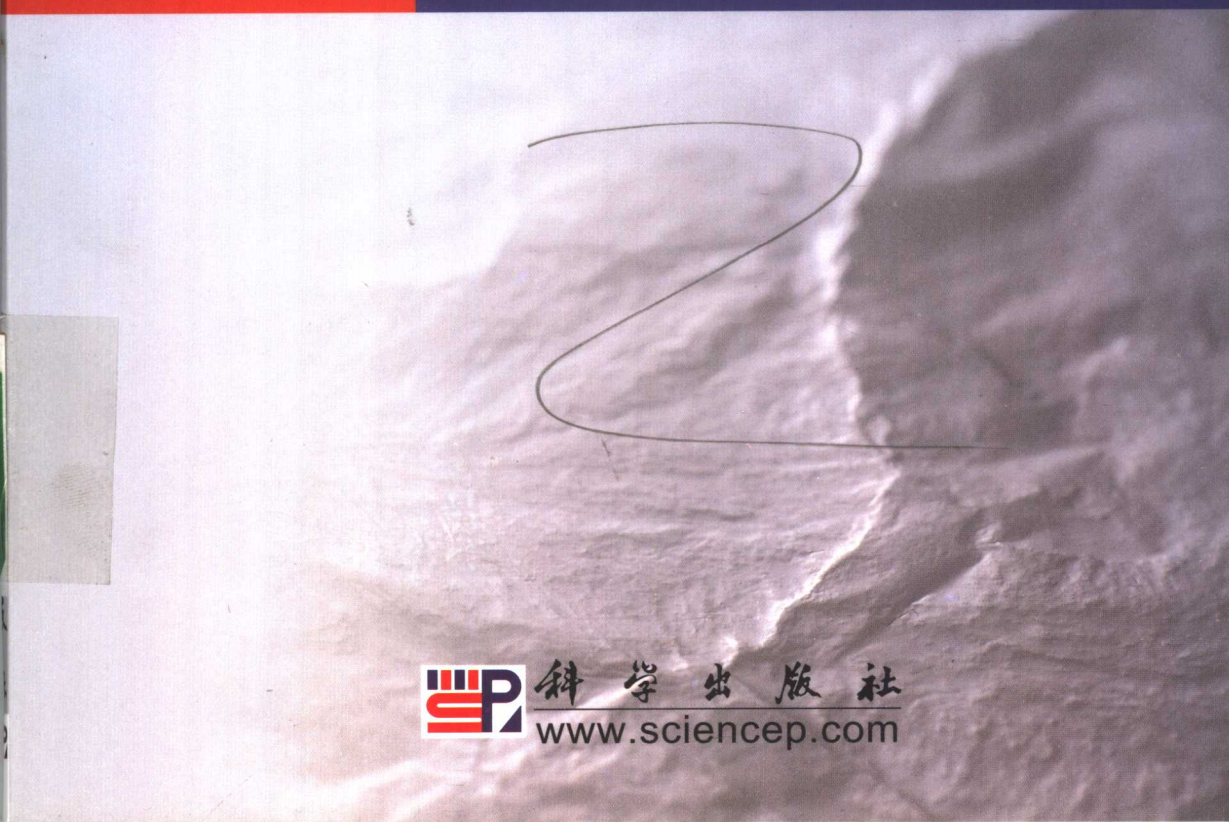




王树仁 何满潮
武崇福 王 健

著

复杂工程条件下 边坡工程稳定性研究



科学出版社

www.sciencep.com

复杂工程条件下 边坡工程稳定性研究

王树仁 何满潮 武崇福 王 健 著

燕山大学学术著作出版基金资助出版

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书以安太堡露天煤矿边坡工程为背景,采用现场勘察、室内试验、理论分析、现场监测和数值模拟相结合的研究方法,改进了美国陈氏公司关于西端帮总体边坡角的设计;对露天与井工联合采动影响下的西北帮复杂岩移规律及其稳定性进行了分析和评价;对下伏采空区东北帮在逐期分步开挖过程中的地表沉降预警范围进行了预测分析;并针对不同类型的边坡工程,提出了有效的工程防治对策等。本书对指导现场安全生产及类似工程实践,具有十分重要的理论意义和工程实用价值。

本书是一部系统总结如何解决边坡工程安全技术难题的专著,研究内容丰富,实践性强,可供采矿、地质、交通、国防、水利水电等与边坡相关专业的工程技术人员、科研人员及高校师生参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

复杂工程条件下边坡工程稳定性研究/王树仁等著. —北京:科学出版社, 2007

ISBN 978-7-03-019111-3

I. 复… II. 王… III. 煤矿开采:露天开采-边坡稳定-研究
IV. TD824.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 086186 号

责任编辑:王志欣 周 炜/责任校对:曾 茹

责任印制:刘士平/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>

新 蕾 印 刷 厂 印 刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2007 年 6 月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2007 年 6 月第一次印刷 印张:11

