

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2024.06.010

# 基于模糊物元分析的拓宽路堤施工安全评估

王明全<sup>1</sup>, 张高阳<sup>2</sup>, 林颖<sup>1</sup>

(1. 厦门路桥百城建设投资有限公司, 福建 厦门 361000; 2. 中交第二航务工程局有限公司, 武汉 湖北 430048)

**摘要:** 为有效控制拓宽路堤高边坡施工风险, 基于模糊物元分析法提出一种施工安全评估模型。首先, 针对拓宽路堤施工的工程特点, 构建包括4个一级指标(诱发因素、交通组织、施工环境、施工设计)和11个二级指标(施工季节、自然灾害影响、交通量、交通布控与导改、施工周边环境、原边坡变形、填方高度、地基处理、加固方式、设计资料完整性、施工机械)的安全风险评估指标体系。其次, 采用层次分析法和熵权法(EWM)分别计算一级和二级指标的权重。最后, 运用模糊物元分析法构建拓宽路堤施工安全风险评估模型, 并将其应用于实际工程当中, 通过对比验证了模型的有效性。结果表明: 该模型能够有效评估拓宽路堤高边坡施工的整体安全风险。

**关键词:** 拓宽路堤; 风险评估; 改进的层次分析法; 熵权法; 模糊物元分析

中图分类号: U416.12

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2024)06-0068-08

## Safety Assessment of Widening Embankment Construction Based on Fuzzy Object Element Analysis

WANG Mingquan<sup>1</sup>, ZHANG Gaoyang<sup>2</sup>, LIN Ying<sup>1</sup>

(1. Xiamen Road and Bridge Baicheng Construction Investment Co., Ltd., Xiamen, Fujian 361000, China;

2. CCCC Second Navigation Engineering Bureau, Wuhan, Hubei 430048, China)

**Abstract:** In order to effectively control the construction risk of widening embankment high slope, this work proposed a construction safety assessment model based on fuzzy object element analysis. Firstly, for the engineering characteristics of widening embankment construction, a safety risk assessment index system including 4 first-level indicators (triggering factors, traffic organization, construction environment, construction design) and 11 second-level indicators (construction season, natural disaster impact, traffic volume, traffic control and guided change, construction surrounding environment, deformation of the original slope, fill height, foundation treatment, reinforcement method, completeness of design data, construction machinery) is constructed. Secondly, hierarchical analysis and entropy weight method (EWM) were used to calculate the weights of primary and secondary indicators respectively. Finally, a safety risk assessment model for widening embankment construction was constructed by using fuzzy object element analysis, and it was then applied to actual engineering examples to verify the effectiveness of the model through comparison. The results show that the model can effectively assess the overall safety risk of widening embankment high slope construction.

**Keywords:** widening of embankments; risk assessment; improved hierarchical analysis; entropy weighting; fuzzy object meta-analysis

近年来,随着我国交通运输快速发展,原有公路已不能满足交通需求。因此,对不满足交通需求公路进行扩建已逐渐成为我国重点建设任务。对于地势起伏地区会出现大量高填路堤,在对公路进行拓宽施工时,路堤高边坡施工不可避免。例如,在漳龙高速公路扩建工程中,路堤高度超过20 m的路段多

达29处。在对路堤高边坡施工时,一旦发生安全事故,势必会对人身和财产造成严重损失。因此,在公路拓宽工程中,路堤高边坡施工的安全控制至关重要,在施工前对其进行安全风险评估更是尤为重要。

目前,许多学者对路堤高边坡安全风险评估进行了研究,并取得了较为丰硕的成果,如交通运输部

收稿日期:2024-06-17

修稿日期:2024-09-03

基金项目:福建省自然科学基金面上项目(2023J011133)

作者简介:王明全(1984—),男,高级工程师,主要从事项目管理等方面工作。E-mail:2757618349@qq.com

出台了《高速公路路堑高边坡过程安全风险评估指南》<sup>[1]</sup>(以下简称“指南”),用于指导高边坡施工,而由于指南研究对象是新建边坡,对拓宽边坡施工没有针对性,且指南方法为了操作简单化采用专家调查法和指标体系法,结果主观性较强;吴忠广等<sup>[2]</sup>根据高边坡施工安全管理失误传递路径确定施工安全风险传递路径,进行了风险源辨识分析并构建了高边坡总体风险评估指标体系,建立了总体风险评估模型;祁海军等<sup>[3]</sup>针对我国高寒高海拔地区边坡施工特点,建立了评估模型,并与指南进行对比验证;罗竞等<sup>[4]</sup>分析了指南方法存在的不足,并对其进行优化;刘舒逸等<sup>[5]</sup>针对岩质边坡施工安全性评价问题,提出了一种基于嵌套型优势关系粗糙集与模糊理论的风险评价分析方法;Zhang 等<sup>[6]</sup>为解决施工过程中边坡安全性的实时评价,提出了一种将边坡安全建设进展与边坡安全数值分析相结合的实时安全评价方法;Huang 等<sup>[7]</sup>为解决高速铁路高边坡施工安全风险问题,从风险技术规范、文献分析、案例统计分析 3 个维度对高边坡施工安全风险进行识别,并开发了高铁高边坡安全风险评估模型对滑坡定性风险评价进行了研究,主要考虑了各个风险因素的详细程度和复杂性排序;Lin 等<sup>[8]</sup>基于指数重要性排序开发了一种新的公路建设风险评估系统,用于边坡施工风险的不确定评估。此外,部分学者针对改扩建工程也进行了相应的研究,如钟元庆<sup>[9]</sup>针对拓宽山区高速公路高边坡工程特点,根据集对分析方法建立施工安全风险评估模型,并将该模型运用到工程实例中;刘阳毅等<sup>[10]</sup>针对改扩建路堤施工特点,提出基于指标体系法的改扩建路堤高边坡施工安全风险评估。

