

Use of Variable Fuzzy Sets Method for Evaluating Tunnel Rock Quality

Yong Lei, Yu Guo

Pearl River Hydraulic Research Institute, Ministry of Water Resources, Guangzhou Guangdong
Email: 113759737@qq.com

Received: Oct. 30th, 2015; accepted: Nov. 15th, 2015; published: Nov. 19th, 2015

Copyright © 2015 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

The variable fuzzy sets method is combined with tunnel rock quality evaluation. In view of the variety and complexity of the factors influencing rock quality, the parameters reflecting the general rock engineering are taken into account for evaluation. Under difference function and relative parameters thus the calculating model is advanced. The method can scientifically determine relative membership functions of disquisitive indexes at level interval relating to engineering, also it can fully use one's experience and knowledge, qualitative and quantitative information of index system to obtain weights of indexes for operating comprehensive evaluation for tunnel rock quality. The numerical example of Shibeiling tunnel rock shows that the proposed method can more precisely reflect the engineering characteristics of tunnel rock.

Keywords

Variable Fuzzy Sets, Rock Quality Evaluation, Difference Function, Rank Feature Values

洞室岩体质量评价的模糊可变集合方法

雷 勇, 郭 瑜

珠江水利委员会珠江水利科学研究院水利工程研究所, 广东 广州
Email: 113759737@qq.com

收稿日期: 2015年10月30日; 录用日期: 2015年11月15日; 发布日期: 2015年11月19日

摘要

将模糊可变方法与洞室岩体质量评价相结合, 从洞室工程的角度选取能够反映岩体综合工程特性的参数进行评价, 在差异函数与相关参数的基础上建立洞室岩体质量评价模型。该方法能够科学、合理地确定与洞室岩体质量相关的各个研究指标处于级别区间的相对隶属函数, 并根据指标重要性进行二元比较与量化, 从而合理地确定出各个指标的权重, 得出洞室岩体质量的综合评价的级别特征值。对石牌岭公路隧道岩体质量进行了分析, 实例证明, 本文所提方法能够准确地反映洞室岩体的工程特性。

关键词

模糊可变集合, 岩体质量评价, 差异函数, 级别特征值

1. 引言

本随着社会经济的发展, 隧道及地下空间的开发利用越来越受到人们的重视。随之而来的各种地质灾害问题, 如塌方、涌水、瓦斯、岩爆等也日益增多, 在这种环境背景下, 洞室围岩稳定性评价就显得非常重要[1] [2], 模糊可变集合方法选取了相应典型岩体的评价指标, 并就模糊概念 - 重要性进行二元比较与量化, 从而合理地确定出各个指标(或研究对象)的权重并建立洞室围岩的综合评判模型, 进而实现对工程体系的综合质量评价。

2. 模糊可变集合原理

2.1. 模糊可变集合定义

设论域 U 上的一个模糊概念(事物、现象) A , 对 U 中的任意元素 $u (u \in U)$, 在相对隶属函数的连续统数轴任一点上, u 对表示吸引性质 A 的相对隶属度为 $\mu_A(u)$, 对表示排斥性质 A^c 的相对隶属度为 $\mu_{A^c}(u)$, 设

$$D_A(u) = \mu_A(u) - \mu_{A^c}(u) \quad (1)$$

$D_A(u)$ 称为 u 对 A 的相对差异度[3]。这里 $0 \leq \mu_A(u) \leq 1$, $0 \leq \mu_{A^c}(u) \leq 1$ 。映射

$$\begin{aligned} D_A : D &\rightarrow [-1, 1] \\ u &\rightarrow D_A(u) \in [-1, 1] \end{aligned} \quad (2)$$

