

水电工程安全监测 技术文集

邵乃辰 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

水电工程安全监测

技术文集

邵乃辰 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本文集是有关水电工程安全监测技术的论文汇编,共38篇论文,内容包括四个部分。第一部分是监测资料分析与反馈,主要是介绍国内一些水电工程监测资料的分析成果和运行信息反馈;第二部分是监测资料整理计算,包括监测资料的整理计算方法、分析成果、统计分析和灰色理论的应用等;第三部分是监测仪器与系统,包括监测仪器的应用、计算方法的研究、安全监测自动化系统的讨论等;第四部分是监测专题讨论,包括混凝土坝温度场、坝基扬压力、钢筋混凝土内的应力分布和钢筋计的计算方法、有关监测仪器的检验、安全监测施工监理、统计分析在混凝土试验研究中的应用等。

本文集可供水电工程安全监测技术工作者和监测仪器制造商参考。

图书在版编目(CIP)数据

水电工程安全监测技术文集 / 邵乃辰著. —北京: 中国水利水电出版社, 2009

ISBN 978 - 7 - 5084 - 6284 - 4

I. 水… II. 邵… III. ①水利工程-安全监察-文集
②水力发电工程-安全监察-文集 IV. TV51 - 53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 020980 号

书 名	水电工程安全监测技术文集
作 者	邵乃辰 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京市地矿印刷厂
规 格	184mm×260mm 16开本 13.5印张 320千字
版 次	2009年4月第1版 2009年4月第1次印刷
印 数	0001—1500册
定 价	42.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

水电工程的安全不仅取决于科学合理的设计、施工和运行管理，而且也不离开贯穿于工程生命期的安全监测。自 20 世纪 50 年代后期以来，我国大中型水电工程广泛开展了工程安全监测工作，积累了丰富的实践经验，取得了重大的技术进步。

水电工程在施工和运行过程中，需要依靠先进、可靠的监测设备和技术，获取真实的原型观测数据。通过科学整理和分析，可以准确掌握工程安全性态，及时发现工程隐患，合理提出安全预测，客观找出内在规律，从而指导工程设计、施工和运行管理，保证工程安全。

由于不同水电工程及不同水工建筑物在自然条件、结构特点、运行规律、安全性态等方面各有不同，因此，其监测要求和监测技术也各具特色。概括和总结这些水电工程及水工建筑物的安全监测经验，对于促进监测技术的发展具有重要意义。

邵乃辰同志从事水电工程安全监测工作近 40 年，在理论和实践方面都取得了丰硕的成果。现将其在安全监测方面的著文汇编成《水电工程安全监测技术文集》，以兹交流。本文集集中反映了著者在监测仪器系统的应用与运行、监测数据的整理与计算、监测资料的分析与反馈以及一些安全监测专题研究等方面的实践经验和独到见解。

相信该文集对水电工程安全监测技术的应用和发展将大有裨益。

是为序。

中国水电顾问集团成都勘测设计研究院

院长

邵乃辰

我国水能资源十分丰富，随着社会主义建设的发展和科学技术的进步，水电事业也得到相应的快速发展，水电工程的数量逐年增多，其规模也不断增大。在筑坝兴利的同时，还面临着工程的安全问题。由于水电工程的规模越来越大，地形、地质条件却越来越复杂，一些经过长期运行的工程已有老化趋势，一旦失事，将造成人民生命财产的巨大损失，因此加强水电工程的安全监测工作是一项十分重要的任务。

水电工程安全监测工作不仅是工程安全的耳目，能够监控工程安全，而且在充分发挥工程效益、提高设计水平、改进施工方法等方面都是行之有效的手段，因而受到国内外坝工界的普遍重视，并已发展成为水电工程的一个重要组成部分。近年来，水电工程安全监测技术得到了迅猛的发展，广大安全监测工作者付出了辛勤劳动，发挥了自己的聪明才智，在监测仪器、施工技术、计算方法、监测成果分析和安全监控理论等方面发展了新技术，创建了许多新经验和新理论，应加强交流，相互学习，以期适应国家能源建设的需要，促进监测技术发展 to 更高的水平。

著者曾长期从事大坝安全监测工作，在以往数十年的工作中，陆续将自己的心得体会和研究成果撰写成论文发表于有关的刊物上。近来在成都勘测设计研究院领导的鼓励和支持下，重新整理、校核这些论文，并进行必要的修改补充，选择部分论文汇编成《水电工程安全监测技术文集》，供水电工程安全监测工作者参考。