印数:1—2 500 字数:202 000

定价:30.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈明辉〉)

前 言

近年来,随着国民经济建设的飞速发展,作为我国煤炭工业优先发展的露天煤矿,其规模也得到了迅速的扩张^[1,2],由此也导致了采场滑坡和地表塌陷变形等地质灾害事故频繁发生,不仅扰乱了矿山的正常生产秩序,致使国家的经济财产蒙受巨大损失,而且对作业人员的生命安全也构成了严重威胁^[3]。因此,露天煤矿采场的边坡设计优化问题和采掘边坡的稳定安全问题越发引起了人们的关注和重视。

煤矿边坡工程是露天开采活动的产物。随着开采深度的增加和边坡的加高变陡,采场边坡失稳的概率和开采的难度也会越来越大;而进一步提高边坡角、增加采煤量、减少剥岩量,产生的经济效益将会十分显著,这种相互制约的关系,构成了安全生产与经济利益之间的尖锐矛盾。在边坡开挖过程中,边坡工程的稳定性除了受原岩应力状态、岩土成分、地质构造与软弱夹层的分布、地下水的赋存状况和边坡外貌地形等内在因素影响外,还受大面积开挖卸荷造成的二次应力场重新分布、频繁的爆破施工动荷载致使岩土体的强度损伤弱化、雨水入渗作用引起边坡渗流场变化等诸多外在扰动因素的影响^[4]。正是由于边坡工程问题的重要性和复杂性,致使世界上许多国家,尤其是露天采矿发达的加拿大、美国、俄罗斯和澳大利亚等,投入了大量的人力和物力从事此项研究,取得了不少有效成果^[5,6]。新中国成立以来,我国对露天煤矿边坡工程问题的研究也取得了许多重要成果。但随着工程实践的发展,露天采矿面临着新的困难和挑战,仍有很多复杂又具有挑战性的课题需要研究。

安太堡露天煤矿是改革开放后我国第一个中美合资、年产量达 1500 万 t 的大型现代化露天煤矿。近年来,随着采矿规模的不断扩大,采掘活动频繁,工程环境日益复杂,主要存在如下三个方面的问题:

(1) 美国陈氏公司运用经典力学理论,做出安太堡露天煤矿西端帮总体边坡角为 30° 左右的设计。但是,如果继续按此设计施工,将造成过多的表土剥离和大量的边坡压煤,不仅使生产成本大幅增加,而且造成大量煤炭资源浪费。

(2) 安太堡露天采矿后,能否采用井工技术安全开采西北帮内部的煤炭资源;在露天与井工复合采动下,西北帮是否稳定,能否触发西排土场边坡的滑坡,是否对地表排土场的正常作业构成安全隐患;如何对井工采动前、采动过程中及采动后的稳定状况进行分析和评价,以制定及时有效的防治对策等,是安太

堡露天煤矿生产中急需解决的安全技术难题。

(3) 安太堡东北帮存在井阳井采煤矿大面积地下采空区。随着边坡剥离深度的逐渐下降,由于爆破振动作用和施工设备的影响,将不断活化采空区顶板覆岩,造成地表突发性坍塌灾害的危险性增强,对施工设备和作业人员的安全构成严重威胁。

露天煤矿边坡工程稳定性研究是涉及技术、经济和安全生产等诸多因素的复杂系统工程。因此,本书在系统科学原理的指导下,采用综合集成的方法,针对安太堡露天煤矿边坡工程实践中遇到的上述安全难题进行系统研究,对解决现场实际问题及类似工程实践,具有十分重要的理论意义和工程实用价值。

在撰写本书的过程中,作者得到了北京科技大学蔡美峰教授、王金安教授,安太堡露天煤矿段起超矿长、刘宪权总工程师、张旺高工、杨叶齐高工,安家岭露天煤矿李志强矿长,华北科技学院田多老师,中国矿业大学(北京)放顶煤试验室闫保金老师等及同事们的大力支持和帮助,在此一并表示感谢。

