

文章编号: 1674-599X(2022)02-0013-07

基于层次可拓集的公路边坡稳定性评估

王道隆¹, 向敬², 黄亚娥², 曾铃³

(1. 中交路桥华南工程有限公司, 广东 清远 528400; 2. 浙江海洋大学, 浙江 舟山 316000;
3. 长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114)

摘 要: 为分析公路边坡稳定性评估的影响因素, 确定稳定性等级, 基于结合层次分析法和可拓集理论, 构建了基于层次可拓集的边坡稳定性评估模型, 建立多层次评估指标体系, 计算了各评估指标的权重和各级指标的综合关联度, 并对评估指标进行了排序。依据该模型对广连高速路基某段岩质路堑高边坡施工稳定性进行了评估, 研究表明: 该边坡稳定性综合关联度分别为-0.447 9、-0.188 0、-0.013 1、-0.014 3和-0.339 8, 稳定性评估的级别特征值为3.315 4, 评估结果为Ⅲ级, 偏向为Ⅳ级, 与现场勘测报告一致。该模型可为公路边坡稳定性评估和施工方案的编制提供参考。

关键词: 路基施工; 可拓集; 边坡稳定性

中图分类号: U416 **文献标志码:** A

Stability assessment of highway slope based on extension set of hierarchy

WANG Daolong¹, XIANG Jing², HUANG Ya'e², ZENG Ling³

(1. CCCC Road and Bridge South China Engineering Co., Ltd., Qingyuan 528400, China; 2. Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316000, China; 3. Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: In order to analyze the influencing factors for stability evaluation of highway slope, assessing the stability grade. Based on the AHP method and extension set theory, the assessment model of slope stability was established using extension hierarchy method. The multi-level assessment index system was established, the weight order of assessment indices and the comprehensive correlation degree of each level index were calculated. The construction stability of a rock cutting high slope in the Guanglian highway subgrade was evaluated using the model. The research results show that the comprehensive correlation degree of the slope stability is -0.447 9, -0.188 0, -0.013 1, -0.014 3, -0.339 8, respectively. The grade characteristic value of the stability evaluation is 3.3154, and the evaluation result is grade III to grade IV, which is consistent with result from the field survey. The model can provide reference for stability evaluation of highway slope and construction plan.

Key words: subgrade construction; extension set; slope stability

在高速公路路基施工中, 高边坡稳定性分析是路基工程施工安全管控的重点环节。边坡施工前需考虑稳定性影响因素, 编制合理的高边坡施工方案, 预防安全事故的发生。在边坡稳定性评估中, 常用的方法有模糊评价法^[1]、强度折减法^[2]、有限元法^[3]、灰理论聚类评价法^[4]、可拓层次分析

法和极限平衡法等。边坡稳定评估的关键是选取评估指标、确定指标权重及选择综合评价方法^[5]。国内外许多学者已进行了大量的探索性研究, 也取得了一些成果。孙世国等人^[6]改进了模糊层次分析法, 计算了多种类型权重, 将模糊权重进行调整, 对不同类型的边坡进行了稳定性评估。刘洋

收稿日期: 2021-05-21

基金项目: 浙江省项目(2020C21013); 中交集团项目(ZJLJGLTJ5A3JSFW2019011)

作者简介: 王道隆(1990—), 男, 中交路桥华南工程有限公司工程师。

洋等人^[7]结合层次分析法(analytic hierarchy process, 简称为AHP), 构建了基于AHP的山区丘陵公路边坡稳定性评价模型。曹仁举等人^[8]用模糊数学和系统工程的理论与方法, 建立了软岩边坡稳定性的一级模糊综合评判模型和多级模糊综合评判模型。高红灵^[9]采用三维有限元数值模拟方法, 对西宁市城南区某建筑高边坡进行了支护前、后的数值模拟对比。这些研究成果建立了边坡评估的基本理论与方法, 也构建了众多数学模型, 但对评估指标的选取多采用专家调查法, 而该方法赋权的主观性强, 缺乏对评估等级的定量分析。因此, 本研究拟以广连高速(广州至连江高速)公路路基施工岩质边坡稳定性影响因素评估为依托, 根据AHP法和可拓集理论, 建立评估模型, 分析边坡稳定性的关键影响因素, 可为类似岩质路堑边坡施工的安全控制提供借鉴。

