

# 地壳浅表圈层与人类工程

王兰生 等著

地质出版社

· 北 京 ·

## 内 容 简 介

本书汇集了地壳浅表生改造和时效变形的基本理论和研究方法,包括了地质改造过程的建模与模拟、地面地质灾害(滑坡、泥石流)评价预测与防治、工程边坡稳定性及控制、地下工程围岩稳定性及地质灾害预测预报,以及环境地质评价等方面的研究成果,较为全面地介绍了地壳浅表圈层改造以及人类工程活动中的各类地质问题的评价、预测及其防治理论、方法和实例,涉及学科领域较广,具有重要的应用意义和较高的学术价值。

本书可供从事地质工程、岩土工程、防灾减灾工程与防护工程、环境地质、环境科学与工程等工作的工程技术、高校或研究单位的有关人员阅读和参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

地壳浅表圈层与人类工程/王兰生等著.—北京:地质出版社,2004.11

ISBN 7-116-04248-2

.地... .王... .地壳构造—研究  
.P313.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2004)第111921号

## DIQIAO QIANBIAO QUANCENG YU RENLEI GONG CHENG

---

责任编辑:屠涌泉 孙亚芸

责任校对:任 丽

出版发行:地质出版社

社址邮编:北京海淀区学院路31号,100083

电 话:(010)82324508(邮购部);(010)82324573(编辑室)

网 址:<http://www.gph.com.cn>

电子邮箱:[zbs@gph.com.cn](mailto:zbs@gph.com.cn)

传 真:(010)82310759

印 刷:北京长宁印刷有限公司

开 本:787mm×1092mm<sup>1</sup>/<sub>16</sub>

印 张:26.75

字 数:650千字

印 数:1—600册

版 次:2004年11月北京第一版·第一次印刷

定 价:68.00元

ISBN 7-116-04248-2/P·2523

---

(凡购买地质出版社的图书,如有缺页、倒页、脱页者,本社出版处负责调换)

# 前 言

王兰生教授是我国地质工程学界著名的专家、优秀的教育家。他 1934 年 11 月出生于浙江杭州，1957 年毕业于北京地质学院水文地质工程地质系并留校任教，1959 年调至成都地质学院（现成都理工大学）工作至今。其中，1981~1984 年赴意大利世界著名的“结构模型试验研究所”（ISMES）进行高级访问进修与合作科研，1987 年晋升为教授，1992 年由国务院学位委员会增列为博士生导师。曾先后担任成都地质学院工程地质教研室主任、水文工程地质系主任以及国际工程地质协会（IAEG）中国国家小组副秘书长等职。现为国际工程地质与环境协会（IAEG）成员、中国地质灾害研究会名誉理事、中国地质灾害研究会崩塌滑坡专业委员会副主任。

王兰生教授是成都理工大学工程地质学科的奠基人，也是成都理工大学“地质工程”国家重点学科的学术带头人之一。在数十年的教学与科研工作中，他为人师表、严于律己、脚踏实地、治学严谨、勇于探索、成果累累，不仅传道授业有方，桃李满天下，为我国工程地质事业培养了一大批高层次人才，而且将教学与科研相结合、理论与实践相结合，通过对国家重大工程建设过程中实际问题的解决和应用性基础研究，在岩体稳定性、地质灾害防治以及地质环境保护等领域取得了突出成就，为推动我国工程地质学科的发展做出了卓越的贡献。

王兰生教授长期从事岩体稳定、地质灾害和地质环境方面的研究工作。早在 20 世纪 60 年代初，他就参加和负责了中国科学院组织的南水北调西线工程地质考察、大渡河龚嘴电站选坝、宝成铁路病害等工程的工程地质调研工作。70 年代负责承担了 10 多项四川省中小型水利工程的工程地质病害调研，领队参加了雅砻江二滩水电站选坝及初设阶段的勘察调研工作。80 年代中期回国后，结合国家重大工程建设和地质灾害防治工作，先后负责了原地矿部科技攻关项目“西南西北崩滑灾害山区斜坡稳定问题研究”、国家“七五”攻关项目“长江三峡水库库岸稳定性前期论证”、“长江三峡工程库岸稳定性”、“长江三峡库区重大地质灾害机制及防治对策”、“黄河龙羊峡水电站近坝库岸稳定性预测预报研究”、中国科学院地质研究所开放基金项目“浅生时效变形结构及其工程地质意义”等课题的研究工作，以及大渡河铜街子电站坝基、二滩电站坝肩稳定问题的地质力学模拟研究。90 年代主持了西安地裂缝与地面沉降的量化模拟研究、西安地面沉降与城市环境、山区城市地质环境演化与评价等国家自然科学基金项目和国家“八五”攻关项目，负责了雅砻江官地电站“枢纽区及库区斜坡稳定性”与“坝区岩体结构模型及其物理力学参数”、岷江天龙湖水电站“叠溪较场滑坡稳定性及其对工程建设的影响评价”等课题的研究，负责和承担了国家重点工程川藏公路二郎山隧道“高地应力与围岩稳定问题研究”、“西引道公路滑坡及地质灾害整治工程的监测、勘察与设计”以及 108 国道凉山高速公路“高边坡防护工程勘察与设计”。新世纪以来，随着我国西部大开发的不断深入，王兰生教授将他的工作重点转移到了与重大工程建设密切相关的工程高边坡稳定和深埋隧道围岩稳定问题方面，主持和参与了黄河拉西瓦水电站、雅砻江锦屏水电站、金沙江溪洛渡水电站、大渡

河瀑布沟水电站等工程高边坡稳定性的研究，以及邵阳 怀化高速公路雪峰山隧道、国道 317 线鹧鸪山隧道等工程的岩爆大变形防治、超前地质预报和围岩稳定性研究。近期又承担了“四川岷江叠溪古堰塞湖与环境”的自然科学基金研究项目。

