

DIANXING CENGZHUANG YANZHI BIANPO DIZHI ZAIHAI
BIANXING FENXI MOXING JI YUJING FANGZHI

典型层状岩质边坡地质灾害 变形分析模型及预警防治

贵州电网有限责任公司输电运行检修分公司
中国电建集团贵州电力设计研究院有限公司

编



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

典型层状岩质边坡地质灾害 变形分析模型及预警防治

贵州电网有限责任公司输电运行检修分公司
中国电建集团贵州电力设计研究院有限公司

编



内 容 提 要

本书总结了贵州省层状地层分布特点、岩性特点及结构演化特点,建立了层状地层结构演化模型和层状边坡破坏模式的地质力学模型。应用理论分析、数值模拟、工程地质类比等研究方法,对典型层状岩质边坡破坏模式与稳定性分析进行深入探讨。在现有研究的基础上提出了滑坡地质灾害预测预报和预警的新方法。同时以抗滑桩和锚杆为例进行了滑坡防治工程适宜性与优化设计研究。本书研究成果对层状边坡的治理与预警预报工程具有重要的指导意义。

本书可供水利、电力、城市地铁、市政、交通、铁道、矿山工程等建筑领域中从事地质灾害防治和岩土工程方面的设计、施工、研究的科技工作人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

典型层状岩质边坡地质灾害变形分析模型及预警防治/
贵州电网有限责任公司输电运行检修分公司, 中国电建集团
贵州电力设计研究院有限公司编. — 北京: 中国水利
水电出版社, 2018.6

ISBN 978-7-5170-6630-9

I. ①典… II. ①贵… ②中… III. ①层状构造—边坡—地质灾害—灾害防治—研究 IV. ①P694

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第149580号

书 名	典型层状岩质边坡地质灾害变形分析模型及预警防治 DIANXING CENGZHUANG YANZHI BIANPO DIZHI ZAIHAI BIANXING FENXI MOXING JI YUJING FANGZHI
作 者	贵州电网有限责任公司输电运行检修分公司 编 中国电建集团贵州电力设计研究院有限公司
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京瑞斯通印务发展有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 13.25印张 314千字
版 次	2018年6月第1版 2018年6月第1次印刷
印 数	0001—1200册
定 价	65.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

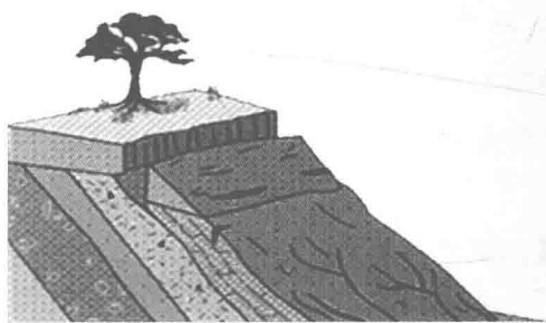
版权所有·侵权必究

编 委 会

主 编： 魏 韬

副主编： 杨 立 刘 锐 唐锡彬

参 编： 赵 健 李晓春 彭 赤 刘 超 杨明瑞
黄 隆 时 磊 周振峰 王亮清 葛云峰
李雪平 杨建华 甘小迎 张 贇 韦远武
严尔梅 杜万霞 崔 健



前 言

近几年，贵州省正在大力开展基础性建设，许多与岩土体有关的工程，特别是山区线性工程（如输电线路、铁路、公路等），均面临着滑坡灾害的威胁。会文变—渔安变 220kV 线路工程是贵阳市主要的电力线路工程，该线路的 J2 号铁塔位于贵阳市东山回迁安置区附近层状岩质边坡上（以下简称“J2 号铁塔边坡”）。J2 号铁塔边坡为层状切向坡，基岩为二叠系上统吴家坪组（ P_2w ）灰岩泥岩互层，风化严重，经历过反复的人工扰动及 J2 号铁塔荷载以及风荷载的影响，边坡稳定性受到较大影响，而该边坡失稳将严重威胁贵阳市用电及回迁居民的生命安全。此类威胁较大的潜在不稳定边坡在贵州地区广泛存在，深入开展层状边坡的破坏模式、稳定性评价、预测预报及预警体系以及防治工程等研究具有重要的理论意义与工程应用价值。

为研究典型层状岩质边坡地质灾害变形机理，分析其破坏模型及预警预报机制，本项目在现场踏勘与调研工作的基础上，进行了室内资料的整理与分析工作，完成了贵州省二叠系地层分布及结构演化特征研究、典型层状岩质边坡地质力学模型研究、典型层状岩质边坡稳定性评价、滑坡地质灾害预警预报研究、层状岩质边坡地质灾害防治工程等关键问题研究。

