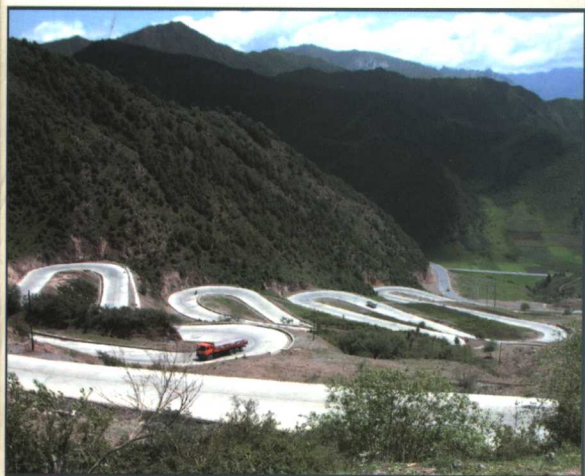


SHANQU GAOSU GONGLU GAOBIANPO BINGHAI FANGZHI SHILI

马惠民 王恭先 周德培 编著



山区高速公路 高边坡病害防治实例



人民交通出版社

China Communications Press

山区高速公路 高边坡病害防治实例

马惠民 王恭先 周德培 编著

人民交通出版社

内 容 简 介

本书的高边坡病害治理工程实例选自1998年以来治理的近10条山区高速公路沿线近千处高边坡病害治理工程和部分科研成果,集中反映了我国近年来发生在山区高等级公路建设过程中具有代表性的典型高边坡病害的治理工程。

本书包括顺层地段高边坡工程实例11个,坡体病害地段高边坡工程实例10个,特殊岩土高边坡工程实例7个,重要构筑物附近的高边坡工程实例6个,复杂高大高边坡工程实例9个,其他类型高边坡工程实例8个。这些实例对各种类型高边坡病害的地质条件、影响因素、变形破坏机制和防治工程措施等进行了较全面的论述。在此基础上,本书综述了近年来我国高边坡工程的概况和主要类型、研究成果。

本书紧密结合当前山区高等级公路建设中遇到的高边坡的工程实践,资料丰富、内容翔实、新颖,对高边坡的研究及工程防治具有一定的参考价值。

本书可供从事水利、水电、矿山、城建、交通和国防工程建设的工程技术人员以及高等院校有关专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

山区高速公路高边坡病害防治实例 / 马惠民, 王恭先,
周德培编著. —北京: 人民交通出版社, 2006.10
ISBN 7-114-06130-7

I. 山… II. ①马…②王…③周… III. 山区-高速公路-边坡-病害-防治 IV.U418.5

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第097626号

书 名: 山区高速公路高边坡病害防治实例

著 作 者: 马惠民 王恭先 周德培

责任编辑: 陈志敏

出版发行: 人民交通出版社

地 址: (100011) 北京市朝阳区安定门外外馆斜街3号

网 址: <http://www.ccpres.com.cn>

销售电话: (010) 85285838, 85285995

总 经 销: 北京中交盛世书刊有限公司

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京宝莲鸿图科技有限公司

开 本: 787×1092 1/16

印 张: 39.5

字 数: 1000 千

彩 插: 1

版 次: 2006年10月 第1版

印 次: 2006年10月 第1次印刷

书 号: ISBN7-114-06130-7

印 数: 0001~4000 册

定 价: 75.00 元

(如有印刷、装订质量问题,由本社负责调换)



元磨高速公路K235+160~+600大型崩塌



元磨高速公路三公箐隧道进口端坍塌性滑坡



竣工后的万梁高速公路张家坪堆积滑坡



万梁高速公路安龙东滑坡治理工程



疏排水和支挡相结合治理成功的
青海互助北山 K37~K39 段公路病害



变形破坏后的贵州三凯高速公路
南约沟隧道进口段高边坡



布鲁克柔性网防危岩、落石



竣工后的平阿高速公路 K34 高边坡

序 Xu

我国是一个多山之国,除广阔的西部地区外,还包括华东、华南沿海经济发达地区。近年来,我国山区高速公路的快速修建导致大量高边坡的出现,就当前人们对高边坡治理的认识与技术水平来说,不仅治理费用相当昂贵,而且还发生众多的高边坡变形与破坏,在工程施工期造成投资增大,工期延误,工程运营期耽误运营,甚至造成人身财产损失,因而高速公路高边坡的防治工程已引起政府与工程、科研等部门的热切关注。中铁西北科学研究院与西南交通大学在高速公路高边坡工程治理中积累了丰富的经验,本书的出版必将提升我国高边坡治理的勘察、设计水平,促进高边坡治理的技术进步。本书具有如下特点:

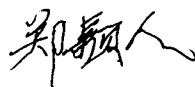
一是,针对目前山区高速公路建设和运营中出现的高边坡变形与滑坡的 51 个工程实例,因而富有现实意义,是一本对工程技术人员十分有益的、理论与实践相结合的好书。

二是,比较系统地总结了高边坡调查、勘探、试验、监测、稳定性评价和工程治理一整套科学工作方法,为今后高边坡病害预防与治理提出了理论依据和实用方法。

三是,本书将工程地质调查、稳定性分析、动态设计与信息化施工有机地结合,内容新颖、技术先进,反映了边坡工程的新理论、新方法与新水平。

最后,作为作者的同行和朋友,既是感谢,又是祝贺,感谢他们为我们共同的岩土工程事业的发展付出了一份辛勤的劳动,祝贺他们在岩土人生的道路上又迈进了一步。

中国工程院院士



二〇〇六年五月八日

前言 *Qianyan*

近年来,随着山区高等级公路建设的迅速发展,路线等级高、路面宽、开挖量大,出现了大量高边坡,也发生了众多高边坡变形和破坏,既增加了投资,也延误了工期,甚至造成已有工程破坏。如京珠高速公路广东北段高于 30m 的边坡 85 处,治理滑坡和高边坡加固费用近 8 亿元;云南省元江至磨黑高速公路长 147km,高于 30m 的边坡 432 处,出现病害 177 处,治理滑坡和边坡加固费用 5 亿多元;重庆市万州至梁平高速公路有 20 余公里通过砂、泥岩顺层地段,几乎所有的高边坡开挖后都发生了变形,加固边坡费用近 2 亿元。

如何正确认识和设计稳定的高边坡已引起各级领导和技术人员的重视。一方面,针对高速公路建设中滑坡与高边坡病害、地质灾害、特殊岩土等一系列特殊和突出路基病害问题,设立了西部开发交通建设专项研究基金,开展了大量研究工作,其中涉及滑坡与高边坡防治技术的有 24 项;另一方面,作为高速公路建设的主管部门,逐渐重视高边坡的地质勘察工作,在高速公路施工初期,邀请专业单位对高边坡进行补充勘察、调查评估、加固工程设计复核,大大减少了高边坡变形破坏的概率和整治工程费用。如京珠高速公路和万梁高速公路的主管部门设立专项基金进行沿线高边坡病害和滑坡发生发展机理及防治技术的研究,开展了全路段高边坡工点现场调查、资料分析、设计文件复查评估、试验工点的模型试验和数值分析、高边坡施工方法和工艺研究、施工动态监测、病害治理对策及建议等一系列工作。这些成果紧密结合实际工程,并直接应用于重大工程实践中,不仅丰富了高边坡变形破坏机理、加固工程设计的理论和防治技术成果,而且确保了工程建设的如期完成,值得进一步推广。

一般认为岩质边坡高于 30m、土质边坡高于 20m 即为高边坡。高边坡的稳定性问题在铁路、公路、矿山和水利建设中早已存在,国内外有许多人进行过研究。但是,由于高边坡是将地质体的一部分改造成为人为工程,因此它的稳定性受控于边坡所在岩土体的基本特性——地层岩性、地质构造、岩体结构、坡体结构及水文地质条件等,以及人为改造的程度——开挖高度、坡形和坡率。由于地质体的复杂性、多变性和不均质性,使得高边坡设计也十分复杂,至今还作为一种特殊设计而无章可循。

中铁西北科学研究院是以滑坡、高边坡、工程冻土和特殊土路基与地基为重点专业,主要针对特殊、重大科技理论进行研究的科研与生产相结合的科研单位。滑坡与高边坡病害防治技术研究是中铁西北科学研究院最主要的学科,40 多年来,主持、参与了 40 余项铁路重点工程中有关滑坡的课题研究、数百项滑坡的勘察设计及防治工作,取得了一大批科研成果,积累

