

小湾水电站工程关键技术丛书

复杂高边坡整治 理论与工程实践



邹丽春 王国进 汤献良 等 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

小湾水电站工程关键技术丛书

复杂高边坡整治 理论与实践

邹丽春 王国进 汤献良 等 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书以小湾水电站边坡工程的理论研究与工程实践为背景,系统介绍了复杂高边坡工程的分析理论及其在实际工程中的应用。主要包括:边坡环境背景、变形失稳机制、安全控制标准、安全监控体系以及工程实践等。

本书内容系统全面、资料翔实、实例极其丰富,所论述和总结、介绍的一些理论分析方法和工程处理方法具有独创性和先进性,特别是基于变形失稳机制的稳定性分析方法、信息化动态治理理念以及针对性和适应性较强的工程处理方法等。

本书可供从事边坡工程的工程技术人员阅读参考,也可以作为相关领域大专院校师生的参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

复杂高边坡整治理论与工程实践/邹丽春等著. —北京:中国水利水电出版社, 2006
(小湾水电站工程关键技术丛书)
ISBN 7-5084-4004-8

I. 复... II. 邹... III. 边坡稳定性—研究
IV. TV698.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 095973 号

书 名	小湾水电站工程关键技术丛书 复杂高边坡整治理论与工程实践
作 者	邹丽春 王国进 汤献良 等 著
出版 发行	中国水利水电出版社(北京市三里河路 6 号 100044) 网址: www. waterpub. com. cn E-mail: sales @ waterpub. com. cn 电话: (010) 63202266(总机)、68331835(营销中心)
经 售	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	北京市兴怀印刷厂
规 格	787mm × 1092mm 16 开本 17.75 印张 445 千字 16 插页
版 次	2006 年 9 月第 1 版 2006 年 9 月第 1 次印刷
印 数	0001—4000 册
定 价	78.00 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

小湾水电站工程关键技术丛书

编辑委员会

主 任 蔡绍宽

副 主 任 邹丽春 杨光亮

委 员	何 伟	冯峻林	张宗亮	喻建清
	杨宜文	汤献良	王国进	曹以南
	陈正标	许文涛	李仕胜	罗孝明
	朱兆才	罗文强		

秘 书 长 徐仲华

秘 书 许 晖 盛旭辉

本书撰写人员名单

邹丽春	王国进	汤献良	向东辉
赵志勇	许 晖	刘东勇	陈宗荣
陈光明	杨宜文	胡 睿	

序

中国在建的大型水电工程中，小湾水电站无疑是很受人瞩目的一座。这首先由于她的主要建筑物——双曲拱坝高达 292m，为世界之冠，而且修建在著名的大河澜沧江上，又位于高地震烈度区，地质条件很复杂，这使小湾工程成为当今世界技术难度最大的水电工程之一。为了攻克这一难关，承担小湾水电站工程勘测设计重任的中国水电顾问集团昆明勘测设计研究院，联合有关院校和专家，开展了长达 30 余年的勘测、分析、试验、研究及设计工作。他们认真学习国内外经验，取得了丰硕的科学研究及工程设计成果，逐步解决了一系列难题，使小湾水电站工程得以通过了许多层次的严格评估和审查，终于顺利开工建设。他们虚怀若谷，认为小湾工程关键技术成功解决，凝聚了国内外众多专家的智慧 and 心血。为使这笔宝贵的知识财富长久存留，供同行借鉴参考，他们拟将小湾工程的关键技术（以高拱坝为主）逐项进行系统总结，编写成“小湾水电站工程关键技术丛书”，随小湾工程建设进展，分册出版，内容以小湾工程的理论研究与工程实践为背景，加以提炼，力求升华为系统性的总结，既有别于教科书和论文集，又不同于单纯的工程总结。我非常赞赏他们的努力，因为这不仅给小湾工程留下一部信史，而且更可为我国今后的高拱坝建设提供宝贵的借鉴资料，有利于我国水电建设技术的发展。我很高兴地看到，在小湾工程进入大坝混凝土浇筑高潮之际，这套丛书的第一部《复杂高边坡整治理论与工程实践》即将问世。

