

水力不确定性因素对堤防防洪风险效益的影响

张 铭, 范子武

(南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029)

摘要: 常规防洪安全分析认为, 水利工程的失事风险主要来自超标洪水, 工程失事洪灾风险损失计算也仅考虑水文频率因素. 对堤防工程而言, 其漫溢失事风险不仅受洪水等级水文因素的影响, 还受河道沿程糙率、初值水位、局部损失、河道形态、断面面积等水力随机因素的影响. 只有综合考虑了水文和水力随机因素综合影响的堤防工程防洪效益才更为合理和准确. 因此, 在常规防洪效益计算的基础上, 综合考虑河道糙率等多种水力不确定性因素的影响, 构建河道行洪随机微分数学模型, 计算不同频率洪水条件下河道行洪的漫溢失事风险率, 并在此基础上构建堤防工程风险效益计算模型. 最后, 应用沂沭泗流域洪水“东调南下”续建工程对构建模型进行了验证.

关 键 词: 河道行洪; 随机微分; 数学模型; 防洪; 失事风险; 风险效益

中图分类号: TV871

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2011)01-0071-05

在流域堤防防洪系统体系规划与建设中, 防洪系统的效益计算是核心. 目前常用的防洪效益计算方法, 如频率法和年系列法等^[1-4], 往往仅考虑洪水频率水文因素的影响, 忽略了河道沿程糙率、初值水位、局部损失、河道形态、断面面积等水力不确定性随机因素的影响. 河道行洪本质为一随机过程, 而相应的防洪效益则为具有风险意义的随机变量. 河道行洪风险率关系着河道行洪能力和堤防高程的确定, 而堤防工程防洪风险效益的计算则涉及到工程投资规模及其防洪效果. 目前国内外防洪效益计算模型要么仅考虑水文频率因素的影响^[5-6], 要么通过离散随机模拟的方法来计算^[7], 前者考虑因素不够全面, 后者则数理内涵不足. 因此, 本文在微分方程理论和概率论的基础上探索构建具有严格数学物理意义的河道行洪随机微分数学模型, 通过对各种随机影响因素的概率模拟和分析, 定量计算不同频率洪水的漫堤风险率, 并在此基础上, 对堤防工程防洪风险效益进行计算.

1 河道行洪随机数学模型构建

根据圣维南方程求解河道行洪水面线, 可不考虑非恒定性的影响, 即偏安全地以设计洪峰流量作为各断面的已知流量推求水面线. 忽略时间因素的作用, 可得到如下形式的恒定非均匀流水面线基本方程^[8].

$$\frac{dz}{dx} = \frac{Q^2}{K^2} + (\alpha + \xi) \frac{d(v^2/2g)}{dx} \quad (1)$$

式中: Q 为流量; K 为流量模数; α 为流速水头系数; ξ 为局部损失系数; v 为流速; x 为断面位置. 当河道比较均匀顺直、相邻断面面积变化不大时, 式(1)的末项可忽略不计, 可简化为:

$$\begin{cases} \dot{Z}(x) = \varphi(z(x), x) \\ z(x_0) = z_0 \end{cases} \quad (2)$$

收稿日期: 2010-06-05

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2008ZX07101-008-03); 水利部公益性行业科研专项(200901067); 南京水利科学研究院青年科研基金(Y10808); 南京水利科学研究院面上基金(Y109001)

作者简介: 张 铭(1978-), 男, 河南内乡人, 工程师, 博士, 主要从事水文水资源、水力学和风险分析等研究.

E-mail: zhangm@nhri.cn

式中: $\varphi(z(x), x) = Q^2/K^2$. 该常微分方程中的函数为确定性变量, 可求解确定性的水面线. 然而该方法无法引入河道糙率等随机因素的作用, 难以考察水面线的随机性.

河道水面线可用随机过程模型来模拟. 在这一随机过程中, 确定断面 x_i 处水位是随机变量, 其概率分布为: $F(z, x_i) = P[z(x_i) \leq z]$, 这样, 就可以把随机水面线 $Z(x)$ 看作一簇随机变量. 根据河道动力系统特征分析, 可将影响水面线不确定随机因素分作 3 类引入式(2).

(1) 随机系数. 决定河道边界条件的特性参数对水流运动状态影响显著. 其中, 河道糙率 n 是最重要的随机参数. 自然河道的 n 值可在 0.025 ~ 0.045 之间变化. 通常可将系数 n 以正态自变量的形式引入式(2),

$$\text{即} \quad f(n, x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_n} \exp(-(n - \mu_n)^2/2\sigma_n^2) \quad (3)$$

式中: μ_n 和 σ_n 分别为断面 x 处的糙率均值和均方差.

