



006834 水利部信息所



# 大坝安全监测的原理与应用

赵志仁 著

天津科学技术出版社

## 内 容 提 要

本书是关于大坝安全监测技术的专著,书中系统地总结了这一学科的新进展,介绍了基本原理和应用方法,并结合具体工程实例进行了说明。全书共分十章:总论、变形监测、渗流监测、应力监测、动态监测、安全检查、监测技术研究、监测系统改造、资料处理计算及成果分析应用。每章分三至五节,各节均作为一个子题进行详细介绍,因此内容相对独立,自成体系,便于读者掌握和应用。

本书着重对国内外在大坝安全监测中存在的带有普遍性的技术问题进行深入地论述,适合于已经掌握大坝监测基本知识和实际操作技能的人员阅读。因此,可供广大从事大坝安全监测工作的设计、施工、运行、科研和管理人员使用,也可供水利水电专业的工程技术人员和有关高等院校的师生参考,或作为大学高年级学生及研究生的选修课教材。

2006/03

# 序 言

新中国成立以来,坝工建设发展很快,迄今为止已建成的坝超过八万座,其中绝大多数质量较好,但也有一些质量较差的病坝或险坝.坝对国计民生发挥越来越大的作用,而坝的渗漏、开裂以至失事时有发生,故坝的安全越来越被人们重视.近年来人们加强了对大坝安全监测并定期对大坝开展了安全检查和鉴定工作.对于大坝原型观测资料分析,在统计性模型外,通过反分析发展了确定性和混合性模型.这不仅能了解到大坝的实际工作状况,并可预卜和监视大坝今后的安全运行,需要时可设置预警装置或进行加固.在大坝安全监测方面所积累的资料,通过反分析可以验证并提高今后大坝设计水平,并可为今后大坝可靠度设计提供可行的依据.大坝监测不仅为保证大坝安全服务,而且也为提高大坝设计、施工水平创造条件.

本书内容丰富,涉及作者三十余年来从事的大坝安全监测工作.本书对大坝监测的基本原理及方法中带有普遍性的问题作了全面系统的阐述,各章节内容相对独立,自成体系,结合所研究课题对其涉及到的原理、方法、结果及计算分析以及统计性和确定性模型均有阐述,便于读者阅读和应用,是一本紧密结合实际的具有较高学术水平的大坝安全监测专著.

本书对实际监测和分析中遇到的一些问题,如观测误差值如何考虑、观测系统的更新改造、钢筋混凝土实测钢筋应力的分析、水库首次蓄水、动态监测、混凝土冷却及灌浆效果观测分析、软基倒锤线的设置、混凝土自身变形的推算及静力水准和引张线的应用等方面都提出了新的见解和方法.因此,本书对今后大坝安全监测技术的完善和优化具有较大的实用价值.

水利部能源部天津勘测设计院技术委员会主任  
高级工程师、教授、中国工程设计大师

**曹楚生**

1992年5月

# 前 言

建设大坝的投资大、效益高,在国民经济发展中起着举足轻重的作用,与人民的生活也休戚相关。一个庞大的水坝,一旦失事,造成人民生命财产的损失是巨大的。因此,加强大坝的安全监测工作是一项十分重要的任务。

随着经济的发展和科学技术的进步,目前世界各国大坝的数量逐年增多,规模和体积不断增大,而地形、地质条件却更加复杂,一些经过长期运行的工程已经明显的老化,在筑坝兴利的同时,发生事故危及安全,乃至溃坝失事造成灾害的事件屡有发生。因此,在大坝的建设和管理方面,面临着许多有关安全性和经济性的技术问题,这些问题仅靠现行的设计理论和模型试验是不可能圆满解决的,因而广泛开展了安全监测工作,并已发展成为水利和能源建设的重要组成部分,受到国内外坝工界的普遍重视。例如,国际大坝委员会从1958年至1991年共召开十二次国际大坝会议,其中有十次会议讨论了与大坝安全监测有关的议题。

