

DOI:10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2019.04.08

基于 ANP-KL-TOPSIS 法的铁路隧道围岩安全性评价

祁英弟, 靳春玲, 贡 力

(兰州交通大学土木工程学院, 甘肃 兰州 730070)

摘要: 为客观评价隧道围岩安全状态, 结合围岩岩体结构及地质特征等影响因素, 建立隧道围岩安全评价指标体系。用 ANP 法应用 Super Decision 软件建立指标因素关联图并计算出各指标权重。在传统 TOPSIS 法的基础上结合相对熵原理, 用 Kull-back-Leibler 距离计算贴近度, 构建隧道围岩安全评价模型。运用该模型对张吉怀铁路兰新乡隧道进口段七处隧道段的围岩进行安全性评价, 得出各隧道段围岩安全等级, 评价结果切合实际, 对隧道施工有一定的指导意义。该评价模型简单可操作, 可运用于隧道围岩安全性评价研究中。

关键词: 铁路隧道; 围岩; 安全性评价; ANP; KL-TOPSIS 法

中图分类号: TU457

文献标识码: A

文章编号: 1003-8035(2019)04-0054-07

Safety evaluation of railway tunnel surrounding rock based on ANP-KL-TOPSIS Method

QI Yingdi, JIN Chunling, GONG Li

(School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou, Gansu 730070, China)

Abstract: In order to evaluate the safety state of tunnel surrounding rock objectively, the evaluation index system of tunnel surrounding rock safety is established by combining with the influence factors such as the structure of surrounding rock mass and geological characteristics. The correlation graph of index factors is established by using ANP method and Super Decision software, and the weight of each index is calculated. Based on the traditional TOPSIS method, the relative entropy principle is added to calculate the closeness degree by using the Kull-back-Leibler distance, and the safety evaluation model of tunnel surrounding rock is constructed. The model is used to evaluate the safety of surrounding rock in seven sections of Lanxinxiang tunnel entrance section of Zhangjiuhai Railway, and the safety of surrounding rock of each tunnel section is obtained. The evaluation results are practical and have certain guiding significance for tunnel construction. The evaluation model is simple and operable and can be used in the study of tunnel surrounding rock safety evaluation.

Keywords: railway tunnel; surrounding rock; safety evaluation; ANP; KL-TOPSIS method

0 引言

随着我国国民经济的发展, 无论是铁路工程、公路

工程还是水利工程等, 隧道的开发建设越来越普遍。而在隧道开挖施工过程中, 其岩体围岩的稳定及安全性一直是研究的重点和难点。影响围岩安全性的因素

收稿日期: 2018-11-04; 修订日期: 2018-12-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(51669010); 甘肃省自然基金(17JR5RA105); 甘肃省“十三五”教育科学规划课题(GS[2017]GHB0382)

第一作者: 祁英弟(1993-), 女, 甘肃临夏州人, 硕士研究生, 从事土木工程造价与管理研究工作。E-mail: 1508588707@qq.com

通讯作者: 靳春玲(1976-), 女, 黑龙江齐齐哈尔人, 教授, 从事土木工程造价与管理研究工作。E-mail: 522719061@qq.com

指标众多,各指标因素间相互关联、相互制约。因此,系统地识别出各影响因素并对围岩安全性进行评价预判,能有效控制隧道在施工开挖过程中的风险。

在隧道围岩安全及稳定性研究方面,苏永华等^[1]利用非概率可靠性的凸集合模型对岩体结构围岩的稳定性进行了分析研究,该方法应用复杂不适用于常规围岩的安全性评价。康志强等^[2]运用层次分析法结合可拓学理论建立物元评价模型,对地下隧道的岩体质量进行了评价,该方法没有考虑各指标因素间存在的关联影响关系,有一定的缺陷。郑颖人等^[3]引入有限元强度折减法根据洞周位移及围岩塑性区大小对围岩安全性进行判别,其合理性有待进一步研究。常晓林等^[4]利用联系熵模型对围岩稳定性进行评价,但并未给出准确的变形控制标准。王克忠等^[5]采用数值仿真模拟方法对引水隧洞复合支护体系及围岩稳定性进行了研究,只提供了理论依据。我国在隧道围岩安全性研究方面,现有评价方法所考虑的影响因素固定片面,不能完整反映隧道围岩的安全状态,且计算量大,预设情况单一。评价指标体系及评价模型很不完善,有待进一步研究。

