

文章编号:1671-1556(2020)05-0092-06

基于 EW-AHP 和未确知测度理论的隧道坍塌 风险评价

翟 强,顾伟红

(兰州交通大学土木工程学院,甘肃 兰州 730070)

摘 要: 评价隧道施工中坍塌风险,确定隧道坍塌风险发生的可能性等级对降低隧道施工风险、预测和控制风险有着重要的意义。提出了一种基于熵权法与层次分析法和未确知测度理论的隧道坍塌风险评价方法。该方法先基于现有的研究选取围岩等级、断裂破碎带宽度、地下水状况等 11 个评价指标,以此建立隧道坍塌风险评价指标体系,并建立了隧道坍塌风险可能性分级标准;然后将层次分析(AHP)法和熵权(EW)法运用乘法合成归一化方法来确定评价指标的综合权重,采用 EW-AHP 和未确知测度理论确定研究对象的多指标综合测度评价向量,并根据最大隶属度原则确定隧道坍塌风险可能性等级;最后运用该评价方法对新疆 3 条特长引水隧道 10 个研究区段发生坍塌风险的可能性进行了评价,并与实际调查结果进行对比。结果表明:该评价方法的评价结果与实际情况基本符合,且评价方法合理、有效,可为隧道坍塌风险评价提供参考。

关键词: 隧道;坍塌;风险可能性评价;层次分析法;熵权法;未确知测度理论

中图分类号:X913

文献标识码:A

DOI:10.13578/j.cnki.issn.1671-1556.2020.05.014

Risk Assessment of Tunnel Collapse by EW-AHP and Unascertained Measure Theory

ZHAI Qiang, GU Weihong

(School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: Assessing tunnel collapse risk and determining the probability level of tunnel collapse risk is greatly significant, which can reduce the tunnel construction risk and predict and control the risk. This paper proposes a tunnel collapse risk assessment method based on entropy weight method and uncertainty measurement theory. Firstly, through the existing research summary and discussion, the paper determines 11 tunnel collapse indexes, such as surrounding rock grade, fracture zone width and groundwater condition so as to establish an evaluation index system and a risk possibility classification standard for tunnel collapse risk. Then the paper adopts Analytic Hierarchy Process (AHP) and Entropy Weight method (EW) to determine the comprehensive weight by multiplication synthesis normalization method, and adopts unascertained measure theory to determine the multi-index comprehensive measure evaluation vector of the research object and determines the tunnel collapse risk probability grade according to the maximum membership principle. Finally, the paper applies the method to evaluating the collapse risk possibility of 10 research sections of 3 super long water diversion tunnels in Xinjiang and to analyzing and comparing with the actual investigation. The results show that the model evaluation results are basically in line with the actual situation, and the evaluation method is reasonable and effective. It can provide a reference for the tunnel risk possibility evaluation.

Key words: tunnel; collapse; risk probability assessment; Analytic Hierarchy Process method; entropy weight method; uncertainty measurement theory

收稿日期:2020-01-31 修回日期:2020-08-04

基金项目:国家自然科学基金项目(51668037)

作者简介:翟 强(1994—),男,硕士研究生,主要研究方向为铁路工程管理。E-mail:525883876@qq.com

隧道施工地下工程项目与其他工程项目相比,具有隐蔽性、复杂性、不确定性和安全隐患大等特点,因此隧道工程施工过程中安全事故屡屡发生。塌方作为岩石隧道施工中最常见的灾害,主要是由于受不良地质断裂破碎带、地下水等影响使岩石失去控制而导致的。隧道坍塌不仅会给隧道施工带来巨大的困难,而且还会使施工成本、时间和意外事故发生的可能性增加,因此预测隧道坍塌风险的可能性已成为隧道研究的热点问题。

