

# Comprehensive Evaluation Model of Tunnel Collapse Risk Based on FUZZY-AHP and Its Application

Bowen Luo, Xinyue Chen\*, Zhibin Wang, Zhenhuan Liao

College of Resources, Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan Hunan

Email: 657126425@qq.com, \*xinyuchen@ 163.com, wangzhibin1975@ 21cn.com

Received: Nov. 5<sup>th</sup>, 2019; accepted: Dec. 2<sup>nd</sup>, 2019; published: Dec. 9<sup>th</sup>, 2019

---

## Abstract

In the construction of expressway tunnel, adopting scientific and reasonable evaluation method is an effective method to prevent and control the collapse of tunnel construction. Based on the background of an expressway tunnel's construction in Yunnan province, and with the Safety risk assessment guide for highway bridge and tunnel engineering construction, added monitoring factor to the tunnel construction evaluation hierarchy, then building the evaluation index system which the target layer is the tunnel collapse, and finally constructing the comprehensive evaluation model with the Analytic hierarchy process (AHP) and Fuzzy mathematics comprehensive evaluation method (FUZZY). Combined with the monitoring data of tunnel area and the actual situation, the results shows: This model is scientific and effective in establishing the risk level of tunnel collapse, and it accords with the actual situation, this model is helpful to improve the safety level of tunnel construction, and can provide theoretical support and scientific guidance for construction managers.

## Keywords

Expressway, Tunnel Collapse, Risk Assessment, Fuzzy Analytic Hierarchy Process, the Weight

---

# 基于FUZZY-AHP的隧道坍塌风险综合评判模型与应用

罗博文, 陈新跃\*, 王志斌, 廖振环

湖南科技大学资源环境与安全工程学院, 湖南 湘潭

Email: 657126425@qq.com, \*xinyuchen@ 163.com, wangzhibin1975@ 21cn.com

收稿日期: 2019年11月5日; 录用日期: 2019年12月2日; 发布日期: 2019年12月9日

---

\*通讯作者。

## 摘要

高速公路隧道施工建设中,采用科学合理的评估方法是预防与控制隧道施工发生坍塌事故的有效手段。以云南省某高速公路隧道的施工情况为背景,并依据公路桥梁和隧道工程施工安全风险评估指南,在众多隧道施工影响因素的基础上加入监控因素,构建以隧道坍塌事故为目标层的评价指标体系,用层次分析法(AHP)与模糊数学综合评估法(FUZZY)组合的形式构建其综合评估模型。结合隧区监控数据和实际情况,结果表明:此模型对确立隧道坍塌风险等级科学且有效,与实际情况符合程度较高,有助于提升隧道施工安全等级,并为施工管理者提供理论支持和科学指导。

## 关键词

高速公路, 隧道坍塌, 风险评估, 模糊层次分析法, 权重

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

高速公路隧道建设,工作面通常处于复杂乃至恶劣的环境,隧道施工受到地质构造、大气降水、隧道设计、施工管理等众多自然因素和人为因素的影响,导致其建设过程增加了许多隐患[1]。高速公路隧道施工过程中,坍塌、突泥涌水等事故的发生率较高,而隧道坍塌事故常造成较为严重的人员伤亡、经济损失以及社会影响[2]。如2018年2月7日,佛山市轨道交通2号线一期工程土建一标段湖涌站至绿岛湖站盾构区间右线工地突发透水,引发隧道及路面坍塌,造成11人死亡、1人失踪、8人受伤,直接经济损失约5323.8万元[3]。2014年4月2日,吉林省珲春市吉珲高铁珲春段小盘岭1号在建隧道出口距掌子面50米处发生坍塌,12名工人被困[4]。综合上述事故可知,高速公路隧道施工过程中由于自然因素和人为因素所诱发产生的事故,不仅为施工建设方带来了巨大的经济损失,在人员安全、社会秩序的保障上也产生了重大影响。因此,采用科学合理的评估方法是预防与控制隧道施工期发生坍塌事故的有效手段,为隧道施工提供了现实意义与实际价值[5]。

