

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2014.01.005

淤地坝工程安全综合评判方法

姜彤,刘勇进

(华北水利水电大学,河南 郑州 450045)

摘要: 由于淤地坝工程本身的复杂性以及评价准则的模糊性,基于层次分析法和模糊综合评判方法,充分考虑影响淤地坝工程安全运行的各种因素或指标,分别给出了淤地坝工程安全性指标综合权重矩阵的概念以及综合评判指标、评价原理和方法。通过青莲河和谭坪小流域坝系安全性模糊矩阵集比对,说明了在进行单坝以及坝系安全性评价时该方法的适用性,对今后淤地坝多坝系间工程安全性评判起到一定的借鉴作用。

关键词: 淤地坝;安全性;层次分析法;模糊评判

中图分类号: TV649

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2014)01-0021-05

Comprehensive Safety Evaluation Method for Warping Dam Engineering

JIANG Tong, LIU Yong-jin

(North China University of Water Conservancy and Hydropower, Zhengzhou, He'nan 450045, China)

Abstract: Due to the complexity of warping dam project and the fuzziness of evaluation criterion, based on the Analytic Hierarchy Process (AHP) and Fuzzy Comprehensive Evaluation Method(FCE), and fully considering the various factors or indicators influencing the safe operation of the warping dam project, the concept of comprehensive weight matrix for safety indexes as well as the comprehensive evaluation index, evaluation principle and method are given to the warping dam engineering, respectively. By comparison with the safety fuzzy matrix set of Qinglian River and Tanping small watershed dam system, the applicability of this method in the safety evaluation of single dam and dam system is illustrated, which will play a certain reference function to the evaluation for the safety of the projects between multiple warping dam systems in the future.

Keywords: warping dam; safety; analytic hierarchy process (AHP); fuzzy evaluation

淤地坝工程是黄土高原地区重要的水土保持设施,对减少入黄泥沙、控制水土流失、巩固退耕还林成果,改善生态环境,促进农业增产、农民增收和农村经济发展发挥了积极作用。大多数骨干坝以及中型坝还承担着所在小流域坝系防洪保安的重要任务。2003—2010年累计建成各类淤地坝8100多座,形成总库容约32亿 m^3 ,拦泥库容约18亿 m^3 ,可淤地面积约为48万亩^[1]。但是,一些地方在淤地坝工程建设管理中不同程度地存在着施工质量差、技术和管理工作不完善、配套资金不落实、运行管护不到位等问题,影响工程的安全运行,对下游人民群众生命财产安全构成威胁,制约了淤地坝的健康发展。

为了解决淤地坝工程建设管理中存在的突出问题,需对已建淤地坝工程的安全性进行全面分析和评价^[2-3]。

大坝安全性评价的方法中较为常用的主要有:大坝结构性态数学模型法^[4],层次分析法^[5-6]。由于大坝结构性态数学模型法单纯强调结构可靠性,忽略了淤地坝的社会属性、自然属性以及经济效益属性,而层次分析法可以充分考虑上述条件因素对淤地坝的影响,所以其在综合评价方面应用较为普遍。近年来,模糊数学^[7]、神经网络^[8-9]、遗传算法^[10]等先进的评价方法得到加速发展,并被逐步应用于系统工程的多因素评估、优化和预测等方面。

收稿日期:2013-11-01

修稿日期:2013-12-13

基金项目:河南省教育厅自然科学研究计划项目(12A410001)

作者简介:姜彤(1973—),男,浙江天台人,博士,教授,博士生导师,主要从事岩土工程方面的研究工作。

将模糊理论与层次分析法结合起来并应用到坝体安全评价中是一项值得研究的新课题。在前人研究^[11-13]基础上,首先确定淤地坝安全性评价指标体系与标准,接着利用层次分析法建立淤地坝各影响因素的权重分析模型,然后结合模糊数学的理论方法得到淤地坝安全性综合评价结果,最后通过实际案例说明了淤地坝工程安全性模糊评判方法的适用性。