成都勘测设计研究院郑声安院长为本文集撰写了序，特此感谢！

本文集在编写和出版过程中得到成都勘测设计研究院工程安全监测中心的领导和有关同志的大力支持和帮助，著者表示衷心感谢！

曾经与著者共同撰写论文的同志，在论文中均已列出，对于他们的劳动和合作，著者也表示感谢！

限于著者水平，本文集中难免存在错误和不足之处，敬请读者批评指正。

著者

2008年10月10日

序 前言

一、监测资料分析与反馈

龚嘴大坝水平位移的统计分析	1
刘家峡大坝左岸绕坝渗流观测与分析	8
以礼河水电站高压钢管道应力分析	14
刘家峡大坝坝基扬压力观测分析	22
葛洲坝二江泄水闸闸墩工作性态	29
葛洲坝二江泄水闸闸基和护坦工作性态	35
乌江渡水电站运行信息反馈	42
乌江渡水电站运行信息反馈 (续)	50
乌江渡库水温和坝体温度分析	57
黑龙滩水库大坝渗流监测资料分析	64

二、监测资料整理计算

应变计资料整理方法	71
水工建筑物原型观测物理量的统计分析	79
统计理论在围岩变形分析中的应用	85
灰色系统理论在围岩变形分析中的应用	90
二滩拱坝应变计的组特点及其计算方法	94
由应变计测值计算应变的讨论	100
混凝土应力应变的量测和计算	105

三、监测仪器与系统

大坝安全监测自动化	109
美国基康压应力计的使用	114

国外安全监测仪器在二滩工程的应用	118
测压管若干问题讨论	121
差动电阻式仪器温度计算方法的讨论	124
差动电阻式仪器温度检验限差的讨论	127
钢弦式仪器的计算方法	130
差动电阻式仪器的温度补偿问题	135
关于应变计若干问题的讨论	139

四、监测专题讨论

混凝土重力坝稳定温度场的分析	143
温度对混凝土自生体积变形的影响	150
也谈重力坝抽水减压后的扬压力	156
关于钢筋混凝土内的应力分析	159
钢筋计观测资料整理方法	164
滑坡及其监测	171
二滩拱坝安全监测施工监理	178
用最小二乘法检验监测仪器的方法	183
关于《混凝土坝安全监测技术规范》中仪器检验的讨论	187
回归分析在混凝土材料试验中的应用	191
混凝土比热试验的数据处理	198
混凝土绝热温升历时过程的数学拟合	203

一、监测资料分析与反馈

龚嘴大坝水平位移的统计分析

邵乃辰

提 要 坝体位移是监测大坝安全性的一项重要指标。本文用逐步回归方法对龚嘴大坝的水平位移测值进行统计计算,并分析了库水位、温度和时效诸因素的作用。本文提出了用空气温度的各种“滞后”影响作为温度因子,并在分析计算中取得了满意的结果。

关键词 水平位移 统计分析 逐步回归 因子

1 引言

坝体位移是监测大坝安全性的一项重要指标,位移值的分析对于了解坝体结构性态,评估坝体安全性以及校核设计参数等都有重要意义。本文根据四川省龚嘴电厂大坝垂线仪的水平位移测值进行统计分析。垂线仪设置在第九坝段的三个高程 528.825m (A)、496.020m (B)、476.000m (C) 上(见图 1),观测相对于高程 459.246m 的水平位移。从 1972 年 8 月 14 日作为基准开始观测,至今已有 11 年的观测资料,观测值规定向下游为正值。

用概率统计方法^[1,2]编制逐步回归计算程序,建立测值的最优统计方程,分离出各个因素的单个影响,并作出预测预报。

大坝水平位移值 y , 可以看作是一个服从正态分布的多元连续型随机变量,其数学期望为 E , 方差为 σ^2 。我们假定它和 $n-1$ 个

因素(亦称自变量或因子) $X_1, X_2, \dots, X_{n-1}$ 有线性关系,这样,可根据 m 个实测值(子样)建立起 y 和 $x_1, x_2, \dots, x_{n-1}$ 的多元回归方程:

$$\hat{y} = b_0 + \sum_{i=1}^{n-1} b_i x_i \quad (1)$$

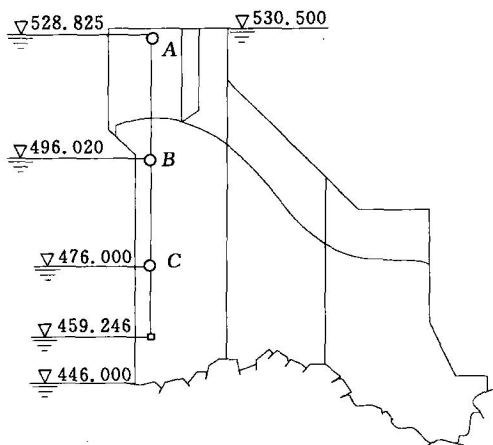


图 1 垂线仪布置图

式中 $\hat{y}$ ——因变量的经验回归值；

b_0 、 b_i ——回归常数。

实际计算表明，所假设的 $x_1, x_2, \dots, x_{n-1}$ 个因子中，并不是每一个都是和 y 有显著关系的；另外，各因子之间可能还有相关关系，因而降低了回归方程的效果和稳定性。因此，回归方程还有一个优选的问题，即希望在全局变量中选出和 y 关系最密切，且最具有代表性的 L 个因子 $X_{K1}, X_{K2}, \dots, X_{KL}$ 作 y 的一个偏回归方程：

