

基于FAHP-GRA理论的隧道爆破冲击波风险评估

吴波^{1,2,3}, 赵睿¹, 蒙国往¹, 陈辉浩¹, 黄惟¹

(1. 广西大学 土木建筑工程学院, 南宁 530004; 2. 东华理工大学 土木与建筑工程学院, 南昌 330013;
3. 广州城建职业学院 建筑工程学院, 广州 510925)

摘要: 爆破冲击波理论研究复杂, 不确定性因素较多, 为减少钻爆法施工爆破冲击波对人员和设备的伤害, 有必要对隧道爆破冲击波进行安全风险评价。以福建某高速公路隧道为依托, 结合相关规范和文献, 对爆破冲击波风险进行了有效的风险识别, 建立了隧道钻爆法施工爆破冲击波风险评价指标体系。将灰色关联度理论引入模糊层次分析法, 建立了隧道爆破冲击波风险评估模型。根据定量计算结果分析, 结合建立的评价集, 可以得到爆破冲击波风险发生的概率等级。由评估得到的各指标关联度大小, 可采取相应的措施来降低爆破冲击波带来的风险。该爆破冲击波评价体系和评估模型可供类似工程参考借鉴。

关键词: 公路隧道; 爆破冲击波; 风险评价; 模糊层次分析法; 灰色关联度理论

中图分类号: X932

文献标识码: A

文章编号: 1673-0836(2022)06-2072-08

Risk Assessment of Blast Wave in Tunnel Based on FAHP-GRA Theory

Wu Bo^{1,2,3}, Zhao Rui¹, Meng Guowang¹, Chen Huihao¹, Huang Wei¹

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Guangxi University, Nanning 530004, P. R. China; 2. School of Civil and Architectural Engineering, East China University of Technology, Nanchang 330013, P. R. China; 3. School of Architectural Engineering, Guangzhou City Construction College, Guangzhou 510925, P. R. China)

Abstract: The theoretical research of blast wave is complex and uncertain. In order to reduce the damage of blast wave to personnel and equipments, it is necessary to evaluate the safety risk of tunnel blast wave. Based on a highway tunnel in Fujian, the blast wave risk was effectively identified by combining relevant specifications and literature, and a blast wave risk evaluation index system of tunnel drilling and blasting method construction was established. Combining Grey Relational Analysis with Fuzzy Analytic Hierarchy Process, a tunnel blast wave risk assessment model was established. According to the analysis of quantitative calculation results, the corresponding risk grade of tunnel blast wave in the evaluation set could be obtained. Depending on the correlation degree of each index obtained from the evaluation results, corresponding measures could be taken to reduce the risk of the tunnel blast wave. The evaluation system and model can be used as reference in similar projects.

Keywords: highway tunnel; blast wave; risk evaluation; the fuzzy analytic hierarchy process; the grey relational analysis

收稿日期: 2022-06-25 (修改稿)

作者简介: 吴波 (1971—), 男, 四川阆中人, 博士, 教授, 主要从事隧道与地下工程技术研究。

E-mail: 813792833@qq.com

基金项目: 国家自然科学基金 (51678164, 51478118); 广西自然科学基金 (2018GXNSFDA138009); 广西科技计划项目 (桂科 AD18126011); 广西大学科研基金 (XTZ160590)

0 引言

改革开放40年以来,随着我国经济实力的跨越式发展以及国家发展战略的推进,我国建成了大量的公路和铁路隧道,使得我国成为了名副其实的隧道大国。隧道的基本施工方法有钻爆法、明挖法、掘进机法、盾构法等,其中钻爆法由于应用灵活方便、适用性强、较为经济的特点,在隧道工程中仍然被广泛地使用。钻爆法施工中炸药释放的能量大部分可以用于破开掌子面岩层,但仍有部分能量会扩散传递到空气中,形成冲击波。相较于露天爆破,在巷道或者隧道内爆破产生的冲击波,由于壁面的限制和反射,其冲击波强度更高、破坏能力更强、影响范围更大,轻则造成人体内脏挫伤、重则直接导致人员伤亡^[1],给爆破施工带来巨大的风险。

