

基于计算公式的土石坝渗透稳定可靠度分析

张士辰 李 雷

(南京水利科学研究院大坝安全管理中心,江苏 南京 210029)

摘要:依据土石坝渗透坡降计算公式和可靠度理论,建立了基于计算公式的渗透稳定可靠度分析方法;并对白浪河水库大坝坝后出逸段作了渗透稳定可靠度分析,得出渗透稳定可靠指标及失效概率,该结果表现出的规律性与工程经验相符,可用于对土石坝安全性状的粗略估计。

关键词:渗透坡降;抗渗强度;计算公式;失效概率;可靠指标

中图分类号:TV223.4 文献标识码:A 文章编号:1006-7647(2006)S1-0068-03

据 1954~2001 年我国土石坝溃坝资料^[1],渗透破坏导致的溃坝数目占总溃坝数的 20.2%,仅次于漫顶,说明渗透破坏是导致溃坝的重要因素之一。工程上常基于计算公式分析土石坝渗透稳定性状,该方法通常假定坝体均匀(或分区均匀),渗透系数与抗渗强度在某区域为常数,事实上,因施工过程分层碾压、取料部位不同、卸料时的颗粒分离等因素的影响,且土体内部颗粒组成与结构的随机性,导致坝内土体多具不均匀性,表现出渗透系数与抗渗强度具有不同程度的变异性。未考虑参数的变异性使得这种传统分析法不能客观地反映大坝渗流状态。

近些年发展起来的可靠度分析方法,将有关参数视作随机变量,通过客观地考虑它们的变异性,计算出相应功能的失效概率。将传统的基于计算公式渗透稳定分析方法与可靠度理论相结合,将渗透坡降与抗渗强度视为随机变量,将使分析结果更客观地反映渗流状态,且该结果也可满足大坝风险分析^[2]的需要。本文重点基于计算公式研究土石坝渗透稳定可靠度分析方法,并以白浪河水库大坝为例,对该方法进行验证。

1 基于计算公式的渗透稳定可靠度分析方法

本文直接依据渗透坡降 J 计算公式(经验公式和规范公式等),根据可靠度理论,对渗透稳定性作可靠度分析。

土石坝坝型很多,不同坝型渗透坡降计算公式

不同,计算原则却类似,可具体坝型具体分析。

本文以不透水地基、下游坡无排水设备的均质土坝为例(见图 1),依分段法建立典型部位渗透稳定可靠度分析方法,其他部位或坝型类推。

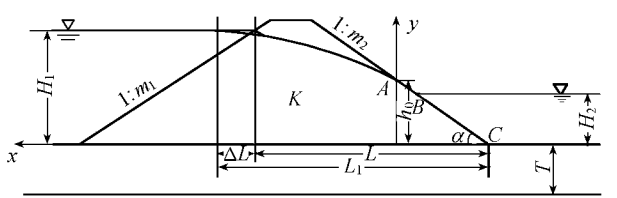


图 1 均质土坝渗流计算示意图

1.1 随机变量概率特征的确定

随机变量有抗渗强度 J_n 、渗透系数 k 、渗流量 q 、浸润线与下游坡面交点处渗流水深 h_0 。 k 、 J_n 概率特征由实验数据统计确定或假定^[3]; h_0 、 q 概率特征由公式推导确定。

联立坝体中前段和坝体后段渗流量计算公式,有^{[4]101}:

$$\begin{cases} q = k \frac{H_1^2 - h_0^2}{2(L_1 - m_2 h_0)} \\ q = k \frac{h_0 - H_2}{m_2 + 0.5} \left[1 + \frac{H_2}{h_0 - H_2 + \frac{m_2 H_2}{2(m_2 + 0.5)}} \right] \end{cases} \quad (1)$$

