



Zuyu CHEN Xiaogang WANG Jian YANG Zhixin JIA Yujie WANG

陈祖煜 汪小刚 杨 健 贾志欣 王玉杰 著



ROCK SLOPE STABILITY ANALYSIS

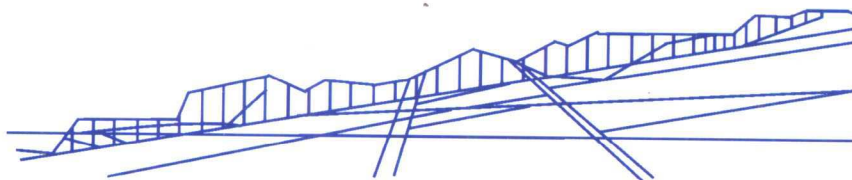
# 岩质边坡稳定分析

——原理·方法·程序

Theory  
Methods and  
Programs



中国水利水电出版社  
www.waterpub.com.cn



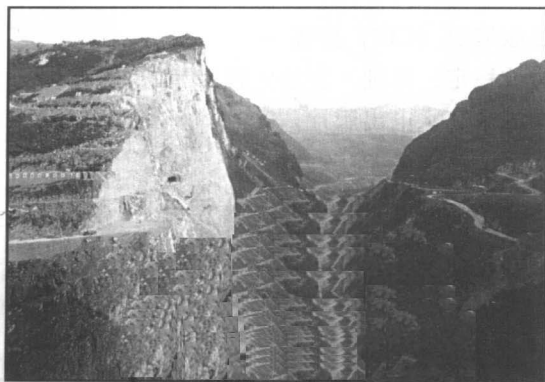
12  
国家科学技术学术著作出版基金资助出版

# 岩质边坡稳定分析

## ROCK SLOPE STABILITY ANALYSIS

——原理·方法·程序

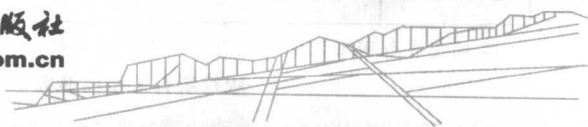
Theory  
Methods and  
Programs



Zuyu CHEN Xiaogang WANG Jian YANG Zhixin JIA Yujie WANG  
陈祖煜 汪小刚 杨健 贾志欣 王玉杰 著



中国水利水电出版社  
www.waterpub.com.cn



## 内 容 提 要

本书是作者所在从事边坡工程的研究集体,在以往十余年内完成国家重点科研项目和重大工程咨询任务过程中,取得的科研和工程应用成果的系统总结。书中全面阐述了岩质边坡稳定分析的原理和方法,并介绍了有关程序和使用说明。主要内容包括:边坡工程地质和总体稳定性评价方法,确定岩体抗剪强度的理论和方法,边坡稳定极限分析的理论 and 二、三维分析方法,确定临界滑动模式的最优化方法以及边坡楔体和和倾倒分析的原理和方法。本书还介绍了具有 788 组试验资料的岩体抗剪试验参数数据库和包含 115 个边坡工程的“水利水电边坡工程登录”数据库的查询系统。

本书可供水利、水电、土建、交通、矿山等领域的科研、设计和施工人员使用。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

岩质边坡稳定:原理·方法·程序/陈祖煜等著.

北京:中国水利水电出版社,2005

ISBN 7-5084-2587-1

I. 岩... II. 陈... III. 岩石—边坡稳定性—分析  
(力学) IV. TU457

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 011947 号

书 名	岩质边坡稳定分析——原理·方法·程序
作 者	陈祖煜 汪小刚 杨 健 贾志欣 王玉杰 著
出版 发行	中国水利水电出版社 (北京市三里河路 6 号 100044) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 63202266 (总机)、68331835 (营销中心)
经 售	全国各地新华书店和相关出版物销售网点
印 刷	北京市兴怀印刷厂
规 格	787mm×1092mm 16 开本 56.25 印张 1334 千字
版 次	2005 年 3 月第 1 版 2005 年 3 月第 1 次印刷
印 数	0001—3500 册
定 价	130.00 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