1 层次可拓集评估模型的构建

1.1 评估指标体系的建立

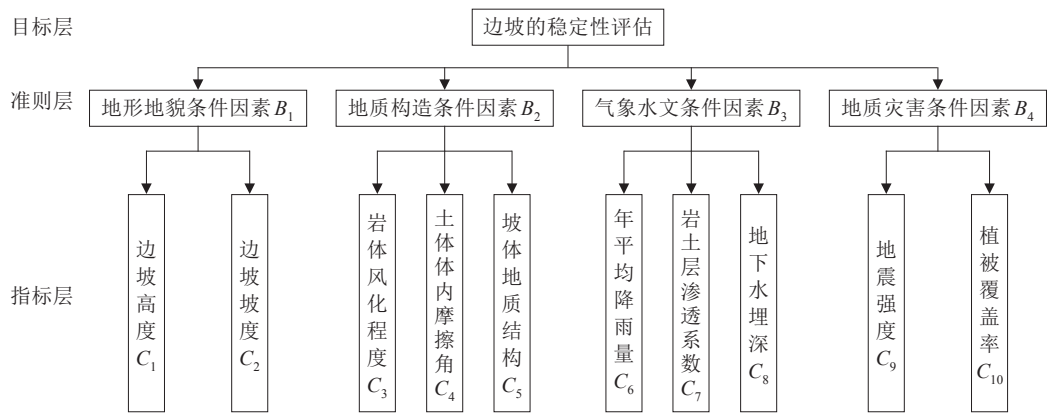


图1 广连高速公路路基施工高边坡稳定性评估指标体系

Fig. 1 The evaluation index system of high slope stability in roadbed construction of the Guanglian expressway

表1 影响因素两两比较标准

Table 1 Pairwise comparison criteria of influencing factors

比较标准 a_{ij}	定义	说明
1	同等重要	根据实际经验 A 和 B 具有同等的重要性
3	稍微重要	认为 A 较 B 稍微重要, 根据实际经验其中一个要素较另一个要素稍微重要
5	明显重要	认为 A 较 B 明显重要, 根据实际经验明显倾向于某一要素
7	强烈重要	认为 A 较 B 明显重要, 根据实际经验非常倾向于某一要素
9	绝对重要	认为 A 较 B 绝对重要, 根据实际经验, 在比较时, 某一要素非常重要, 即另一个要素相对无重要性
2、4、6、8		用于这些标准之间的折中值

由于边坡稳定性影响因素的评估结果关系到施工安全控制。因此, 指标体系的建立要坚持科学合理的原则。本研究依据边坡评估规范^[10]和相关研究成果, 以广连高速 A3 分部某段岩质路堑高边坡施工实例, 选取地形地貌、地质构造、气象水文和地质灾害 4 个因素作为准则层; 选取边坡高度(m)、边坡坡度(°)、岩体风化程度(%)、土体内摩擦角(°)、坡体地质结构、年平均降雨量(mm)、岩土层渗透系数、地下水埋深(m)、地震强度和植被覆盖率(%) 作为指标层建立层次结构指标体系^[11], 如图 1 所示。

1.2 权重计算

基于 AHP 法^[12]建立广连高速 A3 分部某段高边坡施工重大风险识别的判断矩阵, 以及判断标准见表 1。其中, 1、3、5、7、9 为风险因素两两相互比较的重要性, 主要是对边坡稳定性影响因素进行分类, 建立各种影响因素多级递阶结构模型, 应用两两比较法构造影响因素判断矩阵 **D**, 计算综合权重, 对风险因素进行优先排序。

$$D = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1m} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \cdots & a_{mm} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: $D = (a_{ij})_{n \times n}$ 为判断矩阵, a_{ij} 为第 i 项风险因素相对于第 j 项风险因素的重要性的比较结果, 为保持一致性, $a_{ij} \cdot a_{ji} = 1$, $i=1, 2, \dots, n$, $j=1, 2, \dots, n$, 并假设 $a_{ii}=1$, $i=1, 2, \dots, n$ 。

