

国家自然科学基金项目资助(50678182)
重庆市重点自然科学基金项目资助(2005BA7008)

危岩防治原理

陈洪凯 唐红梅 叶四桥 祝辉 著

地震出版社

国家自然科学基金项目资助(50678182)

重庆市重点自然科学基金项目资助(2005BA7008)

危岩防治原理

陈洪凯 唐红梅 叶四桥 祝 辉 著

地 震 出 版 社

图书在版编目 (CIP) 数据

危岩防治原理/陈洪凯著. —北京:地震出版社, 2006. 12
ISBN 7-5028-3047-2

I. 危… II. 陈… III. 三峡—危岩—防治 IV. TU457

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 132833 号

地震版 XT200600217

危岩防治原理

陈洪凯 唐红梅 叶四桥 祝 辉 著

责任编辑: 李小明

责任校对: 庞娅萍

出版发行: 地震出版社

北京民族学院南路 9 号

邮编: 100081

发行部: 68423031 68467993

传真: 88421706

门市部: 68467991

传真: 68467991

总编室: 68462709 68423029

传真: 68467972

E-mail: seis@ht.rol.cn.net

经销: 全国各地新华书店

印刷: 北京地大彩印厂

版 (印) 次: 2006 年 12 月第 1 版 2006 年 12 月第 1 次印刷

开本: 787 × 1092 1/16

字数: 304 千字

印张: 12

印数: 0001 ~ 1000

书号: ISBN 7-5028-3047-2/P · 1304 (3630)

定价: 40.00 元

版权所有 翻印必究

(图书出现印装问题, 本社负责调换)

内 容 提 要

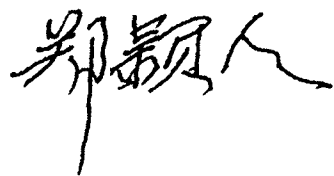
基于多年对三峡库区危岩研究及防治工程实践,本书系统地构建了危岩防治工程理论及技术体系,紧密结合相关技术规范,理论研究、技术开发与工程实践相结合,详细论述了危岩分类方案及智能识别系统,建立了危岩荷载计算方法及荷载组合模式,基于极限平衡理论系统地建立了不同类型危岩的稳定性计算方法,基于运动学和动力学原理系统地建立了危岩失稳以后的运动路径及冲击力计算方法,系统开发、总结了危岩防治技术体系,把防治技术分为主动防治技术、被动防护技术和主动-被动联合防治技术三大类,据此系统建立了危岩支撑计算方法、锚固计算方法、支撑-锚固联合计算方法、拦石墙计算方法和拦石网计算方法,全面分析构建了危岩防治工程设计、施工及监测方法,给出了大量工程实例。本专著高度重视研究成果的工程实用性。

本书对于从事地质灾害及岩土工程研究、勘察、设计、施工、监测以及道路工程、市政工程、边坡工程、环境保护、土木工程健康研究的科技人员具有重要参考指导价值。本书可作为从事地质工程、地质灾害、环境保护、公路及铁路工程、水利水电工程、城镇建设等方向教学、科研及工程技术人员的参考用书。

序

我国是一个多山之国家，也是世界上地质灾害严重的国家之一。危岩作为一种地质灾害，严重威胁着我国山区的居民、交通干线和市政建设。随着我国经济建设与基础设施建设的蓬勃发展，尤其是西部大开发战略的实施，危岩灾害防治愈来愈受到政府与各界人民的密切关注，开展危岩机理与防治技术的研究更为紧迫。本书作者陈洪凯先生及其团队，结合三峡库区地灾防治工程实际，率先在国内开展危岩机理及其防治技术的理论与实践研究，重点进行了危岩分类、稳定性分析与防治技术方面的系统研究，基本建立了危岩机理及其防治技术的理论技术体系，并结合三峡库区地灾防治工程实施了多项工程实践，取得了圆满成功和良好的经济效益。作者还承担了重庆市地方标准《地质灾害防治工程设计规范》（DB50/5029—2004）中“危岩防治工程”部分的编撰任务，研究成果被该规范吸收与应用。因而本专著充分反映了该领域科技研究的深度与广度及其广泛的工程实用性，是一部开拓性的著作。