本书的撰写参考了大量的相关文献和专业书籍,谨向其作者深表谢意。

由于作者水平和能力所限,书中难免有疏漏和不妥之处,敬请读者严加斧正、不吝赐教。

作 者

2007年1月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 国内外边坡工程稳定性研究进展	1
1.2.1 边坡工程稳定性研究历程	1
1.2.2 边坡工程稳定性分析方法	3
1.3 安太堡露天煤矿边坡工程研究现状	9
1.4 安太堡边坡工程存在的主要问题	11
1.4.1 西端帮美国陈氏公司边坡设计中存在的问题	11
1.4.2 露天与井工复合采动下西北帮安全开采问题	12
1.4.3 下伏采空区东北帮开挖过程中的安全预警问题	15
1.5 研究思路	16
第 2 章 安太堡露天煤矿边坡工程地质背景	17
2.1 岩性结构场特征	17
2.1.1 沉积表土层	17
2.1.2 基岩岩组	19
2.2 地质构造场特征	19
2.2.1 褶皱构造	19
2.2.2 断层构造	19
2.2.3 节理构造	20
2.2.4 层理构造	20
2.3 环境物理场特征	21
2.3.1 地下水渗流场	21
2.3.2 地震活动特征	21
2.3.3 爆破振动荷载	22
2.3.4 地应力场特征	22
2.4 西端帮稳定性工程地质分区	23
2.5 东北帮下伏采空区及其生产衔接	23
2.5.1 安太堡露天煤矿采区衔接	23
2.5.2 东北帮下伏采空区分区	24

2.6 小结	25
第3章 工程岩体力学参数确定与边坡变形力学机制分析	27
3.1 岩石物理力学性质试验研究	27
3.1.1 岩石单轴拉压试验	28
3.1.2 岩石三轴压缩试验	29
3.1.3 结构面中型剪切试验	30
3.1.4 软弱夹层中型剪切试验	33
3.2 边坡工程岩体分类	34
3.2.1 RMR 法岩体分类	34
3.2.2 BQ 法岩体分类	35
3.3 边坡工程岩体力学参数确定	36
3.3.1 钻孔岩芯岩体分类	36
3.3.2 工程岩体力学参数确定	36
3.4 边坡工程分类及其变形力学机制分析	39
3.4.1 边坡工程分类	39
3.4.2 边坡变形力学机制分析	40
3.5 小结	43
第4章 西端帮强度稳定性分析及其加固设计研究	45
4.1 边坡工程稳定性 MSarma 分析设计系统	45
4.1.1 Sarma 法原理及存在问题	45
4.1.2 MSarma 分析设计系统功能与特点	47
4.2 美国陈氏公司边坡设计与陡帮开采新设计对比分析	50
4.2.1 地质模型	50
4.2.2 力学模型	51
4.2.3 计算参数	51
4.2.4 结果分析	52
4.3 陡帮开采边坡稳态影响因子敏感性分析	53
4.4 陡帮开采边坡工程加固设计研究	57
4.4.1 预应力锚索加固边坡设计优化分析	57
4.4.2 预应力锚索加固机理数值模拟研究	59
4.5 小结	65
第5章 西端帮变形稳定性分析及其工程控制对策	67
5.1 边坡工程非线性大变形分析几何理论	67
5.2 边坡开挖过程非线性大变形响应分析	69
5.2.1 不同开挖顺序边坡产生非线性大变形响应特征	69

5.2.2 边坡岩体处于极限平衡状态时变形局部化特征	71
5.2.3 边坡在分步开挖过程中产生三维变形效应分析	73
5.3 美国陈氏公司设计与陡帮开采新设计技术优化分析	75
5.3.1 控制边坡稳定开采技术对策研究	75
5.3.2 控制边坡稳定开采技术优化分析	76
5.4 雨水入渗作用下固-流耦合边坡变形稳定性分析	80
5.4.1 雨水入渗作用下边坡固-流耦合原理	80
5.4.2 模型边界条件及计算参数选取	81
5.4.3 固-流耦合边坡岩移特征及分析	81
5.5 地震作用下西端帮动态变形响应分析	83
5.5.1 边坡动态变形稳定性分析方法	83
5.5.2 地震作用下西端帮震动效应分析	88
5.6 保障西端帮边坡稳定的工程控制对策	91
5.7 小结	92
第6章 露天与井工复合采动下西北帮变形稳定性分析	94
6.1 西北帮三维计算模型	94
6.1.1 西北帮三维地质模型	94
6.1.2 数值计算模型及模拟方案	94
6.2 露天与井工复合采动下西北帮变形效应研究	96
6.2.1 自重场下分步开挖及回填压脚施工过程响应分析	96
6.2.2 井工开采前暴雨入渗作用下固-流耦合边坡变形特征分析	100
6.2.3 开采4 [#] 煤后暴雨入渗作用下固-流耦合边坡岩移特征分析	103
6.2.4 三维边坡开采9 [#] 煤施工顺序优化分析	107
6.2.5 开采9 [#] 煤后边坡变形破坏趋势预测分析	109
6.3 井工采动边坡岩移规律试验研究	114
6.3.1 相似模拟试验原理	114
6.3.2 相似材料模型设计	115
6.3.3 试验结果及其分析	119
6.4 复合采动边坡内部岩移动态监测及分析	124
6.4.1 岩体内部平面位移监测技术原理	124
6.4.2 西北帮边坡工程地面监测孔布置	126
6.4.3 西北帮边坡深部位移监测结果及分析	127
6.5 确保西北帮边坡稳定的工程技术措施	131
6.6 小结	131