式中: m_1 、 m_2 为上、下游边坡系数; $L_1 = L + \Delta L$, ΔL 为上游坝体段等效计算长度,它们均被视为常数;上游水深 H_1 、下游水深 H_2 、渗透系数 k 均为已知随机变量。对式(1)中 q 在均值 $\bar{H}_1$ 、 $\bar{H}_2$ 、 $\bar{k}$ 、 $\bar{h}_0$ 处泰勒级数展开,略去二阶以上高阶项:

$$\begin{cases} q = q(\bar{k}, \bar{H}_1, \bar{h}_0) + \frac{\partial q}{\partial k} \Big|_{\bar{k}, \bar{H}_1, \bar{h}_0} (k - \bar{k}) + \frac{\partial q}{\partial H_1} \Big|_{\bar{k}, \bar{H}_1, \bar{h}_0} (H_1 - \bar{H}_1) + \frac{\partial q}{\partial h_0} \Big|_{\bar{k}, \bar{H}_1, \bar{h}_0} (h_0 - \bar{h}_0) \\ q = q(\bar{k}, \bar{H}_2, \bar{h}_0) + \frac{\partial q}{\partial k} \Big|_{\bar{k}, \bar{H}_2, \bar{h}_0} (k - \bar{k}) + \frac{\partial q}{\partial H_2} \Big|_{\bar{k}, \bar{H}_2, \bar{h}_0} (H_2 - \bar{H}_2) + \frac{\partial q}{\partial h_0} \Big|_{\bar{k}, \bar{H}_2, \bar{h}_0} (h_0 - \bar{h}_0) \end{cases} \quad (2)$$

式(2)两边同时取均值,代入均值 $\bar{H}_1, \bar{H}_2, \bar{k}$,求得均值 $\bar{q}, \bar{h}_0$ 。将 $\bar{q}, \bar{h}_0, \bar{H}_1, \bar{H}_2, \bar{k}$ 代回式(2),则非线性函

$$\begin{cases} \sigma_q^2 = \left(\frac{\partial q}{\partial k} \Big|_{\bar{k}, \bar{H}_1} \right)^2 \sigma_k^2 + \left(\frac{\partial q}{\partial H_1} \Big|_{\bar{k}, \bar{H}_1} \right)^2 \sigma_{H_1}^2 + \left(\frac{\partial q}{\partial h_0} \Big|_{\bar{k}, \bar{H}_1} \right)^2 \sigma_{h_0}^2 \\ \sigma_q^2 = \left(\frac{\partial q}{\partial k} \Big|_{\bar{k}, \bar{H}_2} \right)^2 \sigma_k^2 + \left(\frac{\partial q}{\partial H_2} \Big|_{\bar{k}, \bar{H}_2} \right)^2 \sigma_{H_2}^2 + \left(\frac{\partial q}{\partial h_0} \Big|_{\bar{k}, \bar{H}_2} \right)^2 \sigma_{h_0}^2 \end{cases} \quad (3)$$

式(3)可求 q, h_0 的标准差 σ_q, σ_{h_0} 。若考虑 k, H_1, H_2 之间互相关性,在式(3)中添加相关变量间协方差项即可。

1.2 基于计算公式的渗透稳定功能函数的建立

a. 坝体内。依据杜布衣假定^[4, 39],联立抗渗强度 J_n 功能函数表达为

$$z = J_n - J = J_n - \frac{q}{k} \frac{1}{\sqrt{h_0^2 + 2 \frac{q}{k} x}} \quad (4)$$

b. 坝后出逸段。假定该处渗流方向铅直向上,联立抗渗强度 J_n ,该处渗透稳定功能函数为

$$z = J_n - J = J_n - \frac{\pi(h_0 - H_2)}{2T \operatorname{arsh} \sqrt{\exp \frac{\pi m_2 h_0}{T}} - 1 \sqrt{\exp \frac{\pi}{T} - 1}} \quad (5)$$

式中: T 为出逸段坝基厚度,其他符号同前。

当 $z > 0$ 时,即抗渗强度大于实际渗透坡降,土体处于渗透稳定状态;当 $z = 0$ 时,土体处于渗透稳定极限状态;当 $z < 0$ 时,土体处于渗透失稳状态。

1.3 可靠指标和失效概率的计算

国际安全度联合委员会利用JC法计算可靠指标和失效概率,将功能函数及相关随机变量的概率参数输入程序JC.FOR^[5],输出渗透稳定可靠指标 β 与失效概率 P_f 。

