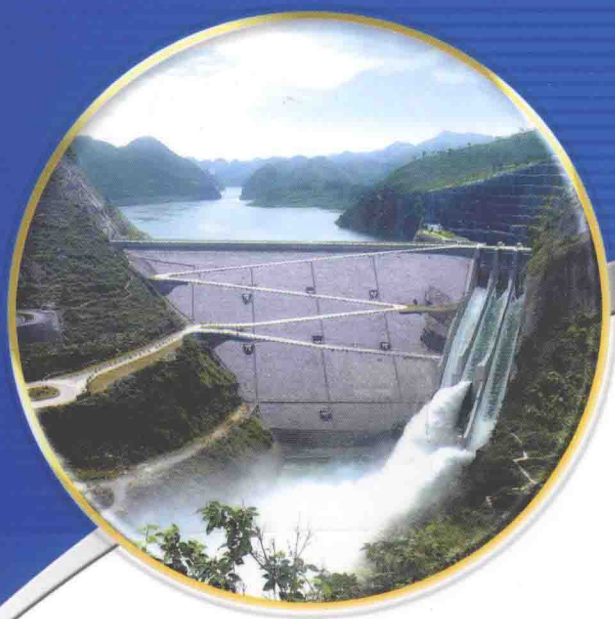


土石坝溃决机理与 溃坝过程模拟

陈生水 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

土石坝溃决机理与 溃坝过程模拟

陈生水 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

土石坝与堰塞坝溃决机理与溃坝过程模拟是一门涉及岩土力学、水力学与泥沙运动理论的新兴学科,近年来日益频繁发生的极端气候现象和地震,促进了该学科的快速发展。本书首先根据国内外典型溃坝案例调查资料,总结分析了土石坝的溃决原因及溃坝特征;重点介绍了国内外在土石坝与堰塞坝形成和溃决机理及溃坝过程模拟领域的研究进展,特别是作者在土石坝三种主要坝型和堰塞坝溃坝离心模型试验和漫顶与渗透破坏溃坝过程数值模拟方面的最新研究成果;最后介绍了国内外溃坝洪水演进数值模拟方法及常用计算机软件,给出了研究成果在水库大坝溃坝洪水风险图编制中的应用实例。

本书可供从事土石坝工程安全专业的研究和管理人员参考,也可作为水利工程等相关专业本科生、研究生的教材或参考书。

图书在版编目(CIP)数据

土石坝溃决机理与溃坝过程模拟 / 陈生水编著. —
北京:中国水利水电出版社, 2012.12
ISBN 978-7-5170-0522-3

I. ①土… II. ①陈… III. ①土石坝—溃坝—研究
IV. ①TV641

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第317627号

书 名	土石坝溃决机理与溃坝过程模拟
作 者	陈生水 编著
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
经 售	电话: (010) 68367658 (发行部) 北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 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	北京博图彩色印刷有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 13印张 308千字
版 次	2012年12月第1版 2012年12月第1次印刷
印 数	0001—1000册
定 价	68.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

序

水是经济社会可持续发展的重要战略资源。水库大坝是调控水资源时空分布、优化水资源配置最重要的工程措施，也是江河防洪工程体系的重要组成部分。目前，中国已建成各类水库大坝近9万座，是当今拥有水库大坝数量最多的国家。这些大坝在防洪保安、保障供水与发电等方面发挥着无可替代的重要作用，是促进经济社会可持续发展的重要基础设施。但是我们还要清醒地认识到，水库大坝给人类带来巨大效益的同时，也存在着溃决的风险，全世界每年都有水库失事溃决、造成重大灾害和影响的报道。据统计，约98%的失事大坝为土石坝。近年来，极端气候现象和地震灾害频发，使得土石坝出险甚至失事的风险增加。因此，深入研究土石坝以及因暴雨和地震等灾害形成的堰塞坝的溃决机理，建立能合理预测其溃坝过程和致灾后果的方法，对提高土石坝和堰塞坝溃坝应急管理水平和减轻或避免因土石坝和堰塞坝溃决所造成的损失，有着重要的科学意义和显著的应用价值。

