

黄河标准化堤防渗流稳定可靠性分析

赵寿刚^{1, 2}, 常向前¹, 潘 恕¹

(1. 黄河水利科学研究院, 河南 郑州 450003; 2. 华北水利水电学院, 河南 郑州 450011)

摘 要: 针对黄河下游堤防特点, 将可靠性理论应用于堤防渗流稳定分析, 基于蒙特卡洛方法研制了渗流有限单元法分析程序。通过大量的试验研究, 对黄河下游堤防各种土质的土性参数进行了统计分析, 得出了各类土体渗透系数的分布规律, 提出了黄河堤防渗透破坏标准的建议, 根据土体单元渗透破坏概率分析了渗透破坏区域的确定方法。利用该研究成果, 具体计算分析了黄河下游 5 个典型部位不同淤背宽度时堤防渗流稳定破坏概率, 对堤防渗流稳定性和淤背体合理宽度进行了深入探讨, 对黄河下游堤防的标准化建设具有重要指导意义。

关键词: 标准化堤防; 渗流; 可靠性; 蒙特卡洛方法; 有限单元法; 破坏概率

中图分类号: TV871

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2007)05-0684-06

作者简介: 赵寿刚(1971-), 男, 高级工程师, 硕士研究生, 主要从事堤防安全及灾害防治方面的研究。E-mail: zsg6537@163.com。

Reliability analysis of seepage stability on standard dyke of Yellow River

ZHAO Shou-gang^{1,2}, CHANG Xiang-qian¹, PAN Shu¹

(1. Yellow River Institute of Hydraulic Research, Zhengzhou 450003, China; 2. North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, Zhengzhou 450011, China)

Abstract: According to the characteristics of the Yellow River dyke, reliability theory was applied to the analysis of seepage stability on dyke, and a finite element program based on Monte-Carlo method was developed. By the laboratory tests on all sorts of soils along the dykes of Yellow River, the statistical analysis on some parameters of soils was studied, and the distribution of the permeability coefficients of soils was deduced. Criterion of seepage failure for Yellow River dykes was proposed. The judgement methods of the seepage failure area were studied on the basis of the seepage failure probability of the soil cells. There were five typical sections of the dykes with analysis of seepage failure probabilities the conditions of different silting widths, and the proper silting width and the seepage stability of dyke were discussed. Some preparatory proposals were advanced on the standardization construction of dykes of the lower Yellow River.

Key words: standard dyke; seepage; reliability; Monte-Carlo method; finite element method; probability of failure

0 前 言

由于黄河堤防工程地质条件复杂, 大堤堤身经多次加高增厚, 土质均一性差, 即使同一种土, 其物理力学指标也相差很大。针对某一断面进行渗流安全评价时, 仅凭少量地质勘探资料和土壤渗透性指标作渗流分析, 很难符合实际情况。在很多情况下, 甚至分析不出问题。因此有些文献采取了加大安全系数的做法。为解决渗流稳定分析中的这些问题, 有两种方法可供选择。①利用渗流原型观测资料对土壤渗透性参数进行有限元法反演拟合。南京水利科学研究院对安庆市长江大堤渗流控制研究采用了这一方法, 取得土壤的渗透性参数后再进行设计水位下的渗流分析, 所得成果与实际情况吻合较好。此方法很有参考价值,

但该方法需要有较系统的原型观测资料。由于黄河大堤常年甚至多年不靠水, 不少河段缺乏系统的观测资料。而且有些河段一旦洪水来临, 观测管往往已淤堵, 仍然无法取得观测资料。因此目前黄河大堤的渗流稳定分析不易采用此方法。②利用可靠性理论对大堤渗流安全性进行分析。可靠性理论的基本点是将影响工程安全的因素视为随机变量, 建立功能函数, 求解失效概率或可靠度, 以此来评价工程的安全性。不言而喻, 利用这一理论首先要积累大量的试验资料, 并据此研究影响工程安全的各种因素的概率分布规律, 其次需

