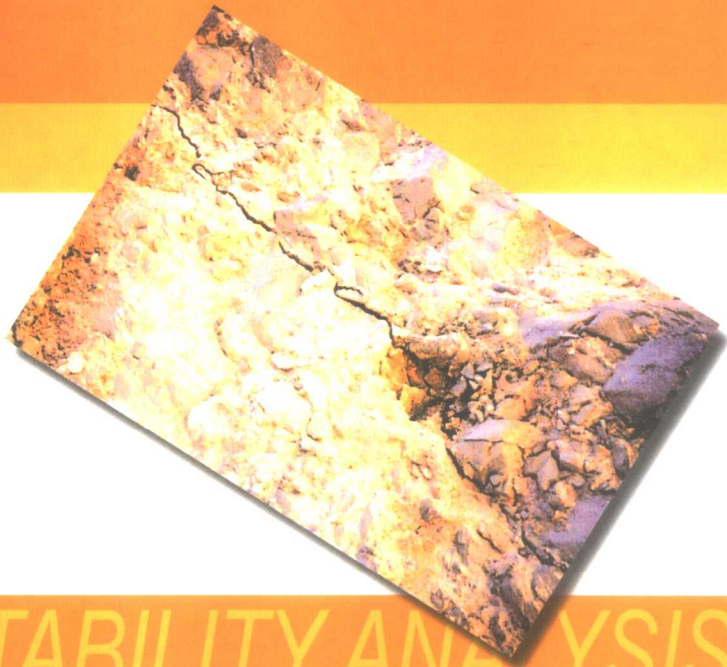


Zuyu CHEN

陈祖煜 著



SOIL SLOPE STABILITY ANALYSIS

土质边坡稳定分析

——原理·方法·程序

*Theory
Methods and
Programs*

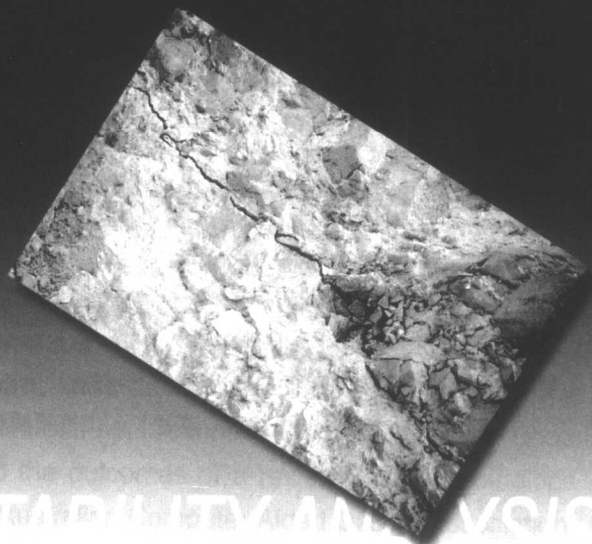


中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn



Zuyu CHEN

陈祖煜 著



土质边坡稳定分析

——原理·方法·程序

*Theory
Methods and
Programs*



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn



内 容 提 要

本书全面阐述对土质边坡进行稳定分析的原理和方法,介绍有关程序和使用说明,主要内容包
括:边坡稳定分析的通用条分法及各种简化方法,使用最优化方法搜索圆弧和任意形状滑
裂面的最小安全系数的原理和方法,土的抗剪强度和确定土的孔隙水压力方面的有关问题,以
及有效应力法和总应力法的原理。本书讨论了对挡土墙、加筋土、土锚钉等各种边坡加固措施
的设计计算方法和边坡稳定风险分析的原理和方法,并介绍边坡稳定分析程序的结构和程序设
计方法,附以主要源程序。本书记载了使用 STAB 程序完成的 13 个工程的分析计算成果,同时
简要介绍了作者近期开发的三维边坡稳定分析方法的原理和应用实例。

本书可供水利、水电、土建、交通、矿山等领域科研、设计和施工人员使用。

图书在版编目(CIP)数据

土质边坡稳定分析:原理·方法·程序/陈祖煜著. —北京:
中国水利水电出版社, 2003

ISBN 7-5084-1375-X

I. 土… II. 陈… III. 土坝—边坡稳定性—分析 IV. TV698.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 000772 号

书 名	土质边坡稳定分析—原理·方法·程序
作 者	陈祖煜 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: sale@waterpub.com.cn 电话: (010) 63202266 (总机)、68331835 (发行部)
经 售	全国各地新华书店
排 版	中国水利水电科学研究院岩土工程研究所
印 刷	北京市兴怀印刷厂
规 格	787×1092 毫米 16 开本 35.75 印张 848 千字
版 次	2003 年 1 月第一版 2003 年 1 月第一次印刷
印 数	0001—2600 册
定 价	75.00 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 言