对高速公路隧道坍塌风险进行评估,需要对隧道坍塌的风险源进行识别,对风险因子的影响程度进行划分,因此不同的专家和学者采用不同的评估角度对隧道施工期风险进行评估。Alan N. Beard [6]对铁路和公路隧道安全评估和安全决策问题进行了研究;Olga [7]等人把施工时间、施工费用、施工组织等因素引入了其隧道施工塌方的损失估计简化模型,以研究隧道开挖塌方几率;周峰[8]收集和整理了大量山岭隧道塌方的资料,以围岩级别、开挖跨度、埋深、偏压情况、地下水状况为影响因子,分析了导致塌方的主要原因;谢小鱼[9]对广深沿江高速宴岗隧道进行了施工风险评估,重点讨论了大跨度、偏压、浅埋等重要的风险因子的影响程度,并对隧道进行了围岩的稳定性分析;安文杰[10]对隧道的施工方案进行评估时将互联网技术与传统的施工管理技术相结合,开发了施工管理云平台对隧道施工进行管控;张进、马斌、王可娜[11]在确定河南某采用钻爆法施工的排洪隧洞工程的安全等级时,加入监控量测影响因子进行风险评估,但并未涉及到第三方在工程中的职能;李梓源、吕显鹏[12]等在利用传统的层次分析法对隧道塌方风险进行评估时,运用MATLAB软件分析了隧道塌方的成因;温世儒[13]在识别隧道风险源时采

用较为客观的 GPR 地质雷达探测来中和主观因素较大的专家调查法,分区段的对隧道施工进行专项风险评估,并用数值计算的方法分析其施工工法和支护的可行性。

上述学者在评估隧道施工安全等级上所使用的因子不尽相同,其成果不断完善了高速公路隧道坍塌风险体系。然而,高速公路隧道坍塌风险评估指标的多样性和不确定性是构建评价指标体系的重点与难点,因此构建评价指标体系并对指标进行定性是一项需要不断探索和完善的研究。

层次分析法(AHP),最早是在 20 世纪 70 年代由美国教授 T. L. Saaty 提出,因其具备多种决策因素以及科学的矩阵演算方法而得以运用和发展。后将模糊数学的基本理论与其相结合,形成了模糊数学层次分析法(Fuzzy-AHP)。笔者采用层次分析法[14] (AHP)将收集并筛选后的不确定因素指标进行权数的运算,然后与模糊数学综合评价法[15] (FUZZY)有机结合[16],以此弥补层次分析法中主观因素强的不足,构建基于 FUZZY-AHP 的高速公路隧道坍塌风险综合评价模型[17]。最后通过现场第三方监测的地质雷达图像与监控量测数据佐证了评价结果的合理性和准确性。此评价模型为预防和控制高速公路隧道坍塌事故的发生提供了理论和实践依据,为施工管理提供科学、可靠的战略决策来源。

## 2. 高速公路隧道坍塌风险安全等级综合评价模型

### 2.1. 高速公路隧道坍塌风险安全等级评价指标体系

高速公路隧道坍塌风险事故的发生取决于多种因素,大多数的评价体系是基于自然因素、地质因素、勘察设计因素以及施工因素而建立的[18],本文注意到高速公路隧道施工中各方的参与情况,加入了监控因素,构建了地质及地形、水的影响、隧道设计、施工因素和监控因素 5 个诱发因素所组成的高速公路隧道坍塌风险安全综合指标评价体系,如表 1 所示。

**Table 1.** Comprehensive evaluation index system of expressway tunnel collapse risk grade  
**表 1.** 高速公路隧道坍塌风险安全等级综合评价指标体系

