



教育部高等学校地矿学科
教学指导委员会采矿工程专业规划教材



丛书主编 古德生

岩土边坡 稳定性分析

饶运章 主编

YANTUBIANPO
WENDINGXING FENXI



中南大学出版社

www.csupress.com.cn

教育部高等学校地矿学科教学指导委员会
采矿工程专业规划教材

岩土边坡稳定性分析

主 编 饶运章

编写人员 朱洪威 潘建平 肖广哲



中南大学出版社
www.csupress.com.cn

图书在版编目(CIP)数据

岩土边坡稳定性分析/饶运章主编. —长沙:中南大学出版社,
2012.01

ISBN 978-7-5487-0444-7

I. 岩... II. 饶... III. 岩石-边坡稳定性-稳定分析-
高等学校-教材 IV. TU457

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 253025 号

岩土边坡稳定性分析

主编 饶运章

☐责任编辑 刘 辉

☐责任印制 文桂武

☐出版发行 中南大学出版社

社址:长沙市麓山南路

邮编:410083

发行科电话:0731-88876770

传真:0731-88710482

☐印 装 长沙市宏发印刷厂

☐开 本 787×1092 1/16 ☐印张 10.5 ☐字数 257 千字 ☐插页

☐版 次 2012 年 1 月第 1 版 ☐2012 年 1 月第 1 次印刷

☐书 号 ISBN 978-7-5487-0444-7

☐定 价 25.00 元

图书出现印装问题,请与经销商调换

内 容 简 介

.....

本书系统地介绍了岩土边坡稳定性分析的概念、稳定性计算、加固技术、滑坡监测等内容。全书分为11章，主要包括边坡的概念与分类，滑塌模式与识别，边坡稳定性设计流程，水文地质与工程地质调查，边坡岩土抗剪强度计算与测试方法，岩基、岩坡、土坡等平面滑动稳定性分析，楔体滑动稳定性分析，圆弧滑动稳定性分析，路堑边坡稳定性分析，废石场稳定性分析，尾矿坝稳定性分析，边坡加固技术，滑坡监测与预报等。本书还以布里渊光时域反射计(BOTDR)为例，对最先进的无损健康光纤监测技术也做了介绍。

本书可作为采矿工程、土木工程、安全工程、工程地质等专业本科生教材，也可供相应专业的研究生使用以及相关专业的科研、设计和施工技术人员借鉴参考。

教育部高等学校地矿学科教学指导委员会
采矿工程专业规划教材

编 审 委 员 会

丛书主编

古德生

编委会委员

(按姓氏笔画为序)

王新民	伍法权	李夕兵	刘爱华	杨 鹏
吴 超	吴立新	张明旭	陈建宏	周科平
赵跃民	赵 文	侯克鹏	饶运章	姚书振
殷 昆	高永涛	黄润秋	廖立兵	

序

站在 21 世纪全球发展战略的高度来审视世界矿业，可以清楚地看到，矿业作为国民经济的基础产业，与其他传统产业一样，在现代科学技术突飞猛进的推动下，也正逐步走向现代化。就金属矿床开采领域而言，现今的采矿工程科学技术与 20 世纪 90 年代以前的相比，已经不可同日而语。为了适应矿业快速发展的形势，国家需要大批具有现代采矿知识的专业人才，因此，作为优秀专业人才培养的重要基础建设之一——教材建设就显得至关重要。

在 2006—2010 年地矿学科教学指导委员会（以下简称地矿学科教指委）的成立大会上，委员们一致认为，抓教材建设是本届教学指导委员会的重要任务之一，特别是金属矿采矿工程专业的教材，现在多是 20 世纪 90 年代出版的，教材更新已迫在眉睫。2006 年 10 月 18—20 日在中南大学召开了第一次地矿学科教指委全体会议，会上委员们就开始酝酿采矿工程专业系列教材的编写拟题；之后，中南大学出版社主动承担该系列教材的出版工作，并积极协助地矿学科教指委于 2007 年 6 月 22—24 日在中南大学召开了“全国采矿工程专业学科发展与教材建设研讨会”，来自全国 17 所院校的金属、非金属矿床采矿工程专业和部分煤矿开采专业的领导及骨干教师代表参加了会议，会议拟定了采矿工程专业系列教材的选题和主编单位；从那以后，地矿学科教指委和中南大学出版社又分别在昆明和长沙召开了两次采矿工程专业系列教材编写大纲的审定工作会议。

