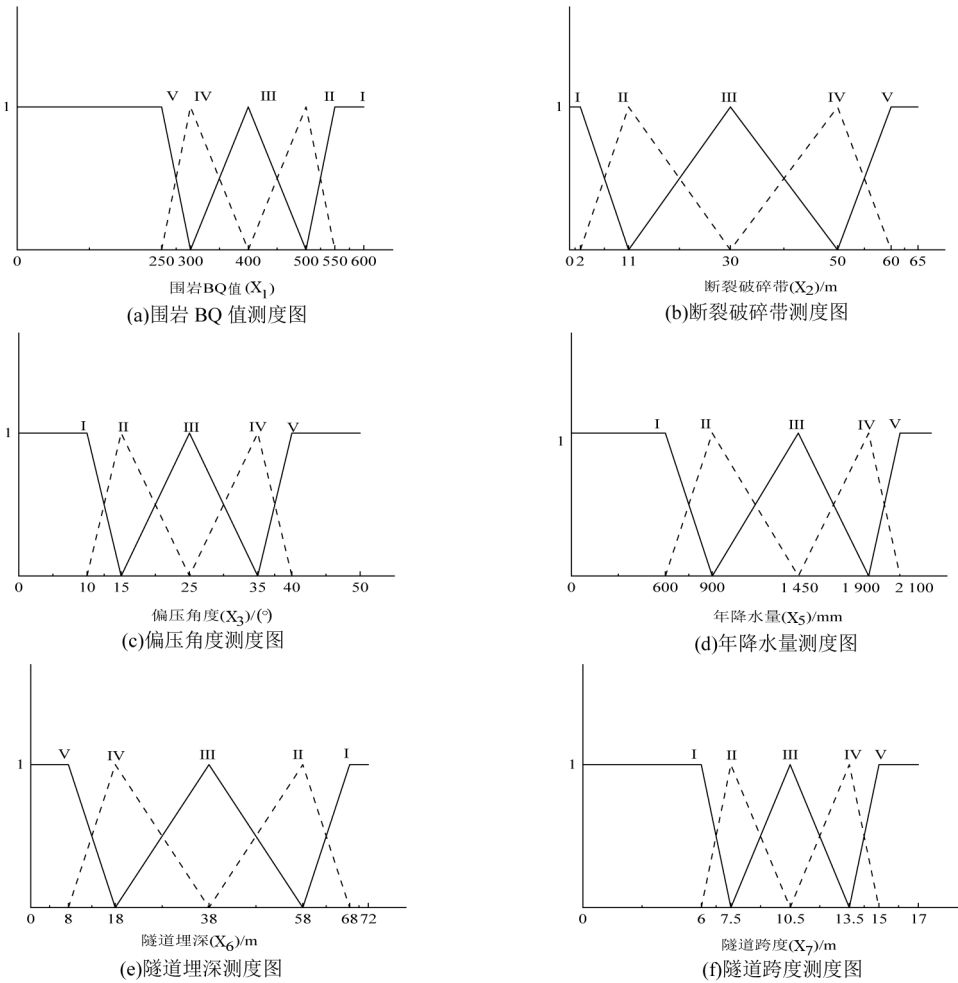


图 1 定量指标单指标测度函数图

Fig.1 Single indicator measurement function graph of quantitative indicators

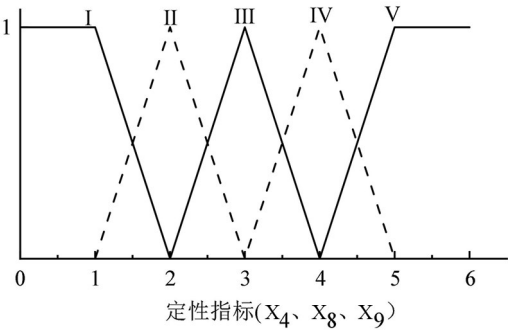


图 2 定性指标单指标测度函数图

Fig.2 Single indicator measurement function graph of qualitative indicators

2.2 博弈论法组合赋权

2.2.1 评价指标主权重确定

层次分析法 (AHP) 由美国学者 Saaty 提出, 是一种常用的主权重计算方法。当涉及因素较多时, 因素重要度排序过程复杂且计算量较大, 判断矩阵需进行一致性检验。由于专家主观差异性, 常难以满足一致性要求, 为此相关学者提出了 3 标度层次分析法 (improved analytic hierarchy process, IAHP) [12]。IAHP 法可有效简化各因素重要度确定的复杂过程, 其计算结果精度高、收敛快, 不必进行一致性检验。