$$\hat{y} = b_0 + b_{K1} X_{K1} + \dots + b_{KL} X_{KL} \quad (2)$$

用以大致描述 y 的变化情况。在这个方程中，且仅包含对 y 作用显著的因子。逐步回归就是建立这种最优回归方程的方法。在计算过程中，对回归方程中所含的因子逐个进行检验，剔除那些不显著的因子，选择作用显著的因子，因此，如此算得的偏回归方程式 (2) 中包含，且仅包含那些对 y 作用显著的因子。

2 因子的选择

2.1 影响位移的因素

考察观测资料，有这样一些特点：①水平位移测值作年周期变化，同气温变化密切相关，但有一些滞后，一般在 2~3 月向下游位移达最大值，8~9 月向上游位移达最大值；②水位变化对位移有一定的影响，如 1978 年 10 月水位升高后，坝顶明显偏向下流；③水平位移值均为正值，说明在首次观测以后，坝顶一直处于初始位置的下游，其原因可能是开始观测日期（8 月）正是坝顶向上游位移达到最大值的时刻。

综上所述，龚嘴大坝的水平位移值应包含三个影响因素，因此具有三个分量：水库水位变化引起的位移分量 y_H ，坝体温度变化引起的位移分量 y_T ，随时间推移的不可逆变形引起的位移分量 y_θ ，即

$$y = y_H + y_T + y_\theta \quad (3)$$

2.2 库水位因子

关于库水位因子的选择，文献 [3] 在对响洪甸拱坝进行统计分析中曾作了全面的分析，其基本原则也适用于龚嘴重力坝。参照重力坝位移的特点，主要考虑以下一些因素：

(1) 由于坝体上游面的水压力引起的位移，和水位 H 、 H^2 及 H^3 成线性函数关系。

(2) 由于坝体上游面静水压力作用使地基面转动而引起的位移也是 H 、 H^2 及 H^3 的线性函数。

(3) 库水重引起库底沉陷使地基转动而引起的位移主要和 H 有关。

综上所述，在建立回归方程时，关于水位引起的位移，涉及 H 、 H^2 及 H^3 三个因子，可表示为

$$y_H = \sum_{i=1}^3 b_i H^i \quad (4)$$

由于龚嘴电厂库水位一直在高程 520m 以上运行，所以实际因子取 $H = h - 520$ (h 为实际水位高程)。同时，坝体位移为弹性变形，直接受水位变化影响，故分析时取当时水位。

2.3 温度因子

对温度因子的选择,目前多数采用坝内各测点的温度,有的还加坝体平均温度及其梯度等作因子,这种方法在物理意义上容易理解,但在实际计算中存在一些问题:

(1) 如坝内温度测点较少,或测点代表性较差时,温度因子难以选择。

(2) 需要输入大量温度数据信息。

(3) 由于坝内各测点温度、平均温度和温度梯度之间存在相关性,因而即使选上某一温度因子,也不能认为就是这个因子的作用,而是代表了与它相关的一群温度因子的共同作用。如果根据方程中出现的因子来分析那些因子作用显著与否,恐怕不符合实际情况。当回归方程中有密切相关的因子时候,往往不能简单地用物理观点解释单独项的意义^[3]。

本文采用另一种选择温度因子的方法:不管具体测点的温度,而是用空气温度并考虑对坝内温度的滞后影响作为温度因子。

坝内温度状态归根结底取决于外界气温的变化。在大坝运行期,当水泥的水化热影响消除后,坝内和基础部位的温度分布基本上可以分成两个区:稳定温度区和变温区^[5]。

(1) 稳定温度区,包括坝体中心(离边界 5m 以上)、坝基和泥沙淤积层。在多年运行后,这个部位温度稳定,不随外界气温变化。就龚嘴大坝而言,坝内确实存在这个稳定温度区,其温度维持在 16℃。