本书总结了贵州省层状地层分布特点、岩性特点及结构演化特点，建立了层状岩层结构演化模型和层状边坡破坏模式的地质力学模型。应用理论分析、数值模拟、工程地质类比等研究方法，对典型层状岩质边坡破坏模式与稳定性分析进行深入探讨。在现有研究的基础上提出了滑坡地质灾害预测预报和预警的新方法。同时以抗滑桩和锚杆为例进行了滑坡防治工程适宜性与优化设计研究。本书研究成果对层状边坡的治理与预警预报工程具有重要的

指导意义。

本书得到了贵州电网有限责任公司、中国地质大学（武汉）工程学院的大力支持和帮助。他们对研究内容、技术路线、研究方法等提出不少宝贵意见，特向他们表示诚挚的谢意。同时，本书在编写过程中参考和吸收了近年来国内外专家和同行的研究成果，在此一并表示感谢！

限于作者水平和时间有限，书中有疏漏不足之处，敬请读者批评指正。

编者



目 录

前言

第 1 章 概述	1
1.1 背景	1
1.2 贵州省地层分布及特征	2
1.2.1 贵州省二叠系地层	2
1.2.2 贵州省二叠系地层岩性特征	3
1.2.3 贵州省二叠系地层工程地质特征	3
1.3 层状岩质边坡变形破坏机制	4
1.3.1 岩体力学参数研究方法	4
1.3.2 层状岩质边坡破坏模式	5
1.4 边坡稳定性评价	6
1.4.1 定性分析法	7
1.4.2 半定量分析法	7
1.4.3 定量分析法	7
1.4.4 边坡稳定性分析不足之处	9
1.5 滑坡预测预警	10
1.5.1 区域滑坡空间预测模型	10
1.5.2 单体滑坡预测模型	10
1.5.3 滑坡预警预报判据	12
1.6 层状岩质边坡防治工程	13
1.6.1 抗滑桩工程	14
1.6.2 锚固工程	15
第 2 章 典型层状地层分布与工程地质特征	16
2.1 概述	16
2.2 贵州省典型层状地层分布	16
2.2.1 下二叠统	16

2.2.2	上二叠统	18
2.3	典型层状地层岩性特点	21
2.3.1	早二叠世碳酸盐岩台地时期	22
2.3.2	晚二叠世陆地和滨—浅海时期	23
2.4	典型层状地层结构演化特点	24
2.4.1	层状地层结构演化影响因素	24
2.4.2	层状地层演化过程	28
2.5	实例分析	29
2.5.1	边坡岩层分布及岩性特征	29
2.5.2	边坡岩体结构演化特点	30
第3章	典型层状岩质边坡地质力学模型	32
3.1	概述	32
3.2	力学参数的确定	32
3.2.1	力学参数确定方法	32
3.2.2	贵州省二叠系地层岩体力学参数建议值	38
3.3	破坏模式的确定	41
3.3.1	散体或碎裂岩质边坡	42
3.3.2	土岩混合边坡	42
3.3.3	块状或中厚层状岩质边坡	42
3.3.4	其他破坏模式	45
3.4	地质力学模型的建立	46
3.4.1	边坡内部因素	46
3.4.2	边坡外部条件	48
第4章	典型层状岩质边坡稳定性评价	51
4.1	概述	51
4.2	稳定性计算	51
4.2.1	计算工况	51
4.2.2	计算参数	51
4.2.3	荷载选取	53
4.3	边坡稳定性定性分析	53
4.3.1	楔形体破坏模式下最大安全边坡角的确定	53
4.3.2	J2号铁塔边坡定性评价	54
4.4	基于极限平衡法的边坡稳定性定量计算	54
4.4.1	计算方法与原理	55
4.4.2	圆弧滑动破坏	56
4.4.3	结果分析	61
4.5	基于可靠度的边坡稳定性定量计算	61

