

# 改进层次分析法在土石坝安全评价中的应用

陈 诚<sup>1</sup>,花剑岚<sup>2</sup>

(1.黄河水利职业技术学院水利系,河南 开封 475003;2.南京市水利规划设计院有限责任公司,江苏 南京 210022)

**摘要** :对影响土石坝安全的基本事件进行系统分析和研究,开发土石坝安全评价数学模型。该模型直观地反映了各基本事件之间的关系,利用概率计算理论求解土石坝溃决概率,同时引用改进层次分析法,分析各基本事件对大坝溃决的影响程度,可较好地确定各基本事件的概率权重。以陆浑水库大坝为例进行安全评价,对数学模型进行验证,结果表明该模型的模拟计算结果与目前对大坝安全评价的结论较吻合。

**关键词** :土石坝;大坝溃决;数学模型;大坝安全评价;陆浑水库大坝

中图分类号 :TV641      文献标识码 :B      文章编号 :1006-7647(2010)02-0058-05

**Application of improved analytic hierarchy process method in safety assessment of earth-rockfill dams**//CHEN Cheng<sup>1</sup>, HUA Jian-lan<sup>2</sup> 1. Department of Water Conservancy of Yellow River Conservancy Technical Institute, Kaifeng 475003, China; 2. Nanjing Water Planning and Designing Institute Co., Ltd., Nanjing 210022, China )

**Abstract** :The basic events for the safety of earth-rockfill dams were studied. A mathematical model for the safety assessment of earth-rock dams was developed. The model directly depicted the relationship among various basic events. The probability of breaking of earth-rockfill dams was solved by use of the theory of probability. The improved analytic hierarchy process method was employed to analyze the influences of the basic events on dam breaking. The probability weights of the basic events could be satisfactorily determined. Luhun Dam safety assessment was taken as an example, and the mathematical model was validated. The model results show that the simulated results agree with the current conclusions of dam safety assessment.

**Key words** :earth-rockfill dam; dam breaking; mathematical model; dam safety assessment; Luhun Dam

## 1 土石坝溃决模型的建立

传统的水库安全评价方法一般包括工程质量评价、大坝运行管理评价、防洪标准复核、结构安全评价、渗流安全评价、抗震安全复核、金属结构安全评价、大坝安全综合评价等内容<sup>[1]</sup>。这些评价方法到目前为止仍具有比较好的可靠性,但是在评价过程中涉及大量的计算问题,评价过程较复杂。影响水库安全的因素是复杂的、随机的,如一般洪水条件下在溢洪道闸门意外卡槽的情况下,也可能发生漫顶而溃坝的事件,因此水库安全评价应该采用动态的风险评价方法。笔者试图应用改进层次分析法结合概率分析方法,建立土石坝安全综合评价方法。

土石坝破坏的基本原因有漫顶、漏水、管涌破坏、滑坡、裂缝、护坡破坏、坝基破坏、施工质量差等<sup>[2]</sup>。为了分析土石坝溃决的事故模型,对上述土石坝溃决的原因进行分析归类,分析各原因之间的