小湾工程自开工之日起，就面临一系列的挑战，其首先遇到的是高边坡的难题。小湾坝址位于澜沧江的高山深谷之中，岸坡陡峻，沟梁相间，基岩节理发育，风化卸荷严重，还存在许多欠稳定的堆积体。为了布置枢纽建筑物，以及施工的需要，必然要开挖稳定性本已接近临界的山体，形成众多高陡边坡，如坝肩开挖形成的边坡最大高度竟达 700m。这些开挖边坡的规模和地形地质条件各异，潜在的变形失稳模式复杂多样，有些高边坡的规模、复杂性及处理技术难度尚属罕见。确保工程边坡安全稳定，并力求经济和加快施工进度，成为小湾水电站建设首先面临的关键技术难题。

昆明勘测设计研究院的同志针对小湾工程高边坡的现实条件，开展了长

期的理论研究与工程实践。他们探索了适应各种变形失稳模式的稳定计算方法 and 与之配套的安全控制指标取值等方面的问题，并将成果成功地应用于设计中，取得了良好的效果。在实施中，他们创造性地将信息化动态治理理念贯穿于工程实践中，即密切跟踪开挖揭示的实际地质条件以及边坡变形情况，建立必要和严密的监控体系，及时反馈所取得的信息并进行分析。一方面，可及时优化调整治理方案；另一方面，分期、分区合理选择安全控制指标和分步整治措施，较好地解决了安全、经济和工期之间的突出矛盾。此外，他们分析各种变形失稳机制，采用针对性的工程措施，并就其作用机理、作用效应和具体应用进行研究，也取得了重要成果。依靠上述努力，终于成功解决了小湾工程复杂高边坡的稳定问题，确保了工程建设的顺利进行。

边坡稳定问题是水电工程和其他工程经常遇到的难题，甚至可以说，没有一座大型水电工程不出现边坡问题的。为研究解决这一难题，我国科学家和工程师们进行了长期不懈的努力，取得了显著的成就。随着位于高山峡谷区的大型工程建设项目日益增多，面临的高边坡问题日趋复杂和困难，安全、经济和工期之间的矛盾会愈来愈突出，往往成为影响工程顺利建设的重要因素。要妥善解决这个问题，重要的是必须首先研究和认识问题的本质，实事求是，区别对待，动态跟踪，妥善处理，切忌囿于成规，照抄照搬。本书作为“小湾水电站工程关键技术丛书”中的第一部，以小湾边坡工程为背景，介绍复杂高边坡整治工程的分析理论及其实际应用，在前人工作的基础上，对某些理论分析和工程处理方法有创造性的发展，特别是适合不同变形失稳机制的分析方法、信息化动态治理理念，以及针对性和适应性较强的工程处理措施等，弥足珍贵。相信本书的出版必将有助于我国高边坡问题研究的继续深入发展，故乐为之序。

中国科学院院士
中国工程院院士

潘家铮

2006年7月7日
于北京

丛 书 序

小湾水电工程系当今世界技术难度最大的水电工程之一，从设计工作开始，就受到世界水电界同行和相关行业专家的高度关注。中国水电顾问集团昆明勘测设计研究院（以下简称昆明院）汇聚中国乃至世界高水平专家的智慧，开展了长达 30 余年的勘测设计与研究工作，取得了丰硕的科学研究和设计成果，并成功地将这些成果应用于工程实践。为了使小湾工程科研设计的成果为世界同行所共享，为全球水电事业作出更大的贡献，我们编辑出版了这套丛书，供有关同行参考借鉴。

小湾水电站是以发电为主并兼具防洪、灌溉、库区航运等综合利用效益的工程，是澜沧江开发的关键性工程。拦河建筑物为混凝土双曲拱坝，最大坝高 292m，水库总库容 $149 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，具有不完全多年调节性能，电站总装机容量 4200MW，多年平均年发电量 $188.9 \times 10^8 \text{ kW} \cdot \text{h}$ ，保证出力 1854MW。电站投入运行后，不仅可为系统提供大量优质电源，而且可使下游 6 个梯级电站得到补偿调节，增加保证出力约 1100MW，增加年发电量 $25.75 \times 10^8 \text{ kW} \cdot \text{h}$ （均为枯水期电量）。同时，通过系统水电站群跨流域组合调度，可增加云南水电站群的枯水期电量和提高保证电量，使云南电力系统不合理的电源结构得到根本改善，对云南省的经济腾飞和云电外送有着突出的重要作用。