4.5.1	可靠度计算原理与方法	61
4.5.2	参数选取及模型建立	64
4.5.3	计算结果及分析	68
4.6	基于离散单元法的边坡稳定性定量计算	69
4.6.1	3DEC 软件简介及计算方法	69
4.6.2	模型的建立	70
4.6.3	圆弧滑动破坏	71
4.6.4	楔形体破坏	83
4.7	边坡稳定性评价	92
4.7.1	塔基边坡稳定性系数取值	92
4.7.2	圆弧滑动破坏	93
4.7.3	楔形体破坏	94
第5章	滑坡预警预报研究	95
5.1	概述	95
5.2	滑坡监测体系构建	95
5.2.1	监测内容	95
5.2.2	监测点布设	96
5.2.3	监测周期	98
5.3	滑坡空间预测模型与案例	98
5.3.1	区域性边坡地质灾害空间预测模型	98
5.3.2	区域性滑坡空间预测案例分析	102
5.4	滑坡变形预测模型与案例	112
5.4.1	滑坡变形预测模型	112
5.4.2	滑坡变形预测案例分析	118
5.5	滑坡时间预报模型与案例	134
5.5.1	基于宏观变形的经验预报方法	134
5.5.2	滑坡时间预报模型	138
5.5.3	滑坡时间预报案例分析	141
5.6	滑坡灾害预警预报判据及等级划分	145
5.6.1	基于层次分析法的气象降雨预警判据	145
5.6.2	基于相关矩阵法的预警方法	152
第6章	岩质边坡地质灾害防治工程研究	158
6.1	概述	158
6.1.1	抗滑桩工程	158
6.1.2	锚固工程	165
6.2	边坡地质灾害防治工程适宜性研究	167
6.2.1	工程防治	168

6.2.2	监测预警	169
6.2.3	搬迁避让	170
6.3	考虑滑床复合倾斜岩体综合地基系数的抗滑桩受力特征研究	170
6.3.1	传统设计方法的不足	170
6.3.2	基本假定及力学模型的建立	170
6.3.3	综合地基系数的确定	171
6.3.4	抗滑桩嵌固段变形、内力的计算	176
6.3.5	其他计算方法	177
6.3.6	实例分析	177
6.4	基于荷载传递法的锚杆内力分布及锚固段设计方法研究	181
6.4.1	传统设计方法的不足	181
6.4.2	基本假定及力学模型建立	182
6.4.3	基于荷载传递法的锚杆锚固段荷载变形分析	184
6.4.4	锚固段应力分布影响因素	187
6.4.5	其他计算方法	190
6.4.6	实例分析	192
参考文献		194

第 1 章 概 述

1.1 背 景

层状岩体是指具有层状结构的沉积岩、副变质岩及火山岩岩体，其中具有层状结构的沉积岩占陆地面积的 2/3（占我国陆地面积的 77%）。因此，在人类工程活动中将遇到大量的层状岩体稳定问题。层状岩质边坡的破坏与失稳是岩土工程重大灾害之一，如 1959 年法国 Malpaset 坝沿软弱夹层发生的边坡失稳事故；1963 年意大利北部威尼斯省的瓦伊昂上游近坝库段库岸巨型滑坡导致下游几个市镇近 2500 人遇难，一直是备受关注的典型地质灾害案例；我国葛洲坝工程虽然历经 40 多年的反复勘察论证，却仍然在洞群进水口边坡（反向坡）出现了滑塌破坏现象等。虽然层状岩质边坡地质灾害问题多发，但通过对岩质边坡地质灾害的成因、变形规律及预测预报进行深入的研究，可以有效地监测边坡岩体滑移量，减少地质灾害造成的经济损失和人员伤亡。例如长江链子崖危岩体防治监测预警工程，其监测预报工作始终贯穿于危岩体防治的全过程，有效保障了工程治理安全；又如经过 9 年监测成功预报的长江新滩滑坡，保证了 1371 人的生命安全。上述事实既说明层状岩质边坡地质灾害的危险性，又表明地质灾害预测预报的重要性和必要性。

目前，贵州省正在大力发展道路、交通、水利电力等基础性建设，随着这些工程活动的展开，不可避免地会导致地质环境条件的改变，形成大量的人工边坡，由此将可能诱发更多的滑坡、崩塌等地质灾害。二叠系地层是贵州省出露最广的地层之一，其出露面积占总面积的 30% 以上。受沉积相、构造活动等因素影响，二叠系地层具有独特的工程地质特性，如岩性变化差异大、岩溶发育、软弱夹层众多等，所以在二叠系地层内发育有众多的地质灾害；据统计，贵州省发生于石炭（C）、二叠（P）、三叠（T）地层内的滑坡占滑坡总数的 97%，崩塌所占比例更高，为 97.89%。图 1.1 为贵州省地质灾害（滑坡、崩塌、地裂缝）发育的各地层所占比例。由图 1.1 可见，贵州省二叠系地层内发生的地质灾害所占比重最多。因此，需要对二叠系地层分布、岩体结构演化以及力学参数确定方法等进行系统研究，研究成果对贵州省区域地层的研究和地质灾害稳定性评价、预警预报及防治工程具有重要的指导意义。

