

地下隧洞岩体质量的可拓学理论评价*

康志强¹, 周 辉², 冯夏庭^{1,2}, 杨成祥¹

(1. 东北大学 资源与土木工程学院, 沈阳 110004

2. 中国科学院 武汉岩土力学研究所, 武汉 430071)

摘 要: 基于可拓理论识别方法, 在物元模型理论的基础上建立了地下隧洞岩体质量评价的物元识别模型, 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。通过实际地下隧洞岩体质量等级的关联度计算, 对锦屏二级水电站深埋长大引水隧洞的围岩岩体质量进行了评价, 得出了与现场实际相符合的结论。研究分析表明: 可拓理论识别方法用于隧洞围岩分类是可行的, 能够较全面地反映多因素指标对隧洞围岩分类的影响, 对解决岩土工程中的类似问题具有重要的借鉴意义。

关键词: 可拓学; 物元模型; 岩体质量评价; 层次分析法; 隧洞稳定性

中图分类号: TU457

文献标识码: A

文章编号: 1673-0836(2008)02-0259-06

Extensions Theory Evaluation of Underground Tunnel Rock Quality

KANG Zhi-qiang, ZHOU Huí, FENG Xia-tíng², YANG Cheng-xiáng

(1. School of Resources and Civil Engineering Northeastern University, Shenyang 110004, China

2. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Science, Wuhan 430071, China)

Abstract: The matter element recognition model of underground tunnel rock quality evaluation is established using matter element model theory based on extensions recognition method. The stratification analysis method used to calculate the weight coefficient of evaluation index is proposed. Through calculating the relational degree of the actual tunnel rock quality grades, the deep and long diversion tunnel rock quality of Jinping second hydropower station is evaluated, and the conclusion drawn is in accordance with the practice. It is shown that extensions recognition method is feasible to classify tunnel rock, which can comprehensively reflect the influence of multi-factor index on tunnel rock classification and can be used for reference to solve the similar problems in geotechnical engineering.

Keywords: extensions matter element model; rock quality evaluation; stratification analysis method; stability of tunnel

1 前言

随着国家经济建设的发展, 隧洞和地下空间的开发利用越来越受到人们的重视, 尤其是国家在西部大开发的建设中, 越来越多的大型水电站已经或即将开工建设, 随之而来的各种工程灾害问题也日益增多, 因此, 如何对地下隧洞的稳定性进行可靠的评价就显得尤为重要。

在地下岩体中进行施工, 必须对施工区域的围岩加以分类, 对岩体质量进行分级评价^[1]。当前, 对岩体质量的评价方法有很多, 而在国内岩石工程中应用较多的岩体分级方法主要有国标《工程岩体分级标准》、RMR分级以及Q系统分级三种^[2-6], 且这三种方法的侧重点各不相同, 这些方法都是以定性和定量相结合来评价岩体的质量的, 所考虑的因素包括岩石的强度、结构面的因素、岩

* 收稿日期: 2007-11-19(修改稿)

作者简介: 康志强(1974-), 男, 河北石家庄人, 博士, 主要从事岩土工程及采矿工程领域的教学与科研工作。E-mail: kzqzsl@163.com

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(编号 50579091, 50504004)

体赋存的地质环境等因素, 由于在这些分类方法中, 每一种方法所考虑的因素都是固定的, 而现场的地质条件是千变万化的, 所以, 这些方法还有待于进一步发展和完善。且岩体质量问题是一类很复杂的矛盾问题, 例如 RMR 岩体质量分级方法对软岩就不适用, 因此这就需要一种能够处理矛盾问题的新方法, 而可拓学理论就是把矛盾问题转化为相容问题, 所以运用可拓学理论对地下隧洞的围岩进行评价是一种比较理想的方法。

本文运用可拓学理论进行地下隧洞岩体质量等级的评价, 并采用层次分析法来确定各评价指标的权系数。层次分析法^[7,8]的最大优点是将复杂问题分解为若干层次和若干因素, 在各因素之间进行简单的比较和计算, 得出不同因素的权重, 为最佳方案的选择提供依据。将可拓学理论和层次分析法结合在一起, 对地下隧洞岩体质量的评估是一种行之有效的方法。