滑坡是一种常见和重大的自然灾害。每年，滑坡和泥石流都要给人民生命财产带来巨大的损失。滑坡同时也对许多工程建设造成严重影响。就我所熟悉的水利水电建设而言，库区、坝区滑坡事故多次发生，造成重大经济损失和人员伤亡。我国主要的水电宝藏多位于西南、西北等地区的高山深谷之中，自然条件复杂。宏伟的南水北调工程的西线也将跨越地质条件极为恶劣的高山大川。瞻望前程，要开发这些水利水电资源，攻克高边坡稳定难关将是一个突出的问题。

和一系列的科学技术问题相比，边坡问题是个古老和普通的问题，似乎排不上“高、精、尖、新”之列。但现实的情况是：不仅建国以来，在水利、水电、铁道、公路、建筑各工程领域中滑坡事故成为最常见的、重要的自然灾害，而且要及时预报、合理分析、妥善处理还存在着很多问题与困难，我们决不能掉以轻心。今后随着大型工程建设日益增多，高边坡问题也将愈加突出。

为研究解决边坡失稳问题，我国科学家和工程师们做了长期努力，取得显著成就。陈祖煜同志就是有代表性的一位。他长期从事边坡稳定的科学研究和工程咨询工作，积累了丰富的经验。现在，他将自己的学术成果和工程经验系统地整理成书，这是一件很有意义的工作，弥足珍贵。在这里，我想写一点我对作者的一些印象。

我初次和陈祖煜同志相识，是1983年我在水利水电规划设计院工作的时候。当时，我正在组织开发“水工建筑物设计专用程序包”。陈祖煜刚从加拿大留学回来。在讨论会上，他向我们介绍了经过他和摩根斯顿教授改进的边坡稳定分析的程序。他对边坡稳定分析方法所做出的重大改进以及相应程序的先进性，引起了我的极大兴趣。我把他的工作和另一位孙君实同志的工作列为会议的两大收获，全力支持，并将这些程序纳入我们的“软件包”。后来他开发的STAB程序在水规院组织的黄山会议上通过审查鉴定，作为土石坝设计专用程序之一在水利水电系统获得了推广应用。从那时至今二十年中，我们一起经历了我国水利水电事业前所未有的建设高潮。我看到了他在学术研究、工程咨询和程序开发、推广等方面一步一个脚印前进的步伐。使我对他的工作和为人有了较深的印象。

陈祖煜同志给我的第一个印象是一位不谋名利、以事业为唯一目标的研究人员。他献身于边坡稳定领域的研究，孜孜不倦，锲而不舍，数十年如一日。正是在这种精神支持下，才取得一个又一个的成果。

丁34.12

本书介绍的通用条分法、自动搜索临界滑裂面的方法、土压力计算、风险分析以及三维分析方法，都有作者独到的见解和创新点。1984年，组织上为了培养年轻班子，特任命他担任水利水电科学研究院副院长。他却因行政职务影响科研工作苦恼，在1989年坚决辞去了行政领导职务，转而在清华大学黄文熙教授指导下攻读博士学位。我作为他的博士论文答辩委员会主任，曾仔细审阅了他的论文。我在评审意见中写道：“本论文既有理论高度，又有实用意义，是一篇极为优秀的学位论文，已达到国际先进水平”。我自信这一个评价是恰如其分的，这一点可以从他在国内、外重要学术刊物中发表的许多论文和引用记载中得到证明。我们国家是多么需要这样的‘学术迷’和‘工作迷’啊。

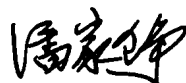
陈祖煜同志的第二个特点，是十分重视将研究成果用于解决工程建设中的难题，而不是做学院式的研究，以发表论文为唯一目的。书中介绍的三峡、小浪底左岸、宜兴抽水蓄能电站上池坝基的抗滑稳定问题，我都经历过，有关的分析成果确实为工程决策提供了重要的科学依据。可以说，在“生产依靠科研，科研面向生产”的原则上，他是贯彻得很好的一位。

我还高兴地看到他所开发的高水平的边坡稳定分析程序 STAB 在过去的十几年获得了广泛的应用，成为水利水电系统许多单位工程设计的工具。黄山会议的纪要中要求编制单位提供源程序，并由水总计算中心制订推广应用工作的具体办法。我当时还怕有些作者不愿意发表。现在，这部分源程序不仅已在本书中全部发表，而且配以详细的原理说明和例题。这对进一步推广岩土工程软件，提高设计工作效率和准确性是十分有益的。

最后还想呼吁一下，高边坡的研究，不仅是一颗难啃的硬果，而且不会为研究者本人或单位带来多少“经济效益”，它的贡献是反映在工程安全和进度上，也就是说反映在对国家、社会、和人民负责的社会效益上的。所以我对在市场经济冲击下仍能坚忍不拔地进行学术研究的同志表示由衷的敬意。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。