专家通过比较因素 a_i 和 a_j 的相对重要性程度来构建判断矩阵 $A = (a_{ij})_{n \times n}$, 见表 3。

表 3 矩阵各元素取值规则(IAHP 法)

Tab.3 Value rule of each element of the matrix (IAHP method)

a_{ij}	定义
0	因素 a_j 比 a_i 明显重要
1	a_i 和 a_j 两因素同样重要
2	因素 a_i 比 a_j 明显重要

对判断矩阵行求和从而得出重要性排序指数 s_i ,如公式(3)所示。通过公式(4)和(5)计算得到间接判断矩阵 $B=(b_{ij})_{n\times n}$ 。

$$s_i = \sum_{j=1}^n a_{ij} \tag{3}$$

$$\bar{s} = \max(s_i), \underline{s} = \min(s_i) \tag{4}$$

$$b_{ij} = \begin{cases} \frac{s_i - s_j}{\bar{s} - \underline{s}} \left(\frac{\bar{s}}{\underline{s}} - 1 \right) + 1, & s_i \geq s_j \\ \left[\frac{|s_i - s_j|}{\bar{s} - \underline{s}} \left(\frac{\bar{s}}{\underline{s}} - 1 \right) + 1 \right]^{-1}, & s_i < s_j \end{cases} \tag{5}$$

构造拟优一致矩阵 $B'=(b'_{ij})_{n\times n}$,由公式(6)确定矩阵各元素。通过计算拟优一致矩阵 B' 的特征向量得出同一指标层各指标因素的权重值 w_i ,计算方法见公式(7)。

$$b'_{ij} = 10^{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (\lg b_{ik} - \lg b_{jk})} \tag{6}$$

$$w_i = \frac{1}{n} \frac{\sum_{j=1}^n b'_{ij}}{\sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n b'_{kj}} \tag{7}$$

2.2.2 评价指标客观权重确定

熵值法是客观赋权方法,信息熵是信息不确定性的一种量度,采用随机事件的概率来衡量每个事件显示有效信息的能力。通过分析和比较样本数据的信息,可确定多指标体系中各个评价指标的客观权重。用 w_{ij} 表示评价指标 x_i 与评价指标 x_j 相对重要性程度,满足 $0 \leq w_{ij} \leq 1, \sum_{j=1}^m w_{ij} = 1$,则 w_{ij} 为评价指标 x_i 的权重值。各评价指标客观权重计算公式如下:

$$v_{ij} = 1 + \frac{1}{\lg p} \sum_{i=1}^p \mu_{ijk} \lg \mu_{ijk} \tag{8}$$

$$w_{ij} = \frac{v_{ij}}{\sum_{i=1}^m v_{ij}} \tag{9}$$

2.2.3 博弈论法确定评价指标组合权重

为同时考虑主客观权重影响,采用博弈论法计算评价指标组合权重。博弈论组合赋权旨在建立不同方法所确定权重间的线性优化组合^[13],并取得优化权重与不同权重计算方法所得权重之间的平衡。

记 w_i^a 为主观权重向量, w_i^b 为客观权重向量,则组合权重向量为 W ,

$$W = \alpha_1 (w_i^a)^T + \alpha_2 (w_i^b)^T \tag{10}$$

式中: α_1 和 α_2 分别为 w_i^a 和 w_i^b 的线性组合系数,且 α_1 和 α_2 均大于 0。组合权重向量确定即是寻找最优线性组合系数 α_1 和 α_2 的 NASH 均衡点,通过公式(11)计算

$$\min = \| \alpha_1 (w_i^a)^T + \alpha_2 (w_i^b)^T - w_q^T \|_2, \tag{11}$$

$q = (1, 2)$

式(11)的最优化一阶导数条件如下:

$$\alpha_1 w_q (w_i^a)^T + \alpha_2 w_q (w_i^b)^T = w_q w_q^T \tag{12}$$

计算得到 α_1 和 α_2 的值后进行归一化处理,如式(13)所示

$$\alpha_q^* = \frac{\alpha_q}{\alpha_1 + \alpha_2} \tag{13}$$

最终得到组合权重向量 $W^* = (w_1^*, w_2^*, \cdots, w_m^*)$ 如下:

$$W^* = \alpha_1^* (w_i^a)^T + \alpha_2^* (w_i^b)^T \tag{14}$$

2.3 多指标综合测度及风险等级确定

根据评价指标组合权重值求出隧道施工段 r_i 的多指标综合测度:

$$\mu_{ik} = \sum_{j=1}^m w_j^* \mu_{ijk}, i = 1, 2, \cdots, n; k = 1, 2, \cdots, p \tag{15}$$

