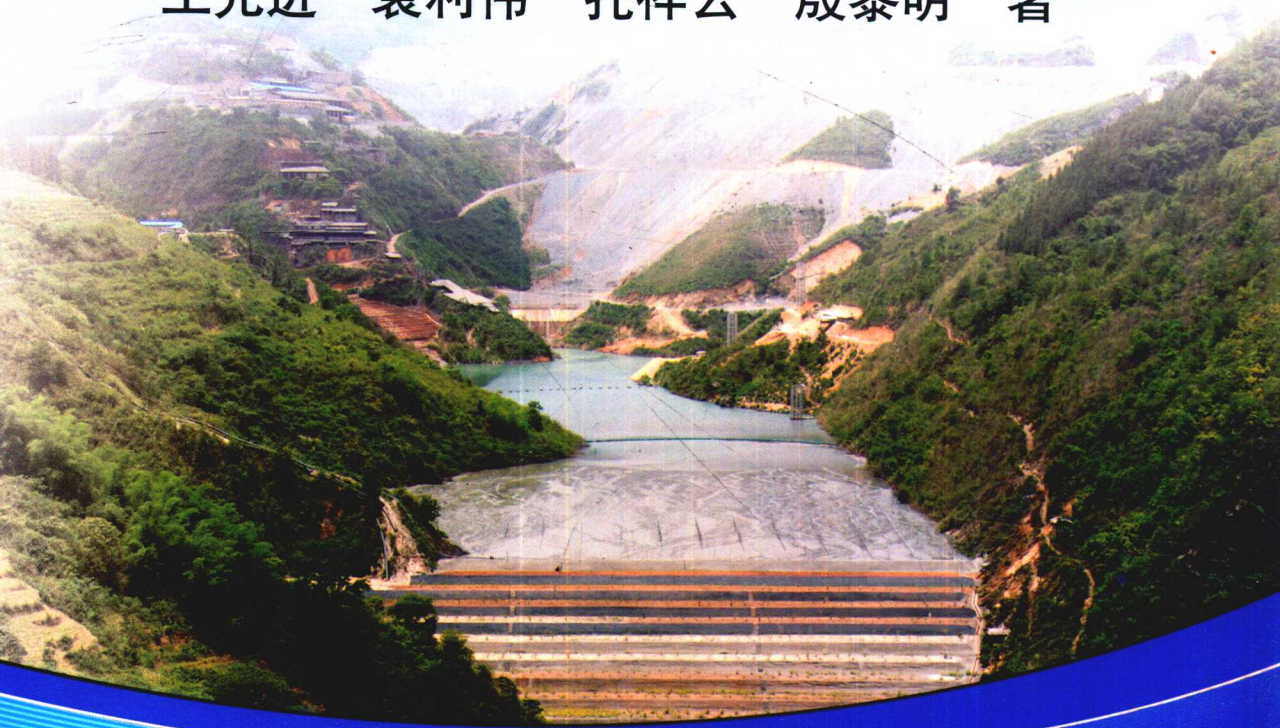


边坡工程稳定与不确定性分析 Slide 程序的应用

王光进 袁利伟 孔祥云 殷黎明 著



冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press

边坡工程稳定与不确定性分析

Slide 程序的应用

王光进 袁利伟 孔祥云 殷黎明 著

北 京
冶 金 工 业 出 版 社
2015

内 容 提 要

本书介绍了极限平衡理论及 Slide 程序,可使读者快速掌握其在边坡稳定性分析中的应用。主要内容包括边坡工程的分类、边坡稳定性分析方法及其临界滑动面搜索方法的介绍,极限平衡理论及其在边坡稳定分析中的应用,Slide 程序在边坡工程中的应用,边坡可靠度与敏感度分析,以及矿山排土场、尾矿坝及尾矿初期坝的稳定性分析案例。

本书既可作为高等院校相关专业的研究生教材和教学参考用书,也可供水电工程、矿业工程、铁路工程、公路工程、岩土工程、地质工程等相关专业的技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

边坡工程稳定与不确定性分析 Slide 程序的应用/
王光进等著. —北京:冶金工业出版社, 2015. 3
ISBN 978-7-5024-6844-6

I. ①边… II. ①王… III. ①边坡稳定性—程序分析
IV. ①TU413.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 045904 号

出 版 人 谭学余

地 址 北京市东城区嵩祝院北巷 39 号 邮编 100009 电话 (010)64027926

网 址 www.cnmp.com.cn 电子信箱 yjcb@cnmp.com.cn

责任编辑 杨秋奎 加工编辑 夏小雪 美术编辑 彭子赫

版式设计 孙跃红 责任校对 石 静 责任印制 李玉山

ISBN 978-7-5024-6844-6

冶金工业出版社出版发行;各地新华书店经销;北京百善印刷厂印刷

2015 年 3 月第 1 版, 2015 年 3 月第 1 次印刷

787mm × 1092mm 1/16; 18 印张; 433 千字; 279 页

69.00 元

冶金工业出版社 投稿电话 (010)64027932 投稿信箱 tougao@cnmp.com.cn

冶金工业出版社营销中心 电话 (010)64044283 传真 (010)64027893

冶金书店 地址 北京市东四西大街 46 号(100010) 电话 (010)65289081(兼传真)

