

土石坝漫顶溃决 模拟与抢护

李云 宣国祥 王晓刚 黄岳 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

土石坝漫顶溃决 模拟与抢护

李云 宣国祥 王晓刚 黄岳 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

土石坝溃决过程研究同时涉及水力学、泥沙运动力学、土力学等多个学科。土石坝溃决过程具有强非线性与非恒定性，研究具有很大的难度。本书收集了大量溃坝案例资料，采用理论分析、现场大尺度实体溃坝试验、室内小尺度物理模型试验及数值模拟等方法，对土石坝漫顶水流特性、土石坝溃坝机理、超标准洪水条件下土石坝是否会溃决、何时溃决、如何抢护等进行了系列研究。

本书可供从事溃坝水力学计算、溃坝洪水分析与管理的科研技术人员参考，也可作为水力学及河流动力学、水利水电工程、安全管理等专业的教学参考书。

图书在版编目（C I P）数据

土石坝漫顶溃决模拟与抢护 / 李云等著. -- 北京 : 中国水利水电出版社, 2015. 4
ISBN 978-7-5170-3075-1

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

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第069664号

书 名	土石坝漫顶溃决模拟与抢护
作 者	李云 宣国祥 王晓刚 黄岳 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 (发行部)
经 售	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 14印张 350千字
版 次	2015年4月第1版 2015年4月第1次印刷
印 数	0001—1000册
定 价	108.00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

前 言

水库大坝在防洪、灌溉、排涝、发电、航运、供水、养殖、水土资源保护和改善生态环境等方面发挥了巨大作用，产生了巨大的经济效益和社会效益。受全球性气候变化影响，我国极端天气事件明显增多，洪水灾害的突发性、反常性、不可预见性日显突出，对水库大坝安全提出了巨大挑战。堤坝工程一旦发生溃决，所造成的灾难是毁灭性的。鉴于溃坝带来的严重后果，国内外众多学者开展了大量土石坝漫顶溃决研究，并取得了较为丰硕的成果。由于溃坝问题同时涉及水力学、泥沙运动力学、土力学等多个学科，溃坝水流具有强非线性、非恒定性等特性，迄今溃坝预测技术难有突破性进展，相应的溃坝分析评估也存在很大的不确定性。因此，开展土石坝漫顶溃决机理、预测及抢护技术研究具有重大意义。

本书主要进行了三个方面的研究。首先，采用大尺度现场试验及室内水槽试验开展了土石坝漫顶溃决的机理研究，得到了不同的坝体材料特性、不同坝体几何特性等情况下的土石坝的溃决特征及洪水流量过程，获得了土石坝溃决的基本规律；通过试验及数值模拟技术分析了下不同情况下土石坝漫顶坝面流速、切应力等水力指标的变化规律，开发了一套土石坝漫顶溃决数学模型。其次，采用了数据挖掘技术研究了不同库容、坝高、集水面积等情况下，土石坝漫顶的安全判别问题，提出了土石坝漫顶溃决时间的预测方法。最后，针对土石坝漫顶研制了一套应急溢洪道快速构建技术。研究成果可为土石坝漫顶溃决机理的理论分析及数值模拟研究提供基础资料，也可以用于土石坝漫顶溃决应急判别及溃决时间预测，并为土石坝漫顶抢护提供新的思路。相关成果可为制定有效的防洪预案及抢险技术提供技术支持。

本书内容为“十一五”国家科技支撑项目“水库大坝安全保障关键技术研究”第二课题“溃坝试验和模拟技术研究”(2006BAC14B02)、水利部公益性行业科研专项项目“超标准洪水条件下土石坝防洪能力及抢护技术”(201001033)、国家国际科技合作项目“大坝原体溃决试验信息获取与挖掘

技术合作研究”（2011DFA72810）的总结与拓展。王小东工程师、刘火箭博士、祝龙博士、曾晨军硕士等均为本书研究内容付出了大量辛勤的劳动。在此，向他们以及关心和协助本书出版的同仁表示衷心感谢。

