

Rock
Slope
Engineering



岩石边坡工程

熊传治 等 著

 中南大学出版社
www.csupress.com.cn

岩石边坡工程

Rock Slope Engineering

熊传治 等著

中南大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

岩石边坡工程/熊传治等著. —长沙:中南大学出版社,2010.10
ISBN 978-7-5487-0116-3

I. 岩... II. 熊... III. ①岩石-边坡-研究 IV. P642.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 194982 号

岩石边坡工程

熊传治 等著

责任编辑 史海燕

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 长沙市华中印刷厂

开 本 787×1092 1/16 印张 21.5 字数 530 千字 插页

版 次 2010年10月第1版 2010年10月第1次印刷

书 号 ISBN 978-7-5487-0116-3

定 价 48.00 元

图书出现印装问题,请与出版社调换

作者简介

熊传治，技术科学博士，教授级高级工程师，1991年起获国务院颁发的政府特殊津贴。从事露天矿边坡稳定性研究30余年，参加过美国与澳大利亚边坡科研合作项目2项，主持并参加国家“七五”“八五”边坡工程攻关项目2项以及多项省、部级科研项目。获国家科技进步奖二等奖1项、三等奖1项，冶金部科技进步奖一等奖1项、二等奖2项，有色金属总公司科技进步奖三等奖1项，辽宁省科技进步奖1项。

参加了《露天采矿手册》(煤炭工业出版社)和《采矿手册》(冶金工业出版社)有关章节的编写和《中国露天矿边坡稳定性研究》(中国科学技术出版社)第8、11、13章的编写，在国内外公开发行的期刊上发表论文数十篇。

1998年10月退休，1999—2003年受湖南省交通科学研究院聘用，从2004年起至今受长沙矿冶研究院返聘。

内容提要

本书共分为 6 篇 19 章，包括影响岩石边坡稳定的地质构造、岩性、地下水条件，极限平衡分析方法的变分分析与精确解法，数值分析方法的有限元、边界元、离散元计算，概率统计方法的破坏概率及 Monte Carlo 模拟计算，边坡受天然地震力及工程爆破振动力的动力稳定性分析以及边坡加固与滑坡监测等内容。

前 言

本书是熊传治和他的研究生(毛锡平、徐大威、李建平、夏远发、谢学斌)在“七五”“八五”期间国家科技攻关项目的科研成果和在返聘期间与其他作者的共同成果。

本书的写作从2004年下半年开始,到2009年上半年写出初稿。本书由熊传治、孙晓然、彭状、王新建、张映德编著。在本书写作期间孙晓然高工和彭状工程师为本书的结构、章节和实例、写作计划作了安排。孙晓然和熊传治所带的硕士研究生王新建参加了第5、16章的编写,张映德参加了第6、7章的编写。熊传治编写了其余章节,并对所有章节进行统编。

本书理论与实用并重,为了保持学科系统性和先进性,本书除反映作者的创新点外,还系统论述了国内外已有的先进成果。

本书的主要创新点有:

1)在边坡稳定性的极限平衡分析中,推导了适应任何坡面形态和滑动面类型的普遍积分表达式——精确解法,其中,安全系数为最小的临界滑动面是用共轭梯度法的F-R法求解的,在编程中用了黄金分割法(即0.618法)加速解的搜索。

2)在数值分析方面,涉及有限元、边界元、离散元在边坡稳定方面的应用和对已有软件udec和ansys的二次开发,例如在有地下水和热应力作用下的计算边坡安全系数值。

3)在边坡动力稳定分析中,区别对待爆破震动力和天然地震力,对质点震动测量作了详细介绍并提出了计算动力安全系数的方法。

4)所有的创新及软件的二次开发部分均有编程计算,给出了程序框图及数据文件的格式。

本书强调概率分析、Monte Carlo模型及边坡加固、边坡监测部分的实际应用,实例交待详细,便于推广应用。本书可作为相关学科的教科书,也可供矿山、公路、铁路、水工部门从事边坡路堑、路堤和坝基、坝肩稳定的工程技术人员参考使用。