了丰富的实践经验。近年来,中铁西北科学研究院在西南、华南、华北承担了包括京珠高速公路粤境北段、京福高速公路、万梁高速公路等 10 余条高速公路沿线近千余处高边坡病害的勘察、设计、研究和咨询任务,涉及福建、广东、陕西、安徽、内蒙、四川、重庆、青海、山西、贵州、云南等省、市、自治区。由于工作区域辽阔,高速公路所经地带自然条件差异显著,尤其地质环境变化悬殊,广大技术人员针对不同地域、不同地质条件下高边坡的变形破坏机理,完成了大量工程地质勘察和治理工程设计任务,取得了成功,积累了丰富经验。当然,有的地段地质条件十分复杂隐蔽;有的由于人为因素,致使在个别高边坡治理工程的实施和使用过程中也暴露出一些问题,对施工和运营产生不同程度的影响。上述高边坡治理工程中的经验与教训,对今后高边坡的勘察、设计和施工具有借鉴价值。

西南交通大学岩土工程研究所近 10 余年来与中铁西北科学研究院合作,结合铁道部、交通部和科技部科研课题及生产实践,在滑坡和高边坡的变形破坏机理、加固工程的效果方面进行了深入、系统的理论研究和大量的野外测试、模型试验工作,并取得了重大突破。

为了系统地总结高边坡的治理经验,中铁西北科学研究院与西南交通大学合作,从大量高边坡工程实例和有关资料中,选出有一定典型意义的 51 个(其中公路边坡 49 个,其他 2 个)实例材料进行分类,并汇编为《山区高速公路高边坡病害防治实例》一书,其目的在于在今后的工作中,能借鉴以往的有益经验和防止类似教训的重现。我们希望本书对从事这一领域的工作者,特别是青年技术人员,在提高高边坡勘察、设计水平方面有所裨益,为推动我国高边坡防治技术起到积极的作用。

与已出版的同类书比较,本书有以下特点:①在综合分析的基础上通过不同类型的实例给技术人员以具体参考,并有广泛的涵盖性,避免了理论性、概括性多而实例少的弊病;②本书以最近几年新的研究和实践成果及成功的实例反映国内最新水平;③从一些失败的典型工点实例出发,剖析失败的原因,避免今后在工程实践中犯类似错误。

本书共分九章,第一章为高边坡工程综述,第二章为高边坡病害的分类和防治技术,第三章为高边坡开挖失稳机理及控制技术,第四章至第九章为各类工程实例。其中,第四章介绍顺层岩石高边坡的治理工程实例;第五章介绍坡体病害地段高边坡的变形规律和治理工程实例;第六章着重介绍发生于西部山区侏罗、白垩和第三系的红层地段,以及高海拔地区公路边坡病害的特点;第七章是高速公路重要构筑物(桥梁、隧道)附近高边坡病害治理工程特例;第八章着重介绍多条高速公路建设中的著名高边坡工程;第九章则从高边坡病害的调查分析方法、监测技术应用方面,介绍典型高边坡变形破坏的成因,以及监测资料在信息化施工管理中的应用。这些实例的原始资料均来源于工程地质勘察报告、施工处理记录与总结、设计文件、科研报告、其他刊物有关文章及其他单位经验材料等。

本书第一、二章由马惠民、王恭先编写,第三章由周德培编写,第四章至第九章的实例部分由近年来主持或参加高边坡病害治理工程勘察、设计和研究的同志执笔。其中,王传仁编写第八章第二节;宋学安编写第八章第三节;张玉芳编写第八章第四节;成永刚编写第四章第三节;张红利编写第四章第四、五、七、八节;张华编写第四章第九节;于贵编写第四章第十二节和第七章第六节;孙立东、于贵编写第八章第六节;郑静、覃木庆编写第四章第十节、第九章第三节;侯殿英、张俊德编写第六章第七、八节和第九章第九节;孔德刚、王鸿、孙波和王建松分别编写第五章第三、五、七、十节;韩龙编写第九章第七、八节;张志强、于兴国编写第四章第十一节、第五章第八、九节、第七章第五节;张忠平、戚宗柯、李晓军和孙书伟编写第四章第六节、第五章第四、十一节和第六章第三、四、六节、第七章第七节、第八章第九节及第九章第五节。其余各节

由马惠民编写。

本书由中铁西北科学研究院马惠民研究员、西南交通大学岩土工程研究所周德培教授具体组织编著,侯殿英教授级高级工程师、沈尧良和张永生高级工程师进行了校核,周德培教授、王恭先研究员主审。

在本书的编写过程中,得到中铁西北科学研究院院长王应先、滑坡专家徐邦栋的指导和支持。书中引用了中铁西北科学研究院和国内外许多学者的研究成果和资料。李晓军、孙书伟、陈媛媛、金增芳、李舟、张俊德等为成书做了大量艰苦细致的编辑和绘图工作。本书的出版得到人民交通出版社的支持。在此对所有有关人员和支持本书出版的同志表示衷心的感谢!

