

DIANXING PAITUCHANG
BIANPO WENDINGXING KONGZHI JISHU

典型排土场

边坡稳定性控制技术

孙世国 杨 宏 等著



冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press

典型排土场边坡稳定性 控制 技 术

孙世国 杨 宏 冉启发 张天文 薄志毅 著

北 京
冶 金 工 业 出 版 社
2011

内 容 提 要

本书就排土场设计中涉及的环境工程地质条件、地质构造与地层分布以及特殊排弃物如高含水率湿物料排弃物的安全设计、安全控制措施、软岩基底安全性等许多共性问题进行了分析总结。

全书共分为五篇,第一篇主要介绍二维、三维滑移场理论及其优化设计技术,以及在实际工程应用中的方法;第二篇着重结合 5 个不同工程地质条件和排弃废料巨大差异性,详细介绍排土场的设计方法、安全控制技术以及具体防护措施与方法;第三篇介绍了厚软基底排土场安全堆排控制技术;第四篇介绍了黄土厚基底排土场安全控制技术。

本书适合矿山、科研设计院所、高等院校的采矿专业的科技人员、教学人员和管理人员参考阅读。

图书在版编目(CIP)数据

典型排土场边坡稳定性控制技术/孙世国等著. —北京:
冶金工业出版社, 2011. 1
ISBN 978-7-5024-5344-2

I. ①典… II. ①孙… III. ①排土场—边坡稳定性—
研究 IV. ①TD228

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010) 第 181781 号

出 版 人 曹胜利

地 址 北京北河沿大街嵩祝院北巷 39 号, 邮编 100009

电 话 (010)64027926 电子信箱 yjcb@cnmip.com.cn

责任编辑 杨盈园 美术编辑 张媛媛 版式设计 孙跃红

责任校对 侯 璐 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-5344-2

北京百善印刷厂印刷; 冶金工业出版社发行; 各地新华书店经销

2011 年 1 月第 1 版, 2011 年 1 月第 1 次印刷

787mm × 1092mm 1/16; 20.5 印张; 488 千字; 310 页

62.00 元

冶金工业出版社发行部 电话:(010)64044283 传真:(010)64027893

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

(本书如有印装质量问题, 本社发行部负责退换)

前 言

目前, 全国有 113100 多个矿山, 其中对矿区环境影响严重的矿山有 8457 个, 而滑坡和泥石流是露天矿山主要的地质灾害问题之一, 并由此给国民经济和人民生命财产造成了重大的损失。由于露天矿排土场用地约占矿山总用地的 30% ~ 50%, 所以, 增加排土场堆积量是矿山追求目标之一, 而排土场同时又面临着滑坡和泥石流两种灾害的威胁, 由此排土场安全与堆排之间形成了尖锐的矛盾。目前, 我国各类大型排土场就有几万座, 又由于排土场多堆排在山沟与山坡地上, 其安全与否主要受控于堆排工艺、山坡坡度、基底强弱、堆排物料的物理力学性质、堆排高度、降雨大小等因素的综合影响, 再加上滑坡内因素复杂性及其形成条件、诱发因素的多样性, 使得排土场边坡安全评价非常困难。而排土场滑坡近年来呈递增之势, 主要原因是由于矿山征用土地困难, 且价格昂贵, 从矿山经济效益角度看, 要求排土场堆积量多, 从而使排土场的堆高和坡角都比较大, 再加上许多排土场的工程地质勘察不规范、设计不尽合理、排土场排弃量大、堆排高度超出基底承载能力, 同时排土场多位于山坡区, 基底承载力和环境工程地质条件都比较差, 由此造成排土场频繁发生滑坡灾害。有些滑坡灾害不仅仅影响到矿山自身的安全生产, 还造成重大人员伤亡和环境的破坏, 并产生重大的经济损失和严重的社会影响。例如, 2008 年 8 月 1 日凌晨 1 时左右, 山西省娄烦尖山铁矿发生排土场连同山体垮塌事故, 造成 45 人死亡和失踪, 受伤 1 人, 事故的直接原因是排土地基土质松软、承载能力差; 排土场设计依据不充分, 地质资料不全等。又如 1990 年平朔安太堡露天矿南排土场滑坡, 滑体滑移距离较长、相邻公路被破坏, 并造成多人死亡。1967 年江西德兴铜矿露天基建剥离, 将上万方土石堆排在西侧山坡上, 当年天降暴雨, 山上堆土产生大规模滑坡, 冲毁涵洞 7 座、桥梁 1 座; 1970 年夏季再次发生暴雨又形成泥石流, 大量废石土冲入下游大坞河, 导致 5km 河段被堵, 冲毁农田 200 多亩, 损失非常严重。类似事故非常多, 在此不一一赘述。

