

外秦淮河堤防水文失事风险分析

邢万波¹,徐卫亚¹,王 凯²,闫 旭³

(1.河海大学岩土工程研究所,江苏 南京 210098;2.南京市水利局,江苏 南京 210008;
3.南京市秦淮河河道整治工程建设处,江苏 南京 210008)

摘要 结合南京市外秦淮河堤防整治工程,放弃传统的堤防潮位频率曲线线型,采用频率统计分析的方法确定了外秦淮河堤防潮位频率曲线的线型为反高斯分布。根据该堤防现行洪水设计标准推求了反高斯分布参数 λ 和 μ 。基于推求的洪水位频率曲线,将堤防水文失事风险分为洪水漫溢风险和洪水漫顶风险。考虑洪水漫顶事件对堤防水文失事风险的贡献权重,分别建立了堤防洪水漫溢和洪水漫顶失事概率计算模型,求出外秦淮河堤防水文失事风险率为 0.374%,能满足工程防洪要求。

关键词 堤防 洪水位频率曲线 反高斯分布 水文失事风险 外秦淮河

中图分类号 P331 **文献标识码** A **文章编号** 1000-1980(2006)03-0262-05

江河堤防是防洪工程的重要组成部分。目前,我国堤防工程防洪标准的设计主要是根据 GB 50286—98《堤防工程设计规范》中重现期的潮位频率设计方法。众所周知,洪水是一个随机事件,堤防任何防御标准均有可能为洪水所超过,致使堤防漫溢溃决。1998 年长江流域大洪水中长江干堤发生 9 000 多处险情,充分说明我国堤防防洪标准低^[1]。因此,对堤防防洪标准安全的鉴定是堤防安全鉴定工作中很重要的一个环节。

不确定性的概率风险分析方法已在防洪系统领域得到较广泛的应用^[2]。王栋和朱元铎^[2]对防洪系统中风险进行了分析。朱元铎^[3]采用频率组合法对长江堤防南京段设计洪水位的风险进行了分析。Olson^[4]从水力学角度出发研究了美国 Mississippi 和 Missouri 河防洪系统的水文失事风险。Voortman^[5]从风险角度出发提出了基于定量风险分析的大型防洪系统设计方法。姜树海^[6]从风险角度出发对大坝的洪水漫顶风险进行了研究。李青云^[7]和朱勇华等^[8]研究了堤防各种失效破坏模式下的失事风险,同时也对堤防漫顶失事模式下的风险进行了估算。

本文结合南京市外秦淮河堤防整治工程,放弃传统的频率曲线线型,采用频率统计分析的方法推求了外秦淮河堤防潮位频率曲线的线型及分布,并利用水文失事风险计算模型,求取该段堤防水文失事风险率。

1 洪水位频率曲线线型及分布

1.1 洪水位频率曲线线型

我国堤防工程洪水设计标准采用的是设计重现期频率分析方法,GB 50286—98《堤防工程设计规范》建议洪水频率曲线在沿岸地区宜采用极值 I 型分布曲线,在潮汐河口地区宜采用皮尔逊 P-III 型分布曲线,这 2 种分布曲线的典型形状如图 1 所示。而确定堤防的洪水设计标准,需要确定堤防运行时可能出现的最高洪水位的出现频率(即重现期),传统的设计重现期频率分析方法能够较合理推求最高洪水位的重现期,符合现行的堤防工程设计标准,故在实践中得到广泛应用。

堤防工程不仅仅会在高洪水位下溃决失事,在低洪水位下甚至任何洪水位下堤防同样有溃决失事的可能,可能表现为水文失事,亦可能表现为结构

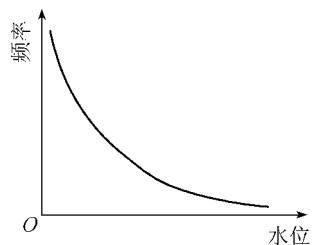


图 1 洪水频率曲线典型分布线型

Fig.1 Typical frequency curve of flood water level

失事(管涌、滑坡等).在堤防工程概率风险分析中要考虑各种水位下堤防失事的可能性,就必须同时考虑堤防运行的水位概率密度函数.堤防所有可能运行水位的出现频率(无论是高洪水位出现频率还是低洪水位出现频率)的大小对概率风险分析结果的合理性有直接影响.因此,在堤防概率风险分析中对洪水位频率曲线进行合理的假定是必要的.

