

基于未确知网络分析法的土石坝风险分析研究

李宗坤¹, 叶青¹, 李锋^{1,2}

(1. 郑州大学 水利与环境学院, 河南 郑州 450001; 2. 河南省水利科学研究院, 河南 郑州 450003)

摘 要: 针对风险分析依赖于专家对未确知信息的判断, 将未确知测度综合评价模型与网络分析法相结合, 提出了未确知网络分析法. 详细介绍了该法的基本理论, 并将其应用于实际工程中. 评价结果与模糊层次分析法的结果相一致, 验证了未确知网络分析法在土石坝风险分析中应用的可行性和合理性.

关键词: 风险分析; 未确知测度; 网络分析法; 土石坝

中图分类号: TV641

文献标志码: A

doi:10.3969/j.issn.1671-6833.2012.01.003

0 引言

我国已建成大坝 8.7 万余座, 90% 以上是土石坝^[1-2]. 由于历史原因, 有相当一部分土石坝存在各种病险隐患, 对人民生命财产和经济发展形成潜在威胁. 近几年我国政府开始对病险水库进行除险加固, 但由于国家经济能力有限, 不可能同时对所有病险水库加固. 若通过土石坝风险评估工程风险, 对工程的安全性作出评价, 按照轻重缓急对病险水库进行除险加固, 将达到合理运用国家资金的目的.

土石坝风险分析是专家根据实测资料、计算分析和工程实际情况对工程进行评价, 评价结果取决于专家对工程主观认识的准确性和完整性. 未确知信息是指由于决策者所掌握的证据尚不足以确定事物的真实状态和数量关系, 从而带来纯主观认识上的不确定性. 土石坝风险分析方法有很多, 包括层次分析法、模糊综合评价法、模糊层次分析法、灰色聚类分析法等各有各的优缺点, 但都未曾从未确知性这个角度解决风险分析问题. 层次分析法(AHP)^[3-4] 简便、灵活, 把复杂问题分解成组成因素, 并按支配关系形成层次结构, 各层次中元素是相互独立的, 而土石坝工程是复杂系统, 元素间往往都是相关的. 模糊综合评价法^[5] 考虑了评价的模糊性, 实现定性分析和定量分析综合集成, 但其作为状态集函数的模糊隶属度不满足“归一性条件”及“可加性原则”, 因而评价结果有待进一步分析. 最大隶属度识别准则不适用

于有序评价空间的识别和排序^[6].

针对以上问题, 笔者将未确知测度综合评价模型^[7]与能充分考虑土石坝工程元素相关性的网络分析法(ANP)^[8-9]相结合, 提出了未确知网络分析法. 运用未确知数学将专家对定性指标的评价进行综合, 由未确知测度函数求出定量和定性指标满足“归一性”和“可加性”的单指标测度, 与网络分析法求出的权重相结合, 得多指标综合测度, 最后按置信度识别准则对土石坝工程进行风险评价.

1 土石坝风险分析的未确知网络分析法

1.1 评价指标体系

根据我国最新的溃坝失事统计及原因分析^[1], 结合 SL 258—2000《水库大坝安全评价导则》, 确定出我国土石坝风险因素^[10], 并构建评价指标体系, 如图 1 所示.

1.2 未确知测度综合评价模型^[11]

以土石坝为评价对象 x , 有 23 个评价指标 I_1, I_2, \dots, I_{23} , 则 x 可表示一个 23 维向量 $x = (x_1, \dots, x_{23})$, 其中 x_i 表示研究对象 x 关于评价指标 I_i 的测量值. 对每个 x_i 有 3 个评价等级(低风险, 一般风险, 高风险), 则评价空间为 $U = \{c_1, c_2, c_3\}$. 此评价空间满足: $c_1 < c_2 < \dots < c_p$, 是有序分割的.

