

大坝安全监测 理论与应用

何金平 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

大坝安全监测 理论与应用

何金平 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书在比较系统地总结了大坝安全监测基本知识的基础上,重点叙述了作者 20 年来在大坝安全监测资料分析、数学模型、异常测值分析和综合评价等方面所取得的部分研究成果及工程应用实例。全书共分为 7 章,其内容分别为:大坝安全监测的内涵和发展趋势,一些传统的和新兴的大坝安全监测技术,监测资料整理整编和初步分析方法,大坝安全监测数学模型、监控指标和反分析,监测异常测值的分析方法,大坝安全综合评价体系、途径和方法,大坝安全监测系统综合评价的基本方法。

本书可作为水工结构工程、水利水电工程以及相近专业的本科生和研究生教材,也可供大坝安全监测设计、施工、运行管理和科学研究人员参考。

图书在版编目 (C I P) 数据

大坝安全监测理论与应用 / 何金平著. — 北京 :
中国水利水电出版社, 2010.10
ISBN 978-7-5084-7980-4

I. ①大… II. ①何… III. ①大坝—监测 IV
①TV698.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第201944号

书 名	大坝安全监测理论与应用
作 者	何金平 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	中国人民大学出版社印刷厂
印 刷	北京海洋印刷厂
规 格	184mm×260mm 16 开本 17 印张 403 千字
版 次	2010 年 10 月第 1 版 2010 年 10 月第 1 次印刷
印 数	0001—1200 册
定 价	55.00 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

序

巍巍大坝,雄跨江河,下扼洪流,上壅平湖。但这看似岿然不动的庞然大物,却无时无刻不在发生着动态的变化。这些变化缓慢而微小,复杂且隐蔽。若一朝从量变跃入质变,就可能出现灾难性的后果,既关系到兴利除害巨大效益的存废,更维系着数以千、万计人民生命财产的安危。幸运的是,通过长期实践,人们开发出多种监测大坝性状变化的手段,通过对这些手段所获取的大量信息进行分析,可以对大坝健康状况作出诊断,对大坝安全性态进行评价,这就是大坝安全监测。通过大坝安全监测,可以将信息反馈于设计和施工,检验设计是否合理,施工质量孰优孰劣;可以将信息反馈于管理,反映大坝运行是否安全正常,维修处理是否得当;若发现大坝异常,还可提供是否需要进一步采取加固或控制措施的依据。此外,大坝安全监测又可将信息反馈于科学研究,得出对大坝性态变化规律的新认识。由此可见,大坝安全监测涉及和影响到坝工建设的多个环节,具有举足轻重的作用和地位。

我国的大坝建设无论在坝的总量抑或在若干坝工技术指标上都已在世界位列前茅。我国的大坝安全监测技术在近半个世纪尤其在近三十年中也有了长足的发展,进入国际领先或先进行列。但是,我国出版的全面阐述大坝安全监测理论和技术的专著还不多,这与大坝安全监测技术发展的要求不相适应。

何金平博士从事大坝安全监测的科研与教学已有很多年。他孜孜以求地潜心钻研监测分析理论,诲人不倦地指导研究生学术攻坚,并注重联系实际,深入大量大坝现场进行实地调查研究。他参加了多项有关大坝安全监测的国家和省部级科技攻关专题,又主持或参加了20余座大坝的监测资料分析和安全评价项目,在国内外学术期刊上发表过数十篇研究论文,并且是几本专著和教材的撰稿人之一。今天,顺应形势发展的需求,他的新著《大坝安全监测理论与应用》又将与广大读者见面,我为此感到由衷的喜悦。

披读书稿,我感到可用“全、新、实”三个字来形容何金平博士这本新书的特点。

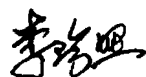
一曰“全”。此书内容全面涵盖了大坝安全监测的各个方面:从监测的内涵和发展历史,到各类监测技术与自动化系统;从监测资料整理和初步分析方法,到监测数学模型、监控指标和监测反分析;从监测仪器设备系统工作性态的评价,到大坝安全综合评价的体系、途径和方法,都作了比较系统的阐述,并将它们构建为一个完整的体系,由之可使读者一览大坝安全监测学科的全貌。这不

仅对研究生、本科生系统掌握这一学科知识有益,而且对于从事大坝安全监测设计、施工、运行管理和研究的人员,也能于各自侧重的领域取得有用信息的同时,对监测全局知识得到更多的了解。

二曰“新”。书中不仅详细介绍了比较成熟的传统监测技术,而且还用较多篇幅阐述了许多新理论、新技术。例如监测自动化系统和监测信息管理系统的结构与功能,多维多测点多方向监测数学模型的构建,大坝安全综合评价中突变理论、可拓理论、集对分析等新理论的应用等。作者在书中引入了自己以及所在研究团队近年的多项科研成果,并反映了大坝监测领域国内外的新进展。可以认为,此书表达了新世纪当代大坝安全监测的发展水平。