基金项目: 科技部科研院所社会公益研究专项基金项目 (2005DIB3J054)

收稿日期: 2006-07-24

要进行大量的计算。目前黄河大堤经多次勘探已积累了数量可观的有关资料数据, 大容量高速度计算机也已普遍使用。因此, 利用可靠性理论研究渗流问题的条件已经具备。

1 渗流稳定分析可靠性原理与实施方法

1.1 渗流控制设计适用原则和随机变量的确定

按照水工结构极限状态设计原则, 水工结构应按承载能力极限状态和正常使用极限状态进行设计。相关标准规定, 当土石结构或地基产生渗透失稳时为超过了承载能力极限状态情形之一。因此, 对黄河大堤渗流稳定性分析时对应于承载能力极限状态, 并应符合有关标准的要求。当利用可靠性理论研究渗流稳定性时, 原则上是将荷载效应(或称作用效应)以及材料特性及结构的几何尺寸等视为随机变量。鉴于黄河大堤的复杂性和不确定性主要在于堤身和堤基土壤材料特性, 为使问题不过于复杂, 同时又抓住问题的本质, 仅将土壤渗透系数和密度视为随机变量, 而将大堤上下游水位及其断面尺寸视为确定值, 来研究黄河大堤渗流稳定性。

1.2 渗流稳定性功能函数与渗透破坏概率

当采用有限单元法分析渗流稳定性时, 研究的对象是可能破坏区域内的每个土体单元。由于黄河大堤土壤基本上属于非管涌土, 因此按下式判断背河堤脚以外区域单元土体的渗透稳定性:

$$Z = R - S, \quad (1)$$

式中, R 为作用于被研究单元底面上的有效土重, S 为作用于被研究单元底面上的渗透压力。

由于土壤密度的随机性, 因此 R 是一随机变量; 同样当大堤上下游水位和断面尺寸被确定后, S 仅由大堤堤身和堤基的渗透性所确定, 当土壤渗透性参数为随机变量时, S 也为一随机变量, 虽然 S 与土壤渗透性参数的函数关系不能用显式写出。

实际上, 式(1)即为研究大堤渗流稳定性的功能函数。当 $Z = R - S > 0$ 时, 土体单元处于渗流稳定状态; 当 $Z = R - S = 0$ 时, 土体单元处于渗流极限状态, 此式即土体渗流极限状态方程; 当 $Z = R - S < 0$ 时, 土体单元处于渗流失效状态, 由于土壤渗透失稳时称为渗透破坏, 故本文称为渗透破坏状态。

如果能求出 R, S 的概率分布函数(概率密度函数), 则土壤渗透破坏概率可由下式求出:

$$P_f = 1 - P_r = 1 - \int_{-\infty}^{\infty} f_s(s) \left[\int_s^{\infty} f_r(r) dr \right] ds, \quad (2)$$

式中, $f_s(s)$ 为 S 的概率分布函数, $f_r(r)$ 为 R 的概率分布函数, P_r 为土壤渗透稳定可靠度。

可见, $P_f + P_r = 1$ 。

1.3 破坏概率与安全系数的关系

当 R, S 为两个随机变量, 其均值分别用 m_R, m_S 表示, 标准差分别用 σ_R, σ_S 表示。则功能函数 Z 的均值与标准差分别为

$$m_Z = m_R - m_S, \quad (3)$$

$$\sigma_Z = \sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}. \quad (4)$$

当 R, S 均为正态分布随机变量时, 功能函数 Z 亦为正态分布随机变量, $Z < 0$ 的概率, 即破坏概率为

$$P_f = P(Z < 0) = \int_{-\infty}^0 \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_Z} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z - m_z}{\sigma_z}\right)^2\right] dz. \quad (5)$$

式(5)可变为

$$P_f = \int_{-\infty}^{m_z/\sigma_z} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-t^2/2} dt \quad (\text{其中 } t = \frac{z - m_z}{\sigma_z}). \quad (6)$$

