第28卷第12期 东北大学学报(自然科学版) Vol. 28, No. 12
2007年12月 Journal of Northeastern University(Natural Science) Dec. 2007

大型岩质边坡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, 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: 基于物元模型的可拓学理论分析,提出龙滩水电站高边坡岩体稳定性的可拓学预测方法.利用岩体边坡稳定性等级和影响因子,构造经典域物元和节域物元,应用物元和可拓集合中的关联函数,建立了岩体边坡稳定性等级综合评判的可拓预测模型,通过可拓学评价分析,得到了岩体边坡稳定性的预测结果.实例分析表明该可拓学预测方法能够更加准确、科学地预测岩质边坡质量的等级问题,从而为采取相应的经济合理的支护加固措施提供了更可靠的依据.

关 键 词: 可拓学;物元模型;岩质边坡;岩体质量评价;层次分析法;关联度
中图分类号: TD 313.1 **文献标识码**: A **文章编号**: 1005-3026(2007)12-1770-05

Evaluation of High Rock Slope Quality Based on Theory of Extenics

KANG Zhi-qiang[1], *ZHOU Hui*[2], *FENG Xia-ting*[1,2], *YANG Cheng-xiang*[1]
(1. School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110004, China; 2. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China. Correspondent: KANG Zhi-qiang, E-mail: kzqzsh@163.com)

Abstract: A forecasting method is proposed for the high rock slope stability of Longtan hydropower station, based on the matter element model as deduced from the theories of extenics. The elements in classical and sectorized field are defined using the stability classification and influencing factors on rock slope, then an extension forecasting model is developed for comprehensive evaluation of the classification of rock slope stability by the correlation function of matter elements and extension sets. The forecasting results are thus obtained through such an evaluation. An exemplification shows that the method proposed can forecast the classification of rock slope quality more accurately and scientifically, thus providing a more reliable basis for taking economic and reasonable supporting/reinforcing measures.

Key words: extenics; matter element model; rock slope; rock quality evaluation; stratification analysis method; correlativeness

随着我国经济建设的高速发展,水电工程在能源开发利用中占有十分重要的地位,然而这些工程大多建造在中国西部的高山峡谷区域,很突出的问题就是工程高边坡的稳定性.本文利用可拓学理论,在工程边坡岩体质量分级方面,进行一些新的探索,其成果可以为工程高边坡稳定性的智能分析[1]提供理论和方法借鉴.

边坡岩体质量分级是经验设计的基础[2],目前国内比较系统的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[3-5]等.近年来,随着可拓学的兴起及其在工程中的应用,给边坡岩体质量评价带来了新的方法.因此借助于可拓学理论对边坡岩体进行评价,是一种理想的岩体工程分类评价方法.

1 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[6-8]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

收稿日期: 2006-12-20
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50579091; 50504004).
作者简介: 康志强(1974-),男,河北井陉人,东北大学博士研究生; 冯夏庭(1964-),男,安徽潜山人,东北大学教授,博士生导师.

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

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．

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

$$R_{ot}=(N_{ot},C,V_{ot})=\begin{bmatrix} N_{ot}, & c_1 & \langle a_{ot1},b_{ot1}\rangle \\ & c_2 & \langle a_{ot2},b_{ot2}\rangle \\ & \cdots & \cdots \\ & c_n & \langle a_{otn},b_{otn}\rangle \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$R_p=(N_p,C,V_p)=\begin{bmatrix} N_p, & c_1 & \langle a_{p1},b_{p1}\rangle \\ & c_2 & \langle a_{p2},b_{p2}\rangle \\ & \cdots & \cdots \\ & c_n & \langle a_{pn},b_{pn}\rangle \end{bmatrix}, \quad (2)$$

其中，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 $\langle a_{oti},b_{oti}\rangle\subset\langle a_{pi},b_{pi}\rangle$ $(i=1,2,\cdots,n)$．