(1) 单指标测度确定

令 $\mu_{ik} = \mu(x_i \in c_k)$ 表示测量值 x_i 属于第 k 个评价等级 c_k 的程度, 若 μ 满足

收稿日期: 2011-09-20; 修订日期: 2011-11-12

基金项目: 河南省重大公益性科研计划资助项目(08110091200)

作者简介: 李宗坤(1961-), 男, 河南南阳人, 博士, 郑州大学教授, 博导, 主要研究方向为大坝安全性评价与水工结构计算分析, E-mail: lizongkun@zzu.edu.cn.

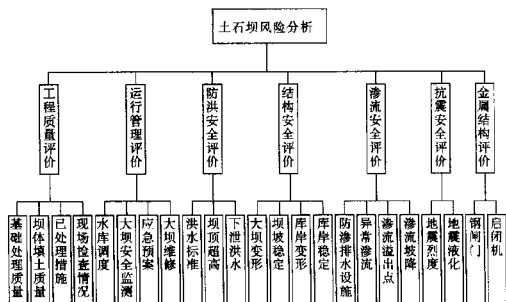


图1 土石坝风险分析评价指标体系

Fig.1 Dam risk analysis' index system

$$0 \leq \mu_{ik} \leq 1, (i = 1, 2, \dots, n; k = 1, 2, \dots, p) \quad (1)$$

$$\mu(x_i \in U) = 1, (i = 1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

$$\mu(x_i \in \bigcup_{l=1}^k c_l) = \sum_{l=1}^k \mu(x_i \in c_l), \quad (i = 1, 2, \dots, n; k = 1, 2, \dots, p) \quad (3)$$

称 μ 为未确知测度. 式(2)表示“归一性”; 式(3)表示“可加性”.

土石坝风险分析评价指标 I_i 包括定量和定性两种. 定量指标往往由实测或计算分析得到测量值 x_i , 将其代入未确知测度函数, 就可得定量指标的单指标测度值. 未确知测度函数由指标中具有代表性的数值作为评价等级的划分标准构造而成.

定性指标由专家组打分, 计算出专家组综合打分值, 将其代入未确知测度函数即得定性指标的单指标测度值. 考虑到专家意见是未确知信息, 笔者采用未确知数学中的未确知有理数^[12]计算专家组综合打分值, 专家组打分可表示为

$$f(x) = \begin{cases} \alpha_1 & x_1 = g_1 \\ \vdots & \vdots \\ \alpha_k & x_k = g_k \\ 0 & x \notin \{g_1, \dots, g_k\} \text{ 且 } x \in G, \end{cases} \quad (4)$$

式中: g_i 表示专家按10分制的打分值; 函数值表示打分为 g_i 的专家可信度之和, 每个专家的可信度可依据专家的职称、学历、工龄和专业方向4个方面按10分制打分确定. 如有 n 位专家组成的专家组, 他们的信任度按式(5)计算.

$$\bar{\alpha}_i = \alpha_i / \sum_{k=1}^n \alpha_k, (i = 1, 2, \dots, n), \quad (5)$$

式中: $\alpha_i = \sum_{j=1}^4 g_j / 40$, g_j 表示专家在第 j 个方面的得分.

求出未确知有理数的期望 $E(f(x)) =$

$$\sum_{i=1}^k \alpha_i x_i, \text{ 即为专家组的综合打分值.}$$

(2) 多指标综合测度

令 $\mu_k = \mu(x \in c_k)$ 表示评价对象 x 属于第 k 个评价等级 c_k 的程度, 则

$$\mu_k = \sum_{i=1}^n w_i \mu_{ik}, (k = 1, 2, \dots, p), \quad (6)$$

式中: w_i 表示指标 I_i 的权重, 满足 $0 < w_i < 1$,

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

(3) 置信度识别准则

在求出多指标综合测度的情况下, 若 $\{c_1, c_2, \dots, c_p\}$ 是评价空间 U 的一个有序分割, 则可以引入置信度识别准则. 设 λ 为置信度, $\lambda > 0.5$, 常取0.6或0.7. 当 $c_1 < c_2 < \dots < c_p$, 令 $k_0 = \min(k: \sum_{i=1}^k \mu_i \geq \lambda, k = 1, 2, \dots, p)$, 则认为 x 属于第 k_0 个评价类 c_{k_0} .