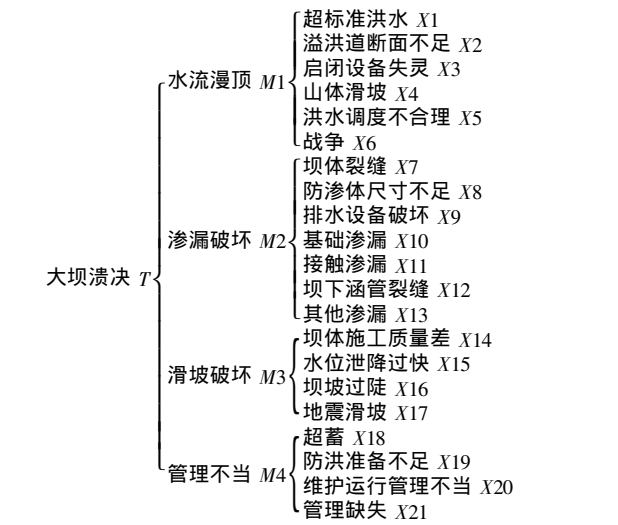
关系,层层分解,最后建立土石坝溃决的事件关系模型。一般土石坝溃决分为 4 大类,分别为水流漫顶溃决、滑坡破坏、渗漏破坏及管理不当<sup>[3]</sup>。对这 4 类破坏因素逐层分解便可得到影响土石坝溃决的基本事件 X。土石坝溃决的事件关系模型如表 1 所示。事件超标准洪水 X<sub>1</sub>、溢洪道断面不足 X<sub>2</sub>、启闭设备失灵 X<sub>3</sub> 三者之间是事件积的关系,当发生超标准洪水时,如溢洪道断面不足,可增加输水洞、泄洪洞泄洪,但如果输水洞、泄洪洞闸门失灵,可能因溢洪道断面不足而发生洪水漫顶事件。其他事件一旦发生就可能引发相应的中间事件,事件间的关系为事件和的关系。

## 2 土石坝溃决概率计算

### 2.1 土石坝溃决概率计算公式

根据土石坝溃决事件关系,模型再利用概率计算方法即可得出溃决概率为

表1 土石坝溃决事件关系模型



$$Q_T = 1 - (1 - q_1 q_2 q_3 \text{ \textasciitilde } 1 - q_4 \text{ \textasciitilde } 1 - q_5 \text{ \textasciitilde } 1 - q_6) \cdot (1 - q_7 \text{ \textasciitilde } 1 - q_8 \text{ \textasciitilde } 1 - q_9 \text{ \textasciitilde } 1 - q_{10} \text{ \textasciitilde } 1 - q_{11}) \cdot (1 - q_{12} \text{ \textasciitilde } 1 - q_{13} \text{ \textasciitilde } 1 - q_{14} \text{ \textasciitilde } 1 - q_{15}) \cdot (1 - q_{16} \text{ \textasciitilde } 1 - q_{17} \text{ \textasciitilde } 1 - q_{18} \text{ \textasciitilde } 1 - q_{19}) \cdot (1 - q_{20} \text{ \textasciitilde } 1 - q_{21})$$

不同的水库枢纽 ,同一基本事件 ,发生的概率不同 ,概率的权重也不尽相同。考虑概率权重后 ,土石坝溃决概率为

$$\bar{Q}_T = 1 - (1 - q_1' q_2' q_3' \text{ \textasciitilde } 1 - q_4' \text{ \textasciitilde } 1 - q_5') \cdot (1 - q_6' \text{ \textasciitilde } 1 - q_7' \text{ \textasciitilde } 1 - q_8' \text{ \textasciitilde } 1 - q_9') \cdot (1 - q_{10}' \text{ \textasciitilde } 1 - q_{11}' \text{ \textasciitilde } 1 - q_{12}') \cdot (1 - q_{13}' \text{ \textasciitilde } 1 - q_{14}' \text{ \textasciitilde } 1 - q_{15}') \cdot (1 - q_{16}' \text{ \textasciitilde } 1 - q_{17}' \text{ \textasciitilde } 1 - q_{18}') \cdot (1 - q_{19}' \text{ \textasciitilde } 1 - q_{20}' \text{ \textasciitilde } 1 - q_{21}')$$

其中  $q_i' = q_i p_i$   
式中 : $q_i$  为基本事件发生的概率 ; $p_i$  为基本事件概率的权重。

在上述模型中各事件之间的层次关系清楚 ,不同事件对溃坝作用的程度不同 ,采用改进层次分析法可求出各事件在溃坝概率分析中的权重大小。由于事件权重的大小取决于专家评委会对中间事件的相对重要性评估值 ,该评估值与大坝实际状况、水文状况变化有关 ,概率权重具有动态性 ,因此评价结论也只能反映大坝某一历史阶段的安全程度<sup>[4]</sup>。

