

滑坡演化的地质过程 分析及其应用

王延涛 孙光吉 刘亚川 编著



冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press

滑坡演化的地质过程 分析及其应用

王延涛 孙光吉 刘亚川 编著

北 京

冶 金 工 业 出 版 社

内 容 提 要

本书以秦峪滑坡群为例,介绍了该区的地质构造背景、滑坡形态和结构,对其进行了地质过程分析和数值模拟计算,预测了滑坡演化的趋势,并提出了公路选线的优化方案。

本书可供地质、水利、公路、铁路等相关科研院所和高等院校从事工程地质专业的技术人员及师生参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

滑坡演化的地质过程分析及其应用/王延涛,孙光吉,
刘亚川编著. —北京:冶金工业出版社,2013.8

ISBN 978-7-5024-6337-3

I. ①滑… II. ①王… ②孙… ③刘… III. ①滑坡—
地质灾害—研究 IV. ①P642.22

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013) 第 178689 号

出 版 人 谭学余

地 址 北京北河沿大街嵩祝院北巷 39 号, 邮编 100009

电 话 (010)64027926 电子信箱 yjcs@cnmip.com.cn

责任编辑 徐银河 美术编辑 杨 帆 版式设计 孙跃红

责任校对 郑 娟 责任印制 李玉山

ISBN 978-7-5024-6337-3

冶金工业出版社出版发行; 各地新华书店经销; 北京百善印刷厂印刷

2013 年 8 月第 1 版, 2013 年 8 月第 1 次印刷

148mm×210mm; 5.5 印张; 164 千字; 168 页

25.00 元

冶金工业出版社投稿电话: (010)64027932 投稿邮箱: tougao@cnmip.com.cn

冶金工业出版社发行部 电话: (010)64044283 传真: (010)64027893

冶金书店 地址: 北京东四西大街 46 号(100010) 电话: (010)65289081(兼传真)

(本书如有印装质量问题, 本社发行部负责退换)



前 言

国道 G212 是连接我国西北与西南地区的重要通道,滑坡泥石流成为该国道的最大威胁。对滑坡严重发育的秦峪滑坡群段进行的研究程度直接关系到秦峪滑坡群段兰海高速公路的选线及 G212 的改造。由于滑坡是一个系统,而演化是一个过程,研究滑坡的演化应从系统全过程动态演化着手。基于地球系统科学原理,立足于现场调研,结合各种测试手段和计算分析,对秦峪滑坡开展系统研究,从全过程及内部作用机理上掌握秦峪滑坡变形破坏的演变规律,才可以对滑坡稳定性现状及今后的发展趋势作出科学合理的评价和预测。

本书结合了作者在水利、公路及铁路行业从事工程地质选线、勘查和配合施工中的总结与思考,强调地质背景的认知决定着工程绕避不良地质的方案及对不良地质的工程措施,须改变在工程领域中普遍存在的“重工程、轻地质”的现象。本书是依托交通部西部交通科技项目“国道 212 公路(兰州-重庆)陇南段修建技术研究——滑坡运动机理及设计参数研究”的成果,在收集和整理相关资料的基础上,对区域地质环境开展区域性调查,通过比例尺工程地质测绘、工程地质勘查(钻探、坑槽探、地球物理勘探等)及室内试验研究,对秦峪滑坡群展开详细研究,基本查明了秦峪滑坡群各滑坡的发育规律及结构特征,并将其归

纳、编著成书的。

本书将宏观的地质背景分析和滑坡群地质过程分析结合，并应用到工程实践中，对水利跨流域引水、铁路公路山区选线等具有参考和借鉴价值。

由于作者水平所限，书中存在不足之处，敬请广大专家和读者批评指正。

作 者
2013 年 4 月

目 录

1 概述	1
1.1 滑坡的概念	1
1.2 滑坡机理	2
1.2.1 斜坡演化机理	2
1.2.2 滑坡演化机理	3
1.3 滑坡研究现状	5
1.3.1 国外滑坡研究	5
1.3.2 国内滑坡研究	6
1.4 公路选线研究现状	11
1.5 滑坡演化地质过程分析	12
1.5.1 滑坡演化地质过程分析的研究内容	14
1.5.2 滑坡演化地质过程分析思路	16
2 地质环境背景	18
2.1 大地构造背景	18
2.2 地层岩性	19
2.2.1 古-中生界浅变质碎屑岩—碳酸盐岩沉积岩地层	19
2.2.2 第四系各种成因的松散堆积地层	19
2.3 地质构造	24
2.3.1 主要的构造形迹及其特征	24
2.3.2 地质构造演化	28
2.3.3 古构造应力场时空演化分析	29
2.4 新构造运动与地形地貌	31
2.4.1 新构造运动	31
2.4.2 地形地貌	35