1.4 各向异性在渗透稳定可靠度分析中的处理方法

实际工程中坝体逐层填筑,不可避免有成层现象,使坝内填料渗透各向异性。为真实地反应渗透坡降的分布,对渗透系数做近似变换^[4, 36] $k' = \sqrt{k_x k_y}$,使其变为各向同性等效平均渗透系数 k' 。若假定各向异性系数 $\lambda = k_x/k_y$ 相同,则 k' 概率特征值为 $k' = \bar{k}_x/\sqrt{\lambda}, \sigma_{k'} = \sigma_{k_x}/\sqrt{\lambda}$,其中 k_x 表示水平渗透系数, k_y 表示铅直渗透系数。

2 工程实例

2.1 工程概况及随机变量参数的确定

白浪河水库位于山东省潍坊市白浪河中游,水

库大坝为均质土坝,坝基为砂砾石强透水层,运行过程中不少部位出现渗透变形,坝后出逸段更为严重。为此,在坝后设置了2 m厚压砂盖重,在12个断面设置了18支测压管。选取主坝0+410断面坝后出逸段中 P_4 测点为代表位置(距离坝脚1 m),对其进行铅直向上的渗透稳定可靠度分析,如图2所示,涉及的随机变量概率参数见表^[6-8]。

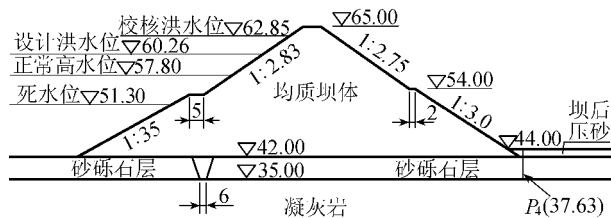


图2 主坝0+410断面及部分测压管布置示意图

表1 坝后出逸段渗流稳定可靠度分析所需随机变量概率参数

随机变量	概型	均值	标准差	变异系数
抗渗强度 J_n	正态、对数正态	0.245	0.01833	0.075
坝体渗透系数 $k/(10^{-5} \text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$	极值 I	5.05	8.07	1.6
坝基渗透系数 $k_0/(10^{-3} \text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$	常数	1.0		
截水墙渗透系数 $k_1/(10^{-5} \text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$	对数正态	8.2	13.12	1.6
上游水深 H_1/m	极值 I	12.741	2.446	0.192
下游水深 H_2/m	常数	2.0		
坝基厚度 T/m	常数	7.0		
渗流量 $q/(10^{-6} \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	正态、对数正态	3.83	0.515	0.134
特征水深 h_0/m	正态、对数正态	2.52	0.343	0.136

注 ① k, k_1 概率参数为各向同性等效平均渗透系数概率参数; ② k_0, H_2, T 3 参数视为常数,因缺少资料对其进行统计; ③ h_0, q 及 k, k_1 统计特性依据1.1节和1.4节方法获得。

2.2 功能函数的建立

取 P_4 点为研究对象,依据式(5),建立以下功能函数:

$$\text{压砂前 } z = J_n - J = J_n - \frac{0.298(h_0 - 2.0)}{\operatorname{arsh} \sqrt{3.642 h_0 - 1}} \quad (6)$$

$$\text{压砂后 } z = J_n - J = J_n - \frac{0.27(h_0 - 2.0)}{\operatorname{arsh} \sqrt{3.642 h_0 - 1}} \quad (7)$$

2.3 渗透稳定可靠指标和失效概率

将 h_0, J_n 概率参数和功能函数式(6)(7)代入程序 JC.FOR 得计算结果如表 2 所示。

表 2 坝后出逸段渗透稳定可靠度计算成果

工况	J_n 概型	h_0 概型	可靠指标 β	失效概率 $P_f/10^{-6}$
压砂前	正态	正态	3.598	165.0
		对数正态	3.380	431.0
	对数正态	正态	3.571	178.3
		对数正态	3.383	355.0
压砂后	正态	正态	6.161	<1.00
		对数正态	5.662	<1.00
	对数正态	正态	6.420	<0.40
		对数正态	5.663	<0.40

