

DOI :10.3876/j.issn.1000-1980.2010.06.011

考虑时变效应的土石坝安全风险综合评价模型

李 益^{1,2}, 蔡 新^{1,2,3}, 徐锦才⁴, 李洪煊^{3,5}, 戴双喜^{1,2}

(1.河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室,江苏 南京 210098;
2.河海大学力学与材料学院,江苏 南京 210098;3.河海大学水利水电学院,江苏 南京 210098;
4.水利部农村电气化研究所,浙江 杭州 310012;5.南京市市政设计研究院,江苏 南京 210008)

摘要:针对土石坝整体安全风险和时变效应问题,以调查资料为基础,分析了土石坝整体安全的主要影响因素,综合运用层次分析法、可靠度计算法和专家评判法,以洪水漫顶、滑坡失稳、渗透变形以及工程管理为基本要素,构建土石坝安全风险评价指标体系,考虑洪水漫顶、滑坡失稳、渗透变形的时变效应,研究了基于时变效应理论的多层次土石坝安全风险综合评价模型。工程实例分析表明,该模型是可行和有效的,可为土石坝除险加固、水电站安全运行提供参考。

关键词:土石坝;风险评价;时变效应;层次分析法

中图分类号:TV641 文献标志码:A 文章编号:1000-1980(2010)06-0655-05

挡水建筑物是水电站主要组成部分之一,其安全性直接影响水电站的正常运行,对水电站挡水建筑物进行安全风险评估尤为重要。土石坝是水电站挡水建筑物中应用最广泛的一种坝型,因而对土石坝进行安全风险评估是重中之重。土石坝除险加固和失事实例表明,洪水漫顶、滑坡失稳和渗透变形是土石坝的主要破坏模式^[1-3]。传统的土石坝安全评估中,单独对洪水漫顶、滑坡失稳、渗透变形 3 项进行可靠度计算,得出三者的安全水平,并没有评估土石坝整体的安全风险,寻求一种能有效评价土石坝整体安全性的方法是亟待解决的问题。结构的荷载和抗力在设计基准期内随时间变化,土石坝安全的主要影响因素是动态变化的,土石坝安全性具有明显的时变特征,考虑时变效应的土石坝安全风险评价更加科学、合理。

本文在总结、分析大量调查资料的基础上,归纳了影响土石坝整体安全的主要因素,构建了以洪水漫顶、滑坡失稳、渗透变形和管理不当为基本要素的土石坝安全风险评价指标体系,研究、提出了土石坝安全风险综合评判模型,并初步探讨了洪水漫顶、滑坡失稳和渗透变形的时变效应对土石坝整体安全风险的影响。

1 土石坝安全风险评价指标体系

水利部农村电气化研究所通过现场调研并对调查资料的统计分析得出导致小水电站土石坝失事的主要原因有洪水漫坝、坝体失稳、渗透变形破坏和管理不当。进一步分析以上原因,得到影响土石坝安全的主要因素有:洪水漫顶、上游滑坡失稳、下游滑坡失稳、管涌、流土、接触冲刷、接触流失、运行时间、安全检测和维护加固等。

在对土石坝安全影响因素分析基础上,以安全风险评价指标选取的规范性、科学性、全面性、层次性、独立性和可行性为基本原则,以土石坝整体安全性为总目标,将总目标分解为渗透、漫坝、稳定、管理 4 项子目标,每项子目标再分解成若干基础指标,构造出多层次、多目标的土石坝安全风险综合评价指标体系,如表 1 所示。

表 1 土石坝安全风险评价指标体系
Table 1 Safety risk assessment model for earth-rock dams

总目标	子目标	基础指标
总安全度	渗透	管涌
		流土
		接触冲刷
		接触流失
	漫坝	洪水漫顶
		上游滑坡失稳
	稳定	下游滑坡失稳
		运行时间
	管理	安全检测
		维护加固

2 土石坝安全风险综合评价方法

2.1 安全风险评价方法

评价结构安全风险的方法总体可以归结为三大类:定性评价法、定量评价法和综合评价法。定性评价法(如专家评判法、加权评分法)主要用于指标的非量化评估,操作简单、快捷,但带有人为主观成分;定量评价法(如可靠度计算法、安全系数法、有限元计算法)可计算出指标的具体评估值,但实际应用范围有限;综合评价法由于兼有前两者的优点,得到了广泛的应用。

