

基于层次分析法和模糊理论的小型水库 土石坝安全评价

周海怡¹, 李淑祎², 蔡先锋², 申屠毅², 刘桢义³, 章振华³, 金洁³, 林颖典¹

(1. 浙江大学 海洋学院, 浙江 舟山 316021; 2. 杭州鲁尔物联科技有限公司, 浙江 杭州 311121;
3. 浙江省杭州市余杭区林业水利局, 浙江 杭州 311115)

摘要: 鉴于水库大坝安全状态评价的模糊性和层次性,通过分析我国小型水库土石坝结构特征和破坏机理,构建结构安全状态评价指标体系,提出基于层次分析法和模糊理论的小型水库土石坝安全评价方法。利用模糊理论对层次分析法计算的权重进行修正,得到评价体系中各指标的隶属度值,根据最大隶属度原则确定结构安全状态的模糊综合评价结果。研究以浙江省杭州市余杭区康门小型水库土石坝为工程实例,应用本文的指标体系和模糊综合评价方法对其进行结构安全状态评估。将结果与工程实际对比发现两者基本一致,验证了本文所提出的指标体系及评价方法的有效性,可为小型水库土石坝的结构安全评价提供借鉴和参考依据。

关键词: 小型水库土石坝; 安全状态评价; 模糊理论; 层次分析法

中图分类号:TV641

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2023)04-0167-08

Safety evaluation of small earth-rockfill dams based on analytical hierarchy process method and fuzzy theory

ZHOU Haiyi¹, LI Shuyi², CAI Xianfeng², SHEN Tuyi², LIU Zhenyi³,
ZHANG Zhenhua³, JIN Jie³, LIN Yingdian¹

(1. Ocean College, Zhejiang University, Zhoushan 316021, China; 2. Hangzhou Ruhr Technology Co., Ltd., Hangzhou 311121, China; 3. Forestry and Water Conservancy Bureau of Yuhang District, Hangzhou, Hangzhou 311115, China)

Abstract: In view of the fuzziness and hierarchy of dam safety evaluation, the structural characteristics and failure mechanism of small earth-rockfill dams in China are analyzed to construct a safety evaluation index system considering the multi-criteria and multi-factors involved, based on which, a safety evaluation method is proposed combining analytical hierarchy process and fuzzy theory. According to this method, the weight of each index is calculated by the analytical hierarchy process and then modified by the fuzzy theory, so the membership value of each index in the evaluation system is obtained, and the evaluation result of the structure safety state is determined according to the maximum membership principle. In the study, the Kangmen Reservoir earth-rockfill dam in Yuhang District, Hangzhou City, Zhejiang Province is taken as a practical engineering example, and the proposed index system and evaluation method are applied to evaluate its structural safety level. Comparing the calculated evaluation results with the actual engineering situation, it can be found that the two are basically consistent, which in turn verifies the effectiveness of the index system and evaluation method. This study can provide a reference for the structural safety evaluation of earth-rockfill dams of small reservoirs.

Key words: small earth-rockfill dam; safety evaluation; fuzzy theory; analytical hierarchy process

收稿日期:2022-06-30; 修回日期:2022-11-29

基金项目:余杭区水利工程监测体系完善项目(YHZFCG2020-203)

作者简介:周海怡(1998—),女,重庆綦江人,硕士研究生,主要从事结构健康监测研究。

通讯作者:林颖典(1976—),男,台湾台北人,博士,副教授,主要从事土木水利防灾减灾相关研究。

1 研究背景

我国水库大坝多为混凝土坝和土石坝,其中土石坝在施工组织、建材质量、养护管理等方面的特点,使其在长期服役过程中容易出现材料老化变质、结构异常破坏、坝基异常渗漏等安全隐患^[1]。对于传统的中小型水库土石坝的安全评价技术,一方面人工巡检不仅费时费力,还存在主观误差等不可量化的因素;另一方面监测设备成本较高,且局部布设仪器不能满足整体监测的需求^[2]。全国水库大坝安全评价工作内容、方法及标准主要以《水库大坝安全评价导则》(SL 258—2017,简称《导则》)^[3]为参照,但现有指标体系在复杂的水库大坝安全评价场景中仍存在主观性和模糊性较强的缺陷。

近年来许多学者采用层次分析法、风险评估法等方法,对小型水库土石坝进行结构安全状态评价,以提升水库大坝安全监管水平,保障大坝长期稳定运行^[4-7]。梁文娟等^[8]通过调研陕西省10个地市共172座小型水库,建立了基于层级分析法的物元可拓评价模型,为小型水库的标准化运行管理提供了科学建议。江超等^[9]梳理了小型水库大坝安全鉴定基本程序以及在安全鉴定过程中存在的典型问题,并提出改善小型水库安全评价方法和提高工程安全鉴定质量的工作建议。孙玮玮等^[10]构建了小型水库除险加固评估指标体系和方法,通过工程案例验证了方案的可行性。Daud等^[11]利用层次分析法评估了大坝溃坝影响因素,着重分析了结构因素、人为因素和自然因素,分析结果与依据溃坝准则计算的评价等级一致,并对大坝渗漏导致溃坝问题的运维管理提出了建议。Juliastruti等^[12]基于目视和仪器检测识别坝体损伤,利用层次分析法并辅以专家调查法确定大坝修复优先级,并应用于大坝工程实例,对大坝损坏修复工作提出了建议。