上述针对高边坡施工安全风险评估的研究存在三方面问题:① 目前研究主要针对新建边坡,对拓宽路堤研究较少;② 传统的层次分析法一致性检验不易通过;③ 大部分研究都是基于指南推荐的指标体系法,而施工安全风险具有不确定性和模糊性,类似于指标体系法并不能很好体现这一点。因此,本文通过对拓宽路堤施工特点进行分析,将指标分为 4 大类,由此将建立更全面的拓宽路堤施工安全风险评估指标体系,采用改进后的层次分析法解决一致性检验不通过的问题用以计算一级指标权重,熵权法<sup>[11-13]</sup>计算二级指标权重,并结合模糊物元分析对拓宽路堤施工安全风险进行评估,以此构建一个更加客观准确的风险评估模型。

## 1 安全评估指标体系

针对拓宽路堤高边坡施工的特点,选取诱发因

素、交通组织<sup>[14-15]</sup>、施工环境和施工设计 4 个主要影响因素作为一级评估指标。在一级指标基础上细化得到 11 个二级指标<sup>[10]</sup>,构建路堤高边坡施工安全风险评估体系。建立如图 1 所示的拓宽路堤高边坡施工安全风险评估指标体系。

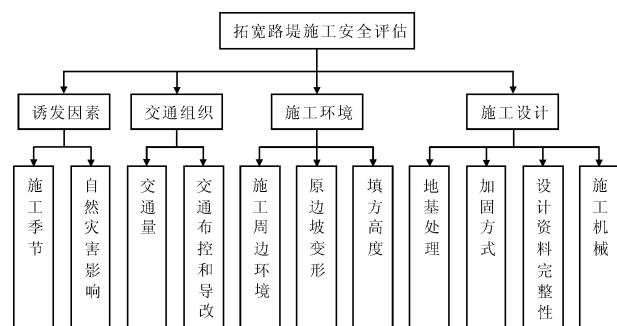


图 1 拓宽路堤施工安全风险评估指标体系

## 2 安全评估指标权重确定

### 2.1 改进的 AHP 法计算权重

一级指标共有 4 个影响因素,由于评估对象不多且对精度要求较高,因此采用层次分析法来确定各级指标权重系数。邀请专家对照 0~9 标度表对各个指标进行两两比较确定重要性程度,形成专家判断矩阵  $M$ 。

传统的层次分析法得到专家判断矩阵后,需要对其进行一致性检验,检验公式为:

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (1)$$

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (2)$$

式中: $\lambda_{\max}$  为专家判断矩阵最大特征根; $n$  为唯一非零特征根; $CI$  为一致性指标; $RI$  为随机一致性指标; $CR$  为一致性比率(相对性一致性指标)。

平均随机一致性指标如表 1 所示。

表 1 平均随机一致性指标

阶数	3	4	5	6	7	8	9	10
$RI$	0.52	0.89	1.12	1.26	1.36	1.41	1.46	1.49

根据公式(1)和公式(2)以及平均随机一致性指标  $RI$ (表 1)得到相对性一致指标  $CR$ 。当  $CR < 0.1$  时,判断矩阵的一致性是可以接受的。

记  $M = [a_{ij}] (i, j = 1, 2, \dots, n)$  为专家判断矩阵,根据层次分析法原理,可知矩阵  $M$  为互反矩阵,即  $a_{ij} = a_{ji}^{-1}$ 。在实际过程中,专家对各个指标进行两两重要性比较得到的专家判断矩阵往往是不满足一致性检验的。为了解决这一问题,根据一个指标与

所有指标的比较结果得到完整的专家判断矩阵。由此可以得到  $n$  个一致性矩阵,记为  $M_i$ 。再用特征向量法求出每一个一致性矩阵所对应的指标权重向量  $W_i = (W_{i1}, W_{i2}, \dots, W_{in})^T$ ,最后根据公式(3)得到一级指标的权重。

$$W = \begin{bmatrix} W_{11} & W_{12} & \dots & W_{1n} \\ W_{21} & W_{22} & \dots & W_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ W_{n1} & W_{n2} & \dots & W_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1/n \\ 1/n \\ \vdots \\ 1/n \end{bmatrix} = (W_1, W_2, \dots, W_n) \quad (3)$$