由上式可见, t 是标准随机变量, P_f 仅为积分上限的函数。因此可记

$$P_f = \Phi\left(-\frac{m_z}{\sigma_z}\right). \quad (7)$$

引入可靠指标

$$\beta = \frac{m_z}{\sigma_z}, \quad (8)$$

则

$$P_f = \Phi(-\beta), \quad (9)$$

可以导出可靠指标与可靠度 P_r 的关系

$$P_r = 1 - P_f = 1 - \Phi(-\beta) = \Phi(\beta). \quad (10)$$

由式(8)代入式(3), (4)得

$$\beta = \frac{m_z}{\sigma_z} = \frac{m_R - m_S}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}}. \quad (11)$$

以下讨论可靠指标与安全系数的关系, 由安全系数的定义

$$K = \frac{m_R}{m_S}, \quad (12)$$

对式(11)进行变换:

$$\beta = \frac{m_R - m_S}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}} = \frac{\frac{m_R}{m_S} - 1}{\sqrt{\left(\frac{\sigma_R}{m_S}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_S}{m_S}\right)^2}}. \quad (13)$$

由于

$$\frac{\sigma_S}{m_S} = V_S, \quad (14)$$

$$\frac{\sigma_R}{m_R} = \frac{\sigma_R}{m_R} \cdot \frac{m_R}{m_S} = V_R \cdot K, \quad (15)$$

式中, V_R, V_S 为随机变量 R, S 的变异系数。因此(11)式变为

$$\beta = \frac{K-1}{\sqrt{K^2 V_R^2 + V_S^2}} \quad (16)$$

由式(16)可见,可靠指标不仅与安全系数有关,而且与随机变量的变异系数有关,也即安全系数确定后,工程结构的可靠度或破坏概率与随机变量的分布规律有关,并不是一个常量。因此,从统计学观点看,传统的安全系数存在两个问题:一是没有考虑影响工程结构安全因素的随机性质,而靠经验或工程判断方法取值,带有主观因素;二是安全系数只与 R 和 S 的均值有关,这种表达方式不能反映工程结构实际破坏情况。

应当指出,上述结论是在 R, S 为正态分布随机变量条件下得到的,如果 R 或 S 为非正态分布随机变量,则结论仍会有一定的近似。对于渗透稳定分析,单元渗透压力取决于各土层的渗透系数,它是渗透系数的复杂函数,而渗透系数为对数正态分布。所以作为这些随机变量函数的总渗透压力不一定是正态分布。因此在以下的研究中直接用破坏概率来表达黄河大堤渗流稳定性。

1.4 渗流有限元计算的蒙特卡洛法

进行黄河大堤渗流稳定可靠性分析有多种方法,如一次二阶矩法、JC 法等等^[1]。但这些计算方法的共同缺点是它们是一种近似计算方法,而且假定影响可靠度的随机变量为正态分布,同时存在可能陷入所谓局部最小和变量截尾等问题。为此采用蒙特卡洛法,该法目前被认为是相对精确的方法,其优点是回避了结构可靠度分析中的数学难题,不需考虑功能函数的非线性和极限状态曲面的复杂性,只要模拟的次数足够多就能得到比较精确的破坏概率和可靠指标。

由概率定义知,某事件的概率可用大量试验中该事件发生的频率来计算。因此,可以先对影响渗流稳定可靠性的随机变量进行大量随机取样,然后用这些抽样值一组一组进行渗流有限元计算,得出被研究单元总渗透压力 S ,再与该单元底部有效土重 R 比较,确定是否发生渗透破坏,从而计算出渗透破坏频率,即得到该土体单元的破坏概率。

