

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2023.06.008

基于模糊层次和改进灰色关联度耦合算法 的隧道爆破风险评价*

赵立财^{①②}

①台湾科技大学营建工程系(台湾台北,10607)

②中铁十九局集团第三工程有限公司(辽宁沈阳,110136)

[摘要] 在隧道开挖过程中,对隧道掌子面爆破工程进行风险因子的识别及评价,可以达到评价整个隧道施工安全风险的目的。以石柱至黔江高速公路万寿山隧道为研究对象,从影响隧道爆破安全的角度出发,确定4个一级指标和14个二级指标。然后,结合模糊理论和改进灰色关联度分析方法,建立了模型矩阵以及模糊互补矩阵,确定了各因子的权重和矩阵特征向量。最后,再运用模糊理论多层次分析方法对隧道爆破施工风险开展评价,确定了各风险分级。结果表明:各因子的权重由大至小依次为掌子面爆破、爆破管理、地质条件、爆破设计。同时,隧道爆破风险综合等级为高风险;各一级指标中,地质条件为高风险,掌子面爆破为极高风险,爆破管理和爆破设计为中风险。基于风险类型和风险评价结果,可制定分级管控措施及北斗一体化监测系统方案,实时了解隧道围岩变形情况,实行风险分级管控,为隧道开挖动态施工的安全提供保障。

[关键词] 改进灰色关联度;模糊多层次;隧道爆破;风险评价

[分类号] TD235.4

Risk Assessment of Tunnel Blasting Based on Coupling Algorithm of Fuzzy Hierarchy and Improved Grey Relevance

ZHAO Licai^{①②}

①Department of Civil and Construction Engineering, National Taiwan University of Science and Technology
(Taiwan Taipei, 10607)

②Third Engineering Co., Ltd., China Railway 19th Bureau Group Co., Ltd. (Liaoning Shenyang, 110136)

[ABSTRACT] During the excavation process of the tunnel, the safety risks of the entire tunnel construction can be evaluated by identifying and evaluating the risk factors in the blasting engineering of the tunnel face. Taking Wanshoushan Tunnel on the Shizhu-Qianjiang Expressway as the research object, from the perspective of affecting tunnel blasting safety, four first-level indicators and 14 second-level indicators were determined. Then, the model matrix and fuzzy complementarity matrix were established using the coupling theory of fuzzy hierarchy and improved grey correlation degree, and the weights of each factor and matrix eigenvectors were determined. Finally, the fuzzy multi-level method was used to evaluate the risk of tunnel blasting construction, and the classification of each risk was also determined. The results show that the weights of each factor, from highest to lowest, are tunnel face blasting, blasting management, geological conditions, and blasting design. The comprehensive risk level of tunnel blasting is high risk. Among the first level indicators, geological conditions are at high risk, tunnel face blasting is at extremely high risk, and blasting management and design are at medium risk. Based on risk types and risk assessment results, graded control measures and Beidou integrated monitoring system schemes can be developed to understand tunnel deformation in real-time, implement risk graded control, and provide security for dynamic construction of tunnel excavation.

[KEYWORDS] improved grey relevance; fuzzy multi-level; tunnel blasting; risk assessment

* 收稿日期:2022-11-07

基金项目:辽宁省“兴辽英才计划青年拔尖人才”资助项目(XLYC2007146);中铁十九局集团有限公司科技研究开发计划项目(2021-B03)

第一作者:赵立财(1985-),男,博士,正高级工程师,主要从事地下工程岩石破坏机制、混凝土结构的损伤力学及灾变防治理论方面的研究。E-mail: zhaolicai1314@foxmail.com

0 引言

隧道是高速公路、铁路的重要组成部分之一。隧道工程极大地缩短了各省、市、县之间的出行时间^[1]。在山区,隧道施工较为复杂。当穿越硬岩时,多采用爆破施工。但爆破施工存在较大的风险,若防控不及时,容易造成不可挽回的后果^[2]。

