

堤防失事风险分析和风险管理研究

徐卫亚¹, 邢万波¹, 魏文白², 王凯³, 闫旭³

(1. 河海大学 岩土工程研究所, 江苏 南京 210098; 2. 南京市雨花台区水利农机局, 江苏 南京 210012;
3. 南京市水利局, 江苏 南京 210008)

摘要: 基于堤防渗透破坏和岸坡滑动失稳风险的数学模型, 提出了场地砂土地震液化和堤防失事综合风险分析的数学模型, 以及堤防风险管理的概念; 以南京市板桥河左岸堤防加固工程为例, 应用风险分析理论和方法对该段堤防渗透破坏风险、岸坡滑动失稳风险、场地砂土地震液化风险以及堤防失事综合风险进行了分析研究; 通过 1995 年板桥河左岸堤防典型破坏实例建立整个板桥河堤防渗透破坏风险率临界值、岸坡滑动失稳风险率临界值以及堤防失事综合风险率临界值; 同时基于风险分析的结果和所建立的风险率临界值, 根据风险管理的理论, 针对板桥河左岸堤防加固工程提出降低风险的措施, 对堤防汛期洪水水位运行管理提出建议。其理论、方法、思路和结论可供同类工程借鉴。

关键词: 岩土力学; 风险分析; 风险管理; 渗透破坏; 砂土液化; 滑动失稳; 综合风险

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2006)01 - 0047 - 09

RISK ANALYSIS AND RISK MANAGEMENT FOR LEVEES FAILURE

XU Wei-ya¹, XING Wan-bo¹, WEI Wen-bai², WANG Kai³, YAN Xu³

(1. *Institute of Geotechnical Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China;*
2. *Yuhuatai Water Conservancy and Agricultural Machine Bureau, Nanjing, Jiangsu 210012, China;*
3. *Nanjing Water Conservancy Bureau, Nanjing, Jiangsu 210008, China*)

Abstract: Based on the mathematical models of seepage failure risk and slide instability risk for levees, the mathematical models of sandy soil seismic liquefaction risk and comprehensive failure risk for levees were developed; and the conception of risk management for levees was established. The risks of seepage failure, slope slide instability, sandy soil seismic liquefaction and comprehensive failure in Banqiao River levee were analyzed; and critical risk coefficients for seepage failure, slide instability and comprehensive failure in Banqiao River levee were found on the failure case of Banqiao River levee in 1995. In addition, according to the results of risk analysis, and approaches of risk management, measures to decrease the failure risk of the levee and suggestions to the levee operation management in flood seasons were proposed. The analytical approach and the results will be practical and helpful in levee engineering practice.

Key words: rock and soil mechanics; risk analysis; risk management; seepage failure; liquefaction; slide instability; comprehensive risk

收稿日期: 2004 - 09 - 23; **修回日期:** 2004 - 11 - 23

基金项目: 水利部科技创新基金资助项目(SCX2000 - 55)

作者简介: 徐卫亚(1962 -), 男, 博士, 1982年毕业于华东水利学院, 现任教授、博士生导师, 主要从事岩土力学与工程方面的教学与研究工作。E-mail: wyxu@hhu.edu.cn.

1 引言

目前堤防安全分析方法多为定值分析的方法。长期工程实践证明其是一种有效设计方法,但是该方法最大的缺点就是没有考虑实际存在的不确定性因素(包括荷载效应和抗力等不确定性)的影响。特别是对于堤防工程,堤身土质不均匀、堤基地质条件差、堤后淤滩众多以及我国现有的堤防多是历史上经过多次修建、破坏、再修复加固而逐渐形成的等因素的影响,导致堤防土层分布及土工参数变异性大,存在很大的不确定性,这就使得堤防的安全评价成为一个难度较大的问题,常规的定值安全评价方法得到安全系数的大小并不能完全确切地表征工程的安全程度。以概率论和可靠度为基础的风险分析方法能够考虑实际工程中存在的不确定性以及荷载效应和抗力效应各种影响因素的随机变异性,因此在安全评价中具有非常重要的意义^[1]。

目前,国内外关风险分析在工程中的研究比较多, H. H. Einstein^[2]综述了风险分析在岩土工程中的应用, 陈祖煜^[3]也综述了可靠度和风险分析在边坡工程中的应用。关于风险分析在堤防工程中应用的研究进行的不多,主要集中在防洪堤及防洪系统的水文风险研究方面^[4, 5],而对防洪堤结构风险以及防洪堤防洪综合风险方面的研究则较少,其中, T. F. Wolff^[6]针对防洪堤不同失效模式提出了不同洪水水位下堤防失效概率的估算方法, 王卓甫等^[7]和吴兴征和赵进勇^[8]定义并研究了防洪堤岸坡滑动失稳以及渗透破坏的风险数学模型, 朱勇华等^[9]研究了防洪堤失事破坏的综合风险, 章志强等^[10]对长江南京段堤防进行了失稳的风险分析。这些研究只是对堤防失事破坏的风险率进行了估算,对计算结果进行了定性分析,并没有达到风险分析的真正目的。

笔者结合南京市板桥河左岸堤防加固工程,针对该段堤防可能的失效模式,提出堤防砂土地震液化风险的数学模型,应用风险计算模型和风险分析方法,对该段堤防进行了风险分析,通过该段堤防防蛤蟆石处 1995 年板桥河左岸堤防典型破坏实例建立堤防失事破坏风险率临界值,同时根据风险分析结果,应用风险管理的方法对板桥河堤防汛期洪水位的运行管理提出了建议。

