

基于模糊层次分析法的运营高速公路边坡拓挖危险性评价

厉彦军¹, 彭 磊², 许 柯², 魏福军², 陈 宾³

(1. 中铁南方投资集团有限公司 广东 深圳 518054; 2. 中铁七局集团广州工程有限公司
广东 广州 510700; 3. 湘潭大学 土木工程学院, 湖南 湘潭 411105)

摘要:为应对既有边坡拓挖在高速公路改扩建项目中面临的复杂地质条件、施工与运营相互干扰、生态环境保护等多重挑战,本文以阳信高速水口南枢纽某匝道边坡拓挖工程为研究对象,基于模糊层次分析法对其施工危险性进行分段评价。通过层次分析法确定各风险因素权重,以此为基础构建涵盖地质条件、施工方法、施工环境和交通组织的多层次风险评价指标体系,并针对边坡拓挖过程开展影响因素的敏感性分析。结果表明:拓挖工程中A-C段危险性等级为三级,需采取加强措施;D-H段危险性为二级,可通过常规措施控制风险,权重值对危险度计算值的影响程度大于指标赋值,且权重值变动对高危险度等级段的敏感性更高。本文成果可为运营高速公路边坡拓挖工程的风险管理提供科学依据,也为同类工程的风险评估和施工优化提供实践参考。

关键词:高速公路边坡; 土石混合边坡; 边坡拓挖; 层次分析法; 危险性评价

中图分类号: U416.1

文献标志码: A

文章编号: 1673-8993(2026)02-0017-07

doi: 10.13402/j.gcjs.2026.02.014

Risk assessment of slope widening-excavation on operational expressways based on fuzzy analytic hierarchy process

LI Yanjun¹, PENG Lei², XU Ke², WEI Fujun², CHEN Bin³

(1. China Railway Southern Investment Group Co., Ltd., Shenzhen 518054, Guangdong, China;

2. China Railway Seventh Group Guangzhou Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510700, Guangdong, China;

3. College of Civil Engineering, Xiangtan University, Xiangtan 411105, Hunan, China)

Abstract: In order to cope with the multiple challenges of complex geological conditions, mutual interference between construction and operation, and ecological environmental protection during the widening-excavation of the existing slope in expressway reconstruction and expansion projects, in this paper, the slope widening-excavation works of a hub slope at the south of Shuikou Town of the Yangchun-Xinyi Expressway is studied to conduct a segmented risk assessment based on the fuzzy analytic hierarchy process (FAHP). The weights of each risk factor were determined by means of the Analytic Hierarchy Process (AHP), based on which, a multi-level risk assessment index system covering geological conditions, construction methods, construction environment and traffic organization is constructed and a sensitivity analysis of influencing factors during the slope widening-excavation process is conducted. The results indicate that the risk level of sections A-C in the widening-excavation works is classified as Level III, requiring the enhanced control measures, while the risk level of Sections D-H are classified as Level II, which can be controlled through conventional measures. The influence degree of weight values on the calculated value of risk degree is greater than that of index assignments, and weight value variations exhibit higher sensitivity in sections with higher risk levels. The findings of this study can provide a scientific basis for risk management in slope widening-excavation works on

收稿日期: 2025-02-27

作者简介: 厉彦军(1991—),男,工程师,从事高速公路、轨道交通的设计、科技创新及项目管理等方面的研究工作。

通信作者: 陈 宾(1977—),男,博士生导师,教授,从事地质灾害防治等方面的研究工作。

operational expressways and offer practical references for risk assessment and construction optimization in similar works.

