

# 拱坝安全度模糊综合评判模型

高 健<sup>1</sup> , 黄海燕<sup>2</sup> , 周登峰<sup>1</sup>

( 1. 浙江水利电力专科学校水利工程系 , 浙江 杭州 310016 ; 2. 河海大学土木工程学院 , 江苏 南京 210098 )

摘要 : 首先给出模糊数学在拱坝安全评价中的应用方法和步骤 , 然后在拱坝体型设计统计模型的基础上建立了考虑厚高比、柔度和最大拉应力 3 个因素的模糊综合评价模型 , 并对数座拱坝进行了验证 . 验证结果表明 , 拱坝模糊综合评判方法简便易行 , 评判结果切合实际 .

关键词 : 拱坝 ; 厚高比 ; 柔度 ; 模糊综合评价

中图分类号 : TV642.4 文献标识码 : A 文章编号 : 1000-1980( 2004 )02-0164-04

通常 , 初拟拱坝体型时 , 选择一两个类似的已有工程进行比较模拟 . 但已有工程原型观测资料各数据之间的关系极为复杂 , 往往很难用物理力学方法和先进的数值计算方法来确定 . 因此 , 本文首先建立国内外已建拱坝的基本资料数据库及其参数统计模型 , 然后用综合评判法对拱坝安全度进行分析并建立预测模型 .

## 1 模糊综合评判方法及模型

综合评判就是对多因素所影响的事物或现象做出总的评价 , 这是统计分析指标的方法之一 , 但是 , 在对某些事物的评价中 , 所选定的评价指标都是模糊概念 , 各经济指标之间既相互联系又相互影响的程度亦带有模糊性时 , 可采用模糊综合评判法 . 模糊综合评判数学模型分为单层次模糊综合评判模型和多层次模糊综合评判模型 .

### 1.1 单层次模糊综合评判模型<sup>[1]</sup>

a. 选择综合指标 , 确定评判对象的因素集  $U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$  .

b. 选择评判集  $V = \{v_1, v_2, \dots, v_m\}$  .

c. 单因素评判 . 确定第  $i$  个评价因素  $u_i$  对第  $j$  个评判等级  $v_j$  的隶属度  $r_{ij}$  , 即建立隶属函数 . 于是可得到因素  $u_i$  的评判向量  $R_i = (r_{i1}, r_{i2}, \dots, r_{im})$  , 从而可得到由几个因素的评判向量组成的模糊评判矩阵

$$R = \begin{bmatrix} R_1 \\ \vdots \\ R_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & \cdots & r_{1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{n1} & \cdots & r_{nm} \end{bmatrix} \quad (1)$$

d. 确定各因素的权重  $A = (a_1, a_2, \dots, a_n)$  . 其中  $a_i$  (  $i = 1, \dots, n$  ) 为因素  $u_i$  对应的权重 ,  $0 \leq a_i \leq 1$  且

$$\sum_{i=1}^n a_i = 1 .$$

e. 综合评判 . 由  $B = A \circ R$  可得评判集  $V$  上的模糊子集  $B = (b_1, b_2, \dots, b_m)$  . 根据实际问题的需要 , 可以选定某种具体的求  $B$  的方法 . 常用的方法有 ( a ) 注因素决定型  $M(\wedge, \vee)$  ( b ) 注因素突出型  $M(\cdot, \vee)$  ( c ) 不均衡平均型  $M(\wedge, \oplus)$  ( d ) 加权平均型  $M(\cdot, +)$  .

f. 做出综合评判结论 . 首先将  $B$  归一化 , 得到  $B_1 = (b'_1, b'_2, \dots, b'_m)$  , 然后根据实际情况做出综合评判结论 . 通常采用下列方法 ( a ) 最大隶属度法 . 若  $b'_k = \max\{b'_1, b'_2, \dots, b'_m\}$  , 则可判定对此事物的评判为  $V_k$  . 但是 , 若在  $B_1$  的分量中有 2 个或 2 个以上的分量相等 , 则此方法失效 . ( b ) 加权平均法 . 若主评判集合  $V = \{v_1, v_2, \dots, v_m\}$  中各元素均可量化时 , 将  $b'_j$  看成  $v_j$  的权重 , 用  $f(v_j)$  表示  $v_j$  的量化值 , 则  $V = \sum_{j=1}^m b'_j \circ f(v_j)$  就是对

此事物的综合评判,但当  $V$  中的各元素不均能量化时,此方法失效。(c)模糊分布法.直接把  $B_1=(b'_{11},b'_{12},\dots,b'_{1m})$  作为对此事物的综合评判结果.这种结果具体反映了此事物对于各评判等级的分布情况,能使人们对此事物等级有一全面了解,据此可做出某种处理.