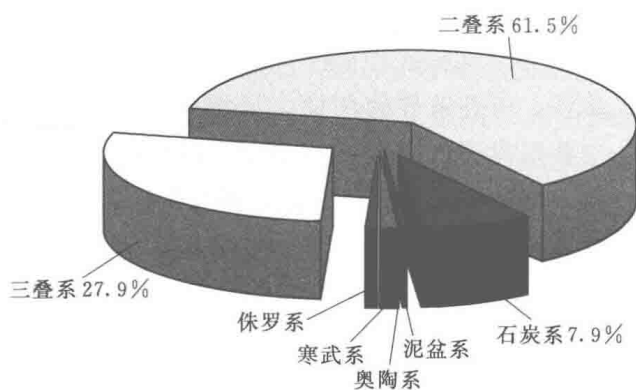


图 1.1 贵州省地质灾害发育的各地层所占比例

贵阳市会文变—渔安变 220kV 线



路工程 J2 号铁塔位于贵阳市中天城投集团东山回迁安置区 E 组团西北侧边坡上, 该边坡为层状切向破, 基岩为二叠系上统吴家坪组 (P_2w) 灰岩泥岩互层, 风化严重, 经历过反复的人工活动扰动, 再加上 J2 号铁塔荷载以及风荷载的影响, 边坡的变形不仅威胁工农业的用电安全, 还会直接威胁安置区居民的生命安全。

基于以上, 本书归纳总结贵州省二叠系不同岩性地层的工程地质特征及物理力学参数的确定方法, 综合目前对典型层状边坡的变形破坏模式、稳定性评价、预测预报、预警判据以及治理工程的理论研究, 选择 J2 号铁塔边坡工程为研究对象, 采用理论分析、数值模拟、现场监测等方法, 首先建立相应的边坡失稳破坏模型, 并分不同工况进行稳定性评价, 然后建立典型层状边坡地质灾害预测模型, 提出地质灾害综合预警指标体系, 进行预警等级划分, 最后开展抗滑桩、锚索等防治工程的适宜性与优化设计研究。

1.2 贵州省地层分布及特征

贵州省层序地层的研究是该地层工程地质特征研究的基础, 国内学者对贵州省层序地层的研究较为深入。吉汝安^[1]、杨瑞东等^[2]、王立亭等^[3]、董卫平^[4]、杨有龙^[5]、何树兴^[6]分别从不同方面对贵州省不同地质时期的地层展开详细的研究, 成果表明该地区地层发育齐全, 中、晚元古宙以海相碎屑沉积为主, 古生代至晚三叠世中期则是海相碳酸盐岩占优势, 晚三叠世晚期之后则全为陆相碎屑沉积。不同沉积环境形成的地层岩性存在很大差异, 但均有明显的原生岩层面, 可整体划归为层状结构类型岩体, 简称“层状岩体”。

1.2.1 贵州省二叠系地层

贵州省二叠系层序地层的研究是该地层工程地质特性研究的基础, 前人对贵州省二叠系的层序地层研究较为深入, 焦大庆等^[7]研究表明, 在二叠系中, 船山统与下伏石炭系顶部的地层构成 1 个三级沉积层序 (SQ_{19}), 阳新统包含 4 个三级层序 ($SQ_{20} \sim SQ_{23}$), 乐平统包括 2 个三级层序 (SQ_{24} 、 SQ_{25}); 孟庆芬等^[8]通过对贵州省南部典型的二叠系剖面的层序地层研究, 共识别出 7 个三级沉积层序, 并基于不同相带剖面三级层序的对比建立了贵州省南部二叠系的层序地层格架; 林春明等^[9]在详细的岩石岩相学、沉积学研究和精细的地层划分对比基础上, 应用露头层序地层学基本原理和方法, 对贵州省宗地剖面早二叠纪一晚石炭世地层进行了露头层序地层研究; 杨逢清等^[10]综合研究了贵州省威宁岔河陆相二叠系、三叠系界线剖面, 已建立 5 个孢粉组合带, 1 个植物化石群, 并确定了二叠系、三叠系界线; 邹灏等^[11]利用区域钻井资料对比层序地层, 对贵州省平塘地区中上二叠统长兴组的沉积相特征、层序地层特征以及岩相古地理平面展布进行了综合研究, 指出上二叠统长兴组可划分为两个三级层序 (PSQ_1 、 PSQ_2), 且均由海侵体系域 (TST) 与高水位体系域 (HST) 两部分组成, 且皆为 $TST > HST$; 常晓琳等^[12]利用多重地层划分方法对贵州省平塘县甘寨剖面的岩石地层单位进行了清理, 将剖面中的二叠系由下至上划分为马平组、梁山组、栖霞组、茅口组、合山组和大隆组。以上众多学者的研究成果为贵州省二叠系层序地层研究奠定了坚实的基础。