1 淤地坝工程评价标准

由于淤地坝工程影响因素较为复杂^[14-15],根据科学性、系统性、简约可操作性原则选取主要治沟骨干坝评价因子:骨干工程安全类别(C_1),工程管护(C_2),防洪减灾能力(C_3),竣工验收(C_4)。主要坝系评价因子:竣工验收优良率(C_5),优良安全类别比率(C_6),总剩余防洪能力(C_7),空间布局均衡系数(C_8)。

骨干坝安全类别(C_1)是一项综合指标,该标准确定将淤地坝按照安全性要求划分为五类:一类坝为实际抗御洪水标准分别达到《水土保持治沟骨干工程技术规范》^[16](SL289-2003)和《水土保持综合治理技术规范沟壑治理技术》^[17](GB/T16453.3-2008)的规定,淤地坝工作状态正常;工程无重大质量问题,能按设计正常运行的淤地坝。二类坝为尚未达到设计淤积高程,运行情况基本正常,但主要建筑物(坝体、放水工程或溢洪道)存在局部裂缝、损坏等情况,所需维修资金较少,由县级及以下政府或管护单位可以承担的;或应用防汛经费,采取一定措施可以保障安全运行的淤地坝。三类坝下游有村庄、学校、工矿、道路等基础设施,溃坝后可能影响下游人员生命安全,需要进一步采取工程措施提高防洪标准或者转移上述已建设施的淤地坝。四类坝为达到或超过设计淤积高程,防洪标准已达不到相应规范的要求,需及时进行加高、加固或配套排洪设施的淤地坝。五类坝为存在较严重安全隐患,如坝体出现贯通性横向裂缝、放水工程不能正常放水、溢洪道不能安全泄洪,或出现不能按设计正常运行的其它严重安全问题的淤地坝。

2 淤地坝工程各评价指标权重

2.1 构造判断矩阵

采用层次分析法,设 $u = \{u_1, u_2, \dots, u_m\}$ 为评价因素集。 u_{ij} 表示 u_i 对 u_j 的相对重要性数值, u_{ij} 的取值按表 1 进行。

表 1 判断矩阵标度及其含义表

标度值	含 义
1	表示因素 u_i 与 u_j 比较,具有同等重要性
3	表示因素 u_i 与 u_j 比较, u_i 比 u_j 稍微的重要
5	表示因素 u_i 与 u_j 比较, u_i 比 u_j 明显的重要
7	表示因素 u_i 与 u_j 比较, u_i 比 u_j 强烈的重要
9	表示因素 u_i 与 u_j 比较, u_i 比 u_j 极端的重要
2,4,6,8	上述两相邻判断的中值
倒数	表示因素 u_i 与 u_j 比较的判断 u_{ij} ,则因素 u_j 与 u_i 比较的判断 $u_{ji} = 1/u_{ij}$

则 m 个因素两两比较后即可得判断矩阵(方阵)

$$T = \begin{pmatrix} u_{11} & u_{12} \cdots & u_{1m} \\ u_{21} & u_{22} \cdots & u_{2m} \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ u_{m1} & u_{m2} \cdots & u_{mm} \end{pmatrix} \quad (1)$$

称 T 为判断矩阵。

2.2 层次单排序及其一致性检验

对应判断矩阵最大特征根 λ_{\max} 的特征向量,经归一化(使向量中各元素之和等于 1)后记为 W 。

W 的元素为同一层次因素对于上一层次因素某因素相对重要性的排序权值,这一过程称为层次单排序。能否确认层次单排序,需要进行一致性检验,所谓一致性检验是指对 T 确定不一致的允许范围。其检验公式为:

$$CR = CI/RI \quad (2)$$

式中: CR 为判断矩阵的随机一致性比率,当 $CR < 0.1$ 时,认为 T 的不一致程度在容许范围之内,通过一致性检验,否则,应根据文献[18]对层次分析法进行相应的修正。

CI 为判断矩阵一致性指标,其值可由下式求得:

$$CI = \frac{1}{m-1}(\lambda_{\max} - m) \quad (3)$$

式中: λ_{\max} 为最大特征值; m 为判断矩阵阶数;当 $CI = 0$ 时,表示有完全一致性; CI 趋于零,有较满意的一致性;相反,则不一致性越严重。

