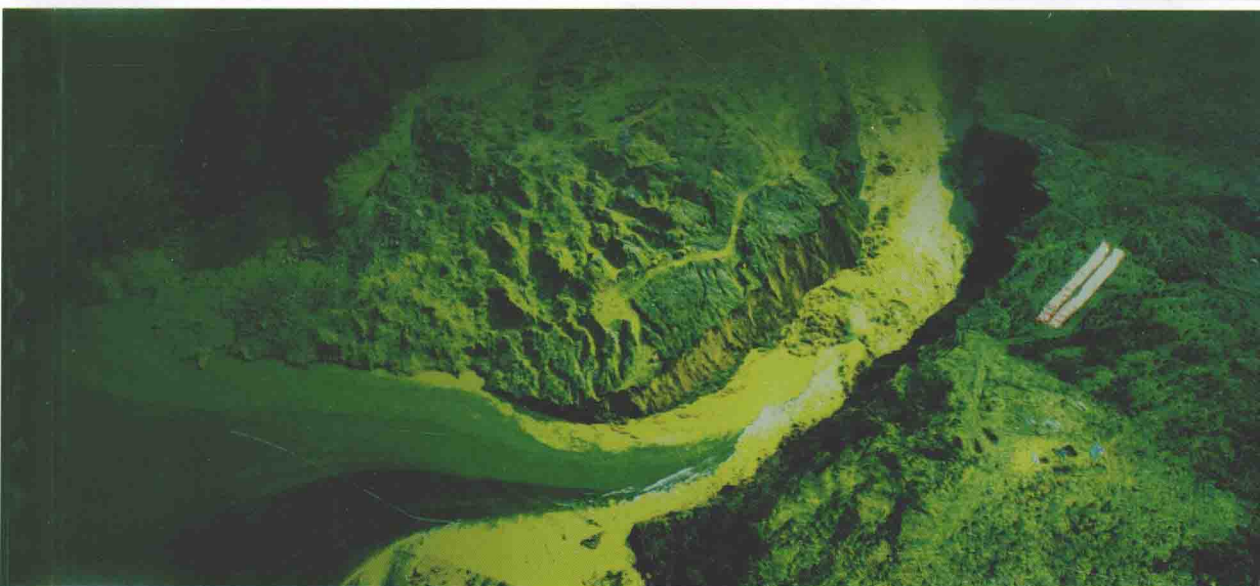




堰塞坝险情特征与应急处置

YANSEBA XIANQING TEZHENG YU YINGJI CHUZH

范天印 汪小刚 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

堰塞坝险情特征与应急处置

范天印 汪小刚 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

• 北京 •

内 容 提 要

本书重点分析了堰塞坝的形成条件与机理、险情特征,以及险情勘察、分析、研判与应急处置。主要内容包括:堰塞湖与堰塞坝的概念与分类,不同类型的堰塞坝形成条件、机理与可能性判断,堰塞坝的特点、险情特征与灾变过程,堰塞坝险情勘察与监测预警系统建立、险情研判、溃决洪水计算、坝体稳定分析,堰塞坝的应急处置工程、非工程措施与组织实施,堰塞坝险情的应急管理,最后,通过国内外堰塞坝险情的应急处置案例分析,系统介绍了堰塞坝险情应急处置各方面的内容。

本书立足于武警水电部队应急救援力量建设需要,提升武警水电部队应急技术研究及实战水平,为服务广大官兵而编写的培训教材,也可作为防灾减灾相关研究、管理人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

堰塞坝险情特征与应急处置 / 范天印, 汪小刚编著

. — 北京: 中国水利水电出版社, 2016. 7

ISBN 978-7-5170-4595-3

I. ①堰… II. ①范… ②汪… III. ①土坝—堤防抢险 IV. ①TV641.2②TV871.3

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第180659号

书 名	堰塞坝险情特征与应急处置 YANSEBA XIANQING TEZHENG YU YINGJI CHUZH
作 者	范天印 汪小刚 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 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、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	三河市鑫金马印装有限公司
规 格	170mm×240mm 16开本 19.5印张 272千字
版 次	2016年7月第1版 2016年7月第1次印刷
印 数	0001—2500册
定 价	49.00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

