

DOI :10.3876/j.issn.1000-1980.2011.05.011

基于可靠度的黄河下游堤防工程渗流稳定分析

张秀勇^{1,2}, 花剑岚³, 杨洪祥⁴

(1. 南京水利科学研究院岩土工程研究所, 江苏 南京 210024; 2. 东南大学交通学院, 江苏 南京 210096;
3. 南京市水利规划设计院有限责任公司, 江苏 南京 210016; 4. 济南黄河河务局, 山东 济南 250032)

摘要: 将可靠性理论应用于黄河下游堤防工程的渗流稳定分析, 根据与 Monte-Carlo 方法相结合的有限单元法求解单元堤段渗流稳定的基本原理, 基于黄河下游堤防渗透破坏的特点, 建立了黄河堤防渗透破坏计算模型, 介绍了基于 Monte-Carlo 方法的有限单元法求解典型堤防断面渗透破坏概率的计算步骤, 最后利用基于 Monte-Carlo 方法的有限单元法分析程序计算分析了黄河下游典型堤防断面的渗流稳定性, 计算结果对黄河下游堤防工程的除险加固决策具有参考价值。

关键词: 黄河下游堤防; 失事概率; 有限单元法; Monte-Carlo 方法

中图分类号: TD853.34 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2011)05-0536-04

黄河下游两岸多为平原地区, 防洪保护区面积 12 万 km², 人口密集, 城市众多, 资产集中, 黄河一旦决口, 势必造成巨大的灾难。黄河下游堤防经过多次加高增厚, 土质主要为砂性土, 透水性强, 均一性差, 土体的物理力学指标随机性很大, 洪水期间堤防的渗透稳定性差, 因此目前渗透破坏是黄河下游堤防洪水期间主要的破坏形式之一。

本文利用可靠性理论对黄河下游堤防的渗流稳定性进行分析, 将影响堤防工程渗流安全的因素视为随机变量, 建立渗流稳定的功能函数, 求解堤防工程洪水期间的渗透破坏概率, 以此来评价黄河下游堤防工程的渗流安全性。

1 渗流稳定分析可靠性基本原理

1.1 渗流控制的设计原则和随机变量的确定

按照堤防工程的设计原则, 堤防工程应按承载能力极限状态和正常使用极限状态进行设计。黄河堤防渗流稳定性可以看做是堤防在设计水位下是否超过堤防承载能力极限状态的情形^[1]。利用可靠性理论研究黄河堤防渗流稳定性时, 原则上是将荷载效应、材料特性及结构的几何尺寸等视为随机变量。鉴于黄河堤防的复杂性和不确定性主要取决于堤身和堤基土壤材料特性, 因此本文仅将土壤渗透系数和密度视为随机变量, 而将堤防上下游水位及其断面尺寸视为确定值, 来研究黄河堤防的渗流稳定性。

1.2 渗流稳定性功能函数

采用随机有限单元法分析渗流稳定性, 则研究对象是可能遭受破坏区域内的每一个单元土体。由于黄河下游堤防土质属于非管涌土, 因此按照流土破坏准则来判定背河堤脚以外区域单元土体的渗流稳定性。渗透破坏发生的原因是单元土体所受竖向总渗透力超过了单元土体的有效重力:

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

式中: R ——被研究单元土体底面上的有效土重力; S ——作用于被研究单元土体底面上的渗透力。

由于土壤密度的随机性, 因此 R 是一随机变量; 同样当堤防上下游水位和断面尺寸确定后, S 仅由堤身和堤基渗透性所确定, 当土壤渗透性参数为随机变量时, S 也为一随机变量。

式(1)即为研究堤防渗流稳定性的功能函数。当 $Z > 0$ 时, 单元土体处于渗流稳定状态; 当 $Z = 0$ 时, 单元

土体处于渗流极限状态,当 $Z < 0$ 时,单元土体处于渗流失效状态,即渗透破坏状态^[2]。

1.3 渗透破坏概率的计算理论^[3-10]

当 R 和 S 为 2 个随机变量,如果已知 R 和 S 的概率密度函数 $f_R(r)$ 和 $f_S(s)$,且 R 和 S 完全独立,则堤防渗透破坏概率可由式(2)得到:

$$P_f = 1 - P_r = 1 - \int_{-\infty}^{\infty} f_S(s) \left[\int_S^{\infty} f_R(r) dr \right] ds \tag{2}$$

