



中国电建集团昆明勘测设计研究院有限公司

技术丛书

糯扎渡水电站 岩石高边坡工程 理论与实践

主编 刘兴宁



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn



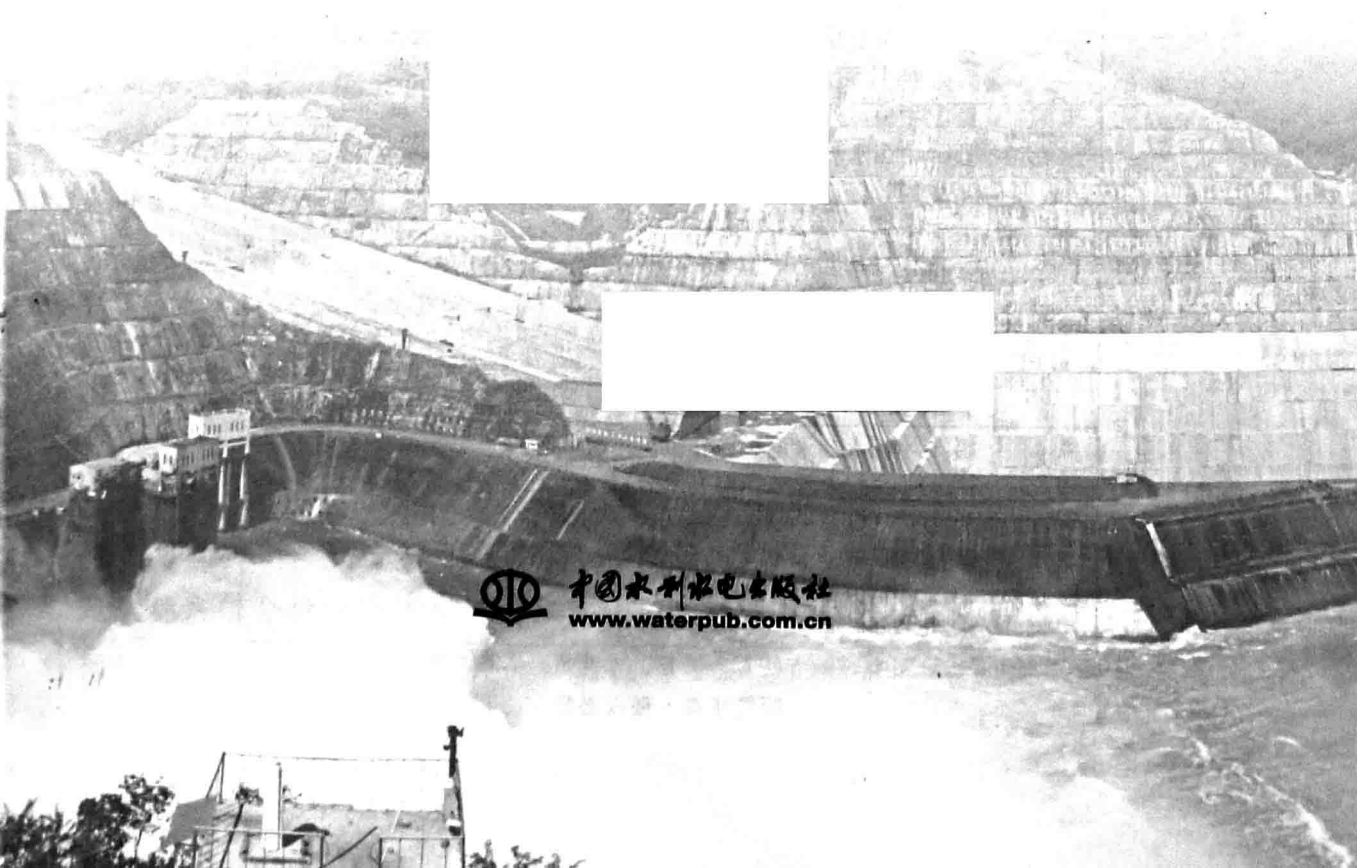
中国电建集团昆明勘测设计研究院有限公司

技术丛书

糯扎渡水电站 岩石高边坡工程 理论与实践

主编 刘兴宁

编写 徐卫亚 石 崇 张四和 邹 青



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

图书在版编目（C I P）数据

糯扎渡水电站岩石高边坡工程理论与实践 / 刘兴宁
主编. -- 北京：中国水利水电出版社，2014. 9
（中国电建集团昆明勘测设计研究院有限公司技术丛书）
ISBN 978-7-5170-2522-1

