

长江南京段堤防工程失稳风险分析^{*}

章志强

王卓甫 杨高升

(南京长江河道管理处 南京 210011)

(河海大学国际工商学院 南京 210098)

摘 要 对影响长江南京段防洪堤结构稳定的不确定性作了初步分析,提出了防洪堤工程失稳风险计算的数学模型.借助于 Monte Carlo 方法,具体计算了目前长江南京段防洪堤工程失稳风险的大小.计算表明,目前长江南京段防洪堤发生边坡失稳的风险度为 1.15%,发生渗透变形的风险度为 0.63%.

关键词 防洪堤 不确定性 风险度

中图号 TV871

长江南京段防洪主要依靠防洪堤,而且绝大部分是土堤.防洪堤失效的风险性如何,为人们所关心.防洪堤失效风险一般包括洪水漫顶、防洪堤边坡滑动及渗透变形等.许多学者对防洪堤的漫顶风险,即水文风险,作了较多的研究^[1,2].但对防洪堤工程结构方面风险的研究还有待深入.

对长江南京段百里岸线近 200 km 防洪堤近代抗洪情况的调查结果表明:解放初期,长江南京段防洪堤普遍矮小、单薄,一般顶高程为 8.0~10.0 m(吴淞高程,下同),顶宽 2.0 m 左右,堤坡坡比为 1:1.5~1:2.5.1954 年特大洪水(南京下关水位 10.22 m)时,有 90% 以上的圩遇到了风险——破圩.破圩原因基本上是洪水漫过堤顶.1954 年特大洪水后,长江南京段防洪堤普遍进行了加高加宽,堤顶高程一般超过 1954 年洪水位 0.5~1.5 m,堤顶加宽到 3.0~4.0 m,堤坡坡比降为 1:2.0~1:3.0.此后,防洪堤出现的失事形式由原来的漫顶变成了堤身失稳,包括堤(岸)边坡滑动失稳和堤身(基)渗透变形(管涌或流土)失稳,或堤身(基)先发生渗透变形,然后发展为堤塌陷或堤坡滑动失稳.因此,仅仅考虑水文风险则低估了防洪堤工程全面风险,研究防洪堤结构风险是研究防洪工程全面风险的一个组成部分.本文主要对防洪堤失稳风险作一探讨.

1 防洪堤工程风险定义

长江南京段防洪堤失稳破坏的形式有两种:一种是堤的边坡滑动,包括上下游边坡滑动(包括基础);另一种是堤身或堤脚处产生渗透变形.但不管属那种形式的破坏,均可将其风险定义为当洪水位超过某一界限时,防洪堤的荷载超过抗力,导致其失效的概率.

防洪堤所受荷载用 Z 表示,它可以是防洪堤的挡水水位、防洪堤边坡的滑动力矩,也可以是堤身在水力作用下的渗透坡降.防洪堤的抗力用 Z' 表示,它可以是堤顶高程(或设计水位)、堤边坡的抗滑力矩,也可以是堤身土体的抗渗能力.

防洪堤失稳风险的大小用其风险度 R 来表示.其数学表达式为

$$R = P(Z > Z') \tag{1}$$

式中 Z 和 Z' 均是随机变量.因为虽在枯水位期间,防洪堤也会出现滑坡事故,但这时防洪堤的滑坡对保护对象来说并不构成任何风险.所以,仅当洪水位超过规定值,如在警戒水位以上时,讨论式(1)才有意义.

2 防洪堤稳定的不确定性分析

影响防洪堤边坡滑动和发生渗透变形的因素很多,如水位、土质的物理力学性质指标、堤防的结构尺寸及施工质量等.若堤防在抗洪过程中,这些因素的值和设计值相吻合,那么,只要设计不出差错,堤防工程在

收稿日期:1997-11-10

第一作者简介:章志强,男,高级工程师,水利规划施工管理专业,主要从事水利规划和施工管理研究.

^{*} 南京市科技发展计划项目资助课题(96617)研究成果的部分内容.

边坡滑动和渗透变形方面就不会产生风险.但事实上做不到这一点.这些因素存在不确定性,因此就存在了防洪堤失稳的风险.

应该说,影响防洪堤稳定因素的不确定性的研究是项很复杂的工作,而且某些因素的不确定性的研究还极其困难.为简化这方面的研究,本文作下列概括性分析.