本人作为地质灾害防治工程的一位研究人员，也作为作者的一位挚友，深感本专著的出版为该领域开放出一枝鲜艳的花朵，可庆可贺，特此为序。



注：郑颖人教授为中国人民解放军后勤工程学院教授、博士生导师、中国工程院院士。

前 言

我国幅员辽阔、地貌差异显著、地质环境复杂、灾害性气候及气候条件频繁，尤其在山地、丘陵地区，危岩、滑坡、泥石流等灾害性地表动力过程发育，制约着区域内社会经济的可持续发展。在这些地质灾害类型中，“危岩”是最薄弱的研究环节。不完全的统计资料表明，三峡库区仅重庆境内直接威胁居民区、交通干线和市政设施的危岩有 4000 余处共计 50000 多个危岩单体，威胁着 80 多万人的生命安全和数百亿元的财产安全！如位于三峡库区重庆市万州区的太白岩存在 120 余个危岩体，天生城存在 217 个，单个危岩体的体积可及 5500 m^3 ，直接威胁着万州主城区 3 万多人生命安全和沙龙路、诗仙路、太白公园、沙龙公园等城镇设施财产安全。随着西部大开发的快速推进、三峡水库等库区移民的实施以及相关工程建设、高等级公路、铁路及新城镇建设发展，陡高边坡及人工切坡日益涌现，有效防治危岩灾害极为迫切！然而，迄今，国内外缺乏针对性强、易于操作的相关技术规范作支撑，以至于“危岩防治”目前仍然处于定性、半定量的粗放型阶段，危岩防治工程建设中存在 80% 以上的设计变更！因此，全面实施危岩防治研究，构建必要的理论方法和技术体系，具有紧迫性、实用性！

2001 年，三峡库区二期地质灾害防治工程全面启动，本专著作者之一陈洪凯教授承担了三峡库区多个危岩防治工程可行性方案研究及工程设计，期间感受到了危岩防治工作的极大难度，尤其发现了危岩研究与防治领域尚存在多个学术和技术盲点，于是成立“重庆交通大学地表动力过程学术创新团队”，将“危岩研究与防治”作为团队主攻方向之一。通过近 6 年的研究，开创了系统研究危岩的新领域，建立了危岩研究的理论及技术体系。研究过程中，理论分析、试验研究与工程实践相结合，从危岩分类、稳定性分析及防治技术等方面对三峡库区的危岩进行了系统研究。

迄今，陈洪凯教授共培养了 4 位危岩研究方向的硕士研究生，学位论文分别

为《三峡库区危岩发育机理及防治原理》(2003)、《危岩损伤—断裂联合机理研究》(2004)、《危岩发育链式机理研究》(2005)和《危岩主控结构面损伤—流变—断裂复合机理与稳定寿命研究》(2006);在核心学术刊物发表了危岩方面的学术论文 40 余篇,在多次国内学术会议上作了该方面的学术报告。鉴于在危岩研究方面取得的突出成绩,陈洪凯教授获得了 2005 年度“振兴重庆争光贡献奖”,并于 2006 年被国际著名学术组织“国际科学与工程学会”(World Scientific and Engineering Academy and Society, WSEAS)邀请作为 WSEAS 学术团队成员;独立承担了《重庆市三峡库区滑坡及危岩防治工程设计技术规定》(2002)和重庆市地方标准《地质灾害防治工程设计规范》(DB50/5029—2004)中“危岩防治工程”部分的编撰任务。

上述研究成果已经广泛用于指导三峡库区二期、三期地质灾害防治工程及相关非库区危岩灾害防治工程,取得了极其显著的社会、经济和环境效益。上述成果的推广应用对于实现我国危岩灾害的防灾减灾、推动区域社会经济可持续发展具有重要指导借鉴作用。

本书是从 2002 年以来先后获得重庆大学西南资源开发及环境灾害控制工程教育部重点实验室访问学者基金项目“三峡库区危岩破坏机理研究”、重庆市重点自然科学基金项目“三峡库区危岩发育综合机理研究”(2005BA7008)、国家春晖国际合作项目“危岩损伤—断裂机理研究”(Z2005-1-55002)和国家自然科学基金项目“危岩破坏机理研究”(50678182)应用型研究成果的总结,由陈洪凯全面负责,第 1、3 章由唐红梅撰写,第 2、5、6 章由陈洪凯撰写,第 4 章由祝辉撰写,第 7 章由叶四桥撰写。全书由陈洪凯和唐红梅校稿。

