

层状岩质边坡稳定性

Layered Rock Slope Stability

刘才华 陈从新 著



科学出版社

层状岩质边坡稳定性

刘才华 陈从新 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书系统介绍了层状边坡稳定性分析的工程地质原理、变形与破坏力学机制及稳定性分析方法,内容包括岩质边坡地质基础、岩体结构面力学特性、边坡稳定性分析原理、边坡水力学特性、层状边坡失效模型(包括平面破坏、楔体破坏、倾倒破坏和溃曲破坏等)的破坏力学机制和稳定性评价与分析方法,以及边坡典型加固技术的加固原理与设计方法等。

本书可供从事交通、水利水电、矿山及城建等领域从事边(滑)坡工程勘察、设计与施工的工程技术人员和有关大专院校的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

层状岩质边坡稳定性/刘才华,陈从新著. —北京:科学出版社,2012.10
ISBN 978-7-03-035715-1

I. 层… II. ①刘…②陈… III. 层状构造—边坡稳定性 IV. TU457

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 236769 号

责任编辑:张颖兵/责任校对:吴 森
责任印制:彭 超/封面设计:苏 波

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>

武汉市首壹印务有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

开本: 787×1092 1/16

2012 年 10 月第 一 版 印张: 13 3/4

2012 年 10 月第一次印刷 字数: 317 000

定价: 60.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

我国是一个多山的国家,地质灾害尤其是滑坡灾害十分频繁。近年来,随着我国西部高速公路网的建设,沿线所经过的地区地形地质条件复杂,边坡灾变问题严重威胁工程建设的安全与运行。作为岩质边坡分布最为广泛的层状边坡,发生的问题最多,危害也最严重。如沪蓉西高速宜昌至恩施段沿线光顺层边坡就有 100 来个,其中不稳定边坡占 70%;渝怀铁路全线分布顺层边坡 249 个,累计长 43.6 km,占全线总长 15%。分布如此广泛的层状边坡的灾变问题成为这些线路工程一个非常突出和亟待解决的重大课题。

岩体结构是岩质边坡的主要控稳因素。从结构控制稳定的观点出发,边坡岩体结构特征是层状边坡失稳破坏类型划分的依据,也是开展层状边坡稳定性评价的基础。从岩体结构面组合及其产状与边坡的相互关系可以判别边坡潜在的变形与破坏模式,但要进一步对边坡的稳定性开展定量评价和控稳设计,需要综合考虑各种内外在因素的作用,其中结构面的力学参数以及边坡地下水赋存与作用特点是最为重要的两个方面。因此,对于岩质边坡来说,无论是理论研究还是工程设计,都是以岩体结构地质特征、岩体与结构面强度参数以及边坡地下水力学机理研究为基础,继而开展边坡破坏机理分析与稳定性评价。本书内容安排正是遵循这一原则。

本书阐述的层状边坡稳定性仅是边坡工程学科中的一个分支领域,因此,在内容安排上既具有边坡工程的一般原理和方法,同时又具有显著的自身特点,其重点在于基于层状边坡地质结构特点的不同边坡破坏类型的稳定性分析理论与方法。本书以层状边坡为对象,在阐述岩质边坡的地质结构特点、结构面力学特性和边坡水力学特性的基础上,介绍了基于岩体结构特征的层状边坡失稳破坏机制与稳定性评价原理。全书共分 10 章,前半部分是岩质边坡稳定性分析的工程地质原理与基本方法,其中,第 1 章介绍了边坡灾害的危害性,回顾边坡稳定性的研究历史、方法以及防治技术的发展,并简要介绍了边坡工程防治的一些基本原则;第 2 章主要介绍了岩质边坡的地质结构特征,包括结构面类型、分级和定量描述,岩体结构分类和基于岩体结构特征的岩质边坡分类方法,层状边坡的失稳地质模型与变形破坏机制,并讨论了影响边坡稳定性的内外在作用因素;第 3 章讨论结构面力学特性,内容有结构面变形特征、结构面的抗剪强度及其确定方法以及影响结构面抗剪强度的因素分析;第 4 章边坡稳定性分析原理,介绍了边坡变形破坏的基本特点和滑坡的工程地质分析基本原理,并介绍了边坡稳定性分析的两种主要力学方法;第 5 章专门讨论了边坡水力学特性,对边坡地下水的作用机理、水力计算方法及其对边坡稳定性的影响进行分析,同时鉴于目前双场耦合机理在边坡稳定性分析中的发展前景,使用较多篇幅介绍了岩体渗流基础以及渗流与应力耦合作用理论。后半部分从第 6 章开始,是层状边坡稳定性评价与控制,其中第 6~9 章分别对滑动破坏、楔体破坏、倾倒破坏以及溃曲破坏

4 种破坏模式的变形破坏特征与力学分析原理进行了介绍;第 10 章则以目前在边坡防治工程中应用最为广泛的挡土墙、锚杆以及抗滑桩为对象,介绍边坡结构加固的特点与设计方法。