我国水能资源十分丰富,总蕴藏量居世界第一位,另一方面,水旱灾害问题尚未根本解决。近年来,我国正在大力加强大江大河的治理和开发利用,从而对大坝的安全监测提出了更高的要求,同时也促进了监测技术的发展和提高。实践证明,大坝的安全监测工作对于监控工程安全、充分发挥效益、提高设计水平、改进施工方法等都是行之有效的手段。为了适应我国水利和能源建设事业的需要,促进安全监测技术的进步,使之在四化建设中发挥更大的作用,当务之急是推广应用新技术、新方法,迅速提高广大监测人员的业务素质 and 科学技术水平。

作者从事大坝安全监测技术研究工作三十余年,主要研究成果已陆续写成学术论文和专著发表。这些科研成果注意了紧密结合生产实际,力争从理论和实践的结合上说明问题,所阐述的原理和方法大多是作者的研究心得和体会,并在生产上得到应用,有的已纳入我国大坝安全监测技术规范。本书取材于最近十年即从1981年至1991年发表的由作者撰写的部分学术论文,以这些论文为基础进行修订、补充、改写成本书。因此,本书着重对国内外在大坝安全监测中遇到的带有普遍性的技术问题进行深入论述,适合于已经掌握大坝监测基本知识和实际操作技能的人员阅读,也可供从事水利水电专业工作的工程技术人员和有关院校的师生参考。

全书共分十章四十节,包括大坝安全监测技术的各个方面,内容涉及到监测的仪器、设计、施工、运行、观测、检查、改造、计算、分析等各专业,以及与大坝有关的隧洞、厂房、蜗壳、水闸、管道、底孔等各种水工建筑物,对于大坝安全监测中相当重要的新领域——动态监测,本书也列有专章作了介绍。

水利部能源部天津勘测设计院技术委员会主任、高级工程师、教授、中国工程设计大师

曹楚生总工程师在百忙中为本书撰写序言,作者十分感谢!

本书在出版过程中得到水利部能源部天津勘测设计院及研究所、天津大坝安全监测研究中心和天津科学技术出版社的大力支持,作者在此表示衷心的感谢!

对于曾经参加过本书部分工作的同志,已在有关各节中列出,限于水平,书中难免存在错误和不妥之处,敬请读者批评指正。

**著 者**

1991年10月20日

# 目 录

<b>第一章 总论</b> .....	(1)
第一节 大坝安全监测的主要项目.....	(1)
第二节 我国大坝安全监测技术的新进展.....	(6)
第三节 国外大坝安全监测及资料分析技术综述.....	(13)
第四节 国外施工及初次蓄水期间的大坝安全监测.....	(24)
<b>第二章 变形监测</b> .....	(31)
第一节 土坝倒垂线的设计与施工.....	(31)
第二节 应用水管仪观测大坝的变形.....	(34)
第三节 高精度观测大坝变形的一种重要方法.....	(39)
第四节 水工混凝土的变形特性.....	(45)
第五节 大坝变形监测设计及改进建议.....	(49)
<b>第三章 渗流监测</b> .....	(57)
第一节 大坝渗流监测技术综述.....	(57)
第二节 重力坝扬压力的观测研究.....	(68)
第三节 水工建筑物渗水压力观测的若干问题.....	(76)
<b>第四章 应力监测</b> .....	(81)
第一节 大坝应变及应力原型研究综述.....	(81)
第二节 混凝土无应力计的研究结果.....	(91)
第三节 混凝土变形对实测应力的影响.....	(98)
第四节 水工混凝土自生变形的应用.....	(107)
第五节 大体积混凝土施工温度的观测研究.....	(112)
<b>第五章 动态监测</b> .....	(123)
第一节 大型水轮机蜗壳叉管应力的原型观测.....	(123)
第二节 地下埋藏式高压管道的原型研究.....	(134)
第三节 腹拱坝初次蓄水的安全监测.....	(143)
<b>第六章 安全检查</b> .....	(150)
第一节 水库大坝的安全检查.....	(150)
第二节 混凝土坝的现场检查.....	(154)
第三节 坝内观测仪器编号的检查鉴别.....	(165)