本书共分 7 章。第 1 章基于对危岩研究现状的评述,分析了危岩成因分类模式及其智能识别系统;第 2 章分析了作用在危岩体上的荷载类型,建立了每种荷载的计算方法,尤其是裂隙水压力折减法和主控结构面强度参数贯通率法,据此提出了荷载组合(工况);第 3 章分析提出了危岩稳定性评价标准,建立了每种类型危岩的稳定性计算方法;第 4 章建立了危岩失稳运动路径及冲击力计算方法;第 5 章分析了危岩防治技术体系,建立了危岩支撑、锚固、支撑—锚固联合、拦

石墙等主要防治技术的工程计算方法；第6章结合相关技术规范及根据对大量危岩防治工程实践的科学提炼，详细分析了危岩防治工程设计、施工及监测的相关技术问题；第7章以三峡库区万州太白岩危岩防治工程、万州天生城危岩防治工程和云阳磨子岭危岩防治工程为例，详细分析了危岩防治工程实践问题。

在“重庆交通大学地表动力过程学术创新团队”中，参与危岩研究与防治工程实践的成员前后30余人，同志们以“严谨的治学作风、求实的科学态度、勇攀科学高峰、国家民族感、社会使命感”的团队精神为指导，精心协力、尽心策划、兢兢业业，为了获取第一手资料，长期穿行在三峡库区陡崖坡脚、深入我国西部天山、大凉山、川藏公路的崇山峻岭，千余次冒着坠石的生命危险在陡崖、陡坡上下攀爬，涌现出了一批立志危岩研究与防治的有为青年。为此，笔者深深感谢团队成员对危岩研究与工程实践所做出的一切贡献！

在从事危岩研究及工程实践过程中，长期得到中国人民解放军后勤工程学院的郑颖人院士、重庆大学的鲜学福院士、尹光志教授、张永兴教授、许江教授、郭映忠教授、吴德伦教授、罗济章教授、国土资源部的殷跃平博士、重庆市国土资源和房屋管理局的彭光泽处长、袁兴平处长、重庆市地质灾害防治工程勘查设计院的刘光华教授级高工、重庆市地勘局的黎力教授级高工、重庆市工程勘察质量检测站的何平教授级高工、重庆市设计院的江景雄教授级高工、黄家愉教授级高工、重庆市钢铁设计院的曾世仁教授级高工、重庆市地质环境监测总站的彭先孚教授级高工、任幼蓉教授级高工、重庆市建筑科学研究院的徐锡权教授、重庆师范大学的赵纯勇教授、西南大学的王建力教授、谢世友教授、况明生教授、重庆交通大学的唐伯明教授、梁乃兴教授、王昌贤教授、易志坚教授、周华君教授、欧阳仲春教授、廖世荣教授、重庆南江地质队的李玉生教授级高工、重庆二〇八地质队的周颂杰教授级高工、重庆时乐浦公司的鲁克岑教授、中煤重庆设计院的唐耿琛教授级高工、赵洪波教授级高工、重庆市万州区建委的万放教授级高工等的大力支持和鼓励，在此一并致以诚挚的谢意！衷心感谢已为三峡库区地质灾害防治献出宝贵生命的著名岩土工程专家重庆市设计院的郑万才教授和重庆大学的黄求顺教授对我们从事危岩研究的殷切指导！

本项研究得到重庆市市委、市府的殷切关怀，得到国家自然科学基金委、国家春晖办、重庆市科委、重庆市国土房管局、重庆市移民局、重庆市建委、九三学社重庆市委等单位和领导的大力支持与热忱关怀，得到了重庆交通大学以及河海学院、科技处、人事处、宣传部、重点学科办公室、研究生院、教务处及实验部等相关职能部门领导的大力支持与关心，在此一并致以诚挚的谢意！向地震出版社的领导及为本专著的出版付出艰苦劳动的朋友们致以深深的谢意！