本次新规划出版的采矿工程专业系列教材侧重于金属矿

床开采领域。编审委员会通过充分的沟通和研讨，在总结以往教学和教材编撰经验的基础上，以推动新世纪采矿工程专业教学改革和教材建设为宗旨，提出了采矿工程专业系列教材的编写原则和要求：①教材的体系、知识层次和结构要合理，要遵循教学规律，既要有利于组织教学又要有利于学生学习；②教材内容要体现科学性、系统性、新颖性和实用性，并做到有机结合；③要重视基础，又要强调采矿工程专业的实践性和针对性；④要体现时代特性和创新精神，反映采矿工程学科的新技术、新方法、新规范、新标准等。

采矿科学技术在不断发展，采矿工程专业的教材需要不断完善和更新。希望全国参与采矿工程专业教材编写的专家们共同努力，写出更多、更好的采矿工程专业新教材。我们相信，本系列教材的出版对我国采矿工程专业高级人才的培养和采矿工程专业教育事业的发展将起到十分积极的推进作用，对我国矿山安全、经济、高效开采，保障我国矿业持续、健康、快速发展也有着十分重要的意义。



中南大学教授

中国工程院院士

教育部地矿学科教指委主任

前 言

随着国民经济的稳定发展,尤其是矿业和交通运输业的快速发展,露天矿边坡、废石场和尾矿坝,以及公路铁路的路堑边坡和填方路堤等岩土边坡工程的数量急剧增加,边坡失稳、滑塌等灾害事故也不断增加,边坡稳定性问题日益受到重视和关注,并与国家财产安全和人类生命安全紧密相连。

《岩土边坡稳定性分析》是全国工程教育专业论证标准之专业补充标准规定的采矿工程专业的主干课程。知识点主要包括边坡破坏的形式、各类边坡的特点、边坡稳定性研究;边坡稳定性影响因素、结构面调查与分析方法;边坡稳定性计算方法、防治滑坡的措施以及边坡监测、地面监测和地下监测方法。

本书是编者为十几届采矿工程专业本科生讲授《边坡稳定性分析》和硕士生讲授《岩土边坡工程》的讲义以及边坡工程的科研成果整理而成,但作为教材,对知识点的介绍则力求系统、完整,以便读者全面掌握边坡工程及其稳定性分析与加固的知识体系、基本概念和理论方法;对内容的组织则力求简明、实用,以便读者在从事边坡工程及其稳定性分析与加固时能够理论联系实际、学以致用、创造性地解决工程难题。针对近年来频繁出现的尾矿库溃坝、废石场滑塌、路堑滑坡等重大边坡灾害事故,特别安排了相应章节,以飨读者。

本书由江西理工大学饶运章教授编著,其中第7章由朱洪威编写,第8章由肖广哲编写,第9章由潘建平编写,其余各章由饶运章编写,全书由饶运章统稿。本书参考了许多同行专家的教材、专著、论文和部分科研成果,还引用了一些网络资料和照片,在此特向原作者(或所有权人或版权人)致以

衷心感谢,对引用文献而漏标的作者表示真诚歉意。教育部高等学校地矿学科教学指导委员会和本系列规划教材编委会的多位教授对本书内容提出了宝贵意见,中南大学出版社和江西理工大学为本书出版提供了大力支持和资助,还有我指导的历届十几位研究生参与了本书编录、绘图、校对等工作,在此一并表示感谢。

由于编者水平有限,书中缺点和错误在所难免,敬请读者批评指正。

饶运章

目 录

第1章 绪论	(1)
1.1 边坡及其分类	(1)
1.1.1 边坡概念	(1)
1.1.2 边坡分类	(2)
1.1.3 滑坡因素	(2)
1.2 边坡滑塌模式及识别	(2)
1.2.1 边坡滑塌模式	(2)
1.2.2 边坡滑塌识别方法	(3)
1.3 边坡稳定性设计	(8)
1.3.1 边坡稳定性设计流程	(8)
1.3.2 影响边坡稳定性设计因素	(9)
本章习题	(11)
第2章 工程地质、水文地质调查	(13)
2.1 地质间断分类	(13)
2.2 工程地质调查	(13)
2.3 水文地质调查	(17)
本章习题	(26)
第3章 边坡岩土抗剪强度计算	(27)
3.1 概述	(27)
3.2 岩坡抗剪强度计算	(27)
3.2.1 岩坡稳定性分析	(27)
3.2.2 岩体抗剪强度	(28)
3.3 土坡抗剪强度计算	(35)
3.3.1 土坡稳定性分析	(35)
3.3.2 土体抗剪强度	(35)

