

土坝渗透稳定可靠性分析方法及应用

魏海, 沈振中

(河海大学水利水电工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 采用确定性分析方法分析土坝渗透稳定的理论和方法已经较为完善, 但它由于没有考虑坝体材料参数的变异性, 因此得出的安全分析成果并不能完全可靠地表征其安全性。利用概率与统计的方法对土坝渗透稳定进行可靠性分析则可考虑坝体材料等一些不确定因素对土坝的渗透稳定影响。首先利用统计方法对坝体材料物理参数进行分析, 得出了参数的概率分布类型, 然后运用可靠性分析原理, 构造土坝渗透破坏功能函数, 分析土体有效重度、内摩擦角, 坝体、坝基材料渗透系数对功能函数的影响, 并采用几何法对坝体渗透破坏可靠指标进行计算, 得出坝体发生渗透破坏的概率。利用上述方法对一土坝渗透稳定进行了分析。结果分析表明, 坝体渗透破坏的概率随着土体有效重度和内摩擦角变异性的增加而增加, 并且土体内摩擦角的变异性对坝体渗透破坏的影响较大, 坝体渗透变异性对坝体渗透破坏的影响较大; 另外, 随着库水位的升高, 坝体发生渗透破坏的概率也显著增加。

关键词: 土坝; 可靠性分析; 渗透破坏; 变异性

中图分类号: TU441.33

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2008)09-1404-06

作者简介: 魏海(1975-), 男, 博士研究生, 主要从事水工结构工程的研究。E-mail: weihai2005@hhu.edu.cn.

Reliability analysis on seepage stability of earth dams and its application

WEI Hai, SHEN Zhen-zhong

(College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The deterministic methods widely used to evaluate seepage stability of earth dams were perfect. But the safety of earth dams could not be indicated reliably by the results of safety analysis due to the incomplete consideration of variation of parameters of dam material. In the seepage stability analysis of earth dams using probabilistic and statistic methods the uncertain factors of dam materials could be taken into account. First, the probability distribution of physical parameters of dam materials was obtained by use of the statistic methods. Then the principle of reliability analysis was used to construct the function of seepage failure of earth dams, and the effect of effective unit weight and angle of internal friction of soil, seepage coefficient of dam body and foundation were also analyzed. The geometric methods were adopted to calculate the reliability index of seepage failure of earth dams, furthermore the seepage failure probability of earth dams was also obtained. Taking one earth dam for example, the method mentioned above was used to analyze the seepage stability of earth dams. It was shown that the great variation of effective unit weight and angle of internal friction of soil could result in the increase of seepage failure probability of earth dams, the effect of variation of angle of internal friction of soil was greater, and the seepage failure probability of earth dams was sensitive to variability of dam seepage. In addition, the increase of water level in reservoir would also induce great increase of seepage failure probability of earth dams.

Key words: earth dam; reliability analysis; seepage failure; variability

0 引言

渗透破坏是大坝失事的重要因素之一, 因此渗透破坏分析是堤坝安全分析的重要内容之一。目前对渗透破坏多是采用确定性分析方法, 首先利用有限元或水力学的方法计算出坝体和坝基渗透坡降, 再利用其物理参数, 计算出土体的临界渗透坡降, 然后对土体的实际坡降和临界坡降进行比较, 判断土体是否发生渗透破坏。该方法的局限性就是它把土体视为均匀介

质, 通常土体是一种很不均匀的介质, 比如渗透系数的变异系数在 0.03~32 之间变化^[1]。由于确定性分析方法没有考虑计算条件的不确定性因素, 如土层分布、土工参数和库水位的变异性等, 它得出的结果是唯一

基金项目: 国家 973 计划课题 (2002CB412707); 国家科技支撑计划课题 (2006BAC14B03)

