

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

康志强¹, 冯夏庭¹, 周 辉²

(1. 东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110004; 2. 中国科学院 武汉岩土力学研究所, 湖北 武汉 430071)

摘要: 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。通过实际洞室岩体质量等级的关联度计算, 对水布垭水电站地下厂房的围岩岩体质量进行了评价, 得出与现场实际相符合的结论。研究表明: 层次分析法用于确定洞室岩体质量评价指标的权系数是可行的, 并且洞室岩体质量的可拓学评价能够较好地反映洞室岩体的质量等级, 具有较好的适用性。

关键词: 岩石力学; 可拓学; 物元模型; 岩体质量评价; 层次分析法; 关联度; 地下洞室

中图分类号: TU 457

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2006)增 2 - 3687 - 07

APPLICATION OF EXTENICS THEORY TO EVALUATION OF UNDERGROUND CAVERN ROCK QUALITY BASED ON STRATIFICATION ANALYSIS METHOD

KANG Zhiqiang¹, FENG Xiating¹, ZHOU Hui²

(1. *School of Resources and Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang, Liaoning 110004, China;*
2. *Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Science, Wuhan, Hubei 430071, China*)

Abstract: The matter element model of cavern rock quality evaluation is established using matter element model theory based on extension engineering method. The stratification analysis method used to calculate weight aggregation of evaluating factors is proposed. Through calculating the relational degree of the actual cavern rock quality grades, the rock quality of Shuibuya Waterpower Station cavern is evaluated by extenics, and the conclusion has good relation with the facts. It is shown that stratification analysis method is feasible to calculate the weight aggregation of evaluating factors. The extenics evaluation of cavern rock quality with high applicability can more precisely reflect the quality classification of the cavern rock.

Key words: rock mechanics; extenics; matter element model; rock quality evaluation; stratification analysis method; association degree; underground cavern

1 引言

随着国家经济建设的发展, 隧道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, 其随之而来的各种工程灾害问题也日益增多, 因此, 如何对地下洞室的稳定性进行可靠的评价就显得尤为重要。

在岩体中进行施工, 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

收稿日期: 2006 - 04 - 27; **修回日期:** 2006 - 05 - 27

基金项目: 国家杰出青年资助项目(50325414); 国家自然科学基金资助项目(50579091)

作者简介: 康志强(1974 -), 男, 博士, 2000 年于河北理工大学采矿工程专业获硕士学位, 主要从事岩石力学及工程力学方面的研究工作。E-mail: kzqzsh@163.com

用较多的岩体分级方法主要有国家标准《工程岩体分级标准》^[2]、RMR 分级以及 Q 系统分级 3 种^[3~6]，且这 3 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、岩体赋存的地质环境等，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，而可拓学理论可将矛盾问题转化为相容问题，所以运用可拓学理论对地下洞室的围岩进行评价是一种比较理想的方法^[7, 8]。

本文运用可拓学理论进行地下洞室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，利用层次分析法确定影响地下岩体质量的各因素的权系数，利用可拓学理论分析实际评估对象的等级范围，对地下洞室岩体质量的评估是一种行之有效的办法。

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，利用物元的可拓性确定定性计算，利用可拓集合论，通过关联函数进行定量计算。该方法是一种新的评价方法，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

$$R = \begin{bmatrix} N & c_1 & v_1 \\ & c_2 & v_2 \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & v_n \end{bmatrix} = \left\{ \begin{matrix} R_1 \\ R_2 \\ \vdots \\ R_n \end{matrix} \right\} \quad (1)$$