《土石坝溃决机理与溃坝过程模拟》一书较为全面系统地总结了国内外学者在土石坝和堰塞坝溃决机理试验研究成果、溃坝过程及溃坝洪水演进过程数值模拟方面的研究进展，重点介绍了作者及其研究团队近年来在该研究领域的最新成果。其中作者研制提出的土石坝溃坝离心模型试验系统及相应试验方法、黏土心墙坝和混凝土面板砂砾石坝溃决机理，以及黏土心墙坝、混凝土面板砂砾石坝、堰塞坝和土石坝渗透破坏溃决全过程的数学模型及相应的数值计算方法等成果是近些年来该研究领域的创新性成果，这些成果应用于土石坝安全管理，将进一步提高土石坝溃坝致灾后果评价的精度，从而提升土石坝溃坝洪水应急预案的科学性。

作者长期从事土石坝建设和管理科学研究与技术咨询工作，工作勤奋、学风严谨、合作精神强，在该研究领域具有较高的学术造诣和丰富的工程实践经验。我相信本书的出版将对我国土石坝的设计、建设和运行管理，以及该学科的发展起到积极的推动作用。

中 国 工 程 院 院 士
南京水利科学研究所 院 长
水利部大坝安全管理中心 主 任

张健云

前 言

我国拥有水库大坝近 9 万座，绝大部分为土石坝，这些水库大坝给人类带来巨大经济和社会效益的同时也存在着溃坝的风险。自 1954 至今，我国已有 3500 多座水库大坝溃决，造成重大生命财产损失和生态环境破坏。另一方面，我国也存在为数不少因暴雨或地震等导致山体滑坡而形成的堰塞坝，这类特殊的土石坝如不及时采取排险措施，绝大部分将会溃决致灾。因此，国内外针对土石坝和堰塞坝的溃决机理、溃坝过程模拟以及致灾后果评价已开展了大量的研究工作，取得了不少很有价值的研究成果。

近年来，笔者在国家自然科学基金重点项目“高土石坝地震灾变模拟及安全控制方法研究”（90815024）、水利行业公益性科研专项经费项目“土石坝溃决致灾后果评价方法和技术研究”（201001034）和“高土石坝地震灾变模拟及安全控制技术研究”（200801014）等资助下，研制成功了先进的土石坝溃坝离心模型试验系统，利用其对均质坝、心墙坝和混凝土面板堆石坝三种坝型的溃决机理与溃坝过程进行了较为系统深入的研究，在此基础上提出了能合理反映土石坝上述三种主要坝型及堰塞坝漫顶和渗透破坏溃坝溃口发展规律与溃口洪水流量过程的数学模型，建议了相应的计算方法，编制了计算机程序，并将其结合进溃坝洪水演进计算机软件，用于实际水库大坝溃坝洪水风险图的编制。

本书是笔者及国内外学者在该研究领域成果的总结，书中引用了国内外多位专家学者的成果，已在其中标注；钟启明、傅中志参与了本书第 1 至第 4 章的编写工作，范子武、张铭负责了第 5 章大部分内容的编写工作，任强、曹伟参与了第 3 和第 4 章的部分编写工作，徐光明、顾行文参与了土石坝溃坝离心模型试验系统的研制和部分试验工作；本书的出版得到了南京水利科学研究院出版基金的支持；中国工程院院士、南京水利科学研究院院长、水利部大坝安全管理中心主任张建云教授欣然为本书作序，使本人受到很大鼓舞，在此一并致以衷心感谢和敬意。还要特别感谢江苏省防汛防旱指挥部办公室陶长生、陆一忠和李春华等，他们与笔者合作完成了金牛山水库溃坝洪水风险图的编制工作。

本书可供从事土石坝安全研究与管理人员参考，希望本书的出版有助于提

高我国土石坝和堰塞坝的安全控制水平，提升溃坝致灾后果评估以及溃坝应急预案的科学性，减轻或避免因土石坝和堰塞坝溃决所造成的损失。

土石坝和堰塞坝的溃决机理和溃坝过程模拟研究工作涉及到水力学、岩土力学以及泥沙运动理论等多门学科，由于笔者学识水平和工程实践经验所限，书中肯定存在许多不足甚至错误之处，恳请读者不吝指教。