称为 u 对 A 的相对差异函数。根据模糊集合的余集定义

$$\mu_A(u) + \mu_{A^c}(u) = 1 \quad (3)$$

则

$$D_A(u) = 2\mu_A(u) - 1 \quad (4)$$

或

$$\mu_A(u) = (1 + D_A(u)) / 2 \quad (5)$$

令

$$V = \{(u, D) \mid u \in U, D_A(u) = \mu_A(u) - \mu_{A^c}(u), D \in [-1, 1]\} \quad (6)$$

$$A_+ = \{u | u \in U, \mu_A(u) > \mu_{A^c}(u)\} \quad (7)$$

$$A_- = \{u | u \in U, \mu_A(u) < \mu_{A^c}(u)\} \quad (8)$$

$$A_0 = \{u | u \in U, \mu_A(u) = \mu_{A^c}(u)\} \quad (9)$$

V 称为 U 的模糊可变集合。 A_+ 、 A_- 、 A_0 分别称为模糊可变集合 V 的吸引(为主)域、排斥(为主)域和平衡界或质变界。

2.2. 相对差异函数模型

设 $X_0 = [a, b]$ 为实轴上模糊可变集合 V 的吸引域区间即 $\mu_A(u) > \mu_{A^c}(u)$ 区间, $X = [c, d[$ 为包含 X_0 ($X_0 \subset X$) 的某一值域区间。如图 1 所示。

根据模糊可变集合定义可知 $[c, a]$ 与 $[b, d]$ 均为其排斥(为主)域区间, 即 $\mu_A(u) < \mu_{A^c}(u)$ 区间。设 M 为吸引(为主)域区间 $[a, b]$ 中 $\mu_A(u) = 1$ 的点值, M 可根据实际问题确定, 在通常情况下 M 为区间 $[a, b]$ 的中点值。设 x 为 X 区间内的任意点的量值, 则 x 落入 M 点左侧时的差异函数公式

$$\begin{cases} \mu_A(u) = 0.5 + 0.5 \left(\frac{x-a}{M-a} \right)^\beta & x \in [a, M] \\ \mu_A(u) = 0.5 - 0.5 \left(\frac{x-a}{c-a} \right)^\beta & x \in [c, a] \end{cases} \quad (10)$$

x 落入 M 点右侧时, 其差异函数公式

$$\begin{cases} \mu_A(u) = 0.5 + 0.5 \left(\frac{x-b}{M-b} \right)^\beta & x \in [M, b] \\ \mu_A(u) = 0.5 - 0.5 \left(\frac{x-b}{d-b} \right)^\beta & x \in [b, d] \end{cases} \quad (11)$$

当 $x \notin [c, d]$ 时,

$$\mu_A(u) = -1, \quad x \notin [c, d] \quad (12)$$

式中 β 为大于 0 的指数, 通常可取 $\beta = 1$ 即线性函数。公式(10)~(12)满足: (1) 当 $x = a$ 、 $x = b$ 时, $\mu_A(u) = \mu_{A^c}(u) = 0.5$; (2) 当 $x = M$ 时, $\mu_A(u) = 1$; (3) 当 $x = c$ 、 $x = d$ 时, $\mu_A(u) = 0$; (4) 当 $x \notin [c, d]$, $\mu_A(u) = -1$ 。

3. 石碑岭公路隧道岩体质量评价的模糊可变集合方法

本文以长白公路石碑岭隧道围岩质量评价为例, 采用文献[4]中的数据, 说明模糊可变集合模型在洞室岩体质量评价中的应用过程。

长白公路石碑岭隧道长 1239 m, 宽 10.6 m, 净高 7.25 m, 围岩主要有太古界及元古界的老变质岩地层及古生界以来的沉积岩地层组成, 岩性主要为混合岩、片麻岩及角闪岩组成, 以混合岩为主。

本着使所选取的评价因素简便、易于测定的原则, 本文选取以下几个参数作为分类依据: (1) 岩石的

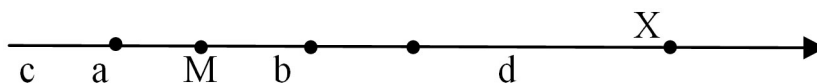


Figure 1. Location relationship between points x , M and intervals $[a, b]$, $[c, d]$
图 1. 点 x 、 M 与区间 $[a, b]$ 、 $[c, d]$ 的位置关系图