# 前 言

滑坡是自然界和基本工程建设中面临的重大灾害。在国民经济建设中，由于高边坡失稳导致的重大人员伤亡、巨大经济损失和工程建设受阻的事件屡屡发生，引起了各级领导和工程技术界的广泛关注和高度重视。

在过去的十几年中，中国水利水电科学研究院岩土工程研究所岩石力学与工程技术研究室负责和参加了多项国家和省部级重点科技攻关项目以及很多国家重大水利水电工程高边坡问题的科研咨询工作。在完成这些项目的过程中，取得了多项具有国际领先水平或国际先进水平的学术研究成果，解决了包括三峡、小浪底、洪家渡等一大批实际工程建设中高边坡稳定的关键技术问题，多次获得国家级和省部级奖励。研制开发的边坡稳定分析系列程序以及水利水电边坡工程登录和抗剪强度参数数据库等重要科研成果，已在水利水电工程中得到广泛应用和推广。

作为系统、全面总结整理这些研究成果的一项重要工作，我们从前几年就开始着手编写专著。本书的姐妹篇《土质边坡稳定分析——原理·方法·程序》（作者：陈祖煜）已于2003年1月由中国水利水电出版社正式出版，并承蒙潘家铮院士为该书作序。潘院士在此书序言中提到，“目前，有关研究工作虽已取得重要成就，但征途仍长（尤以岩质边坡为甚），我盼望有关部门能继续支持他们的工作，并祝他们在今后的战斗中取得更大的成就”。本书正是顺应这一形势和要求编写出版的。

本书的主要内容取材于作者所在课题组参加国家“八五”、“九五”科技攻关、国家自然科学基金等一系列重大项目的研究报告，同时，也包括了课题组在过去的十几年中完成三峡、小浪底、洪家渡、锦屏、小湾、糯扎渡等一系列大型水利水电工程的科研和咨询项目的研究成果。

本书前13章着重介绍了岩质边坡稳定分析的基本原理和方法，内容覆盖了边坡工程地质，失稳模式判断，岩体结构面网络模拟和抗剪强度，边坡稳定极限分析原理，二、三维极限分析方法，楔体和倾倒稳定分析方法，以及有限单元方法等；第14章至第16章主要介绍了边坡稳定分析的相关程序和使用手册；第17章和18章分别介绍了“水利水电边坡抗剪强度参数汇编”和“水

利水电边坡工程登录”两个大型数据库。

本书包含的内容凝聚了水利水电工程建设中广大工程技术人员的心血。书中介绍的滑坡登录和抗剪强度参数数据库，是在完成国家“八五”科技攻关项目“岩质高边坡稳定分析和软件系统”过程中，由我们组织水利水电设计院的同志共同开发完成的。有关水利水电工程实例的研究成果，也是在完成各设计院的咨询和科研工作的基础上形成的。更需要指出的，中国水利水电科学研究院岩土工程研究所岩石力学与工程技术研究室的全体同志都为本书做出了贡献。在这里，我们特别要向何传永、李新强、武雄、王雪涛、孙平、赵宇飞、陈立宏、孙陶、张培文、段庆伟、李旭等同志表示诚挚的谢意。

本书可供水利、水电、土建、交通和矿山等领域的科研、设计及施工人员使用，书中存在的一些不足之处，敬请读者批评指正。

**著 者**

2004年12月

# 目 录

前言

<b>第 1 章 绪言</b> .....	1
1.1 滑坡灾害 .....	1
1.2 岩质边坡中常见的滑坡 .....	6
1.3 岩质高边坡工程治理技术.....	20
1.4 岩质边坡稳定分析.....	41
1.5 边坡工程数据库.....	46
1.6 本书的主要内容和结构.....	47
参考文献 .....	48
<b>第 2 章 边坡工程地质</b> .....	51
2.1 前言.....	51
2.2 边坡岩体结构.....	53
2.3 岩质滑坡分类.....	57
2.4 边坡工程地质勘测和岩石力学试验.....	74
2.5 地球物理勘探方法.....	98
2.6 数字工程地质 .....	117
2.7 边坡岩体分类和质量评定 .....	143
参考文献.....	151
<b>第 3 章 边坡失稳模式和总体稳定性评价方法</b> .....	157
3.1 前言 .....	157
3.2 对结构面进行统计和分析的赤平投影原理 .....	158
3.3 边坡失稳模式初步判断方法及其应用 .....	165
3.4 岩质边坡总体稳定性评价 .....	168
3.5 边坡稳定的安全评价方法和标准 .....	187
参考文献.....	204
<b>第 4 章 岩石和结构面抗剪强度的基本理论</b> .....	206
4.1 引言 .....	206
4.2 岩石抗剪强度基本理论 .....	206
4.3 结构面的抗剪强度 .....	218
4.4 泥化夹层抗剪特性研究 .....	230
参考文献.....	240