近些年,许多学者对隧道坍塌风险进行了评估。如张晨曦等^[1]运用层次分析法与多层次模糊综合决策法确定了山岭隧道施工中塌方风险事件的可能性等级;朱捷等^[2]通过文献总结和现场调查,统计了大量的隧道坍塌工程案例,对引起隧道坍塌的风险源进行了辨识与分析,对构建隧道坍塌风险评价体系起着至关重要的作用;元晓贵等^[3]和于咏妍^[4]基于模糊层次分析方法对隧道坍塌风险进行了评估;周建昆等^[5]采用概率分析事故树理论对隧道塌方事故进行了预测;孙彦峰^[6]选取岩石单轴饱和抗压强度等12个影响因素建立隧道塌方风险评价体系,并基于理想点法对隧道塌方风险进行了评价;杨光等^[7]和时惠黎等^[8]为了解决隧道塌方事故的复杂性和模糊性问题,运用云模型对隧道塌方风险等级进行了评价;苏永华等^[9]针对传统的模糊综合评价中评价指标权重的确定过分依赖专家经验,可能会造成评判结论模糊这一问题,引入了粗糙理论来计算评价指标的客观权重,并将模糊中心理论应用于隧道坍塌风险评价中。

由于采用层次分析(AHP)法、概率分析事故树理论等主观方法确定评价指标权重时过分依赖专家经验易造成误差,而采用理想点法、云模型和粗糙集理论等客观方法确定评价指标权重时需要大量的调查数据,故本文将最常用的主观方法层次分析(AHP)法和客观方法熵权(EW)法相耦合来确定评价指标的综合权重,一方面可以弥补数据的缺失,另一方面可以削弱人为判断引起的误差,并且EW法完全取决于数据,且计算较为客观。未确知信息是一种不同于模糊信息、随机信息和灰色理论信息的新的不确定信息,未确知测度理论能够很好地解决信息的不确定性问题。因此,本文采用EW-AHP和未确知测度理论对隧道坍塌风险可能性进行评价,可为预防和控制隧道坍塌提供理论参考。

1 隧道坍塌风险评价的未确知测度原理

假设评价指标空间 $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ 有 n 个, $H(h_1, h_2, \dots, h_m)$ 是每个研究对象的 m 个评价指

标,则可构成 $a_i = \{a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{im}\}$ 的 m 维向量,其中 a_{ij} 表示隧道坍塌风险评价指标测度值。将 a_i 划分为 s 个评价等级,记评价等级 $R = \{C_1, C_2, \dots, C_s\}$,假设 $C_e > C_{e+1}$,则称 $\{C_1, C_2, \dots, C_s\}$ 为评价等级 R 上的一个有序分割类^[10-11]。

1.1 单指标未确知测度

设 $\beta_{ije} = \beta(a_{ij} \in C_e)$ 表示测度值 a_{ij} 属于第 e 个评价等级 C_e 的程度,要求 β 满足以下三式:

$$\begin{cases} 0 \leq \beta(a_{ij} \in C_e) \leq 1 \\ \beta(a_{ij} \in R) = 1 \\ \beta(a_{ij} \in \bigcup_{l=1}^e C_l) = \sum_{l=1}^e \beta(a_{ij} \in C_l) \end{cases} \quad (1)$$

($i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m; l = 1, 2, \dots, e$)

根据未确知测度的定义,首先构造隧道坍塌风险评价单指标测度函数 $\beta(a_{ij} \in C_e)$,求出某评价因素 a_i 的各评价指标测度值 β_{ije} , β_{ije} 表示测量值 a_{ij} 属于第 e 个评价等级的程度,且满足公式(1)所对应的“非负有界性”、“归一性”和“可加性”。

各单指标测度值 β_{ije} 构成的评价矩阵如下:

$$(\beta_{ije})_{m \times s} = \begin{bmatrix} \beta_{i11} & \beta_{i12} & \cdots & \beta_{i1s} \\ \beta_{i21} & \beta_{i22} & \cdots & \beta_{i2s} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \beta_{im1} & \beta_{im2} & \cdots & \beta_{ims} \end{bmatrix} \quad (2)$$