多年以来,国内外学者针对爆破冲击波进行了深入的研究,总结得到了多种冲击波超压公式和衰减规律。Smith等^[2]使用等比例缩小的隧道模型,得出随着隧道壁面粗糙度增加,隧道爆炸冲击波强度降低幅度增加的规律。Benselama等^[3-4]指出隧道内爆破时,爆源近处的冲击波的传播方式是自由传播,而在远离爆源处的冲击波呈一维衰减模式。而Uystepuyst等^[5]研究爆炸发生在矩形截面隧道时,发现爆炸波传播和衰减还呈现二维的模式。李玉民等^[6]基于等效球源中心爆炸的物理模型,结合量纲分析法和现场实验数据拟合出了空气冲击波在巷道内传播的经验公式。庞伟宾等^[7]考虑炸药质量、炸药相对位置等影响因素,建立了坑道内爆炸冲击波到达时间的公式。杨科之等^[8]通过三维数值模拟,模拟出了坑道内爆炸流场的形态,得出了坑道内超压峰值的衰减公式及作用时间的冲量公式。宁鹏飞等^[9]指出通风口对于爆炸冲击波有泄压作用,且随着通风口面积的增加,爆炸冲击波的超压峰值会减小。肖望等^[10]将直隧道内的爆炸流场情况与带弯道或岔口的爆炸流场情况进行比较,得出弯道和岔口的存在会不同程度的削减爆破超压峰值。张学民等^[11]根据实测的多组冲击波数值,验证了《爆破安全规程》中给出的巷道爆破空气冲击波超压公式在大断面隧道钻爆施工中的可行性,初步确定大断面隧道中冲击波的计算参数。

综上所述,目前科研学者主要集中于研究隧道爆破冲击波的传播衰减规律、爆炸流场形态、冲击波

波形等物理力学规律,缺乏对爆破冲击波的风险识别、风险评价等风险管理研究。爆破冲击波由于其复杂性和不确定性,一旦出现事故,极易造成人员伤亡和财产损失,因此需要对隧道钻爆法施工进行风险评估,为隧道爆破施工安全风险管理提供参考。

1 隧道爆破冲击波风险评估指标

设最高层为隧道钻爆法施工冲击波风险 S ;第二层因素集为 $S=(S_1, S_2, \dots, S_i)$,其中 S_i 为第一层第 i 个子因素集;第三层因素集为 $S=(S_{i1}, S_{i2}, \dots, S_{ij})$,其中 S_{ij} 为第一层第 i 个子因素集中第 j 个因素集;第四层因素集为 $S=(S_{ij1}, S_{ij2}, \dots, S_{ijk})$,其中 S_{ijk} 为第一层第 i 个子因素集中第 j 个因素集中的第 k 个元素。

从隧道钻爆法施工安全的角度出发,根据我国《铁路隧道风险评估与管理暂行规定》^[12]《爆破安全规程》^[13]《爆破安全规程实施手册》^[14],同时参考杨科之等^[15]总结的空气冲击波研究现状以及近年来发生的爆炸冲击波事故,针对隧道钻爆法施工这一特殊情况,选取多层次的、具有代表性的风险因素,进行了有效的风险识别,并建立了完整的隧道钻爆法施工风险评价体系,如图1所示。

2 隧道爆破冲击波评估模型

2.1 模糊层次分析法

由美国运筹学家T. L. Saaty提出的层次分析法(AHP),与模糊数学相结合,逐渐形成模糊层次分析法(FAHP),该方法可以处理复杂问题中的模糊信息,更好地反映出参评专家判断的模糊程度。其主要步骤如下:

2.1.1 建立模糊判断矩阵

选择三角模糊数0.1~0.9标度方法^[16]作为判断准则,见表1。通过依次比较同一层次的2个元素建立基于三角模糊数的模糊判断矩阵 R :

$$R = (r_{ij})_{n \times n} = \begin{pmatrix} r_{11} & \cdots & r_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{n1} & \cdots & r_{nn} \end{pmatrix}$$

式中: $r_{ij} = (r_{ij}^L, r_{ij}^M, r_{ij}^U)$, M 为三角模糊数的中值,代表专家根据表1给出的两两元素比较的重要程度分数; L 和 U 为三角模糊数的下界和上界,代表专家判断的模糊程度,差值越大则越模糊;同时三角