第 7 章 下伏采空区东北帮开挖过程安全预警分析	133
7.1 采空区覆岩移动引发地表变形时空效应研究	133
7.1.1 地下采空区覆岩移动变形特征	133
7.1.2 地下采空区覆岩移动时空效应分析	134
7.1.3 地下采空区地表变形破坏程度评价	136
7.2 开采过程中东北帮三维采场非线性变形响应特征	136
7.2.1 构建下伏采空区东北帮三维计算模型	136
7.2.2 井阳煤矿三期采矿覆岩移动响应过程分析	138
7.2.3 东北帮分期开挖地表瞬时变形响应特征分析	144
7.3 东北帮三期采矿后地表沉陷关键部位判定	147
7.4 施工荷载作用下采空区地基稳定性分析	148
7.4.1 采空区地基破坏模式及其稳定判据	148
7.4.2 基于数值分析的采空区地基稳定性研究	148
7.4.3 采空区地基稳定性评价与工程处治对策	156
7.5 小结	157
第 8 章 结论	158
8.1 结论	158
8.2 评价	160
参考文献	161

第 1 章 绪 论

1.1 引 言

能源、人口和环境是当今世界三大国际性科学主题，能源的优先发展战略越来越受到世界各国的重视。在能源的需求中，与其他国家相比，中国更加依赖煤炭资源。据统计^[7]，建国以来，煤炭在我国一次能源消费构成中一直占 70% 以上。目前，我国原煤产量为 19 亿 t，居于世界首位。由于我国是一个缺油、少气、富煤的国家，因此，我国 76% 的发电能源、76% 的工业和动力燃料、60% 的民用商品能源及 70% 的化工原料都是煤炭提供的。这种格局在今后相当长的时期内不会发生根本性的变化。世界能源工业和我国煤炭工业发展的实践都证明，煤炭以其所具有的资源可靠性、价格低廉性、燃烧的可洁净性，决定了其在一次能源中不可替代的地位。

随着我国经济建设的快速发展，能源消费也必将迅速增长。与井工采煤相比，露天煤矿具有基建投资省、生产成本低、资源浪费少、安全好和效率高等优点，因而，近年来露天采矿的规模得到了迅速的扩张。随着新的大型露天煤矿的不断开发，原有露天采场的逐年加深，造成边坡暴露的高度、面积及维持的时间也在不断增加，因此，如何经济有效地评价和保障露天煤矿边坡工程的稳定性，成为日益突出和亟待解决的技术难题。

边坡工程问题由来已久，其研究发展历史已长达百年。但随着工程实践的发展，露天采矿面临着新的困难和挑战，仍有很多复杂而又具有挑战性的课题需要解决，因此，在前人研究成果的基础上，结合安太堡露天煤矿工程实践，对露天煤矿边坡工程的稳定性及其控制对策问题，继续开展深入系统的研究，仍具有十分重要的理论意义和工程实用价值。

1.2 国内外边坡工程稳定性研究进展

1.2.1 边坡工程稳定性研究历程

1. 国外边坡工程稳定性研究的发展

工程实践的需要是岩土工程得以快速发展的主要动力。边坡工程的稳定性问题是岩土工程的主要研究内容之一。纵观国外边坡工程稳定性研究的发展历程，

大体可划分为三个阶段^[8]：

第一阶段：20 世纪 20 年代以前，边坡工程稳定性的计算分析，基本采用材料力学和土力学的原理和方法，以半经验、半理论性质并假定滑动面具有某一固定位置和形状为显著特点。例如，1915 年彼得森（Petterson）提出了只考虑摩擦力而不计黏聚力的圆弧滑动面的分析方法^[9]；1926 年费勒纽斯（Fellenius）^[10]等提出了同时考虑摩擦力和黏聚力的瑞典条分法。该阶段边坡工程稳定性的计算分析在力学原理上是很粗浅的，所做出的基本假定也是脱离力学实际情况的。

第二阶段：到 20 世纪 50 年代，边坡工程稳定性分析进入了重要发展阶段，以采用均质体弹塑性理论和极限平衡理论，能够考虑岩体材料的特性及岩体结构面对边坡失稳的控制作用为显著特色。例如，1954 年索柯洛夫斯基（Соколовский）根据松散介质极限平衡原理提出的边坡工程稳定性的计算，使边坡工程稳定性的分析方法向前迈进了一步，引起了普遍的重视。但该方法忽视了岩体的结构特征和力学状态，在实践中计算结果与实际不相符，显露出严重缺陷；与此同时，费先柯（Фисенко）考虑了岩体中结构面对边坡失稳的控制作用，结合松散介质极限平衡原理提出了一套岩质边坡稳定性的计算分析方法，但此方法采用了不够合理的静力学条分法，使其计算结果与实际情况差别较大。