《堰塞坝险情特征与应急处置》 编委会名单

主 编：范天印 汪小刚

参编人员：庞林祥 程兴军 于 旭
 孙东亚 崔亦昊 解家毕

前 言

堰塞坝险情是地震、强降雨等自然灾害引发的较为严重的次生灾害之一，近年来越来越受到社会的普遍关注，如何科学、高效地应急处置，关乎社会民生。武警水电部队作为国家应急救援专业队，是堰塞坝险情处置的先头部队、主力部队，先后参与了西藏易贡、四川唐家山、云南鲁甸等多起堰塞坝的成功处置，当前正处于加速应急处置力量建设阶段。堰塞坝险情特征与应急处置是加速提升武警水电部队应急救援能力的重要研究课题，是自然灾害作用下的堤坝险情特征与应急处置的重要内容。

本书以堰塞坝险情产生、险情研判、险情处置三方面为主线，在总结武警水电部队堰塞坝险情应急处置经验的基础之上，系统分析了滑坡型堰塞坝、崩塌型堰塞坝、泥石流型堰塞坝、碎屑流型堰塞坝的形成条件、机理、工程地质特点、常见险情及可能造成的危害，对堰塞坝险情的勘察内容与方法、坝体水体监测预警、险情研判、坝体稳定以及一旦溃决可能产生的洪水计算方法进行了全面的阐述。同时，对堰塞坝险情的应急处置原则、流程、方法、组织实施、开发利用进行了阐述。既有理论基础，又有较强的实用性，对堰塞坝险情的应急处置具有指导作用。不仅弥补我国目前关于堰塞坝险情处置出版文献的空白，还能提升武警水电部队的应急力量建设水平，促进部队的力量生成、力量融合，保证部队关键时刻拉得出、打得赢。

本书是为适应水电部队应急救援力量建设需要，经武警水电第一总队与中国水利水电科学研究院合作编著完成的《堰塞坝险情特征与应急处置》《土堤险情特征与应急处置》《土石坝险情特征与应急处置》《混凝土坝险情特征与应急处置》等系列图书之一。本书

不仅可以作为武警水电部队官兵的应急救援教学课本、读本，还可作为研究堰塞坝险情的参考资料。

在系列丛书的编写过程中，得到了武警水电部队、中国水利水电科学研究院、中国电建集团昆明勘测设计研究院有限公司的大力支持。水利部防汛抗旱减灾工程技术研究中心主任丁留谦、副主任郭良等专家对书稿的编写提出了大量宝贵意见和建议。武警水电部队原总工程师梅锦煜将军对本书的定题、定稿提出了宝贵建议。此外，还参考了很多文献。在此，我们一并谨向以上单位、个人和相关作者表示衷心的感谢和致以崇高的敬意。

由于编写时间紧迫，限于作者水平，书中难免存在疏漏之处，恳请读者批评指正。

作者

2016年6月

目 录

前言

第 1 章 概述	1
1.1 定义	2
1.2 堰塞坝与堰塞湖分类	3
1.3 堰塞坝发育分布	20
1.4 堰塞坝险情及应急处置	22
第 2 章 堰塞坝形成条件与机理	27
2.1 堰塞坝诱因与成因	27
2.2 滑坡型堰塞坝形成条件与机理	30
2.3 崩塌型堰塞坝形成条件与机理	39
2.4 泥石流型堰塞坝形成条件与机理	46
2.5 碎屑流型堰塞坝形成条件与机理	54
2.6 堰塞坝形成可能性判断	63
第 3 章 堰塞坝特点与险情特征	74
3.1 堰塞坝特点	74
3.2 堰塞坝险情特征	82
3.3 堰塞坝险情灾变过程与危害	86
第 4 章 堰塞坝险情勘察、监测与研判	92
4.1 堰塞坝险情勘察	93
4.2 堰塞坝险情监测与预警	106
4.3 堰塞坝险情研判	137
4.4 溃决洪水计算	161

4.5	堰塞坝稳定性分析与判断	169
4.6	堰塞坝漫顶溢流计算	187
第5章	堰塞坝险情应急处置	194
5.1	处置原则和流程	195
5.2	应急处置方案	196
5.3	应急处置工程措施	199
5.4	应急处置工程措施组织实施	209
5.5	应急处置非工程措施	219
5.6	应急处置后续评估与中长期处置	221
5.7	堰塞坝的开发利用	226
第6章	堰塞坝险情应急管理	232
6.1	基本概念	232
6.2	应急管理策略	235
6.3	应急管理对策	238
第7章	堰塞坝险情应急处置案例	258
7.1	易贡堰塞坝应急处置	258
7.2	唐家山堰塞坝应急处置	275
7.3	国外部分堰塞坝应急处置与开发利用	286
	参考文献	299