中国科学院院士

中国工程院院士



2002年12月5日 北京

目 录

序 言	
第1章 绪 言	1
1.1 滑坡灾害	1
1.2 土质边坡中发生的滑坡	2
1.3 边坡稳定分析	15
1.4 本书的主要内容和结构	20
参考文献	21
第2章 边坡稳定分析的通用条分法	23
2.1 边坡稳定分析极限平衡法的基本原理	23
2.2 静力平衡方程的普遍形式及其解	25
2.3 静力平衡方程的数值解	27
2.4 与条分法有关的一些基本问题的讨论	32
2.5 关于通用条分法理论问题的讨论	41
2.6 本章附录	56
参考文献	64
第3章 边坡稳定分析的简化方法	67
3.1 概述	67
3.2 瑞典法	67
3.3 毕肖普简化法	68
3.4 滑楔法	69
3.5 斯宾塞法 (Spencer 法)	71
3.6 简化法	71
3.7 各种方法和简化处理对计算精度的影响	72
3.8 本章附录	82
参考文献	84
第4章 确定最小安全系数的最优化方法	87
4.1 概述	87
4.2 任意形状滑裂面的模拟和目标函数的确立	89
4.3 模式搜索法	91
4.4 牛顿法	97
4.5 确定整体极值的随机搜索方法	104

4.6	应用实题	109
4.7	非数值方法	113
4.8	本章附录	119
	参考文献	119
第5章	土的抗剪强度	121
5.1	土的抗剪强度理论的简要回顾	121
5.2	粘性土的强度理论及强度指标	123
5.3	抗剪强度试验	127
5.4	残余强度	136
5.5	粘性土的饱和不排水强度-稳定分析的总应力法	140
5.6	循环荷载作用下土的总强度	146
5.7	无粘聚力土的非线性强度指标	147
	参考文献	149
第6章	土的孔隙水压力	151
6.1	概述	151
6.2	粘性土的孔隙水压力系数	151
6.3	确定孔隙水压力的理论和方法	152
6.4	确定土石坝各运用期孔隙水压力的经验方法	167
	参考文献	178
第7章	土石坝各运用期的稳定分析	181
7.1	前言	181
7.2	施工期	181
7.3	稳定渗流期	185
7.4	库水位骤降期	187
7.5	地震荷载作用下坝坡的稳定分析	192
7.6	本章附录	196
	参考文献	196
第8章	边坡加固稳定分析	197
8.1	前言	197
8.2	支挡结构的主动土压力计算	199
8.3	抗滑桩加固的边坡稳定分析	215
8.4	内部加固边坡的稳定分析	224
8.5	本章附录	235
	参考文献	236
第9章	有限元法在边坡稳定分析中的应用	239
9.1	概述	239

9.2	求解渗流和应力、应变控制方程的有限元方法	239
9.3	建立在滑裂面应力分析基础上的边坡稳定有限元分析	254
9.4	建立在强度缩小有限元分析基础上的边坡稳定分析	261
	参考文献	272
第 10 章	边坡稳定的可靠度和风险分析	273
10.1	边坡稳定的风险分析	273
10.2	可靠度分析基础	284
10.3	蒙特卡洛法 (Monte Carlo Method)	292
10.4	一次二阶矩法	294
10.5	自动搜索最小 β 值	305
10.6	岩土材料的变异特征和统计参数	306
10.7	工程实际应用实例	319
10.8	讨论和结论	329
10.9	本章附录	330
	参考文献	332
第 11 章	程序设计	335
11.1	前言	335
11.2	几何图形的识别和分析	336
11.3	边坡稳定分析的源程序	339
11.4	边坡稳定分析程序的考核	364
11.5	本章附录	375
	参考文献	376
第 12 章	程序使用说明	377
12.1	程序开发过程	377
12.2	数据处理	377
12.3	数据文件的格式	392
12.4	数据文件变量说明	400
12.5	例题目录	407
12.6	例题	407
12.7	程序的安装和运行	458
12.8	本章附录	461
	参考文献	462
第 13 章	工程案例	463
13.1	蒲城电厂张家沟灰坝	463
13.2	公伯峡水电站堆石坝	466
13.3	小浪底水利枢纽大坝	470

13.4	三峡工程 3 坝段坝基深层抗滑稳定分析	473
13.5	小浪底库岸河岸边坡稳定分析	483
13.6	宜兴抽水蓄能电站上池	491
13.7	紫坪铺水库左岸堆积体	495
13.8	徐村水电站溢洪道边坡	502
13.9	天生桥厂房高边坡	507
13.10	乌鲁瓦提面板堆石坝	512
13.11	黄河三盛公水利枢纽拦河闸	515
13.12	日照电厂蔡家滩灰场挡灰堤	517
13.13	紫坪铺工程 2#导流洞出口滑坡稳定分析	522
13.14	本章附录	531
第 14 章	三维极限平衡分析方法	533
14.1	概述	533
14.2	水科院三维极限平衡分析方法的理论框架	542
14.3	静力平衡方程式和求解步骤	543
14.4	验证	545
14.5	应用实例	547
14.6	讨论和结论	559
	参考文献	559

ABSTRACT

第1章 绪 言

1.1 滑坡灾害

滑坡是一种重要的地质灾害，对人类的生命财产带来重大威胁。例如滑坡可导致交通中断，河道堵塞，厂矿城镇被掩埋，工程建设受阻。

表 1.1 统计了上世纪世界上的一些重大滑坡灾害的实例（王恭先，1998）。从中可以发现，一些规模较大的滑坡，如意大利的瓦依昂滑坡，死亡人数达几千人。中国宁夏海源及秘鲁 Yungay 个别特大滑坡灾害的伤亡人数均以万计。另外由于滑坡堵塞河道，形成天然水库，而这些水库又没有溢洪道，通常会在短期内溃决，形成特大洪水，由此导致更大的灾害。

