

# 蒙特卡罗法在堤防工程中的应用研究

吴兴征

丁留谦

张金接

(中国水利水电科学研究院防洪减灾研究所 北京 100038)



**摘要:** 采用蒙特卡罗 (Monte Carlo) 模拟方法对两种典型堤防结构形式在高洪水位下经常发生的漫顶、渗透变形、边坡滑动等失稳形式进行了可靠性分析。并通过变动堤防几何参数 (堤顶高程、顶宽和坡比) 和土工参数, 探讨了堤高与漫顶可靠性、堤防几何参数的变化对堤基渗透稳定的可靠性、坡率对边坡失稳可靠性的影响。计算结论将有助于完善现有堤防设计规范, 最终与穿堤建筑物、防渗墙等可靠性研究共同实现堤防工程系统设计方法向概率型转变。

**关键词:** 堤防, 可靠性, Monte Carlo, 风险

## 一 引言

由于受到堤身断面形状、堤身填土性质、堤基地质、水文、地形和施工条件等诸多因素的影响, 堤防在汛期往往出现漫顶、堤身 (基) 渗透破坏、堤身滑坡等险情。依据堤防的设计与使用要求, 在使用年限内应充分考虑影响这些险情的因素, 以满足渗透稳定和堤坡整体稳定的要求。按照现有的堤防设计规范, 设计方法是基于极限平衡分析的安全系数 (或分项安全系数) 法, 它无法给出工程可靠性的评价指标, 其原因主要在于没有考虑到设计量的不确定性。概率方法将结构的多种参数作为随机变量, 可根据不同堤防结构重要性程度采取相应设计, 无疑有其先进性和科学性。因此, 以概率理论为基础的可靠性设计和安全评估方法在国内外均得到较快的发展, 这为岩土工程的设计开辟了新的领域。美国和荷兰的堤坝和护岸工程的设计导则中提出了概率设计和风险分析方法<sup>[1, 2]</sup>。国内一些学者<sup>[3, 4, 5]</sup>曾对边坡等工程的可靠性设计方法进行了系统研究。一些学者曾对堤防的洪水风险进行了较多的研究<sup>[6, 7]</sup>, 有关结构风险方面的已有研究较少<sup>[8, 9]</sup>。

结合堤防的结构特征与材料组成特点, 综合考虑多种失稳因素, 提出简便实用的可靠性设计方法, 并深入研究防洪堤在行洪期间受长时间浸泡后土性参数发生变化而引起的堤坡滑动和渗透变形失稳风险等均具有较大的实际价值。

本文采用 Monte Carlo 法, 以二元结构堤基的斜墙式堤防和均质堤防为算例, 通过变动参数研究堤防漫顶、渗透稳定、岸坡稳定可靠性指标或失稳风险的影响, 进而发展堤防的可靠性设计和风险评估方法。以期为工程技术人员在汛前预测堤防险情、汛后工程加固设计提供较为科学的理论依据和全新的技术手段。

## 二 Monte Carlo 法的计算原理

工程结构可靠性常用的计算方法, 主要有一次二阶矩法、改进一次二阶矩法、JC 法、Monte Carlo 法等。其中: 一次二阶矩法和改进一次二阶矩法对变量的分布型式要求十分苛刻, 分布型式只有为正态分布时, 才能得到精确的结果, 否则只能得到偏差较大的结果; 而 JC 法和 Monte Carlo 法则通俗易懂, 又不受随机变量分布规律限制, 计算精度高, 广泛为国内外工程界所采用, 两者中 Monte Carlo 法解题思路更为清晰简单, 且能求解出非线性极限状态方程的失效概率和可靠指标。因此 Monte Carlo 法对于极限状态函数形式较为复杂的堤防可靠性分析较为适用。它又被称为随机模拟法或统计试验法, 基本原理<sup>[10]</sup>如下:

### (一) 随机抽样方法

先在 (0,1) 区间上产生均匀分布随机数。可采用的方法有乘同余法、混合同余法等, 其中混合同余法的递推公式为

$$\begin{aligned} x_i &= (Ix_{i-1} + C) \pmod{M} \\ r_i &= x_i / M \quad (i=1, 2, \dots, n) \end{aligned} \quad (1)$$

式中:  $I$ 、 $x_0$ 、 $C$  和  $M$  为选定的常数。式 (1) 表示  $Ix_{i-1} + C$  除以  $M$  的余数为  $x_i$ , 将其再除以  $M$  即得 (0,1) 上均匀分布的随机数  $r_i$ 。

将随机数序列  $\{r_i\}$  转换为  $(a, b)$  区间上的均匀分布随机数序列  $\{R_i\}$

$$R_i = a + (b - a)r_i \quad (2)$$

采用反函数法将均匀分布随机数  $\{r_i\}$  转换为符合某一指定概率分布的随机数。其前提是经验分布的反函数存在，否则采用随机变量函数法。

设  $X$  为具有分布函数  $F_X(x)$ ，且反函数  $F_X^{-1}(x)$  存在的连续随机变量， $r$  是均匀分布随机变量  $R$ （分布函数为  $F_R(r)$ ）的值。若给定累计概率  $F_X(x) = r$ ，则有

$$x = F_X^{-1}(r) \quad (3)$$

若已知  $\{r_i\}$ ，则可得符合  $F_X(x)$  的随机数序列：

$$x_i = F_X^{-1}(r_i) \quad (i=1,2,\dots,n) \quad (4)$$

**(二) Monte Carlo 模拟法的基本步骤**

- (1) 统计确定与可靠性分析有关的各基本变量（如材料参数、荷载等）的概型分布及其分布参数；
- (2) 对所有基本变量按统计特征进行第一次随机采样，将其代入极限状态方程式，获得第一次模拟结果；
- (3) 重复  $n$  次独立随机采样，进而估算失效概率。