隧道爆破越来越成为相关领域的研究热点。Lei等^[3]为研究隧道在爆破作业中遇到软弱夹层的变形机理,建立了一系列数值模型,研究了爆破应力波传播过程和围岩破坏形态的变化,揭示了软弱夹层的影响机制。Guo等^[2]为研究山岭地貌下隧道爆破的传播规律,以贵州银松高速公路沿线杨柳隧道开挖爆破工程为研究对象,结合数值模拟手段和监测数据进行对比分析。Guan等^[4]认为,爆破冲击对隧道爆破施工中临时支护结构的安全构成严重威胁,采用流固耦合算法模拟了不同装药质量和爆破距离条件下对支护结构的振动响应和破坏模式。

除此之外,隧道爆破施工产生的风险极大,这也是大多数学者的重点研究对象。叶海旺等^[5]以贵州省某工程为例,采用HAZOP的评价方法,对开挖爆破进行风险评价,分析该工程在爆破作业中可能产生的危险因素以及产生的后果。于丽等^[6]采用改进灰色关联度法对超小净距交叉隧道爆破施工进行研究,并得出对隧道爆破影响程度最大的因素是炸药量和净距。段军等^[7]采用模糊评价法对工程爆破风险进行评价,并设计了4组爆破方案,对各方案进行风险综合评判,并最终得出决策方案。瞿东明等^[8]以恩贡山隧道为研究对象,研究隧道爆破对地面建筑的影响,并对爆破作业中的振动测试数据进行分析,获得了爆破振动衰减规律。陈绍辉等^[9]为研究隧道爆破施工对邻近隧道安全性的影响,利用建立的静力模型和动力模型进行评价,并根据评价结果提出了必要的控制措施。

学者们在隧道爆破分析及安全风险评价方面开展了一定的研究,并取得了一定的成果。但是,由于影响隧道爆破安全风险的因素众多,且因子之间往往具有不确定性和模糊性,单一的评价手段以及半定量的分析方法往往还不够准确,需结合实际进一步综合完善评价方法。鉴于此,以石柱至黔江高速公路途经石柱县的万寿山隧道段为研究对象,采用改进的灰色关联度和模糊多层次方法耦合的评价手段进行隧道爆破安全风险评价。首先,结合实际确定影响隧道爆破安全风险的一级指标和二级指标;

然后,采用模糊理论进行模糊互补矩阵计算,并确定各因子的权重和矩阵特征向量;最后,评价隧道爆破的安全风险。

1 隧道爆破风险评价方法

1.1 隧道风险评价方法

目前,针对隧道爆破施工风险评价的方法以如下3个方面为主:

1)半定量法。常见的有LEC法等。该类评价方法较为简单,具有较好的潜在风险评价效果,但使用范围较小,容易受主观因素的影响。

2)定性定量法。常见的有风险矩阵法、未确知测度理论、模糊理论法等。该类评价方法较为科学,适用于数据资料不够充分、受主观因素影响小的情况,但需要操作者具有较高的数学基础水平。

3)数理统计法。常见的有AHP法、数据包络分析法、贝叶斯法、BP神经网络法等。该类方法更为科学,受数据限制程度小,评价精度更高,对于学术研究者比较适用。

为消除一种模型本身的局限性,将耦合定性定量法和数理统计法两种模型(灰色关联度法、模糊理论以及多层次分析法)相结合进行综合评价。

1.2 灰色关联度法

灰色关联度法的核心是构建GM(1,1)模型^[10-11]。按照灰色关联度法的需求,若有 m 个评价指标、 n 个试验方案,则评价指标矩阵 A 为:

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1m} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nm} \end{bmatrix} \quad (1)$$

在确定评价矩阵 A 后,进行归一化处理。

根据各评价指标的最大值和最小值,进行归一化,可得

$$r_{ij} = \frac{\max(a_{1j}, a_{2j}, \cdots, a_{nj}) - a_{ij}}{\max(a_{1j}, a_{2j}, \cdots, a_{nj}) - \min(a_{1j}, a_{2j}, \cdots, a_{nj})}, \quad (i = 1, 2, 3, \cdots, n; j = 1, 2, 3, \cdots, m) \quad (2)$$

