

高拱坝失效故障树模型与失效概率

陈在铁^{1,2}

(1.河海大学土木工程学院,江苏 南京 210098;2.沙洲工学院基础科学系,江苏 张家港 215600)

摘要 研究高拱坝洪水、地震、山体滑坡等外载荷,坝身混凝土、坝基岩石材料强度弱化等的随机性,以及评价准则的模糊性;分析了高拱坝分别基于强度理论和稳定理论确定性评价方法的不足,提出应该利用模糊数学方法解决具有随机性、模糊性的高拱坝安全评价问题;建立了基于结构可靠度理论的高拱坝失效概率故障树模型并给出了具体算例。

关键词 高拱坝 随机性 模糊性 故障树模型 安全评价

中图分类号 TV642.2 **文献标识码** A **文章编号** 1000-1980(2006)06-0688-05

自从法国 1854 年修建世界上第一座拱坝——Zola 拱坝、美国 1936 年修建世界上第一座高拱坝——Hoover 高拱坝至今,拱坝由于其合理的坝型、独有的强超载能力与自调节性能以及显著的经济性,受到世界各国坝工界的青睐,全世界 200 m 以上的大坝一半以上采用拱坝坝型^[1]。我国的李家峡、乌江渡、东风等拱坝,坝高均在 150 m 以上,二滩拱坝高达 240 m。随着国民经济的飞速发展和西部大开发的深入,我国在西南和西北地区正在修建或即将修建小湾、溪洛渡、锦屏、白鹤滩等一批 300 m 级世界之最的特高拱坝^①(表 1),它们将为我国经济建设发挥巨大的作用。

表 1 中国在建和拟建的 200 m 以上高拱坝
Table 1 High arch dams with height over 200 m being built or to be built in China

工程名称	所在地	坝型	坝高/m	装机/MW	库容/亿 m ³
溪洛渡	金沙江(四川、云南)	拱坝	273	12 000	115.7
白鹤滩	金沙江(四川、云南)	拱坝	277	12 000	191.5
虎跳峡	金沙江(云南)	拱坝	278	4 200	378.8
锦屏一级	雅砻江(四川)	拱坝	305	3 000	100.0
小湾	澜沧江(云南)	拱坝	292	4 200	151.3
拉西瓦	黄河(青海)	拱坝	254	3 720	10.6
构皮滩	乌江(贵州)	拱坝	225	2 000	56.9

高拱坝坝高库大,环境条件复杂,又多处于高烈度地震区,一旦失事,后果不堪设想,不但会严重影响工农业生产、重创国民经济,而且会使人民生命财产遭受极大损失,产生恶劣的政治影响。因此,高拱坝的安全评价与风险分析越来越受到力学界、坝工界、政府的高度重视和社会各界的广泛关注。

本文利用模糊数学方法研究具有随机性、模糊性的高拱坝安全评价问题,建立了基于结构可靠度理论的高拱坝失效概率故障树模型。

1 高拱坝安全研究中的随机性、模糊性

高拱坝地质条件复杂、环境恶劣,在其安全分析与评价中存在大量的不确定性因素,如随机性、模糊性等。

1.1 外载荷的随机性

除自重外,高拱坝的外载荷都与运行过程中发生的洪水、地震、山体滑坡、上游垮坝、战争、恐怖袭击等事

收稿日期 2006-02-27
基金项目 国家自然科学基金重点资助项目(50539030) 国家自然科学基金资助项目(50379005)
作者简介 陈在铁(1967—),男,江苏盐城人,副教授,博士,主要从事结构安全研究。
① 中国大坝委员会.世界大坝统计情况及资料. www.icold-cigh.org.cn/zt/dams/wqk.asp. 2005-10-6.

件有关.洪水何时出现、水位多高,地震何时发生、震级多高、烈度多大等在事件出现前谁也无法给出确切的答案.人们常说的百年一遇、千年一遇的大洪水只是统计说法,既不能肯定百年、千年必然出现一次,更不能确定百年内、千年内的那一天出现,洪水的出现具有随机性.同样的道理,地震、山体滑坡、上游垮坝、战争、恐怖袭击等事件的发生也具有随机性.对于随机性事件产生的载荷必须研究其发生的概率.如果概率足够小就可以不予考虑,就像人们不担心雷击雨日照样外出、不担心坠机照样坐飞机一样.如果用人类有史以来只出现过 1 次的特大洪水载荷或特大地震载荷来校核一座设计寿命有限的高拱坝安全性,则就过分考虑了高拱坝的安全性,没有综合考虑安全性与经济性的平衡,这是不可容许的.