本文在既有研究的基础上更加全面的提出针对隧道围岩安全性的评价指标体系,应用 ANP 求解出影响隧道围岩安全性的各指标权重,解决了在各指标赋权时同一层次中不同影响因素之间存在的相互影响、相互依存关系。并将相对熵原理^[6]与 TOPSIS 法^[7-9]相结合,用 Kull-back-Leibler 距离^[10-11]计算所评价隧道各标段与理想值的贴近度。有效解决了单纯 TOPSIS 法对于正理想方案与负理想方案连线中垂线上的点无法区分优劣的缺点,使评价结果更加合理可靠。

1 建立隧道围岩安全评价指标体系

隧道的坍塌破坏,主要原因在于围岩稳定性差,安全性低。岩体质量问题复杂矛盾且影响围岩稳定安全性的因素众多,主要有地质因素、岩体自身结构状态及人为因素等等。根据《铁路隧道设计规范》、《铁路隧道超前地质预报技术规程》、《工程岩体分级标准》,识别出影响隧道围岩安全性的围岩岩性及结构特征、围岩物理力学性质、围岩地质特性及人为因素四类指标,建立如表 1 所示的隧道围岩评价指标体系及判定标准。

表 1 隧道围岩安全性评价指标体系及判定标准
Table 1 Evaluation index system and criteria for tunnel surrounding rock safety

一级指标	二级指标		稳定性等级				
			I 级	II 级	III 级	IV 级	V 级
围岩岩性及结构特征(A)	围岩基本质量指标 BQ	A_1	>550	451 ~ 550	351 ~ 450	251 ~ 350	≤250
	岩体完整性指数 K_v	A_2	>0.75	0.55 ~ 0.75	0.35 ~ 0.55	0.15 ~ 0.35	≤0.15
	单轴饱和抗压强度 R_c/MPa	A_3	>60	30 ~ 60	15 ~ 30	5 ~ 15	≤5
	围岩弹性纵波速率 $v_p/\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$	A_4	>5.3	4.5 ~ 5.3	4.0 ~ 4.5	3.0 ~ 4.0	2.0 ~ 3.0
	结构面摩擦系数 f	A_5	0.8 ~ 1.2	0.3 ~ 0.8	0.2 ~ 0.3	0.1 ~ 0.2	0.01 ~ 0.1
围岩物理力学性质(B)	弹性反力系数 $K/(\text{MPa}/\text{m})$	B_1			500 ~ 1 200	200 ~ 500	100 ~ 200
	变形模量 E/GPa	B_2	33 ~ 60	20 ~ 33	6 ~ 20	1.3 ~ 6.0	0.0 ~ 1.3
	泊松比 ν	B_3	0.0 ~ 0.2	0.20 ~ 0.25	0.25 ~ 0.30	0.30 ~ 0.35	0.35 ~ 0.45
围岩地质特征(C)	地下水状态/ $\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$	C_1	<25	25 ~ 50	50 ~ 100	100 ~ 125	125 ~ 200
	主要结构面产状/ $(^\circ)$	C_2	75 ~ 90	60 ~ 75	45 ~ 60	30 ~ 45	<30
	初始地应力	C_3	极低	低	中	高	极高
	软弱夹层性质	C_4	无夹层	软岩、岩块	岩屑	岩屑夹泥	泥夹岩屑、泥质
人为指标(D)	施工围岩扰动	D_1	无扰动	微扰动	扰动	严重扰动	破坏扰动
	支护方案	D_2	优等	较好	一般	较差	差
	设计高垮比	D_3	<1.0	1.0 ~ 1.5	1.5 ~ 3.5	3.5 ~ 4.5	4.5 ~ 6.0

2 ANP-KL-TOPSIS 安全评价模型

本文在传统 TOPSIS 法的基础上应用 ANP 法确定各指标权重,考虑了各指标因素间可能存在的关联和反馈关系,更加全面的考虑到了影响因素^[12-13]。结合相对熵原理,将两个不同评价对象之间的差异用 Kull-

back-Leibler 距离来衡量。综合运用 ANP-KL-TOPSIS 模型^[14-15]对铁路隧道围岩进行安全性评价。ANP-KL-TOPSIS 模型算法如下:

(1) 建立标准化评价矩阵

假设有 m 个评价对象,表示为 $P = \{p_1, p_2, \dots, p_m\}$, n 个评价指标,表示为 $r = \{r_1, r_2, \dots, r_n\}$ 。 $r_{ij}(i =$

$1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n$) 表示第 i 个评价对象的第 j 项评价指标, 建立初始评价矩阵 R :

$$R = (r_{ij})_{m \times n} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \cdots & r_{mn} \end{bmatrix}$$

对 R 做标准化处理, 得到标准化评价矩阵 S :

$$S = (s_{ij})_{m \times n} = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} & \cdots & s_{1n} \\ s_{21} & s_{22} & \cdots & s_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ s_{m1} & s_{m2} & \cdots & s_{mn} \end{bmatrix}$$

$$s_{ij} = \frac{r_{ij}}{\sqrt{\sum_{j=1}^n r_{ij}^2}} (i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

(2) ANP 法确定指标权重

根据影响隧道围岩安全性各指标及其相互影响关系, 构建 ANP 网络结构模型。

假设 $X_1, X_2, X_3, \dots, X_m$ 为 ANP 网络结构模型中的控制层元素, $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ 为网络层元素组, $e_{i1}, e_{i2}, e_{i3}, \dots, e_{in} (i = 1, \dots, N)$ 为 x_i 中的元素。以 $X_s (s = 1, 2, \dots, m)$ 为准则, $x_i (i = 1, \dots, N)$ 中的 $e_{jl} (l = 1, 2, \dots, n)$ 为次准则, 将 x_i 中的元素对 e_{jl} 的重要度大小进行比较, 构造出网络层间的判断矩阵, 继而形成超矩阵子块 W_{ij} :

$$W_{ij} = \begin{bmatrix} w_{i1}^{(j1)} & w_{i1}^{(j2)} & \cdots & w_{i1}^{(jn)} \\ w_{i2}^{(j1)} & w_{i2}^{(j2)} & \cdots & w_{i2}^{(jn)} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ w_{in}^{(j1)} & w_{in}^{(j2)} & \cdots & w_{in}^{(jn)} \end{bmatrix}$$

进而得到在以元素 X_s 为准则下的超矩阵 W :

$$W = \begin{bmatrix} W_{11} & W_{12} & \cdots & W_{1N} \\ W_{21} & W_{22} & \cdots & W_{2N} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ W_{N1} & W_{N2} & \cdots & W_{NN} \end{bmatrix}$$

以 X_s 为准则, $x_i (i = 1, \dots, N)$ 为次准则, 比较其他元素组对 x_i 的优势度大小, 得到归一化特征向量 $(p_{1j}, p_{2j}, \dots, p_{Nj})^T$, 将各个元素组特征向量组合得到元素组权重矩阵 P :

$$P = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & \cdots & p_{1N} \\ p_{21} & p_{22} & \cdots & p_{2N} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ p_{N1} & p_{N2} & \cdots & p_{NN} \end{bmatrix}$$

求出加权超矩阵 $\bar{W}$:

$$\bar{W} = PW = (p_{ij} \times W_{ij}) \quad (2)$$

对加权超矩阵 $\bar{W}$ 利用 Super Decision 软件自相乘 β 次, 使得乘积收敛, 得到极限超矩阵。则第 j 列就是 X_s 网络层各元素的全局权重向量, 即为 W_j 。

(3) 建立加权标准化评价矩阵

$$T = (t_{ij})_{m \times n} = \begin{bmatrix} t_{11} & t_{12} & \cdots & t_{1n} \\ t_{21} & t_{22} & \cdots & t_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ t_{m1} & t_{m2} & \cdots & t_{mn} \end{bmatrix}$$

$$t_{ij} = s_{ij} \times W_j (i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n) \quad (3)$$

其中 W_j 表示第 j 项指标的综合权重。

(4) 计算加权标准化矩阵 T 的正理想解和负理想解

$$t^+ = (t_1^+, t_2^+, \dots, t_n^+), t^- = (t_1^-, t_2^-, \dots, t_n^-) \quad (4)$$