我国目前正处于经济建设高速发展的时期。滑坡给水利、铁路、公路、矿山建设带来巨大损失。1989 年 1 月 10 日在中国云南漫湾水电站大坝坝肩开挖过程中发生的滑坡，不仅耗资近亿元进行了治理，而且使这个 150 万 kW 的水电站推迟发电近一年，给云南省经济建设的整体安排带来了困难。1981 年雨季宝成铁路共发生滑坡 289 处，中断行车 2 个多月，抢建费用达 2.56 亿元。抚顺西露天矿自 1914 年投产以来，为保持边坡稳定，共剥离岩石 1 亿 m^3 。

滑坡可以发生在土质边坡，也可能发生在岩质边坡。发生于土质边坡的形态通常比较单一，基本上以剪切破坏为主，滑裂面为圆弧型或圆弧与夹泥层的组合型。岩质边坡发生的滑坡则因受岩体结构、地应力等影响，呈现出崩塌、滑动、倾倒、溃屈等多种破坏类型（孙广忠，姚宝魁，1988）。

触发滑坡的因素是多种多样的。降雨和地震是最常见的滑坡灾害的外因。人类的工程活动也是导致滑坡的重要原因。常见的工程活动是边坡开挖，地下开挖也会触发地面沉降和滑坡。湖北盐池河磷矿由于地下开挖导致边坡突然滑坡，埋没了村庄，287 人丧生。土方填筑也是导致滑坡的一个重要因素，在饱和软弱地基上修建堤坝，经常导致堤坝和地基一起滑动。高填方本身也会在填筑过程中发生滑坡。水库蓄水后库区经常发生大规模的崩岸和滑坡。

人类与滑坡灾害作斗争的努力始终没有中断过。这一努力表现在认识滑坡机理、完善边坡稳定分析理论和方法、开发滑坡治理技术和滑坡预报等方面。对滑坡灾害认识的不断深化是建立在地理、地质和岩石力学、土力学等一系列科学分支的形成、发展和完善的基础上的。而滑坡预报和治理又是围绕着确保人身安全和经济建设顺利开展这一中心进行的。只有在诸多领域内共同开展深入的研究，人类才有可能在防治滑坡方面取得重大进展。

本章简要回顾土质边坡的滑坡灾害以及边坡稳定分析理论体系形成的过程。

表 1.1 世界重大滑坡灾害实例

国家, 地区	日期	滑坡类型	灾害
爪哇	1919年	泥石流	5100人死亡, 140个村庄被毁
中国, 宁夏海源	1920年12月16日	黄土流	约20万人死亡
美国, 加利福尼亚	1934年12月31日	泥石流	40人死亡, 400间房子被毁
日本, 久礼	1945年		1154人死亡
日本, 东京西南	1958年		1100人死亡
秘鲁, Ranrachirca	1962年6月10日	冰和岩石崩塌	3500多人死亡
意大利, 瓦依昂	1963年	岩石滑坡进入水库	约2600人死亡
英国, Aberfan	1966年10月21日	流动滑坡	144人死亡
巴西, Rio de Janeiro	1966年		1000人死亡
巴西, Rio de Janeiro	1967年		1700人死亡
美国, 弗吉尼亚	1969年	泥石流	150人死亡
日本	1969年-1972年	各种灾害	519人死亡, 13288间房被毁
秘鲁, Yungay	1970年5月31日	地震引起碎屑崩塌、碎屑流	25000人死亡
Chungar	1971年		259人死亡
香港	1972年6月	各种灾害	138人死亡
日本, Kamijima	1972年		112人死亡
意大利南部	1972年-1973年	各种灾害	约100个村庄被毁, 影响20万人
秘鲁, Mayuamarca	1974年	泥石流	镇被毁, 451人死亡
秘鲁, Mantaro峡谷	1974年		450人死亡
Semeru山	1981年		500人死亡
秘鲁, Yacitan	1983年		233人死亡
尼泊尔西部	1983年		186人死亡
中国, 东乡县西勒	1983年	黄土滑坡	4个村被毁, 227人死亡
哥伦比亚, Armero	1985年11月	泥流	约22000人死亡
土耳其, Catak	1988年6月		66人死亡

1.2 土质边坡中发生的滑坡

1.2.1 天然边坡

在天然边坡中发生的山体滑移, 通常没有人类活动、降雨、地震等明显的触发因素。此类滑坡多呈现渐进性破坏特征。触发滑坡的主要因素为滑带土由峰值强度向残余强度的过渡。1983年3月17日17时45分发生于甘肃酒勒山的滑坡是一个典型的实例(见图1.1)。滑坡处于甘肃东部黄土高原。滑带是由临夏组黑灰色粘土岩演变的5~20cm的夹层组成, 矿物成分以蒙脱石为主。滑坡于1979年9月起动, 当时在北坡发现宽约10cm的东西向的裂缝, 自1982年10月至12月开始进入挤压滑移阶段, 最终于1983年3月进入剧变和滑动阶段。滑坡体积5000 m³, 摧毁4个村庄, 227人死亡。