2 堤防风险分析理论

根据板桥河左岸堤防情况,通过分析认为,板

桥河堤防最有可能的 3 种结构失效模式分别为渗透破坏、岸坡滑动失稳以及砂土地震液化失事。

2.1 渗透破坏风险和滑动失稳风险计算模型

根据相关研究成果^[7, 8],堤坝渗透破坏风险率的数学模型可表示为

$$R = \int_{H_1}^{H_2} F_j(H) f(H) dH \quad (1)$$

式中: $F_j(H) = \int_{j_k}^{\infty} f(J/H) dJ$ 为给定洪水水位 H 时,渗透坡降 J 大于临界渗透坡降 j_k 的概率, $f(J/H)$ 为给定某一洪水水位 H 条件下 J 的条件概率密度函数; $f(H)$ 为洪水位的概率密度函数; H_1 为计算堤防失稳风险时规定的最低洪水水位值; H_2 为计算堤防失稳风险时规定的最高洪水水位值。

堤坝岸坡滑动失稳风险的数学模型可以表示为

$$R = \int_{H_1}^{H_2} F_s(H) f(H) dH \quad (2)$$

式中: $F_s(H) = \int_{M_r}^{\infty} f(M_s/H) dM_s$ 为给定洪水水位 H 时,岸坡滑动力矩 M_s 大于抗滑力矩 M_r 的概率; $f(M_s/H)$ 为给定某一洪水水位 H 条件下 M_s 的条件概率密度函数。

2.2 砂土液化风险率计算模型

国内外许多学者对砂土地震液化的不确定性进行了很多研究,提出了液化概率的概念并针对工程实际进行了砂土地震液化的概率分析^[11]。但是液化概率并不适合直接计算堤防场地砂土地震液化的风险,这是因为所提出的砂土液化概率模型并没有考虑地震发生的随机性,而砂土液化却与地震发生的可能性有着直接关系。同时也应该注意到,砂土地震液化也与洪水水位有一定关系,即地下水位越高,土层越容易液化。显然,可以认为地震发生率与洪水水位相互独立,因此,堤防场地砂土地震液化风险的数学模型应该表述为

$$R = \int_{H_1}^{H_2} P_1(H) f(H) P_e dH \quad (3)$$

式中: $P_1(H)$ 为给定洪水水位 H 时,场地砂土的液化概率; P_e 为场地地震发生概率,通常为常数。

2.3 失效概率的计算方法

$F_j(H)$, $F_s(H)$ 和 $P_1(H)$ 均为极其复杂的函数,目前国内外多采用随机抽样的 Monte Carlo 法,在目前可靠度计算中,是一种相对精确的方法。

Monte Carlo 模拟法又称随机模拟法或统计试验法。该法是由统计过程所确定的物理状况在计算

机上进行随机模拟。对堤防工程风险分析来讲, 风险率的大小直接取决于所建立的功能函数, 以及随机变量的选择和随机变量的统计特性。3 种失效模式的功能函数和失效概率的计算过程分别如下:

2.3.1 渗透破坏

根据渗透破坏的基本原理, 可以建立堤防渗透破坏的功能函数为

$$Z = G(X) = J - j_k \quad (4)$$

J 和 j_k 的确定所采用的是基于确定性渗流有限元模拟的方法, 根据板桥河左岸堤防的特点, 采用 1995 年板桥河左岸堤防典型破坏实例建立堤防的抗渗临界水力坡降; 基于“端点组合-单调性法”理论和“ 3σ ”法则, 建立起堤防背水面最大水力坡降的统计特征。

2.3.2 滑动失稳

根据土坡稳定分析的基本理论, 采用国内外使用相当普遍的简化毕肖普 Bishop 方法, 建立起堤防岸坡滑动失稳的功能函数^[12]为

$$Z = G(X) = F_s - 1 = \frac{\sum \frac{1}{m_{\alpha_i}} [c'_i b_i + (W_i - u_i b_i) \tan \phi'_i]}{\sum W_i \sin \alpha_i + \sum C_s W_i \frac{e_i}{R}} \quad (5)$$

式中: $m_{\alpha_i} = \cos \alpha_i \frac{\tan \phi'_i \sin \alpha_i}{F_s}$, 为简单起见, 可直接令 m_{α_i} 中的 $F_s = 1$; ϕ'_i 为土条 i 的有效内摩擦角; c'_i 为土条 i 的有效黏聚力; u_i 为作用于土条 i 底边上的孔隙水压力; b_i 为土条 i 的宽度; $W_i = b_i \gamma_i h_i$ 为土条重量, 其中, γ_i 为土的湿容重, h_i 为土条的高度; C_s 为水平向地震影响系数; e_i 土条重心点到滑弧圆心的垂直向距离。

选取的土抗剪强度指标作为随机变量, 根据 Monte Carlo 法基本原理, 基于确定性算法得到的最危险滑弧, 计算分析滑动失稳的失效概率。

选取的土抗剪强度指标作为随机变量, 根据 Monte Carlo 法基本原理, 基于确定性算法得到的最危险滑弧, 计算分析滑动失稳的失效概率。

2.3.3 砂土地震液化

根据砂土液化的基本原理, 采用规范^[13]中推荐的标准贯入试验(SPT)判别法建立起砂土液化的功能函数, 该函数表述如下:

$$Z = G(N, d_s, d_w, \rho_c) = N - N_0 = [0.9 + 0.1(d_s - d_w)] \sqrt{\frac{3}{\rho_c}} \quad (6)$$

式中: N 为工程运用时贯入点的标准贯入锤击数;

