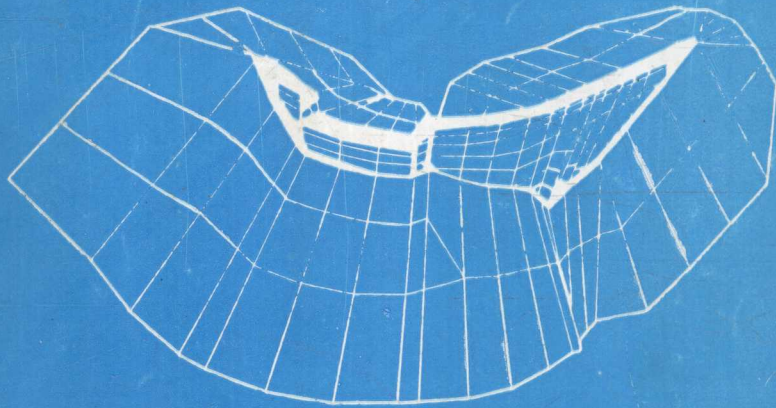


大坝安全监测培训教材

大坝安全监测

吴炳麟 琪 轩 道 英



武汉工业大学出版社

大坝安全监测培训教材

大坝安全监测

吴炳麟 琪轩 道英

武汉工业大学出版社

大坝安全监测培训教材
大坝安全监测
吴炳麟 等编

武汉工业大学出版社出版发行

(武汉市武昌街道口, 邮政编码: 430070)

水利部丹江口水利枢纽管理局印刷厂印刷

开本: 787×1092 1/16毫米 印张: 25.25 插页: 4 字数: 630千字

1991年10月第1版 1991年10月第1次印刷

印数: 1—1000册

ISBN 7-5629-0478-2/TU·29

定价: 15.00元

序

全世界有各种坝20余万座，其中我国就有8.6余万座，在世界各国中占首位。这些坝在发电、防洪、灌溉、城市供水、工业供水等方面发挥着重要作用。但是，坝的失事将给社会带来巨大灾害。因而各国政府和人民都很重视坝的安全问题。为防止超标准洪水漫坝，有赖于流域降雨监测—洪水预报—水库调度监控系统。为防止坝和泄水建筑物结构失事，有赖于结构运行性态监测—效应量预报—水位操纵监控系统。

我国水利电力部（现在为水利部和能源部）对大坝安全非常重视，水利电力部培训中心每年都开设大坝观测培训班。能源部大坝安全监测中心每年都委托河海大学水力发电工程系为各水电厂的观测班长开设安全监测培训班，收到了很好的效果。本书是根据培训中心使用了十余次的教材经补充更新而成的。

本书重点讲述大坝外部位移观测的大地测量法和引张线法，混凝土坝内部位移（挠度）观测的垂线法，土石坝内部位移（沉降）观测的横梁固结管法和连通管法，混凝土坝温度、应力、应变的内部观测仪器，土坝渗流观测和混凝土坝扬压力观测等。还介绍了土坝隐患探测的电测法和同位素法。本书还简明地讲述了测值的数据处理统计模型、确定性模型和混合模型。

需要注意的是，仪器监测是局部的定点的，而大坝发生异常，不一定在埋设仪器监测的部位。根据统计，大坝失事的先兆，有60%是巡视检查发现的。所以，不论仪器监测精度多高，自动化程度多高，而现场巡视检查必不可少。即使用自动监控系统报警，还要结合巡视检查的宏观现象才能决策。

本书也注意到巡视检查的重要性，介绍了巡视检查的项目、等级、内容、测次。

本书的编写，参照了1990年水利部、能源部颁布的《混凝土大坝安全监测技术规范》和1990年中国水利部大坝安全监测中心拟定的《土石坝安全监测技术要点》以及水利电力部制订的《水工建筑物观测工作手册》。书中涉及项目、测次、方法等符合上述规范要求、手册的规定。