<b>第 5 章 确定边坡岩体综合抗剪强度指标的经验方法</b> .....	243
5.1 概述 .....	243
5.2 基于国标 BQ 值确定岩体力学指标 .....	244
5.3 确定节理岩体抗剪强度的 Hoek-Brown 经验公式 .....	245
5.4 关于 Hoek-Brown 经验准则的讨论 .....	267
5.5 典型工程案例 (一): 漫湾水电站左岸边坡.....	270
5.6 典型工程案例 (二): 昌马水库枢纽工程坝址右岸边坡.....	275
5.7 典型工程案例 (三): 糯扎渡水电站高边坡.....	279
5.8 附录: 确定等效 Mohr-Coulomb 抗剪强度的数据拟合方法 .....	287
参考文献.....	288
<b>第 6 章 岩体结构面的调查、统计和计算机模拟</b> .....	290
6.1 前言 .....	290
6.2 岩体结构面数理统计的基本原理 .....	291
6.3 测线法 .....	300
6.4 统计窗法 .....	310
6.5 岩体结构面网络的计算机模拟 .....	312
6.6 确定节理密度 $\lambda$ 和岩体质量指标 $RQD$ .....	316
6.7 确定节理岩体的连通率 .....	319
6.8 非连续介质力学分析的地质概化模型 .....	328
6.9 工程案例研究 (一): 三峡工程 1 <sup>#</sup> ~5 <sup>#</sup> 机组坝段坝基 .....	330
6.10 工程案例研究 (二): 漫湾水电站左岸边坡 .....	346
6.11 工程案例研究 (三): 龙滩水电站左岸边坡 .....	354
6.12 附录.....	364
参考文献.....	371
<b>第 7 章 边坡稳定极限分析的理论基础</b> .....	373
7.1 前言 .....	373
7.2 塑性力学基础 .....	376
7.3 边坡稳定极限分析的塑性力学上、下限定理 .....	385
7.4 边坡稳定分析条分法的塑性力学基础讨论 .....	391
7.5 潘家铮“最大最小原理” .....	394
7.6 滑移线理论 .....	399
参考文献.....	408
<b>第 8 章 二维稳定的极限分析方法</b> .....	410
8.1 概述 .....	410
8.2 边坡稳定分析的塑性力学上限解 .....	410
8.3 边坡稳定分析的 Sarma 法 .....	417
8.4 稳定分析中有关问题的讨论 .....	422
8.5 上限解的验证和例题 .....	428