本文引入模糊数学理论,采用综合评价法对土石坝系统进行安全风险评估,采用层次分析法来确定各指标体系的权重。

2.2 基础指标失效概率计算方法

基础指标根据其特性可分为定性指标和定量指标^[4]。本文将各基础指标分为A、B、C、D 4个等级,每个等级对应相应的安全级别和失效概率范围如表2所示。对于定性指标,由于其模糊性和非量化的特点,可先由多位专家综合定出其指标等级,再在其指标级别对应的失效概率范围内确定指标的失效概率;对于定量指标,可以通过可靠度计算等方法计算出其失效概率^[5-10],也可以采用与定性指标相同的方法进行计算。

表2 基础指标等级

Table 2 Level of basic indices			
指标等级	安全级别	可靠度范围	失效概率范围/ 10^{-6}
A	安全	≥ 3.7	≤ 107.8
B	较安全	$3.2 \sim < 3.7$	$> 107.8 \sim 687.1$
C	较不安全	$2.7 \sim < 3.2$	$> 687.1 \sim 3467.0$
D	不安全	< 2.7	> 3467.0

2.3 土石坝安全风险计算方法

确定各指标权重系数以及各基础指标的失效概率后,就可以构建土石坝安全风险综合评价模型如下:

$$P_{fm} = (A_m)_{1 \times k} (T_m)_{k \times 1} \quad P_F = (B)_{1 \times 4} (P)_{4 \times 1} \quad (m = 1, 2, 3, 4) \quad (1)$$

式中: P_{fm} ——第 m 个子目标的失效概率; A_m, T_m ——第 m 个子目标下基础指标的权重系数矩阵和失效概率列阵; k ——第 m 个子目标下基础指标的个数; P_F ——土石坝整体安全失效概率; B, P ——子目标的权重系数矩阵和失效概率列阵。

3 考虑时变效应的安全风险评价模型

3.1 时变效应下土石坝安全风险评价模型

影响土石坝安全的主要因素在其生命周期内随时间动态变化,由于这种变化是趋劣性的,导致土石坝整体安全性降低、风险增大,土石坝安全风险具有明显的时变效应。考虑时变效应后,土石坝安全风险综合评判模型可表示为

$$P_{fmt} = (A_{mt})_{1 \times k} (T_{mt})_{k \times 1} \quad P_{Ft} = (B_t)_{1 \times 4} (P_t)_{4 \times 1} \quad (m = 1, 2, 3, 4) \quad (2)$$

式中: P_{fmt} ——时间为 t 时第 m 个子目标的失效概率; A_{mt}, T_{mt} ——时间为 t 时第 m 个子目标下基础指标的权重系数矩阵和失效概率列阵; k ——第 m 个子目标下基础指标的个数; P_{Ft} ——时间为 t 时土石坝整体安全失效概率; B_t, P_t ——时间为 t 时子目标的权重系数矩阵和失效概率列阵。

3.2 土石坝安全风险时变效应

一般情况下,失效概率随时间变化是一维或多维的随机非平稳过程,很难具体地表示其时间变化函数。因此,本文采用较为简单的随机过程模型进行模拟,即:

$$P_{ft} = P_{ft_0} \varphi_{ijt} \quad (3)$$

式中: P_{ft} ——时间为 t 时土石坝指标的失效概率; t_0 ——土石坝完建时间; P_{ft_0} ——土石坝完建时某项指标的失效概率; φ_{ijt} ——时间为 t 时指标的衰减程度。

本文主要考虑坝顶高程的改变引起土石坝漫坝风险、坝坡失稳的时变效应以及土体渗透率的变化导致土石坝渗透的时变效应对土石坝整体安全性的影响。因此作如下假定:

a. 假定大坝设计基准期以 50 a 计,沉降稳定时总沉降量按原始坝高的 1% 计算,衰减函数取为幂形式^[11],则构造出的大坝坝高衰减函数为

$$\alpha_t = \left(1 - 0.005 \frac{t}{50}\right)^2 \quad (4)$$

式中： α_t ——时间为 t 时大坝坝高衰减程度； t ——大坝运行时间，a。

b. 在分析土石坝渗透时变效应时，以土体渗透率 k 反映土体的渗透特性， k 值越大，说明土体越容易发生渗透破坏。在渗流过程中，土体渗透率与时间之间存在反正切函数变化关系^[12-13]。由此构造土体渗透率时变函数：

$$k_t = k_0 \left(1 + \frac{2}{\pi} \arctan t \right)$$

(5)