2.2 用层次分析法计算土石坝溃决概率权重

2.2.1 构造判断矩阵 B

层次分析法是美国著名运筹学家 T L Saaty 创立的一种新的多准则决策方法 ,已被广泛应用于许多难以完全用定量方法来分析的复杂系统。层次分析法通过分析复杂系统所包含的因素及其相互关系 ,将问题分解为不同的要素 ,并将这些要素分为不

同的层次 ,从而形成一个多层次的分析结构模型<sup>[5]</sup>。计算中最关键的步骤就是构造判断矩阵 ,判断矩阵表示针对上一层次某一单元(元素) ,本层次与之有关单元之间相对重要性的比较 ,写成判断矩阵的形式。假定  $P_1, P_2, \dots, P_n$  个方案以准则  $C_1$  来进行两两对比 ,评比结果用判断矩阵  $B$  表示 ,则

$$B = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \dots & b_{1n} \\ b_{21} & b_{22} & \dots & b_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{n1} & b_{n2} & \dots & b_{nn} \end{bmatrix}$$

判断矩阵  $B$  具有如下特性 :①  $b_{ii} = 1$  ;②  $b_{ij} = 1/b_{ji}$  ( $i, j = 1, 2, \dots, n$ ) ;③  $b_{ij} = b_{ik}/b_{jk}$  ( $i, j, k = 1, 2, \dots, n$ ) 。 $b_{ij}$  表示第  $i$  个方案与第  $j$  个方案比较其重要程度的标度值。 $b_{ij}$  值应根据资料数据、专家意见和系统分析人员的经验经过反复研究后确定。只要矩阵中的数据符合上述特性 ,就说明判断矩阵具有完全的一致性。

2.2.2 构造最优传递矩阵 O

根据  $O_{ij} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (b_{ik} + b_{kj})$  ,计算最优传递矩阵如下 :

$$O = \begin{bmatrix} o_{11} & o_{12} & \dots & o_{1n} \\ o_{21} & o_{22} & \dots & o_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ o_{n1} & o_{n2} & \dots & o_{nn} \end{bmatrix}$$

2.2.3 确定一致性矩阵 K

利用  $k_{ij} = \exp(-o_{ij})$  可求出一致性矩阵如下 :

$$K = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & \dots & k_{1n} \\ k_{21} & k_{22} & \dots & k_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ k_{n1} & k_{n2} & \dots & k_{nn} \end{bmatrix}$$

2.2.4 求权重矩阵 P\_T

利用方根法求出特征向量 :  
 $P = (p_1, p_2, \dots, p_i, \dots, p_n)$   
其中  $p_i = \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n o_{ij}}$  ,再将特征向量归一化 , $p_{Ti} = \frac{p_i}{\sum_{i=1}^n p_i}$  ,得到权重矩阵 :  
 $P_T = (p_1, p_2, \dots, p_n)$

3 以陆浑水库为例进行大坝安全评价

3.1 陆浑水库溃坝基本事件

陆浑水库溃坝的主要基本事件有超标准洪水、坝基管涌、主坝和西坝头存在渗流稳定问题、大坝上

游坡滑坡等 21 种 ,这里仅对主要事件做简要分析。

3.1.1 超标准洪水漫顶

超标准洪水是当暴雨中心在水库上游造成库水位猛涨时可能出现的一种漫溢险情。根据历史资料的不完全统计 ,从公元前 184 年到 1949 年新中国成立之前的 2 133 年间共发生大洪水 13 次 ,给伊洛河流域两岸人民的生命财产均造成了巨大的损失。公元 271 年 ,洛阳等地发生特大洪水。公元 223 年的洪水洪峰流量最大 ,据推算 ,伊河龙门流量达 20 000 m<sup>3</sup>/s。洪水属于尖瘦型洪峰类型 ,陡涨陡落。