8.6	垂直条分法 .....	435
8.7	关于重力坝深层抗滑稳定分析方法的讨论 .....	443
8.8	地震稳定分析的 Newmark 法 .....	446
8.9	工程案例研究(一):黄河小浪底水利枢纽左岸山体高边坡 .....	456
8.10	工程案例研究(二):三峡工程船闸高边坡 .....	473
8.11	工程案例研究(三):昆明市柴石滩水库溢洪道高边坡工程 .....	484
8.12	工程案例研究(四):小浪底库岸河岸边坡 .....	497
8.13	工程案例研究(五):恶滩水电站4*机组基坑右侧高边坡 .....	504
8.14	附录 .....	514
	参考文献 .....	516
<b>第9章</b>	<b>岩质边坡楔体稳定分析</b> .....	<b>519</b>
9.1	概述 .....	519
9.2	楔体稳定的极限平衡分析方法 .....	520
9.3	楔体稳定分析的塑性力学上限解 .....	522
9.4	楔体稳定分析的塑性力学广义解 .....	523
9.5	有关理论问题的讨论 .....	531
9.6	随机楔体的稳定分析 .....	536
9.7	拱坝拱座楔体稳定分析 .....	538
9.8	工程案例研究(一):三峡船闸边坡楔体的稳定分析 .....	544
9.9	工程案例研究(二):小湾进水口边坡随机楔体稳定性分析 .....	549
9.10	工程案例研究(三):锦屏水电站左岸拱座楔体稳定分析 .....	551
	参考文献 .....	565
<b>第10章</b>	<b>三维边坡稳定分析方法和应用</b> .....	<b>566</b>
10.1	前言 .....	566
10.2	边坡稳定的三维极限平衡分析法的简要回顾 .....	574
10.3	边坡稳定的三维极限分析上限解 .....	576
10.4	例题和验证 .....	579
10.5	关于三维边坡稳定严格方法的讨论 .....	583
10.6	工程案例研究(一):洪家渡水电站左岸输水建筑物边坡 .....	585
10.7	工程案例研究(二):锦屏一级水电站拱坝坝肩抗滑稳定分析 .....	600
10.8	工程案例研究(三):小湾厂房进口边坡楔体滑动稳定分析 .....	605
10.9	工程案例研究(四):恰甫其海大坝左岸山体抗滑稳定分析 .....	610
10.10	工程案例研究(五):百色水利枢纽主坝坝基深层抗滑稳定 .....	614
	参考文献 .....	629
<b>第11章</b>	<b>边坡倾倒稳定分析</b> .....	<b>631</b>
11.1	前言 .....	631
11.2	边坡稳定倾倒分析的 Goodman-Bray 法 .....	631
11.3	对 Goodman-Bray 法的改进 .....	634



11.4	倾倒稳定分析的物理模型试验研究	640
11.5	工程案例研究(一):昌马水库枢纽工程右岸边坡稳定研究	653
11.6	工程案例研究(二):天生桥二级水电站厂房南边坡稳定研究	668
11.7	附录:第11.3.1节公式的推导	675
	参考文献	677
<b>第12章</b>	<b>确定临界滑动模式的最优化方法</b>	679
12.1	前言	679
12.2	确定土体的临界失稳模式的数值分析方法	679
12.3	常用的最优化方法简述	682
12.4	遗传算法	685
12.5	搜索三维临界滑裂面的步骤	693
	参考文献	699
<b>第13章</b>	<b>应力变形分析方法在边坡稳定分析中的应用</b>	701
13.1	概述	701
13.2	地下洞室和边坡开挖有限元程序——PHASE <sup>2</sup>	702
13.3	结构非线性分析有限元程序——ANSYS	712
13.4	结构非线性分析程序——ADINA	719
13.5	结构非线性有限元分析程序——ABAQUS	721
13.6	岩体稳定分析的离散元方法	724
13.7	拉格朗日差分法	728
13.8	DDA方法	734
13.9	数值流形方法	738
	参考文献	742
<b>第14章</b>	<b>边坡结构面统计及失稳模式判断程序 YCW</b>	744
14.1	概述	744
14.2	YCW程序的主要功能	744
14.3	YCW程序使用说明	745
14.4	培训题	757
<b>第15章</b>	<b>岩质边坡平面滑动和倾倒分析程序 EMU</b>	766
15.1	概述	766
15.2	主要功能	772
15.3	使用说明	773
15.4	培训题	783
	参考文献	801
<b>第16章</b>	<b>楔形体稳定分析程序 WEDGE</b>	802
16.1	概述	802
16.2	WEDGE程序使用说明	805
16.3	培训题	809

16.4	附录：计算四面体楔体几何特征量的公式 .....	814
	参考文献 .....	817
<b>第 17 章</b>	<b>水利水电工程岩体抗剪试验参数数据库及查询系统 .....</b>	<b>818</b>
17.1	前言 .....	818
17.2	抗剪强度试验资料数据库 .....	818
17.3	数据库查询系统简介 .....	825
17.4	实例说明 .....	829
<b>第 18 章</b>	<b>水利水电边坡工程登录 .....</b>	<b>834</b>
18.1	前言 .....	834
18.2	中国水利水电边坡登录工作 .....	834
18.3	边坡登录数据库的概况 .....	834
18.4	水利水电工程边坡登录数据库查询系统 .....	840
18.5	附录 1：边坡工程登录样板文件 .....	845
18.6	附录 2：水利水电工程边坡登录工作程序 .....	886