1.2.2 贵州省二叠系地层岩性特征

沉积相决定了沉积岩的岩性,不仅能反映沉积岩的特征,还能揭示沉积环境,深入开展沉积相的研究对贵州省二叠系地层中地质体的工程地质特征具有重大意义。王立亭^[13]对贵州古地理的演变进行了深入的研究,指出早泥盆系至早二叠系是一个海侵逐渐扩大的时期,早二叠世海侵范围最大,海水遍及贵州全省。在海侵的总背景上,曾出现多次的海侵、海退,表现为沉积间断及凝缩层的多次出现及陆源碎屑沉积与碳酸盐沉积的多次交替。早晚二叠世之交的东吴运动使贵州的岩相古地理格局发生了重大变化,使贵州大部分地区上升成陆,造成上下二叠统的假整合,西部大规模玄武岩喷溢不仅增加了组成沉积物的内容,也为某些矿产的形成提供了物源,川滇古陆的形成,使浅水沉积域成为西高东低的缓坡,南部紫云、望漠、罗甸等地的深水盆地的拗陷进一步加剧,并堆积了巨厚的安山质火山碎屑浊积岩。周国正^[14]以贵州省织金矿区4个含煤向斜构造单元勘查资料为基础,对该区晚二叠世晚期沉积特征进行分析,提出区内广泛发育砂泥潮坪相和碳酸盐潮坪相。熊孟辉等^[15]详细研究了贵州省晚二叠世含煤地层的沉积格局及其构造控制特征,提出不同断裂带在不同沉积阶段沉降活动的差异性,是导致龙潭早期、龙潭晚期、长兴期沉积格局和聚煤特征有所不同的重要原因。王安华等^[16]通过安顺旧州地区地面调查及钻孔岩性分析研究,从岩性组合、沉积构造、沉积相特征、沉积模式分析,进一步说明该区处于晚二叠世三岔河地区龙潭相区与吴家坪相区的相变位置,属于潮坪—泻湖相至半局限台地相过渡带,是具有特殊组成含义的“龙潭组”。熊孟辉等^[15]通过对贵州省盘县上二叠统钻井资料的研究分析,基于沉积岩石学、沉积学、古生物地史学及沉积地球化学等相标志识别出潮坪沉积以陆源碎屑沉积为主,可细分为砂坪、混合坪、泥坪、泥炭坪和潮沟等5种微相。分析认为:潮坪沉积发育海退型进积层序,沉积物粒度整体较细,分选性较好,发育潮汐层理。罗进雄等^[17]以贵州省桐梓松坎二叠系剖面为例,通过岩性、古生物、沉积构造、地球化学等相标志的分析,划分出了滨岸和碳酸盐岩开阔台地两种沉积环境,其中碳酸盐岩开阔台地内局部出现浅滩环境。

1.2.3 贵州省二叠系地层工程地质特征

对贵州省二叠系地层工程地质特征开展研究具有重大意义。姚智^[18]研究了贵州省西部石炭、二叠和三叠系地层中崩塌滑坡地质模式及其敏感性地层;沈春勇^[19]介绍了贵州省思南县境内的乌江思林水电站的主要工程地质问题,该区域出露的主要地层为二叠系下统栖霞组与茅口组灰岩、二叠系上统吴家坪组硅质结核灰岩及硅质黏土岩与长兴组灰岩;卿三惠等^[20]结合贵州省二叠系地层中的何家寨隧道地质灾害整治实践,就有关设计与施工问题进行探讨;邹林^[21]对贵州省务川县境内的洪渡河石埡子水电站的工程地质条件和工程地质问题进行概述,二叠系是该库区出露的主要地层之一;徐必根等^[22]等对贵州省山岭隧道围岩力学行为进行数值模拟,该隧道围岩岩性主要为二叠系上统峨眉山玄武岩组;赵帅军等^[23]对贵州省某隧道隧址区二叠系灰岩中岩溶发育的特征进行研究;闫建^[24]以贵州省典型岩层组合为切入点,系统研究了典型组合层状岩质边坡的类型、影响因素、变形机制、破坏模式、稳定性评价理论等内容;张显书^[25]对贵州省二叠系地层的工程地