I. ①糯… II. ①刘… III. ①水力发电站—水利水电工程—边坡—岩石力学—研究—云南省 IV. ①TV7

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第213279号

书 名	中国电建集团昆明勘测设计研究院有限公司技术丛书 糯扎渡水电站岩石高边坡工程理论与实践
作 者	主编 刘兴宁
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 16印张 370千字
版 次	2014年9月第1版 2014年9月第1次印刷
印 数	001—800册
定 价	58.00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

序

随着国民经济的发展和水电开发战略的实施，水能资源丰富的西南地区形成了大量的岩石高边坡。但由于这里是地质条件极其复杂、地质灾害发育、生态环境十分脆弱的地区，边坡稳定问题尤其突出，现有的工程经验和设计规范已难以满足工程实际需要，对传统岩石力学理论及设计分析方法提出了严峻的挑战，其安全控制已成为制约水电工程建设的瓶颈问题之一。

糯扎渡水电站是澜沧江中下游河段梯级规划“二库八级”中第五级，工程规模巨大，边坡开挖较高，坝址区地质条件复杂，设计及施工过程中将涉及众多的重大技术难题，其中的岩石高边坡问题非常具有代表性。

糯扎渡水电站工程建筑物开挖形成边坡规模巨大，地质条件的复杂程度，边坡失稳产生的危害性非常严重，因此对边坡的稳定性要求高。电站枢纽区主要的工程边坡有8个，分别为：右岸坝肩开挖边坡，溢洪道消力塘左侧开挖边坡，溢洪道冲刷区右岸边坡，电站进水口开挖边坡，尾水出口开挖边坡，左岸1号、2号导流洞进口开挖边坡，右岸3号、4号导流洞进口开挖边坡，右岸3号、4号导流洞及右岸泄洪洞出口开挖边坡。其中又以右岸坝肩开挖边坡、尾水出口开挖边坡、溢洪道消力塘左侧开挖边坡、溢洪道冲刷区右岸边坡的规模更大，坡高均大于200m。无论是前期勘察还是施工期地质工作，均对边坡勘察工作非常重视，在各边坡部位均布置了勘探试验工作，对边坡稳定性进行了分析评价。工程建设全过程开展了相应的研究工作。糯扎渡水电站已经于2014年6月全面发电，相应的岩石高边坡历经10余年的运行与监测，经受了暴雨、地震等不良工况的考验，获得了诸多成功经验。

本书系统总结了针对糯扎渡水电站枢纽区含蚀变岩体边坡、雾雨影响边坡、洞坡联合变形三大特殊问题，从地质资料的分析、岩体力学参数的确定、边坡稳定性分析方法、数值模拟方法、反演反馈分析等方面开展的研究成果，阐述了通过多年的监测资料进行边坡质量验证的情况，探讨合理的边坡监测

设计思路，对糯扎渡水电站的建设提供了理论依据和技术支撑，是对岩石高边坡工程较好的理论探索成果和工程应用实例总结，具有很好的参考借鉴价值。

全国工程设计大师



2014 年 9 月

前 言

本书共分9章。第1章简要介绍了当前我国岩石高边坡分析理论与实践概况,包括稳定性分析方法、数值模拟方法、高边坡监测与反分析等研究现状;第2章主要介绍糯扎渡水电站多年的地质勘察研究成果;第3章与第4章主要在岩石力学参数确定理论与方法,岩石高边坡稳定性分析理论开展理论研究成果介绍;第5~7章分别针对糯扎渡枢纽区边坡问题,以具体的边坡为例介绍了研究进程、最终采用的工程措施;第8章介绍了岩土工程领域常用的地应力与变形参数反分析方法,并提出了边坡反馈分析方法;第9章则利用监测数据分析,对多个边坡的变形特征进行了分析,并结合10年的工程实践,探讨了全生命周期边坡设计思路。

作者从事糯扎渡水电站工程设计十余年,行走于滇南山水,观河流山川变迁,明白水穷之处,乃云起之地;两年多黄卷青灯,甘苦自知。回忆本书的撰写过程,作者特别感谢昆明院的领导和参与糯扎渡水电站设计与建设的同事们,是他们向作者提供了无私的帮助和支持,并付出了辛勤的劳动。

长期点点滴滴的来来往往,如清水洗尘、普洱养神,使作者同他们结下了深厚的友情,时时刻刻不能忘怀,谨此致以衷心的感谢!