2 可拓学基本理论

可拓学方法是对研究对象从可行性和优化的角度来进行评价的, 是定性与定量的结合, 它可以将各个评价指标转化为一种相容的问题, 通过建立物元模型, 得出与现场实际相符合的结论。

可拓学^[9-13]以物元理论和可拓数学作为其理论框架。其中, 物元是可拓学的逻辑细胞。给定事物的名称 N 它关于特征 C 的量值为 V 以有序三元组 $R=(N, C, V)$ 作为描述事物的基本元, 简称物元。事物的名称 N 、特征 C 和量值 V 称为物元的三要素。如果事物 N 有多个特征, 则

$$R = \begin{bmatrix} N & C_1 & V_1 \\ & C_2 & V_2 \\ & \dots & \dots \\ & C_n & V_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1 \\ R_2 \\ \dots \\ R_n \end{bmatrix}$$

这时, 称 R 为 n 维物元, 简记为 $R=(N, C, V)$ 。

当 N_0 为标准事物, 关于特征 C_i 量值范围 $V_{oi} = \langle a_{oi}, b_{oi} \rangle$ 时, 经典域和节域的物元矩阵可分别表示为:

$$R_{oi} = \left(N_0, C, V_0 \right) = \begin{bmatrix} N_0, C_1, \langle a_{o1}, b_{o1} \rangle \\ C_2, \langle a_{o2}, b_{o2} \rangle \\ \dots, \dots \\ C_n, \langle a_{on}, b_{on} \rangle \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$R_0 = \left(N_0, C, V_0 \right) = \begin{bmatrix} N_0, C_1, \langle a_{01}, b_{01} \rangle \\ C_2, \langle a_{02}, b_{02} \rangle \\ \dots, \dots \\ C_n, \langle a_{0n}, b_{0n} \rangle \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中, R_0 为经典域物元, R_0 为节域物元, 而 $V_{oi} = \langle a_{oi}, b_{oi} \rangle$ 为节域物元关于特征 C_i 的相应标准扩大了的量值范围。显然有, $\langle a_{oi}, b_{oi} \rangle \subset \langle a_{0i}, b_{0i} \rangle$ ($i=1, 2, \dots, n$)。

请若干专家根据实际情况对某物质单元 N_j ($j=1, 2, \dots, m$) 的各种特征值做出评价, 并根据给定的标准进行评分, 从而获得待评物元:

$$R_j = \begin{bmatrix} N_j, C_1, V_j \\ C_2, V_j \\ \dots, \dots \\ C_n, V_j \end{bmatrix} \quad (3)$$

某物质单元 N_j 关于等级 t 的关联函数为:

$$k_{jt}(V_{jt}) = \frac{\rho(V_{jt}, V_{oi})}{\rho(V_{jt}, V_{oi}) - \rho(V_{jt}, V_{0i})} \quad i=1, 2, \dots, n; \quad j=1, 2, \dots, m; \quad t=1, 2, 3, 4, 5 \quad (4)$$

其中:

$$\rho(x, x) = \begin{cases} a - x & x \leq \frac{a+b}{2} \\ x - b & x \geq \frac{a+b}{2} \end{cases} \quad (5)$$

式中, x 为数值, $x \in (a, b)$ 为区间; $k_{jt}(V_{jt})$ 为第 j 个物质单元的第 i 个特征关于标准物元等级 t 的关联度; 对于每个特征 C_i 取权系数 W_i , 则某物质单元 N_j 关于等级 t 的关联度 $k_t(N_j)$ 为:

$$k_t(N_j) = \sum W_i k_{jt}(V_{jt}) \quad (6)$$

$$k_0(N_j) = \max \{ k_t(N_j) | t=1, 2, 3, 4, 5 \} \quad (7)$$

则此物质单元等级为 t_0 。

3 运用可拓学理论对地下隧洞岩体质量进行评价的步骤

运用可拓学理论对地下隧洞岩体质量进行评价的基本步骤如下:

(1) 确定影响隧洞质量的评价指标和评价标准, 即确定具体的影响因素及其变化范围。影响因素的确定要遵循可比性, 相关性, 整体性和简捷性的原则。为了便于进行比较, 对不同量纲的指标要进行无量纲处理;