如果 R 与 S 都服从正态分布,令它们的均值与标准差分别为 μ_R, σ_R 和 μ_S, σ_S ,则功能函数 Z 服从均值为 $\mu_Z = \mu_R - \mu_S$ 、标准差为 $\sigma_Z = \sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}$ 的正态分布。破坏概率可由式(3)求取:

$$P_f = P(Z < 0) = \int_{-\infty}^0 \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_Z} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{Z - \mu_Z}{\sigma_Z}\right)^2\right] dZ \tag{3}$$

令 $t = \frac{Z - \mu_Z}{\sigma_Z}$,则式(3)变为

$$P_f = P(Z < 0) = \int_{-\infty}^{-\frac{\mu_Z}{\sigma_Z}} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{t^2}{2}} dt \tag{4}$$

再令 $\beta = \mu_Z/\sigma_Z$,则可记为 $P_f = \varphi(-\beta)$ 。 β 为一无量纲次数,称为可靠指标,其与可靠度 P_r 的关系:

$$P_r = 1 - P_f = 1 - \varphi(-\beta) = \varphi(\beta) \tag{5}$$

由于堤防工程系统的复杂性和资料的局限性, $f_R(r)$ 和 $f_S(s)$ 很难严格求取,而且积分也很难实现。为求解堤防渗透破坏概率,本文采用 Monte-Carlo 方法,并利用基于 Monte-Carlo 方法的渗流有限元程序来计算黄河下游堤防的渗流稳定性, Monte-Carlo 方法的理论见文献[2]。

2 渗透破坏概率的计算步骤

本文将 Monte-Carlo 方法与有限单元法相结合,计算堤防渗透破坏概率。根据式(1)建立渗流变形的计算模型:

$$Z = F_{\text{重}} - F_{\text{渗}}$$

应用基于 Monte-Carlo 方法的渗流有限元程序计算渗透破坏概率的具体步骤如下:

- a. 根据随机取样方法,按概率随机选取一组土性参数值;
- b. 将该组参数值代入渗流有限元计算,得出土体单元渗透压力值 $F_{\text{渗}}$,同时计算出土体单元上的有效浮重力值 $F_{\text{重}}$;
- c. 比较 $F_{\text{渗}}$ 和 $F_{\text{重}}$ 大小,如果 $F_{\text{渗}} > F_{\text{重}}$,则 L 加 1 (L 为失事次数,初始值为 0),否则不变;
- d. 重复步骤 a ~ c N 次 (N 大小根据 Monte-Carlo 方法要求确定),得出最终 L 值;
- e. 得出土体单元发生流土破坏的概率:

$$P_f = L/N$$

3 黄河下游堤防渗流稳定计算实例

3.1 工程基本资料

本文选取济南黄河河务局所辖临黄堤左岸天桥(桩号)137+900 断面为研究对象。该段堤防上游设计水位为 34.45 m,下游地面高程 24.08 m,堤内地面高程 27.12 m,堤顶高程 37 m,堤顶宽度 8 m,内坡坡比 1:2.5,外坡坡比 1:3。该段堤防堤身土质自堤顶向下 5.6 m 为砂壤土,5.6 ~ 15.6 m 为壤土,15.6 ~ 17.6 m 为黏土,17.6 ~ 50.0 m 为砂壤土。

3.2 土性参数统计

对济南黄河河务局所辖堤防的土质参数进行了统计分析,将黄河堤防土质分为壤土、砂壤土、黏土 3 类,对各类土的渗透系数、干湿密度 ρ_{dry} 和 ρ_{sat} 分别进行了统计分析。统计结果表明,土壤渗透系数 K_s 符合对数正态分布^[4], ρ_{dry} 和 ρ_{sat} 均近似符合正态分布,具体见表 1 ~ 3。

表 1 黄河下游堤防土质渗透系数统计特征

Table 1 Statistics of permeability coefficient of embankment soils in lower Yellow River					
土壤类别	土样组数	均值/($10^{-5}\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$)	标准差/($10^{-5}\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$)	对数均值	对数标准差
壤土	428	1.48	10.94	-11.18	0.84
砂壤土	883	17.54	18.38	-8.67	0.73
黏土	384	0.33	15.08	-13.90	0.96

表 2 黄河下游堤防土质干密度统计特征

Table 2 Statistics of dry density of embankment soils in lower Yellow River			
土壤类别	土样组数	均值/($\text{t}\cdot\text{m}^{-3}$)	标准差/($\text{t}\cdot\text{m}^{-3}$)
壤土	575	1.51	0.082
砂壤土	1 153	1.52	0.043
黏土	467	1.39	0.062

表 3 黄河下游堤防土质饱和密度统计特征

Table 3 Statistics of saturated density of embankment soils in lower Yellow River			
土壤类别	土样组数	均值/($\text{t}\cdot\text{m}^{-3}$)	标准差/($\text{t}\cdot\text{m}^{-3}$)
壤土	575	1.83	0.072
砂壤土	1 153	1.83	0.046
黏土	467	1.85	0.051

3.3 计算断面与计算工况的选取

计算断面 堤外取距外坡脚 100 m 处为边界,堤内取内距坡脚 100 m 处为边界,自堤顶向下 50 m 处为底面固定边界,计算网格见图 1.