## 2.2 熵权法(EWM)计算权重

熵权法是以信息熵作为计算指标的工具,信息是系统有序程度的一个度量,根据信息熵的定义,可以通过熵值来判断某项指标的离散程度。熵值越小,表明该指标的离散程度越大,该指标在综合评价中的影响(即权重)越大。如果某项指标的值完全相同,则该指标在综合评价中无作用。因此,信息熵可以作为计算各指标权重的工具,为多指标综合评价提供依据。

采用熵权法对二级指标权重系数进行简化,并通过增加专家信心指数来提高二级指标权重系数的精度。拓宽路堤高边坡施工安全风险评估共有 11 个二级指标,邀请专家对 11 个二级指标重要性进行打分,每个指标的分值为 1~100,分值越高表明该指标在路堤高边坡施工安全风险评估中越重要。

将得到的专家评分数据标准化,对于数据标准化处理,计算公式如下:

$$Y_{ij} = \frac{X_{ij} - \min(X_i)}{\max(X_i) - \min(X_i)} \quad (\text{正向指标}) \quad (4)$$

$$Y_{ij} = \frac{\max(X_i) - X_{ij}}{\max(X_i) - \min(X_i)} \quad (\text{反向指标}) \quad (5)$$

式中: $X_{ij}$ 为专家评分对应矩阵的值; $Y_{ij}$ 为标准化后对应的值; $\max(X_i)$ 和 $\min(X_i)$ 分别为专家对同一指标评分的最大值和最小值。

计算公式分为正向指标和反向指标两种方式。由于专家赋值越高表明该指标重要性越大,因此采用正向指标对数据进行标准化处理。得到数值全在 0~1 之间的标准化矩阵。

设某一级指标有  $m$  个二级指标,且已取得  $n$  个数据,记为矩阵  $Y_{ij}$ 。在同一指标下,采用式(6)计算各二级指标占一级指标的比重:

$$p_{ij} = \frac{Y_{ij}}{\sum_{i=1}^n Y_{ij}} \quad (6)$$

式中: $p_{ij}$ 为第  $j$  个指标第  $i$  个专家的数值比重。

根据信息熵的计算式(7),计算出各个指标的信息熵为  $E_1, E_2, \dots, E_m$ 。

$$E_j = -\ln(n)^{-1} \sum_{i=1}^n p_{ij} \ln p_{ij} \quad (7)$$

式中: $E_j$ 为各个指标的信息熵,其中  $j = 1, 2, \dots, m$ ;  $m$ 为指标个数; $n$ 为专家人数。

通过信息熵计算各指标权重:

$$W_j = \frac{1 - E_j}{m - \sum E_j} \quad (8)$$

式中: $W_j$ 为未计入专家信心指数的指标权重。

表 2 为专家信心指数评分表,邀请专家结合指标评估自信度、专业领域熟悉度、专业技术职称和工作年限对评估信心指数进行评分,将专家得分进行归一化计算,得到专家信心系数。并利用式(9)和式(10)计算得到专家信心指数权重。

表 2 专家信心指数

信心指标	类别	分值
指标评估自信度	一般、比较自信、自信	1, 2, 3
专业领域熟悉度	了解、比较熟悉、非常熟悉	1, 2, 3
专业技术职称	工程师、高级工程师、正高	1, 2, 3
工作年限	5 年及以下、5 ~ 10 年、10 年及以上	1, 2, 3

$$\overline{D_{ij}} = \frac{X_{ij}}{\sum_{i=1}^m X_{ij}} \quad (9)$$

$$F_j = \sum_{i=1}^m K \overline{D_{ij}} \quad (10)$$

式中: $\overline{D_{ij}}$ 为归一化后专家指标评分; $F_j$ 为专家信心指数; $K$ 为专家评分占所有专家评分总和的比值。

熵权法得到的二级指标权重系数  $W_j$  与专家信心指数权重系数  $F_j$  进行耦合计算得出最终的二级指标权重系数  $W$ ,耦合计算式为:

$$W = \frac{W_j F_j}{\sum_{j=1}^m W_j F_j} \quad (11)$$

式中: $W_j$ 为未计入专家信心指数的指标权重; $F_j$ 为专家信心指数,其中  $j = 1, 2, \dots, m$ 。

## 3 基于模糊物元分析评价模型构建

### 3.1 拓宽路堤高边坡施工安全风险评估指标体系建立

为了更加综合、客观分析拓宽路堤施工安全风险程度,将模糊物元法应用于拓宽路堤施工安全风险评价中,并构建对应的评价模型。以实际工程概况、专家学者研究成果文献和我国的“指南”为依据,将巷道冒顶风险评价等级的评语集从低到高依次划分为极低风险(I)、低风险(II)、中风险(III)