陆浑水库建库以来 ,发生过“ 75·8 ”和“ 82·7 ” 2 次较大洪水 ,1975 年 8 月上旬水库遭遇了建库以来最大的暴雨洪水 ,最大 120 h 流域平均降雨量为 322.6 mm ,最大入库流量为 5 640 m<sup>3</sup>/s。1982 年 7 月底至 8 月初 ,水库遭遇了建库以来的第 2 次大洪水。陆浑站 5 d 累计雨量为 766.2 mm ,其中 7 月 29 日最大日雨量达 528.7 mm。该次洪水是个复峰 ,第 1 个峰的洪水最大入库流量为 5 280 m<sup>3</sup>/s ,第 2 个峰的洪水东湾站实测洪峰流量为 3 500 m<sup>3</sup>/s。

3.1.2 坝基管涌破坏

由于水库坝基基岩构造复杂 ,有 6 条顺河断层 (其中最大的 F<sub>5</sub> 断层宽 40 m) ,且基岩裂隙也比较发育 ,原设计未对基岩采取灌浆处理 ,加之河床底部 2 m 厚的砂卵石中粒径 2 cm 以下的细粒少 ,截水槽黏土与砂卵石之间 30 cm 厚的反滤层是否能够满足反滤要求尚不能确定。因此 ,汛期高水位时发生渗透破坏形成管涌的可能性存在 ,一旦发生这一情况 ,其表现主要是滤水坝址附近的河床砂、砾石层出现单点或多点式翻砂冒水或橡皮泥现象。

3.1.3 大坝上游坡滑坡

当地震或库水位骤降造成大坝上游坡滑坡时 (黏土斜墙上的砂卵石保护层沿斜墙下滑) ,应立即进行抢护 ,防止水位上涨后风浪冲击淘刷斜墙<sup>[6]</sup>。陆浑水库上游坝坡系混凝土块体护坡 ,比一般块石护坡抗风浪能力强。但坝体截渗体为黏土斜墙 ,在斜墙的前面铺有不等厚度的天然砂、砾石料层 ,其外层是按设计铺设的反滤层。产生滑坡的可能条件是 :当水库遇到紧急情况 ,必须使水库高水位骤降时 ,如果来不及排水 ,就有可能引起黏土斜墙前面反滤料层及混凝土块护坡沿斜墙面向下滑塌 ,造成黏土斜墙外露 ,受风浪冲击危及大坝安全。

3.1.4 主坝和西坝头存在渗流稳定问题

东、西坝头或坝肩部位因上游防渗体薄弱 ,在高水位下可能会出现渗漏破坏等。东坝肩至灌溉洞间

的地带宽约 200 m ,在高程 295 m 以下为基岩 ,295 ~ 297 m 间为一天然砂、砾石层 ,再往上为原黏土层。砂、砾石层上游进口处接大坝斜墙设置了底宽为 4 m 的黏土截渗墙 ,用以防止砂、砾石层的渗流破坏。

3.1.5 突发性故障

当泄水闸门因发生突发性故障而不能及时泄洪时 ,也可能给水库带来灭顶之灾。陆浑水库现有 4 类泄水建筑物 ,即溢洪道、泄洪洞、灌溉洞、输水洞。最大总泄量为 5 622 m<sup>3</sup>/s ,这 4 大类建筑物能否安全运用 ,关系到水库的安危 ,在闸门启闭中可能发生突发性故障 ,其一是启闭电源中断造成闸门无法启闭 ;其二是闸门机电设施发生故障造成启闭困难。这 2 种情况的发生都将给水库的安全带来致命的威胁。

3.2 确定各事件概率权重值

溃坝事件实际上是一个系统各基本事件共同作用的结果。影响土石坝溃坝的因素很多 ,各因素之间不是孤立的 ,而是相互作用的 ,是多层次的错综复杂的 ,这些因素具有很大的不确定性和模糊性<sup>[7]</sup> ,利用层次分析法可以比较好地确定各个事件对溃坝产生的影响程度 ,对利用事故树原理求出的土石坝概率进行加权处理 ,能更好地反映土石坝溃决概率 ,并使对土石坝的评价更趋向合理。