RI 为判断矩阵的随机一致性指标。 RI 已经通过大量试验数据求出,可根据 m 查询随机一致性指标表获得。

2.3 淤地坝工程各安全性指标权重

根据以上步骤,利用 $C_1 \sim C_4$ 构造治沟骨干坝安全性判断矩阵:

$$T_1 = \begin{pmatrix} u_{11}^{(1)} & \cdots & u_{14}^{(1)} \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ u_{41}^{(1)} & \cdots & u_{44}^{(1)} \end{pmatrix} \quad (4)$$

式中: $u_{ij}^{(1)}$ 含义同表 1。

由 $C_5 \sim C_8$ 构造的坝系安全性判断矩阵:

$$T_2 = \begin{pmatrix} u_{11}^{(2)} & \cdots & u_{14}^{(2)} \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ u_{41}^{(2)} & \cdots & u_{44}^{(2)} \end{pmatrix} \quad (5)$$

式中: $u_{ij}^{(2)}$ 含义同表 1。

经过 40 余位专家评议各安全性指标相对重要程度,取其平均值作为该评价指标的相对值,最后利用层次分析法软件 Yaahp 获得各指标相应的权重如表 2 所示。

其随机一致性比率 $CR_1 = 0.089 < 0.1$, $CR_2 = 0.023 < 0.1$,通过一致性检验。

表 2 淤地坝工程安全性指标体系及权重表

目标层 (A)	准则层 (B)	指标层(C)	评价等级					权重值
			强安全 V_1	较强安全 V_2	基本安全 V_3	弱安全 V_4	不安全 V_5	
坝系工程 安全性 (A)	治沟骨干 工程安全 评价指标 (B_1)	骨干坝安全类别(C_1)	一类坝	二类坝	三类坝	四类坝	五类坝	0.4964
		工程管护(C_2)	县级	乡镇	村级	个人承包	无人管护	0.0827
	坝系工程 安全评价 指标(B_2)	防洪减灾能力(C_3)/%	90~100	70~90	50~70	30~50	<30	0.2668
		竣工验收(C_4)	优秀	优良	良好	合格	不合格	0.1540
		竣工验收优良率(C_5)/%	>90	80~90	70~80	60~70	<60	0.1988
		优良安全类别比率(C_6)/%	>90	80~90	70~80	60~70	<60	0.3976
		总剩余防洪能力(C_7)/%	90~100	70~90	50~70	30~50	<30	0.1672
		空间布局均衡系数(C_8)/%	≥ 60	50~60	30~50	20~30	<20	0.2364

3 模糊综合评判

运用模糊综合评判法(Fuzzy Comprehensive Evaluation, FCE)对淤地坝工程安全性进行评判,其方法如下:

步骤 1:确定影响淤地坝工程安全性评价的各种因素所构成的集合 U 和评语等级标准集合 V 。

假设安全评价过程中有 n 个影响因素,则相应的影响因素集合 $U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$;并且,相应的 m 个评语标准 $V = \{v_1, v_2, \dots, v_m\}$ 。

