

基于集对分析法的山岭隧道坍塌风险评价

茶增云^{1,2}, 陈 舞^{3,4}, 肖振江^{1,2}, 王云龙^{1,2}, 郭跃文^{1,2}

(1. 西双版纳景海高速公路建设投资有限公司, 云南 景洪 666100;

2. 云南腊满高速公路有限公司, 云南 西双版纳 666300;

3. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071;

4. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 坍塌是山岭隧道施工中主要的地质灾害之一。为了有效评估隧道坍塌风险, 为风险控制提供依据, 提出了一种基于集对分析理论的山岭隧道坍塌风险评价方法。首先, 综合考虑隧道坍塌孕险环境和致险因子, 选取围岩级别、地下水、不良地质、初期支护刚度、开挖方法等主要影响因素作为评价指标。其次, 将评价指标与风险等级标准相结合建立集对, 并将坍塌风险评价指标分为效益型指标和成本型指标两大类, 利用集对分析法计算评价指标的等级联系度。最后, 建立基于集对分析的坍塌风险评价模型, 并将其应用于景海高速公路宾房2号隧道。评估结果与现场实际情况吻合。研究表明, 集对分析法简单可行, 易于实现, 是一种有效的坍塌风险评价方法, 具有良好的工程应用情景。

关键词: 山岭隧道; 坍塌; 风险评价; 集对分析; 联系度

中图分类号: U458

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2021)01—0122—08

Collapse Risk Assessment of Mountain Tunnels Based on Set Pair Analysis Theory

CHA Zengyun^{1,2}, CHEN Wu^{3,4}, XIAO Zhenjiang^{1,2}, WANG Yunlong^{1,2}, GUO Yuewen^{1,2}

(1. Xishuangbanna Jinghai Highway Construction Investment Co., Ltd., Jinghong, Yunnan 666100, China;

2. Yunnan Laman Expressway Co., Ltd., Xishuangbanna, Yunnan 666300, China;

3. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China;

4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Collapse is a major geological disaster that frequently occurs during mountain tunnel construction. In order to evaluate the collapse risk and provide a basis for risk control, a risk assessment method for mountain tunnel collapse based on set pair analysis (SPA) theory is proposed. First, the risk environment and risk factors of tunnel collapse were considered, and the main influencing factors, such as surrounding rock grade, groundwater, unfavorable geology, initial support stiffness and excavation method, were selected as evaluation indices. Second, a set pair was established with the combination of the evaluation indices and the standards of risk grade. Then, the evaluation indices of collapse were divided into two main types: benefit type and cost type indices. Based on SPA, the graded connection degrees of evaluation indices were calculated. Finally, a collapse risk evaluation model based on SPA is established and applied to No. 2 tunnel in Binfang on the line of the Jinghai Expressway in China. The evaluation result was in good agreement with the actual situation. The results showed that set pair analysis method is simple, feasible and easy to implement, which is an effective method for collapse risk assessment and has good prospects for further engineering applications.

Keywords: mountain tunnel; collapse; risk assessment; set pair analysis; connection degree

收稿日期: 2020-09-04

修稿日期: 2020-09-30

基金项目: 云南省交通科技项目(云交科教[2019]52号); 国家自然科学基金重点项目(41731284); 国家自然科学基金面上项目(51579235)

作者简介: 茶增云(1986—), 男, 云南凤庆人, 高级工程师, 主要从事隧道现场施工设计研究工作。E-mail: 364102707@qq.com

通讯作者: 陈 舞(1994—), 男, 江西萍乡人, 博士研究生, 研究方向为隧道安全风险评估。E-mail: chenwu16@mails.ucas.ac.cn

目前隧道正朝着大断面、扁平化趋势发展,三车道、四车道以上的大断面小净距和连拱隧道数量不断增多,导致工艺复杂、工法转换多,施工技术难度、坍塌风险日益增大。尤其是修建于崇山峻岭之中的山岭隧道,其施工条件的复杂性、地质条件的多样性、构造活动的强烈性和风险影响因素的不可预见性更加突出,进一步加大了坍塌事故的发生^[1]。因此,准确评价山岭隧道施工中的坍塌风险具有重要意义。

目前,隧道坍塌风险评价方法有多种,如风险矩阵法^[2]、层次分析法^[3]、事故树法^[4-6]、神经网络法^[7]和模糊综合评价法^[1,8]等。这些研究成果对隧道施工工期坍塌风险分析均发挥了重要作用。然而受地形地貌、地质构造、勘察设计和施工等多种因素的影响,山岭隧道坍塌风险影响因素往往呈现出复杂性、模糊性和不确定性等特征,将以上方法用于山岭隧道坍塌风险评价具有一定的局限性。集对分析理论是由我国学者赵克勤^[9]教授于 1994 年提出的,是一种用来处理多因素不确定问题的有效方法。目前,该理论已经广泛应用于边坡^[10-11]、基坑^[12-13]、公路隧道^[14-15]等岩土工程领域中,并取得了丰富成果。因此,本文提出了基于集对分析理论的山岭隧道坍塌风险评价模型,并将其应用到景海高速公路宾房 2 号隧道中。评价结果与实际情况较吻合,为山岭隧道坍塌风险评价提供了一种新的研究思路。