(2) 变温区,主要指坝体上下游离坝面约 5m 以内的边界区,这个区域的温度随外界气温作年周期变化,温度是时间和离边界距离的函数。其中下游边界直接受气温和太阳辐射作用,变化较剧烈。上游边界受水温影响,而水温又受气温影响,因而上游边界温度受气温间接影响,变化较平缓,滞后也较大。这种差别是造成坝内上下游温度梯度的主要原因。

把坝体近似地看作一半无限大物体,气温作为振幅 T_0 的简谐波动,即

$$T_r = T_0 \cos\left(\frac{2\pi}{\tau_0} \tau\right) \quad (5)$$

式中 τ ——时间;

τ_0 ——波动年周期。

坝体内温度可用式(6)表示为^[6]

$$T_{x,\tau} = T_0 e^{-\sqrt{\frac{\pi}{a\tau_0}} x} \cos\left(2\pi \frac{\tau}{\tau_0} - \sqrt{\frac{\pi}{a\tau_0}} x\right) \quad (6)$$

式中 $T_{x,\tau}$ ——时间为 τ 、离边界距离为 x 的温度;

a ——混凝土导温系数;

x ——离边界的距离。

把式(6)用图 2 表示,可以看到:

(1) 在任何瞬时 τ , 物体内部的温度分布都是波的形状,其周期相同。

(2) 任何位置的温度波比表面温度落后

一个相角 $\varphi = \sqrt{\frac{\pi}{a\tau_0}} x$, 对应时间为 $\frac{1}{2} \sqrt{\frac{\tau_0}{a\pi}} x$,

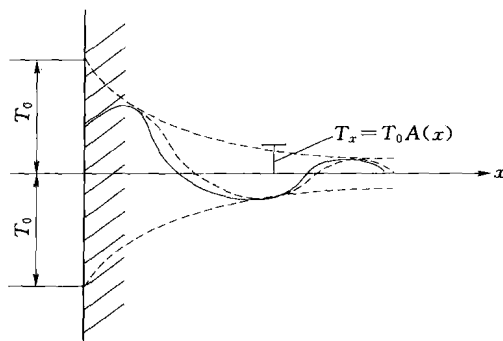


图 2 半无限大物体内的温度分布

称为时间滞后。

(3) 波的振幅随深度 x 的增加而衰减, 衰减率为 $A(x) = e^{-\sqrt{\frac{\pi}{\alpha \tau}} x}$ 。

上述分析完全符合大坝变温区实测温度情况。实测资料表明, 在下游变温区, 随着测点深度的增加, 出现最高温的时间滞后, 波幅也减小。水库温度虽不如混凝土内那样有规律, 但一般也作年周期变化, 而且库水越深, 波幅越小, 滞后也越大。坝体平均温度及其梯度是坝内各种温度共同作用的结果, 因此可分解成各种温度因素。

由此可知, 有些测点虽然具体部位不同, 但只要其温度波的相位差基本相同, 或相差接近 π 的整倍数, 则它们就会出现相关现象, 在回归分析中也很难把他们区分开来。为了克服这个困难, 可以避开具体测点, 而用气温对坝内各种滞后影响作因子。这两种选择温度因子的方法从本质上来讲是一样的。而这种方法避免了因子的相关性, 并能更为全面地反映坝内各个部位的温度变化, 其物理意义更为明确。同时, 计算时只要输入少量数据(气温), 即可自动生成各个温度因子。

丰满水电站大坝由于未埋设温度计, 采用观测前第一至第六旬的旬平均气温作因子, 对垂直位移进行分析计算, 取得了很好的结果。

实际计算表明, 变温区内气温的滞后影响一般不超过半年。滞后时间越长, 其影响越小。实际计算采用因子时, 所谓坝内“滞后”某一段时间的温度, 可采用超前相应时间的气温。本文在采用因子的时候, 计算时取前 2 个月内每旬一个因子, 后 4 个月后, 每月一个因子, 加上当时气温, 共 11 个因子:

$$y_T = b_1 T + \sum_{i=2}^7 T_{10(i-1)} + \sum_{i=8}^{11} T_{60+30(i-7)} \quad (7)$$

考虑到混凝土热膨胀系数与温度的一次方、二次方都有关。因此, 在选择温度因子

时, 把式 (7) 中的 11 个温度的二次方也作为因子。这样, 温度因子共 22 个, 安排为第 4~25 个因子。

2.4 时效因子

随着时间的推移所发生的不可逆变形称为时效变形, 它是一个时间因子。从物理意义上讲, 这个位移分量一般是由于混凝土、基岩的徐变、库底基岩裂隙节理或其他软弱结构面在水重作用下发生的不可逆变形等。关于时效因子的选择, 目前尚无统一的意见。时效变形一般在蓄水初期变化大, 后期变化缓慢。从分析龚嘴大坝 1976 年以后的资料, 蓄水已达 4 年之久。1976~1982 年水平位移的最大值 $\delta_{\max}$ 和最小值 $\delta_{\min}$ 跟时间都呈直线关系 (见图 3), 即与时间为一次方关系。所以采用时间 θ 作为因子

