

考虑时变效应的水电工程运行安全风险分析方法

张社荣, 严磊

(天津大学建筑工程学院, 天津 300072)

[摘要] 针对水电工程风险因子的时变特性,用随机过程的方法模拟结构抗力与荷载作用,分析水电工程结构特性与运行方式,综合运用改进层次分析法、时变可靠度理论和风险率阈值,建立水电工程运行安全风险率评估模型。以土石坝工程为算例,详细展示时变风险率评估方法的分析流程。算例表明,工程运行安全风险率与服役时间及设计标准有着密切关系;考虑时变效应,风险率随时间推移而逐渐增大,其与设计标准的交点反映结构技术性使用寿命。应用文章提出的评估模型,预测运行期风险率变化趋势,可为水电工程的安全运行和风险决策提供科学依据。

[关键词] 水电工程运行安全;风险分析;风险率评估;时变可靠度;改进层次分析法

[中图分类号] TV697 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2011)12-0051-05

1 前言

基于风险理念对水电工程进行安全评估与管理是近20年来在国外发展起来的一种安全管理新理念,它不仅考虑水电工程的安全,更重要的是保障下游的公共安全,将水电工程安全风险控制在下游容许风险之内。这一理念对我国水电工程安全管理影响巨大,将我国工程界历来重视的“工程安全”转换到“工程风险”^[1]。将水电工程风险以工程失事概率(即风险率)与其产生后果(即风险损失)的乘积来度量,国内专家已达成共识。文章重点研究前者,即工程运行安全风险率评估方法。

风险率是描述可靠度的指标之一,它主要考虑水电工程风险因子的随机不确定性,以数理统计法为主,常采用的方法有直接积分法、一次二阶矩法(first order second moment method, FOSM)、JC法(该方法是国际结构安全度联合委员会(JCSS)所推荐的可靠指标求解方法,故简称为JC法)、蒙特卡罗(Monte Carlo, MC)法、降维数值解法、随机有限元法(stochastic finite element method, SFEM)等。这些方法被广泛应用于水电工程可靠性分析的各个方面。

Meon采用直接积分法分析了大坝的漫顶概率^[2]。董增川等在综合考虑洪水、风浪、库容、泄洪等不确定性因素基础上建立了土石坝漫坝风险模型,并提出用“积分-一次二阶矩法”进行求解^[3]。陈凤兰等对泄洪风险计算的JC法和MC法进行对比,结果表明两种方法结果相近,但JC法计算效率远比MC法高^[4]。张社荣等提出了岩质边坡稳定可靠度分析的离散化降维解法,另基于可靠度分析法给出了最危险滑弧的搜索方法及验证了土的抗剪强度是边坡稳定的主要因素^[5,6];王媛等基于TSFEM法(Taylor展开SFEM法的简称)推导出渗流响应量的随机响应公式,编程实现了三维稳定渗流场分析^[7]。

上述这些方法均是从时不变可靠度的角度来考察工程安全风险的。然而在水电工程设计基准期内,影响工程安全的主要风险因子(包括结构内部材料)是动态变化的。随着时间的推移,风险分析结果也会发生变化,即结构安全性具有时变效应。一方面在长期使用过程中,由于外部环境和材料内部相互作用的影响,工程安全性将发生缓慢变化,通常以年为单位计算;另一方面,在一个相对较短的时

[收稿日期] 2011-09-16

[基金项目] 国家自然科学基金创新研究群体科学基金(51021004)

[作者简介] 张社荣(1960—),男,山东日照市人,天津大学教授,研究方向为工程结构可靠度与风险分析;E-mail: tjuzsr@126.com

期内,突发的极端条件使得工程安全性发生突变,根据实际情况以天或小时计算。这两方面的长期积累严重影响着结构的服役期限。因此,在研究水电工程运行安全风险时,必须考虑时变效应的影响。

基于此,文章考虑时变效应,按照一致的概率标准,分析各时变不确定性因素的影响,选取风险因子可靠度衰减函数,建立水电工程运行安全风险率估计模型,进而评估设计基准期内的工程安全性,可为水电工程安全运行及风险决策提供科学依据。

2 风险分析体系及方法

2.1 风险分析体系

水电工程风险分析主要包括3个互相联系的部分,即风险识别、风险估计和风险评价。其中,风险识别主要包括识别影响工程安全的不确定性因素(即风险因子)、工程潜在失事模式及路径、失事后果影响等,是进行风险估计和评价的前提基础。风险估计着重于定量地估计工程失事的成因和发生的概率以及失事后果等;风险评价则是要解决“怎样才算安全”的问题,为决策者提出建议,具体内容是评价工程的安全性、可靠性以及在综合考虑工程失事概率和后果的基础上制定风险处理方案,建立经济投入、工程安全与工程失事可能带来的生命、经济和社会环境损失之间的关系。水电工程安全风险分析框架见图1。