在长期的教学、科研和生产实践中，王兰生教授和张倬元教授、孔德坊教授、王士天教授等老一辈工程地质学家共同创立了具有成都理工大学特色并得到国内外同行专家广泛称赞的“地质过程机制分析-定量评价”学术思想体系。这一学术思想是成都理工大学“地质工程”国家级重点学科的学术灵魂和理论精髓，它影响了一代又一代的莘莘学子，在我国工程地质学界享有极高的盛誉。在这一学术思想体系下，王兰生教授针对具体的工程地质问题，建立了系统的研究思路和技术方法体系，取得了众多具有创新性的研究成果。具体体现在他参编的《工程地质分析原理》、《中国工程地质学》、《中国工程地质世纪成就》，以及编著的“长江三峡工程库岸稳定性”、“浅生时效构造与人类工程”、“边坡地质工程问题的理论与实践”等多部专著和在国内外发表的系列论文中。由于在科学研究方面的突出成就，他多次获得省部级科技成果奖励，包括省部级科技成果一等奖 1 项、二等奖 2 项、三等奖 6 项。在对与人类工程活动密切相关的地壳表层岩体结构的研究方面，经过他长期的实践和探索以及其同事、研究生们的共同努力，创造性地提出和建立了“浅表生时效构造”的理论体系，系统地阐明了地壳表层岩体遭受浅表生改造的过程、力学机制和模式以及浅表生时效构造的工程地质意义。这一理论体系为许多重大工程地质问题的分析和解决指明了方向，提供了理论基础，并在多个重大工程的实践中得到了应用，解决了诸如大渡河铜街子电站的坝基稳定和水库诱发地震问题、西安地裂缝和黄河大柳树坝址松动岩体的成因问题以及雅砻江官地水电站、锦屏水电站和金沙江溪洛渡水电站等工程的斜坡稳定问题。浅表生时效构造理论已经得到国内外学者和工程师们广泛的认同，我国工程地质学界将其称之为“20 世纪中国工程地质的三大理论”之一，并纳入《中国工程地质世纪成就》专著中。在斜坡稳定性和崩滑地质灾害防治领域，王兰生教授以他敏锐的观察能力和敏捷的思维能力，在复杂的斜坡变形破坏现象中，抽象和总结出了斜坡变形破坏的力学机制模式，建立了斜坡变形破坏的分类系统和评价预测系统。斜坡变形力学机制模式为斜坡变形阶段的判定、稳定性评价和发展趋势预测提供了重要的理论支撑，已经得到了广泛的应用和赞誉。针对斜坡变形的机制模式，他提出了一些相应的稳定性定量评价方法，如滑移-弯曲变形、平推式滑坡和旋转滑移-拉裂的启动准则等。应用灰色系统理论，首次提出了斜坡失稳和滑坡预报的灰色理论预报法，开辟了滑坡非线性理论预报的先河。在隧道与地下工程研究领域，王兰生教授重点对与高地应力有关的岩爆和大变形问题进行了系统研究。他运用工程地质和岩石力学理论，建立了新的岩爆和大变形力学机制模型；综合岩爆的各种表征，并与岩石变形破坏发展阶段进行对照，确定出岩爆分级的量化判据，提出了岩爆烈度分级的 RMS 方案，并制定了一套不同烈度岩爆的系统防治措施；建立了基于岩爆基本规律和现场测试的岩爆超前预报系统。同时，在地下工程围岩二次应力和围岩变形测试中，提出了改进型（W 型）门塞式应力恢复测试法，研制了一种简易的量测围岩不同深度变形的围岩变形监测系统（TMS），为岩爆预测和围岩稳定性分析提供了新的测试技术。这些成果应用于二郎山隧道、雪峰山隧道、锦屏级电站引水隧道工程中，取得了良好效果，赢得了建设单位、勘察与设计及施工部门的高度评价。在地质环境评价领域，王兰生教授也颇有建树和成就。通过对我国典型山区城市重庆和盆地城市西安

地质环境的研究，建立了地质环境链及链效应的系统分析思路，提出了西安地裂缝成因的“重力扩展机制”和重庆山城地质环境的“二次污染机制”，阐明了西安地面沉降与地裂缝的量化关系以及重庆山城地质环境的演化趋势，并在国内较早将地理信息系统应用于城市地质环境评价中。在新技术和新方法的引进以及学科的交叉与渗透方面，王兰生教授思维极其活跃。80年代中期回国后，他吸取国外的先进经验，带领同事和研究生建立了具有我国特色的工程地质学科地质力学模拟实验室。经过多年的努力，形成了一套较为完善的地质力学模型试验建模思路、加载技术和量测技术，并在斜坡变形破坏全过程物理模拟、坝肩和坝基岩体稳定性分析以及断裂构造活动性评价等领域取得了重要的研究进展。在他的带领下，成都理工大学在地质力学模拟技术方面一直处于国内领先地位。此外，他和同事们在国内最早研制出点荷载仪、便携式剪切仪，并获得了国家专利；将甚低频电磁仪、测氦技术引入滑坡调查中；将激光散斑测量技术引入地质力学模拟中……

王兰生教授十分注重将科学研究与学科建设和高层次人才培养紧密结合。80年代末期，在他担任成都理工大学水文地质工程地质系主任期间，与全系教师共同努力创建了“工程地质”国家重点学科和“地质灾害防治与地质环境保护”国家级专业实验室，为推动成都理工大学的学科发展做出了重要贡献，为成都理工大学“工程地质”学科的持续发展和壮大搭建了良好的平台。他和张倬元教授等老一辈工程地质学家一起，团结奋斗，辛勤耕耘，培养和造就了成都理工大学工程地质学科一批优秀的中青年学术带头人和朝气蓬勃、团结向上的学术梯队。在高层次人才培养过程中，他严格要求、悉心指导、鼓励创新、精益求精，要求研究生深入现场，十分强调地质原型调研在科学研究中的重要性。他以自身渊博的知识、敏捷的思维、实事求是的态度、对事业执着的追求以及永不言败的精神，影响着一批又一批的研究生。在他培养的研究生中，有的已成为高校的教授、博士生导师，继续为国家培养高层次人才，推动学科发展与进步；有的在勘测、设计部门担当技术重任，为国家的建设服务；有的从事产业开发，推动先进技术的应用。由于在教学领域的突出贡献，他两次获得国家级优秀教学成果二等奖和省部级优秀教学成果一等奖。