请若干专家根据实际情况对某物质单元 N_j $(j=1,2,\cdots,m)$ 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．

$$R_j=\begin{bmatrix} N_j, & c_1 & v_{j1} \\ & c_2 & v_{j2} \\ & \cdots & \cdots \\ & c_n & v_{jn} \end{bmatrix}. \quad (3)$$

某物质单元 N_j 关于等级 t 的关联函数为

$$k_{tj}(v_{ti})=\frac{\rho(v_{ji},v_{oti})}{\rho(v_{ji},v_{pi})-\rho(v_{ji},v_{oti})}. \quad (4)$$

$i=1,2,\cdots,n;\ j=1,2,\cdots,m;\ t=1,2,\cdots,l$．其中，

$$\rho(x_0,x)=\begin{cases} a-x_0, & x_0\le\dfrac{a+b}{2}, \\ x_0-b, & x_0\ge\dfrac{a+b}{2}. \end{cases} \quad (5)$$

式中，x_0 为数值；$x(a,b)$ 为区间；$k_{tj}(v_{ti})$ 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 $k_{tj}(N_j)$ 为

$$k_{tj}(N_j)=\sum W_i k_{tj}(v_i), \quad (6)$$

$$k_{jt_0}(N_j)=\max\{k_{tj}(N_j)\mid t=1,2,\cdots,l\}. \quad (7)$$

则此物质单元等级为 t_0．

2　运用可拓学理论对龙滩边坡岩体质量进行评价

本文以龙滩水电站高陡边坡为例，对大型岩质边坡的质量等级进行了可拓学理论评价，为工程稳定性分析、岩体的合理利用等提供可靠的依据．

2.1　龙滩边坡地质条件

选取龙滩水电站边坡地层 5 层（B_1，B_2，B_3，B_4，B_5）的主要围岩进行边坡稳定性等级可拓学评价．

第一层（B_1）为所选边坡的最底层，岩性以砂岩为主，厚度达到 640 m，岩体较完整；第二层（B_2）的岩性以粉砂岩和泥板岩为主，厚度达到 390 m，岩体总体稳定；第三层（B_3）的岩性以泥板岩为主，厚度达到 160 m，岩体基本完整；第四层（B_4）属于罗楼组，以薄层、中等厚层硅质泥板岩为主；第五层（B_5）以强风化岩体为主，岩层风化强烈．

2.2　龙滩边坡评价指标选取

根据龙滩水电站现场实测结果和资料分析，对于龙滩水电站边坡选取 6 个因素作为边坡稳定性评价的综合指标．分别为岩石湿抗压强度 R_c、岩体变形模量 E、岩石重度、岩体抗剪断强度（黏聚力 C 和内摩擦角 ϕ）、岩石泊松比．

对照规范及国家标准[9-10]，用单因素法将龙滩水电站边坡岩体质量分为 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 factorial index

级别	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅴ
R_c/ MPa	120～200	60～120	30～60	15～30	0～15
γ/ (kN·m^{-3})	28～30	26.5～28	24.5～26.5	22.5～24.5	0～22.5
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	2.1～1.5	1.5～0.7	0.7～0.2	0.05～0.2
ϕ/ (°)	60～90	50～60	39～50	27～39	0～27

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

根据龙滩水电站水利枢纽边坡设计报告,得到龙滩水电站边坡主要的 5 层(B_1, B_2, B_3, B_4, B_5)围岩所对应的 6 个参数指标值,如表 2 所示.

表 2 龙滩边坡围岩各层参数值列表

Table 2 Parameters of Longtan wall rock slope

类型	B_1	B_2	B_3	B_4	B_5
R_c/ MPa	100	80	50	50	20
γ/ (kN·m^{-3})	27.3	20	15	15	5
E/ GPa	22	20	15	15	5
μ	0.24	0.25	0.27	0.27	0.35
C/ MPa	2.45	1.96	1.48	1.48	0.50
ϕ/ (°)	56.3	53.5	47.7	47.7	30

2.3 参数指标无量纲化

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.