第 1 章 概 述

随着人类社会的发展,全球气候变暖、地震频发、人类活动加剧,自然灾害愈发频发。伴随着自然灾害的产生,特别是地震、强降雨、冰川融化等影响地层运动与含水情况的地质灾害作用,形成了大量堰塞坝,在世界各国尤其是瑞士、意大利、美国、新西兰等山区较多的国家广泛发育,时有发生,是非常严重的灾害。我国也是世界上堰塞坝形成较为活跃的地区,尤其西南山区与青藏高原。堰塞坝的形成在我国由来已久,远在地质历史时期,就曾在岷江因滑坡形成了大量、多级的堰塞坝。我国也是世界上最早记录堰塞坝的国家,早在一千多年前就有滑坡堵塞长江和疏浚航道的历史记载。

堰塞坝形成与消失有着自己的规律,且一旦形成总是会引起极大的惶恐,威胁着上下游人民的生命财产安全。但是这个带着些生僻“面相”的名词,真正进入国人视野并引起国人的广泛关注,是在 2008 年 5 月 12 日四川汶川特大地震后。当时任国务院总理温家宝亲自登上唐家山堰塞坝坝顶的时候,当武警水电部队成功处置唐家山堰塞坝险情的时候,堰塞坝这个陌生的名词,成了大家关注的焦点——什么是堰塞坝?有什么危险危害?如何处置?什么时候处置?唐家山堰塞坝处置成功了吗?一时之间,成为整个社会乃至国外广泛谈论的话题。

因此,基于堰塞坝的形成条件、险情特征、溃坝机理等分析,开展应急处置、开发利用等方面的研究,具有重要的理论和现实价值,如何有效防止堰塞坝造成的二次灾害更是目前相关防灾减灾单位研究的重要方向。世界各国的地质、环境、水利水电、航运、旅游等部门对此高度重视,各国的地质学家,特别是工程地质学家围绕此类地质自然灾害开展了广泛而深入的研究,研究成果对于评价

某些流域的堵江发育程度和危险状况、为国民经济的发展提供有关的资料具有现实意义。本书将基于前人的研究成果，对堰塞坝的分类与特点、险情特征、应急处置进行综合阐述。

1.1 定 义

堰塞坝属天然坝 (natural dam) 类，关于其定义国内外并没有统一的界定，有称之为天然堆石坝，也有称之为天然土石坝。本书认为堰塞坝的说法更为合理，其不仅仅包括了地震、降雨等引起的崩塌、滑坡等形成的堰塞坝 (landslide dam)，还包括冰川运动、冰湖形成的冰碛坝 (glacier dam/moraine dam)，火山喷发形成的火山湖天然坝 (volcanic dam) 等。本书将堰塞坝定义为在一定的地质与地貌条件下，斜坡或者边坡上的岩土体因地震、降雨或火山喷发等原因引发山崩、滑坡、冰碛物、泥石流或火山熔岩和碎屑物截断山谷、堵塞江河、上游壅水，形成的不完全或完全堵水堆积体。

堰塞坝是未经人力作用而自然形成的起拦蓄水作用的天然挡水构筑物，属于土石坝，但与人工修筑的碾压土石坝相比较而言，工作条件、坝体几何特征以及坝体物质组成和内部结构等都存在明显差别，稳定性、均质性、整体性和坝体结构等都明显低于人工坝类，险情特征更加复杂。其险情主要来源于蓄水形成的不稳定堰塞湖对下游人民生命财产的威胁。一般来说，先有堰塞坝，后有堰塞湖。

堰塞湖 (landslide dammed lake，四川人叫“海子”) 来源于地质学，是一种较为常见的、经常发生的自然现象和次生灾害，随着堰塞坝的形成应运而生，没有堰塞坝的形成，也就不会拦河成湖，不拦河成湖也就无坝可言。关于堰塞湖的定义，指在一定的地质与地貌条件下，由于地震、强降雨、火山喷发等原因，引发滑坡、崩塌、泥石流、火山熔岩及冰水堆积等形成横向堤坝堵塞河道，造成河流上游壅水形成的湖泊。根据成因的不同，可分为由山岳沿地面运动的巨大冰块、极地或大陆沿地面运动的冰块堵江 (河)，以及冰碛堵

