

基于粗糙集和风险矩阵的隧道施工塌方风险评估研究^{*}

乔晓青, 杨云

(四川文理学院 建筑工程学院, 四川 达州 635000)

摘要:从风险的本质出发,以风险发生可能性和风险后果两方面评估隧道塌方风险的影响程度。先选取隧道塌方可能性风险因素集,以粗糙集区分矩阵计算风险因素权重并进行属性约简,通过模糊综合决策确定风险因素的判断矩阵、权重和隶属度,以最大隶属度原则评估塌方风险可能性;再引用当量估计法确定隧道塌方风险后果评估模型,评估隧道塌方风险影响程度,并将该方法应用于实际工程。

关键词: 工程管理;隧道;塌方;风险评估;粗糙集;风险矩阵

中图分类号: U415.1

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2021)06-0162-06

作为隧道施工中主要风险事件之一,塌方严重威胁着人员、设备及周边环境的安全,对隧道塌方进行风险评估有着极其重要的现实意义。杨光等选取 10 项风险因子,引入云模型得到综合确定度,由最大综合确定度得到塌方风险分析结论。苏永华等应用粗糙集 Pawlak 属性与模糊重心理论计算权重,以正态分布作为各评价因素隶属函数,以最大隶属度确定风险等级。杨卓、时惠黎等建立熵权物元可拓模型,计算关联函数值及待评物元关联度确定塌方风险等级。翟友成等基于信息熵和层次分析法得到隧道塌方评价指标权重,以非线性模糊评判法对隧道塌方风险进行评估。何美丽等引入信息熵理论确定各指标权重,建立置信度识别准则评判风险。周建昆等编制公路隧道塌方事故树对底事件进行预估打分,得到顶事件发生的概率,最后通过重要度求解每个影响因素重要性大小,并提出改善措施。上述研究主要以风险发生可能性评估风险,并建立等级评估表,以信息熵、物元法和层次分析法等算法求出权重,应用最大隶属度原则确定指标值的高低来评估风险。周峰选取 6 项因素,采用模糊层次法对风险发生概率和风险发生损失进行估计。张晨曦、吕擎峰等采用层次分析法和多模糊决策确定隧道塌方的可能性,以当量估计法判断塌方风险的严重性,最后基于风险矩阵法确定隧道塌方风险等级。上述研究以风险事件发生概率和风险损失为指标来衡量风险,无论以模糊故障树还是层次分析法获得权重,都带有一定的主观性,采用信息熵的权重计算法则

可能出现非核属性大于核属性的现象。该文从风险的本质和内涵出发,通过粗糙集区分矩阵确定风险因素的客观权重,并进行属性约简得到新的风险可能性决策规则,通过模糊综合决策得到隧道塌方的可能性,结合当量估计法确定风险后果,以风险可能性和风险后果两指标评估隧道施工塌方风险影响程度,为隧道施工风险评估提供参考。

1 塌方风险影响程度评估方法

将隧道塌方事件看作一个系统,其中诸多风险因素相互影响和作用。由风险的本质出发,塌方风险影响程度用风险可能性和风险后果两指标来衡量,评估流程见图 1。

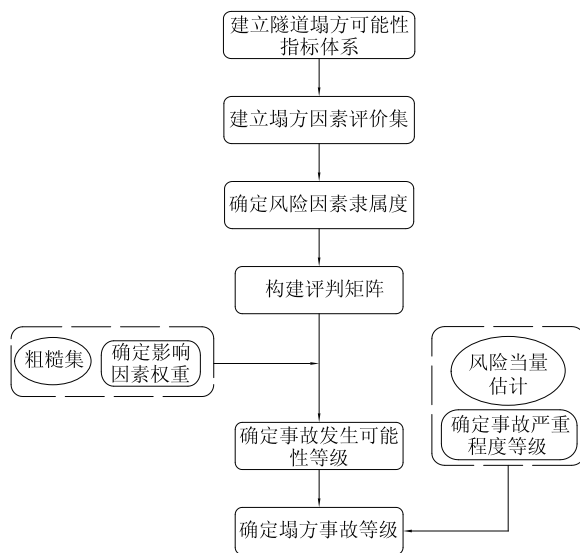


图 1 隧道塌方风险评估流程

^{*} 基金项目: 四川省教育厅项目(17ZB0374)