小湾水电站工程规模宏伟，坝高库大，泄洪功率高，单机容量大，坝址区地形地质条件复杂，地震烈度高，技术问题极其复杂，且难度很大，在许多方面均属世界之最。20 世纪 70 年代中期，昆明院开始进行小湾水电站的开发研究，经过 30 余年的艰苦努力，在完成河段开发规划的基础上，按基本建设工作程序，于 1990 年、1991 年和 1995 年先后完成坝址选择、预可行性研究、可行性研究。此后，昆明院主持完成了国家“九五”科技攻关结合小湾水电站工程的 5 个专题及 12 个子题，联合国内著名科研院所、高等院校开展科技攻关；同时，与国外著名咨询机构（俄罗斯水工设计院、法国 EDF 和 COB 公司）就小湾水电站工程的关键技术问题开展合作研究。在此基础上，于 1999 年完成了区域构造稳定性及水库诱发地震、高拱坝工作性态、坝肩稳定及基础处理、枢纽总布置优化、施工技术等 5 个专题研究，其中的多项研究

成果荣获省、部级科技进步一、二等奖。小湾工程的关键技术概述如下。

(1) 300m 级高拱坝体形及防裂和抗震措施。小湾拱坝为目前世界在建的最高拱坝,修建在高地震烈度区,基岩峰值水平加速度为 $0.308g$ 。坝顶弧长近 900m,总水推力达 $1.66 \times 10^8 \text{ kN}$ 。拱坝的布置与体形受制于特定的地形地质条件、枢纽总布置以及坝肩稳定,坝体的体形设计要同时满足施工期、正常运行期以及地震工况的应力控制标准,难度极大。为此,除采用传统的多拱梁法进行拱坝体形优化外,还将厚壳单元法、有限单元法等引入高拱坝体形优化中,提出既注重点的最大应力值满足控制标准,又力求控制坝踵和坝趾的高拉压应力区以及坝体中上部高程的高动应力区的高拱坝体形优化新理念,较好地协调、解决了小湾拱坝体形设计的安全与经济问题。

对于目前规范尚未涉及到的高拱坝坝踵开裂问题,采用国内外最新发展起来的多种分析方法,从不同角度进行了深入的研究,提出了小湾拱坝防止或减少坝踵开裂程度的工程措施——在坝踵设置结构诱导缝和坝前布设淤堵材料及坝面防渗体系等。关于拱坝的抗震问题,除在体形优化中将其作为一个重要因素加以考虑,并在高动应力区研究采用高强混凝土外,重点围绕强震时坝体中上部高程横缝可能张开的问题,采用多种分析方法和模型试验进行分析研究,布设了抗震钢筋和阻尼器,并对其作用机理和效果进行了深入的数值分析和模型试验研究。

(2) 复杂地质条件下的坝肩稳定及加固措施。高拱坝的安全不仅取决于拱坝本身,坝肩及坝基的稳定也至关重要。小湾水电站枢纽布置、坝线位置以及拱坝体形优化均在确保坝肩抗力岩体条件较好和拱端有足够嵌入深度的前提下进行。此外,围绕坝基及坝肩岩体的稳定性及其加固措施开展了大量的分析研究及模型试验,从不同角度深入分析研究了坝肩岩体的抗滑稳定、变形稳定以及超载安全度。采用高压固结灌浆、混凝土洞井塞置换、预应力锚索及锚杆、地表及地下排水系统等综合措施,并结合水垫塘边坡处理,对坝肩抗力岩体进行综合加固处理和保护。特别是为提高加固处理的针对性和有效性,并尽量减少对周围岩体的扰动,对于抗力岩体内存在的地质缺陷按照跟踪置换的理念进行处理,收到了良好的效果。

针对高山峡谷地区高地应力引起的开挖卸荷回弹松弛问题,一方面采用先进的物探技术(钻孔数字成像、声波等)查明影响范围和程度;另一方面采用精细复杂的三维非线性有限元模型深入研究坝基岩体回弹松弛对坝体以及坝基本身的影响,采取加强锚固和固结灌浆等一系列针对性工程措施,确保拱坝安全稳定。

