

复杂岩质高陡边坡 变形与稳定性研究

——以雅砻江锦屏一级水电站为例

伍法权 祁生文 宋胜武 巩满福/著



科学出版社

www.sciencep.com

TU457/5

2008

复杂岩质高陡边坡变形与稳定性研究

——以雅砻江锦屏一级水电站为例

伍法权 祁生文 宋胜武 巩满福 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书是一部关于复杂岩质高陡边坡变形与稳定性研究的专著。全书以在建的锦屏一级水电站枢纽区复杂超高陡边坡为例,提出了进行复杂岩质高陡边坡变形与稳定性分析的工作要点——五步工作法,其基本思想是:强调从边坡地质结构与地质环境研究入手,通过对勘探平硐等人工和天然露头揭示的大量变形破坏迹象的地质鉴定、力学机制解析以及分布规律的分析,建立边坡变形破坏的成因模式;根据边坡变形破坏模式与变形破坏的程度进行边坡稳定性状态的稳定性地质判断,并逐步形成了边坡稳定性的下限判断思想;提出大规模的高陡岩质边坡稳定性评价计算必须以边坡变形破坏模式为基础,合理选择定量计算方法,并强调稳定性评价必须定性定量结合,以定性的地质判断为基础的思想;打破规范化设计理念,强调以边坡地质结构、变形破坏模式为基础,面向对象、与工程结构相协调的边坡工程处理设计思想,有针对性的提出工程处理设计方案建议。

全书详尽地介绍了锦屏一级水电站枢纽区的工程地质背景,分析了各个边坡的变形和稳定性状况,并提出了针对性的加固措施。同时全书还专辟一章详细地论述了锦屏一级水电站左岸边坡内部发育的罕见地质现象——“深部裂缝”,分析了其分布特点、模式及规律,深刻揭示了这一现象产生的机理。

本书可供水利水电工程、地质工程、土木工程及相关领域的专家、学者、工程师以及研究生参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

复杂岩质高陡边坡变形与稳定性研究:以雅砻江锦屏一级水电站为例 / 伍法权等著. —北京:科学出版社, 2008

ISBN 978-7-03-020394-6

I. 复… II. 伍… III. 水力发电站 - 水力发电工程 - 岩石 - 边坡稳定性 - 研究 - 锦屏县 IV. TV7 TU457

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 195420 号

责任编辑:韩 鹏 李久进 / 责任校对:邹慧卿

责任印制:钱玉芬 / 封面设计:王 浩

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

双青印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2008 年 3 月第 一 版 开本:787 × 1092 1/16

2008 年 3 月第一次印刷 印张:24 插页:2

印数:1—1 500 字数:566 000

定价:90.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈双青〉)

序

近十余年来雅砻江锦屏一级水电站高边坡大范围松动变形一直是工程界和学术界广泛关注的热点问题。坝区左岸高边坡中数百米水平深度的深部裂缝地质成因、大范围松动岩体的工程性质及其可能引起的两岸坝肩岩体不对称变形、大坝下游雾化区松动山体的长期稳定性与加固工程措施等一系列问题直接制约着电站建设的可行性与技术决策。该书的作者紧密配合工程的可行性论证与勘察设计工作,通过系统深入的研究,合理回答了上述关键的工程地质与岩石力学问题,有力地支撑了工程立项和开工建设各阶段的技术工作。

在近期我国西部高山峡谷地区基础设施建设,特别是大型水电工程建设中,高陡岩质边坡的大范围卸荷松动变形已经成为越来越普遍的工程地质问题。边坡岩体卸荷变形范围之大,岩体松动变形之剧烈,已经远远超出人们的经验范围,也远远超出国家和行业现有技术规范所规定的研究范围。对这类卸荷现象的地质成因解释、对卸荷松动岩体工程性质的研究,以及对大规模卸荷岩体边坡的工程处理技术研究,已经逐步形成一个独特的新领域——卸荷岩体力学。该书在这一领域进行了有益探索,并获得了可喜的进展。