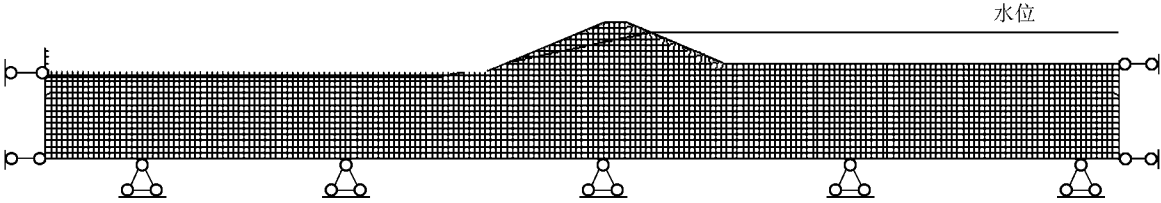


图 1 黄河下游堤防典型计算断面网格剖分示意

Fig. 1 Grid profile of typical embankment section of lower Yellow River

计算工况 选择断面按照未加固前的堤防原始状态进行计算.

本文取 3 种土质的 K_s $\eta\rho_{\text{dry}}$ $\eta\rho_{\text{sat}}$ 为随机变量,设计洪水位 34.45 m,其他参数为定值,计算次数 $N = 10^5$ 次.

3.4 计算成果分析

3.4.1 渗透破坏概率

取距背河堤脚 2 m 处的土体单元进行渗透破坏概率计算,在该处第 1 层壤土、第 2 层黏土和第 3 层壤土土体底部取土体单元,土体单元底部高程分别为 21.4 m,19.4 m,11.9 m,计算 3 层土底部单元土体的渗透破坏概率.

计算结果显示 济南天桥左岸(桩号)137+900 断面距背河堤脚 2 m 处第 1 层壤土的破坏概率为 9.17×10^{-2} ,第 2 层黏土的最大破坏概率为 2.23×10^{-2} ,第 3 层砂壤土的破坏概率为 0.41×10^{-2} .由此可以看出,该段堤防在设计洪水期间的渗透破坏概率很大,因此,必须进行除险加固来降低堤防的渗透破坏概率,提高堤防的渗流稳定性.

3.4.2 渗流出逸点高度

根据文献[11],渗流出逸点高度控制值可按式(6)进行计算:

$$h = \bar{h} + 3\delta \tag{6}$$

式中: h ——渗流出逸点高度控制值; $\bar{h}$ ——渗流出逸点高度均值; δ ——标准差.

根据渗流有限单元法分析程序的计算结果 济南天桥左岸(桩号)137+900 断面的渗流出逸点高度均值为 0.62 m,标准差为 0.35 m,最大值为 8.47 m,控制值为 1.67 m,出逸点高程控制值 25.75 m.由此可以看出,该断面的渗流出逸点控制在背河地面高程 1.67 m 以上,渗流出逸点不满足渗流安全控制要求(出逸点在背河堤脚以下),需要在堤防背河进行加固来降低渗流出逸点的高度.

由于本文采用各土层的计算参数为济南黄河堤防土质参数的统计值,土壤参数统计值的离散性偏大,所得计算结果比实际情况偏大[12].因此,采用这些数据作为除险加固的参考依据,堤防工程偏于安全.

4 结 语

本文基于与 Monte-Carlo 方法相结合的有限单元法求解单元堤段渗流稳定的基本原理,根据黄河下游堤防渗透破坏的特点,建立了黄河下游堤防渗透破坏的计算模型,介绍了基于 Monte-Carlo 方法的有限单元法求解典型堤防断面渗透破坏概率的计算步骤.根据济南黄河堤防土质参数的统计值,选择黄河下游堤防的典型断面济南天桥左岸(桩号)137+900 为例进行了堤防渗流稳定计算分析.计算结果显示,该段堤防设计洪水水位期间的渗透破坏概率很大,渗流出逸点高度远高于控制值,需要通过除险加固来提高黄河下游堤防洪水期间的渗流稳定性.