2.4 确定龙滩边坡物元的经典域矩阵与节域矩阵

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.6 个因素分别取为 c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, c_6.

边坡岩体质量 Ⅰ级($t=1$):

$$R_{01}=\begin{bmatrix} N_{01}, & c_1 & \langle 0.60, 1.0\rangle \\ & c_2 & \langle 0.93, 1.0\rangle \\ & c_3 & \langle 0.55, 1.0\rangle \\ & c_4 & \langle 0.60, 1.0\rangle \\ & c_5 & \langle 0.26, 1.0\rangle \\ & c_6 & \langle 0.67, 1.0\rangle \end{bmatrix},$$

边坡岩体质量 Ⅱ级($t=2$):

$$R_{02}=\begin{bmatrix} N_{02}, & c_1 & \langle 0.30, 0.60\rangle \\ & c_2 & \langle 0.88, 0.93\rangle \\ & c_3 & \langle 0.33, 0.56\rangle \\ & c_4 & \langle 0.50, 0.60\rangle \\ & c_5 & \langle 0.19, 0.26\rangle \\ & c_6 & \langle 0.56, 0.67\rangle \end{bmatrix},$$

边坡岩体质量 Ⅲ级($t=3$):

$$R_{03}=\begin{bmatrix} N_{03}, & c_1 & \langle 0.15, 0.30\rangle \\ & c_2 & \langle 0.82, 0.88\rangle \\ & c_3 & \langle 0.10, 0.33\rangle \\ & c_4 & \langle 0.40, 0.50\rangle \\ & c_5 & \langle 0.09, 0.19\rangle \\ & c_6 & \langle 0.43, 0.56\rangle \end{bmatrix},$$

边坡岩体质量 Ⅳ级($t=4$):

$$R_{04}=\begin{bmatrix} N_{04}, & c_1 & \langle 0.08, 0.15\rangle \\ & c_2 & \langle 0.75, 0.82\rangle \\ & c_3 & \langle 0.02, 0.10\rangle \\ & c_4 & \langle 0.30, 0.40\rangle \\ & c_5 & \langle 0.03, 0.09\rangle \\ & c_6 & \langle 0.30, 0.43\rangle \end{bmatrix},$$

边坡岩体质量 Ⅴ级($t=5$):

$$R_{05}=\begin{bmatrix} N_{05}, & c_1 & \langle 0.0, 0.08\rangle \\ & c_2 & \langle 0.0, 0.75\rangle \\ & c_3 & \langle 0.0, 0.02\rangle \\ & c_4 & \langle 0.0, 0.30\rangle \\ & c_5 & \langle 0.0, 0.03\rangle \\ & c_6 & \langle 0.0, 0.30\rangle \end{bmatrix}.$$

表 3 单因素指标评价标准(无量纲)

Table 3 Rock mass quality classification with single factorial index (dimensionless)

级别	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅴ
R_c	0.60～1.0	0.30～0.60	0.15～0.30	0.08～0.15	0～0.08
γ^3	0.93～1.0	0.88～0.93	0.82～0.88	0.75～0.82	0～0.75
E	0.55～1.0	0.33～0.55	0.10～0.33	0.02～0.10	0～0.02
μ	0.60～1.0	0.50～0.60	0.40～0.50	0.30～0.40	0～0.30
C	0.26～1.0	0.19～0.26	0.09～0.19	0.03～0.09	0～0.03
ϕ	0.67～1.0	0.56～0.67	0.43～0.56	0.30～0.43	0～0.30

表 4 龙滩边坡岩体各层参数值列表(无量纲)

Table 4 Parameters of Longtan wall rock slope (dimensionless)

类型	B_1	B_2	B_3	B_4	B_5
R_c	0.50	0.40	0.25	0.25	0.10
γ^3	0.91	0.91	0.90	0.90	0.89
E	0.37	0.33	0.25	0.25	0.083
μ	0.52	0.52	0.46	0.46	0.30
C	0.31	0.25	0.185	0.148	0.063
ϕ	0.63	0.59	0.53	0.53	0.33

节域是根据边坡岩体质量指标的取值范围而定的,一般是边坡岩体质量等级的全体.