以上安全评价体系与计算方法均基于传统安全评价进行了优化改善,但在针对小型水库土石坝特点的评价程序繁简程度和量化定性指标等方面有待进一步完善与提高。本文首先建立小型水库土石坝安全评价指标体系,然后采用层次分析法计算指标权重,并结合模糊理论修正使权重值更客观,根据模糊综合评价的最大隶属度原则,得到小型水库土石坝的安全状态评价结果。

2 水库大坝安全评价指标体系

水库大坝安全评价影响因素之间相互作用,评价体系又具有多层次、多因素的结构形式,因而在综合评价时难以一次性比较出指标间的重要程度^[13]。因此,构建典型且能够全方位反映实际需求的安全评价指标体系有利于分析水库大坝安全状态的演化趋势^[14]。

依据《导则》《水库大坝安全管理条例》(2018年修订,简称《条例》)^[15]以及《水库大坝安全鉴定办法》(水建管[2003]271号文件,简称《办法》)^[16]的要求,通过多次组织人员进行管理档案收集、工程现场巡查,本文基于资料分析、数值模拟和计算,针对指标体系鲜明的层次性和模糊性,建立水库大坝安全评价因素集,构建多级评价指标体系,明确了指标之间的从属和并列关系。

2.1 小型水库土石坝评价因素集

将水库大坝安全评价指标体系从上至下分为目标层、准则层和指标层3级,本文的评价对象为灌溉型小型水库土石坝,本着系统性、层次性和可操作性的原则,初选《导则》规定的6个指标作为评价体系的准则层。针对小型水库土石坝的类型、工程等别以及枢纽工程和主要建筑物,结合健康大坝的内涵和影响因素,对评价指标体系进行修改和完善^[17-19],共设立23个评价指标。其评价指标体系如图1所示。

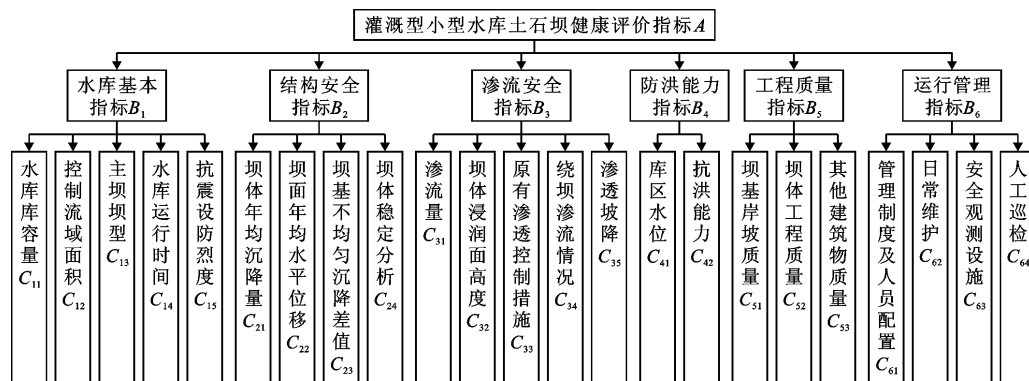


图1 灌溉型小型水库土石坝安全评价指标体系

2.2 小型水库土石坝评价评语集

在《导则》中,水库大坝安全综合评价被划分为 A、B、C 3 类,分别对应工程质量合格、运行管理规范的一类坝,运行性态基本正常、但存在安全隐患的三类坝,工程存在严重质量缺陷、不能正常服役的三类坝。但是,《导则》的分类较为简单,所给出的判断依据不够细致^[20]。本文将水库大坝安全综合评价等级划分为 4 类,提供更为细致详尽的划分依据,并能够根据评价结果提出安全隐患处置建议和方案。本文将评价评语集划分为公式(1)所示的 4 个等级,对应的评价含义分别为:“健康”“基本健康”“较不健康”“不健康”。

$$U = \{u_1, u_2, u_3, u_4\} = \{I, II, III, IV\} \quad (1)$$

3 小型水库土石坝模糊综合评价

3.1 模糊理论与评分标准

经典集合理论(set theory)认为某个因素是否属于某个等级只有真或假两种情况^[21],而水库大坝安全状态评价的等级具有一定的模糊性和不确定性,不易直接划分为好或坏两种情况,模糊理论(fuzzy theory)充分补充了经典集合理论的不足,在进行安全状态评价时,因素集对评语集的隶属度充满连续区间,即 $\{0, 1\} \rightarrow [0, 1]$ ^[22]。在灌溉型小型水库土石坝安全状态的影响因素中,需要量化单因素指标的评语集等级区间,便于构建隶属函数,再利用专家评分所给的量化值,得到计算插值点。常规的安全状态评价所使用的专家调查法大多忽视了专家自身缺陷和专业程度^[23],本文在进行专家评分时,构建由 15 人组成的专家评分小组,参与调查的专家包括大坝设计人员、建筑工程师、运维管理人员,并综合考虑小组内专家的工龄、职称等因素,确保评分过程的客观性和评分结果的可靠性。根据公式(1)所示评语集,将专家评分区间划分为:等级 1 为健康,评分 $[100, 80)$;等级 2 为基本健康,评分 $[80, 60)$;等级 3 为较不健康,评分 $[60, 40)$;等级 4 为不健康,评分 $[40, 0)$ ^[24]。