虽然作者对本书的撰写已经经历了两年多时间,也查阅了大量的国内外资料和最新研究成果,但由于作者的知识结构、认识水平与工程实践条件的限制,难免存在错漏。如有疏漏之处,恳请广大读者批评指正。

作者

2014年9月于昆明

目 录

序

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 重大水电工程中的高边坡问题	1
1.2 国内外研究现状	1
1.2.1 岩石高边坡稳定性分析	2
1.2.2 岩石高边坡数值模拟方法	4
1.2.3 岩石高边坡安全监测	5
1.3 水电工程岩石高边坡岩石力学问题	5
第 2 章 枢纽区岩石高边坡地质勘察成果	7
2.1 工程概述	7
2.2 坝址区工程地质条件	9
2.2.1 勘察工作过程	9
2.2.2 地形地貌	10
2.2.3 地层岩性	11
2.2.4 地质构造	11
2.2.5 物理地质现象	15
2.2.6 水文地质条件	16
2.2.7 工程地质分区	16
2.3 区域构造背景及实测地应力分析	17
2.3.1 区域构造背景	17
2.3.2 实测地应力分析	17
2.4 枢纽边坡岩体结构工程地质特征	24
2.4.1 岩体结构类型划分	24
2.4.2 结构面的工程地质分级	25
2.4.3 结构面力学特性及力学参数取值	27
2.4.4 工程边坡地质结构分类	30
2.5 糯扎渡水电站岩石高边坡力学问题	32
第 3 章 岩体物理力学参数确定理论与应用研究	33
3.1 边坡岩体质量评价的 GSMR 法	33

3.2 基于 Hoek-Brown 岩体锚固强度准则	38
3.2.1 广义 Hoek-Brown 强度准则	38
3.2.2 岩块单轴抗压强度微结构张量表示	38
3.2.3 参数 m_b 、 s 和 a 的开挖弱化因子表示	39
3.2.4 参数 m_b 、 s 和 a 的锚固增强因子表示	39
3.3 岩体参数模糊分析和评价	40
3.3.1 岩体模糊分类	40
3.3.2 岩土力学参数模糊统计分析	41
3.3.3 小结	43
3.4 基于裂隙网络的节理岩体参数研究	43
3.4.1 节理岩体三维裂隙网络	43
3.4.2 基于裂隙网络确定岩体等效参数	45
3.4.3 小结	49
3.5 枢纽区边坡岩体质量分级及力学参数取值研究	50
3.5.1 CSMR 边坡岩体质量分类	50
3.5.2 边坡岩体力学参数取值研究	52
3.5.3 糯扎渡枢纽边坡设计规划	56
第 4 章 岩石高边坡稳定性分析理论和方法研究	59
4.1 考虑空间效应的改进三维刚体极限平衡法	59
4.1.1 安全系数定义	59
4.1.2 改进三维 Sarma 算法	60
4.1.3 改进三维不平衡推力法	61
4.1.4 算例验证	64
4.2 基于 Dijkstra 算法的极限平衡有限元方法	65
4.2.1 边坡稳定性问题的图形化	66
4.2.2 基于 Dijkstra 算法的最危险滑动面确定	66
4.2.3 Dijkstra 算法的优化	67
4.2.4 抗滑力的计算	67
4.2.5 程序实现	68
4.2.6 算例验证	68
4.3 基于滑移线理论的边坡极限平衡有限差分研究	69
4.3.1 滑移线理论的提出	69
4.3.2 滑动方向确定	70
4.3.3 最小安全系数计算	71
4.3.4 程序开发	71
4.3.5 算例验证	71
4.4 考虑滑面变形的楔形体稳定性分析	73