2.5 水文、气象、植被	35
2.5.1 流域特征	35
2.5.2 降雨	36
2.5.3 气候	36
2.5.4 植被	37
3 秦峪滑坡群概况	38
3.1 地质环境	39
3.1.1 地层岩性	39
3.1.2 地质构造	46
3.1.3 地形地貌	49
3.2 基本特征	51
3.2.1 大峪下滑坡	51
3.2.2 大峪上滑坡	52
3.2.3 秦峪滑坡	55
3.3 形成条件及影响因素	56
3.3.1 地层岩性	57
3.3.2 地质构造	58
3.3.3 外动力作用	59
3.3.4 其他外因	59
4 秦峪滑坡群形态及结构特征	61
4.1 秦峪滑坡	61
4.1.1 总体特征	61
4.1.2 分区与分级	61
4.1.3 物质组成与坡体结构	66
4.1.4 地貌特征	69
4.1.5 地下水	70
4.2 秦峪滑坡 C ₁ 区	70
4.2.1 物质组成和坡体结构	71
4.2.2 物理力学性质	75

4.2.3 微地貌特征	77
4.2.4 地下水与植被	83
5 滑坡地质过程分析	84
5.1 概述	84
5.2 河谷地貌演化	86
5.3 滑坡的演化过程	87
5.3.1 宗属与时序关系	87
5.3.2 第一阶段——A区的形成	89
5.3.3 第二阶段——B区的形成	93
5.3.4 第三阶段——古滑坡复活	97
5.3.5 第四阶段——滑坡的解体	103
5.4 滑坡演化过程的预测	110
6 C_1 区滑坡地质过程数值模拟	112
6.1 概述	112
6.2 形成机制的概念模型	113
6.3 计算模型的建立	116
6.3.1 地质结构模型	116
6.3.2 边界条件	118
6.3.3 物理力学参数	118
6.3.4 网格划分	118
6.4 数值模拟分析	118
6.4.1 有限元法 (FEM)	118
6.4.2 拉格朗日差分法 (FLAC)	127
6.4.3 小结	138
6.5 发展演化趋势分析	138
7 滑坡稳定性评价与演化趋势预测	140
7.1 秦峪滑坡的稳定性分析	140
7.1.1 工程地质分析	140

7.1.2	秦峪滑坡 C_1 区数值计算	144
7.1.3	秦峪滑坡 C_1 区极限平衡计算	145
7.1.4	稳定性分析小结	146
7.2	滑坡演化趋势预测	147
7.2.1	工程地质分析预测	147
7.2.2	地质过程分析预测	148
7.2.3	秦峪滑坡 C_1 区演化趋势预测	148
8	工程地质选线与方案优化	150
8.1	公路选线概况	150
8.1.1	公路选线步骤	150
8.1.2	公路选线原则	151
8.1.3	原则性的方案比选	152
8.2	滑坡段工程地质选线	153
8.3	秦峪滑坡群段选线方案与优化	155
8.3.1	滑坡体通过方案	155
8.3.2	右岸隧道绕避方案	156
8.3.3	其他方案	158
8.3.4	方案优化及建议	159
9	滑坡演化地质过程分析的总结和展望	161
9.1	秦峪滑坡地质过程分析总结	161
9.2	滑坡演化地质过程分析的展望	163
	参考文献	165

1 概 述

滑坡是山体变形中数量多、规模大、危害严重、性质比较复杂而又具有一定规律性的自然地质灾害。滑坡产生于特定的地质环境,是以重力为主的地质营力作用下或在人类工程活动影响下发生、发展的斜坡变形活动。滑坡产生后将在地表形成环状后壁、台阶、垄状前缘等特定的滑坡构造形迹和滑坡地貌。滑坡也是斜坡地貌演变的一种动力表现,它具有独特的地貌特征和发育演变过程,在不同的发育阶段又有不同的外貌和构造形迹。滑坡的发育过程受滑坡区的地层岩性和岩体格架的控制。