1.2 坝身与坝基材料强度弱化的随机性

高拱坝与坝基所处环境恶劣,由于河水侵蚀、渗流、碱化反应、裂隙扩展、混凝土老化等原因,致使坝身材料、坝基岩层软弱带的强度随着时间的推移不断降低.而河水侵蚀、碱化反应、裂隙扩展、混凝土老化的快慢和渗流的强弱具有不确定性,因此坝身与坝基材料强度弱化进程具有随机性.不考虑强度弱化的必然性与弱化程度的随机性而将高拱坝系统看成一个力学参数恒定的确定性结构将影响评价结论的准确性.

1.3 评价准则的模糊性

模糊性是指人们不可能给某些事物以明确的定义和评价标准而形成的不确定性^[2].高拱坝安全研究存在许多模糊性问题.例如,高拱坝地基中的岩体怎样才算是 I 类岩体?没有也不可能有的准确的定义.对高拱坝沿建基面进行稳定分析时,若抗滑稳定安全系数的容许值为 1.05,是否安全系数等于 1.04 就一定不安全,等于 1.06 就一定安全?规范中关于分项系数的确定也存在模糊性.造成这种状况的原因是采用了确定性的分析方法来研究带有不确定性(包括随机性、模糊性)的问题,使本来明确的问题变得‘模糊’了.模糊数学理论是研究和解决客观事物中那些含有模糊性因素的不确定现象的一种新的数学方法,以模糊理论为基础的模糊综合评判方法将在高拱坝安全评价中发挥重要作用.

2 高拱坝确定性安全评价方法分析

高拱坝安全的系统研究始于 1959 年法国的 Malpasset 拱坝因坝体连同岩基发生深层滑动而溃坝后的 20 世纪 60 年代^[3].目前,基于强度破坏理论的安全系数评价仍是高拱坝安全评价的主要手段,基于结构稳定理论的整体安全度评价方法也逐步得到重视与发展.

2.1 基于强度破坏理论的安全系数评价法

高拱坝安全系数(包括分项安全系数)评价法的基本方法是:选取最大可能载荷组合,利用各种方法(拱梁分载法^[4]、有限元^[5-6]、边界元^[7]、界面元法^[8]、离散元法^[9]等)计算最大应力和变形,由材料的极限应力除以最大工作应力得到实际工作安全系数 k ,通过比较工作安全系数与规范中规定的容许安全系数 $[k]$ 来判断高拱坝是否安全以及安全的储备程度,校核主要考虑抗拉、抗压与抗滑 3 种情况^[10].高拱坝的安全系数评价法以强度破坏理论为基础,意义简单明确,但高拱坝是复杂超静定结构,一点或局部的强度破坏可能仅仅导致局部开裂、压溃或滑动等现象,高拱坝整体仍能安全运行.基于强度理论的危险点安全系数评价难以准确反映高拱坝整体的安全程度.

2.2 基于稳定理论的整体安全度评价法

当高拱坝处于极限平衡状态时,一个小的扰动将使其偏离原平衡状态而产生无法恢复性的破坏.高拱坝整体破坏时状态从静止向不可逆转的可动状态转变,这正是失稳现象.不少学者探索利用稳定理论解决高拱坝的整体破坏问题,用整体安全度衡量高拱坝的稳定安全性^[11],但进展不够理想.原因在于理论上可用总势能 Π 反映高拱坝整体的状态,用一阶变分 $\delta\Pi$ 的符号判断状态是否平衡,用二阶变分 $\delta^2\Pi$ 的符号判断是否处于临界状态,由此对高拱坝整体进行安全评价,但由于高拱坝是一个高度流固耦合、应力场与温度场耦合的系统,因此用总势能表示十分困难^[12].目前基于稳定理论的高拱坝整体安全度评价主要通过模型试验进行,主要方法有超载法^[13]、强度储备法^[14]以及先超载后降低材料强度的综合法^[15].这些方法人为性较强,实施也比较困难,许多实际因素无法考虑.