3.2 构建模糊隶属度矩阵

本文采用指派法确定隶属函数(membership function),通过专家访谈和资料调研,明确水库大坝安全评价的性质,然后选用抛物型、正态型、柯西型等类型的模糊分布函数计算隶属度,构建模糊综合评价矩阵,按照最大隶属度原则,计算目标层和准则层指标的安全状态评价结果^[25]。

通过专家调查法得到的指标层各指标的评分值

离某一评分区间的中点越近,则对该等级的隶属度越高;离该评分区间的边缘越近,则对该等级的隶属度越低,甚至可能属于其他等级。这种特性类似于正态分布函数,故本文选用正态型分布的函数作为隶属函数^[26]:

$$r(x) = \exp[-(x - a)^2/\sigma^2] \quad (2)$$

式中: x 为专家对影响因素的评分; a 为各等级评分区间的中值; σ 为待定参数。

若专家对影响因素的评分为中值 a ,则该指标的隶属度为 1。若专家对影响因素的评分位于区间的两端,则表明该指标对相邻两区间的隶属度相同,均为 0.5。则有:

$$r(x) = \exp[-(x_1 - x_2)^2/4\sigma^2] = 0.5 \quad (3)$$

式中: x_1, x_2 为评分区间的端点值,将该值代入即可求得参数 σ 。

由于安全评价指标体系中指标的评分值越高代表该指标的安全状态评价越好,对最佳等级的隶属度越高,但不应超过 1,而正态型隶属函数存在两端隶属度低于 1 的情况,故需对其两端进行修正,本文利用将左、右两端隶属函数分别升半梯度和降半梯度的方式,使修正后正态分布型隶属函数的隶属度恒等于 1^[27]。修正后的隶属函数如下:

$$r_1(x) = \begin{cases} 1 & (90 < x \leq 100) \\ \exp[-(x - a_1)^2/\sigma_1^2] & (0 \leq x \leq 90) \end{cases} \quad (4)$$

$$r_2(x) = \exp[-(x - a_2)^2/\sigma_2^2] \quad (5)$$

$$r_3(x) = \exp[-(x - a_3)^2/\sigma_3^2] \quad (6)$$

$$r_4(x) = \begin{cases} \exp[-(x - a_4)^2/\sigma_4^2] & (10 \leq x) \\ 1 & (0 \leq x < 10) \end{cases} \quad (7)$$

公式(4)~(7)中,各隶属函数参数取值根据不同等级区间的端点值利用等式(3)确定,计算结果如表 1 所示。

表 1 各等级隶属函数参数取值

| 等级 1 | | 等级 2 | | 等级 3 | | 等级 4 | |
|-------|------------|-------|------------|-------|------------|-------|------------|
| a_1 | σ_1 | a_2 | σ_2 | a_3 | σ_3 | a_4 | σ_4 |
| 90 | 12.01 | 70 | 12.01 | 50 | 12.01 | 20 | 24.02 |

在构建模糊综合评价模型的过程中,首先需要确定指标层各指标对公式(1)所示评语集的隶属度,得到各单因素的模糊子集,再经过归一化处理计算单因素隶属度矩阵(matrix of membership degree)。本文准则层 6 个指标 $B_i(i = 1, 2, \dots, 6)$ 对

应的指标层各指标对评语集的模糊综合评价矩阵为 $R_i (i = 1, 2, \dots, 6)$, 具体形式如下:

$$R_i = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & r_{14} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & r_{24} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & r_{34} \\ r_{41} & r_{42} & r_{43} & r_{44} \\ r_{51} & r_{52} & r_{53} & r_{54} \end{bmatrix} \quad (i = 1, 3) \quad (8)$$

$$R_i = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & r_{14} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & r_{24} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & r_{34} \\ r_{41} & r_{42} & r_{43} & r_{44} \end{bmatrix} \quad (i = 2, 6) \quad (9)$$

$$R_4 = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & r_{14} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & r_{24} \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$R_5 = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & r_{14} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & r_{24} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & r_{34} \end{bmatrix} \quad (11)$$

结合利用层次分析法得到的权重向量 W_i , 可以得到准则层指标的模糊评价矩阵:

$$B_i = W_i \circ R_i \quad (12)$$

进一步可以计算目标层的安全状态评价结果:

$$A = W \circ B_i \quad (13)$$

公式(12)和(13)中, “ \circ ”表示模糊理论中的模糊关系合成运算, 本文通过比选确定模糊推理时控制效果最优的算子为加权平均算子。

最后, 按照最大隶属度原则选择 $\max \{A_i\} (1 \leq i \leq 4)$ 作为最终的水库大坝安全状态评级。

4 各级指标权重的确定

层次分析法在定性决策过程中引入定量分析, 以降低主观判断对决策结果的影响^[28]。此外, 在使用层次分析法时, 构建多层评价指标体系的过程有助于决策者更加全面地考虑影响决策的因素, 在计算过程中更清晰地衡量指标间的重要性优先级^[29]。

在实际计算过程中, 需要具有深厚知识储备和实践经验的专家作为参与决策的评价者, 由专家对决策指标体系中准则层指标间以及同一准则层下的指标层指标间进行相对重要性评分, 由此计算准则层和指标层指标的比较判断矩阵, 然后对每个矩阵的最大特征根进行一致性检验, 将通过一致性检验的指标权重值进行排序, 以确定决策结果^[30]。