3.2.1 确定各因素的相对权重

3.2.1.1 中间事件相对大坝溃决的权重矩阵

a. 中间事件比较矩阵 C 的建立。C 的元素是根据各中间事件的相对重要性确定的 ,专家评委会初步评估各中间事件的相对重要性为 M1 > M2 > M3 > M4 ,C 的元素按下列判断关系确定 :

$$c_{ij} = \begin{cases} -1 & M_i \text{ 劣于 } M_j \\ 0 & M_i \text{ 与 } M_j \text{ 优劣相同} \\ 1 & M_i \text{ 优于 } M_j \end{cases} \quad (i, j = 1, 2, 3, 4)$$

再根据中间事件相对重要性比较矩阵 :

| T  | M1 | M2 | M3 | M4 |
|----|----|----|----|----|
| M1 | 0  | 1  | 1  | 1  |
| M2 | -1 | 0  | 1  | 1  |
| M3 | -1 | -1 | 0  | 1  |
| M4 | -1 | -1 | -1 | 0  |

于是得

$$C = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 1 \\ -1 & 0 & 1 & 1 \\ -1 & -1 & 0 & 1 \\ -1 & -1 & -1 & 0 \end{bmatrix}$$

b. 确定最优传递矩阵 O。根据  $O_{ij} =$

$\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (c_{ik} + c_{kj})$  ,计算最优传递矩阵如下 :

$$O = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{2} & 1 & \frac{3}{2} \\ -\frac{1}{2} & 0 & \frac{1}{2} & 1 \\ -1 & -\frac{1}{2} & 0 & \frac{1}{4} \\ -\frac{3}{2} & -1 & -\frac{1}{4} & 0 \end{bmatrix}$$

c. 确定一致性矩阵  $K$ 。利用  $k_{ij} = \exp(o_{ij})$  可求出一致性矩阵如下 :

$$K = \begin{bmatrix} 1 & 1.649 & 2.718 & 4.482 \\ 0.607 & 1 & 1.649 & 2.718 \\ 0.368 & 0.607 & 1 & 1.284 \\ 0.223 & 0.368 & 0.779 & 1 \end{bmatrix}$$

d. 中间事件  $M$  对大坝溃决的权重矩阵  $P_T$ 。利用方根法求出  $M$  的特征向量

$$p = (2.003 \ 1.284 \ 0.732 \ 0.503)$$

其中  $p_i = \sqrt[4]{\prod_{j=1}^4 o_{ij}}$  ,再将特征向量归一化 ,  $p_{Ti} = \frac{p_i}{\sum_{i=1}^4 p_i}$  ,得到权重矩阵

$$P_T = [0.443 \ 0.284 \ 0.162 \ 0.111]$$

3.2.1.2 各基本事件相对中间事件权重  $p_j$  计算  
 $p_j$  计算方法和步骤与中间事件对大坝溃决权重计算方法相同 现将计算结果归结到表 2 中。各因素对中间事件的权重向量矩阵为

$$P_M = \begin{bmatrix} p_{M1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & p_{M2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & p_{M3} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & p_{M4} \end{bmatrix}$$