目标层	中间因素层	指标因素层
隧道坍塌风险评价(S)	地质及地形(U <sub>1</sub> )	围岩等级(U <sub>11</sub> )
		岩体完整程度(U <sub>12</sub> )
		断层破碎带(U <sub>13</sub> )
	水的影响(U <sub>2</sub> )	地下水发育程度(U <sub>21</sub> )
		大气降水(U <sub>22</sub> )
		地表水的影响(U <sub>23</sub> )
	隧道设计(U <sub>3</sub> )	断面尺寸(U <sub>31</sub> )
		隧道埋深(U <sub>32</sub> )
		偏压影响(U <sub>33</sub> )
	施工因素(U <sub>4</sub> )	衬砌的跟进及时性(U <sub>41</sub> )
		施工方法适用性(U <sub>42</sub> )
		施工管理水平(U <sub>43</sub> )
	监控因素(U <sub>5</sub> )	第三方监测真实性(U <sub>51</sub> )
		第三方预报准确性(U <sub>52</sub> )
		第三方预警及时性(U <sub>53</sub> )

上述评价指标体系的建立,借鉴了前人研究中所涉及的重要影响因子,并考虑了与实际施工密不可分的监控因素,并根据第三方监测中职能的不同做出详细的分类,以具化监控因素在隧道建设中的影响程度。

## 2.2. 构建判断矩阵

针对上述评价指标体系,本文对每一层次中不同因素间的相对重要程度进行两两比较,其重要程度的轻重用 Sauly 1~9 的标度表示,具体方法如下:

$$S = (s_{ij})_{n \times n} \quad (i, j = 1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

注:  $s_{11} = 1$ ,  $s_{ji} = 1/s_{ij}$ 。

由式(1),可得评价体系中中间因素层判断矩阵如下:

$$S = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 5 & 4 & 4 \\ 1/3 & 1 & 3 & 2 & 2 \\ 1/5 & 1/3 & 1 & 1/2 & 1/2 \\ 1/4 & 1/2 & 2 & 1 & 1 \\ 1/4 & 1/2 & 2 & 1 & 1 \end{bmatrix}。$$

## 2.3. 评价因素权重

本文使用层次分析法确定了高速公路隧道坍塌风险安全等级综合评价指标体系中各因素的权重,而其权重的计算则采用特征根法,其公式如下:

$$SW = \lambda_{\max} W \quad (2)$$

式中,  $S$ : 判断矩阵;  $W$ : 特征向量(权重值);  $\lambda_{\max}$ :  $Q$  的最大特征值。

通过式(2)得到其特征向量  $W = (0.4851, 0.2046, 0.0684, 0.1244, 0.1175)^T$ ,  $\lambda_{\max} = 5.12$ 。

## 2.4. 一致性检验

度量判断矩阵中选取数值有无逻辑混乱,需进行一致性检验,其公式如下:

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}, \quad CR = \frac{CI}{RI} \quad (3)$$

式中,  $CI$ : 一致性指标;  $CR$ : 一致性比率;  $RI$ : 随机一致性指标。其  $RI$  取值如表 2 所示:

Table 2. Random conforming index of  $RI$

表 2.  $RI$  随机一致性指标

判断矩阵阶数	$RI$	判断矩阵阶数	$RI$
2	0	9	1.46
3	0.52	10	1.49
4	0.89	11	1.52
5	1.12	12	1.54
6	1.26	13	1.56
7	1.36	14	1.58
8	1.41	15	1.59

由式(3)可得  $CR = 0.0268 < 0.1$ , 表明上述判断矩阵具有满意的一致性。同理,可得指标因素层的各项系数,如表 3 所示:

**Table 3.** Calculation results of various coefficients in the index factor layer  
**表 3.** 指标因素层各项系数计算结果

系数	$W_i (i = 1, 2, \dots, n)$	$\lambda_{\max}$	CI	RI	CR
U <sub>1</sub>	(0.4444, 0.1112, 0.4444) <sup>T</sup>	3	0	0.52	0
U <sub>2</sub>	(0.6251, 0.2384, 0.1365) <sup>T</sup>	3.0181	0.0091	0.52	0.0174
U <sub>3</sub>	(0.6833, 0.1998, 0.1169) <sup>T</sup>	3.0240	0.0124	0.52	0.0238
U <sub>4</sub>	(0.1428, 0.4286, 0.4286) <sup>T</sup>	2.9992	-0.0004	0.52	-0.0007
U <sub>5</sub>	(0.637, 0.2583, 0.1047) <sup>T</sup>	3.0379	0.019	0.52	0.0364

