

洞室围岩质量多因素模糊综合评价模型及应用

郑美田¹, 陈乐求¹, 王曰国²

(1. 广州市建筑科学研究院, 广州 510440; 2. 中南大学土木建筑学院, 长沙 410075)

[摘要] 由于洞室围岩质量及其影响因素的复杂性和不确定性, 以往采用定指标、定权重的评价方法不尽合理, 因此, 有必要建立一多因素模糊评价模型。首先, 应用模糊数学方法, 建立了考虑岩石的单轴抗压强度 σ_c , RQD 指标, 结构面间距 J_1 , 结构面摩擦系数 f 和岩体的声波速度 V 的多因素洞室围岩综合评价模型; 然后, 以地下洞室围岩为工程背景, 对岩体质量进行了模糊综合评价, 结果表明: 模糊评价方法适用于不同岩体工程, 能最大限度地利用工程勘察成果, 是解决多因素、多指标综合问题的有效决策方法。得到的结果与可拓学评价法以及 RMR 法得到的结果大致相同, 符合实际情况, 说明多因素综合评价模型的正确性。

[关键词] 洞室 围岩质量 模糊综合评价 多因素 评价模型

[中图分类号] TU457 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 0495-5331(2007)05-0101-04

为了评价围岩的稳定性、合理设计衬砌和支护方案, 围岩质量的确定和分类是一项不可或缺且十分重要的工作, 其既涉及地下工程能否建成, 也影响工程的投资及工期。目前国内外关于岩体质量综合评价方法体系繁多, 其中以 Deere 的 RQD 分类法 (1964), 挪威 Barton 的 Q 系统 (1974, 1980), 南非 Bieniawski 的 RMR 分类 (1974, 1976) 应用最广^[1-5]。但由于岩体是复杂的地质体, 它不仅由多种岩石组成, 而且包含了大量各种成因的结构面, 处于复杂的地下水 and 地应力环境, 并经历了长期的次生和表生改造作用, 这些岩体经典的质量评价方法通常都建立在二值逻辑基础上, 二值逻辑规定一个元素与一个集合之间, 元素只能属于这个集合或不属于这个集合, 两者必居其一, 而且仅居其一, 决不允许有中间状态存在, 这种划分标准存在一定不合理性, 而造成这种情况的原因是采用经典数学来描述模糊性事物。因此, 有必要搜寻其他方法来描述这些事物, 如黄祥志等^[6]在物元理论、可拓集合论和关联函数运算的基础上, 建立了隧洞围岩稳定分类的可拓评价方法, 引进了隶属度的概念和一种定量的指标权重的确定方法。陈守煜等^[7]以工程模糊集理论为基础, 建立以相对差异函数为基础的模糊可变集合工程方法, 并考虑模型参数指标权向量的可变性。杨朝晖等^[8]以人工神经网络方法对围

岩质量进行评价。康志强等^[9]基于可拓工程方法, 在物元模型理论的基础上建立了洞室岩体质量评价的物元模型, 提出采用层次分析法计算物元模型中各评价指标的权系数的方法。

本文针对影响围岩稳定性的因素具有模糊性这一特点, 应用模糊数学方法^[10-13], 在单因素模糊综合评价的基础上, 建立了考虑岩石的单轴抗压强度 σ_c , RQD 指标, 结构面间距 J_1 , 结构面摩擦系数 f 和岩体的声波速度 V 的五因素洞室围岩综合评价模型; 然后, 以某地下洞室为工程背景, 对其中六个洞段岩体质量进行了模糊综合评价, 探讨多因素模糊评价方法的可行性。

1 计算原理

模糊综合评价是解决多因素、多指标综合问题的一种行之有效的决策方法。它是应用模糊关系合成的特性, 根据给出的评价准则和实测值, 从多个指标对评判事物隶属等级状况进行综合性评判: 它把被评价事物的变化区间作出划分, 又对事物属于各个等级的程度作出分析, 使得对事物的描述更加深入客观, 分析结果更加准确。给定事物名称为 N , 它关于特征 ξ 有量值为 μ , 以有序三元 $R = (N, \xi, \mu)$ 组为描述事物的基本单元, 其中量值 μ 具有模糊性。如果事物 N 有 n 个特征 $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n$ 和相应的模糊