目前, 露天矿山排土场占用大量土地, 如抚顺西露天矿 3 个排土场占地面

积达 20.2km^2 ，累计堆排量近 10 亿 m^3 ；攀枝花矿区排土场占地面积 4.11km^2 ，累计堆排量达 1.843 亿 m^3 ，其他矿山与此类似。这些排土场不仅多次产生破坏性滑坡，造成巨大的经济损失，而且这些排土场裸露的废石土源源不断地产生灰尘、放射性元素等，不仅污染空气，而且在雨季雨水冲刷下又造成周围环境及其下游水源污染，严重影响安全生产和周围环境、空气质量与周围村民饮水的安全。

从排土场安全角度来看，排土场所堆放的废石土属于松散介质，其物理性质介于固体和液体之间。由于松散介质与固体不同，松散介质的颗粒具有部分流动性。另外，松散介质抗拉强度很低或者抗拉强度为零。从排土场基本特性来看，松散介质大体上可分为三类：第一类是颗粒之间没有黏结力，称为理想松散介质。理想松散介质不具有抗拉强度，冶金类矿山排土场多属于此类。第二类是颗粒间有胶结物充填，有一定黏结力，能保持一定的几何形状，并能承受不大的拉应力，称为黏性松散介质，煤炭类矿山排土场多属于此类。第三类是介于前两者之间，部分排弃物有一定黏聚力，部分排弃物没有黏聚力。上述三种物料排土场所堆放的废石土都属于松散介质，其物理性质介于固体和液体之间。众所周知，岩体是依靠其造岩矿物颗粒的黏结力以及内摩擦力来抵抗外部荷载的，因此，强度较高。而排土场是一种特殊的工程体，杂乱无章的离散分布废石土强度较低，随着排土场堆排物料的增高和自重荷载的增加以及雨水软化作用等因素的影响；在排土场坡体内部、在堆积体与基底接触面之间及在承载力较低基底表土内部等薄弱区域易发生冲剪破坏；从而产生滑坡或泥石流灾害。

本书着重研究和探索 5 方面的问题，（1）排土场优化设计的智能匹配技术，在这方面主要研究了二维滑移场技术；三维滑移场技术；排土场智能匹配优化设计技术。（2）研究了稀湿物料排弃堆积控制技术，主要内容包括：特殊支挡措施与排水技术；上行堆排与承载力控制技术；智能匹配优化设计技术三个方面。（3）研究了厚软基底排土场堆积控制技术，主要内容包括上行堆排与承载力控制技术；排土场滑坡与泥石流协同破坏机制问题；厚软基底排土场智能匹配优化设计技术三个方面。（4）研究了黄土基底排土场堆积控制技术，主要内容包括黄土基底排土场破坏机制；上行堆排与承载力控制技术；黄土基底

排土场智能匹配优化设计技术三个方面。(5) 研究了防洪与防治泥石流技术, 主要内容包括: 防洪沟的设计技术; 防治泥石流技术方法。

在本书完成过程中得到了中钢矿山公司连民杰、李晓飞、马毅敏、范才兵、李占科、王学明, 华新(宜昌)水泥有限责任公司龚志根、石斌宏、肖华、张胜华、小龙潭矿务局王文忠、王成龙、朱家春等领导同志的大力帮助和指导, 在此表示深深的谢意! 在本书的前期编写过程中, 研究生韦寒波、姜亭亭、谭亮、鲁海、崔颖辉、阚生雷、彭红艳参加了资料整理和分析工作, 对此致以衷心的感谢!