本书是作者多年从事边坡工程研究与实践工作的总结。在本书写作过程中,得到课题组许多同志的大力支持和帮助,在此表示衷心的感谢。

由于作者水平有限,书中难免有疏漏之处,敬请读者批评指正。

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 边坡灾害问题	1
1.2 边坡工程研究历史	3
1.3 边坡稳定性分析方法	3
1.4 边坡防治技术的发展	5
第 2 章 岩质边坡地质基础	7
2.1 岩体结构	7
2.2 地质结构分析法及其应用.....	16
2.3 岩质边坡分类.....	22
2.4 层状边坡失稳地质模型.....	24
2.5 边坡稳定性的影响因素.....	28
第 3 章 结构面力学特性	32
3.1 结构面法向变形特性.....	32
3.2 结构面剪切变形特性.....	34
3.3 结构面抗剪强度.....	36
3.4 软弱夹层的力学特性.....	40
3.5 结构面强度参数的确定方法	42
3.6 结构面抗剪强度影响因素.....	45
第 4 章 边坡稳定性分析原理	47
4.1 边坡的变形与破坏特征.....	47
4.2 滑坡工程地质分析.....	50
4.3 边坡稳定性评价的力学分析方法.....	56
4.4 工程地质类比分析.....	62
第 5 章 边坡水力学特性	66
5.1 边坡地下水作用机理.....	66
5.2 孔隙水压力.....	67
5.3 渗透力.....	73
5.4 岩质边坡优势结构面的水力作用.....	75
5.5 岩体渗流基础.....	78
5.6 岩体渗流与应力耦合作用.....	86
5.7 岩体渗透场与应力场耦合分析.....	90
5.8 岩体渗透系数研究方法.....	95

第 6 章 平面破坏分析	97
6.1 平面破坏的地质力学模型及破坏机理	97
6.2 平面破坏力学分析	98
6.3 平面破坏影响因素	104
6.4 地震作用对边坡稳定性影响评价	107
6.5 工程案例	109
第 7 章 楔体破坏分析	113
7.1 楔体结构分析与稳定性判别	114
7.2 楔体破坏的极限平衡分析	118
7.3 力的图解法	121
7.4 算例分析	123
第 8 章 倾倒破坏	126
8.1 倾倒破坏地质特征	127
8.2 G&B 模型	128
8.3 拟连续介质法	132
8.4 传递系数法	140
8.5 基岩侧向约束作用	145
8.6 地震影响分析	151
8.7 工程案例	154
第 9 章 溃曲破坏	159
9.1 溃曲破坏地质力学模型	159
9.2 梁柱模型的力学分析原理	161
9.3 溃曲破坏分析	164
9.4 工程案例	167
第 10 章 边坡防治工程	170
10.1 挡土墙设计	170
10.2 锚固设计	178
10.3 抗滑桩设计	181
10.4 工程案例(一):三峡库区大昌库岸防护工程	189
10.5 工程案例(二):万州长江大桥右岸边坡治理工程	200
参考文献	209

第 1 章 绪 论

1.1 边坡灾害问题

人类生存的地球表层在地质构造以及各种自然营力的作用下形成了大陆、海洋、山岳、平原等复杂多样的地形地貌,并通过大气、水、冰川等自然物质载体的风化作用、剥蚀作用、搬运和沉积作用不断地进行演化和变迁。地形地貌的演化过程是其与外界物质和能量传递与耗散的不可逆过程,崩塌、滑坡、泥石流等地质灾害是地形地貌自稳自组过程中的产物。但是,人类工程活动对自然环境的破坏作用,严重影响了地貌单元的自我演化过程,使地质灾害打上了人类活动的烙印,特别是近一个多世纪以来,随着世界范围内对自然资源的开发开采以及大量的基础设施建设,地质灾害的发生更为频繁、剧烈。统计数据表明,近一半以上的地质灾害与人类工程活动密切相关,并对人类社会与经济造成了极大的损失。

地质灾害,尤其是边(滑)坡灾害已引起全人类的关注。近一个世纪以来发生的一些重大滑坡灾害给人类带来了惨痛的教训。发生在 1903 年 4 月 29 日的加拿大 Alberta 省的 Frank 滑坡,是一个著名的由于地下采煤导致大规模滑坡的实例,失稳边坡高 640 m,宽 915 m,厚度为 152 m,总方量为 3 000 万 m^3 ,滑坡体掩埋了坡下的村庄,70 人丧生。1925 年 5 月 3 日,美国怀俄明州的格罗斯-文特河谷,约 3 800 万 m^3 的边坡顺层滑下,堵塞河道形成 60 m 的高坝并发生溃决。1963 年 10 月 9 日,意大利 Vajont 双曲拱坝左岸山体发生体积约为 2.5 亿~3 亿 m^3 的大滑坡,造成的 260 m 高涌浪夺取了坝下游 2 400 余人的生命。1987 年 6 月 28 日发生在意大利 Mount Zandila 的滑坡,总高度 1 200 m,滑坡发生后引起的浪高达 85 m,27 人丧生。1991 年 12 月 14 日,新西兰 Mount Cook 发生的一次规模巨大的山体崩滑在没有明显触发因素的情况下,高度 1 500 m、总体积 1 400 万 m^3 的滑坡体坠入 1 000 m 以下的 Tasman Glacier 冰川湖。