式中： k_t ——时间为 t 时大坝土体渗透率； k_0 ——大坝建成时土石坝土体渗透率。

其他影响因素的衰减函数国内外研究尚少，本文暂不予考虑。

4 实例分析

某水库大坝是一座集发电、防洪、供水、旅游为一体的综合性大(Ⅰ)型水利枢纽工程。水库正常高水位 185.00 m，死水位 165.00 m，千年一遇设计洪峰流量 6 640 m³/s，设计洪水位 188.10 m，万年一遇校核洪峰流量 8 700 m³/s，校核洪水位 189.50 m。大坝为黏土心墙和混凝土心墙相结合的土石坝，最大坝高 70.40 m，坝长 425.00 m，坝顶高程 190.40 m。

洪水漫顶及上、下游滑坡失稳 3 项基础指标按定量指标分析，通过 Visual Basic 语言编程计算出其相应的失效概率；其他基础指标按定性指标分析，通过专家评定其安全级别，然后在安全级别对应的失效概率范围内选择其失效概率；各级指标的权重由专家给出指标的判断矩阵，利用层次分析法计算得出。结合表 1 所示的大坝安全风险评价指标体系，最终得到整个水库大坝的整体失效概率，计算成果如表 3 所示。考虑大坝漫坝、坝坡失稳以及大坝渗透的时变效应对土石坝整体安全性的影响，得到土石坝整体安全的时变效应，如图 1 所示。

表 3 大坝安全风险评价结果
Table 3 Results of dam safety risk assessment

子目标	子目标权重	子目标失效概率/ 10^{-6}	基础指标	基础指标权重	基础指标失效概率/ 10^{-6}
渗透	0.142	147.3	管涌	0.411	160.0
			流土	0.411	160.0
			接触冲刷	0.113	88.4
			接触流失	0.065	88.4
漫坝	0.515	5.1	洪水漫顶	1.000	5.1
稳定	0.293	181.3	上游滑坡失稳	0.167	48.0
			下游滑坡失稳	0.833	208.0
管理	0.051	390.0	运行时间	0.276	688.0
			安全检测	0.128	483.0
			维护加固	0.596	232.0

注：整体安全失效概率为 96.53×10^{-6} 。

由表 3 可知：该大坝整体安全失效概率为 96.53×10^{-6} ，对应的可靠度约为 3.73，由表 2 及规范^[14]可知大坝整体是安全的；对基础指标进行敏度分析得出，洪水漫顶和下游滑坡失稳两项的权重系数占总体权重的比重较大，在对大坝进行加固维修时应首先考虑这两项的加固措施。

由图 1 可得：该土石坝整体安全失效概率随时间逐渐增大，从 96.53×10^{-6} 增加到 121.14×10^{-6} ，相应的可靠度由 3.73 降低到 3.67，在建完后 5 a 内，大坝整体安全失效概率随时间增长较快；5 a 后，失效概率随时间增长逐渐变缓，趋于稳定。说明在土石坝刚完工的几年内，大坝整体安全性不太稳定。

该水库大坝于 1974 年完成混凝土防渗墙的加固施工，1993 年完成大坝灌浆防渗施工。检测资料表明：加固完成后，坝顶存在沉陷现象，经回填、压实黏土后坝顶沉陷趋势趋于缓和；当防洪限制

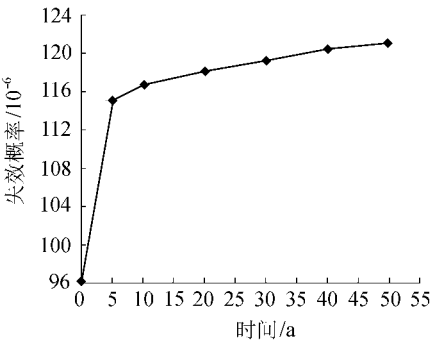


图 1 大坝安全风险时变效应
Fig. 1 Time-varying effect of dam safety risk

水位控制在 185.00 m 时,大坝防洪满足设计要求,大坝在高库水位下未出现浸润线溢出现象,大坝渗流处于安全状态.与大坝安全现状比较可知,计算所得结果能较好地反映出该大坝安全风险状态,模型是可行、有效的.