经过式(2)处理后,矩阵 A 将变成矩阵 R 。

在此基础上,进行关联系数矩阵的计算:

$$\xi_{ij} = \frac{\min(\min |k_{ij} - r_{ij}|) - \lambda \max(\max |k_{ij} - r_{ij}|)}{|k_{ij} - r_{ij}| - \lambda \max(\max |k_{ij} - r_{ij}|)} \quad (3)$$

式中: r_{ij} 为评价矩阵 A 第 i 行、第 j 列数值; k_{ij} 为关联矩阵 R 第 i 行、第 j 列数值; λ 为分辨系数, $0 < \lambda < 1$ 。

经过式(3)处理后,得到关联系数矩阵 ξ 。

$$\xi = \begin{bmatrix} \xi_{11} & \xi_{12} & \cdots & \xi_{1m} \\ \xi_{21} & \xi_{22} & \cdots & \xi_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \xi_{n1} & \xi_{n2} & \cdots & \xi_{nm} \end{bmatrix} \quad (4)$$

1.3 模糊层次理论

模糊层次理论模型主要是利用了模糊数学的概念以及连续隶属度函数的理论。首先,建立评价对象的评价等级。在此基础上,确定各评价因子对应的隶属度,从而得到模糊关系矩阵 R 。

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \cdots & r_{nm} \end{bmatrix} \quad (5)$$

对各评价因子的相对重要性进行评价。最后,利用最大隶属度原则或加权平均原则,进行模糊综合评价^[12-13]。

利用模糊矩阵进行评价的关键一步是确定模糊矩阵 B 。假设模糊矩阵 $B = (b_{ij})_{n \times n}$, 满足 $0 < b_{ij} < 1$, $b_{ij} + b_{ji} = 1$ 。若 $b_{ij} = b_{ik} - b_{jk} + 0.5$, 则称矩阵 B 为加型模糊一致互补判断矩阵。对模糊互补判断矩阵进行转化后,得到 $\bar{b}_{ij} = (b_i - b_j) / a + 0.5$ 。

若不是一致互补判断矩阵,首先要将模糊判断矩阵 B 转化为模糊一致矩阵 R , $r_{ij} = (\sum_{k=1}^n b_{ik} - \sum_{k=1}^n b_{jk}) / 2n + 0.5$ 。

1.4 多层次分析方法

多层次分析方法首先要建立层次结构模型,主要包含最高层、中间层和最低层。然后,建立判断(成对比较)矩阵。确定因子权重,对每个风险因子进行权重计算,得出权重占比大小。对于矩阵 R , 先算出最大特征值 λ_{\max} ; 然后,计算出相应的特征向量 W , 即 $RW = \lambda_{\max} W$, 这时, W 的 n 个分量即相应 n 个因素的权重; 最后,结合上一步计算得出各风险因子的权重,依次计算出各层次因子对总目标的综合重要度^[14-15]。灰色关联度、模糊理论多层次分析法(FAHP)耦合模型的隧道爆破风险评价流程如图 1 所示。

2 工程实例

2.1 工程概况

石柱至黔江高速公路万寿山隧道为双连拱隧道,沿构造线方向布设,与岩层走向相交角度 $15^\circ \sim 34^\circ$ 。地形北低南高,地面高程 670~730 m,坡向 $10^\circ \sim$