我国幅员辽阔,地质构造复杂,三分之二的国土为山地,是一个滑坡灾害发生十分频繁、损失极为严重的国家。据不完全统计,每年发生的滑坡数以万计,所带来的经济损失平均在 30 亿~50 亿元,滑坡已成为制约我国经济和社会可持续发展的一个重大问题。表 1-1 列出了我国部分典型滑坡。

层状边坡作为岩质边坡中分布最为广泛的一类边坡,在铁路、交通、水利水电、矿山等基本建设领域大量存在,其稳定性问题相当严重。层状边坡是指分布有一组占绝对优势结构面的边坡,优势结构面一般为层面和软弱夹层或层间错动面,其次是节理面,它们是复杂岩体的典型特征之一,具有横观各向异性。优势结构面大多属于物质分界面,平行优势结构面方向,岩体的组成基本相同,而垂直优势结构面方向,岩体的组成则呈现频繁的软硬交替。这种优势结构面多属原生结构面,褶皱作用强烈,因褶皱作用而产生的层间强烈错动,使结构面的物理力学性质进一步弱化,甚至成为对岩体稳定性起控制作用的泥化

表 1-1 我国发生的典型滑坡

滑坡名称	地点	日期	体积/ 10^4 m^3	触发因素	后果
塘岩光滑坡	湖南柘溪	1961/03/06	80	水库蓄水	死亡 70 人
唐古栋滑坡	四川凉山	1976/06/08	6 800	降雨	形成库容 6.8 亿 m^3
盐池河滑坡	湖北宜昌	1980/06/03	100	地下开采	死亡 287
鸡扒子滑坡	重庆云阳	1982/07/17	1 500	暴雨	及时搬迁
洒勒山滑坡	甘肃东乡	1983/03/07	4 000	灌溉、冻融	死亡 237 人, 伤 22 人
新滩滑坡	湖北姊归	1985/06/12	3 000	降雨	及时搬迁
中阳村滑坡	重庆巫溪	1988/01/10	765	暴雨	死亡 33 人
铁西滑坡	四川喜德	1988/09/02	220	暴雨	掩埋铁路 160 m
漫湾滑坡	云南云县	1989/01/07	10.8	坝肩开挖	经济损失过亿
溪口滑坡	重庆华莹	1989/07/10	100	暴雨	死亡 221 人
昭通滑坡	云南昭通	1990/06	1 000	暴雨	死亡 100 人
鸡冠岭滑坡	重庆武隆	1994/04/30	424	地下采矿	死亡 16 人
二道沟滑坡	湖北巴东	1995/06/10	60	洪水	死亡 5 人
陨阳滑坡	云南	1996/06/01	500	采矿	死亡 200 人
岩口滑坡	贵州印江	1996/07/18	1 500	坡脚开挖	死亡 3 人
沙冲路滑坡	贵州贵阳	1996/12/02	2	切坡	死亡 38 人、伤 16 人
黔春路滑坡	贵州贵阳	1996/07/02		切坡	死亡 26 人、伤 11 人
易贡滑坡	西藏波密	2000/04/09	2 800	溶雪	淹没茶厂
兰坪滑坡	云南兰坪	2000/09/03	2 000	暴雨	搬迁 5 000 人
武隆滑坡	重庆武隆	2001/05/01	1.6	暴雨	死亡 79 人, 伤 7 人
平溪滑坡	贵州三穗	2003/05/11	20		死亡 35 人
千将坪滑坡	湖北姊归	2003/07/13	2 000	库水、降雨	死亡 24 人

夹层。因此,从结构控制稳定性的观点出发,应该考虑层间结构面在边坡中的产状、位置及其变化,这是边坡分类、稳定性评价、破坏机制分析以及模拟实验等必须贯彻始终的原则。

以往的工程实践表明,层状边坡尤其是顺层边坡发生的问题最多,危害最大,对人类工程建设和生命财产造成了不可估量的损失。如 1980 年 7 月 3 日发生的成昆铁路铁西顺层滑坡,约 $2.2 \times 10^6 \text{ m}^3$ 的滑体堵塞铁西隧洞进洞口,堆积在路基上的滑体厚度达 14 m,掩埋铁路长达 160 m,中断行车 40 天;1999 年底动工的万梁高速公路施工期间,仅 K41~K50 段就发生了 20 余处顺层滑坡,导致重新开展地质勘查和边坡加固治理,严重影响工程建设进度。其他如 Vajont 滑坡以及表 1-1 中的塘岩光滑坡、中阳村滑坡、沙冲路滑坡以及兰坪滑坡等著名滑坡灾害都是顺层边坡失稳的实例。近些年来,随着一些国家大项目的实施,如三峡工程、西电东送、南水北调、青藏铁路以及西部高速公路网的建设,沿线所经过的地区地质条件极其复杂,不同层次的褶皱、断裂构造众多,岩性变化大,沟谷纵横,工程区层状边坡分布极其广泛。例如,沪蓉西高速宜昌至恩施段沿线顺层边坡就有 100 来个,其中不稳定边坡占 70%;渝怀铁路全线分布顺层边坡 249 个,累计长 43.6 km,占全线总长 15%。但迄今为止,对层状边坡的破坏模式、变形破坏机理、稳定性评价和防治方法等还缺乏系统深入的研究。

