

# 机场防洪工程风险—效益分析方法

刘一通, 岑国平

(空军工程大学 工程学院, 陕西 西安 710038)

**摘要:** 针对现行机场防洪工程设计方法的不足, 提出一种新的设计方法: 风险—效益分析方法。该方法以防洪工程的经济、社会和军事等的综合效益作为依据来评价设计方案。对各个效益指标的确定和计算也进行了初步的探讨。通过某机场改建排洪沟工程的计算, 用风险—效益分析法确定了最佳的设计方案。

**关键词:** 机场; 防洪工程; 风险—效益分析法; 综合效益

**中图分类号:** TV122.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-3516(2000)02-0018-04

现行机场防洪工程设计中, 首先由水文资料计算出规定重现期下的洪峰流量, 再根据水力计算, 确定构筑物的断面尺寸。从工程可靠性设计的角度看, 该方法有两点不足<sup>[1]</sup>: 1. 只考虑了设计洪水本身的概率分布, 没有考虑防洪构筑物防洪能力的不确定性, 因此不能获得工程的风险; 2. 设计重现期的确定带有规定性, 没有综合考虑防洪效益。而在当今时代效益是建筑工程追求的目标, 而且效益不仅是单指经济效益。社会效益、军事效益、生态环境效益等综合效益才是工程追求的最终目标。

颜本琦与洪华生、郑汉忠以雨水排水系统和河道堤防设计为例首先将风险及可靠度分析引入水利工程。徐祖信<sup>[2]</sup>分析了开敞式溢洪道水力设计中各种不确定因素, 不仅考虑了洪水发生的概率分布, 同时对溢洪道的断面尺寸及施工造成的误差进行统计, 得出了溢洪道允许流量的概率分布。王卓甫等<sup>[3]</sup>从经济的角度评价水利水电工程中确定导流方案的方法, 同时将风险损失费用与导流工程的建筑费用综合以作为选择方案的依据。既承认了风险, 又具有工程经济观点, 是水利工程修订设计规范或选择施工方案的参考。

为了改变以洪水单一因素作为防洪标准的方法, 本文以机场截排洪沟为例, 提出了小流域防洪构筑物设计的风险—效益分析法, 构筑物的可靠度与失事损失紧密联系, 将工程的综合造价、军事效益评价和社会效益评价的综合得分作为标准。以该方法解决现行机场排洪构筑物设计存在的不足, 并为新设计标准的制定打下基础。

防洪工程风险—效益分析有风险分析和防洪效益评价两个方面。风险分析中同时考虑洪水的发生概率和防洪能力的不确定性, 通过一次二矩法来求解。综合效益评价中以经济效益评价为主, 社会和军事效益作为综合评价的一项指标参与计算。经济效益用工程的建设费用、运行维护费用和使用期内洪灾损失费用的总和, 即工程综合费用作为评价指标。

## 1 防洪工程可靠度的计算

我们对防洪构筑物发生失事事件进行分析后, 将防洪工程的可靠度计算简化为对实际洪水和构筑物过水能力的联合失事概率密度积分。

### 1.1 洪水的分布概率分析

洪水的分布包括洪水本身的分布和计算模式引起的误差两个方面。洪水本身的分布已有许多人作过研

收稿日期: 1999-12-17

基金项目: 空后科研基金资助

作者简介: 刘一通(1975-), 男, 助理工程师, 硕士。

究。本文只分析计算模式引起的误差。小流域的设计洪水一般用推理公式计算。为了确定推理公式的计算模式误差,我们收集了陕西省内四个小流域的资料,将实测的洪水资料与用水科院推理公式法计算的结果比较,得出实际洪水与推理公式计算结果的比值,并分析了比值的分布概率。这样在推理公式的结果上附加计算模式误差系数,就可较为精确地把握实际洪水的分布概率。

四个水文站都位于渭河流域的支流上,具体情况如表 1。在收集这四个流域资料后,用水科院法计算不同重视期下洪峰流量;通过实测流量资料用频率分析法推求相应的洪峰流量。相互比较得出表 2。

