

*Strip Mine Landslide Disaster Prevention  
and Surface Resources Damage Evaluation  
and GIS Visualization Application Practice*



# 露天矿滑坡灾害防治与 地表资源损害评价及 GIS可视化技术应用实践

张 鹏 王旭春 管晓明 朱 珍 著



中国海洋大学出版社  
CHINA OCEAN UNIVERSITY PRESS

本书获得国家自然科学基金项目资助

资助类别:青年科学基金项目

项目编号:41402275

项目名称:滑坡滑动力-位移三维可视化联合预报模型与机理探究

# 露天矿滑坡灾害防治与地表 资源损害评价及 GIS 可视化 技术应用实践

张 鹏 王旭春 管晓明 朱 珍 著

中国海洋大学出版社

• 青岛 •

图书在版编目(CIP)数据

露天矿滑坡灾害防治与地表资源损害评价及 GIS 可视化技术应用实践/张鹏等著. —青岛:中国海洋大学出版社,2016.8

ISBN 978-7-5670-1221-9

I. ①露… II. ①张… III. ①露天矿—滑坡—灾害防治—研究②露天矿—地面沉降—研究 IV. ①TD7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 192640 号

出版发行 中国海洋大学出版社

社 址 青岛市香港东路 23 号

邮政编码 266071

出版人 杨立敏

网 址 <http://www.ouc-press.com>

电子信箱 1922305382@qq.com

订购电话 0532-82032573(传真)

责任编辑 刘宗寅

电 话 0532-85902533

印 制 蓬莱利华印刷有限公司

版 次 2016 年 8 月第 1 版

印 次 2016 年 9 月第 1 次印刷

成品尺寸 170 mm×230 mm

印 张 13.5

印 数 1—1000

字 数 260 千

定 价 28.00 元

# 前言

## PREFACE

我国是矿业大国,又是最大的发展中国家,矿产资源的年消耗量很大。矿山建设项目,不论露天还是井下开采,无一例外地都要对地质结构、水文地质条件、工程地质结构、环境地质条件造成严重的破坏。矿山开采活动势必导致大量采掘井巷破坏和岩土体变形,以及矿区地质、水文地质条件与自然环境发生严重变化,诱发地质灾害,危害人类生命财产安全,破坏采矿工程设备和矿区资源环境,影响采矿生产。因此,有别于其他建设项目,矿山开发项目更有必要开展地质灾害危险性评估工作。

矿山地质灾害种类很多,单就地面矿山地质灾害而言,包括地面塌陷、地面沉降、地裂缝、滑坡、崩塌、泥石流、煤自燃等。本书针对矿山边坡滑坡与地面沉陷两类地质灾害开展了研究与分析;边坡工程与开采沉陷作为岩土工程领域的热点话题,其研究具有极大的理论意义和应用价值。边坡工程的研究是岩土工程的一个主要分支,涉及工程数学、力学、工程地质学等多个学科领域,其研究历史已有100多年。边坡稳定性分析和评价是边坡稳定研究的核心。对边坡进行稳定性分析评价就是对边坡的稳定性现状及其发展趋势做出评价与预测,从而为边坡的防护与治理提供依据。国内外当前边坡稳定性评价方向,主要是不断应用新的计算机技术手段,以期更为准确合理地模拟分析边坡稳定性。随着煤矿开采强度和开采范围的不断扩大,沉陷区环境资源损害问题越来越受到关注,也成为当前迫切需要解决的技术性难题之一。沉陷区环境资源损害评价是一项综合性强、工作量大、技术难度高的工作,传统的手工分析及计算已远远落后于当今社会发展的需要,同时其

计算结果的科学性与合理性也难以保证。随着计算机技术的不断发展与广泛应用,大量的新技术逐步被引入开采沉陷领域,沉陷区主要环境资源的损害评价等工作步入信息技术引领的新阶段。

在写作本书过程中,参阅了大量国内外文献,试图较为客观地反映矿山地质灾害的研究现状以及前人的研究成果与实践经验。本书阐述了边坡滑坡、开采沉陷等地质灾害问题的基本性质、形成机理、研究理论与方法、灾害评价分析与防治等,旨在让读者通过本书能够对矿区地质灾害防护的相关理论有所掌握,便于进行矿区综合治理规划与设计。