N_0 为液化判别标准贯入锤击数基准值由规范确定; ρ_c 为土的黏粒颗粒含量质量百分率(%), 当 $\rho_c < 3\%$ 时, 取 $\rho_c = 3\%$; d_s 为工程正常运用时标准贯入点在当时地面以下的深度; d_w 为工程正常运行时地下水位在当当地面以下的深度, 当地面淹没于水位以下时, 取 $d_w = 0$ 。

选取 N , d_s , d_w 和 ρ_c 为随机变量, 根据由场地试验确定的随机变量的统计特征, 由 Monte Carlo 法来模拟砂土地震液化的概率。需要指出的是, 这种方法得到的是场地砂土的点液化概率, 对于某一给定洪水水位下, 选取砂土点液化概率的最大值来代表堤防场地砂土的地震液化概率。

2.4 堤防失事综合风险率的数学模型

由以上计算步骤可以得到堤防渗透破坏风险率、岸坡滑动失稳风险率和场地砂土地震液化风险率, 分别以 R_1 , R_2 和 R_3 表示。假定这 3 种失效模式间相互独立, 则堤防失事综合风险率应为

$$R = 1 - (1 - R_1)(1 - R_2)(1 - R_3) \quad (7)$$

由于 R_1 , R_2 和 R_3 一般较小, 因此近似地有

$$R = R_1 + R_2 + R_3 \quad (8)$$

堤防失事综合风险率的数学模型应为

$$R = \int_{H_1}^{H_2} [F_J(H) + F_S(H) + P_1(H)P_c] f(H) dH \quad (9)$$

3 堤防风险管理的概念

风险管理(risk management)是针对风险进行识别、分析、估计和处理的过程, 从狭义上说是针对一个存在风险状况的管理过程, 从广义上说它包含了系统的规划在内, 即降低系统风险的措施。图 1 是一个典型的风险管理流程图^[14]。

堤防风险管理(levee risk management)是分析、评价、预防和处理堤防失事风险的一项复杂的系统工程, 包含着风险分析、风险评价和风险处理 3 个方面内容, 是对风险和承受者的脆弱度进行分析并作出相应对策的综合体系。

4 计算模型及计算条件

4.1 工程概况和计算模型

南京市板桥河左岸堤防位于南京市雨花台区板桥镇以东, 宁芜公路以北, 在南京市雨花台经济开

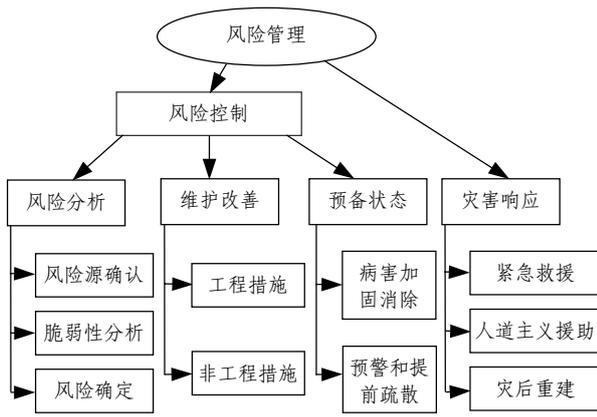


图1 风险管理流程图

Fig.1 Risk Management Procedure

发区内,全长约 3 km。1995 年 7 月 6 日,南京市板桥河堤蛤蟆石处堤防在超警戒水位运行 34 d 后,内河洪水水位处于▽10.0 m 时发生了溃决,并造成了巨大的经济损失,其失事的直接原因就是由于堤基中较为普遍地分布着的透水性强、中等~严重液化的粉细砂土,正是由于其极其特殊的物理力学性质而导致堤防发生了溃决。为了彻底消除板桥河堤防汛隐患,南京市雨花台区水利局对板桥河堤进行了加固。

板桥河破圩断面和加固后断面工程地质图分别如图 2 和 3 所示。根据 2 个计算断面图分别生成了有限元计算网格。

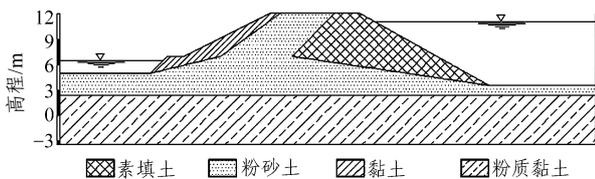


图2 破圩断面 P-P 图

Fig.2 Failure section P-P

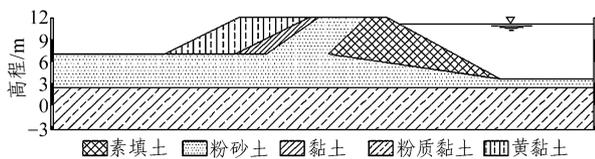


图3 加固断面 P-P'图

Fig.3 Reinforced section P-P'

4.2 计算参数统计特征

根据板桥河左岸堤防场地堤身和地基土体渗透试验、剪切破坏试验以及现场的标准贯入(SPT)试

验,根据相关研究成果,得到了渗透破坏风险随机变量统计特征(见表 1)、滑动失稳风险随机变量统计特征(见表 2)以及砂土地震液化风险随机变量统计特征(见表 3)。

表 1 渗透破坏风险随机变量统计特征表

Table 1 Statistical characterization of random variables in seepage failure risk analysis