1 集对分析理论

1.1 集对分析原理

集对分析 (Set Pair Analysis, SPA) 是用集对和联系度来研究系统的确定性和不确定性及其转化规律的系统分析技术,可以定量处理模糊、随机、不确定性问题。该理论实质是将研究对象作为一个确定-不确定系统,用“对立”、“同一”2 个特征来描述确定性,用“差异”描述不确定性,从“同、异、反”三个方面来研究系统的确定性与不确定性之间关系。

1.2 联系度的定义

将具有一定联系均包含 N 个特征的 2 个集合 A , B 组成一个集对,可用联系度 μ 来表示集对 $H = (A, B)$ 的辩证关系,如下:

$$\mu = \frac{S}{N} + \frac{F}{N}p + \frac{L}{N}q = a + bp + cq \quad (1)$$

式中: p 为差异不确定系数, $p \in [-1, 1]$; q 为对立度系数, $q = -1$; N 为集对特征总数, $N = S + F + L$, S , F 和 L 分别为同一特征数、差异特征数、对立特征

数; a, b, c 分别为同一度、差异度、对立度,且 $a + b + c = 1$ 。

式(1) 称为一般联系度或三元联系度。然而,有些问题可能存在不止一种差异程度,例如轻度差异、中度差异及重度差异。因此,有必要将三元联系度扩展到多元联系度来反映各种差异程度。把公式(1) 展开,可得到多元联系度 μ_n , 如下:

$$\mu_n = \frac{S}{N} + \frac{F_1}{N}p_1 + \frac{F_2}{N}p_2 + \cdots + \frac{F_{n-2}}{N}p_{n-2} + \frac{L}{N}q \quad (2)$$

简写为:

$$\mu_n = a + b_1p_1 + b_2p_2 + \cdots + b_{n-2}p_{n-2} + cq \quad (3)$$

式中: $p_1, p_2, \cdots, p_{n-2}$ 为差异度系数; $b_1, b_2, \cdots, b_{n-2}$ 为差异度分量,代表差异程度的不同,例如轻度差异、中度差异、重度差异等; q 为对立度系数,并且规定: $a \in [0, 1], b_{n-2} \in [0, 1], c \in [0, 1]$, 且 $a + b_1 + b_2 + \cdots + b_{n-2} + c = 1, p \in [-1, 1], q = -1$ 。 $b_1, b_2, \cdots, b_{n-2}$ 是对差异度 b 的进一步划分,更深入地展示差异度大小。在不计 $p_1, p_2, \cdots, p_{n-2}, q$ 的值时, $p_1, p_2, \cdots, p_{n-2}, q$ 仅代表一种标记。

2 山岭隧道坍塌风险评价的集对分析模型

2.1 隧道坍塌风险评价指标体系的建立

隧道坍塌是一个典型的不确定性问题。它是隧道工程固有属性和外部施工因素相互作用的结果。隧道工程地质和水文地质条件复杂,呈现出复杂性、模糊性和不确定性等特征。常规方法在处理这种模糊不确定信息时遇到困难。实际工程中,隧道坍塌的影响因素很多,并且这些因素相互作用。但总体来说,影响隧道坍塌的主要因素有自然因素、地质因素、勘察设计因素和施工因素。参考已有的山岭隧道塌方影响因素统计分析结果^[1, 8, 16-20], 选取年降雨量、地形地貌、围岩级别、深度比(隧道埋深 H_0 /隧道高度 H)、地下水状况(隧道每 10 m 的进水量 (L/min))、不良地质情况、地质勘察准确程度、初期支护刚度、开挖断面面积、开挖方法、施工技术水平和施工管理水平 12 项因素(分别用 $X_1, X_2, X_3, X_4, X_5, X_6, X_7, X_8, X_9, X_{10}, X_{11}, X_{12}$ 表示)作为隧道坍塌风险评价指标。其中,地形地貌 X_2 、围岩级别 X_3 、不良地质情况 X_6 、初期支护刚度 X_8 、开挖方法 X_{10} 、施工技术水平 X_{11} 和施工管理水平 X_{12} 为定性因素,分级标准用定性语言描述,计算分析时参照文献[21]采用半定量的方法进行量化取值,具体分级标准及赋值情况见表 1。对年降雨量 X_1 、深度比 X_4 、地下水

状况 X_5 、地质勘察准确程度 X_7 、开挖断面面积 X_9 为定量指标,用实测值进行评价,分级标准见表 2。根据隧道坍塌特征,将评判空间 $T = \{P_1, P_2, \cdots, P_m\}$ 定义为 $\{P_1, P_2, P_3, P_4, P_5\}$, 即 I、II、III、IV、V 五级,分别表示无坍塌风险、较低坍塌风险、中度坍塌风险、高坍塌风险和极高坍塌风险。

表 1 隧道坍塌风险评价的定性指标分级标准

影响程度分级	赋值	地形地貌 X_2	围岩级别 X_3	不良地质情况 X_6	初期支护刚度 X_8	开挖方法 X_{10}	施工技术水平 X_{11}	施工管理水平 X_{12}
I 级(P_1)	1	平坦地形	I	无致灾性	刚度大,对地层位移控制好	合理	非常好	非常好
II 级(P_2)	2	小型负地形	II	弱致灾性	刚度大,对地层位移控制较好	较合理	好	好
III 级(P_3)	3	中型负地形	III	中等致灾性	刚度一般,对地层位移控制一般	不太合理	一般	一般
IV 级(P_4)	4	较大负地形	IV	较强致灾性	刚度较弱,对地层位移控制较差	不合理	差	差
V 级(P_5)	5	大型负地形	V	强致灾性	刚度较弱,对地层位移控制较差	极不合理	很差	很差