冶金工业出版社天猫旗舰店 yjgy.tmall.com

(本书如有印装质量问题,本社营销中心负责退换)

前 言

近年来,随着国家经济建设的急剧发展,人类工程活动规模的不断扩大,使得边坡工程涉及的工程地质问题变得更为复杂,导致边坡工程出现的大量滑坡、崩塌、泥石流以及其他边坡地质灾害对我国经济建设和人民生命财产带来巨大损失,且这些地质灾害也是制约工程是否经济合理乃至成败的重要因素。而边坡稳定性分析是判断边坡是否稳定、是否需要加固、采取何种加固措施及加固效果的主要依据,这也是边坡工程设计与施工中最难和最迫切需要解决的问题之一,因此如何合理地分析边坡稳定性并在此基础上采取经济可靠的加固措施是一项具有实际应用价值的研究工作。所以,基于行业现状和教学要求,作者编写了这本介绍边坡稳定分析的书籍。本书内容主要涉及边坡工程的分类、边坡稳定性分析方法及其临界滑动面的搜索方法的介绍,极限平衡理论及极限平衡理论在边坡稳定性分析中的应用,Slide 程序在边坡工程中的应用,边坡可靠度与敏感度分析,矿山排土场、尾矿坝及尾矿初期坝的稳定性分析实例。

本书既能让读者了解极限平衡理论的计算原理,也能让读者快速掌握 Slide 程序的应用。本书可作为高等院校相关专业的研究生教材和教学参考书,也可供水电工程、矿业工程、铁路工程、公路工程、岩土工程、地质工程等相关专业技术人员参考。

在编写过程中,本书参阅了相关方面的资料,在此谨向原作者和相关人员表示衷心的感谢。

感谢国家自然科学基金委员会(重点项目:尾矿坝稳定性评价与安全监控基础性研究——No. 51234004)对本书出版的支持。

由于作者水平所限,书中不足之处,恳请广大读者及同行批评指正!

作 者
2014 年 11 月

目 录

1 绪论	1
1.1 概述	1
1.2 边坡分类	1
1.2.1 按物质组成分类	1
1.2.2 按边坡成因分类	2
1.2.3 按岩体结构分类	2
1.2.4 按坡高和坡度分类	2
1.2.5 按边坡朝向分类	4
1.2.6 按边坡变形破坏分类	4
1.2.7 其他分类	5
1.3 边坡稳定性分析方法	5
1.3.1 极限平衡分析法	5
1.3.2 极限分析法	6
1.3.3 数值分析法	6
1.3.4 随机概率分析法	7
1.4 临界滑动面搜索	8
2 边坡稳定性分析——极限平衡理论	9
2.1 概述	9
2.2 极限平衡理论	9
2.3 边坡稳定性极限平衡分析法	9
2.3.1 瑞典条分法	10
2.3.2 Bishop 法	12
2.3.3 Janbu 法	13
2.3.4 Spencer 法	15
2.3.5 Morgenstern-Price 法	16
2.3.6 Sarma 法	17
2.3.7 不平衡推力法	17
2.4 极限平衡理论边坡稳定性分析方法的比较	18
2.4.1 极限平衡法的方程数	18
2.4.2 极限平衡法的方程比较	19
3 Slide 在边坡工程中的应用	21
3.1 概述	21

3.1.1	边坡稳定性分析	21
3.1.2	地下水分析	21
3.1.3	概率统计分析	21
3.2	Slide 程序的安装	22
3.3	均质、单一材料、无地下水的圆弧滑面分析	23
3.3.1	创建模型	23
3.3.2	计算分析	33
3.3.3	诠释结果	34
3.4	考虑软弱层、多种材料、均布外荷载及地下水的圆弧滑面分析	45
3.4.1	创建模型	45
3.4.2	计算分析	54
3.4.3	诠释结果	55
3.4.4	查询功能	56
3.4.5	沿坡面的 S-F 图	65
3.5	考虑软弱层、多种材料、均布外荷载及地下水的非圆弧滑面分析	67
3.5.1	创建模型	68
3.5.2	计算分析	72
3.5.3	诠释结果	72
3.5.4	重置模型	76
3.5.5	计算分析	77
3.5.6	诠释结果	77
3.5.7	优化滑面	77
3.6	考虑软弱层、多种材料、均布外荷载及地下水的组合滑面分析	80
3.6.1	创建模型	80
3.6.2	计算分析	82
3.6.3	诠释结果	82
3.6.4	重置模型	85
3.6.5	计算分析	86
3.6.6	诠释结果	89
3.7	孔隙水压力	90
3.7.1	创建模型	91
3.7.2	计算分析	101
3.7.3	诠释结果	101
3.7.4	添加查询	106
3.7.5	孔隙压力图	107
3.8	边坡支护	108
3.8.1	无支护边坡计算模型	109
3.8.2	有支护边坡计算模型	113