本书的出版得到南京水利科学研究院出版基金的资助，谨表感谢！

由于自身知识水平的限制及土石坝漫顶溃决机理的复杂性，本书对该问题的研究还远没达到完善的程度，难免存在欠缺和不妥之处，敬请读者同仁批评指正。

作者

2014 年 12 月

目 录

前言

第1章 土石坝溃坝概述	1
1.1 国内外溃坝情况	1
1.1.1 国外溃坝事件分析	1
1.1.2 国内溃坝事件分析	2
1.1.3 土石坝溃口特征分析	6
1.2 土石坝溃坝研究现状	8
1.2.1 溃坝物理模型试验及数值模拟技术	8
1.2.2 超标准洪水条件下土石坝安全判别	16
1.2.3 土石坝漫顶溃决时间	18
1.2.4 土石坝漫顶溃决抢护技术	20
1.2.4.1 漫顶前抢护	20
1.2.4.2 溃口出现后抢护	20
第2章 土石坝漫顶溃决试验及溃决机理	23
2.1 土石坝漫顶溃决试验方法	23
2.1.1 库水位下降过程	23
2.1.2 下游洪水演进过程	24
2.1.3 溃口流速及溃口形态	24
2.1.4 溃口纵向下切与横向扩展过程	24
2.2 土石坝漫顶坝面水力特性	26
2.2.1 坝面水动力参数分布特性	26
2.2.1.1 坝面水深分布	26
2.2.1.2 坝面流速分布	27
2.2.1.3 切应力及摩阻流速分布	29
2.2.2 漫顶水深、坝坡坡度对坝面水力特性的影响	31
2.2.2.1 不同漫顶水深的坝面水力特性	31
2.2.2.2 不同坡度坝面水力特性	33
2.2.3 坝面切应力、平均流速公式	33

2.2.3.1	国内外坝面切应力公式研究概况	33
2.2.3.2	坝面切应力公式推导	38
2.2.3.3	坝面平均流速公式	47
2.3	土石坝溃决现场大尺度试验	47
2.3.1	现场大尺度溃坝试验准备	48
2.3.1.1	现场试验选址	48
2.3.1.2	坝区地质勘探	49
2.3.1.3	坝体施工填筑	51
2.3.2	现场大尺度漫顶溃坝试验组次及可重复性研究	54
2.3.3	现场大尺度漫顶溃坝试验成果	56
2.3.3.1	漫顶溃坝过程	56
2.3.3.2	漫顶溃坝力学机理	61
2.3.3.3	溃口峰值流量及坝体纵向下切速度预测	65
2.3.3.4	宽顶堰流公式在溃口流量分析中的适用性分析	71
2.4	土石坝溃决小尺度试验	75
2.4.1	非黏性土均质坝溃决试验	75
2.4.1.1	非黏性土均质坝溃坝相似准则	75
2.4.1.2	不同中值粒径 D_{50} 对坝体溃坝过程的影响	79
2.4.1.3	不同下游坝坡坡度对溃坝过程的影响	79
2.4.1.4	不同溃口位置对溃坝过程的影响	80
2.4.1.5	下游沉积层对溃坝过程的影响	81
2.4.2	黏性土均质坝溃决试验	81
2.4.2.1	含水率、压实度对“跌坎”移动速度的影响	84
2.4.2.2	“跌坎”移动速度的计算表达式	87
2.4.3	溃坝模型相似率探讨	88
2.4.3.1	一般均质土石坝溃坝相似准则	88
2.4.3.2	溃坝模型试验的模型延伸法	93
第3章	土石坝漫顶溃决数学模型	97
3.1	漫顶溃决过程的数学描述	101
3.1.1	水库水位演变	101
3.1.2	溃口流量计算	102
3.1.3	溃口扩展模拟	102
3.1.3.1	溃口的纵向下切	102
3.1.3.2	溃口的横向扩展	103
3.1.4	溃面冲槽水流计算	104
3.2	模型计算方法	105

3.3 模型的应用	107
3.3.1 室内溃坝试验演算	107
3.3.2 野外现场溃坝试验演算	112
3.3.3 大洼水库自然溃决过程演算	115
3.3.4 唐家山堰塞湖人工溃决过程演算	118
3.3.5 河南石漫滩水库漫顶溃坝事件演算	121
第4章 土石坝漫顶溃决判别分析	125
4.1 坝体安全应急判别方法	125
4.1.1 土石坝与天然坝之间的相似性	126
4.1.1.1 溃决形式的相似性	126
4.1.1.2 溃坝动力参数之间的相关一致性	127
4.1.2 简单指标判别法在土石坝安全判别上的应用	129
4.1.3 判别分析法在土石坝安全上的应用	130
4.1.3.1 判别分析法原理	130
4.1.3.2 判别分析法对数据资料要求的验证	132
4.2 基于判别分析法的土石坝溃决判别模型	134
4.2.1 数据适用性验证	135
4.2.2 模型建立	136
4.2.3 判别分析结果	138
4.2.3.1 判别模型中各变量重要性分析	138
4.2.3.2 与简单判别方法的比较	139
4.3 考虑坝体材料特性的溃决判别分析模型	140
4.3.1 代表坝体材料综合抗冲能力的变量——起动摩阻流速 U_{*c}	140
4.3.2 判别模型的建立及定量正确性	141
4.3.3 判别模型各变量影响权重及模型的定性合理性	145
4.4 判别分析法实例应用	145
第5章 土石坝溃决时间预测	147
5.1 溃决时间的定义及统计分析	147
5.2 溃决时间影响因素	150
5.2.1 坝高与溃决时间	150
5.2.2 坝宽与溃决时间	150
5.2.3 坝长与溃决时间	150
5.2.4 库容与溃决时间	152
5.2.5 坝体综合稳定性指标与溃决时间	152
5.3 溃决时间预测方法——多元回归预测	154
5.3.1 土石坝溃决时间回归模型的建立	155