收稿日期: 2007-08-15

的,是一种平均意义下的结果,不能反映坝体材料的不均匀性,因此确定性方法得出的安全分析结果并不能完全可靠地表征土坝的安全性。而基于可靠性理论的土坝渗透稳定分析,它能考虑坝体材料的不均匀性。比如当坝体材料物理参数的均值一样时,确定性方法的结果是唯一的,相反可靠性分析的结果是随坝体物理参数的变异性变化的。因此,以可靠性理论为基础的概率分析渐渐被重视并已成为大坝稳定分析中新的研究领域。张我华等^[2]利用概率分析方法对九江大堤溃决进行分析。李锦辉等^[3]将渗透系数作为随机场对堤坝渗透破坏进行了可靠性分析。谭晓慧等^[4]利用随机有限元对边坡稳定的可靠度和敏感性进行分析。本文就影响土石坝稳定的一些主要因素作出可靠性分析,比如土体有效重度、内摩擦角、渗透系数、库水位等,并利用实例分析了土体参数变异性与库水位变化对坝体渗透稳定的影响。

1 结构可靠性分析原理

设结构的基本荷载变量 $X=(x_1, x_2, \dots, x_n)$, 描述结构的功能函数的极限状态方程为 $g(X)=0$ 。其中基本随机变量 $x_i(i=1, 2, \dots, n)$ 可以是荷载、几何尺寸、材料特性参数等。结构的功能函数建立在结构的力学特性、渗透特性等指标上。通常用变量 $R=R(X)=(r_1, r_2, \dots, r_n)$ 表示广义抗力, 用变量 $S=S(X)=(s_1, s_2, \dots, s_n)$ 表示广义效应。于是结构的功能函数 $g(X)$ 可写为 $g(R, S)$ 。

设基本变量 $X=(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 为一组正态变量, 通过式(1)变换得到一组相互独立的标准正态变量 $Y=(y_1, y_2, \dots, y_n)$ 。

$$Y=T^{-1}\sigma_X^{-1}(X-\mu_X), \quad (1)$$

式中, 其中 $\mu_X=(u_1, u_2, \dots, u_n)^T$, $\sigma_X=\text{diag}(\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_n)$ 分别为 X 的均值向量和标准差对角阵, T 由 X 的协方差矩阵(C_X)的特征向量构成。

于是结构的功能函数就转换到标准正态变量空间, 即

$$g(X)=g[R(X), S(X)]=g[R(\sigma_X T Y + \mu_X), S(\sigma_X T Y + \mu_X)]=G(Y).$$

标准差与均值的比值称为参数的变异系数, 它是反映随机变量分散程度的无量纲因数, 即

$$\delta = \sigma / \mu. \quad (2)$$

计算结构的可靠指标时, 可采用目前普遍应用的几何法进行求解^[5]。该法首先以均值点作为初始验算点, 然后采用迭代的方法确定在标准正态空间里极限状态面 $G(Y)=0$ 上距离原点最近的点 Y^* , 即验算点, 再按照如下公式计算可靠指标 β :

$$\beta = \sqrt{Y^{*T} Y^*}. \quad (3)$$

结构的失效概率为

$$P_f = 1 - \Phi(\beta), \quad (4)$$

式中, P_f 为失效概率, $\Phi(\cdot)$ 标准正态概率分布函数。

2 渗透破坏(流土)可靠性分析

土坝渗透破坏(流土)的功能函数可写为

$$g(X)=J_{cr}-J, \quad (5)$$

式中, J 为土体的渗透坡降, J_{cr} 为土体的临界渗透坡降。

对于无黏性土或弱黏性土, 在下游坝趾出渗地表面, 由于上升渗流引起流土的临界渗透坡降 J_{cr} 可按文献[6]提供的方法计算, 如式(6); 在下游坝坡出渗段, 可利用极限平衡条件导出由向下渗流引起流土的临界渗透坡降 J_{cr} 的计算公式, 即式(7),

$$J_{cr} = \frac{\gamma'}{\gamma_w}, \quad (6)$$

$$J_{cr} = \frac{\cos \alpha \tan \varphi - \sin \alpha}{\sin(\alpha - \theta) \tan \varphi + \cos(\alpha - \theta)} \frac{\gamma'}{\gamma_w}. \quad (7)$$