全书共分 10 章。其中,第 1 章阐述了边坡稳定性分析、监测、采煤沉陷区环境资源损害评价等研究理论与方法,提出了近年来比较突出的相关研究问题。第 2 章对矿山滑坡的分类、影响因素、时空分布规律,以及矿山开采岩层移动、地表变形、环境损害等进行了总结,并介绍了 GIS 可视化技术。第 3 章借助 MSARMA 分析设计系统,开展了边坡稳定性计算及稳态敏感性特征分析;同时,基于 GIS 三维可视化技术,通过与三维工程地质模型叠加,实现了安太堡露天矿边坡自然状态的三维可视化稳定性分区。第 4 章分析了降雨条件、地震条件,以及降雨与地震耦合作用条件下的边坡稳定性发展态势,并依据三类不同分析条件的稳定性计算结果,基于三维可视化技术,开展了安太堡露天矿边坡三维可视化边坡稳定性分区研究。第 5 章通过研究安太堡露天矿边坡的变形和失稳特点,确定了预应力锚索框架梁加固设计方案;结合安太堡露天矿边坡工程实例,确定了预应力锚索的主要设计参数,制订了详细的施工设计方案,并研究了框架梁在张拉阶段和工作阶段受力特点和内力计算方法。第 6 章对采用预应力锚索框架梁加固后的边坡进行了稳定性分析和评价,并进行了岩体材料参数、地震、地下水和支护结构参数对边坡稳态敏感性分析,在此基础上对边坡进行了锚固优化设计。第 7 章开展了边坡稳定性监测防治工作,在安太堡露天矿边坡应用集监测、预警、加固、防治于一体的边坡稳定性远程智能监测系统,对系统监测结果进行了可视化分析,经分析得知经加固后的边坡稳定性明显提升,基本处于稳定状态。第 8 章归纳总结了国内外关于沉陷区建筑物和土地资源损害评价的理论与标准;由于国内外至今未形成公认的环境资源损害评价体系,通过对兖州矿区进行现场调研,并结合相关理论及现行标准构建了专用于兖州矿区鲍店煤矿的主要环境资源损害评价应用模型。第 9 章从数据需求

和功能需求两方面进行了系统分析,针对系统目标、系统的设计原则、软件平台选择等内容论述了系统的总体设计,基于 Arc GIS 的 AO 二次集成开发建立了环境资源损害评价模块。第 10 章实现了对“开采沉陷环境资源损害评价系统”的工程实际应用,选取兖州矿区鲍店煤矿为评价研究区,结合矿区的地质采矿条件,详细介绍了评价计算及可视化分析的全过程。

本书第 1、3、4、7、8、9、10 章由张鹏、王旭春撰稿,第 2、5、6 章由管晓明、朱珍撰稿。

本书出版得到了国家自然科学基金的资助。在写作过程中,受到了诸多同行的鼓励与指导。同时,排版过程中得到了丁仓硕士、王鹏军硕士、赵军祥硕士的帮助,感谢他们的帮助与指导。还要特别感谢中煤平朔公司与兖州煤业股份有限公司的领导及现场工程师,在现场调研过程中他们提供了大量的数据资料和现场指导,并对本书所涉及的研究提出了良好的建议。在此,向他们表示衷心的感谢。

矿山边坡滑坡与开采沉陷是岩土工程中常见的问题。本书仅是对过去的一些研究成果进行了综合分析和总结,并在 GIS 操作平台下的软件研制方面做了初步尝试。书中若有不妥之处,敬请同行和专家批评指正。

张 鹏

2016 年 5 月于青岛

# 目 录

## CONTENTS

|          |                                |           |
|----------|--------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>绪论</b>                      | <b>1</b>  |
| 1.1      | 煤矿地质灾害概述 .....                 | 1         |
| 1.2      | 相关研究理论与方法综述 .....              | 3         |
| 1.3      | 相关研究突出性问题总结 .....              | 13        |
| 1.4      | 本书的研究内容与方法 .....               | 14        |
| <b>2</b> | <b>矿山滑坡、开采沉陷及 GIS 可视化技术</b>    | <b>16</b> |
| 2.1      | 矿山滑坡 .....                     | 16        |
| 2.2      | 矿山开采沉陷 .....                   | 24        |
| 2.3      | GIS 可视化技术 .....                | 32        |
| <b>3</b> | <b>自然条件下露井联采边坡稳定性分析</b>        | <b>38</b> |
| 3.1      | 自然条件下安太堡露天矿边坡隐患机理分析 .....      | 38        |
| 3.2      | 自然条件下边坡稳定性评价计算 .....           | 42        |
| 3.3      | 基于 GIS 的自然条件下露井联采边坡稳定性分区 ..... | 48        |
| <b>4</b> | <b>降雨和地震条件下露井联采边坡稳定性分析</b>     | <b>54</b> |
| 4.1      | 降雨条件下边坡三维可视化稳定性分区 .....        | 54        |
| 4.2      | 地震条件下边坡稳定性分析和可视化实现 .....       | 59        |
| 4.3      | 降雨和地震条件下边坡稳定性研究分析 .....        | 64        |
| <b>5</b> | <b>露天矿边坡预应力锚索框架梁加固技术研究</b>     | <b>71</b> |
| 5.1      | 边坡加固方案初设 .....                 | 71        |