三曰“实”。全书文字朴实,阐述理论明白晓畅,讲解方法脉络清楚,可操作性强。书中列举了许多实例,可帮助读者更容易理解有关的理论和方法。

笔者期望,此书的出版将在大坝安全监测的百花园中增添一簇有自己特色的花朵,在大坝安全监测的科研、教学以及设计、施工、运行管理诸方面发挥出积极的促进作用。



2010年8月12日
于悉尼涛静轩

前 言

在大学的最后一个学期,我选修了李珍照教授开设的“大坝观测”课程。李珍照教授的那句“大坝观测是大坝的医生”的比喻,深深地吸引着我对这个领域的无限向往。1990年我读研究生时,有幸拜李珍照教授为师,开始踏入这个充满生机和魅力的研究领域,到今天已经走过了整整20个年头。20年来,这个研究领域从当初的以大坝结构性态分析为目的“大坝观测”,发展到今天的以大坝健康诊断和安全监视为目的的“大坝安全监测”,并且正在向以大坝实时、在线安全监控为目的的“大坝安全监控”的目标前进,呈现出一片欣欣向荣、蒸蒸日上的广阔前景。

大坝安全监测是通过仪器观测和巡视检查对大坝主体结构、地基基础、高边坡、相关设施以及周围环境所作的测量和观察,以及通过监测资料对大坝安全进行的诊断、分析、评价和监控,是水利水电工程学科中融工程结构学、工程力学、仪器仪表学、计算机科学、现代数学、网络技术等诸多现代理论和高新技术于一体的一个重要分支。本书第一章介绍了大坝安全监测的意义、基本内容和相应的规程规范,回顾了大坝安全监测的发展历程,分析了大坝安全监测的发展趋势和存在的主要问题。

监测技术是获取大坝各类监测效应量实测资料的手段和方法,是大坝安全监测的基石。目前,除传统的监测技术得以完善和发展外,一些诸如GPS变形监测技术、热渗流监测技术、测量机器人、系统系统集成技术等现代的新兴监测技术不断涌现,并在实际工程中得到了应用。本书第二章比较详细地叙述了传统和新兴的大坝变形监测、渗流监测、应力监测和专项监测技术以及大坝安全监测自动化系统,同时还简单讲述了混凝土坝和土石坝安全监测设计的基本方法。

“重采集、轻整理”的思想在很多一线监测人员中依然存在。不及时地对监测资料进行整理和分析,让宝贵的监测信息在资料柜或计算机里“睡大觉”,将使大坝安全监测从根本上失去意义。因此,作为一项基础性的工作,监测资料的整理整编和初步分析具有特殊的重要意义。本书第三章阐述了大坝安全监测资料整理整编的基本要求和内容,归纳了典型监测效应量的计算方法,重点讲述了监测资料初步分析的基本思路和一般方法,并提供了混凝土坝水平位移和土石坝坝体渗流监测资料初步分析的实例。

监测数学模型是大坝安全监测领域最活跃的研究方面,是解释大坝监测效应量变化规律和异常测值成因、分析大坝结构性态和诊断大坝健康状态、实施大坝安全监控和预报预警、探索大坝安全变异和失事机理等的主要定量分析方法。本书第四章详细论述了大坝安全监测统计模型、确定性模型和混合模型这三大类传统监测数学模型的建立方法和实例分析,对时效变形的特性、温度因子对渗流监测模型的影响、监测模型中的异方差现象以及大坝安全监控指标的拟定方法等问题进行了研究。此外,还讲述了目前备受关注和极具发展潜力的多维多测点分布数学模型和监测资料反分析方法。

大坝安全监测资料中常常会出现一些异常测值,这些异常测值有可能是监测中不可避

免的误差引起的,也可能是蕴涵着大坝安全变异信息的特殊测值。前者将歪曲大坝的实际结构性态,不利于对大坝安全作出合理的判断;后者则直接关系到大坝的安全,需要进行专门的研究。本书第五章首先归纳了监测误差分析的基本知识,阐述了异常测值的分类和主要分析判断方法,并通过三个典型的工程实例,探讨了大坝安全监测异常测值分析的基本思路。

大坝安全一旦出现变异,必将在不同的监测效应量上得到不同程度的反映。单个监测测点或单种监测效应量所反映的,只是大坝的局部结构性态或某一方面效应量的特性,要对大坝安全状态作出全面、整体的判断,就必须对多个监测测点、多种监测效应量进行综合分析。同时,仪器监测和巡视检查是大坝安全监测中密不可分的两个方面,也必须综合考虑。本书第六章叙述了基于监测资料的大坝安全综合评价体系,从模糊数学、突变理论、可拓理论、集对分析等方面研究了综合评价的不同途径,讨论了综合评价中定性指标和定量指标的度量方法,分析了大坝安全综合评价权重的特点和确定方法。

大坝安全监测系统是获取监测资料的载体和基础,监测系统工作状态的优劣,直接决定了所获取的监测资料的合理性和可靠性,并进而决定了大坝安全分析、评价和监控的合理性和可靠性。因此,对大坝安全监测系统进行综合评价,以确定监测系统的工作状态,对保障大坝安全具有十分重要的意义。本书第七章论述了大坝安全监测系统综合评价的基本内容和几种典型监测项目的现场测试方法,以引张线和垂线联合观测为例分析了组合式监测方法的观测误差传递和观测精度评价问题,在讨论了白塞尔公式适用条件的基础上研究了变形监测长期观测精度评价的改进方法。