5.3.2	对回归模型的统计检验	156
5.3.3	案例验证及分析	157
5.4	溃决时间预测方法——基于切应力的溃决时间预测	158
5.4.1	预测方法的由来	158
5.4.2	坝体材料特性 U_{*c} 的引入	160
5.4.3	坝面切应力的引入	160
5.4.4	预测的步骤	161
5.4.5	实例验证	162
第6章	应急溢洪道快速构建技术	164
6.1	应急溢洪道快速构建技术的由来	164
6.2	应急溢洪道坡面水力特性试验	165
6.2.1	应急溢洪道土工合成材料物理力学特性	167
6.2.2	土工合成材料表面水流水力特性	168
6.2.2.1	布面水深与漫顶水深的关系	168
6.2.2.2	布表面的流速与漫顶水深的关系	169
6.2.2.3	布面切应力与漫顶水深的关系	175
6.2.3	土工合成材料摩阻系数	178
6.2.4	切应力与摩阻系数关系分析	181
6.2.5	土工合成材料受力分析	184
6.3	应急溢洪道锚固件抗拔力试验	185
6.3.1	锚固件抗拔力试验介绍	185
6.3.2	抗拔力与埋深的关系	187
6.3.3	抗拔力与锚固件材料的关系	190
6.3.4	新型自扩刺锚固件研制	194
6.4	应急溢洪道布置与实施方案	197
6.4.1	漫顶水流坡面扩散范围	197
6.4.2	水流经溃口下泄扩散范围	198
6.4.2.1	水流在坡面上的扩散形状	198
6.4.2.2	溃口形状及下游坡度对水流扩散范围的影响	200
6.4.3	应急溢洪道水流最大断面平均流速分析	203
6.4.4	护坡材料铺设及锚固	206
6.4.4.1	护坡材料的选择	206
6.4.4.2	护坡材料铺设及锚固方法	208
参考文献		209

第1章 土石坝溃坝概述

1.1 国内外溃坝情况

土石坝溃决现象时有发生，给人类带来了巨大的灾难，世界各国均对土石坝溃坝事件进行了大量研究工作。但是，由于溃坝事件具有突发性、灾难性，溃坝数据资料多为事后调查、访问获取，资料的真实性、可靠性存在较大的不确定因素。迄今，完整的溃坝资料极为稀少，诸多研究仅限于对溃口主要参数的统计与分析。

1.1.1 国外溃坝事件分析

水库大坝溃决指主体工程和附属结构物的完全破坏，包括因溢洪道设计不当而漫顶或因设计洪水估算错误而在泄洪中引起的结构破坏。尽管大坝工程技术不断进步，但很多不确定因素仍引起大坝失事。国际大坝委员会（ICOLD）曾进行过三次溃坝事故调研（1973年、1983年、1995年）^[1]，成果发表于 ICOLD 第 99 期专题报告中（数据不含中国，下同）。据该报告，1900—1951 年共建大坝 5286 座，其中溃坝 117 座，溃坝率 2.2%；1951—1986 年共建大坝 12138 座，其中溃坝 59 座，溃坝率 0.49%。

按溃坝年代统计，1910—1920 年间建成的坝溃决数量最多，其次是 1950—1960 年，见图 1.1，该时期与两次世界大战时间相近。按溃坝坝型统计，土石坝溃坝数量最多，占总溃坝数的 70%（见图 1.2）。若以不同坝型溃坝数与总溃坝数比值（ A ）和相应坝型已建坝数与总建坝数比值（ B ）比较，则二者大致相近，见图 1.3。

根据 ICOLD 的研究，绝大多数的溃坝发生在工程投入运行后的 10 年内，见图 1.4。其中， a 表示建设年代不明， b 表示施工期溃坝。由图可见，蓄水运行第一年就溃决的又占大多数。