(2) 随机初始条件. 初始水力条件 z_0 对微分方程的解有显著影响. 通常, 初始位置选择在控制断面, 并认为该处 z_0 等于临界水位或某一给定水位. 但 z_0 受较多不确定因素的影响, 因此, 应把初值 $z(x_0)$ 看作具有某种分布的随机变量引入式(2), 即

$$f(z, x_0, n) = f_0(z, n) \quad (4)$$

在随机微分方程分析中, 可将 Q 考虑为定值, 将初值 z_0 视为某种分布的随机变量. 在实际应用中, 可根据实际情况, 确定其服从点分布或正态分布等.

(3) 随机作用项. 在式(2)中, 计算流速水头、局部损失、断面面积和湿周等参数时产生的误差都可能造成水面线的随机波动. 由于随机输入的影响因素较多, 综合作用的结果是使 $Z(x)$ 围绕其均值过程线 $\mu_z(x)$ 作随机变化, 其概率分布 $f(z, x)$ 可假设为正态分布

$$f(z, x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi x}\sigma_z} \exp\left(-\frac{[z(x) - \mu_z(x)]^2}{2\sigma_z^2 x}\right) \quad (5)$$

这样, 则可认为 $Z(x)$ 符合 Wiener 过程定义条件. 在扣除 $Z(x)$ 的均值偏移后, 存在一无偏的水位 $H(x)$ 变化过程, 其均值 $E[H(x)] = 0$, 方差 $D[H(x)] = \sigma^2 x$. 其中, σ^2 为常数, 称为过程强度, 它取决于 $H(x)$ 的离散程度, 即取决于河道水位的变异性. σ^2 可认为是沿程水深的某一变幅, 即 $\sigma^2 = \delta_z^2 [Z - z_b]^2 / x$, 其中: Z, z_b 分别为沿程 x 处断面水位和河底高程; δ_z 为水位的变异系数. 通过实际调查和资料分析, 可给出这一随机过程的均方差 σ . 由此, 以 σ^2 作为式(5)的过程强度参数, 来反映 Q 等多个随机因子对 $H(x)$ 的综合作用. 这样, 就可以把 $H(x)$ 作为非齐次的随机作用项引入式(2), 得

$$\begin{cases} \dot{Z}(x) = \varphi(Z(x), x; n) + H(x) \\ Z(x_0) = Z_0(n) \end{cases} \quad (6)$$

这是典型的 Ito 方程, 具有随机初值、随机系数和随机作用项. 该方程的求解结果不再是确定性函数 $z(x)$, 而是随机过程 $Z(x)$.

2 模 型 求 解

为了准确地对河道行洪风险率做出评价, 需首先确定河道沿程断面水位 Z 的概率分布. 式(6)的求解过程是 Markov 过程, 可以采用随机过程的动力学方法计算. 通过求解出转移概率密度分布, 为风险分析的概率量度提供条件. Fokker-Planck 方程提供了求解式(6)的途径. 首先进行方程增广的变形处理, 以适应 Fokker-Planck 方程的运用条件. 对于初值断面, 若认定 $Z(x_0)$ 和 $n(x_0)$ 是相互独立的, 则其联合概率密度函数可满足

$$f(Z, x_0, n) = f(Z, x_0)f(n, x_0) \quad (7)$$

在此基础上, 将式(6)化成随机系数只出现在初值条件中的 Ito 方程. 定义矢量过程

$$W(x) = \begin{bmatrix} Z(x) \\ n \end{bmatrix} \quad (8)$$

则式(6)转化为: $\begin{cases} \dot{W}(x) = k(W(x), x) \\ W(x_0) = W_0 \end{cases}$, 其中: $k = \begin{bmatrix} \varphi + H \\ 0 \end{bmatrix}$, $W_0 = \begin{bmatrix} Z_0 \\ n \end{bmatrix}$.

在河道糙率 n 值沿程变化的情况下, 可在递推计算的每一初始断面上, 按式(6)输入校正的 $f(n, x_i)$.

