DOI:10.3880/j.issn.1006-7647.2008.02.014

渗漏量监控指标的拟定方法

陈红梅[1,2],郑东健[1,2],娄一青[1,2]

(1.河海大学水利水电工程学院,江苏 南京 210098;2.水资源高效利用与工程安全国家工程研究中心,江苏 南京 210098)

摘要:为了分析大坝和坝基抗渗性能的好坏,采用典型小概率法拟定大坝渗漏量安全监控指标。通过比较实测值与指标值来反映坝体和坝基抗渗性能的好坏。以某混凝土宽缝重力坝为例进行坝基总渗漏量观测,选取 1965~2005 年共 41 个样本进行统计分析,结果表明本文方法可以有效地反映坝基抗渗性能的好坏。

关键词:大坝渗漏量;安全监控指标;典型小概率法

中图分类号:TV698 文献标识码:A 文章编号:1006-7647(2008)02-0056-03

Method for determination of safety-monitoring index of seepage//CHEN Hong-mei[1,2], ZHENG Dong-jian[1,2], LOU Yi-qing[1,2]

(1. *College of Water Conservancy and Hydropower Engineering*, *Hohai University*, *Nanjing* 210098, *China*; 2. *National Engineering Research Center of Water Resources Efficient Utilization and Engineering Safety*, *Nanjing* 210098, *China*)

Abstract: The safety-monitoring index of seepage was determined by use of the typical low probability method, and the impermeability of the dam body and its foundation was analyzed through comparison of measured data with the index value. With a slotted gravity dam taken as an example, the total seepage quantity of the dam foundation was observed. Statistical analysis of 41 samples chosen from 1965 to 2005 shows that the method proposed in this paper can effectively reflect the impermeability of dam foundations.

Key words: dam seepage; safety-monitoring index; typical low probability method

1 问题的提出

安全监控指标是评价和监测大坝安全的重要指标,对于馈控大坝安全运行十分重要,也是国内外坝工界研究的重要课题。由于影响大坝安全的因素很多,因而拟定大坝安全监控指标的难度较大,国外在这方面的报道相对较少。在国内,这方面也主要应用于拟定坝体变形安全监控指标,如:吴中如[1]提出典型小概率法、置信区间法、极限状态法拟定坝体和坝基的位移监控指标;吴中如等[2]将力学模型引入大坝安全监测领域,并依据混凝土大坝的变形规律提出了拟定混凝土大坝变形的一、二、三级监控的原理和方法;郑东健等[3]用混合法拟定了大坝水平位移的监控指标,即通过结构分析和建立数值模型,计算大坝水平位移的水压分量和给定概率水平下温度分量的极值,进而拟定水平位移的监控指标;吴相豪等[4-5]根据碾压混凝土坝的结构特点,建立了坝体渗流场与应力场耦合的弹塑性有限元分析模型,探讨了拟定碾压混凝土坝变形一、二级监控指标的方法。

对于大坝的安全运行而言,除需要考虑坝体变形和地基强度等安全监测重要问题外,及时掌握坝体和坝基渗漏量的情况也是十分重要的。由于坝体和坝基大都是透水材料构筑的,在大坝建成蓄水后,坝体和坝基都将承受巨大的水压力而发生不同程度的渗流现象,这对大坝的运行是不利的。为此,本文通过建立统计模型,基于典型小概率法研究了渗漏量监控指标的拟定方法,并且通过比较实测值与指标值来反映坝体和坝基抗渗性能的好坏。

2 典型小概率法拟定大坝渗漏量安全监控指标的原理

2.1 典型小概率法的原理

从实测资料中选取不利荷载组合情况下的监测效应量 X_{mi},例如大坝的坝基总渗漏量或其数学模型中某监测效应量,则 X_{mi} 为随机变量,每年有一个子样,因此由观测资料系列得到一个样本子数为 n 的样本空间:

$$X = \{X_{m1}, X_{m2}, \cdots, X_{mn}\} \tag{1}$$

基金项目:国家自然科学基金项目(50539030-1-3);"973"计划项目(2002CB412707);国家科技支撑计划项目(2006BAC14B03);国家自然科学基金雅砻江水电开发联合研究基金重点项目(50539110);中国水电工程顾问集团公司科技项目(CHC-KJ-2007-02)