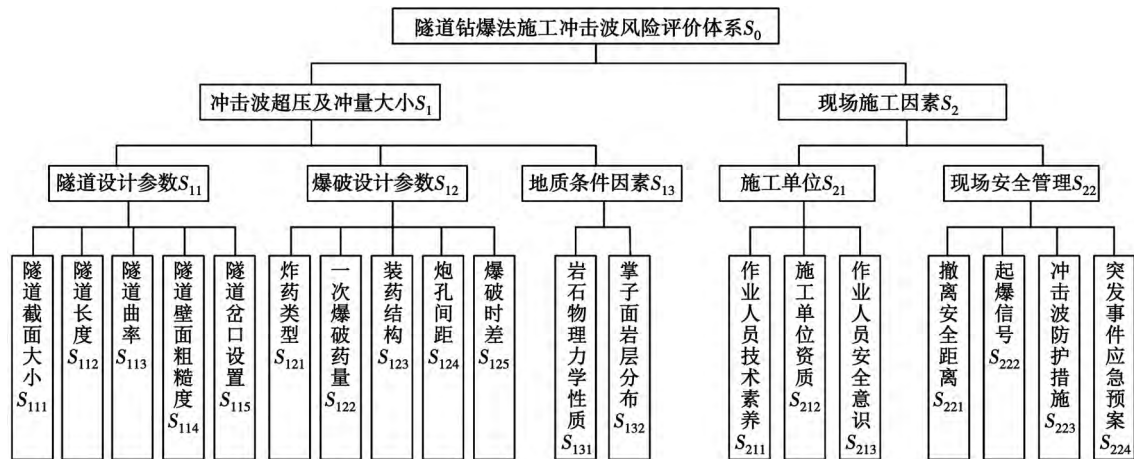


图 1 隧道钻爆法施工冲击波风险评价体系

Fig. 1 Risk assessment system of blast wave in tunnel construction by drilling and blasting method

模糊数应满足:

$$r_{ij}^L + r_{ji}^U = r_{ij}^M + r_{ji}^M = r_{ij}^U + r_{ji}^L = 1, r_{ii}^L = r_{ii}^M = r_{ii}^U = 0.5, r_{ij}^L \leq r_{ij}^M \leq r_{ij}^U$$

表 1 0.1—0.9 标度内涵

Table 1 0.1—0.9 scale connotation

标度	定义	内涵
0.9	极端重要	两两相比,前一个元素比后一个元素极端重要
0.8	强烈重要	两两相比,前一个元素比后一个元素强烈重要
0.7	明显重要	两两相比,前一个元素比后一个元素明显重要
0.6	稍微重要	两两相比,前一个元素比后一个元素稍微重要
0.5	同等重要	两两相比,重要程度相同
0.4~0.1	反过来比较	交换比较顺序之后的比较结果

2.1.2 分层计算权重

由图 1 可知,影响隧道钻爆法冲击波风险评价的指标较多,若不对由参评专家判断信息建立的三角模糊互补判断矩阵进行处理,则其不能满足一致性检验的要求。引入参考文献[17]使用的方法,重新调整形成模糊互补判断矩阵 $V = (v_{ij})_{n \times n}$,并验证调整后得到的矩阵一致性。

首先,根据式(1)、(2)计算得到模糊判断矩阵 A :

$$a_{ij} = 1 - \frac{r_{ij}^U - r_{ij}^L}{2(r_{ij}^L + r_{ij}^M + r_{ij}^U)} \quad (1)$$

$$A = (a_{ij})_{n \times n} = \begin{pmatrix} 1 & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & 1 & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

然后,根据式(3)—(5)计算得到调整得到模糊判断矩阵 $V = (v_{ij})_{n \times n}$:

$$b_{ij} = \frac{r_{ij}^U + 4r_{ij}^M + r_{ij}^L}{6} \quad (3)$$

$$C = (c_{ij})_{n \times n} = (a_{ij}b_{ij})_{n \times n} \quad (4)$$

$$v_{ij} = \frac{1}{2}(1 + c_{ij} - c_{ji}) \quad (5)$$

验证调整后的模糊判断矩阵一致性,对不满足一致性的矩阵重新按照式(1)—(5)进行调整,直到模糊判断矩阵满足一致性要求后,根据式(6)、(7)计算各指标权重:

$$v_{ij}' = \sum_{s=1}^k \lambda_s v_{ij} \quad (6)$$

$$\omega_m = \frac{1}{n} - \frac{1}{2\alpha} + \frac{1}{n\alpha} \sum_{j=1}^n v_{ij}' \quad (7)$$

式中: λ_s 为考虑专家能力水平高低的系数,一般认为专家水平相当,取 $\lambda_s = 1/k$, k 为参与打分的专家人数,且有 λ_s 之和等于 1。 ω_m 为最终计算得到的指标权重,式中为最重视元素间重要程度的取法^[18],取 $\alpha = (n-1)/2$ 。

2.1.3 验证一致性

假设调整后的模糊判断矩阵 $V = (v_{ij})_{n \times n}$ 的可达矩阵为 $Q = S + S^2 + \cdots + S^n$,若其对角线全部为 0,不存在等于 1 的元素,则该模糊判断矩阵具有满意一致性,否则不能通过一致性检验^[19]。 $+$ 是布尔运算规则,如式(8)所示。同时通过式(9)计算可以

得到矩阵 $S = (s_{ij})_{n \times n}$

$$0 \div 0 = 0 \quad 0 \div 1 = 1 \quad 1 \div 0 = 1 \quad 1 \div 1 = 1 \quad (8)$$

$$s_{ij} = \begin{cases} 1, v_{ij} \geq 0.5, i \neq j \\ 0, \text{其他} \end{cases} \quad (9)$$