王兰生教授十分重视国际学术交流，曾主持过中日滑坡对比研究（1987~1988），组织了长江三峡水库岸坡稳定问题和日本滑坡的中日专家联合考察；先后在意大利都灵大学（1983）、美国麻省理工学院（1984）、日本新筈大学（1988）、香港地质学会（1988）、香港理工大学（1993）、美国阿拉巴马大学（1998）进行过讲学和学术交流；2000年赴台湾东华大学参加两岸学术交流会议；2003年赴美国旧金山、拉斯维加斯大学参会和进行学术交流。

在王兰生教授从事地质工作50年之际，作为他的学生们，回顾老师的谆谆教诲和他在事业上取得的杰出成就，一种感恩和崇敬之情油然而生。我们这些有幸得到老师指导和培养的学生，由衷地向恩师说一声：谢谢！衷心祝福他身体健康、幸福平安！纵有千言万语也难以表达师生情谊，只有努力、努力、再努力！用事业上的不断进步报答老师的辛勤培养。为了更好地继承和发扬先生的师风师德，让更多的人系统了解先生的学术思想和成就，我们从老师发表的多部专著和100余篇学术论文中，选择部分代表性成果分专题汇编成《地壳浅表圈层与人类工程》一书，供地质工程、岩土工程和其他相关学科的科技人员参考和借鉴。

李天斌等全体弟子敬贺

2004年9月30日

# 目 录

## 前 言

地壳的浅表生改造与时效变形论.....	王兰生 (1)
---------------------	---------

## 地壳浅表生改造与人类工程

块状火成岩体岩心“裂成饼状”现象和某些表生结构面的形成机制 .....	王兰生 张倬元 (43)
水库地震预测的构造应力场演变史分析.....	王兰生 黎克武 许述礼等 (64)
卸荷应力状态下玄武岩变形破坏特征的试验研究.....	李天斌 王兰生 (75)
江陵凹陷底辟构造形成演化的岩体力学研究.....	王跃飞 王兰生 (81)
The Mechanism of Land Subsidence in Xian .....	Zhao Qihua Wang Lansheng (91)
官地水电站坝区岩体的浅表生结构 .....	沈军辉, 王兰生, 赵其华等 (100)
Epigenetic Structure and the Division of Slope Rockmass Deformation-breakage Phase .....	Shen Junhui Wang Lansheng (109)
溪洛渡水电站坝区岩体的浅表生改造 .....	沈军辉 王兰生 李天斌等 (116)

## 地质过程的建模分析与模拟

地质力学模型试验中的某些模拟技术问题 .....	王兰生 沈 泰 (125)
Geomechanical Simulation of Rockmass Deformation Failure on a High Dip Slope .....	Xu Jin Chen Mingdong Wang Lansheng (134)
铜街子电站坝基地质结构的地质力学模拟研究 .....	王兰生 徐 进 梁虹等 (142)
Ways and Methods for the Physical Simulation of Landslides .....	Li T.B Xu J Wang L.S. (151)
Triaxial-dimensional Geomechanical Model Test for the Study on Failure Types and Fracture System in Rock Mass .....	Wang Lansheng Rossi Pier Paolo Confalonieri Giuseppe etc. (160)
构造重力扩展机制的地质力学模拟研究 .....	赵其华 王兰生 (163)
The Geomechanical Modeling of a Type of Epigenetic Time-dependent Structures .....	Li Tianbin Wang Lansheng Xu Jin (170)
工程地质物理模拟 .....	王兰生 (179)

地面地质灾害评价预测与防治

斜坡岩体变形破坏的基本地质力学模式 ..... 王兰生 张倬元 (193)

1981年暴雨期四川盆地区岩质滑坡的发育特征 ..... 王兰生 李曰国 詹铮 (204)

二郎山榛子林滑坡形成演化机制及整治对策 ..... 沈军辉 王兰生 赵其华等 (214)

四川省西昌大桥沟泥石流及其工程危害性评价 ..... 沈军辉 王兰生 赵其华等 (222)

川西泥石流的发育分布、形成演化及防治对策 ..... 赵其华 王兰生 沈军辉等 (228)

和平沟滑坡风险性评价 ..... 赵其华 彭社琴 孙钧 (236)

Some Kinematic Features of Landslide ..... Dong Xiaobi Wang Lansheng (243)

Time Prediction of Landslides Using Verhulst Inverse-function Model  
..... Li Tianbin Chen Mingdong Wang Lansheng etc. (252)

工程边坡稳定性及控制

边坡地质工程学导论 ..... 赵其华 王兰生 沈军辉 (263)

边坡工程的爆破效应分析 ..... 亚南 赵其华 王兰生等 (270)

地连墙变形的神经网络多步预测研究 ..... 赵其华 孙钧 徐伟 (277)

土钉墙设计计算与优化问题分析 ..... 赵其华 彭社琴 寇举安 (284)

108国道泸沽段花岗岩高边坡稳定性评价及整治措施  
..... 沈军辉 李天斌 王兰生等 (291)

溪洛渡水电站拱肩槽高边坡稳定性的三维有限元分析 ... 王卫 李天斌 王兰生 (299)

The Design of Anti-slide Pile and the Interaction Analysis Between Anti-slide Pile and  
Slip Mass ..... Wang Wei Li Tianbin Wang Lansheng (306)

岩质工程高边坡稳定性及其控制研究的思路与途径 ..... 李天斌 王兰生 (317)

柔性防护技术的历史与进展 ..... 周迎庆 (321)

地下工程围岩稳定性及灾害预测

高地应力区域公路隧道围岩稳定性及施工地质监测预报系统  
..... 王兰生 李永林 徐林生等 (347)

二郎山公路隧道岩爆及岩爆烈度分级 ..... 王兰生 李天斌 徐进等 (351)

深埋长大公路隧道高地应力岩爆和岩溶涌突水问题及对策 ..... 姜云 王兰生 (357)

隧道围岩稳定性信息化监测、预测与决策系统 ..... 李天斌 王兰生 李永林等 (364)

## 环境地质评价

城市发展中的地质环境演化与控制 .....	王兰生	孔德坊	赵其华等	(373)
山区城市地面岩体演化特征 .....	姜云	王兰生		(389)
西安地面沉降与地裂缝关系的量化分析 .....	赵其华	王兰生		(395)
西安市反倾向地裂缝成因分析 .....	赵其华	王兰生		(403)

## 其他

王兰生教授论著目录一览.....				(411)
王兰生教授指导研究生一览.....				(419)