<b>第七章</b>	<b>监测技术研究</b> .....	(172)
第一节	观测值中因线路电阻引起的误差及修正.....	(172)
第二节	控制大坝观测值质量的原理与方法.....	(179)
第三节	逐步回归分析法的电算程序设计与使用.....	(184)
第四节	地下结构物的原型监测研究.....	(190)
第五节	底孔的原型监测与现场试验技术.....	(199)
<b>第八章</b>	<b>监测系统改造</b> .....	(207)
第一节	大坝监测系统更新改造方案研究.....	(207)
第二节	腹拱坝监测技术改造设计简介.....	(213)
第三节	重力坝变形自动化观测系统改造设计.....	(218)
<b>第九章</b>	<b>资料处理计算</b> .....	(224)
第一节	大坝观测数据的统计计算.....	(224)
第二节	水工混凝土徐变的推算.....	(232)
第三节	钢弦式传感器计算方法的改进.....	(237)
第四节	水工钢筋混凝土结构实测钢筋应力的分解与计算.....	(242)
<b>第十章</b>	<b>成果分析应用</b> .....	(249)
第一节	大坝二期冷却及灌浆效果的观测与分析.....	(249)
第二节	腹拱坝原型观测数据的解释与分析.....	(258)
第三节	重力坝实测变形的分析与应用.....	(265)
第四节	大坝观测的变形性态及数学模型研究.....	(280)
第五节	底孔观测成果的分析与评价.....	(290)

# PPRINCIPLES AND APPLICATIONS OF DAM SAFETY MONITORING

## Contents

<b>Chapter I</b>	<b>General Description</b> .....	(1)
Section 1	The main contains of the dam safety monitoring .....	(1)
Section 2	New technical progress on the dam safety monitoring in China .....	(6)
Section 3	A summary of technology on dam safety monitoring and analysis abroad .....	(13)
Section 4	Dam safety monitoring during the construction and the first filling stage abroad .....	(24)
<b>Chapter II</b>	<b>Deformation Monitoring</b> .....	(31)
Section 1	Design and construction of the inverted plumb in an embankment dam .....	(31)
Section 2	Observation of the dam deformation with the watertube gauge .....	(34)
Section 3	An important high — accuracy method for observing deformation of dams .....	(39)
Section 4	Deformation characteristics of the hydraulic concrete .....	(45)
Section 5	Proposals for the design and improvement on dam deformation moni- toring .....	(49)
<b>Chapter III</b>	<b>Seepage Monitoring</b> .....	(57)
Section 1	A summary of the monitoring techniques on dam seepage ...	(57)



Section 2	Observation and study of the uplift pressure for a gravity dam .....	(68)
Section 3	Several problems on observation of the piezometric pressure for hydraulic structures .....	(76)
<b>Chapter IV</b>	<b>Stress Monitoring</b> .....	<b>(81)</b>
Section 1	A summary of prototype study on the strain and stress in dams .....	(81)
Section 2	Research findings of the no-stress meters in concrete .....	(91)
Section 3	The influence of concrete deformation on the observed stress .....	(98)
Section 4	Application of the autogenous growth in concrete .....	(107)
Section 5	Observation and study on the constructional temperature of the mass concrete .....	(112)
<b>Chapter V</b>	<b>Dynamic Monitoring</b> .....	<b>(123)</b>
Section 1	A Prototype observation of stress of the forkpipe in spiral case for a large turbine .....	(123)
Section 2	Prototype study on behaviors of the underground highpressure penspotks .....	(134)
Section 3	Safety monitoring during the first filling of a hollow gravity arch dam .....	(143)
<b>Chapter VI</b>	<b>Safety Inspection</b> .....	<b>(150)</b>
Section 1	Safety inspection of the large reservoir dams .....	(150)
Section 2	Field inspection of concrete dams .....	(154)
Section 3	The inspection and identification for the mark number of observation instruments inside the dam .....	(165)