### 2.5. 高速公路隧道各因素权重量化排序

在得知中间因素层的特征向量  $W$  和指标因素层的特征向量之后  $W_i$  之后，可得指标层各因素相对于目标层的权重大小(见表 4)。

**Table 4.** Weight of factors affecting the expressway tunnel collapse  
**表 4.** 影响高速公路隧道坍塌的各因素权重

指标因素层	权重/排序	指标因素层	权重/排序
围岩等级	0.2156/1	断面尺寸	0.04670/7
断层破碎带	0.2156/1	第三方预报准确性	0.03040/8
地下水发育程度	0.1279/2	地表水的影响	0.02790/9
第三方监测真实性	0.0748/3	衬砌的跟进及时性	0.0178/10
岩体完整程度	0.0539/4	隧道埋深	0.0137/11
施工方法适用性	0.0533/5	第三方预警及时性	0.0123/12
施工管理水平	0.0533/5		
大气降水	0.0488/6	偏压影响	0.0080/13

由上述计算可知，评价体系中不同因素在高速公路隧道安全施工期影响程度轻重不一，其中地质及地形的影响最大，水的影响次之，再次施工方和监测方有着相似的影响。因此，在隧道的施工过程中，当隧道中出现围岩破碎或涌水突泥等情况时需要加强支护，谨慎施工，监测方应及时预警。

### 2.6. 高速公路隧道坍塌风险模糊综合评价

以上的分析和计算凸显出层次分析法可量化每一指标的影响程度的特点，但此方法中定性成分较多，主观性较大，为弥补其缺点，故引进模糊数学综合评价法，用更精确的数字手段使评价结果矢量化。采用模糊综合评价法进行项目风险评估，首先通过层次分析法得到评价体系中指标因素层和中间因素层的权重，得到各分层的特征向量，明确了各因素的影响占比，为其后的模糊评价提供数据依靠。后通过构建数学模型，利用模糊数学分析法推算出各指标层因子在可能发生的情况下对目标层的所构成的风险概率，最后可能性程度值高者为高风险水平的最终确定值。因此本文首先构建了模糊评价风险评价集  $V = \{I, II, III, IV, V\}$ ，这五个等级分别对应着“高风险、较高风险、中等风险、较低风险和低风险”。并借此评价集由专家对各指标层因素进行打分，得到模糊关系矩阵  $R_i$ 。后运用模糊变换计算获得中间因素层评价矩阵  $B_i$ ，同理，最终得到目标层的评价集  $S$ 。计算公式如下。

$$B_i = W_i \cdot R_i, \quad S = W \cdot B \quad (4)$$

式中,  $W_i$ : 各指标层特征向量,  $i=1,2,3,4,5$ ;  $W$ : 各指标层特征向量。

最后根据最大隶属度原则[19], 得到此项目的整体风险等级, 并依据风险等级对项目的施行提供科学实际的建议及方法。

### 3. 工程实例应用

#### 3.1. 工程实例概况

云南省小中甸地区位于云贵高原中部, 属构造侵蚀、剥蚀高中山地貌。地形波状起伏, 山谷相间, 多呈“U”型, 海拔在 1800 m 至 3500 m 之间。该区域位于印尼-青藏-滇甸“歹”字形构造体系和径向构造体系复合部位, 构造复杂, 断裂发育, 挽近期构造活动强烈[20]。隧区地下水较丰富, 其中主要为基岩裂隙水。香格里拉-丽江某高速公路隧道为左右幅双线隧道, 左幅起止桩号为 ZK31+832~ZK33+082.5, 全长 1250.5 m, 右幅起止桩号为 YK31+832~YK33+094, 全长 1262 m。隧道洞身的最大埋深约为 352 m, 围岩地层以三叠系中统  $a$  组( $T_2a$ )为主, 围岩目前主要以强风化灰黑色薄层状碳质板岩为主, 见少量灰绿色碎块状灰岩, 局部中风化, 总体呈镶嵌结构。围岩节理裂隙发育, 其自稳能力差或无自稳能力, 无支护时易发生坍塌。隧区降水集中在夏季, 冬季相对干燥, 进口洞室内常呈淋雨状滴水, 较易发生塌方。隧区以 V 级围岩为主, 因此对此隧道进行坍塌风险评价是非常必要的。

