

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2023.04.034

基于组合赋权-EAHP-NCM模型理论的 层状围岩隧道风险评估计算

杨永斌,王庆,王轶君,高伟政,李永亮

(中交第二公路工程局有限公司,陕西 西安 710065)

摘要:为了在施工时准确评估计算层状围岩隧道的结构稳定性,该文首先在考虑水文地质、结构面、工程、外力、地形地貌因素的基础上,构建层状围岩隧道风险评估指标体系。基于德尔菲法(DELPHI)与熵权法(EWM)得出指标组合赋权。基于典型事件样本与评估体系经典域一节域的挖掘,分别建立层状围岩隧道稳定性评估的可拓层次分析计算模型(EAHP)与正态云计算模型(NCM)。依托共和隧道验证该文两种层状围岩隧道风险评估算法。经研究得出:EAHP、NCM、BP神经网络算法的评估结果相互吻合,共和隧道稳定性处于Ⅲ~Ⅳ之间,隧道结构处于“严重~异常”状态,这与施工现场常有钢拱架变形、偶有塌方事故相吻合,验证了该研究层状围岩隧道风险评估系统与理论算法的可靠性。

关键词:隧道工程;层状围岩;风险评估;EAHP;NCM

中图分类号:U458

文献标志码:A

0 引言

层状围岩隧道施工期间,常会产生围岩大变形、初期支护开裂、钢拱架屈曲甚至塌方,严重威胁施工人员安全,并影响隧道工程建设进度。因此,层状围岩隧道风险评估计算研究已迫在眉睫。

罗选红^[1]基于现场施工经验,归纳出围岩力学特性、地下水、开挖方法、支护方式是影响层状围岩隧道稳定性的主要因素;夏彬伟等^[2]依托现场试验得出隧道偏压、地应力、岩性因素可极大影响层状围岩衬砌结构的受力特性;田卫明^[3]基于模糊评判算法,从施工、水文地质、工程因素3方面建立了层状围岩隧道风险评估体系;于剑舟^[4]以营盘山隧道现场施工为依托,验证了弱爆破、快成环可大幅减小层状围岩变形量;文竞舟^[5]指出断面形状、断面高跨比、支护时机、支护方式可极大影响倾斜状围岩稳定性;涂瀚^[6]基于数值模拟方法研究了在爆破条件下,层状围岩隧道结构的力学响应;陈俊栋等^[7]采用Ansys数值模拟方法研究了层状围岩条件下,且隧道洞口处于浅埋偏压时衬砌结构的受力情况;郑飞^[8]归纳出初始地应力、岩体构

造、地下水、隧道形式、施工扰动是影响层状围岩稳定性的主要因素,并采用3DEC软件模拟分析了隧道衬砌结构的受力特性;王更峰^[9]提出可通过加强初期支护强度与刚度、控制爆破、长锚杆注浆方式对层状围岩变形进行控制;屈鹏程^[10]以叙大铁路A标段为研究对象,分析了岩层倾角、岩性、施工因素对层状围岩稳定性的影响,并采用FALC^{3D}软件进行数值模拟;吴渤^[11]通过数值模拟方法研究了软硬互层状围岩对隧道衬砌结构受力的影响;刘锦欣^[12]依托数值模拟方法研究了层状围岩倾角对隧道衬砌结构受力的影响,提出并验证了非对称锚杆支护方式;丁尧等^[13]采用数值模拟方法研究了层状围岩隧道开挖过程中围岩塑性区分布情况,并给出穿层定向锚固设计方案;王安^[14]基于数值模拟方法分别研究了施工步、爆破震动荷载对层状围岩隧道衬砌结构受力的影响。

目前关于层状围岩隧道的研究成果较多,但大部分学者聚焦于层状围岩隧道结构的破坏失稳原因、隧道衬砌与围岩的力学响应状态研究。关于层状围岩隧道稳定性风险评估、考虑施工步与爆破震动荷载影响下结构力学响应、病害处置措施方面的研究成果却鲜有报道。

收稿日期:2021-04-27

基金项目:中交第二公路工程局科技研发项目(编号:GHTJ-07-QT-046)

作者简介:杨永斌,男,大学本科,高级工程师.E-mail:597278676@qq.com

为此,本研究旨在建立一套层状围岩隧道稳定性的风险评估系统。① 首先建立完整度较高的层状围岩隧道风险评估指标体系;② 拟采用德尔菲法(DELPHI)及熵权法(EWM)确定指标的组合赋权;③ 分别构建层状围岩隧道稳定性评估的可拓层次(EAHP)与正态云(NCM)计算模型;④ 依托共和隧道现场施工情况,联合BP神经网络算法,验证本研究EAHP与NCM理论算法的可靠性,以期层状围岩隧道工程建设提供借鉴。

1 层状围岩隧道稳定性评估模型

为了对层状围岩隧道稳定性风险进行准确评估,第一步需尽可能挖掘与目标层相关的影响因素,继而分门别类建树状评估体系。

层状围岩隧道结构失稳破坏机理可理解为:地下岩层最初处于三向应力状态,经地应力长期作用而达到平衡状态。隧道开挖过程对初始应力状态产生扰动,造成应力重分布。对于完整性较好的岩体,岩体内部存在较强黏聚力与摩阻力,其合力可充分抵抗岩体应力与自重,此时岩体处于稳定状态。层状围岩由于其层间黏聚力及摩阻力远小于岩石强度,特别是含有软弱夹层围岩,在岩体自重、地下水、爆破荷载因素影响下更易形成掉块、围岩大变形,甚至崩塌。层状围岩隧道失稳如图1所示。