根据公式 (2) ~ (3), 计算判断矩阵的一致性指标 CI、随机一致性^[13]比例 CR。当 $CR < 0.1$ 时, 表示该矩阵满足一致性检验标准。若 $CR > 0.1$, 则矩阵不满足一致性检验标准, 需检查专家调查数据进行修正, 直至 $CR < 0.1$ 。

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

$$CI = \frac{(\lambda_{\max} - n)}{n - 1} \quad (3)$$

式中: RI 为随机一致性指标, 见表 2; n 为判断矩阵阶数; λ_{\max} 为判断矩阵的最大特征值。

表 2 随机一致性指标

Table 2 Table of random consistency indexes

阶数	3	4	5	6	7	8	9
RI	0.58	0.89	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45

根据判断矩阵将同一准则下各指标按权重值进行重要性排序。根据公式 (4), 得到判断矩阵最大特征值 λ_{\max} 对应的特征向量 W 。

$$DW = \lambda_{\max} W \quad (4)$$

将 W 按照公式 (5) 进行归一化处理, 得到 W_i , 则单层次权重值排序为 W_{j1}, \dots, W_{jk} 。

$$W = \begin{bmatrix} a_1 \\ \vdots \\ a_k \end{bmatrix}, W_i = \begin{bmatrix} w_{j1} \\ \vdots \\ w_{jk} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$w_{jk} = \frac{a_i}{\sum_{i=1}^k a_i} \quad (j = 1, 2, \dots, n)$$

准则层指标的单层次排序 $W_p = (p_1, p_2, p_3, p_4)^T$ 与指标层指标的单层次排序 $W_j = (b_1, b_2, \dots, b_n)$ 利用公式 (6), 得到总权重排序 W_1 。

$$W_1 = p_i w_i, i = 1, 2, 3, 4 \quad (6)$$

1.3 物元分析

结合单层次排序和总排序权重, 利用可拓集理论^[14], 将物元、事元、关系元 (各个指标、各个指标对应的等级和各个指标对应等级的量值范围) 结合在一起, 形成可拓学逻辑细胞, 建立广连高

速公路路基施工边坡稳定性评估物元模型 $R_T = (N, C, V)$ 。

1) 确定可拓评估物元

$$R_T = (N, C, V) \quad (7)$$

式中: $N = (N_1, N_2, N_3, N_4)$, N 为广连高速待评估边坡稳定性等级集; $C = (C_i)$, $i = (1, 2, \dots, 10)$ 为影响边坡稳定性的因素集; V 为 N 关于 C 的评估集。

2) 确定经典域与节域

根据可拓集理论建立物元评估模型, 其经典域 R_j 为:

$$R_j = (N_j, C, V_{ij}) \quad (8)$$

式中: N_j 为边坡稳定性评估第 j ($j=1, 2, \dots, 5$) 级; C_i 为第 i ($i=1, 2, \dots, 10$) 个评估指标; $V_{ij} = [a_{ij}, b_{ij}]$ 为 N_j 关于评估指标的取值范围。

其节域 R_p 定义为:

$$R_p = (P, C, V_{ip}) \quad (9)$$

式中: P 为广连高速路基施工高边坡稳定性评估等级的全体^[15]; $V_{ip} = [a_{ip}, b_{ip}]$ 为评估指标 C_i 的所有取值范围。