单轴抗压强度 σ_c ，反映岩块的软硬程度及岩性特征；(2) RQD 指标，反映岩块大小及完整性程度；(3) 结构面间距 J_1 ，反映地质构造及岩体结构特征；(4) 结构面摩擦系数 f ，反映结构面粗糙程度、蚀变及充填情况等特征；(5) 岩体钻进速度 T ，以每钻进 10 cm 岩体所需时间来衡量，在一定程度上反映工程岩体的强度特征；(6) 岩体的声波速度 V ，一定程度上反映岩体的刚度特征。各指标的变化范围如表 1 所示。

对照规范及惯例，用单因素法将岩体质量分为 5 个等级，如表 2 所示。

根据现场及室内测试，得到该隧道 7 段(N1~N7)6 个指标的对应值如表 3 所示。

为便于计算，必须把量纲不同的指标进行无量化处理。处理方法如下式所示：

对于越大越优因素：

$$q'_{ij} = \frac{q_{ij} - q_{ij}^{\min}}{q_{ij}^{\max} - q_{ij}^{\min}}; \quad d'_{ij} = \frac{d_{ij} - d_{ij}^{\min}}{d_{ij}^{\max} - d_{ij}^{\min}}$$

对于越小越优因素：

Table 1. Variety of parameters for rock quality evaluation

表 1. 岩体质量评价指标变化范围

指标参数	变化范围
σ_c / Mpa	10~300
RQD/%	0~100
J_1 / m	0.01~2.0
f	0.10~1.2
$T / 10 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$	3~10
$V / \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	500~7500

Table 2. Rock quality classification with single parameter

表 2. 单因素指标岩体分类表

级别	σ_c / Mpa	RQD/%	J_1 / m	f	$T / 10 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$	$V / \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
I	300~200	100~90	2.0~0.8	1.2~0.8	15~12	7500~5000
II	200~150	90~75	0.8~0.3	0.8~0.3	12~7	5000~4000
III	150~100	75~50	0.3~0.2	0.3~0.2	7~5	4000~2500
IV	100~50	50~25	0.2~0.1	0.2~0.1	5~3	2500~2000
V	50~1	25~0	0.1~0.01	0.1~0.01	3~1	2000~500

Table 3. Parameters of tunnel rock mass

表 3. 隧道各段岩体参数值列表

区段	σ_c	RQD	J_1	f	T	V
N1	82.24	53	0.43	0.57	5.2	3200
N2	83.78	26	0.40	0.50	3.2	2300
N3	79.67	57	0.29	0.41	7.3	3600
N4	65.87	25	0.45	0.27	5.8	2100
N5	79.88	57	0.30	0.48	6.6	2800
N6	62.09	44	0.38	0.33	6.7	2800
N7	85.80	54	0.29	0.41	5.6	3200

$$q'_{ij} = \frac{q_{ij}^{\max} - q_{ij}}{q_{ij}^{\max} - q_{ij}^{\min}}; \quad d'_{ij} = \frac{d_{ij}^{\max} - d_{ij}}{d_{ij}^{\max} - d_{ij}^{\min}}$$

式中: q_{ij} 为第 t 类别第 j 因素的评价标准值, q'_{ij} 为无量纲化后的第 t 类别第 j 因素的评价标准值, q_{ij}^{\min} 为第 t 类别第 j 因素的最小评价标准值, q_{ij}^{\max} 为第 t 类别第 j 因素的最大评价标准值; d_{ij} 为第 t 种待评岩体第 j 因素的评价标准值, d'_{ij} 为无量纲化后第 t 种待评岩体第 j 因素的评价标准值。