4.1 构建比较判断矩阵

基于构建的评价指标体系(如图1)进行定性定

量分析, 首先需要将同一准则层的各个元素进行两两比较, 计算指标间相对重要性的量化值, 即比较判断矩阵, 以尽可能排除决策认知的局限性对结果的影响, 降低不同性质元素相互比较的困难, 提高评价判断的准确度^[31]。本文采用1—9标度法构建比较判断矩阵, 表2列出了各标度的含义^[32]。

表2 1—9标度法含义表

| 标度 | 含义 |
|------------|--------------------------|
| 1 | 两指标重要性相同 |
| 3 | 一个指标与另一个指标相比, 稍微重要 |
| 5 | 一个指标与另一个指标相比, 明显重要 |
| 7 | 一个指标与另一个指标相比, 强烈重要 |
| 9 | 一个指标与另一个指标相比, 极端重要 |
| 2, 4, 6, 8 | 两指标的重要性比较量化值介于上述相邻标度的中间值 |

在灌溉型小型水库土石坝安全评价体系中, 本文以工程质量综合指标 B_5 为例, 对 B_5 的3个子指标“坝基岸坡质量 C_{51} ”“坝体工程质量 C_{52} ”“其他建筑物质量 C_{53} ”构建比较判断矩阵, 如表3所示。同理可得准则层指标间以及同一准则层指标下的指标层各指标间的比较判断矩阵。

表3 $B_5 - C$ 比较判断矩阵

| B_5 | C_{51} | C_{52} | C_{53} |
|----------|----------|----------|----------|
| C_{51} | 1 | 1/3 | 5 |
| C_{52} | 1 | 1 | 7 |
| C_{53} | 1/3 | 1/7 | 1 |

4.2 权向量计算及一致性检验

本文采用根法计算指标权重向量 W , 具体过程如下:

(1) 比较判断矩阵中每行连乘, 然后开 m 次方, 得到向量:

$$W^* = (w_1^*, w_2^*, \dots, w_m^*) \quad (14)$$

$$w_i^* = \sqrt[m]{\prod_{j=1}^m a_{ij}} \quad (15)$$

(2) 对 W^* 进行归一化处理, 得到权重向量:

$$W = (w_1, w_2, \dots, w_m)^T \quad (16)$$

$$w_i = w_i^* / \sum_{i=1}^m w_i^* \quad (17)$$

(3) 对比较判断矩阵中每列元素求和, 得到向量:

$$S = (s_1, s_2, \dots, s_m) \quad (18)$$

$$s_i = \sum_{j=1}^m a_{ij} \quad (19)$$

(4) 计算最大特征值 λ_{\max} :

$$\lambda_{\max} = \sum_{i=1}^m s_i w_i = S \cdot W = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{(A \cdot W)_i}{w_i} \quad (20)$$

一致性检验的具体步骤如下:

(1) 一致性指标 CI (consistency index)

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (21)$$

式中: n 为矩阵阶数, λ_{\max} 为矩阵的最大特征值。

(2) 随机一致性指标 RI (random index)

利用 RI 衡量 CI 的大小,通常情况下,其值与比较判断矩阵的阶数呈正相关。

$$RI = \frac{CI_1 + CI_2 + \dots + CI_n}{n} \quad (22)$$

(3) 一致性比例 CR (consistency ratio)

$CR \leq 0.1$ 表示矩阵满足一致性要求, $CR > 0.1$ 表示矩阵达不到一致性要求,需要重新构建矩阵。 CR 的值按照下式进行计算:

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (23)$$

按如上所述流程,对每个比较判断矩阵计算权重并进行一致性检验。

5 实例分析

康门水库位于浙江省杭州市余杭区良渚街道安溪村,属东苕溪水系,东苕溪流域及测点分布如图 2 所示。

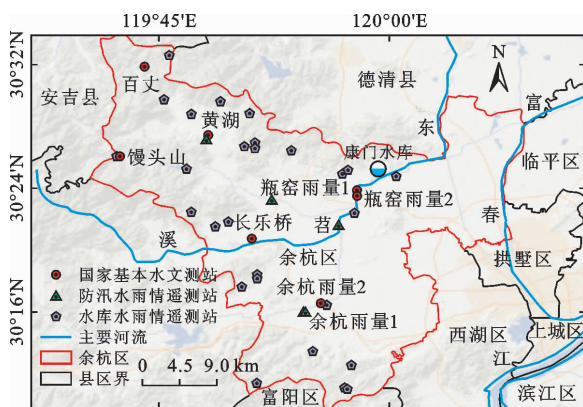


图 2 东苕溪流域及测点分布图

水库的来水面积为 4.647 km^2 , 主流长度为 4.06 km , 水库总库容为 $142.99 \times 10^4 \text{ m}^3$, 是一座承担下游约 133 hm^2 农田灌溉任务的小(1)型水库。康门水库于 1960 年竣工, 2003 年经余杭区林业水利局技术认定为二类坝, 同年进行标准化建设, 2014 年在下游坝坡几处渗漏点处设置砂石反滤体。康门