作者在一系列水电工程高陡边坡研究的基础上,提出了岩质高陡边坡变形与稳定性评价的五步工作方法,其基本思想是:强调从边坡地质结构与地质环境研究入手;通过对勘探平硐等人工和天然露头所揭示的大量变形破坏迹象的地质鉴定、力学机制解析以及分布规律的分析,建立边坡变形破坏的成因模式;根据边坡变形破坏模式与变形破坏的程度进行边坡稳定性状态的稳定性地质判断,并逐步形成了边坡稳定性的下限判断思想;提出大规模的高陡岩质边坡稳定性评价计算必须以边坡变形破坏模式为基础,合理选择定量计算方法,并强调稳定性评价必须定性与定量结合,以定性的地质判断为基础的思想;打破规范化设计理念,强调以边坡地质结构、变形破坏模式为基础,面向对象、与工程结构相协调的边坡工程处理设计思想,有针对性的提出工程处理设计方案建议。

针对高陡边坡复杂的地质结构和变形破坏模式,该书提出了稳定性评价和工程加固的三个层次思想,即山体稳定性、工程岩体稳定性和随机块体稳定性评价与相应层次的工程加固思路。对于不同层次岩体稳定性问题,评价和加固的视角具有显著的差异性。例如,对于随机块体,可按刚性块体进行稳定性计算或赤平投影分析,而加固工程则以防止块体崩落和滑动破坏为目标;对于工程岩体稳定性,则应以控制性结构面组合切割关系所决定的破坏模式为基础进行稳定性评价计算和加固处理;山体稳定性问题常常是被忽视的问题,其破坏模式也更为复杂,加固技术也不能采用简单锚固技术解决。针对锦屏一级水电站左岸高陡边坡“上软下硬”逆向坡的边坡地质结构特征,作者还提出了保护基座,减少扰动的的设计指导思想。

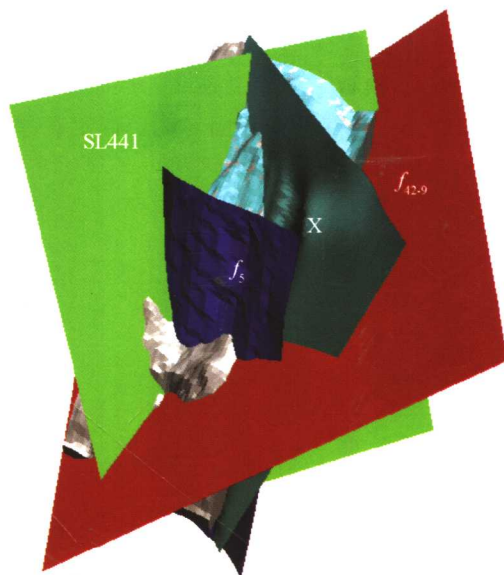
该书是一部以锦屏一级水电站为实例进行高陡岩质边坡工程地质条件和稳定性研究的学术专著,书中不仅提供了丰富的工程实际资料,还系统介绍了边坡稳定性分析的方法和成果,所提出的许多思想方法和工作方法对同类问题的研究也将具有重要的指导作用。