式中： R 为 n 维物元，简记为 $R = (N, C, v)$ 。

当 N_{ot} 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

$$R_{ot} = (N_{ot}, C, V_{ot}) = \begin{bmatrix} N_{ot}, & c_1, & \langle a_{ot1}, b_{ot1} \rangle \\ & c_2, & \langle a_{ot2}, b_{ot2} \rangle \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n, & \langle a_{otn}, b_{otn} \rangle \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$R_p = (N_p, C, V_p) = \begin{bmatrix} N_p, & c_1, & \langle a_{p1}, b_{p1} \rangle \\ & c_2, & \langle a_{p2}, b_{p2} \rangle \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n, & \langle a_{pn}, b_{pn} \rangle \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中： R_{ot} 为经典域物元， R_p 为节域物元，而 $V_{pi} = \langle a_{pi}, b_{pi} \rangle$ 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， $\langle a_{oi}, b_{oi} \rangle \subset \langle a_{pi}, b_{pi} \rangle$ ($i = 1, 2, \dots, n$)。

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。

$$R_j = \begin{bmatrix} N_j & c_1 & v_{j1} \\ & c_2 & v_{j2} \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & v_{jn} \end{bmatrix} \quad (4)$$

某物质单元 N_j 关于等级 t 的关联函数为

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

其中，

$$\rho(x_0, x) = \begin{cases} a - x_0 & \left(x_0 \leq \frac{a+b}{2} \right) \\ x_0 - b & \left(x_0 \geq \frac{a+b}{2} \right) \end{cases} \quad (6)$$

式中： x_0 为数值， $x(a, b)$ 为区间， $k_{jt}(v_{ji})$ 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。对于每个特征才 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 $k_{jt}(N_j)$ 为

$$k_{jt}(N_j) = \sum W_i k_{jt}(v_{ji}) \quad (7)$$

$$k_{j0}(N_j) = \max\{k_{jt}(N_j) | t=1, 2, 3, 4, 5\} \quad (8)$$

则此物质单元等级为 t_0 。

3 运用可拓学理论对地下洞室岩体质量进行评价的步骤

运用可拓学理论对地下洞室岩体质量进行评价的基本步骤如下:

(1) 确定影响洞室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量纲一的量处理。

(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(具体步骤见下节)。

(4) 根据式(5)和(6)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(7)计算各洞段关于各质量等级的关联度。

(5) 根据式(8)对各洞段质量等级进行判定。

4 用层次分析法确定评价指标的权系数

运用可拓学理论对岩体质量进行评价,其中权重对最终的评价结果会产生很大的影响,不同的权重有时会带来不同的结论。权系数的确定有很多方法,如专家评议综合法、层次分析法等。其中层次分析法^[14, 15]是美国运筹学家 T. L. Saaty 教授于 20 世纪 70 年代提出的一种系统分析方法。它是一种确定权系数的有效方法,把复杂问题中的各因素划分为互相关联的有序层,使之条理化,根据对客观实际的模糊判断,就每一层次的相对重要性给出定量的表示。其基本思路是:首先把复杂的问题逐阶分解成简单的组成因素,将这些因素按支配关系分组形成有序递阶的层次结构;其次通过对这些因素的两两比较,可以得到各因素在每个层次中的相对重要性,即目标权重,从而将多目标问题转化为加权单目标问题。采用层次分析法确定权重,具有较强的逻辑性、实用性和系统性,并能准确地得出各评价指标权系数。

本文提出运用层次分析法确定地下厂房围岩各评价因素的权重的步骤如下:

(1) 确定评价因素。即地下厂房围岩的 8 个评价指标。

(2) 构造判断矩阵。判断矩阵元素的值反映了人们对厂房围岩各评价指标相对重要性的认识,一般采用 1~9 及其倒数的标度方法。但当相互比较因素的重要性能用具有实际意义的比值说明时,判断矩阵相应元素的值则取这个比值。即得到判断矩阵 S 。

(3) 采用方根法或和积法计算判断矩阵 S 的最大特征根 λ_{\max} 及其对应的特征向量并归一化,即得到围岩各评价指标的权重集 W ,此向量就是各评价指标的重要性排序,也即是权系数的分配。

(4) 一致性检验。为进行判断矩阵的一致性检验,需计算一致性指标 $CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}$ 和平均随机性