3.9 地下水及其分析	126
3.9.1 地下水模拟	126
3.9.2 地下水计算	138
3.9.3 地下水分析	138
4 边坡不稳定性分析	163
4.1 概率分析	163
4.1.1 创建模型	163
4.1.2 计算分析	168
4.1.3 诠释结果	168
4.2 敏感度分析	192
4.2.1 创建模型	192
4.2.2 计算分析	194
4.2.3 诠释结果	195
4.3 地下水位统计	201
4.3.1 敏感度分析	201
4.3.2 概率分析	208
4.3.3 指数分布	217
4.3.4 张力裂缝统计	218
4.4 整体边坡可靠度	219
4.4.1 概述	219
4.4.2 创建模型	220
4.4.3 计算分析	223
4.4.4 诠释结果	224
5 案例分析	236
5.1 排土场案例	236
5.1.1 排土场现场调查	236
5.1.2 排土场稳定性计算剖面及参数指标	239
5.1.3 排土场的稳定性计算分析	242
5.2 尾矿坝案例	251
5.2.1 尾矿坝的工程勘察	252
5.2.2 尾矿坝浸润线及渗透稳定性分析	254
5.2.3 尾矿坝的稳定性计算分析	257
5.3 尾矿初期坝案例	271
5.3.1 尾矿初期坝的工程勘察	271
5.3.2 尾矿初期坝的稳定性计算分析	274
参考文献	279



绪 论

1.1 概述

在水电工程、矿产资源和能源开发以及公路、铁路工程建设等工程活动领域中出现了越来越多的高陡边坡，其引起的滑坡、崩塌、泥石流以及其他不稳定边坡灾害给我国经济建设和人民生命财产带来巨大损失，并且这些边坡也是制约工程是否经济合理乃至成败的重要因素。因此，对这些类型边坡的稳定性分析研究成为岩土工程界与地质工程界关注的焦点。

我国正处于经济建设高速发展的时期，滑坡给水电工程、铁路、公路、矿山建设带来了巨大损失。近年来，我国西南、西北、东南沿海等地暴雨集中引发了大量边坡相关的地质灾害。边坡稳定性分析是判断边坡是否稳定、是否需要加固、采取何种加固措施及加固效果的主要依据，它是边坡工程中最基本的问题，也是边坡工程设计与施工中最难和最迫切需要解决的问题之一。因此，如何合理地分析边坡稳定性，并在此基础上采取经济可靠的加固措施是一项具有实际应用价值的研究工作。

随着社会的进步及经济的发展，通过长期的工程实践，相关研究学者已对边坡工程形成了比较完善的理论体系，并对工程实践进行了有效地指导。近年来，人们逐渐认识到，在水电、交通、采矿等诸多领域，边坡工程都是整体工程不可分割的部分。所以，为保证工程安全运行及节约经费，广大学者对边坡的演化规律、边坡的稳定性及滑坡预测预报等进行了广泛研究。随着人类工程活动的规模扩大及经济建设的急剧发展，边坡工程涉及的工程地质问题极为复杂，特别是在西南山区，边坡的变形、破坏极为普遍，滑坡灾害已成为一种常见的危害人民生命财产安全及工程正常运营的地质灾害。

1.2 边坡分类

边坡分类是为了更好地从不同的角度认识边坡。目前国内外对于边坡已有很多分类方法，但由于所依据的分类原则、分类标准和分类目的的不同，迄今还没有一个公认的统一分类。但无论何种分类体系，安全稳定性是其最基本的要素。以安全稳定性为出发点，依据国内外关于边坡分类的理论体系，按照物质组成、边坡成因、岩体结构、坡高和坡度、边坡朝向、边坡变形破坏、风化程度等对边坡进行分类。

1.2.1 按物质组成分类

岩土体组成物质是决定边坡稳定性的根本要素，岩石的成因类型、矿物成分、岩石强度都对边坡稳定产生影响。按照边坡物质组成对边坡进行分类是目前最为常见的一种分类方式，其分类情况如图 1-1 所示。

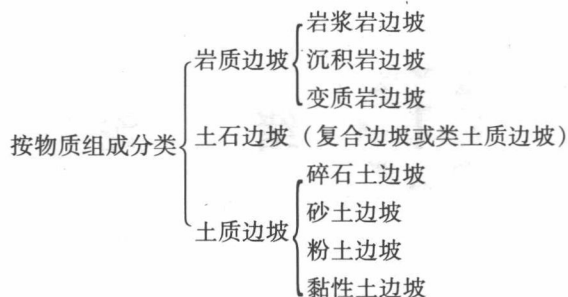


图 1-1 按物质组成的边坡分类

其实，土与岩石的物质构成并无本质的区别，差别在于结构。岩质边坡中存在大量的裂隙、节理、断层等结构面，具有明显的结构性，其稳定性除了受到岩性本身的影响外，更重要的是受岩体结构的控制。岩性影响岩体的坚硬程度、风化程度、完整性等，进而影响坡体表面的抗剪强度。对于土质边坡而言，不存在明显结构，力学性能与破坏模式显著区别于岩质边坡，土质边坡的各个分类仅在颗粒大小、土体黏聚力等方面有所差异，且均属于流塑体，土体自身黏聚力、坡度与水的作用是影响其稳定性的最大因素。

