

向家坝水电站马延坡边坡 稳定性分析及安全监测技术

姜龙 孙建会 王万顺 熊成林 朱赵辉 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

向家坝水电站马延坡边坡 稳定性分析及安全监测技术

姜龙 孙建会 王万顺 熊成林 朱赵辉 著

内 容 提 要

本书主要内容包括：马延坡边坡地质环境及治理措施，主要介绍了工程概况、马延坡边坡工程地质勘察、马延坡边坡蠕滑变形机制和马延坡边坡工程治理设计与施工等；马延坡边坡安全监测设计与施工，主要介绍了马延坡边坡安全监测设计原则及依据、马延坡边坡监测设计及仪器选型和马延坡边坡监测施工及整编等；马延坡边坡安全监测成果分析，主要介绍了马延坡边坡监测信息管理及分析系统、马延坡边坡变形特性分析和马延坡边坡应力应变特性分析等；马延坡边坡稳定性分析，主要介绍了马延坡边坡数值模型建立、基于智能计算的模型参数反演分析和马延坡边坡稳定性分析；马延坡边坡安全预警分析，主要介绍了监控级别及标准、安全预警判别标准和马延坡边坡安全预警分析等。

本书可供从事边坡安全监测、稳定性以及安全预警的技术人员参考。

图书在版编目（C I P）数据

向家坝水电站马延坡边坡稳定性分析及安全监测技术/
姜龙等著. — 北京：中国水利水电出版社，2014. 12
ISBN 978-7-5170-2803-1

I. ①向… II. ①姜… III. ①水电站—边坡稳定性—安全监测 IV. ①TV698.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第311210号

书 名	向家坝水电站马延坡边坡稳定性分析及安全监测技术
作 者	姜龙 孙建会 王万顺 熊成林 朱赵辉 著
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 (发行部)
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	北京纪元彩艺印刷有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 10.75印张 255千字
版 次	2014年12月第1版 2014年12月第1次印刷
定 价	40.00元

凡购买我社图书，如有缺页、倒页、脱页的，本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

前言

PREFACE

我国幅员辽阔，地形地质条件复杂，2/3的国土为山地。我国水力资源理论蕴藏量高达6.8亿kW，可开发利用的资源量为3.8亿kW，68%分布在西南部的云南、贵州、四川等地区。随着我国经济高速发展，极大地带动了资源、能源的开发进程，从而全面带来了水电建设领域的繁荣，大型工程活动数量之多、规模之大、速度之快、波及面之广，举世瞩目。如三峡水电工程、南水北调工程、龙滩水电工程、小湾水电工程、向家坝水电工程、溪洛渡水电工程、白鹤滩水电工程、乌东德水电工程等大型工程相继或即将兴建。毫无疑问，随之也带来了众多的边坡工程问题，尤其是西部水电工程，边坡越来越高、地质结构及环境条件越来越复杂，对于边坡工程的质量要求越来越高。

作为工程建（构）筑物的基本环境和工程设施的承载体，岩土高边坡的失稳破坏不仅会直接摧毁工程建设本身，而且也会通过环境灾难对工程 and 人居环境带来间接的影响和灾害。边坡稳定性的主要影响因素是力学参数选取的基础，边坡的稳定性分析是判断边坡是否失稳的依据，边坡的安全预警体系是判断边坡是否需要加固以及采取何种加固措施的保障。依据边坡安全监测成果，通过智能计算方法选取合理的边坡物理力学参数，分析其边坡的稳定性，进而建立边坡的安全预警体系，将是未来一段时间内对边坡设计和加固处理研究的重要内容之一。

本书的编纂立意是面向从事边坡安全监测、稳定性以及安全预警的各方面技术人员，力求对其他边坡安全监测工程和安全监测技术人员有一定参考和使用价值，力图为我国安全监测事业拓展、深入起到推动作用。

第1章为绪论。介绍了国内外工程边坡研究现状、边坡稳定性及安全预警研究内容及技术路线和边坡稳定性及安全预警研究目的及意义等。

第2章为马延坡边坡地质环境及治理措施。介绍了工程概况、马延坡边坡工程地质勘察、马延坡边坡蠕滑变形机制和马延坡边坡工程治理设计与施工等。针对马延坡边坡地质调查和建筑物布置情况，详细阐述了工程地质勘察成果和边坡加固治理设计及施工等。