(3) 高水头大流量泄洪消能。小湾水电站的泄洪流量和泄洪功率分别达到 $20745\text{m}^3/\text{s}$ 和 46000MW 。坝址区河谷狭窄、岸坡陡峻,泄洪消能区又位于坝肩抗力岩体范围,泄洪消能设施在布置上受到限制。由于坝高、泄洪水流落差大,因此存在一系列高速水流问题(空化空蚀、振动、雾化等)。坝身泄洪表、中孔的纵向尺寸受到限制,存在泄洪水流径向集中和入水单宽流量大的问题。不难看出,泄洪消能问题相当突出且难度极大。为此,围绕这些问题开展了大量的数值分析和模型试验研究,采用坝身表、中孔与岸边泄洪洞联合泄洪的方式确保枢纽泄洪安全,坝身泄洪按照纵向分层拉开、横向单体扩散、空中对撞消能、总体分散归槽的原则和方法解决消能问题,达到了理想的消能效果。

(4) 超大型地下洞室群。地下引水发电系统规模宏大,主副厂房、主变室、尾水调压室及闸门室平行布置,其中主厂房长 323m 、宽 30.6m 、最大高度 82m ,地下洞室群的围岩稳定成为引水发电系统的突出问题。基于模拟开挖支护步序的三维非线性有限元分析和施工过程的反馈分析,强调支护措施的及时性和针对性,优化采用经济且便于施工的有效支护措施维持围岩的稳定。在国内外首次开展了带模型机组的机电一体化水力过渡过程试验研究,采用带上室的圆筒阻抗式调压室解决了尾水系统的稳定问题。

(5) 高水头大容量水轮发电机组及金属结构。水轮机运行水头高(最高水头 251m)、单机容量大(700MW)、机组转速高($150\text{r}/\text{min}$),是目前世界上该水头段单机容量最大的机组。同时,由于水头变幅大(87m),机组在系统中担任调峰、调频和事故备用,对水轮机的运行稳定性要求高。为改善水轮机的运行稳定性,经过模型试验研究,决定提高水轮机额定水头和增加吸出高度以及发电机的额定电压,并采用全风冷的发电机冷却方式。

由于小湾水电站工程坝高、作用水头高、水推力大、水头变幅大、泄流量大从而使金属结构设计、制造和安装难度大,特别是大孔口、高水头闸门的结构、抗振、止水密封、门槽水力学、抗气蚀、大荷载链轮闸门的支撑等问题均为世界首屈一指。例如,坝身底孔工作闸门($5\text{m} \times 7\text{m}$)设计水头为 160m 、总水压力达 113510kN ,其事故检修闸门($5\text{m} \times 11\text{m}$)为承压水头 160m 的平面链轮门,总水压力达 107000kN 。经过深入分析和模型试验研究,成功地解决了相关设计问题。

(6) 高强混凝土及大体积混凝土温控防裂。拱坝混凝土原材料和温控问题,是小湾工程的关键技术问题之一。基于坝体的高应力水平,为提高坝体的抗压、防裂及抗裂性能,分别对水泥、粉煤灰、骨料、外加剂及混凝土特

性开展了深入细致的试验研究。经过一系列原材料试验和混凝土配合比试验研究及优选,小湾坝体混凝土达到了高强度、高极限拉伸值、中弹模、低热、不收缩性能的总技术指标。

小湾拱坝中下部高程最大浇筑块长度达 90 余 m,温控防裂极为重要。为此,从分析、确定坝体混凝土温控参数着手,深入分析研究了典型坝段的稳定温度场和准稳定温度场、温差和温度应力标准,浇筑块的不稳定温度场和温度应力、坝体封拱灌浆温度,并仿真分析了整个拱坝 43 个坝段从浇筑开始到正常运行全过程的温度场和应力场以及横缝开度。在此基础上,提出了合理的混凝土最低出机口温度、浇筑温度、通水冷却温度和时间、封拱灌浆温度以及浇筑层厚和间歇时间等控制性标准。