本书选材较广，内容较全，系统性较好。对提高水库大坝及水工建筑物观测人员的技术素质和扩大知识面能起到良好作用。是一本较好的大坝安全监测培训教材。

河海大学教授

水利部技术委员会委员

顾淦臣

1991年9月

前 言

随着坝工建设的日益发展以及溃坝教训的深化，大坝安全监测在坝工建设和运用管理中占有着重要地位。

1982年在里约热内卢举行的国际大坝委员会（ICOLD）第50次执行委员会会议上，组建了大坝及其基础监测委员会。并在1988年颁布了由该委员会主席意大利Marazio教授起草的国际大坝委员会第60号公报——“大坝监测基本要求”，它是在修订第21号公报（土石坝仪表量测）和第23号公报（大坝量测一般准则）的基础上合并制定的。全委会商定在公报中关于大地测量的光学监测法可大量删减，只提出一些基本概念和要求就足够了，避免重复混凝土坝和土石坝所共有的部分，并拟在下一个公报中编录一些国家的实例。

1989年年底，水利部在湖南岳阳召开了我国“第二届全国土石坝安全监测座谈会”，会议指出，全国土石坝的安全监测工作急待加强和提高。

1991年是我国继续教育年。

鉴于上述情况，为使从事大坝安全监测工作的工程技术人员和读者能获得体现当前这方面水平的一些信息，故编写了此书。

本书本着国际大坝委员会第60号公报精神和基本要求，同时考虑我国实际情况和教材特点，对一些不必要的公式推导，则予省略，而侧重于介绍土石坝的安全监测情况。

本书分上、下两篇，共二十五章。

上篇讲述变形、渗流、温度、应力、应变、强震、高速水流、水库水文、水质、泥沙、淤积和冰凌等监测项目和方法。介绍了电法探测和核子跟踪技术在监测裂缝和渗漏中的应用。以及强调了大坝安全巡视检查的重要性。

下篇讲述资料整编微机处理的重要性的方法，数据库的建立和检索方法；比较了国内外流行的统计模型、确定性模型和混合模型的优缺点；介绍了捕捉“异常”的一些基本方法和专家系统。阐述了变形、渗流、应力、应变资料分析方法，编录了国内外一些土石坝的成功监测、酒埠江“病险库”安全论证的实例，以及丹江口水利枢纽管理局引进的法国监测项目和监测情况。

本书由吴炳麟副教授、琪轩高级工程师和道英工程师等编写。全书由水利部丹江口水利枢纽管理局副总工程师王占锐高级工程师主审。参加审核的还有江西拓林电站总工程师王永元高级工程师、湖北漳河水库管理局副局长林善钿高级工程师等。

水利部丹江口水利枢纽管理局綦连安局长对本书的编写给予了极大的关心和支持，并题写了书名。水利战线老前辈、二级教授顾淦臣老先生为本书题写了序言。谨在此一并表示谢意。

由于时间仓促、水平有限，不妥之处望读者、专家指正。

编 者

1991年3月

目 录

上篇 大坝安全监测项目和方法

第一章	概论	(3)
第一节	坝工建设和安全监测发展简史.....	(3)
第二节	大坝失事和质量概况.....	(4)
第三节	大坝安全监测目的和项目.....	(9)
第二章	前方交会法监测水平位移	(11)
第一节	概述.....	(11)
第二节	边角网.....	(11)
第三节	前方交会法.....	(16)
第三章	视准线法监测水平位移	(33)
第一节	视准线监测方法.....	(33)
第二节	精度分析.....	(40)
第三节	激光准直线法监测水平位移.....	(43)
第四章	引张线与垂线监测水平位移及缝的监测	(46)
第一节	引张线法监测水平位移.....	(46)
第二节	垂线法监测坝体挠度.....	(48)
第三节	缝的监测.....	(51)
第五章	水准测量监测垂直位移	(53)
第一节	精密水准监测大坝垂直位移.....	(53)
第二节	精度分析.....	(56)
第六章	土坝固结监测	(61)
第一节	概述.....	(61)
第二节	固结监测方法.....	(62)
第七章	连通管法监测垂直位移	(65)
第一节	概述.....	(65)
第二节	连通管法监测方法.....	(65)
第八章	混凝土重力坝扬压力监测	(66)
第一节	概述.....	(66)
第二节	扬压力监测方法.....	(66)