目 录

第1篇 基础

第1章 总论	(3)
1.1 影响边坡稳定性的因素	(3)
1.1.1 自然因素	(3)
1.1.2 人为因素	(6)
1.2 边坡分类	(6)
1.2.1 根据边坡成因分类	(6)
1.2.2 根据边坡介质材料分类	(7)
1.2.3 根据边坡用途分类	(7)
1.2.4 国际分类法	(7)
1.2.5 国内分类法	(7)
1.3 结构面分级和岩体结构的基本类型	(7)
1.4 边坡破坏模式与破坏判别准则	(8)
1.4.1 等角度投影网(吴氏网)	(8)
1.4.2 等面积投影网(斯氏网)	(9)
1.5 常见岩石边坡破坏模式及其判别准则	(12)
1.5.1 概述	(12)
1.5.2 滑动破坏	(12)
1.5.3 倾倒破坏	(15)
1.5.4 溃屈(板裂)破坏	(16)
第2章 岩块与岩体强度	(17)
2.1 岩石物理力学性质的尺寸效应	(17)
2.2 岩块的单轴、三轴抗压强度	(17)
2.3 岩块的单轴抗拉强度	(19)
2.4 岩块的抗剪强度指标 C , φ 值的确定	(19)
2.5 室内中型剪与现场原位大剪试验	(20)
2.5.1 室内中型剪	(20)
2.5.2 现场原位大剪试验	(21)
2.6 岩块弹性参数的确定	(22)

2.6.1	单轴压缩试验	(22)
2.6.2	三轴压缩试验	(23)
2.7	C, φ 值的工程处理	(23)
2.8	节理化岩体的强度特性	(23)
2.8.1	岩石节理变形特性	(23)
2.8.2	节理特性参数的测定	(24)
2.8.3	岩石节理闭合试验	(24)
2.8.4	含单一节理的岩体强度特性	(26)
2.9	Griffith 强度理论	(27)
2.10	Drucker-Prager 准则(D-P 准则)	(28)
第3章 地下水影响及其计算方法		(29)
3.1	概述	(29)
3.2	静水压力影响	(29)
3.3	动水压力影响	(30)
3.4	流网、流线、等势线	(31)
3.5	用裂隙网络方法计算岩体的渗透系数	(31)
3.6	用水文地质参数确定渗流面的方法	(31)

第2篇 经典分析

第4章 极限平衡分析		(35)
4.1	概述	(35)
4.2	三维变分分析	(35)
4.2.1	平衡方程	(35)
4.2.2	破坏准则	(37)
4.2.3	安全系数泛函 $\tilde{K}\{*\}$ 的计算	(37)
4.2.4	极值函数和安全系数的计算	(39)
4.2.5	地震力分析	(40)
4.2.6	三维对称滑体稳定性分析	(41)
4.3	二维变分分析	(43)
4.3.1	欧拉方程	(44)
4.3.2	极值函数	(44)
4.3.3	非均质边坡的滑面极值函数	(45)
4.3.4	边坡安全系数计算	(45)
4.3.5	地震力计算	(46)
4.3.6	计算实例	(46)
4.4	圆弧型滑动的精确解法	(48)