1.2 边坡工程研究历史

边坡稳定性研究起源于20世纪20年代的瑞典,20世纪前期,边坡稳定性的研究比较零散,人们对其重视程度不高。早期边坡稳定性的研究主要从两个方面进行,一是借用土力学中极限平衡理论,由静力平衡条件计算边坡极限状态下的稳定性;二是从边坡的地质历史条件、影响因素等进行工程对比分析。第二次世界大战后,随着各国经济建设的不断发展,遇到的滑坡逐渐增多,特别是一些灾难性的滑坡的发生,客观上促进了对边坡稳定性逐渐系统和深入的研究。

1950年美国学者K. Terzaghi发表了《滑坡机理》的论文,系统阐述了滑坡产生的原因、过程、稳定性评价方法。1952年澳大利亚-新西兰的区域性土力学会议上,所有报告几乎全部与滑坡有关。1954年9月在瑞典斯德哥尔摩召开第一届土力学会议,主题就是滑坡稳定性问题。1958年美国公路局的滑坡委员会编写了《滑坡与工程实践》一书,是世界上第一本全面叙述滑坡防治的专著。1960年日本的高野秀夫发表了《滑坡与防治》一书,1964年3月日本正式成立了滑坡协会,出版季刊《滑坡》,后又成立了滑坡对策协会,出版《滑坡技术》,这是当时国际上两种关于滑坡的专门刊物。1986年在布拉格举行第23届国际地质大会期间,酝酿成立了国际工程地质协会,同时成立了“滑坡及其块体运动”委员会。

我国对滑坡的系统研究起始于20世纪50年代初期。1951年在西北铁道干线工程局成立“坍方泥流”小组,1956年成立坍方研究站,1959年成立坍方科学技术研究所,即西北研究所滑坡研究室的前身。1959~1973年召开滑坡防治经验交流及科研协作会议。1958年出版宝成铁路技术总结《路基设计与坍方滑坡处理》,1962年出版铁路路基设计手册《滑坡地区路基建设》,1971年西北研究所编制了《滑坡防治》一书。20世纪80年代后,伴随着国民经济的高速发展,能源、矿山、水利水电以及交通运输等领域的重大项目相继实施,边坡稳定性问题越来越突出。原地矿部、水利水电部、国家自然科学基金委员会以及其他相关部门组织科研人员对边坡的稳定性进行专题研究,如“中国西南、西北崩滑灾害与斜坡稳定性研究”(1981~1986)、“岩质顺层高岸坡变形破坏机制及稳定性评价”(1986~1990)、“岩质高边坡稳定及处理技术”(1991~1995)、“三峡船闸高边坡的变形与稳定”(1996~2000)、“山区高速公路高陡边坡失稳预测与处治技术研究”(2004~2008)等。我国的边坡稳定性研究进入了一个全新的发展阶段。

1.3 边坡稳定性分析方法

边坡的稳定性分析方法分为确定性方法和非确定性方法,确定性方法包括极限平衡分析法和数值计算方法,非确定性方法主要有可靠度分析法、模糊数学法、分析几何法、人工智能法以及非线性分析法等。确定性分析方法尤其是极限平衡法用稳定系数作为评价边坡安全性的指标,在长期的工程实践中积累了丰富的经验,并且经过不断完善,是目前边坡稳定性分析中运用最为普遍且行之有效的方法,但该方法没有反映边坡工程的不确

定性。非确定性方法综合考虑了影响边坡稳定性的不确定性因素,真实反映了边坡工程的不确定性特征,但该方法的研究开展得较晚,在实际边坡稳定性分析中的运用比较困难。

边坡稳定分析方法研究始于 20 世纪 20 年代,最早是从土质边坡稳定分析过程中发展起来的,它以极限平衡分析方法理论为基础,假定滑坡发生时,滑裂面上土体处于极限平衡状态,运用极限平衡理论对边坡进行稳定性分析。在运用极限平衡理论时对边坡进行了一些简化的假定,在这些假定的基础上,边坡稳定性由静不定问题变为静定问题。根据稳定性分析给定的边界条件的不同,极限平衡法可分为瑞典条分法、简化毕肖普法、简布普遍条分法以及 Sarma 法等。虽然极限平衡法假定的条间作用力并不能真实反映边坡的真实应力状态,在理论的严密性上存在一些问题,但由于其形式简单、运用方便,在稳定性分析方面可以满足工程的要求,因而受到广泛的应用。在岩质边坡极限平衡分析领域 Sarma 法具有重要的地位,该方法采用斜条分法,假定条块倾斜界面之间也达到极限平衡,静力平衡方程和未知数恰好匹配,边坡的稳定变为静定问题。岩体内通常存在陡倾结构面,岩体在沿底滑面发生滑动破坏时,同时沿这些陡倾结构面错动,因此 Sarma 法是分析岩质边坡稳定较为合理的方法。潘家铮对极限平衡理论作出了解释,提出了“最大最小原理”;他指出,滑坡发生时,滑体的内力会自动调整,以发挥最大的抗滑能力,因此,传统的极限平衡法中包括的静不定问题可以通过求解安全系数的最大值这一约束条件来解决,真实的滑裂面就是提供最小抗滑能力的那个。Donald 和陈祖煜等提出了塑性力学上限解法,该法假定滑体在滑面和倾斜界面均达到了极限平衡,应用 Mohr-Coulomb 相关流的流动法则建立了一个协调的滑块运动速度场,用虚功原理求解安全系数,只需求解一个控制方程,在进行三维边坡稳定性分析时有一定的优越性。在塑性力学上、下限定理基础上发展起来的滑移线法假定边坡内存在一个塑性区,在这一区域内岩土体处处达到极限平衡,这样,在一些特定的边界条件和土的特性指标条件下,可以获得解析解。滑移线法的一个重要的作用在于为塑性力学极限分析提供了一系列的闭合解,但由于该法对边坡的边界条件要求简单,很难在实际工程中加以运用。