王恩敬

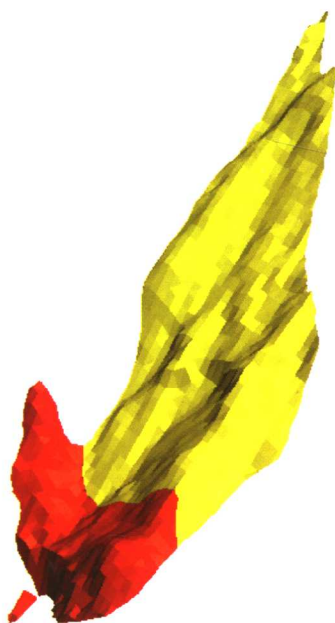
2007 年 10 月



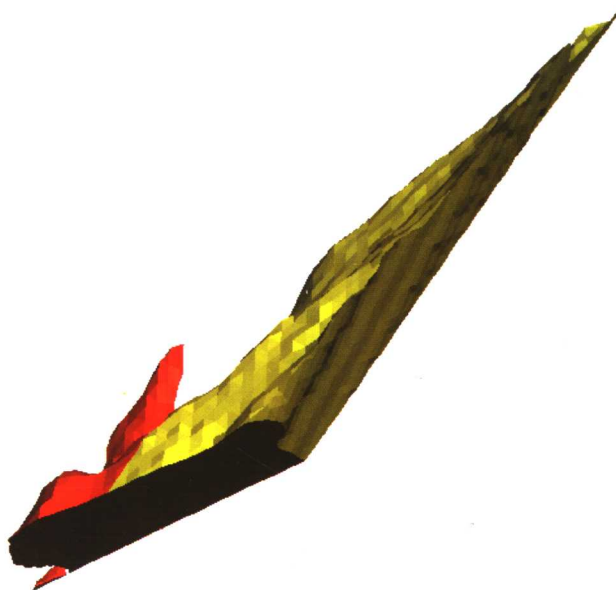
彩图1 左岸缆机平台以及拱肩槽原地形地貌



彩图2 该处各结构面的交切关系

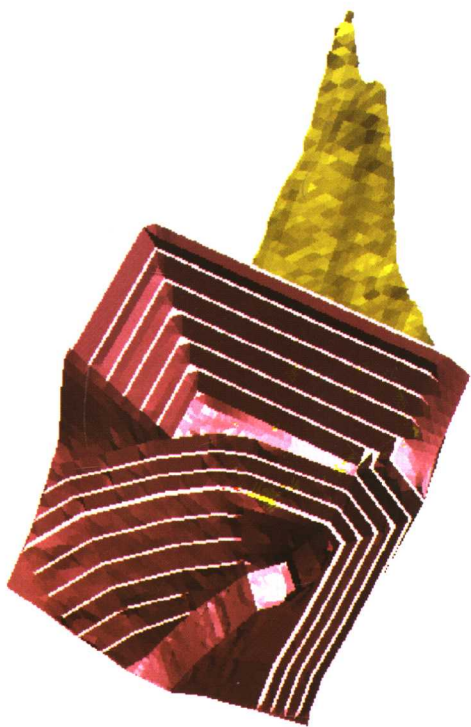


(a) 正视图



(b) 侧视图(从下游向上游看)

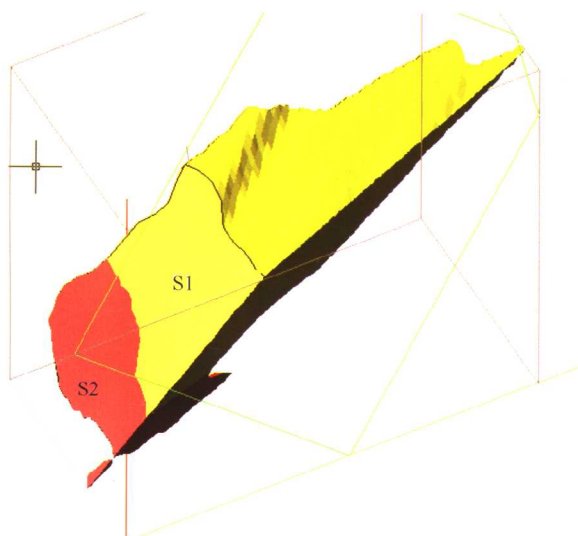
彩图3 由 $f_{42.9}$ 断层、煌斑岩脉X、SL44-1裂隙带构成的块体
其中黄色为 $f_{42.9}$ 断层、SL44-1裂隙带、煌斑岩脉X以及 f_5 切割的大块体，红色为SL44-1裂隙带与 f_5 断层，并假定 $f_{42.9}$ 切穿 f_5 断层形成的小块体