和高风险(IV)4个等级,分别有其对应的分值范围,各等级对应的含义见表3。

表3 拓宽路堤高边坡施工安全评分表

分类	指标	分级	分值范围	风险等级	
诱发因素	降雨量	施工场地所在的地区近5年内年均降雨量超过1900 mm	(1900, ∞)	IV	
		施工场地所在的地区近5年内年均降雨量在1660 mm~1900 mm	(1660, 1900]	III	
		施工场地所在的地区近5年内年均降雨量在1300 mm~1660 mm	(1300, 1660]	II	
		施工场地所在的地区近5年内年均降雨量低于1300 mm	(0, 1300]	I	
自然 灾害 的影 响		施工周期位于台风多发月份,且近5年对施工地区有影响的台风数量大于7个	(7, ∞)	IV	
		施工周期位于台风多发月份,且近5年对施工地区有影响的台风数量为3~7	(3, 7]	III	
		施工周期位于台风多发月份,且近5年对施工地区有影响的台风数量为1~3	(1, 3]	II	
		施工周期不处于台风多发月份,或施工地区近5年没有受到台风的影响	(0, 1]	I	
交通 组织	交通 布控 和导 改	在基准条件下, $U/C \geq 0.75$	[0.75, ∞)	IV	
		在基准条件下, $0.5 \leq U/C < 0.75$	[0.5, 0.75)	III	
		在基准条件下, $0.25 \leq U/C < 0.5$	[0.25, 0.5)	II	
		在基准条件下, $U/C < 0.25$	(0, 0.25)	I	
施工 环境	施工 周边 环境	在坡底 $0.5H$ 范围内有构筑物	(0, $0.5H$ ]	IV	
		在坡底 $1.0H$ 范围内有构筑物	( $0.5H$ , $1.0H$ ]	III	
		在坡底 $1.5H$ 范围内有构筑物	( $1.0H$ , $1.5H$ ]	II	
		设施位于上述范围以外	( $1.5H$ , ∞)	I	
	原边 坡变 形		边坡变形明显,出现较大裂缝,且数量较多	(75, 100)	IV
			边坡变形明显,出现较大裂缝,但数量较少	(50, 75]	III
			边坡出现小范围裂缝	(25, 50]	II
			边坡无明显变形,没有出现裂缝	(0, 25]	I
填方 高度		填方高度 $40 \text{ m} \leq H$	[40, ∞)	IV	
		填方高度 $30 \text{ m} \leq H < 40 \text{ m}$	[30, 40)	III	
		填方高度 $20 \text{ m} \leq H < 30 \text{ m}$	[20, 30)	II	
		填方高度 $H < 20 \text{ m}$	(0, 20)	I	
地基 处理 类型		深层复合地基法	(75, 100]	IV	
		深层挤密地基法或夯实地基法	(50, 75]	III	
		深层换填垫层法或预压地基法	(25, 50]	II	
		浅层地基处理	(0, 25]	I	
施工 设计	边坡 加固 方式	抗滑桩	(75, 100]	IV	
		锚固工程	(50, 75]	III	
		注浆类工程	(25, 50]	II	
		挡土墙工程	(0, 25]	I	
设计 资料 完整 性		每个高路堤工点没有勘察断面、勘探点且设计图件不完整	(75, 100]	IV	
		每个高路堤工点没有勘测断面、勘探点,设计图件完整	(50, 75]	III	
		每个高路堤工点有勘测断面、勘探点,设计图件不完整	(25, 50]	II	
		每个高路堤工点有勘测断面、勘探点,设计图件完整	(0, 25]	I	
路基 加固 方法		强夯法	(75, 100]	IV	
		冲击夯实(冲击压路机)	(50, 75]	III	
		常规碾压(普通压路机)	(25, 50]	II	
		人工碾压	(0, 25]	I	

注:表中  $H$  为边坡高度; $U$  为最大服务交通量,即特定时间内道路能够容纳的最大车流量; $C$  为通行能力,即在道路一定条件下的实际车流量。

### 3.2 构建模糊物元分析模型

通过分析拓宽路堤施工安全风险指标体系,并结合模糊物元分析理论,构建拓宽路堤施工安全风险评估模型如下:

(1) 建立评价事物的复合物元

$$R_{nm} = \begin{bmatrix} & M_1 & M_2 & \cdots & M_n \\ C_1 & x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ C_2 & x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ C_m & x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (12)$$

式中: $R_{nm}$  为  $n$  个事物的  $m$  维复合物元; $M_n$  为第  $n$  个事物; $C_m$  为第  $m$  个特征; $x_{mn}$  为第  $n$  个事物第  $m$  个特征相应的量值。