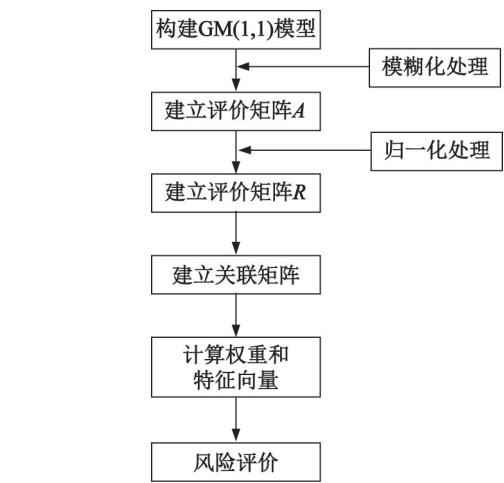


图 1 隧道爆破风险评价流程图

Fig. 1 Flow chart of risk assessment of tunnel blasting

40° , 坡角 $15^\circ \sim 40^\circ$ 。隧道出口受夹岩河切割,地形坡度较陡,北高南低,坡向 $170^\circ \sim 210^\circ$, 坡角 $45^\circ \sim 85^\circ$, 地面高程 745~862 m。隧道洞身地质情况复杂,局部基岩风化破碎,围岩稳定性差,隧道最大埋深 490 m。研究对象为分离式隧道,采用钻爆法施工。隧道左洞起讫桩号为 K1 + 880~K4 + 598, 路线全长 2 718 m; 右洞起讫桩号为 YK1 + 870~YK4 + 599, 路线全长 2 729 m; 共计总长 5 447 m。左、右隧道净距 18 m, 爆破作业安全风险高、施工难度大,对项目管理水平、施工技术能力都提出了重大挑战。需要预测出整个隧道爆破过程中风险因素的权重大小,克服围岩破碎等不利因素的影响,以降低隧道施工的危险性。

2.2 风险因子确定

基于改进灰色关联度和 FAHP 的耦合模型,对隧道爆破安全风险进行评价。首先,要确定影响隧道爆破安全的各项因子。主要从最能影响爆破安全的角度出发,根据地质条件、掌子面爆破作业的特点、爆破管理、爆破设计等进行风险因子确定。

2.2.1 地质条件

隧道区主要由侏罗系中统上沙溪庙组泥岩、砂岩组成,岩层 $292^\circ \sim 310^\circ$, 倾向北西,倾角 $11^\circ \sim 13^\circ$ 。产状较稳定,区内未见次级褶曲和断层,构造简单,构造属简单地区。

隧址区中风化岩体较完整。进洞侧岩体中发育有两组裂隙: 1) $20^\circ \angle 65^\circ$, 裂面较平直,宽 1.0~5.0 mm, 局部泥质填充,延伸 1.0~5.0 m, 发育间距 0.5~3.0 m, 结合程度一般~差; 2) $130^\circ \angle 80^\circ$, 裂面较平直,宽 0.5~2.0 mm, 无填充或局部泥质填充,延伸 0.5~4.0 m, 发育间距 0.5~4.0 m, 结合程度一般~差。出洞侧岩体中发育有两组裂隙: 1) $190^\circ \angle 80^\circ$

(卸荷裂隙),裂面较平直,由上至下变陡,张开0.5~100.0 mm,局部钙泥质填充,延伸7.0~65.0 m,发育间距0.5~9.0 m,结合程度一般~差;2)310°∠83°,裂面较平直,微张,无填充,延伸0.5~5.0 m,发育间距0.2~3.0 m,结合程度一般~差。基岩裂隙水多赋存于强风化带裂隙中,在雨季水流量较为明显。

故从地质条件角度出发,将影响隧道爆破安全的因子集中在岩性(基岩坚硬程度)、节理裂隙发育情况、软弱面发育情况、基岩裂隙水4个方面。

2.2.2 掌子面爆破

根据地质条件和周围环境制定合理的掌子面爆破方案。爆破振动安全允许距离^[16]

$$R = \left(\frac{K}{v} \right)^{\frac{1}{a}} Q^{\frac{1}{3}} \quad (6)$$

式中: R 为隧道爆破允许的最大安全距离; Q 为炸药量; v 为地质点安全允许振速; K 、 a 为与地形、地质条件有关的系数和衰减指数。中硬岩, $K=150\sim 250$, $a=1.5\sim 1.8$;软岩, $K=250\sim 350$, $a=1.8\sim 2.0$ 。