# 第1章 绪 言

## 1.1 滑坡灾害

### 1.1.1 直接灾害

我国是一个地质灾害发生十分频繁、损失极为严重的国家。据初步统计,每年由地质灾害所带来的经济损失平均在200亿~500亿元之间,地质灾害已成为制约我国经济及社会可持续发展的一个重大问题。

根据“中国环境公报,1998~2002”和“中国地质环境公报,2003”的统计可知:

(1) 1999年,全国共发生较大规模的突发性地质灾害320起,造成823人死亡。

(2) 2000年,我国西南、西北、东南沿海等地暴雨集中,引发了大量崩塌、滑坡、泥石流、地面塌陷等地质灾害。据不完全统计,全国因地质灾害造成1102人死亡、63人失踪、26709人受伤。

(3) 2001年,全国共发生滑坡泥石流、地面塌陷等地质灾害5793处。其中重大地质灾害240余起,造成788人死亡,直接经济损失近35亿元。死亡最多的云南省达191人;其次是湖南、四川、重庆、贵州和广东,分别为146人、108人、82人、61人和54人。

(4) 2002年,全国共发生各类地质灾害40246起,造成853人死亡、109人失踪,1797人受伤,直接经济损失51亿元。

(5) 2003年,全国共报告发生各类地质灾害13832起,其中突发性地质灾害13237起。全年因地质灾害共造成743人死亡、125人失踪、564人受伤,直接经济损失48.65亿元。四川省伤亡人数为305人,其中死亡123人,失踪57人,伤125人,其次为陕西省和湖南省,伤亡人员总数分别为236人和123人。

滑坡泥石流作为地质灾害中的一个十分突出的问题,给国民经济建设的各部门带来了严重的干扰和损失。在交通领域由于滑坡导致运输中断和人员伤亡的事故极为严重,例如<sup>[60]</sup>:

(1) 2003年5月11日,贵州省三穗县台烈镇三穗至凯里高速公路正在施工的平溪特大桥3号墩附近发生山体滑坡(参见图1.1)。20余万 $m^3$ 的滑体淹埋施工棚,死亡35人。

(2) 2003年5月22日,正在施工的甘肃省兰州至临洮高速公路在桩号K58+820m处左侧边坡发生塌滑,将8个正在施工的民工埋入土体中,造成7人死亡,1人受伤的重大事故。

(3) 2003年7月21日,陕西省佛坪县108国道牛湾段发生山体滑坡,4位民工当场



图 1.1 贵州省平溪滑坡

被倾泻而出的山石推出或掩埋。

(4) 2003年7月29日,新疆吐乌大高等级公路后沟段K4066+300处发生山体滑坡,200余 $\text{m}^3$ 碎石顺山而下,将该段公路阻断,十几辆车受阻,一辆卡车连撞两辆因山体滑坡受阻的卡车后,2人死亡。

(5) 2001年6月12日,云南大理白族自治州境内国道320线K3204+600处发生严重泥石流,覆盖公路长达180m,厚5m,泥流体1万 $\text{m}^3$ 多,造成国道320线大理至永平间交通中断。

(6) 国道318是连通西藏和内地的重要交通干线,但受滑坡泥石流影响,常年处于半通车状态。川藏公路的拉月大塌方、芒康县昌都地区大塌方、102大塌方、易贡湖溃坝、牛塌沟泥石流等地质灾害,均导致长时间断道,沿线居民居住地陷为陆地孤岛。2004年7月9日,西藏色季拉山发生山体滑坡,致使在川藏公路上修路的19名民工被掩埋,17人罹难。

目前,世界各国均仍有相当一部分人居住在山坡和坡趾地区。一旦产生滑坡将会给当地居民的生命财产带来难以估量的损失。例如2001年5月1日重庆武隆县城发生山体滑坡,滑坡体垂直高度46.8m,前沿宽552m,后沿宽25~30m,总量1.6万 $\text{m}^3$ ,一幢9层楼房被摧毁掩埋,79人死亡、7人受伤(图1.2)。2004年12月7日贵州纳雍山体滑坡,导致44人丧生。