(2) 计算隶属度

由“事物、特征、模糊量值”三项要素构成的三元组被称为模糊物元,记为:

$$R = \begin{bmatrix} M \\ C \quad \mu(x) \end{bmatrix} \quad (13)$$

式中: $M$  为事物; $C$  为特征; $\mu(x)$  为模糊量值。

通过隶属度来描述元素与模糊集合之间隶属关系的程度,将拓宽路堤施工安全风险评估指标体系划分为 4 个等级,其分值范围记作  $A_i = (a_i, b_i)$ ,  $i = 1, 2, 3, 4$ 。当指标值为分值范围中点时,认为其在当前风险程度的隶属度为 1。具体隶属度  $\mu$  计算公式如下:

$$\mu = \begin{cases} 1 & (x < \delta_1) \\ \frac{\delta_2 - x}{\delta_2 - \delta_1} + \frac{x - \delta_1}{\delta_2 - \delta_1} i_1 & (\delta_1 < x < \delta_2) \\ \frac{\delta_3 - x}{\delta_3 - \delta_2} i_1 + \frac{x - \delta_2}{\delta_3 - \delta_2} i_2 & (\delta_2 < x < \delta_3) \\ \frac{\delta_4 - x}{\delta_4 - \delta_3} i_2 + \frac{x - \delta_3}{\delta_4 - \delta_3} j & (\delta_3 < x < \delta_4) \\ j & (x > \delta_4) \end{cases} \quad (14)$$

式中: $i_1, i_2, j$  值均为 1,  $i_1$  为该值为等级 II 的隶属程度; $i_2$  为该值为等级 III 的隶属程度; $j$  为该值为等级 IV 的隶属程度。

$$\text{其中} \quad \delta_i = \frac{a_i + b_i}{2} \quad (15)$$

式中: $\delta_i$  为  $a_i$  和  $b_i$  的中点; $a_i$  为分值范围的下限; $b_i$  为分值范围的上限,其中  $i = 1, 2, 3, 4$ 。

图 2 为根据隶属函数式(14)得到的隶属函数图。

(3) 建立关联系数复合模糊物元

将每个事物中每个特征对应的量值,由式(3)得到的隶属度通过关联变换得到对应的关联系数值,以此构建关联系数复合模糊物元,即:

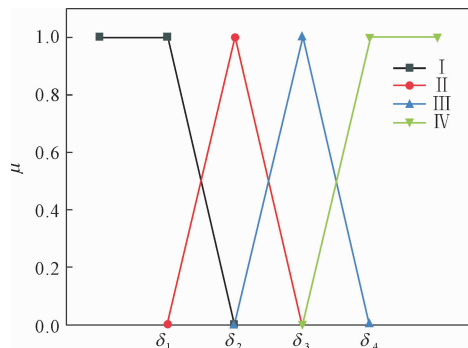


图 2 隶属函数图

$$R_\varepsilon = \begin{bmatrix} & M_1 & M_2 & \cdots & M_n \\ C_1 & \varepsilon_{11} & \varepsilon_{12} & \cdots & \varepsilon_{1n} \\ C_2 & \varepsilon_{21} & \varepsilon_{22} & \cdots & \varepsilon_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ C_m & \varepsilon_{m1} & \varepsilon_{m2} & \cdots & \varepsilon_{mn} \end{bmatrix} \quad (16)$$

(4) 建立权重复合物元

由于拓宽路堤施工安全风险评估中含有一级指标和二级指标,则设  $W_i$  和  $W_{ij}$  分别为一级指标和二级指标的权重复合物元。

$$W_i = \begin{bmatrix} C_1 & C_2 & \cdots & C_t \\ W_i & W_1 & W_2 & \cdots & W_t \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$W_{ij} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & \cdots & C_{tp} \\ W_{ij} & W_{11} & W_{12} & \cdots & W_{tp} \end{bmatrix} \quad (18)$$

式中: $t$  为一级指标个数; $C_t$  为第  $t$  个一级指标; $C_{tp}$  为第  $t$  个一级指标下第  $p$  个二级指标; $W_i, W_{ij}$  分别为一级指标和二级指标。

(5) 建立关联度复合模糊物元

将权重复合物元和关联系数复合模糊物元乘积,得到关联度复合模糊物元:

$$R_k = W_{ij} \cdot R_\varepsilon \quad (19)$$

(6) 综合评价

确定各个单项评价指标的复合模糊物元  $R_i$ :

$$R_b = W_i \cdot R_k \quad (20)$$

为了克服评价的片面性,可以考虑各个维度相对应权重下的模糊量值  $R_{bjm}$  的平均值、最大值和最小值,分别记作  $d_{j1}, d_{j2}, d_{j3}$ ,得到模糊评价矩阵  $R_d$ ,并取  $d_{j1}, d_{j2}, d_{j3}$  三者均值作为最终各等级风险隶属程度,得到最终评价矩阵  $R_D$ 。

$$\begin{cases} d_{j1} = \frac{R_{bj1} + R_{bj2} + \dots + R_{bjm}}{m} \\ d_{j2} = \max(R_{bj1}, R_{bj2}, \dots, R_{bjm}) \\ d_{j3} = \min(R_{bj1}, R_{bj2}, \dots, R_{bjm}) \end{cases} \quad j = 1, 2, 3, \dots, n \quad (21)$$

$$d_j = \frac{d_{j1} + d_{j2} + d_{j3}}{3} \quad (22)$$

$$R_D = \begin{bmatrix} M_1 & M_2 & \dots & M_n \\ d_j & d_1 & d_2 & \dots & d_n \end{bmatrix} \quad (23)$$