#### 3.2. 建立模糊综合评价矩阵

本文邀请了 10 位相关专业、经验丰富的专家根据评价模型、评价集及隧道施工现场情况, 对地质及地形、水的影响、隧道设计、施工因素、监控因素 5 个子系统的 15 个指标进行单因素打分评判, 打分依据此高速公路隧道项目风险的评语集  $V =$  (高风险、较高风险、中等风险、较低风险、低风险)。然后运用统计学的方法确定每个指标层因素的最终权重值大小, 对其进行加权平均[21]后再进行归一化处理, 由单因素评判结果构成的一级模糊综合评价矩阵分别如下。

$$R_1 = \begin{bmatrix} 0.4 & 0.5 & 0.1 & 0 & 0 \\ 0.1 & 0.2 & 0.5 & 0.1 & 0.1 \\ 0.4 & 0.4 & 0.2 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad R_2 = \begin{bmatrix} 0.3 & 0.3 & 0.2 & 0.2 & 0 \\ 0.1 & 0.2 & 0.5 & 0.1 & 0.1 \\ 0 & 0.1 & 0.2 & 0.3 & 0.4 \end{bmatrix};$$

$$R_3 = \begin{bmatrix} 0.2 & 0.3 & 0.3 & 0.1 & 0.1 \\ 0.1 & 0.2 & 0.4 & 0.2 & 0.1 \\ 0.1 & 0.2 & 0.2 & 0.3 & 0.2 \end{bmatrix}; \quad R_4 = \begin{bmatrix} 0.1 & 0.2 & 0.3 & 0.3 & 0.1 \\ 0.2 & 0.2 & 0.3 & 0.2 & 0.1 \\ 0.2 & 0.3 & 0.2 & 0.2 & 0.1 \end{bmatrix};$$

$$R_5 = \begin{bmatrix} 0.4 & 0.3 & 0.3 & 0 & 0 \\ 0.3 & 0.3 & 0.2 & 0.1 & 0.1 \\ 0.2 & 0.3 & 0.3 & 0.2 & 0 \end{bmatrix}。$$

通过公式(4)可得中间因素层的综合评价向量  $B_i$  及其矩阵  $B$  为:

$$B = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \\ B_4 \\ B_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.3666 & 0.4222 & 0.1889 & 0.0111 & 0.0111 \\ 0.2114 & 0.2489 & 0.2715 & 0.1898 & 0.0784 \\ 0.1683 & 0.2683 & 0.3083 & 0.1434 & 0.1117 \\ 0.1857 & 0.2429 & 0.2571 & 0.2143 & 0.1 \\ 0.3532 & 0.3 & 0.2742 & 0.0468 & 0.0258 \end{bmatrix}。$$



### 3.3. 评价结果

上述层次分析法计算得到了包含地质及地形、水的影响、隧道设计等 5 个主要中间层因素的特征向量  $W = (0.4851, 0.2046, 0.0684, 0.1244, 0.1175)$ ，在此基础上通过模糊变换  $S = W \cdot B$  则可确定此香-丽某高速公路隧道整体坍塌风险的评价向量  $S = (0.2972, 0.3396, 0.0684, 0.1244, 0.0445)$ 。最后依据最大隶属度原则，评价向量中的最大值与评价集  $V = \{I, II, III, IV, V\}$  中的风险等级相对应得出该隧道失稳概率为 II 级，即发生塌方风险较高，与现场施工情况基本符合，隧道较易失稳，需做好预防措施。