5 结 语

本文用结构安全风险分析方法取代了传统的安全系数法,对土石坝安全风险进行综合评价,考虑漫坝、渗透、稳定和管理对于大坝整体安全性的影响,建立了土石坝安全风险综合评价模型.土石坝安全主要影响因素具有时变特性,其整体安全性随时间动态变化,评估土石坝安全风险时考虑时变效应更加合理、科学.本文仅对土石坝安全风险综合评价方法及其时变效应做了初步的研究探讨,考虑更多复杂因素时变作用下的土石坝安全综合评价模型是下一步的研究方向.

参考文献:

- [1] 麻荣永.土石坝风险分析方法及应用[M].北京:科学出版社,2004:162-171.
- [2] 陈诚,朱歧武,李舒瑶.土石坝溃决模型研究[J].人民黄河,2009,31(12):121-122.(CHEN Cheng,ZHU Qi-wu,LI Shu-yao.Study on earth and rockfill dam burst mode[J].Yellow River,2009,31(12):121-122.(in Chinese))
- [3] 李雷,王仁钟,盛金宝,等.大坝风险评价与风险管理[M].北京:中国水利水电出版社,2006:17-22.
- [4] 顾冲时,汪自力,刘成栋.堤防工程安全评估专家赋权模型[J].岩土力学,2006,27(12):2009-2014.(GU Chong-shi,WANG Zi-li,LIU Cheng-dong.Experts' weight model assessing embankment safety[J].Rock and Soil Mechanics,2006,27(12):2009-2014.(in Chinese))
- [5] 莫崇勋,董增川.区间分析在漫坝风险评判中的应用[J].水力发电,2007,33(6):16-18.(MO Chong-xun,DONG Zeng-chuan.Application of interval analysis to evaluating overtopping risk[J].Water Power,2007,33(6):16-18.(in Chinese))
- [6] 程圣国,陈高峰.考虑参数相关性的滑坡稳定敏感性分析模式研究[J].水力发电,2008,34(6):38-40.(CHENG Sheng-guo,CHEN Gao-feng.Study on analysis model of landslide stability sensitivity considering of parameter correlation[J].Water Power,2008,34(6):38-40.(in Chinese))
- [7] 范子武,姜树海.大坝防洪时变风险率研究[J].水利学报,2007(增刊1):168-173.(FAN Zi-wu,JIANG Shu-hai.Researches on time-varying risk rate for flood control of dam[J].Journal of Hydraulic Engineering,2007(Sup1):168-173.(in Chinese))
- [8] 王仲珏,冯平.基于时变可靠度的水工建筑物防洪风险估算[J].天津大学学报,2008,41(11):1336-1336.(WANG Zhong-jue,FENG Ping.Flood risk assessment of water construction based on time-dependent reliability theory[J].Journal of Tianjin University,2008,41(11):1336-1336.(in Chinese))
- [9] 薛新华,张我华.堤坝管涌渗流的损伤机理分析[J].江南大学学报:自然科学版,2009,8(1):85-89.(XUE Xin-hua,ZHANG Wo-hua.Damage theoretical analysis of piping seepage in embankmen[J].Journal of Jiangnan University:Natural Science Edition,2009,8(1):85-89.(in Chinese))
- [10] 魏海,沈振中.土坝渗透稳定可靠性分析方法及应用[J].岩土工程学报,2008,30(9):1404-1409.(WEI Hai,SHEN Zhen-zhong.Reliability analysis on seepage stability of earth dams and its application[J].Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2008,30(9):1404-1409.(in Chinese))
- [11] 姜树海,范子武.时变效应对大坝防洪风险率的影响研究[J].水利学报,2006,37(4):425-430.(JIANG Shu-hai,FAN Zi-wu.Influence of time-varying effect on flood control risk rate for dam[J].Journal of Hydraulic Engineering,2006,37(4):425-430.(in Chinese))
- [12] 程伟平.动态模型在土石坝长期渗流稳定性分析中的研究[J].水力发电学报,2005,24(4):84-88.(CHENG Wei-ping.Study of seepage stability of earth-rockfill dam based on dynamic statistical mode[J].Journal of Hydroelectric Engineering,2005,24(4):84-88.(in Chinese))
- [13] 吴增光,四旭飞,杨敏.时变渗透特性的底板中水渗流过程分析[J].湖南科技大学学报:自然科学版,2010,25(1):62-66.(WU Zeng-guang,SI Xu-fei,YANG Min.Analysis on the seepage flow of water in coal seam floor with variable permeability paramters[J].Journal of Hunan University of Science & Technology:Natural Science Edition,2010,25(1):62-66.(in Chinese))
- [14] GB50199—1994 水利水电工程结构可靠度设计统一标准[S].