对于正指标, 其理想解 t_j^+ 和负理想解 t_j^- 分别为:

$$t_j^+ = \max \{t_{1j}, t_{2j}, \dots, t_{mj}\} \quad (5)$$

$$t_j^- = \min \{t_{1j}, t_{2j}, \dots, t_{mj}\}$$

对于负指标, 其理想解 t_j^+ 和负理想解 t_j^- 分别为:

$$t_j^+ = \min \{t_{1j}, t_{2j}, \dots, t_{mj}\} \quad (6)$$

$$t_j^- = \max \{t_{1j}, t_{2j}, \dots, t_{mj}\}$$

(5) 计算与理想解的 Kullback-Leibler 距离

$$d_i^+ = \sum_{j=1}^n \left[t_j^+ \lg \frac{t_j^+}{t_{ij}^+} + (1 - t_j^+) \lg \frac{1 - t_j^+}{1 - t_{ij}^+} \right]$$

$$d_i^- = \sum_{j=1}^n \left[t_j^- \lg \frac{t_j^-}{t_{ij}^-} + (1 - t_j^-) \lg \frac{1 - t_j^-}{1 - t_{ij}^-} \right] \quad (7)$$

(6) 计算各评价对象的相对贴近度

$$N_i = \frac{d_i^-}{d_i^+ + d_i^-} \quad (8)$$

根据最终求得各评价对象的相对贴近度 N_i 判定围岩的安全性, N_i 越大, 表明所评价对象离理想值越近, 围岩越安全, 反之亦然。其中相对贴近度 N_i 大于 0.8 为安全 I, $(0.6, 0.8]$ 为较安全 II, $(0.4, 0.6]$ 为基本安全 III, $(0.2, 0.4]$ 为不安全 IV, 小于等于 0.2 为极不安全 V。

3 应用实例

本文以新建张吉怀铁路兰新乡隧道进口段为例, 说明 ANP-KL-TOPSIS 法在铁路隧道围岩安全性评价中的应用。

兰新乡隧道位于湖南省怀化市麻阳县兰新乡境内, 沉麻红层盆地, 为剥蚀丘陵地貌, 地势起伏较大, 地

表植被茂盛。其隧址区山坡表层分布有第四系全新统、白垩系上统第二岩组,岩性主要为泥质砂岩,棕红色、褐红色,多有薄弱泥质夹层,为泥岩或泥质砂岩。隧道进口段全风化层风化较剧烈,多呈砂土状,厚约 1~3 m;强风化层风化不均,厚约 7~15 m,岩体节理裂隙发育,岩体破碎,多呈棱块状,敲击易碎,岩质较

软。岩层产状主要为 31°<32°。隧道区地表水较发育,主要为河流水、溪沟水等。地下水类型主要为风化裂隙水及构造裂隙水(表 2)。

根据兰新乡隧道工程地质勘察报告,经过整理分析得到表 3 所示的兰新乡隧道进口各隧道段围岩安全性评价指标数据。

表 2 兰新乡隧道进口各隧道段特点

隧道段	各隧道段特点
DK206+951~DK207+028	该段长 76.9 m,有高度的坍塌冒顶风险,为断层破碎带,强风化作用较明显
DK207+028~DK207+105	该段长 77 m,有高度的坍塌冒顶风险,围岩较破碎,分化裂隙较发育
DK207+105~DK207+220	该段长 115 m,有中度的坍塌掉块,围岩较破碎,分化裂隙较发育
DK207+220~DK207+305	该段长 85 m,有中度掉块风险,围岩较破碎,分化裂隙较发育
DK207+305~DK207+420	该段长 115 m,有中度的坍塌掉块,围岩较破碎,分化裂隙较发育
DK207+420~DK207+490	该段长 70 m,有中度掉块风险,围岩较破碎,分化裂隙较发育
DK207+490~DK207+560	该段长 70 m,有中度的坍塌掉块,围岩较破碎,分化裂隙较发育

