

围岩质量综合评判模型和大坝建基面优选模型的建立

陈志坚¹, 朱代洪², 张雄文¹

(1. 河海大学土木工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 南昌水利水电高等专科学校, 江西 南昌 330029)

摘要 阐述了岩体质量及其影响因素的复杂性和不确定性, 采用模糊数学方法建立了考虑岩石单轴抗压强度、RQD、裂隙间距、裂隙面粗糙度系数、裂隙水压力与最大应力比值的 5 因素洞室围岩综合评判模型, 以及考虑岩体纵波波速、完整性系数、变形模量、均一性系数、RQD、裂隙间距、承压水顶板岩体自重应力与承压水头比值的 7 因素大坝建基面模糊优选模型。

关键词 模糊综合评判 模糊优选 模型 围岩质量 建基面

中图分类号 :TU457 **文献标识码** :A **文章编号** :1000-1980(2002)04-0088-04

岩体是复杂的地质体, 经历了漫长的岩石建造和构造改造作用. 它不仅可由多种岩石组成, 而且包含了大量各种成因的结构面、处于复杂的地下水和地应力环境, 并经历了长期的次生和表生改造作用. 所以, 目前人们仍未能对岩体的工程性质进行正确而全面的认识和评价. 实践表明, 工程岩体的复杂性不仅表现在其组成结构及影响因素, 而且还表现在各因素的影响程度因不同的岩体、受力状态和运营环境而异. 显然, 岩体的质量评价存在许多不确定性. 工程岩体按其作用的不同可分为边坡、坝基和洞室围岩, 其中坝基和围岩与工程活动的相互作用更强烈. 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专项研究工作. 大坝建基面的确定则是一项建立在风化卸荷分带基础上、对大坝安全和工程投资均有重要影响的坝基设计工作. 但影响围岩质量和大坝建基面的工程地质条件的各因素是相互制约、相互影响的, 各自都有有利与不利的一面. 建立在模糊集基础上, 以不确定型现象为研究对象的模糊数学为客观、真实地进行围岩质量评价和大坝建基面确定提供了一套可行的方法.

1 围岩质量综合评判模型

影响围岩质量的因素是复杂的, 为了合理、正确地利用和改造围岩, 工程实践中的常规途径是综合考虑各因素的影响后进行围岩分类, 并给出各类围岩的质量, 进而确定其设计参数和支护方案. 参考现行的、较为成熟的围岩分类方法, 本文将围岩分为稳定、基本稳定、稳定性差、不稳定和极不稳定 5 个等级, 综合考虑围岩质量之主要影响因素 岩石抗压强度 R_c 、岩体整体性(以岩体质量指标 RQD 和不连续面间距 d 表征)、不连续面粗糙度系数 JRC 和地下水作用^[1], 采用模糊数学方法建立围岩质量综合评判模型.

1.1 围岩质量综合评判模型的建立^[2]

建立洞室围岩质量综合评判模型时, 取因素集 $U = \{u_1, u_2, \dots, u_5\} = \{R_c, \text{RQD}, d, \text{JRC}, \text{裂隙水压力与最大应力比值}\}$ 评判集 $V = \{v_1, v_2, \dots, v_5\} = \{\text{稳定, 基本稳定, 稳定性差, 不稳定, 极不稳定}\}$ 各因素 u_i 与各等级 v_j ($i = 1, 2, \dots, 5$ $j = 1, 2, \dots, 5$) 之间的关系如表 1. 采用如式(1)所示的正态分布函数作为隶属函数.

$$\mu_{C_{ij}}(x_i) = \exp\left[-\left(\frac{x_i - m_{ij}}{\sigma_{ij}}\right)^2\right] \quad (1)$$

式中: x_i ——第 i 因素的实测值; m_{ij} ——第 j 等级围岩第 i 因素的标准值; σ_{ij} ——标准差; $\mu_{C_{ij}}(x_i)$ ——隶

属函数. 根据式(1)及表 1,可求出模糊关系矩阵 $R^{[3]}$.