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

2.5 确定待评龙滩边坡各层围岩物元

根据表 4 确定待评物元(B_1, B_2, B_3, B_4, B_5).

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

$$R_{10}=\begin{bmatrix} N_{10}, & c_1 & \langle 0.50\rangle \\ & c_2 & \langle 0.91\rangle \\ & c_3 & \langle 0.37\rangle \\ & c_4 & \langle 0.52\rangle \\ & c_5 & \langle 0.31\rangle \\ & c_6 & \langle 0.63\rangle \end{bmatrix},$$

$$R_{20}=\begin{bmatrix} N_{20}, & c_1 & \langle 0.40\rangle \\ & c_2 & \langle 0.91\rangle \\ & c_3 & \langle 0.37\rangle \\ & c_4 & \langle 0.52\rangle \\ & c_5 & \langle 0.31\rangle \\ & c_6 & \langle 0.63\rangle \end{bmatrix},$$

$$R_{30}=\begin{bmatrix} N_{30}, & c_1 & \langle 0.25\rangle \\ & c_2 & \langle 0.90\rangle \\ & c_3 & \langle 0.25\rangle \\ & c_4 & \langle 0.46\rangle \\ & c_5 & \langle 0.185\rangle \\ & c_6 & \langle 0.53\rangle \end{bmatrix},$$

$$R_{40}=\begin{bmatrix} N_{40}, & c_1 & \langle 0.25\rangle \\ & c_2 & \langle 0.90\rangle \\ & c_3 & \langle 0.25\rangle \\ & c_4 & \langle 0.46\rangle \\ & c_5 & \langle 0.148\rangle \\ & c_6 & \langle 0.53\rangle \end{bmatrix},$$

$$R_{50}=\begin{bmatrix} N_{50}, & c_1 & \langle 0.10\rangle \\ & c_2 & \langle 0.89\rangle \\ & c_3 & \langle 0.083\rangle \\ & c_4 & \langle 0.030\rangle \\ & c_5 & \langle 0.063\rangle \\ & c_6 & \langle 0.33\rangle \end{bmatrix}.$$

2.6　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.

$$S=\begin{bmatrix} 1 & 7 & 3 & 5 & 6 & 8 \\ 1/7 & 1 & 1/5 & 1/3 & 1/2 & 2 \\ 1/3 & 5 & 1 & 3 & 5 & 6 \\ 1/5 & 3 & 1/3 & 1 & 3 & 4 \\ 1/6 & 3 & 1/5 & 1/3 & 1 & 4 \\ 1/8 & 1/2 & 1/6 & 1/4 & 1/4 & 1 \end{bmatrix}$$

2) 采用方根法求出上述判断矩阵的最大特征根 $\lambda_{max}=6.444$,对其对应的特征向量归一化,得到评价指标的权重集 $W=(0.456, 0.051, 0.254, 0.128, 0.079, 0.032)$.

2.7　计算待评隧洞围岩物元的关联度

根据式(4)和式(5),计算待评边坡岩体关于各质量等级的关联度,再根据式(6)和得出的权系数 W_i,计算待评边坡岩体关于各质量等级的综合关联度,计算结果见表 5.

