

Shuigong Jianzhuwu Anquan Jiance Fenxi

水工建筑物 安全监测分析

唐崇钊 陈灿明 黄卫兰·著



本书论述水利工程建设（拦河大坝、边坡与地下洞室）工程监测试验及安全管理中相关的技术问题，内容包括项目设置与缘由分析、观测仪器主要产品构造与应用、成果整理内容和数学方法、安全判识等的原理方法或效果分析，章节中列有实例以作说明。

本书主要为水电厂和大中型水库的安全管理人员编写，亦可供水利、土建工程的设计、施工管理、科研人员及相关专业高等院校师生参考应用。



东南大学出版社
SOUTHEAST UNIVERSITY PRESS

水工建筑物安全监测分析

唐崇钊 陈灿明 黄卫兰 著

东南大学出版社

• 南京 •

内容提要

本书论述水利建设(拦河大坝、边坡与地下洞室)工程监测试验及安全管理中相关的技术问题,内容包括项目设置与缘由分析、观测仪器主要产品构造与应用、成果整理内容和数学方法、安全判识等的原理方法或效果分析,章节中列有实例以作说明。

本书主要为水电厂和大中型水库的安全管理人员编写,亦可供水利、土建工程的设计、施工管理、科研人员及相关专业高等院校师生参考应用。

图书在版编目(CIP)数据

水工建筑物安全监测分析 / 唐崇钊, 陈灿明, 黄卫

兰著. —南京:东南大学出版社, 2015. 9

ISBN 978-7-5641-5892-7

I. ①水… II. ①唐… ②陈… ③黄… III. ①水工建筑物—安全监测 IV. ①TV698.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 149126 号

出版发行:东南大学出版社

社 址:南京市四牌楼 2 号 邮 编:210096

出版人:江建中

责任编辑:杨 凡

网 址:<http://www.seupress.com>

经 销:全国各地新华书店

印 刷:南京玉河印刷厂

开 本:700mm×1 000mm 1/16

印 张:11.75

字 数:232 千

版 次:2015 年 9 月第 1 版

印 次:2015 年 9 月第 1 次印刷

书 号:ISBN 978-7-5641-5892-7

定 价:39.00 元

本社图书若有印装质量问题,请直接与营销部联系,电话:025-83791830。

前 言

拦河大坝是水利工程的主要建筑物,是直接影响枢纽安全的关键设施,因此水利工程建筑原型观测通常又称大坝安全监测。本书讨论的观测分析,包含项目设置的缘由分析、设备和仪器原理与应用技术分析、观测结果分析、安全判识与应用分析等。本书原为笔者以往写的技术交流总结,现经全面修订正式出版,可作水利工程界安全管理、观测试验以及设计和施工等工作参考应用。编写时力求简单明了、内容集中、可读性好,目的在于使有关人员加深对水利工程建筑安全监测重要性的认识,了解监测试验技术的基本原理和问题。全书共分六章二十七节。

第一章 第一节介绍水利工程安全监测的目的,着重讲述观测试验与坝工技术发展,以及大坝失事与观测项目、观测布置之间的关系。第二节阐述坝工观测的由来、发展与现状;其中观测仪器的原理、工艺与应用是现代观测技术发展的重要标志,分析理论、安全判识、计算方法与管理技术是现代大坝安全监测的基础。

第二章 拦河大坝、坝基与岸坡、危及大坝安全的库区近坝不稳定山体是大坝安全监测的主要部位。本章分混凝土坝、土石坝以及岩坡和地下工程三节论述观测项目设置与安全的关系,每节后面列有观测设计案例,乃至观测要求和作法,及规范与条文说明等。高山地区大型边坡工程和地下厂房洞室的围岩稳定尤为重要,在第三节作专门讨论。

第三章 讲述仪器的性能和质量要求,分别介绍几种埋设型仪器的工作原理和特性参数,列述了工程中常用的仪器、仪表产品,分析了弦式仪器和差动电阻式仪器可能有的质量问题产生的测值偏差。对于仪器工作原理的讲述,目的仅限于在选购和使用时对仪器有所了解。

第四章 讨论几种埋设型观测仪器的应用实践。第一节分析土压力的测值偏差与仪器结构构造改进;第二节介绍混凝土应变观测中的应力实用算法;第三节分析多点位移计安装时的钻孔方向和孔底深度等布置问题;第四节讨论土石坝粘土心墙水平应变观测值与安全判识问题。