表 1 各因素 u_i 与各评判等级 v_j 的关系

Table 1 Relationship between factors and evaluation grades

因素	v_1	v_2	v_3	v_4	v_5
u_1	> 250	100 ~ 50	25 ~ 50	25 ~ 5	5 ~ 0
u_2	90 ~ 100	75 ~ 90	50 ~ 75	25 ~ 50	25 ~ 0
u_3	> 2	0.6 ~ 0.2	0.2 ~ 0.6	0.06 ~ 0.2	0.06 ~ 0
u_4	20 ~ 16	16 ~ 2	12 ~ 8	8 ~ 4	4 ~ 0
u_5	0 ~ 0.02	0.02 ~ 0.1	0.1 ~ 0.2	0.2 ~ 0.5	> 0.5

注： u_1 单位为 MPa； u_3 单位为 m.

该模型中各因素的重要程度是不同的,必须考虑它们的权重. 权重的确定可采用 Satty 提出的 AHP 方法^[2],根据各因素对围岩质量影响的相对重要程度进行两两比较判断,构造判断矩阵,检验一致性,采用特征向量法计算矩阵最大特征值对应的特征向量,作为各指标的权重. 计算得权向量为 $A = (0.386\ 0.274\ 0.193\ 0.059\ 0.088)$,它表征各因素对评判等级所起作用的大小.

在建立模糊关系矩阵 R 后,通过式(2)的合成运算,根据最大隶属度原则可得综合评判结果：

$$B = (b_1, b_2, \cdots, b_5) = A R$$

(2)

式中： B ——既考虑各因素权重,又考虑单因素 u_i 作用的模糊等级.

1.2 围岩质量综合评判的实例

某地下洞室围岩,由工程地质勘察资料可确定其岩石单轴抗压强度 R_c 为 200 MPa、RQD 为 83、不连续面间距 d 为 0.4 m、裂隙粗糙系数 JRC 为 14、裂隙水压力与最大应力比值为 0.08. 根据式(2)及表 1 计算可知围岩质量模糊关系矩阵为

$$R = \begin{bmatrix} 0.344 & 0.779 & 0 & 0 & 0 \\ 0.063 & 0.926 & 0.112 & 0 & 0 \\ 0.256 & 0.317 & 1 & 0.902 & 0 \\ 0.062 & 0.317 & 1 & 0.902 & 0 \\ 0.062 & 1 & 0.062 & 0.499 & 0 \\ 0 & 0.779 & 0.256 & 0.105 & 0.007 \end{bmatrix}$$

(3)

按式(2)计算并作归一化处理后得： $B = (0.138\ 0.527\ 0.177\ 0.151\ 0.007)$. 按最大隶属度原则可知该洞室围岩属于基本稳定围岩. 该结果已得到工程的验证.

2 大坝建基面优选模型

大坝建基面的确定取决于坝型、坝高和坝基岩体质量. 对于确定的坝型和坝高,可根据风化、卸荷分带按规范要求确定建基面. 但由于风化、卸荷分带的不确定性以及每个风化带岩体有一定厚度(弱、微风化带的厚度往往可达几十米,甚至上百米),所以建基面的确定往往带有主观性和不确定性. 在选定坝型和坝高后,可确定建基面所处的风化、卸荷带. 但同一风化卸荷带中,岩体的工程性质也会随深度而变化,最优建基面主要由岩体质量控制. 因此,综合考虑影响岩体质量各因素的大坝建基面优选模型不失为一条值得探索的途径.