水库正常蓄水位为 24.67 m , 相应库容为 $101.46 \times 10^4 \text{ m}^3$, 设计洪水位为 26.21 m , 校核水位为 26.29 m 。主坝原为均质坝, 坝长为 168.5 m , 坝顶宽度为 8.5 m , 最大坝高为 17.3 m , 坝顶高程为 27.32 m , 副坝位于主坝左侧 300 m 处, 原为一山坳, 副坝坝顶高程为 28.69 m , 坝顶宽度为 3.0 m 。

5.1 各因素隶属度计算

依据建立的灌溉型小型水库土石坝大坝安全综合评价方法, 在进行专家评分时遵循 2.1 节提出的标准规则。依据《导则》《条例》和《办法》的要求, 借鉴灌溉型小型水库土石坝科学管理的专家知识和实证资料, 确定指标层各指标的评分条件和专家评分, 如表 4 所示。

表 4 康门水库大坝各项安全评价指标得分

| 准则层 | 指标 | 评分条件 | 得分 |
|--------------|---|-------------|----|
| 水库基本指标 B_1 | 水库库容量 $C_{11} / 10^8 \text{ m}^3$ | 0.01 ~ 0.1 | 85 |
| | 控制流域面积 C_{12} / km^2 | 71.6 | 90 |
| | 主坝坝型 C_{13} | 土坝 | 70 |
| | 水库运行时间 C_{14} / a | 61 | 65 |
| | 抗震设防烈度 C_{15} | 6 | 90 |
| 结构安全指标 B_2 | 坝体年均沉降量 C_{21} / mm | 2.09 | 85 |
| | 坝面年均水平位移 C_{22} / mm | 0.367 | 87 |
| | 坝基不均匀沉降差值 C_{23} / mm | 1.802 | 83 |
| 渗流安全指标 B_3 | 坝体稳定分析 C_{24} | 稳定 | 94 |
| | 渗流量 $C_{31} / (\text{L} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1})$ | 0.128 | 91 |
| | 坝体浸润面高度 C_{32} | 稳定 | 90 |
| | 原有渗透控制措施 C_{33} | 有且完善 | 95 |
| | 绕坝渗流情况 C_{34} | 正常 | 89 |
| 防洪能力指标 B_4 | 渗透坡降 C_{35} | 0.501 | 90 |
| | 库区水位 C_{41} | 小于正常蓄水位 | 96 |
| | 抗洪能力 C_{42} | 防洪标准及大坝抗洪能力 | 85 |
| 工程质量指标 B_5 | 坝基岸坡质量 C_{51} | 合格 | 90 |
| | 坝体工程质量 C_{52} | 合格 | 95 |
| | 其他建筑物质量 C_{53} | 合格 | 93 |
| 运行管理指标 B_6 | 管理制度及人员配置 C_{61} | 有且健全 | 90 |
| | 日常维护 C_{62} | 正常 | 87 |
| | 安全观测设施 C_{63} | 较完善 | 85 |
| | 人工巡检 C_{64} | 正常 | 83 |

在计算渗流量时, 使用 Abaqus 软件计算康门水库大坝的渗流孔隙水压力云图(如图 3), 分析大坝渗流场的变化情况, 取大坝中渗流水体饱和区域与非饱和区域的边界线为浸润线, 下游边界节点上单

位时间流出云图模型的流体体积即为渗流量,经计算得到单位宽度的渗流量为 $0.128 \text{ L}/(\text{s} \cdot \text{m})$ 。

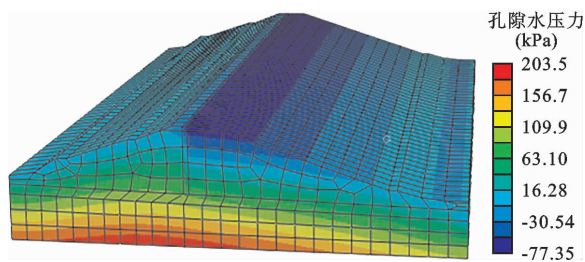


图3 康门水库大坝渗流孔隙水压力云图

在确定渗透坡降的评分条件时,依据《水利水电工程地质勘察规范》(GB 50487—2008)(2022年版)^[33]附录G的规定,通过分析康门水库地勘资料的颗粒分析成果,并参考类似水库大坝坝体土的试验成果,宏观判断康门大坝土的渗透变形形式为流土型,流土型临界比降 J_{cr} 采用由极限平衡理论所得的太沙基公式计算,康门水库大坝安全系数取值为2,则渗透坡降为 $[J] = J_{cr}/2 = 0.501$ 。