第九章	土坝渗流监测	(69)
第一节	概述.....	(69)
第二节	土坝浸润线(坝体渗流压力)监测.....	(73)
第三节	土坝坝基渗水压力监测.....	(77)
第四节	绕坝渗流监测.....	(78)
第五节	导渗降压监测.....	(78)
第六节	渗流量与透明度监测.....	(80)
第十章	温度、应力及应变监测	(83)
第一节	内部监测系统.....	(83)
第二节	仪器类型、原理及率定.....	(83)
第三节	内部监测仪器.....	(90)
第四节	仪器埋设.....	(96)
第五节	混凝土坝内部监测.....	(97)
第六节	土坝内部监测.....	(121)
第十一章	基岩变形及滑坡监测	(123)
第一节	概述.....	(123)
第二节	基岩相对变形监测.....	(124)
第三节	基岩绝对变形监测.....	(127)
第四节	岩基滑坡监测.....	(128)
第十二章	高速水流监测	(129)
第一节	概述.....	(129)
第二节	水流流态监测.....	(130)
第三节	空蚀监测.....	(132)
第四节	磨损监测.....	(135)
第五节	冲刷监测.....	(139)
第六节	进气量监测.....	(142)
第七节	振动与负压监测.....	(143)
第十三章	强震监测	(145)
第一节	概述.....	(145)
第二节	强震监测.....	(145)
第十四章	含砂量与库区泥砂淤积监测	(150)
第一节	概述.....	(150)
第二节	库区的淤积监测.....	(150)
第十五章	水库水文与水质监测	(154)
第一节	降水量与水文监测.....	(154)

第二节	流量监测	(155)
第三节	波浪与冰凌监测	(156)
第四节	水质污染监测	(157)
第十六章	大坝隐患的电法探测与核技术监测	(171)
第一节	电法探测大坝隐患	(171)
第二节	核子示踪技术监测渗漏	(172)
第十七章	大坝运行性态巡视检查	(174)
第一节	概述	(174)
第二节	巡视检查	(174)
第十八章	大坝安全监测设计	(178)
第一节	概述	(178)
第二节	原型监测设计	(178)

下篇 监测数据处理与资料整编分析

第十九章	误差与最小二乘法	(187)
第一节	概述	(187)
第二节	误差传递的估算	(194)
第三节	最小二乘法	(197)
第二十章	统计模型	(200)
第一节	一元线性回归统计模型	(200)
第二节	化曲线为直线的一元回归	(214)
第三节	多元线性回归	(219)
第四节	多项式回归	(238)
第二十一章	谱量模型与经验公式	(254)
第一节	实用谱量分析方法	(254)
第二节	经验公式	(260)
第二十二章	有限元及确定性模型、混合模型	(261)
第一节	有限元	(261)
第二节	反分析与确定性模型、混合模型	(277)
第二十三章	信息、检索、数据库与资料整编	(295)
第一节	信息与资料整编	(295)
第二节	检索与数据库	(295)
第三节	资料整理、整编及其微机处理	(300)

第二十四章	监测资料分析	(304)
第一节	捕捉异常的基本简易方法	(304)
第二节	变形资料分析	(313)
第三节	渗流资料分析	(321)
第四节	温度、应力、应变资料分析	(340)
第五节	专家系统	(343)
第二十五章	土石坝原型监测实例	(344)
第一节	湖南铁山坝原型监测	(344)
第二节	墨西哥埃尔因非尼罗坝原型监测	(348)
第三节	美国马莫思普尔坝原型监测	(350)
第四节	日本四座水库工程管理简况	(352)
第五节	酒埠江“病险”库大坝安全论证	(353)
第六节	丹江口引进法国大坝自动监测装置简况	(370)
附表		
	〔1〕 相关系数检验表	(381)
	〔2〕 F检验的临界值(F_{α})表	(382)
	〔3〕 正交多项式表	(387)
参考文献	(393)