由于时间仓促,水平有限,书中难免有疏漏和错误出现,敬请读者批评指正。

编著者

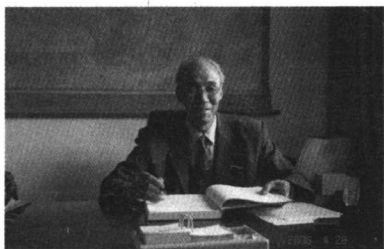
2006年3月

作者简介



马惠民:男,汉族。1963年6月出生于陕西省大荔县,1985年毕业于西南交通大学铁道工程地质专业,20余年来,一直在铁道部科学研究院西北分院(现中铁西北科学研究院)工作,历任助理研究员、副研究员、研究员、硕士生导师,勘测设计所所长、院副总工程师、副院长等。

马惠民同志长期从事西部山区铁路、公路沿线地质灾害防治工程的研究、勘察设计、咨询工作,主持和参与地质灾害治理项目近100项,其中10余项为重大、复杂地质灾害防治工程,2项获铁道部科学研究院1993年度科技开发二等奖,4项分获铁道部科技进步二等奖、甘肃省优秀勘察设计二等奖。1997年获铁道部科学研究院青年科技拔尖人才称号,2001年获第五届詹天佑人才奖,2002年获第四届甘肃省青年地质科技奖。现任中国科协咨询中心滑坡防治技术专家委员会副主任委员、甘肃省科技专家委员会地质灾害防治委员会专家、注册岩土工程师、咨询工程师。



王恭先:研究员,博士生导师。1961年毕业于唐山铁道学院铁道工程系,遂进入铁道部科学研究院西北分院(现中铁西北科学研究院)从事崩塌滑坡防治技术的研究及勘察设计工作。45年来一直坚持理论研究与生产实践相结合、工程地质与岩土力学相结合的指导思想,深入实际,调查研究,足迹遍及20多个省、市几乎所有的山区铁路、公路及矿山、水电等病害工点。较系统地研究了滑坡的形成条件、作用因素、发生和运动机理,预测预报理论和方法及防治原则和工程措施。参与和主持治理的百余处大型滑坡均取得成功。对国内多个大型复杂的滑坡和高边坡病害进行了技术咨询和治理方案论证,成效显著。主编的专著《滑坡防治》填补了我国在该领域的空白,获全国科学大会奖。作为主持人之一的《滑坡的规律与防治》成果获全国自然科学三等奖,作为主

要指导和决策人的《西北地区大型滑坡监测预报》成果获全国科技进步三等奖。在国内外发表论文 60 余篇,领导和主持翻译国外滑坡专著 5 部。1986 年应日本建设省土木研究所邀请,考察日本滑坡防治技术并进行学术交流。1986~2003 年任国际土力学与岩土工程学会滑坡技术委员会委员。1991 年被评为铁道部有突出贡献专家,享受政府特殊津贴。1996 年获茅以升科技教育基金土力学及基础工程大奖。

王恭先同志现任中国科协科技咨询服务中心滑坡防治技术专家委员会主任委员、中国地质灾害研究会顾问、甘肃省滑坡泥石流研究会理事长、甘肃省岩石力学与工程学会理事长、《滑坡文集》编委会主任。



周德培:教授,博士生导师。1981 年和 1987 年分别在西南交通大学土木工程专业获得硕士和博士学位,留校从事岩土工程领域的教学和科研工作。近年来,在高边坡变形及其控制理论的研究方面作出了较为突出的贡献。主要成果有:出版学术专著一部、获得省部级科技进步二等奖两项、三等奖一项。提出的岩土体预加固开挖技术、信息施工技术 etc 成果已在南昆铁路、内昆铁路、株六铁路、渝怀铁路、川藏公路、京珠高速公路等工程建设中广泛应用。在高边坡防护技术研究方面,首次在国内开发研究出了“岩石边坡喷射植被护坡工程技术”,恢复开挖破坏了的植被,保护生态环境,目前该项成果已在全国广泛应用,在这方面出版学术专著一部,获得国家科技进步二等奖一项,省级科技进步一、二等奖各一项。发表学术论文 30 多篇。四川省学术与技术带头人,中国岩石力学与工程学会理事、四川省岩石力学与工程学会副理事长、《岩石力学与工程学报》编委。