基于层状围岩隧道结构失稳破坏机理,结合相关文献资料,从人的不安全因素和物的不安全因素

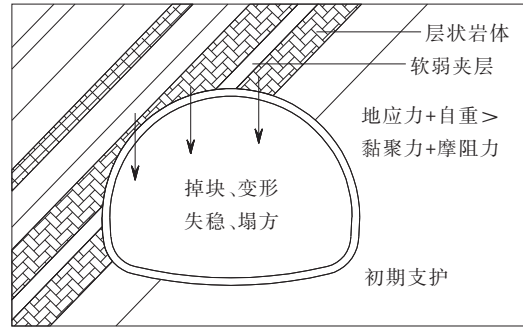


图1 层状围岩隧道失稳示意图

两方面出发,综合考虑水文地质、结构面、工程、外力、地形地貌共5个方面因素建立层状围岩隧道风险评估指标体系,层状围岩隧道风险评估指标体系的建立见表1。

2 组合赋权法确定指标权重

准确赋予评估体系指标权重是进行层状围岩隧道风险评估的第二重要步骤。本研究采用组合赋权法确定指标权重。

2.1 基于德尔菲法(DELPHI)确定指标权重

德尔菲法(DELPHI)是确定评估体系指标权重方法之一。首先通过判定任意两个评估指标对上一准则层产生影响的重要度构造出判断矩阵,形成计算矩阵 $U(u_{ij})_{n \times n}$ 。

$$U = \begin{bmatrix} u_{11} & \cdots & u_{1n} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ u_{n1} & \cdots & u_{nn} \end{bmatrix} = U(u_{ij})_{n \times n} \quad (1)$$

表1 层状围岩隧道风险评估指标体系的建立

目标层	准则层	指标层	单位	目标层	准则层	指标层	单位
层状围岩隧道稳定性的评估体系	S ₁	层状岩体完整性系数 S ₁₋₁ ^[2,5]		层状围岩稳定性评估体系	S ₃	断面形状圆度率 S ₃₋₁ ^[10]	
		水文 层状岩体强度 S ₁₋₂ ^[2,6]	MPa			断面矢跨比 S ₃₋₂ ^[5]	
		地质 层状岩体厚度 S ₁₋₃ ^[6]	cm			断面开挖步数 S ₃₋₃ ^[1]	
		因素 软弱夹层厚度 S ₁₋₄ ^[11]	cm			拱部超欠挖尺寸 S ₃₋₄ ^[9]	cm
		围岩地下水出露量 S ₁₋₅ ^[1]	L/(min·10 m)			预支护拱圈弹性模量 S ₃₋₅ ^[10]	GPa
		地质构造强度 S ₁₋₆ ^[1,8]	MPa			初期支护弹性模量 S ₃₋₆ ^[9]	GPa
		层状结构面倾角 S ₂₋₁ ^[10,12]	(°)			初期支护时机 S ₃₋₇ ^[3-4]	h
	S ₂ ^[6,10]	轴线与控制层面走向夹角 S ₂₋₂ ^[10]	(°)	H	S ₄	地质预报检测率 S ₃₋₈ ^[3]	
		层状结构面贯通率 S ₂₋₃				外力 爆破围岩质点震速 S ₄₋₁ ^[3-4]	cm/s
		层状结构面开裂度 S ₂₋₄	mm			因素 每循环机械扰动次数 S ₄₋₂ ^[8]	
		层状结构面粗糙度系数 S ₂₋₅				地震烈度影响 S ₄₋₃ ^[10]	
		层状结构面填充度 S ₂₋₆				地形地貌 隧道浅埋深度 S ₅₋₁ ^[3,7]	m
		层状结构面胶结强度 S ₂₋₇				因素 S ₅ 隧道偏压角度 S ₅₋₂ ^[2,7]	(°)

注:泥质、钙质、铁质、硅质胶结强度依次取1、2、3、4;圆度率=(最大半径值-最小半径值)/最小半径值。

对于判断矩阵式(1),矩阵元素 u_{ij} 满足式(2)的特点:

$$\begin{cases} u_{ij} = 1/u_{ji} \\ u_{ij} > 0 \\ u_{ii} = 1 \end{cases} \quad (i, j = 1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

以往文献采用德尔菲法计算指标权重时,大多采用1~5标度法、1~9标度法、“9/9~9/1标度法”“ $x^{1/2}$ 标度法”“ x^2 标度法”,但已有研究成果表明其计算结果会出现判断矩阵一致性与思维一致性相脱节、评估结果逆序的问题^[16-17]。