3) 确定关联函数及计算关联度

设 v_{ik} 为边坡稳定性关于 C_i 的实测值, $v_{ij} = [a_{ij}, b_{ij}]$, $v_{ip} = [a_{ip}, b_{ip}]$, 依据可拓集中“距”^[16]的定义, 得到边坡稳定性关于经典域和节域的距为:

$$\begin{cases} \rho(v_{ik}, v_{ij}) = \left| v_{ik} - \frac{a_{ij} + b_{ij}}{2} \right| - \frac{b_{ij} - a_{ij}}{2} \\ \rho(v_{ik}, v_{ip}) = \left| v_{ik} - \frac{a_{ip} + b_{ip}}{2} \right| - \frac{b_{ip} - a_{ip}}{2} \end{cases} \quad (10)$$

第 i 个指标关于等级 j 的关联度 $k_j(v_{ik})$ 采用关联函数为:

$$k_j(v_{ik}) = \begin{cases} \frac{-\rho(v_{ik}, v_{ij})}{|a_{ij} - b_{ij}|}, v_{ik} \in v_{ij} \\ \frac{\rho(v_{ik}, v_{ip})}{\rho(v_{ik}, v_{ip}) - \rho(v_{ik}, v_{ij})}, v_{ik} \notin v_{ij} \end{cases} \quad (11)$$

4) 确定综合关联度和稳定性等级

综合关联度^[17] $K(N_i)$ 和指标层关联度 $K(N_p)$ 的计算式为:

$$K(N_i) = (w_{j1}, w_{j2}, \dots, w_{jk})$$

$$\begin{bmatrix} k_1(v_{i1}) & k_2(v_{i1}) & k_3(v_{i1}) & k_4(v_{i1}) & k_5(v_{i1}) \\ k_1(v_{i2}) & k_2(v_{i2}) & k_3(v_{i2}) & k_4(v_{i2}) & k_5(v_{i2}) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ k_1(v_{ik}) & k_2(v_{ik}) & k_3(v_{ik}) & k_4(v_{ik}) & k_5(v_{ik}) \end{bmatrix}, \quad i = 1, 2, 3, 4 \quad (12)$$

$$K(N)=\sum_{p=1}^4W_pK(N_p)$$
$$=[K_1(N),K_2(N),K_3(N),K_4(N),K_5(N)]$$

(13)

式中： W_{jk} 为归一化后同一准则层下的各指标权重； W_p 为归一化后的准则层各指标权重。

计算得出综合关联度 $K(N)$ 后，若 $K_{t,0}=\max(K_t)$ ， $t=1,2,\cdots,5$ ，则可确定待评边坡施工风险的等级为 t 级。

5) 确定级别变量特征值

$$\ddot{K}_t=\frac{K_t-\min\{K_t\}}{\max\{K_t\}-\min\{K_t\}}$$

(14)

$$t^*=\frac{\sum_{t=1}^5t^*\overline{K}_t}{\sum_{t=1}^5\overline{K}_t}$$

(15)

式中： t^* 为待评价所属等级级别变量特征值。

2 实例验证

2.1 工程概况

以广连高速公路K80+960~K81+040右侧岩质路堑高边坡为工程背景进行实例验证。该边坡为高速公路路基施工开挖出的岩质边坡，边坡区属于构造剥蚀地貌区，自然坡度为20°~30°，边坡最大高度为48.9 m，植被较发育，坡顶设有截水沟，坡面设有排水沟，坡底设有碎落台。

2.2 等级划分及无量纲化

结合专家意见和相关规范^[10]，将稳定性等级划分为Ⅰ~Ⅴ级，边坡概况和设计方案等见表3，分别对应稳定、基本稳定、欠稳定、不稳定和极不稳定状态。结合已有研究成果和相关规范^[10]，各指

标等级划分所对应的范围见表4。由于本评估指标中含有定性指标，无法与定量指标相比较，需要对其进行无量纲化处理^[18]，处理后结果见表5。将定性指标的坡体结构和地下水埋深等级量化，分为稳定（0~0.2）、基本稳定（0.2~0.4）、欠稳定（0.4~0.6）、不稳定（0.6~0.8）和极不稳定（0.8~1.0）。由表5可知，实测值 $C_5=0.50$ 、 $C_8=0.55$ 。