|           |                                  |            |
|-----------|----------------------------------|------------|
| 5.2       | 预应力锚索框架梁加固技术 .....               | 74         |
| 5.3       | 预应力锚索框架梁加固设计方案 .....             | 76         |
| 5.4       | 预应力锚索设计 .....                    | 79         |
| 5.5       | 框架梁设计 .....                      | 87         |
| <b>6</b>  | <b>边坡加固后稳定性分析与优化设计</b> .....     | <b>100</b> |
| 6.1       | 边坡加固后稳定性分析与评价 .....              | 100        |
| 6.2       | 边坡稳态对参数敏感性分析 .....               | 105        |
| 6.3       | 边坡加固优化设计 .....                   | 110        |
| <b>7</b>  | <b>边坡监测防治及 GIS 可视化分析</b> .....   | <b>114</b> |
| 7.1       | 安太堡露天矿边坡监测防治设计 .....             | 114        |
| 7.2       | 预应力监测系统的安装 .....                 | 119        |
| 7.3       | 基于 GIS 的加固条件下边坡稳定性分析 .....       | 124        |
| <b>8</b>  | <b>沉陷区主要环境资源损害评价模型</b> .....     | <b>128</b> |
| 8.1       | 沉陷区建筑物损害评价理论及标准 .....            | 128        |
| 8.2       | 沉陷区土地资源损害评价理论及标准 .....           | 135        |
| 8.3       | 沉陷区主要环境资源损害评价应用模型 .....          | 142        |
| <b>9</b>  | <b>沉陷区损害评价 GIS 可视化系统实现</b> ..... | <b>148</b> |
| 9.1       | 系统分析 .....                       | 148        |
| 9.2       | 系统总体设计 .....                     | 150        |
| 9.3       | 系统开发概述 .....                     | 151        |
| 9.4       | 环境资源 GIS 基础数据库建立 .....           | 152        |
| 9.5       | 评价系统操作界面及功能模块简介 .....            | 158        |
| <b>10</b> | <b>GIS 环境资源损害评价系统应用</b> .....    | <b>171</b> |
| 10.1      | 系统应用简况 .....                     | 171        |
| 10.2      | 建立基础数据库 .....                    | 171        |
| 10.3      | 沉陷区地表变形预计点层 .....                | 176        |
| 10.4      | 沉陷区主要环境资源损害 GIS 可视化评价 .....      | 177        |
|           | <b>参考文献</b> .....                | <b>182</b> |

## 1.1 煤矿地质灾害概述

地质灾害是指由于自然、人为或综合的地质作用使地质环境产生突发或累进的破坏,并造成人类生命财产损失的现象或事件。由于地质灾害具有隐蔽性、破坏性和突发性强的特点,重大的地质灾害事故往往会给国民经济建设和人民生命财产造成严重危害,破坏资源和环境,给灾区社会经济发展造成广泛而深刻的影响。

我国的地质灾害种类繁多、分布广泛、活动频繁、危害严重,每年因地质灾害造成的直接经济损失占自然灾害总损失的 20% 以上,直接影响了人民的生活,制约了社会的可持续发展。我国地质灾害以突发性地质灾害为主,其中滑坡发生数量最多。《中国地质环境公报》记载,2004 年,我国除上海外全国 30 余个省(自治区、直辖市等)都有突发性地质灾害发生,主要类型有滑坡、崩塌、泥石流和地面塌陷等;其中,共发生滑坡灾害 9 130 起,主要分布在湖南、云南、重庆、四川、湖北、广西、安徽、吉林、福建等省(自治区、直辖市)。2005 年,全国共发生滑坡灾害 9 359 起,主要分布在福建、安徽、湖北、重庆、陕西、浙江、广东等省(直辖市)。2006 年,全国有 28 个省(自治区、直辖市)发生突发性地质灾害,其中滑坡灾害 88 523 起,占全国地质灾害发生总数的 86.1%。2007 年全国发生各类地质灾害 25 364 起,造成 1 123 人伤亡,其中死亡 598 人,失踪 81 人,造成直接经济损失 24.8 亿元;与上年同期相比,地质灾害造成的死亡和失踪人数减少 12.3%,直接经济损失减少 42.7%。中华人民共和国国土资源部公布的《全国地质灾害通报》(2009~2014 年度)显示,2009 年全国共发生地质灾害 10 840 起,其中滑坡 6 657 起,特大型滑坡共导致 48 人死亡、16 人受伤,直接经济损失达到 2 亿元;2010 年全国共发生地质灾害 30 670 起,其中滑坡 22 329 起,特大型滑坡共导致 364 人死亡、失踪;2011 年