第五章 讲述观测资料处理分析的基本知识,内容有数据检查、观测物理量的误差处理、过程线的匀整、特征值计算、观测物理量的时间和空间关系分析、直线回归和曲线回归分析等。为资料整编与安全分析用到的基本方法,也是试验工作者和水库管理人员应该掌握的基本技能。

第六章 讨论资料分析与安全判识。第一节分析堆石坝混凝土面板变形和应变观测以应力为目标量的判识,举例说明面板挠曲位移和应力测值回归分析的方法与技巧;第二节论述渗流分析与大坝安全的关系;第三节讲用位移表示的安全判识,按混凝土坝、土石坝及边坡工程和地下洞室分段解说;第四节列举工程案例说明人工边坡的观测结果与安全分析;第五节介绍地下厂房开挖施工的观测结果与围岩稳定分析。

本书引用和参考了南京水利科学研究院相关研究人员、国内兄弟单位的同行及专家学者的论文和研究报告,徐正栋高工对本书原稿的编写提供了观测仪器相关资料,陈仲先教授提供了部分地下厂房观测设计资料,丁伟农教授对书稿做了详细的校阅与修改。本书的编写和出版还得到南京水利科学研究院出版基金的资助,在此一并表示衷心感谢!

笔者
2015年7月于南京

目 录

第一章 综述	1
第一节 观测目的、作用和内容	1
第二节 原型观测的由来、发展和现状	5
第二章 观测布置与项目	9
第一节 混凝土坝的观测问题	9
第二节 土石坝的观测问题	17
第三节 岩坡与地下洞室的观测问题	24
第三章 原观仪器	34
第一节 原观仪器性能的基本要求和主要类型	34
第二节 钢弦式仪器的工作原理与特性参数	37
第三节 钢弦式仪器的主要产品	39
第四节 差动电阻式仪器的工作原理与特性参数	47
第五节 差动电阻式仪器的主要产品	52
第六节 其他类型观测仪器	56
第四章 观测仪器的应用浅说	64
第一节 土压应力的测值偏差与仪器改进	64
第二节 混凝土观测应力的实用计算	67
第三节 多点位移计的观测布置	74
第四节 土的应变观测	79
第五章 观测数据的处理与分析	83
第一节 数据处理的内容与目的	83
第二节 数据检查与误差分析	84
第三节 差动电阻式仪器电阻比测值检查	87
第四节 误差修正与曲线匀整	90
第五节 观测物理量的特征值与统计分析	95

第六节 线性方程回归计算	103
第七节 曲线方程的回归计算	110
第六章 资料分析与判断	120
第一节 堆石坝混凝土面板的变形与应力应变	120
第二节 渗流观测与安全判识	128
第三节 位移观测与安全判识	136
第四节 边坡工程的监测与稳定分析	148
第五节 地下厂房的监测与稳定分析	158
后记	172
附录	175
附表 1: 变形监测图形符号	175
附表 2: 渗流监测图形符号	176
附表 3: 应力监测图形符号	177
参考文献	178

第一章 综 述

第一节 观测目的、作用和内容

一、目的

大型水利枢纽工程通常都具有防洪、发电、灌溉、供水、通航等多种效益;拦河大坝是枢纽工程发挥效益和与安全关联的主要建筑,也是枢纽的重点监测对象,故水利工程原型观测通常又称大坝观测或大坝安全监测。

根据物理量属性不同可在水工建筑物的施工期或建成后埋设安装仪器,通过长期系统的定期观测,以获取被测物理量及其变化,是观测的直接目的。采用众多传感器和设备设施进行测量和数据传输是原型观测的主要手段。人工巡视检查和直觉估量同样也是原型观测的重要部分,往往也是发现险情信号的有效途径。借助观测仪器和设备采集的观测资料和数据是建筑物在实际环境条件下多种具有过程性的因素持续作用和影响的响应。有了这些资料和数据,还需进行全面分析和计算才能了解建筑物的实际工作性态,从而对工程质量及安全度进行评估和判断、预测长期或近期的发展和变化,为施工和运行期的安全管理和决策提供依据;检验设计和施工工艺、为设计与施工提供反馈讯息、积累科研资料等,是原型观测中专项试验的最终目标。为此,现代原型观测技术包括观测设计、观测仪器的选择与研制、室内试验与设备检测、观测设备和仪器的安装埋设技术、观测方法与数据采集管理,以及对观测资料的整理分析、观测分析结果在安全监控和管理中的应用技术等。原型观测是一项综合性技术,为了获得预期结果,需要把握全过程中的每一环节,对上述每一环节进行专门研究。