### 3.4. 第三方数据对比与结果分析

此隧道隧区地质情况复杂，地下水较为丰富，本文根据第三方检测单位的监控数据检验上文计算分析得出的此隧道坍塌风险较高的结论。本文截取了 2018 年 6 月进口右洞 YK32 + 556 的超前预报中的地质雷达图像(见图 1)，和施工期间监控点 YK32 + 558、568、578 的监控量测数据(见图 2、图 3)。由超前地质雷达的探测报告中可以得出，YK32 + 562~YK32 + 581 探测范围内(图中红色圆圈所示)，显示探测剖面前方电磁波反射波形一性差，整体振幅较大，能量团分布均匀性较差，同相轴连续性一般，波形局部较杂乱。判断此区段范围围岩和当前掌子面围岩状况相当，以强风化板岩为主，局部为中风化，围岩破碎~极破碎，围岩完整性差，节理裂隙发育，岩质软，层间含破碎软弱夹层，为 V 级围岩。此区段地下水发育，存在富水带，无支护时受震动掌子面易出现掉块、坍塌等现象。

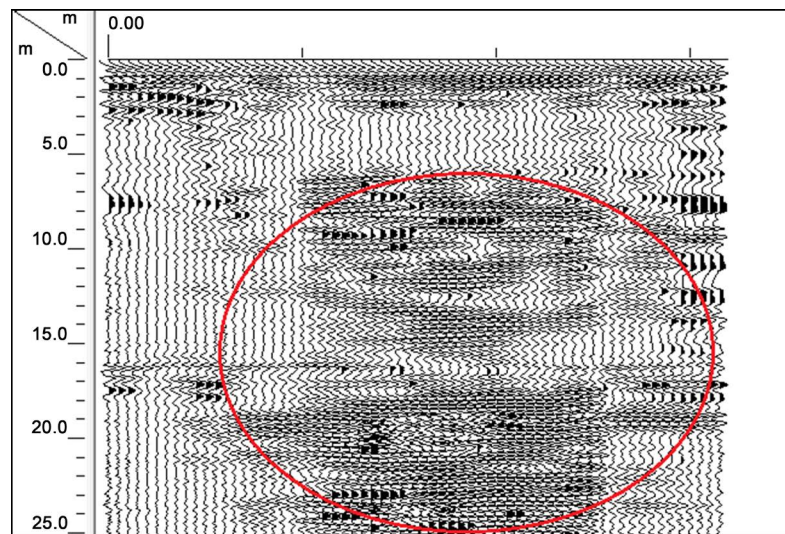
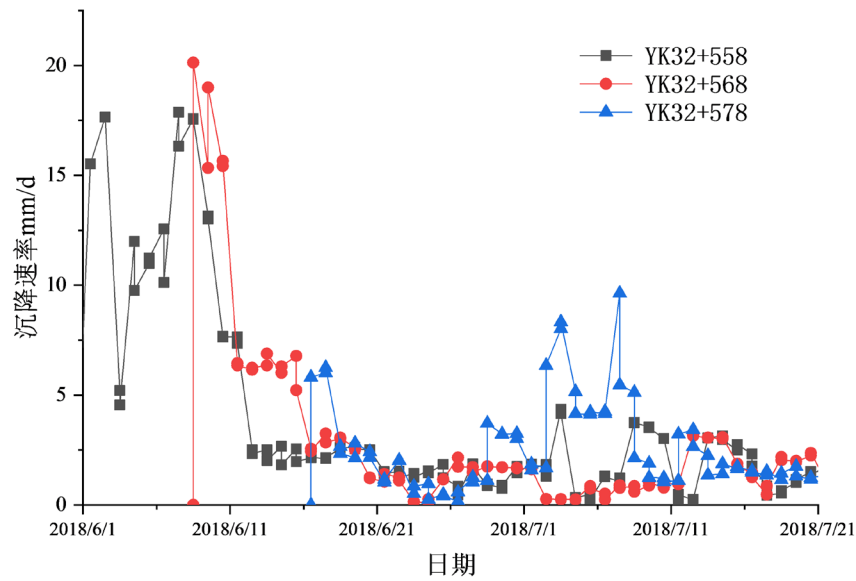
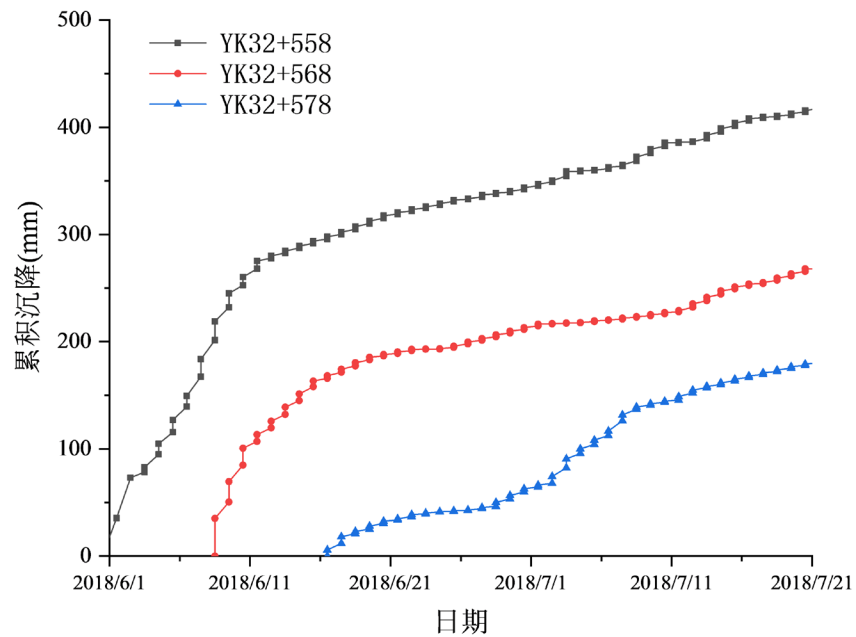