1.2 基于EW-AHP确定评价指标的权重系数

1.2.1 熵权法确定评价指标的客观权重

熵权(EW)法是一种客观赋权方法,该方法是用熵值 ν_{ij} 来度量信息量的多少,进而确定评价指标的重要性。假设评价指标 h_j 相当于其他评价指标的重要性用 θ_{ij} ($0 \leq \theta_{ij} \leq 1, \sum_{j=1}^m \theta_{ij} = 1$) 来表示,那么 θ_{ij} 是评价指标 h_j 的权值(其他评价指标的权值可类似求出),具体计算公式如下:

$$\nu_{ij} = 1 + \frac{1}{\lg s} \sum_{i=1}^s \beta_{ije} \lg \beta_{ije} \quad (3)$$

$$\theta_{ij} = \nu_{ij} / \sum_{i=1}^n \nu_{ij} \quad (4)$$

1.2.2 层次分析法确定评价指标的主观权重

层次分析(AHP)法是一种主观赋权方法,该方法首先将已经确定的引起隧道坍塌风险的因素按照9级标度法进行两两比较,构成判断矩阵 S ;然后用方根法计算判断矩阵,得到各因素的权重;最后对判断矩阵进行一致性检验,当随机一致性比率 CR 小于0.1时则认为层次分析排序的结果满意,即权系数的分配是合理的;否则,需要调整判断矩阵的因子取值,重新计算。

1.2.3 乘法合成归一化方法确定评价指标综合权重

复合权值是客观数据与主观经验的耦合,本文运用乘法合成归一化方法计算评价指标的综合权重^[12-13],具体计算公式如下:

$$\omega_j = (\alpha_j \cdot \beta_j) / \sum_{j=1}^m (\alpha_j \cdot \beta_j) \quad (5)$$

式中: ω_j 为第 j 个评价指标的综合权重; α_j 、 β_j 分别为第 j 个评价指标的主、客观权重; m 为评价指标的个数。

1.3 多指标综合测度

结合评价指标综合权重值求出某评价因素 a_i

的多指标综合测度,即 $\beta_{ie} = \sum_{j=1}^m \omega_{ij} \beta_{ije}$,其中 $\sum_{e=1}^s \beta_{ie} = 1$,则称 β_{ie} 为测度, $\{\beta_{i1}, \beta_{i2}, \dots, \beta_{is}\}$ 为 a_i 的评价向量, $0 \leq \beta_{ie} \leq 1$,并依据最大隶属度原则确定样本隧道坍塌风险的评价等级。

2 实例应用与分析

2.1 研究区概况

研究区为新疆某地区 3 条特长引水隧道。其中,西二隧道洞身为奥陶系黑云母石英片岩、二云石英片岩以及华力西期变质斜长花岗岩、花岗斑岩、闪长岩,花岗岩中石英含量一般为 15%~25%,为中硬—坚硬岩,整体稳定性好,饱和抗压强度为 30~170 MPa,隧洞埋深为 15~596 m,绝大部分均为 II、III 类围岩,石炭系凝灰质砂岩、黑云长英角岩中石英含量一般为 20%~30%,花岗岩、黑云母花岗岩、黑云母角闪斜长岩、片麻极少,为 IV、V 围岩;双三隧道隧洞穿越石炭系(C)、泥盆系(D)和华力西期三大地层,岩性主要为硅质砾岩、安山岩,局部夹凝灰质砂岩、砂岩、沉凝灰岩、石英闪长斑岩、砂砾岩等,石英含量一般为 1%~15%,饱和抗压强度为 40~130 MPa,隧洞埋深为 65~300 m,绝大部分均为 II、III 类围岩,极少为 IV、V 类围岩;喀双隧道沿线地形为剥蚀丘陵地貌,地形略起伏,多发育丘陵,部分地段发育冲沟,无大断裂发育,隧洞洞身为石炭系