式中 γ' 为土的有效重度; γ_w 为水的重度; α 为背水面坡角; φ 为土的内摩擦角; θ 为流线与水平方向的夹角, 当渗流方向向下时取正值, 反之取负值。 θ 可按下式计算:

$$\theta = \alpha - \frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{2} \left[0.6 \left(\frac{y}{h_0} \right)^{1/6} + 0.4 \left(\frac{y}{h_0} \right)^3 \right]. \quad (8)$$

式中 h_0 为出逸点高度; y 为出渗段计算点高度。

式(6)、(7)可合并为下式

$$J_{cr} = f(\varphi, \alpha) \frac{\gamma'}{\gamma_w}. \quad (9)$$

当 $\alpha=0$ 时, 取 $f=1$, 即为式(6); 当 $\alpha \neq 0$ 时, 即为式(7)。

渗流出渗段的渗透坡降可以采用有限元或水力学的方法计算得到, 本文采用水力学的计算方法。对于具有截水槽, 坝基渗透系数大于坝体渗透系数的均质土坝, 下游出渗段坝坡面和坝基面的出逸坡降可近似按下式计算^[7]:

坝坡面 $J = \frac{1}{\sqrt{1+m_2^2}} \left(\frac{h_0-H_2}{y-H_2} \right)^{0.25}, \quad (10)$

地基面

$$J = \frac{\pi(h_0-H_2)}{2T \operatorname{arsh} \sqrt{\exp\left(\frac{\pi m_2 h_0}{T}\right) - 1} \sqrt{\exp\left(\frac{\pi x}{T}\right) - 1}}. \quad (11)$$

式中 h_0 为出逸点高度; m_2 为背水面坡比; T 为坝基地层厚度; H_2 为下游水深; x, y 分别为计算点的位置。

h_0 可利用式(12)进行迭代可解, 迭代公式如下:

$$h_0 = \frac{1}{A} \left[\frac{k(H_1^2 - h_0^2)}{2(L + \frac{m_1 H_1}{2m_1 + 1} - m_2 h_0)} + \frac{k_0 T(H_1 - H_2)}{(L + m_1 H_1 + 0.88T)} \right] + H_2 \quad (12)$$

式中 k 为坝体材料渗透系数; H_1 为上游水深; k_0 为坝基材料渗透系数; L 为库水面与迎水面交点至下游坝趾点的水平距离; m_1 为迎水面坡比; 其它变量同式 (10)、(11), 其中

$$A = \frac{k}{m_2} \left[1 + \frac{H_2}{(h_0 - H_2) + \frac{H_2}{2m_2 + 1}} \right] + \frac{k_0 T}{m_2 h_0 + 0.44T}$$

由式 (12) 可知, 背水面出逸点的高度 h_0 是 k_0, k, H_1 和 H_2 的函数, 可记作 $h_0 = h_0(k_0, k, H_1, H_2)$ 。

求出 J_{cr} 和 J 后就可以利用公式 (5) 计算坝体渗透破坏的功能函数, 并计算坝体渗透破坏的概率。由于土体的渗透系数等参数一般不服从正态分布, 因此在计算前必须把它们转化为等效正态分布变量^[8]。

3 渗透破坏 (流土) 敏感性分析

影响土坝渗透破坏的因素很多, 它们各自对土坝渗透破坏的影响程度是不同的, 因此有必要对其各因素进行敏感性分析。

土坝渗透破坏 (流土) 的功能函数最终可写为

$$g(X) = f(\varphi, \alpha) \frac{\gamma'}{\gamma_w} - J \quad (13)$$

坝坡面

$$g(X) = \frac{\cos \alpha \tan \varphi - \sin \alpha}{\sin(\alpha - \theta) \tan \varphi + \cos(\alpha - \theta)} \frac{\gamma'}{\gamma_w} - \frac{1}{\sqrt{1 + m_2^2}} \left(\frac{h_0 - H_2}{y - H_2} \right)^{0.25} \quad (14)$$