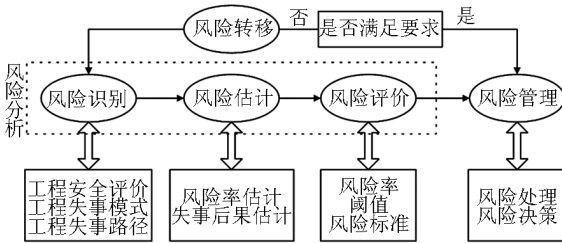


图1 水电工程风险分析框架

Fig. 1 The architecture of risk analysis for hydropower project

2.2 风险分析方法

从理论体系上,风险分析方法主要分为定性分析法、定量分析法及定性与定量相结合的方法。定性分析法主要以专家经验法为主,用于非量化风险评估,操作方便,但受人主观因素影响很大;定量

分析法主要以安全系数法、可靠度分析法等为主,用于量化风险,但由于风险因子的不确定性,实际应用时假定较多且范围受限。联合使用上述两种方法,优势互补,效果较好。

针对水电工程风险分析中影响因素的不确定性与专家评判意见的主观性,文章提出了采用区间层次分析法(interval analytic hierarchy process, IAHP)^[8]分析各风险因子的权重,再结合专家经验法及可靠度分析法求解水电工程总风险率。该方法分析步骤为:a. 以事故树分析法为主进行风险识别,由此建立层次分析模型;b. 组织专家采用1~9标度法^[9]层次分析模型各指标并进行打分,为反映专家判断的不确定性,引入区间判断矩阵;c. 对区间判断矩阵的一致性进行检验、调整,采用粒子群算法(particle swarm optimization, PSO)求解区间判断矩阵的权重模型^[10](权重上下限模型和权重可能值模型),最终得出各因子的组合权重(此方法得出的权重更可信)及相对于目标层的权重。

2.3 风险率估计模型

由区间层次分析法确定各层目标权重,结合专家经验法及可靠度法求得指标层各目标的风险率,即可构成水电工程安全风险率模型为:

$$P_r = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^l A_i B_{ij} X_{jk} P_k \quad (1)$$

式(1)中, P_r 为水电工程总风险率; A_i 为一级准则层第 i 个目标的权重; n 为一级准则层目标数; B_{ij} 为二级准则层第 j 个目标对一级准则层第 i 个目标的权重; m 为二级准则层目标数; X_{jk} 为指标层第 k 个目标对二级准则层第 j 个目标的权重; l 为指标层目标总数; P_k 为指标层第 k 个目标的风险率。

2.4 风险率阈值模型

风险率阈值模型有两种确定方法,其一是以工程安全为主,依照规范、标准^[11, 12],建立水电工程安全等级划分与风险率的对应关系,给出对应安全等级的风险率阈值。表1给出了大型水电工程漫坝、渗透破坏、坝坡失稳风险率与工程安全等级对应关系^[13]。二是以风险标准为依据,结合工程下游潜在的生命损失、经济损失及社会环境影响,反求出工程安全风险率的限值作为风险阈值,见式(2)。

表1 大型水电工程风险率阈值

Table 1 The risk rate threshold of large hydropower project

失事模式	变异系数 δ	安全系数 K	可靠指标 β	风险率 P_{fa}	安全系数 K	可靠指标 β	风险率 P_{fb}
漫坝风险	—	—	3.0	2.7×10^{-7}	—	—	6.8×10^{-7}
	—	—	2.0	4.4×10^{-6}	—	—	1.1×10^{-5}
渗透破坏	$\delta_J = \delta_{Jc} = 0.1$	—	4.47	7.8×10^{-10}	—	2.77	1.4×10^{-6}
	$\delta_J = 0.2, \delta_{Jc} = 0.1$	2.0	3.54	4.0×10^{-8}	1.5	2.0	1.1×10^{-5}
	$\delta_J = \delta_{Jc} = 0.2$	—	2.24	2.5×10^{-6}	—	1.39	4.1×10^{-5}
坝坡失稳	$\delta_R = \delta_S = 0.1$	—	3.37	7.5×10^{-8}	—	2.77	1.4×10^{-6}
	$\delta_R = \delta_S = 0.2$	—	1.68	9.2×10^{-6}	—	1.39	4.1×10^{-5}
大型水电工程安全等级	A级,安全		$< P_{fa} <$	B级,基本安全	$< P_{fb} <$		C级,不安全

