

公路高边坡施工安全风险动态评估研究

俞素平, 徐行军

(福建船政交通职业学院 道路工程系, 福建 福州 350007)

摘要: 为弥补现有高边坡安全风险评估方法的不足, 提高评估精度, 借鉴可拓学原理, 从风险事故发生的可能性和严重程度两个维度对高边坡施工安全风险进行动态评估。在量化风险评估等级标准的基础上, 建立高边坡施工安全风险评估的可拓物元模型, 通过关联函数计算各层评价指标与评估等级的关联度, 根据各指标的权重计算综合关联度, 以确定风险事故发生的可能性和严重程度等级及安全风险等级。最后, 将评估方法用于实例中, 分析结果可为采取相应的控制措施提供决策支持。

关键词: 公路高边坡; 安全风险; 动态评估; 可拓学理论; 关联度; 风险等级

中图分类号: U415.1

文献标志码: A

文章编号: 1672-4348(2015)01-0015-07

Dynamic assessment of construction safety risks for road high-slope

Yu Suping, Xu Xingjun

(Road Engineering Department, Fujian Chuanzheng Communication College, Fuzhou 350007, China)

Abstract: To improve the evaluation precision of road high-slope, the principle of extenics was employed to evaluate the security risk of high slope construction from the two dimensions of accidents risk likelihood and severity degree of the accident. Based on the quantitative evaluation grade of risk assessment, an extension matter-element model of high slope construction security risks was established. The correlation degree of each layer of evaluation index and evaluation grade was calculated in accordance with the weight of individual index to determine the accidents risk likelihood, the severity degree and the security risk grade. The results indicate that the evaluation model can contribute to the decision-making for taking appropriate control measures.

Keywords: road high slope; security risk; dynamic assessment; theory on extenics; correlation degree; risk grade

随着山区高等级公路建设的发展, 不可避免产生较多的高边坡。高边坡处理属于公路工程领域危险性较大工程, 是公路施工安全管理重点^①。为全面提升公路工程施工安全风险防控能力, 减少重特大生产安全事故的发生, 降低人员伤亡和经济损失, 保障公路高边坡工程建设的安全, 开展公路高边坡施工安全风险评估工作具有重要

的意义。

土质挖方边坡高度超过 20 m, 岩质挖方边坡高度超过 30 m 即为高边坡, 属于危险性较大的分部分项工程^[1]。公路高边坡工程施工主要包括边坡开挖、脚手架、边坡防护加固等作业活动, 不同的施工作业活动, 由于作业特点、环境条件、施工组织等致险因子有所不同, 导致其施工风险特

① 原交通部《公路水运工程安全生产监督管理办法》, 中华人民共和国交通部令, 2007 年第 1 号。

收稿日期: 2014-10-03

基金项目: 福建省交通运输科技发展计划项目(201334)

第一作者简介: 俞素平(1968-), 男(汉), 福建宁化人, 副教授、高级工程师, 硕士, 主要研究方向: 工程项目风险管理、公路工程管理。

点不同,风险的识别、分析与评价应贯穿于整个高边坡的施工过程中,进行动态评估。目前,不少学者对边坡的稳定性评价及安全风险评估进行了相关研究并取得了一定的成果^[2-5],但从风险事故发生的可能性和严重程度两个维度对高边坡施工安全风险的动态评估研究较少。

基于此,笔者以公路高边坡施工中的边坡开挖作业为例,以本质安全为出发点,建立高边坡开挖作业安全风险评估指标体系,基于可拓学理论建立安全风险评估等级物元模型,通过关联度的计算确定风险事故发生的可能性和严重程度等级,最终确定安全风险等级。

1 确定风险评估的分级标准

风险评估的方法和技术很多,风险矩阵法以其简洁、直观等优点被广泛应用^[6-7],本文也采用风险矩阵法来确定高边坡施工安全风险等级。

1.1 评估等级的量化

将风险事故发生的可能性等级分为不太可能、偶然、可能、很可能 4 级,风险事故的严重程度等级分为一般、较大、重大、特大 4 级,所对应的分数,如表 1。

表 1 评估等级量化标准

Tab. 1 Quantitative assessment standard of road high slope accident risks

等级	评分值范围			
	$Q \leq 40$	$40 < Q \leq 60$	$60 < Q \leq 80$	$80 < Q \leq 100$
可能性等级	不太可能	偶然	可能	很可能
严重程度等级	一般	较大	重大	特大