土层	水平渗透系数 k_h ($10^{-6} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$)			竖向渗透系数 k_v ($10^{-6} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$)		
	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值
素填土	761.30	8.102	155.7	289.22	3.078	59.15
黏土	473.49	0.456	139.3	473.49	0.456	139.30
粉砂土	495.66	196.9	2 545.6	495.66	196.9	2 545.60
粉质黏土	35.83	16.21	23.35	35.83	16.21	23.35
黄黏土	473.49	0.456	139.3	473.49	0.456	139.30

注:加固黄黏土采用与黏土相同的渗透系数特征值。

表 2 滑动失稳风险随机变量统计特征表

Table 2 Statistical characterization of random variables in slide failure risk analysis

土层	黏聚力统计特征			内摩擦角统计特征		
	标准值 /kPa	变异 系数	分布 类型	标准值 /(°)	变异 系数	分布 类型
素填土	38.1	0.302	正态	38.1	0.302	正态
黏土	18.3	0.446	正态	18.3	0.446	正态
粉砂土	4.0	0.322	正态	4.0	0.322	正态
粉质黏土	42.0	0.349	正态	42.0	0.349	正态
黄黏土	18.3	0.273	正态	18.3	0.273	正态

注:加固黄黏土采用与黏土相同的渗透系数特征值。

表 3 砂土地震液化风险随机变量统计特征表

Table 3 Statistical characterization of random variables in sandy soil seismic liquefaction risk analysis

随机变量	N /(击 \cdot (30 cm) $^{-1}$)	d_s /m	d_w /m	ρ_c %
分布类型	对数正态	正态	正态	对数正态
均值	6.400	1.0~11.0	2.5~7.0	8.40
标准差	5.693	1.0	-	3.04

注:表中地下水埋深 d_w 的标准差在不同水位埋深下是不同的,取其变异系数 δ 为 0.5。

4.3 洪水位概率密度函数和场地地震发生率

由于板桥河场地缺乏洪水序列资料,为简单起见,假定洪水位服从指数分布,再考虑板桥河堤防

校核水位为▽11.5 m, 设计标准为百年一遇, 反推得洪水位的均值为▽5.6 m, 所以洪水水位高程的 PDF (概率密度函数)为

$$f(H) = \frac{1}{2.04} e^{-\frac{1}{2.04}(H-3.56)} \quad (10)$$

式中: H 为堤防临水面洪水水位高程。

根据规范^[13]可知, 板桥河场地的抗震设防标准为 VII 度。很多学者对地震发生率进行了研究, 根据汪雪泉和潘坚云^[15]对华东地区(29°~37°N, 112°~123°E)1300~2001 年 $M \geq 4.75$ 地震目录所做的完全性分析, 从安全角度出发, 南京地区发生 VII 度地震的发生率取为 0.055。

4.4 相关说明

基于 Monte Carlo 法基本原理和随机抽样过程, 根据所建立起堤防渗透破坏功能函数、岸坡滑动失稳功能函数和砂土地震液化功能函数, 用 FORTRAN 语言编制了堤防渗透破坏、岸坡滑动失稳和砂土地震液化的风险率计算程序 MCseep.for, MCslide.for 和 MClique.for, 对板桥河堤防失稳的风险进行分析。

勘察显示板桥河左岸堤防背水面地下水位的工程常年处于▽6.0 m~▽6.5 m 范围内, 内河洪水水位低于▽6.0 m 情况下堤防发生滑动失稳和渗透破坏的可能性非常小, 故计算中取最低洪水水位值 H_1 为▽6.0 m。

5 堤防失稳风险率的计算

分别使用自编程序计算得到不同给定洪水水位下堤防渗透破坏的概率、堤防岸坡滑动失稳的概率以及砂土地震液化的概率, 采用回归拟合的方法确定各种失效模式的风险率计算式, 进而对堤防失事的综合风险进行分析。

同时基于 1995 年板桥河左岸堤防典型破坏实例建立堤防渗透破坏风险率临界值、岸坡滑动失稳风险率临界值以及堤防失事综合风险率临界值, 从而对堤防进行基于风险分析结果的风险管理研究。

5.1 渗透破坏风险率的计算

采用相关计算方法^[12]回归拟合可得堤防渗透破坏风险率计算式为

$$R = \int_{H_1}^{H_2} \left[\frac{A_1 - A_2}{1 + e^{(H-h_0)/A_3}} + A_2 \right] \left[\frac{1}{2.04} e^{-\frac{1}{2.04}(H-3.56)} \right] dH \quad (11)$$

式中: A_1, A_2, A_3, h_0 的取值如表 4 所示。

表 4 A_1, A_2, A_3, h_0 取值表
Table 4 Values of A_1, A_2, A_3, h_0

断面	A_1	A_2	A_3	h_0
破坏断面 P-P	-0.000 120	0.878 59	0.413 61	9.898 3
加固断面 P-P'	-0.000 067	0.829 73	0.427 82	10.283 5

据式(11), 分别计算不同最高洪水水位 H_2 下堤防渗透破坏风险率, 生成板桥河左岸堤防渗透破坏风险率与内河洪水水位关系曲线, 如图 4 所示(图中虚线表示的是板桥河左岸堤防临界渗透破坏风险率以及所对应的水位)。