<b>Chapter VII</b>	<b>Study of Monitoring Techniques</b> .....	(172)
Section 1	The error observed owing to the wire resistance and it's correction .....	(172)
Section 2	Principles and methods for the quality control of the observed values of the dams .....	(179)
Section 3	Design and application of a computer program for the step—by— step regression analysis method .....	(184)
Section 4	Prototype monitoring study on underground structures .....	(190)
Section 5	Prototype monitoring and field test techniques for the bottom outlets .....	(199)
<b>Chapter VIII</b>	<b>Improvement of Monitoring Systems</b> .....	(207)
Section 1	Proposed program study for the improvement of the dam monitoring system .....	(207)
Section 2	Brief introduction of the technical improvement design on observa- tion of a hollow gravity arch dam .....	(213)
Section 3	Improvement design of an automatical deformation monitoring sys- tem of a gravity dam .....	(218)
<b>Chapter IX</b>	<b>Data Processing and Calculation</b> .....	(224)
Section 1	Statistics and calculation of the odserved data of the dams .....	(224)
Section 2	Calculation of the creep of hydraulic concrete .....	(232)
Section 3	Improvement of the calculation method for string—wire transducers .....	(237)
Section 4	Resolution and Calculation of the measured stress of the steel bars within the hydraulic reinforced concrete structures .....	(242)

<b>Chapter</b>	<b>X</b>	<b>Analysis and Application of the Results</b> .....	<b>(249)</b>
<b>Section</b>	<b>1</b>	<b>Observation and analysis on the effects of the second—stage cooling and grouting of the dams</b> .....	<b>(249)</b>
<b>Section</b>	<b>2</b>	<b>Interpretation and analysis of the prototype observed data from a hollow gravity arch dam</b> .....	<b>(258)</b>
<b>Section</b>	<b>3</b>	<b>Analysis and application of the measured deformation for a gravity dam</b> .....	<b>(265)</b>
<b>Section</b>	<b>4</b>	<b>A study of the observed deformation behavior and the math model for a dam</b> .....	<b>(280)</b>
<b>Section</b>	<b>5</b>	<b>Analysis and evaluation of the observed results from the dam bottom outlets</b> .....	<b>(290)</b>

# 第一章 总 论

## 第一节 大坝安全监测的主要项目

国务院发布的《水库大坝安全管理条例》<sup>[1]</sup>明确规定：“大坝的建设和管理应当贯彻安全第一的方针”。为了确保大坝的安全性和经济性，就必须搞好大坝安全监测工作，因此，大坝安全监测已成为水利水电工程建设的重要组成部分，并受到国内外坝工界的普遍重视。我国兴建的一些大中型工程，如刘家峡、鲁布革、龙羊峡、葛洲坝、乌江渡等，都埋设和安装了数量可观的监测仪器和设备，并取得了一些有价值的成果。例如刘家峡大坝运行 20 多年来，通过安全监测，提供了大量的第一手资料，为提高设计、施工和运行水平作出了贡献，对掌握大坝的工作状态起到了重要作用。特别是 1979 年和 1985 年通过监测资料分析，使得大坝在比正常高水位分别超蓄 0.49m 和 0.80m 条件下工作，安全运行，从而获得了更大的经济效益。

文献<sup>[1]</sup>规定：“必须按照有关技术标准，对大坝进行安全监测和检查”，并指出：“大坝包括永久性挡水建筑物以及与其配合运用的泄洪、输水和过船建筑物等。”因此，本书中“大坝”一词，可理解为包括各种水工建筑物。本节先对大坝安全监测的主要项目作简要介绍。

### 一、变 形 监 测

大坝在自重、水压力、扬压力、淤沙压力及温度等荷载作用下，必然会产生变形，变形监测是了解大坝工作状态及安全管理的重要内容，主要包括以下几方面。

#### (一) 垂 直 位 移

1. **几何水准测量** 包括两部分：一是由水准基点校测各工作基点。这项工作对于混凝土坝和土石坝可分别采用一等和二等水准测量进行；二是利用工作基点测定各垂直位移标点的位移，其测量要求可考虑比上述降低一个等级。由于水准基点校核工作基点的要求较严，工作量较大，可以利用倒垂线作为工作基点，这样既可大大节省工作量又可提高观测精度。此外，如通过坝顶或廊道等部位观测时，可采用特制的微型因瓦水准尺，其优点为重量轻、使用简单、不需要司尺员立尺，而且位移标点可设在建筑物的墙上或已建的墩台上。