表 5　边坡岩体各层关联度计算结果

Table 5　Calculation results of strata correlativeness of rock slope

类型	k_1	k_2	k_3	k_4	k_5
B_1	- 0.174 8	0.157 7	- 0.200 3	- 0.389 4	- 0.456 8
B_2	- 0.223 2	0.177 7	- 0.126 6	- 0.370 9	- 0.448 5
B_3	- 0.476 0	- 0.139 1	0.241 8	- 0.325 1	- 0.405 0
B_4	- 0.487 3	- 0.154 5	0.027 1	- 0.261 5	- 0.415 6
B_5	- 0.749 2	- 0.606 2	- 0.262 4	- 0.304 9	- 0.215 7

按前面的评价规则式(7)可得:

$$\mathrm{Max}\,k_j(B_1)=k_2(B_1),$$
$$\mathrm{Max}\,k_j(B_2)=k_2(B_2),$$
$$\mathrm{Max}\,k_j(B_3)=k_3(B_3),$$
$$\mathrm{Max}\,k_j(B_4)=k_3(B_4),$$
$$\mathrm{Max}\,k_j(B_5)=k_5(B_5).$$

由以上结果可以得出,第一层和第二层属于 2 级,第三层和第四层属于 3 级,第五层属于 5 级.

在龙滩左岸边坡中,由于岩体风化影响及边坡倾角的影响,导致岩体参数降低,变形趋势将明显增强,所以实际评价结果要比理论评价结果偏低.在 B_5,B_4,B_3 为主的岩层中,对于 B_5 的强风化的岩层,开挖边坡时,要挖除,同时要进行有效的加固.对于 B_4,B_3 岩层,由于受到断层、边坡形态及风化的影响,因此要加强边坡开挖时的锚索、锚杆支护措施,防止岩层变形破坏,减缓或阻止岩体的蠕变.

3　结　　语

本文针对龙滩水电站实例边坡,建立了基于层次分析法的边坡岩体的可拓学理论评价的物元

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

模型,对边坡的稳定性进行了可拓学评价,计算结果表明这种评价是合理的、可行的.该方法理论上比较严谨,且计算十分简单,具有较好的实用性,同时也为类似工程问题的综合评判提供了一种新的思路和手段.

参考文献:

[1] 冯夏庭,王泳嘉,丁恩保.智能化的边坡稳定性分析方法[J].东北大学学报:自然科学版,1995,16(5):453 - 457.
(Feng Xia-ting, Wang Yong-jia, Ding En-bao. Intelligent method of stability analysis of open-pit slopes[J]. *Journal of Northeastern University: Natural Science*, 1995, 16(5): 453 - 457.)

[2] 李建林,王乐华,刘杰,等.岩石边坡工程[M].北京:中国水利水电出版社,2006.
(Li Jian-lin, Wang Yue-hua, Liu Jie, *et al*. Rock slope engineering[M]. Beijing: China Water Power Press, 2006.)

[3] Bieniawski Z T. Engineering rock mass classification[M]. New York: John Wiley & Sons, 1989.

[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.
(Bieniawski Z T. Classification of engineering rock[M]. Translated by Wu Li-xin, Wang Jian-feng, Liu Dian-shu, *et al*. Beijing: China University of Mining and Technology Press, 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] Cai W. The extension set and non-compatible problem[C]// Advances Mathematics and Mechanics in China. Beijing: International Academic Publishers, 1990.

[7] Cai W. Extension engineering and applications [J]. *International Journal of Operations and Quantitative Management*, 1999, 5(1): 59 - 72.

[8] Liu M Y. An application of extension theory to the evaluation of slope stability [J]. *Journal of Wuhan University of Technology: Materials Science Edition*, 1999, 14(4): 57 - 62.

[9] 中华人民共和国水利部.工程岩体分级标准,GB 50218—94[S].北京:中国计划出版社,1995.
(The Ministry of Water Resources, PRC. Classification criterion of engineering rocks, GB 50218 - 94[S]. Beijing: China Planning Press, 1995.)

[10] 中华人民共和国水利部.水利水电工程地质勘察规范,GB 50287—99[S].北京:中国计划出版社,1999.
(The Ministry of Water Resources, PRC. Code for water resources and hydropower engineering geological investigation, GB 50287 - 99[S]. Beijing: China Planning Press, 1999.)

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net