凝灰岩、凝灰质砂岩,少量石英闪长岩,为坚硬岩,整体稳定性好,饱和抗压强度为 20~120 MPa,隧洞埋深为 103~790 m,绝大部分均为 II、III 类围岩,极少为 IV、V 围岩。本文在研究区选取了 10 个具有代表性的区段作为隧道坍塌风险评价的对象。

2.2 隧道坍塌风险可能性等级评价

2.2.1 确定隧道坍塌风险可能性的评价等级

参照文献[4]中风险事件的可能性等级,本文建立隧道坍塌风险可能性的评价等级 $R = \{C_1, C_2, \dots, C_5\}$,其中 $C_1 \sim C_5$ 分别表示“很可能”、“可能”、“偶尔”、“可能性很小”、“不可能”。

2.2.2 隧道坍塌风险评价指标的选取

隧道坍塌风险评价指标的选取一方面要依据是否容易获取且可操作性强,另一方面要根据待评价隧道的施工现状、地质条件和风险特征等情况进行合理筛选。

通过对已有的研究成果进行汇总,归纳出造成隧道坍塌风险的主要因素有地质条件因素、设计因素、施工因素,并根据朱捷等^[2]对 381 个隧道坍塌案例的概率统计分析得到的主要影响因素为围岩级别(18.35%)、地下水(11.15%)、降雨(10.19%)、支护方式(7.29%)、断裂破碎带(6.90%)、岩体完整性(6.13%)、隧道埋深(4.39%),而降雨一般考虑在隧道洞口或浅埋段,故本文不予考虑。此外,结合国外学者的相关研究^[2],还应充分考虑隧道断面设计因素和施工因素。最终本文选择了 3 个定量评价指标和 8 个定性评价指标,即等效截面积 X_1 (m²)、深度比 X_2 、断裂破碎带宽度 X_3 (m)、单轴抗压强度 X_4 (MPa)、地下水状况 X_5 、RQD X_6 (%)、岩石风化程度 X_7 、超挖 X_8 (%)、支护方式 X_9 、围岩等级 X_{10} 、岩体完整性 X_{11} 。研究区隧道坍塌各评价指标的调查数据和具体分级标准见表 1 和表 2。部分评价指标描述如下:

(1) 等效截面积(X_1):隧道断面积越大,隧道越不稳定,越容易发生坍塌,该评价指标的等级划分标准主要依据实测数据^[14]。

表 1 研究区隧道坍塌调查信息表

Table 1 Tunnel collapse information in the study area

样本编号	X_1/m^2	X_2	X_3/m	X_4/MPa	X_5	$X_6/\%$	X_7	$X_8/\%$	X_9	X_{10}	X_{11}
ST1	47.8	8.97	无	75	无	81	未分化	75	钢拱架	1.8	0.8
ST2	47.8	2.5	25	15	线状	22	强风化	120	钢拱架	1.4	0.3
ST3	47.8	1.8	20	40	点滴状	45	中等风化	104	钢拱架	1.6	0.55
ST4	38.5	28.4	无	55	线状	88	微风化	85	锚杆	1.7	0.8
ST5	38.5	17.3	无	101	涌流状	71	未分化	90	锚杆	3.8	0.62
ST6	38.5	27.2	15	55	点滴状	45	中等风化	125	锚杆	2.4	0.8
ST7	23.7	20	无	140	点滴状	70	未分化	80	循环	4.0	0.7
ST8	23.7	22.4	15	4	无	14	中等风化	115	循环	1.2	0.2
ST9	23.7	27.5	无	108	无	77.1	微风化	102	循环	3.8	0.9
ST10	23.7	27.6	40	55	潮湿	41	微风化	105	循环	2.4	0.4