[收稿日期] 2007-05-10; **[修订日期]** 2007-09-06。

[第一作者简介] 郑美田 (1967 年—), 男, 2000 年毕业于武汉大学, 获学士学位, 在读硕士生, 高级工程师, 现主要从事岩土工程研究、测试、咨询等工作。

量值 $\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n$, 称 R 为 n 维模糊物元^[11]。如果 m 个事物 n 维物元组合在一起, 使其构成 m 个事物 n 维复合物元 R_{mn} 。若将 R_{mn} 的量值改写为模糊物元量值, 称为 m 个事物 n 维复合物元, 记作:

$$R_{mn} = \begin{bmatrix} M_1 & M_2 & \dots & M_m \\ \xi_1 & \mu_{11} & \mu_{12} & \dots & \mu_{1m} \\ \xi_2 & \mu_{21} & \mu_{22} & \dots & \mu_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \xi_n & \mu_{n1} & \mu_{n2} & \dots & \mu_{nm} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: R_{mn} 为 m 个事物 n 维复合模糊物元; M_i 为第 i 个事物, $i=1, 2, \dots, m$; ξ_j 为第 j 项特征, $j=1, 2, \dots, n$; μ_{ij} 为第 i 个事物第 j 项对应的模糊量值, 即隶属度。

由于特征 ξ , 即各个评价因素的重要程度不同, 必须分别赋予其相应的权重, 设 $A = (a_1, a_2, \dots, a_n)$, 其中 $a_j (j=1, 2, \dots, n)$ 为第 j 项评价因素 ξ_j 的权重。可得事物 N 的模糊综合评判集为:

$$B = A \cdot R_{mn} = (b_1, b_2, \dots, b_m) \quad (2)$$

利用最大隶属度原则进行判断, 推断岩体的等级, 具体流程如图 1 所示。

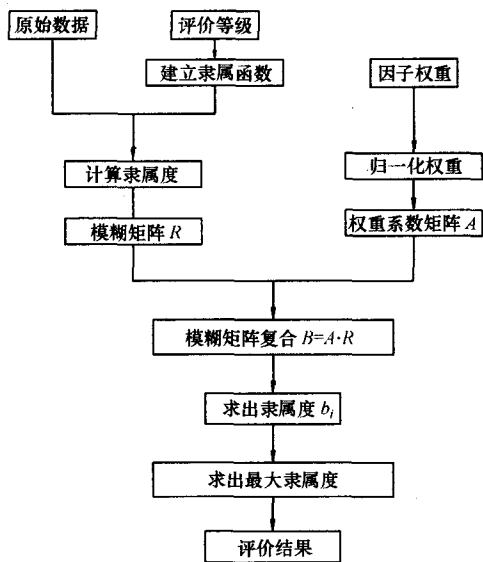


图 1 评价流程图

2 评价模型

2.1 评价指标

为了使所选取评价因素简便、易于测定, 选取以下几个参数作为分类依据: (1) 岩石的单轴抗压强度 R_c , 该指标反映岩块软硬特征及岩性特征; (2) RQD 指标, 反映岩块大小及完整程度; (3) 结构面间距 J_l , 该参数反映地质构造及岩体结构特征; (4) 结构面摩擦系数 f , 该项指标反映结构面粗糙程度、蚀变及充填情况; (5) 岩体的声波速度 V , 该指标在一

定程度上反映岩体的完整程度及刚度特征。本文所选的指标较文^[14]的指标减少一项: 岩体钻进速度 T (以每钻进 10cm 岩体所需时间来衡量, 该指标在一定程度上反映工程岩体的强度特征), 因为岩体的强度指标可通过其他 5 个指标得以体现, 从而使各指标更容易在实际工程中得到确定。这些指标的变化范围如表 1 所示。对照规范及惯例将岩体质量分为 5 个等级, 如表 2。

表 1 岩体质量评价指标变化范围

指标参数	变化范围
R_c/MPa	10 ~ 300
$RQD/\%$	0 ~ 100
J_l/m	0.01 ~ 2.0
f	0.10 ~ 1.2
$V/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	500 ~ 7500