第3章为马延坡边坡安全监测设计与施工。介绍了马延坡边坡安全监测设计原则及依据、马延坡边坡监测设计及仪器选型和马延坡边坡监测施工及整编

等。针对马延坡边坡工程特点，详细阐述了安全监测设计、项目布置以及整编分析方法等。

第4章为马延坡边坡安全监测成果分析。介绍了马延坡边坡监测信息管理及分析系统、马延坡边坡变形特性分析和马延坡边坡应力应变特性分析等。针对马延坡边坡建筑物布置情况，详细阐述了马延坡边坡表面变形、深部变形、抗滑桩钢筋计、锚索测力计、地下水位等的变形和结构受力特性以及变化规律。

第5章为马延坡边坡稳定性分析。介绍了马延坡边坡数值模型建立、基于智能计算的模型参数反演分析和马延坡边坡稳定性分析。针对马延坡边坡变形体蠕滑特征和加固治理效果，详细阐述了基于有限元强度折减法和传递系数法的稳定性分析方法、步骤和计算成果。

第6章为马延坡边坡安全预警分析。介绍了监控级别及标准、安全预警判别标准和马延坡边坡安全预警分析等。针对马延坡边坡加固效果和安全监测成果，详细阐述了基于预施边界位移的安全预警评价体系。

本书编写过程中，得到中国水利水电科学研究院、北京中水科水电科技开发有限公司以及中国长江三峡集团公司向家坝建设部、中国水电顾问集团中南勘测设计研究院等单位的大力支持，在此向他们表示诚挚谢意。本书定稿过程中，中国水利水电科学院汪小刚教授、张金接教授、葛怀光教授，中国长江三峡集团顾功开高工对本书提出了许多宝贵意见和建议，在此向他们表示感谢。

本书第1章由孙建会、熊成林执笔，第2章由姜龙、王万顺、王永强执笔，第3章、第4章由孙建会、王万顺、朱赵辉、李娜执笔，第5章、第6章由姜龙、熊成林、朱赵辉执笔。全书由姜龙、孙建会、王万顺、熊成林、朱赵辉统稿。

限于作者水平，书中难免存在缺点和错误，敬请广大读者批评指正。

作者

2014年6月



前言

第1章 绪论	1
1.1 国内外工程边坡研究现状	1
1.1.1 工程边坡中常见的滑坡	1
1.1.2 边坡稳定性研究现状	8
1.1.3 边坡安全预警研究现状	14
1.1.4 监测技术在边坡工程中的应用与发展	16
1.2 边坡稳定性及安全预警研究内容及技术路线	19
1.2.1 边坡稳定性及安全预警研究内容	19
1.2.2 边坡稳定性及安全预警研究技术路线	19
1.3 边坡稳定性及安全预警研究目的及意义	20
1.3.1 边坡稳定性及安全预警研究目的	20
1.3.2 边坡稳定性及安全预警研究意义	21
1.4 本章小结	21
第2章 马延坡边坡地质环境及治理措施	22
2.1 工程概况	22
2.1.1 向家坝水电站区域地质	22
2.1.2 马延坡边坡工程地质	24
2.2 马延坡边坡工程地质勘察	28
2.2.1 勘察布置及原则	28
2.2.2 勘察成果整编及分析	30
2.3 马延坡边坡蠕滑变形机制	37
2.3.1 地质因素	37
2.3.2 人类活动	38
2.3.3 降雨影响	39
2.3.4 马延坡边坡蠕滑变形机制	40
2.4 马延坡边坡工程治理设计与施工	40
2.4.1 工程治理设计	40
2.4.2 工程治理施工	43
2.5 本章小结	50

第3章 马延坡边坡安全监测设计与施工	51
3.1 马延坡边坡安全监测设计原则及依据	51
3.1.1 安全监测目的	51
3.1.2 安全监测设计原则	51
3.1.3 安全监测依据	52
3.2 马延坡边坡监测设计及仪器选型	52
3.2.1 外部监测设计	52
3.2.2 内部监测设计	55
3.2.3 渗流监测设计	56
3.2.4 监测仪器设备选型	57
3.3 马延坡边坡监测施工及整编	61
3.3.1 外部监测施工	61
3.3.2 内部监测施工	65
3.3.3 渗流监测施工	71
3.3.4 监测观测及整编	73
3.4 本章小结	79
第4章 马延坡边坡安全监测成果分析	80
4.1 马延坡边坡监测信息管理及分析系统	80
4.1.1 系统开发目标	80
4.1.2 系统功能模块	81
4.2 马延坡边坡变形特性分析	87
4.2.1 表面变形特性	88
4.2.2 深部变形特性	96
4.3 马延坡边坡应力应变特性分析	101
4.3.1 钢筋计变化特性	101
4.3.2 锚索测力计变化特性	112
4.3.3 应变计组变化特性	116
4.3.4 地下水变化特性	124
4.4 本章小结	126
第5章 马延坡边坡稳定性分析	127
5.1 马延坡边坡数值模型建立	127
5.1.1 有限元基本理论	127
5.1.2 基于渗流—应力耦合的边坡数值模型	131
5.2 基于智能计算的模型参数反演分析	135
5.2.1 参数反演的基本理论	135
5.2.2 BP网络算法及实现	136