1.2.2 按边坡成因分类

按边坡形成的原因，边坡分为自然边坡和人工边坡，其常见分类如图 1-2 所示。

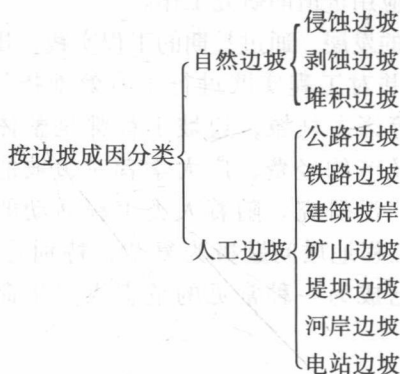


图 1-2 按边坡形成的原因边坡分类

1.2.3 按岩体结构分类

岩体结构指岩体中结构面与结构体的排列组合特征，其包含两个要素，即结构面和结构体。结构面和结构体二者具有内在的联系，共同形成了岩体结构类型。岩质边坡的分类，多集中于按岩体结构类型的划分，其详细分类如图 1-3 所示。

1.2.4 按坡高和坡度分类

坡高和坡度是定义和描述边坡几何特征的两个重要参数，但是由于边坡所形成的成因、组成物质及赋存环境的不同，导致按坡高和坡度的分类有所差异，其一般分类见表 1-1。

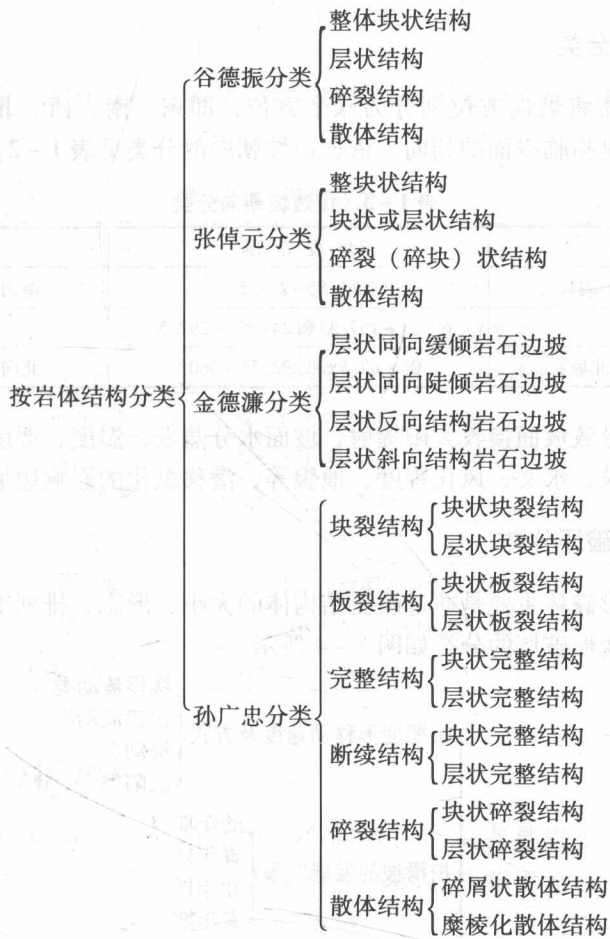


图 1-3 按岩体结构的边坡分类

表 1-1 按照边坡坡高和坡度分类

按坡度 分类	类别	缓坡 /(°)	斜坡(中等坡) /(°)	陡坡 /(°)	急坡(峻坡) /(°)	悬崖(悬坡) /(°)	倒坡 /(°)
	金德濂	<10	10~30	30~45	45~65	65~90	>90
	周德培	≤15	15~30	30~60	60~90	—	>90
	叶建军	岩质≤30 土质≤20	岩质 30~45 土质 20~30	岩质 45~90 土质 30~45	—	—	岩质 >90
	姜德义	≤15	—	15~35	35~55	55~90	—
按坡高 分类	类别	超高边坡/m		高边坡/m		中高边坡(中 边坡)/m	低边坡/m
	周德培	岩质 >10 土质 >15		岩质 15~30 土质 10~15		岩质 8~15 土质 6~10	岩质 <8 土质 <6
	姜德义	>100m		50~100		20~50	<20
	王铁桥	—		>10		—	>10

1.2.5 按边坡朝向分类

一般来说,通常将坡向方位划分为八个方位,即东、南、西、北、东北、东南、西北、西南,其坡向是指临空面的朝向。依据边坡朝向的分类见表1-2。

表 1-2 按边坡朝向分类

分类名称	角度范围	包含方位
阳边坡(阳坡或南坡)	157.5°~247.5°	南向、东南向和西南向
阴阳边坡	67.5°~157.5°和247.5°~292.5°	东向、西向
背阴边坡(阴坡或北坡)	0°~67.5°和292.5°~360°	北向、东北向、西北向