表 2 单因素指标岩体分类

级别	R_c/MPa	$RQD/\%$	J_l/m	f	$V/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
I	120 ~ 200	90 ~ 100	0.8 ~ 2	0.8 ~ 1.2	5000 ~ 7500
II	60 ~ 120	75 ~ 90	0.3 ~ 0.8	0.3 ~ 0.8	4000 ~ 5000
III	30 ~ 60	50 ~ 75	0.2 ~ 0.3	0.2 ~ 0.3	2500 ~ 4000
IV	15 ~ 30	25 ~ 50	0.1 ~ 0.2	0.1 ~ 0.2	2000 ~ 2500
V	< 15	< 25	< 0.1	< 0.1	< 2000

以某地下洞室为工程背景^[14], 该洞室长 1239m, 宽 10.6m, 净高 7.25m, 围岩主要由太古界及远古界的老变质岩地层及古生界以来的沉积岩层组成, 岩性主要为混合岩、片麻岩及角闪岩组成, 以混合岩为主。根据现场及室内测试, 得到该隧道 6 段 ($K_1 \sim K_6$) 5 个指标对应值如表 3。

表 3 各段岩体参数

区段	R_c/MPa	$RQD/\%$	J_l/m	f	$V/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
K_1	82.24	53	0.43	0.57	3200
K_2	83.78	26	0.40	0.50	2300
K_3	79.67	57	0.29	0.41	3600
K_4	65.87	25	0.45	0.27	2100
K_5	79.88	57	0.30	0.48	3800
K_6	85.80	54	0.29	0.41	3200

2.2 隶属函数的确定

在确定指标实际值之后, 还必须解决指标间的可比较问题, 即进行指标的无量纲化处理, 通过一定的数值变换来消除指标间的量纲影响。从本质上讲, 指标无量纲化过程也就是求解隶属函数的过程, 各种无量纲化公式, 即是指的隶属函数。根据岩体的特点和可操作性, 本文选择线性无量纲化方法来确定指标的隶属函数, 具体公式如下:

$$U_I(\lambda) = \begin{cases} 1 & (\lambda \geq \omega_1) \\ \frac{\lambda - \omega_2}{\omega_1 - \omega_2} & (\omega_2 < \lambda \leq \omega_1) \\ 0 & (\lambda < \omega_2) \end{cases} \quad (3)$$

$$U_i(\lambda) = \begin{cases} 0 & (\lambda > \omega_{i-1}, \lambda < \omega_{i+1}) \\ -\frac{\omega_{i-1} - \lambda}{\omega_i - \omega_{i-1}} & (\omega_i < \lambda \leq \omega_{i-1}) \\ \frac{\omega_{i+1} - \lambda}{\omega_{i+1} - \omega_i} & (\omega_{i+1} < \lambda \leq \omega_i) \end{cases} \quad (4)$$

$$U_n(\lambda) = \begin{cases} 0 & (\lambda > \omega_{n-1}) \\ -\frac{\omega_{n-1} - \lambda}{\omega_n - \omega_{n-1}} & (\omega_n < \lambda \leq \omega_{n-1}) \\ 1 & (\lambda < \omega_n) \end{cases} \quad (5)$$

式中: $U_I(\lambda)$ 、 $U_i(\lambda)$ 、 $U_n(\lambda)$ 表示第 I 级、第 i 级以及第 n 级岩体的隶属函数; ω 为岩体评价级标准值; λ 为实测值。

2.3 评价矩阵

根据表 2 建立各个因素对于 5 个级别的隶属函数,其边界值均取各个级别的上限值。从而建立各段岩体因素集的评价矩阵:

$$R_{K_1} = \begin{bmatrix} 0 & 0.37 & 0.63 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.12 & 0.88 & 0 \\ 0 & 0.26 & 0.74 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.1 & 0.9 & 0 \\ 0 & 0 & 0.47 & 0.53 & 0 \end{bmatrix}$$

$$R_{K_2} = \begin{bmatrix} 0 & 0.4 & 0.6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.04 & 0.96 \\ 0 & 0.2 & 0.8 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.1 & 0.9 \\ 0 & 0 & 0 & 0.6 & 0.4 \end{bmatrix}$$

$$R_{K_3} = \begin{bmatrix} 0 & 0.33 & 0.67 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.28 & 0.72 & 0 \\ 0 & 0 & 0.9 & 0.1 & 0 \\ 0 & 0.06 & 0.94 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.73 & 0.27 & 0 \end{bmatrix}$$