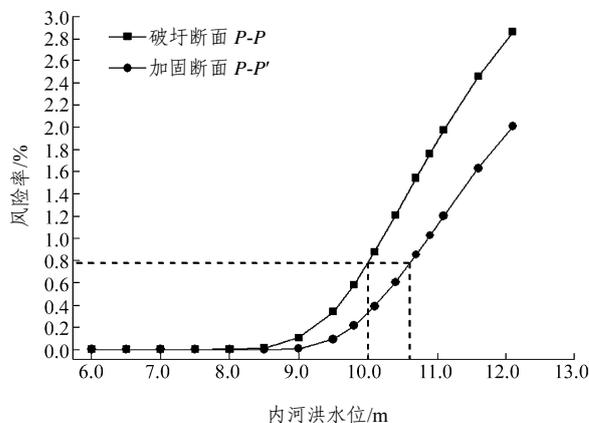


图 4 板桥河左岸堤防渗透破坏风险率与内河洪水水位关系曲线

Fig.4 Risk coefficient of seepage failure in Banqiao River levee vs. flood water stage

图 4 的计算结果表明, 随着洪水位的逐渐增加, 堤防渗透破坏风险率逐渐增大, 加固断面 P-P' 渗透破坏风险率相对破坏断面 P-P 对应值的减小幅度随着计算上限洪水位的增加而逐渐增大; 当计算上限洪水位为▽10.0 m 时, 破坏断面 P-P 渗透破坏风险率为 0.781%; 临界渗透破坏风险率所对应的洪水位由破坏断面 P-P 的▽10.0 m 提高到加固后断面 P-P' 的▽10.6 m。

5.2 岸坡滑动失稳风险率的计算

根据所述计算方法, 回归拟合得到堤防背水面岸坡滑动失稳风险率计算式为

$$R = \int_{H_1}^{H_2} \left[A_1 + A_2 e^{-\frac{(H-A_3)^2}{2\omega^2}} \right] \left[\frac{1}{2.04} e^{-\frac{1}{2.04}(H-3.56)} \right] dH \quad (12)$$

式中: A_1, A_2, A_3, ω 取值如表 5 所示。

表5 A_1, A_2, A_3, ω 取值表
Table 5 Value of A_1, A_2, A_3, ω

断面	A_1	A_2	A_3	ω
破圩断面 $P-P$	1.246 62	308.704 04	24.262 15	5.167 87
加固断面 $P-P'$	1.776 81	13.296 09	3.910 91	2.922 38

据式(12), 分别计算不同最高洪水位 H_2 下堤防岸坡滑动失稳风险率, 生成板桥河左岸堤防岸坡滑动失稳风险率与内河洪水位关系曲线, 如图 5 所示(图中虚线表示的是板桥河左岸堤防岸坡滑动失稳风险率临界值以及所对应的水位)。

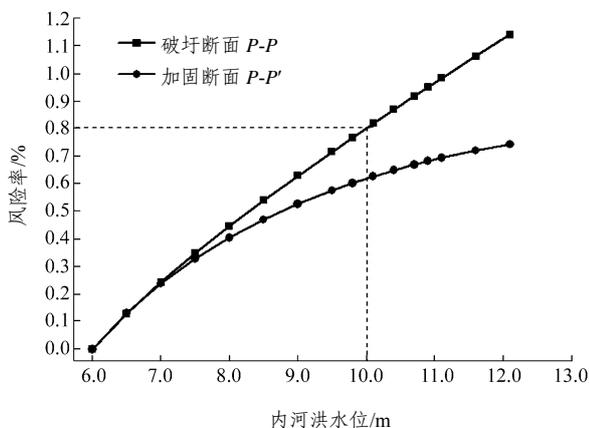


图5 板桥河左岸堤防岸坡滑动失稳风险率与内河洪水位关系曲线

Fig.5 Risk coefficient of slide instability in Banqiao River levee vs. flood water stage

从图 5 可以看出, 随着洪水位的逐渐增加, 堤防背水面岸坡滑动失稳风险率逐渐增大, 加固断面 $P-P'$ 的滑动失稳风险率相对破圩断面 $P-P$ 对应值的减小幅度随着计算上限洪水位的增加而逐渐增大; 当计算上限洪水位为 $\nabla 10.0$ m 时, 破圩断面 $P-P$ 背水面岸坡滑动失稳风险率为 0.802%。图 5 中, 根据破圩断面 $P-P$ 破圩时的水位确定的堤防岸坡滑动失稳风险率的临界值同加固断面 $P-P'$ 所对应的曲线并没有相交, 表明现有的加固措施明显提高了堤防的抗滑稳定性, 降低了堤防滑动失稳的风险; 由此可以看出, 加固措施的一个明显的效果是有效地改变了滑动失稳风险率与内河洪水位关系曲线, 降低了堤防滑动失稳风险率对洪水位的敏感性; 在计算最高上限洪水位 $\nabla 12.1$ m 下, 加固断面 $P-P'$ 的滑动失稳风险率比加固前降低了约 34.9%。

5.3 砂土液化风险率的计算

由砂土液化的基本原理可知, 砂土液化与否主要取决于土的抗液化能力, 对板桥河左岸堤防加固工程来讲, 现有加固措施并没有改变堤防原堤身和堤基填土性质, 故简单起见, 假定场地砂土液化概率在加固前后没有发生变化。根据前述计算方法, 回归拟合得到板桥河堤防场地砂土液化概率计算式为

$$R = \int_{H_1}^{H_2} \left[\frac{A_1 - A_2}{1 + e^{(H-h_0)/A_3}} + A_2 \right] \left[\frac{1}{2.04} e^{-\frac{1}{2.04}(H-3.56)} \right] P_e dH \quad (13)$$