4.4.1	考虑滑面变形复杂楔形体稳定性公式推导	73
4.4.2	程序编制的相关说明	74
4.4.3	程序流程	76
4.4.4	算例验证	77
4.5	本章小结	78
第5章	右岸坝肩岩石高边坡稳定性研究	79
5.1	工程概况	79
5.2	边坡稳定地质力学分析	81
5.2.1	整体稳定性分析	81
5.2.2	边坡块体稳定性分析	82
5.3	坝轴线剖面数值分析	83
5.3.1	计算模型与工况	83
5.3.2	计算成果分析	85
5.4	含蚀变岩体右岸坝肩边坡稳定性分析	90
5.4.1	刚体极限平衡分析	90
5.4.2	极限平衡有限元分析	92
5.5	含蚀变岩体右岸坝肩岩石高边坡长期稳定	95
5.5.1	流变计算参数	95
5.5.2	长期流变变形分析	95
5.5.3	长期安全系数分析	97
5.6	研究结论与处理措施	98
5.6.1	稳定性结论	98
5.6.2	最终采用的处理措施	99
第6章	雾雨作用下高边坡变形及稳定性研究	100
6.1	边坡工程概述	100
6.1.1	溢洪道冲刷区右岸边坡工程地质特征	100
6.1.2	左岸消力塘边坡工程地质特征	101
6.1.3	雾雨区水文地质特征	102
6.2	雾雨作用下边坡计算原理及入渗失稳机制	103
6.2.1	边坡渗流—应力耦合计算原理及方法	103
6.2.2	边坡非饱和渗流计算原理及方法	104
6.2.3	雾雨入渗引发边坡失稳机制	105
6.2.4	糯扎渡水电站雾雨区边坡降雨入渗特征	106
6.3	冲刷区右岸边坡稳定性分析	108
6.3.1	边坡稳定地质分析	108
6.3.2	数值计算模型	109
6.3.3	数值计算条件的确定	109

6.3.4	数值计算参数与计算工况	111
6.3.5	数值计算结果与分析	114
6.3.6	右岸边坡刚体极限平衡计算成果	116
6.3.7	雾雨条件下边坡稳定性分析	119
6.4	消力塘泄洪雾化边坡稳定性研究	119
6.4.1	边坡稳定地质分析	119
6.4.2	消力塘边坡雾雨范围及强度	121
6.4.3	非饱和水力参数的确定	124
6.4.4	计算模型及工况	126
6.4.5	数值计算成果分析	127
6.4.6	刚体极限平衡计算成果	133
6.4.7	处理建议	134
6.5	研究结论与工程处理措施	135
6.5.1	主要研究结论	135
6.5.2	工程处理措施	135
第7章	尾水出口洞坡联合稳定性及加固措施研究	137
7.1	尾水隧道出口洞坡工程地质条件	137
7.2	洞坡稳定分析的基本理论	140
7.2.1	洞坡稳定分析的强度折减法	140
7.2.2	刚体极限平衡分析法	144
7.3	有限元计算条件	144
7.3.1	计算模型	144
7.3.2	计算荷载	146
7.3.3	计算参数	147
7.4	尾水出口洞坡刚体极限平衡稳定性分析	148
7.5	计算结果与分析	149
7.5.1	位移计算结果	149
7.5.2	应力计算结果	151
7.5.3	塑性屈服计算结果	153
7.5.4	安全系数计算结果	155
7.6	刚体极限平衡计算结果	155
7.7	研究结论与工程处理措施	157
7.7.1	主要研究结论	157
7.7.2	工程处理措施	158
第8章	糯扎渡边坡反分析与边坡反馈设计研究	159
8.1	反分析问题的统一形式	159
8.2	糯扎渡枢纽区地应力反演分析	159