堤防概率风险分析中的洪水频率曲线实质上是堤防运行的年洪水频率曲线,它不同于堤防工程设计标准中的洪水频率曲线,后者是根据不少于连续 20 a 的年最高(低)潮位资料推求得到的最高(低)洪水位的重现期,再利用所假定的洪水频率曲线在高(低)洪水位下的外延来确定堤防工程洪水设计标准.而前者需要根据堤防多年连续运行的洪水位系列资料(实测水位运行系列资料)按经验频率方法推求年洪水位频率曲线,它不仅仅关心高水位下和低洪水位下频率曲线的外延,同时也关心洪水位频率曲线的内插.

由于实践中缺乏实测水位运行资料,目前堤防失事概率风险分析研究中所采用的洪水位频率曲线多直接采用 GB 50286—98《堤防工程设计规范》推荐的极值Ⅰ型分布曲线或者皮尔逊 P-Ⅲ型分布曲线.但是这种合乎规范的洪水位频率曲线假定却并不一定符合堤防运行的实际情况.例如,对南京市外秦淮河堤防来讲,它属于内河,水位运行受上游武定门闸和下游三汊河口闸控制,产生高洪水位原因主要有 2 个方面:一是本流域降雨,二是长江高水位顶托.根据南京市秦淮河河道管理处统计资料显示,外秦淮河堤防运行水位常年处于 3.6~7.5 m 之间,堤防运行水位低于 3.6 m 的情况是很罕见的.若简单地把外秦淮河堤防年水位频率曲线假定为指数分布、极值Ⅰ型分布或者皮尔逊 P-Ⅲ型分布,势必不能同时考虑洪水位频率曲线在高低洪水位下的外延以及频率曲线的内插,造成与实际情况的偏差,故有必要对该段堤防的洪水位频率曲线分布进行研究.

1.2 洪水位频率曲线统计分析

基于南京市秦淮河河道管理处提供的 1990~2004 年 15 a 的秦淮河武定门闸(闸下)站逐日最高水位的资料,采用 @Risk4.5 版进行洪水位频率曲线拟合,得到反高斯分布拟合图,如图 2 所示.

由于外秦淮河水文系列资料的统计年限仅 15 a,得到的潮位频率曲线无法满足外秦淮河百年一遇的防洪设计标准,因此,必须对拟合得到的潮位频率曲线进行适当的修正以满足外秦淮河堤防百年一遇的设计标准要求.由于外秦淮河堤防百年一遇的设计洪水位为 10.7 m,同时假定修正前拟合曲线均值点 5.7928 m 所对应的频率值 0.408 61 在修正前后不变,以 $f(h)$ 表示反高斯分布概率密度函数,则有以下式

$$\begin{cases} f(10.7) = 1/100 \\ f(5.7928) = 0.408\ 61 \end{cases} \tag{1}$$

联立求解式(1)所对应的非线型方程组,可得到修正后的反高斯分布的两个参数 μ 和 λ ,最后得到外秦淮河堤防洪水位频率曲线为

$$f(h) = \sqrt{\frac{\lambda}{2\pi h^3}} e^{-\frac{\lambda(h-\mu)^2}{2\mu^2 h}} \tag{2}$$

式中 h 为洪水位; $\mu=4.885\ 03$, $\lambda=26.811\ 5$.

由外秦淮河 15 a 洪水系列资料推求得到的洪水频率曲线式(2)符合外秦淮河堤防洪水运行特征,可以认为式(2)的概率密度曲线特征代表了整个外秦淮河堤防洪水频率曲线特征.

2 水文失事风险计算

2.1 堤防水文失事模式分析

堤防水文失事风险是指堤防在设计、施工和管理运用过程中由于水文因素的不确定而引发的风险.堤防工程水文失事风险可分为洪水漫溢风险和洪水漫顶风险.洪水漫溢是指洪水位已经超过堤顶,直接漫过堤顶造成堤防失事,如图 3(a)所示.洪水漫顶是指洪水位并没有超过堤顶,而是在高洪水位下,由于风荷载等作

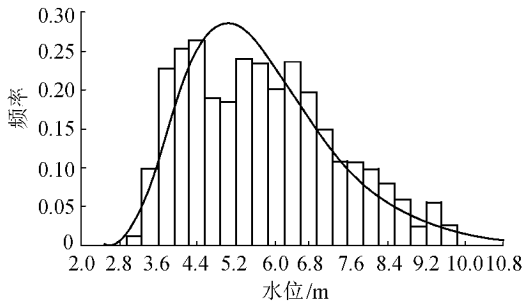


图 2 外秦淮河洪水频率曲线拟合图
Fig.2 Curve fitting for frequency of flood water level in external Qinhuai River