作者

2012年9月



目 录

序

前言

第 1 章 土石坝溃决事件调查分析	1
1.1 概述	1
1.2 国内外溃坝事件调查分析	2
1.2.1 国外溃坝事件调查分析	2
1.2.2 国内溃坝事件调查分析	3
1.3 土石坝溃决原因及溃坝特征分析	8
1.3.1 土石坝溃决原因	8
1.3.2 土石坝溃决特征分析	10
参考文献	11
第 2 章 土石坝溃决机理试验研究	13
2.1 土石坝溃坝试验相似准则	13
2.2 小比尺溃坝水工模型试验	16
2.2.1 国外小比尺溃坝水工模型试验研究进展	16
2.2.2 国内小比尺溃坝水工模型试验研究进展	21
2.3 大比尺溃坝水工模型试验	25
2.3.1 国外大比尺溃坝水工模型试验研究进展	25
2.3.2 国内大比尺溃坝水工模型试验研究进展	30
2.4 溃坝离心模型试验	38
2.4.1 溃坝离心模型试验中主要物理量的相似准则	38
2.4.2 溃坝离心模型试验系统	43
2.4.3 溃坝离心模型试验结果及分析	48
参考文献	58
第 3 章 土石坝溃决过程数值模拟	61
3.1 常用土石坝溃决过程数学模型简介	61
3.1.1 CRISTOFANO 模型	61
3.1.2 H-W 模型	61
3.1.3 BRDAM 模型	62
3.1.4 P-T 模型	63
3.1.5 LOU 和 NOGUEIRA 模型	63

3.1.6	BEED 模型	64
3.1.7	FREAD 系列数学模型	67
3.1.8	“陡坎”模型	72
3.1.9	HR-BREACH 模型	74
3.1.10	中国水利水电科学研究院数学模型	78
3.2	南京水利科学研究院系列数学模型	80
3.2.1	均质土石坝漫顶溃决数学模型	80
3.2.2	黏土心墙坝漫顶溃决数学模型	83
3.2.3	混凝土面板砂砾石坝漫顶溃决数学模型	88
3.2.4	土石坝渗透破坏溃决数学模型	95
	参考文献	106
第 4 章	堰塞坝形成与溃决机理及溃坝过程数值模拟	110
4.1	堰塞坝类型及其形成机理	111
4.1.1	滑坡形成堰塞坝	111
4.1.2	崩塌形成堰塞坝	112
4.1.3	泥石流形成堰塞坝	113
4.1.4	碎屑流形成堰塞坝	115
4.2	堰塞坝溃决破坏机理	116
4.2.1	堰塞坝的溃决方式	116
4.2.2	堰塞坝溃决的控制因素	118
4.2.3	小结	120
4.3	堰塞坝溃决机理及处治方法试验研究	120
4.3.1	堰塞坝溃决机理试验研究	120
4.3.2	堰塞坝处治方法试验研究	127
4.4	堰塞坝溃决过程数值模拟	131
	参考文献	140
第 5 章	溃坝洪水演进数学模拟及工程应用	143
5.1	溃坝洪水演进数学模型	143
5.1.1	溃坝洪水的特点	143
5.1.2	溃坝洪水演进数值模拟	144
5.1.3	溃坝洪水数学模型	145
5.2	溃坝洪水模型的数值解法	146
5.2.1	模型简化方法	146
5.2.2	有限差分法	148
5.2.3	有限体积法	155
5.2.4	有限元法	160
5.3	溃坝洪水演进数值计算软件与功能测评	163

5.3.1	常用溃坝洪水演进数值计算软件	163
5.3.2	常用溃坝洪水演进数值计算软件测评	167
5.4	工程应用	172
5.4.1	金牛山水库工程概况	172
5.4.2	主、副坝溃决过程数值模拟	175
5.4.3	溃坝洪水演进模型的构建	178
5.4.4	溃坝洪水演进计算结果与分析	179
参考文献		199



第1章 土石坝溃决事件调查分析

1.1 概述

我国拥有水库大坝近9万座，其中93%以上为土石坝，它们为我国经济社会的发展做出了重要贡献，但水库大坝给人类带来巨大经济效益的同时也存在着溃坝的风险。据我国水利部大坝安全管理中心2008年普查资料统计^[1]，1954—2007年，我国有3503座水库大坝发生溃决，且溃决大坝中98%以上是土石坝，年平均溃坝率达到 7.6×10^{-4} ，这不仅远高于发达国家的年平均溃坝率（日本年平均溃坝率仅为 0.4×10^{-4} ），也明显高于 2.0×10^{-4} 的世界年平均溃坝率。我国典型溃坝事件有：1975年河南“75·8”暴雨导致板桥（见图1.1）、石漫滩（见图1.2）两座大型水库，田岗、竹沟两座中型水库和58座小型水库发生漫顶溃决，造成2万多人死亡和大量财产损失及生态环境破坏^[2]；1993年青海沟后水库坝高71.0m的混凝土面板砂砾石坝因渗透破坏发生溃决，造成320人死亡和大量财产损失（见图1.3）；2001年四川大路沟水库坝高44.0m均质土坝因渗透破坏发生溃决，造成26人死亡，10人失踪和大量财产损失。2010年，我国多个地区出现特大暴雨，又导致10多座土石坝发生漫顶溃决。