质特征进行了综合性的研究。

综上所述,贵州省二叠系地层是滑坡灾害及其他地质问题多发的地层,开展该地区地层分布及工程地质特征的研究对贵州省的经济建设具有重大意义。但目前的研究中仍存在许多不足之处,如:

(1) 系统开展地层分布与物理力学性质结合的研究成果较少。

(2) 地质灾害研究目前只注重影响因素、破坏模式以及稳定性评价等方面,考虑自然历史尺度及人类工程活动尺度演化过程的研究成果相对较少。

1.3 层状岩质边坡变形破坏机制

1.3.1 岩体力学参数研究方法

如何合理地确定工程岩体力学参数一直以来都是岩石力学界的重要研究课题。目前,常用的研究岩体力学参数的方法大致可分为五类,即试验方法、经验方法、解析方法、反分析方法和数值方法。

1. 试验方法

试验方法是研究力学性质、确定岩体力学参数最直接、最基本的方法。Barton^[26]、Pratt等^[27]、黄建陵等^[28]发现室内试验参数是原位试验的2~5倍,有的甚至达到10倍以上,因此,室内岩石试验结果不能直接应用于工程。Muller^[29,30]教授认为只有通过原位试验结果才可能正确判断岩体强度和变形性质。客观上,原位试验岩体也受到了一定程度的扰动,考虑到岩体力学参数有明显的尺寸效应特征^[31],故理论上来说,原位试验的结果也不能直接运用到工程实际。

2. 经验方法

经验分析法主要是通过对众多试验资料进行回归分析,得到量化经验公式来确定岩体力学参数,该法可以考虑影响岩体力学参数的诸多地质因素。Beiniawski^[32]和 Serafim等^[33]经过统计分析,建立了RMR与变形模量的经验公式;Barton^[34]和 Singh^[35]提出了变形模量与Q之间的经验公式;Serafim等^[36]和 Hoek等^[37]提出了岩体变形模量与GSI指标间的关系式;卢书强等^[38]成功将Hoek基于地质强度指标GSI建立的估算岩体变形模量公式运用于实际工程中;张志刚等^[39]在研究国内外岩体变形模量经验确定方法的基础上,提出了改进的节理岩体变形模量经验确定方法,即“尺寸效应折减”与“节理特征折减”的二次折减法。

3. 解析方法

目前,常用的解析法包括变形等效法、能量等效法、裂隙组构张量法、自洽理论和损伤力学方法。徐光黎等^[40]根据等效应变原理,利用解析方法建立节理应力应变本构方程,推导出岩体变形模量随空间方位变化的预测方程;陈庆发等^[41]推导了层状岩体弹性模量随层理面倾角的变化关系曲线;张志强^[42]基于变形等效原理和裂隙岩体细观变形特征,分别推导了含单组和多组非贯通裂隙岩体的变形参数表达式,研究了岩体变形模量、泊松比、剪切模量等变形参数随岩体裂隙连通率、裂隙倾角、裂隙厚度率的变化规律;杨旭



等^[43]根据脆性材料的研究成果,采用自洽理论建立了岩体的损伤力学模型,并结合岩体原位试验的要求,提出了岩体力学试验的模拟方法。解析方法主要优点在于能直接反映岩体各向异性,但由于解析方法计算一般建立在一定的假设条件下,故难以反映节理间的相互作用。

4. 反分析方法

自 Kavanagh 等^[44]发表了有限元法反演固体材料弹性模量的论文后,根据现场量测信息确定岩体力学参数的反分析研究得到了国内外学者的广泛重视,目前,反分析方法以位移反分析法应用最为广泛;冯夏庭等^[45]将人工神经网络和遗传算法相结合,提出了一种新的位移反分析方法,即进化神经网络法;邓勇^[46]基于均匀设计、有限元、神经网络和遗传算法建立了新的边坡岩体力学参数反分析方法。

5. 数值方法

20世纪60年代,Goodman等^[47]在有限元的基础上引入节理刚度单元来模拟结构面性质,用于研究和分析节理岩体的力学性质,拉开了不连续变形模拟分析的序幕;晏长根等^[48]利用 Monte Carlo 法建立了结构面网络模型,采用有限差分软件 FLAC^{3D}对随机节理岩体的变形与强度及其尺寸效应进行了数值试验研究;朱维申等^[49]推导了等效变形与等效强度的基本公式,提出了一种等效连续模型;薛廷河等^[50]研究了含层状斜节理的灰岩岩体力学参数随岩体试件尺寸的变化关系,研究表明岩体力学参数具有明显的尺寸效应。