江（河）形成的冰川堰塞湖；火山活动液体喷出冷凝堵江（河）、火山固体喷出物诸如火山弹、火山砾、火山砂和火山灰等集结或成层堵江形成的火山堰塞湖，由生物型灰华堵江、结晶型灰华堵江形成的沉积堰塞湖，以及由山谷滑坡、崩塌或者支流的泥石流堵江形成的滑坡（崩塌）堰塞湖、泥石流堰塞湖等。世界上影响较大的几个堰塞湖有 1987 年形成的意大利 Val Pola 滑坡堵江堰塞湖，1993 年形成的厄瓜多尔 La Josephina 堰塞湖，1999 年形成的台湾南投堰塞湖，2005 年 8 月形成的巴基斯坦 Hattian Bala 堰塞湖。

地震堰塞湖是直接由地震将山体位移堵江（河）、地震导致山崩堵江（河）、滑坡堵江（河）、泥石流堵江（河）等形成的堰塞湖，是地震诱发的较为常见的，且最为严重的次生灾害之一，在世界各国的历史地震事件中较为常见，特别是山区。形成的数量的多少与地震震级、次数存在正相关，但是造成的次生水害与堰塞湖的数量并不直接相关，而是同堰塞湖蓄水量的多少、下游地区人口经济密度正相关。目前，世界上存在规模最大的地震堰塞湖是位于塔吉克斯坦东部的帕米尔高原穆尔加布河上的萨雷兹堰塞湖。自然灾害专家比尔·麦圭尔于 2007 年 9 月在英国《焦点》月刊发表文章，把萨雷兹堰塞湖列为全球十大潜伏自然灾害之一。

1.2 堰塞坝与堰塞湖分类

1.2.1 堰塞坝分类

堰塞坝的分类方法有多种，有按照成因、物质组成、几何形态进行分类的，也有按照斜坡几何形态、破坏机制、风险程度分类的。本节主要介绍按照成因、物质组成、几何尺寸、堆积形态和风险程度等几种主要的分类方法。

1.2.1.1 按成因分类

根据堰塞坝的成因不同，将堰塞坝分为滑坡型堰塞坝、崩塌型堰塞坝，以及滑坡、崩塌运动过程中形成的泥石流型堰塞坝。参考

147座典型堰塞坝统计资料,滑坡型堰塞坝发育最多,崩塌型堰塞坝次之,泥石流型堰塞坝形成最少。三种不同成因的堰塞坝所占比例见表1.1。不同成因形成的堰塞坝具有不同的破坏机制,具体内容将在第2章中进行阐述。

表 1.1 按成因进行堰塞坝分类

分类类型	滑坡型堰塞坝	崩塌型堰塞坝	泥石流型堰塞坝
数量	98	24	18
所占比例/%	70	17.1	12.9

滑坡型堰塞坝在各种地形、地貌、地层中均有发现,尤其在易滑地层中较为常见。其透水性和强度受原滑地层特性的影响和控制,材料强度、渗透与抗渗性与原岩土体密切相关,材料的异质性较大。该类堰塞坝在我国的岷江上游较为常见。

崩塌型堰塞坝,多发育于高山峡谷地区。该地区山谷陡峭、地形复杂、岩层碎裂,新构造运动强烈,易于形成各种堵江崩塌与大规模的山崩。崩塌型堰塞坝一般规模较小,受原地质结构条件的影响,材料差别也较大、透水性强、强度高。

在强降雨或冰雪融化的情况下,滑坡或者崩塌形成的岩土体在运动过程中随着水流的掺加,逐渐转化成泥石流,堵塞河谷,或者大量物质被搬运到溪流沟口堵塞干流,形成泥石流型堰塞坝。泥石流形成的堰塞坝的透水性与强度跟原岩土地的地质、水文条件密切相关,坝体材料总体较均匀,细粒含量较高,含水量较大,透水性差,强度较低,抗渗性差。