表 3 兰新乡隧道进口各隧道段围岩安全性指标数据

指标层	DK206+951~ DK207+028	DK207+028~ DK207+105	DK207+105~ DK207+220	DK207+220~ DK207+305	DK207+305~ DK207+420	DK207+420~ DK207+490	DK207+490~ DK207+560
A1	184.46	180.14	250.80	354.81	252.06	340.25	225.09
A2	0.16	0.13	0.38	0.65	0.35	0.61	0.32
A3	14.82	15.88	18.6	30.77	21.52	29.25	15.03
A4	4.37	3.03	3.76	5.13	2.98	5.27	3.21
A5	0.13	0.18	0.32	0.11	0.17	0.21	0.28
B1	138	147	189	253	225	279	175
B2	1.38	1.97	2.00	2.55	1.84	1.99	1.58
B3	0.49	0.44	0.32	0.36	0.25	0.39	0.37
C1	132	142	97	77	103	103	95
C2	59	49	42	71	58	74	43
C3	极高	极高	高	低	高	中	高
C4	岩屑夹泥	泥夹岩屑、泥质	泥夹岩屑、泥质	岩屑夹泥	岩屑夹泥	岩屑	岩屑
D1	扰动	扰动	微扰动	微扰动	微扰动	微扰动	扰动
D2	较好	较好	较好	一般	较好	一般	较好
D3	3.6	3.6	3.4	3.2	3.4	3.2	3.5

将表 1 中识别出的 15 个因素指标进行关联影响分析,构造出各指标因素关联图如图 1 所示。

对各因素指标进行相互重要度评判,构造未加权超矩阵,再对一级指标间的相互重要度进行评判,进而得到加权超矩阵如表 4 所示,在软件 Super Decision 中自动将加权超矩阵自相乘 β 次,待乘积收敛得到极限超矩阵如表 5 所示,最终得出各指标的综合权重。

由极限超矩阵可得各指标权重 W_j 分别为:
(0.119 4, 0.104 3, 0.099 6, 0.078 3, 0.063 6, 0.056 7, 0.051 6, 0.053 9, 0.015 5, 0.072 3, 0.086 5, 0.046 8, 0.068 4, 0.061 1, 0.022 1)。

通过 KL-TOPSIS 法计算最终得到各评价隧道段

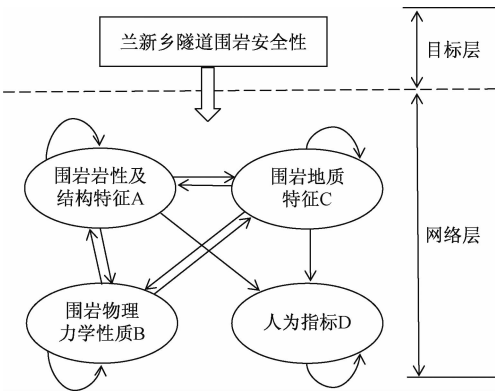


图 1 指标因素关联图

Fig. 1 Correlation graph of indicator factors

与理想解和负理想解的 Kullback-Leibler 距离及各评 所示。
价隧道段的相对贴 近度及所属围岩安全等级如表 6

表 4 加权超矩阵
Table 4 Weighted hypermatrix

	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	A ₅	B ₁	B ₂	B ₃	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	D ₁	D ₂	D ₃
A ₁	0.000 0	0.197 4	0.207 1	0.164 8	0.280 9	0.172 0	0.166 8	0.176 6	0.094 3	0.075 2	0.000 0	0.074 4	0.133 8	0.000 0	0.000 0
A ₂	0.152 4	0.000 0	0.138 1	0.199 3	0.239 0	0.144 1	0.188 3	0.085 4	0.080 4	0.064 9	0.000 0	0.051 4	0.156 2	0.000 0	0.000 0
A ₃	0.127 5	0.177 4	0.000 0	0.140 3	0.339 7	0.109 6	0.111 4	0.111 4	0.071 2	0.046 0	0.000 0	0.066 4	0.113 3	0.000 0	0.000 0
A ₄	0.079 4	0.129 2	0.103 6	0.000 0	0.140 4	0.171 3	0.129 2	0.127 3	0.071 2	0.058 2	0.000 0	0.064 3	0.066 9	0.000 0	0.000 0
A ₅	0.050 7	0.082 8	0.138 1	0.082 4	0.000 0	0.069 8	0.071 0	0.166 0	0.047 1	0.061 0	0.000 0	0.048 7	0.069 4	0.000 0	0.000 0
B ₁	0.032 4	0.047 9	0.047 9	0.120 7	0.000 0	0.000 0	0.222 2	0.222 2	0.000 0	0.000 0	0.118 1	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0
B ₂	0.045 0	0.120 7	0.120 7	0.076 0	0.000 0	0.083 3	0.000 0	0.111 1	0.000 0	0.000 0	0.056 8	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0
B ₃	0.093 5	0.076 0	0.076 0	0.047 9	0.000 0	0.250 0	0.111 1	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.040 9	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0
C ₁	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.117 8	0.000 0	0.000 0	0.087 5	0.000 0
C ₂	0.059 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.296 9	0.533 2	0.048 5	0.185 3	0.000 0
C ₃	0.148 6	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.636 0	0.533 2	0.000 0	0.000 0	0.160 3	0.152 9	0.000 0
C ₄	0.093 6	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.187 0	0.000 0	0.088 2	0.219 3	0.000 0
D ₁	0.036 6	0.083 2	0.055 9	0.092 2	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.074 6	0.035 7	0.107 7	0.000 0	0.355 0	0.333 3
D ₂	0.058 1	0.052 4	0.063 9	0.044 3	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.037 3	0.090 0	0.053 9	0.163 4	0.000 0	0.666 7
D ₃	0.023 1	0.033 0	0.048 8	0.032 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.049 7	0.056 7	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0