8.2.1	地应力影响因素	159
8.2.2	地应力回归分析方法	160
8.2.3	三维计算模型	166
8.2.4	回归分析地应力实测点选取	168
8.2.5	坝址区初始地应力分析	173
8.3	右岸坝肩边坡流变力学参数反分析与长期稳定性	176
8.3.1	位移反分析目标取值	176
8.3.2	模型构建	177
8.3.3	反演样本抽取	179
8.3.4	三维流变参数反演的结果	180
8.3.5	边坡变形反馈	181
8.4	溢洪道消力塘边坡流变参数反分析与反馈设计	185
8.4.1	计算模型与计算条件	185
8.4.2	反演样本构造	187
8.4.3	流变参数反演结果	189
8.4.4	边坡变形反馈与长期稳定	191
8.5	尾水出口边坡流变参数反分析与反馈设计	199
8.5.1	计算模型与计算条件	199
8.5.2	反演样本构造	199
8.5.3	三维流变参数反演结果	202
8.5.4	边坡变形反馈与长期稳定	204
8.6	边坡反演反馈设计理论体系	212
8.6.1	边坡稳定反馈设计方法	212
8.6.2	边坡变形反馈设计方法	212
8.6.3	岩石高边坡反馈设计方法	212
第9章	糯扎渡水电站枢纽区边坡监测分析与实践检验	214
9.1	监测数据的预处理方法	214
9.1.1	误差的分类	214
9.1.2	粗差的判识和处理	214
9.1.3	监测数据的预处理	215
9.2	糯扎渡水电站枢纽边坡监测数据分析	216
9.2.1	监测项目	216
9.2.2	电站进水口边坡监测数据分析	217
9.2.3	溢洪道泄槽段边坡监测数据分析	220
9.2.4	溢洪道消力塘边坡监测数据分析	222
9.2.5	右岸坝顶高程以上边坡监测数据分析	226
9.2.6	冲刷区右岸边坡监测数据分析	228

9.2.7 尾水出口边坡监测数据分析	231
9.3 枢纽边坡现状分析.....	235
9.3.1 右岸坝肩边坡现状分析	235
9.3.2 雾雨区岩石高边坡现状分析	236
9.3.3 洞口边坡现状分析	237
9.4 全生命周期边坡设计思路	238
参考文献	240

第1章 绪 论

1.1 重大水电工程中的高边坡问题

全球水能资源理论蕴藏量约 39.9 万亿 kWh, 技术可开发量约 14.6 万亿 kWh, 到 2010 年, 全球水电装机容量超过 10 亿 kW, 年发电量超过 3.6 万亿 kWh, 开发程度约 25% (按发电量计算), 其中欧洲、北美洲、南美洲、亚洲、非洲水电开发程度分别为 47%、38%、24%、17% 和 8%。我国水力资源蕴藏量和可开发装机容量居世界第一。根据 2003 年全国水力资源复查成果, 我国水能资源理论蕴藏量年电量 6.08 万亿 kWh, 平均功率 6.94 亿 kW, 技术可开发年发电量 2.47 万亿 kWh, 装机容量 5.42 亿 kW (如计算雅鲁藏布江下游河段 5.70 亿 kW)。截至 2010 年年底, 我国水电开发程度 27.7% (按发电量计算), 与发达国家相比仍有较大差距, 开发潜力较大。

截至 2010 年底, 我国水电装机容量达到 21606 万 kW, 其中大中型水电 14071.5 万 kW、小水电 5840 万 kW、抽水蓄能电站 1694.5 万 kW, 水电装机占全国发电总装机容量的 22.3%, 2010 年全国水电发电量 6867 亿 kWh, 占全国发电量的 16.2%。

总体讲, 我国水力资源主要集中在西部, 尤其是金沙江 (总装机 6887 万 kW)、澜沧江干流 (云南段总装机 2137 万 kW)、怒江 (中下游规划装机 2132 万 kW)、雅砻江 (总装机 2265 万 kW)、大渡河 (可开发装机 2348 万 kW)、乌江 (总装机 867.5 万 kW) 等水电基地, 干流梯级电站规模多在 100 万 kW 以上, 个别为 1000 万 kW 级的超巨型电站, 是我国乃至世界少有的水力资源“富矿”。

但西部的水电开发, 同样面临巨大的工程挑战。一方面, 地质条件与外部环境与东部水电开发相比变得异常复杂, 复杂地质、高应力、高卸荷、地下水等问题突出; 另一方面, 由于水电建设引起的高边坡问题层出不穷, 地质灾害与生态引人关注, 需进行系统评估。“十一五”期间, 随着我国一系列大型水电工程如三峡水电站、向家坝水电站、景洪水电站、糯扎渡水电站、锦屏二级水电站的建设, 超过规范的岩石高边坡设计积累了一定工程经验, 但复杂地质条件下的岩石高边坡工程建设仍面临着巨大挑战, 需要理论创新和技术发展来支撑。

针对大型水电工程岩石高边坡工程实践, 本书基于糯扎渡水电站枢纽区的岩石高边坡, 从地质、力学参数、边坡稳定分析、工程边坡实践等方面开展了系统深入的理论研究和工程应用, 可为同类边坡的设计与工程治理提供借鉴。