1.1 建立塌方风险可能性评估指标体系

隧道系统中众多因素可能导致塌方,且机制复杂,难以对每个因素进行分析。结合实际并参考相关研究成果,选取隧道塌方风险中最重要、影响最大的因素即围岩等级 BQ 值、跨度、地下水情况、埋深、偏压角、设计施工质量及施工工况(分别对应 c_1 、 c_2 、 c_3 、 c_4 、 c_5 、 c_6)建立塌方可能性影响因素集 C ,并依

据文献[4],将影响因素和塌方规模离散为 5 个等级。对易于量化的塌方因素,如围岩等级、跨度、埋深等,采用实测值作为塌方风险可能性参数代表值(见表 1);对不易量化的地下水情况、设计施工质量、施工工况等因素,以 Karwowski 推荐的模糊语言进行表述(见表 2)。

$$C = \{c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, c_6\} \quad (1)$$

表 1 隧道施工塌方可能性评估指标体系

塌方因素	指标分级标准				
	1	2	3	4	5
c_1	>550	451~550	351~450	250~350	≤ 250
c_2/m	≤ 7	7~10	10~12	12~15	>15
c_3	存在	少	丰富	充足	极丰富
c_4/m	>60	40~60	20~40	10~20	≤ 10
$c_5/(\circ)$	没有	存在	大	较大	严重
c_6	台阶法	全断面开挖	大断面	存在失误等	爆破扰动大
T/m^3	≤ 100	101~500	501~1 000	1 001~5 000	$>5 000$

注: T 为塌方量。

表 2 Karwowski 推荐的模糊隶属度函数值

模糊语言	模糊隶属度函数值						
很大	0.0	0.0	0.1	0.3	0.70	0.90	1.0
大	0.0	0.0	0.1	0.3	0.70	0.90	1.0
中等	0.0	0.2	0.7	1.0	0.70	0.20	0.0
或多或少	0.0	0.0	0.3	0.5	0.85	0.95	1.0
小	1.0	0.9	0.7	0.3	0.10	0.00	0.0

1.2 基于粗糙集的风险因素客观权重求解及约简

作为一种处理不确定性问题的方法,粗糙集理论常被用于求解分类指标的权重,该过程多依赖已有数据,客观性更强。

(1) 权重的确定。设有决策系统 $S = (U, C \cup D, V, f)$, 其中 U 为论域,是对象的一个非空有限集合, $U = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_n\}$; C 、 D 分别为条件、决策属性集, $A = C \cup D$, $C \cap D = \phi$, A 统称为属性集合; V 为所有属性值域; f 为信息函数,它给予各属性一个信息值。系统区分矩阵见式(2)。由于有 $c_{ij} = c_{ji}$ ($i, j = 1, 2, 3, \dots, n$), 实际应用中通常采用上三角或下三角部分表示区分矩阵。基于区分矩阵的属性重要度可表示为式(4)。对于任意 $b \in C$, 其权重可表示为式(6)。该方法可在一定程度上解决非核属性计算权重为零的问题。

$$M = (c_{ij})_{n \times n} = \begin{pmatrix} c_{11} & c_{12} & \cdots & c_{1n} \\ c_{21} & c_{22} & \cdots & c_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ c_{n1} & c_{n2} & \cdots & c_{nn} \end{pmatrix} \quad (2)$$