表 1 各水文站资料

水文站	所处流域	流域面积(km <sup>2</sup> )	流域平均纵坡(‰)
大峪	鹳河	53.9	70
益门镇	清姜河	219	35.7
漫湾	汤峪河	122	62.3
罗敷坡	罗敷河	122	64.3

表 2 不同累积频率下实测资料与水科院结果之比值

累积频率	0.01	0.02	0.05	0.10
大峪	0.34	0.42	0.64	0.86
益门镇	0.76	0.85	1.16	1.54
漫湾	0.36	0.41	0.57	0.77
罗敷坡	0.74	0.85	1.02	0.94

表中的数据显示出水科院法的计算结果与实测值的偏差。水科院法的计算很大程度上依赖于损失参数  $\mu$ , 汇流参数  $m$  及暴雨公式参数的精度。由于资料条件所限,这些参数的取值都带有一定偏差。特别是  $\mu$  值,一般是根据 24 小时的平均径流系数估计的,误差可能较大,引起计算的洪峰流量与实测结果有较大偏差。

对表中的数据进行拟合优度检验可知,这组数据服从对数正态分布,说明用水科院法计算的结果与实际的比值是服从对数正态分布的。那么反过来,实际洪水值与水科院方法计算结果的比值也是服从对数正态分布,分布的均值  $\mu=0.72$ , 方差  $\sigma=0.25$ 。

### 1.2 防洪构筑物防洪能力的概率分布

防洪构筑物防洪能力不确定性的计算需要对防洪构筑物的实际断面尺寸进行采样,分析水力计算模式中各因素的概率分布。对截排洪沟来说,排洪能力按下式计算:

$$Q_m = \frac{\sqrt{i}}{n} \frac{(bh + mh^2)^{\frac{5}{3}}}{(b + 2h\sqrt{1 + m^2})^{\frac{2}{3}}} \tag{1}$$

我们可以通过实测,获得沟底宽度  $b$ 、沟深  $h$ 、边坡系数  $m$ 、沟底坡度  $i$  和粗糙系数  $n$  的分布规律。从某机场排洪沟的统计分析,这五个参数都服从正态分布,可计算出各自的均值和均方差。由于这些参数相互独立,所以排洪能力也服从正态分布,通过用一阶二次矩法计算,最后求得排洪能力的均值  $\bar{Q}_m$  和均方差  $\sigma_Q$ 。

### 1.3 防洪工程可靠度的计算

构造排洪沟的防洪功能函数:

$$g(R, K, S) = R - KS \tag{2}$$

其中,防洪能力  $R$  服从正态分布,计算模式误差服从对数正态分布,实际洪水  $S$  服从极值 I 型分布,将实际洪水的分布当量正态化,采用 JC 法得出可靠度指标  $\beta$ 。因为实际洪水变量是以年最大值来分析的,所以该可靠度是每年的工程可靠度。在设计基准期的运营过程中,总失事概率用下式计算:

$$P_f = 1 - (1 - P_f')^N \tag{3}$$

式中,  $P_f$  为防洪工程在设计基准期内总失事概率,  $P_f'$  为工程年失事概率,  $N$  为设计基准期的年数。

## 2 防洪工程损失期望函数

通过洪流模拟计算,可以得出相应于不同标准下洪水造成的损失。每一年防洪构筑物可能遇到的实际洪水是不确定的,将各种洪水的出现概率与造成的损失相乘后累积起来,就是每一年的防洪工程损失期望值,所以年损失函数是防洪工程每一年的失事概率与失事所造成损失的乘积。如果损失用连续函数  $K(s, r)$  表示,因为构筑物防洪能力与实际洪水是相互独立的随机变量,防洪能力的概率分布密度函数记为  $f_r(r)$ ,实际洪水出现的概率分布密度函数记为  $f_s(s)$ ,那么年失事概率用函数  $f_s(s)f_r(r)drds$  表示,年损失函数用下述公式表示:

$$L = \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} K(s, r) f_s(s) f_r(r) ds dr \tag{4}$$