故本研究基于文献[16-17]提出的指数标度法进行计算,式(3)为矩阵元素形式, K 值取1.316。

$$\epsilon_q = K^\mu (\mu = 0, 1, \dots, \text{自然数}) \quad (3)$$

式中: ϵ_q 为准则层 Q_k 下两因素 Q_{ki} 与 Q_{kj} 的相对重要程度; μ 为元素重要度,其对应评价语言如表2所示。

表2 重要度评价

μ	评语	标度值
0	同等重要	1.000
2	稍微重要	1.732
4	明显重要	3.000
6	强烈重要	5.194
8	极端重要	3.000

通过计算得判断矩阵 $U(u_{ij})_{n \times n}$ 最大特征根 λ_{\max} 及对应特征向量 W ,如式(4)所示:

$$UW = \lambda_i W \quad (4)$$

人类认识客观事物时具有一定主观性与局限性,故需检验判断矩阵的一致性。一致性指标 I_{CI} 计算如式(5),矩阵一致性计算结果 R_{CR} 应满足相应要求^[17]。

$$\begin{cases} I_{CI} = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1) \\ R_{CR} = I_{CI} / I_{RI} \end{cases} \quad (5)$$

表4 典型层状围岩隧道稳定性分析资料

样本	S_{1-1}	S_{1-2}	S_{1-3}	S_{1-4}	S_{1-5}	S_{1-6}	S_{2-1}	S_{2-2}	S_{2-3}	S_{2-4}	S_{2-5}	S_{2-6}	S_{2-7}	实际等级 (Matlab数值)
文献[5]	0.55	25	115	25	85	14	40	25	0.35	2.5	11	1.2	2	Ⅲ(3)
文献[8]	0.75	100	25	45	90	45	75	65	0.45	2.0	8	0.8	3	Ⅳ(4)
文献[10]	0.45	20	80	120	105	20	66	35	0.50	2.0	10	0.9	2	Ⅱ(2)
文献[11]	0.65	18	190	50	115	18	40	30	0.30	3.0	13	1.1	4	Ⅲ(3)
文献[13]	0.35	15	60	20	110	20	45	20	0.60	3.5	9	0.8	1	Ⅳ(4)
文献[14]	0.30	12	50	15	20	25	5	10	0.85	4.0	6	0.7	1	Ⅳ(4)
文献[15]	0.35	15	45	25	25	20	7	8	0.80	3.5	8	0.8	1	Ⅲ(3)

对通过一致性检验的判断矩阵,即可通过归一化处理,获得评估指标权重 ω_k ,见式(6):

$$\begin{cases} W = (W_1, W_2, \dots, W_n)^T \\ \omega = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n)^T \\ \omega_k = \sum_{i=1}^n \frac{W_k}{W_i} \begin{cases} i = 1, 2, \dots, n \\ k = 1, 2, \dots, n \end{cases} \end{cases} \quad (6)$$

搜集相关文献资料,并联合若干隧道专家建议,准则层判断矩阵见表3,依次可建立指标层判断矩阵,本文此处不再赘述。

表3 准则层的判断矩阵

Q	Q_1	Q_2	Q_3	Q_4	Q_5
Q_1	1	$1.316^{8/7}$	$1.316^{4/3}$	$1.316^{8/5}$	1.316^2
Q_2	$1/1.316^{8/7}$	1	$1.316^{7/6}$	$1.316^{7/5}$	1.316^2
Q_3	$1/1.316^{4/3}$	$1/1.316^{7/6}$	1	$1.316^{6/5}$	$1.316^{3/2}$
Q_4	$1/1.316^{8/5}$	$1/1.316^{7/5}$	$1/1.316^{6/5}$	1	$1.316^{5/4}$
Q_5	$1/1.316^2$	$1/1.316^2$	$1/1.316^{3/2}$	$1/1.316^{5/4}$	1

注: Q 为目标层; Q_k 为各项准则层, $k=1,2,3,4,5$ 。

调用 Matlab 软件中 eig() 函数进行求解,最大特征根 $\lambda_{\max}=5.0426$,对应特征向量 $W=[0.5889, 0.5086, 0.4261, 0.3583, 0.2908]$,代入式(5)计算, $I_{CI}=0.01065, R_{CR}=0.01479 < 0.1$,满足一致性检验。代入式(6)归一化后即得准则层赋权,依次计算指标层赋权。

2.2 基于熵权法(EWM)确定指标权重

本文累计搜集27组层状围岩隧道风险评估数据,筛选7组典型样本作为研究基础,见表4,形成式(7)的事件指标矩阵 $M(\xi_{ij})_{n \times m}$ 。

$$M = \begin{bmatrix} \xi_{11} & \dots & \xi_{1m} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \xi_{n1} & \dots & \xi_{nm} \end{bmatrix} = M(\xi_{ij})_{n \times m} \quad (7)$$

续表 4

样本	S ₃₋₁	S ₃₋₂	S ₃₋₃	S ₃₋₄	S ₃₋₅	S ₃₋₆	S ₃₋₇	S ₃₋₈	S ₄₋₁	S ₄₋₂	S ₄₋₃	S ₅₋₁	S ₅₋₂	实际等级 (Matlab数值)
文献[5]	0.06	0.76	2	15	2.5	17.5	4.0	1.0	14	55	7	120	15	Ⅲ(3)
文献[8]	0.12	0.63	2	18	1.5	20.5	5.5	0.95	17	60	7	150	17	Ⅳ(4)
文献[10]	0.33	1.13	3	12	1.8	21.5	4.0	1.0	12	50	6	85	30	Ⅱ(2)
文献[11]	0.42	0.50	5	14	2.5	22.5	3.5	0.95	15	75	6	65	25	Ⅲ(3)
文献[13]	0.36	0.58	2	17	1.5	18.0	5.0	0.90	18	65	7	35	40	Ⅳ(4)
文献[14]	0.05	0.52	2	18	1.5	18.5	4.5	0.90	12	85	7	45	35	Ⅳ(4)
文献[15]	0.32	0.64	2	16	1.8	17.5	4.0	0.95	14	70	7	40	30	Ⅲ(3)