地基面

$$g(X) = \frac{\gamma'}{\gamma_w} - \frac{\pi(h_0 - H_2)}{2T \operatorname{arsh} \sqrt{\exp(\frac{\pi m_2 h_0}{T}) - 1} \sqrt{\exp(\frac{\pi x}{T}) - 1}} \quad (15)$$

在 Y 空间中, 可靠指标 β 对变量 X_i 的均值 μ_{x_i} 和标准差 σ_{x_i} 的敏感性可表示为^[9]

$$\frac{\partial \beta}{\partial \mu_{x_i}} = \frac{1}{\sigma_{x_i}} \frac{1}{\|\nabla G(Y^*)\|} \frac{\partial G(Y^*)}{\partial Y_i} \quad (16)$$

$$\frac{\partial \beta}{\partial \sigma_{x_i}} = \frac{Y_i^*}{\sigma_{x_i}} \frac{1}{\|\nabla G(Y^*)\|} \frac{\partial G(Y^*)}{\partial Y_i} \quad (17)$$

在 X 空间中, 可靠指标 β 的敏感性可表示为^[3]

$$\frac{\partial \beta}{\partial \mu_{x_i}} = \frac{1}{[\nabla g(X^*)^T C_X \nabla g(X^*)]^{1/2}} \frac{\partial g}{\partial X_i} \quad (18)$$

$$\frac{\partial \beta}{\partial \sigma_{x_i}} = \frac{\partial \beta}{\partial \mu_{x_i}} \frac{X_i^* - \mu_{x_i}}{\sigma_{x_i}} \quad (19)$$

功能函数 $g(X)$ 对 γ', φ, k 和 k_0 的偏导数分别如下:

坝坡面

$$\frac{\partial g}{\partial \gamma'} = \frac{\cos \alpha \tan \varphi - \sin \alpha}{\sin(\alpha - \theta) \tan \varphi + \cos(\alpha - \theta)} \frac{1}{\gamma_w} \quad (20)$$

$$\frac{\partial g}{\partial \varphi} = \frac{\cos \theta \sec^2 \varphi}{[\sin(\alpha - \theta) \tan \varphi + \cos(\alpha - \theta)]^2} \frac{\gamma'}{\gamma_w} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial g}{\partial k} &= -\frac{\partial J}{\partial h_0} \frac{\partial h_0}{\partial k} \\ &= -\frac{0.25}{\sqrt{1 + m_2^2}} \left(\frac{h_0 - H_2}{y - H_2} \right)^{-0.75} \frac{1}{y - H_2} \frac{\partial h_0}{\partial k} \quad (22) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial g}{\partial k_0} &= -\frac{\partial J}{\partial h_0} \frac{\partial h_0}{\partial k_0} \\ &= -\frac{0.25}{\sqrt{1 + m_2^2}} \left(\frac{h_0 - H_2}{y - H_2} \right)^{-0.75} \frac{1}{y - H_2} \frac{\partial h_0}{\partial k_0} \quad (23) \end{aligned}$$

地基面

$$\frac{\partial g}{\partial \gamma'} = \frac{1}{\gamma_w} \quad (24)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial g}{\partial k} &= -\frac{\partial J}{\partial h_0} \frac{\partial h_0}{\partial k} = -\frac{\pi}{2T \sqrt{\exp(\frac{\pi x}{T}) - 1}} \\ &\left(\frac{h_0 - H_2}{\operatorname{arsh} \sqrt{\exp(\frac{\pi m_2 h_0}{T}) - 1}} \right)' \frac{\partial h_0}{\partial k} \quad (25) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial g}{\partial k_0} &= -\frac{\partial J}{\partial h_0} \frac{\partial h_0}{\partial k_0} = -\frac{\pi}{2T \sqrt{\exp(\frac{\pi x}{T}) - 1}} \\ &\left(\frac{h_0 - H_2}{\operatorname{arsh} \sqrt{\exp(\frac{\pi m_2 h_0}{T}) - 1}} \right)' \frac{\partial h_0}{\partial k_0} \quad (26) \end{aligned}$$