(7) 700m 复杂高边坡。枢纽区位于深山峡谷地区,两岸岸坡陡峻,高出河水面约 1000m。河谷岸坡因被多条冲沟切割,呈现沟梁相间的地貌形态。山坡表层顺坡剪切裂隙发育,卸荷作用强烈,部分冲沟地段分布有深厚的第四系堆积层。为满足永久和临时建筑物的布置以及施工场地的需要,必然形成较多的高陡工程开挖边坡,特别是沿两岸坝肩槽的边坡高度达 1000 余 m,需人工处理边坡高达 700m。这些高边坡的稳定条件较差,存在各种不同的变形失稳模式和复杂的边界条件,是工程建设首先面临的关键技术问题之一,其技术处理难度之大,在国内外水电建设乃至其他行业工程建设中尚属罕见。而目前国内外对于高边坡的治理尚处在探索阶段,在分析理论、计算方法以及与之相配套的安全指标、控制标准等方面尚未形成较为统一的认识,缺乏操作性强的规程规范。

为此,针对小湾高陡工程边坡开展了一系列分析、研究工作。在分析边坡失稳机制的基础上,运用多种分析方法(刚体极限平衡法、空间楔体矢量分析法、有限单元法等)对边坡的稳定性进行了评价,并结合建筑物的布置型式、施工及运行对边坡稳定的影响以及施工工期安排和施工条件,采取了针对性和适应性较强且安全可靠、经济合理的工程措施,探索出一套适合于裂隙发育的岩质类边坡、物质组成不均一的土质类(特别是崩塌堆积体)边坡的治理方法,成功地解决了 700m 复杂高边坡的稳定问题,为小湾水电站工程的顺利建设奠定了基础。

鉴于小湾水电站工程技术问题的复杂性,从工程建设一开始,昆明院便聘请了以潘家铮院士为组长,谭靖夷院士和王柏乐设计大师为副组长,由全国 13 位著名专家组成的小湾水电站工程设计顾问组,对重大技术问题的决策进行咨询指导。在专家们的指导和帮助下,在中国华能集团、云南华能澜沧

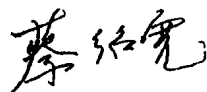
江水电有限公司和参建各方的支持下，经过昆明院几代人的艰苦努力，小湾工程的技术难关正逐一被攻克，工程建设日新月异，稳步向 2009 年第 1 台机组发电的目标顺利推进。

小湾水电站关键技术问题的成功解决，使我国高拱坝建设上了一个新的台阶，为我国乃至世界高拱坝建设积累了极其宝贵的经验，造就了一大批高水平的专家。为将专家们的经验和智慧汇集起来，升华为系统的理论与实践经验总结，使这笔宝贵的知识财富长久存留，供同行借鉴参考，在中国水电顾问集团的领导下和在中国水利水电出版社的积极支持下，我们组织编写了这套“小湾水电站工程关键技术丛书”。本丛书内容涉及复杂高边坡、导截流工程、引水发电系统、高拱坝体形优化及防裂和抗震措施、高拱坝坝肩稳定及加固措施、高水头大流量泄洪消能、高水头大容量水轮发电机组、高水头高承压金属结构、高强大体积混凝土温控防裂等。本丛书作为一套系统的技术丛书，将随小湾工程的建设进度，以不定期、分阶段的方式陆续出版各分册。

本丛书为应用技术类图书，是理论与实践的系统论述和总结，既有别于教科书和论文集，又不同于工程总结。本丛书不仅可作为水电工程科技工作者的工具书，而且也可作为有关大专院校师生的教学参考书。希望这套丛书的出版将有助于促进我国高拱坝建设的发展。

在昆明院长期的勘测设计研究中，不断学习和融汇了国内外众多专家和学者的经验和智慧。在成书之际，谨向他们表示崇高的敬意和衷心的感谢！

中国水电顾问集团昆明勘测设计研究院院长



2006 年 5 月

于春城昆明

前 言

自然环境中的基本建设工程（水电、水利、公路、铁路以及建筑等），往往需要对所处的自然边坡进行改造，以满足工程建设的需要，从而不可避免地涉及到边坡工程。随着我国社会主义经济建设的迅速发展，经济、技术水平和人民生活水平的不断提高，基本建设项目的工程规模日益扩大，涉及的地质环境和技术问题越来越复杂，边坡工程的规模和复杂程度以及工程造价也相应增大，边坡工程越来越受到学术界和工程界的广泛关注和重视。