# 地壳的浅表生改造与时效变形论

## ON THE EPIGENETIC ACTION OF THE EARTH CRUST AND TIME-DEPENDENT DEFORMATION

王兰生

(成都理工大学)

### 1 概 述

地壳的浅表圈层 (epigenetic sphere of earth crust) 是人类与岩石圈相互作用最密切的圈层。各种类型的地质灾害, 地质环境的变动与演化, 人类工程活动的实施与运行, 均发生在浅表圈层之中。实际上岩石圈与大气圈、水圈和生物圈 (包括人类工程活动的智能圈) 的相互作用也主要发生在地壳的浅表圈层中。工程地质要研究与人类工程活动有关的地质问题, 其中一项十分重要的基础工作就是地壳浅表圈层结构特征的研究。地壳的岩石圈是由一定的建造所构成的, 因而它首先具有不同建造所特有的原生结构; 经历过构造改造后, 它又具有了一定的构造结构特征; 而处在地壳浅表圈层部位的岩体, 在地貌形成演化过程中, 又经历了进一步的改造, 这种改造过程与地貌形成演化过程相联系, 就整体而言是一个卸荷过程, 可将这一改造过程称之为浅表生改造。人类工程活动实践证明, 岩体的浅表生改造及其所造成的特殊结构和构造, 与地壳浅表圈层的演化和人类工程活动之间有着十分密切的关系, 对它的研究, 将有助于我们对地壳浅表圈层的地质灾害及地质环境的演化和工程实践中的实际问题做出更符合实际的评价和预测。

我国地处欧亚大陆东南部, 西部受印度板块北向的推挤, 东部位于西太平洋岛弧弧后拉张带, 台湾东海岸处在欧亚板块与菲律宾板块的接触带。挽近期以来, 新构造运动在西部喜马拉雅山和东部台湾中央山脉表现为强烈隆升, 褶皱成山系, 造成强烈隆起的山系与大面积裂陷下沉的盆地相间的地貌景观; 而位于西太平洋岛弧弧后的中国东部地区则以拉伸裂陷盆地的形成为主要表现形式。我国大地构造格架和地貌轮廓还具有由西向东明显分带的特征, 形成一个以青藏高原向东逐级下降的阶梯状的三级阶梯地貌。我国所处的这一特定的地球动力学环境, 决定了我国地壳浅表圈层具有两个鲜明对照的特征区: 西部强烈隆升的山系, 尤其是以青藏高原为中心及其周边的第一、二阶梯带, 自上新世以来, 隆升高度已超过 4000 m, 目前仍以每年毫米级速度隆升。这一带 (台湾中央山脉为东部隆升山系) 不仅是地震活跃带, 由于山系形成时间相对较年轻, 并且仍在继续隆升, 因而山系正处在遭受浅表生改造的活跃带, 山体变形破裂的进展性发展, 导致崩塌、滑坡、泥石流等地面地质灾害的发生, 是这一地区资源开发、工程建设以及生态环境保护中面临的主要

地质问题：东部的拉伸裂陷盆地，这些盆地可有上千米的盖层，裂陷盆地的周边往往有活动的断裂存在，有的延伸至盆内，成为地震发震的部位。盆地的地面沉降和地裂缝，是这一地区资源开发、工程建设尤其是城市建设工程以及生态环境保护中面临的重大地质问题。

基于我国地壳浅表圈层的上述特征，自 20 世纪 50 年代以来，随着我国水电、交通、城市建设事业的迅速发展，我国工程地质工作者不仅在解决许多复杂的地质问题的实践中积累了丰富的经验，也为认识我国地壳浅表圈层的结构、构造的基本特征提供了非常可贵的资料，为建立具有我国特色的关于地壳浅表圈层结构构造模式和理论奠定了基础。地壳浅表圈层现今的表部，由于岩体卸荷回弹和在自身重力场条件及外界影响因素的作用下而发生的变形破坏，称之为表生改造 (surficial action)，其所形成的变形破裂称为表生结构 (surficial structure)；与此相对照的，在地貌挽近期的改造和演化过程中，地壳浅表圈层中因区域性卸荷引起岩 (土) 体应力场的变化和应变能的释放而形成变形破裂过程，可称之为浅生改造 (near surface action)，其所形成的变形破裂体系称为浅生结构 (near surface structure)。表生改造实际上是对接近地面表部的早期的浅生结构构造的再改造，两者往往以不同的方式组合、包容、整合在一起，统而言之，称之为浅表生改造 (epigenetic action)。由于它们在形成和演化过程中，往往以不同方式随地质、地貌的演化进程而变化，具有一定的时效特征，因而将这类组成地壳浅表圈层的结构构造称之为浅表生时效结构 (或构造) (epigenetic time-dependent structure or tectonics)。

本文简要地介绍了地壳浅表生改造的基本理论和典型模式及其应用。这一理论和应用实践起始于 20 世纪 70 年代。1979 年和 1981 年，作者先后提出了“岩体的表生改造和表生结构的形成以及力学机制模式”和“斜坡岩土体的变形破坏形成演化力学机制模式”，对斜坡岩土体在斜坡形成过程中的变形破裂机制和斜坡在自重应力场条件下的演化机制做了系统分析研究，建立了可供工程实践应用的力学机制模式。90 年代初期又根据大量生产实践中发现的新的地质现象，提出了“浅生时效构造”的基本理论和“浅生时效构造形成演化机制模式”。

这一套理论方法的形成与发展，是成都理工大学 (原成都地质学院) 工程地质研究所的老师和同事们 40 多年来共同努力的成果，也凝聚了许多地质、水电、交通、城建等勘测设计研究单位工程地质工作者的实践经验和丰富的资料，它已被广泛应用于实践，并在实践中受到进一步检验。

## 2 地壳的表生改造和表生结构面的形成演化力学机制模式

地壳的表生改造和与它相联系的表生结构面，系指在地壳现有的表面形态和主要在自身重力场条件下形成的结构面。包括岩体表部与卸荷回弹有关的结构面；斜坡岩土体的变形破坏过程中形成的结构面和斜坡破坏后形成的特殊结构面。