全国共发生地质灾害15 664起,其中滑坡 11 490 起,特大型滑坡共导致 54 人死亡,直接经济损失达到 6 亿元;2014 年全国共发生地质灾害 10 907 起,其中滑坡 8 128 起、崩塌 1 872 起、泥石流 543 起、地面塌陷 302 起、地裂缝 51 起、地面沉降 11 起,共造成 349 人死亡、51 人失踪、218 人受伤,直接经济损失 54.1 亿元;2015 年全国共发生地质灾害8 224起,与 2014 年相比,地灾发生数量、造成死亡失踪人数和直接经济损失分别减少 24.6%、28.3%和 54.0%。此外,2015 年全国共成功预报地灾 452 起,避免人员伤亡 20 465 人,避免直接经济损失 5 亿元。

煤矿开采过程中,不同的开采方式从地壳内部挖出了大量的矿石和岩石,破坏了地表与内部岩石圈原有的平衡状态,开采的不合理性、长期性、广泛性、多样性导致出现了地壳的不稳定性,诱发了地质灾害。此外,相当长时间以来,地方和民营小煤矿等如雨后春笋般发展,它们与国营大矿山争夺资源,或单独或寄生于国营大矿山之上,每个小矿山在大矿山上挖一个洞,宛如一个个疮疤,极易发生地质灾害事故。

据统计,山西省采矿高峰时期各类煤矿企业达 10 000 多家,全省历年总采动面积高达 16 000 km<sup>2</sup> 以上。原本十分脆弱的地质环境,在长期、大量采掘活动影响下,加上降雨集中,人为诱发的地面塌陷、地裂缝时有发生,使岩土体的稳定性遭受严重破坏,加剧了一系列地质灾害,因灾害导致居民房屋遭受不同程度的破坏,民事纠纷不断增多,部分村庄被迫搬迁,生态环境损害惊人。

煤矿开采形成的地质灾害种类繁多,矿山开采过程中会产生边坡失稳、滑坡、崩塌、泥石流、地面沉陷、地面沉降、地裂缝、矿震等,该类灾害的频率高、范围广,最直接的受害者是矿区的建筑物、土地、道路等基础设施类地表资源。煤矿开采对矿区土地资源及环境的影响破坏主要表现为矿区煤场、废石、土堆积物、地表废气坑等工程占地,因采煤导致的土地塌陷和煤矸石压地现象屡见不鲜,严重影响了当地经济发展与居民生活。此外,煤矿开采容易引发矿区水资源危机,导致地下水疏干、井泉干涸,对矿区水资源及水环境的破坏严重。

本书主要研究分析两类地质灾害问题,其一为对露天煤矿开采形成的高边坡稳定性问题,其二为地下煤矿开采引发的地表资源损害问题;选取了安太堡露天矿西北帮边坡作为工程背景,结合工程实际,分析了该边坡在自然条件、降雨、地震及降雨地震耦合条件下的稳定性状况,并针对其关键性区域提出了一系列防治加固措施。同时,以尧州矿区鲍店煤矿为研究对象,开展了“三下”开采对矿区建筑物、土地等地表环境资源的损害评价研究,通过构建损害计算模型对矿区地表资源的损害程度进行科学评价,有效地指导后续的赔偿问题。针对以上两类地质灾害问题,基于 GIS 可视化工具,开展了边坡稳定性分析与开采沉陷损害评价的三维可视化研究工作,推动了信息化技术在地质灾害领域的应用实践。

## 1.2 相关研究理论与方法综述

### 1.2.1 边坡稳定性分析评价

边坡稳定分析方法的研究是边坡问题的重要研究内容,也是边坡稳定性研究的基础。边坡稳定性分析过程一般步骤为实际边坡—力学模型—数学模型—计算方法—结论,其核心内容是力学模型、数学模型、计算方法的研究,即边坡稳定性分析方法的研究。边坡计算作为岩土工程学科中的一个非常重要的分支,在其自身发展的历程中不断地自我完善。近年来在该领域已经取得了许多新的进展,可大致归纳如下。