Figure 1. Radar image of YK32 + 556~YK32 + 581 section of the tunnel  
图 1. 该隧道 YK32 + 556~YK32 + 581 段超前地质预报雷达图像

由图 2 所反映的 YK32 + 558、568、578 断面拱顶中间测点的监测数据中可得，此隧道右幅进口 YK32 + 558、568 断面在 2018 年 6 月 1 日至 6 月 14 日期间内的单日沉降速率逐日增大，其中例如 2018.6.1~2018.6.2 的 YK32 + 558 断面以及 6.8~6.11 的 YK32 + 568 断面，其隧道拱顶的单日的沉降速率远远大于容许安全沉降速率(5 mm/d)，故需及时发出预警警示施工方立即停止掌子面的施工，加强支护。由图 3 可知，YK32 + 558、568 断面因累积沉降量超过累计容许沉降量(200 mm)，故应督促施工方进行换拱。现场的实际情况反映，此隧道进口右洞自 6 月起掌子面及初期支护出水严重，并于 6 月 12 日早晨掌子面出现突泥涌水和坍塌事故。综上所述，此隧道进口右洞施工环境恶劣，其监控数据证实了多影响因素耦合情况下此隧道坍塌风险较高。



**Figure 2.** Settlement rate of the middle measuring point of the tunnel's YK32 + 558, 568 and 578 sections  
**图 2.** 该隧道 YK32 + 558、568、578 断面拱顶中间测点沉降速率



**Figure 3.** Accumulated settlement at the middle measuring point of the tunnel's YK32 + 558, 568 and 578 sections  
**图 3.** 该隧道 YK32+558、568、578 断面拱顶中间测点累积沉降量

#### 4. 结论

本文以云南省香格里拉-丽江高速公路某隧道为例,利用层次分析法和模糊数学评价法,建立了隧道坍塌风险评价体系。通过对此评价模型的建立和检验,得到以下结论:

- 1) 建立模型所采用的静态评估技术路线可以有效反映各单因素影响因子对总目标层的影响程度,有助于施工管理者“对症下药”,在改进管理方法时目标更明确,针对性更强。
- 2) 在对于评价结果的分析中,纳入第三方超前预报结果、监控量测数据及实际施工情况,在科学数



据和实践中都证实了此隧道具较高坍塌风险的结论，从而凸显了 FUZZY-AHP 综合评价法的有效性和合理性，说明此方法完全适用于隧道施工安全等级的评估。

而通过计算和分析得出此隧道的坍塌风险为较高，与实际施工情况相符。为降低此香 - 丽高速公路隧道较高的坍塌风险等级，确保安全施工，针对以上风险因素，对隧道施工方以及监控方提出以下建议：