5.2.3 参数智能反演	137
5.3 马延坡边坡稳定性分析	141
5.3.1 有限元强度折减法	141
5.3.2 边坡失稳判据	142
5.3.3 基于强度折减的边坡稳定性分析	143
5.3.4 基于传递系数的边坡稳定性分析	146
5.4 本章小结	148
第6章 马延坡边坡安全预警分析	149
6.1 监控级别及标准	149
6.2 安全预警判别标准	150
6.3 马延坡边坡安全预警分析	151
6.4 本章小结	160
参考文献	161

第 1 章 绪 论

我国幅员辽阔，地形地质条件复杂，国土面积的 2/3 为山地。我国水力资源理论蕴藏量高达 6.8 亿 kW，可开发利用的资源量为 3.8 亿 kW，68% 分布在云南、贵州、四川等西南地区。随着我国经济高速发展，极大地带动了资源、能源的开发进程，从而全面带来了水电建设领域的繁荣，大型工程活动数量之多、规模之大、速度之快、波及面之广，举世瞩目，如三峡水利枢纽、南水北调、龙滩、小湾、向家坝、溪洛渡、白鹤滩、乌东德等大型水电工程相继建成或即将兴建。毫无疑问，随之也带来了众多的边坡工程问题，尤其是西部水电工程，边坡越来越高、地质结构及环境条件越来越复杂，对于边坡工程的质量要求越来越高。这些工程边坡的稳定性状况，事关工程建设的成败与安全，对整个工程的可行性、安全性及经济性等起着重要的控制作用，并在很大程度上影响着工程建设的投资及使用效益。如果处理不当，往往导致边坡失稳，形成滑坡和崩塌，其后果不堪设想，如：云南澜沧江漫湾水电站左岸缆机平台边坡失稳的治理工程耗资 1.2 亿元，延误工期一年，损失超过 10 亿元；龙羊峡水电站的虎山边坡治理工程耗资近 3 亿元；天生桥二级水电站进口右岸挡墙基坑开挖导致滑坡，使 48 人丧生；清江隔河岩水电站右岸导流洞出口边坡失稳，近 20 万 m³ 岩体解体，延误工期 3 个月；黄河小浪底工程进场公路开挖时，发生 30 万 m³ 滑坡，造成公路改道、增开交通隧道及桥梁工程的大量投资。我国工程边坡失稳频繁发生的主要原因有：①对工程边坡的认识不足，对工程边坡进行勘察、论证不充分，设计参数选取多以工程经验为依据；②受我国传统分工体系的影响，认识边坡和改造边坡人员脱节；③工程边坡地质条件复杂、多样，且对地质滑坡的研究多，而对工程边坡的研究相对较少，未形成一套完善的技术方法体系；④边坡预警以观测数据的预测较多，对物理模型和数学模型组合预测较少，也未形成一套较为科学的应用体系。

随着对环境与资源问题的高度重视，对国家能源战略结构的重大调整，对优先开发利用水电可再生清洁能源的清晰认识，中国的水电开发正处于一个新的高峰期。工程高边坡稳定问题成为我国水电工程建设中面临的主要技术问题之一。依据工程边坡结构特征、工程地质条件和安全监测成果，深入系统地开展工程高边坡稳定性和边坡预警方面研究，反演工程高边坡力学参数、分析工程高边坡稳定性、建立边坡预警模型和健康诊断体系，指导和优化工程设计、施工，为类似工程提供宝贵经验和技術支撑，将为今后工程边坡稳定性研究的重要工作之一。

1.1 国内外工程边坡研究现状

1.1.1 工程边坡中常见的滑坡

滑坡是土木、水利、交通、矿山等基本建设工程常见的事故和灾害。工程开挖和填筑

是导致土质边坡滑坡的两大主要原因，地面和地下开挖是导致岩质边坡滑坡的两大主要原因。土质工程边坡典型滑坡见表 1.1-1，岩质工程边坡典型滑坡见表 1.1-2。我国典型滑坡现场照片如图 1.1-1~图 1.1-16 所示。