隧道口明洞石方爆破飞石距离^[16]

$$R_f = (15\sim 16)d \quad (7)$$

式中: R_f 为飞石的飞散距离; d 为爆破孔直径。

故从掌子面爆破角度出发,将影响隧道爆破安全的因子集中在炸药用量、爆破安全距离、爆破孔直径3个方面。

2.2.3 爆破管理

根据爆破施工特点,从爆破管理角度出发,将影响隧道爆破安全的因子集中在技术水平、操作规程、安全责任制3个方面。

2.2.4 爆破设计

从爆破设计角度出发,将影响隧道爆破安全的因子集中在安全设计依据、预防保护措施、爆破参数设计以及安全核算4个方面。

综上所述,隧道爆破总体风险评价系统分为地质条件、掌子面爆破、爆破管理、爆破设计4个一级指标以及14个二级指标。如表1所示。

3 风险评价

3.1 指标模糊互补矩阵计算

对确定的一级、二级评价系统的评价指标分别进行两两重要性对比。利用式(1)~式(5)建立模糊互补判断矩阵 A_1 、 A_2 、 A_3 、 A_4 、 A_5 。4个一级指标的模糊互补矩阵 A_1 如表2所示。地质条件包括4个二级指标,模糊互补矩阵见表3。掌子面爆破包括3个二级指标,模糊互补矩阵见表4。爆破管理包括3

表1 隧道爆破风险评价指标

Tab.1 Risk assessment indicators in tunnel blasting

一级指标	二级指标
地质条件	岩性
	节理裂隙发育 软弱面发育 基岩裂隙水
掌子面爆破	炸药用量 爆破安全距离 爆破孔直径
爆破管理	技术水平 操作规程 安全责任制
爆破设计	安全设计依据 预防保护措施 爆破参数设计 安全核算

表2 一级指标模糊互补判断矩阵 A_1

Tab.2 Fuzzy complementary judgment matrix A_1 of first-level indicators

一级指标	地质条件	掌子面爆破	爆破管理	爆破设计
地质条件	1.00	0.56	0.45	0.88
掌子面爆破	1.78	1.00	0.63	0.52
爆破管理	2.22	1.58	1.00	0.48
爆破设计	1.14	1.92	2.08	1.00

表3 地质条件二级指标模糊互补判断矩阵 A_1

Tab.3 Fuzzy complementary judgment matrix A_1 for second-level indicators of geological conditions

二级指标	岩性	节理裂隙	软弱面	基岩裂隙水
岩性	1.00	0.58	1.23	1.02
节理裂隙	1.72	1.00	0.66	1.45
软弱面	0.81	1.52	1.00	0.78
基岩裂隙水	0.98	0.68	1.28	1.00

表4 掌子面爆破二级指标模糊互补判断矩阵 A_2

Tab.4 Fuzzy complementary judgment matrix A_2 for second-level indicators of tunnel face blasting

二级指标	炸药用量	爆破安全距离	爆破炮孔直径
炸药用量	1.00	0.68	1.33
爆破安全距离	1.47	1.00	0.50
爆破炮孔直径	0.75	2.00	1.00

个二级指标,模糊互补矩阵见表 5。爆破设计包括 4 个二级指标,模糊互补矩阵见表 6。

表 5 爆破管理二级指标模糊互补判断矩阵 A_3
Tab. 5 Fuzzy complementary judgment matrix A_3 for second-level indicators of blasting management

二级指标	技术水平	操作规程	安全责任制
技术水平	1.00	0.44	0.58
操作规程	2.27	1.00	0.72
安全责任制	1.72	1.39	1.00

表 6 爆破设计二级指标模糊互补判断矩阵 A_4
Tab. 6 Fuzzy complementary judgment matrix A_4 for second-level indicators of blasting design

一级指标	安全设计依据	预防保护措施	爆破参数设计	安全核算
安全设计依据	1.00	1.36	1.22	0.58
预防保护措施	0.74	1.00	0.76	0.60
爆破参数设计	0.82	1.32	1.00	0.52
安全核算	1.72	1.67	1.92	1.00

3.2 指标权重计算

通过表 2~表 6 和多层次分析法 λ_{max} , 确定了影响隧道爆破安全的因子指标模糊互补判断矩阵。并利用多层次分析方法确定各因子权重。在确定各因子权重的基础上, 对各权重进行归一化处理, 即以 100% 作为各一级安全风险因子的相对权重, 用以推算出一级安全风险因子下的二级因子的相对权重, 最终得到两级评价系统指标的权重, 见表 7。