注: δ_J 为渗透坡降变异系数; δ_{Jc} 为临界渗透坡降变异系数; δ_R 为抗力变异系数; δ_S 为荷载效应变异系数

$$\bar{R} = P_f \cdot C \Rightarrow P_f = \frac{\bar{R}}{C} \quad (2)$$

式(2)中, \bar{R} 为风险,由工程失事风险率与失事后果乘积确定,或根据风险标准而确定的某地的允许风险值; P_f 为工程失事概率,即风险率; C 为失事后果,包括生命损失、经济损失及社会环境影响等。

3 考虑时变效应的风险率估计模型

随着时间推移,影响工程安全的各种函数关系常常会发生变化,即出现时变效应。根据时变可靠度理论,结构在 t 时间内的可靠度为^[14]:

$$P_r(t) = P(R(\tau) > S(\tau), \tau \in [0, t]) \quad (3)$$

式(3)中, $R(\tau)$ 和 $S(\tau)$ 分别为在 τ 时刻结构的抗力和荷载效应的随机过程。即在 $[0, t]$ 内每一时刻 τ 满足时,结构才是可靠的,相应风险率为:

$$P_f(t) = 1 - P_r(t) = P(R(\tau) \leq S(\tau), \tau \in [0, t]) \quad (4)$$

式(4)是一个高维积分,直接求解十分复杂,文章采用较为简单的随机过程模型进行模拟,将时变可靠度高维积分问题转换为常规的时不变可靠度分析求解,对土石坝工程而言,有:

$$P_n = P_{n_0} \varphi_t \quad (5)$$

式(5)中, P_n 为时间 t 时土石坝某项指标的风险率; t_0 为大坝蓄水初运行时刻; P_{n_0} 为对应于 t_0 时的大坝失事风险率; φ_t 为土石坝某随机变量随时间的衰减函数。

根据土石坝工程特点和运行方式,本次时变风险率分析仅考虑坝顶高程引起土石坝漫坝风险和坝坡失稳风险的时变效应,以及坝体材料渗透系数引起坝体渗透破坏风险的时变效应。参考文献[15]

采用幂函数形式来表达坝顶高程的时变特性:

$$\varphi(t, k_1) = (1 - k_1 \cdot \frac{t}{N})^2 \quad (6)$$

式(6)中, N 为大坝设计基准期; t 为大坝运行时间,单位取年; k_1 为系数,可由工程经验求得。

假定大坝设计基准期为 50 年,沉降稳定时总沉降量按初始坝高的 1% 计算,代入式(4)可求得 $k_1 = 0.005$,则坝高衰减函数为:

$$\varphi_t = \left[1 - 0.005 \cdot \frac{t}{50} \right]^2 \quad (7)$$

根据土体渗透理论,坝体土料渗透系数 k 与临界渗透坡降存在反比关系,渗透系数 k 越大,则临界渗透坡降越小,坝体越容易发生渗透破坏。文献[16, 17]研究表明,坝料渗透系数与时间存在反正切函数关系,则渗透系数的时变函数即为:

$$k_t = k_0 \left[1 + \frac{2}{\pi} \arctan t \right]^2 \quad (8)$$

式(8)中, k_t 为工程运行时间 t 时的大坝土体渗透系数; k_0 为大坝蓄水初运行时土体渗透系数。

4 土石坝考虑时变效应的风险率评估

某工程是以防洪、发电为主,兼顾灌溉、城市供水、养殖及旅游等综合利用的大(1)型水库。拦河大坝为粘土心墙坝,最大坝高为 70.4 m,坝顶宽度为 12 m,坝顶高程为 90.40 m,防浪墙顶高程为 91.80 m。设计洪水位为 88.78 m(洪水频率 $P = 0.1\%$),校核洪水位为 89.85 m(洪水频率 $P = 0.01\%$),正常水位为 85.00 m,死水位为 64.00 m,防洪限制水位为 85.00 m。坝址区设计烈度为 VIII 度,水平向设计地震加速度为 0.2g。

根据对该坝的安全鉴定、设计及其他相关资料,

综合运用风险识别技术及风险率估计方法,得出大坝总风险率,并基于时变可靠度,分析大坝安全风险随运行时间的变化。图2给出了详细的求解分析流程。图3给出了基于自开发的IAHP风险决策系统进行风险分析的关键步骤,其中针对土石坝工程构建的层次分析模型见图3(a)。表2为大坝安全风险率估计结果。