表 2 隧道坍塌风险评价指标的分级标准

Table 2 Classification standard of tunnel collapse risk evaluation indexes

评价等级	X_1/m^2	X_2	X_3/m	X_4/MPa	X_5	$X_6/\%$	X_7	$X_8/\%$	X_9	X_{10}	X_{11}
I(C_5)	<20	>7	不存在断层	>150	无地下水	90~100	未分化	<100	无	II,I >4.5	0.9~1
II(C_4)	20~45	4.5~7	0~20	100~150	潮湿或点滴状	75~90	微风化	100~105	喷混凝土	III 3.5~4.5	0.75~0.9
III(C_3)	45~70	2.5~4.5	20~30	50~100	淋雨状	50~75	中等风化	105~110	锚杆	IV 2.5~3.5	0.5~0.75
IV(C_2)	70~120	1~2.5	30~50	10~50	线状或小涌水状	25~50	强风化	110~120	钢拱架	V 1.5~2.5	0.2~0.5
V(C_1)	>120	<1	>50	<10	涌流状	<25	全风化	>120	循环进尺	VI <1.5	0~0.2

(2) 深度比(X_2):表示的是隧道埋深与隧道直径的比值(z_0/D),根据有关研究表明该深度比值越大,隧道坍塌的风险越小。

(3) $RQD(X_6)$:表示岩石质量指标值,可以用来反映隧道的地质状况。

(4) 围岩等级(X_{10}):隧道围岩的强度和完整性对隧道围岩的稳定性有很大的影响,随着隧道岩体强度的降低,隧道围岩的稳定性降低,纵波可以作为

隧道围岩等级的判断标准。

(5) 岩体完整性(X_{11}):岩体的完整性系数 K_v 可以用来反映岩体的完整性等级,可表示为 $K_v = v_{pm}^2 / v_{pr}^2$ [其中, v_{pm}^2 为岩体的弹性纵波速度(m/s); v_{pr}^2 为岩石的弹性纵波速度(m/s)]。