本章习题	(37)
第4章 平面滑动稳定性分析	(38)
4.1 岩基抗滑稳定性分析	(38)
4.1.1 表层滑动稳定性计算	(38)
4.1.2 深层滑动稳定性计算	(39)
4.2 岩坡抗滑稳定性分析	(42)
4.2.1 岩坡沿单平面滑动稳定性计算	(42)
4.2.2 岩坡沿双平面滑动稳定性计算	(44)
4.2.3 力的图解法岩坡稳定性计算	(45)
4.2.4 力的迭代法岩坡稳定性计算	(47)
4.3 土坡抗滑稳定性分析	(48)
4.3.1 黏性土土坡稳定性计算	(48)
4.3.2 无黏性土土坡稳定性计算	(48)
本章习题	(49)
第5章 楔体滑动稳定性分析	(51)
5.1 概述	(51)
5.2 楔体滑动稳定性计算	(51)
本章习题	(54)
第6章 圆弧滑动稳定性分析	(55)
6.1 概述	(55)
6.2 瑞典圆弧法	(55)
6.3 毕肖普法	(59)
6.4 摩擦圆法	(60)
6.5 简布法	(62)
本章习题	(66)
第7章 路堑边坡稳定性分析	(67)
7.1 概述	(67)
7.2 深路堑边坡稳定性设计	(68)
7.3 岩石路堑边坡稳定性计算	(70)

7.4 碎石土路堑边坡稳定性计算	(75)
7.5 土质路堑边坡稳定性设计	(76)
本章习题	(77)
第8章 废石场稳定性分析	(78)
8.1 废石场滑塌模式及稳定性影响因素	(78)
8.1.1 废石场滑塌模式	(78)
8.1.2 废石场稳定性影响因素	(79)
8.2 废石场稳定性计算	(85)
8.3 废石场稳定化措施	(87)
8.4 矿山泥石流及防治	(90)
8.4.1 泥石流概述	(90)
8.4.2 矿山泥石流	(95)
8.4.3 矿山泥石流防治	(98)
本章习题	(101)
第9章 尾矿坝稳定性分析	(103)
9.1 概述	(103)
9.2 尾矿坝破坏模式及稳定性影响因素	(107)
9.2.1 尾矿坝破坏模式	(107)
9.2.2 尾矿坝稳定性影响因素	(109)
9.3 尾矿坝稳定性计算	(110)
9.3.1 尾矿坝稳定性计算一般要求	(110)
9.3.2 尾矿坝稳定性计算方法	(111)
9.3.3 尾矿坝稳定性计算示例	(113)
9.4 尾矿坝加固措施	(116)
9.4.1 初期坝加固处理措施	(116)
9.4.2 后期子坝加固处理措施	(117)
9.4.3 沉积滩加固处理措施	(118)
9.4.4 尾矿坝常见排渗降水措施	(118)
本章习题	(119)

第 10 章 边坡加固技术	(120)
10.1 概述	(120)
10.2 疏干排水	(122)
10.2.1 水对边坡稳定的影响	(122)
10.2.2 水压对抗剪强度的影响	(123)
10.2.3 常用的疏、排水方法	(124)
10.3 机械加固	(125)
10.3.1 锚杆(索)加固	(125)
10.3.2 抗滑桩加固	(128)
10.3.3 挡土墙加固	(129)
10.4 其他加固技术	(130)
本章习题	(131)
第 11 章 边坡监测和滑坡预报	(132)
11.1 概述	(132)
11.2 边坡监测	(132)
11.2.1 边坡监测技术	(132)
11.2.2 边坡位移监测	(133)
11.2.3 边坡应力测试	(140)
11.2.4 数值计算方法	(142)
11.3 滑坡预报	(143)
本章习题	(144)
参考文献	(145)
附录 I 主要符号表	(148)
附录 II 课程考试大纲	(151)