#### 1.2.1.1 定性分析方法

定性评价方法是通过分析影响边坡稳定的主要因素、失稳的力学机制及可能的破坏形式等,对边坡的成因及演化历史进行分析,以此评价边坡稳定状况及其可能发展趋势。综合地考虑影响边坡稳定性的因素,快速地对边坡的稳定状况及其发展趋势做出评价是该方法的优点。在边坡工程的抢险中定性评价更显得非常重要。

##### (1) 地质分析法(历史成因分析法)。

根据边坡的地形地貌形态、地质条件和边坡变形破坏规律,追溯边坡演变的全过程,预测边坡稳定性发展的总趋势及其破坏方式,对边坡稳定性做出评价。由于主要依靠经验和定性分析进行边坡的稳定性评价,此方法用于天然斜坡的稳定性评价较多。

##### (2) 工程地质类比法。

该方法的实质是把已有的自然边坡或人工边坡的研究设计经验应用到条件相似的新边坡的研究和人工边坡的研究设计中去。需要对已有边坡进行详细的调查研究,全面分析工程地质因素的相似性和差异性,分析影响边坡变形发展的主导因素的相似性和差异性,同时还应考虑工程的类别、等级及其对边坡的特定要求等。它虽然是一种经验方法,但在边坡设计特别是在中小型工程的设计中是很通用的方法。

##### (3) 图解法。

图解法可以分为两类。第一类,用一定的曲线和诺模图来表征边坡有关参数之间的定量关系,由此求出边坡稳定性系数,或已知稳定系数及其他参数( $\varphi$ 、 $c$ 、 $r$ 、结构面倾角、坡角、坡高)仅一个未知的情况下,求出稳定坡脚或极限坡高。这是力学计算的简化。第二类,利用图解求边坡变形破坏的边界条件,分析软弱结构面的

组合关系,分析滑体的形态、滑动方向,评价边坡的稳定程度,为力学计算创造条件。常用的图解法有赤平极射投影分析法及实体比例投影法。

#### (4) 边坡稳定专家系统。

工程地质领域最早研制出的专家系统是用于地质勘查的专家系统 Propector,是由斯坦福大学于 20 世纪 70 年代中期完成的。另外,MIT 在 20 世纪 80 年代中期研制的咨询专家系统也得到成功的应用。在国内,许多单位正在进行研制,并取得了很多成果。专家系统使得一般工程技术人员在解决工程地质问题时能像有经验的专家一样给出比较正确的判断并做出结论,因此专家系统的应用为工程地质的发展提供了一条新思路。

#### (5) RMR-SMR 法。

对岩体进行分类的方法中,较著名的有巴顿(N. Badon)等人提的 Q 值分类法(主要用于隧道支护设计的岩体工程分类)、RMR 值分类法、SMR 分类法。

SMR 分类法是从 RMR 法演变而来的。利用 SMR 法来评价边坡岩体的稳定性,方便快捷,且能够综合反映各种因素对边坡稳定性的影响。RMR-SMR 体系既具有一定的实际应用背景,又是在国际上获得较广泛应用的方法。在我国工程界对此体系的研究也是十分活跃的。

### 1.2.1.2 定量分析方法

定量评价方法实质是一种半定量的方法,虽然评价结果表现为确定的数值,但最终判定仍依赖人为的判断。目前,所有的定量的计算方法都基于定性分析。

#### (1) 极限平衡法。

极限平衡法在工程中应用最为广泛。工程实践中,常用的边坡稳定性评价指标是边坡稳定系数,它的计算就是基于极限平衡理论。极限平衡法的基本假设是边坡变形破坏时其破坏面(可以是平面、圆弧面、多级折面或不规则面等)满足破坏准则。早期边坡稳定性分析将滑面假定为平面或圆弧面,并认为滑体整体滑动,随后为提高计算精度和处理复杂滑动面边坡,将滑动体划分成若干个条块,假定条块为刚塑性体,建立静力平衡方程,然后求解解析解或迭代求数值解。依据该原理的方法有很多,如瑞典圆弧法、瑞典条分法、Bishop 法、Janbu(简布)法、不平衡传递系数法等。

1915 年瑞典彼得森(Petterson)提出圆弧法,通常称之为“瑞典圆弧法”,适用于均质各向同性的土体边坡或松散碎裂结构的岩体边坡。该方法假定边坡破坏时沿一个有固定圆心的圆弧面滑动,将滑体作为一个整体计算,由圆弧面上的力矩关系计算边坡稳定系数。该方法适用于饱和( $\varphi=0$ )的黏性土坡,对于外形复杂滑体其重心很难确定,而且当构成土坡为多层土又有地震力等外力作用时,其受力情况复杂,用此方法比较困难。