由于排土场边坡具有其特殊性, 存在许多问题亟待解决, 本书仅仅是对某些问题进行初步探索, 希望能起到抛砖引玉的作用, 限于作者的学术水平、掌握的第一手资料不多, 所探讨的问题还不够深入, 如有不妥之处希望广大读者不吝赐教。

本书出版过程中得到了北京市创新人才项目 (PHR201006118)、北京市教委学科与研究生教育-岩土工程项目 (PXM2009-014212-076740) 与北方工业大学重点项目联合资助, 在此一并表示感谢!

孙世国

2010年3月于北京

目 录

第一篇 排土场边坡稳定性计算与优化设计技术

1 边坡稳定性分析与设计	1
1.1 边坡稳定性主要评价方法	1
1.1.1 概述	1
1.1.2 边坡稳定性分析的主要方法	2
1.1.3 边坡的常规极限平衡分析	9
1.2 二维与三维滑移场方法确定边坡岩体危险滑面技术	25
1.2.1 概述	25
1.2.2 任意滑移面边坡剩余推力法	26
1.2.3 边坡全局临界滑移场	27
1.3 边坡临界滑移场的数值模拟方法	27
1.3.1 基本概念的提出	27
1.3.2 临界滑移场的数值模拟	29
1.4 对称破坏机制下的边坡岩体三维滑移场分析方法	31
1.4.1 边坡稳定分析的理论基础	31
1.4.2 剩余推力	32
1.4.3 临界滑移场	32
1.4.4 最优控制原理	33
1.4.5 基本原则	34
1.4.6 离散化与单元剖分	35
1.4.7 平衡方程的建立	36
1.4.8 临界滑移场的搜寻技术	37
1.4.9 临界滑移场的数值模拟	38
1.4.10 滑坡实例验证分析	39
1.5 排土场边坡智能匹配优化设计技术	41
1.5.1 排土场边坡智能匹配优化设计的学术思想	41
1.5.2 排土场边坡智能匹配优化设计的理论基础	42
2 边坡滑移变形预测技术	43
2.1 边坡滑移变形系统模型描述	43
2.1.1 边坡滑移变形系统	43

2.1.2 边坡变形系统模型	43
2.2 变形数据预处理	44
2.2.1 获取等间隔变形数据	44
2.2.2 奇异数据点的检测与修正	45
2.3 多项式回归模型	46
2.3.1 多项式回归模型建立	46
2.3.2 多项式移动拟合法	50
2.3.3 实例预测与分析	50
2.4 时间序列分析法	53
2.4.1 时间序列的传统建模方法	54
2.4.2 基于残差方差最小原则的建模思路	55
2.4.3 边坡变形序列平稳化方法	56
2.4.4 边坡变形预测原理	57
2.4.5 实例预测与分析	59
2.5 灰色预测模型	62
2.5.1 GM(1,1)模型	63
2.5.2 GM(1,1)模型建立的条件	65
2.5.3 GM(1,1)模型精度评定	66
2.5.4 最佳维数灰色模型	66
2.5.5 实例预测与分析	68
2.6 神经网络预测模型	73
2.6.1 神经网络概述	73
2.6.2 神经网络 BP 算法	75
2.6.3 实例预测与分析	78
2.7 组合预测模型	82
2.7.1 组合预测方法研究现状	82
2.7.2 组合预测的分类	83
2.7.3 滚动组合预测模型	84
2.7.4 实例预测与分析	86
2.8 边坡长期变形预测	88
2.8.1 长期变形预测的理论基础	88
2.8.2 长期变形预测的方法设计	90
2.8.3 实例预测与分析	91
2.9 边坡监测线整体变形预测	95
2.9.1 监测线上测点聚类分析	96
2.9.2 预测模型	96
2.9.3 应用实例预测与分析	97
2.10 边坡三维实体变形预测	101
2.10.1 三维实体变形预测原理	101

2.10.2	模型精度与预测精度评定	102
2.10.3	实例预测与分析	103
2.11	边坡三维实体变形长期预测综合	107
2.11.1	前期预测	107
2.11.2	后期预测	113