Key words: expressway slope; soil-rock mixed slope; slope widening-excavation; analytic hierarchy process; risk assessment

随着我国经济快速发展和交通需求持续增长,早期建设的双向四车道高速公路逐渐难以满足日益增长的通行需求,改扩建工程成为提升路网通行能力和服务水平的重要举措。据《国家公路网规划》,2022 年—2035 年期间,预计将有 3 万千米国家高速公路繁忙路段需进行扩容改造。

既有边坡拓挖是高速公路改扩建项目中的重难点工程^[1-2]。随着技术进步,多种边坡稳定性评价方法应运而生。模糊层次分析法作为一种融合定性分析与定量分析的有效方法,在边坡稳定性评价领域应用广泛。涂圣文等^[3]将改进 CRITIC 法与云模型结合,构建了高速公路路堑高边坡工程施工安全总体风险评估模型,为同类工程风险评估提供了新思路。秦植海等^[4]引入集对分析方法,建立高边坡稳定性评价的模糊层次—集对分析耦合模型,经实证研究验证了模型有效性。此外,熵权法作为客观赋权方法,也常与模糊层次分析法结合用于边坡稳定性评价。刘秀等^[5]基于熵权物元可拓模型开展路堑边坡安全性评价,提升了结果客观性。冯忠居等^[6]建立熵权—灰关联安全评价模型,用于岩质开挖边坡安全性评价,并通过数值模拟验证了模型准确性。

目前,针对边坡拓挖施工危险性评价的研究多参考常规边坡开挖评价方法,未充分考虑拓挖工程的施工特点^[7-8]。本文拟系统考虑拓挖工程特性,基于模糊层次分析法对花岗岩残积土边坡拓挖风险进行评价,以期为高速公路既有边坡拓挖运营提供借鉴与参考。

1 模糊层次分析法原理

层次分析法是一种将复杂问题分解为目标、准则和方案等层次结构的系统化决策方法。通过两两比较各因素重要性建立判断矩阵,并据此计算各因素权重。具体实施步骤如下。

(1) 层次结构模型建立:结合边坡拓挖施工特点,将评价目标逐层分解为准则层和指标层,形成层次化的结构模型及评价体系框架。

(2) 判断矩阵构建:基于专家打分与现场调查数据,对各层级因素进行两两重要性比较,最终形成判断矩阵 A [式(1)]。

$$A = \begin{bmatrix} p_{11} & \cdots & p_{1j} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{i1} & \cdots & p_{ij} \end{bmatrix} (i, j = 1, 2, \cdots, n) \quad (1)$$

式中: p_{ij} 为第 i 个项目第 j 个评价指标的数值。

(3) 权重计算:对判断矩阵进行一致性检验,通过后对其进行归一化处理,进而计算各因素的权重。对判断矩阵 A 的每一行进行算术平均,得到平均值向量 [式(2)]。

$$R_{\text{average } i} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n p_{ij} (i = 1, 2, \cdots, n) \quad (2)$$

式中: $R_{\text{average } i}$ 为向量的平均值 W_i 。

将上述平均值向量归一化,得到权重向量 W_i 。

$$W_i = \frac{R_{\text{average } i}}{\sum_{k=1}^n R_{\text{average } k}} (i = 1, 2, \cdots, n) \quad (3)$$

归一化处理可确保权重向量的分量和为 1。

通过求解判断矩阵的特征方程,可得到最大特征值 λ_{ax} 及其对应的特征向量;进而利用最大特征值计算一致性指标 σ_{Cl} , 计算公式如下。

$$\sigma_{\text{Cl}} = \frac{\lambda_{\text{ax}} - n}{n - 1} \quad (4)$$

式中: σ_{Cl} 为判断矩阵的一般一致性指标; λ_{ax} 为判断矩阵的最大特征值; n 为判断矩阵的阶数。

σ_{RI} 为平均随机一致性指标,与矩阵的阶数有关,其取值如表 1 所示。

一致性比率 σ_{RI} 的计算公式如(5)所示,当 $\sigma_{\text{CR}} \leq 0.1$ 时,判断矩阵通过一致性检验。

$$\sigma_{\text{CR}} = \sigma_{\text{Cl}} / \sigma_{\text{RI}} \quad (5)$$

表 1 平均随机一致性取值

3 阶	4 阶	5 阶	6 阶	7 阶	8 阶	9 阶	10 阶	11 阶	12 阶	13 阶	14 阶	15 阶	16 阶
0.52	0.89	1.12	1.26	1.36	1.41	1.46	1.49	1.52	1.54	1.56	1.58	1.59	1.59