对M矩阵进行标准化处理,针对值愈小愈优的指标按式(8)进行处理,ζ_{ij}为修正后的元素值。

$$\zeta_{ij} = \frac{\xi_{ij} - \min(\xi_{1j}, \xi_{2j}, \dots, \xi_{nj})}{\max(\xi_{1j}, \xi_{2j}, \dots, \xi_{nj}) - \min(\xi_{1j}, \xi_{2j}, \dots, \xi_{nj})} + 1 \quad (8)$$

对于值愈大愈优的指标按式(9)进行处理:

$$\zeta_{ij} = \frac{\max(\xi_{1j}, \xi_{2j}, \dots, \xi_{nj}) - \xi_{ij}}{\max(\xi_{1j}, \xi_{2j}, \dots, \xi_{nj}) - \min(\xi_{1j}, \xi_{2j}, \dots, \xi_{nj})} + 1 \quad (9)$$

计算第i个样本方案下,第j项指标所占比重χ_{ij}:

$$\chi_{ij} = \frac{\zeta_{ij}}{\sum_{i=1}^n \zeta_{ij}} \quad (j=1, 2, \dots, m) \quad (10)$$

式中:ζ_{ij}为按式(8)、(9)进行标准化处理后的各项指标值。

确定第j个指标熵值φ_j:

$$\varphi_j = -k \cdot \sum_{i=1}^n \chi_{ij} \ln(\chi_{ij}) \quad (j=1, 2, \dots, m) \quad (11)$$

式(11)中的常数k可按式(12)进行计算:

$$k = \frac{1}{\ln(m_y)} \quad (m_y \text{为样本方案数}) \quad (12)$$

计算第j项指标的差异系数g_j:

$$g_j = 1 - \varphi_j \quad (j=1, 2, \dots, m) \quad (13)$$

基于差异系数g,计算各评估指标的赋权系数ω_j:

$$\omega_j = \frac{g_j}{\sum_{i=1}^m g_i} \quad (j=1, 2, \dots, m) \quad (14)$$

联立式(7)~(14)及表4,求得准则层及指标层赋权,见图2、3。

2.3 基于组合赋权法确定最优指标权重

德尔菲法属主观赋权算法,设DELPHI法赋权

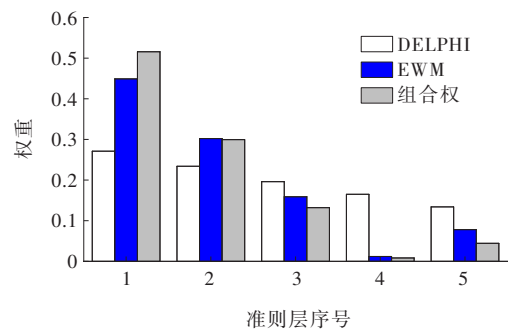


图2 准则层赋权

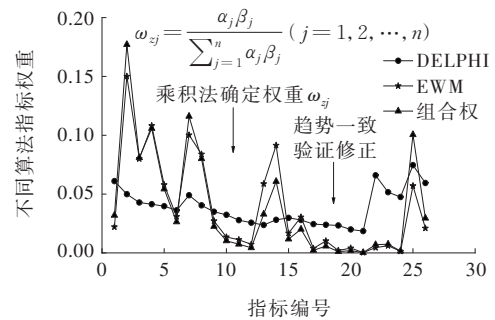


图3 指标层赋权

向量为α。熵权法(EWM)是基于客观事件反演求取赋权,属客观算法,设EWM法赋权向量为β。

$$\begin{cases} \alpha = [\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n] \quad (\text{DELPHI}) \\ \beta = [\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n] \quad (\text{EWM}) \end{cases} \quad (15)$$

依据式(16)的乘法原理确定最优组合赋权ω_j,组合赋权值见图3。

$$\omega_j = \frac{\alpha_j \beta_j}{\sum_{j=1}^n \alpha_j \beta_j} \quad (j=1, 2, \dots, n) \quad (16)$$

3 综合评判模型的构建

获得评估指标体系与组合赋权后,第三步需构

建综合评判模型。

3.1 可拓层次(EAHP)评判模型

采用可拓层次模型(EAHP)进行层状围岩隧道风险评估计算。假定 x 项准则层的 y 评估等级为 N_{xy} , 则其经典域 JD_{xy} 如式(17), 评估指标经典域见表5。

$$JD_{xy} = (N_{xy}, C_{xt}, U_{xyt}) = \begin{Bmatrix} C_{x1} & U_{xy1} \\ N_{xy} \cdots & \cdots \\ C_{xi} & U_{xyi} \end{Bmatrix} \quad (17)$$