上述各式变量意义同前, $\frac{\partial h_0}{\partial k}, \frac{\partial h_0}{\partial k_0}$ 可由式 (12)

按隐函数求导法则求得。

由于在标准正态变量空间有

$$\beta(Y_i + \Delta Y_i) \approx \beta(Y_i) + \sum_{i=1}^n \frac{\partial \beta}{\partial Y_i} \Delta Y_i \quad (27)$$

$$\frac{\partial \beta}{\partial Y_i} = \frac{1}{\|\nabla G(Y^*)\|} \frac{\partial G(Y^*)}{\partial Y_i} \quad (28)$$

Y_i 是标准化后的变量, 都是以 0 为均值, 1 为标准差的标准正态变量, 因此与各自的量纲无关, 于是 $\frac{\partial \beta}{\partial Y_i}$ 可以表示各变量对可靠指标敏感性的相对大小。

由式 (18)、(20)、(21) 可知坝坡的 $\frac{\partial \beta}{\partial \gamma'}$, $\frac{\partial \beta}{\partial \varphi}$ 大于 0, 因此提高 γ' , φ 可以提高坝坡的可靠指标 β , 减小渗透破坏的概率; 由式 (18)、(22)、(23) 可知, 坝坡的 $\frac{\partial \beta}{\partial k}$, $\frac{\partial \beta}{\partial k_0}$ 与 $\frac{\partial h_0}{\partial k}$, $\frac{\partial h_0}{\partial k_0}$ 的变化趋势相反, 因此当 h_0 增加时, 坝坡的可靠指标会降低, 渗透破坏的概率会增加。对于地基面, 由式 (18)、式 (24) 可知, 增加 γ' 可以提高地基的可靠指标, 降低渗透破坏的概率。

4 实例分析

狮洞水库位于广州市花都区花山镇, 是一座拦峰调水为主要用途的小型水库。水库于 1974 年开工建设, 于 1976 年 4 月建成蓄水。水库正常高水位为 127.73 m, 设计洪水位 130.34 m, 校核洪水位为 131.40 m。大坝为均质土坝, 坝顶高程 132.50 m, 防浪墙顶高程 133.30 m, 最大坝高 21.50 m, 坝顶宽度 5.0 m。上游坝坡采用干砌石护坡, 上游坝坡为 1:3.0。下游坝坡在高程 124.40 m 处设有 2.0 m 宽马道, 马道以上坝坡为 1:2.5, 马道以下坝坡为 1:3.0。下游采用草皮护坡。狮洞水库建成运行至今已 30 多年, 一直存在一些安全隐患。目前, 大坝坝趾渗水严重、喜水植物生长

茂盛、常年呈沼泽化, 对水库蓄水影响较大。这里选择典型断面 0+80 进行分析, 其剖面如图 1 所示。

4.1 土体物理参数概率分析

根据地质资料和土工实验数据, 土体有效重度、内摩擦角和渗透系数的取值及其分布类型如表 1 所示。由表 1 可知土体的渗透系数变异性较大。

4.2 渗透破坏(流土)可靠性分析

由于土体有效重度、内摩擦角会影响到土体的临界渗透坡降, 土体渗透系数会影响土体的出渗段渗透坡降, 因此土体的这些物理参数的变化会影响到渗透破坏发生的概率。现就土体有效重度、土体内摩擦角、土体渗透系数的变异性以及库水位的变化对坝体渗透破坏的影响进行分析。计算时, 计算点的选择只要能满足公式计算要求即可, 这里分别选择高度为 $h_0/2$ 的点以及水平距离为 $h_0/2$ 的点, 作为坝坡的计算参考点和下游地基面的计算参考点, 如图 1 所示, (h_0 是按 k , k_0 取均值时的计算值)。下游水位取下游地面高程。由于本实例中各参数间的相关性不明显, 因此分析时暂不考虑各参数之间的相关性。

(1) 土体有效重度变异性对渗透破坏概率的影响

土体有效重度的变异系数按土体实际值的 1/3~20 之间变化取值, 然后利用上述方法求出土体渗透破坏的概率。土体渗透破坏概率随土体有效重度变异系数变化关系如图 2 所示。由图可知随着土体有效重度