边坡工程是一个相对独立，但又和其他学科存在着千丝万缕联系的学科，属于岩土工程范畴，涉及工程地质、结构、力学、水文、气象、测量、材料、监测等诸多学科。边坡的稳定性分析从最初的纯经验判断开始，逐渐向定性评价和定量分析相结合的方向发展。时至今日，对于土质类等相对各向均质、连续、同性材料的边坡，分析理论与计算方法相对成熟，并为工程界广泛采用；而对于含有断续节理裂隙的大量岩质类边坡，由于节理裂隙的存在往往成为控制性的失稳要素，其分布规律的随机性、不连续性及由此带来的岩体各向异性、不均匀性，使预测和分析判断往往存在局限性和片面性。目前，对于复杂的岩质类边坡和不均匀的土质类边坡，尚未形成系统的分析理论。

对于定量分析方法，一方面，随着计算技术的飞速发展，计算手段逐渐趋向精细和复杂化；另一方面，尚缺乏基于变形失稳机制的针对性分析和与之配套的规范及评判标准。大部分边坡工程仍然基于极限平衡经典解进行分析，大型复杂高边坡尽管采用了一些新的数值分析方法，但其成果仅作为参考。边坡处理的工程措施从传统的支挡结构（抗滑洞、桩、墙等）逐步发展到多样化，如锚索、锚杆、喷护、防护等，但总体仍存在对岩质类边坡锚固、对土质类边坡支挡的单一化倾向，尚未形成基于变形失稳机制和信息化动态分析而采取针对性和适应性较强、经济合理的工程措施的完整体系。

总之，国内外对于复杂高边坡工程尚处于探索阶段，在分析理论、计算方法以及与之相配套的安全控制标准等方面尚未形成较为统一的认识，可操作性不强，工程措施往往面临针对性和适应性问题。

小湾水电站坝址区约 3km^2 的范围内，两岸岸坡相对高差均达 1000m 以

上,地形狭窄,岸坡陡峻,沟梁相间,山脊部位基岩裸露、风化与卸荷发育较深,而地势低洼部位和部分冲沟内分布有大型和零散的崩塌堆积体,地形、地质及水文条件极其复杂。枢纽区建筑物与场内公路布置密集、错落多样,为满足其布置要求,并力求经济,致使开挖边坡衔接变异大,在左岸坝肩开挖形成高约700m、宽约500m,右岸形成高约600m、宽约550m的巨型高陡工程边坡,边坡明挖总工程量超过 $2000 \times 10^4 \text{m}^3$ 。坝前左岸分布有饮水沟堆积体,规模巨大,总体积约 $540 \times 10^4 \text{m}^3$,高差达470m,最大铅直深度约60.63m;右岸分布有大椿树沟堆积体,呈狭长条形,高差达610m,最大铅直深度约50.70m。堆积体物质组成复杂,尽管在天然状态下处于稳定—基本稳定状态,但两岸坝肩槽、缆机基础平台、左岸混凝土拌和系统、场内公路等工程的开挖均触及到这两个堆积体,其稳定性在施工期和永久运行期直接影响缆机及大坝的安全。

小湾边坡工程涉及土质类边坡和岩质类边坡,潜在变形失稳模式复杂多样,其规模、复杂性及处理的技术难度,在世界水电界乃至其他土建工程界尚属罕见。在满足建筑物布置要求的前提下,确保工程边坡在施工期和永久运行期的安全稳定,并力求经济和加快施工进度,是小湾水电站的关键技术问题之一,同时也是工程建设首先面临的重大问题。为此,针对小湾水电站工程建设亟待解决而在国内外又尚无成熟理论和实践经验的复杂高边坡工程,开展了历时10余年的理论研究与工程实践。在复杂高边坡变形失稳机制的分析方法、基于变形失稳模式的稳定性计算方法和与之配套的安全控制指标取值等方面进行了探索性的研究,其成果成功应用于小湾边坡工程的实践中,并取得了良好的效果。同时,建立了信息化动态治理理念,密切跟踪、分析开挖揭示的实际地质条件以及施工情况,适时进行监控体系的信息反馈分析。一方面,对工程措施的实施方案及时进行优化调整;另一方面,基于信息化动态治理,较好地协调了安全与经济、进度之间的关系,分期、分区合理选择安全控制指标和分步实施工程处理措施,成功地解决了小湾工程复杂高边坡的稳定问题,确保了工程建设的顺利进行。