**(三) Monte Carlo 模拟法的结果和精度**

在工程结构可靠性分析中，设极限状态方程式  $Z = g(X_1, X_2, \dots, X_n)$ ，其失效概率为

$$P_f = P(g(X_1, X_2, \dots, X_n) \leq 0) \quad (5)$$

式中： $X_i$  为基本随机变量（如材料性能，结构尺寸及外来荷载的作用），借助随机抽样对基本变量赋值时，计算结果只有  $g(\cdot) > 0$  和  $g(\cdot) \leq 0$  两种可能，故可定义指标函数：

$$I(g(X_1, X_2, \dots, X_n)) = \begin{cases} 1, & g(\cdot) \leq 0 \\ 0, & g(\cdot) > 0 \end{cases} \quad (6)$$

根据伯努利大数定理及正态分布随机变量的特性得到的失效概率  $P_f$  为：

$$\hat{P}_f = \frac{1}{N} \sum I(g(X_1, X_2, \dots, X_n) \leq 0) = \frac{M}{N} \quad (7)$$

式中： $M$  为次模拟计算中  $g(\cdot) \leq 0$  的总次数。

Monte Carlo 模拟法不仅可按式 (7) 计算失效概率，还可根据模拟计算结果拟合出功能函数的分布形式，据以估计其一、二阶矩  $\hat{m}_x$  和  $\hat{s}_x^2$ 。进而按下式近似计算可靠度指标  $b$

$$b = \frac{\hat{m}_x}{\hat{s}_x} \quad (8)$$

Monte Carlo 模拟法的误差一般可用  $\hat{m}_x$  表示。功能函数值  $Z$  越离散，误差将越大。当模拟次数充分大时，已经证明由模拟结果样本求得估计值的标准差与模拟次数的平方根成反比。因此，加大模拟次数可望提高模拟精度，特别是当计算得到的失效概率较小时。一般要求 Monte Carlo 法的样本数必须大于引起一次  $Z < 0$  所需的平均样本数的 100 倍，即  $N \geq 100/P_f$  次时，可满足精度要求。

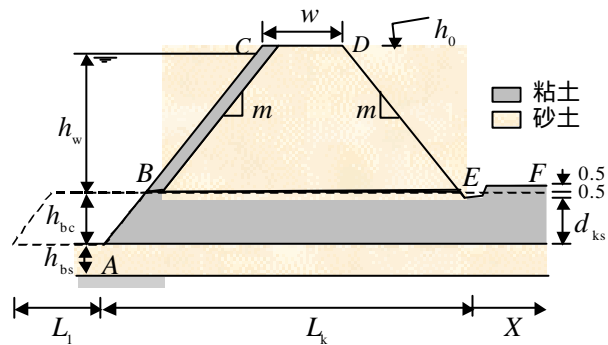


图 1 斜墙式堤防断面示意图

**三 二元结构堤基的斜墙式典型堤防的概率设计**

以某典型斜墙式堤防的概率设计为例，如图 1 所示。假定其堤基为由表层弱透水粘性土、下卧强透水砂层组成的二元结构。表 1 中给出计算中采用的土工的强度参数以及洪水位等参数的取值，表中均值一列给出典型堤防的几何参数取值。

表 1 堤防参数的取值

符号	名称和单位	单位	类型	均值	标准差
$h_0$	堤顶高程	m	设计变量	11.0	
$h_{bc}$	堤基粘土层厚度	m	设计变量	3.5	
$L_1$	平台宽度	m	设计变量	10.0	
$L_k$	有效渗径宽度	m	设计变量	68.75	
$m$	坡率		设计变量	2.5	
$w$	堤顶宽度	m	设计变量	5.0	
$t_{sb}$	透水压盖的厚度	m	设计变量	0	
$h_{bs}$	堤基砂土层厚度	m	常量	2.5	
$g_{nk}$	粘土的浮容重	KN/m <sup>2</sup>	常量	9.0	
$g_w$	水的容重	KN/m <sup>2</sup>	常量	10.0	
$g_{sb}$	压盖土体的容重	KN/m <sup>2</sup>	常量	18.0	
$d_{ks}$	渠底粘土层有效厚度	m	正态	3.5	0.7
$h_w$	洪水位	m	指数	8.34	0.9
$k_c$	粘土的渗透系数	M/s	正态	10 <sup>-8</sup>	2*10 <sup>-8</sup>
$k_s$	砂土的渗透系数	M/s	正态	10 <sup>-5</sup>	0.75*10 <sup>-5</sup>