第三阶段：20 世纪 60 年代以后，边坡工程稳定性分析进入了深入发展阶段，研究人员将岩体视为黏弹性、弹塑性或具有裂隙的脆性介质，并展开了对岩体非均质、各向异性和非连续性的研究，对岩体应力应变关系及岩体流变特性等时间效应的研究等。边坡工程稳定性的计算分析，基本上沿着两条路径进行：一是以极限平衡理论为基础，考虑岩体中断裂结构面控制，利用图解法或计算分析法，最后求得“安全系数”或类似“安全系数”的概念来进行边坡工程稳定性的定量评价。例如，1962 年太沙基提出的临界边坡理论；1970 年约翰（John）提出的半球体图解计算分析等。另一途径则是以有限单元法，近似地分析边坡工程岩体的变形特征和应力状态，但常由于对边坡岩体的基本力学特性、边坡的力学状态和应力特征等研究得不够，给计算与分析等带来了一定的困难，因而，目前通过各种计算分析方法所得到的结果与实际情况均有一定的差异，还有待进一步深入研究和向前发展。

2. 我国边坡工程稳定性研究的发展

我国从解放到现在，对边坡工程稳定性问题的研究可划分为四个阶段：

第一阶段：20 世纪 50 年代，我国开始对露天煤矿的边坡工程问题进行研究，其他行业如对铁路路堑边坡和引水渠道边坡等也开始进行研究。当时着重从

边坡工程造成的地质灾害出发,进行边坡工程破坏的定性分类,利用基于刚体极限平衡的分析方法,同时利用工程地质类比法,对边坡工程的稳定性进行评价和设计^[11]。

第二阶段:到20世纪60年代,孙玉科等提出了岩体结构及控制的观点^[12,13],划出了边坡岩体的结构类型^[14],并在应用赤平极射投影的基础上,提出了实体比例投影方法,用以进行块体破坏的计算、判断边坡工程的稳定性。同时结合露天煤矿边坡工程稳定性研究,开展了野外大型工程岩体的力学试验^[15,16],在边坡工程的稳定性计算方面有了很大的进展。

第三阶段:从20世纪70年代开始,进行边坡工程变形破坏机制的研究。在计算分析方面,不仅应用极限平衡原理,还应用弹塑性力学等理论,并随着计算机技术的发展,广泛采用有限单元法等来分析边坡工程变形破坏的条件及评价边坡工程的稳定性。到70年代末80年代初,已经形成了一套比较完整的工程地质力学学术观点和方法^[17]。在研究边坡工程稳定性问题上,积累了比较丰富的实践经验。

第四阶段:20世纪80年代以后,边坡工程稳定性研究进入了一个新的发展阶段。一方面,随着计算理论及计算机技术的发展,数值模拟技术已广泛应用于边坡工程稳定性研究中^[18],且逐步从定性过渡到半定量研究边坡工程的变形破坏及其内部的作用过程,从整体上认识边坡工程变形破坏的机制和边坡工程稳定性的发展变化趋势。与此同时,诸多学科间的相互交叉、渗透,使许多与现代科学有关的系列理论方法,如系统论、非线性科学^[19~22]等被引入到边坡工程稳定性研究中,使边坡工程稳定性的研究进入了一个新的发展阶段。

1.2.2 边坡工程稳定性分析方法

1. 定性分析方法

定性分析方法主要是通过工程地质勘察,对影响边坡稳定性的主要因素、可能的变形破坏方式及失稳的力学机制等进行分析,在此基础上对已变形地质体的成因及其演化史进行分析,从而给出被评价的边坡工程有关稳定的状况及其可能的发展趋势等定性的说明和解释^[23]。边坡工程稳定性定性分析常用的方法见表1.1。

定性分析方法的优点是能综合考虑影响边坡工程稳定性的多种因素,快速地对边坡工程的稳定状况及其发展趋势作出评价。定性分析方法的主要缺点是评价边坡工程的稳定状况时往往以人的经验为主,解决边坡工程问题的范围较窄,并带有很大的主观随意性^[24]。