设抽样数为 N ,每组抽样值的功能函数值为 Z_i ,若 $Z_i \leq 0$ 的次数为 L ,则渗透破坏概率为

$$P_f = L/N \quad (17)$$

因此,在蒙特卡洛法中的破坏概率等于破坏频率。为使上式达到一定的精度, N 就必须取得足够大,根据文献[2]

$$N \geq 100/P_f \quad (18)$$

文献中取 $P_f = 10^{-3}$,因此, $N = 10^5$,即每完成一个断面的渗流稳定可靠性分析须进行 10 万次渗流计算。

用蒙特卡洛法计算可靠度问题的关键是求已知分布随机变量的随机数。一般须分两步进行。首先在开区间 $(0, 1)$ 上产生均匀分布随机数,然后在此基础上变换为给定分布变量的随机数。作如下变换即得到正态分布的随机数。

设随机数 u_n 和 u_{n+1} 是 $(0, 1)$ 上两个均匀随机数,则

$$\left. \begin{aligned} x_n^* &= (-2 \ln u_n)^{1/2} \cos(2\pi u_{n+1}), \\ x_{n+1}^* &= (-2 \ln u_n)^{1/2} \sin(2\pi u_{n+1}), \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

x_n^* 和 x_{n+1}^* 是两个标准正态分布 $N(0, 1)$ 上的两个随机数。

如果随机变量 x 是一般正态分布 $N(m_x, \sigma_x)$, 则

$$\left. \begin{aligned} x_n &= x_n^* \sigma_x + m_x, \\ x_{n+1} &= x_{n+1}^* \sigma_x + m_x, \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

x_n, x_{n+1} 是两个符合 $N(m_x, \sigma_x)$ 分布的随机数。

对于对数正态分布的随机变量,则利用随机变量取自然对数后的均值和标准差,再利用式(19), (20)求得对数值。然后取反对数,即得对数正态分布随机数。

为实现蒙特卡洛法渗流有限元计算,利用原有渗流计算程序研制了该法计算程序。

1.5 可靠度设计统一标准与渗透破坏区域确定

可靠指标 β 是在功能函数 Z 为正态分布的条件下得到的。否则按所规定公式算得的 β 值是近似的。鉴于此,不采用此表达结构可靠度的方法,而直接采用破坏概率(或曰失效概率)表达结构可靠度。由于破坏概率与可靠度成互补关系即两者之和为 1,因此计算出破坏概率即可求出可靠度。这与可靠指标表达方式并无本质区别。在结构功能函数 Z 为正态分布条件下,可靠指标 β 与破坏概率的对应关系如表 1^[2]。

参照《水利水电工程结构可靠度设计统一标准(GB50199—94)》、《堤防工程设计标准(GB50286—98)》和以往对黄河大堤、东平湖围坝的研究成果,南京水利科学研究院对安庆市城市防洪堤渗流控制研究成果^[3]以及黄河大堤渗流险情的实际情况,认为堤防各部位的重要性是不同的,提出渗透稳定判别标准:①大堤原断面堤背坡应不出渗;②距背河堤脚 100 m 以内土层渗透破坏概率应小于 0.001;③距背河堤脚 100~150 m 范围内土层渗透破坏概率应小于 0.01;④距背河堤脚 150~200 m 范围内土层渗透破坏概率应小于 0.05;⑤距背河堤脚 200 m 以外范围内土层渗透破坏概率应小于 0.1;⑥淤背体渗流出逸点高度(即出逸点与淤背体坡脚高程之差)小于 1.0 m。

当满足上述条件时即认为渗透稳定,否则判为渗

透失稳, 应采取加固措施, 如加大淤背宽度等直至满足上述条件为止。

2 计算采用的参数与条件

2.1 土性参数的概率分布

为实现渗流稳定可靠性计算, 首先要确定大堤各类土壤渗透系数的概率分布规律。为此对试验资料进行了数理统计和研究。研究的结论是土壤渗透系数符合对数正态分布(图 1)。渗透系数参数如表 2。