枢纽工程投入正常运行期间,所有监测对象(部位)、监测项目的设置应以安全为主要目标,故观测设计、仪器选择、仪器的安装埋设乃至观测方法、观测管理等也以达到目标为主要目的。在枢纽工程的施工期,除应结合安全监控的长期目标外,原型观测应为施工安全、工程质量检验和评估、施工决策、检验设计及设计变更、积累科研资料等提供依据。

二、作用

(一) 原型观测与坝工技术发展

观测结果是水工建筑物实际工作状态的信息输出,可以用来检验设计假定和计

算方法;观测结果还能为我们揭示新的现象和规律,引导人们去探索未知的新领域,建立更为符合实际的新思想新方法。

法国在 1830—1838 年建成的格罗斯博斯坝为砌石坝,地基为泥质岩,建坝前未经认真处理。开始蓄水后发现坝体向下游变形达几厘米;可是当水库放空后变形又恢复。这一事实告诉人们,坝的工作状态是弹性的。这一“弹性”认识迄今看来大体上仍然是正确的。此外还发现坝向下游方向滑移 45 mm。根据这一观测结果在竣工 4 年后增设了“二道坝”以防止坝体的滑移。

根据后来对混凝土重力坝大量的观测结果证实,混凝土重力坝的温度应力是主要的,而荷载应力很小,稳定是主要的问题。

19 世纪末,美国在明尼苏达州的一座坝,由于对坝体进行观测的结果发现了冰压力对坝体的作用,采取了相应措施。

为了验证试载法在双曲拱坝设计计算是否适用,美国垦务局从 1963 年至 1972 年在燃烧峡(Flaming Gorge)拱坝和晨点(Morrow Point)拱坝上进行观测研究,结果证实试载法是有效的。

日本黑部第四拱坝进行观测的结果揭示,两岸山体中的孔隙水压力因蓄水增高,造成两岸山体膨胀变形,使拱坝承受附加的切向压应力,为今后高拱坝设计和科研提出新的课题。

原型观测与土石坝的筑坝技术关系更为密切。现代混凝土面板堆石坝的发展与现代观测密切相关,堆石体变形、混凝土面板的接缝张开规律以及面板应力规律基本由观测资料揭示。

混凝土防渗墙是土石坝和深覆盖地基中良好的防渗设施,但在水压力下的应力和变形状态很不清楚。从我国碧口土坝的防渗墙观测资料得知,两侧填土沉陷对防渗墙摩阻力很大,是设计时不可忽视的因素。小浪底上游围堰防渗墙 1996 年的观测结果也证实,防渗墙混凝土变形主要与上部填土引起地基沉降有关。

预应力锚索在我国水利建设中的大坝加固、岩基处理、边坡工程有广泛应用。我国最早是在梅山水库大坝基础的加固处理工程应用。为了验证加固效果和发现问题,曾进行长期观测。

(二) 观测与安全

制造专门仪器进行原型观测,一开始是为检验水工建筑物的设计和施工。在 20 世纪 50 年代末,由于世界上有几座重要大坝失事,水工建筑原型观测对大坝安全的作用逐渐为人们认识,其重要性显得更加突出,成为水电厂和水库管理部门监测大坝安全运行的重要手段。故此,又将水工建筑原型观测称为安全监测。

世界各国对大坝安全监测工作的重视可以从历届国际大坝会议的议题比例及各国制定的有关法规和出版的有关大量刊物看出。据统计,截至 1991 年的 17 届国际大坝会议上,有 11 届将坝工观测内容列入议题。各届大坝会议总共讨论了 69 个