式中: A_1, A_2, A_3 和 h_0 分别为 0.132 4, 0.147 7, 8.044 和 17.31; P_e 取为 0.055。

据式(13), 分别计算不同最高洪水位 H_2 下堤防岸坡滑动失稳风险率, 生成板桥河左岸堤防砂土地震液化风险率与内河洪水位关系曲线, 如图 6 所示。

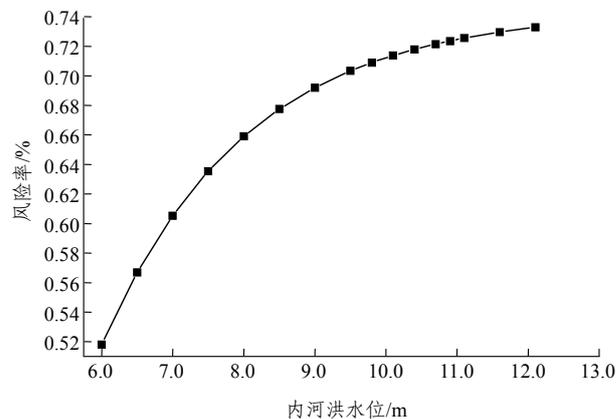


图6 板桥河左岸堤防砂土地震液化风险率与内河洪水位关系曲线

Fig.6 Risk coefficient of sand soil seismic liquefaction in Banqiao River levee vs. flood water stage

图 6 计算结果表明, 场地砂土地震液化风险率随着计算上限洪水位的增加而随之增大, 且增幅随着洪水位的增加反而呈现减小的趋势, 但总体上来说, 场地砂土地震液化风险率对计算上限洪水位不是很敏感; 在最高计算上限洪水位下, 板桥河左岸堤防场地砂土地震液化的风险率约为 0.733%; 基于 C. H. Juang 等^[11]对砂土地震液化概率所做的可能性分类, 分析结果显示板桥河左岸堤防场地砂土几乎不会液化, 因此可以认为场地砂土地震液化的风险率属于可承受范围。

5.4 堤防失事综合风险率的计算

基于堤防失事综合风险率的数学模型, 根据回归分析所得到的堤防渗透破坏风险率、岸坡滑动

失稳风险率和场地砂土地震液化风险率的计算式(式(11)~(13)),生成板桥河左岸堤防失事综合风险率与内河洪水位关系曲线如图7所示。

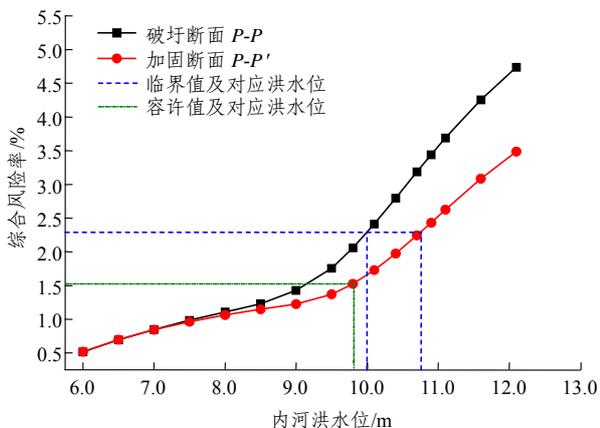


图7 板桥河左岸堤防失事综合风险率与内河洪水位关系曲线

Fig.7 Risk coefficient of comprehensive failure in Banqiao River levee vs. flood water stage

从图7可以明显看出,堤防失事破坏综合风险率与计算上限洪水位间呈现一种非线性的单调递增关系,加固断面 $P-P'$ 失事综合风险率相对破坏断面 $P-P$ 对应值的减小幅度随着计算上限洪水位的增加而逐渐增大,由此可见,加固措施对提高堤防防洪风险的作用是明显的,在计算最高上限洪水位 $\nabla 12.1$ m下,加固断面 $P-P'$ 的失事综合风险率比加固前降低了约26.4%。根据破坏断面 $P-P$ 建立起堤防失事破坏综合风险率的临界值约为2.275%,综合风险率临界值所对应的洪水位由破坏断面 $P-P$ 的 $\nabla 10.0$ m提高到加固后断面 $P-P'$ 的 $\nabla 10.8$ m。

6 堤防风险管理

6.1 降低风险的措施

根据前面对板桥河左岸堤防所做的风险分析研究成果,可以发现堤防失事风险对计算上限洪水位比较敏感,同时渗透破坏风险率在综合风险率中所占的比重也较大。从图4也可发现,在高洪水位下,板桥河堤防还是存在渗透破坏的可能性。通过综合分析,对板桥河左岸堤防提出以下3条降低风险的措施:

(1) 加强洪水位观测,完善汛期洪水位系列资料,为准确风险评估提供依据,进而为堤防运行管理提供依据。

(2) 对现有堤后加固黄黏土来说,工程施工过

程中要对填土质量严格把关,加强施工过程的规范化,切实降低加固黄黏土物理力学性质指标的变异性,从而减小堤防渗透破坏的风险。降低加固黄黏土物理力学性质指标的变异性,同时也相应地减小了堤防岸坡滑动失稳的风险,从而提高了堤防的安全性。

(3) 工程加固中也必须对一些存在的比较贯穿的管涌通道进行处理,以降低堤防发生渗透破坏的风险,提高堤防的安全性。

6.2 板桥河堤防容许风险的研究

制定一个合适的容许风险程度,是风险管理的一个重要组成部分。

如前所述,对板桥河工程来讲,可将1995年破坏断面 $P-P$ 计算得到的风险率作为整个板桥河左岸堤防工程的临界风险率,其余堤段的失事风险率接近或超过该临界风险率,就认为该堤段要在遭遇该临界风险所对应的洪水位时要发生失事破坏。根据工程界普遍的定义,认为容许值等于临界值除以安全系数,取安全系数为1.5,则板桥河左岸堤防发生失事破坏的综合风险率的容许值约为1.517%,对应的计算上限洪水位约为9.8 m;堤防发生失事破坏综合风险率的临界值约为2.275%,其对应的计算上限洪水位约为10.8 m。