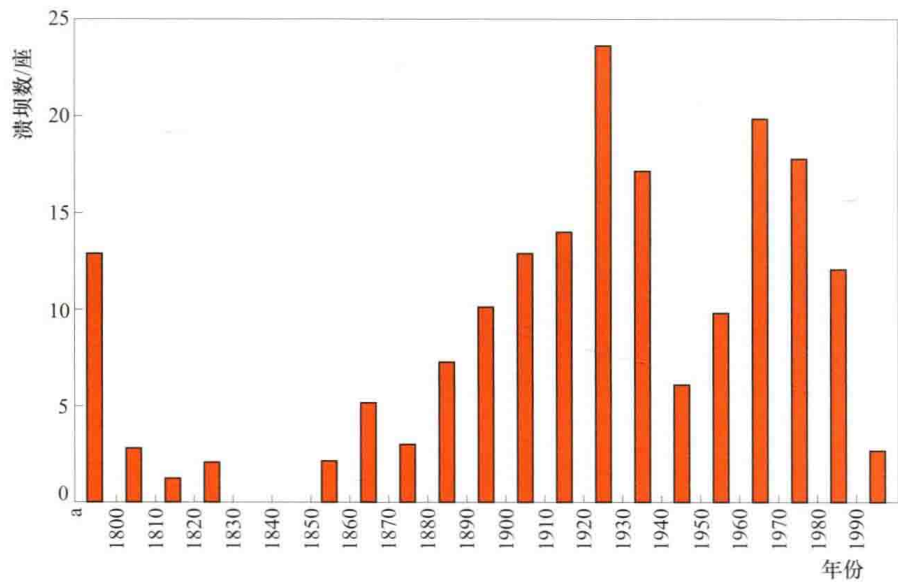


图 1.1 不同年代建成坝的溃坝统计 (a 表示建成年代不明)

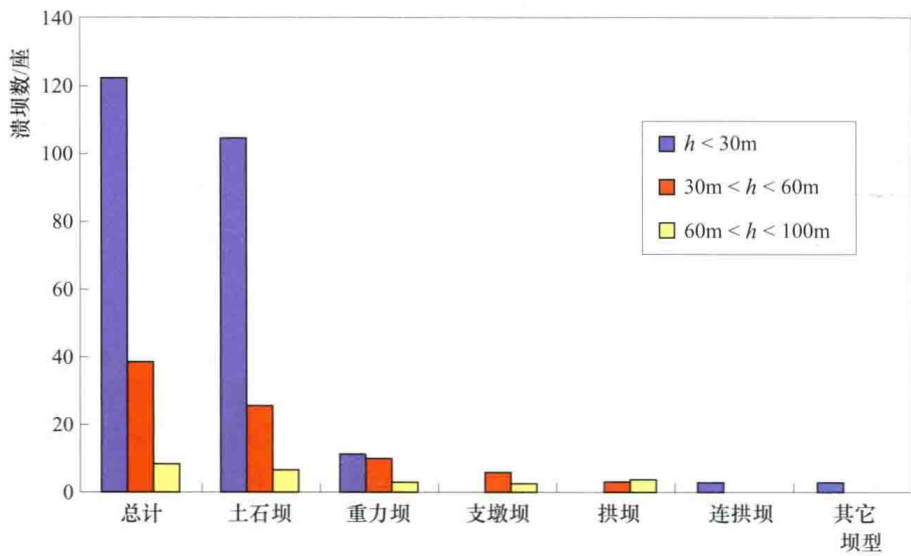


图 1.2 不同坝型的溃坝统计 (h 为坝高)

1.1.2 国内溃坝事件分析

我国溃坝统计先后也进行过三次，分别是 1962 年、1979 年和 1991 年^[1-2]。1962 年，由水利电力部水利管理司根据各地溃坝报告汇编刊印了《水库失事资料汇编》，收录 1954—1961 年间失事水库共 532 座。1979 年，由水利部工程管理局在 1962 年资料汇编基础上，续编了《全国水库垮坝登记册》（1981 年）。1991 年，水利部水利管理司又补充登记了 20 世纪 80 年代的 266 座溃坝，编写成《全国水库垮坝统计资料》（1993 年）。

