

黄河标准化堤防工程淤背的合理设计宽度

沈细中^{1,2}, 兰雁², 赵寿刚², 潘恕², 常向前²

(1. 中国科学院 武汉岩土力学研究所, 武汉 430071, shenxz@126.com;

2. 黄河水利科学研究院 工程力学研究所, 郑州 450003)

摘要:黄河下游标准化堤防建设中,采用放淤固堤方式提高堤防的防洪能力.由于黄河堤防的水文地质条件极为复杂;有的大堤常年甚至多年不靠水,难以通过原型观测资料率定土层的渗透系数,常规的渗流分析方法难以确定大堤淤背的设计宽度.可靠度理论将影响工程安全的因素视为随机变量,通过建立功能函数来求解失效概率或可靠度,据此评价工程的安全性.在考虑黄河堤防土体参数随机变异性的基础上,编制渗流可靠度程序,分析设计洪水水位下,黄河堤防背河坡脚不同距离地层土体的渗透破坏概率,从而确定淤背的合理设计宽度.实例分析表明,该法计算结果与其它研究成果一致,可为黄河堤防放淤固堤工程设计提供理论依据,并可供其它河流治理时参考.

关键词:黄河;标准化堤防;放淤固堤;设计宽度;可靠度

中图分类号: TV142 文献标识码: A 文章编号: 0367-6234(2009)10-0197-05

Reasonable design width of the back of silt area in the standardization dike project of Yellow River

SHEN Xi-zhong^{1,2}, LAN Yan², ZHAO Shu-gang², PAN Shu², CHANG Xiang-qian²

(1. Institute of Rock and Soil Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China, E-mail: shenxz@126.com;

2. Yellow River Institute of Hydraulic Research, Institute of Engineering Mechanics, Zhengzhou 450003, China)

Abstract: In the course of building the standardization dike in lower Yellow River, the capability of controlling flood was improved by reinforcing dike with silt. Because of the extra complexity of hydrogeological conditions of dike in Yellow River, it is difficult to obtain infiltration coefficients of soil layers by antitype observation data so that the design width of the silt area difficulties hard to be determined by routine methods of seepage analysis. The influencing factors of project safety are treated as stochastic variables in reliability theory, and disabled probability or reliability can be solved by establishing function so that the project security character can be estimated. Based on stochastic variability of soil parameters of dike considered in Yellow River, the program of seepage reliability is worked out. With the program, the probability of infiltration destroy of stratum soil is analyzed in different distances of slope feet in back - river of dike in Yellow River under the floodwater level of design so that the reasonable design width of the silt area can be confirmed. Analysis of an example shows that the results of the method is consistent with other research results, thus the study can provide a theoretical basis for project design of reinforcing dike with silt in Yellow River.

Key words: Yellow River; standardization dike; dike reinforcement with silt; design width; reliability

因泥沙淤积严重,黄河^[1]河滩一般高出堤外

3~5m,有的超过10m,形成“地上悬河”,加上大堤是在民埝的基础上逐渐加高培厚形成的,质量参差不齐,隐患多,防汛形势十分严峻.为消除隐患,增强工程的抗洪能力,黄河实行标准化堤防^[2]建设时,在加固大堤的同时,在其两侧进行

收稿日期: 2006-07-15.

基金项目: 黄河堤防工程放淤固堤设计的合理宽度研究项目(黄
科技 ZX-2004-08-13).

作者简介: 沈细中(1969—),男,博士后,工程师.

放淤固堤. 但由于黄河堤防的水文地质条件极为复杂; 有的大堤常年甚至多年不靠水, 难以通过原型观测资料率定土层的渗透系数, 常规的渗流分析方法难以确定大堤淤背的设计宽度, 因而放淤固堤工程的设计与建设缺乏科学理论的指导. 可靠度理论^[3~5]在解决岩土工程问题中的应用逐渐成熟, 黄河大堤经多次勘探已积累了大量的试验资料, 利用可靠性理论研究渗流问题的条件已经具备. 本文利用可靠度理论对黄河大堤淤背的合理设计宽度问题进行了研究, 并与其它研究成果进行对照研究.

1 基于可靠度的黄河堤防淤背的合理设计宽度

1.1 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. 由于黄河大堤土体基本上属于非管涌土, 因此判断单元土体的渗透稳定性, 即确定大堤渗流稳定性的功能函数^[3]如下.

$$Z = R - S. \tag{1}$$

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总渗透压力.

根据 R 、 S 的概率分布函数, 可得出土体渗透破坏概率为:

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

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_f 为土体渗透破坏概率; P_r 为土体渗透稳定可靠度.