1.2.1.2 按物质组成分类

根据滑坡的主要物质组成为土质滑坡、岩质滑坡。滑坡堵江成坝,堰塞坝相应地分为土质堰塞坝和岩质堰塞坝,其中岩质堰塞坝是堰塞坝的主要形式。

土质堰塞坝主要由黄土滑坡、红土滑坡、半成岩滑坡、大断裂带的糜棱岩体滑坡,以及各种古滑坡的复活形成,颗粒组成相对均匀,块石等大颗粒较少,渗透性较低,强度指标较小,主要由破碎

的土体材料或强风化岩体组成。该类堰塞坝在我国西北的黄土地区易于形成，但是最后成坝的坝高都比较小，危险性不高。

岩质堰塞坝涉及的岩质材料复杂多样，一般软弱岩层或含有软弱夹层的岩层以滑坡的形式形成堰塞坝，坚硬岩石多以崩塌和大型山崩的形式形成堰塞坝。岩质堰塞坝多以硬岩为主，粒径变幅较大，往往含有大量的粗粒石块，细颗粒含量少，物质粗细分布不均，水平或垂直方向分异明显，一般规模都比较大，透水性强，强度高。该类堰塞坝在我国的金沙江上游较为常见，尤其以石灰岩山崩、灰岩山崩、板岩山崩与普福玄武岩山崩形成的岩质堰塞坝最为常见。对于岩质堰塞坝的稳定而言，其中粒径大于 1m 以上的块体含量是影响堰塞坝稳定的关键因素之一。

1.2.1.3 按几何尺寸分类

根据堰塞坝的几何尺寸，包括坝高、坝长、坝宽，以及相互之间的比例关系对堰塞坝进行分类，具体分类结果见表 1.2。该分类方法主要用于后续的研究与治理，而在应急处置阶段，由于不具备详细测量分析的条件，较少按照该分类方法进行应急期的堰塞坝类型划分。

表 1.2 按几何尺寸进行堰塞坝分类

分类依据	分类标准	分类类型
坝长/坝高 (L/H)	$L/H \leq 3$	高短坝
	$3 < L/H \leq 10$	矮长坝
	$L/H > 10$	河道型堰塞坝
坝宽/坝高 (W/H)	$W/H \leq 2$	窄坝
	$2 < W/H \leq 10$	中窄坝
	$W/H > 10$	宽坝
坝长/坝宽 (L/W)	$L/W \leq 1$	短坝
	$1 < L/W \leq 5$	中长坝
	$L/W > 5$	长坝

注 L 为坝长， H 为坝高， W 为坝宽。

1.2.1.4 按堆积形态分类

堰塞坝的堆积形态，不仅与崩滑体在坡面上的运动形式有关，还与崩滑体体积及河道纵横剖面形状有关。通过堰塞坝的堆积形态分析，发现堰塞坝的堆积特征呈现以下6种表象：①坝体和山谷宽度相比较小，堆积物无法到达河谷的另一边；②坝体体积足够大，不仅能到达河谷的另一边，甚至有些情况下在河谷另一边形成很高的堆积体；③坝体不仅能达河谷的另一边，而且还会沿着河流的上下游形成一定长度的堆积体；④坝体是由山谷两侧的崩滑体在河道中相汇而成，有的是头碰头，也有的是相错交汇；⑤崩滑体从山谷一侧滑下，形成两座或两座以上的坝体；⑥滑坡体的滑动面从河谷的下面经过一直到河谷的另一边形成堰塞坝。

综合以上6种表象，将堰塞坝按照堆积形态分为整体冲击型、滑动分散型、两岸汇流型、分股多坝型、地震隆起型五类堰塞坝。

(1) 整体冲击型。整体冲击、完全堵江、一次成坝。滑坡、崩塌体或泥石流滑动面剪出口位于河床堆积层之上或者稍下，河床堆积层不足以或者无法阻挡滑体的急剧下滑，滑坡、崩塌体或泥石流以较高的速度，经过较大水平位移，受摩擦阻力和对岸斜坡的阻挡停下或抛出一部分物质，停积于河床上形成堰塞坝。其主要特征为滑坡、崩塌体或泥石流以较高的速度越过河床冲向对岸斜坡，并爬高至一定高度后再折回原河床，典型平面、剖面示意图1.1。雅砻江上游的唐古栋堰塞坝、岷江上游的公棚海子堰塞坝都是典型的整体冲击型堰塞坝。