目录 *Mulu*

第一章 高边坡工程综述	1
第一节 高边坡工程的进展	1
第二节 高等级公路高边坡病害的危害性及其防治技术的发展	5
第三节 高边坡病害的变形特征	17
第二章 高边坡病害的分类和防治技术	21
第一节 基本术语与概念	21
第二节 高边坡变形的基本类型	23
第三节 高边坡病害的防治技术	34
第四节 高边坡结构面工程地质力学调查分析方法	42
第五节 高边坡稳定性判断方法——极限稳定斜坡比拟法	52
第六节 高边坡病害的防治原则和加固工程结构	57
第七节 高边坡病害治理工程设计的若干问题	69
第三章 高边坡开挖失稳机理及控制技术	82
第一节 概述	82
第二节 高边坡的开挖变形失稳机理	83
第三节 控制坡体开挖变形失稳的工程技术	93
第四节 信息化施工技术	99
第五节 预应力锚索抗滑桩设计计算	104
第六节 预应力锚索地梁的设计计算	111
第四章 顺层地段高边坡病害治理工程实例	127
第一节 概述	127
第二节 重庆万梁高速公路 K38~K52 顺层岩石高边坡变形破坏特征与整治	131
第三节 山西长晋高速公路顺层岩石高边坡变形破坏的原因分析与整治	148
第四节 分级锚固的重庆万梁高速公路安龙东顺层岩石滑坡	189
第五节 施工中再次滑动的重庆万梁高速公路安龙西顺层岩石滑坡	193
第六节 重庆万梁高速公路 K47+400~+500 滑坡变形原因分析及整治	197
第七节 分级支挡治理重庆万梁高速公路 K45+942~K46+060 滑坡	201

第八节	施工中多次完善设计的重庆万梁高速公路大荒田顺层滑坡·····	205
第九节	贵州三凯高速公路台烈互通立交顺层滑坡变形及其整治·····	211
第十节	云南元磨高速公路 K294+300~+650 段老顺层岩石 滑坡的复活和稳定性分析·····	218
第十一节	减重支挡结合治理贵州三凯高速公路对门坡顺层岩石滑坡·····	223
第十二节	云南元磨高速公路 K261+175~+365 大型切层滑坡的整治·····	233
第五章	坡体病害地段高边坡病害治理实例·····	241
第一节	概述·····	241
第二节	截排疏挡综合治理重庆万梁高速公路张家坪大型堆积层滑坡·····	243
第三节	综合治理川藏公路二郎山隧道东引道大型破碎岩石滑坡群·····	261
第四节	安徽芜铜高速公路 K28 滑坡特征与整治·····	279
第五节	支挡绕避结合治理青海李坎旅游二级公路 K8~K14 段滑坡群·····	290
第六节	减重支挡结合治理福建永安箭丰滑坡·····	305
第七节	川藏公路二郎山隧道西引道地质灾害特征及整治工程·····	313
第八节	贵州三凯高速公路 K105+590~+890 滑坡治理工程·····	322
第九节	贵州三凯高速公路 ZK87 老滑坡的分析与治理·····	329
第十节	福建龙长高速公路 K2+790~K3+020 段考塘滑坡的治理·····	336
第十一节	青海岗青公路 K3 岩堆病害及其治理措施·····	340
第六章	特殊岩土地区的高边坡病害治理实例·····	346
第一节	概述·····	346
第二节	316 国道稍子坡滑坡群的发生发展规律及其防治·····	349
第三节	青海平阿高速公路 K34 边坡病害治理工程·····	354
第四节	青海平阿高速公路 K37 滑坡特征及整治措施·····	361
第五节	陕西洋勉高速公路 K91 粘性土滑坡的稳定性分析与治理·····	365
第六节	高含水边坡病害的治理工程·····	374
第七节	109 国道 K1928+000~+300 段边坡病害特征和整治·····	390
第八节	兰新铁路 K20 黄土滑坡的特征和整治·····	397
第七章	重要构筑物附近的高边坡病害治理实例·····	405
第一节	概述·····	405
第二节	云南元磨高速公路重要构筑物高边坡病害的治理·····	407
第三节	重庆万梁高速公路亭子坝隧道进口坡体病害整治·····	412
第四节	抱龙峪试验区花岗岩高边坡病害治理工程·····	420
第五节	贵州三凯高速公路隧道进出口段坡体病害概况和治理对策·····	433
第六节	隧道工程纵穿坡体病害的变形特征与整治·····	440
第七节	安徽铜汤高速公路太平湖大桥铜陵岸桥台高边坡工程整治·····	448
第八章	高大复杂的高边坡治理工程实例·····	456
第一节	概述·····	456
第二节	公路滑坡和高边坡及其整治工程措施·····	459
第三节	广东深汕高速公路 K101 大型滑坡的综合勘察与治理实践·····	473
第四节	施工中多次变形的京珠高速公路 K108 滑坡原因分析及防治·····	486