指标 RI 。当随机一致性比率 $CR = \frac{CI}{RI} < 0.1$ 时,认为

层次分析排序的结果有满意的一致性,即权系数的分配是合理的。否则,需调整判断矩阵的元素取值,重新分配权系数的值。

评价一个事物 N 的优劣时,以权系数来衡量各评价指标的重要程度,记为: $W = \{W_1, W_2, \dots, W_n\}$ 。本文使用层次分析法来确定评价指标间的相对重要性次序,从而确定权系数,并且在合成之前归一化,即

$$\sum_{i=1}^n W_i = 1 \quad (W_i \geq 0, i = 1, 2, \dots, n) \quad (9)$$

5 应用实例

本文以水布垭地下洞室厂房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洞室评价中的应用。

水布垭水利枢纽位于清江中游河段巴东县境内,其右岸地下电站是清江梯级开发中的龙头电站。水布垭工程地下厂房主厂房高 68 m,布置在悬崖高边坡及清江右岸岸坡所围成的山体之内,厂房区围岩以栖霞组为主,从上向下主要有栖霞组第 4 段(P_{1q}^4)、第 3 段(P_{1q}^3)、第 2 段(P_{1q}^2)、第 1 段(P_{1q}^1)。其中岩层 P_{1q}^4 主要是中厚层灰岩,岩层 P_{1q}^3 主要为灰岩夹薄层泥质生物碎屑灰岩,多被剪损,岩层 P_{1q}^2 主要是灰岩夹燧石层,岩层 P_{1q}^1 主要为灰岩夹薄层泥质生物碎屑灰岩。

5.1 评价指标选取

本文选取以下 8 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与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 ，该值反映了两侧岩体的坚硬程度和结构面本身的结合程度；

(6) 结构面摩擦因数 f ，该项指标反映结构面粗糙程度，蚀变及充填情况等特征；

(7) 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；

(8) 主要结构面产状 B ，采用结构面走向与洞轴线的夹角。

对照规范及国家标准^[12, 16]，用单因素法将岩体质量分为 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	R_c /MPa	RQD /%	E /GPa	μ	c /MPa	f	$A/(L \cdot (\min \cdot 10\text{ m})^{-1})$	$B/(\circ)$
I	150~200	90~100	33.0~60.0	0.00~0.20	2.1~8.0	0.80~1.20	0~25	75~90
	125~200	80~90	33.0~20.0	0.20~0.25	2.1~1.5	0.30~0.80		
II	125~200	80~90	33.0~20.0	0.20~0.25	2.1~1.5	0.30~0.80	25~50	60~75
	90~125	60~80	20.0~6.0	0.25~0.30	1.5~0.7	0.20~0.30		
III	90~125	60~80	20.0~6.0	0.25~0.30	1.5~0.7	0.20~0.30	50~100	45~60
	40~90	30~60	6.0~1.3	0.30~0.35	0.7~0.2	0.10~0.20		
IV	40~90	30~60	6.0~1.3	0.30~0.35	0.7~0.2	0.10~0.20	100~125	30~45
	10~40	10~30	0.0~1.3	0.35~0.50	0.0~0.2	0.01~0.10		
V	10~40	10~30	0.0~1.3	0.35~0.50	0.0~0.2	0.01~0.10	125~200	0~30

根据水布垭水利枢纽右岸地下电站设计报告，得到水布垭地下厂房洞室围岩 4 段($P_{1q}^1, P_{1q}^2, P_{1q}^3, P_{1q}^4$)8 个指标的对应值^[17]，如表 2 所示。

表 2 洞室围岩各段参数值列表

Table 2 Parameters of cavity rock mass

围岩岩石类型	R_c /MPa	RQD /%	E /GPa	μ	c /MPa	f	$A/(L \cdot (\min \cdot 10\text{ m})^{-1})$	$B/(\circ)$
P_{1q}^1	30	25	8	0.35	0.8	0.60	110	40
P_{1q}^2	80	85	18	0.20	1.3	1.20	30	70
P_{1q}^3	25	20	6	0.40	0.7	0.65	150	25
P_{1q}^4	65	60	20	0.25	1.2	1.20	55	58