1.2 建立风险等级矩阵

根据事故发生可能性等级和严重程度等级,建立风险等级矩阵如表 2。

表 2 风险等级矩阵

Tab. 2 Road high slope security risk rating matrix

可能性等级	严重程度等级			
	一般	较大	重大	特大
很可能	高度Ⅲ	高度Ⅲ	极高Ⅳ	极高Ⅳ
可能	中度Ⅱ	高度Ⅲ	高度Ⅲ	极高Ⅳ
偶然	中度Ⅱ	中度Ⅱ	高度Ⅲ	高度Ⅲ
不太可能	低度Ⅰ	中度Ⅱ	中度Ⅱ	高度Ⅲ

2 基于可拓学理论的高边坡施工安全风险评估模型

2.1 可拓学基本理论

可拓学是由中国学者蔡文提出的一门原创性横断学科,它探讨事物拓展的可能性及开拓创新的规律与方法,以形式化模型处理矛盾问题,提供定性和定量相结合的可操作工具^[8]。

可拓学的基本理论是可拓论,包括基元理论、可拓集理论、可拓逻辑 3 大支柱。在可拓学中,为了形式化描述物、事和关系,建立了物元、事元和关系的概念,它们是可拓学的逻辑细胞,统称为基元。可拓集描述的是事物的可变性,它既可描述事物“是”与“非”的相互转化,又可描述事物具有某种性质的程度,即既可描述事物质变的过程,又可描述事物量变的过程。可拓集的提出,为把人们解决问题的过程定量化、形式化和理论化提供了理论依据。

1) 物元理论

根据可拓物元理论,把待评价事物 N 及特征 C 和特征的量值 V 构成的有序三元组 $R = (N, C, V)$ 称为待评价事物 N 的基本元,也称为一维物元, N, C, V 称为物元 R 的 3 要素。

如果事物 N 以其 n 个特征 C_1, C_2, \dots, C_n 和各个特征对应的量值 V_1, V_2, \dots, V_n 描述,则所构成的阵列:

$$R = \begin{bmatrix} N & C_1 & V_1 \\ & C_2 & V_2 \\ & \vdots & \vdots \\ & C_n & V_n \end{bmatrix} = (N, C, V)$$

称为 n 维物元。

2) 可拓集理论

(1) 可拓距

设 x 为实轴上的任一点, $X = \langle a, b \rangle$ 为实域上的任一区间,

$$\rho(x, X) = \left| x - \frac{a + b}{2} \right| - \frac{b - a}{2}$$

为点 x 与区间的距离,称为可拓距。其中 $\langle a, b \rangle$ 既可为开区间,也可为闭区间,也可为半开半闭区间。

可拓距概念的引入,可以把点与区间的位置关系用定量的形式精确刻划,使人们从“类内即为同”发展至类内也有程度区别的定量描述。

(2) 位值

在现实问题中,除了需要考虑点与区间的位置关系外,还经常要考虑一个点与两个区间的位置关系。

设 $X_0 = \langle a_0, b_0 \rangle, X = \langle a, b \rangle$, 且 $X_0 \subseteq X$, 则点 x 关于区间 X_0 和 X 组成区间套的位置规定为:

$$D(x, X_0, X) = \rho(x, X) - \rho(x, X_0)$$

式中, $D(x, X_0, X)$ 就描述了点 x 与 X_0 和 X 组成的区间套的位置关系。

(3) 初等关联函数的构造

根据可拓集理论,关联函数用来刻划论域中的元素具有某种性质的程度,能定量地、客观地表述元素具有某种性质的程度及其量变与质变的过程。

在实际问题中,论域 U 中一个对象关于某特征的量值符合程度往往有满意的区间 $X_0 = \langle a_0, b_0 \rangle$ 和可接受的区间 $X = \langle a, b \rangle$, 显然 $X \supset X_0$ 。对象关于某特征的量值在可接受区间 $\langle a, b \rangle$ 内,表示对象具有某种性质,其程度用 $(0, +\infty)$ 间的实数表示,这些对象构成可拓集的“正域”,即 $X = \langle a, b \rangle$ 。此时,称满意区间 $X_0 = \langle a_0, b_0 \rangle$ 为标准正域。