2.2.3 构造单指标测度函数

以样本 ST4 为例,图 1 为隧道坍塌风险各评价指标的单指标测度函数。由表 1 的研究区隧道坍塌

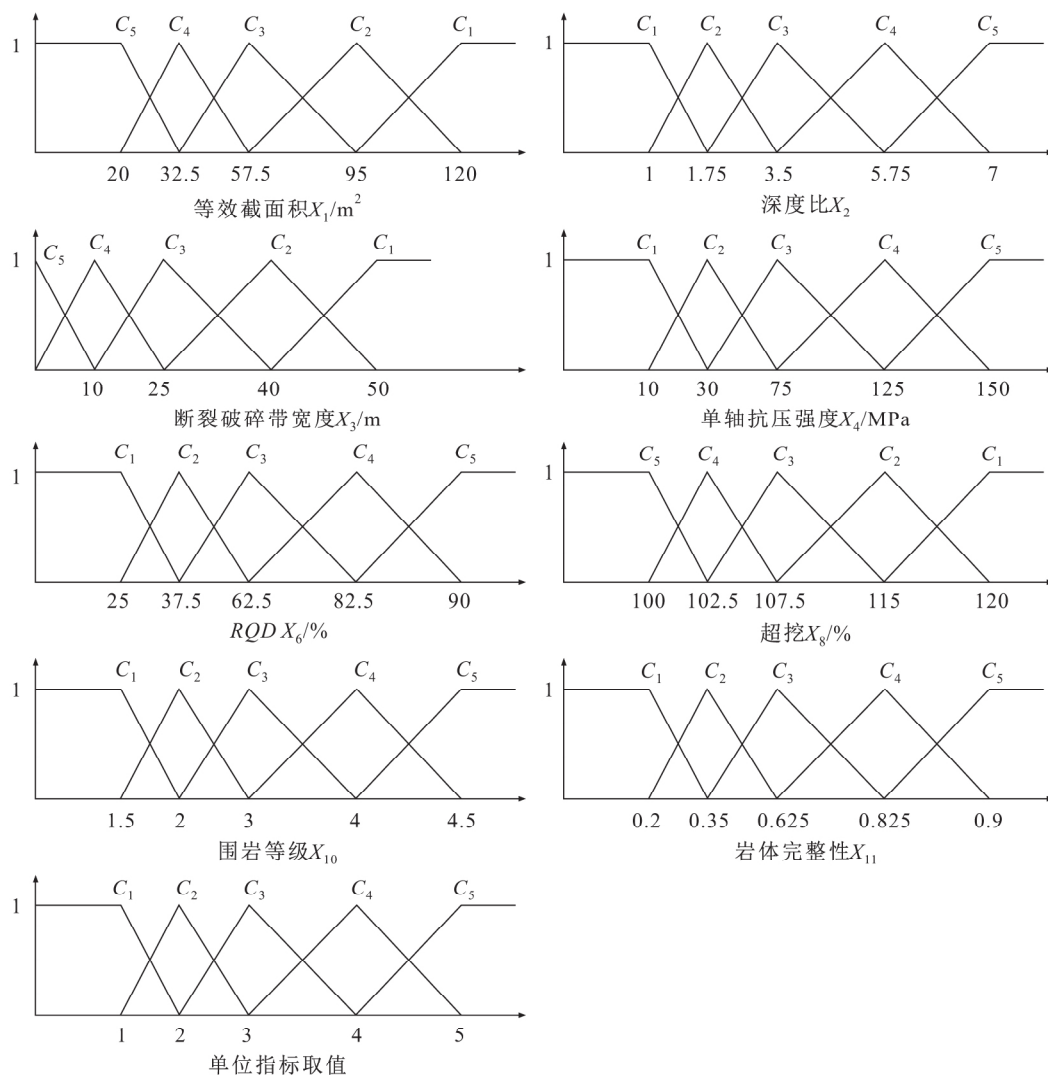


图 1 隧道坍塌风险各评价指标的单指标测度函数

Fig. 1 Single index measure function of each evaluation index of tunnel collapse risk

调查信息表,即可求出样本 ST4 的单指标测度值 β_{ije} 构成的评价矩阵如下:

$$(\beta_{ije})_{11 \times 5} = \begin{bmatrix} & C_5 & C_4 & C_3 & C_2 & C_1 \\ \begin{matrix} 0 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0.733 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0.400 \\ 0 \end{matrix} & \begin{matrix} 0.760 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0.267 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0.600 \\ 0.875 \end{matrix} & \begin{matrix} 0.240 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0.125 \end{matrix} & \begin{matrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0.400 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{matrix} & \begin{matrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0.600 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{matrix} \end{bmatrix} \quad (6)$$

2.2.4 基于 EW-AHP 确定评价指标的综合权重

将主观方法 AHP 法和客观方法 EW 法进行耦合,并通过公式(5)计算各评价指标的综合权重。以样本 ST4 为例,具体计算过程如下:

(1) AHP 法确定评价指标的主观权重:将 11 个评价指标按照 AHP 法中的 9 级标度法通过专家评判对各因素的重要性两两比较形成判断矩阵,并进行一致性检验,最终可计算得出各评价指标的主观权重,见表 3。

(2) EW 法确定评价指标的客观权重:EW 法是根据指标的变异程度来确定该评价指标提供信息量的多少,可直接反映该评价指标作用的大小,因此它可作为综合评价中一种指标客观权重的计算方法。根据公式(3)和(4),可计算得到各评价指标的

客观权重,见表 3。

(3) 乘法合成归一化方法确定评价指标的综合权重:采用乘法合成归一化方法,根据公式(5)将评价指标的主观权重和客观权重进行耦合,可计算得到各评价指标的综合权重,见表 3。