5.2 参数指标量纲一的量化

为便于计算，必须把量纲不同的指标进行量纲

一的量化处理，处理方法如下所示：

$$q'_{ii} = \begin{cases} \frac{q_i - q_i^{\min}}{q_i^{\max} - q_i^{\min}} & \text{(对于越大越好的因素)} \\ \frac{q_i^{\max} - q_i}{q_i^{\max} - q_i^{\min}} & \text{(对于越小越好的因素)} \end{cases} \quad (10)$$

$$d'_{ii} = \begin{cases} \frac{d_i - d_i^{\min}}{d_i^{\max} - d_i^{\min}} & \text{(对于越大越好的因素)} \\ \frac{d_i^{\max} - d_i}{d_i^{\max} - d_i^{\min}} & \text{(对于越小越好的因素)} \end{cases} \quad (11)$$

式中： q_{ii} 为 t 类别第 i 因素的评价标准值， q'_{ii} 为量纲一的量化后 t 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_{ii} 为第 t 种待评岩体第 i 因素的评价标准值， d'_{ii} 为量纲一的量化后第 t 种待评岩体第 i 因素的评价标准值。

对表 1 和 2 的数据进行量纲一的量化处理后的对应值如表 3 和 4 所示。

表 3 单因素指标评价标准(量纲一的量)

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

级别	R_c	RQD	E	μ	c	f	A	B
I	0.74~1.00	0.89~1.00	0.55~1.00	0.6~1.0	0.26~1.00	0.66~1.00	0.88~1.00	0.83~1.00
	0.61~0.74	0.78~0.89	0.33~0.55	0.5~0.6	0.19~0.26	0.24~0.66	0.75~0.88	0.67~0.83
II	0.42~0.61	0.56~0.78	0.1~0.33	0.4~0.5	0.09~0.19	0.16~0.24	0.50~0.75	0.50~0.67
	0.61~0.74	0.78~0.89	0.33~0.55	0.5~0.6	0.19~0.26	0.24~0.66	0.75~0.88	0.67~0.83
III	0.15~0.42	0.21~0.56	0.02~0.10	0.3~0.4	0.03~0.09	0.08~0.16	0.38~0.50	0.33~0.50
	0.42~0.61	0.78~0.89	0.33~0.55	0.5~0.6	0.19~0.26	0.24~0.66	0.75~0.88	0.67~0.83
IV	0~0.15	0~0.21	0~0.02	0~0.3	0~0.03	0~0.08	0~0.38	0~0.33
	0.15~0.42	0.56~0.78	0.10~0.33	0.4~0.5	0.09~0.19	0.16~0.24	0.50~0.75	0.50~0.67
V	0~0.15	0~0.21	0~0.02	0~0.3	0~0.03	0~0.08	0~0.38	0~0.33
	0.15~0.42	0.56~0.78	0.10~0.33	0.4~0.5	0.09~0.19	0.16~0.24	0.50~0.75	0.50~0.67

表 4 洞室围岩各段参数值列表(量纲一的量)

Table 4 Parameters of cavity rock masses(dimensionless)

围岩岩石类型	R_c	RQD	E	μ	c	f	$A/(L \cdot (\min \cdot 10\text{ m})^{-1})$	B
P_{1q}^1	0.11	0.17	0.13	0.3	0.10	0.50	0.45	0.44
P_{1q}^2	0.37	0.83	0.30	0.6	0.16	1.00	0.85	0.78
P_{1q}^3	0.08	0.11	0.10	0.2	0.09	0.54	0.25	0.28
P_{1q}^4	0.29	0.56	0.33	0.5	0.15	1.00	0.73	0.64

5.3 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。8 个因素分别取为 $c_1 \sim c_8$ 。