注:1. 施工技术水平是指支护措施是否合理、支护背后是否存在空洞、爆破震动是否过大等施工技术因素; 2. 施工管理水平是指施工工序安排是否合理、开挖进尺是否恰当、防排水措施是否合理、监控量测是否及时等施工因素。

表 2 隧道坍塌风险评价的定量指标分级标准

影响程度分级	年降雨量 X_1 /mm	深度比 X_4 (H_0/H)	地下水状况 X_5 /($L \cdot (\min \cdot 10m)^{-1}$)	地质勘察准确程度 X_7 /%	开挖断面面积 X_9 /m ²
I 级(P_1)	< 200	> 20	< 5	> 95	< 40
II 级(P_2)	200 ~ 500	15 ~ 20	5 ~ 10	80 ~ 95	40 ~ 60
III 级(P_3)	500 ~ 800	10 ~ 15	10 ~ 25	70 ~ 80	60 ~ 90
IV 级(P_4)	800 ~ 1000	5 ~ 10	25 ~ 125	55 ~ 70	90 ~ 120
V 级(P_5)	> 1000	< 5	> 125	< 55	> 120

注:用设计 RQD 值与开挖后测得的 RQD 值之比来表示地质勘察的准确程度。

2.2 隧道坍塌风险评价的集对分析模型

2.2.1 坍塌风险评价的五元联系度

针对坍塌风险评价问题,将评价指标与风险等级标准相结合,建立了集对。同时,将第 I 级等级标准作为参考标准,则评价指标在 I 级标准内的定义为同一度,II、III、IV 级标准内的分别定义为差异偏同度、差异度、差异偏反度,V 级标准内的定义为对立度,根据式(2)及式(3),可将隧道坍塌风险评价的五元联系度 μ_5 定义为:

$$\mu_5 = \frac{S}{N} + \frac{F_1}{N}p_1 + \frac{F_2}{N}p_2 + \frac{F_3}{N}p_3 + \frac{L}{N}q = a + b_1p_1 + b_2p_2 + b_3p_3 + cq$$

(4)

其中, N 为坍塌风险评价指标总数。 S 为符合 I 级标准的评价指标个数; F_1 为符合 II 级标准的评价指标个数; F_2 为符合 III 级标准的评价指标个数; L 为符合 V 标准的评价指标个数;另外, $a = S/N, b_1 = F_1/N, b_2 = F_2/N, b_3 = F_3/N, c = L/N$ 。 $a, b_1, b_2, b_3, c \in [0, 1]$, 并且 $a + b_1 + b_2 + b_3 + c = 1$ 。

2.2.2 评价指标等级联系度的建立

将山岭隧道坍塌风险评价指标划分为两类指标^[10]:效益型指标和成本型指标。对于效益型指标,隧道坍塌风险等级随着评价指标取值的增大而降低,即越大越优。对于成本型指标,隧道坍塌风险等级随着评价指标取值的增加而增加,即越小越优。如表 1 和表 2 所示,在坍塌风险评价指标体系中,深度比 X_4 、地质勘察准确程度 X_7 属于效益型指标;其余指标均包括年降雨量 X_1 、地形地貌 X_2 、围岩级别 X_3 、地下水状况 X_5 、不良地质情况 X_6 、初期支护刚度 X_8 、开挖断面面积 X_9 、开挖方法 X_{10} 、施工技术水平 X_{11} 、施工管理水平 X_{12} 等都属于成本型指标。各评价指标对坍塌风险的影响由等级联系度反映,具体计算公式如下:

(1) 当评价指标为定性指标时,评价指标 X_i 的等级关联度为:

① 效益型指标(越大越优型):

$$\mu_{x_i} = \begin{cases} 1 + 0p_1 + 0p_2 + 0p_3 + 0q, (x_i \geq S_I) \\ \frac{x_i - S_{II}}{S_I - S_{II}} + \frac{S_I - x_i}{S_I - S_{II}}p_1 + 0p_2 + 0p_3 + 0q, (S_{II} \leq x_i < S_I) \\ 0 + \frac{x_i - S_{III}}{S_{II} - S_{III}}p_1 + \frac{S_{II} - x_i}{S_{II} - S_{III}}p_2 + 0p_3 + 0q, (S_{III} \leq x_i < S_{II}) \\ 0 + 0p_1 + \frac{x_i - S_{IV}}{S_{III} - S_{IV}}p_2 + \frac{S_{III} - x_i}{S_{III} - S_{IV}}p_3 + 0q, (S_{IV} \leq x_i < S_{III}) \\ 0 + 0p_1 + 0p_2 + \frac{x_i - S_V}{S_{IV} - S_V}p_3 + \frac{S_{IV} - x_i}{S_{IV} - S_V}q, (S_V \leq x_i < S_{IV}) \\ 0 + 0p_1 + 0p_2 + 0p_3 + 1q, (x_i \geq S_V) \end{cases} \quad (5)$$