Fokker-Planck 方程与扩散方程形式一致, 是一种描述概率流的概率守恒方程. 对于随机变量 $W(x)$, 其联合密度函数 $f(W, x)$ 满足 $\frac{\partial f(W(x), x)}{\partial x} + \frac{\partial(k \cdot f)}{\partial W} = 0$, 进而可得具有 Ito 方程形式的式(6)的简化运用表达式

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x} F(z, x, n) = -\frac{\partial}{\partial z} [f(z, x, n) \varphi] + \frac{\partial^2}{\partial z^2} [f(z, x, n) \sigma^2] \\ f(z, x_0, n) = f_0(z, n) \end{cases} \quad (9)$$

为满足概率流守恒的要求, 式(9)应满足边界条件: $f(\pm\infty, n, x) = 0$. 在利用式(9)求解获得 $f(z, x, n)$ 的基础上, 通过数值积分可得: $f(z, x) = \int_0^\infty f(z, x, n) dn$, 进而求得相应的统计水位均值 $\mu_z(x)$ 和方差 $\sigma_z^2(0)$.

式(9)为确定的偏微分方程, 具有对流扩散项, 可采用有限体积法或有限差分法对其进行求解. 因为方程为单程坐标, 可沿流向采用步进法. 从已知初值 x_0 断面各高程节点的概率密度 f 值出发, 求出断面 $x_0 + \Delta x$ 的各节点 f 值, 如此逐步推算. Δx 为河道水面线计算分段间的距离, 需根据传统计算方法的分段原则确定. 通常认为, 在 Δx 区间内, 各水力参数呈线性变化, 故常采用分段均值的试算法求解. 为此, 对式(9)非恒定项的离散, 采用半隐半显的 C-N 格式; 对流扩散项, 则采用通用的幂指数离散格式. 在此基础上, 运用 Thomas 计算程式, 求解式(9)离散而形成的三对角矩阵代数方程组, 可方便求解各断面的 $f(z, x, n)$.

3 河道行洪风险率计算

河道的行洪风险, 实质上就是行洪水位 $Z(x)$ 和堤顶高程 $D(x)$ 的关系, 其目标是在一定流量条件下, 行洪水位超越堤顶而造成洪水漫溢失事的可能性. 可用概率分布来反映河道行洪风险率

$$P_f = P_f[Z(x) \geq D(x)] \quad (10)$$

堤顶高程 $D(x)$ 的不确定性, 主要来自施工和测量误差、大堤沉陷影响等, 可根据具体河段的实际情况进行具体分析. 一般 $\mu_D(x)$ 可取为设计给定的堤顶高程; $\sigma_D(x)$ 相对较小, 需依据具体情况而定. 一般而言, 年久失修的堤防, 均方差宜取较大值, 在本文实例研究中, 对“东调南下”续建工程前的河道堤防, 取 0.2 m; 堤防加高或维护处理后, 则根据具体情况取较小值. 行洪水位 $Z(x)$ 的不确定性应包括两个方面: 河道洪水水面线 $Z_1(x)$ 和风浪爬高 $Z_2(x)$. 在 $Z_1(x)$ 上叠加 $Z_2(x)$, 即可得到实际的行洪水位. 得到了 $Z(x)$ 和 $D(x)$ 的概率分布条件, 采用 JC 法或简化方法, 即可确定行洪风险率, 即堤防漫溢失事风险率.

4 防洪风险效益计算

洪灾风险损失, 可表示为某频率洪水事件发生后所导致的期望损失. 用 r_L 表示风险损失大小, $P_f(p)$ 表示洪灾事件发生的概率(风险率), L 表示事件发生所产生的不利后果, 则洪灾风险损失可表述为: $r_L = f(P_f(p), L)$, 按照风险决策理论, r_L 可以用 L 的期望值作为计算依据, 即: $r_L(p) = P_f(p)L(p)$. 河道多年平均行洪漫堤失事风险损失期望 R_L 可表示为:

$$R_L = \int_0^1 r_L(p) dp = \int_0^1 P_f(p)L(p) dp \quad (11)$$

对式(11)进行离散, 可得:

$$R_L = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{P_{f,k}L_k + P_{f,k+1}L_{k+1}}{2} (p_k - p_{k+1}) \quad (12)$$

如上所述, 洪灾损失应该有一个上限, 极端情况是一切全部毁掉. 引起上限损失的最小洪水记为 K .

$$R_L = \sum_{k=0}^K \frac{P_{f,k}L_k + P_{f,k+1}L_{k+1}}{2} (p_k - p_{k+1}) \quad (13)$$

式中: $P_{f,k}$ 和 $P_{f,k+1}$ 分别表示发生第 k 及第 $k+1$ 级洪水时, 堤防漫顶失事风险率. 对于比 K 级更大的洪水, 其损失为 L_K . 式(13)与常规洪灾损失计算式相比, 增加了失事风险率因子, 由于其综合了水文、水力等各种不确

定性随机因素的影响,计算结果更加客观,也更为科学合理.