式中: C_{xi} 为 x 准则层下第 i 项分指标; U_{xyi} 为 x 准则层下第 i 项分指标隶属于第 y 等级的经典域。

表5 评估指标经典域

评价指标	I(正常)	II(注意)	III(异常)	IV(严重)	评价指标	I(正常)	II(注意)	III(异常)	IV(严重)
S ₁₋₁	(0.75, 1]	(0.55, 0.75]	(0.35, 0.55]	(0, 0.35]	S ₃₋₁	[0, 0.25]	(0.25, 0.5]	(0.5, 0.75]	(0.75, 1)
S ₁₋₂	(40, 60]	(25, 40]	(10, 25]	(0, 10]	S ₃₋₂	[0.85, 1]	[0.65, 0.85]	[0.55, 0.65]	(0, 0.55]
S ₁₋₃	[100, 150]	[50, 100]	[10, 50]	(0, 10]	S ₃₋₃	(6, 8]	(4, 6]	(2, 4]	(0, 2]
S ₁₋₄	[0, 5]	(5, 20]	(20, 50]	(50, 80]	S ₃₋₄	(0, 5]	(5, 10]	(10, 15]	(15, 20]
S ₁₋₅	[0, 25]	(25, 75]	(75, 125]	(125, 175]	S ₃₋₅	[4.5, 6.0]	[3.0, 4.5]	[1.5, 3.0]	(0, 1.5]
S ₁₋₆	(0, 10]	(10, 20]	(20, 40]	(40, 60]	S ₃₋₆	[27.5, 32.5]	[22.5, 27.5]	[17.5, 22.5]	(0, 17.5]
S ₂₋₁	(70, 90]	(50, 70]	(30, 50]	[0, 30]	S ₃₋₇	(0, 2.5]	(2.5, 4.0]	(4.0, 5.5]	(5.5, 7.0]
S ₂₋₂	(70, 90]	(50, 70]	(30, 50]	[0, 30]	S ₃₋₈	(0.9, 1.0]	(0.8, 0.9]	(0.7, 0.8]	(0, 0.7]
S ₂₋₃	[0, 0.2]	(0.2, 0.4]	(0.4, 0.6]	(0.6, 1]	S ₄₋₁	(0, 5]	(5, 10]	(10, 15]	(15, 20]
S ₂₋₄	[0, 1]	(1, 2]	(2, 3]	(3, 5]	S ₄₋₂	(0, 25]	(25, 40]	(40, 55]	(55, 70]
S ₂₋₅	(16, 20]	(12, 16]	(8, 12]	(0, 8]	S ₄₋₃	(0, 3]	(3, 4]	(4, 5]	(5, 12]
S ₂₋₆	[2.5, 3.5]	[1.5, 2.5]	[1.0, 1.5]	(0, 1.0]	S ₅₋₁	[45, 60]	[30, 45]	[15, 30]	(0, 15]
S ₂₋₇	[4, 3]	[3, 2]	[2, 1]	[1, 0]	S ₅₋₂	(0, 15]	(15, 30]	(30, 45]	(45, 60]

假若对应 U_{xyi} 的上、下限分别为 b_{xyi} 、 a_{xyi} , 则有:

$$U_{xyi} = [a_{xyi}, b_{xyi}] \quad (18)$$

则 JD_{xy} 可改写为:

$$JD_{xy} = \begin{Bmatrix} C_{x1} & [a_{xy1}, b_{xy1}] \\ N_{xy} \cdots & \cdots \\ C_{xi} & [a_{xyi}, b_{xyi}] \end{Bmatrix} \quad (19)$$

对应经典域, 评判模型节域 JY_{xp} 可写为:

$$JY_{xp} = (P_{xp}, C_{xt}, U_{xpt}) = \begin{Bmatrix} C_{x1} & U_{xp1} \\ P_{xy} \cdots & \cdots \\ C_{xi} & U_{xpi} \end{Bmatrix} \quad (20)$$

假定 $[a_{xpi}, b_{xpi}]$ 为包含 C_{xi} 指标下所有 $[a_{xyi}, b_{xyi}]$ 的合集, 则 JY_{xp} 可改写为:

$$JY_{xp} = \begin{Bmatrix} C_{x1} & [a_{xp1}, b_{xp1}] \\ P_{xy} \cdots & \cdots \\ C_{xi} & [a_{xpi}, b_{xpi}] \end{Bmatrix} \quad (21)$$

假定待评价物元如式(22):

$$DP_{xk} = (P_{xk}, C_{xt}, U_{xt}) = \begin{Bmatrix} c_{x1} & u_{x1} \\ P_{xk} \cdots & \cdots \\ c_{xi} & u_{xi} \end{Bmatrix} \quad (22)$$

式中: u_{xi} 为待评价物元 x 准则层下第 i 项指标参数值。

依据式(23)计算 x 准则层下第 t 项指标隶属于第

n 等级的关联度 $K_n(U_{xt})$:

$$K_n(U_{xt}) = \begin{cases} \frac{\rho(u_{xt}, U_{xyt})}{|U_{xy}|} & (u_{xt} \in U_{xyi}) \\ \frac{\rho(u_{xt}, U_{xyt})}{\rho(u_{xt}, U_{xpi}) - \rho(u_{xt}, U_{xyt})} & (u_{xt} \notin U_{xyi}) \end{cases} \quad (23)$$