最后得各基本事件相对大坝溃决的权重向量矩阵为

$$P = [p_1 \ p_2 \ p_3 \ \dots \ p_{21}] = P_T P_M =$$

表 2 各因素对中间事件权重计算

| 中间事件 | 比较矩阵 $C$                                                                                                                                                                                                                                                   | 最优传递矩阵 $O$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 一致性矩阵 $K$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 权重矩阵 $\omega$                                                                                 |
|------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|
| $M1$ | $\begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ -1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ -1 & -1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ -1 & -1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ -1 & -1 & -1 & -1 & 0 & 1 \\ -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & 0 \end{bmatrix}$                                                           | $\begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{3} & \frac{5}{6} & \frac{5}{6} & \frac{4}{3} & \frac{5}{3} \\ -\frac{1}{3} & 0 & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & 1 & \frac{4}{3} \\ -\frac{5}{6} & -\frac{1}{2} & 0 & 0 & \frac{1}{2} & \frac{5}{6} \\ -\frac{5}{6} & -\frac{1}{2} & 0 & 0 & \frac{1}{2} & \frac{5}{6} \\ -\frac{4}{3} & -1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} & 0 & \frac{1}{3} \\ -\frac{5}{3} & -\frac{4}{3} & -\frac{5}{6} & -\frac{5}{6} & -\frac{1}{3} & 0 \end{bmatrix}$                                                                                                                                                                                                                | $\begin{bmatrix} 1 & 1.396 & 2.301 & 2.301 & 3.794 & 5.294 \\ 0.717 & 1 & 1.649 & 1.649 & 2.718 & 3.794 \\ 0.435 & 0.607 & 1 & 1 & 1.649 & 2.301 \\ 0.435 & 0.607 & 1 & 1 & 1.649 & 2.301 \\ 0.264 & 0.368 & 0.607 & 0.607 & 1 & 1.396 \\ 0.189 & 0.264 & 0.435 & 0.435 & 0.717 & 1 \end{bmatrix}$                                                                                                              | $\begin{bmatrix} 0.329 \\ 0.236 \\ 0.143 \\ 0.143 \\ 0.087 \\ 0.062 \end{bmatrix}^T$          |
| $M2$ | $\begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ -1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ -1 & -1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ -1 & -1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ -1 & -1 & 0 & -1 & 0 & 1 & 1 \\ -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & 0 & 1 \\ -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & 0 \end{bmatrix}$ | $\begin{bmatrix} 0 & \frac{2}{7} & \frac{6}{7} & \frac{4}{7} & 1 & \frac{10}{7} & \frac{12}{7} \\ -\frac{2}{7} & 0 & \frac{4}{7} & \frac{2}{7} & \frac{5}{7} & \frac{8}{7} & \frac{10}{7} \\ -\frac{6}{7} & -\frac{4}{7} & 0 & -\frac{4}{7} & -\frac{1}{7} & \frac{2}{7} & \frac{4}{7} \\ -\frac{4}{7} & -\frac{2}{7} & \frac{4}{7} & 0 & \frac{3}{7} & \frac{6}{7} & \frac{8}{7} \\ -1 & -\frac{5}{7} & -\frac{1}{7} & -\frac{3}{7} & 0 & \frac{3}{7} & \frac{5}{7} \\ -\frac{10}{7} & -\frac{8}{7} & -\frac{2}{7} & -\frac{6}{7} & -\frac{3}{7} & 0 & \frac{2}{7} \\ -\frac{12}{7} & -\frac{10}{7} & -\frac{4}{7} & -\frac{8}{7} & -\frac{5}{7} & -\frac{2}{7} & 0 \end{bmatrix}$ | $\begin{bmatrix} 1 & 1.331 & 2.356 & 1.771 & 2.718 & 4.173 & 5.553 \\ 0.751 & 1 & 1.771 & 1.331 & 2.043 & 3.136 & 4.173 \\ 0.424 & 0.565 & 1 & 0.565 & 0.867 & 1.331 & 1.771 \\ 0.565 & 0.751 & 1.771 & 1 & 1.535 & 2.356 & 3.136 \\ 0.368 & 0.490 & 0.867 & 0.651 & 1 & 1.535 & 2.043 \\ 0.240 & 0.319 & 0.751 & 0.424 & 0.651 & 1 & 1.331 \\ 0.180 & 0.240 & 0.565 & 0.319 & 0.490 & 0.751 & 1 \end{bmatrix}$ | $\begin{bmatrix} 0.284 \\ 0.214 \\ 0.103 \\ 0.170 \\ 0.105 \\ 0.071 \\ 0.053 \end{bmatrix}^T$ |
| $M3$ | $\begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 1 \\ -1 & 0 & 1 & 1 \\ -1 & -1 & 0 & 1 \\ -1 & -1 & -1 & 0 \end{bmatrix}$                                                                                                                                                     | $\begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{2} & 1 & \frac{3}{2} \\ -\frac{1}{2} & 0 & \frac{1}{2} & 1 \\ -1 & -\frac{1}{2} & 0 & \frac{1}{2} \\ -\frac{3}{2} & -1 & -\frac{1}{2} & 0 \end{bmatrix}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | $\begin{bmatrix} 1 & 1.649 & 2.718 & 4.482 \\ 0.607 & 1 & 1.649 & 2.718 \\ 0.368 & 0.607 & 1 & 1.649 \\ 0.223 & 0.368 & 0.607 & 1 \end{bmatrix}$                                                                                                                                                                                                                                                                | $\begin{bmatrix} 0.455 \\ 0.276 \\ 0.167 \\ 0.102 \end{bmatrix}^T$                            |
| $M4$ | $\begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 1 \\ -1 & 0 & 1 & 1 \\ -1 & -1 & 0 & 1 \\ -1 & -1 & -1 & 0 \end{bmatrix}$                                                                                                                                                     | $\begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{2} & 1 & \frac{3}{2} \\ -\frac{1}{2} & 0 & \frac{1}{2} & 1 \\ -1 & -\frac{1}{2} & 0 & \frac{1}{2} \\ -\frac{3}{2} & -1 & -\frac{1}{2} & 0 \end{bmatrix}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | $\begin{bmatrix} 1 & 1.649 & 2.718 & 4.482 \\ 0.607 & 1 & 1.649 & 2.718 \\ 0.368 & 0.607 & 1 & 1.649 \\ 0.223 & 0.368 & 0.607 & 1 \end{bmatrix}$                                                                                                                                                                                                                                                                | $\begin{bmatrix} 0.455 \\ 0.276 \\ 0.167 \\ 0.102 \end{bmatrix}^T$                            |