2. **三角高程测量** 主要用于测量薄拱坝和土坝上垂直位移标点的变化以及滑坡和崩塌地段的变形，其优点是可以测定人们难以到达地点的垂直位移。但该法一般要求测距不大于 600m，测边中误差不大于 2mm，因此，通常与三角测量同时进行。此法的精度比几何水准法低。

3. **流体静力水准测量** 此法测量方便、精度高、不受距离和方向的限制，克服了廊道内进行光学观测的困难，可实现自动记录和遥测，能及时预报将要达到的最大变形值。近年来在大坝、厂房及地壳变形观测中，已得到广泛应用。此外，该法除用于测量两点间的相对高差

外,还可将一系列的水管连通,组成一个整体的测量系统,以测量多点变形,如果将补偿器设置于稳定不变的基点上,即可测量各测点的绝对垂直位移。

4. 遥测仪器测量 国内已经使用的主要有三种方法:差动变压器式遥测水管仪,已应用在葛洲坝大坝;真空激光装置,已应用在太平哨及丰满大坝;步进电机式及电容式遥测仪,已应用在潭岭及参窝大坝。此外,还有电磁式、模梁管式及干簧管式沉降仪,多用于土坝。遥测法虽给观测带来很大方便,但成本较高。

## (二)水平位移

1. 视准线 其原理是通过或平行于坝轴线建立一条固定不变的视准线,定期观测各位移标点对该线的偏离值,借以确定各点的位移量。按使用的工具和作业方法的不同,又可分为活动觇牌法和小角度法。

为了保证观测精度,每段视准线的允许长度对于重力坝为300m,拱坝为500m,对于滑坡体可增加到800m,同时要求视准线旁离障碍物大于1m,仪器底盘对中误差小于0.1mm。另外,目前我国已研制成有线遥控觇牌和无线遥控觇牌,应用效果较好。

2. 激光准直 观测方法有以下几种:

(1)大气照准法 与前述视准线观测方法基本相同,但仪器改用具有衍射效应和投影成像的激光准直装置,其原理是把仪器的十字丝投影到觇牌上,由司标者观测,以消除激光漂移的影响,大气折光和调焦的误差仍不可忽视,但观测精度比视准线法有所提高。

(2)大气波带板法 它是把激光器和接收靶分别安置在两端固定的工作基点上,而将波带板安置在位移标点上,从激光器发出的激光束照满波带板后,在接收靶上会聚形成一个亮点或“十字”亮线,按照三点准直方法,在接收靶上测定“十字”亮线的中心位置,即可决定位移标点的位置。这种观测要求光源、波带板中心和接收靶中心三点基本在同一高度上。该法仪器结构简单、使用方便、观测精度较高,大约比视准线法高三倍,比大气照准法高一倍。

(3)真空管道法 与大气波带板法的观测方法基本相同,只是将激光束置入真空管道传输,从而避免了大气折光的影响,观测精度更高,同时也可观测垂直位移,但其成本较高。

3. 引张线 此法是在两端点之间张拉一根钢丝作为基准线,用来测量坝上各点相对于该钢丝的水平位移,由于端点的张力产生一个水平分力,使钢丝力图保持原位,故而成为一条基准线。引张线法的成本低、精度高(可达0.2~0.3mm),外界影响小,可遥测自记,操作简便,不受距离和气候影响,已获得普遍应用。作者曾在刘家峡和潭岭大坝上将引张线和倒垂线组合成一个水平和垂直的钢丝系统,作为广泛量测大坝和基础变形的监测网,这种方案已相继被国内外的一些大坝所仿效。此外,它还可兼测垂直位移。

4. 导线 适用于拱坝观测,一般布置在廊道内,使两端点的径向与倒垂线相联系,定期地测定各导线点的角度(或矢高)和边长变化值,即可推算各导线点在拱坝上的径向和切向位移。

此外还有前方交会法,由于其观测和计算工作都比较复杂,一般是配合其它方法使用或作为备用手段。

## (三)挠度

主要是混凝土坝的观测项目,近年来土坝亦逐步进行挠度观测。观测方法一般分为正垂

线和倒垂线两种。由于沿垂线不同高程进行观测，因而可求得大坝挠度曲线。对于双曲拱坝，当坝内设置垂线有困难时，也可在坝后设置专门的垂线导管来进行观测。应注意的是正垂线的重锤及倒垂线的浮力应随着垂线长度的增加而适当增加。