1.1 滑坡的概念

滑坡在国外文献中所指的含义是与国内不完全相同的。日本称为“地すべり”(地ヌベリ),苏联和东欧一些国家称为“Оползнь”,这些国家滑坡的含义基本上与我国的一致,即指斜坡上的土体(岩体)沿其下部的软弱面向下方滑动的现象。欧美用“Landslide”或“Slip”一词的国家,则是指除泥石流之外的所有斜坡变形现象,类似于我国经常使用的名词“塌方”。

滑坡是斜坡岩土体沿着贯通的剪切破坏面所发生的滑移地质现象。滑坡的机制是某一滑移面上剪应力超过了该面的抗剪强度所致。

滑坡作为最典型的地质灾害之一,其防治和保护是一个涉及学科范围广、影响因素复杂且具有高度不确定性的课题,要对滑坡发生的可能性作出合理的评价和科学的预测,并提出科学、经济、合理的处理措施,至今尚未得到很好的解决。尽管,人类自有工程活动以来就从未放弃对滑坡问题的研究和探索,对滑坡地质灾害的研究,走过了从封闭到半开放、再到开放,从确定性到随机性、再到混沌性,从线性到非线性的历程。先后将传统静力学、近代岩体力学、现代数理力学及非线性科学理论引入应用,对灾害发生机制、

评价预测及其发生的可能性进行了有效的控制与治理。但必须承认的事实是,滑坡地质灾害的评价、预测没有得到根本解决,仍面临着极高的地质灾害风险。

1.2 滑坡机理

滑坡机理是滑坡预测预报和防治的理论基础,国内外学者从不同学科出发做过不少研究,特别是地质学家、土力学家和滑坡防治专家提出过许多假说和见解,对滑坡形成的条件和作用因素、滑坡的受力状态、滑带土的强度变化规律、滑坡的破坏模式及发育阶段等与滑坡机理有关的问题进行了多方面较深入的研究。因此,滑坡机理的研究一直都受到高度重视。

1.2.1 斜坡演化机理

滑坡是斜坡变形破坏的一种形式,而且是在一定因素作用下且具有一定地质条件的斜坡变形破坏才形成滑坡。如1978年,D. J. Varnes根据斜坡岩土体的运动类型,将斜坡变形破坏分为崩塌、倾倒、滑坡、侧向扩展、流动及其复合类型。

滑坡是斜坡演化过程中的一个阶段,所以对其形成以前的斜坡变形研究显得较为重要。自1979年谷德振提出“岩体工程地质力学”以来,在斜坡变形机理方面,非常注重岩体结构和时间效应及其对边坡演化机理的作用。如1981年张倬元等提出斜坡岩体稳定性的工程地质分析原理并提出斜坡变形破坏的5种模式(蠕滑-拉裂、滑移-压致拉裂、滑移-弯曲、弯曲-拉裂、塑流-拉裂);1981年刘汉超等对我国著名的龙羊峡水库斜坡和滑坡进行了研究,并首次提出了滑坡床面的累进性破坏与贯通的机理。1982年罗国煜等提出斜坡“优势面”概念;1983年孙玉科等根据研究,提出我国岩质斜坡变形破坏的主要地质模型,即金川模型、盐池模型、葛洲坝模型、白灰厂模型、塘岩光模型;1984年孙广忠在谷德振研究的基础上,提出岩体结构控制论。1993年刘广润、徐开祥根据斜坡变形动力成因,提出了天然动力与人为动力条件下的斜坡变形破坏机制。中国科学院工程地质力学开放实验室和成都理工大学等在对五强溪、李家峡、

金川镍矿、三峡的高边坡研究中,在山体岩体质量评价、三维结构数学模型及其数值分析和岩体断裂力学方面取得了进展。

1.2.2 滑坡演化机理

1.2.2.1 滑坡运动的内在物理本质

1950年,K. Terzaghi 作为滑坡机理研究的开拓者,从土力学方面,根据滑带土孔隙水压力的变化来揭示滑坡的机理,同时也注意到地质条件的控制作用。此后众多学者纷纷从不同角度研究了滑坡滑动的内在机理,如1952年 A. W. Skempton 提出了黏性土的残余强度理论;1963年 L. Bjerrum 等研究提出了土的渐进破坏过程;1972年 E. П. Емельянова 从地质学理论出发对滑坡机理进行了研究;1992年 Ter-Stepanian 研究提出了土体的蠕变过程和滑坡发生的关系;1983年卢肇钧研究提出了影响土的抗剪强度的各种因素及抗剪强度的变化规律;1977~1986年湛壮丽等较系统地研究了黏性滑带土的抗剪强度变化规律及残余强度的测试方法和仪器设备;1994年储同庆等将矿物包裹体研究方法引入工程地质,并较好地解决了几个重要工程的稳定性评价问题。2000年晏同珍等分析了滑坡平面的受力状态,依据滑坡主要作用因素,提出了流变倾覆、应力释放平移、震动崩落及震动液化平推、潜蚀陷落、地化悬浮-下陷、高势能飞越、孔隙水压力浮动、切蚀-加载、巨型高速远程等9种滑动机理。