4.4.1	用共轭梯度法求临界滑动面	(49)
4.4.2	程序框图	(52)
4.4.3	非线性型坡面(多台阶边坡)的临界滑动面的确定	(52)
4.4.4	其他圆弧型滑动分析方法	(60)
4.5	平面剪切型滑动	(71)
4.5.1	破坏模式	(71)
4.5.2	安全系数的积分表示	(71)
4.5.3	有张裂隙的平面剪切型滑动	(74)
4.5.4	有岩桥的平面剪切滑动	(78)
4.6	双滑面型滑动	(78)
4.6.1	仅有二组弱面 L_1, L_2	(78)
4.6.2	有三组弱面 L_1, L_2, L_3	(80)
4.7	由多组块体组成的折线型滑动	(82)
4.7.1	折线型滑动的极限平衡法普遍表达式	(82)
4.7.2	求取折线型临界滑动面的 Powell 法	(85)
4.7.3	实例分析	(88)
4.8	Sarma 法	(90)
4.8.1	Sarma 法的极限平衡分析	(90)
4.8.2	Sarma 的优化方法	(91)
4.9	楔型体滑动	(92)
4.9.1	结构弱面产状及其组合的几何特性	(92)
4.9.2	楔型四面体稳定性分析	(93)
4.9.3	楔型五面体稳定性分析	(97)
4.10	倾倒式破坏	(105)
4.10.1	倾倒滑移破坏的计算模式	(105)
4.10.2	倾倒滑移破坏的受力分析与失稳判别准则	(106)
4.10.3	沿多个单层条柱的平面型滑动倾倒破坏	(108)
4.10.4	计算实例	(109)
	第 1 章至第 4 章参考文献	(110)

第 3 篇 数值分析

第 5 章	边坡开挖的有限元分析	(117)
5.1	概述	(117)
5.2	岩体中开挖的有限元分析	(118)
5.2.1	二维弹塑性有限元分析	(118)
5.2.2	实例分析	(121)
5.3	带节理单元的三维有限元分析	(127)

5.3.1	连续体的基本立体单元	(127)
5.3.2	节理单元	(132)
5.3.3	带节理单元的三维有限元程序	(135)
5.3.4	实例分析	(136)
第6章	边坡开挖的边界元分析	(139)
6.1	边界积分方程的建立	(139)
6.2	体积力、面积分项的转换	(139)
6.3	积分方程的数值解	(140)
6.4	有限子域的非均质边界元法	(141)
6.5	用边界元法研究地下水渗流场的作用	(144)
6.6	用边界元法计算边坡安全系数	(148)
6.7	计算实例	(150)
第7章	边坡开挖的离散元分析	(154)
7.1	二维离散元及 udec 程序基本原理	(154)
7.2	Udec 计算模型及其参数	(156)
7.2.1	弹性模型	(156)
7.2.2	塑性模型	(156)
7.2.3	Coulomb 滑动模型	(156)
7.2.4	有加固构件的 udec 参数	(157)
7.2.5	有地下水作用的 udec 参数	(159)
7.3	Udec 命令的执行顺序与绘制各种图形的命令	(160)
7.3.1	Udec 命令的执行顺序	(160)
7.3.2	Udec 绘制各种图形的命令	(161)
7.3.3	计算实例	(162)
	第5章至第7章参考文献	(165)

第4篇 概率与数理统计

第8章	概率分析法	(169)
8.1	概述	(169)
8.2	边坡破坏概率的解析算法	(169)
8.2.1	概率密度函数与边坡破坏概率	(170)
8.2.2	随机变量的数字特征	(171)
8.3	常见滑坡类型的破坏概率计算	(172)
8.3.1	无张裂隙的平面剪切型	(172)
8.3.2	张裂隙在坡顶面上的平面剪切型	(172)

8.3.3 双滑面型	(173)
8.3.4 折线型 Sarma 法的概率分析	(174)
8.3.5 圆弧型滑动精确解法的概率分析	(175)
第9章 Monte Carlo 法模拟分析	(177)
9.1 概述	(177)
9.2 Monte Carlo 法模拟算法	(177)
9.2.1 用(0,1)均匀分布的 Monte Carlo 法确定 K 的分布函数	(177)
9.2.2 几种分布随机变量 x 与均匀分布变量 U 的关系	(177)
9.3 常见滑坡类型安全系数破坏概率的 Monte Carlo 法模拟	(180)
9.4 实例分析	(181)
第8章至第9章参考文献	(184)