2.3 确定经典域、节域

根据公式（6）~（8），建立本实例中边坡各因素的经典域 $P_1\sim P_5$ 、节域 R_p 和可拓物元 R_T ，见表6。

2.4 权重及关联度计算

根据公式（4）~（5），计算得出各指标权重，见表7。根据公式（10）~（11），计算得出各指标关联度，见表8。根据公式（12）~（13），得到各指标等级关联度和综合关联度，见表9。

表3 边坡等级简况及加固设计措施表

Table 3 Slope grade status and control measures

边坡等级	边坡概况	边坡设计加固措施
一级	整体稳定性良好，边坡稳定，无明显病害，坡面设施完善。	不需要其他加固措施
二级	整体稳定性较好，边坡基本稳定，有轻微病害，坡面设施基本完整。	挂网+喷砼
三级	整体稳定性一般，但处于临界状态，遇大暴雨可能会发生局部滑塌。	拱形格栅+石砌墙
四级	整体稳定性较差或已经破坏，出现严重结构性病害，存在滑塌、崩塌、倾覆等整体破坏风险。	拱形格栅+石砌墙，局部锚杆加固
五级	整体稳定性已经破坏，出现严重结构性病害，存在滑塌、崩塌、倾覆等整体破坏风险。	重新开挖或采用预应力锚索框架并结合其他加固方式

表4 各指标因素评估等级范围及实测值

Table 4 Evaluation range and measured value of index factors

稳定状态	B ₁		B ₂			B ₃			B ₄	
	C ₁ /m	C ₂ /（°）	C ₃ /%	C ₄ /（°）	C ₅ /%	C ₆ /mm	C ₇ /%	C ₈	C ₉	C ₁₀ /%
稳定	3~10	10~20	0~5	35~45	0.1	0~600	0~5	浅	0~2	35~45
基本稳定	10~25	20~30	5~15	24~35	0.3	600~900	5~15	较浅	2~4	25~35
欠稳定	25~45	30~40	15~25	13~24	0.5	900~1 200	15~30	一般	4~6	15~25
不稳定	45~60	40~50	23~35	2~13	0.7	1 200~1 500	30~45	较深	6~8	5~15
极不稳定	60~90	50~90	35~45	0~2	0.9	1 500~2 000	45~55	深	8~10	0~5
实测值	48.9	25.0	13.0	22.0	0.5	1 906.2	27.0	一般	4.1	30.0

表5 无量纲化后各指标因素评估等级范围及实测值

Table 5 Evaluation grade range and measured value of index factors after dimensionless

稳定状态	B ₁		B ₂			B ₃			B ₄	
	C ₁ /m	C ₂ / (°)	C ₃ /%	C ₄ /°	C ₅ /%	C ₆ /mm	C ₇ /%	C ₈ /m	C ₉	C ₁₀ /%
稳定	3~10	10~20	0~5	35~45	0~0.2	0~600	0~5	0~0.2	0~2	35~45
基本稳定	10~25	20~30	5~15	24~35	0.2~0.4	600~900	5~15	0.2~0.4	2~4	25~35
欠稳定	25~45	30~40	15~25	13~24	0.4~0.6	900~1 200	15~30	0.4~0.6	4~6	15~25
不稳定	45~60	40~50	23~35	2~13	0.6~0.8	1 200~1 500	30~45	0.6~0.8	6~8	5~15
极不稳定	60~90	50~90	35~45	0~2	0.8~1	1 500~2 000	45~55	0.8~1.0	8~10	0~5
实测值	48.90	25.00	13.00	22.00	0.50	1 906.20	27.00	0.55	4.10	30.00

表6 各因素经典域、节域、可拓物元表

Table 6 Table of classical domain, node domain and extension matter-element of factors