2.1 水位的不确定性分析

长江南京段洪水水位的不确定性,对其防洪堤稳定的风险性有较大的影响,特别是对各种形式的渗透变形,其影响就更为明显.对长江南京段年最高水位的随机变化规律,水文专家们已作了许多分析研究^[1,2],本文不再深入讨论,而是使用其最新研究的结果.

2.2 影响防洪堤边坡抗滑稳定的不确定性分析

根据文献[3],一般土坡稳定可靠性(或风险性)的主要影响因素是土质的物理力学性质指标,包括凝聚力 C 、摩擦角 φ 和重度 γ .但影响防洪堤边坡抗滑稳定的不确定因素除上述这些因素外,还有洪水水位.

引起土质物理力学指标不确定性的原因在于:土质物理力学指标的变异,取样、试验和计算等过程中存在着各种各样的误差.对这种不确定性的描述,从统计角度看,需要收集大量的数据进行分析,然后找出各断面的土质物理力学指标不确定性的规律及其特征值.但事实上,这样做费用很高,一般难以做到.一般根据收集到的有限数据来估算凝聚力 C 、摩擦角 φ 和重度 γ 等的均值 X 、标准差 σ 及离差系数 C_V ,并假定其服从正态分布^[3],然后将其作为分析计算防洪堤滑坡风险的基础.长江南京段防洪堤 3 种典型断面如图 1 所示,其地层土质物理力学性质指标及统计数据见表 1.

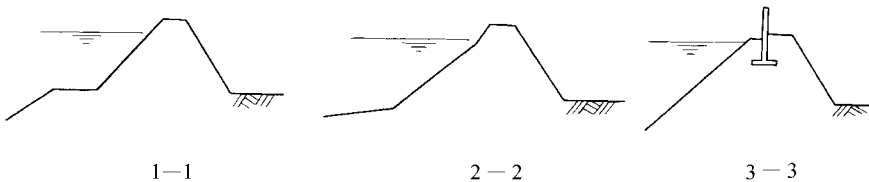


图 1 防洪堤典型断面结构

Fig.1 Typical sections of flood embankment

表 1 地层土质物理力学性质指标及统计数据

Table 1 Data and index of the soil properties

地质	I 素土			II 淤泥粉质土						III 粉土					
				II ₁			II ₂			III ₁			III ₂		
	γ	C	φ	γ	C	φ	γ	C	φ	γ	C	φ	γ	C	φ
	$/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	$/\text{kPa}$	$/(^{\circ})$	$/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	$/\text{kPa}$	$/(^{\circ})$	$/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	$/\text{kPa}$	$/(^{\circ})$	$/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	$/\text{kPa}$	$/(^{\circ})$	$/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	$/\text{kPa}$	$/(^{\circ})$
1—1	19.10	24.70	14.58	18.30	7.40	14.67	18.30	7.40	14.67	19.30	18.80	27.80	19.70	14.40	25.42
2—2	19.20	24.70	14.58	18.30	10.00	15.00	18.10	7.40	14.70	19.30	16.00	26.00	19.90	10.00	30.00
2'—2'	19.20	24.70	14.58	18.30	10.00	15.00	18.10	7.40	14.70	19.30	16.00	26.00	19.90	10.00	30.00
3—3	19.20	24.68	14.58	18.50	7.38	18.50	18.50	7.38	18.50	19.10	9.99	29.33	19.10	9.99	29.33
4—4	19.20	24.68	14.58	18.50	7.38	18.50	18.50	7.38	18.50	19.10	9.99	29.33	19.10	9.99	29.33
4'—4'	19.20	24.68	14.58	18.50	7.38	18.50	18.50	7.38	18.50	19.10	9.99	29.33	19.10	9.99	29.33
C_V	0.010	0.231	0.260	0.010	0.420	0.250	0.010	0.420	0.250	0.010	0.391	0.081	0.010	0.391	0.081

表 1 中 2'—2' 断面是在 2—2 断面基础上做成的标准堤(堤顶高程 12.5m,迎水面坡比为 1:3.0,背水面坡比为 1:2.5,堤顶宽 4.0m),4'—4' 断面为在 4—4 断面基础上做成的标准堤,而 4—4 断面为做成标准堤前的综合断面,其堤顶高程 10.0m,迎水面坡比为 1:2.5,背水面坡比为 1:2.0,堤顶宽 2.5m.

