

堰塞湖及其风险控制

Dammed Lake and Risk Management

刘 宁 程尊兰 等著
崔 鹏 陈宁生



科学出版社

堰塞湖及其风险控制

刘 宁 程尊兰 崔 鹏 陈宁生等 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书较为系统地介绍了堰塞湖的基本知识和风险控制技术,包含了丰富的国内外堰塞湖研究资料和应急处置实例,其中不少是汶川地震堰塞湖研究的最新成果。全书共分11章,内容包括堰塞湖分类与区域特征、堰塞湖危险性评估、堰塞湖溃决模式与溃决机理、堰塞湖溃决洪水演进分析、堰塞湖风险分析与临灾预案、堰塞湖处置技术、堰塞湖应急处置案例、堰塞湖存留条件与资源化利用等。考虑到堰塞湖文献比较分散,为了便于读者阅读和今后的研究,书末列出了作者收集的堰塞湖实例资料。

本书可供山洪和地质灾害防治及其相关领域的科研与工程技术人员参考,也可作为高等院校水文、水利工程、工程地质、岩土工程、自然地理等有关专业师生的教学参考书。

图书在版编目 CIP 数据

堰塞湖及其风险控制 / 刘宁等著. —北京:科学出版社,2013.7

ISBN 978-7-03-037356-4

I. ①堰… II. ①刘… III. ①堰塞湖-风险管理 IV. ①P941.78

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 083197 号

责任编辑:彭胜潮 李秋艳 / 责任校对:郭瑞芝

责任印制:钱玉芬 / 封面设计:王 浩

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2013年7月第一版 开本:787×1092 1/16

2013年7月第一次印刷 印张:25 插页:6

字数:575 000

定价:128.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前言

堰塞湖是一定量的固体物质堵塞山区河道所形成的具有一定库容的水体。一般而言,堰塞湖指由地表物质运移而自然形成的蓄积水体,根据形成堰塞坝体的物质来源和地貌过程,可将堰塞湖分为熔岩堰塞湖、崩滑堰塞湖、泥石流堰塞湖、冰碛堰塞湖。强震能够激发大规模崩塌滑坡并堵塞江河形成堰塞湖,有时也将由地震激发崩塌、滑坡形成的堰塞湖称为地震堰塞湖。2008年“5·12”汶川地震就形成了256处堰塞湖,引起了国际社会广泛关注,其中唐家山堰塞湖的应急排险成为抗震救灾期间最受关切的减灾工作。

堰塞湖的形成需要具备丰富的固体物质条件、相对狭窄的河谷、一定的集水面积和水源供给,在世界各国的山区均有分布。我国山地约占陆地国土面积的2/3,是堰塞湖分布最广、类型最多的国家,仅有记录的就有400余处,特别是在青藏高原隆升和河流下切造成的高山峡谷区域,发育了大量的堰塞湖。

堰塞湖不仅会造成上游的淹没灾害,而且还存在溃决风险,一旦溃决会给下游造成巨大的洪水灾害。1933年8月25日四川叠溪发生7.5级地震,地震直接造成6800余人死亡;地震诱发的大量滑坡、崩塌堵塞岷江,形成多个堰塞湖,最大堰塞坝高160 m以上,随着岷江水位上升,上游沿江村镇逐一被淹没,叠溪镇没于湖下;10月9日堰塞湖溃决,在岷江干流形成十几至几十米高水头的溃决洪水,冲毁了叠溪至灌县(今都江堰市)段岷江干流两岸大量民房、桥梁、道路、农田,进而严重危害下游灌县、温江、双流、新津等地沿江的农田和村庄,据不完全统计,共造成2500多人死亡,冲走牲畜4500多头,冲毁房屋6800多处、农田514 hm²、粮食50余万公斤。

另一方面,堰塞湖如果能够稳定安全地存留,也会给人类带来有利的影响。如可以利用堰塞湖的天然落差和蓄水条件,发展水利和水电。堰塞湖本身就是优美的风景,为人们休闲度假和生态旅游提供了景观资源,如藏东南的然乌湖、东北的五大连池、川西北九寨沟的海子、新西兰“蓝色牛奶湖”——普卡基湖、加拿大亚伯达省的Kananaskis堰塞湖等,都是著名的风景名胜区。

由于总体事件的稀少和天然土石坝结构的复杂性,国际上对堰塞湖的研究还非常薄弱,大部分研究是针对风险处置需求而开展的工作,如危险性评估、风险分析、应急处置技术、临灾预案等。2000年,中国成功处置了易贡滑坡堰塞湖,该湖是国内外迄今为止人工处置的最大堰塞湖。2008年和2010年,分别成功实施了汶川地震区堰塞湖和舟曲特大山洪泥石流堰塞湖排险。在理论研究和工程实践的基础上,编制了世界上第一部《堰塞湖风险等级划分标准》和《堰塞湖应急处置技术导则》。这说明,中国在堰塞湖应急处置方面已走在世界前列。

汶川地震后,堰塞湖研究得到学术界和政府的关注,水利部先后3次立项堰塞湖科研项目,科技部也在汶川地震后应急列项支持相关研究,使得中国堰塞湖研究取得了长足进展。本书集结了众多堰塞湖科研项目研究成果,包括:水利部公益性行业科研专项经费项目“岷江上游滑坡泥石流溃坝洪水的监测与防御”(批准号:200801032)、科学技

术部国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目“汶川地震次生山地灾害形成机理与风险控制”(批准号: 2008CB425800)、国家科技支撑计划课题“YSH(堰塞湖)关键技术与研究”(批准号: 2008BAB42B06)、国家科技支撑计划专题“重大堰塞体灾害风险评估技术”(批准号: 2008BAKS0B04-5)、国家科技支撑计划课题“堰塞湖风险评估与应急管理”(批准号: 2009BAK56B05)、四川省科技支撑计划项目“汶川地震堰塞湖后期处理关键技术与示范”(批准号: 2008SZ0156),内容涵盖堰塞湖分类与区域特征、堰塞湖危险性评估、堰塞湖溃决模式与溃决机理、堰塞湖溃决洪水演进分析、堰塞湖风险分析与临灾预案、堰塞湖处置技术、堰塞湖应急处置案例、堰塞湖存留条件与资源化利用等。同时,考虑到堰塞湖文献比较分散,为了便于读者阅读和今后的研究,书末列出了作者收集的堰塞湖实例资料。

全书由刘宁和崔鹏统稿,苏志满和庄建琦协助,吴积善和秦保芳校阅。各章主要撰写人如下。

- 第1章 刘宁、陈宁生、崔鹏;
- 第2章 崔鹏、庄建琦;
- 第3章 崔鹏、周家文;
- 第4章 程尊兰、陈宁生、崔鹏、刘晶晶;
- 第5章 陈宁生、胡桂胜、邓明枫;
- 第6章 程尊兰、党超、刘晶晶、褚娜娜;
- 第7章 程尊兰、苏鹏程、王士革、柳金峰;
- 第8章 程尊兰、党超、褚娜娜;
- 第9章 刘宁、黄金池、游勇、陈晓清;
- 第10章 刘宁、杨启贵、苏志满;
- 第11章 王兆印、余国安;

附表与附图 刘宁、崔鹏、庄建琦。

为了便于读者了解多年来国家在堰塞湖处置方面取得的成效,作者构思了本书的编撰思路和纲要。由于我们对堰塞湖的认识有限,很多方面还有待进一步研究探讨,错误和不足之处在所难免。衷心希望得到相关专业的专家学者、工程技术人员、灾害管理人员和广大读者的批评指教,并将和大家一起继续深化堰塞湖研究。

作为中国科学院成都山地灾害与地表过程重点实验室学术委员会副主任,我有幸与实验室科研人员经常沟通,并携手开展过一些堰塞湖的应急减灾研究工作。从2000年西藏易贡堰塞湖、2008年汶川地震堰塞湖,到2010年舟曲泥石流堰塞湖的成功处置,诸多科研院所、高等院校、勘察设计单位以及抢险救灾部队在堰塞湖研究、勘察、抢险工程设计与施工等方面做了大量卓有成效的工作,积累了丰富的资料、经验和科学认知,进一步加深了对堰塞湖的理解,这为本书的撰写奠定了良好的科学基础。在本书即将付梓之际,我们要特别感谢那些为堰塞湖风险防控做出过有益探索、研究和实践的专家、学者和科技人员,并向对本书做出贡献的所有人员致以衷心的感谢!

刘宁

2013年1月26日

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 堰塞湖概念	1
1.2 研究现状	2
1.2.1 堰塞湖成因	2
1.2.2 堰塞湖溃决机理	3
1.2.3 堰塞湖应急处置与风险管理	4
1.2.4 堰塞湖的开发利用	6
1.2.5 堰塞湖溃决的环境效应	7
1.3 主要科学技术问题	8
1.4 研究意义	9
参考文献	10
第 2 章 堰塞湖的类型与基本特征	12
2.1 堰塞湖的分类与类型特征	12
2.1.1 堰塞湖的分类	12
2.1.2 滑坡(崩塌)堰塞湖特征	12
2.1.3 泥石流堰塞湖特征	15
2.1.4 冰碛堰塞湖特征	16
2.1.5 熔岩堰塞湖特征	21
2.1.6 地震堰塞湖特征	23
2.2 中国堰塞湖区域特征	28
2.2.1 高山峡谷区堰塞湖	28
2.2.2 高寒区堰塞湖	28
2.2.3 低山丘陵区堰塞湖	29
2.3 堰塞湖基本特征	29
2.3.1 堰塞湖的分布	29
2.3.2 堰塞湖的生命周期	30
2.3.3 堰塞湖危害方式	31
2.4 堰塞湖典型实例	33
2.4.1 米堆沟冰碛湖	33
2.4.2 红椿沟泥石流堰塞湖	36
2.4.3 国内外典型地震堰塞湖	37
参考文献	39

第 3 章 堰塞湖形成机理	42
3.1 堰塞湖形成条件	42
3.1.1 地形条件	42
3.1.2 固体物源条件	47
3.1.3 水源条件	55
3.2 崩滑型堰塞湖形成的力学机理	56
3.2.1 崩滑型堰塞湖形成过程的阶段划分	56
3.2.2 堵江崩滑体形成和运动过程	57
3.2.3 崩滑体堵江过程	59
3.3 滑坡堰塞湖形成过程的数值模拟	60
3.3.1 杨家沟堰塞湖概况	60
3.3.2 气象水文条件	61
3.3.3 滑坡堰塞坝形成过程数值模拟	62
3.3.4 滑坡堵江堰塞湖形成过程	65
参考文献	71
第 4 章 堰塞坝稳定性评估与坝体破坏分析	74
4.1 堰塞湖危险性应急评估	74
4.1.1 堰塞坝稳定性分析的经验方法概述	74
4.1.2 地震堰塞湖危险性应急评估方法	76
4.1.3 汶川地震堰塞湖危险性应急评估	77
4.2 堰塞坝稳定性评价指标与模型	80
4.2.1 评价指标	80
4.2.2 评估模型	83
4.3 堰塞坝溃决模式	83
4.3.1 堰塞坝溃决模式概述	83
4.3.2 坝顶溢流模式	85
4.3.3 侵蚀与管涌模式	86
4.3.4 坝坡失稳模式	86
4.3.5 堰塞坝溃决的方式	87
4.4 堰塞坝溃决破坏的影响因素	88
4.4.1 坝体的几何形态和规模	88
4.4.2 坝体物质的组成和结构	92
4.4.3 堰塞湖的容积和形状	100
4.4.4 入湖水量、湖面蒸发和坝体渗透的影响	101
4.5 堰塞坝破坏分析方法	101
4.5.1 堰塞坝渗透稳定性分析	102
4.5.2 堰塞坝抗滑稳定性分析	105
4.5.3 堰塞坝抗冲刷稳定性分析	106

参考文献	109
第 5 章 堰塞坝溃决过程与机理	111
5.1 堰塞坝溃决模拟试验原型与试验设计	111
5.1.1 试验原型及其概况	111
5.1.2 试验设计	115
5.1.3 试验步骤	119
5.2 堰塞坝溃决过程	120
5.2.1 试验现象分析	120
5.2.2 溃决过程分析	124
5.3 堰塞坝溃决力学机理	130
5.3.1 坝体颗粒冲刷起动流速	130
5.3.2 颗粒冲刷起动过程	133
5.3.3 不同侵蚀阶段颗粒起动的特点	135
5.3.4 坝体组成结构特征对坝体溃决的影响	137
参考文献	138
第 6 章 堰塞湖溃决洪水计算	140
6.1 堰塞湖溃决洪水计算模型	140
6.1.1 经验模型	141
6.1.2 半经验模型	142
6.1.3 物理模型	144
6.1.4 常用的溃坝模型	146
6.2 溃坝洪水演进过程分析	155
6.2.1 Saint-Venant 方程组	155
6.2.2 洪峰展平法	157
6.2.3 线性河道法	158
6.2.4 蓄槽关系法	159
6.2.5 基于河道参数的 Muskingum 法	160
6.2.6 洪水演进案例——石坪滑坡堵塞坝溃决	166
6.2.7 洪水演进案例——磨子沟泥石流堵塞坝溃决	180
参考文献	183
第 7 章 堰塞坝溃决洪水风险评估与应急预案	186
7.1 概述	186
7.2 单个重大堰塞坝快速风险评估	187
7.2.1 危险性评估	187
7.2.2 易损性评估	192
7.2.3 风险评估	194
7.3 溃决洪水区域风险评估	196
7.3.1 溃决洪水危险性评估	196

7.3.2	滑坡泥石流堰塞坝溃决洪水易损性评估	204
7.3.3	溃决洪水综合风险评估	206
7.3.4	滑坡泥石流堰塞坝溃决洪水灾害风险分析	209
7.4	堰塞坝溃决洪水应急预案	215
7.4.1	概述	215
7.4.2	泥石流堰塞坝溃决洪水应急预案案例分析	215
7.4.3	滑坡堰塞坝溃决洪水应急预案案例分析	225
	参考文献	236
第8章	堰塞湖监测预警	238
8.1	堰塞湖监测的主要内容	238
8.1.1	水文要素的监测	238
8.1.2	堰塞坝安全监测	239
8.2	堰塞湖水位监测	240
8.2.1	水位监测站点布设原则	240
8.2.2	监测设备	240
8.3	堰塞坝两侧坡体及堰塞湖岸稳定性监测	241
8.3.1	简易排桩法观测	241
8.3.2	三角交汇法观测	243
8.3.3	横向视准线法观测	245
8.3.4	监测设备	249
8.4	堰塞湖坝体渗流和管涌监测	251
8.4.1	浸润线观测	251
8.4.2	坝基渗水压力观测	253
8.4.3	绕坝渗流观测	254
8.4.4	渗流量观测	254
8.4.5	渗流水透明度观测及化学分析	255
8.5	堰塞湖监测警报系统	256
8.5.1	堰塞湖监测需求分析	256
8.5.2	监测预警系统结构	256
8.5.3	信息传输	257
8.6	磨子沟泥石流堰塞湖监测	259
8.7	米堆沟冰湖监测预警	261
8.8	唐家山滑坡堰塞湖监测	266
	参考文献	269
第9章	堰塞湖排险减灾技术	271
9.1	堰塞湖上游水位调控技术	271
9.1.1	采用虹吸管降低上游水位	271
9.1.2	采用水泵抽排降低上游水位	272

9.1.3 上游修筑拦水坝,对上游水位进行调控	272
9.2 防止堰塞湖一次性整体溃决技术	273
9.2.1 开挖泄流槽	273
9.2.2 爆破工程	274
9.2.3 堰塞坝加固技术	275
9.3 堰塞湖泄流槽最佳过流断面设计关键技术	275
9.3.1 堰塞湖泄流槽的水力最佳断面	276
9.3.2 泄流槽水力最佳断面比较	279
9.3.3 不同泄流槽槽型水力最佳断面比较	280
9.3.4 堰塞湖梯型泄流槽横断面优化设计	281
9.4 堰塞湖人工可控排泄方法	286
9.4.1 堰塞湖人工可控排泄方法初步设计	286
9.4.2 堰塞湖人工可控排泄方法设计案例	288
参考文献	290
第10章 堰塞湖风险控制典型实例	292
10.1 西藏波密贡嘎滑坡堰塞湖应急排险	292
10.1.1 堰塞湖形成背景条件	293
10.1.2 堰塞湖形成过程	296
10.1.3 堰塞湖危险性分析与灾情预测	297
10.1.4 应急排险方案、措施及效果分析	299
10.1.5 总结与认识	304
10.2 汶川地震唐家山堰塞湖应急排险	304
10.2.1 堰塞湖形成背景条件	305
10.2.2 堰塞湖形成过程	309
10.2.3 堰塞湖危险性分析与灾情预测	312
10.2.4 应急减灾方案和措施	317
10.2.5 唐家山堰塞湖应急泄流及其减灾效果	326
10.2.6 体会与认识	333
参考文献	336
第11章 堰塞湖的资源环境效应及其应用	337
11.1 堰塞湖对河道水文及地貌过程的影响	337
11.1.1 对河道水文过程的影响	337
11.1.2 对河流地貌过程的影响	339
11.2 堰塞湖的保存方略	349
11.3 堰塞湖的环境生态效应	353
11.4 堰塞湖的景观效应及景观资源利用	357
11.5 堰塞坝的水利水电利用	359
参考文献	360

附表..... 363

附表一 四川省汶川地震灾区堰塞湖..... 363

附表二 中国滑坡堵江事件..... 371

附表三 中国西部部分泥石流堰塞湖灾害概况..... 382

附表四 2009 年 8 月 8 日中国台湾地区“莫拉克”台风暴雨期间形成的堰塞湖 ... 383

附表五 国外部分典型堰塞湖..... 384

附表六 国内外已溃决的部分典型滑坡堰塞湖..... 385

参考文献..... 388

附图

附图一 汶川地震灾区四川省境内堰塞湖分布

附图二 堰塞湖类型

附图三 地震堰塞湖

附图四 唐家山堰塞湖应急处置

第 1 章 绪 论

1.1 堰塞湖概念

堰塞湖是一定量的固体物质堵塞山区河谷或河道所形成的具有一定库容的水体。一般而言,堰塞湖指天然形成的水体、有别于人工坝体所形成的水体。

堰塞湖固体物质有多种来源,如火山喷发物、滑坡崩塌体、泥石流和冰川堆积物等。依据成因,堰塞湖可分为熔岩堰塞湖、崩塌堰塞湖、滑坡堰塞湖、泥石流堰塞湖、冰碛堰塞湖五类(柴贺军等,2001)。此外,由于强震往往形成大量的崩滑堰塞体,有时也将地震引发的崩塌滑坡而形成的堰塞湖称为地震堰塞湖。统计研究数据表明,降雨和地震引发的堰塞湖占堰塞湖总数的 90%(Costa and Schuster, 1988)。

我国山区广泛分布着规模不同的堰塞湖,它们大部分分布在青藏高原的东缘。由于青藏高原的巨大起伏,区域内的堰塞湖拥有巨大的势能,一旦溃决容易产生巨大的灾害。汶川地震后,新增了大量的地震堰塞湖,其中具有严重危害的有 34 处(崔鹏等,2009)。堰塞湖的存在,犹如悬在头上的“达摩克利斯之剑”,时刻威胁着下游居民的生命财产安全,影响着正常的社会经济活动。

有些堰塞湖留存时间较久,因湖区风景迤迤,成为了著名的景区,如藏东南的然乌湖(图 1-1)、东北的五大连池、川西北九寨沟的海子等。国外有些著名的湖区景点也属于堰塞湖,如大洋洲新西兰美丽的“蓝色牛奶湖”——普卡基湖(图 1-2),加拿大亚伯达省(Alberta)的 Kananaskis 堰塞湖(图 1-3)等。国外有些堰塞湖已开发为水能水资源基地,例如,新西兰利用滑坡堆积坝在韦克瑞莫纳河谷建了 3 座梯级水电站。堰塞湖虽然存在灾害风险,但稳定性好的堰塞湖可成为人类宝贵的资源。



图 1-1 然乌湖(苏志满摄,2011)



图 1-2 新西兰“蓝色牛奶湖”——普卡基湖

图片来源: http://tech.china.com/zh_cn/science/universe/1030/20100223/15825150.html



图 1-3 加拿大 Kananaskis 堰塞湖

图片来源: http://en.wikipedia.org/wiki/Barrier_Lake

1.2 研究现状

国内外关于堰塞湖的研究始于 19 世纪中叶,至今大致经历了两个阶段:早期(19 世纪末至 20 世纪 80 年代)主要以溃坝洪水研究为主;近期(20 世纪 90 年代以来)的研究重点在于溃坝机理(Xu et al., 2009; Schuster, 1995)。研究内容主要包括五个方面:①堰塞湖成因;②堰塞湖溃决机理;③堰塞湖处置与风险管理;④堰塞湖的开发利用;⑤堰塞湖溃决的环境效应。

1.2.1 堰塞湖成因

堰塞湖成因研究包括堰塞湖成因分类、堰塞湖形成和影响因素、堰塞湖的形成过程、模式与力学机理。

(1) 在堰塞湖成因分类研究方面,国内外学者依据其具体的成因将堰塞湖分为地震堰塞湖、冰碛堰塞湖、火山堰塞湖及沉积堰塞湖 4 类(李鹏云等, 2008)。

(2) 在堰塞湖形成和影响因素研究方面, Schuster 和 Costa(1986)在对一些天然土石坝调查研究的基础上,确定出控制堰塞湖发育的主要因素,包括构造活动、地震、火山活动,以及岩层的上下层节理、裂隙、变形错动等。柴贺军等(2002)对岷江流域的堰塞湖进行调查,发现巨大的滑坡和易产生粗大颗粒的硬岩有利于堰塞湖的形成。崔鹏等(2003)发现,泥石流堰塞湖的形成前提为泥石流具有大量的粗大颗粒及较大的流量和总量,主要影响因素为泥石流流量、泥石流一次堆积的总量、主河的流量、泥石流沟与主河의交角、泥石流的物质组成(特别是粗大颗粒的大小和数量)等。此外,对于高海拔山区,第四纪冰川退缩的过程中冰碛物堆积和固结后其后缘径流汇集可形成冰碛堰塞湖。我国大量的冰碛堰塞湖均是在第四纪冰川退缩过程中冰碛物堵塞沟道而形成的,典型代表有米堆沟的光谢错和聂拉木的嘎龙错等。

(3) 在堰塞湖形成过程、模式与力学机理研究方面,结合实验分析方法和水力学分析方法,建立了一些定量和半定量的堰塞湖溃决动力过程模型。

随着青藏高原的隆起,地表强烈侵蚀与剥蚀,为堰塞湖发育提供了条件,其分布广泛(Cheng et al., 2008),堰塞湖形成机理研究也越来越得到人们的重视。堰塞湖的形成机理是地球内外动力共同作用的结果,其研究主要集中在深化现场调查和物理模拟,定量描述堰塞湖形成的地质条件、地形条件和动力条件,分析堰塞湖的物质运动和能量转化以阐释堰塞湖的形成和发展过程。极端气候与地震活动对堰塞湖发育的控制将是今后研究的重点。

1.2.2 堰塞湖溃决机理

堰塞湖溃决机理研究内容包括堰塞湖溃决条件、堰塞湖溃决模式、堰塞湖溃决机理、堰塞坝稳定性分析等。

(1) 在堰塞湖溃决条件研究方面, Costa 和 Schuster(1988)统计分析了溃决案例,发现堰塞湖溃决的主要触发因素包括区域地震作用、区域暴雨、冰雪融水等。国内许多研究人员延续了 Costa 和 Schuster 的工作,从坝体形成原因、地形地貌、物质组成及结构等影响坝体稳定性和寿命的因素分析出发,以期得到堰塞坝溃决的临界条件(邓明枫等, 2010; 胡桂胜等, 2010)。

(2) 在堰塞湖溃决模式研究方面,研究人员通过案例分析认为,漫顶溃决、管涌、坝体失稳是主要的溃决模式,其中漫顶溃决是最常见的溃决模式,比例达到 80%以上。依据堰塞坝与土石坝在形态结构上的相似性,利用土石坝溃决理论探讨堰塞湖溃决机理,建立数学模型(Chu-Agor et al., 2008)。

(3) 在堰塞湖溃决机理研究方面,发展了一些数学模型,大体分为两类:①统计模型,利用一些关键参数(如溃口最终宽度、溃口历时等),通过简单的时变过程与溃口的发展过程的耦合关系建立数学模型,这类模型较简单,对数据输入要求较少,使用较方便,但由于未涉及实际溃坝机理,准确度不够,计算结果也不太稳定,可用于堰塞坝溃决的初步计算和预估;②基于物理过程的机理模型,根据水力学、泥沙、土力学等学科的基本理论,构建能够模拟实际溃坝过程和溃坝洪水过程的物理模型,比较典型的有 P-T 模型、BEED 模型和 BREACH 模型等。

堰塞湖溃决机理较为复杂,不同的环境条件,其机理和过程有显著差异。目前国外应用较广泛的模型是美国国家气象局开发的溃坝与洪水演进模型,该模型由 3 个数学模型组成,即 DamBrk 溃坝及溃坝洪水波动力演算模型、BREACH 土坝缺口侵蚀模型和 SMPDBK 简化溃坝模型,并已有相应的计算程序;国外应用较广的还有由 Danish Hydraulic 研制的 MIKE-11 模型及溃坝 BRESZHU 模型等(朱勇辉等, 2003)。

我国溃坝数值模型的系统研究始于 20 世纪 70 年代,建立了一些具有区域特色的溃坝模型,如中国水利水电科学研究院防洪减灾研究所开发的溃坝模型(晏鄂川等, 2001; 牛志攀等, 2009)。汶川地震以后,堰塞湖溃决模型相继出现(黄金池, 2008; 乔路等, 2009)。黄金池(2008)对堰塞坝漫顶溃口流量变化过程进行了数值模拟,在利用河流洪

水冲刷试验结果的基础上,假定溃口发展是由水流直接冲刷和坝体边坡等速扩展联合形成,根据土力学边坡稳定性分析计算的基本原则,提出了一个堰塞坝逐渐溃坝发展模式,再用堰塞坝的溃坝实测资料对建立的模型进行验证。乔路等(2009)将堰塞湖危险度评价分解为水文地质评价、堰塞坝稳定性评价、库区地质灾害发育情况及其稳定性评价、溃坝损失评价4个方面,利用模糊层次分析法对这4个方面进行定量分析,通过在杨家沟堰塞湖治理工程中的应用,说明模糊层次分析法可以较为客观地评价和预测单个堰塞湖的危险度,为应急处置和治理保护提供了技术参考。

(4)在堰塞坝稳定性分析研究方面,主要考虑堰塞坝自身的工程地质、结构特性等条件,对堰塞坝渗透稳定性、抗滑稳定性和抗冲刷稳定性3个方面进行力学分析。通过分析,明确堰塞坝体可能的破坏成因,并采用相应的工程处置措施。

1.2.3 堰塞湖应急处置与风险管理

堰塞湖特别是汶川地震形成的堰塞湖危险性大,与其相关的应急处置和风险管理研究受到学术界的关注,取得了一系列新进展。

1. 堰塞湖应急处置

通过系统的总结和研究,发展了较为全面的堰塞湖应急处置的原则和技术措施。依据堰塞湖风险的性质,可以采用以下几种措施。

1) 风险较低堰塞湖的应急处置

(1)堰塞体开渠泄流、引流冲刷、拆除,上游堰口疏通排洪、湖水机械抽排、虹吸管抽排、新建泄洪洞等湖水排泄措施。

(2)下游建透水坝壅水防冲。

(3)下游河道与影响区内的工程防护。

(4)对堰塞湖内水位变化和下游河道洪水冲刷可能引起的地质灾害的防护。

2) 风险较高堰塞湖的应急处置

(1)应急处置施工方法应力求简单、有效、快速和易于实施。处置前,做好施工组织设计;实施过程中,根据现场条件动态调整。

(2)应急处置的非工程措施包括确定应急避险范围、应急避险预案和应急避险保障措施。一般地,非工程措施应与工程措施相结合;工程措施实施困难时,可单独采取非工程措施排除险情。

(3)应急处理需要科学合理确定上下游危险区。上游避险范围为最高可能水位对应的淹没区和堰塞湖水位变化引起的次生地质灾害影响区。下游应急避险范围为堰塞湖泄流后下游过水区及可能引起的塌岸、滑坡气浪冲击等次生灾害影响范围。

引流槽和泄流渠是堰塞湖应急处置常用的两种工程结构,其设计关键在于断面设计。通常引流槽的断面形态设计为窄深型,这种结构利于径流的溯源侵蚀冲刷;而泄流

渠断面形态则多呈宽浅的复式断面,以确保不同规模流体的顺利出流。

2. 风险管理

堰塞湖的风险管理包括堰塞湖危险评估、堰塞湖监测预警和决策响应等方面。

1) 堰塞湖危险性评估

国内外大多数学者通过对已溃决堰塞湖的研究,采用统计方法获得经验模型和理论模型,比如,严祖文等(2009)提出的基于岩土力学理论的确定性分析方法;Hemphill等(2000)提出地貌无量纲堆积体指数法(Dimensionless Blockage Index, DBI);Ermini和Casagli(2003)根据对84座滑坡堰塞坝(阿尔卑斯和亚平宁山区36座,日本17座,美国和加拿大20座,新西兰和印度等其他国家11座)资料的统计分析,提出了改进的堆积体指数法;Schuster和Costa于1986年分析了堰塞坝溃决的原因,发现大部分堰塞坝均因漫顶而溃决,且其残存时间与其拦蓄水量和上游来水量的比值有关,提出了评估堰塞坝溃决危险性的指数法(Mizuyama et al., 2008)。张婧等(2009)通过对汶川地震灾区堰塞湖的实地调查,结合坝体级配、上游两岸山体的稳定性以及下游床面的结构,提出了危险性评价的综合指数法。这些方法均在一定的边界条件下适用于不同的堰塞湖危险性评估。

2) 堰塞湖监测预警

堰塞湖监测预警包括以遥感解译为手段的早期监测预警和以监测预警设备结合群测群防的实时定位监测预警。目前,国内外采用先进的遥感技术、传感技术和通信技术对堰塞湖的安全稳定进行监测,并依据其危险程度,将堰塞湖可能引发的灾害分成不同的等级,进行不同等级的预警。2000年之后,根据我国堰塞湖可能引发的山洪灾害,拟定了蓝色、黄色、橙色和红色4级预警。

遥感监测主要是运用可见光、雷达和航空影像等不同空间分辨率的多源遥感数据,监测堰塞湖的变化,进行危险性预判。定位监测是对堰塞湖的水位、流量、降水、气温、坝体的含水量与孔隙水压力进行监测,依据模拟计算的结果确定堰塞湖的稳定性程度。对于我国这样一个人口众多、堰塞湖分布较广的国家,采用以技术设备为基础,结合群测群防的监测预警体系进行防灾减灾,其效果将会更加突出。

3) 决策与响应机制

由于堰塞湖溃决的影响因素较多,溃决危险范围较大,堰塞湖的处置决策和措施成为人们较关注的问题(王兆印等,2010;刘宁,2008)。

自然情况下,堰塞湖的发展趋势分为稳定与溃决两种状况。一般地,存在10年(大多达几十年)以上的堰塞湖被归类为“稳定”的堰塞湖。Korup(2004)统计了新西兰232个堰塞湖,仅有37%溃坝,这一结果表明保留部分堰塞湖是可行的,但依然存在着较大的风险。堰塞湖处置风险较大的主要原因为:①溃坝洪水不是频发事件,通常下游没有相应抵御措施;②预警时间短,来不及疏散人口;③溃坝洪水的洪峰流量可达数倍

到数十倍于一般的暴雨洪水，大大超过防洪标准。

针对存在较大风险的堰塞湖，其风险决策过程为一边决策、一边排险、一边实施疏散受危险人群。汶川地震形成的大量堰塞湖，其决策过程和相应工作如下：

(1)堰塞湖分布与危险性分析。针对汶川地震形成的堰塞湖，利用5月15~28日期间基本覆盖重灾区的124幅AD 540航空影像，判释出256处地震堰塞湖(Cui et al., 2009)。通过研究发现堰塞湖主要沿着断裂带呈带状分布，堰塞湖数量分布与地震破裂带距离的关系符合对数衰减规律；堰塞湖还沿河流成串珠状分布，溃决时上下游具有级联放大效应，增大了风险。

(2)堰塞湖危险性等级划分。综合分析可获取的堰塞坝长度、宽度、高度、坝体物质组成和堰塞湖回水长度等数据，选定坝体的坝高、物质组成和堰塞湖的库容作为判定指标，按3个指标中至少满足其中2个指标条件进行归类，划分极高危险、高危险、中危险和低危险4个危险等级(Cui et al., 2009)。对有明显威胁的21处堰塞湖分析评价结果为：极高危险性的堰塞湖1处，高危险性的7处，中等危险性的5处，低危险性的8处(陈晓清等，2008)。同时，研究不同坝体溃决方式危险性，排出从风险最高到风险较小的溃决方式依次是瞬时全溃、瞬时局部溃决、分步溃决和逐步溃决。研究发现震后5至10年内，由于斜坡失稳，物源丰富，地震山区仍有可能产生新的大规模滑坡和泥石流，堵塞河流形成堰塞湖；但随着其后滑坡和泥石流活动趋于减弱，堰塞湖的形成概率将逐渐降低。

(3)堰塞湖溃决洪水影响区分析。开展了堰塞湖溃决洪水演进的计算分析，结合GIS技术进行溃决洪水泛滥区域的危险性分区，为堰塞湖应急排险工程布设及堰塞湖溃决洪水应急预案的制定提供了较为可靠的依据。

(4)排险决策行动。一边进行排险，同时注意预防次生灾害，及时迁移或临时迁移危险区内的居民。

我国已成功处置2000年易贡滑坡堰塞湖(刘宁等，2000)、2008年唐家山堰塞湖(刘宁等，2009)和2010年舟曲泥石流堰塞湖(刘宁等，2011)，积累了宝贵的堰塞湖应急处置和风险管理经验。今后，仍需进一步总结提炼相关科学技术问题，使堰塞湖风险调控更为系统化和科学化。

1.2.4 堰塞湖的开发利用

堰塞湖的存在既有溃决暴发洪水的风险，也潜藏着可开发的水利水电资源。目前国内外堰塞湖的开发利用体现在水利发电和旅游开发方面。国内成功利用堰塞湖的例子较少，比较著名的就是重庆小南海水库地震堰塞坝的综合利用与岷江叠溪大海子地震堰塞湖的旅游开发。我国分布最广的堰塞湖为地震堰塞湖，根据其形成规模、危险性及可能对下游造成的灾害进行风险评估，在评估的基础上以确保人民生命财产安全为目标，采取相应的排险措施，减小灾害的风险。在成功治理堰塞湖灾害后可变害为益，合理开发利用堰塞湖。

世界上成功开发利用堰塞湖的案例较多，主要方式包括发电、旅游、灌溉等。