第1章 绪论

1.1 边坡及其分类

1.1.1 边坡概念

倾斜的地坡面称为坡或斜坡，因斜坡往往构成了工程边界，故又称为边坡（如露天矿最终边坡、路堑边坡等），如图1-1、图1-2及照片1-1~1-6所示。

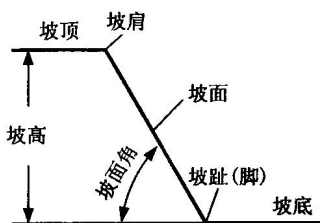


图1-1 边坡示意图

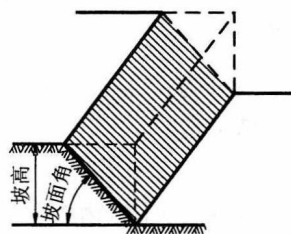
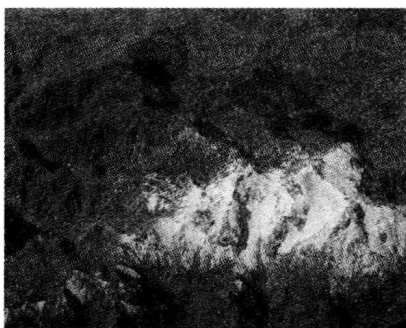


图1-2 边坡几何形状图



照片1-1 黄果树瀑布(台阶)



照片1-2 西北高原自然山坡



照片1-3 某露天矿开采边坡



照片1-4 边坡(土坡)加固现场



照片 1-5 排土场边坡



照片 1-6 三峡新滩滑坡

边坡的构成要素主要有坡顶、坡底、坡面；坡肩、坡脚(趾)；坡高、坡面角。

1.1.2 边坡分类

按成因不同分为：自然边坡和人工边坡。自然边坡由地壳隆起或下陷形成，人工边坡由人工开挖或堆填形成。

按物料不同分为：土质边坡和岩质边坡。

岩、土的物料构成(矿物成分)并无本质差别，但结构有本质差别，甚至完全不同。

岩石结构主要是地质界面，如物质分界面(矿岩界面、岩层界面)、不连续面(层理、节理、断层)、不整合面、软夹层等；土的结构主要是孔隙。因此，岩石的较大位移主要是不连续面，岩石含水主要是裂隙水；土的较大位移主要是孔隙和变形，土的含水主要是孔隙水。

1.1.3 滑坡因素

不管岩坡或土坡，滑坡的根源都是破坏了坡体的力学平衡，使坡体处于不稳定状态，包括：

- ①应力过大：破坏了坡体力学平衡；
- ②强度过低：导致滑面抗剪强度不足；
- ③地质缺陷：岩坡主要是地质界面，土坡主要是孔隙；
- ④地下水：弱化地质界面抗剪力强度和土粒黏结力，产生静/动水压力；
- ⑤爆破震动：动力效应的影响；
- ⑥人为破坏：切断了坡脚，降低了抗滑力；
- ⑦不利产状：裂隙等地质缺陷的不利产状导致了滑坡；
- ⑧地下开采：地下开采对疏水稳坡有利，但对岩移失稳不利。

1.2 边坡滑塌模式及识别

1.2.1 边坡滑塌模式

识别潜滑体及其滑动特征的工作，称为滑塌模式识别。

如图 1-3 所示,常见的边坡滑塌模式主要有:平面滑坡(图 a)、楔体滑坡(图 b)、圆弧滑坡(图 c)、倾倒破坏。

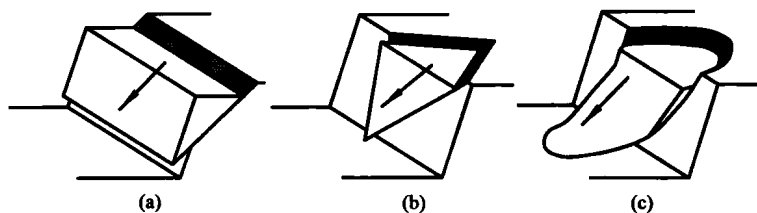


图 1-3 边坡滑塌模式示意图

(1) 平面滑坡

平面滑坡的滑面通常由沉积面或软夹层等地质间断面构成。

当滑体的滑动方向与滑面的倾向一致时,称为顺层滑坡。

(2) 楔体滑坡

楔体滑坡的滑面由两个相交切的地质间断面构成,它们与坡面及坡顶组合将岩体切割成四面楔体。

楔体的滑动方向与两滑面交线的倾向一致。

(3) 圆弧滑坡

土坡(包括土坡、破碎岩体、尾砂坝、废石场)中无控制性地质间断面,滑面的形成完全取决于土的力学性质。

均质土坡和强烈破碎的岩坡的滑面在剖面上接近为圆弧形。

(4) 倾倒破坏

倾倒破坏的岩体具有薄层状或柱状或块状结构,且其倾角陡、岩体倾向与边坡倾向相反。

常见的倾倒破坏有块体倾倒和弯曲倾倒。

(5) 不太常见的滑塌模式

岩块折断、蠕动、薄板翘曲以及两种常见滑塌模式复合等。

1.2.2 边坡滑塌识别方法

识别边坡滑塌的方法很多,主要有:

- ①弹塑性力学计算方法;
- ②刚体极限平衡分析法;
- ③极射赤平投影识别法;
- ④石根华关键块体识别法。

1. 弹塑性力学计算方法

弹塑性力学计算方法主要以微元为单位,通过计算微元的应力、应变来判断微元是否达到屈服、拉伸、断裂、弯曲等破坏,以此判断是否导致材料的局部或全域性破坏。

相关内容请参阅弹塑性力学和材料力学,在此不一一赘述。

2. 刚体极限平衡分析法

刚体极限平衡分析方法是较为成熟、应用最多的边坡稳定性分析方法，也是本书最主要的内容。

(1) 极限平衡分析

岩土体是非均质、非线性、不连续的各向异性体，滑塌和破坏问题的分析已超出弹性力学讨论的范围，理应采用塑性或弹塑性力学加以研究。

弹塑性力学分析法要求按某种破坏准则，用“严格”推理的方法寻找出滑移面，但因边坡问题涉及：大范围岩体、多种岩性岩石、地质间断面、地下水、隐藏于岩面之下难于查清全部细节等因素，致使力学建模非常困难，故放弃了“通过描述各个岩元变形发展的整个历程的方法”来研究边坡稳定问题，而采用“极限平衡分析法”。

极限状态是指抗剪阻力增加“一点”则平衡，减少“一点”则滑动。

极限平衡分析法的特点是：滑移面是事先假定的、任意的，滑移面包含的屈服区中破坏判据并非处处被满足，而是整体满足。

岩体中的真实滑移面取决于地质间断面的空间分布和抗剪强度。

滑塌是否发生，取决于滑体有多大的滑动力（致滑力）和滑床能提供多大的抵抗力（抗滑力）。

(2) 安全系数

定义一：安全系数

$$F_s = \frac{\text{抗滑力(矩)}}{\text{致滑力(矩)}} = \frac{T}{R} = \frac{M_T}{M_R} \quad (1-1)$$

$F_s < 1$ 时，说明抗滑力 < 致滑力，肯定成为实际滑塌体。

$F_s = 1$ 时，说明抗滑力 = 致滑力，称为临界或极限状态。

$F_s > 1$ 时，说明抗滑力 > 致滑力，可能不会成为实际滑塌体。

定义二：使 c 、 φ 值降低的系数。

(3) 安全系数 F_s 取值

$F_s > 1$ ，不同行业有不同要求，尚无统一规定。霍克认为矿山工程一般取 $F_s = 1.3$ ，关键边坡 $F_s = 1.5$ ；计算时如果考虑了地震力则 $F_s \geq 1.1$ ，如果未考虑地震力则 $F_s = 1.15 \sim 1.3$ 。

$F_s < 1$ ，可减少挖方量——接受滑坡（有滑坡预兆时进行疏水或局部加固，甚至让其滑塌，有时效益更好）。

$F_s > 1$ 的理由：岩体强度的不确定（试验误差，取样的局限性）；应保有安全富裕度；地质力学模型与真实条件的差异；局部软弱不稳固地段引起总强度的降低；长期暴露引起渐进性弱化。

3. 极射赤平投影识别法

边坡滑塌之所以有不同的破坏（滑塌）模式，主要是由于地质间断面（滑塌面）与开挖面（自由面/释放面）之间有不同的几何组合关系引起的，这种几何组合关系可用极射赤平投影（Stereographic projection）简称赤平投影法表示。常用的赤平投影有吴尔福网（简称吴氏网，也称等角距投影网）和施密特网（简称施氏网，也称等面积投影网）。

吴氏网与施密特网基本特点相同，两者的主要区别在于：球面上大小相等的小圆在吴氏网上的投影仍然是圆，投影圆的直径角距相等，但由于在赤平面上所处位置不同，投影圆的