2.2 灰色关联度分析

在模糊层次分析法的基础上,引入灰色关联度理论,可以减少专家的主观判断带来的误差,而层次分析法也可以弥补灰色关联度理论测度不足的问题^[20]。因此,在复杂问题中引入灰色关联度理论来改进模糊层次分析法具有科学性和优越性。其主要步骤如下:

2.2.1 建立评价指标矩阵

设某一层有 n 个评价指标,有 k 名专家分别对评价指标进行打分,形成矩阵 U_1 ,其中 u_{ij} 表示第 i 名专家对第 j 个评价指标的评分分值:

$$U_1 = (u_{ij})_{k \times n} = \begin{pmatrix} u_{11} & u_{12} & \cdots & u_{1n} \\ u_{21} & u_{22} & \cdots & u_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ u_{k1} & u_{k2} & \cdots & u_{kn} \end{pmatrix}$$

将各专家对该层次对应的上一层评分作为参考数列 $u_0 = [u_{10}, u_{20}, \cdots, u_{k0}]^T$,合并得到评价指标矩阵 U :

$$U = \begin{pmatrix} u_{10} & u_{11} & \cdots & u_{1n} \\ u_{20} & u_{21} & \cdots & u_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ u_{k0} & u_{k1} & \cdots & u_{kn} \end{pmatrix}$$

2.2.2 评价矩阵初值化

对于建立的评价指标矩阵 U ,以第一列 $u_0 = [u_{10}, u_{20}, \cdots, u_{k0}]^T$ 作为参考数列,其余各列分别除以参考数列得到初值化矩阵 U_2 。

2.2.3 确定关联系数

$$\zeta_k = \frac{\Delta_{\min} + \xi \Delta_{\max}}{\Delta_k + \xi \Delta_{\max}} \quad (10)$$

其中分辨系数取 $\xi = 0.5$ ^[21]; Δ_{\min} 表示各列与参考数列元素的最小绝对差值; Δ_{\max} 表示各列与参考数列元素的最大绝对差值; Δ_k 表示各列与参考数列第 k 个元素的绝对差值。

2.2.4 计算灰色关联度

根据模糊层次分析法得到的指标权重以及式(10)求得的关联系数,通过式(11)可以计算得到各指标的关联度:

$$\gamma = \frac{1}{k} \omega_m \sum_{i=1}^k \zeta_k \quad (11)$$

2.3 建立评价集

结合《公路桥梁和隧道工程施工安全风险评估制度及指南解析》^[22],将隧道爆破冲击波安全风险分为4级,如表2所示。

表2 事故可能性等级标准

Table 2 Criteria for accident possibility grade

概率范围	等级描述	等级
>0.3	很可能	4
0.03~0.3	可能	3
0.003~0.03	偶然	2
<0.003	不太可能	1

3 案例分析

3.1 工程概况

某隧道起讫里程为 K214+600~YK223+320,起点位于大田县东景村,终点位于三元区蟹头村,线路总长 8.72 km。隧道采用新奥法施工,主要工序采用机械化作业,开挖采用钻爆法。

该隧道为双线双洞隧道,单洞设计三车道,宽 16.84 m,高 7.94 m。左右线进出口采用端墙式洞门,洞身宽度 14.75 m,进口线间距为 24 m,出口线间距为 20 m。隧址区属构造剥蚀中低山地貌,覆盖层较薄,主要为Ⅲ级及Ⅳ级围岩,少部分为Ⅴ级围岩。隧区地下水弱发育,但根据物探外业调查及物探揭露,在局部不同岩相接触带处或局部低阻带处岩性相对较为破碎,富水条件较好。

正线Ⅲ级围岩段采用全断面法施工,Ⅳ级围岩段采用台阶法或台阶临时横撑法,Ⅴ级围岩段采用三台阶法或台阶临时仰拱法。

主爆药采用爆炸性能、抗水性能、安全性能较好及环境污染小的 2#岩石乳化炸药,规格为 $\phi 32 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$ 。周边眼采用相同性能直径 $\phi 32 \text{ mm}$ 药卷。装药结构用竹片绑扎,导爆管传爆,进行间隔装药,根据围岩情况,可对间隔距离和药量进行调整。起爆材料采用 1~15 段的非电毫秒雷管起爆,电雷管引爆。

3.2 指标权重确定

进行隧道钻爆法爆破冲击波风险评价之前,邀请 4 位专家根据表 1 进行打分,其中设计单位 2 名,施工单位 1 名,监理单位 1 名。根据表 1 的评分标度,对同层次的评价指标两两比较,得到三角模糊判断矩阵。以专家 A 为例,以隧道爆破冲击波 S_0 为判断准则,对第一层次冲击波超压及冲量

大小 S_1 和现场施工因素 S_2 两个元素进行比较,所建立的模糊判断矩阵 R_1 如下所示:

$$R_1 = \begin{bmatrix} (0.5, 0.5, 0.5) & (0.5, 0.6, 0.7) \\ (0.3, 0.4, 0.5) & (0.5, 0.5, 0.5) \end{bmatrix}$$

