

洪水漫坝模糊可靠度分析简化模型探讨

丰伟¹ 杨学堂²

(1. 广西电力工业勘察设计研究院, 广西南宁 530023; 2. 三峡大学土木水电学院, 湖北宜昌 443002)

摘要 介绍了目前洪水漫坝可靠度分析的基本模型, 指出了其缺点在于过于繁琐, 且大多没有考虑模糊性. 在简化随机荷载和随机抗力的基础上, 综合考虑其随机性和模糊性, 提出洪水漫坝模糊可靠度分析的简化模型, 并介绍了该模型的一种近似解法. 算例分析结果表明该模型对随机变量的特征参数准确性要求较高, 在随机变量特征参数不确定时, 该近似解法可作粗略的估算; 在确保随机变量特征参数相对准确的前提下, 该近似解法的计算成果具有满意的精确度.

关键词 漫坝; 洪水; 模糊可靠度

中图分类号: TV122⁺.4 文献标识码: A 文章编号: 1006-7647(2005)04-0013-03

Discussion on simplified model for fuzzy reliability analysis of flood overtopping/FENG Wei¹, YANG Xue-tang²(1. Guangxi Electric Power Industry Investigation Design and Research Institute, Nanning 530023, China; 2. College of Civil & Hydroelectric Engineering, Three Gorges University, Yichang 443002, China)

Abstract : The shortcomings of basic models currently used for reliability analysis were pointed out, which lie in their complexity and little consideration of fuzzy factors. Based on the simplification of random loads and random resistances, a simplified model for fuzzy reliability analysis of flood overtopping was presented with comprehensive consideration of randomness and fuzziness, and an approximate solution to the present model was given. Case study shows that the present model is comparatively sensitive to some characteristic parameters of random variables. If these parameters are precise enough, the method can reach high accuracy, otherwise, it can only be used for preliminary estimation.

Key words : flood overtopping; flood; fuzzy reliability

漫坝风险是指大坝在运行期间发生洪水越顶事件的风险. 世界上有 1/3 的大坝失事是洪水漫坝造成的^[1], 可见, 洪水漫坝是影响大坝安全的重要因素. 现有的大坝漫坝风险分析方法^[2], 一般从概率论的角度出发, 综合应用可靠性数学、随机水力学、随机水文学等相关知识, 建立洪水漫坝可靠度分析的基础理论和计算方法. 这些方法通常比较繁琐, 不易于作漫坝一般性分析, 而且大多仅考虑不确定性中的随机性, 没有考虑其模糊性. 本文在简化随机变量的基础上, 进一步考虑了失效准则的模糊性, 同时把简化随机变量的模糊性融入其中, 建立洪水漫坝模糊可靠度分析的简化模型, 并探讨其近似解法.

1 漫坝事故分析一般模型

1.1 基本模型

洪水漫坝的风险问题, 本质上就是坝顶高程 D 和调洪过程中最高坝前水位 H 的关系问题, 其极限状态可表述为

$$z = D - H < 0 \tag{1}$$

因此, 在一定洪水重现期和泄洪建筑物设计规模条件下, 发生漫坝事件的概率为

$$P_f = P(D < H) = \int_{z < 0} f(z) dz \tag{2}$$

式中: $f(z)$ 为 $D - H$ 的概率密度函数. 把 D 视为广义随机抗力, H 视为广义随机荷载, 则可靠度指标 β_f 为

$$\beta_f = -\Phi^{-1}(P_f) \tag{3}$$

要求得一定洪水重现期条件下的漫坝风险 P_f 及可靠度 β_f , 必须对 H 和 D 的分布类型及相应的统计特征参数作定量和定性分析.

1.2 抗力和荷载简化后的模型

D 的不确定性比较容易确定, 一般认为服从正态分布, 其均值 μ_D 可取设计给定的坝顶高程, 标准差 σ_D 相对较小, 一般在 0.005 ~ 0.015 m, 可视工程情况而定.

H 的不确定性与水库调洪过程的随机性紧密

联系,如:入库洪水流量过程、泄洪建筑物的泄流能力、防洪库容和防洪调度运行规则等.文献[1]根据调洪过程中水库蓄洪量具 Wiener 过程特性的分析,考虑上述随机性,建立一随机微分方程以求解 H 的随机性.这一随机数学模型,使得 H 随机性的模拟和分析具有较高的可信度.但这一方法要求的资料较多,计算工作量较大,在资料不足的情况下,仅进行一般性评估时,可以采用简化算法,假定 H 和 D 均服从正态分布^[3],有:

$$f(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_z} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z - \mu_z}{\sigma_z}\right)^2\right] \quad (4)$$

$$\beta_t = \frac{\mu_z}{\sigma_z} = \frac{\mu_D - \mu_H}{\sqrt{\sigma_D^2 + \sigma_H^2}} \quad (5)$$

$$\sigma_H = \frac{H_{\max} - \mu_H}{3} \quad (6)$$

式中: μ_H 为最高坝前水位的平均值; σ_H 为相应的标准差; $H_{\max}$ 为最高坝前水位的可能最大值,通常在调洪演算中,取最大的入流洪水过程 $Q(t)$ 最小的泄流能力过程 $q(h, m)$ 最小的调洪库容 $W(h)$ 和最不利的调洪运行方式以求得该值.须指出的是,式(6)为估算式,非解析式.