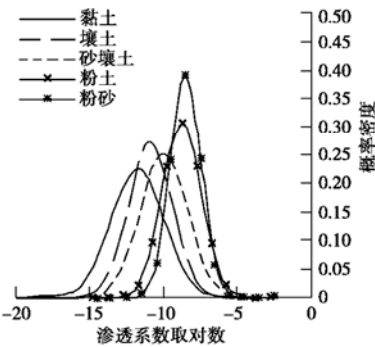


图 1 渗透系数分布规律图
Fig. 1 Distribution of coefficient of permeability

2.2 计算断面与计算工况

通过对黄河下游堤防险情的调研, 选择了具有代表性的堤段利用渗流稳定可靠性有限元进行计算, 选取的计算断面及其物理参数如表 3。

各断面均先计算未淤背时的原始情况, 然后按淤背宽度 50, 80, 100 m 的情况再进行计算。

3 计算成果与淤背效果分析

3.1 渗透破坏区域分析

渗透破坏区域是在各土体单元渗透破坏概率计算成果的基础上, 绘制出同层单元渗透破坏概率沿水平方向的分布曲线, 然后依据前述渗流稳定分析可靠性原理与实施方法中提出的判别标准确定的。渗透破坏区域分析图(略), 由此得出各断面破坏区域(见表 4)。并据此绘制出渗透破坏区域图(略)。

3.2 淤背效果分析

从典型断面渗透破坏区域分析表(表 4)可以看出, 未淤背情况下各断面堤背地基均存在渗透破坏区。淤背后地基渗透破坏区域随淤背体宽度的增加水平向范围有所减小, 深度上由多层破坏变为表层破坏。

表 1 可靠指标β和破坏概率 P_f 的关系

Table 1 Relationship between reliability index and probability of failure								
破坏概率 P _f	0.5	0.25	0.10	0.05	0.01	0.001	0.0001	0.00001
可靠指标β	0	0.67	1.28	1.65	2.33	3.10	3.72	4.25

表 2 土壤渗透系数统计表

Table 2 Coefficient of permeability					
土类	组数/组	均值/(10 ⁻⁵ cm·s ⁻¹)	标准差/(10 ⁻⁵ cm·s ⁻¹)	对数均值	对数标准差
黏土	116	3.8	17.6	-11.7	1.76
壤土	151	5.0	13.5	-11.1	1.59
砂壤土	105	15.7	54.3	-10.0	1.60
粉土	52	38.0	81.8	-8.7	1.31
粉砂	68	34.0	46.2	-8.5	1.02
极细砂	51	152.5	245.3	-7.1	1.13
砂土	53	230.6	108.0	-6.9	1.04
淤背土	74	241.0	157.0	-6.3	0.81

表 3 选取的计算断面物理参数汇总表

Table 3 Parameters for some selected section						
断面名称及桩号	上游计算水位/m	下游地面高程/m	堤顶高程/m	堤顶宽度/m	堤坡坡度	
					临河	背河
武陟张菜园(87+000)	97.27	87.80	101.28	13.20	1 : 3	1 : 3
齐河董家寺(87+000)	40.00	31.70	42.19	10.00	1 : 3	1 : 3
济南洛口(30+150)	34.58	25.30	36.68	12.78	1 : 3	1 : 3
中牟九堡(48+500)	88.90	82.60	93.50	11.00	1 : 2	1 : 1.5
兰考南北庄(134+200)	74.74	70.10	79.40	10.00	1 : 3	1 : 3

