

考虑缓变效应的土石坝渗透破坏风险率分析

王宝强¹ 李伟生¹

水利部珠江水利委员会技术咨询广州有限公司

DOI:10.12238/jpm.v4i10.6344

[摘要] 采用JC法对考虑风险因子缓变特性的土石坝渗透破坏风险率进行评估。分析土石坝渗透破坏随机不确定性,探讨土石坝渗透破坏风险因子的缓变特性和截水槽渗透缓变性的量化方法,构建了考虑缓变效应的土石坝渗透破坏风险率分析模型。结合工程案例,分析了考虑土石坝坝高的缓变性的渗透破坏风险率变化规律:渗透破坏风险率随时间呈反正切关系变化,在前5年内,风险率增长较快,5年以后风险率仍在呈增长的趋势,但是变化非常小,最后基本趋于平稳。

[关键词] 土石坝; 缓变特性; 渗透破坏; 风险率

Analysis of risk rate of earth-rock dam considering slow change effect

Wang Baoqiang 1, Li Weisheng 1

Ministry of Water Resources Pearl River Water Resources Commission Technical Consulting Guangzhou Co., LTD.

510610

[Abstract] JC method is used to evaluate the risk rate of the risk factor. Analypaper the random uncertainty of the seepage failure of the earth-rock dam, and construct the analysis model of the risk rate of the seepage failure of the earth-rock dam. Combined with the engineering cases, the paper analyzes the change law of the infiltration damage risk rate considering the slow degeneration of the earth-rock dam height: the risk rate of seepage damage changes with time. In the first 5 years, the risk rate increased rapidly, and the risk rate is still increasing 5 years later, but the change is very small, and finally it basically stable.

[Key words] earth-rock dam; slow change characteristics; seepage damage; risk rate

渗透破坏是土石坝失事主要原因之一。据统计^[1],渗透破坏导致土石坝失事的数量占土坝失事总数的30%。目前,多采用确定性方法分析大坝渗透破坏,未考虑大坝的随机不确定性,如土层分布、土工参数和库水位等不确定性。而且随着大坝随着时间增长,大坝结构出现劣化现象,即大坝缓变效应。正确考虑缓变特性对大坝风险的影响,才能更加准确的评估大坝风险的影响。渗流破坏多出现在高水位时期,本文以年峰值水位为例,在分析土石坝渗透破坏的随机不确定性和渗透系数的缓变特性的基础上,对土石坝渗透破坏的风险率进行规律分析。

一、土石坝渗透破坏随机不确定性分析

土石坝的随机不确定性一般可以概括为以下几个方面:土体参数的随机不确定性、荷载的随机不确定性、几何尺寸的随

机不确定性、数学模型和求解方法的随机不确定性。

(1) 土体参数的随机不确定性

造成土体参数随机不确定性的因素很多,这主要是由土体本身的性质所决定的。土是在漫长的时间里经过风化、搬运、沉积才形成的,因此土体的三相组成、构成结构不可能完全相同,这是土体表现出随机不确定性的根本原因。在确定土体参数时,常常采用抽样试验的方法,这样使得土体测试的数据表现出离散性,但是试验数据只是土体局部的真实参数,而不是整体的真实参数。土石坝的填筑过程中,都会对土体造成扰动,从而增加土体的不确定性。以上因素影响土石坝渗透稳定的参数如渗透系数、孔隙率、土体颗粒级配等都表现出一定的随机性。

(2) 水荷载的不确定性

大坝受到来水、蓄水、泄水三方面的影响,库水位是不断变动的,表现出随机性。就年峰值水位来说,由于每年最大洪水是不确定的,再加上运行调度过程中的人为因素,每年的年峰值水位也是不同的;即使是同一天的水位,由于相关因素影响,也是在一定范围内波动的,因此大坝承受的水荷载表现出随机不确定性。

(3) 几何尺寸的不确定性

对于地基而言,即使经过地质勘察也不可能完全了解地基的情况,地基中存在的一些断层、节理、裂隙等,其几何尺寸具有不确定性。另外,由于地基表面不会完全平整,坝基厚度也表现随机不确定性,这些对于土石坝渗流计算分析的影响尤为重要,一般要考虑坝基几何尺寸的不确定性。确定相关尺寸参数的原则^[2]为:①测量数据充分时,直接用数理统计方法确定其参数;②当数据不充分时,可根据标准差的有关规定,经分析判定;③几何参数概型可采用正态分布。