通过式(1)—(5)可以得到调整后的模糊判断矩阵 V_1 :

$$V_1 = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.607 \\ 0.394 & 0.5 \end{bmatrix}$$

通过可达矩阵验证模糊判断矩阵 V_1 ,其满足一致性要求。同理,可以得到其余 3 名专家评分的模糊判断矩阵 V_2, V_3, V_4 ,如下所示:

$$V_2 = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.386 \\ 0.614 & 0.5 \end{bmatrix}$$

$$V_3 = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.525 \\ 0.475 & 0.5 \end{bmatrix}$$

$$V_4 = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.607 \\ 0.394 & 0.5 \end{bmatrix}$$

通过式(6)、(7)可以得到, S_1, S_2 的权重分别为 0.531, 0.469。同理可得,其余各层次评价指标相对于其对应的上一层次判断准则的权重,详见表 3。

表 3 评价指标权重

Table 3 Evaluation index weight

目标层	指标层	指标权重	指标层	指标权重	指标层	指标权重
隧道 钻爆 法施 工冲 击波 风险 S_0	S_1	0.531	S_{11}	0.374	S_{111}	0.229
					S_{112}	0.215
					S_{113}	0.192
					S_{114}	0.178
					S_{115}	0.186
			S_{12}	0.383	S_{121}	0.213
					S_{122}	0.253
					S_{123}	0.185
					S_{124}	0.148
					S_{125}	0.201
			S_{13}	0.243	S_{131}	0.702
					S_{132}	0.298
					S_{211}	0.382
	S_2	0.469	S_{21}	0.469	S_{212}	0.292
					S_{213}	0.326
					S_{221}	0.276
			S_{22}	0.541	S_{222}	0.259
					S_{223}	0.268
					S_{224}	0.197

3.3 指标关联度确定

各专家对隧道钻爆法爆破冲击波风险评价指

标以(0-1]标度进行打分,具体评分情况见表 4。

表 4 风险评分汇总

Table 4 Risk score summary

评价指标	专家 A	专家 B	专家 C	专家 D
隧道爆破冲击波风险 S	0.8	0.6	0.7	0.7
冲击波超压及冲量大小 S_1	0.7	0.6	0.6	0.5
隧道设计参数 S_{11}	0.7	0.9	0.8	0.8
隧道截面大小 S_{111}	0.8	0.6	0.7	0.7
隧道长度 S_{112}	0.7	0.6	0.7	0.8
隧道曲率 S_{113}	0.5	0.7	0.6	0.6
隧道壁面粗糙度 S_{114}	0.4	0.4	0.6	0.5
隧道岔口设置 S_{115}	0.5	0.7	0.6	0.6
爆破设计参数 S_{12}	0.9	0.8	0.6	0.9
炸药类型 S_{121}	0.8	0.8	0.7	0.9
一次爆破药量 S_{122}	0.9	0.8	0.9	0.8
装药结构 S_{123}	0.7	0.6	0.8	0.7
炮孔间距 S_{124}	0.6	0.7	0.7	0.6
爆破时差 S_{125}	0.7	0.4	0.6	0.7
地质条件因素 S_{13}	0.6	0.6	0.4	0.7
岩石物理力学性质 S_{131}	0.7	0.6	0.5	0.6
掌子面岩层分布 S_{132}	0.6	0.5	0.5	0.6
现场施工因素 S_2	0.7	0.6	0.5	0.5
施工单位 S_{21}	0.8	0.6	0.7	0.7
作业人员技术素养 S_{211}	0.6	0.7	0.7	0.8
作业单位资质 S_{212}	0.5	0.6	0.5	0.7
作业人员安全意识 S_{213}	0.7	0.7	0.6	0.6
现场安全管理 S_{22}	0.6	0.6	0.6	0.7
撤离安全距离 S_{221}	0.9	0.7	0.8	0.6
起爆信号 S_{222}	0.8	0.7	0.6	0.7
冲击波防护措施 S_{223}	0.7	0.6	0.6	0.8
爆破突发事件应急预案 S_{224}	0.7	0.7	0.8	0.6

以分析冲击波超压及冲量大小 S_1 和现场施工因素 S_2 与隧道钻爆法施工冲击波风险 S 的关系为例进行说明。将隧道钻爆法施工冲击波风险 S 作为参考数列,初值化后得到评价矩阵如下:

$$U_1 = \begin{pmatrix} 1.000 & 0.750 & 0.875 \\ 1.000 & 1.000 & 1.000 \\ 1.000 & 0.857 & 0.714 \\ 1.000 & 0.714 & 0.714 \end{pmatrix}$$