1.3 网络分析法确定指标权重

在土石坝工程综合风险分析系统中, 指标权重非常重要, 笔者采用网络分析法确定. 网络分析法(ANP)的特点是, 考虑了各因素之间的相互影响, 利用加权超矩阵求因素权重.

1.3.1 ANP结构原理

ANP将系统元素划分为两大部分. 第一部分称为控制层, 包括问题目标及决策准则. 决策准则彼此独立, 其权重可用层次分析法(AHP)^[4]求得. 第二部分为网络层, 它是由所有受控制层支配的元素组成, 元素间不独立. 网络层中元素相对于每个准则的排序可以按间接优势度求得, 即在准则下, 进行两个元素对第三个元素(称为次准则)的影响程度比较. 土石坝风险分析网络结构如图2所示.

1.3.2 超矩阵与加权超矩阵的构造

设ANP的控制层中有准则 P_1, P_2, \dots, P_m , 网络层有元素组 C_1, C_2, \dots, C_n , 其中 C_i 中有元素 $e_{i1}, e_{i2}, \dots, e_{in_i}$. 以控制层元素 P_i 为准则, 以 C_j 中元素 e_{jh} ($h = 1, \dots, n_j$)为次准则, 元素组 C_i 中元素按其影响 e_{jh} 的影响力大小进行间接优势度比较, 则构造判断矩阵为: 在准则 P_i 下

次准则	e_{jh}	e_{j1}	e_{j2}	\dots	e_{jn_i}	归一化物征向量
e_{i1}		a_{11}	a_{12}	\dots	a_{1n_i}	$w_{i1}^{(jh)}$
e_{i2}		a_{21}	a_{22}	\dots	a_{2n_i}	$w_{i2}^{(jh)}$
\vdots		\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
e_{in_i}		a_{n_i1}	a_{n_i2}	\dots	$a_{n_in_i}$	$w_{in_i}^{(jh)}$

式中: a_{gk} 表示 e_{ig} 对 e_{ik} 关于 e_{jh} 的间接优势度, 用1

~ 9 和 $1/2 \sim 1/9$ 表示;排序向量 $w = (w_{i1}^{(j1)}, \dots, w_{in_i}^{(jn_i)})^T$ 由判断矩阵按特征根法和归一化得,表示元素组 C_i 中元素 $e_{i1}, e_{i2}, \dots, e_{in_i}$ 对 e_{jk} 的影响度. 记

$$W_{ij} = \begin{bmatrix} w_{i1}^{(j1)} & w_{i1}^{(j2)} & \dots & w_{i1}^{(jn_i)} \\ w_{i2}^{(j1)} & w_{i2}^{(j2)} & \dots & w_{i2}^{(jn_i)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ w_{in_i}^{(j1)} & w_{in_i}^{(j2)} & \dots & w_{in_i}^{(jn_i)} \end{bmatrix}_{n_i \times n_j}$$

W_{ij} 的列向量就是 C_i 中元素 $e_{i1}, e_{i2}, \dots, e_{in_i}$ 对 C_j 中元素 $e_{j1}, e_{j2}, \dots, e_{jn_j}$ 的影响程度排序向量. 这样最终可获得 P_i 下, 超矩阵 $W = (W_{ij})_{n \times n}$, 其列向量表示所有元素组中元素对某个元素的影响程度排序向量.

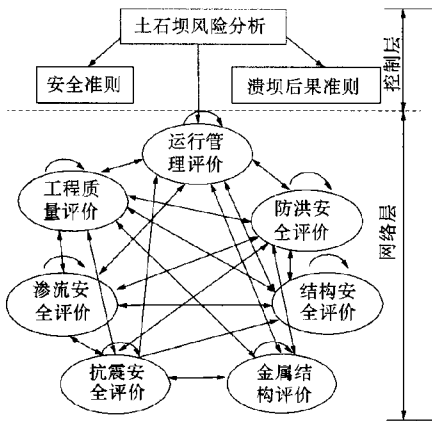


图2 土石坝风险分析网络结构

Fig.2 Dam risk analysis' network struction

W_{ij} 为列归一化, 但超矩阵 W 却不是列归一化, 故引入权矩阵. 以 P_i 为准则, C_j 为次准则, 对元素组 C_1, C_2, \dots, C_n 进行重要性比较, 得排序向量 $(a_{1j}, a_{2j}, \dots, a_{nj})^T$. 由此得到权矩阵

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix}_{n \times n}$$

对超矩阵 W 加权, 得 $\bar{W} = (\bar{W}_{ij})$, 其中 $\bar{W}_{ij} = a_{ij} W_{ij}$.