(一) 漫顶

防洪水位是确定堤顶高程的决定性因素。设堤防发生漫顶的极限状态方程  $z_1$  为

$$z_1 = h_0 - h_w - h_s - e \tag{9}$$

式中： $h_s$ ——波浪爬高； $e$ ——风壅高度。

由于影响堤顶高程的因素很多，如堤基沉降。考虑到施工精度及竣工后固结沉降等因素，为保持设计高程，在设计时需预留沉降量。假定堤顶高程  $h_0$  服从正态分布，其方差取为 0.051m。

最高洪水位  $h_w$  假定服从指数分布，取  $m_{h_w} = 8.34m$ ， $s_{h_w} = 0.9$ 。波浪爬高  $h_s$  假定服从正态分布，并取其均值为 0.638m，方差为 0.4395。风壅高度为  $e = \frac{KV^2 F}{2gh_a} \cos a \approx \frac{KV^2 F}{2gh_a}$ 。

采用 Monte Carlo 法可求得与提高  $h_0$  的平均值  $m_{h_0}$  相应的可靠度指标  $b_1$  的值，如图 2 所示。由图可知， $m_{h_0}$  取 11.0m 时  $b_1$  为 2.363，查表可得  $P_f$  为 0.914%。

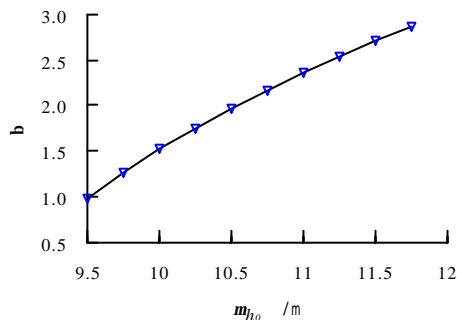


图 2 堤防的高度与可靠度  $b_1$  的关系

(二) 管涌

假定斜墙具有很好的防渗性能，土体的渗透破坏多表现为通过透水的砂土地基的集中渗流对土体的冲刷，在此统称为管涌破坏。

在汛期高水位长期作用下，粘性土层的薄弱处，有可能被承压水顶穿，形成集中出水口，发生管涌。由力学平衡条件，发生管涌的极限状态方程  $z_2$  为<sup>[11]</sup>

$$z_2 = g_{nk} d_{ks} - g_w h_{ap} + g_{sb} t_{sb} \tag{10}$$

式中： $h_{ap}$  为双层堤基表层弱透水层底板下界面处的剩余水头，可由下式简化计算

$$h_{ap} = \frac{h_w}{1 + A * L_k + thA * L_1} e^{-AY} \tag{11a}$$

$$A = \sqrt{\frac{k_c}{k_s h_{bc} h_{bs}}} \tag{11b}$$

式中： $A$  为越流系数。由于天然或人为因素，致使表层粘性土厚薄不均抗渗强度大小不等，在堤后背水侧往往有土坑形成的水塘、低洼地。因此，假定堤防水渠下粘土层的有效厚度  $d_{ks}$  为随机变量，服从正态分布，均值为 3.5m，标准差为 0.7。Y 为距离堤角 E 点的坐标，如图 1 所示。

由式 (11) 可见，可靠度指标主要与汛期水头、堤身填土性质和密度、堤基土层结构和性质、

外滩宽度、堤后透水压盖等参数有关。采用 Monte Carlo 法对这些参数进行敏感性分析。当变化某一参数时，其它参数均取表 1 中的给出的典型值。

### 1、粘土层厚度

图 3 给出粘土层厚度与渗透稳定的可靠度指标  $b_2$  的关系。由图可见，粘土层的厚度直接影响堤基的渗透稳定性。随着堤基粘土层厚度的增加， $b_2$  逐渐增加。

### 2、前滩地宽度

随着堤基前滩地宽度的增加， $b_2$  逐渐增加，如图 4 所示。原因在于地基渗径宽度的加长，使得表层土体的抗渗能力增强。但就本文算例而言，当前滩地的宽度增加至 20.0m 以上时， $b_2$  变化不大，这可能与采用的经验公式有关。实际工程设计时，当临水侧有宽且稳定的滩地时，尽可能的利用天然铺盖防渗，这是二元结构地基上进行渗流控制的一种有效方法。

### 3、堤防坡率

由图 5 可见，随着堤防上下游坡率的同时增加， $b_2$  逐渐增加。

### 4、堤顶宽度

由图 6 可见，随着堤防顶宽的增加， $b_2$  基本呈线性增加。由于坡率和堤顶宽度的增加延长了渗径，显然会增加堤防的渗透稳定性，但这会显著地增加堤防建设费用。引入经济分析的概念权衡堤防建设成本和预期洪灾损失之间的关系是值得深入研究的问题。