本书得以面世源于去年年底的一次内部年终研讨会,当时我的研究生们强烈建议我整理并出版我在大坝安全监测领域 20 年来的研究成果,以便于今后的教学、科研和与同行的交流。在本书的撰写过程中,不仅总结了我个人的大部分研究成果,而且吸收了我的同事和我的研究生们的部分研究成果。因此,在本书完成之际,回过头来看,与其说本书是我的专著,倒不如说是在李珍照教授领导下的大坝安全监测研究团体的共同成果。在此,我首先要对我的博士导师李珍照教授致以崇高的敬意和衷心的感谢,是李珍照教授将我带入了这个我热爱的领域,并给了我无限的关怀和鼎力的支持;同时,还要感谢彭华、薛桂玉、李民、施玉群、吴云芳等同事多年来的合作和支持;此外,我还要特别感谢我的研究生们,他(她)们不仅实现了我的许多研究思想,而且给我们的研究团体注入了朝气蓬勃的活力,让我对大坝安全监测的前景更加充满信心。

本书还引用了国内大坝安全监测同行们的一些研究成果,在此对他们表示诚挚的谢意。大部分引用成果在书中进行了标注,但也有一些引用成果是较早前在科研和教学过程中陆续收集的,现已难以查到确切的出处,因而没有注明,在此深表歉意。

大坝安全监测内容极为丰富,本书所介绍的仅为沧海一粟。限于作者的水平,本书难免会存在一些不妥、疏漏甚至错误之处,敬请读者批评指正。

何金平
2010年7月于武汉大学

目 录

序

前言

第一章 概述	1
第一节 大坝安全监测的意义.....	1
第二节 大坝安全监测的发展历史.....	3
第三节 大坝安全监测的基本环节和主要阶段.....	5
第四节 大坝安全监测的主要项目.....	6
第五节 大坝安全监测的一般注意事项.....	16
第六节 大坝安全监测的相关法律、法规及规范.....	19
第七节 当前大坝安全监测存在的主要问题.....	21
第二章 大坝安全监测技术	23
第一节 变形监测技术.....	23
第二节 渗流监测技术.....	38
第三节 应力监测技术.....	42
第四节 专项监测技术.....	45
第五节 监测自动化系统.....	47
第六节 监测设计.....	55
第三章 监测资料整理整编与初步分析	69
第一节 监测资料的整理整编.....	69
第二节 监测效应量的计算.....	73
第三节 监测资料的初步分析.....	86
第四章 大坝安全监测数学模型	100
第一节 监测统计模型.....	100
第二节 监测确定性模型.....	109
第三节 监测混合模型.....	112
第四节 监测模型中几个问题的探讨.....	116
第五节 大坝安全监控指标.....	125
第六节 多维多测点多方向监测数学模型.....	132
第七节 监测资料反分析.....	147
第五章 大坝安全监测异常测值分析	153
第一节 观测误差分析.....	153
第二节 监测资料中离群测值分析.....	160

第三节	某混凝土坝坝顶垂直位移突变测值分析·····	166
第四节	某混凝土坝坝基扬压力异常测值分析·····	171
第五节	某闸坝坝基扬压力异常测值分析·····	176
第六章	大坝安全综合评价·····	181
第一节	大坝安全综合评价指标体系·····	181
第二节	大坝安全模糊综合评价方法·····	187
第三节	大坝安全突变理论综合评价方法·····	196
第四节	大坝安全可拓理论综合评价方法·····	205
第五节	基于集对分析的指标属性测度确定方法·····	208
第六节	评价指标的度量方法·····	213
第七节	大坝安全综合评价中的权重问题·····	221
第七章	大坝安全监测系统综合评价·····	226
第一节	监测系统综合评价的主要内容·····	226
第二节	大坝安全监测系统的现场测试·····	234
第三节	组合式水平位移监测系统的误差传递分析·····	251
第四节	白塞尔公式与变形监测中的误差估计·····	255
参考文献	·····	260

第一章 概 述

大坝安全监测是通过仪器观测和巡视检查对大坝主体结构、地基基础、高边坡、相关设施以及周围环境所作的测量和观察,以及通过监测资料对大坝安全进行的诊断、分析、评价和监控^[1]。这里的“大坝”泛指各类大坝坝体、溢洪道、水闸、堤防、隧洞、渡槽、渠道、地下洞室、水电站建筑物等水工建筑物;“监测”既包括对建筑物固定测点采用监测仪器按一定频次进行的人工或自动化观测(仪器监测),也包括对建筑物外表及内部大范围对象的定期或不定期的直观检查和仪器探查(巡视检查)。