1.2.2.2 高速滑坡与滑坡动力学

许多学者对高速滑坡的形成机理提出了假说。1989年王思敬专门研究了大型高速滑坡的全过程能量分析,取得了进展;1991~1997年,徐峻龄等提出了高速滑坡的“闸门效应”,并把碰撞理论用于滑速滑程的估算;1997年彭建兵等对黄河积石峡高速滑坡提出了3种成因机制,即“闸门效应”引起的启程剧动、高位能效应引起行程、高速空气动力效应与气垫效应引起的高速飞行;2003年胡厚田等提出大型高速远程滑坡具有规模大、速度快、滑程远、能量大、破坏力强、运动形式多样(滑动、飞行、流动等)的明显的流体化特点。

1993年胡广韬在总结滑坡静力学的基础上,提出滑坡动力学机

理是对具有一定本构的斜坡体,在其所处的特定应力场或力系之中而表现有内在和外在的机械力,两者相互有机地联系并制约。着重研究了滑体在形成演化全过程中的发育、滑移、解体、运行、停滞与消亡的过程。

1.2.2.3 滑坡的运动过程

不同的研究者从不同的角度出发将滑坡的发育过程分成不同的阶段,如1971年日本学者渡正亮比照地貌发育过程把滑坡分为青年期、壮年期、老年期;1968年斋藤迪孝研究了黏性土的蠕变破坏规律,划分出减速蠕变、等速蠕变和加速蠕变3个阶段,并以此为理论基础,应用滑坡位移监测资料,成功地预报了日本饭山线高场山隧道滑坡的大滑动时间。

2001年,徐邦栋将滑坡细分为蠕动阶段、挤压阶段、匀速滑动阶段、加速滑动阶段、固结压密阶段、消亡阶段。2004年王恭先等将滑坡分为局部失稳的蠕动挤压阶段、整体失稳的缓慢滑动阶段、加速滑动与剧滑破坏阶段和滑后暂时稳定(或永久稳定)阶段。1996年马永潮提出滑坡变形可划分为蠕动、挤压、微动、滑动、大滑动和滑带固结6个阶段。

综上所述,目前虽然在滑坡机理方面做了许多研究和探索,但由于滑坡的种类多、结构复杂、作用因素各异,对滑坡机理较全面系统的研究还不多。综观前人对滑坡机理的研究,早期的滑坡研究是仅以土体为研究对象,其方法的显著特点是采用材料力学和简单的均质弹性、弹塑性理论为基础的半经验半理论性质。并把此方法用于岩质滑坡体的稳定性研究,但由于对其力学机理认识的粗浅或假设的不合理,其计算结果与实际情况差别较大。该方法往往将斜坡变形破坏和滑坡的发展演化作为两种不同运动机制,虽然在一些滑坡机理研究中,也提到斜坡的变形,但较为简单,未能完全揭示从斜坡到滑坡的形成直至消亡的全过程。

总之,对滑坡机理的研究,应该具有全过程系统演化的观点,将斜坡的演化和滑坡的演化作为一个全系统,运用系统工程地质分析方法^[1-8]研究其产生、发展的全过程。

1.3 滑坡研究现状

1.3.1 国外滑坡研究

第二次世界大战以前,各国对滑坡的研究是零星和片断的。在经济发达的资本主义国家一般由私人进行,只有瑞典和挪威由国立土工研究所进行;期间也发表过一些著作和论文,但对滑坡的研究意义不大,而且这些工作均是以长期观测为基础进行的,致使在第三届国际土力学与基础工程会议(1953年,瑞士)上,关于滑坡的报告均是如此。如美国曾分别对两处滑坡分别观测22年和23年;瑞士对一个隧道滑坡观测50年,对某湖岸滑坡观测了55年。除苏联于1934年和1946年召开过两次全国性滑坡会议外,期间也没有召开过专门的国际滑坡会议。对滑坡稳定性研究,欧美国家多从土力学和土质学观点出发,研究滑坡地层的土力学性质、稳定性计算方法和理论,以揭示滑坡的机理而提出防治措施;苏联则多偏重地质基础的研究,强调滑坡的成因、分类、性质,同时,也研究稳定性计算方法和防治措施。目前,虽有采用综合研究方法的趋势,即综合应用工程地质、水文地质、土力学、土质学、地质力学和岩石力学等学科的基本理论和方法研究滑坡,但各国仍有侧重。日本则对滑坡地震勘探、测试技术和预报方面的研究发展迅速,且有成效。