滑坡灾害对水利水电工程建设的影响也极为严重。本书以这一领域为主要取材背景,有关事例将在以下的叙述中展示。

### 1.1.2 次生灾害

滑坡还会产生一些次生灾害,造成对环境和生命财产的影响。



图 1.2 重庆武隆滑坡

### 1. 滑坡堵江

滑坡体堵江，是常见的一种灾害。堵江后形成天然坝，如 1943 年 2 月 7 日发生的查纳滑坡，黄河被堵塞 24h 后复原。更多的情况是在坝前形成一个巨大的天然水库，随着库水位不断上升最终漫顶，导致溃坝，由此形成的洪水流量巨大，极易发生重大灾害。在《土质边坡稳定分析——原理·方法·程序》一书中介绍的我国唐古栋和易贡滑坡，即是超大规模的历史性滑坡堵江事件。当然，也有一些天然水库由于具有泄洪条件，永久保存下来，成为了一个天然湖泊，常称为堰塞湖。表 1.1 列出我国已知的堰塞湖体积和天然堆石坝的高度（张倬元和刘汉超，1995）。

表 1.1 我国滑坡堵江坝体堰塞湖统计表

序号	滑坡名称	地点	时间 (年·月·日)	滑坡体积 ( $\times 10^4 \text{m}^3$ )	坝高 (m)	堰塞湖体积 ( $\times 10^4 \text{m}^3$ )	堵塞河流
1	中阳村	四川巫溪	1988. 1. 10	765	30		大宁河
2	大路坝	湖北咸丰	1856. 10. 8	7200	70	6700	老窖溪
3	黄连峡	四川云阳	1982. 7. 19		40	2000	长滩河
4	沙岭	四川石柱	1982. 7. 18	1500	20	200	龙河
5	闪口	四川忠县	1982. 7	1800	30		干井河
6	叠溪 (小桥)	四川茂县	1933. 8. 25	4650	160	8000	岷江
7	叠溪 (小海子)	四川茂县	1933. 8. 25	7500	100	500	岷江

续表

序号	滑坡名称	地点	时间 (年·月·日)	滑坡体积 ( $\times 10^4 \text{m}^3$ )	坝高 (m)	堰塞湖体积 ( $\times 10^4 \text{m}^3$ )	堵塞河流
8	叠溪(大海子)	四川茂县	1933.8.25	9100	130	700	岷江
9	鱼儿寨	四川茂县	1933.8.25	675	135	100	鱼儿寨沟
10	下白腊寨	四川茂县	1933.8.25	1320	60	95	松平沟
11	上白腊寨	四川茂县	1933.8.25	20	20	70	松平沟
12	公棚	四川茂县	1933.8.25	3000	120	1000	松平沟
13	下水磨沟	四川茂县	1933.8.25	50	20	20	水磨沟
14	上水磨沟	四川茂县	1933.8.25	750	50	80	水磨沟
15	扣山	四川汶川		15000	265	43750	岷江
16	鲁车渡	四川会东	1935.11.25	10000	50		金沙江
17	周场坪	四川茂县	1981.4	1000	10	25	岷江
18	泄流坡	甘肃舟曲	1981.4	2500	22	1300	白龙江
19	唐古栋	四川雅江	1967.6.8	6700	165~355	68000	雅砻江
20	者波祖	四川西昌	1965.10.27	2900	51	270	东河
21	东爷庙	云南绥江		21000	60		金沙江
22	吴家湾	云南永善	1887.3.17	3375	20		金沙江
23	波戈溪	四川巴塘		5400	55		巴曲河
24	草坪子	四川木易		15000	70		雅砻江
25	梁家庄	陕西镇安	1983.10.7	412	68	150	甘岔河
26	关家院子	陕西勉县	1981.9.2	500	65	190	长沟河
27	高松树	陕西凤县	1981.8.22	1210	12	15	安河
28	早阳	陕西旬阳	1984.9.10	10	25		西岔河
29	自梅埡	四川南江	1974.9	700		13	板桥沟
30	酱祖	云南禄劝	1965.11.20	30900	140	500	金沙江
31	八嘎村	西藏察隅	1959	2400	150	48000	桑曲河
32	钟享乡	四川万源	1983.7.29	165		1300	
33	土巴沟	四川宝兴	1984.8.7	120	20~30	<100	宝兴河
34	老关口	四川宝兴	1000年以前	300	50		宝兴河
35	桃岭	台湾	1941年、1942年	>4800	217	15700	清水溪
36	桃岭	台湾	1979.8.15	500	90	400	清水溪