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。1943年2月7日在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(见图1.2)。滑体总量达1.27亿 m^3 ,滑速达40m/s,100余人遇难,黄河曾短期断流。查纳滑坡发生在早、中更新世内陆湖相沉积的半成岩土中。此类超固结土的材料强度试验呈明显的应变软化特征,“似岩非岩,似土非土”,构成了一个典型的渐进型破坏高速滑动的条件。



图 1.1 洒勒山的滑坡

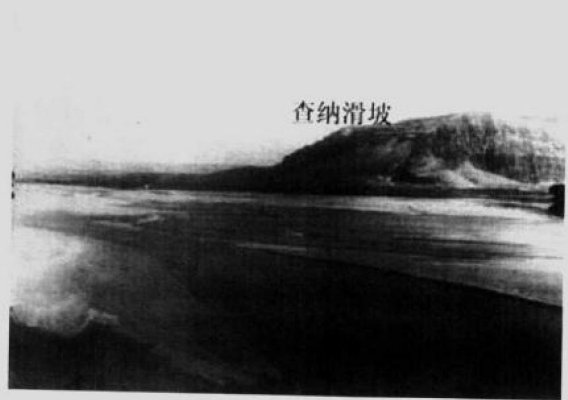


图 1.2 查纳滑坡

1985年6月12日凌晨,在长江西陵峡上段兵书宝剑峡出口新滩镇发生总方量0.2亿 m^3 高度达800m的滑坡。这是一个成功地实现滑坡预报的例子,1371人在滑坡前数小时安全撤离。

1967年6月8日,在雅砻江发生的唐古栋滑坡以其巨大的规模载入历史纪录(见图1.3)。失稳边坡高达1000m。滑坡材料为风化残积土。滑坡体总方量为0.68亿 m^3 ,堵塞河道后形成一个高达335m的大坝,库容6.8亿 m^3 。

唐古栋滑坡将河道堵塞9天后天然坝决口,洪水以39m高的立波形式冲向下游,洪峰流量为5300 m^3/s (Chen, 1992)。



图 1.3 雅砻江唐古栋滑坡

1.2.2 工程边坡

滑坡是土木、水利、交通、矿山等基本建设工程常见的事故和灾害。工程开挖和填筑是导致滑坡的两大主要原因。

1. 开挖边坡

1985年12月24日下午3时,天生桥二级水电站首部右侧挡土墙施工时发生滑坡(见图1.4)。虽然坡高仅30m,但导致了正在基坑内施工的48人丧生。这一滑坡的主要原因是坡内存在一层饱和软粘土。第4章将以此为实例介绍滑坡稳定分析的方法。

天生桥二级水电站电站厂房高边坡在开挖时也触发了一个规模较大的滑坡。滑体沿向斜的夹泥层以7.8m/日的速率移动。曾采用卸荷、排水、抗滑桩和预应力锚索等多种手段来治理这一滑坡。第13章13.9节详细介绍了对这一边坡进行加固过程中所作的稳定分析。

铁路、公路边坡由于大部分为明挖,滑坡通常是路堑建设的重要制约因素。表1.2列出了福建省高速公路施工时发生的主要滑坡(姚国芳,2002)。图1.5示1992年宝成铁路K190段滑坡全貌。

表1.2 福建省高速公路主要滑坡工点一览表

路段名称	滑坡地点	性质	规模	处理措施	工程投资(元)
福泉高速公路	石牌山高边坡	堆积层滑坡	边坡高约40余m	明洞(约100m)	约800万
	官秀互通滑坡	古滑坡复活(堆积层滑坡)	宽150m,长150m,厚度约10~20m	两排抗滑桩,辅以抗滑挡墙和排水平孔等	约600万
漳龙高速公路岩段	新祠互通滑坡	顺层滑坡(石英砂岩+泥岩)	高度约70余m,宽度约100m,厚度约10~15m	改线	
	K67+995滑坡	破碎岩(石英砂岩)滑坡	高度约100余m,宽度约70m,厚度约10~15m	预应力锚索地梁+土钉+挂网喷射混凝土	约350万
	K63+770~+980	堆积层(古崩坡积层)滑坡	高度约200余m,宽度约160m,厚度约15~20m	预应力锚索抗滑桩+抗滑挡墙+排水平孔	约350万
漳龙高速公路和溪段	K64+670~+780	古滑坡复活(崩坡积体)	高度约110余m,长度约200m,具多级次滑动面	预应力锚索框架+抗滑挡墙+排水平孔	约350万
	K64+960	古崩坡积层开挖失稳	边坡高度约20余m,滑坡体宽度约60m,长度约80m	滑坡刚产生变形,就采用预应力锚索框架原位锁定,并辅以排水平孔	约70万
福宁高速公路	八尺门互通滑坡	古滑坡体复活(松散堆积体)	沿线展宽约500m,纵长200~300m的古滑坡群	及时采用预应力锚索框架+预应力锚索抗滑桩+平孔排水	5000万
三福高速公路	梅列互通滑坡	一个古滑坡复活,一个破碎岩石高边坡滑坡	古滑坡体约5万m ³ ,边坡高约70m,滑坡体厚度约25~35m	预应力锚索抗滑桩+预应力锚杆地梁	250万 +1000万
	西芹桥头滑坡	古滑坡复活(泥岩及泥质粉砂岩)	边坡高度约60m,长度约300m	预应力锚索框架+抗滑挡墙	
				预应力锚索框架+预应力锚索抗滑桩+抗滑挡墙+平孔排水	约1100万