根据公式(2)~(7)计算指标层各指标对各评价等级的隶属度,结果见表5。

表5 康门水库大坝各项安全评价指标的专家评分及单因素隶属度

| 指标 | 专家评分 | 隶属度 | | | |
|----------|------|-------|-------|-------|-------|
| | | 等级1 | 等级2 | 等级3 | 等级4 |
| C_{11} | 85 | 0.841 | 0.210 | 0.000 | 0.001 |
| C_{12} | 90 | 1.000 | 0.062 | 0.000 | 0.000 |
| C_{13} | 70 | 0.062 | 1.000 | 0.062 | 0.013 |
| C_{14} | 65 | 0.013 | 0.841 | 0.210 | 0.030 |
| C_{15} | 90 | 1.000 | 0.062 | 0.000 | 0.000 |
| C_{21} | 85 | 0.841 | 0.210 | 0.000 | 0.001 |
| C_{22} | 87 | 0.940 | 0.135 | 0.000 | 0.000 |
| C_{23} | 83 | 0.712 | 0.310 | 0.001 | 0.001 |
| C_{24} | 94 | 0.895 | 0.018 | 0.000 | 0.000 |
| C_{31} | 91 | 0.993 | 0.047 | 0.000 | 0.000 |
| C_{32} | 90 | 1.000 | 0.062 | 0.000 | 0.000 |
| C_{33} | 95 | 0.841 | 0.013 | 0.000 | 0.000 |
| C_{34} | 89 | 0.993 | 0.082 | 0.000 | 0.000 |
| C_{35} | 90 | 1.000 | 0.062 | 0.000 | 0.000 |
| C_{41} | 96 | 0.779 | 0.009 | 0.000 | 0.000 |
| C_{42} | 85 | 0.841 | 0.210 | 0.000 | 0.001 |
| C_{51} | 90 | 1.000 | 0.062 | 0.000 | 0.000 |
| C_{52} | 95 | 0.841 | 0.013 | 0.000 | 0.000 |
| C_{53} | 93 | 0.940 | 0.026 | 0.000 | 0.000 |
| C_{61} | 90 | 1.000 | 0.062 | 0.000 | 0.000 |
| C_{62} | 87 | 0.940 | 0.135 | 0.000 | 0.000 |
| C_{63} | 85 | 0.841 | 0.210 | 0.000 | 0.001 |
| C_{64} | 83 | 0.712 | 0.310 | 0.001 | 0.001 |

5.2 各指标权重计算

基于构建的灌溉型小型水库土石坝健康评价指标体系(图1),利用1—9标度法构建比较判断矩阵,再根据公式(14)~(22),计算得到的准则层和指标层指标权重如表6所示。

表6 康门水库大坝安全评价指标体系准则层和指标层指标权重

| 准则层 | 权重 | 指标 | 权重 |
|--------------|--------|--------------------|--------|
| 水库基本指标 B_1 | 0.0400 | 水库库容量 C_{11} | 0.0044 |
| | | 控制流域面积 C_{12} | 0.0044 |
| | | 主坝坝型 C_{13} | 0.0085 |
| | | 水库运行时间 C_{14} | 0.0085 |
| | | 抗震设防烈度 C_{15} | 0.0907 |
| 结构安全指标 B_2 | 0.3430 | 坝体年均沉降量 C_{21} | 0.0792 |
| | | 坝面年均水平位移 C_{22} | 0.0792 |
| | | 坝体不均匀沉降差值 C_{23} | 0.0261 |
| | | 坝体稳定分析 C_{24} | 0.0792 |
| 渗流安全指标 B_3 | 0.2540 | 渗流量 C_{31} | 0.0758 |
| | | 坝体浸润面高度 C_{32} | 0.0632 |
| | | 原有渗透控制措施 C_{33} | 0.0133 |
| 防洪能力指标 B_4 | 0.1770 | 绕坝渗流情况 C_{34} | 0.0253 |
| | | 渗透坡降 C_{35} | 0.0758 |
| 工程质量指标 B_5 | 0.1160 | 库区水位 C_{41} | 0.0886 |
| | | 抗洪能力 C_{42} | 0.0886 |
| 运行管理指标 B_6 | 0.0700 | 坝基岸坡质量 C_{51} | 0.0328 |
| | | 坝体工程质量 C_{52} | 0.0745 |
| | | 其他建筑物质量 C_{53} | 0.0090 |
| | | 管理制度及人员配置 C_{61} | 0.0048 |
| | | 日常维护 C_{62} | 0.0141 |
| | | 安全观测设施 C_{63} | 0.0141 |
| | | 人工巡查 C_{64} | 0.0371 |

5.3 大坝安全状态评价结果

利用专家评分、单因素隶属度和准则层指标权重向量,按照公式(8)~(12)计算目标层评价结果:

$$A = W \circ B = [0.654, 0.306, 0.035, 0.006]$$

根据最大隶属度原则,结合公式(1)所构建的评语集等级区间,康门水库大坝结构处于安全状态,模糊综合得分为: $0.645 \times 90 + 0.306 \times 70 + 0.035 \times 50 + 0.006 \times 20 = 82.15$ 。根据公式(8)~(12)计算康门水库大坝安全评价体系准则层6个指标的模糊综合评价结果如图4所示。

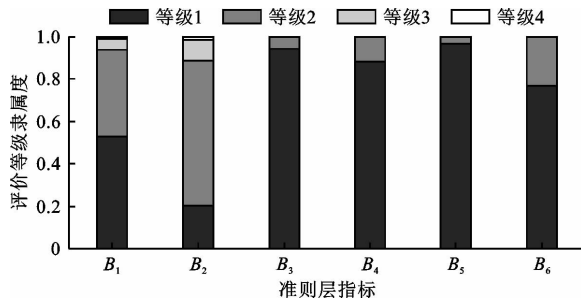


图4 康门水库大坝安全评价体系准则层各指标模糊综合判断评价结果

5.4 讨论

本文的实例分析结果如图4所示,结合最大隶属度原则可以直观地看出,水库基本指标 B_1 的等级1隶属度值最大,表明康门水库大坝的该指标情况为“健康”;结构安全指标 B_2 的等级2隶属度值最大,表明大坝的该指标情况为“基本健康”,但坝体存在不均匀沉降和稳定性问题,同理可得其余指标的安全状态。基于准则层指标与指标层指标的模糊综合评价结果,通过分析大坝外观、结构安全情况和运行管理条件等现场检查情况,表明大坝结构运行正常,但仍存在结构承载力退化、材料破损和性能降低等问题,对大坝结构的长期安全稳定运行构成威胁,建议及时对溢洪道和防浪墙进行修缮,并加强大坝日常管理,定期检查工程设施,建立水库安全鉴定和运维监管的技术档案库。