根据式 (10) 可以计算得到关联系数,见表 5。

表 5 关联系数

Table 5 Correlation coefficient

	ζ_{k1}	ζ_{k2}
专家 A	0.364	0.532
专家 B	1.000	1.000
专家 C	0.498	0.333
专家 D	0.333	0.333

结合式 (11) 可以计算得到各指标的关联度。经计算可得冲击波超压及冲量大小关联度 $\gamma_1 = 0.291$, 现场施工因素关联度 $\gamma_2 = 0.258$ 。同理可以得到其余各层次关联度大小,见表 6。

表 6 评价指标关联度

Table 6 Correlation degree of evaluation indexes

目标层	指标层	关联度	指标层	关联度	指标层	关联度
隧道 钻爆 法施 工冲 击波 风险 S_0	S_1	0.291	S_{11}	0.204	S_{111}	0.154
					S_{112}	0.179
					S_{113}	0.158
					S_{114}	0.149
					S_{115}	0.153
			S_{12}	0.231	S_{121}	0.200
					S_{122}	0.254
					S_{123}	0.152
					S_{124}	0.114
					S_{125}	0.141
			S_{13}	0.139	S_{131}	0.750
					S_{132}	0.294
					S_{211}	0.388
					S_{212}	0.244
					S_{213}	0.306
	S_2	0.258	S_{22}	0.327	S_{221}	0.320
					S_{222}	0.279
					S_{223}	0.277
					S_{224}	0.214

3.4 风险发生概率

将前两层次关联度与对应权重乘积相加得到 $D = (0.276, 0.200, 0.301)$, 选用 I 型评判函数, 最终结果为 $P = 1 \times 0.276 + 0.1 \times 0.200 + 0.01 \times 0.301 = 0.299$ 。由表 2 可得本隧道工程施工风险概率为 3 级, 为可能发生风险, 且非常接近很可能发生风险。隧道钻爆法施工时情况复杂多变, 难以预料, 由于缺少爆破冲击波方面的风险管理, 爆破冲击波的危

害没有引起施工现场重视, 出现险情。与现场施工实际情况相符, 有必要采取针对性的措施来降低风险。

3.5 结果分析

分析计算得到的各层评价指标关联度大小可知, 第一层次指标冲击波超压及冲量大小 S_1 对隧道爆破冲击波风险 S 影响最大, 即爆破冲击波风险管理的重点在于采取措施削弱冲击波的强度; 而第二层次指标爆破设计参数 S_{12} 对冲击波超压及冲量大小 S_1 影响最大, 其次是隧道设计参数 S_{11} , 地质条件因素 S_{13} 影响最小, 因此钻爆法施工时应依据完整的项目资料, 选择合适的爆破参数, 设置可靠的起爆网络, 形成安全有效的施工方案, 同时在无法更改隧道设计截面及长度大小的情况下, 可综合使用增加壁面粗糙度、设置阻挡物或盆口等方法来消耗或分散冲击波能量, 达到快速削弱冲击波强度的目的; 第三层次指标一次爆破药量 S_{122} 对爆破设计参数 S_{12} 影响最大, 其次是炸药类型 S_{121} , 一次爆破药量直接影响冲击波初始能量大小以及超压峰值大小, 而不同炸药爆炸产生的冲击波衰减速率也不同, 因此选择合适的爆破药量及炸药类型, 不但可以获得满意的掌子面爆破效果, 也能控制冲击波的强度。

同时, 在施工阶段中现场安全管理 S_{22} 也很重要, 做好施工现场的清理和准备, 其中应重点把控撤离安全距离 S_{221} , 将人员撤离到安全位置可以有效避免人员受到冲击波伤害, 并制定好应急预案。爆破作业施工单位 S_{21} 除了有必要的施工资质 S_{212} 以外, 关键在于选择技术素养高 S_{211} 并且安全意识足够 S_{213} 的施工人员进行爆破作业, 各施工人员应严格遵守管理规定, 各司其职。

4 结论

(1) 结合实际工程和相关文献资料, 对隧道爆破冲击波影响因素进行了有效的风险识别, 建立了隧道钻爆法爆破冲击波风险评估指标体系。

(2) 将灰色关联度理论与模糊层次分析法相结合, 对隧道钻爆法爆破冲击波风险进行评估, 得到爆破冲击波风险等级, 评估结果与施工情况相符。

(3) 通过分析得到的评估结果可知, 爆破设计时应结合隧道资料, 选择合适的一次爆破药量, 并结合设置缓冲装置等防护措施, 来控制冲击波超压及冲量大小, 同时做好施工现场管理, 将人员撤离

至安全距离,从而降低隧道爆破冲击波风险。

(4) 本文使用的改进模糊层次分析法,将定性的问题定量化,能够做到对多因素模糊关系进行系统评价,为隧道钻爆法爆破冲击波风险评估提供一种合理有效的评估方法,可为相关工程提供参考。