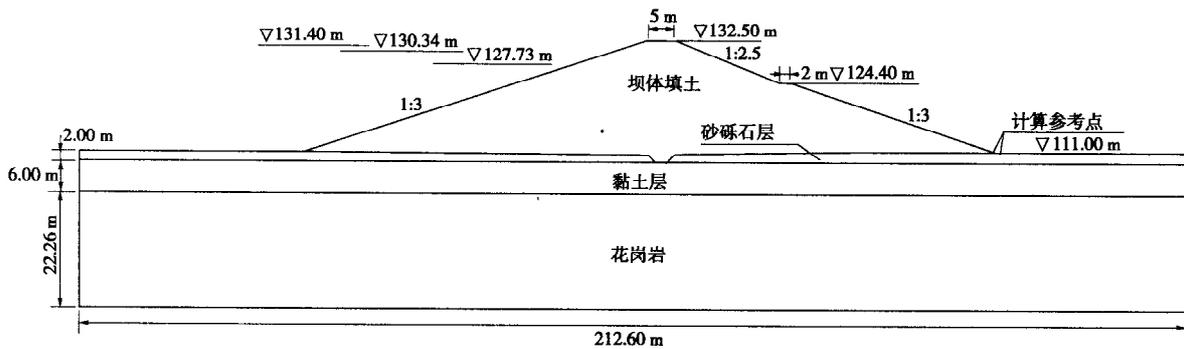


图 1 大坝典型断面剖面图

Fig. 1 Typical profile of dams

表 1 土体物理参数

Table 1 Physical parameters of soil

地层	土体有效重度 γ' (正态分布)			土体内摩擦角 φ (正态分布)			渗透系数 k (对数正态分布)		
	均值 $/(kN \cdot m^{-3})$	标准差 $/(kN \cdot m^{-3})$	变异 系数	均值 $/(^\circ)$	标准差 $/(^\circ)$	变异 系数	均值 $/(m \cdot s^{-1})$	标准差 $/(m \cdot s^{-1})$	变异 系数
坝体填土	9.29	0.16	0.017	22.53	1.89	0.084	2.51×10^{-6}	1.08×10^{-6}	0.430
砂砾石层	9.44	0.10	0.011	24.30	5.94	0.244	1.60×10^{-5}	0.37×10^{-5}	0.231

的变异性增加,土体发生渗透破坏的概率也相应增加,同时有效重度的变异性对砂砾石层的影响较坝体填土要大。

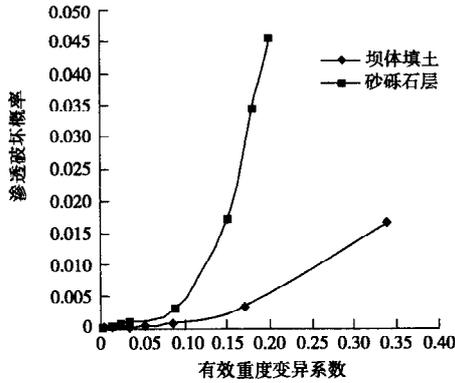


图2 土体渗透破坏概率随有效重度变异系数变化曲线

Fig. 2 Relationship between seepage failure probability and coefficient of variation of effective unit weight of soil

(2) 坝体填土内摩擦角变异性对渗透破坏概率的影响

坝体填土内摩擦角的变异系数按土体实际值的1/3~10之间变化取值,然后利用前述方法即可求出土体渗透破坏的概率。土体渗透破坏概率随内摩擦角变异系数变化关系如图3所示。由图可知坝体填土渗透破坏概率随其内摩擦角变异性的增加而增加,但增加幅度随变异性的增加逐渐变缓。