上 篇

大坝安全监测项目和方 法

THE UNIVERSITY OF CHICAGO PRESS

第一章 概 论

第一节 坝工建设和安全监测发展简史

坝工建设和安全监测发展过程可划分为三个阶段：

一、初级阶段

我国早在公元前240年就在山西修成高30米的石龙坝，公元883年在浙江宁波大溪修筑了高27米的砌石溢流坝。在埃及、锡兰、印度等国，早期也都修筑了大量堤坝。这一时期修筑的大多数为高20米以下的均质粘土堤坝。

第一次产业革命时期（从18世纪50年代起以纺织机、蒸汽机应用为特征的产业革命），强盛的西班牙修了高达44.5米的一座土坝，但蓄水后不久溃毁。致使其后一百多年不敢修造高坝。

第二次产业革命时期（从19世纪40年代起，以电力、钢铁、机械为特征的产业革命），随着1856年达西定律的提出，修造堤坝有所提高。

第三次产业革命时期（从20世纪初期，以汽车、化工、电子工业等为特征的产业革命），科学技术的发展，推动了坝工的建设。

在初级阶段，大坝安全监测工作基本上没有开展。

二、发展阶段

随着第三次产业革命爆发，相应对坝工建设也提出了相应要求，尤其是美国，由于开发西部干旱地区，坝工建设和监测技术都得到了蓬勃发展。例如20世纪初至70年代修造的近100座高于100米的高土石坝中，美国就占了三分之一强。在1937年，美国首先建造了高100米的混凝土斜墙堆石坝。其次，同期修筑高坝的还有日本、墨西哥、加拿大等国。中国仅修了一座，苏联由于卫国战争，没有修造高坝。

这一时期，随着高坝修筑，开展了测压管、孔隙水压力、位移、沉降标点、应变计等原型监测。

解放初期，相继修建了官厅水库、南湾水库、大伙房水库等，坝高在30~50米。并相应的开展了初步监测工作。60年代在横山坝第一次埋设了钢弦式压力计和弦式孔隙水压力计。1964年，修建了高135米的石门坝。

三、提高阶段

70年代至今可视为提高阶段。可从三方面看出，其一是接受了大量溃坝的经验教训，交了“学费”，对多方面事故原因有了认识；其二是对高坝的修筑有了突破，苏联修建的高于200米的土坝占了40%，其次象哥伦比亚、土耳其也后来居上。中国至今没有一座高

于200米石坝；其三是由于电子工业和计算机的发展，使土石坝在原型监测方面不仅在数量上，而且在品种、质量上也都有了大量发展。原观向电脑集中、自动遥控方向发展。

国内外建坝概况请见表1—1，从表中可以看到我国建筑土坝约占总数的90%左右。

第二节 大坝失事和质量概况

一、大坝失事概况

我国共修有8万余座水库，以中小型水库为主，其中大型水库三百余座，为骨干工程。近年来，平均每年约有100座水库垮坝，绝大多数为小型水库，最多的一年是1973年，垮坝400余座；最低一年是1980年，也有61座。历年垮坝情况见图1—1。

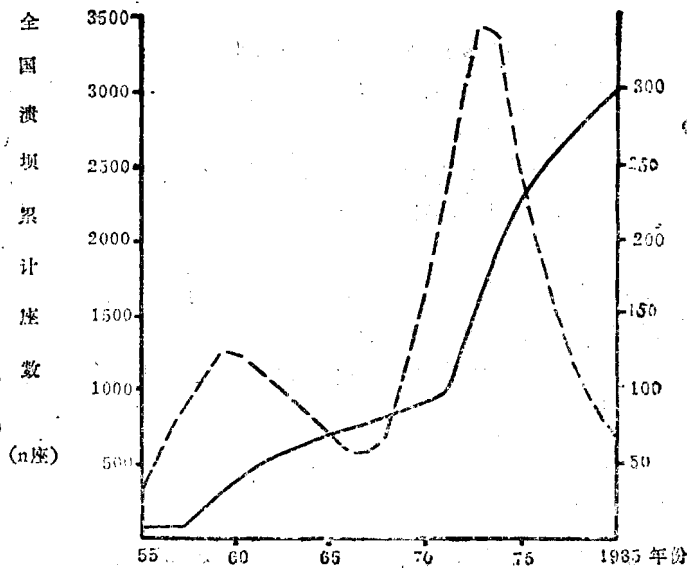


图 1—1 我国解放后历年溃坝情况图

- ①国内外建坝和失事概况见表1—2。
- ②全国各省市建库，垮坝情况见表1—3。
- ③按水库大小，各大行政区垮坝情况见表1—4。
- ④按主体工程部位失事情况见表1—5。
- ⑤按失事原因情况见表1—6。