3 高拱坝整体失效概率

传统的高拱坝确定性安全评价方法没有考虑外载荷发生的概率因素,概率等于 1 的必然载荷与概率趋

近于0的罕见载荷在传统的安全评价中没有区别,传统的确定性评价结论‘是’与‘非’有确定性的边界,而事实并非如此^[16-17].笔者尝试应用源于模糊数学的结构可靠度理论来解决上述问题.

系统在运行过程中存在着‘正常工作’与‘结构失效’一对对立随机事件.系统的可靠度为系统在规定的使用期限、预期的工作条件下,能正常工作的概率,可记为

$$P_r = P(\Omega)$$

(1)

式中 Ω 代表‘正常工作’这一随机事件,由于 $\bar{\Omega}$ 代表与‘正常工作’对立的‘结构失效’随机事件,结构失效的概率可表示为

$$P_f = P(\bar{\Omega}) = 1 - P(\Omega) = 1 - P_r$$

(2)

设结构抗力 R 与载荷效应 S 的概率密度函数分别为 $f_R(r)$ 和 $f_S(s)$,其中 r 和 s 分别为 R 和 S 的基本变量,理论推导可以得到^[16]:

$$P_r = P(S < R) = \int_{-\infty}^{\infty} f_R(r) \left[\int_{-\infty}^R f_S(s) ds \right] dr = \int_{-\infty}^{\infty} f_S(s) \left[\int_s^{\infty} f_R(r) dr \right] ds$$

(3)

由于高拱坝结构抗力 R 与载荷效应 S 的概率密度函数难以得到,实际根据历史数据统计、专家调查与稀有事件类比分析综合确定随机载荷(特大洪水、地震等)和材料强度弱化发生的概率,分析高拱坝的所有可能破坏模式进而确定主要失效模式,利用故障树^[17]分析法建立高拱坝失效的故障树模型,定量计算高拱坝的失效概率 P_f 和可靠度 P_r .

4 高拱坝失效故障树模型

高拱坝的失效顶事件 A 主要由失稳溃坝 B、超量开裂 C、剪滑垮坝 D、毁坝 E 等四种中间事件组成.失稳溃坝 B 是指高拱坝在洪水 K、地震 L 共同作用下坝肩或坝基材料液化导致坝体失稳溃坝;超量开裂 C 指横缝、纵缝等处由于材料老化 F、异常温变 G 等因素造成超量开裂而使坝蓄水失败;剪滑垮坝 D 指上游垮坝 M、山体大面积滑坡 N 造成高水位、高流速瞬时冲击使得高拱坝沿结构薄弱面剪滑溃坝;毁坝 E 指战争 H、恐怖袭击 J 等人为因素毁坝.图 1 为高拱坝失效的故障树模型.