第5篇 动力稳定性

第10章 岩石边坡的爆破震动	(189)
10.1 爆破震动与天然地震的相关性	(189)
10.2 爆破地震波的种类	(189)
10.3 爆破震动的波动方程	(190)
10.4 岩石的动应力与声学刚度	(193)
10.5 爆破地震的烈度,震级与反应谱的确定	(195)
10.5.1 烈度	(195)
10.5.2 爆破地震的震级	(196)
10.5.3 爆破地震反应谱	(197)
10.6 保证爆破地震的建筑物安全	(200)
第11章 爆破作用的机理与生产爆破的分类	(202)
11.1 炸药爆破对岩石的破碎作用	(202)
11.2 生产爆破的分类	(203)
11.3 矿山爆破常用炸药	(204)
11.4 爆破震动强度	(204)
第12章 爆破震动效应测量	(207)
12.1 地震仪的工作原理简介	(207)
12.2 拾震器的运动方程	(207)
12.3 用电流计记录的电动式地震仪组合运动方程	(208)
12.4 地震仪器参数测定	(208)
12.5 爆破测震的现场测量与室内分析	(213)

第 13 章 边坡动力稳定性分析的计算方法	(215)
13.1 不分条的等效载荷法	(215)
13.2 分条的动力分析法	(218)
第 14 章 邻近边坡爆破减震措施	(222)
14.1 控制爆破技术	(222)
14.1.1 光面与预裂爆破	(222)
14.1.2 缓冲挤压爆破	(223)
14.1.3 减震爆破	(223)
14.1.4 直线密集钻孔爆破	(223)
14.2 减震技术	(224)
14.2.1 微差爆破减震技术	(224)
14.2.2 斜孔爆破减震技术	(224)
14.2.3 减少炮孔超深和单孔内装药量	(225)
14.2.4 限制最大一段炸药量和总装药量	(226)
14.2.5 实例分析	(226)
第十五章 天然地震危险性分析	(227)
15.1 影响天然地震危险性的主要参数	(227)
15.2 水厂铁矿地震危险性实例分析	(228)
15.2.1 我国历年来的地震统计资料	(228)
15.2.2 实例分析	(231)
第 10 章至第 15 章参考文献	(235)

第 6 篇 治 理

第 16 章 挡墙、锚杆、抗滑桩的边坡加固	(239)
16.1 概述	(239)
16.2 重力式挡墙加固	(239)
16.2.1 挡墙自身的稳定性	(239)
16.2.2 临界滑动面的最大主动土压	(240)
16.2.3 挡墙背面为直立面时的自身稳定性	(242)
16.2.4 挡墙背面为斜面时的自身稳定性	(242)
16.2.5 悬臂式挡墙	(243)
16.2.6 挡墙加固后滑体的安全系数	(243)
16.3 锚杆(索)加固	(244)
16.3.1 预应力锚杆(索)加固原理	(244)

16.3.2	锚固力 P 的计算	(244)
16.3.3	最优按装角 θ 的确定	(246)
16.3.4	最小锚固长度	(246)
16.3.5	锚杆伸长量	(247)
16.3.6	预应力损失	(247)
16.4	圆弧型滑动面的锚杆加固	(247)
16.5	双滑面型滑动的锚杆加固	(248)
16.5.1	仅有两组弱面 L_1, L_2 的锚杆加固	(249)
16.5.2	有第三组弱面存在的双滑面型锚杆加固	(249)
16.6	抗滑桩加固	(250)
16.6.1	抗滑桩加固原理	(250)
16.6.2	弹性桩的计算方法	(251)
16.6.3	悬臂式抗滑桩的“K”法	(252)
16.6.4	受剪力作用的全埋式抗滑桩的“K”法	(254)
16.6.5	受分布荷载作用的全埋式抗滑桩的“K”法	(255)
16.6.6	受分布荷载作用的全埋式抗滑桩的“M”法	(256)
16.6.7	用链杆法求解的“C”法	(258)
第 17 章	综合支挡的边坡加固	(262)
17.1	挡墙 + 锚杆(索)的边坡加固	(262)
17.1.1	挡墙 + 锚杆(索)自身的稳定性	(262)
17.1.2	挡墙 + 锚杆对滑体的支挡及安全系数的提高	(264)
17.2	钢筋混凝土薄层锚杆挡墙加固	(265)
17.3	柱板式挡墙加固	(266)
17.3.1	立柱内力计算	(266)
17.3.2	锚杆内力计算	(268)
17.3.3	立柱底端地基承载力计算	(268)
17.3.4	基脚侧向压力验算	(268)
17.3.5	基脚底抗剪验算	(269)
17.3.6	挡土板内力计算	(269)
17.3.7	立柱与挡板的配筋设计	(269)
17.3.8	锚杆设计	(271)
17.4	综合支挡下的余推力法	(272)
17.5	有限元法在柱板式挡墙加固中的应用	(273)
17.6	边坡加固的工程实例分析	(275)
17.6.1	K5 + 270 边坡的极限平衡分析	(276)
17.6.2	立柱、挡土板和锚杆加固计算	(276)