议题,直接与坝工观测有关的议题共 12 个,占 17%,而其他内容的议题均远达不到这个比例。法国 1970 年颁布了《法国坝工观测与监控法规》,美国 1971 年颁布了《大坝和水库安全监测法规》,前苏联 1973 年颁布了《电站水工建筑物安全运行监测条例》。中国 1977 年水利电力部水利司编写出版《水工建筑物观测工作手册》,1989 年颁布《混凝土大坝安全监测技术规范》SDJ336—1989,后来新版的《混凝土坝安全监测技术规范》SL601—2013 替代 SDJ336—1989(中华人民共和国水利行业标准),2011 年颁布《土石坝安全监测技术规范》SL 551—2011。1964 年、1982 年和 1984 年曾先后召开过全国性大坝观测学术讨论会,《大坝观测与土工测试》刊物于 1979 年公开出版。专门的坝工观测技术专著《土坝裂缝及其观测分析》、《土石坝观测技术》、《混凝土坝内部观测技术》、《混凝土坝外部观测技术》、《观测数据的处理方法》等相继出版。

大坝失事造成的损失,不仅在于建筑物本身及其兼具的发电、供水、灌溉、防洪等一系列综合效益受损,由于大量库水非计划的瞬间宣泄,对下游人民的生命财产造成的损失是巨大的,因此大坝安全运行是关系到国计民生的重大问题。据统计,全世界失事水坝的总数可能超过 15 万座,失事次(座)数的高峰期分别为 1900—1920 年及 1960—1970 年。迄今为止,有近 40 座水坝发生灾难性失事,造成生命损失。历次大坝失事事件中,以中国浮山堰的垮坝死亡人数最多。法国的马尔巴塞拱坝(坝高 66 m)溃决在当时社会引起极大震动。法国马尔巴塞坝因缺乏必要的监测设施及测次太少,未能系统监测左岸坝基的位移和孔隙水压力,以致失事前发生的险情无法察觉。马尔巴塞坝溃决对水坝变形监测起了推动作用。观测设施完善、观测资料系统完整,就有可能及时发现险情。据称,安徽梅山水库混凝土连拱坝,通过右岸山坡渗流量显著增加,坝垛向下游变形增加 9.4 mm,向右岸倾斜 57.2 mm(其实梅山右坝段山坡上一个坝垛因错位而将该处拱圈自上至下彻底撕裂),判断大坝处于危险状态,采取了应急措施,减少了损失,以后用预应力锚索进行基岩加固等工程措施,使大坝转危为安,保证了正常运行。

水坝失事付出的惨重代价促使各国对大坝安全加强管理立法和政府监督,以及水库和电厂管理部门对监测管理和监测技术的重视。我国电力部 1985 年设立了水电站大坝安全监测中心,1987 年颁布了行政法规《水电站大坝安全管理暂行办法》,1991 年颁布《水库大坝安全管理条例》,水利部于 1988 年设立大坝安全管理中心(1991 年前称监测中心)。

(三) 监测与施工决策

施工期埋设的观测仪器可以为施工安排提供有用的资料依据。大体积混凝土施工时进行温度观测,地下洞室(洞室群)和高边坡开挖时进行位移观测(包括洞室收敛测量),安装埋设的仪器设施除作长期观测外,主要为施工期提供观测结果。施工期观测资料分析的结果有时对重大施工决策有举足轻重的作用。

龙羊峡电站施工工期遭遇 1981 年特大洪水,洪峰使围堰前的水位超过原设计水位甚多,因此是继续保持或放弃基坑就成为当时的重大问题。就在这一关键时刻,对埋设在围堰中 48 支观测仪器的观测资料分析结果揭示,混凝土心墙仍然正常工作,于是决定保基坑进行抗洪斗争,最后获得成功。如果放弃基坑,必将造成工期延长和重新设置开挖的重大损失。

混凝土坝施工有两个重要环节对施工进度和施工质量有决定性影响,一个是施工温度控制,一个是坝缝灌浆时间的确定。根据混凝土浇筑时浇筑块的温度观测结果,可以了解最高温升和冷却效果,并分析混凝土的导温系数和温度应力,再通过选择合理的温度控制措施(如加冰、冷却水、改变材料配比和掺用外加剂等),以保证混凝土不发生温度裂缝。此时期的温度观测有指导施工作用。为保证坝体的整体性进行纵缝灌浆,需要待坝体冷却到合适温度,以防当灌浆后温度进一步降低时灌浆缝重新拉开,影响坝的承载力,因此合理的灌浆时间应以温度和纵缝开度观测资料的分析结果为依据进行选择。