第五节	高山峡谷地段边坡变形破坏特点及其防治措施·····	492
第六节	多次治理的渝黔高速公路向家坡滑坡·····	499
第七节	云南元磨高速公路四处典型高边坡与滑坡的治理工程·····	516
第八节	云南元磨高速公路 K235+160~+600 段大型崩塌的治理·····	532
第九节	贵州三凯高速公路 K118 滑坡的特征与整治·····	536
第十节	京珠高速公路粤境北段 K98 高边坡治理·····	541
第九章	其他类型的高边坡病害治理工程实例·····	549
第一节	概述·····	549
第二节	云南元磨高速公路典型高边坡病害的成因分析·····	550
第三节	抗滑桩施工对滑坡稳定性的影响——以三家寨滑坡治理为例·····	569
第四节	贵州三凯高速公路 K84 边坡治理工程·····	579
第五节	贵州三凯高速公路 K106 滑坡的特征与整治·····	583
第六节	陕西洋勉高速公路 K105+650~+815 段左、右侧两处滑坡治理·····	588
第七节	公路边坡防治工程施工中动态监测的重要性·····	598
第八节	广东河龙高速公路 K9+050~+140 段路堑滑坡的形成与发展·····	607
第九节	青海互助北山旅游二级公路 K33+800 和 K34+150 滑坡稳定性分析及治理·····	610
参考文献	·····	617

高边坡工程综述

第一节 高边坡工程的进展

早在 20 世纪 50 年代,铁路部门就遇到了严重的高边坡问题,对其重视和研究起步较早。但在 20 世纪,我国岩石高边坡理论与实践主要是伴随 60~70 年代以来西南地区水电开发、铁路建设和金川、抚顺等大型露天矿山开采的需求而发展起来的。

20 世纪 50 年代修建宝成铁路时,由于对地质条件复杂性认识不足、对地质工作的重视程度不够、技术力量薄弱以及国力不强等诸因素的影响,铁路以路基工程为主,采用了大量爆破开挖土石方工程和将很多车站放在较平坦的老滑坡体上,结果开挖车站造成了大量老滑坡复活和高边坡病害,根据宝成铁路各方面的资料,仅边坡的坍方崩塌工点多达 337 处(其中宝鸡—略阳段 163 处,略阳—成都段 174 处),滑坡工点 75 处,治理周期较长,耗资巨大。有些高边坡病害、滑坡直到通车近 30 年才得到根治,如观音山车站花岗岩高边坡 1955 年采用大爆破施工,边坡高达百余米,曾产生岩体开裂和坍方,1958 年、1964 年和 1967 年三次对其整治,主要措施有清方刷坡、挡墙支护、裂缝嵌补和增设排水沟等,遏制了裂缝的发展。1981 年宝成线发生特大水害加剧了裂缝的发展,采用以预应力锚索为主的综合整治措施后才稳定了边坡,根治了病害,教训深刻。与其类似的还有陇海铁路宝天段、鹰厦铁路等。