1. **正垂线** 是将垂线的一端固定在坝顶附近，另一端悬挂重锤以保持铅直，沿垂线不同高程坝体上设观测点。观测方式有多测站法和多支点法两种。多测站法是不改变垂线位置，而在每个位移观测点设置测站安置仪器，所得测值为各测点与垂线悬挂点之间的相对位移。多支点法则是改变测点位置，将测站设在靠近重锤处，而在各高程上的测点处安装垂线支点，观测时把垂线依次夹在各支点上，所得观测值为各测点与垂线测站点之间的相对位移。

2. **倒垂线** 是将垂线的一端固定在基岩深处（钻孔），依靠浮力将垂线引至坝顶或某一高程处保持不动，用多测站法进行观测，所得观测值可认为是各测点对于岩基深处的绝对位移。倒垂线的锚固点需要设置在稳定的基岩中，因而一般都需要钻孔，孔深不宜小于坝高的 $1/4 \sim 1/2$ ，钻孔的偏斜率要求在 $1\%$ 以内，为此在钻孔时需埋设固定导向管和活动导向环。在土坝观测中，往往在地表很难找到合适的稳定点作为变形观测的基点，作者曾在黄河渠村分洪闸两端软基上设计了两条倒垂线及提出大锚块的方案，取得了良好的效果。

垂线观测的精度较高，一般可达 $0.2\text{mm}$ ，观测仪器有光学垂线仪、机械垂线仪和遥测垂线仪三种。我国研制的遥测垂线仪以电容式和步进电机式较好。

#### (四) 倾斜

此项观测可以判断坝体倾覆及稳定情况，对于混凝土坝和土石坝都是需要的。特别是在不宜进行挠度观测时，可利用在不同高程上观测的倾斜角而求得近似的挠度曲线。观测方法可分为直接法和间接法两种。

1. **直接法** 目前采用的设备有气泡倾斜仪和遥测倾斜仪两种。前者系由一个高灵敏度的气泡水准管和一套精密的测微器组成，其观测精度一般为 $2''$ 。后者可分为电容式、光电式、变压器式、电阻式、电感式和伺服加速度式等多种测斜仪，可进行长距离遥测，也可进行动态观测并自动记录变化曲线。

2. **间接法** 一般是通过观测相对垂直位移的方法来换算成大坝的倾斜角，主要采用前述几何水准和流体静力水准的测量方法。

除上述各项观测外，大坝的接缝和裂缝观测也是很重要的变形观测项目。

## 二、渗流监测

据国内外统计，因渗流引起的大坝事故或失事约占 $40\%$ 。因此渗流监测是非常重要的，各种坝型都应进行。观测内容有以下几种：

### (一) 绕坝渗流

通常沿绕流线和可能集中渗流的透水层布置测点，以能绘出绕流等水位线为原则。对于近坝区的滑坡体或高边坡，有时也要进行地下水位的观测。各个观测孔孔底应深入至强透水层及建坝前地下水位以下。在坚硬岩石中，可不埋设测压管，对于破碎岩石可仅在破碎段埋设测压管，但均应设管口保护装置。在地质复杂部位，如需要分层观测渗流水位时，也可设置

双管式测压孔。

观测设备有测深钟、电测水位器、压气 U 型管、示数水位器及遥测水位仪等，一般要求读数精度 $\leq \pm 1\text{cm}$ 。

### (二) 渗透流量

指库水穿过地基、坝肩介质及坝体产生的渗流量。为了掌握渗流情况，应分别观测各部分渗流量和总渗流量。可在混凝土坝廊道、排水井或土坝下游采用量水堰或容积法观测，同时，要注意及时进行渗水透明度检定和水质分析。渗水的浑浊不清，反应出坝基或两岸接头岩土受到溶滤或被渗流水带出，往往是管涌、内部冲刷或化学侵蚀等破坏的先兆。