5 实 例 计 算

“东调南下”续建工程是沂沭泗流域的战略防洪骨干工程.工程实施后,通过堤防加高和河道疏浚等处理,可使沂沭泗流域中下游地区防洪标准由 20 年一遇提高到 50 年一遇^[10].根据自然条件、地形地势条件和社会经济状况的差异,可将工程的保护范围划分为包括湖东、湖西、沿运、沂沭河、黄墩湖、新沂河以北等 6 个片区.本文主要研究了沂沭河片区和新沂河以北片区的骨干河道包括沂河、新沂河、沭河、新沭河及邳苍分洪道的河道行洪风险率,因此防洪工程风险效益计算针对这 2 个片区进行.

根据构建的河道行洪水面线计算随机微分数学模型(式(7))和漫堤风险率计算模型(式(10)),可分别求得沂沭泗流域中下游骨干河道在 20 年和 50 年一遇防洪标准下(已考虑安全超高),发生不同频率洪水时的漫堤失事事故的风险率;并根据续建工程运用前后研究防护区域风险损失的差值,即可计算多年平均防洪风险效益,具体结果见表 1.表中损失值表示发生特定频率洪水、堤防发生漫溢失事事故后所导致的洪灾损失.对沂沭河地区,认为无论将来有无工程,发生千年一遇以上洪水,将造成最大可能的损失为 100.31 亿元,对新沂河以北地区,认为无论将来有无工程,发生千年一遇以上洪水,造成的最大可能损失均为 132.17 亿元.

表 1 “东调南下”续建工程部分地区防洪风险效益

Tab. 1 Flood control risk benefits of the “south-east” reconstruction project

洪水频率	“东调南下”续建工程后(50 年一遇防洪标准)				“东调南下”续建工程前(20 年一遇防洪标准)				效益/ 亿元
	沂沭河地区		新沂河以北		沂沭河地区		新沂河以北		
	风险率	损失/亿元	风险率	损失/亿元	风险率	损失/亿元	风险率	损失/亿元	
1/5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	5.00	0.07	5.00	0.120
1/10	0.05	5.50	0.05	5.00	0.15	10.50	0.20	15.00	0.405
1/20	0.10	10.50	0.15	10.00	0.41	20.50	0.42	30.00	0.923
1/50	0.41	20.50	0.53	20.00	0.76	50.50	0.75	60.00	1.288
1/100	0.78	25.50	0.80	25.00	0.95	60.50	0.98	80.00	0.960
1/200	0.92	30.50	0.95	30.00	1.00	80.50	1.00	132.17	0.781
1/500	1.00	44.23	1.00	41.47	1.00	100.31	1.00	132.17	0.294
1/1 000	1.00	44.23	1.00	41.47	1.00	100.31	1.00	132.17	0.147
风险损失平均值		0.603		0.658		2.238		3.094	4.071

由表 1 可知,随着洪水事件重现期的增大,发生漫堤失事的风险率逐渐提高,导致的洪灾损失也不断增大.对沂沭河地区和新沂河以北堤防防洪保护区,经过“东调南下”续建工程后,防洪标准由 20 年一遇提高到 50 年一遇,多年平均洪灾风险损失降低约 4.071 亿元,此即为续建防洪工程的防洪风险效益.由于这一结果是综合考虑了水文、水力等各种不确定因素对洪水损失的影响,因此计算所得的防洪效益更加准确合理.

6 结 语

由于受到河道沿程糙率、局部损失、河道断面变化等多种水力不确定性因素的影响,河道内特定频率洪水的水面线为一随机过程,发生超标洪水洪灾未必一定发生,而低于设防标准的洪水,则以一定的风险率水平发生洪水灾害;洪灾损失计算中不仅要考虑洪水重现期水文因素,还应考虑河道糙率等水力不确定性因素的影响.通过构建的河道行洪随机微分数学模型和堤防工程风险效益计算数学模型,计算了沂沭泗流域洪水“东调南下”续建工程防护区新沂河以北地区 and 沂沭河地区的风险经济效益.计算结果表明,该防护区堤防工程多年平均防洪风险效益达 4.07 亿元.由于洪灾损失计算较常规方法增加考虑了河道糙率、初始条件、随机输入等各种水力不确定随机因素的影响,因此,根据防洪失事风险率水平计算所得的洪灾风险损失更符合客观实际,也更为科学合理.