目前国内外开展岩体力学参数研究的方法较多,但由于岩体性质的复杂性、岩体结构的特殊性,用单一的方法确定岩体的物理力学参数往往较为片面。在实际应用中,建议综合多种方法进行力学参数的确定,更具可靠性。

1.3.2 层状岩质边坡破坏模式

为了较准确地判断边坡的稳定性,研究边坡破坏模式是十分必要的,许多学者采用了很多方法对边坡变形机理和破坏模式进行研究,并取得一定研究成果。Skempton 等^[51]将边坡的破坏模式划分为3种基本类型:崩塌破坏型、滑坡破坏型和侧向扩离破坏型。Brawner 等提出边坡破坏的六种破坏模式,即圆弧滑动、块状破坏、整体与非连续节理破坏、平面破坏、楔体破坏和倾倒式破坏等。Hoek 等^[53]在《岩石边坡工程》中,将岩石边坡变形破坏类型分为4种:圆弧破坏、平面破坏、楔体破坏和倾倒破坏,并对边坡破坏机制、破坏类型、破坏方式以及如何抽象边坡稳定性分析力学模型等问题进行了详细研究。20世纪80年代,国际工程地质与环境协会(IAEG)滑坡委员会建议采用 Varnes 的滑坡分类作为国际标准方案,并将边坡按运动方式划分为5种基本类型:崩落(塌)(Falls)、滑动(落)(Slides)、倾倒(Topples)、侧向扩离(Lateral spreads)和流动(Flows)。王恭先^[55]按边坡变形破坏机制和性质分为坍塌、崩塌、滑坡、错落、倾倒五种类型。华安增等^[56]在其专著《层状非连续岩体稳定学》中,阐述了层状非连续性岩体稳定的若干问题,论述了层状非连续岩体中块体的可动条件、判别方法与步骤,系统研究了层状非连续岩体可动块体稳定性;张倬元等^[57]通过大量研究,从岩体变形破坏过程中划分若干基本单元,即拉裂、蠕滑、弯曲、塑流,并用这些单元的特定组合表征岩体变形机制和演进特征,建立了5种岩体变形破坏的地质力学模式:蠕滑-拉裂、滑移-压致拉裂、弯曲-拉



裂、塑流-拉裂、滑移-弯曲, 这些模式在层状岩体中均可能发生; 陈沉江等^[59]在综合考虑层状岩质边坡的具体工程地质条件、力的作用模式及其破坏形式的基础上, 针对层状岩质边坡的蠕变破坏形式进行了分类; 彭仕雄等^[60]结合具体工程, 系统研究了工程地质条件复杂、岩质条件差的层状岩质高边坡的变形破坏机理, 并归纳出 5 种破坏模式, 即松散堆积体的局部滑塌和沿基岩接触面的滑移、沿层间错动带的压缩、塑流、挤出-拉裂破坏、强风化卸荷带破碎岩体的局部倾倒和滑塌、楔体滑动、向斜核部范围的顺层滑动或溃屈破坏。

边坡岩土体经历了漫长的变形演化过程, 导致岩土体成分、结构具有特殊性与复杂性, 仅用完整岩体的变形破坏理论进行分析, 不足以描述边坡岩土体的变形机制和破坏模式。对于典型层状岩质边坡, 需要根据地形地貌、岩土体特性、坡体结构等, 对不同层状岩质边坡体情况进行分类并展开研究, 全面分析可能的破坏模式。

1.4 边坡稳定性评价

边坡稳定性是岩土工程中比较重要的问题, 而稳定性分析与评价也是边坡研究的重中之重。而随着各种工程的出现, 伴随着各种类型边坡失稳事故的发生, 许多方法都对边坡稳定性提供了一定的解释。这些方法在不同角度对边坡进行稳定性分析得出的结果不尽相同。总的来说, 边坡稳定性分析方法的应用经验积累得非常多, 稳定性评价方法渐趋成熟。

边坡稳定性分析研究涉及工程数学、力学、工程地质学、现代计算技术等多个学科, 其研究历史已达 100 余年。边坡稳定性分析评价方法经历了 3 个阶段, 即传统的定性定量分析评价方法阶段、数值分析方法阶段和目前采用的综合评价方法阶段^[61]。