(2) 物元构造: 根据评价标准数据, 构造出经典域物元、节域物元, 并根据实际洞段确定待评物

- 元;
- (3) 运用层次分析法确定各评价指标的权系数;
- (4) 根据式 (4) 和式 (5) 计算评价指标关于各质量等级的关联度; 利用得到的权系数, 根据式 (6) 计算各洞段关于各质量等级的关联度;
- (5) 根据式 (7) 对各段质量等级进行判定。

4 应用实例

本文以锦屏二级水电站地下引水隧洞的围岩质量评价为例, 说明基于层次分析法的可拓学理论在隧洞评价中的应用。

锦屏二级水电站引水隧洞处于高山峡谷的岩溶地区, 地质条件复杂, 具有埋深大、洞线长的特点。引水洞线自景峰桥至大水沟, 采用“4洞 8机”布置, 引水隧洞共四条, 洞线平均长度约 16.67 km, 开挖洞径 13m, 衬砌后洞径 11.8m, 上覆岩体一般埋深 1500~2000m, 最大埋深约为 2525m, 具有埋深大、洞线长、洞径大的特点, 为超深埋长隧洞特大型地下水工程。

对锦屏二级水电站引水隧洞 4#线 5段 (P₁, P₂, P₃, P₄, P₅) 围岩进行等级评价。

P₁段长度为 2029m, 地层岩性为白~灰白色纯大理岩偶夹绿片岩透镜体、云母片岩等。该段大理岩岩体具有厚层状结构, 完整性好, 岩石硬而脆; 无大型不利结构面通过, 局部可能存在小型破碎带。

P₂段围岩长度为 1223m, 地层岩性为青灰色、中~厚层中细砂岩, 以中层为主, 夹薄砂质板岩。

P₃段围岩长度为 8153m, 地层岩性为厚层块状大理岩、结晶灰岩、白~灰白色粗晶状大理岩。

P₄段围岩长度为 802m, 地层岩性为中薄层泥质灰岩或黑色细晶大理岩。

P₅段围岩长度为 469m, 地层岩性为黑云母绿泥片岩夹薄层状、砾状或条带状大理岩等。

4.1 评价指标选取

本文选取以下 7 个因素作为分类依据:

- (1) 岩石单轴抗压强度 R_c: 该指标反映岩块的软硬程度及岩性特征;
- (2) RQD 指标, 该值反映岩块大小及完整程度;
- (3) 岩体变形模量 E: 该值反映了岩石在载荷作用条件下应力与应变之比;
- (4) 岩石泊松比 μ, 反映了由于外力作用引起

的主应变与在在该主应变方向相垂直的方向上的应变的比值;

(5) 岩体抗剪断强度 C: 该值反映两侧岩体的坚硬程度和结构面本身的结合程度;

(6) 地下水状态 A: 考虑地下水的发育程度, 用单位长度单位时间的涌水量表示;

(7) 主要结构面产状 B: 考虑结构面走向与洞轴线的夹角。

对照规范及国家标准^[14-15], 用单因素法将锦屏引水隧洞岩体质量分为 5 个等级, 如表 1 所示。

表 1 单因素指标岩体分类表
Table 1 Rock mass quality classification with single parameter

级别	I	II	III	IV	V
R _c (MPa)	150~200	125~150	90~125	40~90	10~40
RQD(%)	90~100	80~90	60~80	30~60	10~30
E(GPa)	33~60	33~20	20~6	6~1.3	0~1.3
μ	0~0.2	0.2~0.25	0.25~0.3	0.3~0.35	0.35~0.5
C(MPa)	2.1~8.2	2.1~1.5	1.5~0.7	0.7~0.2	0~0.2
A(L/m ³ ·10m)	0~10	10~25	25~125	125~250	250~500
B(°)	75~90	60~75	45~60	30~45	0~30

根据锦屏二级水电站水利枢纽地下电站设计报告以及现场试验等情况, 得到锦屏二级水电站引水隧洞围岩主要的 5 段 (P₁, P₂, P₃, P₄, P₅) 围岩对应的 7 个参数指标的对应值, 如表 2^[16] 所示。