参考文献(References)

- [1] 孟吉复,惠鸿斌. 爆破测试技术[M]. 北京:冶金工业出版社,1992. (Meng Jifu, Hui Hongbin. Blasting test technology [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1992. (in Chinese))
- [2] Smith P D, Vismeg P, Teo L C, et al. Blast wave transmission along rough-walled tunnels [J]. International Journal of Impact Engineering, 1998, 21(6): 419-432.
- [3] Benselama A M, William-Louis M J P, Monnoyer F. A 1D-3D mixed method for the numerical simulation of blast waves in confined geometries [J]. Journal of Computational Physics, 2009, 228(18): 6796-6810.
- [4] Benselama A M, William-Louis M J P, Monnoyer F, et al. A numerical study of the evolution of the blast wave shape in tunnels [J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, 181(1): 609-616.
- [5] Uystepuyst D, Monnoyer F. A numerical study of the evolution of the blast wave shape in rectangular tunnels [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2015, 34: 225-231.
- [6] 李玉民,胡峰. 井下爆破空气冲击波传播规律的量纲分析与拟合[J]. 矿冶工程, 1993, 13(2): 13-17. (Li Yuming, Hu Feng. The dimensional and regression analyses on the propagation regulation of air blast waves in mines [J]. Mining and Metallurgical Engineering, 1993, 13(2): 13-17. (in Chinese))
- [7] 庞伟宾,何翔,李茂生,等. 空气冲击波在坑道内走时规律的实验研究[J]. 爆炸与冲击, 2003, 23(6): 573-576. (Pang Weibin, He Xiang, Li Maosheng, et al. The formula for airblast time of arrival in tunnel [J]. Explosion and Shock Waves, 2003, 23(6): 573-576. (in Chinese))
- [8] 杨科之,杨秀敏. 坑道内化爆冲击波的传播规律[J]. 爆炸与冲击, 2003, 23(1): 37-40. (Yang Kezhi, Yang Xiumin. Shock waves propagation inside tunnels [J]. Explosion and Shock Waves, 2003, 23(1): 37-40. (in Chinese))
- [9] 宁鹏飞,唐德高. 自然通风隧道内爆炸冲击波传播特性研究[J]. 振动与冲击, 2012, 31(24): 172-176. (Ning Pengfei, Tang Degao. Blast shock wave propagation characteristics in a natural ventilation tunnel [J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(24): 172-176. (in Chinese))
- [10] 肖望,刘丹珠,吴新霞,等. 复杂隧道中爆炸冲击波传播特性的数值模拟[J]. 工程爆破, 2012, 18(1): 16-19. (Xiao Wang, Liu Danzhu, Wu Xinxia, et al. Numerical simulation of shock wave propagation in complicated tunnels [J]. Engineering Blasting, 2012, 18(1): 16-19. (in Chinese))
- [11] 张学民,周贤舜,王立川,等. 大断面隧道钻爆冲击波的衰减规律[J]. 爆炸与冲击, 2020, 40(2): 119-129. (Zhang Xueming, Zhou Xianshun, Wang Lichuan, et al. Attenuation of blast wave in a large-section tunnel [J]. Explosion and Shock Waves, 2020, 40(2): 119-129. (in Chinese))
- [12] 中华人民共和国铁道部. 铁路隧道风险评估与管理暂行规定(铁建设[2007]200号)[S]. 北京:中国铁道出版社, 2007. (Ministry of Railways of People's Republic of China. Interim provisions on risk assessment and management of railway tunnels (铁建设[2007]200号) [S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2007. (in Chinese))
- [13] 汪旭光,郑炳旭,张正忠,等. 爆破安全规程 GB6722-2014 [S]. 北京:中国标准出版社, 2015. (Wang Xuguang, Zheng Bingxu, Zhang Zhengzong, et al. Safety regulations for blasting (GB6722-2014) [S]. Beijing: Standards Press of China, 2015. (in Chinese))
- [14] 汪旭光,于亚伦,刘殿中. 爆破安全规程实施手册 [M]. 北京:人民交通出版社, 2004. (Wang Xuguang, Yu Yalun, Liu Dianzhong. Enforceable handbook of safety regulations for blasting [M]. Beijing: China Communication Press, 2004. (in Chinese))
- [15] 杨科之,刘盛. 空气冲击波传播和衰减研究进展 [J]. 防护工程, 2020, 42(3): 1-10. (Yang Kezhi, Liu Sheng. Progress of research on propagation and attenuation of air blast [J]. Protective Engineering, 2020, 42(3): 1-10. (in Chinese))
- [16] 范英,李辰,晋民杰,等. 三角模糊数和层次分析法在风险评价中的应用研究[J]. 中国安全科学学报, 2014, 24(7): 70-74. (Fan Ying, Li Chen, Jin Minjie, et al. Research on application of triangular fuzzy number and AHP in risk evaluation [J]. Chinese Journal of Safety Science, 2014, 24(7): 70-74. (in Chinese))
- [17] 吴波,吴昱芳,黄惟,等. 基于模糊综合判定法地铁深基坑施工安全风险评估[J]. 数学的实践与认识, 2020, 50(2): 179-187. (Wu Bo, Wu Yufang, Huang