1.2 国内外研究现状

不同地质条件与外部环境、不同岩性下的岩石高边坡所面临的工程问题差异巨大, 在

工程中需要充分考虑其变形特性与稳定特性，制定合理的工程措施，以保证工程安全。表 1.2.1 列出了我国大型水电工程勘测设计与施工中所遇到的典型高边坡实例。

表 1.2.1 中国水电站开发过程典型高边坡问题^[1]

工程名称	边坡位置	坡高/m	岩性	存在的问题
龙羊峡	泄水效能区	>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
天生桥二级	厂房后高边坡	180~300	砂页岩夹泥岩	层状裂隙高边坡
天生桥一级	溢洪道	120	灰岩	竖向与逆向构造坡
向家坝	左岸马步坎	600	砂岩泥岩互层	坡顶与深部拉裂带
溪洛渡	左右岸	300	玄武岩	层间、层间错动带蠕滑
锦屏	左岸	350~600	大理岩、砂板岩	深部拉裂
三峡	左岸船闸	170	闪云斜长花岗岩	边坡高陡、断层节理裂隙发育
白鹤滩	左右岸	>300	玄武岩	柱状节理岩体发育
李家峡	左右岸坝肩、厂房及泄水建筑	220	片岩、变质岩混合	层间挤压断层、NE 裂隙发育
小浪底	引水系统进出口	120	砂岩泥岩互层	岩层软弱、断裂发育
漫湾	左岸坝肩	180	微风化流纹岩	滑面加固后继续下沉
小湾水电站	左右岸	700	片麻岩、少量片岩	强卸荷、倾倒、楔形体、蠕滑
古水水电站	坝后枢纽区	1500	滑坡堆积体	降雨条件下边坡沿着基岩面蠕滑，岩体倾倒、强卸荷
糯扎渡水电站	枢纽区	200~500	花岗岩、沉积岩等	左岸蚀变岩体边坡、下游雾雨影响、洞坡联合作用明显

1.2.1 岩石高边坡稳定性分析

我国的岩石高边坡理论与实践是随着我国基础建设的发展而逐步发展起来的，尤其在水电开发领域，由于其坡高、规模越来越大、地质环境问题越来越突出，使得高边坡问题受到广泛关注。

岩石高边坡的问题除了具有一般边坡的共性之外，最突出的特点是其复杂性难以用静力学观点来认识，这些边坡所表现出的变形破坏机理与现象，滑面的发展孕育、贯通与滑动过程难以采用常规的力学方法来解释^[2-10]。从某种程度上而言，这些变形破坏现象实际上就是边坡变形破坏机理和演化过程的具体表现，如何阐明这一过程，进而认识复杂高边坡稳定性现状并预测其未来发展趋势，是对高边坡稳定分析的重要基础和前提工作。

20 世纪中期，岩石力学特别是岩体力学的发展成为解决这一问题的理论依据。岩石力学帮助工程师们了解了高边坡岩体的可变形性、变形具有显著的时效性、局部变形结果对整体边坡变形乃至最终破坏可能起到的控制作用等，从而使得对高边坡地质灾害的形成和演变进入了地质力学分析时代。此后大量的科学研究开始针对具体的岩石边坡工程，对边坡的变形破坏机理进行了深入分析和滑动模式总结，并引入了地应力和变形破坏基本地质力学模式的概念。但这时的研究，还主要集中于“概念模型”，属于定性分析范畴。

20 世纪 80 年代后，岩石高边坡分析开始进入了由定性向定量分析发展的快速发展时期。一方面，由于计算技术的发展使得现代数值模拟理论飞速发展并用于地质灾害分析，

先后出现了弹性模拟、弹塑性、黏弹塑性模拟，接着出现了大变形、离散单元法、颗粒离散元法，乃至全过程模拟方法^[11-15]。在这些数值模拟方法的帮助下，边坡从内部作用到灾害的发展孕育及滑动面形成过程进一步得到了阐述，从而复杂岩石高边坡的稳定性评价及稳定性预测具有了重要的理论工具。同时，数值模拟技术的发展也促使“地质过程分析”的研究体系开始向“地质过程机制定量评价”方向转化。另一方面，由于静力学、动力学、水力学等各学科开始相互渗透，一些信息论方法、系统理论方法、模糊数学方法、灰色分析理论、数量化理论、统计分析理论被引入到岩石高边坡的稳定性研究^[16-20]，大大丰富了当时的边坡分析手段和应用研究的水平。