表 5 极限超矩阵
Table 5 Limit hypermatrix

	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	A ₅	B ₁	B ₂	B ₃	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	D ₁	D ₂	D ₃
A ₁	0.119 4	0.119 4	0.119 4	0.119 4	0.119 4	0.119 4	0.119 4	0.119 4	0.119 4	0.119 4	0.119 4	0.119 4	0.119 4	0.119 4	0.119 4
A ₂	0.104 3	0.104 3	0.104 3	0.104 3	0.104 3	0.104 3	0.104 3	0.104 3	0.104 3	0.104 3	0.104 3	0.104 3	0.104 3	0.104 3	0.104 3
A ₃	0.099 6	0.099 6	0.099 6	0.099 6	0.099 6	0.099 6	0.099 6	0.099 6	0.099 6	0.099 6	0.099 6	0.099 6	0.099 6	0.099 6	0.099 6
A ₄	0.078 3	0.078 3	0.078 3	0.078 3	0.078 3	0.078 3	0.078 3	0.078 3	0.078 3	0.078 3	0.078 3	0.078 3	0.078 3	0.078 3	0.078 3
A ₅	0.063 6	0.063 6	0.063 6	0.063 6	0.063 6	0.063 6	0.063 6	0.063 6	0.063 6	0.063 6	0.063 6	0.063 6	0.063 6	0.063 6	0.063 6
B ₁	0.056 7	0.056 7	0.056 7	0.056 7	0.056 7	0.056 7	0.056 7	0.056 7	0.056 7	0.056 7	0.056 7	0.056 7	0.056 7	0.056 7	0.056 7
B ₂	0.051 6	0.051 6	0.051 6	0.051 6	0.051 6	0.051 6	0.051 6	0.051 6	0.051 6	0.051 6	0.051 6	0.051 6	0.051 6	0.051 6	0.051 6
B ₃	0.053 9	0.053 9	0.053 9	0.053 9	0.053 9	0.053 9	0.053 9	0.053 9	0.053 9	0.053 9	0.053 9	0.053 9	0.053 9	0.053 9	0.053 9
C ₁	0.015 5	0.015 5	0.015 5	0.015 5	0.015 5	0.015 5	0.015 5	0.015 5	0.015 5	0.015 5	0.015 5	0.015 5	0.015 5	0.015 5	0.015 5
C ₂	0.072 3	0.072 3	0.072 3	0.072 3	0.072 3	0.072 3	0.072 3	0.072 3	0.072 3	0.072 3	0.072 3	0.072 3	0.072 3	0.072 3	0.072 3
C ₃	0.086 5	0.086 5	0.086 5	0.086 5	0.086 5	0.086 5	0.086 5	0.086 5	0.086 5	0.086 5	0.086 5	0.086 5	0.086 5	0.086 5	0.086 5
C ₄	0.046 8	0.046 8	0.046 8	0.046 8	0.046 8	0.046 8	0.046 8	0.046 8	0.046 8	0.046 8	0.046 8	0.046 8	0.046 8	0.046 8	0.046 8
D ₁	0.068 4	0.068 4	0.068 4	0.068 4	0.068 4	0.068 4	0.068 4	0.068 4	0.068 4	0.068 4	0.068 4	0.068 4	0.068 4	0.068 4	0.068 4
D ₂	0.061 1	0.061 1	0.061 1	0.061 1	0.061 1	0.061 1	0.061 1	0.061 1	0.061 1	0.061 1	0.061 1	0.061 1	0.061 1	0.061 1	0.061 1
D ₃	0.022 1	0.022 1	0.022 1	0.022 1	0.022 1	0.022 1	0.022 1	0.022 1	0.022 1	0.022 1	0.022 1	0.022 1	0.022 1	0.022 1	0.022 1