Safety risk comprehensive evaluation model of earth-rock dams considering time-varying effect

LI Yi^{1 2}, CAI Xin^{1 2 3}, XU Jin-cai⁴, LI Hong-xuan^{1 3 5}, DAI Shuang-xi^{1 2}

- (1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering , Nanjing 210098 , China ;
- 2. College of Mechanics and Materials , Hohai University , Nanjing 210098 , China ;
- 3. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering , Hohai University , Nanjing 210098 , China ;
- 4. National Research Institute for Rural Electrification , Hangzhou 310012 , China ;
- 5. Nanjing Municipal Design and Research Institute , Nanjing 210008 , China)

Abstract : For the safety risk and time-varying effect of earth-rock dams , the main factors for earth-rock dams were analyzed based on the survey data. The analytical hierarchy process (AHP) , reliability calculation method and expert judgment method were employed. An evaluation index system for earth-rock dam safety assessment was established. It included the basic elements of dam overtopping , slope failure , seepage deformation and project management. Considering the time-varying effect of the dam overtopping , slope failure and seepage deformation , the safety risk comprehensive evaluation model for earth-rock dams was investigated. The results of engineering cases indicate that the proposed model is feasible and practical , and it can be used for the rehabilitation of earth-rock dams and the safety operation of hydropower stations.

Key words : earth-rock dam ; risk assessment ; time-varying effect ; AHP

《河海大学学报(自然科学版)》征订启事

(邮发代号 28-63 ,CN32-1117/TV ,ISSN1000-1980 ,双月刊)

《河海大学学报(自然科学版)》是以水资源开发、利用与保护为重点的综合性学术期刊 ,主要刊登河海大学在水资源、水文、地质、测量、水利工程、水电工程、水运工程、海洋及海岸工程、水工结构、工程力学、水力学及河流动力学、岩土工程、计算机科学、电力工程、电子技术及自动化工程、工业与民用建筑、环境工程、机械工程等学科方面的科研成果、学术论文、学术讨论、研究动态等学术性文章 ,可供上述有关专业的科技工作者及大专院校师生阅读和参考。

《河海大学学报(自然科学版)》创办于 1957 年 ,是全国中文核心期刊、中国科技核心期刊 ,在国内工程技术界和学术界有较大影响。刊载的文章中 ,大部分为国家科技攻关(重点)项目和各种科学基金资助项目的研究成果 ,部分达到了国内领先和国际先进水平 ,为我国水利、水电、水运工程及其他有关工程建设的规划、设计、施工和管理提供了科学理论、方法和具体建议 ,发挥了较大的社会效益和经济效益 ,深受工程界和科技界赞许 ,并获得中国高校精品科技期刊奖以及中国期刊方阵“ 双效期刊 ”、华东地区优秀期刊、江苏省优秀期刊、全国水利系统优秀期刊称号。

《河海大学学报(自然科学版)》每逢单月出版 ,国内外公开发行 ,每期定价 12.00 元 ,全年 6 期共 72.00 元。欢迎广大读者通过全国各地邮政局订阅或直接与编辑部联系。

编辑部地址 :南京市西康路 1 号 《河海大学学报(自然科学版)》编辑部

邮政编码 210098

电话/传真 025-83786343

E-mail :xb@hhu.edu.cn

网址 :kbb.hhu.edu.cn/web/index_xb.asp?id=53