体现其与普通边坡开挖差异的核心指标。普通边坡开挖不涉及运营与施工同时问题，而拓挖施工中，拓挖宽度直接决定施工面与运营高速公路的安全距离，宽度越小，安全距离越短，施工空间与手段受限，风险随之升高。

3.2 边坡拓挖施工分级标准

结合边坡拓挖施工的特点，制定边坡拓挖施工分级标准。分级标准将施工危险性分为 5 个等级，每个等级对应不同的危险程度和评分范围，同时结合具体指标进行量化评价。边坡拓挖施工分级标准的制定参考相关工程分级评价的思路，结合边坡施工的特点，将施工危险性分为 5 个等级。

根据边坡拓挖施工的危险性特征，将其划分为 5 个等级，具体如表 1 所示。

表 2 边坡拓挖施工危险性分级

等级	评分范围/分	危险程度描述
1 级	0 ~ 20	危险性极低,施工条件良好,风险可控
2 级	20 ~ 40	危险性较低,存在一定风险,但可通过常规措施控制
3 级	40 ~ 60	危险性中等,需采取加强措施确保施工安全
4 级	60 ~ 80	危险性较高,需采取严格的安全措施和管理措施
5 级	80 ~ 100	危险性极高,需特别重视,采取全面的安全措施,制定完善的应急预案

3.3 评价指标及评分标准

边坡拓挖施工的危险性评价指标体系包括地质条件、施工方法、施工环境和交通组织 4 个方面，每个方面下设若干具体指标。各指标的评分标准如表 3 所示。

4 运营高速公路边坡拓挖施工危险性评价

4.1 指标因子权重计算

该工程施工中，影响最大的因素为拓挖施工方式、支护及排水措施，其次为岩土体强度、气候条件。其中，交通组织方面，施工单位与地方交通管理部门进行了密切合作和沟通，交通信息发布及时、管制手段到位、应急管理能力强，因此相对其他因素，可控性更高、影响相对较小。针对项目情况并结合专家咨询与现场调查，构建判断矩阵如表 4 所示。

表 3 边坡拓挖各指标评分标准

一级 指标	二级 指标	评分标准	得分范 围/分
地质 条件 P_1	地形 地貌 P_{11}	坡高 < 10 m,坡度 < 20°	0 ~ 20
		坡高 10 ~ 40 m,坡度 20° ~ 30°, 存在孤突	20 ~ 40
		坡高 > 40 m,坡度 > 30°,凸形 坡面	40 ~ 60
	地层 结构 P_{12}	结构单一	0 ~ 20
		二元结构,滑移风险小	20 ~ 40
		二元结构,覆土薄,滑移风险高	40 ~ 60
	岩土 强度 P_{13}	岩土强度高,稳定性好	0 ~ 20
		岩土强度中等,风险一般	20 ~ 40
		岩土强度低,易塌滑	40 ~ 60
施工 方法 P_2	拓挖 宽度 P_{21}	拓挖宽度 > 20 m,施工限制小	0 ~ 20
		拓挖宽度 10 ~ 20 m,施工受限	20 ~ 40
		拓挖宽度 < 10 m,施工限制多	40 ~ 60
	拓挖 方式 P_{22}	分层分段开挖,先内后外	0 ~ 20
		分层分段开挖	20 ~ 40
		大面积开挖	40 ~ 60
	支护 及排 水 P_{23}	支护和排水完善	0 ~ 20
		支护或排水一般	20 ~ 40
		支护不足,无排水	40 ~ 60
施工 环境 P_3	降雨 强度 P_{31}	小时降雨量 < 10 mm	0 ~ 20
		小时降雨量 10 ~ 30 mm	20 ~ 40
		小时降雨量 > 30 mm	40 ~ 60
	降雨 时长 P_{32}	持续时间 < 24 h	0 ~ 20
		持续时间 24 ~ 72 h	20 ~ 40
		持续时间 > 72 h	40 ~ 60
交通 组织 P_4	管制 疏导 P_{41}	交通管制及疏导措施完善,无 拥堵风险	0 ~ 20
		交通管制及疏导措施一般,存 在干扰或拥堵	20 ~ 40
		交通管制及疏导措施不足干 扰大,拥堵风险高	40 ~ 60
	交通 应急 P_{42}	应急预案完善,应急措施到位	0 ~ 20
		应急预案一般,应急措施不足	20 ~ 40
		应急预案不完善,应急措施缺失	40 ~ 60