(4) 渗流模型和计算方法的随机不确定性

渗流计算模型中常采用一些基本假定或者简化计算条件,例如液体在土中沿孔隙流动的路程是十分复杂的,但在渗流模型中,认为渗流是充满整个孔隙介质的连续水流,渗流水力学计算方法中将坝体上游楔形体用一个矩形简化等。由此可见,由于假定和简化的不同,不同计算模型的计算结果肯定有所差异,再加上模型中参数的不确定性,这就使模型得反映真实情况的能力具有一定的随机性。

二、土石坝坝体失稳破坏风险因子缓变性及量化方法分析

结合工程实例研究渗透破坏风险因子的缓变特性,本文以有截水槽的有限深透水地基的均质土坝作为研究对象,坝身土料以重粉质壤土、粉质粘土为主,坝基为7m深的砂砾石层,截水槽土料为与坝身相似的土料。随着土石坝服役时间增加,地基中的渗透性将会发生缓慢变化,随着截水槽下游侧的反滤层出现功能退化或损坏,截水槽内的土颗粒逐渐被渗透水流带走,使得截水槽防渗性能逐渐降低,其渗透系数增大。文献[3]研究表明,土石坝截水槽的渗透系数在以上劣化作用下,变化规律可以用式(1)来表示:

$$k_1(t) = k_1(0) \left(1 + \frac{2}{\pi} \arctan t \right) \quad (1)$$

式中: $k_1(t)$ 为大坝 t 年后的坝基中截水槽的渗透系数; $k_1(0)$ 为截水槽初始渗透系数。

坝基中截水槽的渗透系数增大,使得截水槽防渗性能下降,导致更多的水流通过地基向下游渗透,引起大坝浸润线升高,大坝某些部位的渗透坡降改变,从而影响大坝的渗透稳定性,增加了土石坝发生渗透破坏的风险。因此在构建土石坝渗透风险率分析方法时需要考虑截水槽渗透系数的缓变性影响。

三、考虑风险因子缓变性的土石坝渗透破坏风险率分析方法

(一) JC法原理

JC法在继承中心点法计算简单等优点的基础上,能够考虑非正态随机变量,计算精度高,应用广泛。JC法计算的最大特点是:将非正态分布的随机变量当量正态化^[7],当量正态化需要在设计验算点 x_i^* 处,满足以下两个条件:①当量正态变量与原变量的分布函数值相等;②当量正态随机变量与原变量概率函数值相等。此后就可以按照全是正态随机变量的方法求解可靠指标。

(二) 土石坝渗透破坏风险率分析方法

(1) 大坝渗透破坏的功能函数

根据相关理论^[4]可知,当土石坝某部位的抗渗强度 $J_n(t)$ 小于当时的渗透坡降 $J(t)$ 时,土石坝就出现渗透破坏。大坝渗透破坏功能函数可表示为式(2)。

$$g(t) = g[J_n(t), J(t)] = J_n - J(t) \quad (2)$$

本文利用文献[5]中的相关公式求得 $J(t)$ 和 J_n 的表达式,在考虑坝基中截水槽渗透系数 k_1 缓变性的基础上,用JC法求解渗透破坏时变风险率 $P_f(t)$ 。

(2) 渗透破坏风险率计算中随机变量不确定性的确定方法

渗透破坏风险率计算中用到的随机变量有:坝体渗透系数 k 、坝基渗透系数 k_0 、截水槽渗透系数 k_1 、总体渗流量 q 、逸出点高度 h_0 、临界坡降 J_n ,其中 k 、 q 和 h_0 是用来计算渗透坡降 J 的, k 、 J_n 的概型及特征参数可由试验数据统计确定, h_0 和 q 根据相关公式计算所得。

以逸出点为界,将坝体分为上游段和下游段。根据杜比公式,坝体上游段和下游段的渗流量公式如式(3)。

$$\begin{cases} q_1 = k \frac{H_1^2 - h_0^2}{2(L + \Delta L)} + k_0 T \frac{H_1 - H_2}{Lc + 0.44T} \\ q_2 = (h_0 - H_2) \left\{ \frac{k}{m_2} \left[1 + \frac{(m_2 + 0.5)H_2}{(m_2 + 0.5)(h_0 - H_2) + 0.5H_2} \right] + \frac{k_0 T}{m_2 h_0 + 0.44T} \right\} \end{cases}$$