随着计算机技术的日益发展和成熟,有限单元法、边界单元法、流形元法、离散单元法、有限差分法、非连续变形分析法以及混合法等数值计算方法在边坡稳定性分析中得到了充分的发展。数值分析方法能从较大范围考虑边坡介质的复杂性,全面地分析边坡的应力应变状况,有助于对边坡变形和破坏机理的认识。

非确定性分析方法研究始于 20 世纪 70 年代,由于一些新的理论和方法如可靠度理论、突变理论、非线性理论、模糊数学、灰色预测系统、分形理论以及人工智能等的出现,以及边坡工程中的一些不确定性因素如边坡介质的物理力学性质、试验方法、统计方法以及自然营力和人工活动等逐渐被人们所认识,非确定性方法开始成为边坡稳定性分析中的一个研究方向。非确定性方法在考虑边坡岩土体本构关系上的非线性和几何上的非线性以及边坡物理力学特性的随机性基础上对边坡稳定性进行分析。目前,已经有许多学者对非确定性方法在边坡稳定性分析中的应用进行了尝试和研究。

目前,边坡稳定性分析方法得到了较为充分的研究和发展,新的理论和方法不断地引入。但是,由于理论和实践的局限性,各种分析方法都存在自身的一些缺陷。虽然以概率

理论和非线性理论为基础的可靠度分析方法代表了边坡稳定性分析方法的发展方向,但工程实践中运用最多最成熟的仍然是以极限平衡法为代表的确定性方法。如何有机地结合极限平衡理论和可靠度理论,建立一种既能反映边坡的实际工程特征又能有效地进行运用的边坡稳定性分析方法是今后边坡工程研究的一大课题。

1.4 边坡防治技术的发展

当边坡处于极限平衡状态或达不到工程安全储备要求时,须采取合理的工程措施对其进行处理。边坡防治措施的一般原则可概括为“砍头、截腰、压脚、引排”八个字,具体地说有削坡减载、压脚、截排水、改良岩土体性质、支挡加固措施等。我国边坡防治技术的发展经历了一个由被动防护、措施单一到主动加固、综合治理以及安全、经济、环保全面考虑的过程。

20世纪50年代,我国边坡处治主要采用地表排水、清方减载、填土反压、抗滑挡墙及浆砌片(块)石防护等措施。但工程实践经验表明,采用这些措施对中、大型边坡的处理难度很大,即使对于小型边坡,当外部条件发生改变时,边坡仍可能失稳。如1981年宝成铁路在洪水期间发生的10处滑坡,其前期治理都是采用的排水、减载和抗滑挡墙等措施。

20世纪60年代末期,抗滑桩技术在我国铁路建设中首次采用,并在成昆线、湘黔线、宝成线以及川黔线等获得推广应用。抗滑桩具有布置灵活、施工简单、对边坡扰动小、开挖断面小、圪工体积小、承载能力大以及施工速度快等优点,很好地解决了一些治理难度较大的边坡工程问题。20世纪70年代开始,逐步形成以抗滑桩支挡为主,结合清方减载、地表排水的边坡综合处治技术体系。1975年铁道部颁布的《铁路工程技术规范》对滑坡工程强调一次根治、综合整治的原则,重视支挡作用,将抗滑桩作为新技术推荐;在1985年修订的《路基设计规范》中,抗滑桩作为一种主要加固措施被推荐应用。

20世纪80年代末期,随着锚固技术和凿岩机械的发展,锚喷防护技术开始在我国得到大量应用。边坡工程防治形成了以排水为主、结合抗滑桩或预应力锚索支挡的综合处治技术。较为典型的南昆铁路八渡车站巨型滑坡,采用立体排水、锚索和锚索桩加固进行综合治理,达到很好的工程效果,被誉为20世纪90年代治理巨型滑坡的成功典范。

在20世纪90年代,压力注浆加固和格构锚固技术被广泛运用于边坡防治工程,尤其是应用于高边坡的治理。它是一种边坡的深层加固处治技术,能解决边坡的深层加固及稳定性问题。此外,基于环保的考虑,喷混植生等一些新型的生态防护技术得到了快速的发展和应用。

目前,随着我国工程建设规模的不断增大,边坡高度越来越大,地质条件更加复杂,因而治理难度越来越大。如采矿边坡高度从原先的100~300 m增加到300~500 m,有的甚至超过700 m,福建紫荆山金矿露天矿坑边坡设计高度高达888 m。这些高、大、难的边坡对防治技术要求越来越高,客观上也促进了边坡防治技术的完善与发展。