相当一部分历史性的滑坡堵江事件是由地震触发的，将在第 1.2.3 节作进一步的讨论。

滑坡堵江也可能干扰工程建设。1996 年 3 月 18 日发生于浙江天荒坪抽水蓄能电站下池的“大溪滑坡”是在持续一个月的中、小雨条件下触发的（图 1.3）。40 余万  $\text{m}^3$  的强风化岩体堵塞了河道，迫使河流改道，从正在施工的地下厂房中通过，给工程建设带来了巨大的干扰。



图 1.3 天荒坪抽水蓄能电站下池的“大溪滑坡”

## 2. 火山复活

滑坡诱发火山复活，是一种不太常见却值得一提的次生灾害。1980 年 5 月 18 日发生于美国华盛顿州的一次规模巨大的著名的圣海伦火山的喷发即与滑坡有关。图 1.4 (a) 为喷发前的照片。上午 8:32 发生了一次 5.1 级地震，几乎同时导致火山顶部的滑坡，如图 1.4 (b)。滑坡体总高度达 800m，随即发生火山喷发，如图 1.4 (c)<sup>[57]</sup>。

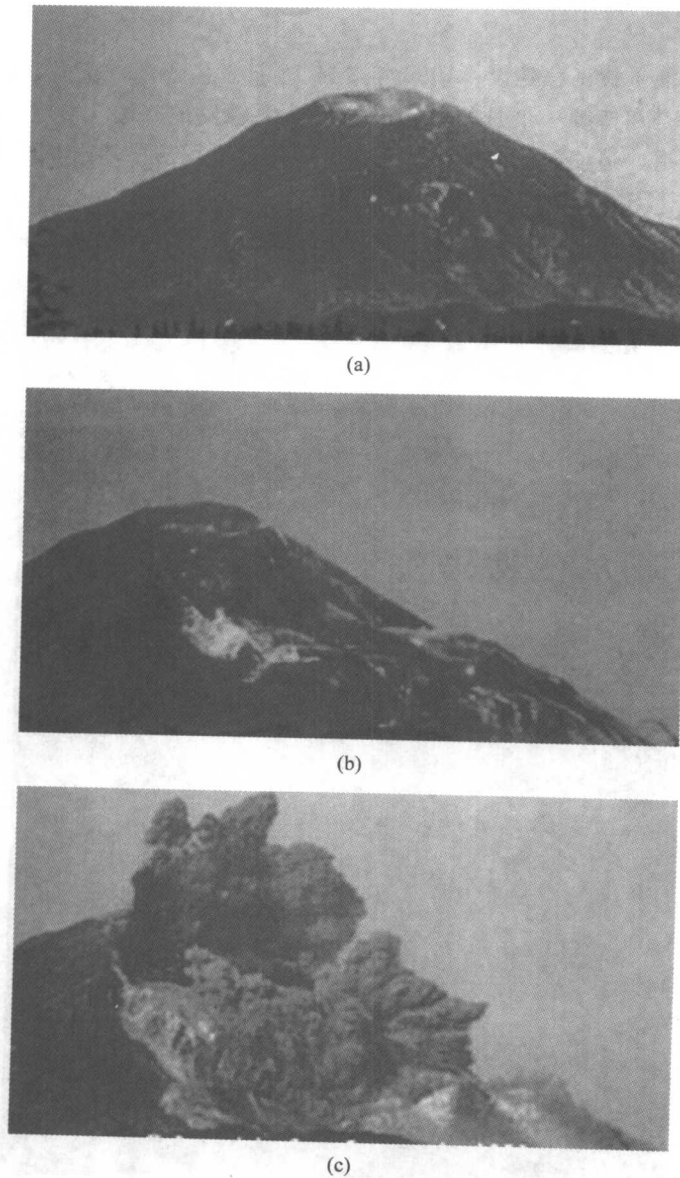


图 1.4 圣海伦火山 (摘自: 文献 [57])  
(a) 喷发前; (b) 地震导致滑坡; (c) 火山喷发

## 1.2 岩质边坡中常见的滑坡

### 1.2.1 天然边坡

天然岩质边坡中发生的滑坡, 通常多发生在强风化岩体中, 其触发因素大多为暴雨、地震等, 其中也有部分属渐进型破坏, 即剪切面材料的抗剪强度从峰值过渡到残余值的过



程中, 能量突然释放, 形成高速滑坡。例如前述 1943 年 2 月 7 日甘肃共和县的查纳滑坡, 是发生于西北黄土半成岩地区的一次规模巨大的灾害。滑体总量达  $1.27 \text{ 亿 m}^3$ , 滑速达  $40 \text{ m/s}$ , 100 余人遇难。