式中: $i, j = 1, 2, 3, \dots, n$; c_{ij} 按式(3)计算。

$$c_{ij} = \begin{cases} \{a \in C \mid f(x_i, a) \neq f(x_j, a)\} \\ (x_i, x_j) \notin IND(D) \\ \phi & (x_i, x_j) \in IND(D) \end{cases} \quad (3)$$

$$sig^M(a) = \frac{\sum_{i,j=1,2,3,\dots,n} c_{ij}(a)}{K} \quad (4)$$

式中: $c_{ij}(a)$ 按式(5)计算; K 为简化后区分矩阵中非空元素的个数。

$$c_{ij}(a) = \begin{cases} \frac{1}{|m_{ij}|} & \{a\} \cap m_{ij} \neq \phi \\ 0 & \{a\} \cap m_{ij} = \phi \end{cases} \quad (5)$$

式中: $|m_{ij}|$ 为非空元素 m_{ij} 中所含条件属性个数。

$$w(b) = \frac{sig(b)}{\sum_{a \in C} sig(a)} \quad (6)$$

(2) 属性的约简。对于任意条件属性 $a \in A$, 决策表 S 的区分矩阵是一个 $n \times n$ 矩阵, 其元素为 $\alpha^*(x, y)$, S 的区分函数定义见式(7)。经过属性约

简,能得到条件属性的决策规则。

$$\Delta^* = \bigwedge_{x,y \in U} \bigvee \alpha^*(x,y) \quad (7)$$

式中: Δ^* 为布尔逻辑公式; $\alpha^*(x,y)$ 为布尔变量。

1.3 模糊综合决策评判风险可能性

引起隧道塌方风险的可能性因素具有模糊不确定性,可使用模糊综合决策法对其进行评判。步骤如下:

(1) 建立决策评价集。设 $v = (v_1, v_2, v_3, \dots, v_n)$ 为风险可能性等级, n 为评语等级数,决策评语一般取为 4~5 级。结合风险矩阵评估法,建立 5 级评语集 $v_1 \sim v_5$, 分别为很不可能、可能性很小、偶尔、可能、很可能。

(2) 确定各因素的隶属度和判断矩阵。在隧道塌方研究中,隶属函数较多使用正态型、岭型、三角形和梯形等,虽然几种函数类型的隶属度和隶属度矩阵存在差异,但结论一致。模糊分析中,对于易于量化的风险因素,利用正态函数的一般形式作为初始函数[见式(8)]。接着对因素集内指标进行单因素评判,得到 c_i 和 v_n 的单因素评判矩阵 R_i , R 是考虑论域 U 到决策论域 V 的一种模糊关系。

$$u(x) = e^{-[(x-x_0)/c]^2} \quad (8)$$

式中:对于给定的模糊区间, x_0 为区间中点, $u(x_0) = 1$; $c = (a_1 - a_2)/1.66$; a_1 、 a_2 分别为该类指标区间边界值。

$$R_i = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{i1} & c_{i2} & \cdots & c_{in} \end{pmatrix} \quad (9)$$

式中: r_{st}^i 为 c_i 中第 s 个因素对评语 v_t 的隶属度, $r_{st}^i \in [0, 1]$; $1 \leq s \leq m, 1 \leq t \leq n$ 。

(3) 基于最大隶属度的综合评判。由粗糙集得到影响因素的权重,再由判断矩阵得到各因素在不同等级的隶属度,进而进行综合评判:

$$B = w(b) \circ R = (b_1, b_2, b_3, \dots, b_n) \quad (10)$$

$$b = \max(b_1, b_2, b_3, \dots, b_n) \quad (11)$$

式中: b_i 为 U 对评语 v_i 的隶属度; b 为最大隶属度,据此获得可能性评语。

1.4 风险损失程度指标的确定

塌方事件会造成多方面的损失,其度量单位不一样,假设所有损失类型发生的可能性一样,参考文献[19-21],从直接经济损失、伤亡人数、工期损失、环境和社会影响等 7 个方面确定风险后果的严重程度。以当量估计法评估风险损失程度,建立当量评估模型如下:

$$C = C_Z/300 + C_{R1} + C_{R2}/10 + C_{R3}/50 + C_G/30 + C_H/9 + C_S/9 \quad (12)$$