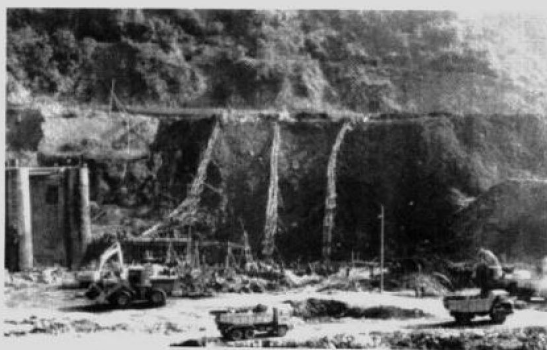


图 1.4 天生桥二级电站闸首滑坡

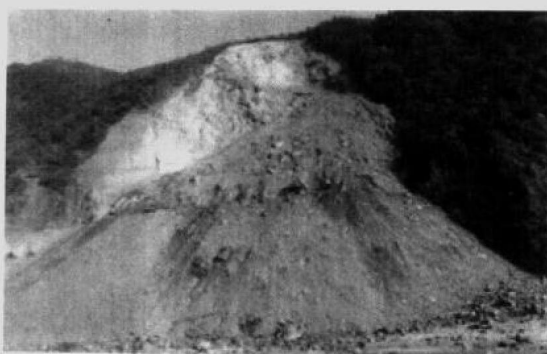


图 1.5 宝成铁路 K190 段滑坡

2. 填筑边坡

在饱和软粘土上修建堤坝，当施工速率较高时，经常会发生滑坡。图 1.6 为 2001 年长江大堤江西马湖段软弱地基上发生的一个滑坡。

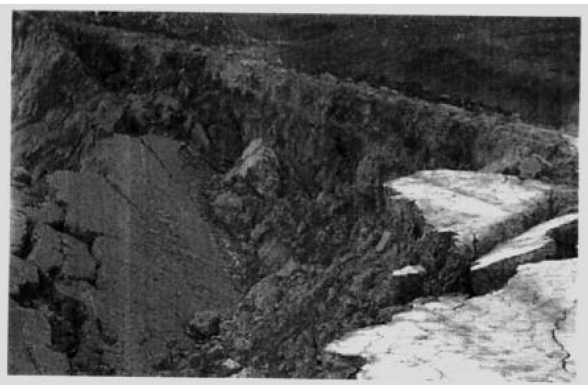


图 1.6 长江大堤江西马湖滑坡

饱和粘土通常压缩性很大，而渗透系数很小，填土增加的地基应力要完全转化为有效应力，必须将地基中的水充分挤出。如果施工速率过快，则孔隙水压力无法及时消散，导致有效应力有可能随荷载的增长而同步增长，因而诱发滑坡。为了保证在软基上修筑坝的稳定性，常需要采取一定的工程措施。例如通过砂井、塑料板排水或真空预压等技术加速水压力消散。

填筑土本身在施工速率较快时也会发生滑坡。这是由于填筑土的含水量通常已使粘土的饱和度超过 90%。进一步的填筑会使粘性土的孔隙水压力快速增长，导致堤坝施工期的滑坡。

1.2.3 地质环境边坡

将滑坡与工程地质环境直接有关的边坡称为地质环境边坡。分述如下。

1. 地震诱发的滑坡

地震是诱发滑坡的重要因素。在我国，有关地震引起的滑坡可以在 4000 年前的记载中找到。“竹书记年”记载公元前 1767 年在河南发生的一次地震：“桀十年，五星错行，夜星陨如雨，地震，伊洛竭”。自公元前 780 年到 1976 年，文献记载了 656 个大于 6 级的地震。公元前 780 年的一次文献记录了地震诱发的滑坡：“同幽王二年，泾、渭、洛三川皆震，川

竭，岐山崩。”1718年，甘肃通渭发生7.5级地震，40000人丧生。1920年11月16日海源地区8.5级地震触发了675个高原地区的滑坡，形成了40个天然湖，其中27个目前仍然存在。

1970年5月31日下午3时23分，距秘鲁海岸130m处发生7.7级地震，导致安第斯山脉中海拔6654m的Nevados Huascarán山体发生总量为0.5~1亿 m^3 的滑坡，山体向前推进16km，覆盖了22.5 km^2 的面积，掩埋了Ranrahirca和Yungay两个村庄，18000人丧生。