表 4 运营高速公路边坡拓挖危险性指标因子重要性判断矩阵

指标因子	P_{11}	P_{12}	P_{13}	P_{21}	P_{22}	P_{23}	P_{31}	P_{32}	P_{41}	PP_{42}
P_{11}	1.000	0.500	0.333	0.333	0.200	0.200	0.250	0.333	2.000	2.000
P_{12}	2.000	1.000	0.500	0.333	0.200	0.200	0.333	0.333	2.000	2.000
P_{13}	3.000	2.000	1.000	1.000	0.500	0.500	2.000	2.000	2.000	2.000
P_{21}	3.000	3.000	1.000	1.000	0.500	0.500	0.500	0.500	2.000	2.000
P_{22}	5.000	5.000	2.000	2.000	1.000	1.000	2.000	4.000	4.000	4.000
P_{23}	5.000	5.000	2.000	2.000	1.000	1.000	1.000	1.000	4.000	4.000
P_{31}	4.000	3.000	0.500	2.000	0.500	1.000	1.000	1.000	3.000	3.000
P_{32}	3.000	3.000	0.500	2.000	0.250	1.000	1.000	1.000	2.000	2.000
P_{41}	0.500	0.500	0.500	0.500	0.250	0.250	0.333	0.500	1.000	1.000
P_{42}	0.500	0.500	0.500	0.500	0.250	0.250	0.333	0.500	1.000	1.000

层次分析法的权重计算结果如表 5 所示, 一致性检验结果如表 6 所示。

表 5 层次分析法权重结果

指标项	特征向量	权重值/%	最大特征根	σ_{CI} 值
P_{11}	0.434	4.339		
P_{12}	0.521	5.206		
P_{13}	1.169	11.690		
P_{21}	0.906	9.058		
P_{22}	2.115	21.149	10.567	0.063
P_{23}	1.732	17.320		
P_{31}	1.246	12.456		
P_{32}	1.068	10.678		
P_{41}	0.405	4.052		
P_{42}	0.405	4.052		

表 6 一致性检验结果

最大特征根	σ_{CI} 值	σ_{RI} 值	σ_{CR} 值	一致性检验结果
10.567	0.063	1.486	0.042	通过

基于层次分析法的权重分析可知, 各因素对风险的影响程度存在显著差异。其中, 拓挖施工方式与支护及排水措施权重最大, 是风险评估需重点关注的关键要素, 其对风险的贡献度显著高于其他因素, 可视为风险评估的核心指标。其次, 降雨强度、岩土体强度、降雨持续时长及拓挖宽度等因素权重也较大, 这些因素在不同场景下可能与其他主要因素产生交互作用, 共同影响最终风险程度, 属于次关键影响因素, 对其分析与管控同样重要。其余因素权重较小, 尽管在特定条件下可能对风险产生一定影响, 但总体影响力有限, 可作为辅助考量因素纳入风险评估体系。在

风险评估与管理实践中, 应优先聚焦权重最大的拓挖施工方式和支护及排水措施这两项关键因素。计算结果与权重计算前基于现场情况的预判一致, 且通过一致性检验, 表明所构建的判断矩阵具有可靠性。

4.2 拓挖段分段及各段评价指标赋值

拓挖项目临近运营高速公路, 故支护、排水及临时支挡措施均非常完善。因此, 整个拓挖段的主要区别在于各段边坡高度和拓挖宽度不同, 其中拓挖宽度差异进一步导致开挖方式存在区别。基于上述差异, 结合边坡拓挖各指标评分标准, 拓挖路段共分为 8 段。

该段拓挖施工工期未处于夏季强降雨季节, 遭遇短时强降雨的概率较低, 但施工期与广东梅雨季节有部分重叠, 因此本次评分考虑了持续降雨的影响。结合各段实际情况及边坡拓挖各指标评分标准, 明确各段各项指标的得分, 具体如表 7 所示。