图 1.1 板桥水库黏土心墙坝溃决

为提高土石坝的安全控制水平，减轻或避免土石坝溃决损失，国内外学者针对土石坝的溃决原因、溃决机理、溃坝过程数值模拟及致灾后果评价方法开展了大量卓有成效的研



图 1.2 石漫滩水库均质土坝溃决



图 1.3 沟后水库面板砂砾坝溃决

究工作，取得了一系列重要成果^[3-12]。在本书中，笔者根据收集到的资料对这些成果进行了总结和分析，同时介绍了近年来笔者在该研究领域的一些最新研究成果，并对今后需重点开展的研究工作提出了建议。

1.2 国内外溃坝事件调查分析

1.2.1 国外溃坝事件调查分析

美国早在 20 世纪 30 年代初就开始了土石坝溃坝事件调查分析，当时美国已建成近

2000 座土石坝。Justin J D^[13]在其著作《土坝工程》一书中对土坝溃决案例进行了较详细的调查分析,文中介绍了 26 座土坝的溃决案例,列举了 80 多座已溃决土坝的相关数据,对 102 座坝的溃决原因进行了分类分析。1944 年美国的 Creager W P 等^[14]又在其所著的《大坝工程》一书中补充了直到 1938 年底的 35 座溃决或发生局部破坏的土石坝案例。1953 年 Middlebrooks T A^[15]收集了美国 1914—1953 年已发生溃决的 206 座土石坝案例,对其溃决模式和服役时间进行了统计分析,并总结分析了这些土石坝溃决的原因。此后,Grüner E^[16]、日本发电水力协会^[17]、Londe P^[18]、Serafin J L^[19]、Howard T R^[20]、Blind H^[21]、Perlea V^[22]等,都曾在不断充实的事故案例基础上对溃坝案例进行过统计分析。

美国大坝委员会在 20 世纪 70 年代和 80 年代进行了两次较为全面的大坝事故调查^[23-24],调查结果分别收录在 1976 年和 1988 年出版的两卷《从坝的事故中吸取教训》专著中。第一卷收集了截至 1972 年 12 月底的大坝重大事故 349 例,其中坝型为土石坝的有 249 例,占总数的 71.3%,包括溃坝案例 52 例。当时美国已建成大坝 4974 座,其中土石坝 3896 座。因此,可以计算得出土石坝的事故率为 6.4%。第二卷收集了 1973—1985 年底大坝事故 258 例,其中坝型为土石坝的有 201 例,包括溃坝事件 13 例。

自 20 世纪 60 年代以来,国际大坝委员会^[25-27]也对溃坝事故进行了多次较为全面的调查分析。第一次调查分析由下设的“大坝破坏和损坏委员会”主持,统计了 1900—1965 年底全球 500 多例大坝事故,包括 90 宗溃坝案例,当时已建大坝总数约 9000 座,根据调查结果,于 1973 年出版了《坝的事故教训》一书。第二次调查分析由下设的“坝和水库退化委员会”主持,调查范围扩大到坝的老化、损伤等方面,其结果于 1993 年以《坝和水库的退化》一书出版。第三次调查分析于 1988 年由时任国际大坝委员会副主席 Serofim 领导,设立“溃坝统计分析专门委员会”,调查内容缩小为专门对溃坝事故的统计分析。结果表明,除我国外,全球 1900—1951 年共建成各类大坝 5286 座,溃坝 117 座,溃坝率 2.2%;1951—1986 年共建成大坝 12138 座,溃坝 59 座,溃坝率 0.49%。该委员会还专门对中国和其他国家的数据进行了比较,发现两者已建成的大坝总数量大致相近,而两者溃坝数量之比竟为 60:1,即使仅比较 1955 年后建成的大坝,两者溃坝数量之比仍高达 50:3,这说明,20 世纪 90 年代前,我国的溃坝率远高于世界平均溃坝率。