2.3 影响防洪堤土质抗渗性的不确定性分析

防洪堤产生渗透变形的条件可以描述为:在防洪堤结构一定的情况下,随着堤外洪水位的上升,防洪堤内渗透坡降不断提高,当该渗透坡降超过了堤身土质的抗渗临界坡降时,渗透变形现象就发生了.显然,防洪堤产生渗透变形的不确定性可分为土质抗渗临界坡降的不确定性和防洪堤内渗透坡降的不确定性.

根据土力学理论和试验^[4],防洪堤土体抗渗临界坡降大小与土质颗粒的大小、颗粒级配及结构、孔隙率、重度、施工质量等因子有关,而这些因子均又有不确定性.若通过研究这些因子的随机性来分析临界坡降的

不确定性,势必会使问题复杂化,以致于找不到答案.为了简化分析计算,本文认为,可直接讨论土质渗透临界坡降的不确定性.其方法是,收集土质渗透临界坡降分布范围的资料,并假定其服从三角分布.根据收集到的数据,经分析综合,可得典型断面附近土质临界水力坡降的分布函数

$$f(x) = \begin{cases} \frac{x - 0.1}{0.2025} & 0.1 \leq x \leq 0.55 \\ \frac{1.0 - x}{0.2025} & 0.55 \leq x \leq 1.0 \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \tag{2}$$

3 防洪堤失稳风险度计算及成果分析

3.1 防洪堤失稳风险计算模型的选择

根据近年来长江南京段堤防失稳事故资料分析,防洪堤失稳形式可分为边坡滑动(包括地基)失稳和渗透变形失稳.假设这两种失稳事件是相互随机独立的.因此,可以将防洪堤边坡失稳风险度 R_1 和渗透变形失稳风险度 R_2 分别讨论,然后计算防洪堤失稳风险度 R .即

$$R = R_1 + R_2 \tag{3}$$

根据研究*, R_1, R_2 在实际计算时可离散化求解.

$$R_1 = \sum_{i=1}^N F_s(\bar{H}_i) \Delta F_0(\bar{H}_i) \tag{4}$$

式中: $F_s(\bar{H}_i) (= \int_{M_R}^{\infty} f(M_s/H) dM_s)$ —— 给定 $\bar{H}_i$ 时,滑动力矩 M_s 大于抗滑力矩 M_R 的概率; $\Delta F_0(\bar{H}_i)$ —— 洪水位频率曲线第 i 段区间概率; N —— 洪水位频率曲线计算段数.

$$R_2 = \sum_{i=1}^N F_J(\bar{H}_i) \Delta F_0(\bar{H}_i) \tag{5}$$

式中: $F_J(\bar{H}_i) (= \int_{i_k}^{\infty} f(J/H) dJ)$ —— 给定 $\bar{H}_i$ 时,渗透坡降 J 大于临界坡降 i_k 的概率; $\Delta F_0(\bar{H}_i)$ 和 N 的意义同前.

3.2 防洪堤失稳风险度计算

3.2.1 防洪堤边坡失稳风险度 R_1 的计算

根据土层特点,并考虑土堤上部加混凝土防洪墙两种结构,如图 1 所示,选择 3 种典型断面,利用式(4)进行堤坡失稳风险计算.

式(4)中, $\Delta F_0(\bar{H}_i)$ 的计算利用有关研究成果*.

在求 $F_s(H_i)$ 时,先确定最小稳定安全系数及对应的滑弧,然后根据下列毕肖普极限状态方程,并利用 MC (Monte Carlo) 方法计算^[6].

$$g(x) = \{ \sum [C_i b_i + (W_i - U_i b_i) \tan \varphi_i] \sec \theta / (1 + \tan \varphi_i \tan \theta_i) \} - \sum W_i \sin \theta_i \tag{6}$$

式中: C_i, φ_i —— 土抗剪强度指标; U_i —— 孔隙压力; W_i —— 土条所受的自重重力; b_i —— 土条宽度; θ_i —— 土条底部中点切线与水平线的夹角.

利用 MC 方法,计算 $F_s(H_i)$ 的程序如下:

- a. 计算堤坡稳定最小安全系数,并确定滑弧;

b. 产生伪随机数,并对 C_i, φ_i 等不确定量抽样;

c. 在确定的滑弧下,计算滑动力矩 M_s 和抗滑力矩 M_R ;

d. 统计 $M_s > M_R$ 的次数,并记为 A ;

e. 重复 (b) ~ (d) B 次(本计算取 $B = 100\,000$);

f. 计算 $F_s(H_i), F_s(H_i) = A/B$.