表 3 隧道坍塌风险评价指标的综合权重值

Table 3 Comprehensive weight value of evaluation indexes

评价指标	EW 法 客观权重	AHP 法 主观权重	综合权重 (EW-AHP)
等效截面积	0.086 7	0.068 2	0.063 1
深度比	0.076 6	0.087 5	0.071 5
断裂破碎带宽度	0.076 3	0.104 2	0.084 8
单轴抗压强度	0.072 2	0.068 4	0.052 7
地下水状况	0.114 2	0.140 2	0.170 9
RQD	0.087 4	0.072 5	0.067 6
风化程度	0.094 2	0.052 2	0.052 5
超挖	0.094 2	0.062 4	0.062 7
支护方式	0.094 2	0.115 4	0.116 0
围岩等级	0.125 6	0.132 2	0.177 2
岩石完整性	0.078 4	0.096 8	0.081 0

2.2.5 确定多指标综合测度评价向量

将样本 ST4 隧道坍塌风险评价指标的综合权重与其单指标测度评价矩阵[式(6)]进行相乘,则可得样本 ST4 的多指标综合测度评价向量为 $\{0.406\ 8, 0.266\ 4, 0.163\ 5, 0.163\ 3, 0\}$,并根据最大隶属度原则,其风险可能性等级为 I 级。采用同样的方法,可求出其他 9 个样本的多指标综合测度评价向量并获得风险可能性等级,最终的评价结果与现场调查结果对比见表 4。

表 4 基于 EW-AHP 和未确知测度理论的隧道坍塌风险评价结果与现场调查结果对比

Table 4 Comparison between evaluation results of tunnel collapse risk based on EW-AHP and unascertained measure theory and the actual investigation results

样本编号	综合未确知测度					EW-AHP 和未确知 测度理论评价结果	现场调查结果 (是否坍塌)
	I (C_5)	II (C_4)	III (C_3)	IV (C_2)	V (C_1)		
ST1	0.442 4	0.157 9	0.053 8	0.275 0	0.070 9	I	否
ST2	0.050 9	0.058 4	0.077 4	0.439 3	0.374 0	IV	是
ST3	0.000 0	0.267 5	0.259 4	0.331 3	0.141 8	IV	是
ST4	0.339 4	0.295 7	0.141 3	0.192 0	0.031 6	I	否
ST5	0.271 5	0.244 8	0.310 4	0.002 3	0.170 9	I	否
ST6	0.071 5	0.275 4	0.347 1	0.243 3	0.062 7	III	否
ST7	0.347 5	0.266 4	0.092 9	0.177 2	0.116 0	I	否
ST8	0.183 5	0.075 2	0.123 3	0.138 6	0.479 4	V	是
ST9	0.465 2	0.205 5	0.071 6	0.141 8	0.116 0	I	否
ST10	0.115 9	0.227 9	0.135 8	0.404 4	0.116 0	IV	是

2.3 评价结果分析

由表 4 可以看出:

(1) 样本 ST8 的隧道坍塌风险可能性等级为 V

级(很可能),经现场调查发现:ST8 处左、右拱顶围岩滑塌严重,尤其薄层凝灰岩滑塌高度高达 0.5 m,且顺裂隙走向滑塌长度较大,向掌子面延伸。

(2) 样本 ST2、ST3、ST10 的隧道坍塌风险可能性等级为Ⅳ级(可能),经现场调查发现:ST2 处围岩完整性差,岩体呈块裂结构,结构面光滑,拱顶围岩顺结构面滑塌、掉块严重;ST3 处围岩裂隙切割强烈,尤其薄层凝灰岩被切割成块体,且裂隙面平直光滑,顺结构面岩体滑塌严重;ST10 处拱底发育 f51 扭性断层,产状为 $330^{\circ}\text{NE}/43^{\circ}$,断层破碎带宽度较大,带内岩体为糜棱岩夹断层泥,呈碎裂结构,掉块严重。