第二篇 稀湿物料排弃物堆排过程安全技术

3	排土场边坡工程地质条件	117
3.1	地形特征	117
3.1.1	基底地形特征	117
3.1.2	排土场边坡地形特征	117
3.2	排土场基底特征	118
3.2.1	排土场基底地形特征	118
3.2.2	基底岩土工程地质特征	118
3.3	排弃物料性质	119
3.3.1	剥离土岩的含水特征	119
3.3.2	剥离土岩的物理力学性质	120
3.3.3	稀湿物料及其排弃后的一般特性	120
3.3.4	泥灰岩排弃物的一般特性	122
3.3.5	排弃物的物理力学性质	122
3.4	排弃物料空间分布特征	122
3.4.1	空间分布特征	122
3.4.2	排弃物含水性及地下水特征	123
3.4.3	排弃物密实程度划分及物理力学特征	125
3.4.4	排土场力学参数的确定	127
3.5	稀湿物料对排土场稳定性的影响	128
3.5.1	稀湿物料的特点	128
3.5.2	稀湿物料的滑坡类型分析	128
4	排土场边坡安全性综合评价	129
4.1	排弃物的物理力学参数及堆排现状	129
4.1.1	排弃物的物理力学参数	129
4.1.2	堆排现状	129
4.1.3	评价范围与评价模型的确定	130
4.2	排土场边坡的危险滑面确定技术	132
4.2.1	边坡临界滑移场理论	132
4.2.2	排土场边坡临界滑移场法与极限平衡法评价结果	133
4.3	边坡的有限元应力分析	138

4.3.1 单元网格划分与应力场演变特点	138
4.3.2 评价结论	145
5 排土场到界边坡的优化设计	147
5.1 排土场到界边坡的优化分析方法	147
5.1.1 学术思想	147
5.1.2 排土场到界坡角的优化设计	147
5.2 排土场基底承载力验算	154
5.2.1 计算方法	154
5.2.2 优化边坡基底承载力验算	155
6 边坡的综合加固措施设计	157
6.1 边坡危险区域的界定	157
6.1.1 单元网格划分	157
6.1.2 应力场演变特征	158
6.2 边坡综合加固技术的设计	158
6.2.1 边坡加固技术的选择	158
6.2.2 边坡加固的综合应用技术	160
6.2.3 排土场到界边坡综合加固设计	161
6.2.4 排土场基底处理措施	164
6.3 排土场边坡优化方案的综合评价	164
6.3.1 技术合理性分析	164
6.3.2 经济技术评价	164

第三篇 厚软基底排土场安全堆排的控制技术

7 石灰石矿排土场与厚软岩山坡古滑体基底协同灾变机制及控制技术	167
7.1 排土场边坡工程概况	167
7.1.1 排土场地理位置概述	167
7.1.2 排土场基底工程地质构造特性	167
7.1.3 排土场基底地层岩性特点	168
7.2 排土场滑动变形特点	169
7.2.1 前期排土场变形情况	169
7.2.2 雨季期地面变形情况	170
7.3 厚软基底排土场滑移机制的数值模拟分析	172
7.3.1 单元网格划分	172
7.3.2 排土场应力场演变特征的数值模拟的结果	174
7.4 厚软基底排土场边坡稳定性评价	175
7.4.1 滑面力学参数反演分析与计算	175