在这一阶段，与一般的边坡相比，关于岩石高边坡稳定性研究，认识上取得了重大进步^[21-22]，研究思路的发展历程如表 1.2.2 所示。

表 1.2.2 岩石高边坡工程实践与研究发展历程

时期	工程实践	主导学术思想	理论基础 基本观点	分析技术	典型高边坡工程及 灾害滑坡事件
1965	西南、西北地区水电工程建设，三线铁路建设，露天矿开发揭示了一系列具有典型时效过程的岩石边坡	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（可变形性，结构控制非连续，流变介质）	解析分析方法为主	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 乌江黄崖边坡变形 金川露天矿边坡
1980	三峡工程库区库岸稳定性评价、黄河上有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+数值模拟理论（确定性分析方法为主）	数值+物理模拟	盐池河岩崩（1980） 鸡卧子滑坡（1982） 新滩滑坡（1985） 中阳村滑坡（1988） 溪口滑坡（1989） 漫湾坝肩滑坡（1989） 龙羊峡近库岸高边坡 拉西瓦坝区高边坡 李家峡库区高边坡
1990	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）	施工过程模拟	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） 鸡冠岭滑坡（1994） 甘肃黄茨滑坡（1995）
2000	三峡水电站工程，锦屏水电站工程等	系统工程地质或工程地质系统集成法	系统工程地质学（含非线性科学）	过程模拟	三峡船闸高边坡 锦屏水电站高边坡
2010	糯扎渡水电站、溪洛渡水电站、锦屏水电站建设，古水水电站等预可研	岩土介质变形理论设计	变形控制理论（强调系统的非线性演化及过程控制）	过程模拟 灾害预测	糯扎渡枢纽高边坡 溪洛渡谷肩堆积体 小湾饮水沟堆积体 古水争刚堆积体边坡

首先，岩石高边坡的稳定性不再被认为是静止不变的，而是处于不断动态演化的过程，在大地物理环境的影响下这个过程就是具有实效性，边坡潜在滑动面不断地孕育、发展、演化，最终形成破坏，研究这一过程和内部作用的机理是岩石高边坡稳定性和适应性评价的基础工作。

其次，岩石高边坡稳定性受各类复杂的岩体结构面控制，因此边坡的变形破坏、力学性质是各向异性的。在岩石高边坡研究中需要特别重视岩体结构的影响，以及岩体结构与潜在的滑面的空间交切关系。

再次，岩石高边坡稳定性评价不仅是岩土介质的强度问题，也是变形稳定性问题，在边坡的不同演化阶段，边坡所处的稳定性状态也有所不同。因此在岩石高边坡稳定分析中需要综合考虑强度与变形稳定性并举的思想。

另外，岩石高边坡稳定性的控制关键在于控制变形的发展，在边坡演化的特定阶段只要控制了边坡变形趋势，破坏其进一步发展的条件，潜在滑面就不会继续孕育和发展了。

数值模拟技术在高边坡稳定性评价中得到了广泛的应用。首先是刚性离散单元法，接着是 FLAC 方法的提出，可以同时考虑材料的力学非线性和几何非线性，混合离散实现塑性流动的模拟。

1.2.2 岩石高边坡数值模拟方法

在岩石高边坡数值分析法中，表 1.2.3 中最为典型的是有限元法。有限元法以弹塑性力学为理论基础，它通过求解弹塑性力学方程，计算岩体处于一定的外部环境条件时的应力和变形场，然后再利用岩土体的破坏准则和流动准则，判断各个相应部位应力所处的状态，界定可能发生破坏的部位和区域，从而对边坡的稳定性状况做出半定量的评价。