4.3 拓挖段各段危险度计算结果

根据表 5、7 计算出各段危险度计算结果, 如表 8 所示。

由表 8 可知: A ~ C 段危险度为三级(危险性中等), 需采取加强措施保障施工安全; D ~ H 段危险度为二级(危险性较低), 虽存在一定风险, 但可通过常规措施控制。其中, 拓挖施工环节风险最大的指标为拓挖宽度与拓挖方式。

拓挖施工方式与支护、排水措施是高速公路边坡拓挖施工危险性评估的核心指标, 权重最大,

表 7 分段各项指标得分情况

分段	P_{11}	P_{12}	P_{13}	P_{21}	P_{22}	P_{23}	P_{31}	P_{32}	P_{41}	P_{42}
A	10	35	35	60	60	50	30	50	10	10
B	30	35	35	60	60	50	30	50	10	10
C	50	35	35	60	60	50	30	50	10	10
D	50	35	35	30	30	50	30	50	10	10
E	30	35	35	30	30	50	30	50	10	10
F	50	35	35	10	10	50	30	50	10	10
G	30	35	35	10	10	50	30	50	10	10
H	10	35	35	10	10	50	30	50	10	10

表 8 分段危险度计算值

分段	危险度计算值	危险度等级/级
A	43.02	三
B	43.89	三
C	44.75	三
D	35.69	二
E	34.82	二
F	29.65	二
G	28.78	二
H	27.91	二

对风险的贡献度显著高于其他因素。降雨强度、岩土体强度、降雨持续时长及拓挖宽度为次关键影响因素，权重较大，与核心因素存在相互作用，共同影响最终风险程度。降雨对高速公路边坡拓挖施工危险性影响显著，施工中应尽量避免雨季，并通过优化施工工序、加固运营道路临时支挡、加大巡查与监测频率等措施，保障施工顺利推进。

4.4 敏感性分析

4.4.1 敏感性分析方法

敏感性分析是通过改变输入参数，观察输出结果的变化程度，从而确定输出结果对各输入参数的敏感程度。在本次分析中，将分别对权重值和指标赋值进行±10%的调整，观察各段危险度计算值的变化。变化幅度计算方法如下：

变化幅度 = [(变动后的危险度计算值 - 原危险度计算值) / 原危险度计算值] × 100%。

4.4.2 权重值变动对危险度计算值的敏感性分析

拓挖施工方式和支护及排水措施是高速公路边坡拓挖施工危险性评估的首要核心指标，其权重最大，因此对其进行敏感性分析，分别将二者

增加 10% 和减少 10%，重新计算各段危险度值，如表 9、10 所示。

表 9 拓挖施工方式权重值变动危险度敏感性分析

分段	原危险度 计算值	危险度计算值		变化幅 度/%
		权重增加 10%	权重减少 10%	
A	43.02	44.29	41.75	±2.95
B	43.89	45.15	42.62	±2.89
C	44.75	46.02	43.48	±2.84
D	35.69	36.33	35.06	±1.78
E	34.82	35.46	34.19	±1.82
F	29.65	29.86	29.44	±0.71
G	28.78	28.99	28.57	±0.73
H	27.91	28.13	27.70	±0.76

表 10 支护及排水措施权重值变动危险度敏感性分析

分段	原危险度 计算值	危险度计算值		变化幅 度/%
		权重增加 10%	权重减少 10%	
A	43.02	43.88	42.15	±2.01
B	43.89	44.75	43.02	±1.97
C	44.75	45.62	43.89	±1.94
D	35.69	36.56	34.83	±2.43
E	34.82	35.69	33.96	±2.49
F	29.65	30.52	28.78	±2.92
G	28.78	29.65	27.92	±3.01
H	27.91	28.78	27.05	±3.10

由表 9、10 可知：当拓挖施工方式和支护及排水措施的权重值发生±10%变动时，各段危险度值也随之变化，总体敏感性较低。其中，拓挖施工方式权重变动时，对 A~C 段危险度的影响幅度大于其他段，但其危险度等级仍为三级；支护及排水措施权重变动时，对 F~H 段危险度的影响幅度大于其他段，危险度等级仍为二级。