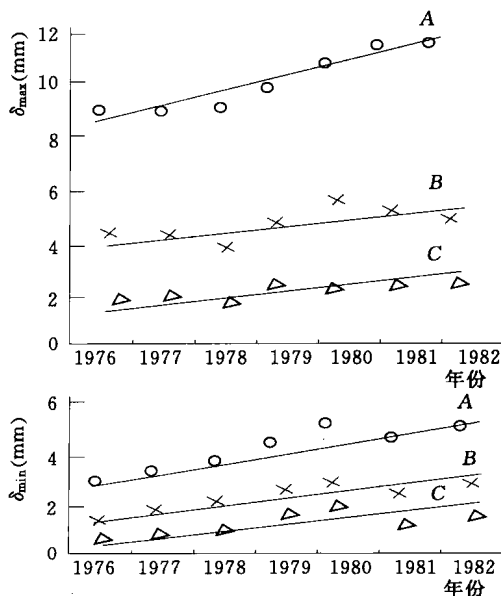


图 3 位移和时间关系

$$y_{\theta} = b_{2\theta} \theta \quad (8)$$

3 逐步回归分析成果

3.1 计算成果

对 A、B、C 三测点 1976~1982 年的 252 个测值进行计算。拟合子样数 M 取 216 个测值，后面 36 个用于考查回归方程外延预报的效果。单个因子进入回归方程的检验标准 F^* 值取 1.55（相应显著性水平 $\alpha = 0.05$ ）。投入筛选的因子有三类，共 26 个。

经计算，取得了 A、B、C 三测点最优统计方程及有关统计参数。表 1 列出了计算的主要成果。三测点最优统计方程分别为

$$\begin{aligned} \text{A 点: } \hat{y} = & 11.2710 + 0.0757 H + 0.0525 H^2 - 0.0044 H^3 - 0.0517 T - 0.0863 T_{20} \\ & - 0.0491 T_{30} - 0.0260 T_{50} - 0.0243 T_{180} - 0.0024 T_{10}^2 - 0.0008 T_{60}^2 \\ & - 0.0013 T_{120}^2 - 0.0012 T_{150}^2 + 0.0007 \theta \\ \text{B 点: } \hat{y} = & 4.4423 + 0.0978 H - 0.0205 T - 0.018 T_{50} - 0.0188 T_{60} - T_{120} - T_{10}^2 \\ & - 0.0010 T_{20}^2 - 0.0005 T_{30}^2 - 0.0011 T_{120}^2 - 0.0004 T_{150}^2 + 0.0004 \theta \\ \text{C 点: } \hat{y} = & 1.9419 + 0.0118 H^2 + 0.0009 H^3 - 0.0079 T_{30} - 0.0102 T_{50} - 0.0003 T_{120} \\ & - 0.0003 T^2 - 0.0006 T_{20}^2 - 0.0002 T_{30}^2 - 0.0003 T_{90}^2 - 0.0003 T_{120}^2 + 0.0003 \theta \end{aligned}$$

表 1 统计计算主要成果

测 点 位 置		A	B	C
入选因子数 (个)	水位	3	1	2
	温度	9	9	8
	时效	1	1	1
复相关系数 R		0.9768	0.9655	0.9682
剩余标准差 S_y (mm)		0.4432	0.2479	0.1155
检验统计表 $F_{l,m-l-1}$		332.8	255.6	307.0
标准检验 $F^{0.01}$		2.22	2.34	2.41
检验结果		高度显著	高度显著	高度显著

3.2 成果讨论

三个测点所得回归方程的复相关系数都在 0.96 以上，数值较高。对方程效果作统计检验的统计量 $F_{l,m-l-1}$ 在 255.6 以上，远大于显著水平为 0.01 时的检验标准值 2.22~2.41，说明回归系数高度显著，回归方程有效，上述选择因子的方法也是可靠的。

用最大最小值方法^[4]计算了各类因子在回归方程中的影响因素，如表 2 所示。可以看出，温度的影响最大，占 60% 左右，起主要作用。 $\hat{y}$ 值的周期变化主要是 y_T 的反映，它们峰谷相应，变幅相当。 $\hat{y}$ 值呈趋势性变化，则由 y_{θ} 反映。在 6 年内（1976~1983 年），A、B、C 三测点平均每年增长分别为 0.24mm、0.14mm、0.09mm，数值并不大。