用造成波浪爬高,越过堤顶而造成的一种破坏模式,如图3(b)所示。

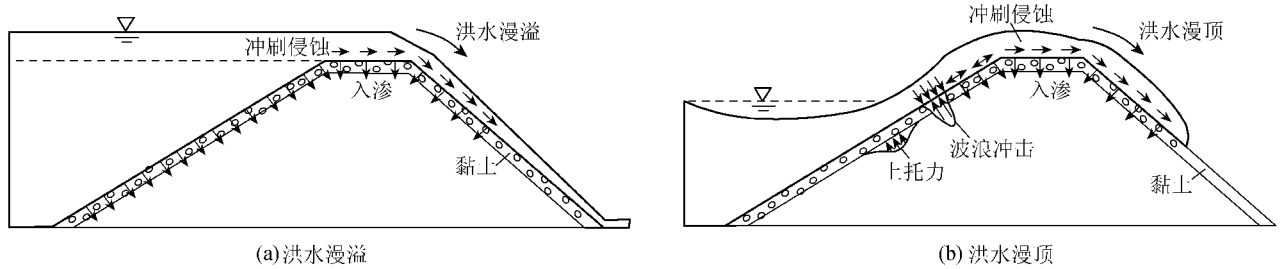


图3 堤防典型水文失事模式

Fig.3 Typical hydrological failure mode of levees

2.2 洪水漫溢失事概率

根据洪水漫溢的定义,记 $P_{\text{漫溢}}$ 为漫溢失事的概率,则

$$P_{\text{漫溢}} = P\{H > h_0\} = \int_{h_0}^{+\infty} f(h) dh = 1 - F(h_0) = 1 - \left\{ \Phi \left[\sqrt{\frac{\lambda}{\mu}} \left(\frac{h_0}{\mu} - 1 \right) \right] + e^{2\lambda/\mu} \Phi \left[-\sqrt{\frac{\lambda}{\mu}} \left(\frac{h_0}{\mu} + 1 \right) \right] \right\} \quad (3)$$

式中: H ——防洪堤临水面洪水位; $f(h)$ ——洪水位概率密度函数; F ——洪水位概率分布函数; Φ ——标准正态分布函数; h_0 ——堤顶高程,在洪水漫溢计算中看作确定量,为 11.2 m。

由式(3)求得外秦淮河堤防洪水漫溢概率为 0.123%。图3(a)所示的洪水漫溢对堤防工程来说是不容许的,会直接造成堤防的溃堤失事,通常认为洪水位一旦超过堤顶,堤防工程就已经失事破坏。故可以认为洪水漫溢风险对堤防水文失事风险的贡献权重为 1。

2.3 洪水漫顶失事概率

根据防洪堤洪水漫顶破坏的定义,可建立防洪堤洪水漫顶事件的功能函数为

$$Z = G(h_w, h_s, h_f) = h_0 - h - h_s - h_f \quad (4)$$

式中: h_0 ——堤顶高程,在洪水漫顶失事概率计算中看作为随机变量; h_s ——波浪爬高,作为随机变量处理; h_f ——风壅高度,作为随机变量处理; h ——防洪堤临水面的洪水位,分析过程中把洪水位作为一个过程量来对待,因此不作为随机变量来处理。

假定堤顶高程 h_0 服从正态分布,堤顶高程 h_0 的均值为 11.2 m;考虑到在一定堤段预留沉降量超过 0.1 m 的概率小于 2%,推求得堤顶高程的标准差为 0.051 m。

根据《堤防工程技术标准汇编》^[9],引入蒲田波浪要素公式计算波高的均值 μ_h ,有

$$\begin{aligned} \frac{g\mu_h}{v^2} &= 0.13 \text{th} \left[0.7 \left(\frac{gh_a}{v^2} \right)^{0.7} \right] \text{th} \left\{ 0.0018 \left(\frac{gF}{v^2} \right)^{0.45} \left[0.13 \text{th} \left[0.7 \left(\frac{gh_a}{v^2} \right) \right]^{0.7} \right]^{-1} \right\} \\ \mu_{h_s} &= \frac{K_\Delta K_v \sqrt{\mu_h \lambda}}{\sqrt{1 + m^2}} \\ \mu_\lambda &= \frac{g\mu_T^2}{2\pi} \text{th} \frac{2\pi h_a}{\mu_\lambda} \end{aligned} \quad (5)$$