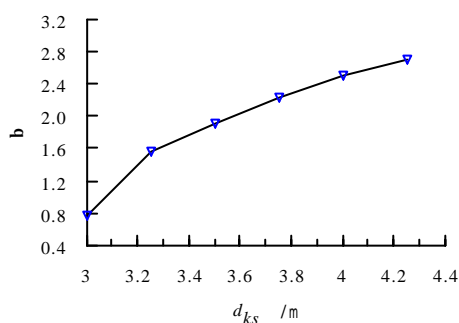


图 3 粘土层厚度

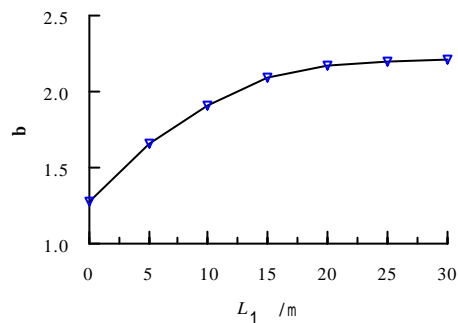


图 4 前滩地宽度

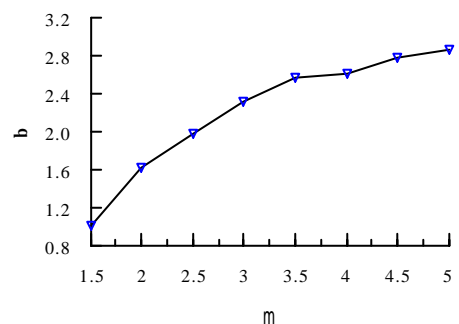


图 5 堤防坡率

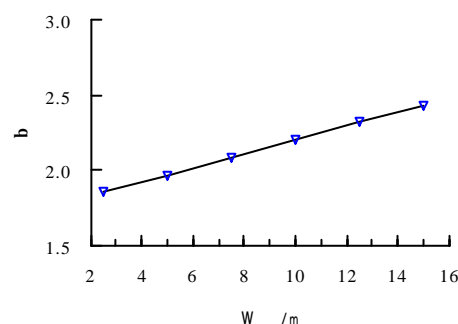


图 6 堤防的堤顶宽度

### 5、压盖厚度

当堤防背水侧有天然铺盖时，压渗盖重的厚度应使盖重末端的剩余水头小于允许值，并使各处的渗透坡降不致引起渗透变形和隆起。由图 7 可见，随着压盖厚度的增加， $b_2$  显著增加，因此采用压盖等措施是可行的。这样堤基粘土层厚度可以适当小些，并通过出口压重（压盖的厚度）控制。

### 6、压盖宽度

图 8 给出压盖宽度与  $b_2$  之间的关系。由图可见，随着压盖宽度的增大， $b_2$  大致呈线性增加。堤后压盖宽度的增加，实质上使天然覆盖层的有效渗径延长。压盖宽度应根据具体地形地质条件和堤防的重要程度选用。当表层土和透水层均较厚的堤基，可考虑垂直防渗等其它渗流控制措施。

上述的计算分析表明，就本文的算例而言，取表 1 中给出的典型值时可以达到渗透稳定性的要求。进行堤防的渗透稳定设计时，应充分考虑这些因素的影响，并结合工程实际选取合适的参数。比如，当堤基粘土层的厚度较小或现场不易得到粘性填土时，可以考虑采取增加堤宽、坡率等措施。

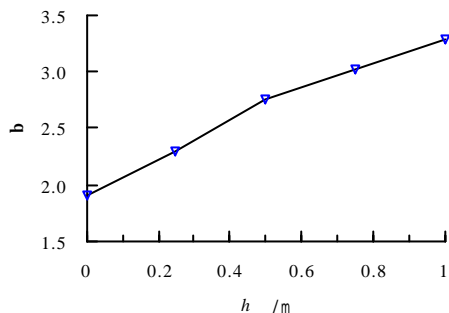


图 7 压盖厚度

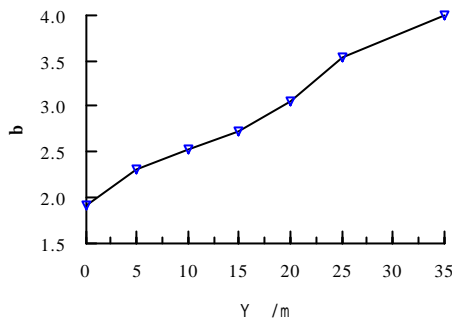


图 8 压盖宽度

### (三) 堤坡稳定

根据土力学极限平衡理论，按照简化 Bishop 方法计算堤坡抗滑稳定的最小安全系数，并确定最危险圆弧滑裂面（切入地基 0.6m），则堤坡稳定的极限状态方程可写为

$$Z_3 = F - 1 = M_r / M_o - 1 \quad (12)$$

式中： $M_r$ 、 $M_o$  分别为土体的抗滑力矩和滑动力矩。

土工参数的统计特征如表 2 所列（假定粘土斜墙与粘土地基的土工参数一致）。图 9 给出堤防坡率与堤坡稳定可靠度指标  $b_3$  之间的关系。由图可见，当坡率取为 2.5 时， $b_3$  为 2.756，相应的失效概率仅为 0.289%，能够满足设计要求。还可看出，相对于漫顶和管涌等失稳形式而言，由于外边坡粘土层的存在，堤防发生边坡失稳的概率较低。此外，图 9 还给出不同坡率下的安全系数值。假定采用的最小临界安全系数  $K_0$  为 1.5，可得相应的可靠度指标值为  $b_3 = 2.63$ 。