(2) 滑动分散型。堰塞坝的滑体剪出口远远高于原有河床，滑坡、崩塌体或泥石流以较高的速度，经过较大水平位移，受阻停下或抛出一部分物质堵塞河道，或以整体或碎层流的形式滑动和一定的速度冲入河床，沿河谷向上游、下游流动一段距离，形成宽厚的堰塞坝，典型平面、剖面示意图1.2。此类堰塞坝以台湾九份二山地区的崁斗山为代表。崁斗山的大量滑动土石，因受限于狭窄山

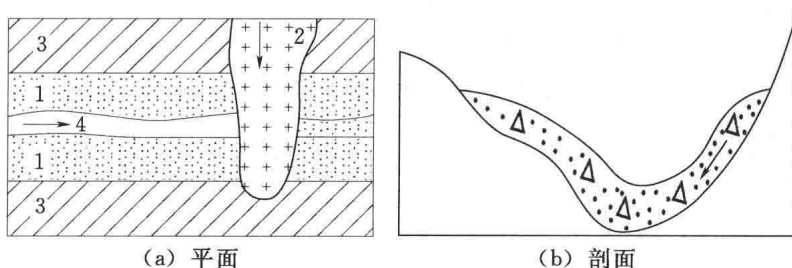


图 1.1 整体冲击型堰塞坝的典型平面、剖面示意图

1—河床；2—滑坡、崩塌体或泥石流滑体及运动方向；

3—两岸岸坡；4—河流及水流方向

谷，大部分崩落土石沿溪谷向下滑动，小部分往上游面推挤，于汇流口处形成堰塞坝；四川的扣山滑坡、云南巧家禄劝滑坡形成的堰塞坝也都为滑动分散型堰塞坝。

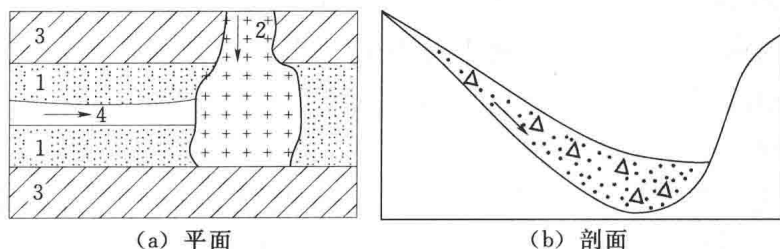


图 1.2 滑动分散型堰塞坝的典型平面、剖面示意图

1—河床；2—滑坡、崩塌体或泥石流滑体及运动方向；

3—两岸岸坡；4—河流及水流方向

(3) 两岸汇流型。这是比较特殊的一种类型，特征是两岸相对的斜坡体同时发生破坏失稳，向河谷流动，头碰头相接堵塞河床，典型平面、剖面示意图 1.3。这种两侧同时发生山崩的情况很少见，较著名的例子为四川岷江上游的大海子堰塞坝。该堰塞坝是由对峙于岷江两岸的观音岩、银屏岩于 1933 年叠溪地震时同时发生山崩，两岸崩塌物在岷江中相接而成。