---

王兰生、张倬元，块状火成岩体中岩心“裂成饼状”现象和某些机构面的形成机制，见：第一届工程地质大会论文，1979，苏州。

王兰生、张倬元，斜坡岩体变形破坏的基本模式，见：第一届工程地质大会论文，1979，苏州。

## 2.1 岩体表部与卸荷回弹有关的表生结构面的力学机制模式

### 2.1.1 建模的理论和实际依据

有关山坡岸边裂隙，20世纪50年代统称为“岸边剪切裂隙”（波波夫，1950），以后随着我国水电工程事业的发展，获得了大量山体内部裂隙发育分布的资料，认识到用“剪切裂隙”描述岸坡表部的裂隙是不够确切的，统称其为卸荷（风化）裂隙（1974）。20世纪70年代中期，国外岩石力学学者对岩石在卸荷状态下的变形破裂开展了较系统的研究（Lajita, 1977; Matheson, Zinchinsky, 1978），工程实践也要求对岸边裂隙的成因机制有进一步的分析和认识，以便能更确切地查明和评价预测它们的空间分布规律和力学性能。1979年，作者在我国第一届工程地质大会上提出了岩体与卸荷回弹有关的表生结构面的基本类型与力学机制模式。模式的提出，建立在以下几点认识基础之上。

#### 2.1.1.1 斜坡形成过程中，岩体内部地应力场的变化

20世纪70年代，岩体地应力场的现场测试和数值模拟研究得到了长足的发展，对斜坡内部应力场的分布规律有了较为深入的了解（科茨，1970; Müller, 1970; Stacey, 1970, 1973）。斯特西（Stacey, 1970, 1973）采用有限元分析法，对斜坡内部应力场做了量化评价，论证了内部应力场与坡型、坡高和坡陡的关系。根据这些研究成果，可将成坡过程斜坡内部应力场的变化规律概括为以下几个方面：

（1）应力场发生重分布，斜坡周围主应力迹线发生明显偏转。无论是在重力场条件下，还是在有残余构造应力叠加的情况下，其总的特征是愈靠近临空面，最大主应力迹线愈接近平行于临空面，最小主应力则与之近于正交；

（2）应力场出现分异，形成应力集中带，在坡脚一带形成应力增高带，是最大主应力和最大剪应力的集中带，在顶缘一带形成拉应力集中带；

（3）主应力迹线发生偏转，最大剪应力迹线，由成坡前的直线型转化为凹面朝向临空面方向的圆弧型；

（4）临空面附近由于径向应力实际近于零，实际处于两向或单向应力状态（不考虑斜坡走向方向的力 $\sigma_2$ 时），向内逐渐转变为三向（考虑 $\sigma_2$ 时）。

#### 2.1.1.2 斜坡形成过程中，岩体内部应变能的释放与变化

国外的岩石力学学者拉吉太等（Lajita, 1977）从理论上研究了岩石在卸荷过程中的变形破裂，提出了在卸荷回弹过程中，由于材料性能的差异、作用应力史的差异，可在岩体中形成一个被约束的拉应力体系，一旦被释放，则造成破裂。Matheson, Zinchinsky等（1978）提出了河谷宽谷区和峡谷区卸荷变形破裂的组合模式。实际上，从20世纪60年代开始，我国工程实践就已经陆续发现和积累了许多岸坡卸荷裂隙的新的现象。如大渡河龚嘴电站勘探中发现的沿花岗岩缓倾角裂隙因差异回弹形成的剪裂面（原水电部成勘院勘探资料，1965）；四川三台县鲁班水库坝肩勘探资料（1974）；雅砻江二滩电站的岩心裂饼现象（成勘院勘探资料，1978）；长江葛洲坝机窝开挖观测资料（长江流域规划办公室，1978）等。我国工程实践的丰富资料表明，（斜坡）岩体在卸荷回弹过程中，由于差异回弹，既可形成残余拉应力约束体系，也可以形成残余的剪应力约束体系。两者一旦释放，可在岩体中形成拉张破裂和剪切破裂。

### 2.1.2 卸荷回弹表生结构面的基本类型与力学机制模式

卸荷将引起临空面附近岩体内部应力应变场的重分布，这一过程可以造成局部应力集中效应，并且还可因为差异回弹而在岩体中形成一个被约束的残余应力体系。岩体在卸荷过程中的变形与破裂正是由于应力应变场的这两方面的变化所引起的，因而就卸荷带的变形破裂机制而言，卸荷变形破裂可分为“应力分异破裂面”和“差异回弹破裂面”两大类型（图 1）。这些卸荷破裂面大多沿着或追踪岩体中原有的原生和构造结构面生成，也有部分可形成新的裂缝。

类型		图 示
应力分异破裂面	拉裂面	
	压致拉裂面	
	剪裂面	
差异回弹破裂面	拉裂面	
	剪裂面	

图 1 岩体中卸荷回弹表生结构面形成机制分类图

(1 ~ 11 解释见文中)

#### 2.1.2.1 应力分异破裂面

应力分异所造成的变形破裂与岩体在拉应力、压应力和剪应力条件下的变形破裂是相

当的。按应力分异后的受力状况和破裂机制可分为拉裂面（图 1 中 1、2），压致拉裂面（图 1 中 3~6）和剪裂面（图 1 中 7）等三类。

#### 2.1.2.2 差异回弹破裂面

差异回弹破裂面也可按破裂机制分为拉裂面和剪裂面（图 1 中 8~11）。其中拉裂面是大体平行临空面的离面卸荷拉裂破裂面（图 1 中 8），它与应力分异型的压致拉裂面（图 1 中 3、4）往往是相互联系或共生的；差异回弹剪裂面可有多种表现形式，如平缓层状体斜坡中沿平缓软弱结构面产生的差异回弹剪裂面（图 1 中 9、10）、陡倾坡内层状体斜坡差异回弹造成的剪裂面（图 1 中 11）等。一些典型实例证明，波及影响深度可达到数十米至上百米，如大渡河龚嘴电站花岗岩岸坡中沿缓倾角裂隙产生深达 50 余米的平缓剪切面，剪切面上可见糜棱岩（王兰生、张倬元，1965，1979）；又如长江葛洲坝机窝开挖过程中直接观测到因差异回弹沿软弱结构面的水平错动（1978）。