边坡防治工程具有复杂性、不确定性和动态发展的特点,因此,在边坡防治技术的选择和治理工程设计中应遵循以下原则。

(1) 一般原则。边坡工程防治应符合“预防为主、合理绕避、一次根治、技术可行和经

济合理”的原则。边坡灾变危害严重,后期治理成本极高,因此,在工程建设选址阶段,尽量避开存在严重不良地质条件而可能存在大型滑坡或滑坡连续分布的路段,对于无法绕避的潜在滑坡,施工时应尽量减少对坡体的扰动,并采取必要的预防处理措施提高边坡的稳定性。边坡防治工程实践表明,由于边坡防治措施不合理而导致防护结构失效和边坡破坏,往往造成更严重的危害后果和花费更多的治理费用,因此,在边坡治理时,应综合对比选取切实可行的防治方案,同时兼顾经济合理的原则,做到“一次根治、不留后患”。

(2) 极限状态设计原则。虽然以概率理论为基础的可靠度分析方法代表了边坡稳定性分析方法的发展方向,但由于影响边坡稳定性的不确定性因素太多,边坡可靠度理论的研究还远远不能应用于工程实践。因此,目前在边坡防治工程中,采用结构可靠度理论,对边坡支护结构采用极限状态设计原则来保证边坡的稳定性。边坡极限状态设计原则以结构可靠性分析为基础,其目的是使边坡及其支护结构在规定的时间内(主体建、构筑物的设计基准期)、规定的条件下(正常设计、施工、使用和维护)维持自身稳定和满足预定功能。极限状态设计分为承载能力极限状态和正常使用极限状态,承载能力极限状态是指支挡结构失效导致边坡失稳破坏;正常使用极限状态是指支护结构和边坡变形量过大并危及邻近建、构筑物正常使用,耐久性不能满足结构设计年限要求。

(3) 荷载效应原则。边坡稳定性分析与计算中涉及的主要荷载有边坡岩土体自重、边坡上的各种建筑物产生的附加荷载、地下水产生水力荷载以及震动荷载(如爆破、地震等);边坡支护结构设计所涉及的荷载分为永久荷载、可变荷载和偶然荷载。边坡防治设计应根据相关现行规范规程,针对不同极限状态,对可能出现的作用荷载进行组合,取其最不利的情况进行设计。

(4) 信息化设计原则。由于边坡岩土体介质的复杂性、可变性和不确定性,地质力学参数难以确定,且边坡设计理论和设计方法带有经验性和类比性,因此边坡防治工程设计需要根据施工过程中反馈的信息和监控资料进行不断校核、补充和完善,这是目前边坡工程处治设计中较为科学的动态设计方法。边坡信息化设计要求在结合设计的基础上,提出合适的施工方案和监控方案,在施工过程中根据施工和监测反馈的信息对原有设计进行补充、优化和完善。

(5) 综合治理原则。在边坡工程设计,应根据边坡的类型、重要性,经技术、经济 and 环保比较,结合主体工程建筑物实施多措施综合治理原则。在保证边坡自身整体稳定的前提下,综合考虑主体建筑物、周边建筑物、周边环境以及整体美观、适用、经济等特点进行优化设计。

第2章 岩质边坡地质基础

岩质边坡工程研究对象是受各种地质构造作用和人工活动影响的天然岩体,尤其是与人类生产活动密切相关的地表浅层岩体。边坡的稳定性主要取决于构成边坡的岩体的物理力学特性及其结构特征,不同的岩体成因和地质构造运动导致岩体在岩性和岩体结构上的巨大差异性,使得边坡具有不同的稳定性特征和潜在破坏类型,因此,在边坡工程中,研究边坡岩体的地质结构特征是非常重要的。

岩体与岩块的一个重要的差别是岩体具有鲜明的结构特征,受不同的岩体成因和地质构造运动,天然岩体形成大量的地质结构面如层理、节理、片理、板理、流层、蚀变带、断层、错动面、劈理面以及张裂隙等,岩体即是由这些地质结构面及其所切割的岩块所构成。由于这些结构面的存在,岩体的力学特性相比岩石软弱许多,岩质边坡的稳定性及其破坏模式受这些结构面所控制因而具有明显的结构特征。近几十年来,基于结构控稳观点的岩体结构力学受到了空前的发展,并在以边坡工程为代表的研究领域中得到广泛的应用。因此,研究边坡工程,必须弄清岩体地质结构特征、地质结构的描述方法以及不同岩体结构对应的边坡类型。

2.1 岩体结构

岩体中的结构面非常复杂,各种规模不等、成因相异的结构面和岩石构成了岩体结构。岩体内的结构面及其切割所形成的岩体结构控制着岩体的变形、破坏机制和力学准则。岩质边坡的稳定性和破坏模式在很大程度上是由岩体中的控制结构面决定的,因此,合理地岩体结构面进行分类,是把握岩质边坡稳定性的基本条件。

2.1.1 结构面类型

岩体结构面按其成因可分为原生结构面、构造结构面和次生结构面三种类型,见表2-1(孙玉科等,1988)。

1. 原生结构面

原生结构是指在岩体形成过程中形成的结构面和构造面,如岩浆岩冷却收缩时形成的原生节理面、流动构造面等,沉积岩内的层理面和不整合面,以及变质岩内的片理、片麻理构造面等。原生结构面除岩浆岩中的原生节理面外,多为闭合式,结构面存在一定的黏聚力。自然界中,沉积岩、火成岩和变质岩三种基本成因的岩类,由于物质来源、动力条件、生成环境和形成方式等差异很大,它们原生结构面各具有不同的特点,可将其细分为沉积结构面、火成结构面和变质结构面三个亚类。