* 章志强等. 南京长江防洪风险与措施研究. 南京市科委资助项目研究报告, 1997

断面 2—2 和 2'—2' 背水面坡失稳风险度的计算结果分别见表 2 和表 3.

表 2 2—2 断面背水坡失稳风险度计算					表 3 2'—2' 断面背水坡失稳风险度计算				
Table 2 Unstable risk rate of 2-2 section slop behind water					Table 3 Unstable risk rate of 2'-2' section slop behind water				
水位 H_i/m	安全系数	$F_s(H_i)$	$\Delta F_0(\bar{H}_i)$	$F_s(\bar{H}_i)\Delta F_0(\bar{H}_i)$	水位 H_i/m	安全系数	$F_s(H_i)$	$\Delta F_0(\bar{H}_i)$	$F_s(\bar{H}_i)\Delta F_0(\bar{H}_i)$
8.0	1.437	0.0076	0.240	0.228×10^{-2}	8.0	1.401	0.0044	0.240	0.116×10^{-2}
8.5	1.407	0.0114		0.345×10^{-2}	8.5	1.381	0.0053		0.140×10^{-2}
9.0	1.377	0.0177		0.385×10^{-2}	9.0	1.360	0.0065		0.154×10^{-2}
9.6	1.388	0.0239	0.185	0.197×10^{-2}	9.6	1.334	0.0102	0.185	0.077×10^{-2}
10.0	1.306	0.0331	0.069	0.222×10^{-2}	10.0	1.315	0.0122	0.069	0.094×10^{-2}
10.6	1.259	0.0637	0.046	0.084×10^{-2}	10.6	1.283	0.0288	0.046	0.038×10^{-2}
					11.1	1.253	0.0406	0.011	0.026×10^{-2}

比较表 2 和表 3 数据可见,2—2 断面背水坡在做成‘标准堤’后,由于加高加宽,水位在 10.0 m 前,不但边坡抗滑稳定安全系数减小,而且边坡滑动风险度也在降低. 做成‘标准堤’后,荷载虽加大,使地基稳定性下降,但此时浸润线下降了,渗流对滑坡的作用大为减小,因此风险度降低了.

不同断面边坡失稳风险度计算结果见表 4.					表 4 不同典型断面边坡失稳风险度计算			
从表 4 可见 :对于背水坡,2—2 断面背水坡失稳风险最大,主要在于 2—2 断面的地基条件较差,说明堤基础地质条件对于堤边坡失稳风险度影响较大 ;3—3 断面背水坡失稳风险度最小,主要在于 3—3 断面采用了混凝土防洪墙结构,一方面这对地基来说荷载减小了,另一方面它的存在降低了浸润线 ;对于迎水坡,3—3 断面风险最大,这在于 3—3 断面和其他断面相比坡度较陡,这对边坡失稳风险度影响较大.					Table 4 Unstable risk rate of various section slopes			
断面编号	背水坡失稳风险度	迎水面失稳风险度	失稳风险度 R_1					
1—1	0.45×10^{-2}	0.0001×10^{-2}	0.45×10^{-2}					
2—2	1.15×10^{-2}	0.0001×10^{-2}	1.15×10^{-2}					
2'—2'	0.47×10^{-2}	0.0001×10^{-2}	0.47×10^{-2}					
3—3	0.30×10^{-2}	0.7400×10^{-2}	1.04×10^{-2}					
4—4	0.92×10^{-2}	0.0001×10^{-2}	0.92×10^{-2}					
4'—4'	0.84×10^{-2}	0.0001×10^{-2}	0.84×10^{-2}					

注 :计算水位从 8.5 ~ 10.0 m.

从表 4 还可见,防洪堤边坡失稳风险度的最大值为 1.15%,宜将其作为目前长江南京段防洪堤边坡失稳的风险度.

3.3 防洪堤渗透变形风险度计算

式(5)中 $\Delta F_0(\bar{H}_i)$ 的计算方法同上.

利用式(5)计算 R_2 的步骤如下:

3.3.1 根据防洪堤典型断面确定不同水位下的渗透坡降

根据水力学方法^[5] 计算出各种水位条件下出渗点高度,然后估算渗径,并计算各种不同水位下的渗透坡降.