第一阶段采用的主要是工程地质分析法、类比法和极限平衡法。前两者是工程工作人员根据工程经验所总结的一种经验方法; 后者则是运用莫尔-库仑准则对滑体进行受力分析的方法, 根据滑体的力(力矩)平衡, 建立边坡安全系数表达式, 进行定量评价分析, 由于其方法简单、安全系数直观而被工程人员所广泛采用。

第二阶段始于 20 世纪 60 年代, 数值方法被引入到边坡稳定性分析中。数值方法包括: 从早期的有限差分法(Finite Difference Method)、有限单元法(Finite Element Method)、边界单元法(Boundary Element Method)到近些年出现的主要针对岩土介质的离散元法(Discrete Element Method)^[62]、关键块体理论(Key Block Theory)^[63]、快速拉格朗日分析法(Fast Lagrangian Analysis, FLAC)^[64]等数值计算技术^[65], 能从较大范围考虑介质的复杂性, 全面分析边坡的应力-应变状态, 有助于加强对边坡变形和破坏机理的认识, 对极限平衡法也有很大的改进和补充。

第三阶段始于 20 世纪 70 年代, 这个阶段一些新理论和现代评价方法应用在边坡分析中, 如可靠性理论^[66]、模糊数学、灰色预测理论等非线性理论^[67]以及人工智能与神经网络、损伤力学等, 这些新理论和现代评价方法在工程中都显示了其良好的应用前景, 大大推动了边坡稳定分析的研究进展。由于它们处于探索阶段, 仍然存在很多不足, 如: 滑坡系统参数的选择往往受到实际监测资料的限制, 资料自身的误差影响滑坡过程中的非线性



方程的建立；对于滑坡的自组织特征和边坡系统内部-外部之间的相互作用和耦合机制不清楚，难以建立模型来分析和研究，只能通过系统的一些宏观参数的数值分析来研究系统的复杂性。

我国边坡稳定性的研究大致可划分为以下阶段：

20世纪50年代，主要是从研究铁路路堑边坡、公路路堑边坡和引水渠道边坡开始的，采用工程地质类比法给出边坡坡角，作为边坡设计的依据。

20世纪60年代，开始形成了岩体结构及控制的观点，划出了边坡岩体结构类型，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，判断边坡的稳定性^[68]。

20世纪70年代，开始研究边坡破坏机制。在计算方面，不仅应用了极限平衡原理，还应用了弹塑性力学理论，并且随着计算机的发展，广泛应用有限单元法来分析边坡变形破坏条件及评价边坡的稳定性。70年代末，已经形成了一套比较完整的地质力学学术观点和方法，积累了较丰富的实践经验^[68]。

20世纪80年代，边坡稳定性研究进入比较全面的发展阶段。一方面，建立了典型边坡工程地质模型，对岩质边坡稳定性的工程地质认识有了一个飞跃；另一方面，随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稳定性研究，且从定性过渡到半定性、半定量研究边坡变形破坏过程及内部作用机制过程，并从整体上认识边坡变形破坏机制，认识边坡稳定性的发展变化。与此同时学科之间的相互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、不确定性等研究方法被引入边坡稳定性研究，从而使其进入一个新阶段。

1.4.1 定性分析法

定性分析法主要是根据岩土工程勘察数据和资料，岩体结构面与坡向、坡角的组合关系分析边坡稳定性，常用的方法主要有赤平投影法、工程地质类比法、边坡稳定性分析数据库、专家系统及图解法等。它的优点是能综合考虑影响边坡的多数因素，迅速对边坡的稳定性及其破坏趋势作出评价；缺点是受人为主观影响较大，不同研究人员在对相同地质环境作评价时往往会得出不同的结果。不管是赤平投影法、工程地质类比法还是历史成因分析法，都受人为主观因素的影响，经验性较强，而且没有实际评价的依托，所以其准确性较差，可靠性有待商榷。

1.4.2 半定量分析法

半定量分析法是首先对边坡进行工程类比，运用数理统计方法处理、分析大量表征边坡稳定性的模糊性参数，然后再运用模糊综合评判等简单计算方法对边坡的稳定性进行评价和预测。该方法的基本思想是，分析影响边坡稳定性的各种因素对稳定性的影响程度（贡献值），然后按照模糊综合评价法的最大隶属度原则进行选择，判别边坡属于哪个类别，最后得到边坡的稳定性状态。

1.4.3 定量分析法

定量分析法主要有极限平衡法、数值分析法等，其中数值分析法又包括有限单元法和