称 \bar{W} 为加权超矩阵, 其列和为 1.

1.3.3 极限相对排序向量计算原理

设加权超矩阵 \bar{W} 的元素为 w_{ij} , 则 w_{ij} 的大小反映了元素 i 对元素 j 的一步优势度. i 对 j 的优势度还可用 $\sum_{k=1}^n w_{ik} w_{kj}$ 得到, 称为二步优势度, 它就是 W^2 的元素, 仍是列归一化. 当 $W^* = \lim_{x \rightarrow \infty} W^x$ 存在时, W^* 的各列相同, 就是 P_i 下网络层中各元素的极限相对排序向量, 即为各风险因素的权重.

2 实例分析

赤竹径水库是一座以灌溉为主, 兼顾防洪、发电的中型水库, 总库容 1 782.4 万 m^3 , 工程等别为三等, 主要建筑物属 3 级建筑物, 大坝为均质土坝, 1985 年底建成投产运行至今. 水库目前出现的主要问题有: 正常蓄水后靠右坝头的后坡发现湿润情况. 1990 年湿润面积扩大到 400 m^2 ; 1993 年湿润面积达 4 000 m^2 ; 1994 年 9 月 ~ 10 月, 湿润面积达 6 600 m^2 . 1995 年 4 月 ~ 9 月, 对大坝进行劈裂灌浆, 最初两年浸润线下降, 两年后浸润线又开始上升, 2004 年后, 又开始出现较大范围的渗水区.

2.1 单指标测度确定

定量指标以坝顶超高为例. 根据 SL 252—2000《水利水电工程等级划分及洪水标准》, 确定其未确知测度函数, 如图 3 所示. 计算得 $K = -0.41$, 将其代入未确知测度函数得单指标测度为 (0, 0.4, 0.6).

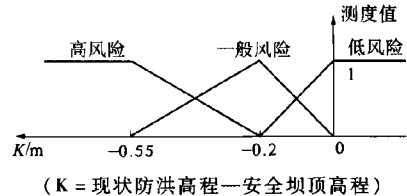


图3 坝顶超高未确知测度函数

Fig.3 The unascertained measure function of freeboard

定性指标以基础处理情况为例, 专家组打分表示为

$$f(x) = \begin{cases} 0.6 & x_1 = 3 \\ 0.4 & x_2 = 4 \\ 0 & x \notin \{3, 4\} \text{ 且 } x \in G \end{cases} \quad (7)$$

求出未确知有理数的期望 $E(f(x)) = 0.6 \times 3 + 0.4 \times 4 = 3.4$, 即为专家组的综合打分值, 代入未确知测度函数, 如图 4 所示, 得单指标测度为 (0, 0.47, 0.53).

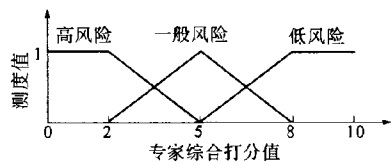


图4 基础处理情况未确知测度函数

Fig.4 The unascertained measure function of foundation treatment

同理得赤竹径水库土石坝工程 23 个风险因素的单指标测度,如表 1 所示。

2.2 ANP 法确定指标权重

运用 Super Decision 软件,根据图 2 所示的网络结构,按 ANP 法计算出以安全为准则的风险因素权重,计算模型如图 5 所示,计算结果和文献[13]中按 AHP 法计算的权重见表 2。