1.2.2 国内溃坝事件调查分析

我国分别于 1962 年、1979 年和 1991 年对溃坝事件进行过较为全面的调查分析。

1962 年,原水利电力部水利管理司编印出版了《水库失事资料汇编》一书^[28],书中收录了我国 1954—1961 年底的 532 座水库大坝事故案例,包括:库容 1 亿 m³ 以上大型水库 8 座,占当时全国大型水库总数的 3.5%;库容 1000 万~1 亿 m³ 的中型水库 76 座,占当时全国中型水库总数的 5.5%;库容 1000 万 m³ 以下的小型水库 448 座,其中库容 100 万 m³ 以上的 157 座。这些大坝的事故主要发生在 1959—1961 年。

1980 年,原水利部工程管理局在 1962 年水库失事资料汇编的基础上,进一步补充核对,比较详细地整理编制了《全国水库垮坝登记册》^[29]。截至 1980 年底,全国水库溃坝

案例(包括溢洪道及输水洞的冲毁)共2976例,其中,大型水库2例,中型水库117例,小(1)型水库594例,小(2)型水库2263例;在溃坝事故中,发生在运行期的占74%,发生在施工期的占26%,小型水库溃坝数占总溃坝数的96%;全国平均每年发生溃坝事故110起,其中数量最多的是1973年,达554例,最少的是1980年,为63例;按行政区域划分的溃坝事故统计,溃坝数以四川省最多,达285例;按坝型划分,除了1起溃坝事故为混凝土坝外,其余的均为土石坝。

1991年,原水利部水利管理司又收集了1981—1990年发生的266座水库大坝溃决案例,编写了《全国水库垮坝统计资料》^[30]一书。在此基础上,张秀玲、文明宣^[31]和李君纯等^[32]先后结合第一、第二次统计资料,对我国1990年前所发生的典型溃坝案例进行了分析,揭示出一些重要特征。

2009年,解家毕等^[33]对1954—2006年我国发生的溃坝事件从以下几个方面进行了分析。

1. 溃坝年份

1954—2006年,全国共有3498座水库发生溃坝,溃坝数量在不同年份所占比例如图1.4所示。1954—1990年,全国共有3260座水库发生溃决,年均约88座;1991—2000年,共有227座水库大坝发生溃决,年均约23座;2001—2006年,共有35座水库大坝发生溃决,年均6座。从上述统计分析可以看出,我国历史上出现了2个水库大坝溃决高峰,一个是1960年前后,即1959—1961年间,共计507座水库大坝发生溃决;另一个高峰期在1973年前后,仅1973年就有554座水库大坝发生溃决;进入20世纪90年代以来,特别是2001年以后,溃坝数量明显减少。

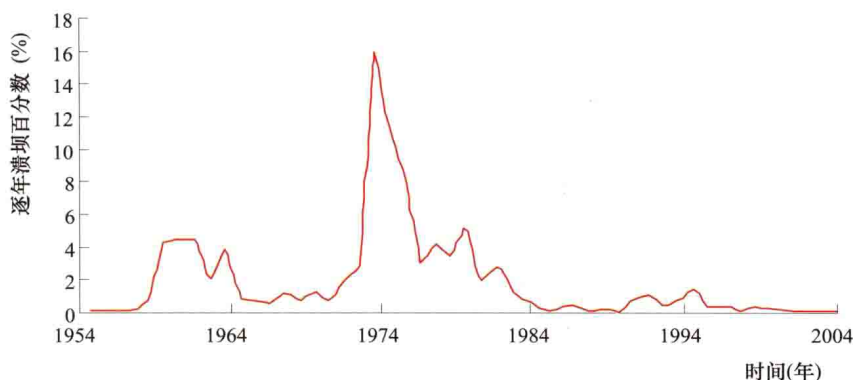


图 1.4 不同年份溃坝所占百分比

表1.1给出了按水库库容统计的各类水库大坝的溃坝数量和比例,从中可以看出,小(2)型水库的溃坝数量最大,占总溃坝数的76.9%。特别是20世纪70年代,全国各类水库溃坝数超过总溃坝数的一半以上,而该时段内小(2)型水库的溃坝数几乎占总溃坝数的一半。