第十八章 边坡加固的优化问题	(284)
18.1 线性规划中的单纯形法	(284)
18.2 非线性规划中的单纯形法	(286)
18.3 边坡加固构件优化的多目标决策方法	(291)
18.3.1 多目标决策问题简介	(291)
18.3.2 多目标规划的求解方法	(292)
18.3.3 加固构件优化的多目标规划及其求解	(294)
18.3.4 程序 MUGOAL. BAS 的算法与功能	(296)
18.3.5 程序 MUGOAL. BAS 的使用方法	(296)
18.3.6 有关单目标决策问题	(298)
18.3.7 程序 SWGOAL. BAS 的使用方法	(298)
18.3.8 加固构件优化的多目标规划	(298)
第 16 章至第 18 章参考文献	(300)
第十九章 边坡监测	(301)
19.1 边坡的几何监测	(301)
19.1.1 测点垂直位移的高程测量	(301)
19.1.2 测点水平位移的测量	(301)
19.1.3 测边、测角精度对 P 点平面位置的精度影响	(302)
19.1.4 测点垂直位移的三角高程测量	(303)
19.2 边坡内部测点及加固构件受力变形监测	(304)
19.2.1 钻孔引伸仪	(304)
19.2.2 钻孔倾斜仪	(304)
19.2.3 加固构件受力变形监测	(304)
19.3 滑坡预报	(305)
19.3.1 用位移随时间的变化曲线作滑坡预报	(305)
19.3.2 用灰色理论 Verhulst 模型作滑坡预报	(305)
19.4 实例分析	(308)
19.4.1 大冶铁矿东采边坡几何监测	(308)
19.4.2 大冶铁矿 A 区边坡尖 F9 区段深部监测系统	(308)
19.4.3 大冶铁矿砂浆锚杆受力观测	(312)
19.4.4 大冶铁矿钢轨桩的受力观测	(313)
19.4.5 富家坞矿北边坡的滑坡预报	(314)
第 19 章参考文献	(318)
后 记	(319)

Contents

Part 1 The fundamental contents

Chapter 1 Introduction	(3)
1.1 The influence factors on slope stability	(3)
1.1.1 Nature factors	(3)
1.1.2 Artificial factors	(6)
1.2 Classification of slopes	(6)
1.2.1 According to slope shape	(6)
1.2.2 According to slope material	(7)
1.2.3 According to slope using	(7)
1.2.4 International 5 ranks classification method	(7)
1.2.5 Domestic classification method	(7)
1.3 Classification of structural planes, basic type of rock mass structure	(7)
1.4 The mode of slope failure, judgment of failure criteria	(8)
1.4.1 Wulf net, equal-angle stereonet	(8)
1.4.2 Schmidt net, equal-area stereonet	(9)
1.5 The usual rock slope failure mode and the judgment of failure criteria	(12)
1.5.1 Introduction	(12)
1.5.2 Sliding failure	(12)
1.5.3 Toppling failure	(15)
1.5.4 Buckling (plane split) failure	(16)
Chapter 2 Rock and rock mass strength	(17)
2.1 The size effect of physical and mechanical rock properties	(17)
2.2 The rock uniaxial and triaxial compression test	(17)
2.3 The rock uniaxial extension test	(19)
2.4 Rock shear strength and C, φ values determination	(19)
2.5 The laboratory shear test and the direct in-situ shear test	(20)
2.5.1 The laboratory shear test	(20)
2.5.2 The direct in - situ shear test	(21)
2.6 Determination rock elasticity parameters	(22)