表 2 引水隧洞围岩各段参数值列表
Table 2 Parameters of cavity wall rock

围岩岩石类型	P1	P2	P3	P4	P5
R _c (MPa)	110	130	85	70	40
RQD(%)	79	50	80	30	20
E(GPa)	10	9	12	7	4
μ	0.22	0.27	0.2	0.3	0.32
C(MPa)	1.2	0.7	1.0	1.0	0.3
A(L/m ³ ·10m)	20	10	20	10	30
B(°)	60	50	50	50	35

4.2 参数指标无量纲化

为便于计算, 必须把量纲不同的指标进行无量纲化处理, 处理方法如下式所示:

$$q_{ti} = \begin{cases} \frac{q_i - q_i^{in}}{q_i^{max} - q_i^{in}} & \text{对于越大越好的因素} \\ \frac{q_i^{ax} - q_i}{q_i^{max} - q_i^{in}} & \text{对于越小越好的因素} \end{cases}$$

$$d'_{ti} = \begin{cases} \frac{d_i - d_i^{in}}{d_i^{max} - d_i^{in}} & \text{对于越大越好的因素} \\ \frac{d_i^{ax} - d_i}{d_i^{max} - d_i^{in}} & \text{对于越小越好的因素} \end{cases}$$

式中: q_i 为类别第 i 因素的评价标准值, q'_{ii} 为无量纲化后类别第 i 因素的评价标准值, $q_{i\max}$ 为第 i 因素的最大评价标准值, $q_{i\min}$ 为第 i 因素的最小评价标准值, d_i 为第 i 种待评岩体第 i 因素的评价标准值, d'_{ii} 为无量纲化后第 i 种待评岩体第 i 因素的评价标准值。

对表 1 和表 2 的数据进行无量纲化处理后的对应值如表 3 和表 4 所示。

表 3 单因素指标评价标准 (无量纲)

Table 3 Rock mass quality classification with single parameter (dimensionless)

级别	I	II	III	IV	V
R_c	0.74~1.0	0.61~0.74	0.42~0.61	0.15~0.42	0~0.15
RQD	0.89~1.0	0.78~0.89	0.56~0.78	0.21~0.56	0~0.21
E	0.55~1.0	0.33~0.55	0.1~0.33	0.02~0.1	0~0.02
μ	0.6~1.0	0.5~0.6	0.4~0.5	0.3~0.4	0~0.3
C	0.26~1.0	0.19~0.26	0.09~0.19	0.03~0.09	0~0.03
A	0.98~1.0	0.95~0.98	0.75~0.95	0.5~0.75	0~0.5
B	0.83~1.0	0.67~0.83	0.50~0.67	0.33~0.5	0~0.33

表 4 引水隧洞围岩各段参数值列表 (无量纲)

Table 4 Parameters of cavity wall rock (dimensionless)

围岩岩石类型	P1	P2	P3	P4	P5
R_c	0.53	0.63	0.39	0.32	0.16
RQD	0.77	0.44	0.78	0.22	0.11
E	0.17	0.15	0.2	0.12	0.07
μ	0.56	0.46	0.6	0.4	0.36
C	0.18	0.09	0.13	0.13	0.04
A	0.96	0.98	0.96	0.98	0.94
B	0.67	0.56	0.56	0.56	0.39

4.3 确定物元的经典域与节域

根据表 3 取 I~V 级围岩质量指标对应的取值范围作为经典域。七个因素分别取为 $\zeta_1, \zeta_2, \zeta_3, \zeta_4, \zeta_5, \zeta_6, \zeta_7$ 。

(1) 围岩质量 I 级 ($\epsilon=1$):

$$R_{01} = \begin{bmatrix} N_{01}, \zeta_1 < 0.74 \ 1.0 > \\ \zeta_2 < 0.89 \ 1.0 > \\ \zeta_3 < 0.55 \ 1.0 > \\ \zeta_4 < 0.60 \ 1.0 > \\ \zeta_5 < 0.26 \ 1.0 > \\ \zeta_6 < 0.98 \ 1.0 > \\ \zeta_7 < 0.83 \ 1.0 > \end{bmatrix}$$

(2) 围岩质量 II 级 ($\epsilon=2$):

$$R_{02} = \begin{bmatrix} N_{02}, \zeta_1 < 0.61 \ 0.74 > \\ \zeta_2 < 0.78 \ 0.89 > \\ \zeta_3 < 0.33 \ 0.55 > \\ \zeta_4 < 0.50 \ 0.60 > \\ \zeta_5 < 0.19 \ 0.26 > \\ \zeta_6 < 0.95 \ 0.98 > \\ \zeta_7 < 0.67 \ 0.83 > \end{bmatrix}$$