二战后,随着世界经济的发展,使采矿、水利、交通和建筑等工程得到大规模建设,而由此形成的大坝坝肩和水库库岸、铁路和公路的路堑斜坡规模之大,条件之复杂均是空前的。特别是1959年法国Malpasset大坝左坝肩岩体的崩溃及1963年意大利Vajont大坝上游左岸的库岸滑坡等事故,使人们清醒地认识到了对滑坡体破坏的力学机理研究的不足,从而推动滑坡体稳定性研究向前迈进了一大步。1950年,美国学者K. Terzaghi发表了《滑坡机理》,系统地阐述了滑坡产生的原因、过程、稳定性评价方法和在某些工程中的表现等。1952年,澳大利亚-新西兰区域性土力学会议上,所有报告几乎全与滑坡有关(主要研究滑坡土的强度特性)。1954年9月,在瑞典斯德哥尔摩召开的全欧第一届土力学会议,主题就是土坡稳定

性问题,会上有 23 篇论文介绍了挪威、瑞典、英国等国家的滑坡。1958 年,美国公路局滑坡委员会编写了《滑坡与工程实践》(Land-slides and Engineering Practice),是世界上第一部全面阐述滑坡防治的专著,随后在 1978 年又出版了《滑坡分析与防治》。1960 年,日本的高野秀夫发表了《滑坡与防治》。1964 年 3 月,日本正式成立滑坡学会,出版季刊《滑坡》,后又成立滑坡对策协议会,出版季刊《滑坡技术》,这是目前世界上唯一的两种关于滑坡的专门刊物。1964 年,苏联又召开全国滑坡会议,出版了论文集,介绍了苏联高加索、黑海沿岸、克里米亚半岛和西伯利亚等地的滑坡。1977 年 9 月,滑坡及其他块体运动委员会与捷克国际工程地质协会在布拉格联合筹备举办了“滑坡及其他块体运动讨论会”,这是世界上第一次举行这样大型的关于滑坡的国际性学术会议,我国曾派地质学家代表团参加了这次会议^[1,9]。1977 年,加拿大矿物与能源中心(CANMET)编写了《斜坡工程手册》(Pit Slope Manual),从理论和实践两方面系统地对斜坡工程进行了论述。1986 年,在国际地质大会期间,成立了国际工程地质协会(IAEG),同时成立了滑坡及其他块体运动委员会,它是世界上第一个专门研究滑坡及其防治的国际组织。

在此期间,以弹塑性理论为基础和改进的极限平衡法应用为主的多种稳定性计算方法应运而生。特别是 1967 年人们第一次尝试用有限元研究岸坡的稳定性问题,给定量评价滑坡体的稳定性创造条件,并使其逐步过渡到数值方法,从而使滑坡体稳定性研究进入模式机制,并使作用过程研究成为可能;同时,随着大量规模巨大工程的开展,决策要求的提高,以概率论为基础的可靠度方法已引入滑坡稳定性研究中。

1.3.2 国内滑坡研究

滑坡作为斜(边)坡演化失稳的一类地质灾害,在生产实践中经常发生,为了保证生产顺利进行,推动了滑坡或斜坡的研究工作。从 20 世纪 50 年代初期开始,在大量滑坡工程实践的基础上,我国对滑(边)坡岩体进行了比较系统、广泛的研究,取得了一定的进

展。回顾我国滑（边）坡研究工作的发展状况，大致经历了以下几个阶段（见表 1-1）：

(1) 20 世纪 50 年代到 60 年代中期。20 世纪 50 年代初期，滑坡或斜坡失稳虽然屡有发生，但总体上，大型滑坡并不太多。新中国成立后兴建了一系列露天矿山，开挖深度浅，边坡稳定性问题及其对生产和安全的影响并不太突出。此时，我国滑坡研究工作尚处于建立队伍阶段。1951 年，在西北铁路干线工程局成立“坍方流泥”小组，1956 年成立坍方研究站，1959 年成立坍方科学技术研究所（西北研究所滑坡研究室的前身）。此阶段主要采用定性描述的“地质历史分析”方法，研究重点侧重于滑坡历史资料的分析及滑坡形态分类，探讨不同类型滑坡的稳定性分析方法及相应的变形破坏机制，其稳定性分析多借助于土力学理论，很少考虑岩体的结构特性及岩体的地质结构面。