- Wei, et al. Safety risk assessment of subway deep foundation pit construction based on fuzzy comprehensive judgment method [J]. Mathematics in Practice and Theory, 2020, 50 (2): 179-187. (in Chinese))
- [18] 吕跃进. 基于模糊一致矩阵的模糊层次分析法的排序[J]. 模糊系统与数学, 2002, 16(2): 79-85. (Lü Yuejin. Weight calculation method of fuzzy analytical hierarchy process [J]. Fuzzy Systems and Mathematics, 2002, 16 (2): 79-85. (in Chinese))
- [19] 侯福均, 吴祈宗. 模糊数互补判断矩阵的加性一致性[J]. 北京理工大学学报, 2004, 24(4): 367-372. (Hou Fujun, Wu Qizong. Additive consistency of fuzzy number complementary judgment matrix [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2004, 24(4): 367-372. (in Chinese))
- [20] 李立云, 刘政, 王兆辉. 基于灰色关联模型的改进型层次分析法与基坑风险评价[J]. 北京工业大学学报, 2018, 44(6): 889-896. (Li Liyun, Liu Zheng, Wang Zhaohui. Improved analytic hierarchy process based on gray correlation model and its application in pit engineering [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2018, 44(6): 889-896. (in Chinese))
- [21] 刘思峰, 谢乃明. 灰色系统理论及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2013. (Liu Sifeng, Xie Naiming. Grey system theory and its application [M]. Beijing: Science Press, 2013. (in Chinese))
- [22] 交通运输部工程质量监督局. 公路桥梁和隧道工程施工风险评估制度及指南解析[M]. 北京: 人民交通出版社, 2011. (Engineering Quality Supervision Bureau of Ministry of Transport. Analysis of construction risk assessment system and guide for highway, bridge and tunnel engineering [M]. Beijing: People's Communications Press, 2011. (in Chinese))
-
- (上接 2071 页)
- [9] 杨成忠, 吴宇健, 王威, 等. 大断面软岩隧道开挖空间效应影响分析[J]. 地下空间与工程学报, 2021, 17(2): 511-519. (Yang Chengzhong, Wu Yujian, Wang Wei, et al. Analysis on influence of spacial effect on excavation of soft rock tunnel with large cross section [J]. 2021, 17(2): 511-519. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2021, 17(2): 511-519. (in Chinese))
- [10] 李涛, 王益博, 郁志伟, 等. 变截面隧道开挖地表土体移动与沉降预测[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2020, 51(2): 433-444. (Li Tao, Wang Yibo, Yu Zhiwei, et al. Prediction of soil movement and settlement of excavated surface soil of variable section tunnel [J]. Journal of Central South University (Science and Technology Edition), 2020, 51(2): 433-444. (in Chinese))
- [11] 田古生. 软岩公路隧道加宽变截面施工力学行为研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2018. (Tian Gu-sheng. Study on the construction mechanics behavior of widening belt of soft rock highway tunnel [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2018. (in Chinese))
- [12] 陈彬. 八达岭长城站超大断面过渡段暗挖施工新技术[J]. 隧道建设(中英文), 2018, 38(增2): 261-267. (Cheng Bing. Mining excavation technology for super-large cross-section transition section of badaling great wall station [J]. Tunnel Construction, 2018, 38(Supp.2): 261-267. (in Chinese))
- [13] 何琼. 变截面交岔隧道开挖与支护衬砌力学行为研究[D]. 成都: 西华大学, 2012. (He Qiong. Study on the excavation and supporting lining mechanical behavior of variable section cross Tunnel [D]. Chengdu: Xihua University, 2012. (in Chinese))
- [14] 闫明超, 曾鹏, 何知思, 等. 超大断面隧道变截面段施工技术研究[J]. 铁道建筑, 2015(7): 43-45. (Yan Mingchao, Zeng Peng, He Zhi-si, et al. Study on construction technology of variable section of super large section tunnel [J]. Railway Engineering, 2015(7): 43-45. (in Chinese))
- [15] 郭文明. 公路超大断面隧道扁平率及施工方法优选研究[D]. 西安: 长安大学, 2012. (Guo Wenming. Study on span-ratio and construction method optimization of road tunnel with super-large cross-section [D]. Xi'an: Chang'an University, 2012. (in Chinese))