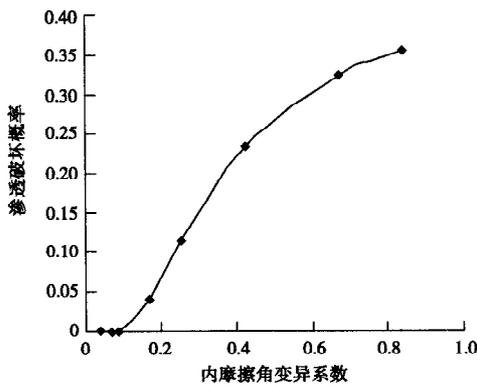


图3 土体渗透破坏概率随内摩擦角变异系数变化曲线

Fig. 3 Relationship between seepage failure probability and coefficient of variation of angle of internal friction of soil

(3) 土体渗透系数变异性对渗透破坏概率的影响

坝体填土渗透系数的变异系数也按土体实际值的1/3~3之间变化取值,然后利用前述方法即可求出土体渗透破坏的概率。土体渗透破坏概率随渗透系数变异系数变化关系如图4所示。由图可知,渗透系数的变异性增加会导致土体发生渗透破坏概率增加,于是提高土的均匀性有利于提高土的抗渗性能。砂砾石层受影响的程度较坝体填土要大,但由于坝体填土的

不均匀性较砂砾石层大,因此发生渗透破坏的概率可能会更大。

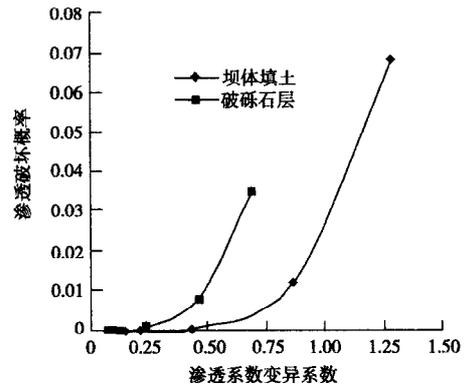


图4 土体渗透破坏概率随渗透系数变异系数变化曲线

Fig. 4 Relationship between seepage failure probability and coefficient of variation of seepage of soil

(4) 库水位变化对土体渗透破坏概率的影响

在计算库水位对土体渗透破坏概率的影响时,库水位分别取127.73,128.00,128.50,129.00,129.50,130.34和131.40 m。土体渗透破坏概率随库水位变化关系如图5所示。由图可知,随着库水位的升高土体发生渗透破坏的概率显著增加,坝体填土和坝基砂砾石层受库水位的影响基本相当。

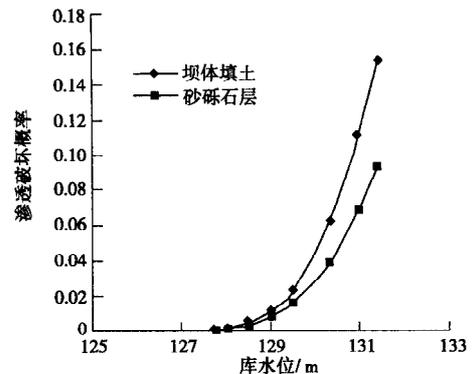


图5 土体渗透破坏概率随库水位变化曲线

Fig. 5 Relationship between seepage failure probability and water level in reservoir

(5) 各参数对渗透可靠指标β的敏感性分析

当坝体填土和坝基砂砾石层各参数取实际均值和标准差时,渗透可靠指标对均值的敏感性分析列于表2。由表可知,坝体填土渗透可靠指标对内摩擦角φ最敏感,其次是坝体填土的渗透系数k,有效重度和坝基砂砾石层渗透系数对其影响较小。坝基砂砾石层渗透可靠指标受坝体填土的渗透系数影响最大,其次是砂砾石层的渗透系数。因此,为了提高坝体填土的可靠指标增加土体的内摩擦角是最有效的,其次是降低其渗透性;如果要提高坝基砂砾石层的可靠指标则应降低坝体填土的渗透性,提高砂砾石层渗透性,增加