2 模糊可靠度的简化模型

2.1 失效区域的模糊化

由可靠度的定义可知,对于式 $z = D - H$,当 $z > 0$ 时,结构处于安全状态;当 $z < 0$ 时,结构处于失效状态;当 $z = 0$ 时,结构处于极限状态,如图 1 所示, $z = 0$ 为结构破坏临界界限.

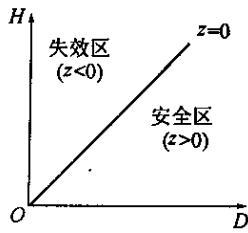


图1 确定性状态函数示意图

从式(2)可知,漫坝事故分析的一般模型中,当 $z < 0$ 这一事件发生时,即认为漫坝事故发生(即失效).但是,由于从安全到失效难以用明确的界限来划分,是具有模糊性的.因此,可把 $z \lesssim 0$ 视为一模糊事件 A (“ $\lesssim$ ”表示模糊性),用隶属函数 $\mu_A(z)$ 表示“ z 小于 0 的可能性”.这样就把失效区域模糊化了,确定的临界失效曲线(图 1)扩展为具有随机取值性质的实数论域上的一个模糊失效区(空间),如图 2 所示.

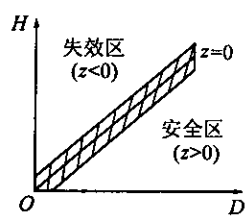


图2 模糊化状态函数示意图

2.2 隶属函数的确定

隶属函数 $\mu_A(z)$ 的形式很多,如指数形式、梯形形式、三角函数形式等,这里采用降半梯形形式,它可较好地反映结构状态函数从安全区经模糊区到失效区的过渡,也便于采用本文后面介绍的近似可靠度计算方法.降半梯形隶属函数(图 3)的数学表达式为

$$\mu_A(z) = \begin{cases} 1 & z \leq -d_D \\ \frac{-z + d_H}{d_H + d_D} & -d_D < z < d_H \\ 0 & z > d_H \end{cases} \quad (7)$$

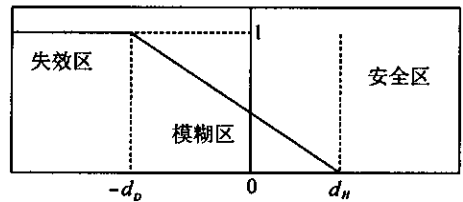


图3 降半梯形隶属函数 $\mu_A(z)$ 示意图

均方差是衡量随机变量取值离散程度的特征值,均方差越小,随机事件发生越集中,可认为事件越清晰;反之,认为事件越模糊.因此,假设 d_H 和 d_D 为均方差 σ_z 的倍数^[4],即

$$d_D = a\sigma_z, \quad d_H = b\sigma_z \quad (a, b > 0) \quad (8)$$

式中的 a, b 可由模糊统计试验确定,故 $\mu_A(z)$ 可表示为

$$\mu_A(z) = \begin{cases} 1 & z \leq -a\sigma_z \\ \frac{-z + a\sigma_z}{a\sigma_z + b\sigma_z} & -a\sigma_z < z < b\sigma_z \\ 0 & z > b\sigma_z \end{cases} \quad (9)$$

2.3 模糊事件的模糊概率

如前所述,事件 A 即“ $z \lesssim 0$ ”为一模糊事件,对模糊事件发生的可能性的描述有必要借助于模糊概率的分析方法.模糊事件的模糊概率集合论中,模糊事件是基本事件空间上的模糊集合.如果基本事件是离散的,其基本事件空间为 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n\}$ 这些基本事件的概率为 $P(x_i) \quad i = 1, 2, \dots, n$,事件 x_i 隶属于模糊事件 A 的隶属函数为 $\mu_A(x_i)$,则模糊事件 A 的概率 $P(A)$ 为其隶属函数的

期望值,即:

P(A) = \int_A \mu_A(x)P(x)dx (10)

若基本事件 X 是连续的,则 A 的概率为

P(A) = \int_A \mu_A(x)P(x)dx (11)

结合式(2),洪水漫坝的失事概率应表示为

P_f' = P_f'(z \le 0) = \int_{-\infty}^0 \mu_A(z)P(z)dz (12)

将式(12)代入式(3)即可求出 \beta_f'.