以上2个指标是根据板桥河左岸堤防工程破坏案例所建立起来的,该指标对板桥河堤防工程风险评价工作以及板桥河左岸堤防的安全运行具有重要的意义。

6.3 板桥河堤防汛期洪水位运行建议

基于计算分析得到的板桥河左岸堤防失事破坏综合风险率随计算上限洪水位关系曲线(见图7)。根据所建立该段堤防失事破坏综合风险率的容许值和临界值,结合分析得到的各分项失事风险率对计算上限洪水位的曲线(见图4~6)以及加固后的堤防实际情况,对该段板桥河左岸堤防运行管理提出如下几条若干建议:

(1) 汛期洪水位处于 $\nabla 9.0$ m以下时,堤防运行处于安全状态,堤防失事的综合风险率低于1.23%,堤防发生破坏的可能性相对很低,可以认为,此时堤防只需要进行正常地例行日常管理。

(2) 认为当洪水位大于 $\nabla 9.0$ m时堤防进入汛期管理状态。当汛期洪水位处于 $\nabla 9.0$ m~ $\nabla 9.5$ m时,堤防失事综合风险率低于1.23%,此时失事综合风险率对上限洪水位增大的敏感性也相对较低,也可以认为堤防此时处于相对安全状态,但必须提高警

惕, 强化洪水位观测, 进行汛期堤防日常巡查工作。

(3) 当汛期洪水位处于 $\nabla 9.5\text{ m} \sim \nabla 9.8\text{ m}$ 时, 堤防失事的综合风险率低于 1.37%, 其对上限洪水位的敏感性提高了, 此时堤防失事综合风险仍低于容许值, 但应该时刻监视洪水水位的变化, 加强堤防安全巡视, 进行昼夜巡查, 及时排除堤防薄弱环节出现的险情。

(4) 当汛期洪水位处于 $\nabla 9.8\text{ m} \sim \nabla 10.5\text{ m}$ 时, 堤防失事风险率低于 1.66%, 此时堤防失事风险急剧增大, 失事综合风险率对上限洪水位的敏感度相应地也急剧增大。当洪水位超过 $\nabla 9.8\text{ m}$ 时, 堤防失事综合风险率超过容许值, 即认为洪水位 $\nabla 9.8\text{ m}$ 是堤防的警戒水位, 当洪水位高于 $\nabla 9.8\text{ m}$, 必须加强堤防安全警戒水平, 密切监视洪水位变化, 同时需获取全流域的洪水资料, 根据天气预报对防汛工作做出调整; 同时进行昼夜安全巡查, 提高警惕, 以应对可能遭遇的洪水。

(5) 当汛期洪水位高于 $\nabla 10.5\text{ m}$ 时, 但低于 $\nabla 10.8\text{ m}$, 堤防失事综合风险率随着上限洪水位增加, 从 1.66%逼近堤防失事综合风险率的临界值 2.275%; 此时应立即发布防汛预警, 堤防失事风险率对洪水位变化变得比较敏感, 必须密切关注洪水水位的变化、上游洪水以及降雨的情况; 同时立即调集防汛抢险物资, 时刻应对堤防薄弱环节可能出现的失事破坏。

(6) 一旦汛期洪水位高于 $\nabla 10.8\text{ m}$ 时, 堤防的失事综合风险率已经超过失事综合风险率的临界值 2.275%, 此时应立即发布防汛警报, 提前撤走保护区内重要物资以及人民生命财产; 同时加强防汛物资储备, 加强各项防汛监控, 随时准备进行抢险救灾。

7 结 论

(1) 分析了板桥河左岸堤防 3 种可能结构失效模式, 提出了堤防场地砂土液化风险率的数学模型; 并应用堤防渗透破坏风险率、岸坡滑动失稳风险率以及场地砂土液化风险率的数学模型对板桥河左岸堤防失事的综合风险率进行了分析。

(2) 通过堤防典型破坏实例, 建立起板桥河左岸堤防失事综合风险率的容许值为 1.517%, 临界值约为 2.275%。可将此值推广到整个板桥河堤防工程风险评估工作中去, 据此对堤防的汛期运行管理提

供建议。

(3) 堤防失事综合风险率的临界值所对应的上限洪水位由破坏断面 $P-P$ 的 $\nabla 10.0\text{ m}$ 提高到加固后断面 $P-P'$ 的 $\nabla 10.8\text{ m}$, 即对加固后的板桥河左岸堤防来讲, 汛期防汛警戒水位从加固前的 $\nabla 10.0\text{ m}$ 提高到 $\nabla 10.8\text{ m}$, 可见现有加固措施的效果是明显的。

(4) 堤防失事的综合风险率与计算上限洪水位间呈现一种非线性的单调递增关系, 加固断面 $P-P'$ 失稳综合风险率相对破坏断面 $P-P$ 对应值的减小幅度随着计算上限洪水位的增加而逐渐增大。

(5) 在最高上限洪水位 $\nabla 12.1\text{ m}$ 下, 板桥河左岸堤防破坏断面 $P-P$ 和加固断面 $P-P'$ 渗透破坏风险率分别为 2.86%和 2.01%, 岸坡滑动失稳的风险率分别为 1.14%和 0.74%, 堤防失事综合风险率分别为 4.74%和 3.48%。现有加固措施分别使得堤防渗透破坏风险率、岸坡滑动失稳风险率和失事综合风险率降低了约 29.7%, 35.1%和 26.4%。