2.6.1	Uniaxial compression test	(22)
2.6.2	Trial compression test	(23)
2.7	The engineering treatment of C, φ values	(23)
2.8	The joint rock mass strength property	(23)
2.8.1	The joint rock mass deformability	(23)
2.8.2	The paramers measurement of joint properties	(24)
2.8.3	Joint closing test	(24)
2.8.4	The joint rock mass strength property including single joint	(26)
2.9	Griffith strength theory	(27)
2.10	Drucker – Prager criteria (D – P criteria)	(28)
Chapter 3	The influence of underground water	(29)
3.1	Introduction	(29)
3.2	The influence of static water pressure	(29)
3.3	The influence of dynamic water pressure	(30)
3.4	Flow net, flow lines, equipotential lines	(31)
3.5	By means of fractured rock net method to calculate the rock permeability coefficient	(31)
3.6	Using the hydrogeologic parameters to determine the surface of permeability	(31)

Part 2 The classical analysis

Chapter 4	Limit equilibrium analysis	(35)
4.1	Introduction	(35)
4.2	Three dimension variational analysis	(35)
4.2.1	Equilibrium equation	(35)
4.2.2	Failure criteria	(37)
4.2.3	Factor of safety and the variational function K calculations	(37)
4.2.4	Extremum function and factor of safety calculation	(39)
4.2.5	The analysis of the earthquake force	(40)
4.2.6	The stability analysis with three dimension symmetry sliding body	(41)
4.3	Two dimension variational analysis	(43)
4.3.1	Eular equation	(44)
4.3.2	Extremum function	(44)
4.3.3	Extremum function for non – homogeneous sliding surface	(45)
4.3.4	The calculation of the slope safety coefficient	(45)
4.3.5	The calculation of the earthquake force	(46)
4.3.6	The calculating example	(46)

4.4	The accurate solution method of circular sliding	(48)
4.4.1	By means of conjugate gradient method to search the critical sliding surface	(49)
4.4.2	Program diagram	(52)
4.4.3	Determine the critical sliding surface for nonlinear slope surface (multi bench slope)	(52)
4.4.4	Other circular sliding stability analysis methods	(60)
4.5	Plane shear sliding	(71)
4.5.1	Failure mode	(71)
4.5.2	The integration expression of factor of safety	(71)
4.5.3	Determination of critical sliding surface	(74)
4.5.4	Shear plane sliding with rock bridge	(78)
4.6	Two-block sliding	(78)
4.6.1	Calculating equation including only two weaknesses L_1, L_2	(78)
4.6.2	Calculating equation including three weaknesses L_1, L_2, L_3	(80)
4.7	The broken-sliding surface composed of multi-block slides	(82)
4.7.1	The general expression of limit equilibrium method for the broken sliding body	(82)
4.7.2	Determination the critical sliding surface of broken sliding body by Powell method	(85)
4.7.3	Practical example analysis	(88)
4.8	Sarma method	(90)
4.8.1	The limit equilibrium analysis of the Sarma method	(90)
4.8.2	The optimization of Sarma method	(91)
4.9	Wedge shape sliding	(92)
4.9.1	The attitude of structure weak plane and their geometric character of composition	(92)
4.9.2	The stability analysis of tetrahedron wedge shape sliding	(93)
4.9.3	The stability analysis of pentahedron wedge shape sliding	(97)
4.10	Toppling failure	(105)
4.10.1	The calculation mode of toppling-sliding failure	(105)
4.10.2	Toppling-sliding force analysis and failure judgment criteria	(106)
4.10.3	The plane shear sliding-toppling failure along multisheet column	(108)
4.10.4	Calculation of practical example	(109)
	Reference from chapter 1 to chapter 4	(110)