表 2-1 结构面类型及其主要特征

成因类型	地质类型	主要特征
原生结构面	沉积结构面 层面、层理、沉积间断面(不整合面、假整合面)、原生软弱夹层	<ol style="list-style-type: none"> 1. 产状与岩层一致,为层间结构面; 2. 一般呈层状分布,延展性强,海相沉积分布稳定,陆相及滨海相沉积易于尖灭,形成透镜体、扁豆体,原生层面呈波浪起伏状; 3. 一般层面结合良好,层理新鲜时只能显示暗淡或黑白相间条纹,风化后才能剥开,若经过后期构造运动常形成层间错动带; 4. 层面特征多样,一般平整,常见泥裂、波痕、交错节理、缝合线等,在沉积间断面中常有古风化残积物; 5. 层间软弱物质在构造及地下水作用下易软化、弱化,强度低,对岩体稳定不利
	火成结构面 流层、流线、火山岩流接触面,蚀变带、挤压破碎带,原生节理	<ol style="list-style-type: none"> 1. 产状受岩体与围岩接触面控制,随侵入岩体或岩脉的形态而异; 2. 流层、流线在新鲜岩体中不易剥开,但经风化后易剥离或脱落,接触面延伸较远,原生节理延续性不强,但往往密集; 3. 冷凝原生节理常常是平行或垂直接触面,为平缓或陡倾角张裂面,较不平整,且粗糙,在浅层岩体及火山岩岩体内常发育有特殊的节理及柱状节理; 4. 火山岩流间充填物松散,原生节理常被软弱泥质物充填,对稳定不利; 5. 蚀变带和挤压破碎带的形态、产状、规模及特性均受侵入岩体及围岩性质所控制
	变质结构面 片理、板理、剥理、软弱夹层	<ol style="list-style-type: none"> 1. 产状与岩层近一致,或受其控制; 2. 片理面延展性较差,一般分布密集; 3. 片理面光滑,形态呈波浪起伏,在新鲜岩体中片理面多呈闭合状,但一般能剥开;片麻理常呈凹凸不平状,且粗糙; 4. 软弱夹层中主要是片状矿物,如黑云母、绿泥石、滑石等富集带,抗剪强度低,是岩体的薄弱部位
构造结构面	劈理	为短小、密集的剪切破裂面,影响局部岩体的完整性和强度
	节理	<ol style="list-style-type: none"> 1. 在走向延展与纵深发展上其范围是有限的,一般大者不过数十至上百米,小者只有几厘米; 2. 一般分为张节理和剪节理,张节理延续性弱,剪节理延伸较长; 3. 张节理一般具陡立或陡倾产状,长垂直岩层走向。剪节理斜交岩层走向,其倾角随岩层倾角变陡而变缓; 4. 张节理面粗糙,参差不齐,宽窄不一;剪节理平直光滑,可见擦痕镜面,常有各种泥质薄膜,如高岭石、滑石、石墨等,尽管接触紧闭,但易于滑动
	断层	<ol style="list-style-type: none"> 1. 规模相差悬殊,有的深切岩石面几十公里,有的仅限于地壳表层或只在地表数十米,断层为延续性较强的结构面,对岩体稳定性影响较大; 2. 大多数断层为剪切作用所形成,也有为张脆性破裂所形成; 3. 一般断层带内都存在有构造岩,如断层泥、糜棱岩、角砾岩、压碎岩,构造岩后期被浸染、胶结,如方解石或石英网络的形成,对岩体稳定有利
	层间破碎夹层	<ol style="list-style-type: none"> 1. 在层状岩体中岩软弱夹层发育,产状与岩层一致; 2. 一般呈层状分布,延续性较强,有时也呈透镜状或尖灭; 3. 结构面破碎,呈鳞片状,含泥质物,呈条带状分布

续表

成因类型	地质类型	主要特征
次 生 结 构 面	卸荷裂隙	<ol style="list-style-type: none"> 1. 产状与临空面有关,一般近水平,多为曲折不连续状态; 2. 延续性不强,常在地表20~40 m内发育; 3. 结构面粗糙不平,常张开,充填物有水、气、泥质碎屑,宽窄不一,变化多样
	爆破裂隙	<p>在边坡岩体中最为常见</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 产状与边坡走向近似平行,有一定的延展范围,视爆破力的大小而异; 2. 多为张开型,松散、破碎,其状态受上述各种结构面及岩性控制,但一般多呈弧状分布
	风化裂隙 风化夹层	<ol style="list-style-type: none"> 1. 一般沿原生夹层和原有结构面发育,短小密集,延续性弱,仅限于地表一定深度; 2. 风化夹层产状与岩层一致,在风化带内延展性强; 3. 充填物质松散破碎,含泥质物
	泥化夹层	<ol style="list-style-type: none"> 1. 产状与岩层一致,岩软弱岩层表部发育; 2. 延展性强,但各段泥化程度可能不一,视地下水作用条件而异; 3. 泥质物多呈塑性状态,甚至流态,强度低,是导致边坡岩体失稳破坏的常见因素