$$R_{K_4} = \begin{bmatrix} 0 & 0.1 & 0.9 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0.3 & 0.7 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.4 & 0.6 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.2 & 0.8 \end{bmatrix}$$

$$R_{K_5} = \begin{bmatrix} 0 & 0.33 & 0.67 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.28 & 0.72 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.8 & 0.2 & 0 \\ 0 & 0 & 0.87 & 0.13 & 0 \end{bmatrix}$$

$$R_{K_6} = \begin{bmatrix} 0 & 0.425 & 0.575 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.16 & 0.84 & 0 \\ 0 & 0 & 0.9 & 0.1 & 0 \\ 0 & 0 & 0.3 & 0.7 & 0 \\ 0 & 0 & 0.47 & 0.53 & 0 \end{bmatrix}$$

3 评价结果

3.1 权重确定

模型中各因素的重要程度是不同的,必须考虑它们的权重。不少综合评判模型和识别模型对指标的权重是根据经验确定的,不免带有一定的主观性。为避免这一偏差,本文采用分担率的方法计算各因素的权重,其具体计算公式如下:

$$\gamma_j = \frac{q_j}{\sum_{j=1}^n q_j} \quad j = 1, 2, \dots, 6 \quad (6)$$

式中, γ_j 为因素权重; λ_j 为第 j 种因素的参数值; $q_j = \lambda_j / \bar{\omega}_j$; $\bar{\omega}_j = (\omega_{j1} + \omega_{j2} + \dots + \omega_{jn}) / n$; $\bar{\omega}_j$ 为第 j 种因素的平均标准值, $\omega_{j1}, \omega_{j2}, \dots, \omega_{jn}$ 为第 j 种因素各级别的标准值。

根据表 2、表 3 的数据,按式(6)计算得到不同分段中各个因素的权重,见表 4。

表 4 各因素权重计算结果

编号	R_c	RQD	J_l	f	V
K_1	0.228333	0.183938	0.149233	0.258688	0.179807
K_2	0.284426	0.110335	0.169746	0.277469	0.158025
K_3	0.243605	0.217859	0.110841	0.204923	0.222773
K_4	0.274453	0.130206	0.23437	0.183891	0.17708
K_5	0.232212	0.207124	0.109013	0.228088	0.223563
K_6	0.267014	0.210064	0.112812	0.208568	0.201543

3.2 综合评价

在建立模糊关系矩阵后,由式(2)进行合成运算,根据最大隶属度原则可得综合评价结果:

$K_1: B_1 = A \cdot R_{K_1} = (0, 0.123284, 0.386733, 0.489983, 0)$; $K_2: B_2 = A \cdot R_{K_2} = (0, 0.147720, 0.306452, 0.126975, 0.418853)$; $K_3: B_3 = A \cdot R_{K_3} = (0, 0.092685, 0.679224, 0.228091, 0)$; $K_4: B_4 = A \cdot R_{K_4} = (0, 0.097756, 0.484623, 0.145750, 0.271871)$; $K_5: B_5 = A \cdot R_{K_5} = (0, 0.07630, 0.699560, 0.223810, 0)$; $K_6: B_6 = A \cdot R_{K_6} = (0, 0.113481, 0.445969, 0.440550, 0)$

由此得到各洞段的质量等级为: $N1$ 段 IV 级, $N2$ 段 V 级, $N3$ 段 III 级, $N4$ 段 III 级, $N5$ 段 III 级, $N6$ 段 III 级。将多因素模糊综合评价方法与可拓学洞室岩体质量评价方法^[14]的结果进行对比,如表

5. 从表中可看出多因素模糊综合评价方法得到的结果与可拓学评价法以及 RMR 法得到的结果大致相同,符合实际情况,说明本文确定的多因素综合评价模型的正确性。

表 5 三种评价结果的比较

洞段	K_1	K_2	K_3	K_4	K_5	K_6
多因素模糊评价	IV	V	III	III	III	III
可拓学评价	III	IV	III	IV	III	III
RMR 法	III	III	III	IV	III	III

4 结论

1) 模糊综合评价是解决多因素、多指标综合问题的一种行之有效的决策方法。它是应用模糊关系合成的特性,根据给出的评价准则和实测值,从多个指标对评判事物隶属等级状况进行综合性评判;它把被评价事物的变化区间作出划分,又对事物属于各个等级的程度作出分析,使得对事物的描述更加深入客观,分析结果更加准确。