坡向的不同会导致坡面接收太阳辐射,坡面水分蒸发,温度、湿度等气候特征产生差异,进而影响到植被、水文、风化程度、地貌等,潜移默化的影响边坡稳定性。

1.2.6 按边坡变形破坏分类

边坡岩体的变形破坏主要是通过改变结构体的大小、形态、排列组合状况影响岩体的完整性,其按边坡变形破坏的分类如图1-4所示。

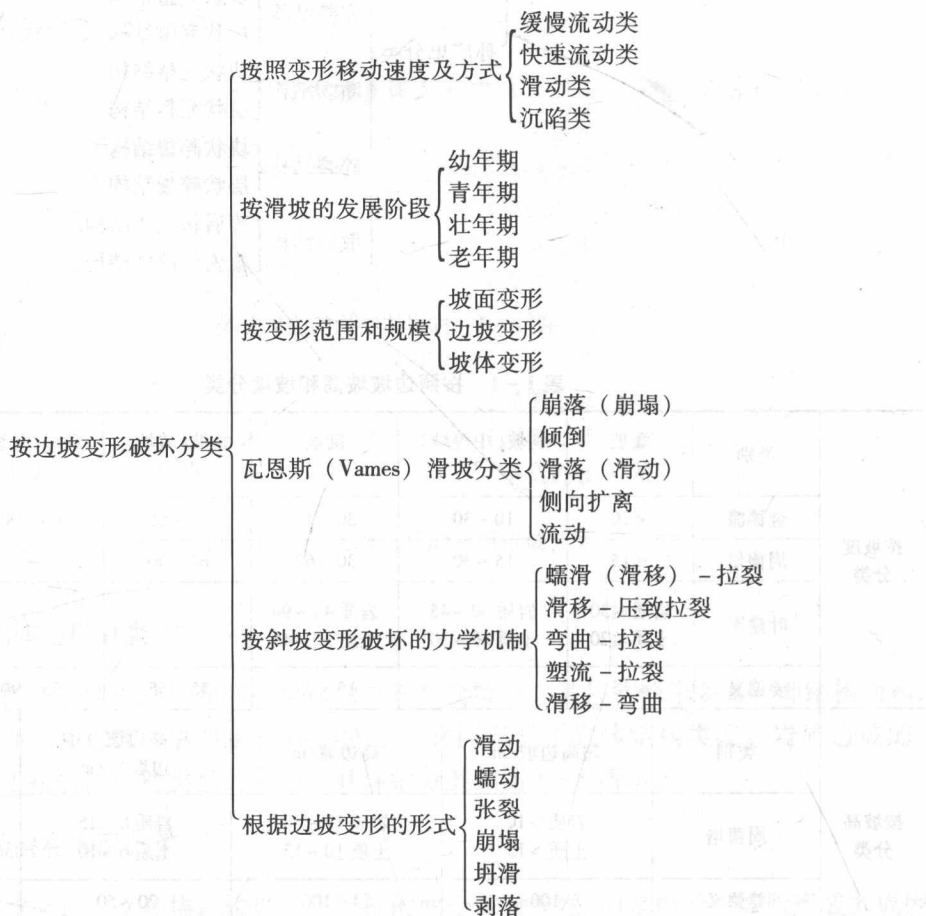


图 1-4 按边坡变形破坏分类

1.2.7 其他分类

除了以上分类外,还有按水文状况、坡面坡长、岩层走向与坡面走向等的分类,见表1-3。

表1-3 其他边坡分类

分类方法	分类名称	边坡定义
按水文状况分类	干燥边坡	下雨后坡面迅速干燥,夏天干旱超过10d坡面植物缺水
	潮湿边坡	坡面有少量地下水从岩石缝隙渗出,夏天能忍受40d连续干旱
	滴水边坡	坡面有较多地下水活动,夏天即使连续干旱60d,坡面仍然潮湿
	泉边边坡	坡面有泉水活动,常年涌水
按坡面坡长分类	长边坡	坡长大于300m
	中长边坡	坡长为100~300m
	短边坡	坡长小于100m
按岩层走向与坡面走向的关系分类	顺向坡	岩层走向与坡面走向平行或比较接近
	逆向坡	岩层走向与坡面走向相反
	斜向坡或切层边坡	岩层走向与坡面走向成较大角度相交

1.3 边坡稳定性分析方法

边坡稳定性分析是边坡工程研究的核心问题,也一直是岩土工程研究的热点问题。由于边坡中广泛存在着非连续、非线性、不确定性等因素,因此边坡稳定性分析是最早试图解决而至今仍未圆满解决的难题。但为了反映这些特性,解决工程问题,人们在边坡分析中采用了许多新方法和新理论。同时,随着计算机技术和数值分析方法的飞速发展,使得边坡稳定性研究理论及计算方法取得了前所未有的进步。边坡稳定性分析方法很多,主要包括极限平衡分析法、极限分析法、数值分析法和随机概率分析法等。

1.3.1 极限平衡分析法

传统的极限平衡法通常是一种简化的方法,其具体做法是将滑坡体作为一个刚体,并将此滑坡体划分成若干垂直土条,建立作用在这些垂直土条上的力的平衡方程,并通过直接对某些多余未知量做出假定,使方程式的数量和未知数的数量相等,从而使问题变成静定可解,因此通常又称为条分法。随着工程数学及计算技术和有限元方法的不断发展,边坡稳定分析方法日趋完善。各种新方法从不同的层面对边坡实际情况进行模拟,许多严格的计算方法都能够顺利求解,并取得了实质性的效果。

极限平衡方法的理论基础是极限平衡理论,其基本原理是假定坡体的安全系数为 K ,则当坡体的抗剪强度参数降低 F (边坡安全系数)倍以后,坡体内存在一个达到极限平衡状态的最危险滑动面,此滑动面处于临界状态。极限平衡法一般需先假定破坏沿岩土体内某一确定的滑动面滑动,再根据滑动岩土体的静力平衡条件和Mohr-Coulomb破坏准则