作者简介:陈红梅(1982—),女,广西桂林人,硕士研究生,从事水工结构安全监控研究。E-mail:fzchm@163.com

该样本 X 一般是一个小子样样本空间，估计其数字特征值的公式为

$$\bar{X} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} X_{mi} \tag{2}$$

$$\sigma_X = \sqrt{\frac{1}{n-1}\left(\sum_{i=1}^{n} X_{mi}^2 - n\bar{X}^2\right)} \tag{3}$$

用小子样统计检验方法（如 A-D 法、K-S 法）对该样本进行分布检验，确定其概率密度函数 $f(X)$ 的分布函数 $F(X)$（如正态分布、对数分布和极值Ⅰ型分布等）。令 X_m 为监测效应量或某一荷载的极值。当 $X > X_m$ 时大坝将会出现异常或险情，其概率为

$$P = P_\alpha = \alpha = \int_{X_m}^{+\infty} f(X)\,\mathrm{d}X \tag{4}$$

求出 X_m 分布后，估计 X_m 的主要问题是确定失事概率 P_α（即 α），其值根据大坝重要性来确定。确定 α 后，由 X_m 的分布函数直接求出 $X_m = F^{-1}(\bar{X}, \sigma_X, \alpha)$。如果 X_{mi} 是监测效应量的几个影响分量，那么将各影响分量叠加才是监测效应量的极值。

2.2 典型监测量的选取

结合工程的具体情况，应选择对大坝及基础安全状态最具有控制意义的关键部位和对安全最敏感部位的效应量建立安全监控模型，从而拟定安全监控指标。对于渗漏量可选择坝体或坝基总的渗漏量或关键、敏感、薄弱部位的渗漏量作为拟定坝体渗漏量的安全监控指标的效应量。

2.3 典型效应量分布的检验

典型小概率法将 X_{mi} 作为随机变量，因此，必须根据典型监测量的子样本分布情况来识别其母体的分布类型。一般对于水工建筑物起监控作用的随机监测量子样较少，属于小子样非参数检验问题。经验表明，K-S 法效果较好，识别率较高。因此，本文采用 K-S 法进行典型监测量的分布检验。

在一般情况下，对水工建筑物起监控作用的随机监测量，其分布类型主要有正态分布、对数正态分布、极值Ⅰ型分布等。

3 实例分析

3.1 工程概况

某大坝为混凝土宽缝重力坝，坝顶高程384.5 m，坝底高程 313.5 m，最大坝高 71.0 m，坝顶全长412 m。该大坝由 21 个坝段组成，从右至左坝段编号为 2 ~ 22 号，其中河床 4 个坝段（12 ~ 15 号）为溢流坝段，左岸采用心墙式土石混合坝接头，长 51.0 m，水库为年调节水库。3 ~ 22 号坝段共布置9 个渗流量观测点，观测坝体、坝基及左岸土坝坝基总渗流量。在坝体排水的引出管处用量杯和量筒测量坝体的渗流量，一般每月观测 1 次，运行初期测量频率较高，由于渗水量很小，目前大部分坝段已停测；而坝基总渗流量则用布置在坝体排水沟出口处的三角量水堰观测，每月观测 1 次。该大坝已运行 40 多年，经历了多种工况的考验。2000 年后，大坝 6 号、16 号和 18 号坝段的坝基总渗流量明显比其他坝段测点大，尤其是 16 号坝段的 WE4 测点受上游水位影响较大。而 WE4 测点是用于观测整个大坝坝基总渗漏量的，是监控坝体渗漏量的关键测点，故本文对该测点坝基总渗漏量的安全监控指标进行估计。