斜坡岩土体中因卸荷回弹形成的上述表生结构面，在重力场条件下可继续发生变形与破坏，成为斜坡演化进程中具有重要控制作用的结构面。

### 2.2 表部岩土体变形破坏的地质力学模式

岩土体在不同应力状态下，其最终破坏不外乎剪切破坏和拉断破坏这样两种基本方式。但是，不同岩性和结构特征的岩土体，在不同的应力状态下，其变形破坏过程则是多种多样的，并且过程中时间效应和空隙水压力所起的作用也各不相同。根据岩土体变形破坏全过程模拟试验，结合大量地质观察资料，可以从岩土体变形破坏过程中划分出若干基本的变形破裂单元，并用这些单元的特定组合表征岩土体的变形破裂机制和演进特征，建立岩土体变形破坏的地质力学模式。基本的单元可划分为拉裂、蠕滑（滑移）、弯曲和塑流四种。

(1) 拉裂（fracturing），为拉断破坏，包括以拉应力为主造成的拉裂（tensile cracking）和以压应力为主造成的压致拉裂（compression cracking），其力学特征表现为弹性介质模型。

(2) 蠕滑（creep sliding）为剪切变形破坏，包括沿某潜在剪切面的剪切蠕变（creep shearing）、沿原有结构面的滑移（sliding）和介于两者之间的蠕变 - 滑移，即蠕滑。这类变形破裂单元具流变特征，一般属黏弹—黏塑性介质模型。

(3) 弯曲（bending）系指弯曲变形，按受力方式可分为横弯曲和纵弯曲；按支持约束方式，可分为简支梁、外伸梁和悬臂梁弯曲等。其流变特征一般属黏弹—黏塑性介质模型。

(4) 塑流（plastic flowing）系指岩土体中软弱层（带）的压缩和向临空或减压方向的塑性流动，包括岩土体中原有软弱层的塑性流动，也包括岩土体变形破坏发展中的压碎带或塑性破坏带的塑性流动，其流变特征属黏弹—塑性介质模型。

这四个变形破裂单元中，后三者具有明显的时间效应，它们决定了岩土体变形破坏演进过程中的时间效应特征。拉裂的产生往往具有突发性，常是岩土体演进过程发生突变的标志，也是引发水动力条件（如空隙水压力）跃变的重要因素。

不同荷载条件下，岩土体的变形破坏过程往往表现为一对互为因果的变形破裂单元对其进程起主导作用，它们相互联系、相互制约，反映了演化进程中的力学机制。据此，将

岩土体的变形破坏按其进程起控制作用的一对变形破裂单元划分为若干基本的地质力学模式，如蠕滑（滑移）-拉裂、滑移-压致拉裂、弯曲-拉裂、塑流-拉裂和滑移-弯曲等（图 2）。

岩体变形基本组合形式	典型图式
滑移—拉裂	
滑移—压致拉裂	
弯曲—拉裂	
塑流—拉裂	
滑移—弯曲	

图 2 表部岩土体变形破坏地质力学基本模式

## 2.3 斜坡岩土体变形破裂结构及变形破坏机制模式

### 2.3.1 斜坡稳定性与斜坡的变形与破坏

斜坡稳定问题的近代研究与发展，突出注意了以下两方面的结合，即斜坡的形成演化机制分析与定量评价预测相结合；工程地质分析与斜坡工程相结合。前者通过揭示斜坡演化的内部机制，采用力学分析和一些理论研究方法，对斜坡的形成过程、现状和发展趋势及其环境效应作出动态分析和量化评价与预测；后者从认识步入改造，在系统总结已有的治理经验基础上，开发更有效的整治和综合治理的优化方案。这两方面的结合构成了斜坡稳定性工程地质分析研究系统的格架。国内外研究者在这方面已做出了许多有成效的努力。

按斜坡形成演化过程可划分为斜坡变形（包括卸荷回弹和蠕变）和斜坡破坏（贯通面形成，发生滑坡、崩塌等）以及斜坡破坏后继续运动（包括转化为碎屑流、泥石流等）三个阶段（王兰生、张倬元，1981，1994）。

### 2.3.2 斜坡破坏的基本类型

根据我国工程实践，参照国际（IAEG, D. Varnes, 1978; D. M. Cruden, 1989）标准，拟定了斜坡破坏基本类型分类方案（图3）。分类中将崩落（崩塌）（falling）、滑落（滑坡）（sliding）和

(侧向)扩离(lateral spreading)作为破坏方式,也是斜坡失稳(slope instability)的基本方式,它们既是破坏的产物,也是破坏的过程和运动方式。


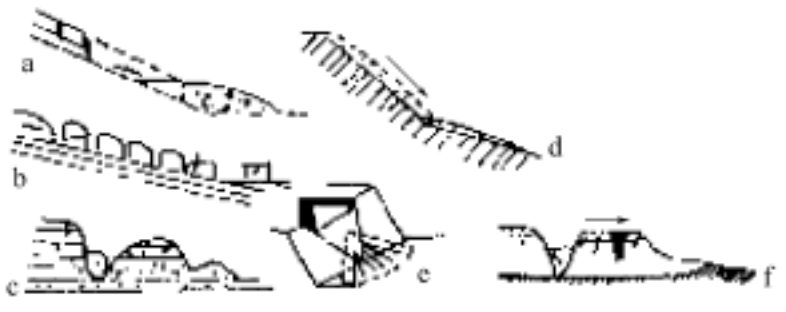
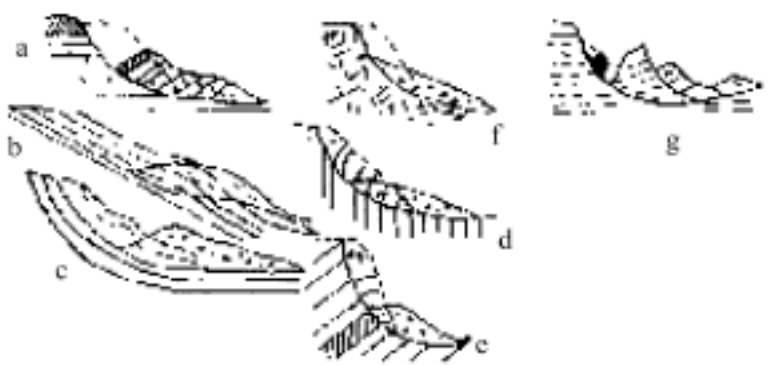