(3) 样本 ST6 的隧道坍塌风险可能性等级为Ⅲ级(偶尔),经现场调查发现:该处围岩完整性相对较完整,隐蔽裂隙发育,局部轻微掉块。

(4) 样本 ST1、ST4、ST5、ST7、ST9 的隧道坍塌风险可能性等级为Ⅰ级(不可能),经现场调查发现:这几处围岩整体较完整稳定,局部裂隙较发育,开挖后洞壁较为平整光滑。

3 结 论

(1) 本文结合国内外相关研究,选取了 11 个隧道坍塌风险评价指标,避免了评价指标过多、计算繁杂和数据不易获取等问题,以此建立了隧道坍塌风险评价指标体系,并建立了隧道坍塌风险可能性分级标准。

(2) 本文将主观层次分析(AHP)法与客观熵权(EW)法相耦合,确定了隧道坍塌风险评价指标的综合权重,一方面降低了人为因素的干扰,另一方面弥补了数据量的不足,并采用 EW-AHP 和未确知测度理论确定研究对象的多指标综合测度评价向量,进而根据隶属度准则确定了隧道坍塌风险可能性等级。

(3) 通过将本文评价方法应用于新疆 3 条特长引水隧道坍塌风险可能性评价,并将评价结果与现场调查结果进行对比分析,结果表明:其评价结果与实际情况基本一致,可为隧道坍塌风险评价提供参

考。

参考文献:

- [1] 张晨曦,吴顺川,吴金. 山岭隧道施工中塌方风险评估模型研究及应用[J]. 中国安全生产科学技术,2019,15(9):128-134.
- [2] 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.
- [3] 元晓贵,陈一洲. 基于模糊层次综合评判法的隧道坍塌风险评估[J]. 安全与环境学报,2016,16(5):37-40.
- [4] 于咏妍. 基于模糊层次分析法的隧道坍塌风险评估[J]. 交通科技,2016(5):111-114.
- [5] 周建昆,吴坚. 岩石公路隧道塌方风险事故树分析[J]. 地下空间与工程学报,2008,4(6):991-998.
- [6] 孙彦峰. 理想点法在隧道塌方风险等级评价中的应用[J]. 隧道建设,2016,36(11):1310-1316.
- [7] 杨光,刘敦文,褚夫蛟,等. 基于云模型的隧道塌方风险等级评价[J]. 中国安全生产科学技术,2015,11(6):95-101.
- [8] 时惠黎,马淑芝,贾洪彪. 基于可拓综合评价模型的隧道塌方概率计算方法[J]. 安全与环境工程,2015,22(2):154-158.
- [9] 苏永华,刘科伟,张进华. 基于粗糙集重心理论的公路隧道塌方风险分析[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2013,40(1):21-26.
- [10] Zhao C Y, Cheung C F, Xu P. High-efficiency submicroscopic uncertainty measurement method using pattern recognition[J]. *ISA Transactions*, 2020, 26(2):1151-1164.
- [11] Yu S, Wang G Q, Shi Y, et al. MCMs in Cancer: Prognostic potential and mechanisms [J]. *Analytical Cellular Pathology (Amsterdam)*, 2020, 24(4):452-462.
- [12] 李天宏,薛晶,夏炜,等. 组合赋权法-木桶综合指数法在长江生态航道评价中的应用[J]. 应用基础与工程科学学报,2019,27(1):36-49.
- [13] 崔晓光. 汶马高速公路崩塌灾害风险评估与防治措施分析[D]. 成都:成都理工大学,2015.
- [14] Hyu S S, Young K K, Yong S J, et al. Methodology for quantitative hazard assessment for tunnel collapses based on case histories in Korea[J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Science*, 2009, 46:1072-1087.

通讯作者:顾伟红(1976—),女,硕士,副教授,主要从事铁路工程管理工作。E-mail:lzgw@163.com