1.2 渗流有限元计算的 Monte - Carlo 法

采用有限单元法计算渗流场, 将各土层渗透系数视为随机变量, 计算被研究单元渗透破坏概率或可靠度. 实现该计算过程的方法有多种^[3~5], 如一次二阶矩法、随机有限元法、Monte - Carlo 法等, 目前 Monte - Carlo 法^[5]采用较多, 具体如下.

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, 并与该单元底部有效土体重量比较, 确定是否发生渗透破坏, 从而计算出该土体单元的渗透破坏频率, 即破坏概率, 具体如下.

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

$$P_f = \frac{L}{N}. \tag{3}$$

在 Monte - Carlo 法中, 破坏概率要求达到一定的精度时, N 就必须取得足够大, 一般要求

$$N \geq 100/P_f. \tag{4}$$

1.3 渗透破坏标准

根据可靠度基本理论^[3,4]及黄河大堤渗流险情的实际情况^[1,6], 定义渗透稳定判别标准如下:

- (1) 大堤原断面堤背坡应不出渗;
- (2) 距背河堤脚 50 m 以内土层渗透破坏概率应 < 0.001 ;
- (3) 距背河堤脚 50 ~ 100 m 内土层渗透破坏概率应 < 0.005 ;
- (4) 距背河堤脚 100 ~ 150 m 内土层渗透破坏概率应 < 0.01 ;
- (5) 距背河堤脚 150 ~ 200 m 范围内土层渗透破坏概率应 < 0.05 ;
- (6) 距背河堤脚 200 m 以外范围内土层渗透破坏概率应 < 0.1 ;
- (7) 淤背体渗流出逸点高度 (即出逸点与淤背体坡脚高程之差) < 1 m. 满足上述条件时, 即为渗透稳定, 否则为渗透失稳.

1.4 黄河堤防土性参数的统计特征

为实现渗流稳定可靠性计算, 首先要确定大堤各类土体渗透系数和密度的概率分布规律. 为此, 选取多个典型断面开展了多组试验^[2], 并收集了多年的试验资料^[1], 对试验资料进行了数理统计和研究. 研究表明, 土体渗透系数符合对数正态分布; 土体密度符合正态分布. 具体统计情况如表 1.

表 1 黄河堤防多种土性参数统计表

土质	组数	土体渗透系数			土体浮密度		
		均值 10^5	标准差 10^5	对数均值	均值 10^{-5}	标准差 10^{-5}	对数均值
粘土	116	3.82	17.63	-11.73	1.76	0.91	0.08
壤土	151	5.09	13.57	-11.11	1.59	0.98	0.07
砂壤土	105	15.75	54.30	-10.03	1.60	0.96	0.06
粉土	29	32.56	75.19	-8.95	1.36	0.93	0.05
粉砂	68	32.77	43.35	-8.53	1.00	1.00	0.09
细砂	19	111.60	210.08	-7.55	1.23	1.01	0.09
淤背砂土	74	241.00	157.00	-6.30	0.81	1.03	0.08

2 实例分析

2.1 工程概况

河南武陟张菜园平工段^[1,2]位于黄河下游北岸,如图 1。堤身主要为壤土,堤基自上而下由壤土、砂壤土、壤土、砂壤土交互组成,堤基下层厚均不大,一般在 3~4 m。其中第二层壤土透水性差,渗透系数原报告取为 3.125×10^{-6} cm/s;壤土与砂壤土互层之下卧层依次为粉砂、细砂和中砂,透水性强;淤背土料为粉细砂。

2.2 计算工况及计算方法

武陟张菜园平工段是黄河较典型的堤段,选择该堤段 87+000 断面作为典型断面进行分析^[1,2],其中断面堤顶高程为 101.277 m;堤顶宽度为 13.2 m;背河侧原地面高程 87.537 m;临河及背河堤坡坡度均为 1:3;淤背与未淤背的上游计算水位取 2001 年设防水位为 97.27 m;下游水位 87.80 m。按二维稳定渗流情况计算,计算网格如图 2;为保证可靠度计算精度,抽样数即计算次数取 10 万次。计算时,先计算未淤背时的原始情况,然后按淤背宽度为 50、80、100、150 m 的情况分别进行分析,其中土层参数见表 1。