参考文献:

[1] 毛昶熙.堤防渗流与防冲[M].北京:中国水利水电出版社,2003.
[2] 刘宁.可靠度随机有限元法及其工程应用[M].北京:中国水利水电出版社,2001.
[3] HOOIJER A ,KLIJN F ,BAS G ,et al.Towards sustainable flood risk management in the Rhine and Meuse Rivers basins : synopsis of the findings of irma-sponge[J].River Research and Applications ,2004 ,28(2) :343-357.
[4] POUILLLOT R ,BEAUDEAU P ,DENIS J ,et al.A quantitative risk assessment of waterborne cryptosporidiosis in France using second-order Monte Carlo simulation[J].Risk Analysis ,2004 ,24(1) :2-17.
[5] 赵寿刚,常向前,潘恕.黄河标准化堤防渗流稳定可靠性分析[J].岩土工程学报,2007 ,29(5) :684-689.(ZHAO Shou-gang , CHANG Xiang-qian ,PAN Shu. Reliability analysis of seepage stability on standard dyke of Yellow River[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering ,2007 ,29(5) :684-689.(in Chinese))
[6] 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 Zhi-qiang ,WANG Zhuo-fu ,YANG Gao-sheng. Flood levee risk analysis for Yangtze River in nanjing[J]. Journal of Hohai University : Natural Sciences ,1999 ,27(2) :17-21.(in Chinese))
[7] 丁留谦,何秉顺,孙东亚,等.已知水头边界条件下双层堤基上盖重的渗流计算方法[J].水利水电技术,2007(2) :1-6.(DING Liu-qian ,HE Bing-shun ,SUN Dong-ya ,et al. Seepage computations of landside seepage berms on two-stratum dike foundations with boundary of deterministic hydraulic head[J]. Water Resources and Hydropower Engineering ,2007 ,38(2) :1-6.(in Chinese))
[8] 李国芳,黄振平,章志强,等.长江防洪堤南京段设计洪水水位风险分析[J].河海大学学报:自然科学版,1999 ,27(2) :22-27.(LI Guo-fang ,HUANG Zhen-ping ,ZHANG Zhi-qiang ,et al. Risk analysis of design flood stage of nanjing section of Yangtze River flood protecting embankmen[J]. Journal of Hohai University :Natural Sciences ,1999 ,27(2) :22-27.(in Chinese))
[9] 宋晓晨,徐卫亚,邵建富,等.暴雨作用下的非饱和边坡稳定性研究[J].河海大学学报:自然科学版,2002 ,30(6) :16-20.(SONG Xiao-chen ,XU Wei-ya ,SHAO Jian-fu ,et al. Stability analysis of unsaturated soil slope under atomized rain[J]. Journal of Hohai University :Natural Sciences ,2002 ,30(6) :16-20.(in Chinese))
[10] 姜树海,范子武.堤防渗流风险的定量评估方法[J].水利学报,2005 ,36(8) :994-995.(JIANG Shu-hai ,FAN Zi-wu. Quantitative assessment of embankment seepage risk[J]. Journal of Hydraulic Engineering ,2005 ,36(8) :994-995.(in Chinese))
[11] GB 50286—98 堤防工程设计标准[S].
[12] CHEN Jin ,HUANG Wei.Failure probability of gravity dam on rock foundation[C]//International Commission on Large Dams. Beijing : [s. n.] ,2000.

Analysis of reliability-based seepage stability of
embankment engineering of lower Yellow River

ZHANG Xiu-yong^{1,2} , HUA Jian-lan³ , YANG Hong-xiang⁴

- (1. Geotechnical Engineering Department , Nanjing Hydraulic Research Institute , Nanjing 210024 , China ;
- 2. Transportation College , Southeast University , Nanjing 210096 , China ;
- 3. Nanjing Water Planning and Designing Institute , Ltd. , Nanjing 210016 , China ;
- 4. Jinan Yellow River Administration Bureau , Jinan 250032 , China)

Abstract : The reliability theory was applied to seepage stability analysis of embankments of the lower Yellow River. Through introducing the principles of Monte-Carlo method into finite element seepage modeling of embankments , a calculated model for seepage analysis of embankments of the lower Yellow River was established based on the characteristics of seepage failure of embankments of the lower Yellow River , and the calculation steps were described. The seepage stability of typical embankment sections was analyzed using the model , and the risk probabilities were evaluated. The calculated results can provide valuable references for decision making of danger removal of embankments of the lower Yellow River.

Key words : embankments of lower Yellow River ; failure probability ; finite element method ; Monte-Carlo method