二、我国土石坝质量概况

水利部在1981年对部属241座大型水库先后发生的1000起事故资料进行了整理分析。事故发生的现象是多样的，原因是复杂的，其事故概况见表1—7。从表中可以看出，因渗流、变形及其他引起的病害各占1/3左右。

从表中还可看出，我国已建的大型水库工程，基本上大小都有些“病”，其中有较大质量问题的有76座，占279座的1/4左右。1988年水利部列为病险库的有43座。

表 1-1 国内 外 建 坝 概 况 一 览 表

数量： $\frac{\text{座数}}{\%}$

规 模 (亿 立 米)	库 容 (亿 立 米)		坝 高 (米)		坝 型			最 大 坝 高		最 大 库 容							
	数 量 (座)	等 级	数 量 (座)	等 级	土 坝	均 质 坝	心 墙 混 合 斜 墙	中 国	外 国	中 国	外 国						
大 型	$\frac{319}{10}$	100	$\frac{7}{2}$	100	$\frac{8}{0.3}$	土 坝	$\frac{1336}{65}$ 均质 $\frac{585}{28}$ 心墙 $\frac{75}{3}$ 混合 $\frac{83}{4}$ 斜墙	广东松涛 80米 甘肃碧口 102米 北京密云 66米 广东龙颈 57米	苏联 罗贡土石坝 325米	加拿大 贝尼特土坝 703亿 苏联 布拉次克土 坝和重力坝 16927亿	中国 江西柘林 72亿						
								$\frac{2945}{83}$	60	以下	$\frac{127}{5}$ 圪工 堆石坝	浙江皎口 95米 河南群英 95米 广东南水 81米	印度 纳加凉萨格坝 125米	加纳科松堆 石坝 1480亿			
															甘肃刘家峡 147米 安徽梅山 88米	苏联 英古里双曲 拱坝 272米	河南三门峡 354亿
合计 2571	合计 2571	合计 2571	合计 2571	合计 305 12	注：世界建坝约25万座，其中土坝占2/4，重力坝约占1/4，其它约1/4。												
中 型	$\frac{2252}{90}$	不 分	$\frac{8}{2}$	情 况 不 明	情 况 不 明	其 他	重力 拱 大头 平板	甘肃刘家峡 147米 安徽梅山 88米 浙江新安江 95米 广东新丰江 95米	苏联 英古里双曲 拱坝 272米 瑞士 大狄克逊坝 225米	河南三门峡 354亿	乌干达欧文 瀑布 2048亿 赞比亚卡里 巴 拱坝 1604亿						
0.1~1	合计	合计	合计	合计	合计	合计	合计	合计	合计	合计	合计						