表 1-1 崩滑地质灾害研究历程

时期	工程实践	主导学术思想	理论基础及基本观点	分析技术	典型高边坡工程及灾害滑坡事件
1950	工程规模较小	地质历史分析方法	刚性体介质 + 结构面控制	解析分析方法为主	—
↓	西南、西北地区水电工程建设，三线铁路建设，露天矿的开发揭示了一系列具有典型时效过程的大型滑坡	地质过程机制分析方法 + 工程地质力学分析方法	工程地质学 + 弹塑性力学 + 流变学概念（可变形性、结构控制非连续、流变介质）		瓦依昂滑坡（1963） 龚嘴电站边坡 大渡河李子坪滑坡 雅砻江霸王山滑坡 雅砻江金龙山滑坡 乌江黄崖边坡变形 金川露天矿边坡
↓	三峡工程库区库岸稳定性评价、黄河上游一系列大型水电工程（龙羊峡、拉西瓦、李家峡等）坝区库区高边坡稳定性评价，大型灾害性滑坡	地质过程机制分析-定量评价	工程地质学 + 岩石力学 + 现代数理统计 + 数值模拟理论（以确定性的分析方法为主）	数值 + 物理模拟	盐池河岩崩（1980. 6. 3） 鸡扒子滑坡（1982. 7. 17） 撒勒山滑坡（1983. 3. 7） 新滩滑坡（1985. 6. 12） 中阳村滑坡（1988. 1. 10） 溪口滑坡（1989. 7. 10） 漫湾坝肩滑坡（1989. 1. 8） 龙羊峡近坝库岸高边坡 拉西瓦坝区高边坡 李家峡库坝区高边坡

续表 1-1

时期	工程实践	主导学术思想	理论基础及基本观点	分析技术	典型高边坡工程及灾害滑坡事件
1990	三峡、金沙江向家坝、溪洛渡、雅砻江锦屏、官地、澜沧江小湾、白龙江苗家坝等大型水电工程高边坡, 攀枝花等灾害性滑坡	系统工程 地质学 + 工程地质系统集成法	现代工程地质学 + 系统科学 (强调系统性、强调过程的模拟再现)	过程模拟	向家坝水电站高边坡 锦屏水电站高边坡 小湾水电站高边坡 李家峡水电站高边坡 天生桥二级水电站高边坡 攀枝花露天矿高边坡 链子崖危岩体治理 黄蜡石滑坡治理 鸡冠岭滑坡 (1994. 4. 30) 甘肃黄茨滑坡 (1995. 3) 黄土坡滑坡 (1995. 6. 10)
↓					
1995 至今	三峡工程船闸高边坡及库区移民迁建, 西南地区大型水电站及山区高等级公路、铁路修建等	系统工程 地质学 + 工程地质系统集成法 + 基于变形理论的设计	系统工程地质学 (含非线性科学) 变形过程控制理论 (强调相互作用及系统的非线性过程演化及过程控制)	过程模拟与过程控制	三峡船闸高边坡 溪洛渡工程 岩口滑坡 (1996. 7. 18) 白土坎滑坡 宝塔滑坡

资料来源: 黄润秋, 中国岩石高边坡工程及其研究, 2005。

(2) 20 世纪 60 年代中期到 70 年代。20 世纪 60 年代中期, 伴随西南、西北地区水电开发、铁路建设及金川、抚顺等大型露天矿山开采, 边坡工程实践得到发展, 一些边坡复杂变形破坏现象引起了工程地质学家的注意^[9]。这些边坡都难以用静力学的观点去认识, 尤其是滑动面的形成过程, 同时, 这种复杂变形破坏现象从某种程度上蕴涵了变形破坏机理及其演化过程, 这是认识复杂高边坡稳定性并预测其未来变化的重要基础与前提, 岩石力学的发展为解决这个问题提供了理论的源泉。尤其是意大利 Vajont 滑坡的发生, 使工程地质学家认识到岩体的可变形性、变形的时效性和岩体结构对这种变形乃至最终破坏可能起到的控制作用, 从而开启了对崩滑地质