其中, $S_I, S_{II}, S_{III}, S_{IV}$ 和 S_V 分别为评价指标的第 I—V 级标准临界值, 且 $S_I \geq S_{II} \geq S_{III} \geq S_{IV} \geq S_V$ 。

② 成本型指标(越小越优型):

$$\mu_{x_i} = \begin{cases} 1 + 0p_1 + 0p_2 + 0p_3 + 0q, (x_i \leq S_I) \\ \frac{S_{II} - x_i}{S_{II} - S_I} + \frac{x_i - S_I}{S_{II} - S_I}p_1 + 0p_2 + 0p_3 + 0q, (S_I < x_i \leq S_{II}) \\ 0 + \frac{S_{III} - x_i}{S_{III} - S_{II}}p_1 + \frac{x_i - S_{II}}{S_{III} - S_{II}}p_2 + 0p_3 + 0q, (S_{II} < x_i \leq S_{III}) \\ 0 + 0p_1 + \frac{S_{IV} - x_i}{S_{IV} - S_{III}}p_2 + \frac{x_i - S_{III}}{S_{IV} - S_{III}}p_3 + 0q, (S_{III} < x_i \leq S_{IV}) \\ 0 + 0p_1 + 0p_2 + \frac{S_V - x_i}{S_V - S_{IV}}p_3 + \frac{x_i - S_{IV}}{S_V - S_{IV}}q, (S_{IV} < x_i \leq S_V) \\ 0 + 0p_1 + 0p_2 + 0p_3 + 1q, (x_i > S_V) \end{cases} \quad (6)$$

其中, $S_I \leq S_{II} \leq S_{III} \leq S_{IV} \leq S_V$ 。

(2) 当评价指标为定量指标时, 评价指标 x_i 的等级关联度为:

① 效益型指标(越大越优型):

$$\mu_{x_i} = \begin{cases} 1 + 0p_1 + 0p_2 + 0p_3 + 0q, (x_i \geq S_I) \\ \frac{2x_i - S_I - S_{II}}{S_I - S_{II}} + \frac{2S_I - 2x_i}{S_I - S_{II}}p_1 + 0p_2 + 0p_3 + 0q, (\frac{S_I + S_{II}}{2} \leq x_i < S_I) \\ 0 + \frac{2x_i - S_{II} - S_{III}}{S_I - S_{III}}p_1 + \frac{S_I + S_{II} - 2x_i}{S_I - S_{III}}p_2 + 0p_3 + 0q, (\frac{S_{II} + S_{III}}{2} \leq x_i < \frac{S_I + S_{II}}{2}) \\ 0 + 0p_1 + \frac{2x_i - S_{III} - S_{IV}}{S_{II} - S_{IV}}p_2 + \frac{S_{II} + S_{III} - 2x_i}{S_{II} - S_{IV}}p_3 + 0q, (\frac{S_{III} + S_{IV}}{2} \leq x_i < \frac{S_{II} + S_{III}}{2}) \\ 0 + 0p_1 + 0p_2 + \frac{2x_i - 2S_{IV}}{S_{III} - S_{IV}}p_3 + \frac{S_{III} + S_{IV} - 2x_i}{S_{IV} - S_V}q, (S_{IV} \leq x_i < \frac{S_{III} + S_{IV}}{2}) \\ 0 + 0p_1 + 0p_2 + 0p_3 + 1q, (x_i < S_{IV}) \end{cases} \quad (7)$$

其中, $S_I \geq S_{II} \geq S_{III} \geq S_{IV} \geq S_V$ 。

② 成本型指标(越小越优型):

$$\mu_{x_i} = \begin{cases} 1 + 0p_1 + 0p_2 + 0p_3 + 0q, (x_i \leq S_I) \\ \frac{S_I + S_{II} - 2x_i}{S_{II} - S_I} + \frac{2x_i - 2S_I}{S_{II} - S_I}p_1 + 0p_2 + 0p_3 + 0q, (S_I < x_i \leq \frac{S_I + S_{II}}{2}) \\ 0 + \frac{S_{II} + S_{III} - 2x_i}{S_{III} - S_I}p_1 + \frac{2x_i - S_I - S_{II}}{S_{III} - S_I}p_2 + 0p_3 + 0q, (\frac{S_I + S_{II}}{2} < x_i \leq \frac{S_{II} + S_{III}}{2}) \\ 0 + 0p_1 + \frac{S_{III} + S_{IV} - 2x_i}{S_{IV} - S_{II}}p_2 + \frac{2x_i - S_{II} - S_{III}}{S_{IV} - S_{II}}p_3 + 0q, (\frac{S_{II} + S_{III}}{2} < x_i \leq \frac{S_{III} + S_{IV}}{2}) \\ 0 + 0p_1 + 0p_2 + \frac{2S_{IV} - 2x_i}{S_{IV} - S_{III}}p_3 + \frac{2x_i - S_{III} - S_{IV}}{S_{IV} - S_{III}}q, (\frac{S_{III} + S_{IV}}{2} < x_i \leq S_{IV}) \\ 0 + 0p_1 + 0p_2 + 0p_3 + 1q, (x_i > S_{IV}) \end{cases} \quad (8)$$