3.2 子样的选择

根据坝基总渗漏量原型观测资料可知，一般在高上游水位、低气温、大降雨情况下坝基总渗漏量达到最大值，在低水位、高气温、少降雨情况下坝基总渗漏量达到最小值。故采用该大坝每年坝基总渗漏量最大值作为监测效应量样本。

该大坝 1964 年建成蓄水并开始监测大坝渗漏量。最初监测时发现坝基和坝体渗漏量较大，于是对其进行了防渗补强加固。再进行观察监测时，发现渗漏量逐渐减小。该大坝防渗补强加固前后所经历的工况不一样，故选取 1965 ~ 2005 年共 41 个样本，见表 1。

表 1　16 号坝段 WE4 测点坝基总渗漏量每年最大值统计　L/min

年份	最大值	年份	最大值	年份	最大值
1965	80.40	1979	37.92	1993	16.62
1966	54.33	1980	23.21	1994	11.02
1967	42.39	1981	26.72	1995	19.25
1968	50.08	1982	22.74	1996	17.61
1969	41.96	1983	25.88	1997	19.25
1970	50.32	1984	19.11	1998	32.21
1971	40.44	1985	15.63	1999	20.66
1972	22.74	1986	14.10	2000	23.63
1973	52.29	1987	18.44	2001	21.00
1974	27.40	1988	26.21	2002	39.00
1975	47.91	1989	27.73	2003	45.00
1976	55.36	1990	22.72	2004	11.10
1977	35.10	1991	23.64	2005	33.90
1978	52.80	1992	26.88		

3.3 分布检验

利用 K-S 法对 WE4 测点坝基总渗漏量的最大值进行检验，结果表明该测点坝基总渗漏量每年的最大值服从正态分布，即 $X \sim N(\bar{X}, \sigma_X^2)$，其中特征值 $\bar{X} = 33.00$ L/min，$\sigma_X = 17.60$ L/min。因此当坝基总渗漏量 X 大于 X_m 时，其概率计算公式为

$$P = P_\alpha = \alpha = \int_{X_m}^{+\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_X}\exp\left[-\frac{(X-\bar{X})^2}{2\sigma_X^2}\right]\mathrm{d}X = \int_{X_m}^{+\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\times 17.60}\exp\left[-\frac{(X-33.00)^2}{2\times 17.60^2}\right]\mathrm{d}X \tag{5}$$

3.4 监控指标的确定和结果分析

由统计理论可知，当 α 足够小时，可以认为这是小概率事件，即该事件几乎不可能发生，若发生则为异常或危险情况。利用这个原理，对该大坝的 16 号坝段取 $\alpha = 1\%$ 的概率水平，由式(5)可求得相应坝基总渗漏量的监控指标为 $X_m = 98.38 \pm \Delta_1$(L/min)，其中 Δ_1 为考虑渗漏量允许的观测中误差的极值。

该大坝从 1965 年(补强加固)以来，经历各种运行工况的考验，遭遇了多种较不利的荷载工况(如 1965 年 8 月 23 日降雨量大，上游水位较高，坝基总渗漏量达 80.40 L/min 为最不利荷载工况)，所以用该样本拟定出来的安全监控指标是这个大坝在该工况下的极值。由上述资料分析得：这座大坝运行40 多年来，坝基总渗漏量未超过 X_m，因此该监控指标反映出该坝坝基抗渗性能较好，加固补强效果较好。