3.3 建立模糊综合评价集

根据确定的 4 个一级指标以及 14 个二级指标, 确定评价对象的因素集为 $H = \{H_1, H_2, H_3, H_4\}$ 。将评价目标的风险等级设定为低、中等、高、极高 4 个标准, 确定评判集为 $V = \{V_1, V_2, V_3, V_4\}$ 。

根据行业规范^[17]中的规定, 将隧道掌子面爆破

风险事件发生概率和损失等级分为低、中、高、极高 4 级。为了便于后期对隧道爆破风险进行打分评价, 将项目施工风险等级按照: 概率 \times 损失, 给出度量值 D , 如表 8 所示。

表 8 风险等级度量值

Tab. 8 Measurement of risk levels				
风险等级	低风险	中风险	高风险	极高风险
D 范围	$D \leq 2$	$2 < D \leq 6$	$6 < D \leq 12$	$12 < D \leq 25$

3.4 综合风险评价

根据表 7 确定的各因子权重, 利用式 (8) 计算出相应的特征向量 W 。

$$\begin{cases} W_1 = \{0.33, 0.20, 0.36, 0.11\}; \\ W_2 = \{0.48, 0.29, 0.23, 0\}; \\ W_3 = \{0.39, 0.28, 0.33, 0\}; \\ W_4 = \{0.17, 0.33, 0.28, 0.22\}. \end{cases} \quad (8)$$

根据评价集 $V = \{V_1, V_2, V_3, V_4\} = \{\text{低, 中等, 高, 极高}\}$, 结合表 8 的风险等级度量值可知: $V_1 \in (0, 2), V_2 \in (2, 6), V_3 \in (6, 12), V_4 \in (12, 25)$ 。故在评价过程中, 选取各区间的中值作为评价集 V 的量化值, 即可得等级权重矩阵 $V = \{1.0, 4.0, 9.0, 18.5\}$ 。

通过风险评价式 (9) 的计算, 将计算结果与表 8 进行对比, 即可得到风险等级^[18-19]。

$$D = R_i V^T. \quad (9)$$

采取加权平均法对隧道爆破总风险 D_i 及各一级因子指标风险进行计算, 得出: $D_1 = 10.32; D_2 = 6.12; D_3 = 18.24; D_4 = 5.58; D_5 = 5.89$ 。

由以上分析可知, 该隧道爆破风险综合等级为高风险。各一级指标中, 地质条件为高风险; 掌子面爆破作业为极高风险; 爆破管理和爆破设计为中风险。故在实际隧道爆破施工过程中, 应特别关注掌子面爆破的施工特点, 把控好炮孔内炸药用量以及安全距离。

基于本次风险评价, 建立风险辨识监测防控机制。实际隧道爆破施工过程中, 分别在隧道洞口两

表 7 两级评价指标的权重

Tab. 7 Weights of two levels of evaluation indicators

一级指标	二级指标			
地质条件 = 0.20	岩性 = 0.33;	节理裂隙发育 = 0.20;	软弱面发育 = 0.36;	基岩裂隙水 = 0.11
掌子面爆破作业 = 0.38	炸药用量 = 0.48;	爆破安全距离 = 0.29;	爆破炮孔直径 = 0.23	
爆破管理 = 0.24	技术水平 = 0.39;	操作规程 = 0.28;	安全责任制 = 0.33	
爆破设计 = 0.18	安全设计依据 = 0.17;	预防保护措施 = 0.33;	爆破参数设计 = 0.28;	安全核算 = 0.22

侧起拱线位置处理设了位移测点1#、测点2#;采用北斗一体化监测系统,实时自动化连续动态监测万寿山隧道洞口围岩及洞口边坡整体位移变化情况,从而计算出被监测对象的位移变化情况。隧道开挖施工期间500 d的位移监测曲线如图2所示。

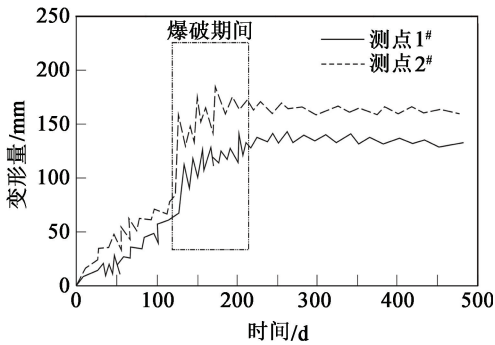


图2 隧道开挖施工期间测点的位移曲线

Fig.2 Displacement curves of measuring points during excavation and construction of the tunnel