7.4.2	排土场边坡稳定性评价	176
7.4.3	排土场边坡评价结论	177
7.5	排土场滑坡转化为泥石流的可能性分析	177
7.5.1	排土场滑坡转化为泥石流的机制分析	177
7.5.2	排土场滑坡转化为泥石流的必要与充分条件	179
7.5.3	排土场滑坡转化为泥石流的数值模拟分析	179
8	排土场滑坡转化泥石流破坏性与危险性预测	184
8.1	排土场泥石流动力活动特性	184
8.1.1	泥石流运动模型	184
8.1.2	泥石流流速	185
8.1.3	泥石流冲击性	186
8.2	泥石流流体力学特性	187
8.2.1	泥石流体的内部作用力	187
8.2.2	泥石流运动力学模型	189
8.3	石灰石矿排土场泥石流危险度判别分析与危险区划	190
8.3.1	可拓模型的基本原理和方法	191
8.3.2	危险度区划的指标	192
8.3.3	危险度区划可拓模型的建立	193
8.3.4	排土场危险度区划过程和结果	195
9	预防排土场滑坡和泥石流发生的关键技术确定	198
9.1	排土场边坡安全与否的控制技术	198
9.1.1	排土场安全性评价	198
9.1.2	排土场的变形特征	198
9.2	减小汇水量的控制技术	200
9.2.1	雨量大小的影响	200
9.2.2	降雨的影响机制	200
10	预防排土场产生滑坡与泥石流的方案设计	201
10.1	建立合理的堆排工艺方案与预防措施	201
10.1.1	岩体力学参数的反分析	201
10.1.2	原设计方案台阶高度修正的理论依据	206
10.1.3	排土场允许排弃高度的确定	206
10.2	排土场设计	206
10.2.1	排土场边坡到界坡角的确定	206
10.2.2	排土场到界边坡稳定性的验算	208
10.3	减小汇水量的技术措施	208
10.3.1	截洪沟措施	208

10.3.2	变形体上的疏导措施	209
10.3.3	预防积水的排水暗渠措施	209
10.4	安全防护措施	210
10.4.1	坝体选型	210
10.4.2	格栅坝的设计	211
11	工程治理效果分析	215
11.1	治理前后变形情况	215
11.2	治理效果分析	218
11.2.1	变形速率对比	218
11.2.2	同期对比	218
11.2.3	结论	219
 第四篇 黄土厚基底排土场安全控制技术		
12	黄土厚基底排土场工程概况	221
12.1	概况	221
12.1.1	矿区地理气象概况	221
12.1.2	地形地貌	222
12.1.3	区内地质构造	223
12.1.4	地层分布	223
12.2	勘察区域岩土体物理与力学参数特征	224
12.2.1	基岩物理力学性质	224
12.2.2	表层土物理力学性质	224
13	矿区水文地质特点	225
13.1	水文地质特点	225
13.1.1	第四系空隙潜水含水区	225
13.1.2	基岩裂隙潜水含水区	225
13.1.3	矿区隔水层	225
13.2	排土场区补充勘察结果	226
13.2.1	排土场地形地貌	226
13.2.2	物理力学参数	226
14	排土场堆排概况	231
15	排土场的设计	234
15.1	台阶高度确定的理论依据	234
15.1.1	第一平盘台阶高度的确定	235

15.1.2 第二台阶高度的确定	237
15.2 排土场设计方案的完善	238
15.2.1 1号排土场8—8'、9—9'剖面 and 10—10'剖面边坡的优化设计	238
15.2.2 1号排土场最终设计结果	245
15.3 2号排土场边坡的优化设计	245
15.3.1 2号排土场11—11'剖面、12—12'剖面 and 13—13'剖面边坡角优化设计	245
15.3.2 2号排土场最终设计结果	254
15.3.3 2号排土场汽车道路的设计	254
15.4 3号排土场边坡的优化设计	255
15.4.1 3号排土场各剖面边坡优化设计	255
15.4.2 3号排土场最终设计结果	266
15.4.3 新设计排弃量计算与堆排顺序设计	266
16 排土场堆排过程中的应力场演变规律的数值模拟	270
16.1 数值分析模型的设计	270
16.1.1 概述	270
16.1.2 模型设计的基本思想	270
16.2 1号排土场堆载过程中边坡岩体变形特征的模拟	270
16.2.1 8线剖面应力场演变特点的数值模拟分析	270
16.2.2 9线剖面应力场演变特点的数值模拟分析	284
16.2.3 1号排土场堆排后边坡岩体滑移变形特性	284
17 截洪沟设计	299
17.1 洪峰流量的计算	299
17.1.1 设计防洪标准	299
17.1.2 计算依据	299
17.1.3 计算理论的选用	299
17.1.4 计算参数的确定	299
17.2 防洪沟水力计算	300
17.2.1 理论选用与对比	300
17.2.2 截洪沟断面设计	300
17.3 排土场内部渡槽设计	302
17.3.1 流量计算	303
17.3.2 断面设计	303
参考文献	305