表 1.1 边坡工程稳定性定性分析方法汇总表

序号	分析方法	方法要点	适用条件
1	自然历史分析方法 ^[25]	通过对边坡中各种变形破坏迹象及其基本规律、影响边坡稳定性因素等的分析,追溯边坡演变的全过程,对边坡稳定的总体状况、变形特征和发展趋势作出评价和预测	主要用于天然斜坡的稳定性评价
2	工程类比方法 ^[26,27]	将已有边坡的稳定状况及影响因素、工程设计等方面的有关经验,应用到类似所要研究的边坡中去,进行稳定性分析和设计的一种方法	这是目前应用较广泛的边坡稳定性分析方法
3	专家系统方法 ^[27]	将边坡工程专家的知识、工程经验、现场监测数据等知识和方法有机地组织起来,利用智能推理机来模拟并再现人脑的思维过程,寻求优化的技术路径,对所研究的边坡进行稳定性评价	输入边坡实例的信息,能省时、高效地优化决策水平
4	图解法 ^[28]	诸模图法利用一定的图表关系曲线来表征与边坡稳定有关参数间的关系,以此求出边坡稳定的安全系数 投影图法利用赤平极射投影的原理,通过作图来直观地表示出边坡变形破坏的边界条件,分析不连续面的组合关系、可能失稳岩体形态及其滑动方向等,进而评价边坡的稳定性	诸模图法主要用于强风化石弧形破坏面的边坡稳定性分析。投影图法主要用于节理化岩体边坡的稳定性分析
5	岩体质量评价法 ^[23,29]	岩体质量能够综合反映岩体中各种主要特征参数对边坡岩体稳定的影响效果,利用边坡岩体质量分级的 SMR (slope mass rating) 方法评价边坡稳定性,能够综合反映各种因素对边坡稳定性的影响	通过认识边坡岩体的固有特性,分析边坡工程的稳定性

2. 定量分析方法

1) 强度稳定性分析方法

本节提出的强度稳定性分析方法即极限平衡分析法。该方法建立在潜在滑移刚性块体的力系或力矩平衡分析的基础上,不考虑滑体本身的变形,只考虑滑体沿假定滑面的滑移,边坡变形破坏时其剪切破坏面(可以是平面、圆弧面、多级折面、不规则面等)满足莫尔-库仑 (Mohr-Coulomb) 破坏准则。

在大量的边坡工程分析和研究中,极限平衡分析法积累了丰富的经验,是目前普遍使用的一种定量分析方法。它是在通过分析临近破坏状况下,边坡工程岩体外力与内部强度所提供抗力之间的平衡,计算边坡工程岩体在自身和外荷载作用下的边坡稳定程度,通常以边坡稳定系数(安全系数)表示。其中最具有代表性的计算方法有瑞典圆弧 (Petterson) 法、瑞典条分 (Fellenius) 法、毕肖普 (Bishop) 法^[30]、简布 (Janbu) 法^[31]、斯宾赛 (Spencer) 法^[32]、摩根斯坦-普拉斯 (Morgenstern-Price) 法^[33]、不平衡推力传递法^[34]、楔体 (Hoek) 分析法^[35]、萨尔玛 (Sarma) 法^[36]等。

20 世纪 80 年代,何满潮通过对 Sarma 法的详细研究^[37],发现了 Sarma 法在考虑边界条件上的不足,提出改进的数学模型,并采用 Basic 语言编制了计算机程序,称为 MSarma(modified Sarma)法。该方法能够完成边坡在非齐次边界条件下的稳定性评价、参数敏感性分析和边坡稳定性的动态分析,对齐次边界条件自动满足。在何满潮教授的指导下,王旭春博士采用 QBasic 语言编制了《边坡稳定性 MSarma 分析系统》(DOS 版本)。2000 年姚爱军博士对 MSarma 法做了进一步的改进,并详细推导了考虑坡面加固力或附加荷载及广义非齐次条件下的边坡稳定性计算公式^[38]。该系统在巴东黄土坡滑坡等边坡稳定性研究中得到成功应用^[39]。

近期又有学者提出基于最小安全系数的改进条分法^[40],Donald 和陈祖煜将 Sarma 法的静力平衡方程转化为微分方程,通过求解该微分方程的闭合解得到安全系数,并已开发出边坡稳定性分析程序 EMU 等^[41]。这些方法的不同之处在于各自的边界条件和假设不同,满足的平衡条件、滑动面形状、分条方法及各分条之间作用力处理方式的不同等,相关内容见表 1.2。

表 1.2 边坡工程稳定性极限平衡分析方法汇总表

序号	计算方法	提出年份	滑体条分形式	是否考虑条块间作用力	适用滑面形态	地震荷载	边界条件
1	瑞典圆弧法	1915	整体	不考虑	圆弧	未考虑	
2	瑞典条分法	1926	垂直条分	不考虑	圆弧	未考虑	
3	简布法	1954 1972	垂直条分	考虑	圆弧、非圆弧	未考虑 考虑	
4	毕肖普法	1955	垂直条分	考虑	圆弧	未考虑	
5	摩根斯坦-普拉斯法	1965	垂直条分	考虑	非圆弧	考虑	
6	斯宾赛法	1967	垂直条分	考虑	非圆弧	未考虑	
7	不平衡推力传递法	1972	垂直条分	考虑	折线形	考虑	
8	楔体分析法	1974	非垂直条分	考虑	楔形	考虑	
9	萨尔玛法	1979	非垂直条分	考虑	任意复杂形态	考虑	齐次边界
10	MSarma 法	1996	非垂直条分	考虑	任意复杂形态	考虑	非齐次边界