2. 溃坝时大坝所处的状态

1950—1970年是我国水库大坝建设的高峰期,由于当时我国水库大坝设计施工技术还不很成熟,加上水文历史数据短,以及经济基础薄弱,特别是“大跃进”和“文化大革

表 1.1

不同年代溃坝数占总溃坝数的百分比

(%)

年 份	中型水库	小 (1) 型水库	小 (2) 型水库	全国水库
1954—1960	1.83	4.46	3.69	9.98
1961—1970	0.83	4.40	11.55	16.78
1971—1980	0.74	8.06	49.14	58.03
1981—1990	0.11	1.29	6.15	7.55
1991—2000	0.06	0.89	5.55	6.49
2001—2006	0.11	0.17	0.60	1.00
年代不明	0.00	0.09	0.09	0.17

命”时期常出现的“边勘测、边设计、边施工”现象，导致许多水库大坝在建设阶段就发生溃决，还有许多大坝由于各种原因经常停工，这些处于停建状态的水库大坝还不完全具备防洪功能，因此发生溃坝的概率更大。图 1.5 给出了水库大坝处于正常运行、停建、施工和不详 4 种状态下的溃坝比例，从图中可以看出，处于施工、停建状态的水库大坝所发生的溃坝比例占总溃坝数的 22.6%，这是我国溃坝率比其他国家高的主要原因之一。

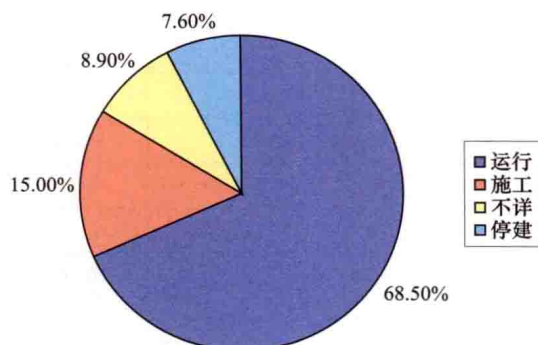


图 1.5 溃坝时大坝的状态

3. 各省、自治区、直辖市（除台湾地区）溃坝及溃坝率统计

表 1.2 给出了截至 2005 年全国各省、自治区、直辖市（除台湾地区）溃坝数占总溃坝数的比例。从表中可以看出，四川省、山西省、湖南省和云南省的溃坝数较多，都超过了 200 座。其中四川省的溃坝数最多，占全国的 11.32%。表 1.2 还给出了各省、自治区、直辖市（除台湾地区）的溃坝率、正常运行水库溃坝率及正常运行水库多年平均溃坝率。截至 2005 年，全国水库溃坝率为 4.11%，而正常运行水库溃坝率为 2.81%。从表 1.2 可以发现：①溃坝率超过 20% 的省份有 5 个，分别是山西、内蒙古、甘肃、宁夏和新疆。从地域上来看，这几个省份（自治区）都是雨水相对较少的区域，并且至 2005 年已建成的水库大坝数都不超过 1000 座。②建成水库大坝数超过 1000 座的省份中，溃坝率最小的是江西省，溃坝率为 1.81%；湖南省是唯一超过 1 万座水库的省份，其溃坝率为 2.15%。

比较国内外的溃坝率可以看出，同一时期国内的溃坝率明显高于国外，即使不考虑施工和停建阶段溃决的大坝，国内的溃坝率还是高于国外。2001—2006 年之间，全国共有 262 座水库大坝发生溃决，溃坝率为 0.31%，大体与国外溃坝率相当。1954—2006 年的 53 年之间，全国的多年平均溃坝率为中型水库 8.11×10^{-4} ，小型水库 7.70×10^{-4} ；正常运行水库大坝的多年平均溃坝率为中型水库 3.40×10^{-4} ，小型水库 5.35×10^{-4} 。从表 1.2 还可以看出，正常运行的水库中，不同省份的多年平均溃坝率相差很大，最低的是北

表 1.2

全国各省(自治区、直辖市)溃坝统计

(%)