式中: $d_j$ 为各风险等级的隶属度,其中 $j = 1, 2, 3, \dots, n$ 。

最后,根据最大隶属度原则<sup>[16]</sup>确定拓宽路堤施工安全风险等级。

## 4 安全评价及结果分析

### 4.1 拓宽路堤施工安全评价

为验证本文所提出的基于模糊物元的拓宽路堤施工安全评价模型的有效性,并与其他学者的方法进行对比,选取文献[10]中的路堤高边坡 2 作为评估对象,验证该模型在拓宽路堤施工安全风险评估中的应用效果。

#### 4.1.1 指标权重计算

邀请 4 名专家结合该边坡,对指标重要性进行评估打分,得到 4 个专家判断矩阵。由 4 个专家判断矩阵可以得到 24 个一致性矩阵,计算最大特征值对应的特征向量。取 24 个特征向量均值,即为各一级指标权重  $W$ 。

$$M_1 = \begin{pmatrix} 1 & \frac{1}{3} & \frac{1}{5} & \frac{1}{9} \\ 3 & 1 & \frac{1}{3} & \frac{1}{5} \\ 5 & 3 & 1 & \frac{1}{3} \\ 9 & 5 & 3 & 1 \end{pmatrix} \quad M_2 = \begin{pmatrix} 1 & \frac{1}{3} & 3 & \frac{1}{2} \\ 3 & 1 & 7 & 2 \\ \frac{1}{3} & \frac{1}{7} & 1 & \frac{1}{5} \\ 2 & \frac{1}{2} & 5 & 1 \end{pmatrix}$$

$$M_3 = \begin{pmatrix} 1 & 7 & \frac{1}{5} & \frac{1}{3} \\ \frac{1}{7} & 1 & \frac{1}{5} & \frac{1}{3} \\ 5 & 5 & 1 & \frac{1}{5} \\ 3 & 3 & 5 & 1 \end{pmatrix} \quad M_4 = \begin{pmatrix} 1 & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & 1 \\ 3 & 1 & 1 & 3 \\ 3 & 1 & 1 & 3 \\ 1 & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & 1 \end{pmatrix}$$

拓宽路堤高边坡施工安全风险评估指标体系共有 11 个指标,共邀请 4 名专家针对该边坡对这 11 个二级指标进行赋值打分(见表 4),信心指数分别为(10,8,9,10)将专家评分结果根据式(4)一式(11)

计算得到二级指标权重系数,结果见表 5。

表 4 专家二级指标评分表

二级指标	专家 1	专家 2	专家 3	专家 4
降雨量 $X_{11}$	70	75	55	70
自然灾害的影响 $X_{12}$	60	80	80	80
交通量 $X_{21}$	70	60	90	70
交通布控和导改 $X_{22}$	55	80	65	85
施工周边环境 $X_{31}$	65	70	55	75
原边坡变形 $X_{32}$	80	90	95	85
填方高度 $X_{33}$	70	85	75	60
地基处理类型 $X_{41}$	70	85	70	70
边坡加固方式 $X_{42}$	80	75	60	70
设计资料完整性 $X_{43}$	65	55	60	55
路基加固方法 $X_{44}$	65	85	85	60

表 5 二级指标权重表

二级指标	$E_j$	$W_j$	$F_j$	$W$
降雨量 $X_{11}$	0.79	0.51	0.48	0.48
自然灾害的影响 $X_{12}$	0.79	0.49	0.52	0.52
交通量 $X_{21}$	0.69	0.54	0.51	0.55
交通布控和导改 $X_{22}$	0.73	0.46	0.49	0.45
施工周边环境 $X_{31}$	0.77	0.31	0.30	0.27
原边坡变形 $X_{32}$	0.73	0.35	0.39	0.41
填方高度 $X_{33}$	0.74	0.34	0.32	0.32
地基处理类型 $X_{41}$	0.00	0.48	0.27	0.50
边坡加固方式 $X_{42}$	0.77	0.11	0.26	0.12
设计资料完整性 $X_{43}$	0.46	0.26	0.21	0.22
路基加固方法 $X_{44}$	0.67	0.16	0.26	0.16

#### 4.1.2 模糊物元确定拓宽路堤施工安全风险等级

(1) 建立拓宽路堤施工安全风险评估复合物元诱发因素复合物元  $R_1$ , 交通组织复合物元  $R_2$ , 施工环境复合物元  $R_3$ , 施工设计复合物元  $R_4$ 。

$$R_1 = \begin{bmatrix} C_{11} & 1904.8 \\ C_{12} & 2 \end{bmatrix} \quad R_2 = \begin{bmatrix} C_{21} & 0.29 \\ C_{22} & 30 \end{bmatrix}$$

$$R_3 = \begin{bmatrix} C_{31} & 1.5 \\ C_{32} & 36 \\ C_{33} & 23.58 \end{bmatrix} \quad R_4 = \begin{bmatrix} C_{41} & 18 \\ C_{42} & 19 \\ C_{43} & 32 \\ C_{44} & 34 \end{bmatrix}$$