(3) 围岩质量 III 级 ($\epsilon=3$):

$$R_{03} = \begin{bmatrix} N_{03}, \zeta_1 < 0.42 \ 0.61 > \\ \zeta_2 < 0.56 \ 0.78 > \\ \zeta_3 < 0.10 \ 0.33 > \\ \zeta_4 < 0.40 \ 0.50 > \\ \zeta_5 < 0.09 \ 0.19 > \\ \zeta_6 < 0.75 \ 0.95 > \\ \zeta_7 < 0.50 \ 0.67 > \end{bmatrix}$$

(4) 围岩质量 IV 级 ($\epsilon=4$):

$$R_{04} = \begin{bmatrix} N_{04}, \zeta_1 < 0.15 \ 0.42 > \\ \zeta_2 < 0.21 \ 0.56 > \\ \zeta_3 < 0.02 \ 0.10 > \\ \zeta_4 < 0.30 \ 0.40 > \\ \zeta_5 < 0.03 \ 0.09 > \\ \zeta_6 < 0.50 \ 0.75 > \\ \zeta_7 < 0.33 \ 0.50 > \end{bmatrix}$$

(5) 围岩质量 V 级 ($\epsilon=5$):

$$R_{05} = \begin{bmatrix} N_{05}, \zeta_1 < 0.0 \ 0.15 > \\ \zeta_2 < 0.0 \ 0.21 > \\ \zeta_3 < 0.0 \ 0.02 > \\ \zeta_4 < 0.0 \ 0.30 > \\ \zeta_5 < 0.0 \ 0.03 > \\ \zeta_6 < 0.0 \ 0.50 > \\ \zeta_7 < 0.0 \ 0.33 > \end{bmatrix}$$

节域是根据围岩质量指标的取值范围而定的, 一般是围岩质量等级的全体。

$$R_p = \begin{bmatrix} P, \zeta_1 < 0.0 \ 1.0 > \\ \zeta_2 < 0.0 \ 1.0 > \\ \zeta_3 < 0.0 \ 1.0 > \\ \zeta_4 < 0.0 \ 1.0 > \\ \zeta_5 < 0.0 \ 1.0 > \\ \zeta_6 < 0.0 \ 1.0 > \\ \zeta_7 < 0.0 \ 1.0 > \end{bmatrix}$$

4.4 确定待评物元

根据表 4 确定围岩 (P₁, P₂, P₃, P₄, P₅) 待评物元。

$$R_{10} = \begin{bmatrix} N_0, \xi 0.53 \\ \xi 0.77 \\ \xi 0.17 \\ \xi 0.56 \\ \xi 0.18 \\ \xi 0.96 \\ \xi 0.67 \end{bmatrix} \quad R_{20} = \begin{bmatrix} N_0, \xi 0.63 \\ \xi 0.44 \\ \xi 0.15 \\ \xi 0.46 \\ \xi 0.09 \\ \xi 0.98 \\ \xi 0.56 \end{bmatrix}$$

$$R_{30} = \begin{bmatrix} N_{30}, \xi 0.39 \\ \xi 0.78 \\ \xi 0.20 \\ \xi 0.60 \\ \xi 0.13 \\ \xi 0.96 \\ \xi 0.56 \end{bmatrix} \quad R_{40} = \begin{bmatrix} N_0, \xi 0.32 \\ \xi 0.22 \\ \xi 0.12 \\ \xi 0.40 \\ \xi 0.13 \\ \xi 0.98 \\ \xi 0.56 \end{bmatrix}$$

$$R_{50} = \begin{bmatrix} N_{30}, \xi 0.16 \\ \xi 0.11 \\ \xi 0.07 \\ \xi 0.36 \\ \xi 0.04 \\ \xi 0.94 \\ \xi 0.39 \end{bmatrix}$$

4.5 用层次分析法确定评价指标的权系数

(1) 确定围岩各评价因素并对评价指标进行处理, 从而构造判断矩阵。评价因素即为围岩的 7 项评价指标。本文采用 1—9 及其倒数作为标度来构造评价指标间相对重要性的两两比较矩阵 S