本文在进行小型水库土石坝的安全健康评价时,按照《导则》规定设置目标层、准则层和指标层,验证了灌溉型小型水库土石坝的安全评价需要充分考虑大坝的抗滑稳定性和渗流性安全,并且需要保证溢洪道稳定和渗流量满足运行要求。许多学者也从其他角度制定安全评价指标体系,如陈曦等^[24]针对无金属结构的农村地区小型水库大坝进行安全评价时,重点考虑了大坝、溢洪道、输水管涵的模糊综合评价结果;陈果^[34]侧重于分析运行时间较长的土坝,对大坝变形和浸润线进行观测,提出了必要时需要整治和翻修大坝溢洪道护砌、防渗帷幕的建议。

因此,大坝安全评价指标的选择应该结合工程实际情况和未来发展需求进行修改和完善,使其更具针对性和适用性。此外,更加完善的工程资料和检测设施更有助于专家进行精确判断,避免因资料缺乏而导致的局限性。在实际工作中还应重视专家质量,因为模糊层次分析法中隶属度的计算过程对专家经验要求较高。

6 结论

本文构建了小型水库土石坝的安全评价指标体系,引入模糊理论对层次分析法进行修正,分析浙江省杭州市余杭区康门水库大坝的结构安全状态,主要研究成果如下:

(1)结合行业标准和规范,构建更符合小型水库土石坝结构特征和破坏机理的评价指标体系,利用1—9标度法计算准则层和指标层指标的权重。

(2)针对评价体系层次复杂和模糊性大的特点,将模糊理论引入安全评价中,构建并修正正态分布隶属函数,计算隶属度矩阵,对小型水库土石坝的结构安全状态进行更加客观的量化评价。

(3)将所构建的安全评价指标体系与计算方法用于浙江省杭州市余杭区康门水库大坝,计算结果与工程实际情况吻合,验证了本文方法的有效性和可行性,对小型水库土石坝的结构安全评价具有参考价值。

(4)综合计算结果和实际情况,康门水库大坝存在结构承载能力退化、材料破损和性能降低等问题,对既有大坝建筑构成安全威胁,建议对风险指标进行除险加固处理,加强大坝的定期检查和清理,加强工程运维等技术档案管理,制定风险应急预案。

参考文献:

- [1] 陈亮. 大坝表面异常巡检装置设计及裂缝检测算法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2019.
- [2] 雷婷. 基于不同规范中混凝土动力特性对大坝抗震性能的影响分析[D]. 大连: 大连理工大学, 2020.
- [3] 中华人民共和国水利部. 水库大坝安全评价导则 SL 258—2017 [S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2017.
- [4] 黎良辉, 杨斌, 魏博文, 等. 基于改进层次分析法的大坝性态安全诊断云模型[J]. 水资源与水工程学报, 2018, 29(1): 209—214.
- [5] 郭宝航, 张社荣, 王超, 等. 基于多源信息融合的长距离引水工程结构安全风险评价方法[J]. 水电能源科学, 2020, 38(6): 84—88.
- [6] 王硕, 沈振中, 张文兵, 等. 一种分析大坝安全状况的改进变权层次分析法[J]. 水利水电科技进展, 2022, 42(3): 97—103.
- [7] 叶亚三, 陈国兴. 水库大坝抗震性能的模糊综合评价[J]. 水力发电学报, 2013, 32(3): 198—206.
- [8] 梁文娟, 朱记伟, 张永进, 等. 基于AHP-物元可拓法的小型水库运行管理标准化评价[J]. 水利与建筑工程学报, 2021, 19(2): 208—214.
- [9] 江超, 王丽俊. 小型水库大坝安全鉴定典型问题与工作建