2) 论述了模糊评价模型的建立过程及其分析步骤,确定了评价指标隶属度和权重。针对影响围岩稳定性的因素具有模糊性这一特点,在单因素模糊综合评价的基础上,建立了考虑岩石的单轴抗压强度 σ_c , RQD 指标,结构面间距 J_1 , 结构面摩擦系数 f 和岩体的声波速度 V 的五因素洞室围岩综合评价模型。

3) 以某隧道为工程背景,对其中六个洞段岩体质量进行了模糊综合评价,表明得到的结果与可拓学评价法以及 RMR 法得到的结果大致相同,符合

实际情况,说明本文确定的多因素综合评价模型的正确性。

[参考文献]

- [1] 冯夏庭,林韵梅. 岩石力学与工程专家系统[M]. 沈阳:辽宁科学技术出版社,1992.
- [2] Bieniawski Z T. Engineering Rock Mass Classification[M]. [s. l.]:[s. n.],1989.
- [3] 李华,朱自强,李键. TSP203 系统在岩体分级中的应用研究[J]. 工程地球物理学报,2005,2(6):449-453.
- [4] BIENIAWSKI Z. T. 工程岩体分类[M]. 吴立新,王建锋,刘殿书,等译. 北京:中国矿业大学出版社,1993.
- [5] Barton N, Lien R, Lunde J. Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support[J]. Rock Mech., 1974, 6(4):183-236.
- [6] 黄祥志,余成学. 基于可拓理论的围岩稳定分类方法的研究[J]. 岩土力学,2006,27(10):1800-1814.
- [7] 陈守煜,韩晓军. 围岩稳定性评价的模糊可变集合工程方法[J]. 岩石力学与工程学报,2006,25(9):1857-1861.
- [8] 杨朝晖,刘浩吾. 地下工程围岩稳定性分类的人工神经网络模型[J]. 四川联合大学学报(工程科学版),1999,3(4):66-72.
- [9] 康志强,冯夏庭,周辉. 基于层次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(s2):3687-3693.
- [10] 陈江,付建飞. 利用 GIS 知识驱动模型开展区域矿产资源预测[J]. 地质与勘探,2005,41(5):66-68.
- [11] 杨纶标,高英仪. 模糊数学原理及应用[M]. 广州:华南理工大学出版社,2002.
- [12] 贾超,肖树芳,刘宁. 可拓学理论在洞室岩体质量评价中的应用[J]. 岩石力学与工程学报,2003,22(5):751-756.
- [13] 陈兰云,杜宁,吴育萍,等. 地基处理方案的模糊判别选择[J]. 地质与勘探,2004,40(4):89-92.

FUZZY COMPREHENSIVE ASSESSMENT MODEL WITH SEVERAL INFLUENTIAL FACTORS FOR QUALITY OF TUNNEL ROCK AND ITS APPLICATION

ZHENG Mei-tian¹, CHEN Le-qiu¹, WANG Yue-guo²

(1. Guangzhou Institute of Building Science, Guangzhou 510440;

2. College of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075)

Abstract: The tunnel rock quality and its influential factors are very complicated and uncertain. And the assessments used before with fixed index and fixed weight are not reasonable. So it is necessary to build a fuzzy assessment model which can consider several influential factors. Firstly, by using fuzzy mathematic method, based on the single factor comprehensive assessment method, a six factors comprehensive model are founded for the tunnel rock. This model contains six factors, namely uniaxial compressive strength of rock σ_c , RQD index, interval J_1 between joint plane, roughness coefficient f of joint plane surfaces, and acoustic wave velocity V in rock mass. Secondly, rock mass in one underground is chosen as the engineering background. The fuzzy comprehensive assessment is done to the rock mass in seven sections of this tunnel. The result of assessment shows that, fuzzy assessment method is suitable for different rock mass engineering, it can make use of resource from engineering geological investigation at the largest degree. Fuzzy assessment method is a good way to solve the problem with several factors and several index. The results obtained for the project by fuzzy assessment method is in good agreement with that from extenics theory and RMR theory, which is in accordance with the practical situation, so the comprehensive assessment model built in this paper is correct.

Key words: tunnel; rock quality; fuzzy comprehensive assessment; several factors; assessment model