其中, $S_I \leq S_{II} \leq S_{III} \leq S_{IV} \leq S_V$ 。

2.2.3 综合联系度的确定

采用综合联系度来综合各评价指标对隧道坍塌风险等级的影响, 计算公式如下:

$$\bar{u} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \mu_{x_i} = \bar{u}_I + \bar{u}_{II}p_1 + \bar{u}_{III}p_2 + \bar{u}_{IV}p_3 + \bar{u}_Vq \quad (9)$$

其中: n 表示评价指标数量, 本文中评价指标数量 $n = 12$ 。 μ_{x_i} 表示各评价指标的等级联系度, 由式(5)一式(8)确定。 $\bar{u}_I$ 、 $\bar{u}_{II}$ 、 $\bar{u}_{III}$ 、 $\bar{u}_{IV}$ 、 $\bar{u}_V$ 分别表示综合联系度的同一度、差异偏同度、差异度、差异偏反度和对立度。

2.2.4 隧道坍塌风险等级的确定

根据联系度运算定理, 隧道坍塌风险联系度的第 I—V 级风险等级对应的同一度 $\bar{u}'_I$ 、差异偏同度 $\bar{u}'_{II}$ 、差异度 $\bar{u}'_{III}$ 、差异偏反度 $\bar{u}'_{IV}$ 及对立度 $\bar{u}'_V$ 可按照下式计算得到:

$$\begin{aligned} \bar{u}'_I &= \frac{a\bar{u}_I}{a\bar{u}_I + b_1\bar{u}_{II} + b_2\bar{u}_{III} + b_3\bar{u}_{IV} + c\bar{u}_V} \\ \bar{u}'_{II} &= \frac{b_1\bar{u}_{II}}{a\bar{u}_I + b_1\bar{u}_{II} + b_2\bar{u}_{III} + b_3\bar{u}_{IV} + c\bar{u}_V} \\ \bar{u}'_{III} &= \frac{b_2\bar{u}_{III}}{a\bar{u}_I + b_1\bar{u}_{II} + b_2\bar{u}_{III} + b_3\bar{u}_{IV} + c\bar{u}_V} \\ \bar{u}'_{IV} &= \frac{b_3\bar{u}_{IV}}{a\bar{u}_I + b_1\bar{u}_{II} + b_2\bar{u}_{III} + b_3\bar{u}_{IV} + c\bar{u}_V} \\ \bar{u}'_V &= \frac{c\bar{u}_V}{a\bar{u}_I + b_1\bar{u}_{II} + b_2\bar{u}_{III} + b_3\bar{u}_{IV} + c\bar{u}_V} \end{aligned} \quad (10)$$

因此, 可以得到隧道坍塌风险联系度 $\bar{u}' = \bar{u}'_I + \bar{u}'_{II}p_1 + \bar{u}'_{III}p_2 + \bar{u}'_{IV}p_3 + \bar{u}'_Vq$ 。由于最大隶属度原则简单易行且广泛应用, 因此本文选择最大隶属度原则作为评价标准来确定隧道坍塌风险等级。根据该原则, 如式(11)所示, 取最大联系度系数作为隧道坍塌风险等级。例如, 如果 $\bar{u}'_{II}$ 是最大联系度系数, 则隧

道坍塌风险等级对应为 II 级, 即较低坍塌风险。

$$\delta = \max\{\bar{u}'_I, \bar{u}'_{II}, \bar{u}'_{III}, \bar{u}'_{IV}, \bar{u}'_V\} \quad (11)$$

2.2.5 风险评估流程

采用基于集对分析法进行山岭隧道坍塌风险评价技术线路如图 1 所示, 具体步骤为:

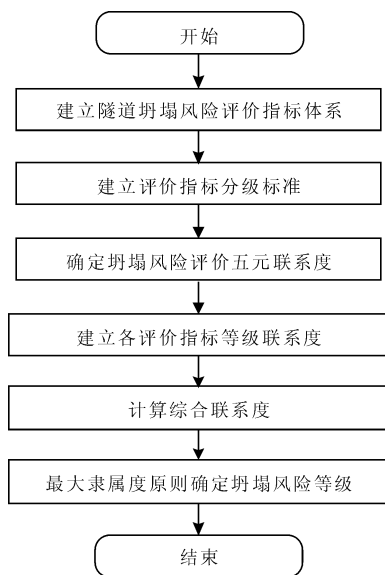


图 1 基于集对分析法的隧道坍塌风险评价流程

(1) 建立了隧道坍塌风险评价指标体系和风险等级标准;

(2) 根据式(4)建立隧道坍塌风险评价的五元联系度;

(3) 利用式(5)一式(8)确定各评价指标的等级联系度;

(4) 采用式(9)计算得到综合联系度;

(5) 根据式(10)计算隧道坍塌风险联系度的同一度、差异偏同度、差异度、差异偏反度及对立度; 并根据最大隶属度原则式(11)确定隧道坍塌风险等级。

3 工程应用

3.1 工程概况

为验证本文所提方法的有效性和准确性,以景海高速公路宾房 2 号隧道为研究对象进行坍塌风险分析。宾房 2 号隧道为分离式长隧道,左幅长度为 2 218 m,设计最大埋深为 118 m;右幅长度为 2 230 m,设计最大埋深为 113 m。隧道区海拔高程介于 1 023 m~1 173 m 之间,相对高差约 150 m,地形起伏较大,变化较复杂,属中浅切割低山地貌区。隧道出口端 K31+580—K31+530 浅埋段下穿越全风化花岗岩层,左、右幅围岩均为 V 级。该段隧道洞顶埋深为 14.3 m~31.5 m,且隧道上方有一常流水冲沟,围岩富水且水源补给充分,岩体力学性质劣化严重,开挖扰动后极易发生围岩失稳。由于埋深较浅,围岩变形可能延伸至地表,造成地表沉陷、甚至冒顶