围岩质量 I 级($t = 1$):

$$R_{01} = \begin{bmatrix} N_{01}, & c_1, & \langle 0.74, 1.0 \rangle \\ & c_2, & \langle 0.89, 1.0 \rangle \\ & c_3, & \langle 0.55, 1.0 \rangle \\ & c_4, & \langle 0.60, 1.0 \rangle \\ & c_5, & \langle 0.26, 1.0 \rangle \\ & c_6, & \langle 0.66, 1.0 \rangle \\ & c_7, & \langle 0.88, 1.0 \rangle \\ & c_8, & \langle 0.83, 1.0 \rangle \end{bmatrix}$$

围岩质量 II 级($t = 2$):

$$R_{02} = \begin{bmatrix} N_{02}, & c_1, & \langle 0.61, 0.74 \rangle \\ & c_2, & \langle 0.78, 0.89 \rangle \\ & c_3, & \langle 0.33, 0.55 \rangle \\ & c_4, & \langle 0.50, 0.60 \rangle \\ & c_5, & \langle 0.19, 0.26 \rangle \\ & c_6, & \langle 0.24, 0.66 \rangle \\ & c_7, & \langle 0.75, 0.88 \rangle \\ & c_8, & \langle 0.67, 0.83 \rangle \end{bmatrix}$$

围岩质量 III 级($t = 3$):

$$R_{03} = \begin{bmatrix} N_{03}, & c_1, & \langle 0.42, 0.61 \rangle \\ & c_2, & \langle 0.56, 0.78 \rangle \\ & c_3, & \langle 0.10, 0.33 \rangle \\ & c_4, & \langle 0.40, 0.50 \rangle \\ & c_5, & \langle 0.09, 0.19 \rangle \\ & c_6, & \langle 0.16, 0.24 \rangle \\ & c_7, & \langle 0.50, 0.75 \rangle \\ & c_8, & \langle 0.50, 0.67 \rangle \end{bmatrix}$$

围岩质量 IV 级($t = 4$):

$$R_{04} = \begin{bmatrix} N_{04}, & c_1, & \langle 0.15, 0.42 \rangle \\ & c_2, & \langle 0.21, 0.56 \rangle \\ & c_3, & \langle 0.02, 0.10 \rangle \\ & c_4, & \langle 0.30, 0.40 \rangle \\ & c_5, & \langle 0.03, 0.09 \rangle \\ & c_6, & \langle 0.08, 0.16 \rangle \\ & c_7, & \langle 0.38, 0.50 \rangle \\ & c_8, & \langle 0.33, 0.50 \rangle \end{bmatrix}$$

围岩质量 V 级($t = 5$):

$$R_{05} = \begin{bmatrix} N_{05}, & c_1, & \langle 0.0, 0.15 \rangle \\ & c_2, & \langle 0.0, 0.21 \rangle \\ & c_3, & \langle 0.0, 0.02 \rangle \\ & c_4, & \langle 0.0, 0.30 \rangle \\ & c_5, & \langle 0.0, 0.03 \rangle \\ & c_6, & \langle 0.0, 0.08 \rangle \\ & c_7, & \langle 0.0, 0.38 \rangle \\ & c_8, & \langle 0.0, 0.33 \rangle \end{bmatrix}$$

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。

$$R_p = \begin{bmatrix} P, & c_1, & \langle 0.0, 1.0 \rangle \\ & c_2, & \langle 0.0, 1.0 \rangle \\ & c_3, & \langle 0.0, 1.0 \rangle \\ & c_4, & \langle 0.0, 1.0 \rangle \\ & c_5, & \langle 0.0, 1.0 \rangle \\ & c_6, & \langle 0.0, 1.0 \rangle \\ & c_7, & \langle 0.0, 1.0 \rangle \\ & c_8, & \langle 0.0, 1.0 \rangle \end{bmatrix}$$

5.4 确定待评物元

根据表 4 确定待评物元。

围岩 P_{1q}^1 :

$$R_{10} = \begin{bmatrix} N_{10} & c_1 & 0.11 \\ & c_2 & 0.17 \\ & c_3 & 0.13 \\ & c_4 & 0.30 \\ & c_5 & 0.10 \\ & c_6 & 0.50 \\ & c_7 & 0.45 \\ & c_8 & 0.44 \end{bmatrix}$$