2.4 计算结果分析

表 2 中的渗透稳定可靠指标和失效概率,两者具有一一对应关系。鉴于缺少土石坝渗透稳定可靠度判别准则,故无法从失效概率的角度判别该处渗透稳定状态。

比较压砂前、后渗透稳定可靠指标,压砂后可靠指标较压砂前增大 2.0~3.0,说明设置压砂盖重后,坝后铅直渗透稳定性得到很大程度的缓解。

2.5 讨论

基于计算公式进行可靠度分析时,因随机变量很多,涉及的基本参数一般有大坝几何尺寸、各部位渗透系数、抗渗强度 J_n 、上游水位 H_1 、下游水位 H_2 等,且其变异性很难完全探测清楚并函数化,不可避免要忽略次要随机变量的影响(例如,可靠度分析中很难考虑几何尺寸变异性),使基于计算公式的可靠指标通常偏大,失效概率偏小。因此,基于计算公式的渗透稳定可靠度分析结果宜用于工程安全性状的粗略估计。

3 结 语

a. 基于计算公式进行土石坝渗透稳定可靠度分析时,坝型复杂性导致渗透坡降计算公式多样化,故该法只能为一种原则,分析时需沿用传统渗透稳定理论中的概念。

b. 基于计算公式法基本步骤:假定渗透坡降方向水平,联立实际坡降 J 公式与抗渗强度 J_n 公式建立功能函数,依 JC.FOR 计算渗流安全可靠指标和失效概率。求渗透坡降 J 概率参数时,将相关参数视为随机变量,利用一阶泰勒展开对非线性公式线性化,近似得出 J 均值、标准差。

c. 基于观测资料的渗透稳定可靠度分析方法比基于计算公式法客观、准确,建议对土石坝进行渗

透稳定可靠度分析时,首先考虑基于观测资料法,基于计算公式法最好用作粗略估计。

参考文献:

[1] 李雷,彭雪辉,王昭生.我国水库大坝溃决模式和溃坝概率分析研究[R].南京:南京水利科学研究院,2004:6-8.
[2] Guidelines on Risk Assessment[S].Australian National Committee on Large Dams(ANCOLD) 2003.
[3] 张士辰,李雷.粗砂渗透系数与抗渗强度概型分布[J].水利水电工程学报,2004(3):58-61.
[4] 毛昶熙.渗流计算分析与控制[M].北京:中国水利水电出版社,1990.
[5] 张士辰.土石坝渗透稳定可靠度分析方法研究[R].南京:南京水利科学研究院,2004:87-92.
[6] 山东省水利工程质量检测中心站,山东省水利科学研究院.潍坊市白浪水库大坝补充勘探报告[R].济南:山东省水利科学研究院,2002.
[7] 山东省潍坊市白浪水库大坝渗流安全分析[R].南京:南京水利科学研究院,2002.
[8] 白浪水库大坝建设和运行管理报告[R].潍坊:潍坊市白浪水库管理局,2002:12-13.

(收稿日期 2005-07-18 编辑 熊水斌)

·简讯·

清江水布垭电站下闸蓄水

2006 年 10 月 19 日,湖北清江水布垭电站正式下闸蓄水,这是继清江上的隔河岩、高坝洲两座大型电站建成投产后,第三座梯级电站由建设期转入建设和发电准备期。

水布垭电站位于湖北省巴东县境内,是国家第一个水电流域开发试点——清江梯级电站开发的龙头工程,属国家“十五”和“十一五”规划重点建设项目。水布垭电站大坝为混凝土面板堆石坝,2006 年 10 月 12 日填筑到顶,最大坝高 233 m,为世界同类坝型之最。水库具有多年调节性能,总库容 45.8 亿 m^3 ,正常蓄水位 400 m 高程。电站设计安装 4 台水轮发电机组,最大出力 184 万 kW。该工程 2002 年初正式开工建设,当年 10 月工程截流。按照计划,2009 年 4 台机组将全部投产运行。水布垭电站建在长江支流清江上,是长江中游防洪控制性骨干工程,也是华中电网乃至全国电网联网后的重要调峰调频骨干电源。工程建成后,将对荆江防洪、湖北和华中电网的安全稳定运行发挥巨大作用。水布垭电站不仅是世界坝工领域的标志性工程,同时也是以宜昌为中心的世界最大水电基地的重要组成部分。

(编辑部供稿)