1911年发生于塔吉克斯坦境内的地震形成了一个库容达11亿 m^3 的Sarez湖(Palmieri, 2000; Schuster, 2002)。滑坡体积22亿 m^3 ，天然坝长2km，高600m。这一坝高远远超过了人类建造的土石坝的世界纪录(罗贡，330m，也在塔吉克斯坦)。图1.7示该大坝和Sarez湖。

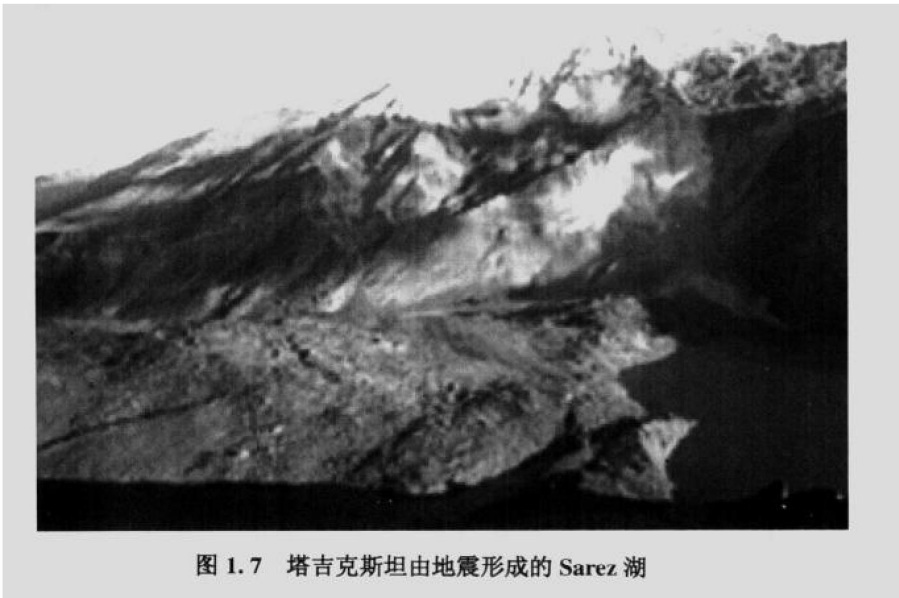


图 1.7 塔吉克斯坦由地震形成的 Sarez 湖

表 1.3 总结国内外由地震诱发的重大滑坡(Hansen, 1991)。同表 1.1 和表 1.2 一样，它也不是此类滑坡全面的总结。

1990年6月20日伊朗Caspian省发生7.3级地震。震中附近出现多处滑坡，其中Galdian滑坡总方量达 $20 \times 10^6 m^3$ ，坡面长达3km。滑坡后出现若干天然湖泊，说明地震和滑坡导致了水文地质情况发生了根本的改变。

图 1.8 示 1995 年 1 月 17 日发生在日本的阪神地震诱发的滑坡数目和与活断层的关系(Sassa, 1995)。

地震时发生的砂土液化是导致滑坡的主要原因。受 1976 年 7 月 28 日唐山地震波及，北京密云水库白河大坝上游坝坡发生滑坡。类似的实例还有发生在 1925 年 6 月 29 日美国 Sheffield 坝的滑坡。

2. 古滑坡体和堆积体边坡

古滑坡体和堆积体的复活是土质边坡中发生的又一种滑坡，它通常和人类活动有关。

表 1.3 国内外由地震诱发的重大滑坡灾害

日期(年)	国家, 地区	滑坡类型或伤亡原因	死亡人数
公元前1789	中国, 甘肃武都	岩石滑坡和泥石流	760
公元前372-73	希腊	整个城市冲向海洋	无记载
1348	澳大利亚	岩石滑坡	人员伤亡巨大
1718, 震级M=7.5	中国, 甘肃通渭	黄土滑坡	>40000
1783	意大利, Calabria	多数为液化导致的滑坡	整个村庄
1786, 震级M=7.5	中国, 四川康定-泸定	滑坡形成的天然坝溃决	死于洪水
1856	中国, 四川钱江	岩石滑坡	>1000
1870		岩石滑坡	>2000
1920	中国, 宁夏海源	黄土滑坡	>100000
1933, 震级M=7.5	中国, 四川叠溪	一个滑坡导致576人丧生, 6800人死于地震, 滑坡形成的天然坝溃决导致超过2429人死亡	
1935	中国, 四川惠利	岩石滑坡和泥石流	250
1931	秘鲁	岩石滑坡	>18000