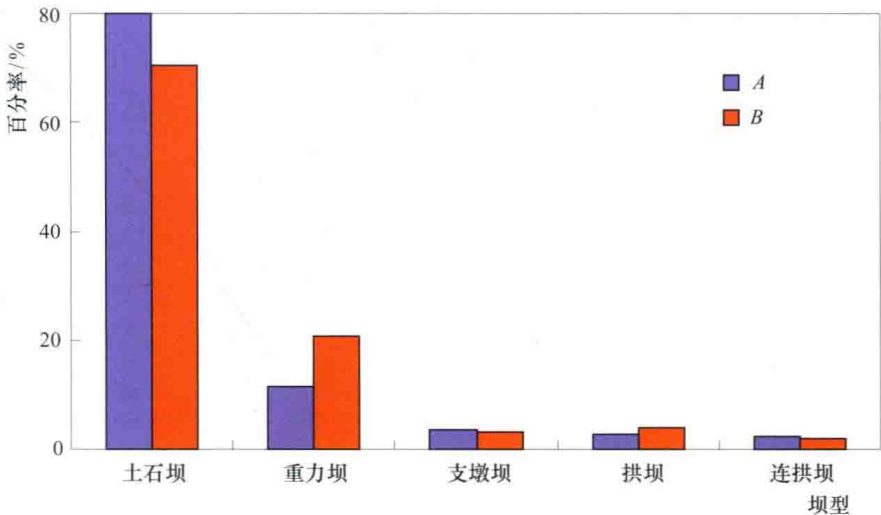


图 1.3 各种坝型的溃坝 A、B 值比较

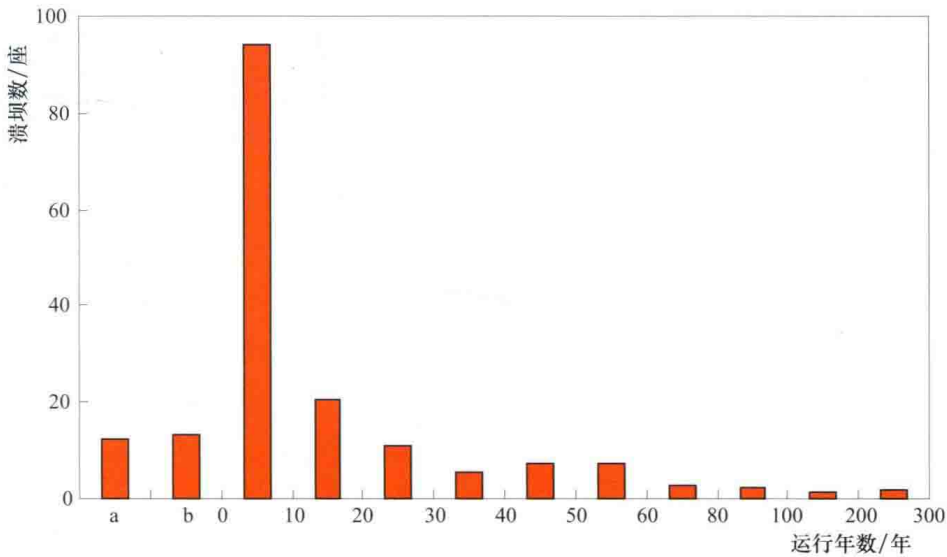


图 1.4 按运行年数统计的溃坝情况

李雷等人在此基础上，对我国 1954—2000 年间水库大坝的溃决情况进行了统计分析^[3]。截至 2000 年年底，我国已发生的溃坝中，大型水库 2 座（“75·8”大洪水中溃决的板桥水库和石漫滩水库），中型水库 124 座，小（1）型水库 668 座，小（2）型水库 2668 座。不同时期的年平均溃坝概率见表 1.1。

1954—2006 年不同年份的水库溃坝数量见图 1.5^[3]。从统计结果看，1959—1963 年和 1973—1975 年这两个时期是我国溃坝发生的高频率期，这与特定历史时期的技术、经济和社会环境等因素有关。

表 1.1 我国各类水库在不同时期的年平均溃坝概率

项 目	中型水库	小（1）型水库	小（2）型水库	全国水库
1954—2000 年年平均溃坝概率/ 10^{-4}	9.78	9.60	8.85	8.95
1959—1960 年年平均溃坝概率/ 10^{-4}	107.86	45.61	8.46	18.32
1973—1975 年年平均溃坝概率/ 10^{-4}	10.97	31.95	55.23	49.16
1982 年后的年平均溃坝概率/ 10^{-4}	1.017	2.13	2.73	2.54
最高年平均溃坝概率/ 10^{-4}	110.70	51.79	72.46	66.13
最低年平均溃坝概率/ 10^{-4}	0	0	0.15	