重庆交通大学岩土工程研究所李明博士、杨世胜硕士、张伟硕士、姜克春硕士、王林峰硕士、张祎硕士等参与完成了部分研究，并协助整理书稿、图件，在此表示衷心感谢！

本专著的姊妹篇《危岩力学》目前正在撰写过程中。

重庆交通大学岩土工程研究所

陈洪凯

2006年10月25日

目 录

第 1 章 危岩研究现状及分类系统	(1)
1.1 危岩研究现状	(1)
1.2 《地质灾害防治工程设计规范》(DB50/5029-2004)分类模式	(6)
1.3 危岩成因分类模式及识别系统	(6)
参考文献	(16)
第 2 章 危岩荷载及其组合	(19)
2.1 重力及地震力	(19)
2.2 裂隙水压力	(20)
2.3 主控结构面强度参数的求法	(25)
2.4 荷载组合	(28)
参考文献	(33)
第 3 章 危岩稳定性计算与评价	(35)
3.1 危岩稳定性评价标准	(35)
3.2 滑塌式危岩稳定性计算	(36)
3.3 倾倒式危岩稳定性计算	(38)
3.4 坠落式危岩稳定性计算	(41)
3.5 工程算例——以三峡库区重庆市万州太白岩南坡为例	(42)
参考文献	(43)
第 4 章 危岩失稳运动与冲击	(47)
4.1 几个典型的危岩崩落实例	(47)
4.2 土体动力恢复系数	(49)
4.3 危岩失稳运动路径	(53)
4.4 危岩冲击力	(60)
参考文献	(65)
第 5 章 危岩防治技术体系及工程计算	(67)
5.1 危岩防治技术体系梗概	(67)
5.2 支撑计算	(72)
5.3 锚固计算	(76)
5.4 支撑-锚固联合计算	(81)
5.5 拦石墙计算	(83)

5.6 拦石网计算.....	(88)
参考文献.....	(90)
第6章 危岩防治工程设计、施工与监测.....	(92)
6.1 防治工程设计原则.....	(92)
6.2 支撑设计与施工.....	(93)
6.3 锚固及锚索设计与施工.....	(96)
6.4 拦石墙设计与施工	(102)
6.5 拦石网及拦石栅栏设计与施工	(104)
6.6 支撑-锚固联合防治结构设计及施工.....	(108)
6.7 排水工程设计与施工	(109)
6.8 防治工程监测技术	(113)
参考文献.....	(125)
第7章 危岩防治工程实践.....	(127)
7.1 三峡库区万州太白岩危岩防治工程	(127)
7.2 三峡库区万州天生城危岩防治工程	(149)
7.3 三峡库区云阳磨子岭危岩防治工程	(166)
后记.....	(180)

第 1 章 危岩研究现状及分类系统

1.1 危岩研究现状

危岩 (Perilous rock) 是指位于陡崖或陡坡上被岩体结构面切割且在重力、地震、裂隙水压力等诱发因素作用下稳定性较差的岩石块体^[1], 其形成、失稳与运动属于边坡地貌动力过程演化的主要形式之一^[2]。危岩是山丘地区主要地质灾害类型及灾害性地貌过程, 危岩破坏失稳具有突发性、致灾具有毁灭性, 在中国长江三峡工程库区仅重庆境内便有 5 万多个危岩, 单个体积可及 8000 m^3 (合川市三汇镇马岩危岩), 威胁着 80 多万人的生命安全和数百亿元的财产安全, 随着中国西部大开发高等级公路及现代化城镇的快速建设、三峡库区“就地后靠”移民安置的全面实施, 将产生数千万个新生危岩体! 目前, 国内外学术及工程界对危岩这种地质灾害类型科学内涵的界定存在一定差异, 主要有三种, 即“崩塌 (avalanche)”^[3~9]、“落石 (rockfall)”^[10, 11]和“危岩 (perilous rock)”^[1, 12~26]。从危岩发育机理和失稳模式来看, 这些术语都具有一定的相似性, 强调了同一个问题的不同侧面, 即“崩塌”是指危岩崩落瞬间的动力行为, “落石”是指危岩崩落后的堆积体态, 而“危岩”则涵盖了危岩体形成、破坏、失稳和运动全过程力学行为^[24]。目前国内地质学界已经渐趋使用“危岩”这个术语^[12, 13]。边坡演化一直是地貌学研究的核心内容之一。20 世纪早期, W.M.Davis (1909)、W Peng (1924)、Von Engel (1948) 和 L C King (1950) 均提出了坡地发育演化模式, Richard J C (1984)^[2]认为湿润地区风化作用有利于坡地倾角的逐渐变缓, 而干旱地区由于顶盖岩层的作用而使坡地保持平行后退。国内学术界对于地表过程的研究侧重在沉积作用阶段, 如韩智勇等在进行三峡库区坡地地貌过程研究中偏重坡体前部第四纪沉积物研究^[27], 杨达源等则从山体峰顶面出发分析三峡库区地貌演化问题^[28, 29]。目前, 从工程防治角度, 可将危岩研究成果概化为三个方面, 即危岩失稳模式、危岩稳定性计算方法及危岩锚固计算方法。