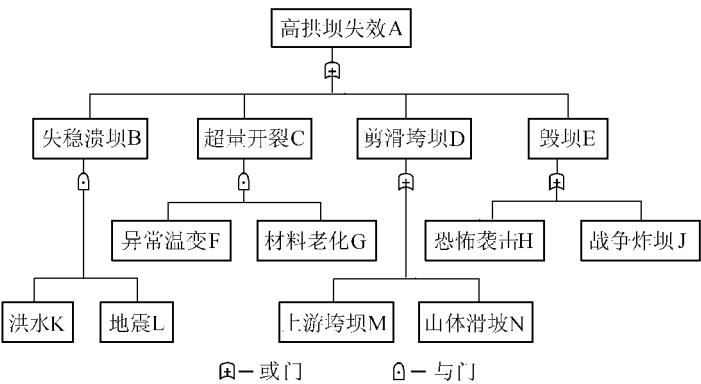


图 1 高拱坝失效故障树

Fig.1 Fault tree model for failure probability study of high arch dams

由集中强降雨产生的洪水 K 一般通过上游高水位作用于大坝,此时若伴随强地震使得一端或两端的坝肩、坝基材料振溃、液化将导致高拱坝失稳垮坝;上游垮坝 M、山体大面积滑坡 N 均具有极强的瞬间性,既能产生高水位洪水,也能产生巨大的水流冲击力,高拱坝极有可能沿结构薄弱面剪滑溃坝;上游垮坝 M、山体大面积滑坡 N 与强降雨产生的洪水 K、地震 L 是不同的基本事件,但由于洪水是诱发上游垮坝 M、山体大面积滑坡 N 的一个原因,因此失稳溃坝模式与剪滑垮坝模式具有一定的相关性.由于材料老化 F、异常温变 G 等因素导致构造缝等局部超量开裂、大量漏水使大坝失去挡水功能,而材料老化 F、异常温变 G 与洪水 K 的相关性很低,可认为超量开裂失效模式与失稳溃坝模式、剪滑垮坝模式之间相对独立.战争与恐怖袭击等人为因素毁坝不能忽视,历史上曾发生过战争炸坝事件,现实中炸坝威胁依然存在,毁坝主要由战争 H、恐怖袭击 J 等人为因素造成,可以认为与自然因素无关,因此,毁坝失效模式与超量开裂模式、失稳溃坝模式、剪滑垮坝模式之间也相对独立.

由故障树模型可得到高拱坝失效概率的计算公式：

$$P_F = P(A) = P(B \cup C \cup D \cup E) = P(B) + P(C) + P(D) + P(E) - P(BD)$$

(4)

5 算 例

以剪滑垮坝为例研究单个失效模式发生概率,进而计算高拱坝的失效概率.剪滑失效模式的状态函数为

$$g = f\sigma + c - \tau$$

(5)

式中： σ, τ ——剪滑面上的压应力、切应力； f, c ——滑移面材料的摩擦系数和黏结力系数. 计算 σ, τ 相关的洪水水位 H 、坝前水流冲击速度 v 一般采用三参数 Γ 分布,它们的均值 μ 、离差系数 C_v 和偏态系数 C_s 可由水文资料结合专家讨论得到,并利用模拟法产生一系列洪水极限水位 H 与坝前水流冲击速度 v 的随机数,利用数值方法计算得到随机变量 σ, τ 的观测值,由专家根据经验确定 σ, τ 的分布,一般可认为是极值 I 型分布,再通过 χ^2 检验法与 K-S 检验法来验证专家确定的分布模型的正确性. 考虑到坝体混凝土与坝基岩层力学性能的离散性以及由于河水侵蚀、碱化反应、裂隙扩展、混凝土老化导致材料性能弱化现象,滑移面材料的摩擦系数 f 、黏结力系数 c 也必须当着随机变量处理,一般可认为符合对数正态分布. 算例参数见表 2.

表 2 随机变量的分布与估计值

Table 2 Distribution and estimated values of random variables

压应力			摩擦系数			黏结力系数			切应力		
均值/MPa	变异系数	分布	均值/MPa	变异系数	分布	均值/MPa	变异系数	分布	均值/MPa	变异系数	分布
30	0.25	极值 I 型	0.2	0.20	对数正态	20	0.125	对数正态	15	0.15	极值 I 型

利用 JC 法得到剪滑失效模式的发生概率为 $P(D) = 4.02 \times 10^{-6}$ 利用类似的方法可以计算出失稳溃坝失效模式的发生概率 $P(B) = 7.34 \times 10^{-6}$ 超量开裂失效模式的发生概率 $P(C) = 1.13 \times 10^{-7}$ 通过历史资料、类比分析与专家讨论相结合的方法推算出毁坝的发生概率 $P(E) = 2 \times 10^{-8}$ 失稳溃坝发生时剪滑垮坝发生的概率 $P(D/B) = 0.3$. 代入式(5)得高拱坝整体失效概率为

$$\begin{aligned} P_F &= P(A) = P(B \cup C \cup D \cup E) = \\ &P(B) + P(C) + P(D) + P(E) - P(BD) = \\ &P(B) + P(C) + P(D) + P(E) - P(D/B) \cdot P(B) = \\ &7.34 \times 10^{-6} + 1.13 \times 10^{-7} + 4.02 \times 10^{-6} + 2 \times 10^{-8} - 0.3 \times 7.34 \times 10^{-6} = \\ &9.291 \times 10^{-6} \end{aligned}$$

5 结 语

高拱坝坝高库大,其风险是客观存在的,对高拱坝失效概率的研究是对其风险分析的基础^[18-19]. 传统的确定性评价方法忽视了高拱坝安全研究中的随机性、模糊性,明确规定评价结果‘是’或‘非’的边界具有很强的人为性. 研究高拱坝的失效概率能揭示结构安全运行的可靠程度以及存在多大程度的失效可能,为评估风险与防范风险提供可靠的依据. 由于引起高拱坝失效的基本事件如洪水、地震等的发生具有随机性,其发生概率的确定需要综合考虑水文、气象、地震资料等多项因素,同时基本事件与高拱坝失效顶事件的关系也具有模糊性,高拱坝失效概率的研究仍处于初级阶段. 利用故障树模型研究高拱坝的失效概率是一种积极的探索,更多方法的创新、应用与互相验证将促进高拱坝失效研究的不断深入.