20 世纪 60 年代修建成昆铁路时,吸取了宝成铁路的经验教训,采取了“预防为主”的原则,在选线时采用路线绕避老滑坡,挖方边坡超过 30m 与隧道方案比选,以及隧道“宁里勿外、早进洞、晚出洞”的设计原则,避免了大量的高边坡工程,并对治理的滑坡总结出了“治早治小”、“一次根治、不留后患”的经验。全线共遇到滑坡 183 处,绕避滑坡 80 处,治理滑坡 103 处,出现了以抗滑桩、锚杆挡墙为代表的新型支挡结构,因地制宜地使用桩墙结合、桩隧结合、桩板结构、沉井挡墙和抗滑明洞等组合形式的滑坡治理结构。由于采用了较多的隧道和桥梁方案,避免了高填深挖,因此路堑高边坡病害不太突出,并总结出了诸如“陡峻的山坡切忌剥山皮、深长路堑重视排水和加固”等成功经验。与此同时,铁道部门成立了专门的研究所,开展了路基地质病害(滑坡、崩塌等)的调查识别、机理分析、勘察手段、防治措施等问题的系统研究,取得了一系列成果,培养了一大批专家、学者和专业技术人员,经过成昆、贵昆、川黔、襄渝、南昆等山区铁路的建设,积累了丰富的边坡病害防治经验,成为 20 世纪 80 年代中国滑坡与高边坡病害防治技术先进水平的代表。

20 世纪 60~70 年代,我国水电开发所遇到的高边坡问题最为突出、最为典型,对这一时

期我国岩石高边坡理论和实践发展的推动作用也最大。表 1-1 列出了 20 世纪我国大型水电工程勘察设计与施工中所遇到的典型高边坡,表 1-2 则简单总结了 20 世纪 60 年代以来我国岩石高边坡工程理论和实践发展的总体历程。

中国水电站建设高边坡 表 1-1

电站名称	边坡位置	坡高(m)	岩 性	存在的主要问题
龙羊峡	泄水消能区	>200	变质砂岩及花岗岩	贯穿拉裂缝和缓倾角裂隙、虎丘山稳定、虎山坡雾化等
天生桥二级	厂房后高边坡	180~300	砂页岩夹泥岩	层状和裂隙岩体高边坡
天生桥一级	溢洪道	120	灰岩	顺向、逆向构造坡
向家坝	左岸马步坎	600	砂、泥岩互层	坡顶和深部拉裂带
溪洛渡	左、右岸	300	玄武岩	软弱夹层
锦屏	左岸	350~600	大理岩、砂质板岩	深部拉裂
漫湾	左岸坝肩	180	微风化流纹岩	滑动带加固后继续下挖
大柳树	左、右岸	200	砂质板岩	松动岩体、深部拉裂
隔河岩	厂房	190	页岩	页岩上层硬、下层软
苗家坝	左、右岸	220		楔体变形、深部拉裂
五强溪	大坝左岸	170	砂岩、石英岩	层状结构,蠕变及顺岩层滑移
李家峡	左、右岸坝肩和厂房及泄水建筑	220	片岩、混合岩	层间挤压断层、NE 向的裂隙发育
小浪底	引水系统进、出口	120	砂、泥岩互层	岩体软弱、断裂发育
三峡	左岸船闸	170	闪云斜长花岗岩	边坡高陡,断层和节理裂隙发育
小湾	左、右岸	700	片麻岩、少量片岩	强卸荷,倾倒,楔形体,蠕滑
龙滩	左岸进水口	260	页岩、砂岩、板岩	蠕变体中开挖边坡
拉西瓦	坝区左岸	700	花岗岩	深部拉裂和缓倾角裂隙

岩石高边坡工程实践与研究发展历程 表 1-2

时期	工程实践	主导学术思想	理论基础及基本观点	分析技术	典型高边坡工程及灾害滑坡事件
1965 年	西南、西北地区水电工程建设,三线铁路建设,露天矿的开发揭示了一系列具有典型时效过程的大型滑坡	地质过程机制分析方法、工程地质力学	工程地质学+弹塑性力学+流变学概念(可变形性、结构控制非连续、流变介质)	解析分析为主	瓦依昂滑坡(1963) 龚嘴电站边坡 大渡河李子坪滑坡 雅砻江霸王山滑坡 雅砻江金龙山滑坡 乌江黄崖边坡变形 金川露天矿边坡
1980 ~ 1990 年	三峡工程库区库岸稳定性评价、黄河上游一系列大型水电工程(龙羊峡、拉西瓦、李家峡等)坝区、库区高边坡稳定性评价	地质过程机制分析——定量评价	工程地质学+岩石力学+现代数理统计和数值模拟理论(确定性的分析方法为主)	数值+物理模拟	盐池河岩崩(1980.6.3) 鸡卧子滑坡(1982.7.17) 洒勒山滑坡(1983.3.7) 新滩滑坡(1985.6.12) 中阳村滑坡(1988.1.10) 溪口滑坡(1989.7.10) 漫湾坝肩滑坡(1989.1.8) 龙羊峡近坝库岸高边坡 拉西瓦坝区高边坡 李家峡库、坝区高边坡