1.1.1 危岩失稳模式

危岩失稳模式也可称为危岩破坏模式, 是危岩稳定性及锚固研究的基础。迄今, 危岩失稳模式尚未统一, 从不同角度存在多种分类方案。如孙云志 (1994) 将危岩失稳模式分为滑移和倾倒两类^[14], 陈明东 (1999) 根据受力模式将危岩失稳模式分为板梁旋滑移和悬臂压杆破坏两类^[30], 张奇华 (1998) 将危岩失稳模式分为八类, 即蠕滑体滑移失稳、整体压陷倾斜崩塌、滑移—倾斜交错崩塌、裂隙段屈曲变形破坏、上下滑出破坏、倾斜—滑移破坏、倾斜—隐裂缝开裂—崩塌、倾斜—滑移—隐裂缝开裂—崩塌^[31]。而大量的工程实践表明, 危岩失稳模式应该从危岩失稳的力学机理出发进行分类, 陈洪凯等将危岩失稳模式分为坠落式危

岩、滑塌式危岩和倾倒式危岩^[32]（图 1.1~图 1.3），该分类几何形态明显、力学机理清晰，分类系统简明，易于掌握。

滑塌式危岩的危岩体后部存在与边坡倾斜一致的、贯通或断续贯通的破裂面，倾角较缓，破裂面的剪出部位多数出现在陡崖，也可能出现在危岩体基座岩土体中，危岩体沿着破坏面滑移失稳（图 1.1）。

坠落式危岩的危岩体下部受结构面切割脱离母岩，上部及与后部母岩的尚未完全脱离。危岩体底部凌空，凌空的原因要么是属于危岩体下部软岩的快速风化而成岩腔，要么是属于下部先期危岩体崩落后的渐进发育（图 1.2）。

倾倒式危岩的危岩体后部存在于边坡坡向一致的陡倾角贯通或断续贯通的破坏面，危岩体底部局部凌空，危岩体重心多数情况下出现在基座凌空支点外侧，危岩体可能沿着支点向凌空方向倾倒破坏（图 1.3）。

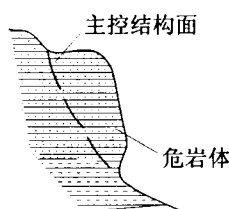


图 1.1 滑塌式危岩

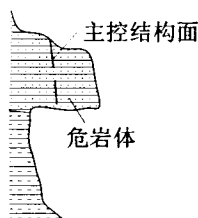


图 1.2 坠落式危岩

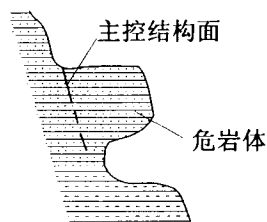


图 1.3 倾倒式危岩

1.1.2 危岩稳定性计算方法

危岩稳定性计算方法可分为 4 类，即基于有限元法的静力稳定性分析法、可靠度分析法、基于监测资料的比较辨识法和静力解析法。

1) 静力稳定性分析法

用有限元方法计算位移和应力时，工程中采用接触单元或夹层单元求解接触问题，因无法求解有初始间隙的接触问题及采用单元内应力作为屈服判据可能导致失真现象，故其应用受到限制。刘国明（1996）采用有限元法对三峡链子崖危岩体进行静力稳定性分析时，考虑了软弱夹层的材料非线性及裂缝的接触非线性问题，提出连杆接触单元有限元模型以满足求解工程接触问题的需要，并将岩块简化为弹性体。当危岩体滑动面已知时，可采用静力分析法，对给定的材料参数计算位移及应力，以危岩体的滑动力和阻滑力相等为条件确定材料参数的安全系数。该方法中，软弱夹层的材料非线性问题采用夹层单元的非线性模型来模拟，用连杆接触单元非线性模型模拟岩体裂缝的接触问题，认为在一对接触点之间采用连杆单元，连杆的应力应变关系遵从抗拉的理想弹塑性模型准则，并假设连杆单元沿连杆的横断面及高度（即夹层厚度）上应力应变均匀分布。这种模型用于模拟岩体裂缝的接触问题时，可以模拟裂缝的闭合问题，也可以用于软弱夹层的材料非线性分析。基于夹层单元及连杆接触单元非线性模型、线弹性体单元模型及静力分析法，还研制了适于复杂岩质边坡稳定分析的三维有限元程序，应用该程序对链子崖危岩体进行了稳定性计算^[33]。