第一节 大坝安全监测的意义

我国是坝工大国,已建成各类水坝 8.7 万余座,其中大、中型大坝 3000 余座,15m 以上的大坝约 1.8 万余座。坝工在我国国民经济建设和社会发展中已经而且正在发挥着重要作用。但是,由于人们对自然力量(如洪水、地震等),材料性能(如材料力学指标、老化病害等),结构机理(如建筑物失稳机理、超载能力等),施工控制(如混凝土温控、填筑密实度等),以及人为损坏(如运行疏忽、恐怖袭击等)等影响大坝安全的因素认识尚不充分,加之许多工程已运行 30~50 年,一些大坝已经接近甚至超过设计服役年限,不少大坝处于带“病”运行状态,成为“病坝”或“险坝”,存在严重的安全隐患和失事风险,大坝失事事件也时有发生。水利部和国家电监委最近 20 年来分别对所属水库大坝和水电站大坝进行了多轮定期安全检查,发现近半数的水库大坝属于病坝或险坝,水电站大坝安全状况略好,但也存在多座病坝或险坝,安全形势相当严峻。随着坝工建设的深入发展,高坝大库不断涌现。而当前高坝枢纽工程失效模式、破坏演变机理、安全评估和风险分析等涉及高坝安全的理论研究尚不完善,高坝的安全问题尤其重要。因此,无论从我国已建大坝的安全状态,还是从未来大坝的深入发展,建立、健全和发展大坝安全监测体系,都具有十分重要的意义。

有两个典型的实例可以作为大坝安全监测意义的最好注释,即法国马尔巴塞(Malpas-set)拱坝的失事和瑞士苏济尔(Zeuzier)拱坝的修复^[2-3]。从马尔巴塞拱坝的失事成为“监测作用未得到发挥”的反面教材,到苏济尔拱坝的修复成为“监测作用得到充分发挥”的经典范例,可以清楚地看出安全监测在确保大坝安全中的意义。

法国马尔巴塞拱坝于 1959 年 12 月 2 日突然溃决失事。马尔巴塞拱坝坝体内未埋设监测仪器,仅在坝下游面横缝 F、H、J、L 等不同高程处设置了 28 个位移观测点,通过大地测量法,每年进行一次位移观测。从开始蓄水到大坝失事,分别于 1955 年 9 月(库水位 79.95m)、1956 年 7 月(库水位 83.85m)、1958 年 7 月(库水位 87.30m)和 1959 年 7 月(库水位 94.10m)共进行了 4 次观测。从仅有的 4 次观测成果来看:前三次观测成果正常,测点位移与库水位大致成正比;第四次实测位移偏大,超出了正常范围,且在中央悬臂梁的底部,测点的水平位移普遍增大到 10mm,横缝 F 底部达到 16mm,并有 7mm 的切向位移。同时,

实测值与计算值的比值,在坝体中、上部 54~102m 高程处基本一致,在坝基处则相差较大,在横缝 H、J 处实测值比计算值大 3 倍,而横缝 F 处大 5 倍。由于大坝管理者监测间隔时间过长,失事前未及时对实测资料进行认真的分析,且未接到设计部门提供的安全监控标准,也未将观测成果及时反馈给设计部门,因此观测成果所反映出的坝底部位移异常的情况未引起各有关方面应有的重视,丧失了有可能避免大坝失事的机会。

瑞士苏济尔拱坝于 1957 年蓄水,该拱坝布置了比较齐全的监测设施,并进行了基本上每月 1 次的长期观测,监测资料也进行了及时的整理和分析。大坝正常运行 21 年后的 1978 年 12 月,在例行观测检查时发现坝体变形出现异常情况:坝体沉陷 110mm,坝顶弦长缩短 60mm,库满状况下坝体垂线径向水平位移却偏向上游,坝体下游面形成周边型裂缝。业主对此深感不安,立即决定将库水位降至最低水位,并报告瑞士联邦水利局,组织专家组对该拱坝的安全状况进行全面检查。专家组一方面要求业主加强坝的安全监测,增加监测项目,加密监测测次;另一方面对已有的监测资料作更为系统细致的分析,对出现异常变形的种种可能原因进行判断。专家组在查找异常变形原因时,首先根据观测资料排除了观测误差和坝体异常温度的可能性,之后还曾考虑过其他各种可能,如地壳构造运动、火山活动、软岩层的潜蚀等。最后结合大范围的巡查,发现真正的原因是公路部门在距左坝肩 1400m、坝以下 400m 处所打的一个公路探洞的影响。该探洞穿过了与坝下地层相连的灰岩底部含水层,使岩层迅速脱水,应力重新分布,从而引起岩层裂缝、断层压缩和坝体下沉。从监测资料来看,坝的位移异常值与探洞排水量增长趋势极为相似,洞的掘进停止和渗漏稳定后,坝体异常变形也趋于稳定。同时,河谷下沉的形状和土壤中排水所产生的情况很相似。在查找出原因后,专家组还对坝进行了应力分析,并制定了切实可行的修复加固方案,于 1980~1984 年分三个阶段完成。水库重新蓄水工作在严格计划和严密监测的基础上,分六个阶段历时 6 年完成,现该坝运行状况良好。

马尔巴塞拱坝布置的安全监测设施很少,无法利用监测设施及时地发现或全面地反映出坝体及坝基出现的异常情况;苏济尔拱坝则安装埋设了比较齐全的监测仪器,利用这些监测仪器,及时地发现了坝体出现的异常变形常情况,避免了坝的失事。