### (三) 扬压力

指水库水头对坝基面上产生的渗透压力及尾水对坝基面上产生的浮托力。对于混凝土坝，从扬压力的大小可以判断灌浆和排水系统的效果，如果超过设计值，对大坝安全是不利的。以往观测坝基扬压力主要是采用测压管。作者首先在刘家峡大坝上采用孔隙压力计观测，取得了良好效果，现已在龚咀等工程推广使用。对于土坝坝基的渗水压力观测，可以检验有无管涌、流土及接触面的渗漏破坏，判断大坝防渗、导渗设施的工作效能，因此也是非常必要的。

需要注意的是不宜用排水孔来观测扬压力，以免影响大坝的正常运行和观测值的正确性。

### (四) 孔隙水压力

混凝土坝的孔隙水压力也是坝体内的一种扬压力。土坝的渗透水将在横断面上形成一条浸润线，如果高于设计值，就可能造成滑坡失稳事故。

混凝土坝的孔隙水压力一般采用孔隙压力计观测。土坝的浸润线以往均采用测压管观测，实践证明，由于滞后时间较长，只有在渗透系数 $k > 10^{-3}\text{cm/s}$ 的岩石或土壤中才能获得较好的效果。在 $k = 10^{-4} \sim 10^{-5}\text{cm/s}$ 的粘土中，若库水位的持续稳定时间超过测压管滞后时间并形成稳定渗流，可选用 $\Phi 15\text{mm}$ 小直径的测压管，但在下列情况下，不宜采用测压管，而可采用孔隙压力计。

1. 不稳定渗流条件下的浸润线和渗压变化过程的观测；
2. 在岩石或土壤的渗透系数 $k < 10^{-6}\text{cm/s}$ 的渗压和浸润线观测；
3. 混凝土和土壤孔隙压力的大小和消散过程观测。

## 三、应 力 监 测

应力监测包括混凝土、钢筋等应力监测及坝体的温度监测。监测结果从微观上反应了大坝承受的外荷载和由此而产生的工作性态变化，与上述变形和渗流监测的宏观变化结合起来分析，才能对大坝的安全性及发生异常的原因作出正确判断，同时也是对设计和施工技术进行反馈的重要手段。

### (一) 混凝土应力

一般采用应力计或应变计进行观测，由于现有应力计只能观测压应力而不能观测拉应

力,所以主要采用应变计观测应变,然后再换算成应力.用应变计观测混凝土应力时,尚需安装混凝土无应力计,这项观测不仅可供应力计算之用,而且对混凝土的化学反应、骨料的碱性反应、冰冻引起的膨胀或崩解及渗水引起的化学溶蚀等,也有一定的监视作用.

## (二)钢筋、钢板应力

在大坝的孔口、管道及洞室等部位常因产生拉应力而布置大量的钢筋,其应力状态可以用钢筋计直接测得.但根据刘家峡等五个工程实测钢筋应力统计结果,有73.6%的测点为压应力,18.4%为拉压交替,仅8%的测点为拉应力.究其原因主要由于钢筋与混凝土的材料性质不同,测值中包括有外部荷载应力和内部非荷载的附加应力,从而改变了钢筋的应力状态.本书第九章介绍了作者对钢筋与混凝土之间的应力转移规律及钢筋与混凝土联合作用情况下应力分析方法的研究结果.

钢板应力监测对象主要是压力钢管、蜗壳、尾水管及闸门等,这项观测是对钢板单独进行的,因而观测值是相当可靠的.钢板计一般是由长度为10cm的小应变计用夹具将仪器两端固定在钢板上改装而成的.在充、放水时,一般需进行动态观测,自动记录测值变化曲线.

对于预应力结构和大坝基岩锚固部位的预应力锚索或锚杆,可根据需要采用荷重计或测力计观测其拉力变化.荷重计可利用小应变计改装(一般要对称装4支),测力计则可利用钢筋计改装.

## (三)温度

温度是产生坝体应力和变形的重要因素.对于坝温、气温、水温及基岩温度,都可以利用铜电阻温度计,也可以通过其它兼测温度的仪器进行观测,以了解坝体温度分布及重要部位的温度变化过程,这对于分析坝体变形、渗流、应力资料及采取温度控制和坝体灌浆等措施都是很重要的.