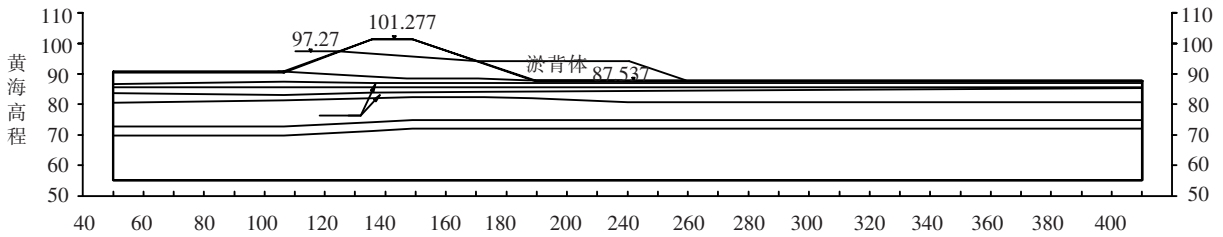


图 1 武陟张菜园平工段(87+000)剖面图

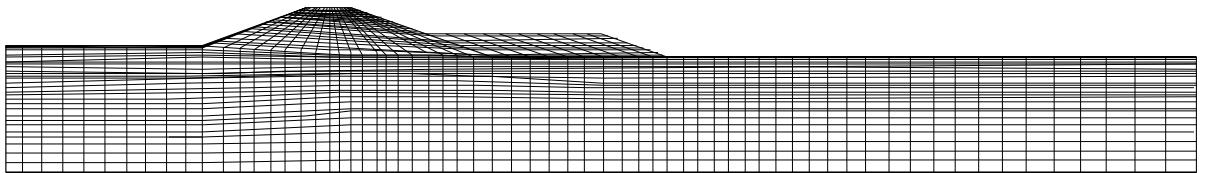


图 2 典型断面渗流计算网格

2.3 计算成果及成果分析

2.3.1 渗透破坏概率情况

利用渗流可靠度计算程序,对是否淤背、不同淤背宽度时,距坡脚不同距离处土层渗透破坏概率进行分析,计算结果如图 3 所示。

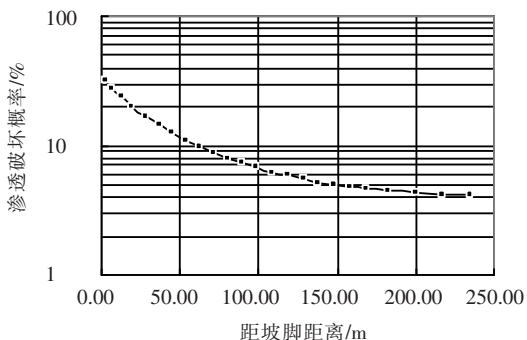


图 3 典型断面背河渗透破坏概率情况

由图 3 可知,在距离大堤背河坡脚 100 m 处,地层土体渗透破坏概率为 6.71%;在距离大堤背河坡脚 150 m 处,地层土体渗透破坏概率为 4.79%。根据上述渗透破坏标准可知,淤背宽度为 100 m 以内时,不能满足大堤安全要求;淤背宽度为 150 m 时,才能确保大堤安全。

2.3.2 背河侧渗透破坏区域

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,然后依据前述渗透破坏标准进行判断,最终得出整个断面破坏区域如表 2(表 2 中的破坏区水平范围,未淤背时指与原始断面背河坡角的距离;淤背时指与淤背体坡脚的距离)。

由表 2 可知,未淤背情况下各断面堤背地基均存在渗透破坏区。淤背体后地基渗透破坏区域随着淤背体宽度的增加,水平方向上的范围有所减小;垂直方向上,由多层破坏变为表层破坏;总体上渗透破坏范围是在减小的。渗透破坏范围的减小,主要是因为允许破坏概率随着与原堤坡脚的距离增大而增大;其次是由于渗径延长而渗透出逸比降有所降低。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反而有所增大或未显著减小。因而发生渗透破坏概率范围在垂直方向上减小,但在水平方向上未见显著减小。

2.3.3 渗流出逸点高度情况

出逸点高程指出逸点与坡脚高程之差,可按式(5)计算出逸点高度控制值^[6]。

$$h = \bar{h} + 3\sigma. \tag{5}$$

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。

根据上述资料，计算武陟张菜园平工段（87+000）典型断面的渗流出逸点高度情况如表 3。

表 2 典型断面渗透破坏区域

土层编号	破坏土层		破坏区水平范围				
	土壤名称	层底高程	未淤背	淤背宽 50m	淤背宽 80m	淤背宽 100m	淤背宽 150m
1	壤土	87.04	150	100	70	50	0
2	砂壤土	85.64	0	0	0	0	0
3	壤土	84.27~85.32	150	50	20	0	0
破坏区水平长度			150	100	70	50	0
破坏区高程			84.27~85.32	84.27~85.32	84.27~85.32	87.04	

表 3 典型断面渗流出逸点高度情况

淤背情况	出逸点高度/m				控制值	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			
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
淤背宽 150 m	0.01	0.01	0.04	0.00	0.03	85.31	97.27

据前述渗透破坏判别标准，来判断出逸点高度是否满足要求。按渗透破坏标准之(7)，因背河侧原地面高程 87.537 m，淤背体渗流出逸点高度应小于 1 m，即应 < 86.537 m。由表 3 可知，淤背宽度低于 100m 时，出逸点高度控制值均达不到此要求，均可能会发生渗透破坏；淤背宽度达 150 m 时，才不会发生渗透破坏。当堤背地基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。