然而，岩体变形破坏过程非常复杂，有限元计算不仅对岩体中节理面的分布和特性难以做出合理描述，而且岩体既不是完全弹性体，也不是弹塑性体，计算出的应力和位移与实际情况有一定出入，加上有限元计算量大，这种方法在实际工程中难于推广应用。

2) 可靠度分析法

用可靠度方法进行危岩稳定性分析时，关键在于功能函数的建立和概率尺度的确定。谢全敏运用蒙特卡罗边界元法分析危岩稳定性^[34]，这种方法是通过求解危岩体破坏概率来评价其稳定性，实际上相当于计算边界上点 $(x_1, x_2, \dots, x_m)$ 处基本随机变量 x_1 的概率分布函数的均值，这样可免去对控制危岩体基本随机变量 x_1 的抽样，具有较小的方差。该方法建立了直接坠落、沿单面滑动和沿双面滑动三种破坏形式的功能函数，并根据 G. G. Meyethof 和 Dieter D. Genske 等人的观点，岩体结构边坡破坏概率大于 1%~1‰。

3) 比较识别法

张奇华提出了一种边坡变形破坏的比较辨识方法^[31]，其主要思想是：在工程地质区域，考虑变形破坏方式及相应的变形破坏特征、位移关系式，针对各种可能的变形和破坏建立（或调整优化已有的）变形监测网，由监测资料计算得到变形区域的空间位移向量，对比各种可能的变形破坏方式相应的变形特征和位移关系式，从而辨识出实际发生的变形破坏方式、变形区域及变形演化成破坏的过程。这种方法目的在于探索将边坡的变形、破坏分析与监测网、监测数据处理有机、系统地联系起来定量化，主要针对在通常情况下（无地震、暴雨、人工大扰动）的变形和破坏。该方法需要相应的变形监测网及监测资料支持，而且在变形、破坏演化过程中，变形区域、变形破坏方式不可能一成不变，监测点需要及时补充，并注意系统辨识方法的完善。另外，该方法在工作时，会碰到一些不明确的情况，在确定变形区域，求取空间位移矢量时，给结论带来不确定性。

4) 静力解析法

在工程实际中最常用的稳定性分析方法还是静力解析法，这种方法简单可行，结果明确，但危岩体破坏模式认识上的差异导致建立的失稳判据不同，判据中参数的确定与地勘资料密切相关，通常分 3 种情况对危岩体进行稳定性计算（图 1.4）。

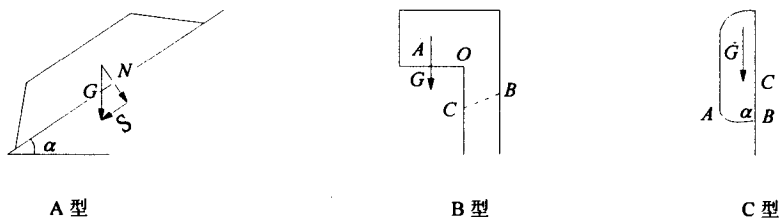


图 1.4 危岩体稳定性分析计算简图

A 型：破坏形式为剪切破坏，危岩稳定系数与危岩体的重量、滑面倾角、长度（或面积）及裂隙面上摩擦系数、粘聚力有关。稳定系数为

$$K = \frac{G \cos \alpha [(f_1 L_1 + f_2 L_2) / (L_1 + L_2)] + C_1 L_1 + C_2 L_2}{G \sin \alpha} \quad (1.1)$$

式中， G 为危岩体重量（kN）； α 为破裂面沿滑动方向的倾角（°）； f_1 和 $C_1 L_1$ 分别为破

裂面的摩擦系数和粘聚力 (kPa)； f_2 和 C_2L_1 分别为未被裂隙切割部分的完整岩石的抗剪断强度的摩擦系数和粘聚力 (kPa)。

B 型：由于重力偏心分布，引起拉应力而产生破坏，稳定系数为岩体平均抗拉强度与产生的拉应力的比值。

$$K = R_t / \sigma_t \quad (1.2)$$

式中， R_t 为岩体平均抗拉强度 (kPa)； $\sigma_t = 2G / L_1 B_1 \pm 6G L_2 / L_1^2 B_1$ (重心 A 在 BC 外取“+”，在 BC 内取“-”)，单位为 (kPa)； L_1 为 OB 段长度 (m)； L_2 为 OA 段长度 (m)，即重心铅垂线距 O 点距离； B_1 为岩体垂直剖面方向的宽度 (m)。

C 型：由坡脚 AB 段压应力引起的破坏，稳定系数由岩石的抗压强度及危岩体重量确定。

$$K = \frac{R_c L}{G} \quad (1.3)$$

式中， R_c 为岩体单轴抗压强度 (kPa)， L 为 AB 段长度 (m)。

如属剪切破坏，则按下式计算

$$K = \frac{fG \cos \alpha + CL'}{G \sin \alpha} \quad (1.4)$$

式中， $\alpha = 45^\circ + \varphi / 2$ ， φ 为岩石的内摩擦角 ($^\circ$)； L' 为 AC 段长度 (m)； f 和 C 分别为岩石抗剪断的摩擦系数和粘聚力 (kPa)。

在研究奉节李子垭危岩体稳定性时，孙云志^[14]对两种情况进行了计算，对于滑移型危岩体的稳定系数用极限平衡理论求解

$$F_s = \frac{CS + (V\gamma \cos \alpha - Q_0 \sin \alpha) \tan \varphi}{V\gamma \sin \alpha + Q_0 \cos \alpha} \quad (1.5)$$

式中， F_s 为安全系数； V 为危岩体体积 (m^3)； γ 为危岩体容重 (kN/m^3)； S 为破裂面的面积 (m^2)； α 为破裂面倾角 ($^\circ$)； C 为破裂面粘聚力 (kPa)； φ 为破裂面摩擦角 ($^\circ$)； Q_0 为作用在危岩体上的水平地震力 (kN)。

对于倾倒型危岩体，将被深宽裂缝所切割的长条形岩柱视为顶端自由的悬臂梁，其失稳方式是自由端的累积挠曲位移而产生的根部折断，失稳判据为稳定系数，由固定端最大拉应力与岩体抗拉强度确定。即

$$K = \frac{2\sigma_t - \sigma_{\max}}{\sigma_t} \quad (1.6)$$

式中， σ_t 为岩体抗拉强度 (kPa)； $\sigma_{\max}$ 为悬臂梁固定端产生的最大拉应力 (kPa)。

孙云志等引进材料力学惯性矩概念^[14]，建立稳定系数计算式为

$$K = 2 - \frac{\gamma \omega}{\sigma_t} \left(\frac{H_0}{D} \right)^2 \quad (1.7)$$

式中， γ 为岩体容重 (kN/m^3)； ω 为悬臂梁自由端的挠度 (m)，即倾倒岩柱在地表的柱裂宽度，通常是指裂隙在地面的出露宽度即柱裂宽度； H_0 为岩柱高度 (m)； D 为岩柱底宽 (m)。

令 $K=1$ ，得到临界柱裂宽度作为岩柱失稳的第二判据，即

$$\omega_0 = \frac{\sigma_\tau}{\gamma} \left(\frac{D}{H_0} \right)^2 \quad (1.8)$$

陈明东虽然也认为危岩的破坏形式为沿软弱层间结构面滑移和向凌空面倾倒两种情况^[30]，但在分析其稳定性时，将滑移型危岩体视为置于倾斜平板上以某裂缝端部岩体为支点的旋转梁，岩体在剩余下滑力作用下，产生的最大横向力超过梁的抗压或抗拉强度而引起失稳破坏。而对于倾倒型危岩体，则将其视为上端自由下端固定的垂直压杆，在自重作用下弯曲产生弯矩和横向力，当横向力超过岩体抗拉或抗压强度时，杆件折断而失稳。

尽管破坏模型建立不同，但破坏原因都是产生的应力大于了岩体强度，两种形式的破坏都采用下列稳定系数计算式

$$K = \frac{2\sigma_\tau - \sigma}{\sigma_\tau} \quad (1.9)$$

式中，倾倒破坏的应力的计算式为 $\sigma = \gamma\omega(H/D)^2$ ，而滑移破坏的应力计算式为

$$\sigma = 6/HD^2 \{H\gamma[\sin\alpha + \alpha\cos\alpha - (\cos\alpha - \alpha\sin\alpha)\tan\varphi] - C\} \sum_{i=1}^n S_i X_i \quad (1.10)$$

式中， H 为岩层厚度 (m)； D 为旋转岩体的宽度 (m)； S_i 为旋转岩体的条分块面积 (m²)； X_i 为条分块重心到支撑面的垂直距离 (m)；其他物理量意义同前。