小浪底工程边坡开挖埋设了测斜管和多点位移计,监测边坡岩体的变形情况,直接监测开挖对边坡稳定的影响及开挖后位移的变化。1996 年根据出水口边坡巡视检查及监测的位移资料分析,依据边坡顶面出现大面积裂缝及岩坡上部水平位移急速增加的危险信号,经在坡顶平台浇筑钢筋混凝土铺盖和增加边坡预应力锚索、放慢开挖速度等综合措施,变形速度得到控制,保证了洞室和消力塘正常施工。大型人工边坡和洞室工程开挖施工,变形量监测是主要的观测项目。

三、观测内容

1977 年水利电力部水利司编制出版《水工建筑物观测工作手册》。基于大坝失事的经验教训,后来的水利部和电力工业部相继编制出版了《混凝土坝安全监测技术规范》、《土石坝安全监测技术规范》和《大坝安全监测自动化技术规范》,后来又出版了《水闸安全鉴定规定》、《水闸技术管理规程》、《水运工程水工建筑物原型观测技术规范》,这就明确了水工建筑原型观测以安全为主要目的。此外,在我国仍然继承了兼顾设计和施工需要的服务,其中研究方面的内容应作为专门观测项目处理。

大型工程和对于安全问题特别重要的中型工程,布设观测仪器进行监测的对象范围应为:坝体、坝基、坝周边岸坡、危及大坝安全的库区不稳定近坝山体。中小型工程以布置最必要的安全监测仪器为宜。国外的实际经验和综合分析认为,混凝土坝和土石坝的合理观测费用为工程费的 1% 左右。

根据我国水坝失事资料,垮坝总数中运行期的垮坝数占 74%、施工期占 26%;垮坝总数中小型坝占 96%、土坝占 98%,混凝土坝只有一起。据有关调查,质量不好的险坝多为 1960 年以前建造的土坝。从《全国水库垮坝登记册》分析的水库垮坝原因为:泄洪能力不足占 42%、超设计洪水占 9.5%、质量问题占 38.5%(其中包括坝体

渗漏管涌 22.7%)、管理不当占 4.2%、泄洪破坏(非质量原因,包括库区或溢洪道岸坡塌方堵塞泄洪设施等)占 4.6%、原因不详者占 1.2%,未发生因地震造成垮坝。

研究水坝失事原因,对于水工建筑的安全监测不无裨益,可以提请设计工程师从历次水坝失事中吸取教训指导自己的设计,注意与安全密切相关的监测项目是否有遗漏,运行管理部门则应充分了解各个监测项目对安全的重要程度和相互联系。根据对以往工程垮坝原因的分析,需要在安全监测工作中着重注意的问题有如下几个方面。

① 洪水漫顶是土石坝垮坝的主要原因。据统计^[1],世界各国由洪水漫顶导致垮坝的比例为 35%,中国达到 51.5%。针对可能发生的洪水漫顶危险,在观测方面需要注意气象水文观测(包括库区降雨和水情,上、下游水位,输、泄水建筑物水位、水温)、泄水排洪建筑(包括溢洪道、泄洪隧洞)的稳定观测、可能堵塞泄水排洪设施的岸坡稳定观测以及影响上述建筑和岸坡稳定的渗压力观测、闸门启闭机检查等。

② 地基破坏与坝体渗漏不容忽视。导致重力坝、拱坝和支墩坝破坏主要是地基渗漏与破坏,而导致土石坝失事的主要因素除漫顶以外是地基与坝体的渗漏。渗流量、坝基渗压力、坝体渗压力(土坝)、绕坝渗流、岸坡地下水、坝基位移是监测地基情况和坝体渗漏的主要观测项目。

③ 加强管理是发挥监测项目作用、防灾减灾的重要经验。这方面包括建立档案、加强监测、巡视检查、设备和仪器维修、建立报警制度、重点项目的快速检查分析。

《土石坝安全监测技术规范》将一般观测项目和必测项目共分为巡视检查、变形(包括坝体和岸坡)、渗流、压力(应力)、水文气象、地震反应及水流七大类,依据建筑物级别调整,同时列出巡视检查的具体部位。实施时应依据不同部位、按规范明确的检查内容并结合实际情况予以增补,列制成表,以供对照。