变量 u_{xt} 到经典域 $[a_{xyi}, b_{xyi}]$ 的矩 $\rho(u_{xt}, U_{xyt})$ 可按式(24)进行计算:

$$\rho(u_{xt}, U_{xyt}) = \left| u_{xt} - \frac{1}{2}(a_{xyt} + b_{xyt}) \right| - \frac{1}{2}(b_{xyt} - a_{xyt}) \quad (24)$$

同理, 变量 u_{xt} 到节域 $[a_{xpi}, b_{xpi}]$ 的矩 $\rho(u_{xt}, U_{xpt})$ 可按式(25)进行计算:

$$\rho(u_{xt}, U_{xpt}) = \left| u_{xt} - \frac{1}{2}(a_{xpt} + b_{xpt}) \right| - \frac{1}{2}(b_{xpt} - a_{xpt}) \quad (25)$$

若 x 准则层下第 t 项指标赋权为 ω_{xt} , 则该准则层关联度 $K_n(J_x)$ 为:

$$K_n(J_x) = \sum_{t=1}^i \omega_{xt} K_n(U_{xt}) \quad (26)$$

假定 x 准则层赋权为 ω_x , 则目标层的综合关联

度 $K_n(J)$ 为:

$$K_n(J) = \sum_{x=1}^i \omega_{zx} K_n(J_x) \quad (27)$$

按式(28)确定评估算例的综合关联度:

$$K_n(J_{y_0}) = \max K_n(J) \quad (28)$$

从而判定待评估物元处于 y_0 等级。

3.2 正态云(CM)评判模型

本文再建立一个正态云理论模型,对层状围岩隧道结构稳定性风险进行综合评估,并与可拓层次分析模型(EAHP)的评估计算结果进行对比验证。

若 $C_{i\max}, C_{i\min}$ 为某一论域模糊集上、下限,则可按式(29)计算其正态云模型的期望值 E_x ,熵值 E_n 与超熵 H_e :

$$\begin{cases} E_x = (C_{i\max} + C_{i\min})/2 \\ E_n = (C_{i\max} - C_{i\min})/6 \\ H_e = K \end{cases} \quad (29)$$

基于熵 E_n 与超熵 H_e , 获取随机生成数 E'_n :

$$E'_n \sim N(E_n, H_e^2) \quad (30)$$

此时对于 x 准则层下第 t 项指标,其在论域 m 上的确定度 $u(m_{xt})$ 为:

$$u(m_{xt}) = \exp\left[-\frac{(m - E_x)^2}{2E_n^2}\right] \quad (31)$$

计算准则层、目标层综合确定度 U_{zx}, U_{zm} :

$$\begin{cases} U_{zx} = \sum_{t=1}^i u(m_{xt}) \cdot \omega_{xt} \\ U_{zm} = \sum_{x=1}^j u(m_x) \cdot \omega_{zx} \end{cases} \quad (32)$$

式中: $u(m_x)$ 为 x 准则层的确定度。

基于式(29)~(32)求取层状岩体完整性系数、层状岩体强度等指标云模型,见图4,5,图中横坐标表示指标阈值,纵坐标 δ 表示各指标层域值对应的隶属度。限于篇幅,其余24项指标层的云模型图不再逐一体现。

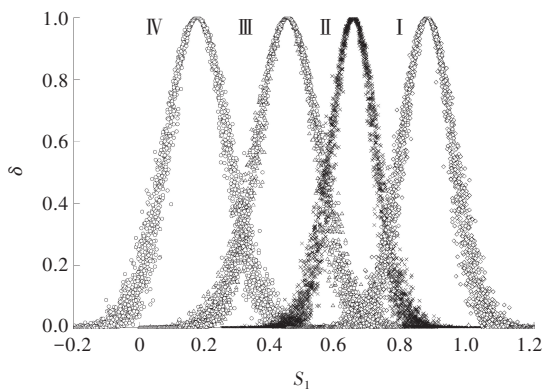


图4 层状岩体完整性系数云模型

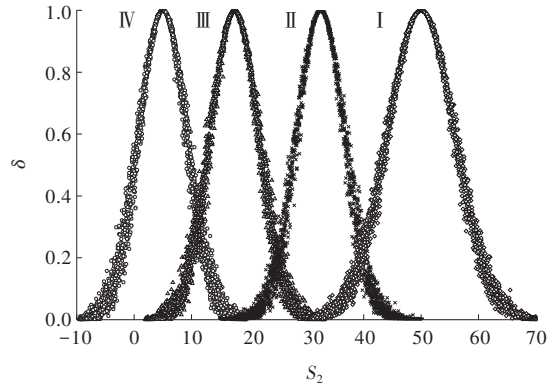


图5 层状岩体强度云模型

4 工程应用

4.1 依托工程概况

以彭水县共和隧道工程为依托,岩层产状为 $300^\circ \sim 325^\circ \angle 20^\circ \sim 40^\circ$, 岩层倾角 $30^\circ \sim 40^\circ$ 。轴线走向 231° , 且轴线与岩层走向夹角为 $0^\circ \sim 20^\circ$ 。隧道最大埋深 1 000 m, 山体自然坡度为 $25^\circ \sim 45^\circ$, 围岩最大主应力为 19.66 MPa。隧道走向右侧毗邻乌江, 隧址区穿越地层岩性为志留系上统罗惹坪组薄层状砂质页岩、局部夹粉砂岩。页岩裂隙面一般平直光滑, 多呈闭合状, 无充填或钙质薄膜充填, K40+430~K42+230 段为 III 级围岩, 在现场施工过程中, K40+900 桩号往后常出现初期支护开裂, 钢拱架变形病害。