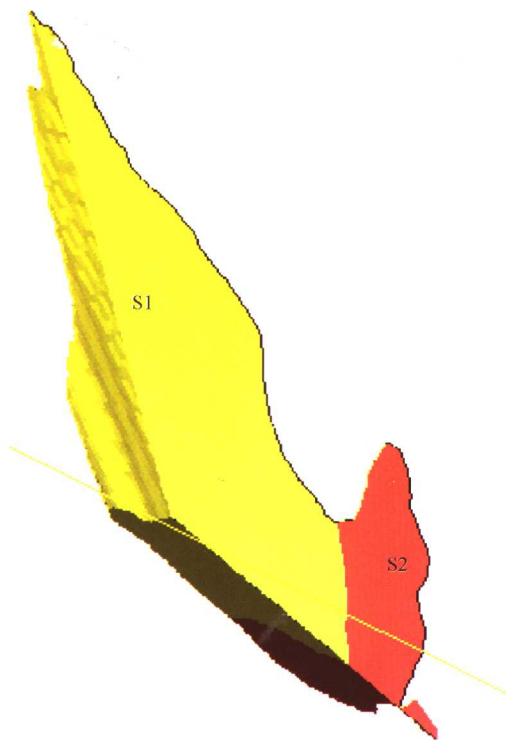
彩图4 开挖轮廓与块体的交切关系



彩图5 开挖后的大小块体



彩图6 滑面 $f_{42.9}$ 的形状及面积



彩图7 滑面SL44-1的形状及面积

目 录

序

绪论	1
0.1 问题的提出	1
0.2 主要研究内容	3
0.3 高陡岩质边坡变形与稳定性分析评价的“五步工作方法”	4
0.4 本书内容	7

第一篇 枢纽区边坡地质环境

第 1 章 坝区基本工程地质条件	11
1.1 区域地质地理背景	11
1.2 坝区基本工程地质条件	15
第 2 章 地应力	34
2.1 构造配套及地应力场演化	34
2.2 坝址区高地应力现象	34
2.3 地应力测试成果分析	36
2.4 坝区岩体应力场的数值模拟	45
第 3 章 岩体结构与岩体工程性质	50
3.1 岩体结构面分级与分类	50
3.2 边坡岩体结构特征及分区	51
3.3 边坡岩体工程性质	52
第 4 章 边坡变形破坏现状	58
4.1 左岸边坡的变形破坏现状	58
4.2 右岸边坡的变形破坏现状	83
4.3 边坡工程地质综合分区	92
第 5 章 边坡深部裂缝成因分析	95
5.1 深部裂缝的空间分布规律	95
5.2 深部裂缝的变形特征	104
5.3 影响深部裂缝分布的因素	110
5.4 深部裂缝形成的力学机制分析	114

第二篇 枢纽区左岸边坡稳定性分析

第 6 章 左岸缆机平台边坡稳定性分析	121
6.1 左岸缆机平台边坡基本工程地质条件	121

6.2	缆机平台开挖边坡变形破坏模式预测	124
6.3	缆机平台稳定性分析	126
第7章	左岸拱肩槽边坡稳定性分析	134
7.1	左岸拱肩槽边坡基本工程地质条件	134
7.2	拱肩槽边坡的变形破坏模式预测	155
7.3	边坡稳定性分析	159
第8章	左岸雾化区边坡稳定性分析	192
8.1	左岸边坡雾化范围	192
8.2	雾化边坡基本工程地质条件	194
8.3	边坡的破坏模式分析	198
8.4	左岸雾化区边坡稳定性评价	200
第9章	左岸导流洞进口边坡稳定性分析	215
9.1	边坡基本工程地质条件	215
9.2	边坡变形破坏模式预测	218
9.3	边坡稳定性分析	220
第10章	左岸导流洞出口边坡稳定性分析	228
10.1	边坡基本工程地质条件	228
10.2	边坡变形破坏模式预测	231
10.3	边坡稳定性评价	233