表 6 兰新乡隧道各隧道段围岩 Kullback-Leibler 距离与相对贴 近度
Table 6 Kullback-Leibler distance and relative close degree of surrounding rock in Lanxinxiang Tunnel

隧道段	d_i^+	d_i^-	N_i	围岩安全等级	现场勘查评价
DK206 + 951 ~ DK207 + 028	0.944 1	0.190 1	0.167 6	V	极不稳定
DK207 + 028 ~ DK207 + 105	0.911 2	0.2136	0.189 9	V	极不稳定
DK207 + 105 ~ DK207 + 220	0.777 8	0.345 2	0.307 4	IV	不稳定
DK207 + 220 ~ DK207 + 305	0.464 6	0.518 9	0.527 6	Ⅲ	基本稳定
DK207 + 305 ~ DK207 + 420	0.683 1	0.290 4	0.298 3	IV	不稳定
DK207 + 420 ~ DK207 + 490	0.425 2	0.602 3	0.586 2	Ⅲ	基本稳定
DK207 + 490 ~ DK207 + 560	0.734 1	0.390 1	0.347 0	IV	不稳定

表6中计算所得围岩安全等级与现场勘查评价结果基本相符。DK206+951~DK207+028及DK207+028~DK207+105隧道段的围岩安全等级为极不安全V,该处围岩有高度的坍塌冒顶分险,施工中可采用小导管、径向注浆等措施防范风险,三台阶临时仰拱法施工。DK207+105~DK207+220、DK207+305~DK207+420及DK207+490~DK207+560隧道段围岩安全级别为不安全IV,有中度的坍塌掉块风险,施工中可采用小导管超前支护、三台阶法施工。DK207+220~DK207+305及DK207+420~DK207+490隧道段围岩级别为基本安全III,可采用台阶法施工。

4 结论

(1)本文在既有研究的基础上,针对隧道围岩的安全性建立围岩安全评价指标体系。考虑到各指标因素间的关联影响性,运用ANP方法用Super Decision软件求出影响隧道围岩安全性的各因素指标权重。

(2)将相对熵原理与TOPSIS方法相结合以新建张吉怀铁路兰新乡隧道进口段的七处隧道段为评价研究对象,根据工程地质勘查报告,分析总结各段围岩安全性影响因素,用Kullback-Leibler距离最终求出各隧道段的相对贴进度,得出各段围岩所属安全等级。

(3)所得评价结果切合实际,对隧道施工有一定的指导意义。表明ANP-KL-TOPSIS模型能够克服各指标因素间的影响及对于正理想方案与负理想方案连线中垂线上的点无法区分优劣的缺点,得出可靠评价结果。该评价模型简单可操作,可运用于隧道围岩安全性评价中。

参考文献:

- [1] 苏永华,何满潮,曹文贵.岩体地下结构围岩稳定非概率可靠性的凸集合模型分析方法[J].岩石力学与工程学报,2005,24(3):377-383.
SU Yonghua, HE Manchao, CAO Wengui. Analysis method of non-probabilistic reliability of rock mass underground structure stability by convex set model [J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24 (3): 377 - 383.
- [2] 康志强,冯夏庭,周辉,等.基于层级分析法的可拓学理论在地下洞室岩体质量评价中的应用[J].岩石力学与工程学报,2006,25(2):3687-3693.
KANG Zhiqiang, FENG Xiating, ZHOU Hui, et al. Application of extension theory based on AHP in quality evaluation of underground cavern rock mass [J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25 (2): 3687 - 3693.
- [3] 郑颖人,邱瑜,张红,等.关于土体隧洞围岩稳定性分析方法的探索[J].岩石力学与工程学报,2008,27(10):1968-1980.
ZHENG Yingren, QIU Chenyu, ZHANG Hong, et al. Exploration of the method for analyzing the stability of surrounding rock of soil tunnel [J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27 (10): 1968 - 1980.
- [4] 常晓林,张美丽,杨海云,等.基于联系熵的围岩稳定性评价研究[J].岩石力学,2010,31(1):99-101.
CHANG Xiaolin, ZHANG Meili, YANG Haiyun, et al. Evaluation of surrounding rock stability based on contact entropy [J]. Rock Mechanics, 2010, 31 (1): 99 - 101.
- [5] 王克忠,刘耀儒,王玉培,等.引水隧洞复合支护钢桁架变形特征及围岩稳定性研究[J].岩石力学与工程学报,2014,33(2):217-224.
WANG Kezhong, LIU Yaoru, WANG Yupei, et al. Study on deformation characteristics and stability of surrounding rock of composite support steel for headrace tunnel [J]. Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33 (2): 217 - 224.
- [6] ZHAO Meng, QIU Wanhua, LIU Beishang. Relative entropy evaluation method for multiple attribute decision making [J]. Control and Decision, 2010, 25 (7): 1098 - 1104.
- [7] 郑雨茜,鲍学英.基于ANP和扩展TOPSIS法的青藏铁路冻土路基安全性分析[J].铁道科学与工程学报,2018,15(3):606-613.
ZHENG Yuxi, BAO Xueying. Safety analysis of frozen subgrade of Qinghai-Tibet Railway based on ANP and extended TOPSIS method [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2018, 15 (3): 606 - 613.
- [8] 陈宇寒,张宏.基于PSO和扩展TOPSIS方法的COA优选方法[J].系统工程理论与实践,2015,35(8):2144-2151.
CHEN Yuhuan, ZHANG Hong. COA optimization method based on PSO and extended TOPSIS method [J]. Systems Engineering Theory & Practice, 2015, 35 (8): 2144 - 2151.
- [9] 何书,陈飞.基于直觉模糊集TOPSIS决策方法的滑坡稳定性评价[J].中国地质灾害与防治学报,2016,27(3):22-28.
HE Shu, CHEN Fei. Evaluation of landslide stability

- based on intuitionistic fuzzy set TOPSIS decision method[J]. Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2016, 27(3): 22 – 28.
- [10] DENG HEPU, YEH CHUNG - HSING, WILLIS R J. Intercompany comparison using modified TOPSIS with objective weights [J]. Computers & Operations Research, 2000, 27(10): 963 – 973.
- [11] 陈长坤, 陈以琴, 施波, 等. 雨洪灾害情境下城市韧性评估模型[J]. 中国安全科学学报, 2018, 28(4): 1 – 6.
CHEN Changkun, CHEN Yiqin, Shi Bo, et al. Model of urban resilience assessment in rain and flood disaster [J]. Proceedings of the China Journal of Safety Sciences, 2018, 28(4): 1 – 6.
- [12] 王莲芬. 网络分析法 (ANP) 的理论与算法[J]. 系统工程理论与实践, 2001, 21(3): 44 – 50.
WANG Lian-fen. The theory and algorithm of analytic net-work process [J]. Systems Engineering-theory & Practice, 2001, 21(3): 44 – 50.
- [13] S VIONDH, S G GAUTHAM, R ANESH RAMIYA, et al. Application of fuzzy analytic network process for agile concept selection in a manufacturing organisation [J]. International Journal of Production Research, 2010, 48(24): 7243 – 7264.
- [14] DOGU ELIF, ALBAYRAK Y ESRA. Criteria evaluation for pricing decisions in strategic marketing management using an intuitionistic cognitive map approach[J]. Soft Computer, 2008, 22(15): 4989 – 5005.
- [15] TOPALOGLU MURSIDE, YARKIN FERHAT, KAYA TOLGA. Solid waste collection system selection for smart cities based on a type-2 fuzzy multi-criteria decision technique[J]. Soft Computer, 2018, 22(15): 4879 – 4890.

《中国地质灾害与防治学报》编辑部网络采编系统运行通知

各位作者:

您好! 为提高稿件处理和办公效率,《中国地质灾害与防治学报》编辑部已从 2013 年 3 月开始启用网络采编办公系统。

作者投稿采用新的网络平台 (www.zgdzzhyfzxb.com; <http://zgdzzhyfz.paperopen.com>), 不再使用原电子邮件投稿, 特此公告, 望作者们予以支持与合作。

在使用网络系统中您有任何疑问、意见和建议, 请您电话 010 – 60850956 或者发邮件 nitx@cigem.cn。

注意: 投稿作者请详细阅读首页导航栏——投稿须知!

期刊编辑部