4.4.3 指标赋值变动对危险度计算值的敏感性分析

当进行拓挖施工方式权重值的敏感性分析时, A ~ C 段危险度值的变化幅度较大; 进行支护及排水措施权重值的敏感性分析时, F ~ H 段危险度值的变化幅度较大。具体操作中, 固定拓挖施工方式及支护及排水措施的权重值, 调整 P_{22} 、 P_{23} 指标赋值发生 $\pm 10\%$ 变动, 重新计算 A ~ C、F ~ H 各段危险度值的变化情况, 结果如表 11 所示。

表 11 指标赋值变动危险度敏感性分析

分段	原危险度 计算值	危险度计算值		变化幅 度/%
		权重增加 10%	权重减少 10%	
A	43.02	45.15	40.88	± 4.96
B	43.89	46.02	41.75	± 4.86
C	44.75	46.89	42.62	± 4.77
F	29.65	30.73	28.57	± 3.63
G	28.78	29.86	27.70	± 3.74
H	27.91	28.99	26.84	± 3.86

由表 11 可知: 当拓挖施工方式与支护、排水措施的指标赋值同时发生变动时, A ~ C、F ~ H 各段危险度变化幅度差异较小。

4.4.4 敏感性分析结果

拓挖施工方式与支护、排水措施这两个关键影响因素的权重值 $\pm 10\%$ 的变动, 会导致各段危险度值发生变化。其中, 拓挖施工方式权重变动对危险度等级为三级的 A ~ C 段影响尤为明显。这表明确定权重值时需格外谨慎, 确保取值合理, 以提高危险度计算的准确性。指标赋值的变动虽也会影响危险度值, 但相比权重值的变动, 其影响程度与波动幅度相对有限。

5 结 论

(1) 在所有评价指标中, 拓挖宽度与开挖方式是影响施工危险性的关键因素。这表明在边坡

拓挖施工中, 合理规划拓挖尺寸、优化开挖工艺是降低施工风险的重要环节。

(2) 通过对阳信高速水口南枢纽某匝道边坡拓挖工程的分段评价, A ~ C 段危险度为三级, 表明这些区域存在中等风险, 需采取针对性加强措施保障施工安全; D ~ H 段危险度为二级, 虽总体风险较低, 但仍需通过优化施工工序、加固临时支挡、加强巡查与监测频率等手段控制潜在风险。

(3) 针对高速公路边坡拓挖施工危险性评估中的拓挖施工方式和支护、排水措施这两个关键因素进行敏感性分析, 发现权重值变动对危险度的影响大于指标赋值变动, 且对高风险段影响更显著, 因此需谨慎确定权重值以提高评估准确性。

参考文献:

- [1] 孙冬爽. 高速公路既有高边坡拓宽开挖稳定性及加固方案优化分析[J]. 交通世界, 2022(17): 92-94.
- [2] 李海龙. 既有高速公路高边坡路堑扩挖爆破开挖技术研究[D]. 长春: 吉林大学, 2012.
- [3] 涂圣文, 郑克梅, 张尧, 等. 基于改进 CRITIC 法与云模型相结合的高速公路路堑高边坡工程施工安全总体风险评估模型研究[J]. 安全与环境工程, 2019, 26(3): 127-132.
- [4] 秦植海, 秦鹏. 高边坡稳定性评价的模糊层次与集对分析耦合模型[J]. 岩土工程学报, 2010(5): 706-711.
- [5] 刘秀, 李文洋. 基于熵权物元可拓模型的路堑边坡安全性评价[J]. 公路交通科技, 2022, 18(11): 49-55.
- [6] 冯忠居, 朱彦名, 高雪池, 等. 基于熵权-灰关联法的岩质开挖边坡安全评价模型[J]. 交通运输工程学报, 2020, 20(2): 55-65.
- [7] 卢伟. 高速公路改扩建既有锚固岩质边坡二次开挖关键问题研究[D]. 长沙: 湖南科技大学, 2020.
- [8] 谢旺祥. 高速公路改扩建工程高边坡施工过程中运营安全风险评价[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2014.