围岩 P_{1q}^2 :

$$R_{20} = \begin{bmatrix} N_{20} & c_1 & 0.37 \\ & c_2 & 0.83 \\ & c_3 & 0.30 \\ & c_4 & 0.60 \\ & c_5 & 0.16 \\ & c_6 & 1.00 \\ & c_7 & 0.85 \\ & c_8 & 0.78 \end{bmatrix}$$

围岩 P_{1q}^3 :

$$R_{30} = \begin{bmatrix} N_{30} & c_1 & 0.08 \\ & c_2 & 0.11 \\ & c_3 & 0.10 \\ & c_4 & 0.20 \\ & c_5 & 0.09 \\ & c_6 & 0.54 \\ & c_7 & 0.25 \\ & c_8 & 0.28 \end{bmatrix}$$

围岩 P_{1q}^4 :

$$R_{40} = \begin{bmatrix} N_{40} & c_1 & 0.29 \\ & c_2 & 0.56 \\ & c_3 & 0.33 \\ & c_4 & 0.50 \\ & c_5 & 0.15 \\ & c_6 & 1.00 \\ & c_7 & 0.73 \\ & c_8 & 0.64 \end{bmatrix}$$

5.5 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 8 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 :

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

(2) 采用方根法求出上述判断矩阵的最大特征根 $\lambda_{max}=8.65$, 对其对应的特征向量归一化, 得到评价指标的权重集 $W = \{0.314, 0.230, 0.191, 0.06, 0.096, 0.042, 0.027, 0.039\}$ 。

(3) 一致性检验。经计算一致性指标 $CI = 0.093$, 平均随机性指标 $RI = 1.410$, 则随机一致性比率 $CR = 0.066$ 。因为 $CR < 0.100$, 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。

5.6 计算待评物元的关联度

根据式(5)和(6), 计算待评围岩关于各质量等级的关联度。再根据式(7)和得出的权系数 W_j , 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 rock masses

围岩岩石类型	k_1	k_2	k_3	k_4	k_5
P_{1q}^1	-0.729 9	-0.626 7	-0.551 6	-0.186 4	-0.266 1
P_{1q}^2	-0.178 8	-0.120 7	-0.124 0	-0.197 0	-0.547 3
P_{1q}^3	-0.794 5	-0.715 9	-0.516 5	-0.310 2	4.451 4
P_{1q}^4	-0.439 7	-0.308 6	-0.098 7	-0.436 6	-0.431 8

按前面的评价规则式(8)可得

$$\left. \begin{aligned} \max k_j(P_{1q}^1) &= k_4(P_{1q}^1) \\ \max k_j(P_{1q}^2) &= k_2(P_{1q}^2) \\ \max k_j(P_{1q}^3) &= k_5(P_{1q}^3) \\ \max k_j(P_{1q}^4) &= k_3(P_{1q}^4) \end{aligned} \right\} (12)$$

由上可知, 围岩 P_{1q}^1 属于 IV 级, 围岩 P_{1q}^2 属于 II 级, 围岩 P_{1q}^3 属于 V 级, 围岩 P_{1q}^4 属于 III 级, 得到的结果和水布垭地下厂房围岩质量等级基本一致。在水布垭地下厂房施工阶段, 地下厂房中围岩 P_{1q}^3 是最弱的一层, 因此, 为了保证厂房顶拱、侧壁及岩壁吊车梁的安全, 栖霞第 3 段(P_{1q}^3)的软岩(图 1 中 1-1 部分所示)需进行混凝土置换处理^[17], 从而更有利于地下厂房围岩的稳定。