对表 2 及表 3 进行无量纲化处理后的对应值如表 4 和表 5 所示。

根据表 4 并参考文献[2], 可以构造模糊可变集合差异函数计算的各项参数(a 、 b 、 c 、 d 、 M)取值矩阵:

$$[a, b] = \begin{bmatrix} [1.0, 0.67] & [0.67, 0.50] & [0.50, 0.33] & [0.33, 0.16] & [0.16, 0.0] \\ [1.0, 0.90] & [0.90, 0.75] & [0.75, 0.50] & [0.50, 0.25] & [0.25, 0.0] \\ [1.0, 0.40] & [0.40, 0.15] & [0.15, 0.10] & [0.10, 0.05] & [0.05, 0.0] \\ [1.0, 0.64] & [0.64, 0.45] & [0.45, 0.27] & [0.27, 0.09] & [0.09, 0.0] \\ [1.0, 0.78] & [0.78, 0.43] & [0.43, 0.28] & [0.28, 0.14] & [0.14, 0.0] \\ [1.0, 0.64] & [0.64, 0.50] & [0.50, 0.29] & [0.29, 0.20] & [0.20, 0.0] \end{bmatrix}$$

$$[c, d] = \begin{bmatrix} [1, 0.50] & [1, 0.33] & [0.67, 0.16] & [0.5, 0] & [0.33, 0] \\ [1, 0.75] & [1, 0.5] & [0.9, 0.25] & [0.75, 0] & [0.5, 0] \\ [1, 0.15] & [1, 0.10] & [0.4, 0.05] & [0.15, 0] & [0.1, 0] \\ [1, 0.45] & [1, 0.27] & [0.64, 0.09] & [0.45, 0] & [0.27, 0] \\ [1, 0.43] & [1, 0.28] & [0.78, 0.14] & [0.43, 0] & [0.28, 0] \\ [1, 0.5] & [1, 0.29] & [0.64, 0.2] & [0.5, 0] & [0.29, 0] \end{bmatrix}, \quad M = \begin{bmatrix} 1.0 & 0.67 & 0.415 & 0.16 & 0.0 \\ 1.0 & 0.9 & 0.625 & 0.25 & 0.0 \\ 1.0 & 0.4 & 0.125 & 0.10 & 0.0 \\ 1.0 & 0.64 & 0.36 & 0.27 & 0.0 \\ 1.0 & 0.78 & 0.355 & 0.28 & 0.0 \\ 1.0 & 0.64 & 0.395 & 0.29 & 0.0 \end{bmatrix}$$

Table 4. Rock quality classification with single parameter (dimensionless)

表 4. 单因素指标岩体分类表(无量纲)

II 级	III 级	IV 级	V 级
0.67~0.50	0.50~0.33	0.33~0.16	0.16~0
0.90~0.75	0.75~0.50	0.50~0.25	0.25~0
0.40~0.15	0.15~0.10	0.10~0.05	0.05~0
0.64~0.45	0.45~0.27	0.27~0.09	0.09~0
0.78~0.43	0.43~0.28	0.28~0.14	0.14~0
0.64~0.50	0.50~0.29	0.29~0.20	0.20~0

Table 5. Parameters of tunnel rock mass (dimensionless)

表 5. 隧道各段岩体参数值列表(无量纲)

区段	σ_c	RQD	J_1	f	T	V
N1	0.27	0.53	0.21	0.43	0.30	0.39
N2	0.28	0.26	0.14	0.36	0.16	0.26
N3	0.26	0.57	0.14	0.28	0.66	0.44
N4	0.22	0.25	0.22	0.15	0.34	0.23
N5	0.26	0.57	0.14	0.34	0.40	0.47
N6	0.20	0.44	0.18	0.21	0.41	0.33
N7	0.28	0.54	0.14	0.28	0.33	0.46

根据矩阵 $[a,b]$ 、 $[c,d]$ 与 M 判断评价指标 x 落入 M 点的左侧还是右侧, 据此选用式(15)或式(16), 以计算指标对等级标准的差异函数 $\mu_A(u_{ih})$, 这里 $h=1,2,3,4,5$ 为等级数, $i=1,2,3,4,5,6$ 为指标数。