在基于变形失稳机制的针对性工程措施作用机理、作用效应的研究以及应用方面也取得了突破。成功地综合采用削坡减载、回填反压、网格梁植草护坡、网喷混凝土、土钉墙、锚筋桩、钻孔灌注桩、各型锚杆、预应力锚杆、预应力锚索、抗滑桩墙体系(“桩—桩”联合受力刚架、“底拱形基础—上部挡墙—预应力锚索”抗滑结构、“锚索—桩—板墙”联合阻滑结构等)、钢筋混凝土锚固洞、乌卡斯混凝土挡墙、柔性防护网以及地表地下排水系统等措

施,分别对各部位边坡进行了针对性和适应性较强、经济性较好的综合治理。这些措施基本涵盖了目前国内外边坡工程所涉及的“十八般武艺”,而且在综合利用等方面有所创新,规模及尺寸均取得突破,其中,3m×5m的抗滑桩最深达80m、堆积体边坡锚索孔深达92m、抗滑桩截面尺寸达4m×7m。

本书在小湾工程边坡理论研究与工程实践的基础上,进行了系统的归纳和分析总结,力求提炼、升华为复杂高边坡工程的系统理论。本书从介绍边坡工程的现状和发展趋势入手,以复杂高边坡工程面临的问题为主线进行论述。首先,介绍了边坡的工程地质勘察方法、稳定性分析方法、强度理论与稳定判据、安全控制标准、安全监测方法,论述了这些方法、理论及标准涉及的前提条件、适用范围以及侧重点。然后,基于小湾边坡工程或以小湾边坡工程为例,论述了边坡的变形失稳机制,包括边坡类别划分、归纳概化出的各种变形失稳模式、与变形失稳模式相配套的定量分析方法,提出了计算分析中应注意的问题和需考虑的因素,介绍了小湾边坡工程安全等级划分及安全控制标准选取的原则、边界条件、考虑要素以及安全监测的特点和布置设计,并论述了监测信息的反馈分析和对整个边坡所作的安全评价。最后,介绍了小湾边坡工程基于变形失稳机制分析和信息化动态治理理念的工程实践。

全书章节按边坡工程概论、环境背景、基础理论和分析方法、安全控制标准、监控体系、工程实践的顺序编排。

小湾水电站工程复杂高边坡问题的研究与实践,得到小湾水电站工程设计顾问组、中国水电顾问集团、云南华能澜沧江水电有限公司,以及小湾水电工程建设管理局的领导和专家的大力支持、指导和帮助,昆明院许多同志参加了此项工作,陈祖煜院士、陈胜宏教授、黄润秋教授领导的课题组也参与了部分工作。潘家铮院士亲自为本书作序。陈胜宏教授参与了本书的审阅并提出了许多宝贵意见。中国水利水电出版社徐青博士对本书的编辑工作认真负责,付出了辛勤的劳动,作了大量令人信服的订正和修改;韩月平编辑也为本书的出版作了大量的工作。谨此一并表示衷心的感谢!

限于我们的水平和经验,本书的不妥之处,敬请读者批评指正。

著 者

2006年5月

于云南昆明

目 录

序

丛书序

前言

1 边坡工程概论	1
1.1 边坡与边坡工程	1
1.2 国内外研究现状	1
1.3 小湾边坡工程	6
2 边坡环境背景	11
2.1 工程勘察	11
2.2 区域构造背景	12
2.3 工程区地质环境	14
2.4 工程区水文地质环境	22
2.5 工程区地应力环境	24
3 边坡变形失稳机制	30
3.1 边坡结构及岩体质量	30
3.2 稳定性影响因素	33
3.3 边坡失稳模式	37
3.4 强度理论与稳定判据	45
3.5 边坡稳定性分析方法	60
3.6 岩土体物理力学参数	93
4 边坡工程安全控制标准	105
4.1 边界条件及考虑要素	105
4.2 国内外现有控制标准	106
4.3 小湾边坡安全等级及控制标准	110
4.4 关于控制标准的讨论	114