事故的发生;另一方面,隧道结构受到的地形偏压影响大,支护结构受力不对称,可能造成支护结构局部破坏、失效。因此,本文所选该段右幅隧道 K31+580—K31+530 浅埋段进行坍塌风险分析。该处地质纵断面图如图 2 所示。

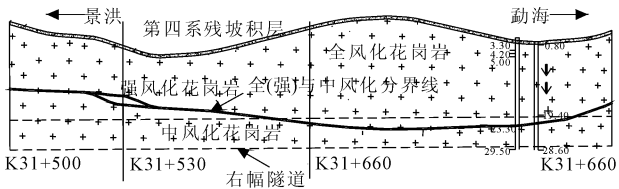


图 2 右幅隧道 K31+580—K31+530 浅埋段地质纵断面图

通过对该段的工程地质、水文地质、掌子面及地质雷达探测成果的综合分析,并结合现场施工组织设计情况,可得里程 K31+580—K31+530 处各影响因素参数和等级,见表 3。

表 3 隧道坍塌风险因素参数

风险因素	年降雨量 X_1	地形地貌 X_2	围岩级别 X_3	深度比 X_4	地下水 状况 X_5	不良地质 情况 X_6	地勘准确 程度 X_7	初期支护 刚度 X_8	开挖面积 X_9	开挖方法 X_{10}	施工技术 水平 X_{11}	施工管理 水平 X_{12}
因素特征	年降雨量 1 943.9 mm~ 2 229.0 mm	低山丘陵 地貌,区 内冲沟发 育,偏压	全风化花 岗岩,V 级围岩	最大埋深 31.5 m, 开挖高度 10.05 m	潮湿或点 滴状,隧 道每 10 m 进水量 115 L/min	下穿富水 全风化花 岗岩,强 致灾性	勘察较准 确,准确 率 94%	砂浆锚杆 和 I18 型 钢钢架支 护	103.8 m ²	采用二台 阶法开 挖,循环 进尺为 2 m	双层 $\Phi 42 \times 4.5$ mm 小导管进行 联合超前支护; 采用常规炮眼 爆破法。施工 技术水平一般。	开挖进尺 不合理,防 排水不当, 监控量测 开展不及 时。施工 管理差。
等级	V 级	Ⅲ级	V 级	V 级	Ⅳ级	V 级	Ⅱ级	Ⅲ级	Ⅳ级	Ⅳ级	Ⅲ级	V 级

3.2 坍塌风险评估

基于集对分析法,对宾房 2 号隧道 K31+580—K31+530 段坍塌风险水平进行了研究。首先,根据表 3 得到符合 I 级标准的评价指标个数为 0 个;符合Ⅱ级标准的评价指标个数为 1 个;符合Ⅲ级标准的评价指标个数为 3 个;符合Ⅳ级标准的评价指标个数为 3 个;符合 V 级标准的评价指标为 5 个。因此, $a=0, b_1=1/12, b_2=3/12, b_3=3/12, c=5/12$,并且隧道坍塌风险评价的五元联系度可以表示为:

$$\mu_5 = 0 + \frac{1}{12}p_1 + \frac{3}{12}p_2 + \frac{3}{12}p_3 + \frac{5}{12}q \tag{12}$$

其次,根据式(5)—式(8),建立了各评价指标等级联系度函数,如图 3 所示。结合表 3 中各评价指标的参数,计算得到各评价指标等级联系度,如下所示:

$$\begin{aligned} \mu_{x_1} &= 0 + 0p_1 + 0p_2 + 0p_3 + 1q \\ \mu_{x_2} &= 0 + 0p_1 + 1p_2 + 0p_3 + 0q \\ \mu_{x_3} &= 0 + 0p_1 + 0p_2 + 0p_3 + 1q \\ \mu_{x_4} &= 0 + 0p_1 + 0p_2 + 0p_3 + 1q \\ \mu_{x_5} &= 0 + 0p_1 + 0p_2 + \frac{1}{5}p_3 + \frac{4}{5}q \\ \mu_{x_6} &= 0 + 0p_1 + 0p_2 + 0p_3 + 1q \\ \mu_{x_7} &= \frac{13}{15} + \frac{2}{15}p_1 + 0p_2 + 0p_3 + 0q \\ \mu_{x_8} &= 0 + 0p_1 + 1p_2 + 0p_3 + 0q \\ \mu_{x_9} &= 0 + 0p_1 + \frac{1}{25}p_2 + \frac{24}{25}p_3 + 0q \\ \mu_{x_{10}} &= 0 + 0p_1 + 0p_2 + 1p_3 + 0q \\ \mu_{x_{11}} &= 0 + 0p_1 + 1p_2 + 0p_3 + 0q \\ \mu_{x_{12}} &= 0 + 0p_1 + 0p_2 + 0p_3 + 1q \end{aligned} \tag{13}$$