计算沿该滑动面滑动的可能性,即安全系数的大小或失稳概率的高低。然后系统地选取多个可能的滑动面,用同样的办法计算稳定安全系数或失稳概率,所得到的安全系数最小或失稳概率最高的滑动面就是最可能的滑动面。

因此,极限平衡法目前是边坡稳定性分析中最主要的分析方法。在工程实践中,可根据边坡破坏滑动面的形态来选择相应的极限平衡法。常用的极限平衡法有瑞典条分法、Bishop 法、Janbu 法、Spencer 法、Sarma 法、Morgenstern-Price 法和不平衡推力法等。

1.3.2 极限分析法

极限分析方法是將土体看作服从流动法则的理想塑性材料,基于这种理想土体材料性质,当外力达到某一定值时,可在外力不变的情况下发生塑性流动,此时边坡岩土体处于极限状态,所受的荷载为极限荷载。但是,由于边坡岩土材料的不连续性、各向异性和非线性的本构关系以及结构在破坏时呈现的体胀、软化、大变形等特性,使求解边坡稳定问题变得十分困难和复杂。

极限分析理论是将静力场和运动场结合起来并提出极值原理以后建立起来的。极限分析法应用理想塑性体或刚塑性体处于极限状态的极小值原理和极大值原理来求解理想塑性体的极限荷载的一种分析方法。它在土坡稳定性分析时,假定土体为刚塑性体,且不必了解变形的全过程,当土体应力小于屈服应力时,它不产生变形;但达到屈服应力,即使应力不变,土体也将产生无限制的变形,造成土坡失稳而发生破坏。其最大优点是考虑了材料的应力-应变关系,并以极限状态时自重和外荷载所做的功等于滑裂面上阻力所消耗的功为条件,结合塑性极限分析的上下限定理求得边坡极限荷载与安全系数。

对于上限理论,如果一系列外部荷载作用在滑动面上,而且外力在位移增量上所做的功等于内部应力所做的功,那么这时的外荷载不小于真实屈服荷载。这说明外荷载不一定必须与内部应力平衡,并且滑动面也不必就是真实的滑动面。通过考察不同的滑动面就可以找到最小的上限解,即所有与运动许可的速度场对应的荷载中,满足外功率等于边坡在塑性变形中的能量耗散的荷载最小。

下限定理表明了如果能找到与应力边界上的外荷载平衡的整个土体内均等分布的应力,并且在土体内处处服从材料的屈服准则,那么这个外荷载不大于真实的外荷载。通过检验不同的许可应力状态,就可以找到最大的下限解,即在所有与静力许可应力场相对应的荷载中,满足屈服条件的荷载为最大。

上下限极限分析理论十分有用,一旦上下限被计算出来,那么真实的破坏荷载就包括在上下限解之间。这个特性在一些不能求出真实解的问题,如边坡稳定问题中十分有用,因为它可以提供检验近似破坏荷载的内在误差。

1.3.3 数值分析法

在岩土工程中,由于岩土边坡工程材料的非均质、非线性及不连续等因素和影响,在多数情况下不可能获得数值解,而采用数值分析技术却能够得到很好的结果。

数值分析方法分析边坡稳定的本质是单元离散,即通过计算网格将岩体分成若干个小单元体。离散后,将任一可能滑动面分成若干微段,根据每一微段的方位,通过应力张量

变换,运用追踪法、位移法、强度比值法或平面应力投影法来求得相应微段的正应力和切向剪应力,再建立力矩平衡。该法以土质边坡在失稳之前伴随的较大变形为依据,将稳定和变形紧密的联系起来。考虑到土的非线性本构关系,求出每一计算单元的应力及应变,根据不同的强度指标确定破坏区的位置及其扩展情况,并设法将局部破坏和整体破坏联系起来。

应用数值方法进行边坡稳定性分析的优点在于:

(1) 数值分析可以很好地处理边坡复杂的边界条件和地质环境(岩土材料的非均匀性、非连续性,导致边坡工程问题的非线性)。

(2) 采用数值方法计算的边坡工程,可以获得边坡体的应力场、应变场和位移场,并可以直观地模拟边坡变形破坏过程。

(3) 数值分析能根据岩土体的破坏准则,确定边坡的塑性区或拉裂区域,分析边坡的累进性破坏过程和确定边坡的起始破坏部位。

(4) 数值方法适用于分析边坡工程的分步开挖、边坡岩土体与加固结构的相互作用、地下水渗流、爆破和地震等因素对边坡稳定性的影响。

目前,岩土工程中主要的数值分析方法包括有限元法(finite element method, FEM)、边界元法(boundary element method, BEM)、离散元法(discrete element method, DEM)和有限差分法(finite difference method, FDM),见表1-4。

表1-4 常用的数值分析方法

数值分析方法	基本原理	求解方式	单元划分方式	适用情况	常用商业软件
有限元法	最小势能原理	解方程组	全区域划分单元	连续介质、大或小变形、不均质材料	Ansys 和 Abaqus
边界元法	Betti 互等定理	解方程组	边界上划分单元	均质、连续介质、小变形	—
离散元法	牛顿运动定理	显式差分	全区域划分单元	不连续介质、大变形、低应力水平	3UDEC (DEC)、2D-Block (3D-Block)、Trudec
有限差分法	牛顿运动定理	显式差分	全区域划分单元	连续介质、大变形	FLAC