式中: C 为风险后果当量总值; C_Z 为直接经济损失; C_{R1} 为死亡人数; C_{R2} 为重伤人数; C_{R3} 为轻伤人数; C_G 为工期损失; C_H 为环境影响; C_S 为社会影响。

部分损失类型的分级取值见表 3。风险后果当量值通过专家评判确定。相对应地将隧道施工风险后果描述为 5 个等级(见表 4)。

表 3 工期损失、环境影响、社会影响的等级划分标准

风险后果	风险事件造成的损失		
	工期损失/月	环境影响值	社会影响值
非常严重	≥ 24	18	18
严重	6~24	13	13
中等	2~6	9	9
较大	0.5~2	5	5
轻微	< 0.5	2	2

表 4 隧道塌方后果评估等级标准

后果当量 C	风险后果	描述等级
≥ 20	非常严重	5
13~20	严重	4
5~13	中等	3
1~5	较大	2
< 1	轻微	1

1.5 确定塌方风险影响程度

利用风险矩阵法判断隧道塌方风险的最终影响程度,结果见表 5。

表 5 隧道塌方风险等级

概率等级	后果等级	轻微	较大	严重	很严重	灾难性
		1	2	3	4	5
很可能	5	高	高	很高	很高	很高
可能	4	中	中	高	很高	很高
偶然	3	中	中	中	高	很高
可能性很小	2	低	中	中	高	高
很不可能	1	低	低	中	中	高

同理,根据式(6)得到各属性的权重分别为 $w(c_1)=0.129\ 1$ 、 $w(c_2)=0.169\ 0$ 、 $w(c_3)=0.216\ 7$ 、 $w(c_4)=0.219\ 4$ 、 $w(c_5)=0.163\ 0$ 、 $w(c_6)=0.106\ 3$ 。由区分矩阵得到区分函数并对其进行属性约简,得:

$$\Delta^* = c_3 \wedge c_4 \wedge (c_2 \vee c_6) = \{c_2, c_3, c_4\}, \{c_3, c_4, c_6\}$$

根据属性约简结果,属性 $\{c_2, c_3, c_4\}$ 、 $\{c_3, c_4, c_6\}$ 与 $\{c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, c_6\}$ 的计算结果相同,实际工程中可根据数据获得的准确程度和难易程度,选择数据集 $\{c_2, c_3, c_4\}$ 或 $\{c_3, c_4, c_6\}$ 进行塌方风险可能性评估。

2.2 塌方风险可能性等级确定

以开挖跨度为例,根据隶属度函数构造方法,通过式(13)~(17)求出其隶属度为 $(0, 0, 0.925\ 7, 0.074\ 3, 0)$ 。同理,得到埋深的隶属度为 $(0, 0, 0.902\ 7, 0.097\ 3, 0)$ 。

$$u_1 = \begin{cases} 1 & x \leq 3.5 \\ e^{-[(x-3.5)/4.22]^2} & 3.5 < x \leq 7 \\ 1 - e^{-[(x-8.5)/1.81]^2} & 7 < x \leq 8.5 \end{cases} \quad (13)$$

$$u_2 = \begin{cases} 0 & x \leq 3.5 \text{ 或 } x \geq 11 \\ 1 - e^{-[(x-3.5)/4.22]^2} & 3.5 < x \leq 7 \\ e^{-[(x-8.5)/1.81]^2} & 7 < x \leq 10 \\ 1 - e^{-[(x-11)/1.20]^2} & 10 < x < 11 \end{cases} \quad (14)$$

$$u_3 = \begin{cases} 0 & x \leq 8.5 \text{ 或 } x \geq 13.5 \\ 1 - e^{-[(x-8.5)/1.81]^2} & 8.5 < x \leq 10 \\ e^{-[(x-11)/1.2]^2} & 10 < x \leq 12 \\ 1 - e^{-[(x-13.5)/1.81]^2} & 12 < x < 13.5 \end{cases} \quad (15)$$