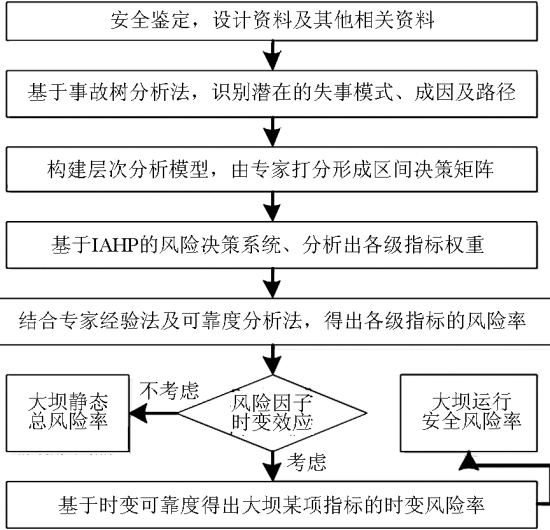
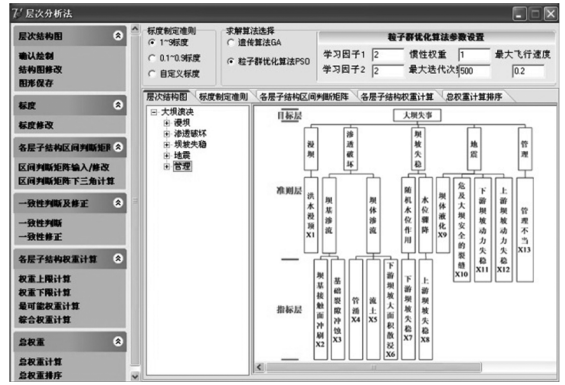


图2 大坝运行安全风险分析流程

Fig. 2 The process of operation safety risk analysis



(a) 建立层次分析模型



(b) 区间层次分析法求解过程

图3 基于IAHP风险决策系统的大坝风险分析

Fig. 3 Risk analysis for dam based on the IAHP risk decision-making system

表2 大坝安全风险率估计结果(风险率: $\times 10^{-6}$)

Table 2 The dam safety risk ratio (risk ratio: $\times 10^{-6}$)

准则层 A	准则层 A 权重/ 准则层 A 风险率	准则层 B	准则层 B 权重/ 准则层 B 风险率	指标层	指标层权重/ 指标层风险率
漫坝	0.483 7/5.0	—	—	洪水漫顶	1.0/5.0
渗透破坏	0.200 7/68.2	坝基破坏	0.107 9/50.0	坝基接触面冲刷	0.728/50.0
		坝体破坏	0.892 1/70.4	坝基裂隙冲蚀	0.272/50.0
坝坡失稳	0.201 6/200.0	随机水位作用	0.842 5/228.0	管涌	0.355 1/98.8
		水位骤降	0.157 5/50.0	流土	0.324 6/98.8
地震	0.057/69.9	—	—	下游坡大面积散浸	0.320 3/10.0
		—	—	下游坝坡失稳	1.0/228.0
管理	0.057/250.0	—	—	上游坝坡失稳	1.0/50.0
		—	—	坝体液化	0.102 9/1.0
		—	—	危及大坝安全的裂缝	0.205 2/1.0
		—	—	下游坝坡失稳	0.608 7/111.0
		—	—	上游坝坡失稳	0.083 2/25.0
		—	—	管理不当	1.0/250.0

注:大坝静态总风险率 $P_f = 70.6$,表中最后一列粗体字标出了基于可靠度分析法求得的风险率,其余项由专家经验法给出

由表2可知,该土石坝总风险率为 7.06×10^{-5} ,综合考虑表中所列5种主要失事模式的权重

及在总风险率中所占比重,可以得出坝坡失稳及渗透破坏对大坝安全影响最大,故对大坝进行除险加

固时,应优先考虑这两项。从工程安全性考虑,该土石坝是大(1)工程,可按表1所给风险阈值对大坝风险率进行评价,对比表1与表2可知,在漫坝、渗透破坏及坝坡失稳等因素作用下,当指标取低值时,大坝安全等级为B级,即基本安全状态。当指标取高值时,大坝安全等级为C级,即不安全状态。从风险标准考虑,根据国外经验,假定该土石坝风险允许值 $\bar{R}=83\ 000$ 元/(年·坝),考虑工程失事后下游损失约为 10^9 量级,根据式(2)求得土石坝安全风险率上限值 $P_{fw}=8.3\times 10^{-5}$ 。