1.2 多层次模糊综合评判模型

对于实际评判问题,往往需要考虑很多因素,且因素之间还有不同的类别和层次,因此需要建立多层次模糊综合评判模型.具体建模步骤为 (a)对因素集  $U=\{u_1,u_2,\dots,u_n\}$  进行划分得  $U/P=\{U_i\} i=1,2,\dots,k$ ,  $U_i$  中含有  $n_i$  个因素,记为  $U_i=\{u_{i1},u_{i2},\dots,u_{in_i}\}$ .这里  $\sum_{i=1}^k n_i=n$ . (b)对每个  $U_i$  用单层次模糊综合评判模型作模糊综合评判  $B_i=A_i\circ R_i (i=1,2,\dots,k)$ . (c)由  $B_i (i=1,2,\dots,k)$  建立高一层次的综合评判矩阵

$$R=(B_1\ B_2\ \dots\ B_k)^T=(A_1\circ R_1\ A_2\circ R_2\ \dots\ A_k\circ R_k)^T\tag{2}$$

设  $U_1,U_2,\dots,U_k$  的权向量为  $A=(a_1,a_2,\dots,a_n)$ ,其中  $a_i (i=1,\dots,n)$  为因素  $u_i$  对应的权重  $0\leq a_i\leq 1$  且  $\sum_{i=1}^n a_i=1$  则 2 层评判模型为

$$B=A\circ R=A\circ(B_1\ B_2\ \dots\ B_k)=(b_1,b_2,\dots,b_m)\tag{3}$$

依次可对 3 层或更多层综合评判模型进行综合评判.

2 拱坝安全度的模糊综合评判

2.1 因素集  $U$  和评判集  $V$  的选取

在拱坝安全评判中,首先是因素集  $U$  的选取问题,若考虑荷载集,则对于各种坝型,其评判矩阵  $R$  是不同的,且  $R$  难以建立.因此,这里撇开荷载而仅考虑直接体现大坝安全性的效应集,如以厚高比、柔度和最大拉应力等作为因素.

厚高比是衡量拱坝厚薄的一项指标及确定拱坝体型特征的重要参数.取小湾、李家峡、Kolnbrein 和 Maplasset 等国内外拱坝样本数  $n=50$ ,建立统计模型.设单位坝高的顶拱跨度  $L/H$  与单位坝高的底厚  $B/H$  符合线性相关<sup>[2]</sup>,通过线性回归,可得 95% 置信概率下厚高比的置信区间下限为

$$(B/H)_{\min}=0.0052+0.0596L/H\tag{4}$$

本文选取相对比值  $u_1=(B/H)/(B/H)_{\min}$  作为模糊综合评判模型的第 1 个因素.其中  $(B/H)_r$  为坝体实际厚高比.

瑞士坝工专家 Lombardi 建议用柔度系数  $C$  对拱坝厚度做经验性判断,并定义<sup>[1]</sup>

$$C=A^2/VH\tag{5}$$

式中: $A$ ——拱坝中剖面面积; $V$ ——拱坝体积; $H$ ——最大坝高.对于相同的坝高来说, $C$  越小,坝越安全.应用上述统计模型,通过回归分析可得 95% 置信概率下的最大柔度为

$$C_{\max}=\begin{cases}(10.42\sim13.86)L_m^{0.384} & H>150\text{ m} \\ (9.62\sim12.79)L_m^{0.766} & 70\text{ m}<H<150\text{ m}\end{cases}\tag{6}$$

本文选取相对比值  $u_2=C_r/C_{\max}$  作为模糊综合评判模型的第 2 个因素.其中  $C_r$  为坝体实际柔度系数.

对于混凝土拱坝来说,坝体内出现的最大主拉应力是评判坝体安全的一个非常重要的控制标准,故本文选取  $u_3=\sigma_1$  作为模糊综合评判模型的第 3 个因素.

因此,评判对象的因素集为  $U=\{u_1,u_2,u_3\}$ .拱坝是高度超静定结构,除上述影响因素外,还有诸如受地质影响的坝肩稳定等因素,这些因素的影响相对较易控制.

评判集选为  $V=\{v_1,v_2,v_3,v_4\}=\{\text{安全,较安全,较不安全,不安全}\}$ .

2.2 隶属函数的建立

设各因素对各等级的概率密度函数为  $\rho(x)$ ,即可求出对应的隶属函数  $\mu(x)$ .这个问题可转化为下述有约束的优化问题<sup>[3]</sup>.

$$\min_{\mu} J(\mu)=\frac{1}{2}\int_{-\infty}^{+\infty}\mu^2(x)\rho(x)dx\tag{7}$$

约束

$$\alpha(\mu) = C - \int_{-\infty}^{+\infty} \mu(x)p(x)dx \leq 0 \tag{8}$$

且

$$\mu \in \Omega = \{ \mu(x) \mid 0 \leq \mu(x) \leq 1 \}$$
 (9)

根据泛函极值,建立

$$L(\mu, \lambda) = \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{+\infty} \mu^2(x)dx + \lambda \left\{ C - \int_{-\infty}^{+\infty} \mu(x)p(x)dx \right\}$$
 (10)

使  $L(\mu, \lambda)$  趋于最小,其充要条件为  $L'_\mu(\mu - \mu^*) \geq 0$ ,其中  $\mu^*$  为最优解,  $\lambda(\lambda \geq 0)$  为 Lagrange 乘子.故

$$\mu(x) = \begin{cases} \lambda p(x) & \lambda p(x) < 1 \\ 1 & \lambda p(x) \geq 1 \end{cases}$$
 (11)

本文选取  $p(x) = e^{ax+b}$  将其代入式(11)并做适当修正<sup>[3]</sup>即得因素  $u_1, u_2, u_3$  的隶属函数. 因素  $u_1$  的隶属函数为

$$\mu_{v_1}(u_1) = \begin{cases} 1 & x > 1.2 \\ e^{x-1.2} & x \leq 1.2 \end{cases}$$

$$\mu_{v_2}(u_1) = \begin{cases} e^{1.2-x} & x \geq 1.2 \\ 1 & 1.0 < x < 1.2 \\ e^{x-1.0} & x \leq 1.0 \end{cases}$$

$$\mu_{v_3}(u_1) = \begin{cases} e^{1.0-x} & x \geq 1.0 \\ 1 & 0.7 < x < 1.0 \\ e^{x-0.7} & x \leq 0.7 \end{cases}$$

$$\mu_{v_4}(u_1) = \begin{cases} 1 & x < 0.7 \\ e^{0.7-x} & x \geq 0.7 \end{cases}$$

因素  $u_2$  的隶属函数为

$$\mu_{v_1}(u_2) = \begin{cases} 1 & x < 0.5 \\ e^{0.5-x} & x \geq 0.5 \end{cases}$$

$$\mu_{v_2}(u_2) = \begin{cases} e^{x-0.5} & x \leq 0.5 \\ 1 & 0.5 < x < 0.8 \\ e^{0.8-x} & x \geq 0.8 \end{cases}$$

$$\mu_{v_3}(u_2) = \begin{cases} e^{x-0.8} & x \leq 0.8 \\ 1 & 0.8 < x < 1.0 \\ e^{1.0-x} & x \geq 1.0 \end{cases}$$

$$\mu_{v_4}(u_2) = \begin{cases} e^{x-1.0} & x \leq 1.0 \\ 1 & x > 1.0 \end{cases}$$

因素  $u_3$  的隶属函数为

$$\mu_{v_1}(u_3) = \begin{cases} 1 & x < 0.5 \\ e^{0.5-x} & x \geq 0.5 \end{cases}$$

$$\mu_{v_2}(u_3) = \begin{cases} e^{x-0.5} & x \leq 0.5 \\ 1 & 0.5 < x < 1.5 \\ e^{1.5-x} & x \geq 1.5 \end{cases}$$

$$\mu_{v_3}(u_3) = \begin{cases} e^{x-1.5} & x \leq 1.5 \\ 1 & 1.5 < x < 2.5 \\ e^{2.5-x} & x \geq 2.5 \end{cases}$$

$$\mu_{v_4}(u_3) = \begin{cases} e^{x-2.5} & x \leq 2.5 \\ 1 & x > 2.5 \end{cases}$$

2.3 各因素权重的确定

各因素权重的确定方法有专家估测法、指标值法、层次分析法和二元相对比较法等. 专家估测法中的各因素的权值都由专家做出主观判断,是一种简单易行且很实用的方法. 笔者首先让专家就影响大坝安全的3个因素给出最合适的权重,然后采用加权统计法确定权重,得

$$A = (0.27 \quad 0.29 \quad 0.44)$$

(12)

切合实际的权重分配会更加真实地反映各参评因素的相对重要性,使评判结果更加切合实际. 因此,在权重分配过程中应最大限度地减少人的主观因素的影响.