- 1) 施工方在施工中应加强支护措施，严格按规范施工；
- 2) 当隧区处于强降雨季节或出现突泥涌水的现象时，应做好截排水措施，并制定应急方案；
- 3) 针对现场施工以及监控等人为因素，应加强施工团队的安全教育和针对各种隧道突发事件的应对能力。同时，第三方监测人员需提供真实、准确的隧道监测数据，并及时发出预警。

## 基金项目

国家自然科学基金资助项目(项目编号：50902110)。

## 参考文献

- [1] 陈鑫. 基于模糊层次分析法的高速公路隧道施工风险评价研究[D]: [硕士学位论文]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2015.
- [2] 赵伟, 卢杨路. 高速公路隧道塌方发生原因分析及处理措施[J]. 交通世界, 2019(Z1): 244-245.
- [3] 广东省佛山市城市轨道交通 2 号线一期工程“2·7”隧道坍塌重大事故应急处置工作情况[J]. 中国应急管理, 2018(2): 25-26.
- [4] 金宝森. “专家科学决策起到了关键作用”——吉珲高铁(客运专线)小盘岭隧道塌方成功抢险记事[J]. 吉林劳动保护, 2014(4): 7-8.
- [5] 岳诚东. 隧道工程施工塌方风险评估研究[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 兰州大学, 2016.
- [6] Beard, A.N. (2010) Tunnel Safety, Risk Assessment and Decision-Making. *Tunnelling and Underground Space Technology*, **25**, 91-94. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2009.07.006>
- [7] Špačková, O., Novotná, E., Šejnoha, M., et al. (2013) Probabilistic Models for Tunnel Construction Risk Assessment. *Advances in Engineering Software*, **62**, 72-84. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2013.04.002>
- [8] 周峰. 山岭隧道塌方风险模糊层次评估研究[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 中南大学, 2008.
- [9] 谢小鱼. 浅埋偏压大跨度隧道风险评估与围岩稳定性研究[D]: [硕士学位论文]. 湘潭: 湖南科技大学, 2014.
- [10] 安文杰. 基于模糊层次分析法的隧道施工组织方案评价与优化研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2012.
- [11] 张进, 马斌, 王可娜. 基于模糊层次分析法的隧道钻爆法施工风险评估[J]. 东莞理工学院学报, 2017, 24(1): 74-80.
- [12] 李梓源, 吕显鹏, 刘光辉, 王海亮. MATLAB 在小净距隧道塌方风险模糊层次分析评价中的应用[J]. 河北地质大学学报, 2018, 41(1): 55-59.
- [13] 温世儒. 基于超前地质预报的隧道施工期风险评估及防控措施研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2012.
- [14] 许柏树. 层次分析法原理[M]. 天津: 天津大学出版社, 1988: 28-30.
- [15] 谢季坚. 模糊数学方法及其应用[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 2006.
- [16] Lesley, D. (1989) Applications of Fuzzy Set Methodologies in Industrial Engineering. *International Journal of Production Research*, **28**, 332. <https://doi.org/10.1080/00207549008942815>
- [17] Weridianti, P.M. and Puspitasari, S.D. (2019) The Design of Geographic Information System Determination of Slum Area to Improve Villages in Supporting Green and Clean in Surabaya City Using Fuzzy-AHP Method. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, **245**, Article ID: 012037. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/245/1/012037>
- [18] 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.
- [19] 曹建, 施式亮, 陈晓勇, 等. 基于 FUZZY-AHP 的危化品管道运输安全等级综合评价模型与应用[J]. 安全, 2019, 40(5): 30-33.

- 
- [20] 吕劲松, 肖渊甫, 邓江红, 王涛, 程超杰, 龚婷婷, 于海军, 邓元兵. 香格里拉小中甸冈达组下段岩石化学特征及构造背景分析[J]. 地质与勘探, 2012, 48(6): 1214-1220.
- [21] 韦伟, 冯海昀, 刘源浩. 模糊层次分析法在公路隧道施工安全评价中的应用[J]. 西部交通科技, 2015(3): 62-66.