若选取的区间套由正域 X 和标准正域 X_0 构成,即 $X_0 = \langle a_0, b_0 \rangle, X = \langle a, b \rangle, X \supset X_0$, 且 X 和 X_0 无公共端点。设 $x \in X$, 即点 x 属于正域时,初等关联函数为:

$$k(x) = \frac{\rho(x, X_0)}{D(x, X_0, X)} \tag{1}$$

初等关联函数基本公式的建立,把“具有性质 P ”的事物从定性描述拓展至“具有性质 P 的程度”的定量描述,使问题关联度的计算不必依靠主观判断或统计,而是根据对事物关于某特征的量值要求的范围来确定,摆脱了主观判断造成的偏差。

2.2 可拓模型的构建

结合物元理论和可拓集理论,在量化各风险事故发生可能性和严重程度基础上,用物元来表示各个因素,并给出各因素权重,通过构造关联函数计算各层因素与风险评价等级的关联度来确定风险事故发生的可能性和严重程度等级,最终确定安全风险等级。

1) 确定标准正域、正域与待评物元模型

将事故发生可能性等级和严重程度等级分为

4 个等级,根据表 1 评估等级的量化标准,得到各级对应的标准正域为:1 级, $X_0 = \langle a_0, b_0 \rangle = \langle 0, 40 \rangle$; 2 级, $X_0 = \langle a_0, b_0 \rangle = \langle 40, 60 \rangle$; 3 级, $X_0 = \langle a_0, b_0 \rangle = \langle 60, 80 \rangle$; 4 级, $X_0 = \langle a_0, b_0 \rangle = \langle 80, 100 \rangle$; 正域为 $X = \langle a, b \rangle = \langle 0, 100 \rangle$ 。

标准正域 X_0 的物元模型为:

$$R_{0j} = \begin{bmatrix} N_j & C_1 & V_{1j} \\ & C_2 & V_{2j} \\ & \vdots & \vdots \\ & C_n & V_{nj} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N_j & C_1 & \langle a_{1j}, b_{1j} \rangle \\ & C_2 & \langle a_{2j}, b_{2j} \rangle \\ & \vdots & \vdots \\ & C_n & \langle a_{nj}, b_{nj} \rangle \end{bmatrix}$$

式中, N_j 表示所划分的等级 j ; C_i 表示各等级 N_j 的特征; $V_{ij} = \langle a_{ij}, b_{ij} \rangle$ 为各等级关于对应特征 C_i 的标准正域值 ($i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m$)。

则

$$\begin{aligned} R_{01} &= \begin{bmatrix} \text{一级 } N_1 & C_1 & \langle 0, 40 \rangle \\ & C_2 & \langle 0, 40 \rangle \\ & \vdots & \vdots \\ & C_n & \langle 0, 40 \rangle \end{bmatrix} \\ R_{02} &= \begin{bmatrix} \text{二级 } N_2 & C_1 & \langle 40, 60 \rangle \\ & C_2 & \langle 40, 60 \rangle \\ & \vdots & \vdots \\ & C_n & \langle 40, 60 \rangle \end{bmatrix} \\ R_{03} &= \begin{bmatrix} \text{三级 } N_3 & C_1 & \langle 60, 80 \rangle \\ & C_2 & \langle 60, 80 \rangle \\ & \vdots & \vdots \\ & C_n & \langle 60, 80 \rangle \end{bmatrix} \\ R_{04} &= \begin{bmatrix} \text{四级 } N_4 & C_1 & \langle 80, 100 \rangle \\ & C_2 & \langle 80, 100 \rangle \\ & \vdots & \vdots \\ & C_n & \langle 80, 100 \rangle \end{bmatrix} \end{aligned} \tag{2}$$

正域 X 的物元模型为:

$$R_P = \begin{bmatrix} N_P & C_1 & V_{1p} \\ & C_2 & V_{2p} \\ & \vdots & \vdots \\ & C_n & V_{np} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N_P & C_1 & \langle a_{1p}, b_{1p} \rangle \\ & C_2 & \langle a_{2p}, b_{2p} \rangle \\ & \vdots & \vdots \\ & C_n & \langle a_{np}, b_{np} \rangle \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N_P & C_1 & \langle 0, 100 \rangle \\ & C_2 & \langle 0, 100 \rangle \\ & \vdots & \vdots \\ & C_n & \langle 0, 100 \rangle \end{bmatrix} \tag{3}$$