物质组成		岩质→土质	继续运动中可能转化的运动方式
破坏类型			
崩塌(坍塌) I			碎屑流
滑落(滑坡) II	平滑面型 II <sub>1</sub>		碎屑流或泥流(土爬)
	弧形滑面型(旋转) II <sub>2</sub>		碎屑流或泥流(土爬)
(侧向)扩离 III			

图3 斜坡破坏(失稳)基本类型分类图表

(图中 a—g 代表分类)

### 2.3.3 斜坡破坏后的继续运动(滑坡运动学)

#### 2.3.3.1 滑落体运动速度

##### 2.3.3.1.1 运动速度等级划分方案

斜坡破坏后的继续运动,按滑坡运动速度,国外有不同的等级划分方案(Varnes, 1978; IAEG, 1984等)。为了使速度等级划分方案不仅便于工程人员记忆和掌握,也便于百姓使用,将等级划分为慢速、中速、快速和高速四个档次。慢速档次靠仪器测试分辨;中速档次可凭人的感觉分辨;快速档次进入人可直接观察到的阶段,分为每秒1mm、每秒1cm、每秒1m三个二级级次;高速档次以人跑步速度(每秒5m)为起点,以汽车一般速度(每秒10m)和转化为碎屑流的临界速度(每秒25m)作为二级级次划分依据。该分类方案(王兰生、董孝璧,1990)也注意了与IAEG滑坡委员会的分类方案进行整合。

### 2.3.3.1.2 滑坡运动速度的特征参数估算法

滑速的预测和计算有多种方法，具代表性的有能量法、谢德格尔法（Scheidegger, 1978）和内尔法（Korner, 1976）等。这些计算方法在很大程度上取决于计算参数（如滑面的  $f$ 、 $c$  值等）选定的代表性，因此计算结果有很大的不确定性。研究证明，已发生过的滑坡残体中，保存着表征自身运动特征的参数，据此可建立推断滑坡最大滑速（ $V_{max}$ ）的公式（王兰生、董孝璧，1990）。

$$V_{max} = \sqrt{2gH^* \cdot [1 - \operatorname{tg} \alpha_d^* / \operatorname{tg} (\frac{\alpha^*}{2} + \frac{\alpha_d^*}{2})]} \quad (1)$$

以洒勒山滑坡为例（1983年3月7日，图4），剖面图显示滑坡体可分为后侧块状滑体（图4中①）和前缘侧碎屑流（图4中②）两个部分。根据块状滑体，可获得以下三个重要参数： $H^*$ ——滑坡后缘（断壁）落差； $\alpha^*$ ——滑坡发生前潜在滑面的等效（平均）坡度，以滑前坡顶破裂缘（滑坡冠）与滑体启动时剪出口（滑坡足（foot））连线（图4中③）的坡度来代表； $\alpha_d^*$ ——滑面综合动摩擦角，以块体滑坡残体下伏滑面的平均坡度表示，相当于滑坡的头（head）与滑面交点与滑坡趾（toe）的连线的坡度。按（1）式计算求得洒勒山滑坡的  $V_{max} = 30 \text{ m/s}$ 。用类似的方法计算长江三峡新滩滑坡、鸡扒子滑坡等滑速，得到了与实际观测相近的结果。

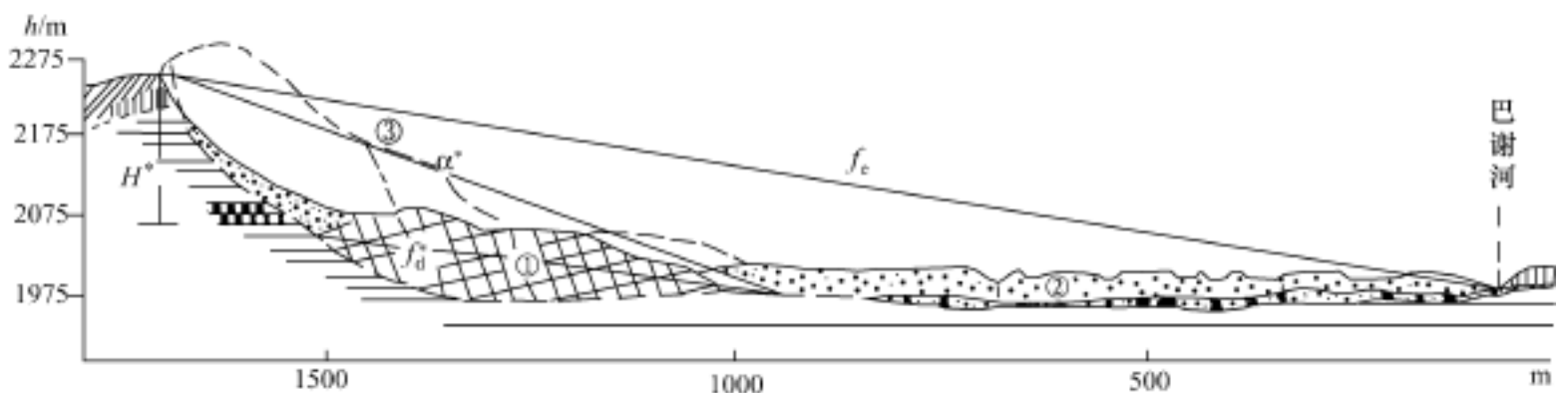


图4 甘肃洒勒山滑坡剖面图

运动特征参数计算公式属于一种反推计算法，但它至少有以下一些值得注意的功能：  
采用剖面恢复法，可推算出已发生的滑坡曾达到的最大滑速，可作为分析判定滑坡残体稳定状况的依据；  
可作为预测类似斜坡一旦失稳可能达到的最大滑速及最大滑程的类比依据，这在库岸稳定性及岸坡再造工程地质分析中有重要意义；  
在滑坡调研中，根据滑动面所确定的综合动摩擦角（ $\alpha_d^*$ ），相当于滑动面的“原位”扭擦试验参数，在斜坡和滑坡稳定性评价中是一个十分有价值的参考数据。