首先计算 N1 区段。由表 4, 对于单轴抗压强度 σ_c , 由吸引(为主)矩阵 $[a,b]$ 、范围域矩阵 $[c,d]$ 和点值矩阵 M 得 $h=1$ 的吸引域向量、范围量与点值 M 向量分别为

$$\begin{aligned} [a,b] &= ([1.0, 0.67] \quad [0.37, 0.50] \quad [0.50, 0.33] \quad [0.33, 0.16] \quad [0.16, 0.0]) \\ [c,d] &= ([1, 0.5] \quad [1, 0.33] \quad [0.37, 0.16] \quad [0.5, 0] \quad [0.33, 0]) \\ M &= (1.0 \quad 0.67 \quad 0.415 \quad 0.16 \quad 0.0) \end{aligned}$$

当 $i=1$ 时, $\sigma_c = 0.27$, 而 $c_{11} = 1.0$, $a_{11} = 1.0$, $b_{11} = 0.67$, $d_{11} = 0.5$, $M_{11} = 1.0$, 由此可判断出 0.27 不属于 $[c_{11}, d_{11}]$ 。由公式(12)得 $\mu_A(u_{11}) = -1$ 。类似地可得到 $i=1,2,3,4,5,6$ 对级别 $h=1,2,3,4,5$ 的各单指标差异函数矩阵, 这里 $\beta=1$:

$$\mu_A(u_{ih})_{6 \times 5} = \begin{bmatrix} -1 & -1 & 0.3235 & 0.6765 & 0.1765 \\ -1 & 0.06 & 0.62 & 0.44 & -1 \\ 0.12 & 0.62 & 0.38 & -1 & -1 \\ -1 & 0.4444 & 0.6111 & 0.05556 & -1 \\ -1 & 0.06667 & 0.6333 & 0.4333 & -1 \\ -1 & 0.2381 & 0.9762 & 0.2619 & -1 \end{bmatrix}$$

为了得到各指标的综合相对隶属度, 应用作者在文[5]提出的模糊可变速识别模型

$$u_h = \frac{1}{1 + \left\{ \frac{\sum_{i=1}^m [w_i (1 - \mu_A(u_{ih}))]^p}{\sum_{i=1}^m (w_i \mu_A(u_{ih}))^p} \right\}^{\alpha/p}} \quad (13)$$

可得隧道岩体 N1 区段评价各指标综合相对隶属度, 再将之归一化即可得到归一化的综合相对隶属度值。这里 w_i 为指标权重, m 为识别指标数, α 为模型优化准则参数, $\alpha=1$ 为最小一乘方准则, $\alpha=2$ 为最小二乘方准则; p 为距离参数, $p=1$ 为海明距离, $p=2$ 为欧氏距离。

为确定 6 个指标相对于 5 个级别的权值, 应用文[5]提出的确定指标权重重要性排序一致性定理, 经认真考虑及工程实践, 得到通过检验的 6 个指标重要性排序一致性指标矩阵:

排序

$$F = \begin{bmatrix} 0.5 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0.5 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0.5 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0.5 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0.5 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0.5 \end{bmatrix} \begin{matrix} (1) \\ (6) \\ (3) \\ (3) \\ (3) \\ (2) \end{matrix}$$

按矩阵 F 关于重要性的排序, 运用经验知识, 以排序为(1)的指标(单轴抗压强度)逐一地与排序为(2)、(3)、(6)的指标做关于重要性程度的二元比较判断如下:

排序为(1)的指标单轴抗压强度与排序为(2)的指标岩体的声波速度相比, 处于“明显”与“显著”之间; 与排序为(3)的指标结构面间距、结构面摩擦系数与岩体钻进速度相比, 处于“十分”与“非常”之间; 与排序为(6)指标 RQD 相比, 处于“极其”与“极端”之间(见表 6)。

Table 6. Relationships between mood operator relative membership degrees of quantitative scale
表 6. 语气算子与模糊标度、相对隶属度对应关系表

语气算子	同样		稍稍		略为		较为		明显		
模糊标度	0.50	0.525	0.55	0.575	0.60	0.625	0.65	0.675	0.70	0.725	
相对隶属度	1.0	0.905	0.818	0.729	0.667	0.60	0.538	0.481	0.429	0.379	
语气算子	显著		十分		非常		极其		极端		无可比拟
模糊标度	0.75	0.775	0.80	0.825	0.85	0.875	0.90	0.925	0.95	0.975	1
相对隶属度	0.333	0.290	0.250	0.212	0.176	0.143	0.111	0.081	0.053	0.026	0