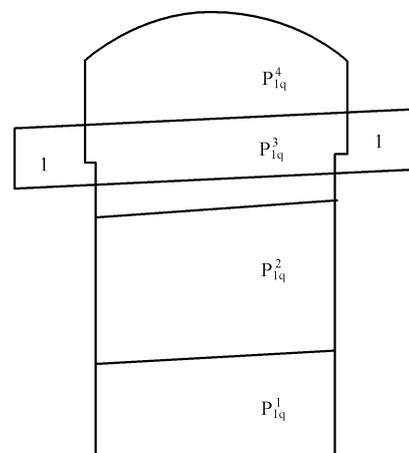


图 1 水布垭地下厂房围岩类型

Fig.1 Types of rocks in Shuibuya underground cavern

6 结 语

洞室岩体质量评价的可拓学理论方法从多角度、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。采用层次分析法确定洞室岩体质量评价指标的权重, 方法简单、高效、科学合理, 是一种处理复杂的多目标决策问题的实用方法。基于层次分析法的可拓学方法评价得到的关联度可以很好的反映洞室岩体属于何种质量等级, 而且在关联度计算中, 各因素对洞室岩体质量的影响是连续变化的, 而其他评价方法中所选取的评价参数都是固定不变的, 因而可以认为基于层次分析法的岩体质量可拓学评价方法更能客观实际的评价洞室岩体质量, 能够满足工程实践的需要。

参考文献(References):

- [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 Xiating, Lin Yunmei. Rock Mechanics and Engineering Expert System[M]. Shenyang: Liaoning Science and Technology Press, 1992.(in Chinese))
- [2] 中华人民共和国国家标准编写组. 工程岩体分级标准(GB50218 - 94)[S]. 北京: 中国计划出版社, 1995.(The National Standards Compilation Group of People's Republic of China. Classification Criterion of Engineering Rocks(GB50218 - 94)[S]. Beijing: China Planning Press, 1995.(in Chinese))
- [3] Bieniawski Z T. Engineering Rock Mass Classification[M]. [s. l.]: [s. n.], 1989.
- [4] 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 to the rock mass classification[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2005, 2(6): 449 - 453.(in Chinese))
- [5] 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.(Bieniawski Z. T. Classification of Engineering Rock[M]. Translated by Wu Lixin, Wang Jianfeng, Liu Dianshu, et al. Beijing: China University of Mining and Technology Press, 1993.(in Chinese))
- [6] 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.
- [7] 姚令侃. 可拓学在泥石流预报减灾决策上的应用[J]. 系统工程与实践, 1998, (1): 139 - 144.(Yao Lingkan. Application of extension theory to the strategic decision for predicting and mitigating debris flow disasters[J]. Systems Engineering—Theory and Practice, 1998, (1): 139 - 144.(in Chinese))
- [8] 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.(Jia Chao, Xiao Shufang, Liu Ning. Application of extenics theory to evaluation of tunnel rock quality[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(5): 751 - 756.(in Chinese))
- [9] Cai W. The extension set and non-compatible problem[A]. In: Advances Mathematics and Mechanics in China[C]. Beijing: International Academic Publishers, 1990. 138 - 152
- [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 and 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 and 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 Extenics[M]. Beijing: Scientific and Technical Documents Publishing House, 1996.(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] 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 — an New Simple Decision Making Method[M]. Beijing: Science and Technology Press, 1986.(in Chinese))
- [15] Dubois D, Prade H. Fuzzy Sets and Systems, Theory and Applications[M]. New York: Academic Press, 1998.
- [16] 中华人民共和国国家标准编写组. 水利水电工程地质勘察规范(GD50287 - 99)[S]. 北京: 中国计划出版社, 1999.(The National Standards Compilation Group of People's Republic of China. Code for Water Resources and Hydropower Engineering Geological Investigation (GD50287 - 99) [S]. Beijing: Beijing: China Planning Press, 1999.(in Chinese))
- [17] 水利部长江水利委员会. 水布垭水利枢纽右岸地下电站招标设计报告[R]. 清江: 水利部长江水利委员会, 2002.(Changjiang Water Resources Committee of Water Resource Department. Underground power station bidding design report of Shuibuya water resources Hubei project right bank[R]. Qingjiang: Changjiang Water Resources Committee, Ministry of Water Resources, 2002.(in Chinese))