费伦纽斯等人在此基础上将滑体分成若干条块,提出瑞典条分法。该方法不考虑条块间的作用力,垂直条分,滑面为圆弧。

1955年,毕肖普(Bishop)提出边坡稳定系数的含义应是沿整个滑动面上的抗剪强度 $\tau_f$ 与实际产生剪应力 $T$ 的比,即 $F_s = \tau_f / T$ ,并考虑了各土条侧面间存在着作用力,称这种稳定系数计算方法为Bishop法。该法假定相邻土条间侧向作用力矩相互抵消,且条块间切向力满足于 $X_{i+1} - X_i = 0$ 。该方法比瑞典条分法更精确了一步,但应注意其稳定系数含义的改变和四项约束条件,即圆弧滑面、垂直条分、相邻条块间侧向作用力矩抵消及 $X_{i+1} - X_i = 0$ 。在实际工程中,边坡的滑动面并不一定是圆弧,而往往是非圆弧的复杂曲面或折线形画面,因此,该法不适用具有复杂滑动面的边坡稳定性评价。

1956年,简布(Janbu)提出了非圆弧滑面的边坡稳定系数计算方法。该方法与Bishop法的主要区别在于滑动面可以是非圆弧滑面,并假定条块间作用点位置已知,确定条块侧面 $E$ 的作用点位置总要落在条块高度范围以内而不会在滑面以下或紧靠滑面处,其位置在条块地面以上 $\frac{1}{4} \sim \frac{1}{3}$ 条块高度处,由于它对计算结果影响较小,通常取 $\frac{1}{3}$ 条块高度即可。

对于折线形滑动面边坡稳定性评价,随后发展的还有不平衡推力传递法。它沿滑动面起伏转折点将边坡分成竖直条块,并假定各条块为刚性的,两条块间作用力的合力 $P$ 的方向与上一条块底面平行。但是,该方法仍然不能解决具有复杂侧滑面的边坡稳定性情况。

极限平衡法的最新发展之一是Sarma法。其基本概念为边坡除非是沿一个理想的平面或圆弧滑动,才可以作为一个完整的刚体运动;否则,必须先破裂成多个可以相对滑动的块体,才能发生滑动。该方法的优点是可以用来评价各种类型滑坡的稳定性,如平面滑动、楔形滑动、圆弧及非圆弧滑动等;条块边界不需要垂直。

## (2) 数值分析方法。

数值分析方法主要是利用某种方法求出边坡的应力分布和变形情况,研究岩体中应力和应变的变化过程,求得各点上的局部稳定系数,由此判断边坡的稳定性。其主要有以下几种方法。

有限单元法(FEM):该方法是目前应用最广泛的数值分析方法。其优点是部分地考虑了边坡岩体的非均质、不连续介质特征,考虑了岩体的应力应变特征,可以避免将坡体视为刚体、过于简化边界条件的缺点,能够接近实际地从应力应变特征分析边坡的变形破坏机制,对了解边坡的应力分布及位移变化很有利。其不足之处是数据准备工作量大,原始数据易出错,不能保证整个区域内某些物理量的连

续性,对解决无限性问题、应力几种问题等其精度比较差。

边界单元法(BEM):该方法只需对研究区的边界进行离散化,具有输入数据少的特点。其计算精度较高,在处理无限域方面有明显的优势。其不足之处为一般边界单元法得到的线性方程组的关系矩阵是不对称矩阵,不便应用有限元中成熟的对稀疏对称矩阵的系列解法;另外,边界单元法在处理材料的非线性和严重不均匀的边坡问题方面远不如有限单元法。

离散单元法(DEM):该方法是由 Cundall(1971)首先提出的。离散单元法可以直观地反映岩体变化的应力场、位移场及速度场等各个参量的变化,可以模拟边坡失稳的全过程。该方法特别适合块裂介质的大变形及破坏问题的分析。其缺点是计算时步需要很小,阻尼系数难以确定等。

块体理论(BT):该理论是由 Goodman 和 Shi(1985)提出的。该理论利用拓扑学和群论评价三维不连续岩体稳定性,并且建立在构造地质和简单的力学平衡计算的基础上。块体理论为三维分析方法,随着关键块体类型的确定能找出具有潜在危险的关键块体在临空面的位置及其分布。