《混凝土重力坝设计规范》规定,大型工程布置下列一般性监测:上下游水位;气温、水温及混凝土温度;扬压力、绕坝渗流、岸坡地下水位、水质化学分析、漏水量;水平位移、沉陷、倾斜;纵、横缝及裂缝;一般外表;坝前冲淤与泄洪淤积;岸坡稳定。专门观测有:坝基应力和位移;坝体应力应变;坝体局部结构;水力学;坝体地震反应等。

第二节 原型观测的由来、发展和现状

坝工设计和建设有赖于经验的积淀和工程师的判断。

最初的原型观测,是为了验证设计和测定设计中的某些参数。

1891 年德国在埃斯巴赫曲线形重力坝上进行了变形观测,1903 年美国在新泽西州的希恩汤重力坝上作过温度观测。1908—1909 年澳大利亚对南威尔士州的 12 m 高的巴伦杰克溪拱坝进行坝体变位观测,瑞士于 1919—1920 年在蒙特萨尔文斯拱坝上作了安装有世界上第一座永久观测仪器的变位观测。

1926年美国垦务局在加利福尼亚州的史蒂文生河上建造了一座试验拱坝,坝高18.3 m,坝长42.7 m,圆拱。试验坝的观测结果用来研究拱坝的计算方法。史蒂文生坝共埋设了140个用炭棒制成的电阻式应变计,经过8年的试验,取得了大量有价值的资料。之后又用赛璐珞和脆性材料做了1/40和1/12的模型,用水银加载进行模型试验,验证史蒂文生坝的观测结果。类似地对一些新颖的坝工结构先做试验坝的方法,对促进坝工技术发展起到了良好作用。在我国20世纪50年代未曾进行了土坝(中、小型)过水和定向爆破筑坝等试验工作,20世纪70年代中曾开展了梯形支墩坝和重力式腹拱坝试验坝工作,20世纪80年代开展了关门山、西北口等面板堆石坝试验坝工作,都取得良好的效益。

原型观测需要埋设仪器和安装设备。早期的水坝原型试验不但为筑坝技术提供了经验积累的途径,也为专门的观测仪器研制和生产提出了需求。需求是技术发展的基础。

1914年德国的瓦尔捷克尔坝首次埋设了遥测温度计。

1916年德国人戈德贝格研制了土压力计,为土坝应力观测开创了新局面。随后西欧一些国家和美国、日本等也研制土压力计。

弦式传感器首先在欧洲出现。1919年由谢弗设计了最早的弦式应变计。20世纪20年代末前苏联的达维坚科夫和德国的舍菲尔创制钢弦式传感器。不久,美国的卡尔逊创制了差动电阻式应变计。

利用振弦原理和差动电阻原理研制应变计、钢筋计、渗压计、测缝计、土压计、反力计等,成为现代原型观测仪器中两个主要系列。这两类仪器的出现,大大地促进了大坝应力应变观测的发展,是现代观测技术发展中一个重要的里程碑。20世纪60年代以来,许多先进国家又开发多种类型的观测仪器,并开发了观测和数据处理自动化系统。

我国的水工建筑原型观测开始于20世纪50年代初。早期在淮河上游几座闸坝,后来在三门峡、新安江及上犹江、流溪河等混凝土坝埋设了观测仪器,这时的仪器主要靠进口,品种和数量都较少。

第一批国产差动电阻式应变计由原北航仪器厂和上海教育仪器工厂生产,外壳采用铜质材料。后来南京自动化设备厂(原南京水工仪器厂)研制差动电阻式传感器,逐渐形成产品系列,成为水工观测仪器专业化生产厂。20世纪70年代后差动电阻式传感器产品质量有了很大提高;用于外部观测和内部观测的差动电阻式仪器自动检测装置研制成功后,在国内一些大型水利工程应用,极大地方便了水电厂的观测和管理工作。

差动电阻式仪器的技术引进,很大程度上推动了我国混凝土坝观测的进展。中国水利水电科学研究院对这一工作曾起了领军作用。

20世纪50年代末期南京水利科学研究所(现南京水利科学研究院)开始研制钢

弦式传感器,主要产品有土压计、土压力盒、渗压计、钢筋计、反力计等。目前生产弦式传感器的厂家还有江苏金坛及辽宁丹东几个厂家,南京自动化设备厂亦有个别弦式传感器产品出售。弦式传感器在国内主要用于土石坝观测。