4.2 计算结果分析

基于本文建立的组合赋权-EAHP-NCM 理论模型对共和隧道进行风险评估。经大量过程运算后得 EAHP 与 NCM 算法下 $S_1 \sim S_5$ 准则层的关联度, 见表6, 可见两种算法下各准则层吻合度较好, 其中 S_1 隶属 III~IV 级, 可判定共和隧道的水文地质因素处于严重~异常状态。依次可得结构面因素处于异常状态; 工程因素处于正常~注意状态; 外力因素处于严重状态, 地形地貌因素处于注意~异常状态。

本文再依托 Matlab 软件编程实现层状围岩隧道稳定性的人工智能评估。调用 BP 神经网络函数 newff(minmax(), [m, n, p], {'tansig', 'tansig', 'purelin'}, 'trainlm'), 设置迭代次数 50 000 次, 收敛误差为 0.000 000 1, 调用 net=train(net, x, y) 函数进行训练, 选择 c=sim(net, a) 函数对共和隧道稳定性进行预测。进行 5 次迭代运算后 Gradient=6.879 7 ×

表6 EAHP与NCM理论算法下准则层关联度

准则层	算法	某准则层确定度				判别结果
		$U(I)$	$U(II)$	$U(III)$	$U(IV)$	
S_1	EAHP	-0.272 69	-0.154 20	0.140 90	-0.140 86	III
	NCM	0.000 00	0.015 24	0.111 63	0.090 68	III~IV
S_2	EAHP	-0.162 76	-0.116 64	-0.037 01	0.013 44	IV
	NCM	0.000 00	0.003 64	0.050 61	0.102 67	IV
S_3	EAHP	-0.042 47	0.017 22	-0.020 07	-0.034 19	II
	NCM	0.025 22	0.030 97	0.006 94	0.014 72	I~II
S_4	EAHP	-0.007 96	-0.005 33	0.001 39	-0.001 05	III
	NCM	0.000 00	0.003 66	0.007 02	0.001 21	III
S_5	EAHP	-0.049 89	0.015 29	-0.006 92	-0.050 56	II
	NCM	0.000 00	0.031 58	0.059 69	0.000 77	II~III

10^{-5} , 权值误差范围 $M_u=1 \times 10^{-5}$, 预测值通过 Matlab 对表4的各样本进行学习训练,并将依托工程中参数带入 Matlab 进行预测,通过迭代计算得出 $c=3.130 8$, 见图6、7。实现了对本文EAHP与NCM算法的验证。

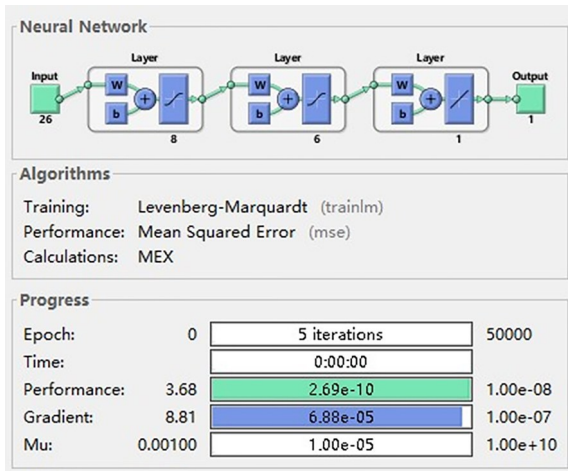


图6 BP神经网络模拟结果界面

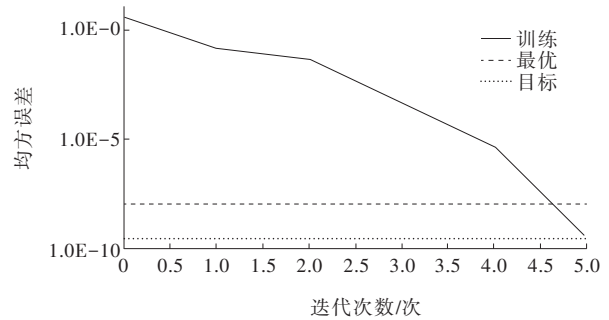


图7 迭代与均方误差

基于表6及BP神经网络预测结果,可得共和隧道稳定性的综合评估结果(表7)。由表7可以看出:EAHP、NCM、BPNN算法的评估计算结果相吻合,共和隧道关联度为III~IV等级,对应评价语言为:异常~严重,这与文献[18]中呈现的施工现场常有钢拱架变形、偶有塌方事故发生现象相吻合(图8、9),从而验证了本研究EAHP及NCM算法的可靠性。

表7 各理论算法下样本综合确定度

项目	样本综合确定度				判别结果	评价语言
	$U(I)$	$U(II)$	$U(III)$	$U(IV)$		
EAHP	-0.197 26	-0.111 55	0.058 63	-0.075 38	III	异常
NCM	0.025 22	0.085 09	0.235 89	0.210 05	III~IV	严重
BPNN	BP预测值=3.130 8		III~IV		异常~严重	
现场	施工现场常有钢拱架变形、偶有塌方等事故 ^[18]					