第一篇 排土场边坡稳定性计算与优化设计技术

1 边坡稳定性分析与设计

1.1 边坡稳定性主要评价方法

1.1.1 概述

边坡稳定性问题是岩土工程领域中一个非常重要的研究论题。它涉及水利水电工程、矿山工程、铁路工程、公路工程、建筑工程和环境安全等诸多工程领域，能否准确地评价其稳定状况直接关系到工程建设的投资和人民的生命与生产安全。有关滑坡问题研究较早报道的是1882年瑞士A. Heim发表的关于瑞士阿尔卑斯山区某处滑坡问题，由此算来，边坡稳定性研究工作已有100多年的历史；目前已逐步发展成为一门可以解决具体工程实际问题的学科。从其100多年的发展历程来看，大致可以划分为三个阶段：早期对滑坡稳定性：主要从土力学中极限平衡概念出发和从斜坡所处的地质条件、作用因素的类比分析着手进行定性研究；20世纪50年代，我国引进苏联工程地质学，继承了其“地质历史分析法”，对边坡稳定性的认识进入了正规化、科学化的轨道；至80年代，边坡稳定性研究进入了一个新的阶段。除侧重于稳定性分析方法的研究外，人们借助于数值和物理模拟手段，在多科学理论的综合运用与分析中，对边坡地质体赋存环境内部应力状态、变形破坏机制、影响稳定性作用因素等进行综合性研究，在边坡整体、内部作用机理等方面有了更为全面的认识和理解。

随着生产的发展和科学技术的进步，人们发现由于滑坡地质体的复杂性、非线性、开放性的特点，工程中某些定量计算结果与实际有较大误差。由此人们又发展了可靠性分析理论，并借助于非线性科学理论，如灰色系统科学理论、神经网络理论、尖点突变理论、自组织理论等，解释滑坡变形过程及失稳方式和失稳时空预报等。这期间又提出并应用浅生时效改造理论研究并分析地质体的动态历史演化过程及其对岩体稳定性及区域稳定的影响，同时又根据不同的环境工程地质条件的变化，对某些影响因素的敏感性进行了系统研究，从而为工程问题决策提供了科学依据。

目前，用于滑坡稳定性分析的方法很多，从使用的角度来看，主要分为五大类：定性分析方法、定量分析方法、非确定分析方法、物理模型方法和现场监测分析方法。如何根

据具体的边坡工程地质条件、具体目的与精度要求、合理有效地选用与之相适应的边坡稳定性分析方法，是一项非常重要的工作。

1.1.2 边坡稳定性分析的主要方法

1.1.2.1 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以及失稳的力学机制等内容进行分析，并对已变形地质体的成因及其演化史进行研究，从而对被评价边坡稳定性状态及其未来发展趋势给出定性说明和解释。

A 自然（成因）历史分析法

该方法主要根据边坡发育的地质环境和边坡发育历史中的各种变形破坏迹象及其基本规律和稳定性影响因素等的分析，追溯边坡演变的全过程，依此对边坡稳定性的总体情况、趋势和区域性特征做出评价和预测，对已经发生的滑坡，判断其能否复活或转化，该方法主要用于天然斜坡的稳定性评价。

B 工程类比法

边坡稳定性评价方法中的工程类比判断方法的实质就是利用已经掌握的边坡稳定性状况及其影响因素，结合曾经采用过的理论与计算等方面的经验，并把这些经验用到类似的边坡稳定性分析和设计中去。该方法需要对已有的边坡和目前的研究对象进行广泛的调查与对比分析，对边坡的工程地质因素和水文地质因素进行全面研究，找出它们之间的共同点和不同点，分析影响边坡变形破坏的各主导因素及发展阶段的相似性及其差异性。同时还要考虑到工程的等级、类别等特殊性的要求，综合分析边坡可能的变形与破坏机制，从而对所研究边坡的稳定性进行对比分析，并给出稳定性的评价结论。需要强调的是工程类比方法是通过对已有的边坡和待分析的边坡从各个方面进行综合对比和归纳总结，并由此得出边坡稳定性评价结论。但由于受环境工程地质条件、工程规模和等级等条件的约束，两个完全相同的环境工程地质条件是不可能的，所以在进行归纳与对比分析的过程中，要抓住主要影响因素，在主要因素方面必须满足相似性要求才能进行对比和归类，否则会造成不良的后果。