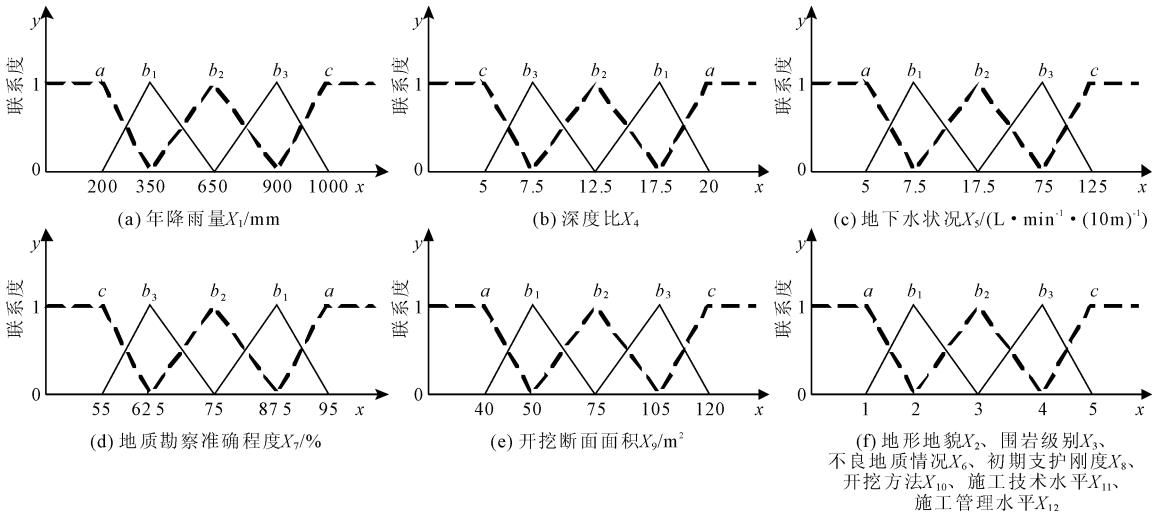


图 3 各评价指标等级联系度函数

然后,根据式(9) 综合各评价指标对隧道坍塌风险等级的影响,得到综合联系度 $\bar{u}$:

$$\bar{u} = \frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} \mu_{x_i} = 0.0722 + 0.0111p_1 + 0.2533p_2 + 0.18p_3 + 0.4834q \tag{14}$$

最后,利用式(10) 得到宾房 2 号隧道 K31 + 580—K31 + 530 段坍塌风险联系度的第 I—V 级对应的同一度,差异偏同度、差异度、差异偏反度及对立面分别为: $\bar{u}'_I = 0$ 、 $\bar{u}'_{II} = 0.003\ 0$ 、 $\bar{u}'_{III} = 0.203\ 9$ 、 $\bar{u}'_{IV} = 0.144\ 9$ 、 $\bar{u}'_V = 0.648\ 2$ 。因此,隧道坍塌风险联系度。根据最大隶属度原则可知,宾房 2 号隧道在穿越 K31 + 580—K31 + 530 浅埋段时,坍塌风险等级为 V 级,极高坍塌风险。

3.3 结果分析与验证

事实上,隧道在穿越 K31 + 580—K31 + 530 段时洞内发生了坍塌,并造成了地表塌陷,如图 4 和图 5 所示。分析其原因主要是:① 富水全风化花岗岩岩体较软弱,围岩自稳能力极差,流塑性强,施工扰动作用下围岩液化现象明显,围岩稳定性进一步变差;② 开挖方法选取不合理,循环进尺过大;③ 超前支护设计不合理;④ 监控量测开展不及时等。

3.4 优化施工组织设计

在吸取现场坍塌事故经验教训后,施工决策者将开挖方法由原来的二台阶法调整为三台阶预留核心土,并且循环进尺由原来的 2 m 调整为 0.5 m。对地表浅埋段采用单根长 9 m 的 $\Phi 108 \times 6$ mm 钢花管进行地表注浆加固,并且原设计双层小导管的超前支护,调整为 $\Phi 108 \times 6$ mm 大管棚 + $\Phi 42 \times 4$ mm 小导管联合超前支护,管棚每循环长度为 20 m、搭接 4 m,小导管每循环长度为 4.5 m,搭接 2.5 m。同时,I18 型钢钢架支护调整为 I20b,间距为 50 cm。

此外,加强了洞内监测频率与现场施工组织管理等保证了右幅地表浅埋段顺利穿越。

对上述风险因素进行调整后(见表 4),采用同一计算模型计算隧道坍塌风险,得到风险联系度 $\bar{u}' = 0 + 0.4781P_1 + 0.024P_2 + 0.0537P_3 + 0.4442q$ 。根据最大隶属度原则可以看出在调整施工组织方案后,隧道坍塌风险等级为 II 级,即较低坍塌风险,与现场实际也较吻合。