表 1.1-1 土质工程边坡典型滑坡

序号	类型	诱发原因	典型滑坡	备注
1	开挖边坡	开挖	天生桥二级水电站厂房高边坡局部滑坡；福宁高速公路八尺门互通滑坡	
2	填筑边坡	填筑	长江大堤江西马湖滑坡	
3	地质环境边坡	地震诱发	宁夏回族自治区海原地区 8.5 级地震触发了 675 个高原地区的滑坡，形成了 40 个天然湖；距秘鲁海岸 130m 处发生 7.7 级地震，导致安第斯山脉中海拔 6654.00m 的 Nevados Huascarán 山体发生总量为 0.5 亿~1 亿 m ³ 的滑坡	
		古滑坡体复活	紫坪铺水利枢纽工程 2 号导流洞出口边坡触发坡堆积体的滑坡；云南省昭通地区大水沟水库工程溢洪道边坡开挖出现大面积裂缝	
		特殊土	甘肃省东乡族自治县洒勒山滑坡；甘肃省共和县查纳滑坡	
4	水环境边坡	暴雨	四川省万县滑坡；台湾岛地区滑坡	
		水库水位骤降	江西省七一水库坝坡失稳；湖北省狮子岩土石坝坝坡失稳	
		泄洪雨雾	龙羊峡水电站下游右岸虎山边坡大范围开裂；李家峡水电站下游 3 号滑坡	
		江河崩岸	湖北省鄂洲肥铺大堤塌崩；湖北省排洲湾溃堤	
		尾矿坝	意大利北部的 Staver 萤矿尾矿坝失事；智利 Barahona 铜矿尾矿坝失事	

表 1.1-2 岩质工程边坡典型滑坡

序号	类型	诱发原因	典型滑坡	备注
1	地面开挖边坡	地面开挖	云南省漫湾水电站左坝肩局部滑坡；金川露天矿上盘西区岩层发生倾向倾倒	
2	地下开挖边坡	地下开挖	三峡库区链子崖地表裂缝；加拿大 Alberta 省的 Frank 滑坡	
3	地质环境边坡	地震诱发	日本阪神地震的仁川滑坡；四川省茂县的下白蜡寨滑坡	
		古滑坡体复活	清江隔河岩水库茅坪滑坡；四川省锦厂高速公路局部滑坡；云南省大理至保山高速公路局部滑坡	

续表

序号	类型	诱发原因	典型滑坡	备注
4	水环境边坡	降雨	意大利 Mount Zandila 的滑坡泥石流；长江支流青干河上的千将坪滑坡	
		水库蓄水	意大利瓦伊昂滑坡；塘岩光顺层滑坡	
		泄洪雨雾	李家峡水电站下游的“三一”滑坡；云南省徐村水电站溢洪道局部崩塌	