2.1 大坝建基面优选模型的建立^[2]

对于确定的坝型和坝高,可根据规范要求确定建基面所处的风化、卸荷带及坝基的最大开挖深度,然后按深度及岩体质量确定建基面待选择的 n 个方案,组成方案集. 选取反映岩体质量的岩体纵波速度、完整性系数、变形模量、均一性系数、RQD、裂隙间距、承压水顶板岩体自重应力与承压水头的比值等 7 个因素组成评判因素集. 以各方案中各因素的测值组成特征值矩阵 $X_{7 \times n}$. 用向量 x_j 表示对应于第 j 个方案 7 个评价因素的特征值：

$$x_j = (x_{1j}, x_{2j}, \cdots, x_{7j})^T$$

(4)

式中： x_{ij} ——特征值矩阵中对于方案 j ,第 i 个评判因素的特征值($i = 1, 2, \cdots, 7$; $j = 1, 2, \cdots, n$).

采用式(5)将特征值矩阵规格化(即将其中评价因素特征值转化为相应的隶属度,消除各因素量纲不同的影响),得到如式(6)所示的优属度矩阵 $R_{7 \times n}$.

$$r_{ij} = \frac{x_{ij} - \bigwedge_{l=1}^n \{x_{il}\}}{\bigvee_{l=1}^n \{x_{il}\} - \bigwedge_{l=1}^n \{x_{il}\}} \quad (5)$$

$$R_{7 \times n} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ r_{71} & r_{72} & \cdots & r_{7n} \end{bmatrix} = (r_{ij})_{7 \times n} \quad (6)$$

若 $g = (g_1, g_2, \cdots, g_i, \cdots, g_7)^T$, $b = (b_1, b_2, \cdots, b_i, \cdots, b_7)^T$, 其中 $g_i = \max(r_{i1}, r_{i2}, \cdots, r_{in})$, $b_i = \min(r_{i1}, r_{i2}, \cdots, r_{in})$, $i = 1, 2, \cdots, 7$, 则称 g 为系统的优等方案, b 为系统的劣等方案. 系统中的每个方案均以一定的隶属度属于优等方案与劣等方案. 用模糊矩阵表示:

$$U_{2 \times n} = \begin{pmatrix} u_{11} & u_{12} & \cdots & u_{1n} \\ u_{21} & u_{22} & \cdots & u_{2n} \end{pmatrix} \quad (7)$$

式中: u_{ij} ——第 j 个方案隶属于优等方案(当 $i = 1$)或劣等方案(当 $i = 2$)的隶属度.

该模型中根据各因素的相对重要程度,按 Satty 提出的 AHP 方法构造判断矩阵^[2],检查矩阵的一致性后,采用特征向量法计算得权向量 $\omega = (0.121, 0.195, 0.31, 0.076, 0.03, 0.042, 0.226)$. 以优等方案与劣等方案的‘欧氏距离’的平方和趋于最小为原则求解最优矩阵,得 u_{1j} 最优值的计算模型为

$$u_{1j}^* = 1 / \left\{ 1 + \sum_{k=1}^m [\omega_k (r_{ij} - g_k)]^2 / \sum_{k=1}^m [\omega_k (r_{ij} - b_k)]^2 \right\} \quad (8)$$

式中: u_{1j}^* ——第 j 个方案($j = 1, 2, \cdots, n$)从属于优等方案的隶属度 u_{1j} 的最优值.

根据最大隶属原则,依据 u_{1j}^* ($j = 1, 2, \cdots, n$) 由大到小得出相应的 n 个方案的优劣顺序,从而选定最优方案.

2.2 优选大坝建基面的实例

某重力坝按规范要求其建基面需位于弱风化带内,基础开挖的极限深度为 9 m. 按步长将 $[0, 9]$ 分为 7 个待选方案 $[0, 0 \sim 1.5, 1.5 \sim 3.0, 3.0 \sim 4.5, 4.5 \sim 6.0, 6.0 \sim 7.5, 7.5 \sim 9.0]$. 其特征值矩阵为