由图2可知:在爆破前的初步开挖阶段,两个测点位移变形幅度均较小,最大变形幅度不超过10 mm/月;当在第135 d开始进行爆破施工后,位移变形量发生剧烈增加,最大变形幅度超过15 mm/月;在爆破结束后,变形量变化幅度逐渐趋于稳定性,最大变形幅度不超过5 mm/月。说明隧道在爆破阶段极容易造成失稳变形,风险程度极高,也进一步验证了上述对隧道爆破风险评价结果的合理性。

4 结论

1)结合万寿山隧道为双连拱隧道的工程特点,从影响爆破安全的角度出发,确定本次风险研究的4个一级指标为地质条件、掌子面爆破、爆破管理、爆破设计。从地质条件角度出发,确定4个二级指标为岩性(基岩坚硬程度)、节理裂隙发育情况、软弱面发育情况、基岩裂隙水;从掌子面爆破角度出发,确定3个二级指标为炸药用量、爆破安全距离、爆破孔直径;从爆破施工角度出发,确定3个二级指标为技术水平、操作规程、安全责任制;从爆破设计角度出发,确定4个二级指标为安全设计依据、预防保护措施、爆破参数设计、安全核算。

2)通过模糊矩阵对4个风险因子进行权重计算后,得出各因子的权重由大到小为掌子面爆破、爆破管理、地质条件、爆破设计。建议一炮一设计调整掌子面钻爆施工技术参数来控制超挖或欠挖,同时加强地质监测,以克服围岩破碎等不利因素的影响,

保证爆破作业安全进行。

3)结合灰色关联度和FAHP耦合模型的方法计算后,得出隧道爆破风险综合等级为高风险。各一级指标中,地质条件为高风险;掌子面爆破为极高风险;爆破管理和爆破设计为中风险。按照风险类型和风险等级,制定分级管控措施及北斗一体化监测系统方案,实时了解隧道变形情况,实行风险分级管控,形成以预防为主的风险闭环管理模式,为隧道开挖动态施工安全提供保障。

参考文献

- [1] KIM M S, KIM C Y, SONG M K, et al. Assessment of the blasting efficiency of a long and large-diameter uncharged hole boring method in tunnel blasting using 3D numerical analysis [J]. Sustainability, 2022, 14(20): 13347.
- [2] GUO D, XIAO W H, GUO D, et al. Numerical simulation of surface vibration propagation in tunnel blasting [J]. Mathematical Problems in Engineering, 2022, 2022(3): 3748802.
- [3] LEI M F, HE R, LIU L H, et al. Mechanical mechanism and shaping effect of tunnel blasting construction in rock with weak interlayer [J]. Sustainability, 2022, 14(20): 13278.
- [4] GUAN X M, YANG N, ZHANG W J, et al. Vibration response and failure modes analysis of the temporary support structure under blasting excavation of tunnels [J]. Engineering Failure Analysis, 2022, 136: 106188.
- [5] 叶海旺,付威志,李宁,等.基于HAZOP与模糊理论的台阶爆破安全综合评价[J].爆破,2020,37(1):152-158.
YE H W, FU W Z, LI N, et al. Comprehensive evaluation of bench blasting safety based on HAZOP & fuzzy theory [J]. Blasting, 2020, 37(1): 152-158.
- [6] 于丽,路明,王明年,等.基于改进灰色关联度法对超小净距交叉隧道爆破施工研究[J].现代隧道技术,2021,58(增刊1):336-341.
YU L, LU M, WANG M N, et al. Study on blasting construction of super-closely-spaced cross tunnel based on improved grey relational analysis [J]. Modern Tunnelling Technology, 2021, 58(Suppl. 1): 336-341.
- [7] 段军,焦登铭,张轰玉,等.融合权重和模糊综合在爆破方案优选中的应用[J].中国矿业,2020,29(12):176-182.
DUAN J, JIAO D M, ZHANG H Y, et al. Application of integrated weight and fuzzy synthesis in blasting scheme optimum selection [J]. China Mining Magazine, 2020,