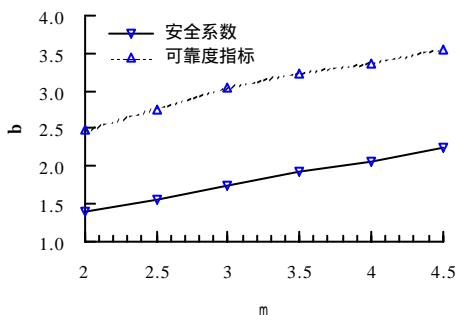


图 9 坡率对岸坡稳定性的影响

表 2 土工参数的统计特征

堤类	土类	符号	单位	分布	均值	标准差
斜墙	砂土	$f$	°	正态	35.0	3.5
	粘土	$c$	kPa	正态	10.0	2.0
		$f$	°	正态	20.0	4.0
均质		$f$	°	正态	12.54	2.8
		$c$	kPa	正态	21.58	3.5
		$g$	kN/m <sup>3</sup>	正态	18.84	3.1
		$J_c$		正态	0.55	0.093

### (四) 堤防概率设计方法

基于上述的计算分析，可将堤防概率设计的方法总结如下：

- (1) 根据堤防保护区可以接受的洪水风险的概率，通过对洪水及风浪资料的计算分析确定堤顶高程；
- (2) 由管涌特性确定堤防的粘土层厚度、堤防坡率、堤顶宽度、前滩地宽度、压盖宽度和厚度、填土的渗透特性等，在堤顶宽度的设计时应考虑防汛抢险时的交通需要；
- (4) 由堤坡稳定性确定填土的强度特性并验算堤坡的稳定性；
- (5) 根据实际需要设置护坡和坡面排水及防渗与排水设施。

## 四 均质堤防结构风险分析

### (一) 堤防失稳风险计算模型

在一定的洪水位下，假定均质堤防失稳形式主要为边坡滑动（包括地基）失稳和渗透变形失稳，且这两种失稳事件是相互独立的，因此，可以将堤防边坡失稳风险度  $R_s$  和渗透变形失稳风险度  $R_p$  分别讨论，然后计算堤防失稳风险度  $R$ 。即

$$R = R_s + R_p \quad (13)$$

由前述可知，计算堤防边坡失稳风险度的数学模型可表达为：

$$R_s = P(M_s > M_r) = \int_{M_r}^{\infty} f(M_s) dM_s \quad (14)$$

式中:  $f(M_s)$  是堤防滑动力矩的概率密度分布函数。

采用式 (14) 直接计算显然很困难。可采用离散化数值积分的方法求解, 即

$$R_s = \sum_{i=1}^N F_S(H_{is}) \cdot \Delta F_0(H_{is}) \quad (15)$$

式中:  $F_S(H_{is}) = \int_{M_r}^{\infty} f(M_s / H) dM_s$  是给定洪水位  $H_{is}$  时, 滑动力矩  $M_s$  大于抗滑力矩  $M_r$  的概率;  $\Delta F_0(H_{is})$  是洪水位频率曲线第  $i$  段区间概率;  $N$  是洪水位频率曲线计算段数。

根据土体渗流理论, 渗透变形失稳(管涌或流土)的原因是渗透坡降  $J$  超过了土体的临界坡降  $J_c$ , 即  $J > J_c$ 。因此, 计算堤防渗透变形失稳风险度的数学模型可表达为:

$$R_p = P(J > J_c) = \int_{J_c}^{\infty} f(J) dJ \quad (16)$$

式中:  $f(J)$  是堤防渗透坡降的概率密度分布函数。由式 (16) 计算也有较大的困难, 因为  $f(J)$  不仅同土质、堤防的结构有关, 与洪水位也有直接的关系, 采用与求  $R_s$  同样的处理办法, 可得计算  $R_p$  离散化的公式:

$$R_p = \sum_{i=1}^N F_J(H_{is}) \cdot \Delta F_0(H_{is}) \quad (17)$$

式中:  $F_J(H_{is}) = \int_{J_c}^{\infty} f(J / H) dJ$  为给定  $H_{is}$  时, 渗透坡降  $J$  大于临界坡降  $J_c$  的概率;  $\Delta F_0(H_{is})$  和  $N$  的意义同前。

## (二) 失效概率 $F_S(H_{is})$ 和 $F_J(H_{is})$ 的计算

式 (15) 中的  $F_S(H_{is})$  一般的积分式难以得到解析解。因为  $\int_{M_r}^{\infty} f(M_s / H) dM_s$  中的  $f(M_s / H)$  是一极其复杂的函数, 同样可用 Monte Carlo 方法求解。

根据规范<sup>[11]</sup>建议的方法计算出不同水位下背水侧堤坡的出逸点高度, 然后估算渗径, 进而计算各种不同水位下的渗透坡降。为简化分析, 假定均质堤体的临界坡降服从正态分布, 采用 Monte Carlo 方法, 计算在某水位下渗透坡降  $J$  大于临界坡降  $J_c$  的概率。

## (三) 土工参数统计量的敏感性分析

假定均质堤防的上下游坡率  $m_1$ 、 $m_2$  均为 3, 顶宽  $w$  为 7m, 高度  $h_0$  为 10m, 上下游水位分别记为  $H_{uw}$ 、 $H_{dw}$ 。在可靠度分析中, 考虑的一些土工参数的统计特征如表 2 所列。应指出, 可靠性指标  $b$  (这里包括边坡失稳的可靠性指标  $b_s$  和渗透变形失稳的可靠性指标  $b_p$  两部分) 是风险度的直接反映, 以下主要讨论土工参数统计量的变化对可靠性指标  $b$  的影响。当变化其中某一参数时, 其它参数均取表 2 中的数值。

### 1、 $c$ 、 $f$ 的均值和变异系数对 $b_s$ 的影响

图 10、图 11 分别为一组  $m_c \sim b_s$  和  $m_f \sim b_s$  关系曲线。可靠性指标  $b_s$  受  $c$ 、 $f$  均值影响的程度不一样, 其中  $m_c$  较敏感。图 12、图 13 分别为一组  $d_c \sim b_s$  和  $d_f \sim b_s$  关系曲线。 $b_s$  受  $c$ 、 $f$  变异系数影响的程度也不一样, 其中  $d_c$  较敏感, 而  $d_f$  的变化对  $b_s$  的影响不大。

计算表明, 土体容重  $g$  的均值和标准差的变化对结构风险的影响不大, 可将其作为确定性参数。

### 2、临界渗透坡降 $J_c$ 的均值和标准差对 $b_p$ 的影响

图 14、图 15 分别为一组  $m_j \sim b_p$  和  $d_j \sim b_p$  关系曲线。可见, 临界坡降  $J_c$  的统计参数显著地影响可靠性指标  $b_p$ 。土的临界渗透坡降与土的颗粒组成和结构、不均匀系数、容重和施工等因素有关。因此, 在堤防的建设中, 合理地选择土质类型并控制施工质量是极其重要的。



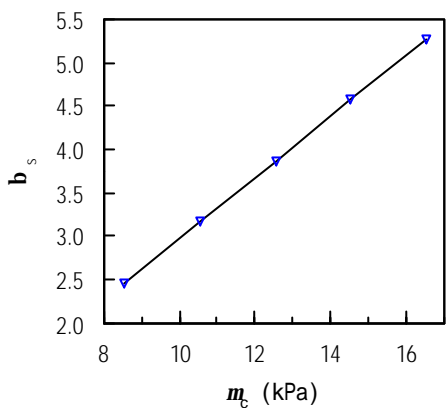


图 10  $m_c \sim b_s$  关系

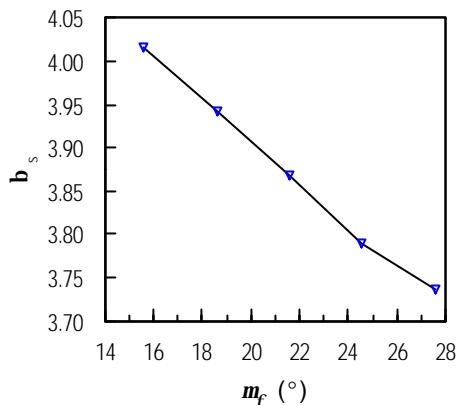


图 11  $m_f \sim b_s$  关系

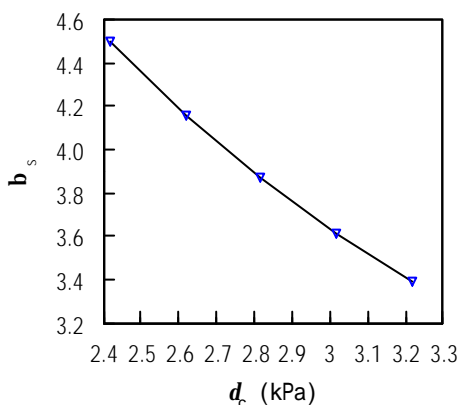


图 12  $d_c \sim b_s$  关系

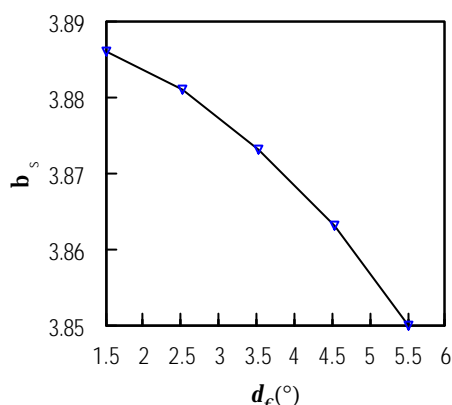


图 13  $d_f \sim b_s$  关系

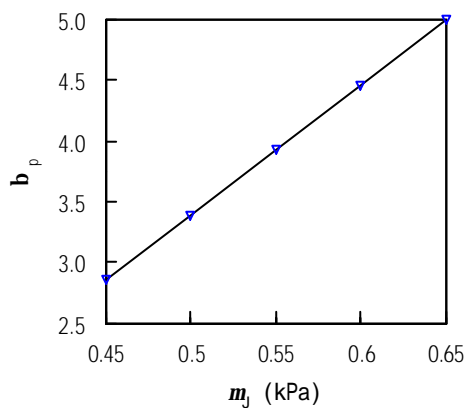


图 14  $m_j \sim b_p$  关系

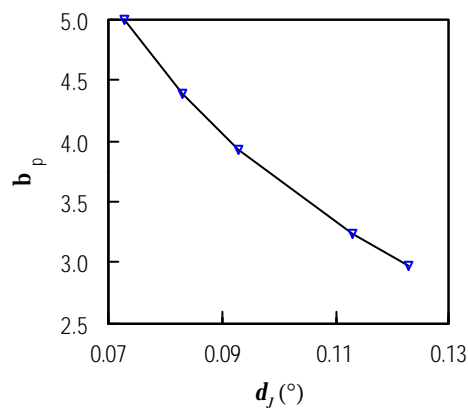


图 15  $d_j \sim b_p$  关系

#### (四) 堤防的几何形状对结构风险的影响

在某一洪水位（以堤防高度以下 0.5m 定义）下，对不同边坡坡率、顶宽和高度的堤防结构失稳风险进行比较分析。以下变动某一几何参数分析时，其它参数取为典型断面的值。计算表明，堤防下游坡发生边坡失稳的风险明显大于上游坡，约大 40%，故以下仅给出堤防下游坡的风险度。

##### 1、上游坡率

图 16 给出上游坡率  $m_1$  分别为 1.5、2.5、3、3.5 和 4.5 时堤防发生边坡失稳和渗透变形失稳的风险度。边坡上游坡率的变化对下游坡的稳定性略有影响，但变化趋势不明显。而坡率的增加，延长了渗透路径，使堤防发生管涌的风险性明显降低。

##### 2、下游坡率

图 17 给出下游坡率  $m_2$  变化时堤防发生失稳的风险度。由图可以看出，随着堤防下游坡率的增加，堤防发生边坡失稳的风险和渗透变形失稳的风险均显著降低，实际工程中通过适当放缓堤坡或设置戕台，以增强堤身（基）抵抗渗流破坏的能力，这在理论上是合理的，但这会增加工程造价。

### 3、堤防顶宽

图 18 给出顶宽  $w$  分别为 4m、6m、7m、8m 和 10m 时堤防发生失稳的风险。可以看出，边坡发生失稳的风险随着  $w$  的变化不甚明显，而发生管涌的风险性明显降低，显然与渗径的增加相关。

### 4、堤防高度

图 19 给出不同堤防高度  $h_0$  下堤防发生失稳的风险。由图可见，随着堤防高度的增加，发生边坡失稳和渗透变形失稳的风险均增加。边坡失稳风险增加的原因有两点：其一是对于所考虑的顶高和坡角而言，随着堤高的增加，所考虑洪水水位相应升高，使得堤身浸润线较高，进而影响滑动面的位置；其二是当顶高增加时，滑动力矩的增加显著快于抗滑力矩的增加。不同高度下渗透变形失稳风险增加的原因在于，下游坡出逸点高度的增加量相对上游水位的增加量较小，计算得到的渗透坡降增加。

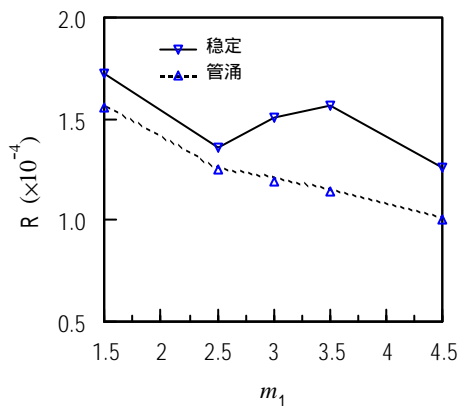


图 16 上游坡率对 R 的影响

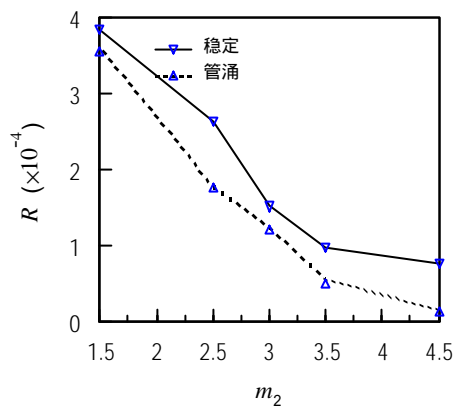


图 17 下游坡率对 R 的影响

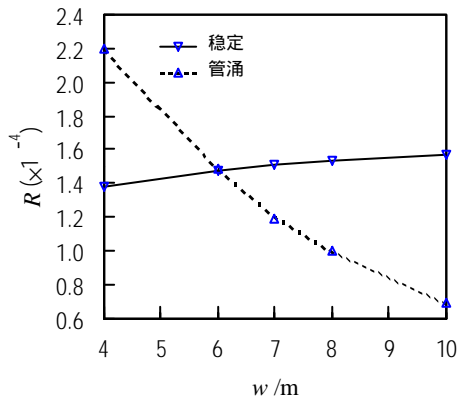


图 18 顶宽对 R 的影响

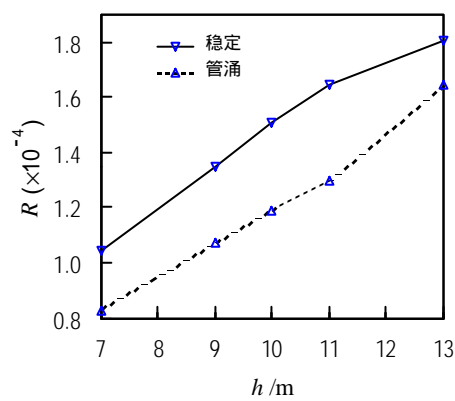


图 19 高度对 R 的影响

以上是给定某一洪水水位并形成稳定渗流情况下，对临水侧和背水侧堤坡进行稳定分析和对堤身进行渗透变形风险分析的结果。事实上，这一特定的洪水水位是有一定发生频率的，如图 20 所示。堤防通常在不同的洪水水位下工作，考虑洪水位的随机变化规律，由式 (13) 可以得到洪水水位由 8.0m 至堤防高程 10.0m 时的典型堤防断面的风险为 0.328%。进而可据容许风险评判该堤防的安全等级。

基于上述计算原理，采用 Visual Basic 和数据库技术开发了堤防安全评估软件系统，可在电子地图上进行全堤段计算结果的平面展示，并已成功用于某城市堤防的防洪现代化管理中，如图 21 所示。



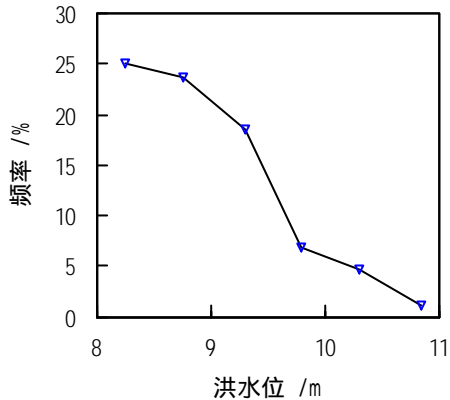


图 20 洪水位频率曲线

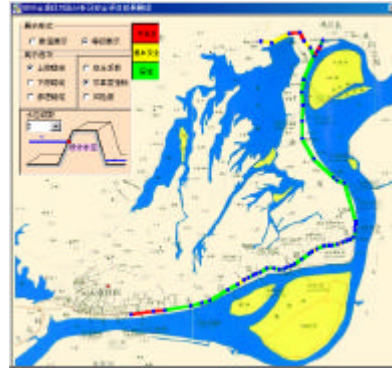


图 21 某城市堤防的全堤段风险评估系统

## 五 结语

斜墙式堤防的计算表明，几何设计参数和土体渗透系数对堤防可靠度的敏感性分析表明：随着堤高的增加，堤防漫顶的可靠性指标逐渐增大；堤防坡率、堤顶宽度、堤基粘土层厚度、前滩地宽度、堤后压盖厚度和宽度等变量的增大，堤基渗透稳定的可靠性指标增大；堤基粘土层和砂土层渗透系数的增加，堤基渗透稳定可靠性指标减小；堤防上下游坡率的增加，堤坡稳定可靠性指标增加。实际堤防工程的概率设计时应充分考虑这些因素的影响。

均质堤防的计算表明，抗剪强度指标 $c$ 、 $f$ 的统计参数和分布类型对边坡失稳的可靠性指标 $b_s$ 具有一定的影响，土体渗透坡降的统计参数对渗透变形失稳的可靠性指标 $b_p$ 具有显著的影响。堤防几何形状的变化对 $b_s$ 和 $b_p$ 均具有一定的影响。

如何结合堤防的几何组成特点，综合考虑堤防建设费用和破坏损失费用最小的原则，确定堤防的目标可靠度，并对堤防进行优化设计是值得深入研究的问题。采用非确定数学的方法对堤防工程进行综合评价，这将有助于传统经验型的堤防安全评价和管理方法向预测型的风险管理体系转变，开发的安全评估系统可望在其它防洪工程管理部门推广。

### 参考文献

1. USACE. Risk-based analysis for evaluation of hydrology/hydraulics, geotechnical stability, and economics in flood damage reduction studies[R]. ER 1105-2-101, Washington, D.C, U.S. Army corps of Engineers.1996.
2. Pilarczyk K W. Dikes and revetments-design maintenance and safety assessment[M]. Delft: Hydraulic Engineering Division, 1998.
3. 王选仓, 王燕平. 王秉纲公路路堤结构可靠性设计方法研究[J]. 中国公路学报, 1997, 10(3): 6-12.
4. 倪万科. 黄土高土坡可靠性分析及优化设计研究[D]. 西安工程学院工学博士论文, 1999.
5. 夏伟, 冯光乐, 王雪刚. 蒙特卡洛法在边坡锚杆优化设计中的应用[J]. 公路, 2001, (6): 73-76.
6. 梁在潮, 李泰来. 江河堤防防洪能力的风险分析[J]. 长江科学院院报 2001 18(2): 7-10.
7. 李国芳, 黄振平, 章志强, 叶松. 长江防洪堤南京段设计洪水位风险分析[J]. 河海大学学报, 1999, 27(2): 23-27
8. 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, 1999, 27(2): 17-21.
9. 刘玉恒, 麻荣永, 吴彰敦. 土坝滑坡风险计算方法研究[J]. 红水河, 2001, 20(1): 29-33.
10. 黄克中, 毛善培. 随机方法与模糊数学应用[M]. 同济大学出版社, 1987.
11. 中华人民共和国水利部国际合作与科技司编. 堤防工程技术标准汇编[M]. 中国水利水电出版社, 2000.

## Application of Monte Carlo method on Probabilistic Design and Risk Analysis of Levee

WU Xingzheng

DING Liuqian

ZHANG Jinjie

(China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing, 100038, China)

第一作者简介：吴兴征 1972 年 2 月出生，男，汉族，山东梁山，中国水利水电科学研究院防洪减灾研究所，工学博士，目前主要研究方向为：堤坝的工程风险分析模型及概率设计方法、土的静动力非线性本构模型、土地震响应非线性分析等。