续上表

时期	工程实践	主导学术思想	理论基础及基本观点	分析技术	典型高边坡工程及灾害滑坡事件
1995 年	金沙江向家坝、溪洛渡、雅砻江锦屏、官地、澜沧江小湾、白龙江苗家坝等大型水电工程高边坡	系统工程地质学 工程地质系统集成法	现代工程地质学+系统科学(强调系统性、强调过程的模拟再现)	过程模拟	天生桥二级水电站高边坡 链子崖危岩体治理 黄蜡石滑坡治理 黄土坡滑坡(1995. 6. 10) 鸡冠岭滑坡(1994. 4. 30) 甘肃黄茨滑坡(1995. 1)
2000 年	三峡工程船闸高边坡, 链子崖危岩体治理, 小湾、锦屏高边坡	系统工程地质或工程地质系统集成法, 基于变形理论的设计	系统工程地质学(含非线性科学)变形过程控制理论(强调系统的非线性过程演化及过程控制)	过程模拟与过程控制	三峡船闸高边坡 链子崖危岩体治理 李家峡水电站高边坡 小湾高边坡 锦屏水电站高边坡

20 世纪 80 年代, 工程地质学的发展进入了定性向定量发展的新阶段, 工程地质学及边坡科学研究也进入了蓬勃发展的新时期。

一方面, 随着计算机技术的迅速发展和现代力学、现代数值分析理论的进步, 模拟技术开始广泛地应用于地质灾害分析, 尤其是机制分析; 针对介质的特点, 先后出现了线弹性模拟、弹塑性模拟和考虑时间效应的粘—弹—塑性模拟, 后期还出现了准大变形和运动过程的离散单元模拟, 乃至全过程模拟等。基于相似理论的物理模拟技术也得到了相应的发展。借助于方法的更新和手段的进步, 人们对地质灾害的认识不再仅仅停留于“概念模型”阶段, 而是通过模拟, 把“概念模型”上升为“理论模型”, 进一步从内部作用过程(机制)中揭示边坡地质灾害的发育及滑动带的形成过程, 以及这一过程所反映的边坡稳定性状况和蕴涵今后的变化信息, 从而为复杂边坡的稳定性评价及预测提供了重要的理论方法和工具。这一阶段的发展促使“地质过程机制分析”的学术思想体系上升到了“地质过程机制分析—定量评价”的新阶段。另一方面, 学科之间的相互渗透使许多与现代科学有关的一系列理论方法, 如系统论方法、信息论方法、模糊数学、灰色理论、数量化理论及现代概率统计等被引入边坡科学研究, 从而大大促进了理论的更新和应用研究及决策水平的提高。但所有这些方法, 在描述方法上仍未脱离传统的线性范畴。

20 世纪 90 年代, 尤其是三峡工程建设和西部开发的实施, 工程建设的需求极大地推动了岩石高边坡工程理论与实践的发展。这一阶段有以下 3 个标志性的成就:

首先是从 20 世纪 80 年代末开始, 系统科学的思想被引入复杂地质过程和高边坡稳定性研究, 人们从系统与系统之间、系统内部各子系统之间的信息传递上认识到了复杂高边坡的稳定性及其控制机制和可能的控制途径, 从而开始了从认识地质体向适应乃至改造地质体、从认识边坡变形破坏行为向控制灾害发生的过渡, 诞生了“系统工程地质学”、“工程地质系统集成”和“互馈作用”等学术思想。

其次是 20 世纪 90 年代初, 非线性科学被引入到了边坡灾害的研究。人们不仅通过一般系统科学认识到了复杂灾害系统的物理构成, 而且借助于非线性科学, 认识到了系统形成与演变的非线性特性, 从而跨越了从线性系统到非线性系统的历史性转变。它认为地质灾害是由一系列非平衡不稳定事件产生空间、时间、功能和结构上的自组织行为, 从而导致开放系统远离平衡态的结果, 借此相继建立了一些初步描述边坡行为的动力学方程, 提出了一些基于突变