图 1.1-1 四川省宣汉县天台乡特大滑坡



图 1.1-2 三峡库区单斜顺向坡滑坡群



图 1.1-3 云阳旧县坪巨型滑坡

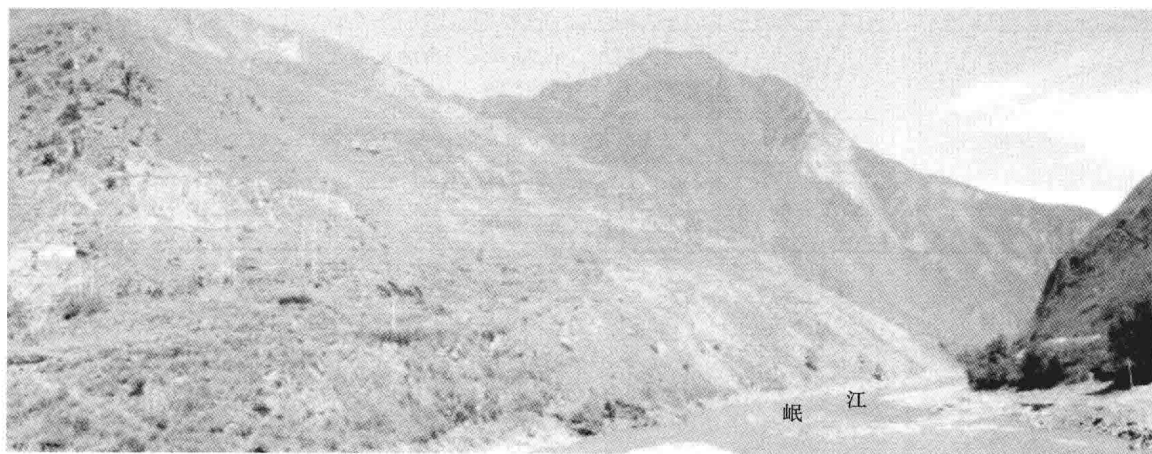


图 1.1-4 叠溪下游的巨型滑坡



图 1.1-5 小南海地震滑坡群



图 1.1-6 海原地震诱发的西吉苏堡乡党家岔村滑坡群



图 1.1-7 青海省西宁市北山林家崖滑坡



图 1.1-8 皋兰山滑坡东侧的老狼沟古滑坡

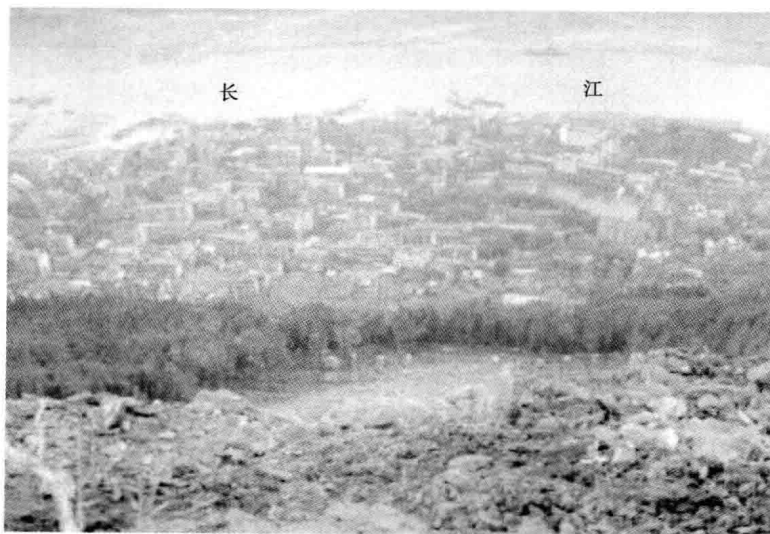


图 1.1-9 三峡水利枢纽工程重庆库区云阳老县城五峰山滑坡



图 1.1-10 甘肃省永靖县黑方台黄茨滑坡



图 1.1-11 江西省遂川县堆子前镇碎屑流（堆积体滑坡）

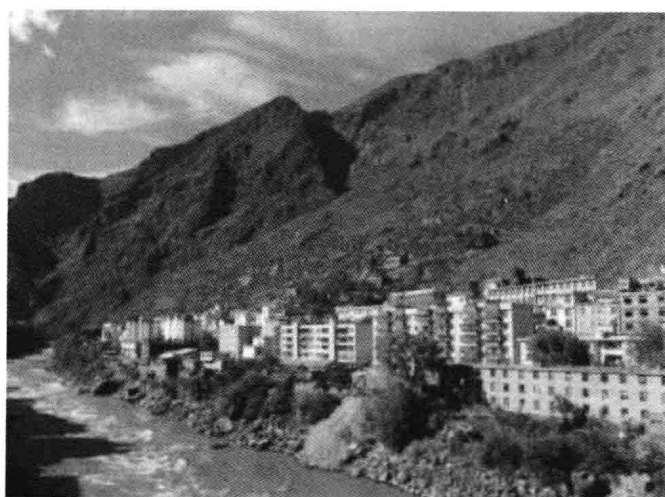


图 1.1-12 四川省丹巴县红军桥堆积层滑坡



图 1.1-13 大渡河四湾滑坡



图 1.1-14 长江三峡之瞿塘峡高陡斜坡（节理切割）



图 1.1-15 三峡水利枢纽工程湖北省库区秭归千将坪滑坡



图 1.1-16 鲁布革水电站水库滑坡

1.1.2 边坡稳定性研究现状

边坡的变形、失稳，从根本上来说是自身求得稳定状态的自然调整过程，而协助它趋于稳定的作用因素有自然因素和人类的活动因素。水文、地质、气象、气候、风化、人类的工程活动等都是边坡失稳的原因，但最为重要的是应力状态的改变和发展的结果所致。典型开挖工程边坡失稳原因有：开挖工程的地质土层应力释放后对形成的坡面应力状态的影响；工程的堆载对坡体的应力扩散传播影响；应力释放对坡体临坡面土层强度的时间滞后影响；自然环境对坡体土层强度的风化侵袭、交融变化所引起的应力效应；环境水的渗流作用对坡体应力与强度的影响。