马尔巴塞拱坝布置的安全监测设施很少,有限的监测设施没有连续观测,监测资料未得到及时的分析,更谈不上利用实测资料对大坝的结构性态作出评价和监控,以至异常情况未得到及时发现,最终酿成灾难性的后果。苏济尔拱坝则不同,不仅安装埋设了比较齐全的监测仪器,进行了长期连续观测,而且监测资料得到了及时的分析和处理,大坝结构性态得到了及时的评价,正是这种及时的分析和评价,才在大坝出现异常的初期即被发现,为苏济尔大坝的安全改善赢得了时间。

在我国大坝安全管理中,通过大坝安全监测避免大坝事故的成功事例也不少^[4-6]。例如,安徽梅山连拱坝 1962 年 11 月发现右岸山坡渗流量显著增加;当即对大坝进行检查,又发现右岸几个坝段已向左岸倾斜,最大达 57mm,坝体也陆续出现了长裂缝;经过对观测资料的系统分析,判断右岸坝基基岩发生了部分错动,大坝处于危险中;于是立即放空水库进行加固处理,使大坝转危为安。广东泉水拱坝在 1976 年蓄水前,因右岸地形单薄、地质条件较差且溢洪及排水洞衬砌出现裂缝,担心不能承受设计水头;经过观测和资料分析,表明大坝坝体、坝基和坝肩应力及变形均正常,裂缝开合度仅受气温影响,从而决定按原计划正常

蓄水运行,使大坝及时发挥了应有的作用。黄河上游龙羊峡水电站施工过程中,1981年8月遭遇100年一遇以上的特大洪水,围堰安全事关重大;当时对埋设在围堰刚性心墙内的48支仪器进行了严密的观测和分析,表明围堰的工作性态是正常的;于是决定采取加高围堰4m的抗洪措施,终于确保了工程安全施工和度汛。安徽佛子岭连拱坝1965年在观测资料分析中发现12号、13号坝基沉降量较大且在继续发展,经调查分析表明该处基岩内存在破碎带和软弱夹层,对坝基稳定不利,于是放空水库进行了地基加固处理;1993年的监测资料分析又发现大坝向下游的位移量明显增大,超过历史最大值的30%多,立即进行全面的检查和分析,判断为大坝遭遇到不利工况所致,考虑到大坝基础、坝体均存在一定的缺陷,为保障大坝安全,决定控制水位运行;1997年地大坝监测系统进行了改造,加强了对大坝结构性态的监测;1999年首次安全定期检查将佛子岭大坝评定为病坝,进一步明确要求控制水位运行;此后对佛子岭大坝坝体、坝基和溢洪道进行了一系列加固处理。

安全监测犹如大坝的“医生”,是大坝安全的耳目,其主要目的在于:

(1) 掌握工作性态,监视工程安全。可以及时获取大坝第一手安全参数和资料,掌握大坝的工作性态,诊断大坝的健康状况,实现对大坝的在线、实时安全监控,并为实施大坝安全预警和制定应急预案提供基础。

(2) 服务工程运行,提高工程效益。可以及时发现大坝的异常迹象,分析异常状态的成因和危险程度,预测大坝安全趋势,制定工程的控制运行计划和维护改造措施,为充分发挥工程经济效益提供技术服务和安全保障。

(3) 检验设计与施工,促进坝工科技发展。可以认识监测效应量的变化规律,检验坝工基本理论、设计方法和计算参数等的合理性,验证施工措施、材料性能、工程质量等的效果,研究坝工工作机理和失效模式,提高坝工科学技术水平。

第二节 大坝安全监测的发展历史

大坝安全监测是顺应工程安全的需要,并随着坝工建设的进展而发展起来的,大致可以划分为四个阶段,即感性认识阶段、原型观测阶段、大坝观测阶段和安全监测阶段^{[1][7]}。

一、第一阶段——感性认识阶段

第一阶段是从远古到19世纪末,是早期阶段。当时主要是一些土石材料坝,对坝的观测仅为感性认识,主要是简单的外表巡视检查。

二、第二阶段——原型观测阶段

第二阶段是20世纪初至20世纪50年代,是起步阶段。随着坝工技术的较快发展,坝工理论体系基本形成,一些新型结构不断出现。为了检验设计理论和计算方法,研究效应量的变化规律,开始在部分大坝中埋设安装相应的监测仪器。为与模型试验相对应,此阶段将监测工作普遍称为“原型观测”。此阶段的主要成就有以下几个方面。

(1) 初步出现了成型的观测仪器和观测方法,如:1919年出现了弦式仪器,1932年出现了差动式仪器(卡尔逊仪器);开始采用垂线法观测挠度(水平位移),采用三角测量法、视准

线法、精密水准法观测水平位移和垂直位移,采用静力水准法观测倾斜;采用测压管监测混凝土坝坝基扬压力等。1891年,德国的埃斯希巴赫重力坝进行了变形观测;20世纪初,澳大利亚的鲑溪拱坝和瑞士的孟萨温斯拱坝进行了挠度观测,孟萨温斯拱坝坝体内还埋设了压阻式仪器,美国的波顿重力坝进行了温度观测,等等。我国20世纪50年代开始在官厅水库和淮河上的南湾、薄山等大型水库大坝上进行水平位移、垂直位移(沉降)和坝体浸润线观测,在丰满、佛子岭、梅山等水电站大坝进行了温度及应力应变观测。