表 2

各类因子影响程度

单位: %

因子类别	水 位	温 度	时 效
A (高程 528.825m)	18.72	65.97	15.31
B (高程 496.020m)	24.43	57.97	17.60
C (高程 476.000m)	14.93	58.49	26.58

根据三个测点的剩余标准差 S_y , 可以算出, 当置信水平 $\alpha=0.05$ 时, 包含 95% 数据的 A、B、C 置信带宽度分别为 $\pm 0.87\text{mm}$ 、 $\pm 0.49\text{mm}$ 和 $\pm 0.23\text{mm}$ 。用统计方程预报水平位移测值时, 95% 的点预报精度在上述范围内, 小于现场观测误差。

3.3 测点 A 成果分析

下面重点分析坝顶 (高程 528.825m) 的计算结果。

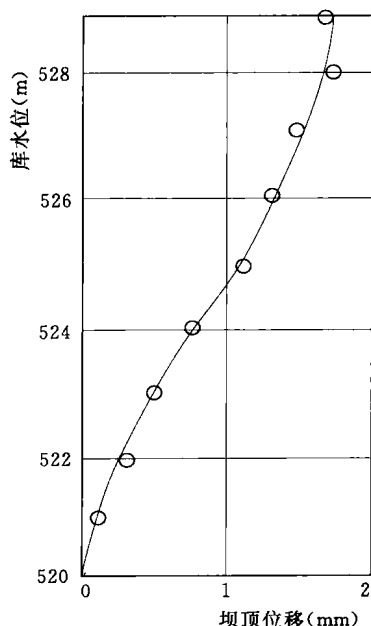


图 4 不同水位时的坝顶位移

(1) 坝顶位移是所有位移中最大值。计算结果表明: 在 216 个计算点内, 只有 6 个点的残差超过 1mm, 95% 的点在置信水平 $\alpha=0.05$ 的置信区内, 复相关系数 $R=0.97668$, 拟合满意。

(2) 由统计方程看出, 坝顶位移和水位的一次方、二次方、三次方都有关, 说明水位的各个因素对坝顶位移都起作用。图 4 示出了相应于各种水位的坝顶位移。总的趋向是水位上升, 坝体向下游移动。这说明, 库水的静水压力及地基转动在起主要作用。但这种趋向随水深而减弱, 当水位升到高程 528m 以上时, 产生向上游移动的趋向, 这说明, 随水深增加, 矛盾发生变化, 库底的沉陷作用逐渐上升, 见图 4。

(3) 统计方程中共有 9 个温度因子入选, 其中以气温超前 (在坝体内是滞后) 20 天的温度因子影响最大, 其次为当时温度和超前 30 天的温度因子。这和坝体向上游位移最大值发生在 8~9 月, 向下游发生在 2~3 月是一致的。

统计方程中包含了温度的二次项, 说明膨胀系数中的温度二次项在起作用。

(4) 时效因子也被选上, 说明坝体随时间在发生向下游的不可逆位移。但速率极小 (平均每年 0.24mm)。这是因为不可逆变形主要发生在蓄水初期, 本文计算时间在蓄水 4 年之后, 这种变形不很明显。

4 结语

(1) 引起龚嘴大坝水平位移的因素有温度、水位和时效, 其中以温度占主要地位。

(2) 大坝存在着向下游的不可逆的位移, 但数值不大, 大坝处于安全运行状态。

(3) 用气温并考虑半年以内的“滞后”影响作温度因子分析大坝位移, 不论用于测值的分析或预报都能达到满意的结果, 此种方法是可行的。

(4) 本文得到的最优统计方程可用来计算单项因素变化对龚嘴大坝位移的影响, 对大坝安全性进行评估。

参 考 文 献

- [1] 中国科学院计算中心概率统计组. 概率统计计算 [M]. 北京: 科学出版社, 1979.
- [2] 南京大学数学系计算数学专业组. 概率统计计算 [M]. 北京: 科学出版社, 1979.
- [3] 华东水利学院. 响洪甸重力坝原形结构状态分析 [J]. 大坝观测与土工测试, 1978 (1).
- [4] 李珍照. 建立观测数据最优统计方程的方法和程序 [J]. 水力发电, 1983 (2).
- [5] 李光宗, 邵乃辰. 关于重力坝稳定温度的分析研究 [J]. 水力发电, 1982 (12).
- [6] E. R. G. Eckert, Heat and Mass Transfer, McGraw-Hill Book Company, Inc. 1959.