引张线、正倒垂线观测技术的应用,有力地推动我国外部观测的发展,对大坝安全监控技术起了很大作用。

早在 20 世纪 60~70 年代,采矿部门、铁道部门及中科院岩土所等对地下工程观测技术作了多方面探索,同时还研究洞室开挖的围岩位移和锚杆应力分布。我国是多山国家,大型水利工程开发经常遇到大型洞室群和高边坡开挖,这些工程的围岩稳定和支护技术成为关注热点。多点位移计和锚索测力计是边坡和围岩观测的主要仪器。国内先后有多家单位做了研制工作,传感器类型主要有差动变压器式(电感式)、滑阻式、弦式等。

水工建筑观测仪器及其接收系统的发展水平是工程建筑物现代观测技术发展的一个重要标志。与先进国家相比,我国弦式传感器的制造由于没有专业化集团企业参与,处于分散状态生产,材料与工艺水平参差不齐,总体而言与国外技术存在一定差距。据载^[38],国产土压计优于国外同类产品,这可能是仪器构造改进的结果。

20 世纪 30 年代美国在吉布森坝埋设了 28 支电阻式应变计,经过长期观测,发现混凝土的不均匀性、温度与湿度变化对应变测值有很大影响,而且认识到混凝土的长期应变与应力的关系不是直接的线性关系,不能按弹性方法计算整理应变观测资料。在此以后,混凝土的徐变和自生体积变形研究成为专门的分支学科在各国展开,结果主要用于混凝土坝的应力观测计算。

“七五”和“八五”期间南京水利科学研究院在土石坝观测技术方面进行了大量现场试验和有成效的探讨,对我国土石坝观测技术的发展起了推动作用。

通过各种观测手段所获得的观测资料,还需要加以整编,才能成为便于使用的系统化、规格化的资料;然后对这些成果进行分析,以了解水利工程在施工和运行期间的状态,寻找其发展规律,并预测未来的变化。

在资料分析方面,20 世纪 50 年代以前,一般是将观测资料作简单的定性分析,用来与设计计算的结果和模型试验结果作对比研究。20 世纪 60 年代,在国外由于计算机技术的飞速发展,资料分析工作开始由定性分析向定量分析发展。其中,统计分析法、方程分析法和数学模型分析法为较常应用的定量分析方法。

① 统计分析法 该方法亦称观测物理量特征值分析,它是通过各观测物理量特征值(如平均值、极大值、极小值、变幅等)的大小变化比较及发展趋势评判设施的工作状况、有无出现异常。该方法简单明了,容易掌握。

② 方程分析法 该方法首先依据观测值或其派生量确定拟合方程,通过方程常数和计算值的比较或趋向性变化评判设施的运行状况。该方法直观,可操作性强。

③ 数学模型法 或称预测模型分析法。该方法首先将观测物理量与作用因子

及时间效应之间建立关系,通过回归计算得到定量形式的方程式,也即数学模型,用模型预报值与未来的实测值进行对比,审视测值是否出现异常。这是“文革”后引进的分析方法,比较繁杂。

20 世纪 60 年代中期以后,在我国因“文化大革命”而停顿了这一领域的发展;随着“文革”的结束,在电力工业部的组织和规划下,在中国水力发电学会、中国水利学会积极参与下,20 世纪 80 年代前期于南京进行了与国外的广泛交流,并以此为契机举行了全国第二届水工建筑物原型观测学术讨论会。自此中国的坝工观测技术进入了一个崭新的飞速发展时期,一些在国外已被证明并行之有效的数学模型方法在我国得到广泛应用,其中主要有统计模型法、确定性模型法和混合模型法应用较多。

由于分析技术的进步,安全评估方法和准则有了进一步制定和判别的依据。所谓技术法规、规范、规程、方法、标准等即为工程经验的积累和认知与认知更新。

大坝观测的发展与坝工技术的进步相伴相随。

第二章 观测布置与项目

第一节 混凝土坝的观测问题

一、项目内容与缘由

按 2013 年 5 月水利部颁布的《混凝土坝安全监测技术规范》SL601—2013, 大坝安全监测包括巡视检查和仪器监测。巡视检查分七大部位(设施):