5 边坡安全监测	117
5.1 监测技术在边坡工程中的应用与发展	117
5.2 安全监测的目的和任务	118
5.3 监控级别及监控标准	118
5.4 监测类别及其项目	121
5.5 监测系统设计与布置	125
5.6 监测仪器选择	127
5.7 监测资料整理及成果分析	128
5.8 安全警戒与预警机制	137
5.9 小湾边坡安全监测特点	140
6 土质类边坡工程实践	146
6.1 小湾土质类边坡特点	146
6.2 圆弧型滑动	149
6.3 组合型滑动	157
6.4 饮水沟堆积体边坡	158
7 岩质类边坡工程实践	198
7.1 小湾岩质类边坡特点	198
7.2 单一滑面的平面型滑动	201
7.3 折线型和阶梯状滑面的平面型滑动	204
7.4 楔形体滑动	210
7.5 倾倒型崩塌	222
7.6 滑移型崩塌	227
7.7 有限变形	235
7.8 岩质边坡治理的有关问题探讨	245
8 坡外危险源及其他边坡防治实践	247
8.1 危险源及其防治	248
8.2 软基上的防冲护岸	257
8.3 泥石流治理	261
参考文献	266

1 边坡工程概论

1.1 边坡与边坡工程

1.1.1 边坡

边坡是地壳表面具有临空条件的地质体，由坡顶、坡面、坡脚及其下部一定深度内的岩土体组成。

根据成因，边坡可分为自然边坡、人工边坡、工程边坡三类。由自然营力形成的天然存在的边坡称为自然边坡；人工堆积形成的边坡称为人工边坡；经人工改造形成或受工程影响的边坡称为工程边坡。

根据组成物质的差异，宏观上可将边坡划分为土质类边坡和岩质类边坡。土质类边坡是指由土、砂、碎石、块石、孤石或碎裂结构岩体等组成的均质或似均质材料边坡；岩质类边坡是指由块体结构、层状结构、镶嵌碎裂结构的岩体组成的边坡。根据坡体结构特征，岩质边坡又可细分为顺向坡、逆向坡、横向坡、斜向坡和水平层状坡等。

根据边坡的陡缓程度划分，坡度在 10° 以下为缓坡， $10^\circ \sim 30^\circ$ 为斜坡， $30^\circ \sim 45^\circ$ 为中等坡， $45^\circ \sim 60^\circ$ 为陡坡， $60^\circ \sim 75^\circ$ 为峻坡， $75^\circ \sim 90^\circ$ 为直立坡， 90° 以上为倒坡。

根据边坡的高度特征划分，坡高在 10m 以下为低边坡，10 ~ 30m 为中低边坡，30 ~ 70m 为中等边坡，70m 以上为高边坡。一般地，150 ~ 300m 可称为超高边坡，300m 以上较为少见，可定义为特高边坡。

1.1.2 边坡工程

为满足工程需要而对自然边坡进行改造，称为边坡工程。

根据边坡对工程影响的时间差别，可分为永久边坡和临时边坡两类；根据边坡与工程的关系，可分为建筑物地基边坡（必须满足稳定和有限变形要求）、建筑物邻近边坡（必须满足稳定要求）和对建筑物影响较小的延伸边坡（允许有一定限度的破坏）。

1.2 国内外研究现状

国际上，边坡工程研究起步较早并在一定时期居于领先地位的主要是发达国家。当前，这些国家正在进行的基本建设所涉及到的边坡工程，在数量以及复杂程度上已次于发展中国家和欠发达国家和地区，其边坡领域面临的主要问题与研究已进入滑坡灾害预测评价等方面。滑坡灾害评价技术较先进的国家和地区有美国、法国、意大利、澳大利亚、加拿大、西班牙、瑞典、瑞士、捷克和中国香港等。

在我国，边坡工程的研究正随着基本建设的发展而逐步深化，并已取得了长足的进