(原载《水电工程研究》1984 年第 1 期)

刘家峡大坝左岸绕坝渗流观测与分析

邵乃辰

提 要 刘家峡大坝左岸岩层产状倾向下游河谷，又有断裂与构造挤压破碎带切割，透水性大，不利于岸坡稳定。本文介绍在设计施工中采取的工程措施和监测手段，并对观测资料进行分析计算，认为左岸绕坝渗流较严重。文中还提出一些探讨的问题和处理措施。

关键词 绕坝渗流 排水 地下水位 统计分析

1 引言

刘家峡大坝左岸岩层产状倾向下游河谷，坝肩岩体薄于中风化和强风化地区，地基分布有构造挤压破碎带，其中较大的共有 18 条层间构造挤压破碎带，分别在高程 1610～1720m 之间，一般宽度为 2～15cm，个别达 40cm。贯穿性和厚度较大的有 5 条，其中高程 1655m 以上充填物主要为岩石碎屑，并夹有云母片、绿泥石、阳起石及少量粘土、方解石等。另外，左坝肩岸坡还有三组较发育的构造裂隙，其中 F80 和 F152 为平行于河流方向的张开性断层，附近岩体透水性强。从工程地质观点来看，存在两个问题。第一是左坝肩地质岩体由北东东向，北西向和构造挤压破碎带切割形成三角体，且岸坡又为自由面，在库水和坝体作用下，构造挤压破碎带抗剪强度会降低，三角体可能产生微型变形。第二是库水沿北东东向结构面渗水后会增加坝肩侧向动水压力和绕坝渗流，危及坝肩的稳定与安全。

2 工程措施和监测布置

针对上述复杂的地质条件，为防止蓄水后岸坡可能发生变形滑动和绕坝渗流，曾采取以下一些工程措施：

(1) 在坝轴线处沿岸坡水平方向挖深 20～25m，增设“Ⅸ”和“Ⅹ”坝段。为截断沿 T431 裂隙渗水的主要通道，在坝轴线上游沿 T431 裂隙面挖至高程 1660m，清除缝面充填物，并于高程 1660m 平台上浇筑混凝土防护体。

(2) 将靠近上游的勘探平洞用混凝土填塞，防止渗流。

(3) 将主坝灌浆帷幕向左延伸 46m，以截断沿左岸 F80 和 F152 等张裂断层的绕坝渗流通道。

(4) 由排水孔，排水平洞和左岸导流隧洞组成左岸坝体及基岩的排水系统，渗水沿不同高程的廊道或自流排至主坝后，或汇流至河床坝基集水井，由水泵抽至下游河床。左岸副坝基岩的一部分渗水和沿 F80、F150 等断层的绕坝渗水，由左岸导流隧洞截排至下游。

为了解左岸基岩的渗漏和绕坝渗流情况，在左岸先后布置 12 个地下水位观测孔，其中 6 个孔（72 号、88 号、162 号、164 号、168 号、173 号）从 1974 年开始观测，另 6 孔

(169号、170号、178号、183号、184号、191号)从1976年开始观测,已有10年左右的观测资料。此外,为了查明“Ⅸ”坝坝肩与陡峻岸边基岩接触的情况,在接触面上埋设了渗压计;在各排水通道外还设置有测量渗水量的装置,并进行了长期观测。这些资料对于了解左岸排水,绕坝渗流及判断其安全性等都是十分宝贵的。

3 观测资料及其初步分析

3.1 地下水位

图1上绘制了12个测孔1978~1983年的实测地下水位过程线。由图1可以看到地下水位变化规律一般和库水位保持密切的对应关系,其中184号、168号、72号和173号等孔的地下水位仅比库水位低5~6m,表明左坝肩地下水位较高。72号和173号孔位于F80、F152断层左侧,从水位变化可以看出向左岸延伸的帷幕没有起到全隔断左坝肩F80、F152断层及其他渗透途径的作用。