- ① 坝体;
- ② 坝基和坝肩;
- ③ 引水建筑;
- ④ 泄水建筑;
- ⑤ 库区近坝岸坡;
- ⑥ 闸门;
- ⑦ 其他设施。

巡视检查主要巡查大坝有无损伤、库区近坝岸坡有无滑移崩塌征兆、上述各设施和部位的破损和异常, 规范对检查对象、内容和方法以及结果记录等都有明确说明。

大型工程仪器监测的一般性项目有: 位移、挠度、倾斜、接缝和裂缝、下游冲淤、坝前淤积、渗漏量、扬压力、绕坝渗流、水质分析、应力、应变、混凝土温度、坝基温度、库水温、水位及气温。其中混凝土应力应变、体积变化和钢筋应力的观测, 对于二级工程以下的小型工程可不予设置或作为专门研究项目处理, 如 20 世纪 60 年代, 孔口应力(弹性)集中问题为人们所关注, 一般工程会布置廊道周边的钢筋应力和混凝土应变观测, 这种观测属于专门研究的观测范畴。

1802 年西班牙皮尤恩特斯坝的溃决警示高的混凝土重力坝不能建造在松散地基上, 而只能建造在岩基上。

19 世纪末 20 世纪初, 在分析法国布泽衣坝等水坝失事的原因后, 设计者才开始明确认识到重力坝设计应考虑扬压力, 坝基扬压力是与大坝稳定相关联的重要荷载。

1959 年法国的马尔巴塞坝失事不是坝体本身的问题, 而是地基问题, 应该密切监测左岸坝基的位移和孔隙水压力的变化。

混凝土坝最初的观测布置主要集中在大坝坝身。从大坝失事的统计分析看,因地基问题引起失事的比例超过三分之一^[19]。

据统计^[27],从1987年至1998年底对全国96座大、中型水电站大坝进行检查和评价的结果如表2.1-1所列。其中有2座被评为险坝,坝基存在重大隐患的有14座,占14.6%,与早年的统计结果相比,有坝基隐患的比例下降,说明从勘察、设计、施工乃至管理各方面对坝基问题相应重视。

表 2.1-1 96 座大、中型水电站混凝土坝重大缺陷和隐患统计表

序号	缺陷或隐患	大坝数量 (座)	比例 (%)
1	防洪标准偏低,不满足现行规范的规定,有的大坝在运行中曾发生洪水漫过坝顶事故,造成巨大损失	38	39.6
2	坝基存在重大隐患,断层、破碎带和软弱夹层(红层)未做处理或处理效果差,有的在运行中局部发生性态恶化,使大坝的抗滑稳定安全度明显降低	14	14.6
3	坝体稳定安全系数偏低,不满足现行规范的规定	5	5.2
4	结构强度不满足要求,坝基、坝体在设计荷载组合下出现超过允许值的拉、压应力	10	10.4
5	坝体裂缝破坏大坝的整体性和耐久性,有的裂缝贯穿上、下游,渗漏严重,有的裂缝规模大且所在的部位重要,已影响到大坝的强度和稳定	70	72.9
6	坝基扬压力或坝体浸润线偏高,坝基或坝体渗漏量偏大,有的坝体大量钙质析出	32	33.3
7	泄洪建筑物磨损、气蚀损坏严重,有的大坝的坝后冲刷坑已影响到坝体的稳定	23	24
8	混凝土强度低,混凝土遭受冻融破坏严重,表层混凝土剥蚀或碳化较深,有的大坝在泄洪时溢流而发生大面积混凝土被冲毁事故	10	10.4
9	近坝区上、下游边坡不稳定,有的曾发生较大规模的滑坡	10	10.4
10	水库淤积严重	10	10.4
11	水工闸门和启闭设备存在重大缺陷,有的已不能正常挡水和启闭运行,影响到安全度汛	27	28.1
12	大坝安全监测设施陈旧、损坏严重,测值精度低、可靠性差,部分大坝缺少必要的监测项目和设施	80 以上	

坝基稳定包括岩体稳定和渗流稳定两方面。

岩体稳定破坏有两种主要形式: