

21世纪高等院校教材

# 地质灾害理论与控制

陈洪凯 唐红梅 王林峰 编著  
刘 丽 何晓英



科学出版社

21 世纪高等院校教材

# 地质灾害理论与控制

陈洪凯 唐红梅 王林峰 编著  
刘 丽 何晓英

科学出版社

北 京

## 内 容 简 介

本书基于西部地区典型地质灾害研究与实践,重点对危岩崩塌、滑坡、泥石流、塌岸的工程计算及治理技术进行了系统论述,分析了滑坡及危岩崩塌的监测预报方法。全书遵循计算方法合理、治理技术实用、易于操作的原则,立足地质灾害治理实际需求,深入浅出,以大量实例做支撑,是一本具有重要工程实用性的地质灾害论著。

本书可作为地质工程、土木工程、水利工程、自然地理学等专业高年级本科生及研究生的教学用书,也可供土建、交通、铁道、采矿、水利水电、城乡规划、地质环境保护、国土资源开发利用等相关部门勘察和工程设计人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

---

地质灾害理论与控制/陈洪凯等编著. —北京:科学出版社,2011  
21 世纪高等院校教材  
ISBN 978-7-03-032105-3

I. ①地… II. ①陈… III. ①地质-自然灾害-理论-高等学校-教材②地质-自然灾害-灾害防治-高等学校-教材 IV. ①P694

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 168470 号

---

责任编辑:杨 红 / 责任校对:刘小梅  
责任印制:张克忠 / 封面设计:陈 敬

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京中新伟业印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2011 年 8 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2011 年 8 月第一次印刷 印张:14 3/4

印数:1—2 500 字数:297 000

定价:30.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

# 前 言

可持续发展是 21 世纪经济社会发展的主题,核心是实现环境、资源与社会的协调发展。而重大自然灾害给人类社会带来了严重的影响和损失,防范自然灾害,减轻影响和减少损失,已成为建设资源节约型、环境友好型社会,实现经济社会可持续发展的重要任务。

危岩崩塌、滑坡、泥石流等地质灾害是我国公路、铁路、矿山、城镇建设及维护面临的重大地质安全隐患。例如,2009 年 6 月 5 日,重庆市武隆县铁矿乡鸡尾山发生特大型山体崩塌,300 多万立方米的崩塌体快速涌进山谷,产生 700 多万立方米的崩塌堆积物,借助气垫效应,崩塌体沿沟向前高速运动近 1000m,80 余人遇难;2007 年 11 月 20 日发生在湖北省巴东县国道 318 线 K1405 高阳寨隧道边坡的崩塌灾害,崩塌体总体积  $4512\text{m}^3$ ,一辆大客车被崩塌体掩埋,车内 31 人全部遇难;2009 年 7 月 25 日,四川省汶川县国道 213 线都汶路  $44\text{km}+200$  彻底关大桥处发生山体崩塌,崩塌体总体积万余立方米,其中,一块约 90t 重的巨石直接砸断了桥墩,造成桥墩倾倒,由于桥墩连接着上方两侧的 60m 桥面,桥面被拉垮,2 辆货车坠入岷江,6 人死亡,经济损失达 1 亿元左右;地处新疆西部南北向跨越天山山脉的国防干线天山公路,存在累积长度超过 400km 的坡面泥石流灾害路段,重庆境内高等级公路沿线的潜在坡面泥石流灾害点多达 4000 个。初步统计表明,我国每年发生重大地质灾害 8000 次以上,直接经济损失超过 80 亿元。

我国是一个多山的国家,山地、丘陵占国土总面积  $2/3$  以上,显著的地貌分异、复杂的地质环境、频繁的危害性天气,使我国成为世界上地质灾害广泛发育、致灾严重的国家之一。地质灾害是指有损于人类生存环境的一切动力地质过程及地质现象,包括崩塌、滑坡、泥石流、地面沉降、岩溶等类型,其中崩塌、滑坡、泥石流(简称崩滑流)占地质灾害总数的 80% 以上。针对我国公路、铁路、矿山、城镇建设,系统地实施地质灾害研究及治理,是我国防灾减灾领域的国家需求。在我国,地质灾害分布广泛,崩滑流灾害主要集中在青藏高原边缘地区、三峡库区、武夷山区、粤北山区、台湾山地、西南山区、燕山-太行山区、秦岭-大巴山区、豫西山地、天山山脉等。

为了满足我国社会经济发展的迫切需求,本书遵循“计算方法合理、治理技术实用、易于操作”的原则,立足地质灾害治理实际需求,深入浅出,以大量实例做支撑,强调实用性和可操作性。

本书由陈洪凯教授、唐红梅教授、刘丽博士、王林峰博士、何晓英博士等共同撰

写,其中第1章由陈洪凯和何晓英撰写,第2章由陈洪凯撰写,第3、第4章由唐红梅撰写,第5章由陈洪凯和唐红梅撰写,第6章由刘丽、王林峰和孙晓勇撰写,第7章由叶四桥和刘厚成撰写,第8章由唐红梅和唐芬撰写。全书由陈洪凯教授统稿,王林峰博士和何晓英博士负责文图整理。编写过程中,得到重庆大学鲜学福院士、后勤工程学院郑颖人院士、中国科学院·水利部成都山地灾害与环境研究所王全才研究员、重庆市地质矿产勘查开发局刘东升教授、西南交通大学胡卸文教授、重庆市地质灾害防治工程勘查设计院刘光华教授、重庆市地质矿产勘查开发局南江水文地质工程地质队曾云松教授等著名专家的关心和鼓励,得到重庆交通大学研究生部、教务处、科技处的大力支持,获得了重庆交通大学研究生教材基金资助,在此一并致以诚挚的感谢。

由于作者水平有限,加之时间仓促,书中不足之处在所难免,敬请广大读者批评指正。

陈洪凯

2011年6月12日

# 目 录

## 前言

|                                 |    |
|---------------------------------|----|
| 第 1 章 危岩稳定性与落石运动                | 1  |
| 1.1 危岩分类                        | 1  |
| 1.1.1 单体危岩分类                    | 1  |
| 1.1.2 群体危岩分类                    | 3  |
| 1.2 荷载类型及其组合                    | 3  |
| 1.2.1 重力及地震力                    | 4  |
| 1.2.2 裂隙水压力                     | 4  |
| 1.2.3 荷载组合                      | 5  |
| 1.2.4 主控结构面抗剪强度参数               | 5  |
| 1.3 危岩稳定性分析                     | 6  |
| 1.3.1 危岩稳定性评价标准                 | 6  |
| 1.3.2 危岩稳定系数计算方法                | 7  |
| 1.4 落石运动路径                      | 12 |
| 1.4.1 几个典型的危岩崩落实例               | 12 |
| 1.4.2 落石运动路径计算方法                | 15 |
| 1.5 落石冲击力                       | 21 |
| 1.5.1 落石冲击过程中的能量损失              | 21 |
| 1.5.2 基于 Hertz 碰撞理论的落石正向冲击力计算方法 | 23 |
| 1.5.3 基于冲击形迹的落石冲击力计算方法          | 24 |
| 1.5.4 落石冲击力在缓冲土层中的扩散            | 26 |
| 思考题                             | 27 |
| 第 2 章 危岩崩塌防治工程                  | 28 |
| 2.1 危岩崩塌防治技术                    | 28 |
| 2.1.1 主动防治技术                    | 28 |
| 2.1.2 被动防护技术                    | 30 |
| 2.1.3 主动-被动联合防治技术               | 31 |
| 2.2 危岩崩塌防治工程计算                  | 33 |
| 2.2.1 危岩支撑条件                    | 33 |
| 2.2.2 坠落式危岩支撑计算                 | 33 |

|                               |           |
|-------------------------------|-----------|
| 2.2.3 危岩锚固计算 .....            | 36        |
| 2.3 危岩崩塌防治工程设计 .....          | 39        |
| 2.3.1 设计原则 .....              | 39        |
| 2.3.2 基本规定 .....              | 40        |
| 2.4 支撑结构设计 .....              | 40        |
| 2.4.1 支撑结构分类 .....            | 40        |
| 2.4.2 支撑结构设计 .....            | 42        |
| 2.5 锚固工程设计 .....              | 43        |
| 2.5.1 锚固结构适用性 .....           | 44        |
| 2.5.2 锚固工程 .....              | 45        |
| 2.6 拦石墙设计 .....               | 48        |
| 2.6.1 拦石墙的分类及特点 .....         | 48        |
| 2.6.2 加筋拦石墙的组成 .....          | 49        |
| 2.6.3 拦石墙设计 .....             | 49        |
| 2.7 拦石网及拦石栅栏设计 .....          | 50        |
| 2.7.1 适用条件 .....              | 50        |
| 2.7.2 拦石网构成 .....             | 51        |
| 2.8 支撑-锚固联合防护结构设计 .....       | 52        |
| 思考题 .....                     | 53        |
| <b>第3章 滑坡稳定性分析与防治技术 .....</b> | <b>55</b> |
| 3.1 滑坡基本特征 .....              | 55        |
| 3.1.1 滑坡要素 .....              | 55        |
| 3.1.2 滑坡类型 .....              | 56        |
| 3.2 滑坡防治技术体系及方案比选 .....       | 58        |
| 3.2.1 滑坡防治原则 .....            | 58        |
| 3.2.2 滑坡防治安全等级 .....          | 59        |
| 3.2.3 滑坡防治技术体系 .....          | 59        |
| 3.2.4 滑坡防治方案选择 .....          | 63        |
| 3.3 滑坡稳定性分析 .....             | 65        |
| 3.3.1 滑坡稳定系数评价标准 .....        | 65        |
| 3.3.2 滑坡稳定系数计算方法 .....        | 66        |
| 3.3.3 滑坡推力计算 .....            | 74        |
| 思考题 .....                     | 76        |
| <b>第4章 滑坡防治工程 .....</b>       | <b>77</b> |
| 4.1 悬臂抗滑桩 .....               | 77        |

---

|                             |     |
|-----------------------------|-----|
| 4.1.1 悬臂抗滑桩内力计算 .....       | 77  |
| 4.1.2 悬臂抗滑桩结构设计 .....       | 98  |
| 4.2 锚索抗滑桩及预应力锚索 .....       | 104 |
| 4.2.1 锚索抗滑桩 .....           | 104 |
| 4.2.2 预应力锚索 .....           | 105 |
| 4.2.3 预应力锚索设计关键问题 .....     | 107 |
| 思考题 .....                   | 108 |
| <b>第5章 泥石流灾害及荷载计算</b> ..... | 109 |
| 5.1 公路泥石流灾害及类型 .....        | 109 |
| 5.1.1 公路与泥石流沟的组合关系 .....    | 109 |
| 5.1.2 穿越泥石流沟的公路结构型式 .....   | 110 |
| 5.1.3 公路泥石流灾害类型 .....       | 111 |
| 5.1.4 公路泥石流分类 .....         | 113 |
| 5.2 泥石流流速 .....             | 114 |
| 5.2.1 稀性泥石流流速公式 .....       | 114 |
| 5.2.2 黏性泥石流流速公式 .....       | 117 |
| 5.2.3 水石流流速公式 .....         | 120 |
| 5.2.4 综合类泥石流流速公式 .....      | 122 |
| 5.3 泥石流冲击力 .....            | 122 |
| 5.3.1 流体动压法 .....           | 123 |
| 5.3.2 船筏撞击法 .....           | 123 |
| 5.3.3 地貌形迹法 .....           | 123 |
| 5.4 泥石流磨蚀计算 .....           | 126 |
| 5.4.1 泥石流磨蚀力 .....          | 126 |
| 5.4.2 防治结构磨蚀速度及磨蚀量计算 .....  | 128 |
| 思考题 .....                   | 129 |
| <b>第6章 泥石流防治工程</b> .....    | 130 |
| 6.1 拦挡结构 .....              | 130 |
| 6.1.1 重力式拦挡坝 .....          | 131 |
| 6.1.2 梳齿坝 .....             | 143 |
| 6.2 排导结构 .....              | 151 |
| 6.2.1 结构型式及布置原则 .....       | 151 |
| 6.2.2 汇流槽计算方法 .....         | 153 |
| 6.2.3 底越式排导结构 .....         | 154 |
| 6.2.4 顶越式排导结构 .....         | 163 |

|                                    |     |
|------------------------------------|-----|
| 6.3 防护结构 .....                     | 174 |
| 6.3.1 护岸墙 .....                    | 174 |
| 6.3.2 防撞墩 .....                    | 184 |
| 思考题 .....                          | 189 |
| <b>第7章 塌岸</b> .....                | 190 |
| 7.1 塌岸概述 .....                     | 190 |
| 7.1.1 塌岸分类 .....                   | 190 |
| 7.1.2 典型岸坡特性 .....                 | 190 |
| 7.2 塌岸再造宽度预测 .....                 | 193 |
| 7.2.1 塌岸稳定坡角取值 .....               | 193 |
| 7.2.2 塌岸预测方法 .....                 | 193 |
| 7.3 塌岸治理技术 .....                   | 197 |
| 7.3.1 框格护坡 .....                   | 197 |
| 7.3.2 喷浆和喷射混凝土护坡 .....             | 198 |
| 7.3.3 干砌片石护坡 .....                 | 198 |
| 7.3.4 砌片石护坡 .....                  | 199 |
| 思考题 .....                          | 200 |
| <b>第8章 地质灾害预测预报</b> .....          | 201 |
| 8.1 滑坡灾害监测预报 .....                 | 201 |
| 8.1.1 滑坡灾害监测预报传统方法 .....           | 201 |
| 8.1.2 滑坡灾害监测预警新方法 .....            | 203 |
| 8.1.3 滑坡监测方法 .....                 | 206 |
| 8.1.4 分布式光纤应变测量技术在滑坡早期预警中的应用 ..... | 210 |
| 8.1.5 滑坡裂缝报警器 .....                | 211 |
| 8.1.6 综合监测无线报警系统 .....             | 211 |
| 8.1.7 多参数综合监测无线传输仪 .....           | 212 |
| 8.2 危岩崩塌监测预报 .....                 | 213 |
| 8.2.1 监测工作目的任务 .....               | 213 |
| 8.2.2 主要监测方法、监测仪器 .....            | 213 |
| 8.2.3 危岩监测实施程序和技术要求 .....          | 216 |
| 8.2.4 成果预测预报 .....                 | 221 |
| 思考题 .....                          | 227 |
| <b>主要参考文献</b> .....                | 228 |

# 第 1 章 危岩稳定性与落石运动

## 1.1 危岩分类

《地质灾害防治工程设计规范》(DB50/5029—2004)根据失稳模式把危岩分为滑塌式危岩、倾倒式危岩和坠落式危岩三类,陈洪凯等提出了危岩成因分类系统,即宏观上把危岩分为单体危岩和群体危岩两大类,认为群体由单体叠置组合而成,并将单体危岩分为压剪滑动型危岩、拉剪倾倒型危岩、拉裂坠落型危岩和拉裂-压剪坠落型危岩四类,将群体危岩分为顶部诱发破坏型危岩和底部诱发破坏型危岩两类。

### 1.1.1 单体危岩分类

#### 1. 压剪滑动型危岩

压剪滑动型危岩的典型物理模型见图 1.1。此类危岩的主控结构面倾角较小,一般在  $45^{\circ}$  以下,为陡崖或陡坡内缓倾角的卸荷拉张结构面或缓倾角地层弱面(图 1.2)。危岩体重心在主控结构面下部端点内侧,主控结构面所受荷载主要为危岩体自重及作用在危岩体的地震力和裂隙水压力。危岩体沿着主控结构面滑移变形、破坏,呈现压剪破坏力学机理。

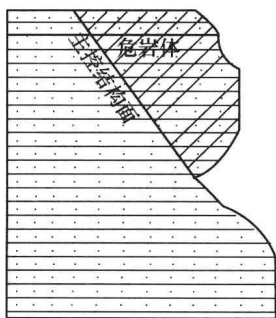


图 1.1 压剪滑动型危岩物理模型



图 1.2 压剪滑动型危岩实例

#### 2. 拉剪倾倒型危岩

拉剪倾倒型危岩的典型物理模型见图 1.3。此类危岩的主控结构面倾角变化较大,一般大于  $45^{\circ}$ ,多为陡崖或陡坡的卸荷拉张结构面,且主控结构面下端部潜存于陡崖或陡坡岩体内(图 1.4)。危岩体的重心位于主控结构面下部端点外侧是

此类危岩的关键,在荷载作用下通常围绕主控结构面的下端部或下端部与临空面的交点旋转倾倒破坏,危岩体呈现拉剪破坏力学机理。

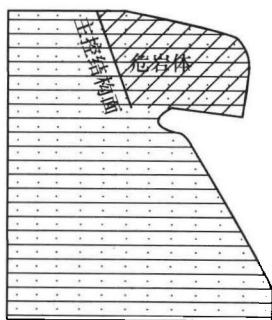


图 1.3 拉剪倾倒型危岩物理模型

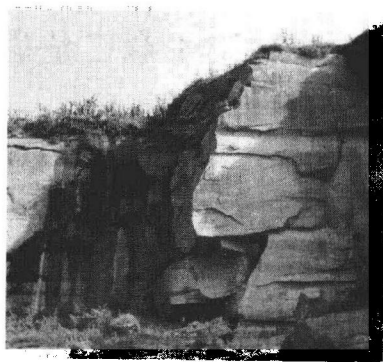


图 1.4 拉剪倾倒型危岩实例

### 3. 拉裂坠落型危岩

拉裂坠落型危岩的典型物理模型见图 1.5。此类危岩体后部为倾角大于  $80^\circ$  的卸荷结构面或断裂结构面,多数处于基本贯通状态;危岩体顶部为主控结构面,近于水平,其逐渐扩展贯通诱发危岩体变形与失稳坠落。在荷载作用下,主控结构面拉裂是控制危岩体变形与稳定的力学机理。

### 4. 拉裂-压剪坠落型危岩

拉裂-压剪坠落型危岩的典型物理模型见图 1.6。此类危岩主要受控于两条主控结构面,即近于水平的第 1 主控结构面和倾角小于  $80^\circ$  的第 2 主控结构面,分别属于拉裂及压剪力学机理。在荷载作用下,首先是危岩体的第 1 主控结构面逐渐受拉扩展,扩展至一定程度时危岩体沿着第 2 主控结构面滑移变形,变形达到阈值后整体失稳崩落。

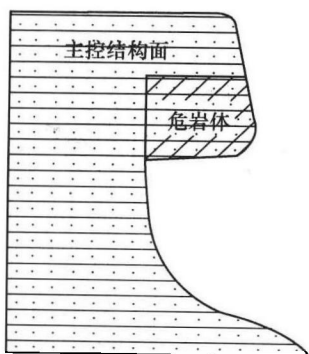


图 1.5 拉裂坠落型危岩物理模型

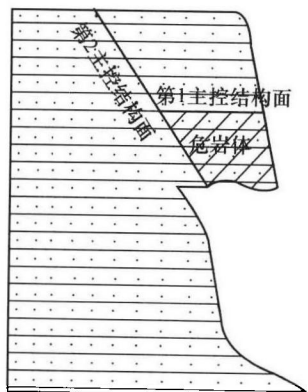


图 1.6 拉裂-压剪坠落型危岩物理模型

### 1.1.2 群体危岩分类

#### 1. 顶部诱发破坏型危岩

顶部诱发破坏型危岩的典型物理模型见图 1.7。该类危岩的主控结构面倾角一般大于  $70^\circ$ ，底部端部潜存于稳定岩体内。危岩体由多个危岩块体叠置构成，底部一块或两块危岩体的重心位于主控结构面以外且具有倾倒失稳破坏趋势，上部危岩块体的重心一般位于主控结构面以内，危岩块体之间的界面近于水平且黏结强度较低。此类危岩的关键块体为顶部危岩块体，对底部危岩块体具有反压作用，关键块体崩落或清除将劣化整个危岩体的安全状态。

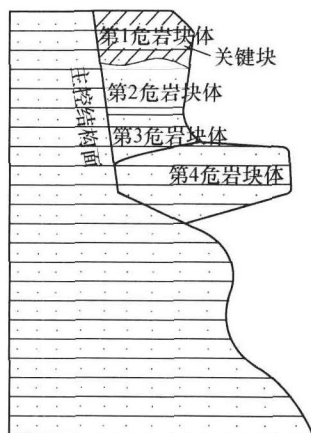


图 1.7 顶部诱发破坏型危岩物理模型

#### 2. 底部诱发破坏型危岩

底部诱发破坏型危岩的典型物理模型见图 1.8。该类危岩的主控结构面倾角一般小于  $70^\circ$ ，底部端部在陡崖或陡坡临空面出露(图 1.9)。危岩体由多个危岩块体叠置构成，危岩块体之间的交界面倾角较小且胶结强度低，底部危岩块体为关键块体。关键块体失稳后，上部危岩块体易于连锁变形失稳。这种危岩类型符合危岩崩塌链式规律。

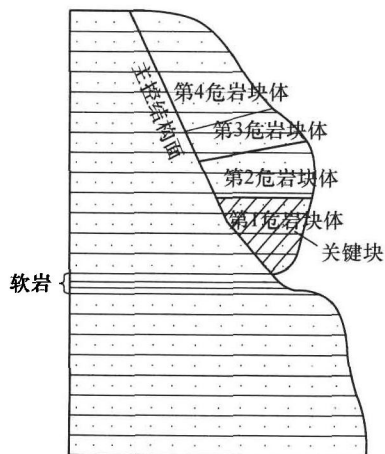


图 1.8 底部诱发破坏型危岩物理模型

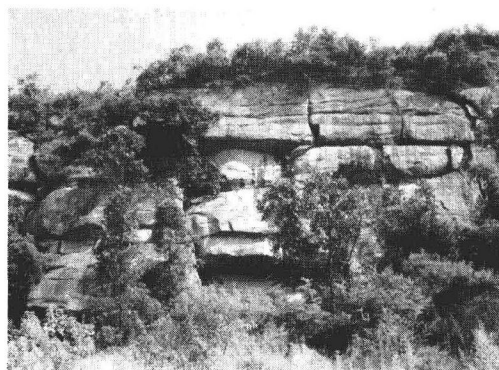


图 1.9 万州枇杷坪底部诱发破坏型危岩

## 1.2 荷载类型及其组合

作用在危岩体上的荷载主要包括危岩体自重、作用在危岩体上的地震力以及存在于危岩体主控结构面内的裂隙水产生的裂隙水压力。

### 1.2.1 重力及地震力

对于一个具体的危岩而言,通过现场勘查可以确定其几何尺寸(图 1.10),即

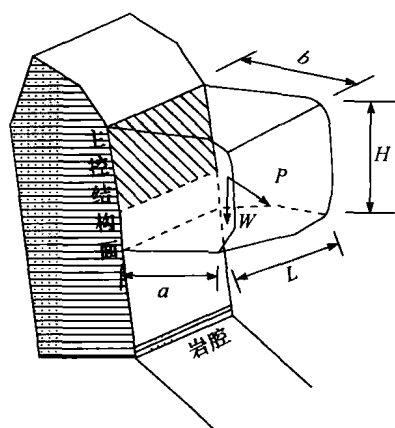


图 1.10 危岩体几何尺寸

沿着陡崖或陡坡走向方向的长度,用  $L$  表示(m);宽度是指沿着陡崖或陡坡倾向方向的长度,通常与临空面垂直,可简化为梯形,顶部宽度用  $b$  表示(m),底部宽度用  $a$  表示(m);高度  $H$  为危岩体顶部至底部的高差(m)。

通过几何分析,可以确定危岩体的重心位置,并假定危岩体自重产生的重力和由于地震及人工振动产生的地震力均作为集中力作用在危岩体重心上,分别由下列公式计算:

$$W = \frac{1}{2}(a+b)LH\gamma \quad (1.1)$$

$$P = \mu W \quad (1.2)$$

式中,  $W$  为危岩体自重(kN);  $\gamma$  为危岩体容重( $\text{kN}/\text{m}^3$ );  $P$  为作用在危岩体上的地震力(kN),采用地震拟静力,地震系数  $\mu$  取水平地震系数时,由式(1.2)计算的地震力为水平地震力,作用力方向水平,地震系数  $\mu$  取竖向地震系数时,由式(1.2)计算的地震力为竖向地震力,作用力方向垂直向下。据《建筑抗震设计规范》(GB50011—2001),当工程所在区抗震设防烈度超过 VI 度(含 VI 度)时,需考虑地震力,如抗震设防烈度为 VI 度时,水平地震系数取 0.05,竖向地震系数取 0.03。

### 1.2.2 裂隙水压力

存在于危岩主控结构面内的裂隙水产生的静水压力即为裂隙水压力,按下式计算:

$$Q = \frac{1}{2}\gamma_w e_1^2 \quad (1.3)$$

式中,  $Q$  为危岩裂隙水压力( $\text{kN}/\text{m}$ ),垂直于主控结构面,作用在主控结构面尖端以上  $1/3$  充水高度处;  $\gamma_w$  为裂隙水容重( $\text{kN}/\text{m}^3$ );  $e_1$  为主控结构面内尖端以上的充水高度(m),一般天然状态取主控结构面贯通段的  $1/3$  长度,暴雨状态取  $2/3$  长度。

然而,根据对三峡库区近百个危岩裂隙水压力的现场观测表明,危岩主控结构面内的裂隙水压力观测值与理论计算值之间存在较大误差,测试值普遍小于理论值,引出了静水压力公式究竟能否直接用于确定危岩裂隙水压力或者利用静水压力公式计算裂隙水压力的具体误差究竟多大等问题,鉴于此,陈洪凯等通过裂隙水

压力模型试验,引入折减系数 $\xi$ ,建立危岩裂隙水压力修正计算式:

$$Q = \frac{1}{2} \xi \gamma_w e_i^2 \quad (1.4)$$

式中, $\xi$ 为裂隙水压力折减系数,计算方法如下:

$$\xi = k_1 a_0^2 + k_2 a_0 + k_3 \quad (1.5)$$

式中, $a_0$ 为主控结构面平均开度(cm);修正系数 $k_1$ 、 $k_2$ 和 $k_3$ 分别取0.57、-0.36和0.45。

式(1.4)的实用性界定在主控结构面开度为0.2~5.0cm。

### 1.2.3 荷载组合

作用在危岩体上的荷载包括危岩体自重、裂隙水压力(天然状态)、裂隙水压力(暴雨状态)和地震力,按照出现频率拟定三种荷载组合(工况)。

组合一:自重+裂隙水压力(天然状态)(倾倒式危岩可不考虑)

组合二:自重+裂隙水压力(暴雨状态)(坠落式危岩可不考虑)

组合三:自重+裂隙水压力(天然状态)+地震力

三种荷载组合中,计算所得危岩稳定系数最小者为设计荷载,而对于处于特大型水利工程区(如三峡库区)或高频率强烈地震区(如横断山区)的一级防治工程,设计荷载组合调整为“自重+裂隙水压力(暴雨状态)+地震力”。

### 1.2.4 主控结构面抗剪强度参数

#### 1. 规范法

《地质灾害防治工程设计规范》(DB50/5029—2004)根据主控结构面贯通部分和未贯通部分的强度参数,按照长度加权建立了危岩主控结构面综合强度参数的等效算法,即

$$c = \frac{(H_0 - e_0)c_1 + e_0 c_0}{H_0} \quad (1.6)$$

$$\varphi = \frac{(H_0 - e_0)\varphi_1 + e_0 \varphi_0}{H_0} \quad (1.7)$$

式中, $c$ 和 $\varphi$ 分别为危岩主控结构面的等效黏结力(kPa)和等效内摩擦角( $^\circ$ ); $c_0$ 和 $\varphi_0$ 分别为危岩主控结构面贯通段岩石的平均黏结力(kPa)和平均内摩擦角( $^\circ$ ); $c_1$ 和 $\varphi_1$ 分别为危岩主控结构面未贯通段岩石的黏结力(kPa)和内摩擦角( $^\circ$ ),通常取组成危岩体的完整岩石相应参数的0.7倍; $H_0$ 和 $e_0$ 分别为危岩体高度和主控结构面贯通段长度,单位均为m。

#### 2. 贯通率法

为了获取主控结构面不同贯通条件下的抗剪强度参数 $c$ 、 $\varphi$ 值,通过预制不同

贯通率的高标号砂浆试件,试件尺寸为长(20cm)×高(10cm)×宽(5cm),贯通率取 11 种,即 10%、30%、50%、55%、60%、65%、70%、75%、80%、85%和 90%。对 11 组共计 63 个试件进行不同法向荷载作用下的直剪试验,运用 YE2539 型高速静态应变仪进行数据自动采集。

假定  $R$  为主控结构面的贯通率(%),构建抗剪强度参数状态方程:

$$c = c(R, [R_c]) \quad (1.8)$$

$$\varphi = \varphi(R, [\varphi_c]) \quad (1.9)$$

式中,  $[R_c]$  为岩石的单轴抗压强度标准值(MPa);  $[\varphi_c]$  为岩石的内摩擦角标准值(°),可通过现场取样,在室内进行常规试验获取。

根据试验获取的抗剪强度参数,分别整理为  $(c_i, R_i)$  和  $(\varphi_i, R_i)$  数列,并对试验获取的主控结构面强度参数  $c$ 、 $\varphi$  值进行无量纲化处理,分别定义为当量黏结力  $\bar{c}$  和当量摩擦角  $\bar{\varphi}$ 。其中,当量黏结力由试验黏结力除以试件的单轴抗压强度标准值计算得到,当量摩擦角由试验摩擦角除以试件的内摩擦角计算得到。于是,  $(c_i, R_i)$  和  $(\varphi_i, R_i)$  数列分别转化为  $(\bar{c}_i, R_i)$  和  $(\bar{\varphi}_i, R_i)$  数列,所得非线性拟合方程分别为

$$\bar{c} = (-0.0160R^2 + 0.9388R + 52.815) \times 10^{-4} \quad (1.10)$$

$$\bar{\varphi} = (-0.0011R^2 + 0.0729R + 8.996) \times 10^{-1} \quad (1.11)$$

式中,主控结构面贯通率  $R$  用百分数表示,拟合系数均大于 0.95。

假定不同贯通率的主控结构面抗剪强度参数符合式(1.10)和式(1.11)关系,则主控结构面的强度参数  $c$ 、 $\varphi$  值分别由下面两式计算。

$$c = k_c \bar{c} [R_c] \quad (1.12)$$

$$\varphi = k_\varphi \bar{\varphi} [\varphi_0] \quad (1.13)$$

式中,  $k_c$  和  $k_\varphi$  为强度参数修正系数,可根据防治工程安全等级,按照下列原则取值:

一级:  $k_c = 0.80$ ,  $k_\varphi = 0.75$ ; 二级:  $k_c = 0.85$ ,  $k_\varphi = 0.80$ ; 三级:  $k_c = 0.90$ ,  $k_\varphi = 0.85$ 。

## 1.3 危岩稳定性分析

### 1.3.1 危岩稳定性评价标准

根据危岩稳定系数可将危岩稳定性分为不稳定、基本稳定和稳定三种状态(表 1.1),《地质灾害防治工程设计规范》(DB50/5029—2004)提出了防治工程安全系数标准(表 1.2)。一般地,处于稳定状态的危岩灾害体可以不采用工程防治措施,处于基本稳定状态的危岩除采用监测、地表及地下排水措施外,尚需在必要部位采用局部工程治理;处于不稳定状态的危岩应采取系统的工程治理,治理后的危岩稳定系数应满足防治工程安全系数要求。

表 1.1 危岩稳定性评价标准

| 危岩破坏模式 | 不稳定  | 基本稳定    | 稳 定  |
|--------|------|---------|------|
| 滑塌式危岩  | <1.0 | 1.0~1.3 | >1.3 |
| 倾倒式危岩  | <1.0 | 1.0~1.5 | >1.5 |
| 坠落式危岩  | <1.0 | 1.0~1.5 | >1.5 |

注：表中数据为危岩体的稳定系数。

表 1.2 危岩防治工程安全系数

| 项 目   | 一 级  | 二 级  | 三 级  |
|-------|------|------|------|
| 滑塌式危岩 | 1.40 | 1.30 | 1.20 |
| 倾倒式危岩 | 1.50 | 1.40 | 1.30 |
| 坠落式危岩 | 1.60 | 1.50 | 1.40 |

注：表中数据为危岩治理后应达到的安全等级，安全等级简述如下。

一级：危及县和县级以上城市、大型工矿企业、交通枢纽及重要公共设施，破坏后果特别严重。

二级：危及一般城镇、居民集中区、重要交通干线、一般工矿企业等，破坏后果严重。

三级：除一级、二级以外的地区。

1.3.2 危岩稳定系数计算方法

在进行危岩稳定系数计算时，可将危岩体视为完全刚性块体，采用极限平衡理论推导不同类型危岩在不同荷载组合下的稳定系数计算方法。

1. 滑塌式危岩稳定系数计算方法

滑塌式危岩计算模型见图 1.11，图中 AB 为主控结构面长度(m)，其倾角为 $\beta(^{\circ})$ ，等效抗剪强度参数为 $c、\varphi$ 。W 为危岩体的自重(kN)，P 为水平地震力(kN)；Q 为危岩裂隙水压力(kN)。针对主控结构面进行分解如下。

法向分量：

$$N = W\cos\beta - P\sin\beta - Q \quad (1.14)$$

切向分量：

$$T = W\sin\beta + P\cos\beta \quad (1.15)$$

假定法向分量和切向分量沿主控结构面均匀分布，则平均法向应力 $\sigma$ 和平均剪应力 $\tau$ 分别由式(1.16)和式(1.17)计算。

$$\sigma = \frac{N\sin\beta}{H} \quad (1.16)$$

$$\tau = \frac{T\sin\beta}{H} \quad (1.17)$$

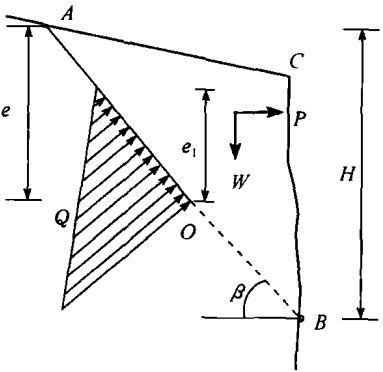


图 1.11 滑塌式危岩计算模型

进而可得主控结构面的抗剪强度为

$$\tau_f = c + \sigma \tan \varphi \quad (1.18)$$

则危岩的稳定系数

$$F_s = \frac{\tau_f}{\tau} = \frac{(W \cos \beta - P \sin \beta - Q) \tan \varphi + c \frac{H}{\sin \beta}}{W \sin \beta + P \cos \beta} \quad (1.19)$$

对于组合一,  $e_1 = e/3$ , 裂隙水压力和危岩稳定系数分别由式(1.20)和式(1.21)计算。

$$Q = \frac{1}{2} \gamma_w e_1^2 l = \frac{1}{18} \gamma_w e^2 l \quad (1.20)$$

$$F_s = \frac{(W \cos \beta - Q) \tan \varphi + c \frac{H}{\sin \beta}}{W \sin \beta} \quad (1.21)$$

式中,  $l$  为危岩体沿陡崖或陡坡走向方向的长度(m);  $e$  为主控结构面贯通段的垂直高度(m)。

对于组合二,  $e_1 = 2e/3$ , 裂隙水压力由式(1.22)计算, 将其代入式(1.21)得该荷载条件下危岩的稳定系数。

$$Q = \frac{1}{2} \gamma_w e_1^2 l = \frac{2}{9} \gamma_w e^2 l \quad (1.22)$$

对于组合三, 裂隙水压力由式(1.22)计算, 危岩稳定系数由式(1.21)计算。

## 2. 倾倒式危岩稳定系数计算方法

倾倒式危岩计算模型见图 1.12 和图 1.13, 图中  $C$  为危岩体底部与基座接触的可能倾覆点, 其余变量同前。

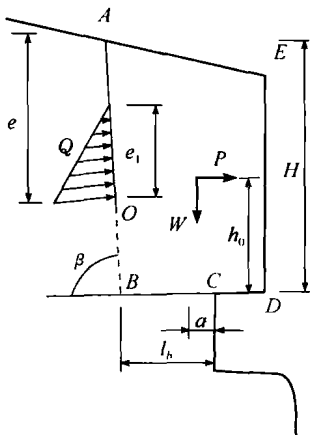


图 1.12 第一类倾倒式危岩计算模型

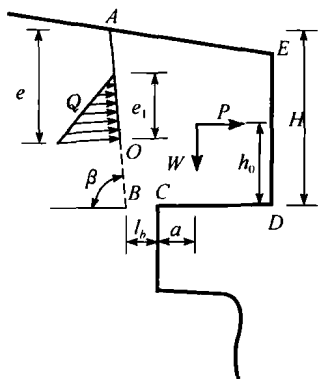


图 1.13 第二类倾倒式危岩计算模型

(1) 危岩体重心在倾覆点内侧时(图 1.12), 围绕可能倾覆点  $C$ , 倾覆力矩为