步骤 2:建立各个评价因素的权重分配向量 B ,即表 2 中利用层次分析法确定的各安全性指标的权重值。

治沟骨干坝评价的权重向量

$$B_1 = (0.4964, 0.0827, 0.2668, 0.1540)$$

坝系评价的权重向量

$$B_2 = (0.1988, 0.3976, 0.1672, 0.2364)$$

步骤 3:建立 U 与 V 之间的模糊关系,即构造隶属度矩阵 R 。

$$R = (R_1 \ R_2 \ \cdots \ R_m)^T = (r_{ij})_{n \times m} \quad (6)$$

式中: R_i 为第 i 个元素对应的评价标准。

$$r_{ij} = \frac{u_j \in v_i}{n} \quad (7)$$

式中: n 为样本总数, $u_j \in v_i$ 为第 i 个元素在第 j 个评语上的所占比重 $r_{ij} \in [0, 1]$

步骤 4:最终得到治沟骨干坝安全性模糊评判集

$$Z_1 = B_1 R_1 \quad (8)$$

坝系工程安全性模糊评判集

$$Z_2 = B_2 R_2 \quad (9)$$

4 实例演算

4.1 工程概况

青莲河小流域位于河南省三门峡市绳池县境内,该流域为洛河上的一级支流,流域总面积 64.0 km²,属黄土丘陵沟壑区第三副区。2003—2010 年青莲河小流域共建骨干坝 8 座,中型淤地坝 8 座、小型淤地坝 15 座。治沟骨干坝工程设计标准:20 a ~ 30 a 一遇设计,200 a ~ 300 a 一遇洪水校核。青莲河小流域内总库容 768.92 万 m³,拦泥库容 296.90 万 m³。各淤地坝工程淤积年限分别为:小型坝 5 a,中型坝 10 a,骨干坝 15 a。坝系工程达到淤积年限后将新增坝地面积 124.44 hm²,最终可发展灌溉 815 hm²。

谭坪小流域位于山西省临汾市乡宁县县城西南 30 km,为直接入黄的一级支流,属黄土残垣沟壑区。该流域片由宜春沟和瓦渠沟两条小流域组成,总面

积 72.00 km²。2003—2010 年谭坪小流域坝系建有治沟骨干坝 13 座,中型淤地坝 13 座,小型淤地坝 8 座,控制流域面积 54.95 km²。工程设计总库容 1 426.12 × 10⁴ m³,滞洪库容 491.67 × 10⁴ m³,可淤地面积 124.12 hm²。

4.2 淤地坝工程模糊综合评判

4.2.1 青莲河小流域治沟骨干坝安全性评判

(1) 治沟骨干坝安全性指标 $C_1 \sim C_4$ 的隶属度矩阵

根据青莲河小流域坝系工程验收资料,参照表 2 中评价标准对其进行统计,利用公式(7)求得相应的 r_{ij} 。

青莲河小流域治沟骨干坝的隶属度矩阵 R_1 见表 3 所示。

表 3 青莲河小流域骨干坝隶属度矩阵 R_1 表

评价因子	评价等级				
	强安全 V_1	较强安全 V_2	基本安全 V_3	弱安全 V_4	不安全 V_5
安全类别(C_1)	0.75	0.25	0.00	0.00	0.00
管护形式(C_2)	0.00	0.75	0.25	0.00	0.00
剩余拦洪库容/设计拦洪库容(C_3)	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
竣工验收结论(C_4)	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00

表 4 青莲河小流域坝系隶属度矩阵 $R_2^{(1)}$ 表

评价因子	评价等级				
	强安全 V_1	较强安全 V_2	基本安全 V_3	弱安全 V_4	不安全 V_5
竣工验收优良率(C_5)	0	0	0.00	1.00	0.00
安全类别(一类坝、二类坝的数量)(C_6)	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
总剩余拦洪库容/总设计拦洪库容(C_7)	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
规范中骨干坝控制面积下限/ 坝系最大骨干工程控制面积(C_8)	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00

表 5 谭坪小流域坝系隶属度矩阵 $R_2^{(2)}$ 表

评价因子	评价等级				
	强安全 V_1	较强安全 V_2	基本安全 V_3	弱安全 V_4	不安全 V_5
竣工验收优良率(C_5)	0	0	1.00	0.00	0.00
一二类坝的比重(C_6)	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
总剩余拦洪库容/总设计拦洪库容(C_7)	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
规范中骨干坝控制面积下限/ 坝系最大骨干工程控制面积(C_8)	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00

5 结果分析

(1) 青莲河小流域治沟骨干坝的安全性分析。利用淤地坝工程安全综合评判指标体系计算方法,

(2) 治沟骨干坝安全性模糊评价集

利用公式(8)可得:

$$Z_1 = (0.6391, 0.1861, 0.0207, 0.1540, 0.0000)$$

4.2.2 坝系工程安全性评判

(1) 坝系安全性指标 $C_5 \sim C_8$ 的隶属度矩阵

根据青莲河小流域坝系以及谭坪小流域坝系工程验收资料,利用公式(9)计算得隶属度矩阵 $R_2^{(1)}$ 和 $R_2^{(2)}$ 如表 4、表 5 所示。

(2) 坝系工程安全性模糊评判集

根据公式(5)可得:

青莲河小流域坝系模糊综合评判集

$$Z_2^{(1)} = (0.5648, 0.2364, 0.0000, 0.1988, 0.0000)$$

谭坪小流域坝系模糊综合评判集

$$Z_2^{(2)} = (0.5648, 0.0000, 0.4352, 0.0000, 0.0000)$$

对青莲河小流域内的 8 座骨干坝进行了安全综合评价。由其模糊评判集 Z_1 不难发现,该流域内治沟骨干坝对强安全等级的隶属度为 0.6391,远高于其余等级的隶属度,故评定该流域骨干坝为强安全等

级。

同时,发现其弱安全等级隶属度为 0.1540。观察表 2 与表 3 其原因为治沟骨干坝的竣工结论均为合格,说明该坝基本能安全运行,前期可以进行试运行,通过增添该流域内的骨干坝监控设施,增派巡察人员,以防险情发生。

(2) 青莲河小流域与谭坪小流域坝系安全性分析。对比两流域模糊综合评判集的计算结果,两者强安全等级的隶属度一致,均为 0.5648 超过其余安全评判等级的隶属度,说明青莲河小流域坝系与谭坪小流域坝系处于强安全运行状态。但是,由于青莲河小流域坝系骨干坝验收结论均为合格,故其对弱安全等级的隶属度等于 0.1988。因此,在当前淤地坝安全综合评判方法下,青莲河小流域坝系安全性低于谭坪小流域坝系。

本文结论与上述两流域竣工验收报告中综合评价结论大体一致,说明该方法在多坝系安全性评判中具有一定的参考借鉴作用。在评价利用层次分析法确定各指标相对权重时,仍不可避免具有一定的主观性,因此评价前应综合考虑工程本身的性质,选取具有代表性的专家对各指标进行对比评判。

参考文献:

[1] 王理想,何 影.淤地坝工程可持续能力评价[J].华北水利水电学院学报,2013,34(2):43-47.

[2] 欧阳新华.水利部启动黄土高原淤地坝安全大检查专项行动[N].黄河报,2009-03-14(01).

[3] 覃友中.大坝安全评价的现状及其发展要求[J].四川水力发电,1996,15(4):14-20.

[4] 胡云鹤.土石坝安全评价理论与系统开发研究[D].郑州:郑州大学,2011.

[5] 陈南祥,董贵明,贺新春.基于 AHP 的地下水环境脆弱性模糊综合评价[J].华北水利水电学院学报,2005,26

(3):63-66.

[6] 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.

[7] 李宗坤,周 晶,郑晶星.土石坝实测性态多级模糊模式识别方法研究[J].水利学报,2003,48(9):83-87.

[8] 马 莎,姜 彤,黄志全,等.岩体变形模量偏最小二乘回归与神经网络关联性研究[J].岩石力学与工程学报,2004,23(22):3770-3774.

[9] 霍润科,刘汉东.神经网络法在地下洞室围岩分类中的应用[J].华北水利水电学院学报,1998,19(2):61-63,66.

[10] 陈南祥,李跃鹏,徐晨光.基于多目标遗传算法的水资源优化配置[J].水利学报,2006,37(3):308-313.

[11] 李日运,王 巍,王新建,等.模糊层次分析法在深基坑支护方案优化中的应用[J].华北水利水电学院学报,2013,34(2):55-58.

[12] 彭 辉,彭惠明,程圣国.多层次模糊评判的土石坝安全综合评价研究[J].灾害与防治工程,2006,1(1):5-11.

[13] 李念国,梁秋生.土坝安全评估综合评判法研究[J].黑龙江水专学报,2007,34(3):15-19.

[14] 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):38-40,87.

[15] 蒋耿民.淤地坝坝系工程总体布局综合评价指标体系及模型研究[D].杨凌:西北农林科技大学,2010.

[16] 中华人民共和国水利部.SL289-2003.水土保持治沟骨干工程技术规范[S].北京:中国水利水电出版社,2003.

[17] 中华人民共和国质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.GB/T16453.3-2008.水土保持综合治理技术规范沟壑治理技术[S].北京:中国标准出版社,2008.

[18] 束 兵.中小型水库土石坝安全度的模糊综合评价[D].合肥:合肥工业大学,2006.