(3)

式中: Lc 为等效地下轮廓总的计算长度; B 为坝体底部总长; b 为截水槽等效宽度; ΔL 为等效矩形宽度; $\Delta L = \frac{m_1 H_1}{2m_1 + 1}$; L 为浸润线在坝体水平投影长度; T 为地基深度; H_1 为上游水深; H_2 为下游水深。

(3) 用水力学法构建渗透稳定功能函数

① 坝体坡降构建功能函数

杜比近似假定,可得某断面平均渗透坡降,见式(4):

$$J = \frac{dy}{dx} = \frac{q_D}{k} \frac{1}{\sqrt{h_0^2 + 2 \frac{q_D}{k} x}} \quad (4)$$

至此,将渗透坡降和抗渗强度代入式(2),得坝体渗透破坏的功能函数,见式(5)。

$$Z_s = J_{nD} - J = J_{nD} - \frac{q}{k} \frac{1}{\sqrt{h_0^2 + 2\frac{q}{k}x}} \quad (5)$$

式中: J_{nD} 为坝体 x 处的临界坡降, 此处 x 为坝体上游段据逸出点的水平距离, 其它字母符号同前面所述。

②坝基出口段坡降构建功能函数

在有限深的地基时, 对地基出口段 AE (如图 1) 的坡降计算, 可采用式 (6):

$$J = \frac{\pi(h_0 - H_2)}{2Tarsh \sqrt{\exp\left[\frac{\pi m_2 h_0}{T}\right] - 1} \sqrt{\exp\left[\frac{\pi x}{T}\right] - 1}} \quad (6)$$

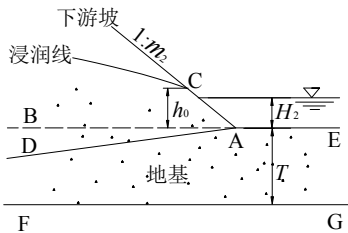


图1 有限深地基上的坝面

同样, 将渗透坡降和抗渗强度代入式 (2), 得地基渗透破坏的功能函数, 见式 (7)。

$$Z_s = J_{nF} - J = J_{nF} - \frac{\pi(h_0 - H_2)}{2Tarsh \sqrt{\exp\left[\frac{\pi m_2 h_0}{T}\right] - 1} \sqrt{\exp\left[\frac{\pi x}{T}\right] - 1}} \quad (7)$$

式中: J_{nF} 为坝基 x 处的临界坡降; x 为渗透破坏计算点距下游坡脚 (图1中A点) 的距离; 其它符号同前面所述。

(3) 土石坝渗透稳定可靠指标和渗透破坏风险率计算

建立了土石坝渗透破坏的功能函数后, 用JC法求解大坝渗透稳定的可靠指标 β 和失效概率 P_f 。

四、工程实例分析

(一) 工程概况

某水库是一座多年调节水库, 主要功能为防洪、灌溉和供水。水库枢纽由坝体、溢洪道和放水洞组成。选取主坝 0+410 断面为研究对象, 其横截面如图 2。主坝坝顶高程为 65.0m, 建基面高程为 42.0m, 死水位 51.30m, 水库正常蓄水位为 57.80m, 设计洪水位为 60.26m, 校核洪水位为 62.85m, 设计基准期 50 年。

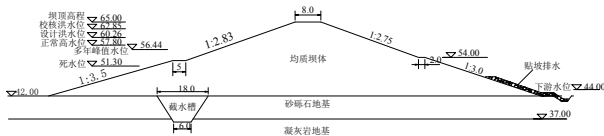


图2 主坝0+410断面示意图

(二) 抗力与荷载参数确定

(1) 荷载参数确定

①年水位峰值 H_1

年水位峰值可根据实测资料用采用数理统计方法求得年水位峰值。在缺少相关实测数据的情况下, 可根据文献[6]中

的方法确定年水位峰值的均值和变异系数, 其概型采用正态分布。本文 $H_{正态} = 15.8m$, 变异系数取 0.102。由式 (8) 得。

$$\mu_H = 0.935 * 15.8 - 0.33 = 14.443(m) \quad (8)$$

②下游水深 H_2

由于缺少下游 H_2 的观测资料, 视其为常数 $H_2 = 2m$ 。

③坝体渗透系数 k

对 0+140 断面钻孔取样数据做 K-S 概型检验, 得出坝体渗透系数服从极值 I 型分布, 其统计参数分别为: 均值 $\bar{k} = 5.05 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$, 变异系数 $\delta_k = \frac{\sigma_k}{\bar{k}} = 1.60$ 。