此外,近些年来数值方法发展很快,比如无界元(IDEM)、不连续变形分析(DDA)等。另外,由于工程实践的需要,出现了大量的各种数值方法的耦合算法。如有限元、边界元、无穷元、离散元、块体元等的相互耦合,以及数值解和解析解的结合、数理统计与数值解的结合等。这些结合充分发挥了各个方法的优点,能更好地反映出岩体工程的计算特点,适应岩体的非均质、不连续的特点,更好地表现出无限域及其近场及远场效应,表达了工程因素的时空变化以及岩体力学参数的不稳定性。这些耦合计算使得岩体结构离散合理化,复杂岩体结构进一步简化,从而达到经济、高效的目的。

边坡工程数值方法以其独特的优势,弥补了理论分析和极限平衡等分析方法的不足,其主要优点如下:① 由于边坡具有复杂的边界条件和地质环境,如岩土体的非均匀性,造成边坡工程问题的非线性等特性,这些问题仅用弹塑性理论和极限平衡分析方法是无法解决的,而数值方法可以方便地处理上述问题;② 数值方法可以得到边坡的应力场、应变场和位移场,非常直观地模拟边坡变形破坏过程;③ 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;④ 数值分析能根据岩土体的破坏准则,确定边坡的塑性区域或拉裂区域,分析边坡的累进性破坏过程和确定边坡的起始破坏部位;⑤ 采用离散元法可以仿真边坡整体滑动的过程,对于预测边坡的破坏规模和方式具有重要意义。

### 1.2.1.3 不确定性分析方法

#### (1) 系统分析方法。

由于边坡处于复杂的岩土体力学环境条件下,其稳定性的涉及面很广,且稳定程度非常复杂,可以认为其是一个复杂系统,因此边坡问题也是一个系统工程问题。只有利用系统分析方法才能把各个侧面的研究有机结合起来,为实现稳定性评价及预测这一系统的总目标服务。应用系统分析方法应该遵循的途径为岩体力学环境条件的研究→变形破坏机制研究→稳定性计算分析。目前,系统分析方法广泛应用于边坡稳定性分析之中。

### (2) 可靠度分析方法。

确定性分析方法中经常用到安全系数的概念,其实只是滑动面上平均稳定系数,而没有考虑影响安全系数的各个因素的变异性,这就有时会导致与实际情况不相符的计算结果,所以要求在分析边坡的稳定性时充分考虑各随机要素的变异性,而可靠度分析方法则考虑了这一点。可靠度方法在分析边坡的稳定性时,充分考虑各个随机要素(如岩体及结构面的物理力学性质,地下水的作用包括静水压力、动水压力、裂隙水压力、软化作用、浮托力,各种荷载等)的变异性。

### (3) 灰色系统方法。

灰色系统信息部分明确、部分不明确。灰色系统理论主要以信息的利用与开拓为宗旨,以客观现象量化为目标,除对事物进行描述外,更侧重对事物发展过程进行动态研究。其应用于滑坡研究中主要有两方面:一是用灰色预测模型进行滑坡失稳时间的预报,实践证明该理论预测的精度相当高;二是用灰色聚类理论进行边坡稳定性分级、分类。该方法的局限性是聚类指标的选取、灰元的白化等带有经验性质。

### (4) 模糊数学评判法。

模糊数学对处理经验模糊性的事物和概念具有一定的优越条件。该方法首先找出影响边坡稳定性的因素,并进行分类,分别赋予一定的权值,然后根据最大隶属度原则判断边坡单元的稳定性。实践证明,模糊评判法效果较好,为多变量、多因素影响的边坡稳定性的综合定量评价提供了一种有效的手段。其缺点是各个因素的权重选取带有主观判断的性质。

#### 1.2.1.4 确定性和不确定性方法的结合

确定性和不确定性方法的结合主要是概率分析方法与有限元法或边界元的结合而形成的随机有限元法或随机边界元法等。这类方法变材料常数为随机变量,故其结果更能客观地模拟边坡岩体力学性质、变形破坏发展及其性态的变化,从而成为数值模拟方法发展的新途径,是边坡稳定性研究的新手段。

#### 1.2.1.5 物理模拟方法

帝国学院的 J. Ashby(1971)最早把倾斜台面模型技术用于研究边坡倾倒破坏

机理及过程。随后,帝国学院又试制了基底摩擦试验模型,它广泛应用于边坡块状倾倒及弯折倾倒;Prichard(1990)也进行过类似试验,并与数值模拟进行了对比,对在可控制条件下简单的弯折倾倒现象,此模型能很好地显示边坡破坏的发展过程;Bray 和 Goodman(1981)建立了基底摩擦试验理论,阐述了极限平衡方程。