注 计算中以中型水库 2735 座，小（1）型水库 15126 座，小（2）型水库 65573 座计。

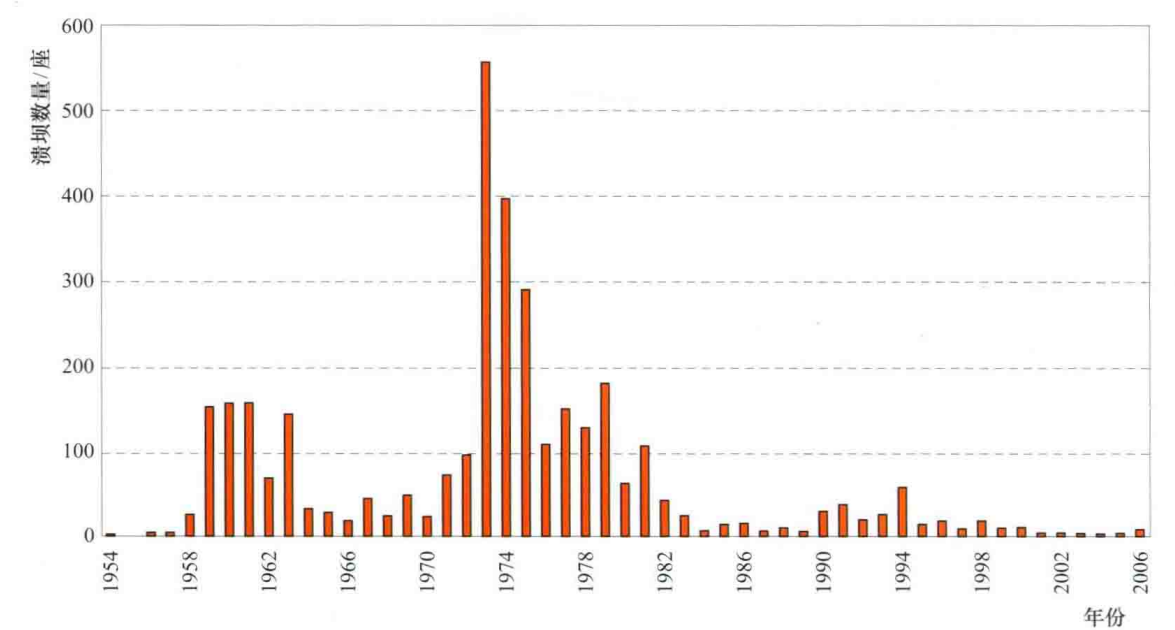


图 1.5 1954—2006 年我国水库溃坝数量

对溃坝的坝高和坝型的统计分析，结果见表 1.2 和表 1.3。

表 1.2 按坝高统计的溃坝比例

坝高/m	<10	10 ~ 20	20 ~ 30	30 ~ 40	40 ~ 50	50 ~ 70	>70
占已溃坝的比例/%	28.4	51.3	16.6	2.8	0.7	0.2	0

表 1.3 按坝型统计的溃坝比例

坝 型	均质土坝	心墙坝	土石混合坝	混凝土坝	砌石坝	其它
占已溃坝的比例/%	90.2	5.8	1.8	0.3	1.4	0.4

引起大坝溃决的原因复杂、多样，不同研究人员对溃坝原因分类也不同。大坝溃决方式可能是逐渐溃决，也可能突然（瞬间）溃决，这取决于溃决原因和坝型。混凝土坝常因漫顶或滑动而突然溃决，土坝溃决则多为逐渐溃决。大坝溃决可能是自然的，即由人力无法抗拒的自然因素引起，也可能是人为的。自然溃坝可能因结构老化、极端自然事件如暴雨、洪水、地震、差异沉降、岩石滑坡、管涌、渗流、漫顶、涌浪等。人为因素包括轰炸、人为破坏、主动拆除、劣质施工、设计错误、运行管理不当、选址错误、生物洞穴等。

《全国水库垮坝登记册》（1981 年）将水库溃决原因分为 5 大类 16 小类^[2]。但实际上，大坝溃决原因复杂，很多溃坝都是由多种原因共同导致的。溃坝原因统计见表 1.4。在各类溃坝原因中，漫顶是最主要的原因，占 47.8%，其中由超标准洪水导致漫坝破坏的占 12.9%，由泄洪能力不足导致溃坝的占 34.9%。从我国建坝的历史来看，绝大多数坝都是新中国成立初期修建的，水文系列短，对水库防洪库容和泄洪能力估计不足，许多水库设计和建设标准低。在所有漫坝而溃决的水库中，处于施工期破坏的占 18%，处于停建状态破坏的占 10.1%。

表 1.4 溃坝原因统计表

序号	溃坝原因	溃坝原因细项	各种原因导致溃坝		正常运行的溃坝		合计 百分比/ %
			溃坝数/ 座	百分比/ %	溃坝数/ 座	百分比/ %	
1	漫顶	超标准洪水	440	12.58	309	12.91	47.8
		泄洪能力不足	1352	38.65	836	34.94	
2	质量问题	坝体渗漏	593	16.95	456	19.06	41.2
		坝体滑坡	113	3.23	87	3.64	
		坝体质量差	50	1.43	32	1.34	
		坝基渗漏	40	1.14	31	1.30	
		坝基滑动或塌陷	6	0.17	5	0.21	
		岸坡与坝体接头处渗漏	79	2.26	70	2.93	
		溢洪道与坝体接触处渗漏	22	0.63	20	0.84	
		溢洪道质量差	192	5.49	105	4.39	
		涵洞（管）与坝体接合处渗漏	155	4.43	138	5.77	
		涵洞（管）质量差	40	1.14	27	1.13	
		生物洞穴	4	0.11	3	0.13	
		新老接合处渗漏	14	0.40	11	0.46	
3	管理不当	超蓄	40	1.14	32	1.34	4.69
		维护运用不良	62	1.77	31	1.30	
		溢洪道筑埝不及时拆除	15	0.43	11	0.46	
		无人管理	51	1.46	38	1.59	

续表

序号	溃坝原因	溃坝原因细项	各种原因导致溃坝		正常运行的溃坝		合计 百分比/ %
			溃坝数/ 座	百分比/ %	溃坝数/ 座	百分比/ %	
4	其它	库区或溢洪道塌方	68	1.94	50	2.09	5.26
		人工扒坝	81	2.32	58	2.42	
		工程设计布置不当	20	0.57	14	0.59	
		上游垮坝	5	0.14	2	0.08	
		其它	5	0.14	2	0.08	
5	原因不详		51	1.46	25	1.04	1.04
	合计		3498	100	2393	100	100

1.1.3 土石坝溃口特征分析

为便于分析说明，不妨将溃口形状近似作为梯形处理，表 1.5 为收集到的国内外历史上失事的 25 座土石坝的资料^[4]。总结发现， B/b 界于 1.08 ~ 1.74 范围内（ B 为溃口顶宽， b 为溃口底宽），其均值为 1.29，标准差为 0.180； B/d 更加离散，（ d 为溃口深度）比值范围为 0.84 ~ 10.93，均值为 4.18，标准差为 2.62。与溃口特征相关的另一个变量是溃口边坡坡角，不同溃口边坡坡角比例统计直方图见图 1.6。

表 1.5 国内外失事大坝的自然特征与溃口资料

序号	坝 名	建成/失事 年份	高度/ m	库容/ 万 m ³	溃口顶/底宽度/ m	溃口平均深度/ m
1	Apishapa（美国）	1920/1933	34	2250	91.5/81.5	30.5
2	板桥（中国）	1956/1975	24.5	49200	372/210	30
3	石漫滩（中国）	1950/1975	25	9180	446/228	25.85
4	八一（中国）	1957/2004	8.9	3000	62/36	—
5	Baldwin Hills（美国）	1951/1963	49	110	23/10	27.5
6	Buffalo Creek（美国）	1972/1972	14	61.0	153/97	14
7	Euclides de Cunha（巴西）	1958/1977	53	1360	131/—	53
8	Frankfurt（德国）	1975/1977	10	35	9.2/4.6	10.0
9	Frenchman Creek（美国）	1952/1952	12.5	2100	67/54.4	12.5
10	Goose Creek（美国）	1903/1916	6	1060	30.5/22.3	4.1
11	Grand Rapids（美国）	1874/1900	7.5	22	12.2/6.0	7.5
12	Hatchtown（美国）	1908/1914	19	1480	180/140.4	19.0
13	Johnston City（美国）	1921/1981	4.3	57.5	13.4/2	5.2
14	Kaddam（印度）	1957/1958	12.5	214	30/—	15.2

续表

序号	坝 名	建成/失事 年份	高度/ m	库容/ 万 m ³	溃口顶/底宽度/ m	溃口平均深度/ m
15	Kelly Barnes (美国)	1948/1977	11.5	50.5	35/18	11.5
16	Lake Frances (美国)	1899/1899	15	86.5	30/10.4	15
17	Lyman (美国)	1913/1915	20	4950	107/87	20
18	Manchhu II (印度)	—/1979	60	11000	540/—	60
19	Nanaksagar (印度)	1962/1967	16	21000	—/—	16
20	Oros (巴西)	1960/1960	35.5	65000	200/—	35.5
21	Salles Oliveira (巴西)	1966/1977	35	2590	—/—	35
22	Schaeffer (美国)	—/1921	30.5	392	210/—	27.5
23	Sheep Creek (美国)	1969/1970	17	143	30.5/13.5	17
24	Sinker Creek (美国)	1910/1943	21	333	92/79.2	21.0
25	Spring Lake (美国)	1887/1889	5.5	13.5	20/9	5.5

这些资料表明，土石坝溃决溃口近似于 $B/b \approx 1.29$ 、 $B/d \approx 3$ 与 $\tan\theta \approx 1$ （ θ 为溃口边坡坡角）的梯形。基于这个结论，可以推断：除极端情况之外，大坝溃口几何特征基本一致。