(2) 开始采用简单的方法对观测资料进行分析,一些设计理论和计算方法(如拱坝试载法、重力坝坝基扬压力计算方法等)被观测资料所验证而得到肯定和推广。美国在20世纪初用拱冠梁法设计了几座中高拱坝,为了确定拱冠梁法的可靠性,于1927年建造了高18.3m的斯蒂文生—克锐克(Stevenson Creek)试验拱坝,埋设了150支电测仪器进行实测,取得了大量观测数据,对建立和发展试载法起了很大作用。

三、第三阶段——大坝观测阶段

第三阶段是20世纪60年代至20世纪90年代,是发展阶段。随着一些著名大坝的失事,各国政府和公众对大坝安全深切关注,安全监测工作被提高到一个更加重要的地位,得到了快速的发展。此时监测工作的主要目的是获取观测数据,从而对结构性态进行评价,发现工程存在的安全隐患,为大坝安全管理提供一定的依据。因此,此阶段将监测工作普遍称为“大坝观测”。此阶段的主要成就有以下几个方面。

(1) 监测仪器的性能得到了较大改善,常规监测仪器可靠性得到了保障,初步出现了自动化观测系统,自动化或半自动化观测手段逐步取代手工观测;大、中型工程一般均设置了监测系统,并有专人负责观测工作,日常观测逐步实现正规化、规范化监测对象也由工程主体及浅层地基扩展到地基深层及周边更大相关范围(如近坝库区),对地基、岸坡的观测给予了更多的重视。

(2) 安全监测制度、法规和管理机构开始出现,并逐步健全。美国大坝安全联合委员会于1979年制定了《联邦大坝安全导则》,1996年制定了“国家大坝安全计划”;英国1975年在原《水库安全保护法》的基础上,颁布了《水库法》;加拿大大坝安全协会1990年代发布了《大坝安全导则》;俄罗斯联邦于1997年颁布了《水工建筑物安全法》,此后还陆续制定了《水工建筑物安全国家监察的组织》、《俄罗斯联邦水工建筑物注册登记局的组建和运作办法》、《关于批准水工建筑物安全报告条例》等一系列标准与法规;法国、德国、意大利、挪威、日本、印度等国家均以立法或规范的方式,对大坝安全监测和管理进行了严格的规定,并成立了相应的国家管理机构。我国于20世纪80年代先后成立了水电站大坝安全监察中心和水利大坝安全管理中心,分别对水电站大坝和水利大坝进行行业管理,并陆续制定了一系列与大坝安全有关的法律、法规和规范,如1988年颁布了《中华人民共和国水法》,1991年颁布了《水库大坝安全管理条例》,1997年颁布了《水电站大坝安全管理办法》等,并已实施大坝安全注册和大坝安全定期检查制度,使得大坝安全监测和管理步入了有法可依、有章可循和依法管坝的标准化轨道。

(3) 监测资料分析方法从定性分析向定量分析转变,出现了一系列安全监测数学模型。提出了以水压、温度/降雨和时效来描述大坝变形/渗流影响因素的方法,采用回归分析方法

建立了大坝变形/渗流监测统计模型,利用有限元计算与实测资料相结合的方法建立了大坝变形/渗流确定性模型和混合模型;开展了多测点监测分布模型、多项目综合评价模型、监测资料反分析(反演分析与反馈分析)等方面的研究。

四、第四阶段——大坝安全监测阶段

第四阶段是 20 世纪 90 年代末期以来的成熟阶段。监测已经在大坝中得到广泛应用,并已取得了实质性成果。监测目的已经从验证设计、解释性态转变为安全评价、安全监视,并且正在向实时、在线安全监控方向发展。因此,目前监测工作普遍称为“安全监测”,并开始出现“安全监控”的提法。此阶段目前的主要成就有以下几个方面。

(1) 已形成了型谱齐全、性能稳定的监测仪器系列,并具备了开发新型监测仪器的能力;监测自动化系统已趋完善,并基本实现监测数据远程控制(采集、传输);各类监测法律、法规、规范体系已基本完备,大坝安全定期检查制度已逐步完善。

(2) 安全监测设计已从工程类比向优化设计发展,开始从机理上研究安全监测设计方案;安全监测已成为工程设计、项目审批、竣工验收的必需内容,形成了单独设计、单独审查、单列资金、单项验收的监测工程管理体制。

(3) 三大传统监测模型(统计模型、确定性模型和混合模型)基本完善,以现代数学理论和系统分析方法为基础的新型监测模型不断涌现,监测资料分析理论和方法得到了深入的研究;开始从机理上研究大坝健康诊断技术和寿命预测方法;出现了比较完善的安全监测信息管理系统,开展了大坝安全辅助决策支持系统的研究;安全监控指标和监控模型的理论研究取得了长足的进展,且初步能应用于工程实际;监测工作正在向实时、在线安全监控方向发展。