对比 ANP 法和 AHP 法所得权重,坝顶超高、洪水标准、坝坡稳定、异常渗流、大坝变形、库岸稳定、渗流坡降等主风险因素的排序基本一致。由于 ANP 法考虑了各风险因素间相互影响关系,而主

风险因素对其它因素的影响大,由 ANP 法计算的权重值相应增加;相反次风险因素对其他因素的影响小,权重值相应减少。因为运行管理直接影响着主风险因素,如能通过检查或监测及时发现问题,并采取有效措施,将减少溃坝的可能性,所以大坝维修、大坝安全监控等运行管理类风险因素排序上升,同样由于运行管理,闸门和启闭机的问题能被及时发现并解决,其风险将大大减少,因此由 ANP 法求得的权重值相应下降。综上所述,ANP 法由于考虑了风险因素间互相依存、反馈关系,计算的权重更符合实际情况。

表 1 赤竹径水库土石坝工程风险因素单指标测度
Tab. 1 Chi Zu-jing reservoir dam engineering's single index measure

风险因素	低风险	一般风险	高风险	风险因素	低风险	一般风险	高风险
基础处理质量	0	0.47	0.53	坝坡稳定	0	0.67	0.33
坝体填土质量	0.35	0.65	0	库岸变形	0	0.73	0.27
已处理措施	0	0.65	0.35	库岸稳定	0	0.67	0.33
现场检查情况	0	0.60	0.40	防渗排水设备	0	0.70	0.30
水库调度	0.40	0.60	0	异常渗流	0	0.25	0.75
大坝安全监测	0	0.55	0.45	渗流溢出点	0	0.45	0.55
应急预案	0	0.60	0.40	渗流坡降	0	0.61	0.39
大坝维修	0.40	0.60	0	地震烈度	0.41	0.59	0
洪水标准	0.80	0.20	0	地震液化	0	0.70	0.30
坝顶超高	0	0.40	0.60	钢闸门	0	0.30	0.70
下泄洪水	0	0.43	0.57	启闭机	0	0.40	0.60
大坝变形	0	0.71	0.29				

注:各元素满足归一性和可加性。

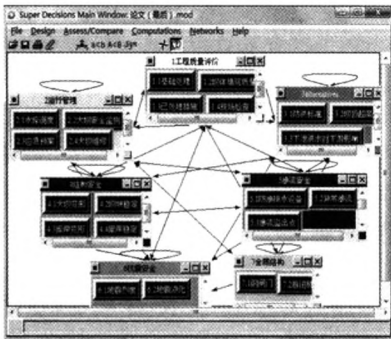


图 5 ANP 法指标权重计算模型

Fig. 5 The index weight's computational model of ANP

2.3 风险综合评价

按式(6)计算得多指标综合测度(0.136, 0.51, 0.354)。为了使评价具有可信度,取 $\lambda = 0.6$,按置信度识别准则判断该工程综合评价属于一般风险,大坝基本安全。如按最大隶属度准则判断,虽然评价结果相同,但属于一般风险的概率只

为 0.51,属于其它级别的机率很大,不满足科学性和严谨性。置信度识别准则是在满足归一性、可加性要求的未确知测度和评价空间有序分割的基础上判断,合理地解决了这个问题。

文献[13]中模糊层次分析法求得的结果为(0.2, 0.47, 0.33),属于二类坝,与未确知网络分析法的结果相一致。但无论从单指标测度或者权重计算都可以看出,未确知网络分析得出的结果更加精确、可靠。

3 结论

未确知测度综合评价模型,运用未确知数学知识将专家对定性指标的意见进行了综合,并利用未确知测度函数对定量和定性指标进行评价,满足“归一性”及“可加性”。ANP 法模拟了土石坝风险因素间的相互影响关系,求得的风险因素权重符合实际。这两种方法相结合,得出的综合评价结果合理、有效,为土石坝工程风险分析提供了一种新的方法,实例也验证了该方法的可行性。