极限平衡分析法一般为二维分析,适用于长直边坡的平面应变分析。对于弧形或圆锥状边坡则宜采用三维分析方法。冯树仁^[42]和杜建成^[43]等提出了关于边坡稳定的三维极限平衡计算方法,王家臣^[44]等提出了考虑边坡渐进破坏的三维

随机分析方法等。上述研究成果完善了极限平衡分析法的理论, 进一步提高了极限平衡理论的实用性。

在进行边坡工程稳定性分析中, 极限平衡分析法具有模型简单、计算简捷、可解决各种复杂剖面形状、能考虑各种加载形式的优点, 并有多年的实用经验, 若使用得当, 能得到比较满意的结果。一般地, 忽视空间效应, 将边坡工程稳定性分析作为平面问题来考虑, 得出的结果偏于安全。此外, 由于该方法引入了过多的人为简化假定、不考虑岩土体自身的应力、变形等力学状态, 所求出的岩土体分条间的内力和岩土体分条底部的反力, 均不能代表边坡工程在实际工作条件下真实的内力和反力, 只是利用人为的虚拟状态求出安全系数而已^[23], 不能反映边坡工程的整体或局部变形情况, 因此, 对变形控制要求较高的重要边坡工程, 传统的极限平衡分析法就显得束手无策了。

2) 变形稳定性分析方法

变形稳定性分析方法主要包括数值计算分析方法、物理模型试验方法^[29]和现场监测分析方法^[25,45]。

自 1966 年美国的 Clough 和 Woodward 应用有限元法分析土坡稳定性问题以来, 数值方法在边坡工程中的应用取得了巨大进展^[46]。比较成熟的数值方法是有限元法 (finite element method, FEM)^[47~55]、边界元法 (boundary element method, BEM)^[56~59]、离散元法 (discrete element method, DEM)^[60~70]、有限差分法 (fast lagrangian analysis of continua, FLAC)^[71~80]等。目前正在深入研究的是块体系统不连续变形分析法 (discontinuous deformation analysis, DDA)^[81~83]和数值流形方法 (numerical manifold method, NMM)^[84~86]。考虑变形的边坡稳定性分析方法汇总见表 1.3。

表 1.3 边坡变形稳定性分析方法汇总表

序号	分析方法	主要程序	基本原理	适用范围及存在问题
1	有限元法	2D 2- σ 3D- σ RFPA FINAL ANSYS	视工程岩体为连续力学介质, 通过离散化, 建立近似函数, 把有界区域内的无限问题简化为有限问题, 并通过求解联立方程, 对工程问题进行应力与变形分析	几乎可适用于所有的计算领域, 但对于大变形问题、岩体中不连续面、无限域和应力集中等问题的求解还不理想
2	离散元法	2D-Block 3D-Block UDEC ^{2D} UDEC ^{3D}	将非连续性力学介质离散为多边形块体单元, 块与块之间没有变形协调的约束, 只需满足平衡方程。基于牛顿第二定律并结合不同本构方程, 允许刚体或可变形体间的位移, 变形可以是不连续的过程	适用于求解非连续介质大变形问题, 目前离散元法在被结构面切割的节理化岩体或碎裂结构的岩质边坡的变形和破坏过程分析及其稳定性分析中得到了广泛应用