(2) 采用方根法求出上述判断矩阵的最大特征根 λ_{max} = 7.46 对其对应的特征向量归一化, 得到评价指标的权重集 W = (0.334 0.246 0.189 0.057 0.097 0.031 0.046)。

$$S = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 & 5 & 3 & 7 & 6 \\ 1/2 & 1 & 3 & 5 & 3 & 5 & 4 \\ 1/3 & 1/3 & 1 & 5 & 3 & 7 & 6 \\ 1/5 & 1/5 & 1/5 & 1 & 1/3 & 3 & 2 \\ 1/3 & 1/3 & 1/3 & 3 & 1 & 3 & 2 \\ 1/6 & 1/4 & 1/6 & 1/2 & 1/2 & 2 & 1 \end{bmatrix}$$

(3) 一致性检验。经计算一致性指标 CI = 0.076 平均随机性指标 RI = 1.32 则随机一致性比率 CR = CI/RI = 0.057。因为 CR < 0.10 所以其

结果有满意的一致性。确定的权重集 W 即为所求的各评价因素的权重。

4.6 计算待评隧洞围岩物元的关联度

根据式 (4) 和 (5), 计算待评围岩关于各质量等级的关联度。再根据式 (6) 和得出的权系数 W, 计算待评围岩关于各质量等级的综合关联度。计算结果见表 5。

表 5 各围岩关联度计算结果

Table 5 Calculation results of relational degree of the rock

围岩岩石类型	k ₁	k ₂	k ₃	k ₄	k ₅
P ₁	-0.4114	-0.1649	-0.1767	-0.3203	-0.5215
P ₂	-0.4344	-0.2553	0	-0.1289	-0.4578
P ₃	-0.3850	-0.2239	0.1980	-0.2941	-0.5010
P ₄	-0.6074	-0.5060	-0.2454	-0.2476	-0.3067
P ₅	-0.7840	-0.7221	-0.5247	0.0409	-0.0052

按前面的评价规则 (7) 式可得:

$$\begin{aligned} \text{Max}_{k_5}(P_1) &= k_2(P_1) & \text{Max}_{k_5}(P_2) &= k_5(P_2) \\ \text{Max}_{k_5}(P_3) &= k_3(P_3) & \text{Max}_{k_5}(P_4) &= k_5(P_4) \\ \text{Max}_{k_5}(P_5) &= k_5(P_5) \end{aligned}$$

由以上结果可以看出, P₁ 段围岩属于 I 类岩体, 岩体相对比较稳定, 围岩的安全性也比较高; P₂、P₃、P₄ 段围岩都属于 II 类岩体, 围岩相对来说, 不稳定, 需要采取一定的安全支护措施; P₅ 段围岩属于 III 类岩体, 安全性较差, 稳定性较差, 需要很好的支护措施。在现场施工中, 对于 II 类围岩, 采用了喷锚支护来增强围岩整体的稳定性, 围岩与喷锚支护作为一个整体来承受压力, 这样既能减小支护上的作用力, 又能控制位移和围岩的稳定性状态。IV 类围岩的锚杆和喷射混凝土均是全断面施做的, 且是钢纤维混凝土, 所以无论是围岩的抗压强度还是抗拉强度都得到了很大的提升。

5 结 语

地下隧洞围岩的分类问题受多种因素影响, 其本质上是模式识别问题, 以物元理论和可拓集合论为基础的可拓识别方法能根据事物关于特征的量值来判断事物属于某集合的程度, 其关联函数能使识别定量化和精确化, 从而为解决隧洞围岩的分类识别问题提供了新途径。隧洞岩体质量评价的可拓学理论评价方法从多角度、多因素出发, 所选取的参数种类和数量均不受限制, 可以适用不同岩体工程的具体特点, 能最大限度地合理利用工程勘察成果, 克服以往固定因素分类法的弊端, 使评价更

切合实际。

运用可拓理论识别方法,采用层次分析法确定隧洞岩体质量评价指标的权重,建立隧洞围岩分类的物元识别模型,通过计算物元关联度给出了定量的识别结果。本文通过对大型水电站锦屏二级引水隧洞围岩的可拓学分析表明:可拓识别方法用于隧洞围岩分类是可行的,能够较全面地反映多因素对隧洞围岩分类的影响,能够满足工程实践的需要,对解决岩土工程中类似的问题具有很大的借鉴意义。