④坝基渗透系数 k_0

坝基为天然砂砾石层, 水平向渗透系数和竖直向渗透系数近似相同。由于坝基土料渗透强度变异系数较小, 故坝基渗透系数为常数: $k_0 = 1.0 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$ 。

⑤截水槽填土渗透系数 k_1

截水槽使用与坝体相似的土料, 因此截水槽渗透系数的相关统计参数取和坝体渗透系数相同值, 概型亦为极值 I 型分布, 其统计参数为: 初值均值 $k_1 = 5.05 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$; 变异系数: 1.6, 考虑反滤层功能退化或失效, 截水槽内粘性颗粒逐渐流失, 使得截水槽的渗透性出现缓慢变化, 其渗透系数缓变规律符合式 (1)。

⑥渗透量 q 、逸出点高度 h_0

由式 (3) ~ 式 (6) 去求渗透量 q 、逸出点高度 h_0 的相关参数。计算结果为: h_0 的均值 $\bar{h}_0 = 2.360m$, 标准差 $\sigma_{h_0} = 0.361m$; q 的均值 $\bar{q} = 2.811 \times 10^{-6} \text{ m}^3/(s \cdot m)$, 标准差 $\sigma_q = 2.478 \times 10^{-6} \text{ m}^3/(s \cdot m)$ 。

(2) 抗力参数确定

①抗渗强度 J_{nF}

根据主坝 0+410 断面有关渗透性试验, 得临界比降 0.19~0.30。由于数据过少, 假定其概型符合正态分布, 又假定该断面所有临界比降值在 (0.19, 0.30) 内, 并由 3σ 原则^[80] 临界坡降值区间为 $(\bar{J}_n - 3\sigma_{J_n}, \bar{J}_n + 3\sigma_{J_n})$ 。联立方程组可求得均值和方差。均值为 0.245, 方差为 0.01833, 变异系数为 0.075。

(三) 土石坝渗透破坏功能函数的建立及风险率计算

该坝坝基出口段容易发生渗透坡降破坏, 因此建立出口段渗透破坏的功能函数。为避免渗透破坏, 在坝后采取压砂措施, 压砂深度为 2m, 压砂后某点的渗透坡降为:

$$J = \frac{\pi(h_0 - H_2)}{2T_p arsh \sqrt{\exp\left[\frac{\pi m_2 h_0}{T_p}\right] - 1} \sqrt{\exp\left[\frac{\pi x}{T_p}\right] - 1}} \quad (9)$$

式中: T_p 为压砂后的地基厚度, 其它参数意义同前面介绍。

本例中令式 (9) 的 $x=1$; 将所求荷载与抗力代入式 (2) 中得功能函数, 编制 JC 法程序, 求解土石坝渗透稳定可靠指标 β 和风险率 P_f 。

(四) 土石坝渗透破坏风险率计算结果分析

基于 JC 法并考虑截水槽渗透系数缓变特性的逐年的浸润

线逸出点高度均值、坝基渗流量和总渗流量、渗透破坏风险率、可靠指标等值绘制相应变量随时间变化曲线，具体见图3~图6。

①由图3可知：逸出点随时间逐渐升高，前5年内变化较大，由2.360m升高到2.507m，变幅达0.147m；随后变化速率变缓，最后趋于平稳，在后45年中变幅仅为0.015m，这主要是受截渗槽渗流系数的缓变特性影响， h_0 变大说明在相同水位下，浸润线逐年升高，坝体渗透破坏风险率增加。

②由图4可知：坝基渗流量和总渗流量的变化趋势相同，都是前5年增长较快，此后增长较为缓慢，最后趋于平稳。从图中可以看出坝基渗流量占总渗流量的比重较大，坝体渗流量所占比重较小，坝体渗流量变化亦较小。

③由图5可知：渗透破坏风险率 $P_f(t)$ 是随着时间呈反正切关系变化，在前5年内，风险率增长较快，从最初的 $P_f(0)=1.94 \times 10^{-4}$ ，很快变化到 $P_f(5)=8.46 \times 10^{-4}$ ；5年以后风险率仍在呈增长的趋势，但是变化非常小，最后基本趋于平稳。