C 边坡稳定性分析数据库和专家系统

数据库知识是 19 世纪 80 年代发展起来的，而将该知识应用到边坡工程中则是 20 世纪 80 年代末至 90 年代初期的事情，并且目前也没有达到成熟阶段。它的本质就是收集已有的边坡资料，如环境工程地质条件、地质特征、影响边坡稳定的因素、边坡的几何因素以及边坡加固的措施等，按照一定的格式和逻辑关系，将各个边坡的资料汇总并有机地结合起来建立边坡工程数据库；其目的主要是进行工程类比和信息交流，它可以直接根据工程设计不同阶段的要求，从中方便快捷地找出相似程度最高的实例进行类比，从而给出具体方案。

边坡稳定分析专家系统就是进行边坡工程稳定性分析与设计的智能化计算机程序。它把某一位或多位专家的知识、工程经验、理论分析、数值分析、物理模拟和现场监测等行之有效的知识和方法有机地结合起来，建成一个边坡工程知识库，然后利用智能化的推理机来模拟并再现专家的思维过程，吸收其合理的知识结构，寻求优化的技术路径，结合相

关学科的不同专家的知识进行推理和决策,对所研究的对象(边坡)进行稳定性评价。在建立专家系统的时候,一定要注意将相关学科不同专家的知识纳入到专家知识库中,因为,专家往往在某一个领域,大多在某一个方面具有专长和特长,而边坡工程是一个庞大的复杂系统,一个或几个专家所反映的知识结构有时难免出现片面,并不能全面反映边坡的实际结构或状况。

D 岩体质量评价方法

岩体质量指标是一个综合的指数,它能够反映岩体中各种主要参数对岩体稳定的影响效果。或者说岩体质量指标是影响岩体稳定各参数的一个多元函数,如岩石的强度、岩体的完整程度、岩体不连续面情况、地下水状况等;根据各种参数的范围相应地给出一个影响岩体稳定的分值,然后将相关的分值相加,得到岩体一个综合的分值,作为岩体稳定的等级,据此作为岩体评价的标准。但是在对影响岩体稳定的参数进行权重分配时仍然存在一些不足,所以,在岩体工程分级标准中明确指出,岩体的工程分级宜采用岩体基本指标和修正指标相结合的方法,即将岩石的强度(主要是单轴抗压强度)和岩体的完整性作为基本指数,然后将其他因素,如地下水状况、工程规模等因素采用修正基本指数的方法进行计算。

边坡稳定性分析方法中定性分析方法只能对边坡的稳定状况做出概括性的评价,如边坡稳定、基本稳定、不稳定以及很不稳定等。如果要进一步分析稳定的程度,就需要进行定量分析。

1.1.2.2 定量分析方法

边坡岩体的稳定性分析是一个十分重要、且非常复杂的问题,自1773年Coulomb提出了极限平衡法以来,相继发展了许多以塑性极限平衡理论为基础的边坡岩体稳定性分析方法,主要包括:

(1) 极限平衡法(LEM):假定潜在滑动岩体在极限平衡状态下必须满足力学平衡条件、运动学条件(如滑移模式),并且在物理学上不违背破坏准则,然后通过分析潜在失稳岩体的力学关系,确定边坡的临界稳定安全系数。

(2) 极限分析法(LAM):是以Drucker和Prager等人提出的塑性极限分析理论的上限定理和下限定理为基础所建立的力学分析方法。自20世纪70年代以来,广泛应用于求解土体的稳定性问题。其中,Chen全面阐述了用上限定理来求解地基承载力、土压力和边坡稳定性的原理和方法。在上限和下限分析中,其各自的关键所在是运动许可速度场和静力许可应力场的构造技术及其优化分析。

(3) 滑移线场方法(SLM):包括由Sokolovskii等人提出的静力学理论和Hansen等人提出的运动学理论,它是一种分别采用速度和应力滑移线场的几何特性求解极限平衡偏微分方程组的数学方法。但是由于其数学算法上的困难,对于一般的边值问题限制了其应用范围。