五、未来的发展趋势——大坝安全监控

大坝安全监测经历了感性认识、原型观测、大坝观测、安全监测等阶段,随着监测技术的发展和计算机网络技术、人工智能技术的进步,正在朝着大坝安全监控的方向发展。未来大坝安全监测的主要发展趋势为^[7]:

(1) 大坝安全监测的功能,正在从离线分析大坝安全,向实时、在线大坝安全健康诊断和安全监控的方向发展,未来将会出现高智能、高效率、高可靠性的真正意义上的大坝安全监控系统。

(2) 大坝安全监测的区域,正在从单个大坝的分散安全监测,向大坝群、区域大坝乃至全国大坝的统一集中监控的方向发展,未来将出现真正意义上的全国性大坝安全监控中心。

第三节 大坝安全监测的基本环节和主要阶段

一、基本环节

大坝安全监测是水利水电工程学科中融工程结构学、工程力学、仪器仪表学、计算机科学、现代数学、网络技术等诸多现代理论和高新技术于一体的一个重要分支,主要包括监测

仪器(系统)、监测设计、监测施工、监测数据采集、监测资料整理与分析、安全评价、安全监控等主要环节。其中,监测仪器是安全监测的基础,监测设计是安全监测的关键,监测施工和监测数据采集是安全监测的保证,监测资料整理与分析是安全监测的手段,安全评价与监控是安全监测的根本目的。

二、主要阶段

大坝监测工作贯穿于坝工建设与运行管理的全过程,基本上可以划分为以下5个阶段。

(1) 可行性研究阶段:提出大坝安全监测系统的总体设计方案、设计专题、监测项目、测点布置、监测仪器技术要求以及所需仪器与设备的数量和监测系统的投资概算(一般占主体工程总投资的1%~3%)。

(2) 招标设计阶段(初步设计阶段):优化大坝安全监测系统的总体设计方案,提出安全监测系统设计文件,包括监测系统布置图、监测仪器设备清单、各监测仪器设施的技术要求、安装埋设要求、观测测次要求、工程预算等。

(3) 施工阶段:设计单位应提出施工详图。承建单位应按照设计要求和规范规定,实施仪器设备(含传感器、电缆、二次仪表、自动化系统等)的采购、检验、率定、埋设、安装、调试和维护,编写埋设安装记录,绘制单项仪器埋设安装竣工图;固定专人进行施工期监测数据采集,保证监测资料的连续、可靠、完整;及时对监测资料进行初步分析,为优化主体工程施工方案和评价工程安全提供依据;施工期应编写各类监测报告(月报、季报、年报、特殊观测报告);工程竣工验收时应编写竣工报告,绘制竣工图,并将监测设施和竣工图、埋设记录和施工期观测记录以及整理、分析资料等全部成果汇编成正式文件移交给管理单位。有条件时,应建立施工期监测信息管理系统。

(4) 首次蓄水阶段:制定首次蓄水的监测工作计划和主要的设计监控技术指标;按设计要求和规范规定,进行监测仪器的常规观测和加密观测及巡视检查;在蓄水前取得并确定各监测测点的基准值,定时对工程安全状态作出初步评价,为制定和优化蓄水方案提供依据。

(5) 运行阶段:进行日常的及特殊情况下的监测工作,实施监测数据的定期采集,并定期进行巡视检查;及时整理、整编监测成果并编写报告,建立监测技术档案;建立安全监测信息管理系统,及时分析监测资料,判断工程安全状态,发现监测资料中的异常现象以及工程可能存在的安全隐患,并分析成因,制定相应的处理或改造措施;做好监测系统的维护、更新、补充、完善、鉴定等工作。有条件时,应建立专家系统或辅助决策支持系统,对工程实施实时、在线安全监控。

第四节 大坝安全监测的主要项目

大坝安全监测包括仪器观测和巡视检查两个方面,它们是大坝安全监测中相互联系、互为补充、缺一不可的两个有机组成部分。一方面,通过先进的仪器和技术,可以获得巡视检查无法得到的数据和信息,特别是隐蔽部位(如坝体内部、坝基等)的信息,并为实现大坝安全的定量分析和利用现代计算机技术实现大坝安全监控提供条件和基础。另一方面,在当前的技术、经济条件下,仪器监测基本上属于“点”监测,监测范围和内容还相当有限,局部的

安全监测还难以反映大坝整体的安全状态,必须充分发挥巡视检查的作用,通过长期、全面的巡视检查来及时发现仪器监测未能反映出的异常现象。因此,大坝安全监测,决不仅仅只是仪器监测,而应包含仪器监测和巡视检查两个同等重要的部分,二者不可偏废。