在高山峻岭中通过的河道通常为滑坡提供了理想的临空面。因此在天然边坡的滑坡中, 河道滑坡占了相当大的比例。长江三峡库区即是一个河岸滑坡典型的多发区, 在  $1240 \text{ km}^2$  内, 每年平均发生的大小不等的崩滑灾害 300 余起。1993 年的巫溪县南门岩体崩滑造成 200 余人丧生。2000 年彭水县山体滑坡造成 70 余人丧生, 三峡库区的新滩、黄腊石、链子崖等均为规模巨大的滑坡体。图 1.5 为链子崖高陡危崖体。

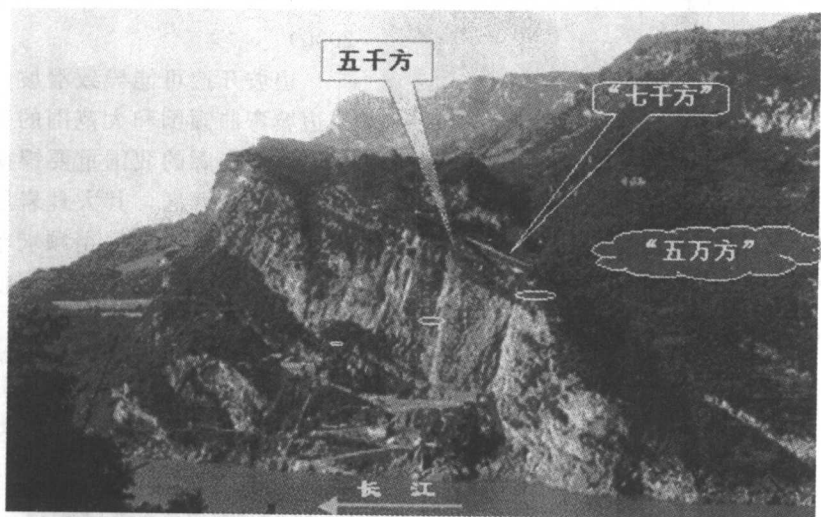


图 1.5 链子崖高陡危崖 (摘自: 文献 [55])

1991 年 12 月 14 日, 新西兰 Mount Cook 发生的一次规模巨大的山体崩滑是在没有明显的触发因素情况下发生的 (Sassa, 1995)。滑坡体高度  $1500 \text{ m}$ , 总体积  $14 \times 10^6 \text{ m}^3$  的滑坡体坠入  $1000 \text{ m}$  以下的 Tasmam Glacier 冰川湖。边坡岩体由中生代的石英砂岩组成。层面倾向坡外, 倾角  $60^\circ \sim 70^\circ$ 。岩体节理密集、张开。表面为冰雪覆盖 (图 1.6)。就滑坡的高度而言, 此滑坡体仅次于我国的易贡 ( $3300 \text{ m}$ ), 超过了唐古栋 ( $1000 \text{ m}$ )。

### 1.2.2 工程边坡

地面和地下开挖是导致土木、水利、交通、矿山等基本建设工程中常见事故和灾害的两大主要原因。

#### 1. 地面开挖边坡

应该说地面开挖是最为常见的诱发滑坡的因素。

1989 年 1 月 7 日, 正在建设的云南省大型水电站漫湾工程在开挖左坝肩的过程中突然发生一次高达  $100 \text{ m}$  的岩质边坡滑坡, 其总体积为  $10.8 \text{ 万 m}^3$  (参见图 7.2)。滑坡发生于强风化流纹岩地区, 该边坡岩体存在着一组十分发育的顺坡向节理, 滑裂面即沿此组节