(4) 现代岩土数值方法:在极限平衡分析中的应用随非线性计算力学与数值技术的理论的应用而发展的,为了克服上述方法的缺陷,现代岩土数值计算方法被广泛应用于岩土工程的稳定性分析中,这些方法主要包括有限单元法、界面单元法、刚性有限元法、离散单元法和非连续变形分析方法,但是如何根据数值分析结果得出合适的衡量岩土结构稳定性的定量指标与极限荷载还需进一步探讨。

1.1.2.3 常用的边坡稳定性分析方法

边坡稳定性的定量分析方法多达十几种,但严格地讲,这些方法还远远没有达到完全定量分析这一步,它只能算是一种半定量的分析方法。下面对边坡稳定性评价常用计算方法做一简要概述。

A 极限平衡方法

极限平衡分析方法是在工程实践中应用最早,也是使用最普遍的一种定量分析方法。其学术思想就是该方法体现了连续与离散的统一,从先前的刚体平衡分析到现在的变形分析方法以及非线性分析,大都采用的是条分的思想;如果从现代分析观点来看,这也是将连续体进行离散分析的典型,是宏观与微观结合的范例。虽然对边坡进行条分后的条块假定的方式不同,但计算的结果却出奇的与实际吻合。由于对条块假定的受力不同,或认为采用的模式存在差异,极限平衡法的变种主要有:Fellenius法、Bishop法、Janbu法、Morgenstem-Prince法、剩余推力法、Sanna法以及楔体极限平衡法等。还有学者把有限元方法引入到极限平衡分析方法中,先通过有限元方法计算出可能滑面上的各点应力,然后再利用极限平衡原理计算滑面上的点安全系数及沿整个滑动面滑动的安全系数。极限平衡方法的缺点是对条块在力学上做了一些简化和假设,但由于该方法抓住了问题的主要方面,并且简易直观,得到的结果还是比较满意的,它仍是目前应用最多的一种分析方法。

B 数值分析方法

随着计算技术的不断发展,采用数值计算理论分析大型复杂岩石工程结构成为可能。为了更好地反映边坡岩土体的应力应变关系,各种数值计算方法在边坡工程中得到了广泛应用。目前比较有代表性的分析方法有:有限元法、离散元法、边界元法、运动单元法、临界滑动场法以及显式的快速拉格朗日(FLAC)法和流行元法等。需要指出的是,尽管这些理论和方法得到广泛的应用,但具体在实际工程评价中仍需要结合其它理论方法一起应用,目前无论是土坡还是岩质边坡,在实际的设计和安全评价中,仍然采用极限平衡的分析方法。

从有限元法就有技术来看,它的理论发展相对比较成熟。采用这一方法,能够反映边坡岩土体的应力—应变关系,避免了极限平衡方法中视条块为刚体的缺陷,并且能够反映岩体的不连续面和土层的界面等,能够模拟复杂的边界条件。同时也可以模拟出边坡岩土体的应力分布特点和规律,以及破坏趋势,如采用屈服准则,也可以求得局部单元的屈服破坏情况,但对整个边坡的稳定状态评价仍欠可靠性。

边界元法从计算的原理来看,边界元法与有限元法是属于同一范畴的,只是出发点不同。边界元的最大优点就是使得计算问题降低维数,计算精度相对较高,其缺点是对材料的非线性、各向异性以及一些特殊的界面(如不连续面)等的处理较难,在边坡工程中应用得相对较少。

离散元法与有限元法和边界元法相同的地方是都需要离散化,但对离散以后的单元处理上,离散元方法强调的是单元之间的作用关系,而对于单元本身的变形却忽略不计,即认为单元为刚体,单元之间的作用关系符合牛顿第二定律,在此基础上建立岩土体的运动规律。显然该法能够模拟边坡岩体的大变形,并且可以实时的预测。由于单元划分的特点,这种分析方法对块体结构、碎裂结构岩土体组成的边坡比较适合,或适用于对单元变形要求不高的岩土体边坡。