图4为大坝总风险率随运行时间的变化规律,由图4可知,考虑时变效应,该土石坝总风险率随工程运行时间而逐渐增大,从 7.06×10^{-5} 增加到 8.3×10^{-5} ;在大坝完建的5年内,大坝总风险率增长较快,以后增长缓慢且趋于稳定,这与实际中土石坝运行规律较为一致,说明此次时变风险率分析假定的风险因子及其时变函数是正确的;当土石坝运行超过7.57年时,大坝总风险率将高于下游风险允许值。综上,该土石坝安全裕度很小,为保障工程安全运行,应提前采取工程措施对大坝进行加固处理。

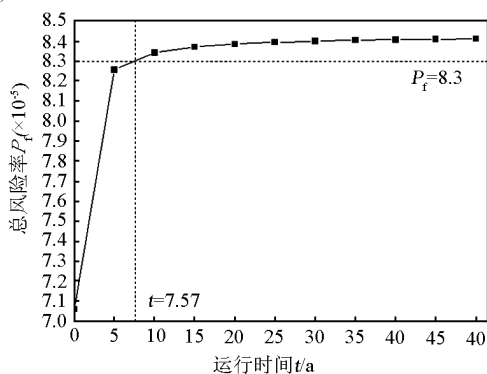


图4 大坝运行安全时变风险率

Fig. 4 The operation safety time-dependent risk rate of dam

5 结语

风险分析是一种事前管理体系,可用于大坝运行安全评估。综合运用风险识别技术和可靠度分析方法,考虑风险因子的时变效应,预测运行期风险率变化趋势,可为水电工程的安全运行和风险决策(工程措施和非工程措施等)提供科学依据。

1)区间层析分析法可有效地反映并解决专家意见的不一致性及判断的不确定性问题,既可作为定性分析方法用于风险识别,又可作为风险率估计的定量分析方法,在水电工程风险分析中具有良好

的应用前景。

2)考虑时变效应后,得到设计基准期内,水电工程风险率随时间的变化规律,可为工程安全运行风险决策提供科学依据。

3)考虑水电工程全寿命周期的运行趋势,对工程安全进行动态的评估和预测,健全事前管理体系,将安全评估、预警体系及应急预案统一起来,深入开展水电工程全寿命周期风险管理体系研究,具有重要的现实意义。

参考文献

- [1] 李雷. 大坝风险管理与应急预案——现代大坝安全理念[J]. 中国水利, 2009(22): 63-66.
- [2] Meon G. Overtopping probability of dams under flood load[C]// Stochastic Hydraulics 92, Proceedings of the 6th IAHR International Symposium. Taipei, China, 1992: 99-106.
- [3] 莫崇勋, 董增川, 麻荣永, 等. “积分-二次二阶矩法”在广西澄碧水库漫坝风险分析中的应用研究[J]. 水力发电学报, 2008, 27(2): 44-49.
- [4] 陈凤兰, 王长新. 泄洪风险计算中JC法与MC法的比较[J]. 水利水电科技进展, 1996, 16(6): 40-42.
- [5] 张社荣, 贾世军, 郭怀志. 岩石边坡稳定的可靠度分析[J]. 岩土学报, 1999, 20(2): 57-61, 66.
- [6] 张社荣, 王海军, 郭怀志. 地基土抗剪强度设计值取值[J]. 水利水电技术, 2001, 32(12): 69-72.
- [7] 王飞, 王媛, 倪小东. 渗流场随机性的随机有限元分析[J]. 岩土力学, 2009, 30(11): 3539-3542.
- [8] 吴育华, 诸为, 李新全, 等. 区间层次分析法—IAHP[J]. 天津大学学报, 1995, 28(5): 700-705.
- [9] 刘铁民, 张兴凯, 刘功智. 安全评价方法应用指南[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005: 15-38.
- [10] 朱建军, 刘士新, 王梦光. 一种新的求解区间数判断矩阵权重的方法[J]. 系统工程理论与实践, 2005(4): 29-34, 54.
- [11] 中华人民共和国水利部. SL258-2000 水库大坝安全评价导则[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2000.
- [12] 国家技术监督局, 中华人民共和国建设部. GB50199-94 水利水电工程结构可靠度设计统一标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 1994.
- [13] 姜树海, 范子武. 土石坝安全等级划分与防洪风险率评估[J]. 水力学报, 2008, 39(1): 35-40.
- [14] 贡金鑫, 赵国藩. 考虑抗力随时间变化的结构可靠度分析[J]. 建筑结构学报, 1998, 19(5): 43-51.
- [15] 姜树海, 范子武. 时变效应对大坝防洪风险率的影响研究[J]. 水力学报, 2006, 37(4): 425-430.
- [16] 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.
- [17] 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.

(下转 67 页)