式中, N_P 表示所划分等级的全体; $V_{ip} = \langle a_{ip}, b_{ip} \rangle$ 表示对应特征 C_i 的正域值。

对待评边坡 N , 把所收集到的统计数据或分析结果用物元 R_x 表示, 则称 R_x 为待评物元, 即

$$R_x = \begin{bmatrix} N & C_1 & x_1 \\ & C_2 & x_2 \\ & \vdots & \vdots \\ & C_n & x_n \end{bmatrix}$$

$$k_j(x_i) = \frac{\rho(x_i, X_0)}{D(x_i, X_0, X)} = \frac{\rho(x_i, X_0)}{\rho(x_i, X) - \rho(x_i, X_0)} = \frac{\left| x_j - \frac{a_0 + b_0}{2} \right| - \frac{1}{2}(b_0 - a_0)}{\left| x_i - \frac{a + b}{2} \right| - \frac{1}{2}(b - a) - \left[\left| x_i - \frac{a_0 + b_0}{2} \right| - \frac{1}{2}(b_0 - a_0) \right]} \quad (4)$$

3) 计算综合关联度及确定评定等级
设评价指标 C_i 的权重为 w_i , 则待评边坡等级 j 的综合关联度为:

$$k_j(N) = \sum_{i=1}^n w_i \cdot k_j(x_i) \quad (5)$$

采用最大隶属度原则, 若 $k_j = \max k_j(N)$, 则评定对象 N 所属等级为 j 级。

3 实例分析

3.1 实例评估指标体系建立

福建漳州华安(玉兰)至新圩段高速公路 A4 合同段 Z4K23+920~ZK24+070 段为深挖路堑, 边坡最大高度 35.8 m, 采取浆砌片石护面墙、TBS 挂网植草、锚索框架植草综合防护措施。本线路区第 4 系地层岩性主要为残、坡积层(Qel)、(Qdl), 主要有坡残积粘性土、砂质粘性土等; 第 4 系全新统长乐组冲、洪积层(Q4al)、(Q4pl), 主要为一般粘性土、砂类土、卵砾石类土。基岩主要为: 中生界的三叠系的沉积岩及火山岩, 燕山期侵入岩和火山岩。根据风险动态评估的要求, 需依次在边坡开挖、脚手架、边坡防护加固作业活动开展施工安全风险评估。现以边坡开挖作业为例, 说明风险评估过程。

高边坡工程施工安全事故主要为坍塌、高处坠落、火药爆炸、物体打击、车辆伤害和机械伤害, 导致事故发生的主要原因为物的不安全状态、人的不安全行为及施工管理缺陷。在总结已有成果的基础上, 结合公路边坡特点及破坏机制, 以本质安全为出发点, 从安全管理、施工现场环境、施工作业工艺技术 3 方面对施工安全风险进行归类、识别, 建立了包含 3 个一级指标和 13 个二级指标

式中: N 为某一具体边坡; x_i 为 N 关于评价指标 C_i 的量值, 即待评边坡 N 的具体指标等级分值, 在表 1 评估等级的量化标准中取定。

2) 确定各评价指标的关联度

根据式(1)得到待求边坡各评价指标关联度的计算公式为:

的高边坡开挖作业安全风险评估指标体系, 如表 3 所示。

表 3 高边坡开挖作业安全风险评估指标体系

Tab.3 The assessment index system of road high slope excavation safety risks

一级指标 (主准则层)	二级指标(次准则层)
安全管理 U_1	施工企业资质 U_{11} ; 施工人员素质及安全
	管理人员配备 U_{12} ; 安全投入 U_{13} ; 机械设 备配置及管理 U_{14} ; 专项施工方案 U_{15}
施工 现场 环 境 U_2	原始地形地貌 U_{21} ; 边坡岩体性质 U_{22} ; 边 坡土体性质 U_{23} ; 边坡结构形态(坡高、坡 度及坡形) U_{24} ; 施工季节降雨量 U_{25}
施工作业工艺 技术 U_3	边坡监测情况 U_{31} ; 开挖工艺 U_{32} ; 弃渣运 输 U_{33}