序号	省份	占总溃坝数百分比	溃坝率	正常运行溃坝率	正常运行溃坝数占总溃坝数比率	正常运行水库多年平均溃坝率
1	北京	0.03	1.20	1.20	100.0	0.023
2	天津	0.06	1.40	1.40	100.0	0.026
3	河北	3.66	11.65	10.65	91.4	0.220
4	山西	8.23	39.40	29.55	75.0	0.743
5	内蒙古	3.46	24.85	19.10	76.9	0.469
6	辽宁	1.17	4.24	2.90	68.3	0.080
7	吉林	2.77	7.84	4.28	54.6	0.148
8	黑龙江	2.97	16.56	5.41	32.7	0.312
9	上海	0	0	0	0	0
10	江苏	0.83	3.16	1.31	41.4	0.060
11	浙江	3.29	2.90	1.74	60.0	0.055
12	安徽	2.89	2.07	1.77	85.1	0.039
13	福建	2.09	2.72	2.24	82.2	0.051
14	江西	4.86	1.81	1.60	88.2	0.034
15	山东	4.15	2.61	2.21	84.8	0.049
16	河南	4.57	6.83	3.88	56.9	0.129
17	湖北	3.00	1.81	0.79	43.8	0.034
18	湖南	8.20	2.15	1.48	68.6	0.041
19	广东	5.49	2.90	1.97	67.7	0.055
20	广西	4.29	3.47	2.38	68.7	0.065
21	海南	0.37	1.31	0.51	38.5	0.025
22	四川	11.32	4.20	2.42	57.6	0.079
23	贵州	2.37	4.23	3.42	80.7	0.080
24	云南	6.69	4.36	2.53	58.1	0.082
25	西藏	0	0	0	0	0
26	陕西	5.00	5.00	12.91	73.7	0.331
27	甘肃	2.43	2.43	23.53	75.3	0.590
28	青海	0.37	0.37	4.61	53.8	0.161
29	宁夏	1.23	1.23	17.68	81.4	0.410
30	新疆	4.20	4.20	22.16	75.5	0.554

注 本表中未列出香港、澳门及台湾地区的统计数值。

京市(除上海市和西藏自治区),多年平均溃坝率为 2.3×10^{-4} , 最高的是山西省,多年平均溃坝率为 74.3×10^{-4} 。

4. 坝型统计

表 1.3 给出全国不同坝型的溃坝数量和百分比。从表中可以看出,绝大部分已溃坝决的大坝为土石坝,混凝土坝的溃坝比例小于 1%,其中土坝所占的比例高达 93%。表 1.4 给出了土坝中各种坝型已溃坝数和百分比。从表中可以看出,均质土坝溃坝占总数的 85%以上,所占比例最大。值得指出的是,如果以每种坝型的溃坝数与总溃坝数的比值和每种坝型的已建坝数与总建坝数的比值比较,两者大致接近,也就是说,各种坝型的溃坝数占其已建坝数的比例大体相同。

表 1.3 各种坝型溃坝比例

序号	坝型	溃坝数(座)	百分比(%)
1	混凝土坝	12	0.34
2	浆砌石坝	35	1.00
3	土坝	3253	93.00
4	堆石坝	32	0.91
5	其他	0	0.00
6	不详	162	4.63

表 1.4 土坝中各坝型溃坝比例

序号	坝型	溃坝数(座)	百分比(%)
1	均质土坝	3003	85.85
2	黏土斜墙坝	11	0.31
3	黏土心墙坝	183	5.23
4	土石混合坝	19	0.54
5	其他	2	0.06
6	不详	36	1.03

5. 坝高统计

如果按照国际大坝委员会的规定,将坝高为 15~30m 归类为低坝,坝高 30~60m 为中坝,坝高大于 60m 为高坝,则各类坝的溃坝数占总溃坝数的百分比如图 1.6 所示。从图 1.6 可以看出,我国已发生的溃坝案例中,小于 15m 的坝占总数的一半以上,低坝接近 1/3。