通常对于每一个洪水荷载  $s$ ; 当它小于防洪工程的防洪能力  $r$  时, 我们认为发生失事是由于洪水对工程的结构造成破坏(填方沟堤的冲刷失稳、渗透、滑坡等), 把损失函数记为  $K_1(s)$ ; 当洪水荷载大于等于工程的防洪能力  $r$  时, 发生失事是由于漫溢、构筑物溃决等, 把损失函数记为  $K_2(s)$ 。那么公式(4)就可以分解为:

$$L = \underbrace{\int_0^{\infty} K_2(s) f_s(s) \left( \int_0^s f_r(r) dr \right) ds}_{\text{①}} + \underbrace{\int_0^{\infty} \int_0^r K_1(s) f_r(r) f_s(s) ds dr}_{\text{②}} \quad (5)$$

用公式(5)计算得出每年的损失  $L$ , 乘以设计基准期的年数就是整个运行期内的损失期望值。由于上式积分比较困难, 采用简化计算: 公式的②部分实际洪水小于防洪能力, 可认为其损失函数  $K_1(s)$  为零。对于公式

(5)的①部分,  $\int_0^s f_r(r) dr$  记为  $F_r(Q)$ , 结合防洪工程设计的实际, 抗力就是防洪构筑物的防洪能力  $R$ , 荷载就是实际洪水流量  $Q$ , 对①采用分段计算, 那么(5)式就变为:

$$L = \int_0^{\infty} K_2(Q) F_r(Q) f_s(Q) dQ = \int_0^{Q_1} K_2(Q) F_r(Q) f_s(Q) dQ + \int_{Q_2}^{Q_1} K_2(Q) F_r(Q) f_s(Q) dQ + \dots + \int_{Q_n}^{\infty} K_2(Q) F_r(Q) f_s(Q) dQ \quad (6)$$

对于满足一定设计流量的防洪工程失事后的损失是洪水量的增函数, 通过计算出多个重现期下洪水造成的损失, 可以拟合出损失与洪水量的函数或者是曲线; 另外对实际洪水和防洪构筑物防洪能力的概率分布函数已经了解。所以通过这三方面因素的掌握, 可以比较精确的解出洪水的损失期望值。

### 3 防洪工程的社会和军事效益

机场防洪工程最主要的功能是防止洪水对机场使用的影响, 保证航空运输或部队的训练及军事任务的完成。社会和军事效益评价包括洪灾后机场停飞、人员伤亡等带来的社会和军事影响, 对附近居民生活、生产的影响, 民众的不安全感, 以及对周围环境的影响等。但这方面的准确定量比较困难。我们知道, 任何工程都有失事的风险。失事风险越小, 安全程度越高, 造成的社会影响和军事损失也越小, 因此我们用风险作为防洪工程社会效益的指标。

### 4 风险—效益法确定工程设计方案的实例

某机场地处陕西省西部, 渭河流域, 汇水面积  $9.7 \text{ km}^2$ , 排洪沟全长 2750 米。改建工程提出了三个备选方案。方案 I 的设计重现期为 10 年, 方案 II 的设计重现期为 20 年, 方案 III 的设计重现期为 50 年。通过对三个方案防洪风险分析和经济效益、社会效益的综合分析, 确定出最佳方案。由于洪水淹没区在机场以外, 因此未考虑军事效益。

#### 4.1 防洪风险分析

收集当地气象资料, 获得了暴雨公式的参数, 并用水科院公式计算各方案的设计流量。洪水按极值 I 型分布, 分析其分布参数。推理公式的模式误差用四个渭河支流水文站的平均值。排洪能力的分布参数计算中, 底宽和边坡系数的分布通过实测确定, 其均值和方差分别为:  $\mu_b = 0.987 \text{ m}$ ,  $\mu_m = 1.078$ ;  $\sigma_b = 0.02 \text{ m}$ ,  $\sigma_m = 0.05$ 。由于条件所限, 没有对沟深、沟底坡度和粗糙系数进行实测, 而是通过查阅现行质量检验评定标准中的允许偏差, 估算得  $\sigma_h = 0.008 \text{ m}$ ,  $\sigma_i = 0.75\%$ ,  $\sigma_n = 0.002$ 。通过一阶二次矩法计算, 最后求得  $\sigma_Q$ 。