3.2 风险分析

3.2.1 确定评估因素集

在表 3 的基础上, 建立高边坡开挖作业安全风险评估因素集:

$$U = \{U_1, U_2, U_3\};$$

$$U_1 = \{U_{11}, U_{12}, U_{13}, U_{14}, U_{15}\};$$

$$U_2 = \{U_{21}, U_{22}, U_{23}, U_{24}, U_{25}\};$$

$$U_3 = \{U_{31}, U_{32}, U_{33}\}。$$

3.2.2 确定权重

请专家分别应用层次分析法确定各级指标权重, 在综合考虑专家自身权重后, 得到各级指标的最终权重^[9], 如表 4 所示。

表 4 指标权重及评估分值

Tab.4 Road high scope index weight and score				
主准则层 (一级指标)	一级指 标权重	次准则层 (二级指标)	二级指 标权重	专家评分(Q)
				风险发生可能性 事故严重程度
U ₁	0.2563	U ₁₁	0.142 6	43 55
		U ₁₂	0.312 2	46 44
		U ₁₃	0.172 4	43 52
		U ₁₄	0.162 3	45 44
		U ₁₅	0.210 5	45 46
U ₂	0.4526	U ₂₁	0.063 0	44 62
		U ₂₂	0.082 0	43 66
		U ₂₃	0.313 2	64 73
		U ₂₄	0.273 6	64 76
		U ₂₅	0.268 2	70 77
U ₃	0.2911	U ₃₁	0.321 4	65 70
		U ₃₂	0.425 3	64 68
		U ₃₃	0.253 3	40 54

3.2.3 风险估计

同时,请专家对风险发生可能性和事故严重程度估计,根据表 1 的量化标准,结合项目现场实际情况打分,结果见表 4。

3.2.4 风险发生可能性综合分析

以施工作业工艺技术 U₃ 为例说明分析过程。

1) 计算关联度

根据式(2)、(3)和(4)得出:

$$R_{01} = \begin{bmatrix} \text{一级 } N_1 & \text{边坡监测情况 } U_{31} & \langle 0,40 \rangle \\ & \text{开挖工艺 } U_{32} & \langle 0,40 \rangle \\ & \text{弃渣运输 } U_{33} & \langle 0,40 \rangle \end{bmatrix}$$

$$R_{02} = \begin{bmatrix} \text{二级 } N_1 & \text{边坡监测情况 } U_{31} & \langle 40,60 \rangle \\ & \text{开挖工艺 } U_{32} & \langle 40,60 \rangle \\ & \text{弃渣运输 } U_{33} & \langle 40,60 \rangle \end{bmatrix}$$

$$R_{03} = \begin{bmatrix} \text{三级 } N_1 & \text{边坡监测情况 } U_{31} & \langle 60,80 \rangle \\ & \text{开挖工艺 } U_{32} & \langle 60,80 \rangle \\ & \text{弃渣运输 } U_{33} & \langle 60,80 \rangle \end{bmatrix}$$

$$R_{04} = \begin{bmatrix} \text{四级 } N_1 & \text{边坡监测情况 } U_{31} & \langle 80,100 \rangle \\ & \text{开挖工艺 } U_{32} & \langle 80,100 \rangle \\ & \text{弃渣运输 } U_{33} & \langle 80,100 \rangle \end{bmatrix}$$

$$R_p = \begin{bmatrix} \text{风险发生可能性 } N_p & \text{边坡监测情况 } U_{31} & \langle 0,100 \rangle \\ & \text{开挖工艺 } U_{32} & \langle 0,100 \rangle \\ & \text{弃渣运输 } U_{33} & \langle 0,100 \rangle \end{bmatrix}$$

$$k_1(U_{31}) = \frac{\left| 65 - \frac{0 + 40}{2} \right| - \frac{1}{2}(40 - 0)}{\left| 65 - \frac{0 + 100}{2} \right| - \frac{1}{2}(100 - 0) - \left[\left| 65 - \frac{0 + 40}{2} \right| - \frac{1}{2}(40 - 0) \right]} = -0.4167$$

$$k_2(U_{31}) = \frac{\left| 65 - \frac{40 + 60}{2} \right| - \frac{1}{2}(60 - 40)}{\left| 65 - \frac{0 + 100}{2} \right| - \frac{1}{2}(100 - 0) - \left[\left| 65 - \frac{40 + 60}{2} \right| - \frac{1}{2}(60 - 40) \right]} = -0.1250$$