式中: $\sum_{k=1}^p \mu_{ik} = 1$ 。

显然 μ_{ik} 满足公式(1),那么可称 μ_{ik} 为测度。 r_i 的多指标综合测度评价向量为 $\{\mu_{i1}, \mu_{i2}, \cdots, \mu_{ip}\}$,依据置信度识别准则确定隧道施工段塌方风险等级,其计算过程如下:设 λ 为置信度($\lambda \geq 0.5$),若 $C_1 < C_2 < C_3 < C_4 < C_5$,则有:

$$k_0 = \min \left\{ \sum_1^k \mu_i \geq \lambda, k = 1, 2, \cdots, p \right\} \tag{16}$$

此时可知待评价的公路隧道 r_i 属于第 k_0 个评价类 C_{k_0} 。

3 工程实例分析

3.1 工程概况

福建莆炎高速公路鱼塘溪隧道为双线分离式小净距隧道,位于丘陵区,山坡基岩出露较差,地表为第四系坡残积土层覆盖。隧道右线最大埋深 107 m,主要位于Ⅳ、Ⅴ级围岩中。隧道洞口段存在大偏压地段,围岩由坡残积层与强风化层构成;隧道出口段围岩主要由砂质黏性土和全、强风化层构成。洞身岩体软硬相间,完整性较差;部分施工区段存在花岗岩侵入,节理、裂隙较发育。工程所处区域主要地下水类型为基岩裂隙水和第四系孔隙水,以基岩裂隙水为主。区域气候特征表现

为雨水较多,且雨季暴雨集中。

3.2 公路隧道塌方风险评价模型应用

3.2.1 鱼塘溪隧道塌方风险评价指标

根据前文的分析,选取 6 个定量指标和 3 个定性指标,即围岩 BQ 值(X_1)、断裂破碎带(X_2)、偏压角度(X_3)、地下水(X_4)、年降雨量(X_5)、隧道埋深(X_6)、隧道跨度(X_7)、施工方法(X_8)、勘察设计(X_9)。本文确定 4 个典型施工区段作为风险评价对象。表 4 中 T_1 为隧道洞口段样本、 T_2 为隧道进口段样本、 T_3 为隧道洞身段样本、 T_4 为隧道出口段样本。综合鱼塘溪隧道设计资料和现场调查结果,得到各隧道施工区段相应评价指标的调查数据如表 4 所示。

表 4 鱼塘溪隧道评价指标调查数据
Tab.4 Evaluation index table of Yutangxi Tunnel

样本编号	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9
T_1	242.77	11	31	4	1 082.3	22.6	14.75	3	2
T_2	268.74	9	25	3	1 082.3	28.0	14.75	3	2
T_3	322.77	18	-	3	1 082.3	107.0	14.75	3	2
T_4	228.74	13	-	3	1 082.3	15.0	14.75	3	2

对选取的典型评价指标说明如下,围岩 BQ 值(X_1)越高,代表围岩越稳定。断裂破碎带(X_2)反映岩体完整性,岩体结构完整则地质风险较小。偏压角度(X_3)越大,隧道开挖后产生的围岩应力重分布越不利。地下水(X_4)和年降雨量(X_5)综合反映水害对隧道塌方风险的影响,地下水发育和雨水较多会显著增加隧道塌方发生可能性。隧道埋深(X_6)越浅,则发生塌方风险可能性越高。隧道跨度(X_7)反映隧道断面大小,隧道开挖断面越大则塌方风险越高。

3.2.2 博弈论法计算评价指标组合权重向量

采用博弈论法将 3 标度层次分析法计算所得主观权重与熵值法计算所得客观权重进行耦合,以样本 T_1 为例,计算过程如下:

(1)根据单指标测度函数的定义以及表 4 中鱼塘溪隧道各评价指标的取值,结合前文所述计算方法求出隧道施工段单指标测度值 μ_{ijk} ,把求出的单指标测度值进行整理,进而得到样本 T_1 单指标测度评价矩阵如下:

$$(\mu_{ijk})_{9 \times 5} = \begin{bmatrix} 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 1.00 \\ 0.00 & 1.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 0.60 & 0.40 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 1.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.67 & 0.33 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 0.23 & 0.77 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.17 & 0.83 \\ 0.00 & 0.00 & 1.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 1.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \end{bmatrix}$$

(17)

(2)3 标度层次分析法计算各评价指标主观权重:首先由专家根据表 3 给出评价指标的相对重要性程度,据此构造判断矩阵。通过公式(3)~(7)计算得到样本 T_1 各评价指标主观权重: $w_i^a = \{0.102\ 2, 0.128\ 7, 0.102\ 3, 0.122\ 0, 0.211\ 3, 0.136\ 8, 0.136\ 8, 0.040\ 7, 0.019\ 2\}$ 。

(3)熵值法计算评价指标客观权重:通过公式(8)~(9)计算得出样本 T_1 各评价指标客观权重: $w_i^b = \{0.134\ 7, 0.134\ 7, 0.078\ 4, 0.134\ 7,$

0.081 6, 0.089 6, 0.076 7, 0.134 7, 0.134 7}。

(4) 博弈论法计算样本 T_1 相应评价指标组合权重向量: 根据公式 (10) ~ (15) 将 IAHP 法和熵值法的计算结果耦合得出样本 T_1 评价指标组合权重向量: $W^* = \{0.112\ 9, 0.130\ 7, 0.094\ 5, 0.126\ 1, 0.168\ 7, 0.121\ 3, 0.117\ 1, 0.071\ 6, 0.057\ 1\}$ 。

量与评价矩阵进行矩阵运算, 得到多指标综合测度评价向量: $\{0, 0.300\ 7, 0.193\ 0, 0.334\ 8, 0.171\ 5\}$, 取置信度 $\lambda = 0.5$, 依据式 (16) 得: $k_0 = 0.828\ 5 > 0.5$, 由此判定该隧道洞口段 T_1 塌方风险等级为 IV 级, 属于较高风险。采用相同方法计算得到其他样本的多指标综合测度评价向量并确定隧道塌方风险等级, 如表 5 所示。

3.2.3 隧道塌方风险多指标综合测度评价向量

将计算得到的塌方风险评价指标组合权重向

表 5 鱼塘溪隧道塌方风险等级

Tab.5 Collapse risk assessment level of Yutangxi Tunnel

样本编号	隧道塌方风险等级					本文方法	现场评估
	I 级	II 级	III 级	IV 级	V 级		
T_1	0.000 0	0.300 7	0.193 0	0.334 8	0.171 5	IV 级	较高
T_2	0.025 8	0.266 2	0.436 5	0.152 5	0.119 0	III 级	一般
T_3	0.249 0	0.241 0	0.294 9	0.134 0	0.081 1	III 级	一般
T_4	0.111 9	0.276 0	0.264 3	0.141 8	0.206 0	III 级	较高

3.4 结果分析

(1) 由表 5 可知隧道洞口段样本 T_1 塌方风险等级为 IV 级, 属于较高风险。隧道洞口段围岩稳定性较差, 存在大偏压地质, 埋深较浅且地下水丰富。同时, 通过现场调查发现洞口段开挖后未成形的边坡也容易因为雨水的冲刷发生滑塌事故。

(2) 样本 T_2 和 T_3 的隧道塌方风险等级为 III 级, 属于一般风险。调查资料显示隧道进口段围岩等级为 IV 级, 属于小偏压地段, 埋深相较洞口段更深, 且受地下水影响较小; 隧道洞身段围岩为 III 级, 属于无偏压地段, 埋深最深, 且地下水不丰富。

(3) 现场评估结果将样本 T_4 塌方风险可能性确定为较高, 主要是考虑到隧道出口段为 V 级围岩, 虽属于无偏压地段且受地下水影响较小, 但出口段埋深较浅, 难以形成拱效应而易产生塌方事故。通过对比样本 T_4 评估结果与现场评估结果可知, 本文方法中未能考虑实际施工中隧道深埋段向浅埋段转换的动态施工过程, 这是样本 T_4 评估结果与现场评估结果产生差异性的主要原因。