2.4 模糊可靠度的近似分析

在上面建立的模型中,概率密度函数 f(z)服从正态分布, \mu_A(z)服从降半梯形分布,文献[5]给出此类模型的近似可靠度计算方法如下:

定义模糊可靠初始指标为 \beta_0、模糊度 \alpha 和模糊可靠度 \beta_f' 分别为

\beta_0 = \frac{\mu_Z - \frac{b\sigma_Z - a\sigma_Z}{2}}{\sigma_Z} (13)

\alpha = \frac{a+b}{2} (14)

\beta_f' = \beta_f'(\alpha, \beta_0) = -\Phi^{-1}(P_f') (15)

\frac{\beta_0}{\beta_f'} 与 \alpha 间近似为二次关系,选择 \frac{\beta_0}{\beta_f'} 形式为

\frac{\beta_0}{\beta_f'} = 1 + (c_1 + c_2\beta_0)\alpha^2 (16)

有 \beta_f' = \frac{1}{1 + (c_1 + c_2\beta_0)\alpha^2} (17)

式中: c_1 和 c_2 为待定系数,可由工程实测数据进行参数辨识得到.

3 算例

根据文献[2]给出的某大坝情况作一计算.该坝为大(二)型混凝土坝,坝高 D = 19.5 m,其泄洪建筑物有主坝 5 孔、副坝 1 孔溢流堰,另设 1 底孔.利用文献[2]中给出的千年一遇洪水在两种不同调洪方式下的水文特性值及随机变量特征参数,运用本文的简化模型算法对漫坝模糊可靠度进行核算.

试取 a = b = 0.5,则 \alpha = 0.5.通过参数辨识,取 c_1 = 0.16876, c_2 = -0.00294,计算得两种工况下的模糊可靠度 \beta_f' 以及模糊风险 P_f',与文献[2]结果 P_f 相比较,见表 1.表中, P_f 是文献[2]中按照随机微分方程调洪并以确定性极限状态计算得出的失效概率, P_f' 是按照本文近似方法计算出的模糊失效概率,两者对照可以看到, P_f' 与 P_f 十分接近,但不完全一致, P_f' 围绕 P_f 有小幅度的波动,这是随机变量

简化的模糊性决定的,符合客观规律.

表 1 模糊可靠度简化计算成果

工况	\mu_D/m	\mu_H/m	\mu_Z/m	\sigma_D/m	\sigma_H/m
工况 1	19.5	18.65	0.85	0.015	1.18
工况 2	19.5	18.34	1.16	0.015	0.73
工况	\sigma_Z/m	\beta_0	\beta_f'	P_f'/%	P_f/%
工况 1	1.1801	0.7203	0.6915	24.46	24.21
工况 2	0.7302	1.5887	1.5261	6.35	6.83

通过一定数量的漫坝事故实例分析计算发现,模糊可靠度的求解对模糊参数不太敏感,具有相对的稳定性,而对随机变量某些特征参数比较敏感,尤其是 \mu_H,要求准确性比较高,由随机微分方程调洪计算可以提供具有较高可信度的成果.由于 \mu_H 随入库洪水与调洪方式的不同变幅较大,式(6)相对粗略,但由于计算简便,对漫坝风险一般性分析,可作参考之用,仍具实用价值.

4 结 语

a. 本文在分析漫坝的模糊性时,形式上考虑了失效准则的模糊性,在 \mu_A(z) 的表达式参数的确定过程中,进一步考虑了随机变量 z 分布类型的模糊性,因而 \mu_A(z) 实际上兼顾了两种类型的模糊性.

b. 本文仅探讨漫坝的可靠度,漫坝与失事之间的关系没有涉及,这也是值得继续探讨的课题.

c. 本模型既考虑了漫坝过程的随机性,也考虑了设计参数和失效准则的模糊性,较为真实地反映了客观现实,但影响洪水漫坝的因素众多且复杂,且实测数据有限,一定程度上限制了本文计算模型与参数选取的客观性与准确性,随着统计工作的逐步完善,有望进一步得到改善与提高,以期更好地与工程实际相符合.

参考文献:

[1] 姜树海.大坝防洪安全的评估和校核[J].水利学报,1998(1):18—24.
[2] 德克斯坦 L,勃兰特 E J.水资源工程可靠性分析与风险[M].吴媚玲,王俊德译.北京:水利电力出版社,1991.10.53—61.
[3] 姜树海.防洪设计标准和大坝的防洪安全[J].水利学报,1999(5):19—25.
[4] 涂文戈,林丽川.结构的模糊可靠度分析[J].中南工业大学学报,2000,31(8):371—374.
[5] 陈忠达,龚明健.路面结构模糊可靠度分析的探讨[J].西安公路学院学报,1994,14(3):6—10.

(收稿日期 2004-06-29 编辑 熊水斌)