国内外建坝质量和失事一览表

表 1-2

规模等级	质量		失事情况				美国概况	世界概况
	数量(座)	数量(座) %	数量(座)	失事方面	原因	典型事例		
大型	319	好	$\frac{159}{50}$	勘设	$\frac{975}{41}$	1979年四川省跨坝50座, 其中28座是因为现场定点, 口头设计, 草图定案, "跃进"施工。	美国建坝约5万座, 其中险坝2万座, 约占40%, 险坝中, 较严重的有0.9万座, 约占20%。	>15米约有25万座, 其中有较大问题的坝约有13万座, 约占50%。每年失事率约为。 1/1500~1/1800。 其中也以中小型坝为主。
		较大问题	$\frac{120}{38}$ (列为病险库)	施工	$\frac{884}{37}$	1979年山西省榆林水库上游没有做好防渗处理, 下游防渗没有做反滤层。		
中型	2252	不明	$\frac{40}{12}$ (归电力部管)	管理	$\frac{120}{5}$	1975年甘肃省党河水库县委书记拍板, 片面追求兴利库容, 挤占防洪库容。	注1: 近年来, 一般年份每年跨坝100座, 最多的一年是1973年, 跨坝400座, 最低一年是1980年, 仅61座。年失事率约1/850。	注2: 若以大型事故1000例为依据则属裂缝事故的为253起占25%; 属于渗漏事故的为317起占31%; 属于变形破坏事故的为174起占17%; 属于其他方面事故为256起占26%。
		较好	$\frac{\text{约}4\text{万余}}{50}$	或特大自然灾害	$\frac{412}{17}$	1976年河南省板桥水库超标洪水, 实际洪水量约为万年一遇标准的2倍左右。		
小型	8.3万	较差	$\frac{2273}{3}$					
合计	85万		2391					

表 1—3

全国已建水库和垮坝数统计表

地 区	已 建 水库数	垮 坝 宗 数	垮坝率 (%)	地 区	已 建 水库数	垮 坝 宗 数	垮坝率 (%)		
A 区	1	82	1	1.2	D 区	15	2486	161	6.5
	2	37	2	5.4		16	6280	97	1.5
	3	1230	128	10.4		17	12705	251	2.0
	4	909	275	30.3		18	7446	16	2.2
	5	5590	138	2.5		19	4570	109	2.4
	6	657	104	15.8		E 区	20	1506	161
B 区	7	1030	36	3.5	21		336	81	24.1
	8	1305	69	5.3	22		195	26	13.3
	9	427	73	17.1	23		113	7	6.2
C 区	10	1188	28	2.4	24		514	112	21.8
	11	3473	109	3.1	F 区	25	12239	285	2.3
	12	2176	59	2.7		26	4173	169	4.0
	13	4257	97	2.3		27	1998	73	3.7
	14	9900	162	1.6		28	30	0	0
								平均 3.4	

表 1—4

按水库类型各区垮坝统计表

区 域	大 型		中 型		小(一)型		小(二)型		合 计	
	座	占现有 水库%	座	占现有 水库%	座	占现有 水库%	座	占现有 水库%	座	占现有 水库%
A 区			12	7.2	109	17.5	389	18.6	510	17.5
B 区			29	17.2	43	5.8	106	5.8	178	6.4
C 区			7	1.2	73	1.9	513	2.3	593	2.2
D 区	2	0.6	36	3.6	125	2.1	618	2.3	781	2.3
E 区			7	3.2	99	4.1	421	2.7	527	2.9
F 区			26	14.6	145	20.8	216	12.2	387	14.5
总计	2	0.6	117	5.1	594	4.2	2263	3.2	2976	3.4
占垮坝数%	0.1		3.9		20		75		100	

表 1—5

按失事主体工程部位水库失事统计表

主体工程	运 行	施 工	合 计	占水库失事总数%
大 坝	1878	669	2547	85.6
溢 洪 道	121	76	197	6.6
输 水 洞	146	11	167	5.3
基 础	34	5	39	1.3
情况不明	22	14	36	1.2
总 计	2201	775	2976	100.0

表 1—6

按失事情况分类统计表

失 事 类 型	宗 数	占失事总数%
一、漫坝	1534	51.5
1、泄洪能力不足	1252	42.0
2、超标准洪水	282	9.5
二、质量问题	1146	38.5
1、坝体渗漏	675	22.7
2、滑坡	78	2.6
3、坝基渗漏	39	1.3
4、溢洪道渗漏	18	0.6
5、溢洪道质量问题	179	6.0
6、输水洞渗漏	134	4.5
7、输水洞质量问题	23	0.8
三、管理不善	124	4.2
1、超蓄	33	1.1
2、运行不当	38	1.3
3、溢洪道	16	0.5
4、无人管理	37	1.3
四、其他原因	136	4.6
1、溢洪道或库区塌方	50	1.7
2、人工扒坝	68	2.3
3、设计不当	18	0.6
五、原因不详	36	1.2