表 2 ANP 和 AHP 计算权重对比
Tab.2 ANP and AHP' calculated weight

AHP 法的权重				ANP 法的权重			
坝顶超高	0.068 4	地震液化	0.038 4	坝顶超高	0.155 8	已处理措施	0.034 6
洪水标准	0.068 4	已处理措施	0.034 1	洪水标准	0.103 7	防渗排水设备	0.030 4
坝坡稳定	0.063 0	防渗排水设备	0.032 3	坝坡稳定	0.074 4	大坝安全监测	0.027 7
异常渗流	0.054 4	大坝维修	0.028 8	异常渗流	0.062 7	地震烈度	0.024 9
下泄洪水	0.053 2	现场检查	0.028 6	大坝变形	0.060 4	现场检查	0.022 2
大坝变形	0.048 6	大坝安全监测	0.025 2	库岸稳定	0.051 6	基础处理质量	0.022 1
库岸稳定	0.045 0	基础处理质量	0.024 2	渗流坡降	0.048 8	地震液化	0.018 3
渗流坡降	0.044 2	应急预案	0.024 0	水库调度	0.048 4	应急预案	0.017 5
水库调度	0.042 0	库岸变形	0.023 4	大坝维修	0.044 7	坝体填土质量	0.015 0
钢闸门	0.039 6	坝体填土质量	0.023 1	渗流溢出口	0.040 4	启闭机	0.014 7
启闭机	0.039 6	地震烈度	0.019 2	下泄洪水	0.036 5	钢闸门	0.009 6
渗流溢出口	0.039 1			库岸变形	0.035 5		

注:两种方法权重和均为 1.

参考文献:

[1] 何晓燕,王兆印,黄金池.中国水库大坝失事统计与初步分析[C].北京:中国水利学会,2005.321 - 330.

[2] 解家毕,孙东亚.全国水库溃坝统计及溃坝原因分析[J].水利水电技术,2009,40(12):124 - 128.

[3] THOMAS L S. Decision making-the analytic hierarchy and network processes (AHP/ANP)[J]. Journal of Systems Science and Systems Engineering, 2004, 13 (1):1 - 35.

[4] 许树柏.层次分析原理[M].天津:天津大学出版社,1988.

[5] 肖盛燮.模糊数学在土木与水利工程中的应用[M].北京:人民交通出版社,2004.

[6] 刘开第,庞彦军,吴和琴,等.模糊隶属度定义中隐含的问题[J].系统工程理论与实践,2000,20(1): 110 - 112.

[7] 陈娟,刘凌.基于熵权的未确知测度模型在湖库富营养化评价中的应用[J].河海大学学报:自然科学版,2008,36(4):452 - 455.

[8] THOMAS L S. Making and validating complex decisions with the AHP/ANP[J]. Journal of Systems Science and Systems Engineering,2005,14(1):1 - 36.

[9] 王莲芳.网络分析法(ANP)的理论与算法[J].系统工程理论与实践,2001,3:44 - 50.

[10] 束兵,徐金.模糊数学法对土石坝安全度综合评判初探[J].工程与建筑,2006,20(1):10 - 12.

[11] 万玉成.基于未确知性的预测与决策方法及其应用研究[D].南京:东南大学博士论文,2004.

[12] 刘开第,周翠英.不确定性信息数学处理及应用[M].北京:科学出版社,1999.

[13] 刘亚莲,周翠英.土石坝安全的模糊层次综合评价及其应用[J].水力发电,2010,36(5):38 - 40.

Risk Analysis of Earth-rock Dam Based on Unascertained Analytic Network Process

LI Zong-kun¹, YE Qing¹, LI Feng^{1,2}

(1. School of Water Conservancy and Environment, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Henan Province Water Conservancy Scientific Research Institute, Zhengzhou 450003, China)

Abstract: In view of the risk analysis's dependance on expert's judgment on unascertained information, a new method named unascertained-analytic network process was proposed combining unascertained measure comprehensive evaluation model with analytic network process. The basic theory was introduced in particular and the method was then applied to an earth-rock dam's risk analysis. The result is consistent with that analyzed with fuzzy analytic hierarchy process, which indicates that the proposed method is feasible and reasonable.

Key words: risk analysis; unascertained measure; analytic network process; earth-rock dam