第三篇 枢纽区右岸边坡稳定性分析

第11章	右岸缆机平台边坡稳定性分析	239
11.1	边坡基本工程地质条件及变形破坏模式分析	239
11.2	边坡稳定性分析	241
第12章	右岸拱肩槽边坡稳定性分析	247
12.1	右岸拱肩槽边坡基本工程地质条件	247
12.2	边坡破坏模式	257
12.3	拱肩槽边坡稳定性评价	259
第13章	右岸导流洞进口及地下厂房进口边坡稳定性分析	301
13.1	边坡基本工程地质条件及破坏模式分析	301
13.2	边坡稳定性分析评价	309
第14章	右岸雾化区边坡及猴子坡边坡稳定性分析	322
14.1	边坡基本工程地质条件	322
14.2	边坡破坏模式预测	326
14.3	边坡稳定性分析	328
第15章	右岸导流洞、尾水洞、泄洪洞出口边坡稳定性分析	339
15.1	边坡基本工程地质条件	339
15.2	边坡破坏模式分析	342

15.3 边坡稳定性分析	347
第 16 章 结束语	360
16.1 主要结论	360
16.2 边坡建议处理措施	361
主要参考文献	364
附录 A 左岸坝头边坡块体稳定性评价	365
A.1 大、小块体及其形状	365
A.2 块体稳定性分析理论	365
A.3 开挖之前块体稳定性计算	366
A.4 开挖之后块体稳定性计算	368
附录 B 预应力锚梁技术	371
B.1 预应力锚梁技术的原理	371
B.2 预应力锚梁的做法和结构	371
B.3 预应力锚梁技术的优点	373
彩图	

绪 论

0.1 问题的提出

锦屏一级水电站位于四川省盐源县与木里藏族自治县交界处、雅砻江中游锦屏大河湾西侧峡谷河段上,地处青藏高原向四川盆地过渡的斜坡地带(图 0-1)。在构造上属青藏高原东部边缘构造带,由鲜水河断裂带、安宁河断裂带、则木河—小江断裂带及金沙江—红河断裂带所围限的川滇 SN 向菱形断块中段东部组成。该区为极强烈切割准山原地貌,区内广泛分布三级夷平面,断续出现多级侵蚀基座阶地。雅砻江深切所形成的相对高差 2000 ~ 3000m 的锦屏山脉,属于典型的高山峡谷地貌。