(6) 建立了堤防风险管理概念, 并基于风险分析的结果, 针对板桥河左岸堤防提出了降低风险的措施, 对堤防汛期洪水位运行管理提出了建议。

参考文献(References):

- [1] 李青云, 张建民. 长江堤防工程风险分析和安全评价研究初论[J]. 中国软科学, 2001, (11): 112 - 115.(Li Qingyun, Zhang Jianmin. On the risk analysis and safety assessment research of the Yangtze River main levee[J]. Soft Science of China, 2001, (11): 112 - 115.(in Chinese))
- [2] Einstein H H. Risk and risk analysis of rock engineering[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 1996, 11(2): 141 - 155.
- [3] 陈祖煜. 土质边坡稳定分析: 原理·方法·程序[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2003. 273 - 334.(Chen Zuyu. Soil Slope Stability Analysis: Theory, Methods and Programs[M]. Beijing: China Water Power Press, 2003. 273 - 334.(in Chinese))
- [4] 朱元胜. 长江南京段设计洪水位的风险分析[J]. 水文, 1989, (5): 8 - 15.(Zhu Yuanshen. Risk analysis of design flood stage of Nanjing Section of Yangtze River[J]. Hydrology, 1989, (5): 8 - 15.(in Chinese))
- [5] Olson J R. Risk modeling for a system of levees under non-stationary condition[Ph. D. Thesis][D]. Virginia: University of Virginia, 1999.
- [6] Wolff T F. Geotechnical reliability of levees[A]. In: Hydrology Hydraulics Workshop on Risk-based Analysis for Flood Damage Reduction Studies[C]. [s. l.]: [s. n.], 1997. 20 - 22.
- [7] 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): 64 - 67.(Wang Zhuofu, Zhang Zhiqiang, Yang

- Gaosheng. Risk calculation model for flood levee structure[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1998, (7): 64 - 67.(in Chinese)
- [8] 吴兴征, 赵进勇. 堤防结构风险分析理论及其应用[J]. 水利学报, 2003, (8): 79 - 85.(Wu Xingzheng, Zhao Jinyong. Theory of structure risk analysis for levee and its application[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003, (8): 79 - 85.(in Chinese))
- [9] 朱勇华, 郭海晋, 徐高洪, 等. 防洪堤防综合风险研究[J]. 中国农村水利水电, 2003, (7): 11 - 14.(Zhu Yonghua, Guo Haijin, Xu Gaohong, et al. Flood-control comprehensive risk study for dikes[J]. China Rural Water and Hydropower, 2003, (7): 11 - 14.(in Chinese))
- [10] 章志强, 王卓甫, 杨高升. 长江南京段堤防工程失稳风险分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 1999, 27(2): 17 - 21.(Zhang Zhiqiang, Wang Zhuofu, Yang Gaosheng. Flood levee risk analysis for Yangtze River in Nanjing[J]. Journal of Hohai University(Natural Science), 1999, 27(2): 17 - 21.(in Chinese))
- [11] Juang C H, Rosowsky D V, Tang W H. Reliability-based method for assessing liquefaction potential of soils[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1999, 125(8): 684 - 689.
- [12] Chowdhury R N, Xu D W. Geotechnical system reliability of slopes[J]. Reliability Engineering and System Safety, 1995, 47(3): 141 - 151.
- [13] 中华人民共和国国家标准编写组. 建筑抗震设计规范(GB50011 - 2001)[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001.(The National Standards Compilation Group of People's Republic of China. Code for Seismic Design of Buildings(GB50011 - 2001)[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2001.(in Chinese))
- [14] Erich J P. Flood risk and flood management[J]. Journal of Hydrology, 2002, 267(2): 2 - 11.
- [15] 汪雪泉, 潘坚云. 华东地区地震目录的完全性分析[J]. 地震学刊, 2002, 22(3): 1 - 4.(Wang Xuequan, Pan Jianyun. Completeness analysis of the earthquake catalog for east china region[J]. Journal of Seismology, 2002, 22(3): 1 - 4.(in Chinese))

科技期刊道德公约

为加强科技界精神文明建议, 提高科技工作者职业道德水平, 保障我国科技事业的健康发展, 特制定《全国性学会科技期刊职业道德公约》, 参与签名的中国科协所属全国性学会科技期刊承诺共同遵守, 互相监督。

(1) 提倡追求真理、实事求是、团结协作、诚实劳动; 坚持学术民主、鼓励百家争鸣, 尊重他人劳动成果; 反对伪科学和迷信活动。

(2) 严格执行审稿制度, 不徇私情, 不登人情稿, 公正廉洁。

(3) 维护投稿人的权益, 一般在规定的期限内对来稿是否被采用予以答复。

(4) 拒绝刊登署名有争议、引用他人著述未注明出处、在规定的期限内一稿多投的稿件。

(5) 对弄虚作假、抄袭剽窃者, 一经查实, 视其情节轻重给予书面警告、拒绝刊登有其署名的稿件、通知其所在单位、公开曝光等处理。

(6) 鼓励对上述所列违反道德规范的行为进行据实举报, 保护举报人的合理要求, 不受理匿名举报。

(7) 对于严重违反科技工作者职业道德、情节恶劣、影响极坏的事件, 将转请有关部门进行严肃处理, 也可以提请中国科协科技工作者道德与权益工作委员会进行必要的调查。