3 实例分析

3.1 李家峡拱坝

李家峡大坝为三圆心等厚双曲混凝土拱坝,最大坝高155m,坝顶宽8m,坝底宽45m,厚高比为0.29,坝顶中心弧长431.5m,最大主拉应力1.10MPa. 根据式(4)(6)可确定因素  $u_1$  和  $u_2$ . 故因素集为  $U = \{u_1, u_2, u_3\} = \{1.70, 1.82, 1.10\}$ ,评判集取为  $V = \{v_1, v_2, v_3, v_4\} = \{\text{安全}, \text{较安全}, \text{较不安全}, \text{不安全}\}$ .

根据各因素隶属函数求出各因素对4个安全级别的隶属度,建立模糊评判矩阵  $R$  并进行归一化处理,则

$$R = \begin{bmatrix} 0.40 & 0.25 & 0.19 & 0.16 \\ 0.13 & 0.17 & 0.21 & 0.49 \\ 0.21 & 0.39 & 0.26 & 0.14 \end{bmatrix}$$

故模糊综合评判模型为

$$B = A \circ R = (0.27 \quad 0.39 \quad 0.26 \quad 0.29)$$

这里采用主因素决定型  $M(\wedge, \vee)$  模型进行计算. 因此, 由计算结果可知, 该拱坝安全概率为 27%, 较安全概率为 39%, 较不安全概率为 26%, 不安全概率为 29%. 根据最大隶属度原则, 该大坝的安全度为“较安全”.

3.2 Kolnbrein 拱坝

Kolnbrein 大坝为双曲混凝土拱坝, 最大坝高 200 m, 坝顶宽 14 m, 坝底宽 36 m, 厚高比为 0.102, 坝顶中心弧长 620 m, 最大主拉应力 2.0 MPa. 根据式(4)(6)可确定因素  $u_1$  和  $u_2$ . 故因素集为  $U = \{u_1, u_2, u_3\} = \{0.94, 0.95, 2.00\}$ , 评判集取为  $V = \{v_1, v_2, v_3, v_4\} = \{\text{安全}, \text{较安全}, \text{较不安全}, \text{不安全}\}$ .

根据各因素隶属函数求出各因素对 4 个安全级别的隶属度, 建立模糊评判矩阵  $R$  并进行归一化处理, 则

$$R = \begin{bmatrix} 0.22 & 0.27 & 0.29 & 0.22 \\ 0.18 & 0.25 & 0.29 & 0.28 \\ 0.09 & 0.25 & 0.41 & 0.25 \end{bmatrix}$$

故模糊综合评判模型为

$$B = A \circ R = (0.22 \quad 0.27 \quad 0.41 \quad 0.28)$$

这里仍采用主因素决定型  $M(\wedge, \vee)$  模型进行计算. 因此, 由计算结果可知, 该拱坝安全概率为 22%, 较安全概率为 27%, 较不安全概率为 41%, 不安全概率为 28%. 根据最大隶属度原则, 该大坝的安全度为“较不安全”. 这一结论与 Kolnbrein 拱坝 1977 年首次蓄水就产生严重裂缝, 随后采取大规模修复措施的实际情况相符.

4 结 束 语

拱坝的安全度评判是一个复杂而又庞大的系统工程, 其评判理论与手段也随着人们对拱坝客体认识的广度和深度的增强而不断地加以完善. 模糊数学在拱坝安全评判中的应用就是一种尝试. 本文实例分析结果表明, 该方法简便易行, 评判结果符合实际, 是拱坝安全综合评判比较有效的一种方法.

参考文献 :

[1] 黄健元. 模糊集及其应用[M]. 银川: 宁夏人民教育出版社, 2000. 157—170.  
[2] 高健, 计家荣, 黄海燕. 拱坝体型设计的统计模型[J]. 河海大学学报, 1997, 25(2): 58—64.  
[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. 188—215.

Fuzzy comprehensive evaluation model for arch dam safety

GAO Jian<sup>1</sup>, HUANG Hai-yan<sup>2</sup>, ZHOU Deng-feng<sup>1</sup>

(1. Department of Water Conservancy, Zhejiang Water Conservancy and Hydropower College, Hangzhou 310016, China;  
2. College of Civil Engineering, Hohai Univ., Nanjing 210098, China)

**Abstract :** An introduction is given to the method and steps of fuzzy mathematics applied to safety evaluation of arch dams, and a fuzzy comprehensive evaluation model, with the thickness-height ratio, flexibility, and the maximal tensile stress of arch dams taken into account, is established based on the statistical model for shape type design of arch dams. The model is applied to safety evaluation of several arch dams, and the results show that the model is easy to use, and the evaluated results are in good accordance with the reality.

**Key words :** arch dam; thickness-height ratio; flexibility; fuzzy comprehensive evaluation