#### 4.2 经济效益的计算

经济效益的计算包括: 建设费用、运营费用和损失期望值。各个方案的建设费用和运营费用见表 3。

对于损失期望值的计算, 根据工程的实际, 我们将可能造成损失的洪水分为重现期在 10~20 年、20~50 年、50 年~ $\infty$  三段来计算, 每段内的损失函数  $K_2(Q)$  用该段内某一代表值近似, 重现期在 10~20 年之间以 15 年一遇的洪水损失值代表, 20~50 年之间以 30 年的洪水损失为代表, 50 年~ $\infty$  之间以 100 年的洪水损失为代表。则式(6)可写成:

$$L = K_2(Q_{15}) \int_{Q_{10}}^{Q_{20}} F_r(Q) f_s(Q) dQ + K_2(Q_{30}) \int_{Q_{20}}^{Q_{50}} F_r(Q) f_s(Q) dQ + K_2(Q_{100}) \int_{Q_{50}}^{\infty} F_r(Q) f_s(Q) dQ$$

先经过数值积分计算出三个方案各段内的构筑物失事概率,再计算出三个代表洪水的损失。即可获得各方案每年的损失期望值。运营期内的总损失期望值是每年的损失期望值乘以设计基准期的年数。代表洪水的损失是通过二维洪水演算,获得洪泛区内洪水淹没深度和淹没时间,估算出农作物和居民财产的损失值。各方案的总损失期望值如表 3。

表 3 经济效益

方案	建设、运营费 (万元)	损失期望值 (万元)	综合费用 (万元)	经济效益 得分
I	221	101.4	322.4	66
II	243	48.3	291.3	70
III	330	4.4	334.4	65

#### 4.3 社会效益的计算

通过可靠度计算,方案 I 每年的失事概率值为 0.12,在设计基准期 30 年中,出现失事的概率为 97.8%;方案 II 每年的失事概率值为 0.08,30 年中出现失事的概率为 91.8%;方案 III 每年的失事概率值为 0.05,30 年中出现失事的概率为 79%。所以不同重现期的社会效益值的得分为:方案 I 63;方案 II 66;方案 III 70。

#### 4.4 方案的最终评比结果

将各个方案的各项综合值相加,就是各方案的总得分。以不同重现期下洪水设计的方案的总得分为:方案 I 得分:129;方案 II 得分:136;方案 III 得分:135。方案 II 为最佳方案。

### 参 考 文 献

[1] L. 德克斯坦. 水资源工程可靠性与风险[M]. 吴媚玲译. 北京:水利电力出版社,1993  
 [2] 徐祖信. 开敞式溢洪道泄洪风险计算[J]. 水利学报,1989,(4).  
 [3] 王卓甫,章志强,杨高升. 防洪堤结构风险计算模型探讨[J]. 水利学报,1998,(7).  
 [4] 芮孝芳. 产汇流理论[M]. 北京:水利电力出版社,1995.  
 [5] 吴世伟. 结构可靠度分析[M]. 北京:人民交通出版社,1986.  
 [6] 黄兴棣. 工程结构可靠性设计[M]. 北京:人民交通出版社,1989.  
 [7] 袁作新. 流域水文模型[M]. 北京:水利电力出版社,1990.

## Airport Flood Prevention Engineering Risk-Return Analysis Method

LIU Yi-tong, CEN Guo-ping

(The Engineering Institute, AFEU., Xi'an 710038, China)

**Abstract:** To develop the designing method of airport flood prevention engineering, this paper introduce a new design method, risk-return analysis method. The method select the design plan by analyzing the economic return, society return and military return synthetically. And the paper made discussions on defining and computing of each return. By using the risk-return analysis method, we selected the best design plan of a airport flood defending constructure engineering.

**Key words:** airport; flood prevention engineering; risk-return analysis method; synthetic return