|        |        |        |        |        |        |        |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 0.1457 | 0.1045 | 0.0633 | 0.0633 | 0.0385 | 0.0275 | 0.0807 |
| 0.0608 | 0.0293 | 0.0483 | 0.0298 | 0.0202 | 0.0151 | 0.0737 |
| 0.0447 | 0.0271 | 0.0017 | 0.0505 | 0.0306 | 0.0185 | 0.0113 |

### 3.3 陆浑水库基本事件概率分析

陆浑水库是按 1 000 年一遇标准洪水设计 ,按 10000 年一遇洪水校核。自 1965 年大坝竣工建成以来 ,发生过“ 75·8 ”和“ 82·7 ”2 次较大洪水 ,各事件的统计资料难以搜集完整 ,对事件可能发生的概率通过调查分析得出。通过对专家和工程管理技术人员的调查后确定各基本事件可能发生的概率如表 3 所示。

表 3 陆浑水库基本事件发生概率分析调查统计

| 事件编号 | 基本事件     | 发生概率             | 概率权重   |
|------|----------|------------------|--------|
| X1   | 超标准洪水    | 10 <sup>-4</sup> | 0.1457 |
| X2   | 溢洪道断面不足  | 10 <sup>-4</sup> | 0.1045 |
| X3   | 启闭设备失灵   | 10 <sup>-2</sup> | 0.0633 |
| X4   | 山体滑坡     | 10 <sup>-2</sup> | 0.0633 |
| X5   | 洪水调度不合理  | 10 <sup>-2</sup> | 0.0385 |
| X6   | 战 争      | 10 <sup>-2</sup> | 0.0275 |
| X7   | 坝体裂缝     | 10 <sup>-2</sup> | 0.0807 |
| X8   | 防渗体尺寸不足  | 10 <sup>-3</sup> | 0.0608 |
| X9   | 排水设备破坏   | 10 <sup>-2</sup> | 0.0293 |
| X10  | 基础渗漏     | 10 <sup>-2</sup> | 0.0483 |
| X11  | 接触渗漏     | 10 <sup>-2</sup> | 0.0298 |
| X12  | 坝下涵管裂缝   | 10 <sup>-2</sup> | 0.0202 |
| X13  | 其他渗漏     | 10 <sup>-3</sup> | 0.0151 |
| X14  | 坝体施工质量差  | 10 <sup>-2</sup> | 0.0737 |
| X15  | 水位泄降过快   | 10 <sup>-2</sup> | 0.0447 |
| X16  | 坝坡过陡     | 0                | 0.0271 |
| X17  | 地震滑坡     | 10 <sup>-2</sup> | 0.0017 |
| X18  | 超 蓄      | 10 <sup>-3</sup> | 0.0505 |
| X19  | 防洪准备不良   | 10 <sup>-2</sup> | 0.0306 |
| X20  | 维护运行管理不当 | 10 <sup>-2</sup> | 0.0185 |
| X21  | 管理缺失     | 10 <sup>-2</sup> | 0.0113 |