式中: μ_h ——波高均值, m; μ_{h_s} ——波浪爬高, m; μ_λ ——波长的均值, m; v ——计算风速,取 $v = 18 \text{ m/s}$; F ——风区长度,取 $F = 1800 \text{ m}$; h_a ——水域的平均水深,取 $h_a = 10.0 \text{ m}$; m ——堤防的坡率; μ_T ——周期的均值, s, 且 $\mu_T = 4\sqrt{\mu_h}$; K_Δ ——斜坡的糙率及渗透性系数,一般 K_Δ 在 0.75 ~ 1.0 之间,此处取 $K_\Delta = 0.85$; K_v ——经验系数,一般 K_v 在 1.0 ~ 1.3 之间,此处取 $K_v = 1.1$; g ——重力加速度, $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ 。

由上述各式可得: $\mu_{h_s} = 0.356$; $\sigma_{h_s} = \delta_{h_s} \mu_{h_s} = 0.69 \times 0.356 = 0.2456$ 。

风壅高度 h_f 为

$$h_f = \frac{Kv^2 F}{2gh_a} \cos \alpha \approx \frac{Kv^2 F}{2gh_a} \quad (6)$$

式中: K ——综合摩阻系数,取 3.6×10^{-6} ; α ——风向夹角,一般取 $\alpha = 0^\circ$ 。

计算得到风壅高度 h_f 的均值为 0.01,标准差为 0.001.

采用 Monte Carlo 随机抽样法^[10]进行失效概率的计算,采用不同的 h 进行随机模拟,模拟结果如表 1 所示.

表 1 洪水漫顶事件条件概率计算结果

Table 1 Calculated results of conditional probability of flood overtopping at different flood water levels

洪水位 h/m	9.0	9.5	10.0	10.3	10.6	10.8	10.9	11.1	11.2
漫顶条件概率	1.3220×10^{-13}	5.2430×10^{-8}	4.4240×10^{-4}	1.6630×10^{-2}	0.115 6	0.334 9	0.633 0	0.865 5	1.000 0

根据表 1 计算所得的漫顶条件概率,用 Hill 函数拟合得到外秦淮河堤防水位位的漫顶事件条件概率函数 $P'(h)$ 为

$$P'(h) = \frac{h^n}{k^n + h^n}$$

(7)

式中 $k = 10.833\ 34, n = 92.972\ 89$.

表 1 中的计算结果是某级洪水位下洪水漫顶的条件概率,要得到洪水漫顶的概率,还必须考虑洪水发生的频率.因此,定义洪水漫顶事件概率计算式如下:

$$P_{\text{漫顶}} = \int_{h_1}^{h_0} P'(h) f(h) \text{d}h$$

(8)

式中: h_1 ——计算起始水位; h_0 ——堤顶高程; $P'(h)$ ——计算拟合所得的洪水位漫顶失事条件概率函数; $f(h)$ ——洪水位概率密度函数.

洪水漫顶对应的破坏模式会造成堤顶的冲刷破坏,甚至会造成较大的破坏,但它并不一定会造成堤防的溃决失事.换句话说,洪水漫顶概率并不等同于洪水漫顶失事风险率,必须对洪水漫顶事件造成堤防失事的可能性即洪水漫顶对堤防水文失事风险率的贡献权重加以考虑.事实上,洪水漫顶事件造成堤防失事的可能性这个问题非常复杂,牵扯到具体堤防的结构状况以及水力冲刷条件等,为简单起见,仅将洪水漫顶对堤防水文失事风险率的贡献权重看作为洪水位的函数.假定此贡献权重函数 $k(h)$ 为指数函数,当洪水位处于堤顶高程时 $k(h)$ 值为 1,则 $k(h)$ 的表达式为

$$k(h) = e^{h-11.2} \quad 0 < h \leqslant 11.2$$

(9)

则洪水漫顶失事概率为

$$P_{\text{漫顶}} = \int_{h_1}^{h_0} P'(h) f(h) k(h) \text{d}h$$

(10)

从表 1 可以看出,洪水位为 9.0 m 时堤防洪水漫顶事件的条件概率已经很小,故可令计算起始水位 $h_1 = 9.0\ \text{m}$,由式(10)可求得洪水漫顶失事概率 $P_{\text{漫顶}} = 0.251\%$.