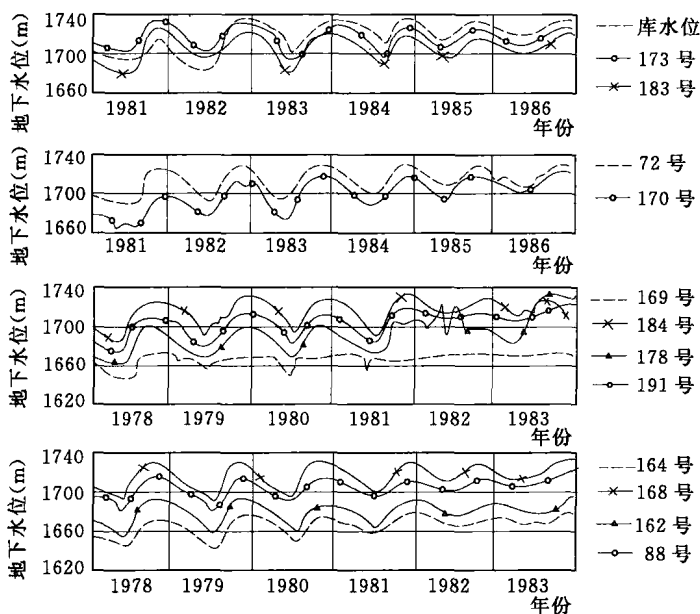


图1 地下水位过程线

88号测孔远离坝轴线(约150m),水位只比库水低10m,说明库水从F80、F152两断层流向F93断层。

169号测孔规律与众不同,每年5~7月水位突降,1982年以后水位保持在1662~1664m间,基本不变。这是因为该孔位于左岸导流洞左侧,可同时向导流洞、左岸和排水洞排水。排水途径畅通,不能形成高水位,水位相对稳定。

为了分析左岸地下水位分布情况,图2上绘制了两个年份高库水位时的等水位线图。

(1) 由图2可以看出,从1978~1982年,在最高库水位($1735 \pm 0.2\text{m}$)时,地下水位分布基本上没有变化,并逐步形成以162号孔为中心的漏斗状分布,地下水由此向导流洞渗漏。

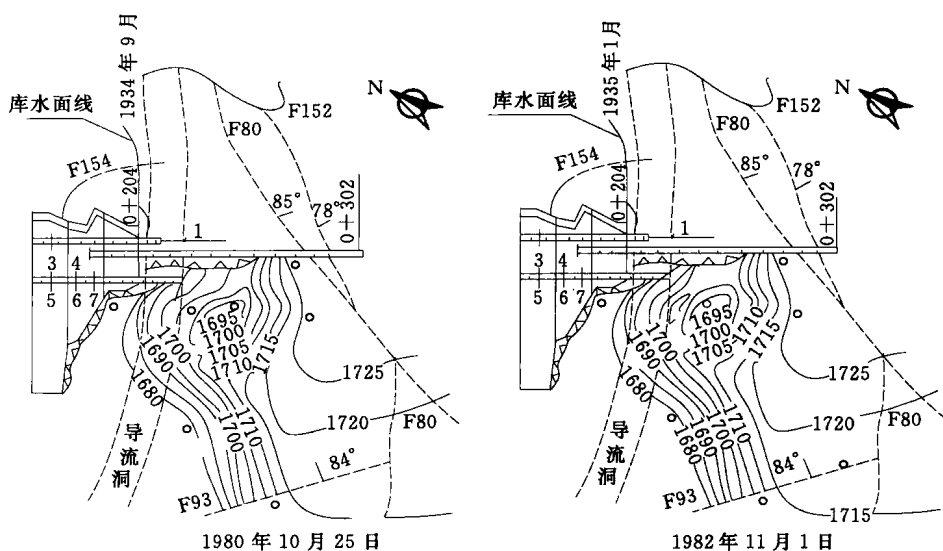


图2 相同水位时左岸地下水等水位线图

(2) 在 F80 和 F152 两侧，始终保持高水位。另外，184 号和 168 号孔也保持高水位。可见，大量地下水由水库通过 F80 和 F152 断层流往下游。左岸灌浆帷幕虽然在地表上看横过了这两个断层，由于断层分别有 85° 和 78° 倾角，所以实际并没有被帷幕完全截断，渗流途径是畅通的。

(3) 导流洞和 5 号、6 号、7 号三个排水洞是主要排水途径。

(4) 绕坝渗流的主要途径是 F80 和 F152 两个断层。

3.2 岩体渗水量

根据多年观测资料，左、岸岩体渗水量见表 1。

表 1

左、岸岩体渗水量

单位：L/min

部位	灌浆排水洞 (m)		左岸导流洞	总计	部位	灌浆排水洞 (m)		左岸导流洞	总计
	D1660	D1631				D1660	D1631		
最小值	11.6	26.6	130.0	168.2	平均值	16.2	30.6	140.0	186.7
最大值	19.6	34.3	150.0	203.8					

由表 1 可以看出，地下水主要是从左岸导流洞渗走的，约占总渗流水的 3/4，从地下水等水位图（图 2）中也能够看到这种现象。此外，有 1/4 的渗水从灌浆排水洞中排走，还有一部分流向坝基。需要指出，左岸岩体渗流水量比坝基渗水量大 2~3 倍，说明绕坝渗流是严重的。

3.3 左坝肩与岸坡基岩的接触状态

主坝“Ⅸ”坝段的左坝肩与岸坡基础接触面的坡度陡峻，为了监测两者接触状态和渗流情况，在高程 1682.5m 和 1710m 上埋设了 5 支渗压计。多年观测表明，渗透压力不大，随库水位起伏也很小，坝肩和岩坡的结合是好的，也没有重大渗漏，原设计中采用的沿上