### 3.4 陆浑水库安全评价

计算表明 ,陆浑水库大坝溃决概率为 0.005 4 ,其安全保证率为 0.996 6。2006 年 12 月河南省水利厅组织有关部门的代表和专家对陆浑水库除险加固工程进行了蓄水安全验收 ,对大坝蓄水安全评估 ,得出了陆浑水库除险加固工程防洪能力满足规范规定的标准要求、枢纽加固建筑物设计合理、符合现行规范要求、工程质量控制严格、工程具备正常运行条件的结论。由此可见 ,验收评价结论与计算结果较吻合。尽管如此 ,由于对事件概率缺乏更详细的系列统计资料 ,概率调查情况难以反映真实工程的全

貌<sup>[8]</sup> ,因此本结论只能作为一个参考。

## 4 结 语

大坝溃决概率计算方法很多 ,笔者建立的土石坝安全评价数学模型反映事件之间的关系清楚 ,概念明确 ,计算工作量相对较少 ,能在特定条件下快速地对大坝安全做出评估 ,为决策者提供参考依据。但是利用层次分析法确定基本事件概率的权重时 ,对事件重要性的评估 ,尽管集中了评估委员会专家、学者的数据 ,仍不可避免地具有一定的主观性。在选择评估专家时要全面考虑 ,既要有来自工程一线的高级工程技术管理人员 ,也要有来自工程设计、科研方面的相关专家学者 ,使对各事件重要性评估更加趋于合理。

### 参考文献：

[ 1 ] 钮新强 杨启贵 ,谭界雄 ,等.水库大坝安全评价[ M ].北京 :中国水利水电出版社 ,2007.

[ 2 ] 李舒瑶 陈诚.用事故树模型计算土石坝溃决概率[ J ].黄河水利职业技术学院学报 ,2006( 4 ) :14-16.

[ 3 ] 汝乃华 牛运光.大坝事故与安全 土石坝[ M ].北京 :中国水利水电出版社 ,2001.

[ 4 ] 向衍 马福恒 刘成栋.土石坝工程安全预警系统关键技术[ J ].河海大学学报 :自然科学版 ,2008 ,36( 5 ) :634-639.

[ 5 ] 张新玉.水利投资效益评价理论与方法[ M ].北京 :水利水电出版社 ,2005 :119-120.

[ 6 ] 葛双成 江影 郑敏生 ,等.堤坝工程隐患特征及探测目标分析[ J ].水利水电科技进展 ,2008 ,28( S1 ) :73-76.

[ 7 ] 沈慧 迟世春 贾宇峰 ,等.覆盖层地基上 250m 级土石坝抗震分析[ J ].河海大学学报 :自然科学版 ,2007 ,35( 3 ) :271-275.

[ 8 ] 邢玉玲 束一鸣 花加凤 ,等.黏土联合防渗系统对高土石坝心墙拱效应的影响[ J ].河海大学学报 :自然科学版 ,2007 ,35( 4 ) :456-459.

( 收稿日期 2009-10-26 编辑 :高建群 )