续表

序号	分析方法	主要程序	基本原理	适用范围及存在问题
3	边界元法	BEM	以 Betti 互等定理和 Kelvin 基本解为理论基础,只对研究区的边界进行离散,主要对无界域或半无界域的线弹性连续介质求解,它要求的数据输入量较少	在处理材料的非线性、不均匀性、模拟分步开挖等方面还远不如有限元法,不能求解大变形问题。在边坡稳定性分析中应用较少
4	有限差分法	FLAC ^{2D} FLAC ^{3D}	将基本方程和边界条件下的微分方程改换成代数方程求解,基于有限差分原理研制推出的 FLAC 数值分析方法,能有效模拟随时间演化的非线性系统的大变形力学过程	适用于求解连续介质大变形问题,其缺点同有限元法一样,计算边界和单元网格的划分带有很大的随意性
5	不连续变形分析法	DDA	用块体元来模拟被不连续面切割成的块体系统,通过不连续面间的约束建立整个系统的力学平衡条件,考虑变形的不连续性并引入时间因素,采用运动学方法解决非连续的静力和动力学问题	可模拟岩石块体的移动、张开、闭合等运动过程,因而可对岩体的局部与整体稳定性作出评判,但在岩体参数选取等方面有一定局限性
6	数值流形方法	NMM	以拓扑流形学为基础,应用有限覆盖技术,在分析域各物理覆盖上,建立通用的覆盖函数和形成总体位移函数,统一解决连续与非连续变形问题的数值方法	对解决复杂地质问题,动、静交叉问题及连续和非连续介质耦合问题等是一种高效精确的数值分析方法
7	物理模型方法		物理模型方法以相似理论为基础,如果相似参数能够在模型设计中得到满足,通常能够形象地模拟边坡岩体中的应力大小及其分布、边坡岩体的变形破坏机制及其发展过程、加固措施的加固效果等	物理模型方法是一种发展较早、应用广泛、形象直观的边坡稳定性分析方法。它主要包括光弹模型试验、底摩擦试验、地质力学模型试验、离心模型试验等
8	现场监测方法		捕捉边坡工程由稳定状态向不稳定状态突变的前兆信息,并对其进行分析和解释,可更好地认识边坡岩体变形的发展过程和失稳的征兆。利用监测结果对边坡的稳定性进行分析,已成为目前边坡稳定性分析评价的一种重要方法	现场监测位移、速度、声发射率、脉冲频率、地下水等信息,对边坡岩体稳定性作出评价和预测,或对已加固措施的加固效果进行检验,为安全施工等提供服务

数值分析方法能从较大的工程范围考虑边坡介质的复杂性,比较全面地分析边坡工程的应力与变形状态,能够对边坡工程从局部开始渐进扩展至整体破坏的过程进行量化表征,能够加深人们对边坡工程破坏模式和变形破坏规律的认识,

是对极限平衡分析法的改进和补充。

由于边坡工程的复杂性,如何合理概化边坡工程岩体的连续性、建立符合边坡工程实际的计算模型、正确选用计算参数和合理的本构关系等,仍是值得深入探讨和研究的问题。

3) 不确定性分析方法

基于对边坡工程岩体、边坡工程复杂性和不确定性的认识,对边坡工程的不确定性与非线性研究已成为边坡工程稳定性分析研究的趋势。各种边坡稳定性不确定性分析方法汇总见表 1.4。

表 1.4 边坡工程稳定性不确定性分析方法汇总表

序号	分析方法	方法要点	适用范围及存在问题
1	可靠性分析法 ^[87~94]	通过现场调查获得影响边坡稳定的多个样本,进行统计分析后,求出它们各自的概率分布及其特征参数,然后利用某种可靠性分析方法,求解边坡岩体的破坏概率即可靠度。用可靠度比用安全系数在一定程度上能客观、定量地反映边坡的安全程度	近年来该方法的研究与应用发展很快,由于计算所需的大量统计资料很难获取,各因素的概率模型及其数字特征等的合理选取还没有很好解决,计算较困难和复杂
2	模糊数学方法 ^[95~96]	首先找出影响边坡稳定的各个因素,并赋予它们不同的权值,然后根据最大隶属度原则,采用模糊分级评判或模糊聚类方法对边坡的稳定性进行评价	主要用于大型边坡的整体稳定性评价。缺点是对边坡的评判较笼统,权重的分配多由经验确定,主观性较大
3	灰色预测方法 ^[97~98]	将边坡工程视为一个灰色系统,根据影响边坡稳定的不确定性因素间发展状态的相似或相异程度,来衡量各因素间的关联程度,确定它们对边坡稳定影响的主次关系,从而对边坡的稳定性进行分析	灰色理论适用于外延明确,内涵不明确的对象。在边坡工程中,应用灰色系统预测模型进行滑坡发生时间的预测较多
4	分形几何方法 ^[99~101]	在边坡稳定性分析中,根据边坡位移的监测资料,依据关联维数 D_2 的原理,应用分形理论确定边坡状态空间维数的充分和必要值,然后依据 Renyi 熵 K_2 的原理,用 K_2 和 $ K_2 $ 来分析边坡稳定性和稳定程度	分形几何的应用必须在无特征尺度区内,如果没有足够的经验,分数维所包含的信息将难以挖掘,因此,应考虑将分数维与各种方法综合应用
5	神经网络方法 ^[102~104]	利用神经网络的学习和联想记忆功能、运用网络存储的相关知识对边坡进行稳定性分析。神经网络可考虑其他方法难以考虑的定性描述和人为因素,解决一些难用明确的数学、力学方法表示的不确定性因素及其相互关系,对结论进行定量和定性分析	基础研究难度大,虽取得了一些成果,但还远未形成完整的理论和体系,另外,存储知识的范围和程度将在很大程度上影响其对边坡稳定性的评判

对边坡工程进行稳定性分析时,各种不确定性方法都不同程度地考虑了边坡