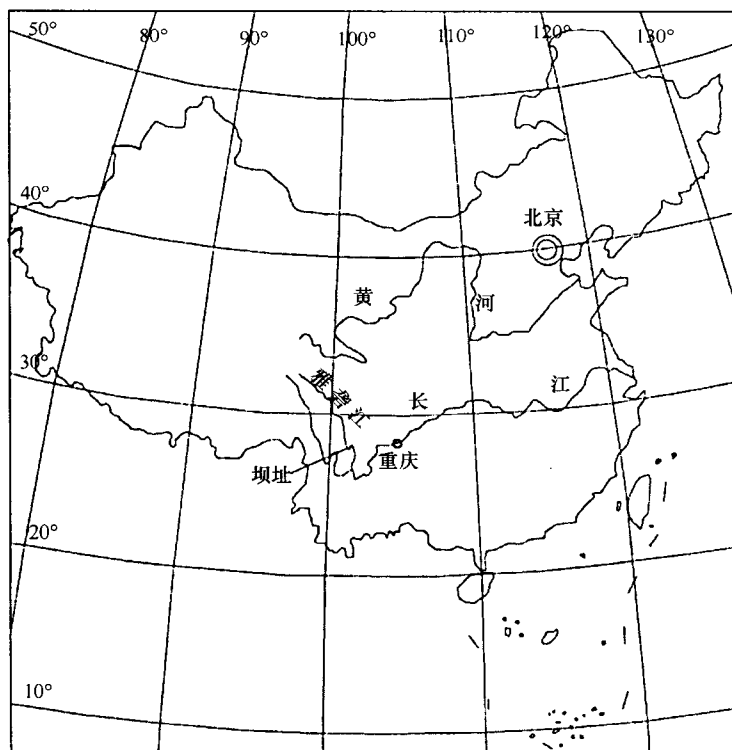


图 0-1 锦屏一级水电站所在地理位置示意图

根据大量的前期工作,通过对水文站坝址、三滩坝址、解放沟坝址和普斯罗沟坝址四个坝址的详细比选,结合多次专题研究及专家咨询结果,最终选定了普斯罗沟坝址。该坝坝型为双曲拱坝,正常蓄水位 1880m,坝顶高程 1885m,是拟建中的世界第一高拱坝。

建成后该坝库容 77.6 亿 m^3 , 调节库容 49.1 亿 m^3 , 正常装机容量 330 万 kW, 保证出力 110.9 万 kW, 年平均发电量 162.9 亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$, 规模超过目前国内最大的水电站——二滩电站。

普斯罗沟坝址的工程地质条件较为复杂。该处河道顺直而狭窄, 两岸谷坡陡峻, 岩壁耸立, 为典型的深切“V”形谷, 单从地貌角度看是很好的拱坝坝址。但是, 该坝址边坡相对高差超过 1500m, 坡度多在 $50^\circ \sim 90^\circ$ 之间, 构造复杂, 岩性复杂多变, 各类物理地质现象十分发育, 内、外动力地质作用极为强烈。由于拱坝坝肩对边坡的稳定性要求极高, 加之工程规模巨大, 因此, 高边坡的变形和稳定性问题作为一个重大工程地质问题, 成为各方关注的焦点。

前期勘探发现, 在普斯罗沟坝址左岸边坡内部发育有大量深部裂缝, 水平分布深度达到 300 余米 (如 PD42 号平硐深 315m 仍能见到拉裂现象), 有些裂缝带宽达几米。这些裂缝在分布深度上大大超出人们工程经验中边坡岩体卸荷带的分布范围, 给裂缝成因的认识提出了新问题。国家电力公司成都勘测设计研究院 (以下简称成勘院) 会同国内有关大专院校和科研院所对这些深裂缝的成因问题开展了深入的勘探、试验和计算分析工作, 获得了较为充分的第一手资料, 为进一步深入分析和认识这一问题, 提供了较好的基础。2000 ~ 2001 年, 中国科学院地质与地球物理研究所和成都理工大学等单位对这一问题进行了研究, 基本上认定普斯罗沟左岸深部裂缝的成因是高陡边坡在自重应力和构造应力的复合应力场作用下的卸荷, 没有超出常规意义下边坡卸荷作用的范畴。

由于在普斯罗沟坝址拟建双曲拱坝, 因此高边坡特别是左岸高边坡的变形和稳定性问题成为决定工程成败的关键性工程地质问题。施工期间工程边坡的稳定性、可能出现的破坏形式、合理的开挖方式及支护方案设计, 水库运营期间工程边坡及雾化区边坡在水力作用下的稳定性问题都是受到特别关注的工程地质问题。对于雾化区边坡, 特别是左岸雾化区边坡 (VI、IV 勘探线及 A 勘探线), 深部裂缝最为发育, 在水库运营期间, 其变形和稳定性问题、渗漏问题将会较为突出, 因此工程地质问题将极为复杂。