表 1.2.3 常用的边坡数值模拟方法

方法名称	优 点	缺 点
有限元法	适用于变形介质的分析方法。①能够对具有复杂地貌、地质的边坡进行计算；②考虑了土体的非线性弹塑性本构关系，以及变形对应力的影响；③可与多种方法相结合，发挥出更大的优势。如：刚体极限平衡有限元法	不能体现颗粒间的复杂相互作用及高度非线性行为；不能真实刻画散体材料的流动变形特征。有限元对于大变形求解、岩体中不连续面、无限域和应力集中等问题的求解还不理想
离散单元法	特别是用于节理岩石边坡稳定分析，便于处理以所有非线性变形和破坏都集中在节理面上为特征的岩体破坏问题	对连续介质有一定的局限性，对节理面上的法向及切向弹簧刚度参数的确定问题有待解决
快速拉格朗日法 (常用软件 FLAC3D)	能处理大变形问题，模拟岩体沿某一弱面产生的滑动变形。可比较真实地反映实际材料的动态行为。能有效模拟随时间演化的非线性系统的大变形力学过程	采用屈服准则，但求得的是局部单元的屈服破坏情况，而对整个边坡的稳定情况评价力度不足
非连续变形分 析法 (DDA)	主要适用于不连续块体系统。可模拟出岩石块体的移动、转动、张开、闭合等全部过程，并据此判断岩体的破坏程度、破坏范围	参数直接影响到计算结果，一般假定岩体为弹性的，塑性、黏性不适用。对软岩、软硬相间的情况处理困难。另外，对静态问题处理过于简单

有限元法用于边坡稳定分析有其独特特点^[23-58]：该方法在滑动面上的计算应力比较真实，可考虑应力应变的非线性和弹塑性；如果将稳定和位移的发展联系起来可以发展出极限平衡有限元法。有限元法的最大优点是可以部分地考虑了岩体的非均质和不连续性，避免了极限平衡分析法中将滑体视为刚体而过于简化的缺点，能近似的从应力应变去分析边坡的变形破坏机制，分析最先、最容易发生屈服破坏的部位。基于有限元方法进行的边坡稳定分析方法有多种，如应力水平法、滑面应力法、搜索滑面法和强度折减法等。

离散单元法^[59-65]假定岩体是由大量裂隙分割开的岩块沿各裂隙面“堆砌”而成，然后运用牛顿第二定律计算组成边坡的各“岩块”在自重和外荷载作用下随时间而变化的加速度、速度和位移。其假设条件是岩体可以沿节理裂隙等结构面产生滑动、转动等大变形。因此该方法主要用于模拟边坡发展演化晚期过程的变化破坏过程。

1.2.3 岩石高边坡安全监测

目前，监测工作是水电工程领域进行边坡工程施工的撒手铜，根据监测工作可以正确评估边坡的安全状态，指导工程施工，及时地进行工程反馈和修改设计、改善边坡设计方法，因此任何水电边坡，即使设计非常保守，必要的监测也是必需的^[66-70]。

目前针对岩石高边坡，常用的监测方法主要分为外观法和内观法两类^[71-75]。外观法以监测坡体的表面位移，其中精密大地测量技术手段最为成熟、精度最高，在当前的水电边坡工程中得到了广泛使用。内观法是将仪器埋入边坡内部，进而监测坡体在工程实施过程中的各种物理量变化，反映坡体内部的变形分布和应力变化情况，特别是加固措施（如锚索的轴力）的有效性，内观法观测精度一般较高、规律性非常好，而且易于实现动态化数据采集与处理，因此是当前边坡监测的主要技术手段。

近年来，基于监测资料分析得到岩土力学参数，进行反馈设计的手段应用越来越广泛。利用监测资料分析进行滑坡变形趋势预报，进行反演反馈已经成为工程中不可或缺的手段^[76-83]。

1.3 水电工程岩石高边坡岩石力学问题

纵观我国水电站建设普遍存在高陡岩石边坡稳定问题，归纳起来主要存在如下几个问题。

1. 高地应力

地应力场作为岩体工程建设的一种基本荷载已被工程界广泛重视，一般情况下地应力导致工程问题多发生在深埋条件下，而不是地表地面工程。然而，在深切河谷地区西南水电站工程中，高应力问题在这些浅部岩体中开始体现出来，如小湾、锦屏Ⅰ级水电站左岸导流洞开挖中的强烈破坏等实际上都直接与高应力条件有关。超大型高边坡是典型高地应力岩体工程问题，值得深入研究。

2. 岩性问题

岩性与岩体结构问题是岩石边坡稳定性的控制因素，岩体边坡的破坏模式与稳定性与之息息相关。受地质复杂性的影响，各水电站岩性问题复杂多变，参数确定复杂、各向异性显著，现有的研究工作尚不系统，还有待深入。