## (四)基岩应变

据统计,在大坝失事的原因中,地基问题约占25%,因此近年来对基岩变形的研究和观测日益重视和加强.

1. **相对变形** 此项观测系指对基岩浅层的变形监测.一般深度在10m以内,采用基岩应变计或基岩变形计进行.以往国内多采用长度25cm的混凝土应变计观测基岩应变,由于基岩本身存在层面、节理、裂隙等构造,加上混凝土应变计的标距及量程都较小,致使测值失去代表性.1965年作者在刘家峡工程中采用测缝计改装成长度为5m的基岩变形计,用于观测大坝、隧洞和地下厂房等部位的基岩变形,取得了良好的效果,此仪器在葛洲坝、龚咀等工程已大量采用.此外美国、瑞士等国采用带式伸长计、法国采用无线电遥测变形计等也取得了较好的效果.

2. **绝对变形** 此项观测一般需要钻20m以上的深孔,才能找到稳定不变的基准点,以便量测绝对变形.为此除可利用上述倒垂线外,一般采用单点或多点位移计、沉降仪、测斜仪、链式挠度计或引伸仪等进行观测.

瑞士苏黎世联邦工学院(ISETH)研制的滑动测微计,可量测孔深达100m范围内的岩石变形,量距为1m,量程有 $\pm 5\text{mm}$ 和 $\pm 2\text{mm}$ 两种,分辨率为 $1\%_0\text{mm}$ ,现场试验的标准差分别为 $3\%_0$ 和 $1\%_0\text{mm}$ ,温度测量精度为 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ ,温度影响可自补偿,这是一种比较先进的仪



器.

## 四、安 全 检 查

以上各项观测通常只能在少数典型坝段和部位进行,故带有一定的局限性,大坝的各种异常现象不一定都能观测到.实践证明还必须同时进行安全检查,才能更好地保证大坝的安全.安全检查可分为现场检查和安全鉴定两部分.

### (一)现场检查

包括日常巡查、年度详查及特种检查三种,主要工作是在现场进行的.日常巡查结果可用表格方式记载,其它两种则应写出检查报告.

根据现场检查部位的不同,其检查方法也不同,可分为以下几方面:

1. **外部检查** 主要有人工巡视、望远镜、光电测距仪、遥感技术、摄影、直升飞机等检查方式.

2. **内部检查** 主要有超声法、回弹法、电测法及钻孔取样等.

3. **水下检查** 主要有潜水员、潜望镜、潜水船、水下电视、自浮沉柜及回声测深仪等.

### (二)安全鉴定

这是由主管单位组织设计、施工、运行、科研等有关人员参加的一种定期检查,一般5~10年一次.主要进行总结、分析和评价工作,其主要任务是:

1. 按照现行规范复查原设计数据、方法及安全度.

2. 审议施工方法、质量和施工中出现的特殊情况所造成的影响.

3. 对观测和检查资料的分析成果进行全面了解和审查,评定大坝及观测系统的运行情况和安全状况.

4. 提出大坝安全鉴定报告和改进建议.

大坝安全监测技术,由渗流、变形、应力、检查四个部分组成,其中应力部分以往国内常称为“内部观测”,其它三部分统称为“外部观测”.然而,对一个坝的监测,在施工期、蓄水期和运行期各有不同的特点,应该有所侧重,例如施工期侧重内部观测,运行期侧重外部观测,蓄水期则两者兼顾.因此,对坝的监测要求不应当是一成不变的,随着时间的推移及大坝工作情况的变化,应随时进行调整和完善.

## 第二节 我国大坝安全监测技术的新进展\*

随着我国建坝数量的日益增加,大坝安全问题已愈来愈引起人们极大的关注.1981年水电部科技司组织了调查组,对安徽、浙江、湖南、云南等省的17座水电站进行了调查,发现在大坝安全管理及监测方面存在着一系列问题.为此,调查组提出了一些改进建议,当即得到水电部领导的重视,大坝安全监测工作也随之有了较大的发展.

\* 参加本节工作的有叶丽秋同志.