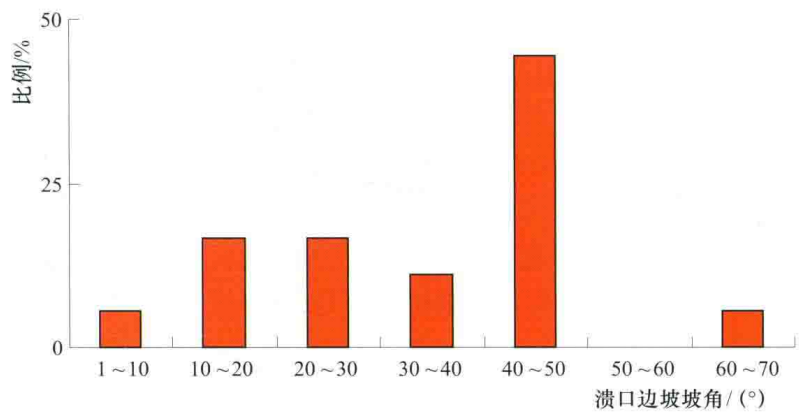


图 1.6 溃口边坡坡角比例统计直方图

从以上溃坝调查分析来看，可以得到以下一些总体认识：

- (1) 大坝失事的年概率约为 10^{-4} 。我国在 1959—1963 年和 1973—1975 年间出现溃坝的高发期，这与特定历史时期的技术、经济和社会环境等因素有关。1980 年以后，我国的溃坝率与国际上的统计结果基本一致。
- (2) 按溃坝坝型统计，土石坝溃坝数所占比例最大，超过 70%，主要原因是土石坝在各种坝型中所占比例大（占 70% ~ 90%）。
- (3) 所有溃坝坝型中均质土坝占已溃坝的比例非常高，达 90%。
- (4) 已溃的大坝中，70% 的坝高都小于 30m，我国和其它国家的数据均如此；如

果按水库规模统计,则溃坝主要发生于小型水库。

(5) 除极端情况之外,大坝溃口几何特征基本一致。

1.2 土石坝溃坝研究现状

土石坝溃坝研究涉及多个方面,研究方法有理论分析、数值模拟、物理模型试验,研究内容涉及土石坝安全分析、溃口发展预测、洪水演进、抢护技术等。本书对溃坝研究的主要技术方法、溃坝问题涉及的关键技术问题(是否会溃、何时溃,如何抢护)进行阐述。

1.2.1 溃坝物理模型试验及数值模拟技术

国外早期溃坝模型试验的主要目的是校核溃坝波理论解,研究溃坝时的坝址峰值流量、流量过程线以及坝址上下游溃坝波的演进等。自1892年德国学者 Ritter 给出简化条件下的溃坝波理论解后,各国学者对其进行了大量的校核试验研究。早期的试验一般在木制水槽或土渠内进行(奥地利、苏联),并且主要依靠肉眼观察溃坝波的传播过程并辅以简单的水位流量测量;20世纪50年代以后,逐步改进了试验手段并提高了测量精度。为方便观察将试验改在玻璃水槽内进行(美国、法国、瑞士、南斯拉夫、奥地利),并利用当时先进的计算机、高速摄影机、水位计及波高仪等对溃坝波传播过程及其相应的特征水位等进行了详细的记录及较为精确的测量。大部分试验用以研究大坝瞬间全溃时溃坝波的传播特性,包括溃坝波的型式(奥地利、南斯拉夫)、波高及波速的变化(美国、南斯拉夫)、溃坝波分别向下游和上游传播的规律(南斯拉夫、苏联、奥地利)、河床阻力对溃坝波的影响(美国)、下游初始水深对溃坝波的影响(南斯拉夫、法国)、下游河道形式对溃坝波的影响(南斯拉夫)、溃坝波传播时下游水深(南斯拉夫)及上游水库水面线的变化(奥地利)等,在试验中则一般采用快速提升闸板的方法来模拟瞬间全溃。此外,也进行了少量研究部分溃决的试验,并得出了相应的峰值流量的表达式(奥地利)。各国学者将试验成果与理论解进行了比较,发现了理论解与实际值之间的差异,并对其影响因素进行了分析,此外还根据试验成果总结得出了波峰传播速度的表达式(美国)及洪水演进概化过程线(南斯拉夫)等。

1959年 Malpasset 拱坝失事时,曾取得了一些溃坝洪水实测资料。1960年后法国对该坝进行了模型试验。其正态模型比尺为1:400,所给出的波峰传播速度与实测值相同,且试验的各地最高水位有80%与实测值之差小于2m,误差约15%。

在土石坝溃决过程方面,20世纪50年代末美国曾进行了一系列的水槽试验,还进行了1:2的现场自溃坝正态模型试验,模型长24.38m、高4.39m。由观测结果得到的均匀料冲刷率为1.82m/min,而良好级配料的冲刷率则为0.455m/min。60年代,奥地利也对堆石坝溃决问题进行了大量的室内试验,最大模型长40m,最高模型高达5.5m。根据试验成果分析,认为溃决时间比尺与美国提出的关系式基本一致。此外,对于同样的护坡块石,坡度减缓时,冲开坝坡的临界水头显著增大,如当下游坝坡由1:1.5减