参考文献：

[1] 刘国华,汪树玉. 拱坝非线性全调整分载法研究[J]. 浙江大学学报:自然科学版,1999,33(1):40-46.
[2] NOWAK A S, COLLINS. Reliability of structures[M]. New York :The McGraw-Hill Companies,2002 :245-275.
[3] 田彬,夏颂佑. 高拱坝坝踵开裂机理研究进展[J]. 水电站设计,1997,13(4):1-6.
[4] REN Qing-wen. Development of theory and methods on high dam structural analysis[C]//MATIN W, REN Qing-wen, JOHN S Y Tan. Proceedings of the 4th International Conference on Dam Engineering-New Developments in Dam Engineering. London :A A Balkema Publishers,2004 :63-74.

- [5] 袁凡凡, 栾茂田, 闫澍旺. 非均质介质破坏机制及承载力的有限元分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(6): 929-933.
- [6] 杨庆生, 杨卫. 断裂过程的有限元模拟[J]. 计算力学学报, 1997, 14(4): 407-412.
- [7] 吴清高, 张明, 姚振汉. 混凝土重力坝边界元可靠度计算[J]. 重庆建筑大学学报, 2000, 22(6): 70-73.
- [8] 卓家寿, 章青. 不连续介质力学问题的界面元法[M]. 北京: 科学出版社, 2000: 30-39.
- [9] 张玉军, 朱维申. 小湾水电站左岸坝前堆积体在自然状态下稳定性的平面离散元与有限元分析[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(5): 497-502.
- [10] 潘家铮. 建筑物的抗滑稳定与滑坡分析[M]. 北京: 水利出版社, 1980: 41-43.
- [11] 任青文, 傅树红. 高拱坝沿建基面抗滑稳定性的分析方法研究[J]. 水利学报, 2002(2): 1-7.
- [12] 周伟, 常晓林. 溪洛渡高拱坝渐进破坏过程仿真分析和稳定安全度研究[J]. 四川大学学报: 自然科学版, 2002, 34(4): 46-50.
- [13] 姜小兰, 赖跃强. 构皮滩双曲拱坝三维地质力学模型试验研究[J]. 长江科学院院报, 1997, 14(3): 27-30.
- [14] 陆述远. 水工建筑物专题——复杂坝基和地下结构[M]. 北京: 水利电力出版社, 1995: 16-78.
- [15] 陈进, 黄薇. 混凝土重力坝抗滑稳定安全系数与安全度探讨[J]. 长江科学院院报, 1995(3): 1-7.
- [16] 刘玉斌, 王光远. 工程结构广义可靠度理论[M]. 北京: 科学出版社, 2005: 2-30.
- [17] 孙新利, 陆长捷. 工程可靠性教程[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005: 61-75.
- [18] LAFTTE R. 大坝风险分类[J]. 水利水电快报, 1997, 18(11): 28-33.
- [19] 戴维斯 C. 大坝风险分析[J]. 水利水电快报, 2003, 24(8): 23-24.

Study on fault tree model and failure probability of high arch dams

CHEN Zai-tie^{1,2}

(1. College of Civil Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China ;

2. Basic Course Department, Shazhou Institute of Technology, Zhangjiagang 215600, China)

Abstract : A study was performed of the randomness of external loads on high arch dams, including flood, earthquake, landslide of mountains, etc., the weakening of concrete strength of arch dams and rock strength of dam foundation, and the fuzziness of evaluation criterion. The disadvantages of conventional deterministic assessment methods for the safety of arch dams based on the strength theory and stability theory were analyzed respectively. It is suggested that fuzzy mathematics theory should be introduced to safety evaluation of high arch dams with characteristics of randomness and fuzziness. Furthermore, a fault tree model based on structural reliability theory was developed for failure probability study of high arch dams, and a calculation example was given.

Key words : high arch dam ; randomness ; fuzziness ; fault tree model ; safety evaluation