1.3.4 随机概率分析法

在边坡工程中涉及大量不确定性因素,所以随着可靠性理论、模糊数学、灰色预测系统、分形几何、人工智能等方法的出现,这些理论方法也逐渐被引入到边坡稳定性分析中。基于对岩体的复杂性和工程的复杂性的认识,对边坡工程的不确定性和非线性研究已成为当今边坡工程稳定性分析研究的趋势。边坡稳定性随机概率分析法主要包括可靠性和模糊分析。可靠性分析法引入边坡,通过计算边坡的可靠性指标和破坏概率,充分地反映了各种不确定性因素对边坡的影响情况,能够更全面地体现边坡的稳定情况,避免了安全系数使用过程中的绝对化;而模糊分析方法认为边坡性质及稳定性的界限是不清楚的,具有相当的模糊性,因此可采用模糊理论对边坡稳定性进行研究。

1.4 临界滑动面搜索

目前,有很多学者提出了很多临界滑动面的搜索方法,这些搜索方法均适用于某一特定边坡工程。各种搜索方法都有其各自的优缺点,见表1-5。

表 1-5 常用的临界滑动面搜索方法

临界滑动面 搜索方法	原 理	优 缺 点
变分法	利用变分法,求得使安全系数达到极小值的临界滑动面及应力分布	难以考虑复杂的土层和地下水情况
区格搜索法	把搜索区域按一定的精度划分成满布区格形式,然后对每一个区格点计算安全系数,取最小值点对应的滑动面为临界滑动面,其对应安全系数即为最小安全系数	通常只用于对圆弧滑动面的搜索
模式搜索法	以搜索起点为中心,按一定的步长确定其上下左右四个点,并计算这五点的安全系数,然后再以安全系数最小点为中心,以相同的步长重复上述过程,直到步长达到相应的精度要求	容易陷于安全系数的局部极小值
二分法	首先确定搜索中心点、四等分搜索区域和另两个等分点,然后对三点计算各自的安全系数,选择安全系数最小点作为新的搜索中心点,搜索半径取为原来的一半。重复上述步骤,直到步长达到相应的精度为止	效率高、收敛快,适用于圆弧滑动面,但易于陷入局部极小值
单形体映射法	单形体映射法是一种有效的非推演搜索极小值过程,它用具有一定几何形体的点集在解空间的映射翻转来代替一系列的指定方向的搜索极小值过程	易于陷入安全系数的局部极小值
数学规划方法	数学规划方法借鉴变分法的思想,把滑动面看成一个变量,再把安全系数看成是滑动面的泛函。然后对安全系数进行求导运算,以确定滑动面沿梯度下降的方向移动,从而求得安全系数极小值。数学规划方法主要有“线性-非线性规划法”和“动态规划法”两种方法	“线性-非线性规划法”易于陷入局部极值点;而“动态规划法”需对安全系数的目标函数进行变换
随机搜索方法	随机搜索方法是利用随机数求极小点而求得函数近似的最优解的方法。变量允许的变化区间,不断随机地而不是有倾向性产生随机点,并计算其约束函数和目标函数的值,对满足约束条件的点,逐个比较其目标函数的值,将坏的点抛弃,保留好的点,最后便得到最优解的近似解。这种方法是建立在概率论的基础上,所取随机点越多,则得到最优解的概率也就越大。随机搜索常用的方法有随机跳跃法,随机走步法等	应用方便,但其计算精度较差、效率较低,一般用于粗选或普查
模拟退火算法	模拟退火算法是基于金属退火机理而建立起的一种优化算法,它能通过随机搜索技术从概率意义上寻找目标函数的全局最优解,是一种具有全局搜索能力的启发式优化方法	能更合理且切合实际地分析评价岩土边坡稳定性
遗传算法	遗传算法基于自然界优胜劣汰的生物进化机制,是一种自适应搜索技术	能搜寻最优解与全局搜索,但需花费大量的计算时间
粒子群优化算法	通过模拟鸟群觅食行为而发展起来的一种基于群体协作的随机搜索算法	可以处理一些传统方法所不能处理的
蚁群算法	一种用来在图中寻找优化路径的概率型算法	对目标函数无特殊要求,易于实现分布式并行计算

2.1 概述

边坡稳定性分析是边坡工程研究的核心问题,也一直是岩土工程研究的一个热点问题。边坡稳定性分析方法经过近百年的发展,其原有的研究不断完善,同时新的理论和方法不断引入,特别是近代计算机技术和数值分析方法的飞速发展给其带来了质的提高,使边坡稳定性研究进入了前所未有的阶段。

任何一个研究体系都是由简单到复杂,由宏观到微观,由整体到局部。对于边坡稳定性研究,在其基础理论的前提下,边坡稳定分析方法从二维扩展到三维,更符合工程的实际情况。由于一些新理论和新方法的出现,如可靠度理论和对边坡工程中不确定性的认识,边坡稳定分析方法由确定性分析向不确定性分析发展。同时,由于边坡工程的复杂性,边坡稳定评价不能依赖于单一方法,也由单一方法向综合评价分析发展。