表 4 典型断面渗透破坏区域分析表

Table 4 Seepage failure area in representative section

断面名称 及桩号	破坏土层		破坏区水平范围/m			
	土层名称	层底高程/m	与原始断面背河 坡脚的距离	与淤背体坡脚的距离		
			未淤背	淤背宽 50 m	淤背宽 80 m	淤背宽 100 m
武陟 张菜园 87+000	第一层壤土	87.04	150	100	70	50
	第二层砂壤土	85.64	0	0	0	0
	第三层壤土	84.27~85.32	150	0	0	0
	简要评价结论	破坏区水平长度	150	100	70	50
		破坏区高程	84.27~85.32	84.27~85.32		87.04
齐 河 董家寺 79+850	第二层壤土	28.11	150	110	100	100
	第三层砂细砂	25.17	100	0	0	0
	第四层细砂	22.24	0	0	0	0
	简要评价结论	破坏区水平长度	200	110	100	100
		破坏区高程	25.17	25.17	25.17	28.11
济 南 洛口 30+150	第一层壤土	21.83~23.20	100	50	20	0
	第二层黏土	18.45~21.34	100	50	20	0
	第三层壤土	15.45~19.65	42	0	0	0
	简要评价结论	破坏区水平长度	100	50	20	0
		破坏区高程	15.45~19.65	18.45~21.34		
中 牟 九堡 48+500	第一层砂壤土/中砂	79.90~79.98	90	42	22	0
	第二层中砂	74.00~75.12	50	0	0	0
	简要评价结论	破坏区水平长度	90	42	22	0
		破坏区高程	74.00~79.98	79.90~79.98		
兰 考 南北庄 134+200	第一层黏土	68.42~68.60	150	100	80	75
	第二层壤土	65.90~66.50	100	50	20	0
	第三层砂壤土	65.00~66.00	0	0	0	0
	简要评价结论	破坏区水平长度	150	100	80	75
		破坏区高程	65.90~68.60	65.90~68.60		68.42

总体上渗透破坏范围是在减小的。从渗流研究角度应指出渗透破坏范围的减小，主要是由于允许破坏概率随着与原堤坡脚的距离增大而增大了；其次是由于渗径延长而渗透出逸点有所降低。实际上因淤背体的存在，使浸润线总体上有所抬高，导致在淤背体后地基表层局部范围渗透破坏概率有所增大。因此出现渗透破坏概率范围在深度上减小，但在水平方向上未见显著减小之现象。

不符合上述规律的情况是存在的，主要是土层结构特点所决定的。中牟九堡 48+500 断面堤背地基土层自上而下砂壤土和中砂同层，下为细砂、中砂；大堤下为堵口混合料。整体上各土层透水性较好。因此淤背宽度达 100 m 以后，渗透破坏区消失。同样济南洛口 30+150 断面，土层是另一种特点，堤背地基上覆透水性差的壤土，下层粉砂其高度至堤背后下降、变薄，第三层为透水性很差的粉质黏土。整体各土层透水性均差，其中粉砂层透水性虽相对好，但层厚太

小。因此该堤段淤背 100 m 宽时渗透破坏区消失。
其余各断面土层结构均较为复杂，即使淤背宽度达 100 m，淤背体后地基土层仍存在渗透破坏区。由上述分析可得出如下结论：在所设定的计算条件下，中牟九堡 48+500 断面和济南洛口 30+150 断面淤背宽度取 100 m 即可满足渗流稳定性要求；而武陟张菜园 87+000 断面、齐河董家寺 79+850 断面、兰考南北庄 134+200 断面淤背宽度即使取 100 m，仍然达不到渗透稳定性要求，还应再加大淤背宽度。