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.(FENG Xiaoting LIN Yumei. Rock Mechanics and Engineering Expert System[M]. Shenyang: Liaoning Science & Technology Press, 1992. (in Chinese))
- [2] Bieniawski Z. T. Engineering Rock Mass Classification. John Wiley & Sons Inc 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 (LI Hua ZHU Ziqiang LI Jian. The Application of TSP203 System in the Rock Mass Classification[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics 2005 2(6) 449—453. (in Chinese))
- [4] Z. T. BIENIAWSKI著,吴立新,王建锋,刘殿书等译. 工程岩体分类[M]. 中国矿业大学出版社,1993.(Z. T. BIENIAWSKI Translated by WU Lixin WANG Jianfeng LIU Dianshu et al. Classification of Engineering Rock[M]. Beijing: China University of Mining and Technology Press 1993. (in Chinese))
- [5] Barton N, Lien R, Lunde J. Engineering Classification of Rock Masses for the Design of Tunnel Support Rock Mech 1974 6(4): 183—236
- [6] 何沛田,崔洪业,张丽. 重庆市工程岩体分级讨论[J]. 长江科学院重庆岩基研究中心: 地下空间, 2002 22(3) 274—277. (HE Peitian CUI Hongye ZHANG Li. Discussion on Classification of Engineering Rocks in Chongqing[J]. The Batholith Study Center in Chongqing of Changjiang Scientific Research Institute Underground Space 2002 22(3) 274—277. (in Chinese))
- [7] 赵炳臣,许树柏,和金生. 层次分析法——一种简易的新决策方法[M]. 北京: 科学技术出版社, 1986 (ZHAO Bingchen XU Shubai HE Jinsheng. Stratification Analysis Method— a New Simple Decision Making Method[M]. Beijing: Science & Technology Press 1986. (in Chinese))
- [8] Dubois D, Prade H. Fuzzy Sets and Systems Theory and Applications[M]. New York: Academic Press 1998
- [9] Cai Wen. The Extension Set and Non-compatible Problem[A]. In: Chen Weizhang ed. Advances Mathematics and Mechanics in China[C]. Beijing: International Academic Publishers 1990
- [10] 蔡文. 物元模型及其应用[M]. 北京: 科学技术出版社, 1994 (CAI Wen. Matter Element Model and Its Application[M]. Beijing: Science & Technology Press 1994. (in Chinese))
- [11] 蔡文,杨春燕,林伟初. 可拓工程方法[M]. 北京: 科学技术出版社, 1997 (CAI Wen YANG Chunyan LIN Weichu. Extension Engineering Method[M]. Beijing: Science & Technology Press 1997. (in Chinese))
- [12] 陈巨龙. 从物元分析到可拓学[M]. 北京: 科学技术文献出版社, 1996 (CHEN Julong. From Matter Element Analysis to Extension[M]. Beijing: Science & Technology Literature Press 1997. (in Chinese))
- [13] 张斌,雍歧东,肖芳醇. 模糊物元分析[M]. 北京: 石油工业出版社, 1997 (ZHANG Bin YONG Qidong XIAO Fangchun. Fuzzy Matter Element Analysis[M]. Beijing: Petroleum Industry Press 1997. (in Chinese))
- [14] 工程岩体分级标准[S]. 北京: 中华人民共和国水利部, 1995. 7 (Classification Criterion of Engineering Rock[S]. Beijing: Ministry of Water Resources P. R. China 1995. 7. (in Chinese))
- [15] 水利水电工程地质勘察规范[S]. 北京: 中华人民共和国水利部, 1999. 8 (Code for Water Resources and Hydropower Engineering Geological Investigation[S]. Beijing: Ministry of Water Resources P. R. China 1999. 8. (in Chinese))
- [16] 锦屏二级水电站地下引水隧洞勘查设计报告[R]. 四川雅砻江, 2004. 5 (Underground diversion tunnel Bidding Design Report of the Two Level Hydropower Station in Jinping[R]. Sichuan Yaolangjiang 2004. 5. (in Chinese))