- 议[J]. 中国农村水利水电, 2021(12):171-173+180.
- [10] 孙玮玮, 龙智飞, 周克发. 小型水库除险加固绩效评估指标体系研究[J]. 水利水电技术, 2018, 49(12):126-133.
- [11] DAUD N M, HASSAN S H, AKBAR N A, et al. Dam failure risk factor analysis using AHP method[C]// IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021.
- [12] JULIASTUTI, RICO I, CAHYONO C, et al. Priority determination of repairing embankment dam using analytical hierarchy process (AHP), case studies: Saguling Dam and Djuanda Dam [C]// IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021.
- [13] 郭维维. 改进层次模糊分析法在水库大坝安全评价中的应用[J]. 水利水电快报, 2020, 41(8):63-67.
- [14] 蔡吉娜. 层次分析法在小型水库运行管理评价中的应用[J]. 水利科技, 2017(1):47-49+61.
- [15] 中华人民共和国国务院. 水库大坝安全管理条例[EB/OL]. (2018-03-19) [2023-03-27]. http://www.gov.cn/zhengce/2020-12/25/content_5574829.htm.
- [16] 中华人民共和国国务院公报. 水库大坝安全鉴定办法[EB/OL]. (2003-06-24) [2022-06-22]. http://www.gov.cn/gongbao/content/2003/content_62472.htm.
- [17] 田林钢, 高佳东, 巴超, 等. 强降雨条件下土石坝安全评价[J]. 人民长江, 2021, 52(6):195-200.
- [18] 刘亚莲, 胡建平, 周翠英. 模糊层次分析在老园水库安全评价中的应用[J]. 人民黄河, 2011, 33(2):133-134+139.
- [19] 郭英嘉, 朱凯, 付浩, 等. 大坝安全综合评价研究[J]. 中国农村水利水电, 2016(4):150-153+157.
- [20] 杨海平. 基于 AHP-熵组合赋权的土石坝安全模糊评价[J]. 人民黄河, 2013, 35(6):116-118.
- [21] 岳强, 刘福胜, 刘仲秋. 基于模糊层次分析法的平原水库健康综合评价[J]. 水利水运工程学报, 2016(2):62-68.
- [22] 钟鸣. 基于关联规则和云模型的水库诱发地震风险多层次模糊综合评价[D]. 武汉:华中科技大学, 2013.
- [23] 陈诚, 花剑岚. 改进层次分析法在土石坝安全评价中的应用[J]. 水利水电科技进展, 2010, 30(2):58-62.
- [24] 陈曦, 曾亚武, 刘伟. 基于模糊层次分析法的农村水库大坝安全二级模糊综合评价[J]. 水利水电技术, 2019, 50(2):168-176.
- [25] 张迅. 基于模糊层次分析法的高速公路养护施工安全风险评价研究——以 X 项目为例[D]. 广州:华南理工大学, 2019.
- [26] 李鹏, 徐格宁. 采用改进的模糊层次分析法的桥式起重机械安全状态评估[J]. 机械设计与研究, 2021, 37(5):219-223.
- [27] 陈曦, 曾亚武. 基于层次分析法和模糊理论水库大坝安全综合评价[J]. 水利与建筑工程学报, 2017, 15(6):95-100.
- [28] 邓雪, 李家铭, 曾浩健, 等. 层次分析法权重计算方法分析及其应用研究[J]. 数学的实践与认识, 2012, 42(7):93-100.
- [29] 依茹罕. 基于规范法与层次分析法的大坝安全综合评价[D]. 大连:辽宁师范大学, 2020.
- [30] 李新华. 基于层次分析法的水电站工程的风险评价与风险管理研究[D]. 昆明:昆明理工大学, 2007.
- [31] 李晓璐, 李春雷, 李德玉, 等. 基于多层次模糊分析法的大坝安全评价研究[J]. 人民长江, 2010, 41(17):92-95.
- [32] 蒋良奎. 模糊一致矩阵在层次分析法中的应用[J]. 上海海运学院学报, 1998, 19(2):57-62.
- [33] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 水利水电工程地质勘察规范(2022年版):GB 50487—2008[S]. 北京:中国计划出版社, 2023.
- [34] 陈果. 基于层次分析法的小型水库安全综合评价[J]. 水利科技与经济, 2020, 26(5):44-50.

(上接第 166 页)

- [21] HIRT C W, NICHOLS B D. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries[J]. Journal of Computational Physics, 1981, 39(1):201-225.
- [22] 罗银森, 朱位秋. 大型翻板闸门流体激振的双模型试验研究[J]. 浙江大学学报(工学版), 2006, 40(8):1399-1403.
- [23] 中华人民共和国水利部. 水利水电工程钢闸门设计规范:SL 74—2019[S]. 北京:中国水利水电出版社, 2019.
- [24] 刘丰, 王正中, 厉宽中, 等. 考虑流固耦合效应的弧形钢闸门地震动力响应研究[J]. 水资源与水工程学报, 2021, 32(3):158-166.
- [25] 赵佳耀, 黄丹, 徐业鹏, 等. 考虑动水压力和流固耦合的库水-坝体-地基系统建模与动力分析[J]. 计算力学学报, 2020, 37(5):524-529.
- [26] 罗吉安, 周星越. 数值模拟中网格单元形状对计算精度的影响研究[J]. 黄河科技学院学报, 2022, 24(5):8-11.
- [27] 兰佳欣. 压杆布置对弧形闸门的静动力特性影响分析[D]. 哈尔滨:东北农业大学, 2020.
- [28] 古华, 严根华. 水工闸门流固耦合自振特性数值分析[J]. 振动、测试与诊断, 2008, 28(3):242-246+301.
- [29] 严根华. 水动力荷载与闸门振动[J]. 水利水运工程学报, 2001(2):10-15.
- [30] 刘进国. 浅析大型底轴驱动翻板闸门制作工艺要点[J]. 珠江水运, 2021(19):59-60.
- [31] 李旭, 张逸军, 张少飞. 浅谈底轴翻板闸门制造中的监造重点和关键点[J]. 设备监理, 202(6):1-3.
- [32] 胡涛勇, 韩晶, 孙美玲. 底轴驱动闸门动力学分析[J]. 大坝与安全, 2020(6):39-44.