5 结论

本文以层状围岩隧道风险评估为研究对象,结合数学计算模型与BP神经网络进行分析,主要结论如下:

(1) 基于层状围岩隧道失稳破坏机理,从人的不安全因素和物的不安全因素两大视角考虑,综合水文地质、结构面、工程、外力、地形地貌共5个方面的影响因素建立了完整度较高的层状围岩隧道风险评估体系。



图 8 拱脚开裂+钢拱架变形

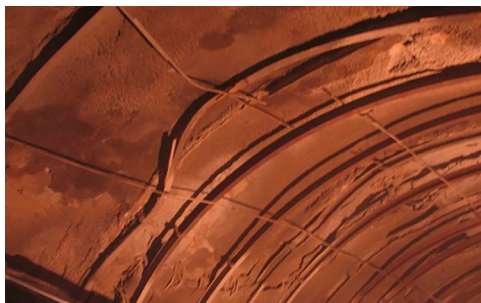


图 9 拱腰开裂+钢拱架变形

(2) 依托德尔菲法(DELPHI)构建判断矩阵,并结合 Matlab 软件求取指标权重。通过典型层状围岩隧道风险分析数据的挖掘获取事件样本矩阵,并依托熵权法(EWM)再获得指标权重。基于乘法原理得出可靠度较好的指标组合赋权。

(3) 通过发掘评估体系指标的经典域与节域,构建层状围岩隧道综合风险评估的可拓层次分析计算模型(EAHP)。联合 Matlab 与 Excel 软件,建立了层状围岩隧道综合风险评估的正态云计算模型(NCM)。

(4) 依托 Matlab 计算软件,进行 BP 神经网络训练与预测编程。分别调用 newff()、train()、sim() 函数,联合典型样本参数挖掘,实现对层状围岩隧道风险评估的训练及模拟预测。

(5) 依托共和隧道工程,验证本文 3 种层状围岩隧道风险评估系统的可靠性。经研究,EAHP 理论计算结果为Ⅲ级,NCM 算法结果为Ⅲ~Ⅳ级,BPNN 模拟预测结果为 3.130 8,综合判定共和隧道工程处于严重~异常状态,上述计算结果均与施工现场常有钢拱架变形、偶有塌方事故发生现象相吻合。

(6) 采用 EAHP、NCM 理论模型对层状围岩隧

道进行风险评估时,整体计算过程烦冗,可进一步基于 VB 语言开发“组合赋权-EAHP-EWM-BPNN”计算软件。

参考文献:

- [1] 罗选红.包西铁路施工期隧道水平层状围岩稳定性评价与支护[J].铁道勘察,2010,36(2):43-46.
- [2] 夏彬伟,陈果,康勇,等.层状岩体围岩变形破坏特征及稳定性评价[J].水文地质工程地质,2010,37(4):48-52.
- [3] 田卫明.层次可拓法在层状围岩隧道风险评估中的应用[J].工业安全与环保,2019,45(9):68-71,40.
- [4] 于剑舟.层状围岩施工变形控制施工技术研究[J].价值工程,2019,38(7):142-144.
- [5] 文竞舟.基于现场监测的倾斜层状隧道围岩稳定性的研究[D].重庆:重庆交通大学,2009.
- [6] 涂瀚.水平层状围岩隧道稳定性及破坏机理研究[J].铁道工程学报,2018,35(9):75-79,87.
- [7] 陈俊栋,葛修润,宋丹青,等.层状岩质边坡成洞过程中围岩变形及力学特征研究[J].水利与建筑工程学报,2018,16(6):149-154.
- [8] 郑飞.层状围岩深埋长大隧道岩爆安全控制技术研究[D].成都:西南交通大学,2016.
- [9] 王更峰.层状围岩隧道变形控制技术探讨与实践[J].铁道建筑技术,2013(7):28-31.
- [10] 屈鹏程.层状碎裂结构隧道围岩稳定性分析及防灾对策研究:以叙大铁路核桃湾隧道为例[D].成都:成都理工大学,2015.
- [11] 吴渤.层状岩体隧道围岩扰动区演化与锚固机理研究[D].武汉:中国地质大学,2016.
- [12] 刘锦欣.层状围岩隧道开挖稳定性及锚杆非对称支护方式研究[D].北京:北京交通大学,2018.
- [13] 丁尧,王俊,徐国文.层状岩体隧道围岩稳定性的数值模拟分析[J].成都理工大学学报(自然科学版),2019,46(3):363-372.
- [14] 王安.水平层状围岩隧道变形特征及爆破方案优化分析[D].武汉:华中科技大学,2017.
- [15] 卢泽霖.水平层状围岩隧道顶板力学模型与稳定性研究[D].西安:西安工业大学,2018.
- [16] 吕跃进,张维,曾雪兰.指数标度与 1-9 标度互不相容及其比较研究[J].工程数学学报,2003,20(8):77-81.
- [17] 吕跃进.指数标度判断矩阵的一致性检验方法[J].统计与决策,2006(18):31-32.
- [18] 李晓红,夏彬伟,李丹,等.深埋隧道层状围岩变形特征分析[J].岩土力学,2010,31(4):1163-1167.