(2) 计算指标隶属度并建立关联系数复合物元诱发因素关联系数复合模糊物元  $R_{e1}$ , 交通组织关联系数复合模糊物元  $R_{e2}$ , 施工环境关联系数复合模糊物元  $R_{e3}$ , 施工设计关联系数复合模糊物元  $R_{e4}$ 。

$$R_{e1} = \begin{bmatrix} M_1 & M_2 & M_3 & M_4 \\ C_{11} & 0 & 0 & 0.78 & 0.22 \\ C_{12} & 0.38 & 0.62 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$R_{e2} = \begin{bmatrix} M_1 & M_2 & M_3 & M_4 \\ C_{21} & 0.34 & 0.66 & 0 & 0 \\ C_{22} & 0.3 & 0.7 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$R_{e3} = \begin{bmatrix} M_1 & M_2 & M_3 & M_4 \\ C_{31} & 0 & 0.66 & 0.34 & 0 \\ C_{32} & 0.06 & 0.94 & 0 & 0 \\ C_{33} & 0.1 & 0.9 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$R_{e4} = \begin{bmatrix} M_1 & M_2 & M_3 & M_4 \\ C_{41} & 0.78 & 0.22 & 0 & 0 \\ C_{42} & 0.74 & 0.26 & 0 & 0 \\ C_{43} & 0.22 & 0.78 & 0 & 0 \\ C_{44} & 0.14 & 0.86 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

### (3) 确定指标权重并建立指标权重复合物元

诱发因素各指标的权重复合物元  $W_{1j}$ , 交通组织各指标的权重复合物元  $W_{2j}$ , 施工环境各指标的权重复合物元  $W_{3j}$ , 施工设计各指标的权重复合物元  $W_{4j}$  和拓宽路堤 4 个一级指标的权重复合物元  $W_i$ 。

$$W_{1j} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} \\ W_{1j} & 0.48 & 0.52 \end{bmatrix}$$

$$W_{2j} = \begin{bmatrix} C_{21} & C_{22} \\ W_{2j} & 0.55 & 0.45 \end{bmatrix}$$

$$W_{3j} = \begin{bmatrix} C_{31} & C_{32} & C_{33} \\ W_{3j} & 0.27 & 0.41 & 0.32 \end{bmatrix}$$

$$W_{4j} = \begin{bmatrix} C_{41} & C_{42} & C_{43} & C_{44} \\ W_{4j} & 0.5 & 0.22 & 0.12 & 0.16 \end{bmatrix}$$

$$W_i = \begin{bmatrix} C_1 & C_2 & C_3 & C_4 \\ W_i & 0.14 & 0.27 & 0.24 & 0.35 \end{bmatrix}$$

### (4) 建立拓宽路堤施工安全的关联度模糊复合物元

诱发因素关联度复合模糊物元  $R_{k1}$ , 交通组织关联度复合模糊物元  $R_{k2}$ , 施工环境关联度复合模糊物元  $R_{k3}$ , 施工设计关联度复合模糊物元  $R_{k4}$ 。

$$R_{k1} = W_{1j} \cdot R_{e1} = \begin{bmatrix} M_1 & M_2 & M_3 & M_4 \\ 0.182 & 0.298 & 0.374 & 0.106 \end{bmatrix}$$

$$R_{k2} = W_{2j} \cdot R_{e2} = \begin{bmatrix} M_1 & M_2 & M_3 & M_4 \\ 0.322 & 0.678 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$R_{k3} = W_{3j} \cdot R_{e3} = \begin{bmatrix} M_1 & M_2 & M_3 & M_4 \\ 0.057 & 0.852 & 0.092 & 0 \end{bmatrix}$$

结合以上各一级指标的关联度复合模糊物元可得拓宽路堤施工安全风险关联度复合模糊物元  $R_k$ , 即:

$$R_k = \begin{bmatrix} M_1 & M_2 & M_3 & M_4 \\ 0.182 & 0.298 & 0.374 & 0.106 \\ 0.322 & 0.678 & 0 & 0 \\ 0.057 & 0.852 & 0.092 & 0 \\ 0.55 & 0.45 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

### (5) 拓宽路堤施工安全风险评价

$$R_b = W_i \cdot R_k = \begin{bmatrix} M_1 & M_2 & M_3 & M_4 \\ b_1 & 0.026 & 0.042 & 0.052 & 0.015 \\ b_2 & 0.087 & 0.183 & 0 & 0 \\ b_3 & 0.014 & 0.204 & 0.022 & 0 \\ b_4 & 0.192 & 0.158 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$R_d = \begin{bmatrix} M_1 & M_2 & M_3 & M_4 \\ d_1 & 0.08 & 0.147 & 0.019 & 0.004 \\ d_2 & 0.192 & 0.204 & 0.052 & 0.015 \\ d_3 & 0.014 & 0.042 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$R_D = \begin{bmatrix} M_1 & M_2 & M_3 & M_4 \\ d & 0.095 & 0.131 & 0.024 & 0.006 \end{bmatrix}$$