边坡稳定性分析与评价长期以来一直是边坡工程的重要核心内容之一，也是当今边坡工程的一个研究热点，它贯穿于边坡工程的始终。边坡稳定性分析方法主要有四大类：定性分析方法、定量分析方法、不确定性分析方法、模型试验及监测分析方法。

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的分析，对已变形地质体的成因及演化史进行分析，从而给出被评价边坡稳定性状态及其可能发展趋势的定性的说明和解释。定性分析法主要包括：自然历史分析法、工程类比（范例推理）法、数据库和专家系统法、图解法和 SMR 法。

(1) 自然历史分析法。自然历史分析法主要根据边坡发育的地质环境、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，对边坡稳定性的总体状况、趋势和区域性特征作出评价和预测，对已发生滑坡的边坡，判断其能否复活或转化。它主要用于天然斜坡的稳定性评价。

(2) 工程类比（范例推理）法。工程类比（范例推理）法实质上就是将已有的边坡

(源范例)的稳定性状况及其影响因素、有关设计等方面的经验,应用到类似的所要研究边坡(目标范例)的稳定性分析和设计中。一些重要规范和规定曾明确规定,在有关地质工程设计中应采用类比法。许多重要的岩土工程采用了工程类比法。工程类比法是一种类比推理,它是通过对两个类似系统的研究,由一个系统的性质对另外一个系统性质获得假设,是一种横向思维。工程类比法虽然是一种经验方法,但在边坡的稳定性评价和设计中,特别是中小型工程的设计中是很通用的一种方法。它是目前应用最广泛的一种边坡稳定性分析方法。

(3) 数据库和专家系统法。边坡工程数据库是收集已有的多个自然边坡和人工边坡实例的计算机软件。它按照一定的格式,把各个边坡实例的发育地点、地质特征、变形破坏影响因素、形式、过程、加固设计,以及边坡的坡形、坡高、坡角等收录进来,并有机地组织在一起。建立边坡工程数据库的目的主要是进行工程类比、信息交流。它可以通过计算机直接根据不同设计阶段的要求和相关类比数据,方便快捷地从中查得相似程度最高的实例进行类比,从而能更好地指导实践。

我国在“八五”国家科技攻关期间,已初步建立了“水电工程边坡数据库”。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。它把某一位或多位边坡工程专家的工程经验、理论分析、数值分析、物理模拟、现场监测等行之有效的知识和方法有机地组织起来,建立一个边坡工程知识库,然后利用智能化的推理机(一个控制整个系统的计算机程序)来模拟并再现人(专家)脑的思维(推理与决策)过程。这一类系统的特点是计算机起着专家咨询作用。由于系统是以专家知识为基础的,因而通常能达到专家处理问题的水平。对于边坡工程这样复杂的,包括诸多不确定性因素的问题,用专家系统来研究最有可能全面考虑各种影响因素。因此,它用于边坡稳定性判断有其优越性。

(4) 图解法。图解法可以分为诺模图法和投影图法。诺模图法就是利用一定的诺模图或关系曲线来表征与边坡稳定有关的参数间的关系,并由此求出边坡稳定安全系数,或根据要求的安全系数及一些参数来反分析其他参数的方法。它实际上是数理分析方法的一种简化方法,使用起来较为方便,结果也较为直观。诺模图法由 Taylor 首次提出。投影图法是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、可能失稳岩体及其滑动方向等,进而评价边坡的稳定性。常用的有赤平极射投影图法、实体比例投影图法、坐标投影图法。投影图法目前主要用于岩质边坡的稳定性分析。

(5) SMR 法。边坡岩体质量评定(SMR法)是根据边坡岩体的某些特性,对边坡岩体进行评分分类,以积分多少来评定边坡岩体稳定性的一种方法。边坡岩体质量综合反映了岩体结构完整性、岩石坚硬程度、结构面发育特征及地下水效应等岩体的基本地质属性,是综合反映边坡岩体质量优劣、地下水作用效应和边坡岩体稳定性的综合指标。为了对边坡进行合理分类,1985年,Romana将RMR法进行修正得到SMR法,并应用到边坡稳定性评估方面。Romana认识到岩石边坡稳定性受不连续面力学特征控制,提出了节理方向参数改正的阶乘方法,添加了开挖方法改正因素。SMR法最大的特点是充分考虑了岩体结构面特征对边坡稳定的影响。