	C ₁ /m	C ₂ / (°)	C ₃ /%	C ₄ / (°)	C ₅ /%	C ₆ /mm	C ₇ /%	C ₈ /m	C ₉	C ₁₀ /%
P ₁	(3,10)	(10,20)	(0,5)	(35,45)	(0,0.2)	(0,600)	(0,5)	(0,0.2)	(0,2)	(35,45)
P ₂	(10,25)	(10,25)	(10,25)	(10,25)	(10,25)	(10,25)	(10,25)	(10,25)	(10,25)	(10,25)
P ₃	(25,45)	(45,60)	(60,90)	(25,45)	(45,60)	(60,0)	(25,45)	(45,60)	(60,90)	(25,45)
P ₄	(30,40)	(40,50)	(50,90)	(30,40)	(40,50)	(50,90)	(30,40)	(40,50)	(50,90)	(30,40)
P ₅	(15,25)	(23,35)	(35,45)	(15,25)	(23,35)	(35,45)	(15,25)	(23,35)	(35,45)	(15,25)
R _p	(3,9)	(10,90)	(0,45)	(0,45)	(0,1)	(0,2 000)	(0,55)	(0,1)	(0,10)	(0,45)
R _T	48.90	25.00	13.00	22.00	0.50	1 906.20	27.00	0.55	4.10	30.00

表7 各指标权重表

Table 7 Weight of indices

目标层	准则层	权重 W _i	指标层	权重 W _i
路基 施工 高边 坡稳 定性 评估	B ₁	0.216 9	C ₁	0.875 0
			C ₂	0.125 0
	B ₂	0.623 7	C ₃	0.258 3
			C ₄	0.104 7
			C ₅	0.637 0
			C ₆	0.125 0
			C ₇	0.125 0
			C ₈	0.750 0
	B ₃	0.103 5	C ₉	0.142 9
			C ₁₀	0.857 1

表8 指标层各指标稳定性关联度值

Table 8 Stability correlation degree of indicators in the indicator layer

指标层	稳定	基本稳定	欠稳定	不稳定	极不稳定
C ₁	-0.486 3	-0.367 7	-0.086 7	0.260 0	-0.212 6
C ₂	-0.250 0	0.500 0	-0.250 0	-0.500 0	-0.625 0
C ₃	-0.381 0	0.200 0	-0.133 3	-0.480 0	-0.628 6
C ₄	-0.500 0	-0.133 3	0.181 8	-0.409 1	-0.606 1
C ₅	-0.375 0	-0.166 7	0.500 0	-0.166 7	-0.375 0
C ₆	-0.933 0	-0.914 7	-0.812 4	-0.812 4	0.187 6
C ₇	-0.449 0	-0.307 7	0.200 0	-0.100 0	-0.400 0
C ₈	-0.437 5	-0.250 0	0.250 0	-0.100 0	-0.357 1
C ₉	-0.338 7	-0.023 8	0.050 0	-0.316 7	-0.487 5
C ₁₀	-0.500 0	0.500 0	-0.500 0	-0.750 0	-0.833 3

表9 各指标等级关联度以及综合关联度表

Table 9 Correlation degree and comprehensive correlation degree of indices

	$t=1$	$t=2$	$t=3$	$t=4$	$t=5$	等级
	-0.456 0	-0.259 2	-0.107 1	0.165 0	-0.264 1	IV
准则层	-0.389 6	-0.068 5	0.303 1	-0.273 0	-0.464 7	III
关联度						
$K(N_i)$	-0.500 9	0.340 3	0.110 9	-0.189 0	-0.294 4	III
	-0.477 0	0.425 1	-0.421 4	-0.688 1	-0.783 9	II
目标层						
关联度	-0.447 9	-0.188 0	-0.013 1	-0.014 3	-0.339 8	III
$K(N)$						

实例边坡关于评估等级 I ~ V 的综合关联度 $K(N) = (-0.447\ 9, -0.188\ 0, -0.013\ 1, -0.014\ 3, -0.339\ 8)$, $\max(K_i) = K_3$ 。本实例边坡稳定性等级属于 III 级, 由公式 (13) ~ (14) 可知目标层级别变量特征值 t^* 为 3.315 4, 偏向为 IV 级。由准则层权重排序可知, 高速公路路基施工中, 边坡稳定的主要影响因素为地质构造。坡体结构影响最为严重, 该边坡为欠稳定状态的岩质边坡, 整体稳定性一般, 若处于临界状态, 遇到大暴雨会发生局部滑塌。因此, 施工中应该对该边坡加强监测, 并设置拱形格栅、石砌墙等坡面防护措施^[19]。