根据最大隶属度原则, 取  $d_{\max}$  作为最终评估结果, 即  $d_{\max} = 0.131$ , 该拓宽路堤施工安全风险等级为 II 级(中等风险)。

## 4.2 结果分析

根据拓宽路堤施工安全风险评估结果(见表 6)。该施工的安全风险等级为中等风险(等级 II)。按照“指南”定义, 中等风险属于可接受范围, 无需采取治理措施, 但应实施风险防控措施, 严格管理日常安全生产, 并加强现场巡视。

表 6 评估结果对比分析

拓宽路堤施工安全评估	本文	文献[10]
评估方法	模糊物元分析	指标体系法
评估结果	中等风险	中等风险

文献[10]中采用指标体系法得到的施工安全风险等级同样为中等风险。由此可知, 本文模型对拓宽路堤施工安全风险评价结果与原文结果基本吻合, 表明本文提出的基于物元模糊的评价模型应用于拓宽路堤施工安全风险评估是有效、合理的。

由于拓宽路堤施工安全风险评估中的很多因素具有不确定性和模糊性, 本文模型能有效处理这些模糊信息, 提高评价结果的可靠性, 将模糊信息定量化, 并且减少了人为主观因素影响, 提高了评价的客观性和公正性。

## 5 结论

本文通过诱发因素、交通组织、施工环境及施工

设计四个方面,建立了拓宽路堤施工安全风险评估指标体系,并基于改进的层次分析法 AHP、熵权法和模糊物元理论构建了评估模型。采用已有路堤高边坡案例进行验证,得出以下结论:

(1) 改进后的 AHP、熵权法与模糊物元模型减少了人为操作和主观因素的影响,能够更好地处理施工安全风险评估中的模糊性因素,评价结果更加客观、科学且可靠。

(2) 基于模糊物元模型的拓宽路堤施工安全评估结果客观且可靠,为进一步研究提供了新思路,并为类似工程的风险评估工作提供了参考依据。

### 参考文献:

[1] 交通运输部安全与质量监督管理局. 高速公路路堑高陡边坡工程施工安全风险评估指南[M]. 北京:人民交通出版社,2015.

[2] 吴忠广,王海燕,陶连金,等. 高速公路高边坡施工安全总体风险评估方法[J]. 中国安全科学学报,2014,24(12):124-129.

[3] 祁海军,贺志昂,黄涛,等. 基于 AHP-熵权法的高寒高海拔地区边坡开挖施工安全风险评估研究[J]. 公路,2024,69(1):86-92.

[4] 罗竞,周富华,黄梦昌. 公路路堑边坡施工安全总体风险评估方法优化研究[J]. 路基工程,2018(6):56-61.

[5] 刘舒逸,陈建宏. 基于嵌套型优势关系粗糙集与模糊理论的岩质边坡施工安全性评价[J]. 铁道科学与工程学报,2023,20(12):4571-4581.

[6] Zhang Shengrong, Hou Dejun, Wang Chao, et al. Real-time safety evaluation for slope during construction using numerical forecast and sensor monitoring platform[J]. Sensors, 2018,18(9):2978.

[7] Huang Jianling, Zeng Xiaoye, Fu Jing, et al. Safety risk assessment using a BP neural network of high cutting slope construction in high-speed railway[J]. Buildings, 2022,12(5):598.

[8] Lin Daming, Zhang Yufang, Qiu Shumao, et al. Landslide susceptibility assessment method during the construction of highways based on the index complexity algorithm[J]. Sustainability, 2024,16(14):6147.

[9] 钟元庆. 基于 SPA-FAHP 法的拓宽山区高速高边坡施工安全评估[J]. 筑路机械与施工机械化,2019,36(10):92-97.

[10] 刘阳毅,江峰,林颖. 基于指标体系法的改扩建路堤高边坡施工安全风险[J]. 水利与建筑工程学报,2024,22(2):207-213.

[11] 罗慧,刘杰,徐军昶,等. 基于熵权法的秦岭区域农村社区气候韧性评价研究[J]. 自然灾害学报,2022,31(2):111-118.

[12] 曾小康,冯阳,赖文庆,等. 基于 AHP-熵权法的城市燃气管道风险评价[J]. 中国安全生产科学技术,2021,17(5):130-135.

[13] 张旭,周绍武,林鹏,等. 基于熵权-集对的边坡稳定性研究[J]. 岩石力学与工程学报,2018,37(S1):3400-3410.

[14] 彭余华,王晓玉,王玮,等. 高速公路拓宽半幅封闭式交通组织方案参数设置方法[J]. 筑路机械与施工机械化,2016,33(6):83-88.

[15] 孙丹,杨军超,李星,等. 高速公路互通式立交改扩建工程施工期交通组织研究[J]. 公路,2022,67(5):75-81.

[16] 柳益君,朱明放,习海旭,等. 基于最大隶属度原则的基因表达式编程分类[J]. 计算机工程与应用,2012,48(26):48-52,80.