其有效重度。

表2 各参数对可靠指标的敏感分析

$\frac{\partial \beta}{\partial \gamma}$	γ' /(kN · m ³)	φ /(°)	k /(m · s ⁻¹)	k_0 /(m · s ⁻¹)
坝体填土	4.55×10^{-2}	0.926	-0.368	-6.95×10^{-2}
砂砾石层	8.53×10^{-2}	—	-0.825	0.559

5 结 语

本文利用土体的极限平衡, 基于可靠性理论, 分析了土体各参数的变异性对土体渗透破坏(流土)的影响。通过对实例的分析, 可以得出以下结论:

(1) 当土的有效重度变异性增加时, 坝体发生渗透破坏的概率也随之增加。有效重度变异性对不同土体的影响大小不同。

(2) 当土内摩擦角变异性增加时, 土体发生渗透破坏的概率也随之增大, 但增加幅度随变异系数的增加逐渐变缓。

(3) 当土体渗透性变异性增加时, 土体发生渗透破坏的概率也随之增加, 因此提高土的均匀性有利于提高土的抗渗性能。

(4) 随着库水位的升高, 坝体发生渗透破坏的概率显著增加。

(5) 增加土体的内摩擦角, 降低其渗透系数, 有助于提高坝体填土的抗渗性能; 提高砂砾石层渗透性, 增加其有效重度, 则可以提高坝基砂砾石层的抗渗性能。

参考文献:

[1] GORDON A Fenton, GRIFFITH D V. Extreme hydraulic gradient statistics in stochastic earth dam[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1997, **123**(11): 995 - 1000.

[2] 张我华, 方仲将, 任廷鸿. 九江大堤溃坝渗流的可靠性分析[J]. 浙江大学学报(工学版), 2005, **39**(7): 976 - 982. (ZHANG Wo-hua, FANG Zhong-jiang, REN Ting-hong. Reliability analysis for seepage burst of Jiujiang dike on Changjiang river[J]. Journal of Zhejiang University

(Engineering Science), 2005, **39**(7): 976 - 982. (in Chinese))

- [3] 李锦辉, 王媛, 胡强. 基于随机有限元的堤防渗透失稳概率分析[J]. 岩土力学, 2006, **27**(10): 1847 - 1850. (LI Jin-hui, WANG Yuan, HU Qiang. Probability analysis of seepage failure of embankments based on stochastic finite element method[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, **27**(10): 1847 - 1850. (in Chinese))
- [4] 谭晓慧, 王建国, 刘新荣, 等. 边坡稳定的有限元可靠度计算及敏感性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, **26**(1): 115 - 122. (TAN Xiao-hui, WANG Jian-guo, LIU Xin-rong, et al. Finite element reliability computation and sensitivity analysis of slope stability[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, **26**(1): 115 - 122. (in Chinese))
- [5] 武清玺, 吕泰仁, 吴世伟. 变量相关时结构可靠指标的计算[J]. 高校应用数学学报, 1987, **2**(3): 323 - 329. (WU Qing-xi, LÜ Tai-ren, WU Shi-wei. Computation of the structural reliability index with correlated random variables[J]. Applied Mathematics Journal of Chinese Universities, 1987, **2**(3): 323 - 329. (in Chinese))
- [6] 钱家欢, 殷宗泽. 土工原理与计算[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1996. (QIAN Jia-huan, YIN Zong-ze. Principle and calculation of geotechnics[M]. Beijing: China Water Power Press, 1996. (in Chinese))
- [7] 毛昶熙. 渗流计算分析与控制[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2003. (MAO Chang-xi. Seepage computation analysis & control[M]. Beijing: China Water Power Press, 2003. (in Chinese))
- [8] 黄克中, 毛善培. 随机方法与模糊数学应用[M]. 上海: 同济大学出版社, 1987. (HUANG Ke-zhi, MAO Shan-pei. Stochastic approach and fuzzy mathematics application[M]. Shanghai: Tongji University Press, 1987. (in Chinese))
- [9] 刘宁. 可靠度随机有限元及其工程应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2001. (LIU Ning. Reliability and stochastic finite element method and engineering application[M]. Beijing: China Water Power Press, 2001. (in Chinese))