沉积结构面是指沉积岩在成岩过程中形成的各种层间结构面,包括反映沉积间断性的层面和层理、显示沉积间断的不整合面和假整合面以及由于岩性变化所形成的原生软弱夹层等,沉积结构面一般延展性较强,常贯穿整个岩体,沉积结构面的产状与沉积岩的成岩环境条件密切相关,如在海相沉积岩中分布稳定,而在陆相沉积岩中常呈透镜状。

火成结构面是指岩浆侵入冷凝后形成的如流层、流线、蚀变带以及原生节理等结构面,火成结构面的分布与产状取决于岩浆与受体之间的接触面。火成结构面的工程地质性质差异很大。流层、流线在新鲜岩体中不易剥落,但风化后形成易于剥离或脱落的弱面。岩浆岩体与围岩之间的混融接触面,接触带岩体致密,地质条件良好;裂隙接触带的工程地质条件较差;接触破碎带构成软弱结构面。

变质结构面是岩体在变质作用过程中形成的结构面,多为残留结构面或重结晶结构面,如片理、片麻理、板理以及软弱夹层等,变质结构面具有分布密集、延展性差的地质特点,其产状一般与岩层产状相一致。

2. 构造结构面

构造结构面是岩体在地壳运动过程中,受地质构造作用在岩体内产生的各种破裂面或破碎带,如断层、层间错动带、节理面及劈理面等。构造结构面是岩体结构面的主要成分,可根据其构造形迹来鉴别其力学成因类型、形成期序与体系,如张性结构面大多粗糙、咬合力大、摩擦系数高等,剪性结构面多平直、光滑、结构面咬合力小、摩擦系数小,压性结构面存在较宽的破碎带和破碎影响带。

断层一般指位移显著的构造结构面,其规模相差悬殊,有的深切岩石圈甚至上地幔,

有的仅限于地壳表层或地表数十米。根据断层的切割深度可将其分为岩石圈断裂、地壳断裂、基底断裂和盖层断裂,按力学性质可分为张性、扭性和压扭性三个类别。张性断面一般起伏不平,扭性断层面比较平直光滑,而压扭性断层面则呈舒缓波状。断裂带中常存在断层泥、糜棱岩、松散角砾岩、岩粉碎屑、劈理带、褶皱扭曲带以及地下水循环的浸染带。因此,断层自身的力学特性软弱,构成软弱结构面。

层间错动带是岩层发生构造运动时,岩层层间发生相对位移的地带。层间错动带在皱褶岩层地区和大断层两侧分布普遍。地质构造运动使层间错动带呈碎屑状、片状或鳞片状,在地下水的长期作用下产生泥化现象,构成软弱结构面。

节理泛指没有位移或位移很小的构造破裂面。节理的延展度一般不大,从数十厘米至数十米不等,宽度不超过数厘米。节理形成的力学机制主要为剪切破坏和张性破裂,节理面形态各异,有的平直光滑,有的波浪起伏,有的参差曲折且粗糙,有的呈擦痕镜面而附有各种泥质薄膜。

劈理可分为流劈理、破劈理和滑劈理等,影响局部地段岩体的完整性和强度。劈理宽度与岩性关系很大,泥岩及板岩劈理间距可小至1~2 mm,而砂岩和灰岩中劈理间距可达数厘米。

3. 次生结构面

次生结构面指在外部营力作用下产生的风化裂隙面、卸荷裂隙面和泥化夹层等。次生结构面多为张裂隙,结构面粗糙,产状不规则,大多不连续,延展性不大。次生结构面多发生在地表附近,如卸荷裂隙面多发生于岩体有临空面如河谷深切处并在地表数十米内发育,结构面延展性较差。风化裂隙面绝大多数发育在地表一定深度的原有结构面内,结构面短小密集,延展性差。

风化裂隙可分为两类,一类为因温度变化是岩体发生胀缩变形而产生的裂隙,主要分布在风化壳以内;另一类是沿原有结构面如节理面或断层等经风化作用而形成的风化结构面,如风化裂隙、风化槽等。

卸荷裂隙是在地壳急剧上升的高山峡谷地区的岩体受雨水、河水冲刷剥蚀,破坏了岩体中的应力平衡状态,导致岩体产生张性或剪性破裂而形成的卸荷裂隙。卸荷裂隙的产状与卸荷方向密切相关,如垂直向卸荷形成水平或近似水平的卸荷裂隙,而谷坡上的侧向卸荷产生的卸荷裂隙走向与河谷走向近似。

2.1.2 软弱夹层

软弱夹层是指岩性比邻近岩层软弱且厚度明显较小的岩层。当受地下水影响,含水量达到塑限而使构成夹层的物质泥化时,称为泥化的软弱夹层或泥化夹层。软弱夹层常构成边坡岩体中的软弱结构面,是控制边坡稳定性的重要因素之一。

软弱夹层是地质历史的产物,与成岩条件、构造作用以及地下水的活动密切相关。软弱夹层有多种划分方法,有的按岩性、成因和产状分,也有的按夹层岩性组合、颗粒组成和