综上所述,基于集对分析法的评价结果与实际情况较吻合,说明将该理论用于山岭隧道坍塌风险评价中是合理可行的。



图 4 宾房 2 号隧道右幅 K31 + 565.5 隧道坍塌状况



图 5 K31 + 565.5 地表塌陷坑

表 4 调整后隧道坍塌风险因素参数

风险因素	年降雨量 X_1	地形地貌 X_2	围岩级别 X_3	深度比 X_4	地下水 状况 X_5	不良地质 情况 X_6	地勘准确 程度 X_7	初期支护 刚度 X_8	开挖面积 X_9	开挖方法 X_{10}	施工技术水平 X_{11}	施工管理 水平 X_{12}
因素特征	年降雨量 1 943.9 mm ~ 2 229.0 mm	低山丘陵 地貌,区 内冲沟发 育,偏压	全风化花 岗岩, V 级围岩	最大埋深 31.5 m, 开挖高度 10.05 m	潮湿或点 滴状,隧 道每 10 m 进水量 115 L/min	下穿富水 全风化花 岗岩,强 致灾性	勘察较准 确,准确 率 94%	中空注浆 锚杆和 I20b 型 钢钢架支 护,间距 50 cm	103.8 m ²	采用三台 阶预留核 心土法开 挖,循环 进尺为 0.5 m	Φ108 * 6 mm 大管棚 + Φ42 * 4.5 mm 小导 管联合超前支 护。施工技术 水平较好。	开挖进尺 合理,工序 衔接合理, 监控量测 开展及时。 施工管理 较好。
等级	V 级	Ⅲ级	V 级	V 级	Ⅳ级	V 级	Ⅱ级	Ⅱ级	Ⅳ级	Ⅱ级	Ⅱ级	Ⅱ级

4 结 论

(1) 将评价指标与风险等级标准相结合,并将风险评价指标分为效益型指标和成本型指标两大类,基于集对分析法,建立了评价指标的等级联系度,量化了评价指标与风险等级的集对联系度。

(2) 将集对分析理论应用到山岭隧道坍塌风险分析中,并建立了隧道坍塌风险评价的集对分析模型。利用最大隶属度准则来判别隧道坍塌风险等级,较好的解决了山岭隧道坍塌风险等级评价中多指标性、模糊性和不确定性等问题。

(3) 将本文方法应用到宾房 2 号隧道中,评价结果与实际情况较吻合,为山岭隧道坍塌风险评价提供新思路。

参考文献:

[1] 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.

[2] 李世平. 风险矩阵法在铁路隧道施工风险评估中的应用[J]. 铁路工程造价管理,2015,30(2):47-52.

[3] 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.

[4] 邓 娜. 地形偏压隧道施工塌方风险事故树分析[J]. 工程地质学报,2015;23(S1):341-348.

[5] 陈 舞,张国华,王 浩,等. 基于 T-S 模糊故障树的钻爆法施工隧道坍塌可能性评价[J]. 岩土力学,2019,40(S1):319-328.

[6] 陈 舞,王 浩,张国华,等. 基于 T-S 模糊故障树和贝叶斯网络的隧道坍塌易发性评价[J]. 上海交通大学学报,2020,54(8):820-830.

[7] 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):118-121,126.

[8] Zhang G H, Jiao Y Y, Chen L B, et al. Analytical model for assessing collapse risk during mountain tunnel construction[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2016,53

(2):326-342.

[9] 赵克勤. 集对分析及其初步应用[J]. 大自然探索,1994,13(1):67-72.

[10] 张 旭,周绍武,林 鹏,等. 基于熵权-集对的边坡稳定性研究[J]. 岩石力学与工程学报,2018,37(S1):3400-3410.

[11] 刘洋洋,郭增长,李永强,等. 基于熵权集对分析和车载激光扫描的公路边坡危险性评价模型[J]. 岩土力学,2018,39(S2):131-141,156.

[12] 斯建宁. 基于集对理论及模糊层次分析的深基坑施工风险评价[J]. 公路交通技术,2020,36(2):108-114.

[13] 蒋英礼,邓子胜,王冬英. 基于集对分析方法的深基坑支护方案优选研究[J]. 地下空间与工程学报,2016,12(1):131-137.

[14] 游 波,施式亮,刘何清,等. 基于信息熵和集对分析理论的公路隧道水害倾向性判定[J]. 公路交通科技,2019,36(6):73-78.

[15] 何忠明,刘 可,付宏渊. 基于集对分析的公路隧道施工安全风险评价[J]. 矿冶工程,2018,38(2):6-9,14.

[16] Zhang G H, Chen W, Jiao Y Y, et al. A failure probability evaluation method for collapse of drill-and-blast tunnels based on multistate fuzzy Bayesian network[J]. Engineering Geology, 2020,276:105752.

[17] 陈礼彪. 山岭隧道施工期安全风险评价方法研究[D]. 武汉:武汉大学,2014:1-173.

[18] 熊俊峰. 山岭隧道施工灾害风险评估方法研究[D]. 北京:中国科学院大学,2017:1-80.

[19] 郝洪兴. 富水山岭隧道开挖工法对围岩稳定性的影响研究[J]. 水利与建筑工程学报,2020,18(3):150-154,174.

[20] 孙忠成. 开挖方式对山岭隧道稳定性影响研究[J]. 水利与建筑工程学报,2019,17(2):83-86,129.

[21] 何美丽,刘 霁,刘 浪,等. 隧道坍方风险评价的未知测度模型及工程应用[J]. 中南大学学报(自然科学版),2012,43(9):3665-3671.