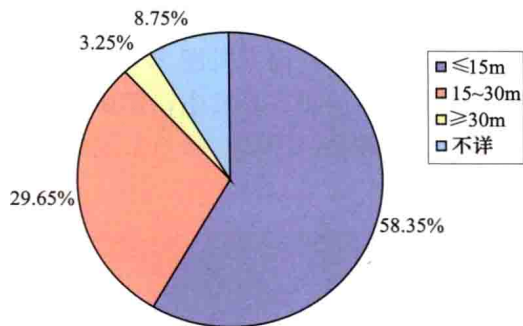


图 1.6 根据国际大坝委员会的坝高分类进行的溃坝统计

6. 破坏部位和时段统计

按破坏部位和时段划分,坝体部分破坏为

2586 座,占溃坝总数的 86.9%,其中施工期溃坝数为 674 座,运行期溃坝数为 1912 座;溢洪道破坏为 197 座,占溃坝总数的 6.6%,其中施工期溃坝数为 76 座,运行期溃坝数为 121 座;输水洞破坏为 157 座,占溃坝总数的 5.3%,其中施工期溃坝数为 11 座,运行期溃坝为 146 座;情况不明为 36 座,占溃坝总数的 1.2%,其中施工期溃坝数为 14 座,运行期溃坝数为 22 座。具体数据如表 1.5 所示。

表 1.5 溃坝破坏部分统计

破坏部位	破坏时段	溃坝数(座)	破坏部位	破坏时段	溃坝数(座)
坝体	施工期	674	输水洞	施工期	11
	运行期	1912		运行期	146
溢洪道	施工期	76	情况不明	施工期	14
	运行期	121		运行期	22

1.3 土石坝溃决原因及溃坝特征分析

1.3.1 土石坝溃决原因

大坝溃决可能是偶发的，也可能是人为的。偶发溃坝可以由结构老化、超常自然事件（如极端暴雨、洪水、地震、坝体差异沉降、滑坡、渗透、漫顶、波浪等因素）引发；人为因素包括轰炸、拆除、劣质施工、错误设计、水库运行管理不当、错误选址等。

Middlebrooks 等^[15]收集了美国 1914—1953 年的大坝溃决案例，并总结了土石坝溃决的原因，如表 1.6 所示。

表 1.6 土石坝溃决原因

溃决原因	占总数的百分比 (%)	溃决原因	占总数的百分比 (%)
漫顶	30	坝下埋管漏水	13
管涌	25	其他情况	17
滑坡	15		

Middlebrooks 等通过调查分析指出^[15]，漫顶、管涌、滑坡和坝下埋管漏水是土石坝发生溃决的主要原因（见图 1.7），其中，滑坡和坝下埋管导致大坝溃决的情况在大坝建成后的前几年内更容易发生；管涌引起大坝溃决的比例在大坝建成后的前 5 年内最高，随着时间的推移逐渐降低；漫顶主要由于外部因素造成，它可能在大坝使用期内的任何时间发生。

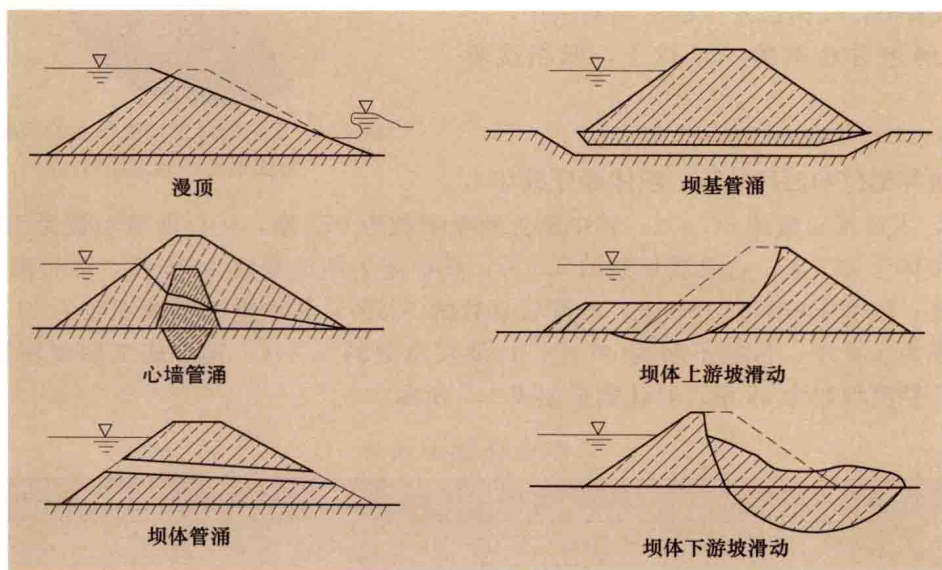


图 1.7 土石坝失事原因分析图

此后，Gruner E^[16]、日本发电水力协会^[17]、Londe P^[18]、Serafin J L^[19]、Howard T