### 2.3.3.2 滑坡运动状态的“流体”化

在一定条件下，滑坡或崩塌体可在继续运动过程中转化为“流体”运动状态，主要表现为碎屑流、泥流（或土爬）和浊流（水下）等。碎屑流（debris flows 或 flowslide）或土爬（mudflow 或 earthflow）系指由滑坡体或崩塌体自身转化而成的流体。前者是一种高

有的建议称为流滑（flowslide, W. Colin Ruse, 1984）。

速散体状流体；后者则是一种速度不太大的塑性黏滞流。泥石流（洪）流（debris floods）应属一种洪流，它总是与暴雨或山洪相联系，是在有足够的外部水流（或降雨）参与下形成的一种高密度的“流体”。我国西南、香港、台湾暴雨滑坡发生期间，有不少这样的实例。浊流（turbidity current）系指水下的高密度流或异重流，见于水下滑坡。滑入水中的滑坡或崩塌体，也可部分转化为浊流。1982年长江鸡扒子滑体即有部分转为浊流，随江水向下游方向展布，成为阻塞航道的组成部分。

### 2.3.3.2.1 碎屑流的基本类型

碎屑流主要发生在山区高陡岩质或土质斜坡中。按其形成条件和平面形态（图5），可分为山前平地型（ ）和沟谷型（ ）两类。前者如洒勒山、查纳等滑坡；后者如瑞士著名的埃耳姆（Elm）崩塌-碎屑流（1881），华釜山溪口滑坡-碎屑流（1989）和西藏易贡滑塌-碎屑流（2000）等。

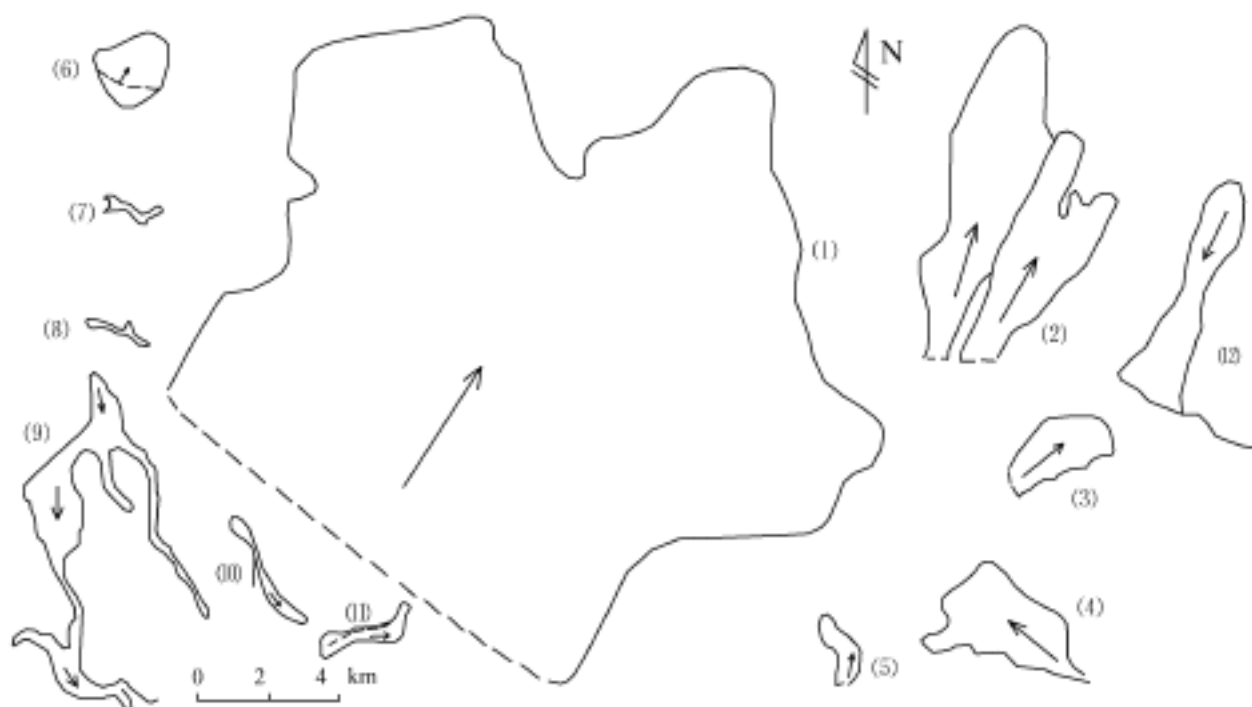


图5 国内外典型碎屑流平面形态示意图

- (1) Saidmarrch (伊朗, 史前, 体积为  $20\text{km}^3$ ); (2) Blackhawk and Sliver Reef (美国, 史前, 体积分别为  $0.28\text{km}^3$  和  $0.23\text{km}^3$ ); (3) Frank (加拿大, 体积为  $0.037\text{km}^3$ ); (4) Sherman (美国, 阿拉斯加, 1964年, 体积为  $0.03\text{km}^3$ ); (5) 查纳 (黄河上游, 1943年, 体积为  $0.2\text{km}^3$ ); (6) Elm (瑞士, 1881年, 体积为  $0.01\text{km}^3$ ); (7) 鸡公嘴 (四川华釜山, 1970年); (8) 溪口 (华釜山, 1989年, 体积为  $0.0002\text{km}^3$ ); (9) 日本, 御丘山 (1984年); (10) 禄劝 (云南, 1965年); (11) 昭通 (云南, 1991年, 体积为  $0.02\text{km}^3$ ); (12) 易贡 (西藏, 2000年, 体积为  $0.03\text{km}^3$ ) 其中, (1) ~ (5) 为 型; (6) ~ (12) 为 型

### 2.3.3.2.2 碎屑流的形成机制

碎屑流总是作高速运动，因而国内外一些研究者往往将滑坡的高速机制与碎屑流的形成机制联系在一起。实际上块状滑体在一定条件下也可作整体超高速滑动。碎屑流则是一种“流体”，因而碎屑流的形成包括了滑体或崩塌体的碎屑化和流态化两个过程。

高速滑动机制目前有多种解释，如气垫（air cushion）效应（Shreve, 1966, 1968），汽化空隙气压力效应（Catembert and Cvitinne, 1964），液化效应等。许靖华（1975）根

国内外文献中，也有将泥石流称为 debris flow。