1.1.3 危岩锚固计算方法

危岩治理属于一个系统工程，需要用清除、拦挡、支撑、锚固、裂隙灌浆等一种或几种方法来进行有效治理^[32]。统计资料表明，锚固是治理危岩的主要工程措施，危岩锚固计算方法多种多样。

郭映忠 (2001) 以二维直线形单滑面为例^[35]，根据滑面静力平衡条件确定最佳锚固力作用方向和在此方向增加的最大抗滑阻力增量 $F_{p\max}$ 。

抗滑阻力增量

$$F_p = P_n \tan\varphi + P_\tau = P[\sin(\alpha + \theta) \tan\varphi + \cos(\alpha + \theta)] \quad (1.11)$$

F_p 最大值得最佳锚固力作用方向

$$\partial F_p / \partial \theta = P \cos(\alpha + \theta) \tan\varphi - P \sin(\alpha + \theta) = 0 \quad (1.12)$$

$$\theta = \varphi - \alpha \quad (1.13)$$

唐红梅等 (2000) 根据沿着锚杆布设方向岩体变形量最大的总体目标，建立了岩体锚固变形方程，据此求出了岩体最优锚固方向^[36]，即锚杆沿着主控结构面倾向布设，锚杆倾角 β 与主控结构面 α 满足

$$\alpha + \beta = \pi \quad (1.14)$$

危岩锚固体数值分析中，陈洪凯等首次提出了锚固岩体等效参数法^[37]，该方法将锚杆与

危岩体共同视作均质各向同性的连续介质,从岩体的等效法向刚度系数及切向刚度系数出发,基于小变形、变形可叠加性和强度参数不相关性假定,建立了等效锚固体的等效强度参数 C 、 φ 表达式。

1.2 《地质灾害防治工程设计规范》(DB50/5029-2004) 分类模式

根据危岩块体的失稳模式,重庆市地方标准《地质灾害防治工程设计规范》(DB50/5029-2004)参照陈洪凯等的研究^[32]把危岩分为三类^[13],即坠落式危岩、滑塌式危岩和倾倒式危岩。

(1) 滑塌式危岩的危岩体后部存在与边坡倾斜一致的、贯通或断续贯通的破裂面,倾角较缓,破裂面的剪出部位多数出现在陡崖,也可能出现在危岩体基座岩土体中或危岩体与基座的交界面,危岩体沿着破坏面滑移失稳(图 1.1)。

(2) 坠落式危岩的危岩体左、右受结构面切割脱离母岩,后部母岩尚未完全脱离。危岩体底部凌空,包括危岩体下部软岩的快速风化而成岩腔与下部先期危岩体崩落后的渐进发育两方面的原因(图 1.2)。

(3) 倾倒式危岩的危岩体后部存在于边坡坡向一致的陡倾角贯通或断续贯通的破坏面,危岩体底部局部凌空,危岩体重心多数情况下出现在基座凌空支点外侧,危岩体可能沿着支点向凌空方向倾倒破坏(图 1.3)。

1.3 危岩成因分类模式及识别系统

从 2001 年三峡库区地质灾害防治工程实施以来,在危岩治理过程中,存在 80%以上的重大方案变更!其原因是危岩体位置、范围大小、主控结构面的组合、开度及长度等均与勘查结果有很大差异,以至于大量分析计算结果均与实际不符,并且存在大量漏勘、误勘现象,如万州太白岩危岩治理工程在 2003 年 5 月竣工以后,于当年 7 月 19 日晚发生危岩灾害,将坡脚的历史文物何其芳纪念馆摧毁,直接经济损失 80 万元左右,该新生危岩发生在原已经勘查并实施治理的 23#和 24#危岩体之间,体积 2000 余 m^3 (图 1.5),属于漏勘范围。对类似这次事件的分析表明,目前我国在危岩研究与防治方面尚存在全方位的不足,根本原因是危岩识别主观性太强、准确性差。从现场易识性、力学机理明确性和失稳模式预判性出发建立危岩新的分类方案,明确危岩宏观识别判据,对于提升危岩勘查水平具有重要现实意义,也为危岩理论研究及防治针对性、有效性提供了依据。

1.3.1 危岩分类原则

1) 现场易识性

目前,在危岩勘查过程中,勘查工程师的主观因素所占分量很重,不同的工程师即使对于同一个危岩体所给出的范围大小、形态外貌以及主控结构面位置、连通率、张开度等均出现较大偏差,其根本原因在于实际工程中的危岩体形态变化较大、所处位置较高较远、危岩