这里要指出的是：①当渗漏量测值的分布检验不满足 K-S 分布规律时，可将渗漏量的影响因子(如库水位、气温、时效等)测值单独拿出来做 K-S 检验，若满足，可按上述方法求出其对应因子测值警戒值；若某一项不满足，可采用其他方法(如统计模型法、混合模型法等)算出对应极值，最后再叠加即可确定出渗漏量的监控指标。②只要样本数据系列中包含该不利荷载工况的监测效应量，即使样本空间不同，按典型小概率拟定出来的监控指标值相差不大。③若大坝没有遭遇过最不利荷载组合，或是资料系列很短，则在以往监测效应量的资料系列中不包含最不利荷载组合时的监测效应量。那么基于这些监测资料，采用典型小概率法拟定的监控指标只能用来预测大坝遭遇该荷载范围内的效应量，其值不一定是警戒值，只是现行荷载条件下的极值。④由于大坝和坝基在运行过程中随着时间的推移，条件在不断的变化，如采取工程措施或遭遇特殊的工况等，因此，随着观测资料的积累，渗漏量的监控指标应相隔一段时间后再进行校验和修正。

4 结 语

a. 坝基具有一定的渗透性，其总渗漏量的大小直接反映了坝基处理措施的有效性。本文基于典型小概率法拟定的坝基总渗漏量安全监控指标能够对坝基渗透性的好坏做出诊断。

b. 典型小概率法定性联系了对强度和稳定不利的荷载组合所产生的效应量，并根据以往的观测资料来估计监控指标。在求算渗漏量监控指标后，以该渗漏量作为监控值，通过有限元计算，求出此不利工况下大坝的渗流场，再结合工程实际情况，按照设计规范及纯摩擦和抗剪断公式进行坝基抗滑稳定校核计算[6]，以校核在该总坝基渗漏量情况下坝基是否满足强度和稳定控制条件。

参考文献：

[1] 吴中如. 水工建筑物安全监控理论及其应用[M]. 北京：高等教育出版社，2003：361-362.

[2] 吴中如，顾冲时. 大坝原型反分析及其应用[M]. 南京：江苏科学技术出版社，2000：100-106.

[3] 郑东健，刘广胜，顾冲时. 大坝水平位移监控指标拟定的混合法[J]. 水电自动化与大坝监测，2002，26(2)：42-44.

[4] 吴相豪，吴中如. 碾压混凝土坝变形一级监控指标的拟定方法[J]. 水利水电技术，2004，35(9)：136-138.

[5] 吴相豪. 探讨碾压混凝土坝变形二级监控指标的拟定方法[J]. 水电能源科学，2005，23(5)：64-66.

[6] 郑东健，卢秋生. 基于扬压力实测资料的古田溪四级大坝稳定分析[J]. 水电自动化与大坝监测，2003，27(6)：56-58.

(收稿日期：2007-06-04 编辑：高建群)

(上接第 50 页)

因素之一，也直接影响了计算分析的精度，应进一步采用试验或反演的方法确定其变化范围。

参考文献：

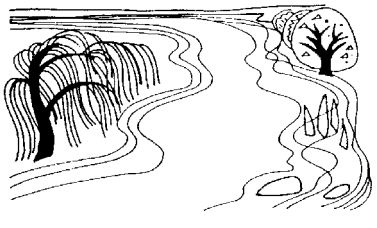
[1] 潘家铮. 重力坝设计[M]. 北京：水利电力出版社，1987：158.

[2] DL5108—1999. 混凝土重力坝设计规范[S].

[3] 任青文，余天堂. 块体单元法的理论和计算模型[J]. 工程力学，1999，16(1)：67-77.

[4] 任青文，钱向东，赵引，等. 高拱坝沿建基面的破坏和安全度研究[J]. 水力发电，2002(12)：10-12.

[5] ZHAO Yin, SHEN Qiang-xi, REN Qing-wen, et al. Study on reinforcement of stability of abutments and foundation of arch dam[C]//Martin Wieland, Ren Qing-wen, John S Y T. New development in dam engineering. London: A A Balkema Publishers, 2004: 1103-1110.

[6] 赵引，陆晓敏，任青文. 金沙江向家坝水电站大坝深浅层抗滑稳定分析研究报告[R]. 南京：河海大学土木工程学院，2003.

(收稿日期：2007-10-08 编辑：高建群)