则由语气算子与相对隶属度之间的关系表 6 [5] 可得 6 项评价指标的权向量为

$$w' = (1 \quad 0.081 \quad 0.212 \quad 0.212 \quad 0.212 \quad 0.379) = (w'_i)$$

则指标的归一化权重向量为

$$w = (0.4771 \quad 0.0386 \quad 0.1011 \quad 0.1011 \quad 0.1011 \quad 0.1810) = (w_i)$$

此时就可应用模糊可变识别模型(13)计算隧道岩体 N1 区段各指标综合相对隶属度, 取模型优化准则参数 $\alpha = 1$, 距离参数 $p = 2$, 将相关数值代入模型(13), 解得综合相对隶属度为

$$u' = (0.1015 \quad 0.0382 \quad 0.0102 \quad 0.1221 \quad 0.0256)$$

归一化后得

$$u = (0.3410, 0.1283, 0.0344, 0.4103, 0.0860)$$

应用文[5]的级别特征值公式, 得到隧道岩体 N1 区段评价的级别特征值为

$$H = (1, 2, 3, 4, 5) \cdot (0.3410, 0.1283, 0.0344, 0.4103, 0.0860)^T = 2.7721$$

这里 H 为级别特征值, 根据 H 对该隧道岩体进行综合评判, 由文[5]知 H 的评价规则为: 若 $H \in [c - 0.5, c + 0.5]$, 则将评价区域归于 c 类。故该隧道岩体 N1 区段综合质量评价为 III 级。用同样的方法, 经计算可得到隧道岩体其他区段的质量等级为: N2 段 III 级, N3 段 III 级, N4 段 IV 级, N5 段 III 级, N6 段 IV 级, N7 段 III 级。

本文与文[4]的评价计算结果相比, 2 种方法得到的结论基本是一致的, 而模糊可变集合应用级别特征值进行评价, 可以直观的反映出质量评价结果偏向另一等级的程度, 因此, 结论更加合理、可信。

4. 讨论与结语

(1) 差异函数概念是对客观事物运动发展变化、量变与质变, 及其转化的本质——吸引与排斥的一种描述, 符合自然辩证法原理。模糊可变集合概念、理论与方法, 是工程模糊集相对隶属度可变理论的发展, 提出的模糊可变概念、理论、模型与方法, 是作者在长期水利水电与水文水资源工程实践中提出的理论与工程方法, 其基本原理与方法, 将继续在实际应用中检验、提高与发展。(2) 由于隧洞围岩是多维因素的综合体, 对其岩体质量评价须经过从单因素的小综合到多因素的大综合, 这就决定了常规的单因素评价往往顾此失彼, 无法得出隧道围岩质量的综合评价。应用模糊可变集合的差异函数方法, 科学、合理地确定与岩体质量相关的各个研究对象(或指标)处于级别区间的隶属度、相对隶属函数, 并且运用人的基本经验与知识, 对大量复杂的定性指标, 反复就关于模糊概念 - 重要性进行二元比较与量化, 最终合理地确定出各个指标(或研究对象)的权重, 从而实现对岩体质量从定性到定量的综合集成评价。实例证

明, 本文所提方法是合理的。

参考文献 (References)

- [1] 徐光黎. 灰色聚类在工程岩体质量评价中的应用[J]. 工程勘察, 1987(6): 12-14.
- [2] 陈守煜, 郭瑜. 模糊可变集合与模型及在岩爆分级预测中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(S1): 4603-4609.
- [3] 陈守煜. 复杂水资源系统优化模糊识别理论与应用[M]. 长春: 吉林大学出版社, 2002(3).
- [4] 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]. 岩土力学与工程学报, 2003, 22(5): 751-756.
- [5] 陈守煜. 工程模糊集理论与应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998.