2.3.4 合理淤背宽度的确定方法

根据武陟张菜园典型断面的渗透破坏概率、渗透破坏区域、渗流出逸点高度情况的分析成果可知，在设定的条件下，武陟张菜园 87+000 断面淤背宽度即使取 100m，仍然达不到渗透稳定性要求，还应再加大淤背宽度，至 150m 时才达到要求。

为突出本研究代表的代表性，在对武陟张菜园进行研究的同时，还对黄河下游齐河董家寺、济南洛口、中牟九堡、兰考南北庄等典型堤段进行了分析^[1]。研究表明，堤防土层结构对渗流稳定性起决定性作用；堤防所在区域的水文及地质条件影响也非常大。对不同的堤段淤背宽度，可采用渗流可靠度分析方法，具体计算确定，不可能制定一个统一的宽度标准。工程实践经验及计算成果表明，黄河大堤的合理淤背宽度为 100 m 左右，具体

可根据堤防实际情况确定。

3 对比分析

可靠性理论应用日益广泛，但这一理论毕竟还处于发展阶段，对于诸多工程问题研究有限，有关标准仅提供了原则性意见，具体应用于工程问题还需要做大量工作，对于黄河堤防渗流稳定问题，还是第一次采用该理论。为验证该成果的可靠性，除用渗流可靠度进行多个典型堤坝段的分析外，同时与以前的研究成果^[1]进行了对比分析，其中武陟张菜园典型断面的对比分析情况如表 4。

由表 4 可知，原武陟张菜园 87+000 断面研究成果中，除未淤背情况下，下游地面最大出逸比降超出要求外，其余均反映不出问题；淤背后最大出逸比降与未淤背时比较并无大的判别，这与本文的结果相符。两者突出的差别是以前的研究结果仅能够给出个别地点发生渗流破坏，而可靠性理论得到的结果能给出明确的破坏区域。

调研情况表明^[1]，尽管近 20 年来，该堤段在 1982 年和 1996 年发生两次洪水，但该堤段出险次数较多，特别是 1996 年，黄河该处流量仅 7600 m³/s，出险达 170 次，渗水堤段长度累计 40383 m，管涌 8 个。因此研究结果和实际出险情况比较相符。应指出，因近年来水量偏小，如果发生设计洪水时，问题还会更加严重，因而需进行加

固处理.

表 4 典型断面研究成果对比分析

类别	上游计算水位/m	下游计算水位/m	淤背体宽度/m	出逸点高度/m	最大出逸比降	安全系数
原研究成果	98.75	89.30 (淤背前)	0 (未淤背)	1.20	0.513	1.844
		88.70 (淤背后)	30	0.00	0.513	1.884
本文计算结果	97.27	87.80	0 (未淤背)	0.88	0.609	1.801
	97.27	87.80	50	0.66	0.519	1.908
	97.27	87.80	80	0.11	0.025	2.474
	97.27	87.80	100	0.05	0.020	2.725
	97.27	87.80	150	0.01	0.004	3.897

4 结 论

(1) 用可靠性理论分析堤防工程渗流稳定情况时,充分考虑了土体参数的随机变异性,更符合实际情况;而且避免了黄河堤防难以通过原型观测资料率定土层渗透系数的缺点,可以通过计算确定淤背的合理设计宽度.多个典型堤段分析与原研究成果对比表明,该法的计算结果与其它研究成果一致,因而可为黄河堤防放淤固堤工程设计提供了理论依据.

(2) 堤防土层结构对渗透稳定有着决定性的影响,对不同堤段的淤背宽度也应不同.工程经验与研究表明,黄河大堤的合理淤背宽度为 100m 左右,具体可根据堤防实际情况分析计算确定.

(3) 该研究成果已经成功应用于黄河堤防淤背宽度设计中,对其它河流堤防的治理,同样具有借鉴意义.

参考文献:

- [1] 黄委会水利科学研究所. 黄河大堤典型断面抗震稳定分析[R]. 1986:10-31.
- [2] 黄河水利科学研究院. 黄河大堤合理淤背宽度研究[R]. 2004:1-28.
- [3] 中华人民共和国能源部,中华人民共和国水利部. GB50199-94 水利水电工程结构可靠度设计统一标准[S]. 北京:中国计划出版社,1994.
- [4] MICHAEL A S, JACK L. The safest dam[J]. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE 2002, 128(1):139-143.
- [5] 陈祖煜. 土质边坡稳定分析统一原理、方法、程序[M]. 北京:中国水利水电出版社,2003.
- [6] 毛昶熙. 堤防渗流与防冲[M]. 北京:中国水利水电出版社,2003.

(编辑 姚向红)