$$k_3(U_{31}) = 0.1667 \quad k_4(U_{41}) = -0.3000$$

其他各指标的关联度如表 5 所示。

表 5 二级指标层各指标的关联度表

Tab.5 Correlation degree of individual index in secondary index layer

一级指标	二级指标	风险发生可能性				事故严重程度			
		1 级	2 级	3 级	4 级	1 级	2 级	3 级	4 级
U_1	U_{11}	-0.065 2	0.075 0	-0.283 3	-0.462 5	-0.250 0	0.125 0	-0.100 0	-0.357 1
	U_{12}	-0.115 4	0.150 0	-0.233 3	-0.425 0	-0.083 3	0.100 0	-0.266 7	-0.450 0
	U_{13}	-0.065 2	0.075 0	-0.283 3	-0.462 5	-0.200 0	0.200 0	-0.142 9	-0.368 4
	U_{14}	-0.100 0	0.125 0	-0.250 0	-0.437 5	-0.083 3	0.100 0	-0.266 7	-0.450 0
	U_{15}	-0.100 0	0.125 0	-0.250 0	-0.437 5	-0.115 4	0.150 0	-0.233 3	-0.425 0
U_2	U_{21}	-0.083 3	0.100 0	-0.266 7	-0.450 0	-0.366 7	-0.050 0	0.055 6	-0.321 4
	U_{22}	-0.065 2	0.075 0	-0.283 3	-0.462 5	-0.433 3	-0.150 0	0.214 3	-0.291 7
	U_{23}	-0.400 0	-0.100 0	0.125 0	-0.307 7	-0.550 0	-0.325 0	0.350 0	-0.205 9
	U_{24}	-0.400 0	-0.100 0	0.125 0	-0.307 7	-0.600 0	-0.400 0	0.200 0	-0.142 9
	U_{25}	-0.500 0	-0.250 0	0.500 0	-0.250 0	-0.616 7	-0.425 0	0.150 0	-0.115 4
U_3	U_{31}	-0.416 7	-0.125 0	0.166 7	-0.300 0	-0.500 0	-0.250 0	0.500 0	-0.250 0
	U_{32}	-0.400 0	-0.100 0	0.125 0	-0.307 7	-0.466 7	-0.200 0	0.333 3	-0.272 7
	U_{33}	0.000 0	0.000 0	-0.333 3	-0.500 0	-0.233 3	0.150 0	-0.115 4	-0.361 1

2)综合关联度计算

由表 4 和表 5 可知:

$W_3 = [0.321\ 4\ \ 0.425\ 3\ \ 0.253\ 3]$

$$R_3 = \begin{bmatrix} -0.416\ 7 & -0.125 & 0.166\ 7 & -0.3 \\ 0.4 & -0.1 & 0.125 & -0.307\ 7 \\ 0 & 0 & -0.333\ 3 & -0.5 \end{bmatrix}$$

指标 U_3 的综合关联度为:

$B_3 = W_3 \cdot R_3 = [0.321\ 4\ \ 0.425\ 3\ \ 0.253\ 3] \cdot$

$$\begin{bmatrix} -0.416\ 7 & -0.125 & 0.166\ 7 & -0.3 \\ 0.4 & -0.1 & 0.125 & -0.307\ 7 \\ 0 & 0 & -0.333\ 3 & -0.5 \end{bmatrix} =$$

$[0.036\ 2\ \ -0.082\ 7\ \ 0.022\ 3\ \ -0.353\ 9]$

同理,可得到指标 U_1 、 U_2 的综合关联度,即:

$$B = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \end{bmatrix} =$$
$$\begin{bmatrix} -0.093\ 8 & -0.117\ 1 & -0.255\ 3 & -0.441\ 5 \\ -0.397\ 4 & -0.113\ 3 & 0.167\ 4 & -0.313\ 9 \\ 0.036\ 2 & -0.082\ 7 & 0.022\ 3 & -0.353\ 9 \end{bmatrix}$$

根据表 4 可知 U_1 、 U_2 和 U_3 的权重,并得到风险发生可能性等级的综合关联度:

$A_p = W \cdot B = [0.256\ 3\ \ 0.452\ 6\ \ 0.291\ 1] \cdot$

$$\begin{bmatrix} -0.093\ 8 & 0.117\ 1 & -0.255\ 3 & -0.441\ 5 \\ -0.397\ 4 & -0.113\ 3 & 0.167\ 4 & -0.313\ 9 \\ 0.036\ 2 & -0.082\ 7 & 0.022\ 3 & -0.353\ 9 \end{bmatrix} =$$

$[-0.185\ 2\ \ -0.045\ 3\ \ 0.016\ 8\ \ -0.358\ 2]$

3)评价结果

根据最大隶属度原则,该边坡风险发生可能性等级为 3 级。其中安全管理因素、施工现场环境因素、施工作业工艺技术因素可能性等级分别为 2 级、3 级和 1 级。

3.2.5 风险发生事故严重程度综合分析

用同样的方法可得到风险发生事故严重程度等级的综合关联度为:

$A_c = W \cdot B = [0.256\ 3\ \ 0.452\ 6\ \ 0.291\ 1] \cdot$

$$\begin{bmatrix} -0.133\ 9 & 0.131\ 3 & -0.214\ 6 & -0.417\ 4 \\ -0.560\ 5 & -0.340\ 7 & 0.225\ 6 & -0.178\ 7 \\ -0.418\ 3 & -0.127\ 4 & 0.273\ 2 & -0.287\ 8 \end{bmatrix} =$$

$[-0.409\ 8\ \ -0.157\ 6\ \ 0.126\ 7\ \ -0.271\ 6]$

根据最大隶属度原则,该边坡风险发生事故严重程度等级为 3 级。其中安全管理因素、施工现场环境因素、施工作业工艺技术因素事故严重程度等级分别为 2 级、3 级和 3 级。

3.3 风险等级确定

根据表 2 的风险等级矩阵,可确定该边坡总体风险等级为Ⅲ级,属于高度风险,为不期望出现的风险,应当采取风险应对措施降低总体风险。其中安全管理因素风险等级为Ⅱ级,属于中度风险;施工现场环境因素风险等级为Ⅲ级,属于高度风险;施工作业工艺技术因素风险等级为Ⅱ级,属于中度风险。

3.4 建议

结合分析结果,在边坡开挖作业过程中,重点

采取以下风险控制措施:

1)根据设计文件、工程地质条件,结合设计资料提供的边坡稳定性评价成果,判断边坡岩土体的变形破坏模式、施工过程中发生失稳的可能性以及影响因素,做到施工前心中有数。

2)加强边坡动态监测,掌握变形趋势,遵循“边探边挖,不探不挖”的原则,采取动态设计、动态施工方法,随时掌握边坡变形发展情况,为确定治理方案提供依据。

3)边坡施工应严格按照自上而下分级进行的原则,开挖一级,防护一级,严禁立体交叉作业。

4 结语

1)结合可拓学的物元理论和可拓集理论,在量化风险事故发生可能性和严重程度评估等级的基础上,建立高边坡施工安全风险评估的可拓物元模型,通过关联函数计算各层评价指标与评估

等级的关联度。然后,根据各指标的权重计算综合关联度,以确定风险事故发生的可能性和严重程度等级,并用风险矩阵法最终确定安全风险等级。该方法将风险事故发生可能性和严重程度从定性描述拓展到定量描述,摆脱了主观判断造成的偏差,提高风险评估精度,更好地反映风险的实际状况。

2)实例分析时,以本质安全为出发点,以边坡开挖作业为切入点,从安全管理、施工现场环境、施工作业工艺技术3个方面对施工安全风险进行归类、识别,建立了评估体系。然后,应用该方法从风险事故发生的可能性和严重程度两个维度对安全风险进行动态评估,得到该边坡开挖作业阶段各影响因素风险发生可能性和事故严重程度等级及总体风险等级。评估结果可为采取相应的风险控制措施提供决策支持。

参考文献:

- [1] 交通运输部工程质量监督局.公路水运工程施工安全标准化指南[M].北京:人民交通出版社,2013.
- [2] 巨能攀,赵建军,邓辉,等.公路高边坡稳定性评价及支护优化设计[J].岩石力学与工程学报,2009,28(6):1152-1161.
- [3] 陈洪凯,唐红梅,崔志波,等.公路高边坡地质安全与减灾[M].北京:科学出版社,2010.
- [4] 林孝松.公路边坡安全评价集对分析模型研究[J].西南师范大学学报:自然科学版,2011,36(6):28-33.
- [5] 刘书军.山区公路边坡安全评价方法研究[D].重庆:重庆交通大学,2012.
- [6] 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.
- [7] 中华人民共和国住房和城乡建设部,中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局.GB 50652-2011城市轨道交通地下工程建设风险管理规范[S].上海:光明日报出版社,2011.
- [8] 扬春燕,蔡文.可拓学[M].北京:科学出版社,2014.
- [9] 俞素平,李素梅.基于集对分析的隧道设计安全风险评估研究[J].重庆交通大学学报:自然科学版,2014,33(8):38-43.

(责任编辑:陈雯)