(4) 鱼塘溪隧道 4 个典型施工区段风险评估结果表明隧道洞口段塌方风险最高, 为避免隧道洞口段塌方事故发生, 在洞口段施工前必须先施作完成洞顶截水沟, 增设临时排水设施, 防止施工

场地积水, 并配备抽水泵。在隧道开挖过程中要随时掌握天气情况, 提前进行施工防排水, 避免雨水对未成形的边坡造成冲刷, 从而引起滑塌。遇到极端降雨天气, 应停止边坡开挖, 人员机械撤离至安全区域, 并对坡面喷射混凝土及时封闭。在汛期时要安排专人巡查, 做好雨中、雨后检查, 确认洞顶及边坡有无危险情况, 发现后及时处理加固, 同时加强洞顶、边仰坡的沉降监测频率, 随时掌握沉降信息。

4 结论

- 1) 根据国内外大量隧道塌方案例统计资料、相关文献及规范, 并结合公路隧道工程特点选取围岩 BQ 值、断裂破碎带、偏压角度、地下水、年降雨量、隧道埋深、隧道跨度、施工方法、勘察设计作为公路隧道塌方风险评价指标, 避免评价指标单一的不足, 一定程度上提高了评价结果的客观性和准确性, 在公路隧道风险评估中具有较强适用性。
- 2) 评价模型中将风险指标因素划分为 5 个等级, 多数指标因素通过可测量的数据进行风险等级划分, 避免指标因素因为模糊描述带来判断偏差。采用博弈论法组合赋权确定各评价指标的

综合权重,能够综合反映主客观权重信息的影响,并基于组合赋权与未确知测度理论的风险评价模型对鱼塘溪隧道塌方风险进行评估,将评估结果与现场评估结果进行比较,验证了该模型应用于隧道塌方风险评价的可靠性。

参考文献:

[1] 张家齐. 山岭铁路隧道施工塌方风险评估[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2021.

[2] 交通运输部工程质量监督局. 公路桥梁和隧道工程施工安全风险评估制度及指南解析[M]. 北京: 人民交通出版社, 2011.

[3] 戴世伟, 刘鑫鑫, 万飞. 软岩隧道大变形事故致灾因素耦合分析[J]. 中国安全科学学报, 2021, 31(8): 119-124.

[4] 关晓吉. 基于可拓联系云模型的隧道塌方风险等级评价方法[J]. 中国安全生产科学技术, 2018, 14(11): 186-192.

[5] 吕擎峰, 霍振升, 赵本海, 等. 基于模糊层次和后果当量法的隧道塌方风险评估[J]. 隧道建设(中英文), 2018, 38(S2): 31-38.

[6] 陈舞, 张国华, 王浩, 等. 基于粗糙集条件信息熵的山岭隧道坍塌风险评价[J]. 岩土力学, 2019, 40(9): 3549-3558.

[7] 王春河, 朱福强, 罗兴, 等. 隧道改扩建工程施工风险评估研究[J]. 现代隧道技术, 2021, 58(2): 63-70.

[8] WU B, QIU W X, HUANG W, et al. A multi-source information fusion approach in tunnel collapse risk analysis based on improved Dempster - Shafer evidence theory[J]. Scientific Reports, 2022, 12: 3626.

[9] 王婧, 靳春玲, 贡力, 等. 基于可变模糊集理论的铁路隧道塌方风险评价[J]. 铁道科学与工程学报, 2021, 18(5): 1364-1372.

[10] 朱捷, 曾国伟, 胡国忠, 等. 基于事故统计分析的隧道坍塌施工安全风险评估[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2019, 15(9): 237-240.

[11] 张国威. 基于统计分析的隧道塌方规律及围岩压力分布特征研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2017.

[12] 梁樑, 盛昭翰, 徐南荣. 一种改进的层次分析法[J]. 系统工程, 1989, 7(3): 5-7, 2.

[13] 钟里密, 谢全敏, 罗忆. 基于博弈-可拓理论的隧道围岩稳定性评价[J]. 中国安全生产科学技术, 2019, 15(1): 56-61.

(责任编辑: 陈雯)