3 结论

1) 考虑地形地貌、地质构造、气象水文和地质灾害 4 个因素, 以及 10 个独立影响因素。采用 AHP 法构建了路基施工中岩质路堑边坡稳定性评价指标体系, 并根据最终权重排序结果, 确定了主要影响因素为地质构造条件。

2) 通过查阅相关文献规范, 结合专家意见, 建立了可拓物元模型。根据物元模型, 结合可拓集理论, 计算了各评估指标与稳定性等级之间的关联度。最后将关联函数与各指标权重排序进行线性组合, 得到综合关联度 $K(N)$ 和级别变量的特征值, 判断实例边坡稳定性等级和等级偏向程度。针对评估结果对实例边坡稳定性情况进行分析, 并提出相应的防护措施, 可供有关部门参考。

3) 利用本模型验算实例边坡所得的主要影响因素、稳定性评估结果与相关文献和现场检测结果吻合, 验证了本模型在高速公路岩质边坡稳定性评估方法的科学合理性, 为有关部门在高速公路

路岩质边坡稳定性评估方面提供了一种新的思路 and 理论支撑。

参考文献(References):

- [1] 赵剑. 基于有限元分析的粉土类边坡稳定性研究[J]. 华北自然资源, 2020(5): 109-111. (ZHAO Jian. Study on stability of silty soil slope based on finite element analysis[J]. Huabei Natural Resources, 2020(5): 109-111. (in Chinese))
- [2] 杜聪. 基于 ABAQUS 强度折减法的边坡稳定性分析[J]. 交通科学与工程, 2018, 34(2): 31-34, 90. (DU Cong. Analysis of slope stability by strength reduction FEM based on ABAQUS[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2018, 34(2): 31-34, 90. (in Chinese))
- [3] 郭子仪, 范振华, 朱云升, 等. 边坡稳定性分析中的有限元极限平衡法[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2014, 38(1): 79-84. (GUO Ziyi, FAN Zhenhua, ZHU Yunsheng, et al. Finite element and limit equilibrium method applied on the stability analysis of road slope[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering), 2014, 38(1): 79-84. (in Chinese))
- [4] 闫一. 基于灰关联分析的聚类方法研究及应用[D]. 重庆: 重庆邮电大学, 2016. (YAN Yi. Research and application of clustering method based on grey incidence analysis[D]. Chongqing: Chongqing University of Posts and Telecommunications, 2016. (in Chinese))
- [5] 王新民, 康虔, 秦健春, 等. 层次分析法-可拓学模型在岩质边坡稳定性安全评价中的应用[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013, 44(6): 2455-2462. (WANG Xinmin, KANG Qian, QIN Jianchun, et al. Application of AHP-extensions model to safety evaluation of rock slope stability [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2013, 44(6): 2455-2462. (in Chinese))
- [6] 孙世国, 苏振华, 张英海. 边坡稳定性的 GIS 评价方法[J]. 金属矿山, 2016(5): 42-47. (SUN Shiguo, SU Zhenhua, ZHANG Yinghai. GIS-based approach of rock slope's stability assessment under multiple factors[J]. Metal Mine, 2016(5): 42-47. (in Chinese))
- [7] 刘洋洋, 李永强, 李有鹏. 基于 AHP-集对分析的山区丘陵公路边坡稳定性评价模型[J]. 公路, 2018, 63(1): 6-12. (LIU Yangyang, LI Yongqiang, LI Youpeng. Slope stability evaluation model for mountainous and hilly highway based on AHP-SPA[J]. Highway, 2018, 63(1): 6-