$$u_4 = \begin{cases} 0 & x \leq 11 \text{ 或 } x \geq 22 \\ 1 - e^{-[(x-11)/1.2]^2} & 11 < x \leq 12 \\ e^{-[(x-13.5)/1.80]^2} & 12 < x \leq 15 \\ 1 - e^{-[(x-22)/9.04]^2} & 15 < x \leq 22 \end{cases} \quad (16)$$

$$u_5 = \begin{cases} 0 & x \leq 13.5 \\ 1 - e^{-[(x-13.5)/1.80]^2} & 13.5 < x \leq 15 \\ e^{-[(x-22)/9.04]^2} & 15 < x \leq 22 \\ 1 & x > 22 \end{cases} \quad (17)$$

定性指标由表2和表3获得其隶属度。由定性和定量指标的隶属度得到隶属度评判矩阵:

$$R = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0.3 & 0.6 & 0.7 \\ 0 & 0 & 0.925\ 7 & 0.074\ 3 & 0 \\ 0.7 & 0.8 & 0.5 & 0.3 & 0.1 \\ 0 & 0 & 0.902\ 7 & 0.097\ 3 & 0 \\ 0.6 & 0.8 & 0.6 & 0.4 & 0.1 \\ 0.7 & 0.5 & 0.3 & 0.1 & 0 \end{pmatrix}$$

由式(10)确定最终的模糊综合决策结果为:

$$B = w(b) \circ R = (0.323\ 9, 0.356\ 9, 0.631\ 2, 0.252\ 2, 0.128\ 3)$$

根据隶属度最大原则,石盘坡隧道分析断面风险发生的可能性为三级。

2.3 塌方风险后果等级确定

根据相关数据及专家调研结果,石盘坡隧道塌方风险损失期望均值为直接经济损失380万元、死亡2人、重伤3人、轻伤5人、工期损失40d、环境和社会影响较轻。根据式(12),后果当量C为:

$$C = 380/300 + 2 + 3/10 + 5/50 + 40/30 + 2/9 + 2/9 = 5.4$$

根据表4,风险后果损失为中等,风险后果等级为三级。

2.4 塌方风险影响程度的确定

隧道塌方风险影响程度由风险发生的可能性和后果两方面决定。分析断面处隧道塌方风险可能性为三级,塌方风险后果也为三级,由表5确定石盘坡隧道塌方风险为中等风险。根据该等级的风险影响,建议在施工中加强监测,采取降低风险的措施。

3 结论

(1) 根据风险的本质,风险的影响程度由不利事件发生的可能性和后果两方面评估确定,将这两方面同时考虑有助于提高隧道施工塌方风险评估的合理性和准确性。

(2) 相比于层次分析法,基于粗糙集求解属性权重更加客观合理。通过属性约简,得到新的决策规则。在实际隧道施工塌方风险评估中,可根据数据获得的准确程度和难易程度,选择其中一种决策属性进行风险可能性评估。

参考文献:

- [1] 刘辉,张智超,王林娟,等.2004—2008年我国隧道施工事故统计分析[J].中国安全科学学报,2010,20(1):96—100.
- [2] 郑艾辰,黄锋,林志,等.2008年至2016年我国隧道工程施工安全事故统计与分析[J].施工技术,2017(增刊1):833—836.
- [3] 杨光,刘墩文,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.
- [4] 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.
- [5] 杨卓,戎晓力,卢浩.基于熵权物元可拓理论的隧道塌方风险评估[J].安全与环境学报,2016,16(2):15—19.
- [6] 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.
- [7] 翟友成,胡云世,廖小辉,等.基于熵权的隧道塌方风险非线性模糊评判方法[J].安全与环境学报,2016,16(5):41—45.
- [8] 何美丽,刘霁,刘浪,等.隧道塌方风险评价的未确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):3667—3671.
- [9] 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.
- [10] 周峰.山岭隧道塌方风险模糊层次评估研究[D].长沙:中南大学,2008.
- [11] 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.
- [12] 吕擎峰,霍振升,赵本海,等.基于模糊层次和后果当量法的隧道塌方风险评估[J].隧道建设,2018(12):31—38.
- [13] 谭宗凤,徐章艳,王帅.一种改进的粗糙集权重方法[J].计算机工程与应用,2012(48):115—118.
- [14] 吴坚,梁昌勇,李文年.基于主观与客观集成的属性权重求解方法[J].系统工程与电子技术,2007(3):383—387.
- [15] 牟瑞芳.系统风险的概念及其计算方法[J].交通运输工程与信息学报,2012,10(2):6—11.
- [16] 陈洁金,周峰,阳军生,等.山岭隧道塌方风险模糊层次分析[J].岩土力学,2009,30(8):2365—2370.
- [17] 叶军,王磊.一种基于区分矩阵的属性组合权重构造方法[J].计算机科学,2014(11):273—277.
- [18] 苏永华,何满潮,孙晓明.岩体模糊分类中隶属函数的等效性[J].北京科技大学学报,2007,29(7):670—675.
- [19] 交通运输部工程质量监督局.公路桥梁和隧道工程施工安全风险评估制度及指南解析[M].北京:人民交通出版社,2011.
- [20] 中国中铁二院工程集团有限责任公司.铁路隧道风险评估与管理暂行规定:铁建设〔2007〕200号[A].北京:中国铁道出版社,2008.
- [21] 中华人民共和国建设部.地铁及地下工程建设风险管理指南[M].北京:中国建筑工业出版社,2007.
- [22] 刘科伟.公路隧道建造期塌方风险分析及控制的系统研究[D].长沙:湖南大学,2012.
- [23] 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.

收稿日期:2020—01—26

(上接第109页)

4 结语

汉口北枢纽互通实现了汉口北大道与武大高速公路的快捷联系,升级区域道路交通系统,对推动汉口北区域社会经济发展具有非常重大的意义。该互通控制因素多,设计难度较大。方案选择时,从服务水平、通行能力、占地、造价等多角度进行分析,层层递进,优化设计方案,合理确定互通总体方案。该互通方案研究过程可为类似复杂互通立交方案分析和设计提供一定参考。

参考文献:

- [1] 交通运输部公路司,中交第一公路勘察设计研究院有限公司.公路工程技术标准:JTG B01—2014[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2014.
- [2] 中交第一公路勘察设计研究院有限公司.公路路线设计规范:JTG D20—2017[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2017.

- [3] 中国公路工程咨询集团有限公司.公路立体交叉设计细则:JTG/T D21—2014[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2014.
- [4] 王义鑫,倪旭,温长鹏.成都天府国际机场高速 T1T2 互通立交总体方案研究[J].中外公路,2020,40(2):310—313.
- [5] 梁海文.特定复杂条件下枢纽互通式立交方案研究[J].中外公路,2018,38(4):333—336.
- [6] 曾骏,原二普.山区特大城市出口高速公路与城市快速通道衔接方案研究:以渝长高速公路扩能项目起点衔接方案为例[J].中外公路,2019,39(5):284—287.
- [7] 何禄诚,宁选杰,史刚雷.山区高速公路服务型异形互通方案研究[J].公路,2019(11):70—74.
- [8] 蔡晓萌,黎明,陈祺.杨泗港快速通道武昌青菱段芦湾湖立交的选型研究[J].中国市政工程,2020(2):6—8.
- [9] 谢琪.福州市二环路白湖亭立交工程方案研究[J].中外公路,2017,37(1):286—291.
- [10] 叶云,黄磊.高速公路多肢交汇枢纽互通交通设施设置研究[J].公路与汽运,2020(2):50—51.

收稿日期:2021—02—21