(4) 分股多坝型。这也是比较特殊的一种类型，滑坡、崩塌体

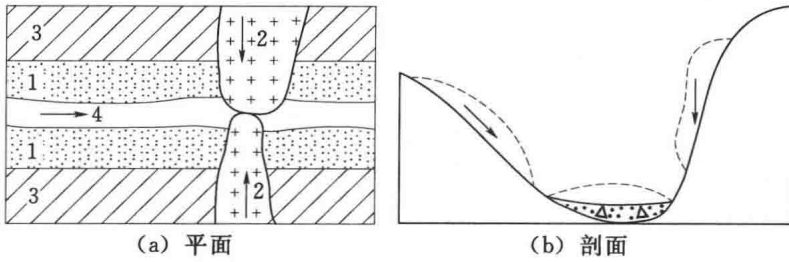


图 1.3 两岸汇流型堰塞坝的典型平面、剖面示意图

- 1—河床；2—滑坡、崩塌体或泥石流滑体及运动方向；
3—两岸岸坡；4—河流及水流方向

或泥石流分股进入河床，形成两座或两座以上堰塞坝，其中至少有一座堰塞坝完全堵塞河道，典型平面、剖面示意图见图 1.4。典型的例子如武隆县的鸡冠岭堰塞坝。1994 年 4 月 30 日，长江支流乌江下游边滩峡左岸武隆县鸡冠岭发生巨型岩崩，崩塌体体积约 390 万 m^3 ，岩体崩塌后分成两股向坡下运动，之后以龙冠岭为砥柱，分成两股向南、向北运动，其中向南的一股转化成碎屑流进入桐麻湾冲沟，填满冲沟后冲入乌江，形成一不完全堵江体，缩小了过水断面；向北一股在运动过程中再次崩裂，连同原斜坡上的残坡积层及基岩风化层崩滑入江，100 万 m^3 方岩土体崩滑进入乌江，水下约 30 万 m^3 ，形成坝高 110m 的堰塞坝，造成上下游水位差约 10m，截留乌江半小时以上。

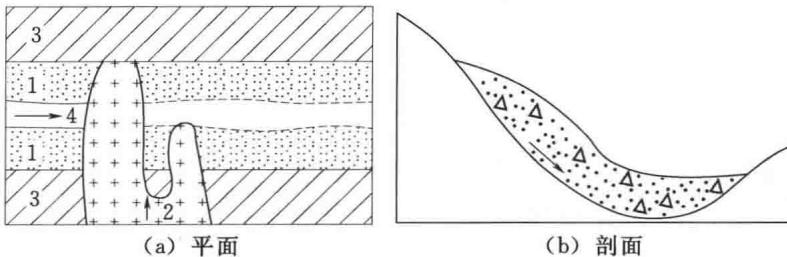


图 1.4 分股多坝型堰塞坝的典型平面、剖面示意图

- 1—河床；2—滑坡、崩塌体或泥石流滑体及运动方向；
3—两岸岸坡；4—河流及水流方向

(5) 地震隆起型。河床受地震挤压而隆起，土石方由下而上，不断上升，堵塞河道，造成水位壅高或堵江，形成潜坝或不完全堰塞坝。这类型的堰塞坝并未在文献中发现，典型平面、剖面示意图 1.5。

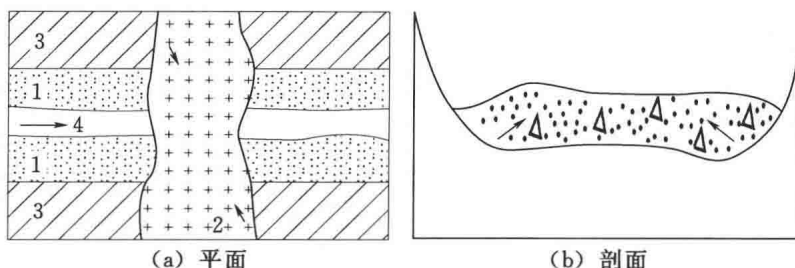


图 1.5 地震隆起型堰塞坝的典型平面、剖面示意图

1—河床；2—滑坡、崩塌体或泥石流滑体及运动方向；

3—两岸岸坡；4—河流及水流方向

1.2.1.5 按风险等级分类

2008 年“5·12”汶川大地震形成堰塞坝 100 余处，主要分布在汶川至青川长达 300km 强震带内的岷江、沱江、涪江和嘉陵江的几条支流上，其中以涪江支流通口河上的唐家山堰塞坝风险最大。在当时的特殊紧急情况下，进行堰塞坝的风险等级划分，对降低其风险可能带来的危害意义重大。由于没有成熟的堰塞坝风险评估经验可借鉴，四川水利抗震救灾指挥部组织专家临时制定了以堰塞坝坝高、最大库容和坝体结构三项指标判定堰塞坝的危险等级，该指标在堰塞坝应急处置过程中发挥了重要作用。

以上三指标虽然考虑了堰塞坝的主要风险因子，但对坝体地质结构的划分较模糊，没有给予足够重视。为此，结合“5·12”大地震的堰塞坝处置经验与教训，水利部组织相关专家进行了《堰塞湖风险等级划分标准》(SL 450—2009)的编制。依据《堰塞湖风险等级划分标准》(SL 450—2009)，先进行堰塞湖的规模分级，具体见表 1.3。然后参考堰塞湖的规模、堰塞坝的物质组成与堰塞坝