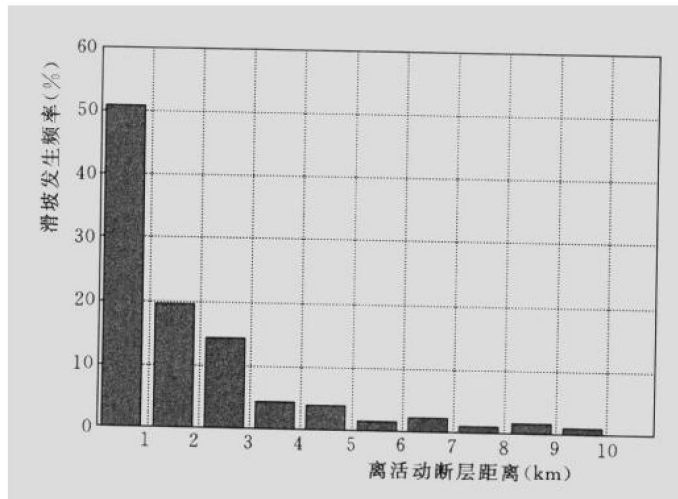


图 1.8 日本阪神地震滑坡数目和与活断层的关系

我国南方地区普遍发育坡崩堆积体, 此类物质是和漫长的地质历史中发生的山体不稳定活动有关。在堆积体和基岩之间多存在夹泥层, 许多卧于基岩面上的第四纪堆积物都可能是古滑坡体, 也可能是坡崩堆积体。无论何种类型, 这一第四纪物质形成的边坡多处于临界状态。降雨和工程活动都可能触发这些山体滑坡, 即使没有明显的外界触发因素, 也会发生渐进性破坏。

紫坪铺水利枢纽工程 2 号导流洞出口边坡在开挖过程中曾触发坡堆积体的滑坡, 在一个月内发生的几次滑坡不仅严重干扰了工程施工, 而且短期封闭了通往九沟寨国道。

水电建设中发生的另一堆积体滑坡的例子为位于云南省昭通地区大水沟水库工程。这一面板坝的溢洪道中部分布有 5~15m 厚的崩塌坡积物,其主要成分为粘质、粉质土砾。粒径变化较大,结构松散。崩塌坡积体与基岩交接面处分布有厚约 0.5~1m 的残积层,主要成分为泥质及岩屑,塑性较大,强度较低。在 2002 年 7 月 17 日开始,施工单位进行溢洪道边坡开挖的准备工作。此时适逢雨季,几乎每日均有雷阵雨。随后即在边坡上发现上部出现大面积裂缝,顶部有两条较大的裂缝,一条出现在高程 1210m 附近,另一条在 1230m 高程附近。裂缝宽度可达 10~15cm,呈弧形分布。裂缝产生区域在桩号 0-100m 至 0+020m,累积变形量分别为 108mm 和 113mm。

这两个工程实例还将在第 13 章中介绍。

在进行工程建设时,当怀疑某第四纪覆盖层是由坡崩堆积体构成时,则需要通过各种勘探手段(钻探,平硐,物探等)了解第四纪堆积体与基岩的接触面的几何形态,查明接触面的物质组成和抗剪强度指标,以正确评价开挖和降雨对这些潜在不稳定边坡的影响。

3. 特殊土边坡

由黄土、膨胀土等特殊土构成的边坡可能导致特殊的边坡稳定问题。第 1.2.1 节介绍的洒勒山、查纳滑坡的主要物质是黄土,但是,滑面则是半岩的粘土,为典型的超固结土,因而具有应变软化特性。

黄土高原地形地貌复杂,分为土塬、梁、峁三种地形,为地质作用的产物。黄土具有颗粒粗、土质结构疏松,孔隙率大,遇水崩解,湿陷等特点。在微结构方面,多呈垂直裂隙形态。黄土边坡经常受到河谷冲沟侵蚀、切割,临空条件远比其它边坡明显。遇降雨后,水很容易在垂直方向渗入边坡底部。而我国黄土通常下卧一层不透水的红层粘土,一旦渗流达到此层后即开始滞水,导致湿陷和浸润线大范围抬高,最终导致滑坡。

我国西北地区黄土高原是黄土边坡崩塌和滑坡的多发区。据陕西省滑坡办对 1985 至 1993 年间黄土崩塌、滑坡事件统计,省内总计有 62 处黄土崩塌、滑坡事故,造成伤亡者 32 处,共死亡 285 人(李坤,1998)。

在下一节,还将简要回顾黄土地区的泥石流灾害。

1.2.4 水环境边坡

水是诱发滑坡的主要因素。我们的祖先将“滑”字赋以水的偏旁足以说明这一点。由水环境触发的滑坡,大致可分为以下几种。

1. 暴雨触发的滑坡

暴雨是导致滑坡和泥石流的主要触发因素。

我国西南、西北是泥石流多发地区。1982 年 7 月四川万县地区普降暴雨,仅云阳县就发生滑坡 2 万多处,并形成数百处较大规模的裂缝。忠县在此期间形成滑坡及崩塌多达 3 万多处,其中大中型滑坡 30 余处。暴雨诱发的滑坡仅云阳县就毁坏房屋数万间,总方量超过 0.1 亿 m^3 的滑坡 10 余处。1981 年雨季宝成铁路宝鸡至广元段共发生滑坡 289 处,使该路段 37 个区间断道 32 次,中断行车两个月,抢建工程费达 2.56 亿元。

香港处于亚热带多雨丘陵地区,人口稠密,暴雨经常触发灾难性滑坡。1925 年 7 月 17