然而,由于受模型尺寸的限制,这些模型技术不能模拟大型复杂的工程及二维、三维的模型。针对这种工程要求,离心模型试验技术快速地发展起来。国外早在 20 世纪 30 年代就已经起步,特别是近 20 年来,这一技术有了快速的发展,并得到了广泛的应用。离心模型试验主要模拟以自重为主荷载的岩土结构,在模型试验过程中模型出现了与原型相同的应力状态,从而避免了使用相似材料,而直接使用原型材料。因此,这项技术已被广泛地应用在滑坡研究的各个方面。

边坡工程中的离心模型试验也存在一些尚未解决的问题,主要是一些模拟理论问题。由于用原材料进行试验,在相似规律条件下并不能使模型满足所有的条件,从而引起固有误差。

1.2.2 边坡稳定性监测防治

滑坡监测是一项集地质学、测量学、力学、数学、物理学、水文气象学于一体的综合性研究,始于 20 世纪 30~40 年代,主要职能包括滑坡的成灾条件、成灾过程、防治过程监测,以及防治效果的监测反馈。滑坡监测已广泛应用于生产实践和科学研究领域,已成为掌握边坡动态、确保工程安全、了解失稳机理和开展边坡稳定性预警预报的重要手段。

回顾国内外对边坡稳定性监测的内容,主要有变形监测、应力监测、水的监测、岩体破坏声发射监测等,其中应用最为广泛的是变形监测。

1.2.2.1 变形监测方法

变形监测主要包括地质宏观形迹观测法、大地测量法、GPS 测量法、钻孔倾斜法等。常用的变形监测仪器见表 1.1。

表 1.1 常用的变形监测仪器及特点

| 仪器名称    | 特点及适用范围                                       |
|---------|-----------------------------------------------|
| 钻孔多点位移计 | 多用于边坡深部岩土体相对位移量的监测                            |
| 收敛计     | 应用范围广,操作简便快捷,但在高差较大时操作难度高                     |
| 测斜仪     | 多用于观测不稳定边坡潜在危险滑动面位置或已有滑动面的变形位置,适用于滑坡变形量较小的坡体中 |

续表

| 仪器名称      | 特点及适用范围                                                     |
|-----------|-------------------------------------------------------------|
| 全站仪       | 可用于滑体地表监测点的三维测量,具备精度高、操作方便、测量速度快和降低测量劳动强度等优点,但其应用受限于通视条件    |
| GPS 卫星定位仪 | 能够实现自动化、远距离、无线监测传输,提高了工作效率                                  |
| TDR 监测系统  | 具备价格低廉、监测时间短、远程访问、数据提供快捷、安全性高等优点,缺点是不能用于需要监测倾斜情况但不存在剪切作用的区域 |

### (1) 地质宏观形迹观测法。

地质宏观形迹观测法是用常规地质调查方法,用于对崩塌、滑坡的宏观变形迹象和与其相关的各种异常现象进行定期的观测、记录,以便随时掌握崩塌、滑坡的变形动态及发展趋势,达到科学预报的目的。

### (2) 大地测量法。

大地测量通常用于监测灾害体表层各部位的位移,主要方法包括两方向(或三方向)前方交会法、双边距离交会法、视准线法、小角法、测距法、几何水准测量法及精密三角高程测量法等。常用仪器有经纬仪、水准仪、测距仪、全站仪等。

### (3) GPS 测量法。

GPS 测量法的基本原理是用 GPS 卫星发送的导航定位信号进行空间后方交会测量,确定地面待测点的三维坐标,根据坐标值在不同时间的变化来获取绝对位移的数据及其变化情况。GPS 方法由于采用了自动化远距离监测,节省了大量的人力物力,可实时获取位移量值。

### (4) 钻孔测斜法。

滑坡的变形监测除进行地表变形监测外还包括边坡岩体内部的变形监测,代表性的方法主要有钻孔测斜法。钻孔测斜技术就是采用某种测量方法和仪器相结合,测量钻孔轴线在地下空间的坐标位置。通过测量钻孔测点的顶角、方位角和孔深度,经计算可知测点的空间坐标位置,获得钻孔弯曲情况。

### (5) 滑坡监测新技术。

近年来,随着科学技术的不断发展,滑坡监测领域出现了越来越多的新型技术与方法,诸如 3S 技术、TDR 技术、无线传感器技术等已逐步应用于滑坡监测领域。

#### 1.2.2.2 应力监测方法

应力监测方法主要包括应力解除法、水压致裂法、声发射法等,主要应力监测仪器见表 1.2。