图6为渗透破坏可靠指标 β 随时间变化曲线，变化规律为：随时间逐渐降低，降低速度逐渐变缓，最后趋于稳定。

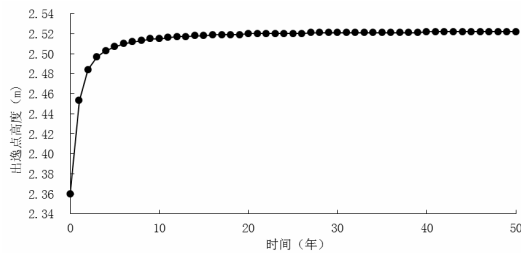


图3 逸出点高度 h_0 均值随时间变化曲线

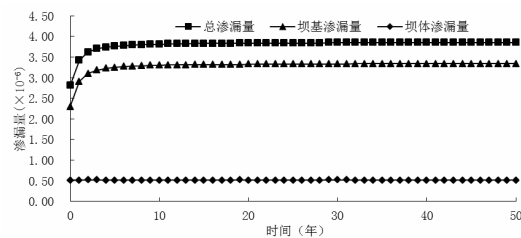


图4 渗流量均值随时间变化曲线($10^{-6} \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$)

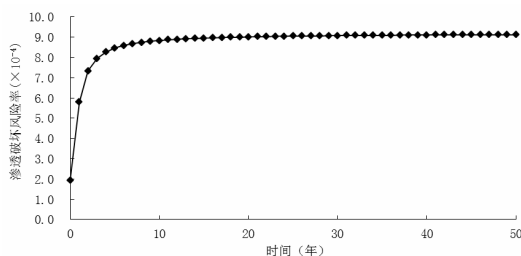


图5 基于JC法的渗流破坏风险率 $P_f(t)$ 随时间变化曲线

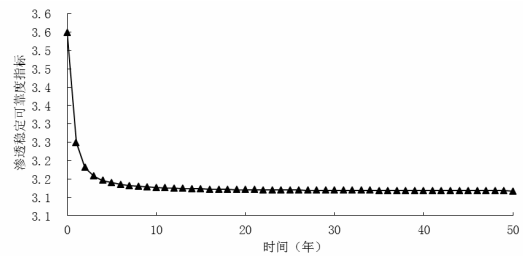


图6 渗流稳定缓变可靠指标 β 随时间变化曲线

五、总结

(1)从材料特性、荷载作用、工程老化及设计施工等方面，分析了土石坝渗透破坏的原因，探讨了土石坝渗透破坏的随机不确定性；在对地基中截水槽渗透系数的缓变特性分析的基础上，研究了土石坝截水槽渗透系数缓变性量化方法和考虑截水槽渗透系数缓变性的土石坝渗透破坏风险率分析方法。

(2)结合工程实例，采用JC法，研究了考虑截水槽渗透系数缓变性的土石坝渗透破坏风险率的变化规律，工程实例分析表明：渗透破坏风险率随时间呈反正切关系变化，在前5年内，风险率增长较快，5年以后风险率仍在呈增长的趋势，但是变化非常小，最后基本趋于平稳。

【参考文献】

[1]王薇. 土石坝安全风险分析方法研究[D]. 天津大学, 2012.

[2]中华人民共和国国家标准: 水利水电工程结构可靠度设计统一标准(GB 50199-1994)[S]. 北京, 国家技术监督局, 1994.

[3]李益, 蔡新, 徐锦才, 等. 考虑时变效应的土石坝安全风险综合评价模型[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2010, 38(06): 655-659.

[4]苑莲菊等. 工程渗流力学及应用[M]. 北京: 中国建材工业出版社, 2001.

[5]毛昶熙. 渗流计算分析与控制[M]. 中国水利水电出版社, 2003.

[6]吴世伟, 张思俊, 余强. 坝上游水位变化规律及统计量[J]. 华东水利学院学报. 1984(04): 66-74.

作者简介: 王宝强, 1987.09.21, 男, 河北赞皇, 汉, 硕士, 工程师, 研究方向, 水工结构。

李伟生, 1990.10.10, 男, 广东高州, 汉, 硕士, 工程师, 研究方向, 水工结构。