- 29(12): 176-182.
- [8] 瞿东明, 郭林宏, 张晓峰, 等. 恩贡山隧道爆破震害对地面建筑影响的安全评价[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2018, 45(增刊): 133-137.
QU D M, WU L H, ZHANG X F, et al. Safety evaluation on influence of blasting damage of Ngong Tunnel on surface structures [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2018, 45(Suppl.): 133-137.
- [9] 陈绍辉, 张贤康, 石波, 等. 隧道爆破施工对邻近隧道安全性的影响研究[J]. 公路交通技术, 2016, 32(6): 100-105.
CHEN S H, ZHANG X K, SHI B, et al. Study on the influence of tunnel blasting on the safety of adjacent tunnels [J]. Journal of Highway and Transport, 2016, 32(6): 100-105.
- [10] 李梓源, 王海亮. 基于灰色关联度分析法的浅埋隧道围岩稳定性研究[J]. 安全与环境学报, 2017, 17(6): 2079-2082.
LI Z Y, WANG H L. Study on surrounding rock stability of shallow tunnel based on grey correlation analysis [J]. Journal of Safety and Environment, 2017, 17(6): 2079-2082.
- [11] 王志杰, 李昭, 马德林, 等. 基于灰色理论的雪山梁隧道施工过程渗漏水水源识别研究[J]. 隧道建设, 2017, 37(1): 24-29.
WANG Z J, LI Z, MA D L, et al. Research on water source identification of water leakage during construction of Xueshanliang Tunnel based on grey theory [J]. Tunnel Construction, 2017, 37(1): 24-29.
- [12] 吴波, 陈辉浩, 黄惟. 基于熵权模糊理论的上软下硬地层隧道施工风险评价[J]. 铁道科学与工程学报, 2021, 18(4): 1056-1063.
WU B, CHEN H H, HUANG W. Safety risk assessment of tunnel construction in upper-soft and lower-hard composite strata based on entropy method and fuzzy evaluation theory [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2021, 18(4): 1056-1063.
- [13] 姜安民, 董彦辰, 张晓波, 等. 基于粗糙集与模糊理论的公路隧道塌方风险评价[J]. 公路与汽运, 2020(3): 156-160.
- [14] 李凌志, 周骏, 滕鸣翰, 等. 基于层次分析法的超大隧道断面多准则优化分析[J]. 交通科技, 2022(4): 119-124.
LI L Z, ZHOU J, TENG M H, et al. Multi criteria optimization analysis of super large tunnel section based on analytic hierarchy process [J]. Transportation Science & Technology, 2022(4): 119-124.
- [15] 李鹏飞, 李康宁, 赵晓勇, 等. 基于层次分析法的铁路隧道装配式二次衬砌分块方案研究[J]. 隧道建设(中英文), 2021, 41(增刊2): 92-99.
LI P F, LI K N, ZHAO X Y, et al. Block division scheme for prefabricated secondary lining in railway tunnel based on analytic hierarchy process [J]. Tunnel Construction, 2021, 41(Suppl.2): 92-99.
- [16] 国家安全生产监督管理局. 爆破安全规程: GB 6772—2014 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.
State Administration of Work Safety. Safety regulations for blasting: GB 6772—2014 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2014.
- [17] 公路水运工程施工安全风险评估指南: JT/T 1375. 5—2022 [S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2022.
Guideline for safety risk assessment of Highway and waterway Engineering construction: JT/T 1375. 5—2022 [S]. Beijing: People's Communications Press Co., Ltd., 2022.
- [18] KINGSLEY L J, LILL M A. Including ligand-induced protein flexibility into protein tunnel prediction [J]. Journal of Computational Chemistry, 2014, 35(24): 1748-1756.
- [19] MELO J J C D, GONÇALVES J R, BRANDÃO L M S, et al. Evaluation of lipase access tunnels and analysis of substance transport in comparison with experimental data [J]. Bioprocess and Biosystems Engineering, 2022, 45: 1149-1162.