大坝安全监测项目的设置,与大坝的型式、工作原理、工程等级以及运行方式等密切相关。不同类型和等级的大坝,监测项目设置的侧重点也有所不同。

一、监测项目的分类

(一) 监测项目分类方法的演变

我国在 20 世纪 80 年代初期举办过多次“全国大坝观测培训班”。原水利电力出版社在该培训班讲稿的基础上,出版了 1 套 3 本“大坝观测技术培训教材”,分别为赵志仁、叶泽荣编写的《混凝土坝外部观测技术》,储海宁编写的《混凝土坝内部观测技术》和李珍照编写的《混凝土坝观测资料分析》。这套教材的出版,对于推动我国大坝安全监测的发展起到了巨大的作用,产生了深远的影响。同时,这套教材的出版,实质上也间接地反映了当时对大坝观测项目(仪器观测)的分类方法,即将大坝观测项目(仪器观测)划分为“外部观测”和“内部观测”(分别简称为“外观”和“内观”),其分类原则主要是按照观测仪器是安置在坝体外部还是埋设在坝体内部来区分。

仪器观测的“外观”和“内观”分类方法,只是从观测表象上而不是从观测机理上来对仪器观测项目进行分类,因而在涉及到具体监测项目的归类时,常常产生困惑。典型的事例是,按上述分类方法,在渗流监测中,测渗压被归类为“内观”监测,而测渗流量应归类为何种类型的监测,则不明确。

基于上述原因,1994 年颁布的《土石坝安全监测技术规范》(SL 60—94)已经放弃了上述“外观”和“内观”的分类方法,提出了“变形监测”、“渗流监测”、“压力(应力)监测”和“水文、气象监测”的监测项目(仪器监测)分类方法;2003 年颁布的《混凝土坝安全监测技术规范》(DL/T 5178—2003)则明确了监测项目(仪器监测)划分为“变形监测”、“渗流监测”、“应力、应变及温度监测”和“环境量监测”。两规范提出的监测项目分类方法,从监测物理量的作用机理出发,反映了监测物理量的本质特性,便于描述和解释环境量对监测物理量的影响,更有利于分析大坝结构形态和实施大坝安全监控。

比较上述两种分类方法,后一种分类应更为科学、合理。“外观”和“内观”的分类方法在大坝安全监测领域影响深远,以至于目前很多监测设计图纸和设计报告以及监测研究报告、监测学术论文等仍在沿用该分类方法。但是,鉴于后一种分类方法的优越性,应在大坝安全监测领域广泛宣传、普及推广后一种分类方法,并明确废弃前一种分类方法。

此外,随着监测范围的扩展,诸如水力学监测、地震监测、动力监测等一些新兴监测项目不断涌现。这些监测项目主要针对某一专门问题进行监测,因此,应在规范中的监测项目类型上新增一类“专项监测”或“专门监测”。

综上所述,大坝安全监测应分为“仪器监测”和“巡视检查”两大类,其中,仪器监测项目以划分为“环境量监测”、“变形监测”、“渗流监测”、“应力、应变及温度监测”和“专项监测”5 类为宜。

(二) 仪器监测项目的一般分类

综合《土石坝安全监测技术规范》(SL 60—94)和《混凝土坝安全监测技术规范》(DL/T 5178—2003),大坝安全监测项目一般可以归纳为以下 5 类。

(1) 工作条件监测:也称环境量监测,主要包括上游水位、下游水位、库水温、坝址气温、坝址降雨量、坝前淤积、下游冲刷、冰冻等。

(2) 变形监测:主要包括坝体水平位移、坝体垂直位移、坝基水平位移、坝基垂直位移、坝体倾斜、接缝和裂缝开合度、近坝区岸坡变形等。

(3) 渗流监测:主要包括混凝土坝的扬压力、土石坝的浸润线、坝基渗透压力、渗流量、绕坝渗流、渗水透明度及化学分析、导渗降压等。

(4) 应力监测:也称应力应变及温度监测,主要包括混凝土坝的混凝土应力、应变、钢筋应力,钢管及蜗壳的钢板应力,混凝土坝体温度及坝基温度,土压力,锚杆(索)应力等。

(5) 专门监测:也称专项监测,主要包括高边坡稳定,局部结构应变及应力,坝体动力监测(坝体振动、地震反应等),水力学项目等。

二、混凝土坝安全监测的主要项目

根据《混凝土坝安全监测技术规范》(DL/T 5178—2003),混凝土坝安全监测项目设置按表 1-1 执行。从表 1-1 可以看出,巡视检查、坝体及坝基位移、裂缝变化、扬压力、渗流量、绕坝渗流以及环境变量中的上下游水位、坝址气温和坝址降雨量属于所有等级混凝土坝均必设的监测项目,这也从一个侧面反映了这些监测项目对混凝土坝安全评价和安全监控的重要性。

表 1-1 混凝土坝安全监测项目分类表

(引自《混凝土坝安全监测技术规范》(DL/T 5178—2003)附录 A 表 A.1)

序 号	监测类别	监 测 项 目	大 坝 级 别		
			1	2	3
1	巡视检查	坝体、坝基、坝肩及近坝库岸	●	●	●
2	变形	1) 坝体位移	●	●	●
		2) 倾斜	●	○	
		3) 接缝变化	●	●	○
		4) 裂缝变化	●	●	●
		5) 坝基位移	●	●	●
		6) 近坝库岸坡位移	○	○	○
3	渗流	1) 渗流量	●	●	●
		2) 扬压力	●	●	●
		3) 渗透压力	○	○	
		4) 绕坝渗流	●	●	●
		5) 水质分析	●	●	○