3.3 渗流出逸点高度计算与淤背高度分析

按下式计算出逸点高度控制值：

$$h = \bar{h} + 3\sigma, \tag{21}$$

式中， h 为渗流出逸点高度控制值， $\bar{h}$ 为渗流出逸点高度均值， σ 为标准差。

计算结果见表 5。并用此值依据渗流稳定分析可靠性原理与实施方法中提出的判别标准，来判断出逸点高度是否满足要求。由表 5 可知，出逸点高度大部

表 5 典型断面渗流出逸点高度计算表
Table 5 Seepage exiting height of representative section

断面名称 及桩号	淤背情况	出逸点高度/m					出逸点高程 控制值/m	计算水位/m
		均值	标准差	最大值	最小值	控制值		
武陟 张菜园 87+000	未淤背	0.88	1.04	5.83	0.00	3.98	91.78	97.27
	淤背宽 50 m	0.66	0.70	2.10	0.00	2.76	90.56	97.27
	淤背宽 80 m	0.11	0.11	0.24	0.00	0.43	88.23	97.27
	淤背宽 100 m	0.05	0.04	0.19	0.00	0.15	87.95	97.27
齐河 董家寺 79+850	未淤背	2.58	1.07	5.37	0.74	5.79	37.49	40.00
	淤背宽 50 m	2.28	0.57	4.11	0.00	3.99	35.69	40.00
	淤背宽 80 m	1.82	0.54	3.93	0.00	3.44	35.14	40.00
	淤背宽 100 m	1.64	0.53	3.71	0.00	3.24	34.94	40.00
济南洛口 30+150	未淤背	0.53	0.27	7.16	0.00	1.34	26.64	34.58
	淤背宽 50 m	0.08	0.03	0.93	0.00	0.17	25.47	34.58
	淤背宽 80 m	0.05	0.02	0.70	0.00	0.11	25.41	34.58
	淤背宽 100 m	0.04	0.03	0.67	0.00	0.13	25.43	34.58
中牟 九堡 48+500	未淤背	0.79	0.56	1.57	0.01	2.47	85.07	88.90
	淤背宽 50 m	0.67	0.04	0.80	0.49	0.79	83.39	88.90
	淤背宽 80 m	0.45	0.15	0.56	0.00	0.90	83.50	88.90
	淤背宽 100 m	0.14	0.13	0.32	0.00	0.52	83.12	88.90
兰考 南北庄 134+200	未淤背	1.13	0.67	3.01	0.00	3.14	73.68	74.74
	淤背宽 50 m	0.51	0.03	0.59	0.00	0.61	71.15	74.74
	淤背宽 80 m	0.39	0.01	0.39	0.00	0.42	71.00	74.74
	淤背宽 100 m	0.19	0.02	0.32	0.00	0.24	70.78	74.74

分均不满足要求。最高可达近 7 m 左右,与上游水位仅差 2 m 左右。

当堤背地层渗透稳定和出逸点高度均不满足要求时,应继续加大淤背宽度;仅当出逸点高度不满足要求时,建议淤背体采用透水性大的土料,或适当采用贴坡排水措施。

淤背体高度是影响工程造价的一个重要数据。为节省工程造价,同时又避免在淤背体顶面出渗,可在渗流出逸点控制值上再加上 1.5~2.0 m,依此决定坡肩高度。

4 结论与建议

(1)渗透破坏是黄河堤防经常发生和非常严重的险情,用经典的确定性分析方法往往难以模拟。采用可靠性理论成功揭示了堤防在渗流方面存在的问题,与实际出险情况较为吻合,为堤防除险加固设计提供了理论依据。

(2)把可靠性理论应用到黄河堤防渗流稳定计算分析中进行了系统的研究工作,针对选定的典型堤段和设计洪水水位,假定不同的淤背宽度进行堤防渗流稳定可靠性计算分析,从而得出不同淤背宽度时堤防渗

流稳定的渗透破坏概率,为淤背体宽度设计提供技术参考。

(3)土层结构对堤防渗流稳定性有决定性影响,因此不同的堤段淤背宽度应根据地层情况具体分析。根据选取的黄河堤防 5 个典型断面的计算分析,100 m 淤背宽度不一定是保守的。

(4)渗流出逸点高度控制可按计算得到的出逸点高度均值加 3 倍标准差计算,并以此推定淤背体合理的设计高度。淤背体宜采用渗透系数大的土料。

参考文献:

[1] 祝玉学. 边坡可靠性分析[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1993. (ZHU Yu-xue. Reliability analysis in slope[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1993. (in Chinese))

[2] 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. (CHEN Zu-yu. Soil slope stability analysis—theory, methods and programs[M]. Beijing: China Water Power Press, 2003. (in Chinese))

[3] 毛昶熙. 堤防渗流与防冲[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2003. (MAO Chang-xi. Seepage of dike & scour defence[M]. Beijing: China Water Power Press, 2003. (in Chinese))