2.2 极限平衡理论

极限平衡法是边坡稳定性分析的传统方法,通过安全系数定量评价边坡的稳定性,由于安全系数的直观性,被工程界广泛应用。该法基于刚塑性理论,只注重土体破坏瞬间的变形机制,而不关心土体变形过程,只要求满足力和力矩的平衡、Mohr-Coulomb 准则。其分析问题的基本思路:先根据经验和理论预设一个可能形状的滑动面,通过分析在临近破坏情况下,土体外力与内部强度所提供抗力之间的平衡,计算土体在自身荷载作用下的边坡稳定性过程。极限平衡法没有考虑土体本身的应力-应变关系,不能反映边坡变形破坏的过程,但由于其概念简单明了,且在计算方法上形成了大量的计算经验和计算模型,计算结果也已经达到了很高的精度。

极限平衡法没有像传统的弹塑性力学那样引入应力-应变关系来求解本质上为静不定的问题,而是直接对某些多余未知量作假定,使得方程式的数量和未知数的数量相等,因而使问题变得静定可解。根据边坡破坏的边界条件,应用力学分析的方法,对可能发生的滑动面,在各种荷载作用下进行理论计算和抗滑强度的力学分析。通过反复计算和分析比较,对可能的滑动面给出稳定性系数。

该方法比较直观、简单,对大多数边坡的评价结果比较令人满意。该方法的关键在于对滑体的范围和滑面的形态进行分析,正确选用滑面计算参数,正确分析滑体的各种荷载。

2.3 边坡稳定性极限平衡分析法

在工程实践中,可根据边坡破坏滑动面的形态来选择相应的极限平衡法。目前常用的极限平衡法有瑞典条分法、Bishop 法、Janbu 法、Spencer 法、Sarma 法、Morgenstern-Price

法和不平衡推力法等。极限平衡分析方法很多,在处理上,各种条分法在以下几个方面引入简化条件:(1)对滑裂面的形状作出假定,如假定滑裂面形状为折线、圆弧、对数螺旋线等;(2)放松静力平衡要求,求解过程中仅满足部分力和力矩的平衡要求;(3)对多余未知数的数值和分布形状作假定,其每种方法的简化条件见表2-1。

表 2-1 常见条分法及其引入的简化条件

极限平衡条分法	对多余变量的简化假定
Ordinary/Fellenius (瑞典条分法)	条块间无作用力,力矩平衡
Bishop Simplified (简化毕肖普法)	条块间只有水平力,力矩平衡
Gle/Morgenstern-Price (摩根斯坦-普赖斯法)	条间切向力(X)和法向力(E)之比与水平方向坐标之间存在一函数关系: $X/E = \lambda f(x)$
Janbu Simplified (简化的简布法)	假定了条间作用力作用点的位置
Lowe-Karafiath (罗厄法)	假定条块间作用力为水平方向
Spencer (斯宾塞法)	条块间作用力为常数
传递系数法	假定了条间作用力的方向(等于条块底面倾角)
萨尔玛法	假定条间也满足极限平衡条件,可以任意条分
分块极限平衡法	假定条间也满足极限平衡条件,但需垂直条分

其中,安全系数定义(极限平衡条件):

$$c_e = \frac{c}{F}, \quad \tan \varphi_e = \frac{\tan \varphi}{F}, \quad \tau_f = c_e + \sigma_n \tan \varphi_e \quad (2-1)$$

对于条块底部,如图2-1所示,满足极限平衡条件时有:

$$T_i = \tau_f l_i = c_e l_i + N_i \tan \varphi_e = c_e \Delta x \sec \alpha_i + N_i \tan \varphi_e \quad (2-2)$$

而对于每一个条块而言,可以建立的方程有4个,其中三个为平衡方程:

$$\begin{cases} \sum X_i = 0 \\ \sum Y_i = 0 \\ \sum M_{(o)} = 0 \end{cases} \quad (2-3)$$

一个为在滑面上满足 Mohr-Coulomb 准则的破坏方程:

$$\tau_i = \sigma \frac{\tan \varphi_i}{F_s} + \frac{c_i}{F_s} L_i \quad (2-4)$$

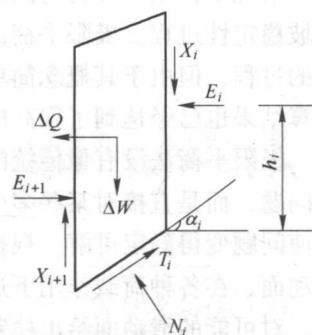


图 2-1 条块受力示意图

2.3.1 瑞典条分法

瑞典条分法又称费伦纽斯法(W. Fellenius)。瑞典圆弧法假定滑动面为圆弧且忽略土条两侧的作用力,其圆弧直径为 R ,只满足整体力矩平衡。条块滑动面安全系数 F ,定义为每一土条在滑动面上提供的抗滑力矩之和与外荷载及滑动体本身在滑动面上产生的滑动力矩之和之比。图2-2为瑞典条分法的受力模型,作用在土条 i 上的作用力有:

(1) 土条的自重 ΔW_i ,其大小、作用点位置及方向均已知。