3.3.2 考虑渗透坡降 J 的不确定性

考虑到计算的误差、实际断面尺寸削弱和动植物破坏等因素,显然 J 存在不确定性. 假定 J 服从三角分布,并认为由计算所得的 J 是可靠的,估计其最大值为 $1.03J$,最小值为 $0.85J$.

3.3.3 计算在某水位 H_i 下渗透坡降 J 大于 i_k 的概率 $F_J(H_i)$

仍采用 MC 方法求 $F_J(H_i)$,其结果见表 5.

3.3.4 计算发生渗透变形的风险度 R_2

根据公式(5)计算发生渗透变形的风险度 R_2 ,得 $R_2 = 0.63\%$.

用上述同样断面,当将渗透临界坡降 i_k 的最小值从 0.1 提高到 0.2 时,计算表明,发生渗透变形的风险度 R_2 从 0.63% 降到 0.04%. 显然渗透临界坡降 i_k 的最小值对渗透变形的风险度 R_2 影响很大.

典型断面 3—3 和其他典型断面相比,在高水位,

表 5 综合断面渗透变形风险度计算				
Table 5 Seepage risk rate of typical sections				
水位 H_i/m	渗透坡降 J	$F_J(H_i)$	$\Delta F_0(\bar{H}_i)$	$F_J(\bar{H}_i)\Delta F_0(\bar{H}_i)$
8.0	0.1019	0.00014	0.240	0.0271×10^{-2}
8.5	0.1227	0.00212	0.237	0.0957×10^{-2}
9.0	0.1449	0.00596	0.185	0.2116×10^{-2}
9.6	0.1742	0.01692	0.069	0.1474×10^{-2}
10.0	0.1952	0.02580	0.046	0.1728×10^{-2}
10.6	0.2316	0.04932		0.0612×10^{-2}

注 : $R_2 = 0.63\%$ (计算水位从 8.5 ~ 10.0 m).

由于混凝土防渗墙的存在,使得水力坡降减小,因此发生渗透变形的风险度会较小.

用和上述相同的方法可算得‘标准堤’发生渗透变形的风险度 $R_2 = 0.02\%$. 显然,“标准堤”断面已在原来的基础上进行了加高加宽,“标准堤”发生渗透变形的风险度有了明显的降低.

4 结 论

a. 计算表明,目前长江南京段防洪堤发生边坡失稳的风险度为 1.15% ,发生渗透变形的风险度为 0.63% . 因此,不考虑防洪堤工程风险将低估防洪的全面风险.

b. 一般说来,防洪堤边坡失稳风险主要来自下游,但当上游边坡和岸坡靠得很近或相连时,其风险度也不小,如栖霞 3—3 断面. 因此,堤轴线不能离岸坡太近.

c. 渗透变形的风险度和渗透临界坡降 i_k 的关系极大,而在土质条件一定的情况下,提高渗透临界坡降 i_k 的主要途径是提高施工质量.“标准堤”建成后对降低渗透变形的风险度比较有利.

参 考 文 献

1 朱元生. 长江南京段设计洪水位的风险分析. 水文, 1989(5) 3 ~ 15

2 陈引川. 南京的洪涝灾害成因及对策研究. 软科学研究通讯, 1993(26) 28 ~ 34

3 姚耀武, 陈东伟. 土坡稳定可靠度分析. 岩土工程学报, 1994(2) 30 ~ 87

4 钱家欢. 土力学. 南京 河海大学出版社, 1992. 15 ~ 45

5 刘润生. 水力学. 南京 河海大学出版社, 1992. 273 ~ 284

6 朱本仁. 蒙特卡罗方法. 济南 山东大学出版社, 1987. 55 ~ 60

Flood Levee Risk Analysis for Yangtze River in Nanjing

Zhang Zhiqiang

(Nanjing Yangtze River Manag. Bureau, Nanjing 210011)

Wang Zhuofu Yang Gaosheng

(College of International Industry and Commerce, Hohai Univ., Nanjing 210098)

Abstract A mathematical model of flood levee risk is established after the analysis of the uncertainties in the structure. Then, with the help of MC method, the flood levee risk of the Yangtze River in Nanjing is calculated. The result of calculation shows that the risk rate for slip and seepage of the flood levee in Nanjing is 1.15% and 0.63% respectively.

Key words flood levee ; uncertainty ; risk rate