2.4 水文失事风险率

综上所述,可知外秦淮河堤防水文失事的风险率为

$$P = P_{\text{漫溢}} + P_{\text{漫顶}} = 0.123\% + 0.251\% = 0.374\%$$

(11)

由计算结果可以看出,水文失事风险中约有 67.1% 是洪水漫顶失事模式诱发的,约 32.9% 为洪水漫溢失事模式诱发.总体说来,与同类工程比^[3,7],外秦淮河堤防水文失事风险相对较小,堤防由水文因素导致失事的可能性不大,能够满足工程防洪要求.

3 结 语

本文结合南京市外秦淮河堤防整治工程,放弃传统的频率曲线线型,采用频率统计分析的方法,根据外秦淮河堤防 15 a 的历史洪水位系列资料确定了外秦淮河堤防潮位频率曲线的线型,同时根据现行外秦淮河堤防洪水设计标准推求出外秦淮河堤防洪水位频率曲线的分布.所得洪水位频率曲线为反高斯分布,符合外秦淮河洪水运行特征,可以认为反高斯分布所代表的洪水位频率曲线可以反映整个外秦淮河堤防洪水频率曲线特征.

基于推求的洪水位频率曲线,将堤防水文失事风险分为洪水漫溢风险和洪水漫顶风险,考虑了洪水漫顶事件对堤防水文失事风险的贡献权重,分别建立了堤防洪水漫溢失事概率计算模型和堤防洪水漫顶失事概

率计算模型,求取了其相应的失事概率,进而推求出外秦淮河堤防水文失事风险率为0.374%,相对较小,能满足工程防洪要求.

文中推求洪水位频率曲线的方法、所建立的堤防水文失事风险模型以及所提出的洪水漫顶对堤防水文失事风险贡献权重的概念对同类工程具有借鉴意义.

参考文献:

[1] 丁留谦,孙东亚.堤防工程中几个关键研究课题[J].水利发展研究,2002,2(12):59-62.
[2] 王栋,朱元生.防洪系统风险分析的研究评述[J].水文,2003,23(2):15-20.
[3] 朱元生.长江南京段设计洪水位的风险分析[J].水文,1989,9(5):8-15.
[4] OLSON J R. Risk modeling for a system of levees under non-stationary condition[D]. Virginiaia:University of Virginia,1999.
[5] VOORTMAN H G. Risk-based design of large-scale flood defence systems[D]. Delft: Delft University of Technology,2003.
[6] 姜树海.大坝防洪安全的评估和校核[J].水利学报,1998(1):18-24.
[7] 李青云.长江堤防工程安全评价的理论和方法研究[D].北京:清华大学,2002.
[8] 朱勇华,郭海晋,徐高洪,等.防洪堤防洪综合风险研究[J].中国农村水利水电,2003(7):11-14.
[9] 中华人民共和国水利部国际合作与科技司.堤防工程技术标准汇编[M].北京:中国水利水电出版社,2000.
[10] 吴世伟.结构可靠度分析[M].北京:人民交通出版社,1990.

Risk analysis of hydrological failures of levees in external Qinhuai River

XING Wan-bo¹, XU Wei-ya¹, WANG Kai², YAN Xu³

(1. Geotechnical Research Institute of Hohai University, Nanjing 210098, China ;

2. Nanjing Water Conservancy Bureau, Nanjing 210008, China ;

3. Construction Bureau of Watercourse Renovating Engineering of Nanjing External Qinhuai River, Nanjing 210008, China)

Abstract :With regard to the external Qinhuai River regulation project in Nanjing City, the inverse Gaussian distribution curve was determined as the flood level frequency curve of the river course by use of the frequency statistics technique, and the parameters λ and μ of the inverse Gaussian distribution were derived according to the current flood design standard. Based on the flood level frequency curve, hydrological failure risk was divided into flood overflowing risk and flood overtopping risk. Considering the contribution weight of flood overtopping risk to combined risk, numerical models for calculating the probability of flood overflowing and flood overtopping were established respectively. Finally, the risk factor of hydrological failure for levees of the external Qinhuai River was calculated as 0.374%, which could satisfy the requirement of flood control projects.

Key words :levee ; frequency curve of flood level ; inverse Gaussian distribution ; hydrological failure risk ; external Qinhuai River