12. (in Chinese))
- [8] 曹仁举,岳跃宁,陈绪超.基于模糊综合评判的露天矿软岩边坡稳定性分析[J].煤炭技术,2020,39(5):143-145. (CAO Renju, YUE Yuening, CHEN Xuchao. Stability analysis of soft rock slope in open pit mine based on fuzzy comprehensive evaluation[J]. Coal Technology, 2020,39(5):143-145. (in Chinese))
- [9] 高红灵.基于有限元模拟的高边坡稳定性分析[C]//2020年工业建筑学术交流会论文集(中册).北京,2020:254-257. (GAO Hongling. Stability analysis of high slope based on finite element simulation[C]//2020 Industrial Architecture Academic Exchange Conference Proceedings (Middle volume). Beijing, 2020: 254-257. (in Chinese))
- [10] 交通运输部安全与质量监督管理局.高速公路路堑高边坡工程施工安全风险评估指南(试行)[M].北京:人民交通出版社,2015. (Department of Safety and Quality Supervision and Management, Ministry of transport. Guide for safety risk assessment of highway cutting high slope project construction: Trial implementation [M]. Beijing: China Communications Press, 2015. (in Chinese))
- [11] 李勇.层次分析法在风险评估中的应用[J].化工管理,2016(24):148. (LI Yong. Application of analytic hierarchy process in risk assessment[J]. Chemical management, 2016(24):148. (in Chinese))
- [12] 骆正清,杨善林.层次分析法中几种标度的比较[J].系统工程理论与实践,2004,24(9):51-60. (LUO Zhengqing, YANG Shanlin. Comparative study on several scales in AHP[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2004, 24(9):51-60. (in Chinese))
- [13] 邓雪,李家铭,曾浩健,等.层次分析法权重计算方法分析及其应用研究[J].数学的实践与认识,2012,42(7):93-100. (DENG Xue, LI Jiaming, ZENG Haojian, et al. Research on computation methods of AHP wight vector and its applications[J]. Mathematics in Practice and Theory, 2012,42(7):93-100. (in Chinese))
- [14] 杨春燕,蔡文,涂序彦.可拓学的研究、应用与发展[J].系统科学与数学,2016,36(9):1507-1512. (YANG Chunyan, CAI Wen, TU Xuyan. Research, application and development on extenics[J]. Journal of Systems Science and Mathematical Sciences, 2016, 36(9): 1507-1512. (in Chinese))
- [15] 张向东,姜革鑫.基于可拓学理论的矿山边坡稳定性分析[J].安全与环境学报,2018,18(6):2141-2145. (ZHANG Xiangdong, JIANG Gexin. Analysis of the mining slope stability from the point of view of the theory of extenics [J]. Journal of Safety and Environment, 2018,18(6):2141-2145. (in Chinese))
- [16] 邱礼球.基于物元可拓模型的改扩建隧道施工安全风险评估[J].隧道建设(中英文),2018,38(S2):25-30. (QIU Lili. Safety risk assessment of tunnel rehabilitation/enlargement based on matter element extension model[J]. Tunnel Construction, 2018,38(S2)25-30. (in Chinese))
- [17] 王金梁,王道隆,陈祖斌,等.基于模糊可拓集的特长隧道施工风险评估[J].公路与汽运,2021(2):150-154,160. (WANG Jinliang, WANG Daolong, CHEN Zubin, et al. Risk assessment of extra-long tunnel construction based on fuzzy extension set[J]. Highways & Automotive Applications, 2021(2): 150-154, 160. (in Chinese))
- [18] 杨皓翔,李涛,张招金,等.基于拉格朗日插值法的新陈代谢模型在边坡位移监测中的应用[J].安全与环境工程,2017,24(2):33-38. (YANG Haoxiang, LI Tao, ZHANG Zhaojin, et al. Application of metabolic model in slope displacement monitoring by Lagrange interpolation method[J]. Safety and Environmental Engineering, 2017, 24(2):33-38. (in Chinese))
- [19] 李涛.基于委托代理理论的工程监理期望值模型[J].模糊系统与数学,2014,28(4):186-190. (LI Tao. An expected value model of the engineering supervision based on principal-agent theory[J]. Fuzzy Systems and Mathematics, 2014,28(4):186-190. (in Chinese))