$$X_{7 \times n} = \begin{bmatrix} 2.751 & 3.419 & 3.708 & 3.448 & 3.679 & 3.677 & 3.626 \\ 0.31 & 0.47 & 0.55 & 0.48 & 0.54 & 0.54 & 0.53 \\ 2.500 & 4.700 & 5.500 & 4.700 & 5.400 & 5.100 & 5.600 \\ 0.32 & 0.19 & 0.31 & 0.59 & 0.38 & 0.73 & 0.42 \\ 50.0 & 50.5 & 32.3 & 14.7 & 36.7 & 28.3 & 35.0 \\ 0.2 & 0.25 & 0.4 & 0.5 & 0.3 & 0.3 & 0.5 \\ 0.90 & 0.85 & 0.80 & 0.75 & 0.71 & 0.66 & 0.61 \end{bmatrix} \quad (9)$$

由式(5)将之规格化,得优属度矩阵为

$$X_{7 \times n} = \begin{bmatrix} 0 & 0.698 & 1 & 0.728 & 0.970 & 0.654 & 0.914 \\ 0 & 0.667 & 1 & 0.708 & 0.958 & 0.958 & 0.917 \\ 0 & 0.710 & 0.968 & 0.710 & 0.935 & 0.838 & 1 \\ 0.241 & 0 & 0.222 & 0.740 & 0.352 & 1 & 0.426 \\ 0.986 & 1 & 0.492 & 0 & 0.615 & 0.380 & 0.567 \\ 0 & 0.167 & 0.667 & 1 & 0.333 & 0.333 & 1 \\ 1 & 0.828 & 0.655 & 0.483 & 0.345 & 0.172 & 0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

由式(10)得

$$X_{2 \times n} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (11)$$

根据式(8)和式(11),得优等方案的隶属度的最优值为

$$(u_{11}^*, u_{12}^*, u_{13}^*, u_{14}^*, u_{15}^*, u_{16}^*, u_{17}^*) = (0.283, 0.832, \underline{0.940}, 0.768, 0.838, 0.730, 0.720)$$

由最大隶属度原则,将建基面选在 1.5 ~ 3.0 m 范围内属最‘优’建基面,此建基面位于弱风化带上部. 该方案被工程实践采用.

3 结 语

模糊数学的很多理论和方法已经逐渐被引入工程地质研究中,用于指导工程实践. 实践已经证明了模糊数学分析方法的系统分析原则和高效协调性. 与传统方法相比,它具有灵活、实用、全面、准确的特点. 显然,在工程地质领域诸多问题的研究评价中,模糊数学方法有着广阔的应用前景.

参考文献：

[1] 陆兆溱. 工程地质学[M]. 北京：水利电力出版社, 1989. 216 ~ 230.
[2] 黄健元. 模糊集及其应用[M]. 银川：宁夏人民教育出版社, 1999. 157 ~ 175.
[3] 吴中如, 沈长松, 阮焕祥. 水工建筑物安全监控理论及其应用[M]. 南京：河海大学出版社, 1990. 189 ~ 192.

Development of adjoining rock quality comprehensive evaluation model and dam foundation building surface optimal model

CHEN Zhi-jian¹, ZHU Dai-hong², ZHANG Xiong-wen¹
(1. College of Civil Engineering, Hohai Univ., Nanjing 210098, China ;
2. Nanchang College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Nanchang 330029, China)

Abstract :Based on the description of the complexity and indeterminacy of rock quality and some affecting factors, a model for comprehensive evaluation of cavern adjoining rock, in which 5 factors are considered, namely uniaxial compressive strength of rock, RQD, interval between fissures, roughness coefficient of fissure surfaces, and the ratio of fissure water pressure to the maximum stress, is established by use of the fuzzy mathematical method. Besides, a fuzzy optimal model for dam foundation building surface is also developed, in which 7 factors are considered, i. e. propagation velocity of primary waves, integrity coefficient, deformation modulus, uniformity coefficient, RQD, interval between fissures, and the ratio of the self-weight of rock mass to the artesian head.

Key words : fuzzy comprehensive evaluation ; fuzzy optimization ; model ; adjoining rock quality ; foundation building surface