参 考 文 献:

- [1] 国家防汛抗旱总指挥部办公室. 中国水旱灾害[M]. 北京:中国水利水电出版社, 1997. (The Office of State Flood Control and Drought Relief Headquarters. Flood and drought of China[M]. Beijing: China WaterPower Press, 1997. (in Chinese))
- [2] 王丽萍, 傅湘. 洪灾风险及经济分析[M]. 武汉: 武汉水利电力大学出版社, 1999. (WANG Li-ping, FU Xiang. Flood risk and economic analysis[M]. Wuhan: Wuhan University of Hydraulic and Electric Press, 1999. (in Chinese))
- [3] 吴新, 黄强, 邓晓青, 等. 防洪工程效益可靠性评价[J]. 水力发电学报, 2006, 25(1): 104-107. (WU Xin, HUANG Qiang, DENG Xiao-qing, et al. Reliability analysis of flood control project benefit[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2006, 25(1): 104-107. (in Chinese))
- [4] 龙子泉. 流域防洪效益计算宏观模型[J]. 水科学进展, 2002, 13(4): 445-449. (LONG Zi-quan. A macro-model for calculating benefit of flood control system in a basin[J]. Advances in Water Science, 2002, 13(4): 445-449. (in Chinese))
- [5] 万五一, 江春波, 李玉柱. 变步长法在天然河道水面线计算中的应用[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2007, 39(4): 647-649. (WAN Wu-yi, JIANG Chun-bo, LI Yu-zhu. Application of varies increment iteration to simulation of water-surface profile in natural channels[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2007, 39(4): 647-649. (in Chinese))
- [6] 张建民, 王玉蓉, 许唯临, 等. 恒定渐变流水面线计算的一种迭代方法[J]. 水利学报, 2005, 36(4): 501-504. (ZHANG Jian-min, WANG Yu-rong, XU Wei-lin, et al. New iteration method for calculating water level of gradually varied steady flow[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005, 36(4): 501-504. (in Chinese))
- [7] 董胜, 王腾. 防洪工程项目的风险评估[J]. 水利学报, 2003, 34(9): 19-24. (DONG Sheng, WANG Teng. Risk assessment of flood control water project[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003, 34(9): 19-24. (in Chinese))
- [8] 姜树海, 范子武, 吴时强, 等. 洪灾风险评估和防洪安全决策[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005. (JIANG Shu-hai, FAN Zi-wu, WU Shi-qiang, et al. Flood risk assessment and flood control decision-making[M]. Beijing: China WaterPower Press, 2005. (in Chinese))
- [9] 纪昌明, 梅亚东. 洪灾风险分析[M]. 武汉: 湖北科学技术出版社, 2000. (JI Chang-ming, MEI Ya-dong. Flood risk analysis[M]. Wuhan: Hubei Science and Technology Press, 2000. (in Chinese))
- [10] 沂沭泗水利管理局. 沂沭泗防汛手册[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2003. (Yi-Shu-Si Water Authority. Yi-Shu-Si flood control manual[M]. Xuzhou: China University of Mining Press, 2003. (in Chinese))

Influence of hydraulic uncertainties on embankment flood control risk benefits

ZHANG Ming, FAN Zi-wu

(Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract: For the conventional safety analysis of flood control, the excessive flood is generally believed to be the main factor causing the project accident risk. The projects will suffer overflow crash if the flood goes beyond the flood control strand, and otherwise will be secure. For the accident loss calculation, the hydrological frequency factor is considered only. This knowledge is incomplete. For the embankment project, its crash risk is not only affected by the flood hydrology factor, but also by the hydraulic random factors such as the roughness along the river, initial water level, partial loss, channel morphology, and hydraulic cross section area, etc. Only all of the random factors, hydrological and hydraulic, have been taken into the model, the flood control benefit is reasonable and accurate. Therefore, based on the conventional flood control benefit calculation method, the river flood evolution stochastic differential mathematical model is constructed to calculate the accident risk rate under different frequency flood degrees. Based on this, the risk-benefit calculation model for the embank project is constructed and tested by the “south-east” reconstruction flood control project of the Yishusi Basin.

Key words: flood carrying capacity; stochastic differential; mathematical model; flood control; risk by failure; risk benefit