2002 ~ 2003 年, 受成勘院的委托, 中国科学院地质与地球物理研究所和成都理工大学共同承担了锦屏一级水电站普斯罗沟坝区边坡稳定性的评价工作, 特别是坝下游雾化区边坡的变形和稳定问题的深入研究工作, 并提交了《锦屏一级水电站高陡边坡变形与稳定性研究报告》。报告深化了对锦屏一级水电站工程地质条件, 特别是深部裂缝成因的认识, 对边坡进行了较为细致的工程地质分区, 详细评价了锦屏一级水电站自然边坡以及雾化区边坡的稳定性, 并对边坡的加固和监测方案提出了必要的建议。

上述两个阶段的成果均已反映在成勘院锦屏一级水电站相应阶段的勘察设计成果之中。

目前, 锦屏一级水电站已经处于前期施工阶段, 边坡问题进一步突出, 相应的工程地质工作需要更进一步深化和细化。2005 年 1 月 7 日, 受成勘院邀请, 中国科学院地质与地球物理研究所参加了成勘院组织的专家小组, 对工程现场进行了为期 3 天的考察, 并就相关的问题进行了详细的讨论, 明确了需要进一步研究的问题。受成勘院的委托, 中

国科学院地质与地球物理研究所和成都理工大学共同并行承担了枢纽区左、右岸边坡的工程地质深化研究工作。

0.2 主要研究内容

三个阶段的工作对与本问题相关的关键技术问题进行了系统的研究。第一阶段工作内容主要包括如下几个方面:

(1) 深部裂缝的力学机制、分布规律和整体成因模式。客观认识与深部裂缝现象相关的各种变形迹象的力学机制,是宏观上分析深部裂缝现象成因模式的微观力学基础;查明各种裂缝迹象在空间的分布规律,是基于已有经验判定深部裂缝现象成因、分析各种影响因素作用规律、推断裂隙岩体结构性质、判定结构面网络连通性和相关的岩体水文地质性质、判断岸坡岩体变形状态和稳定性状态的宏观依据。

深部裂缝现象的整体成因模式,不仅决定了岸坡岩体不同的结构性质、力学性质与变形破坏特征,也反映了岸坡岩体变形的地质与力学环境,以及岸坡未来工作环境,例如,地质构造应力环境、水文地质环境等。

因此,对各种变形迹象的力学机制和分布规律的正确认识,是本项研究工作的基础;而对深部裂缝的整体成因模式的合理认识,则对设计参数分析、工程处理措施的合理选用具有重要的指导意义。

(2) 岩体工程性质与工程参数。岩体工程性质与工程参数是设计工作的基础。由于存在大量的深部裂缝、裂隙卸荷松弛带及其他软弱带,岩体中广泛出现低波速带,亦即低参数带,表现为声波速度和岩体原位载荷试验变形模量偏低。由于这些低参数带多是不规则间隔分布的,所以,如何合理地进行参数分布统计和整体参数分析,提出接近实际的工程评价和设计参数,直接关系到左岸山体作为高拱坝坝肩岩体的可用性、山体加固工程方案的选择和处理费用。

(3) 两岸山体变形不对称性及其工程效应。两岸山体变形不对称性不仅是普斯罗沟坝址目前存在的客观现象,也是电站设计、施工乃至运行期中直接决定坝体安全性的一个最重要的工程地质问题。其对坝体安全的工程效应表现为大坝拱座岩体的不对称变形可能导致坝体变形扭曲而发生拉张结构性破坏。导致这一问题产生的基本原因是山体结构的不对称性,而其工程效应则是由两岸岩体变形性质的差异性引起的。因此,在弄清两岸山体不对称变形机制和变形参数的基础上,合理评价两岸山体变形的差异性和工程效应是至关重要的问题。

(4) 左岸山体稳定性与发展趋势。左岸山体的松弛变形导致了山体的稳定性显著降低,而左岸山体的稳定性将直接或者间接威胁大坝的安全,这成为普斯罗沟坝址及高拱坝方案成立与否的第二个重要工程地质问题。因此,如何客观判断左岸山体的稳定性现状,预测其发展趋势,成为一个必须回答的问题。

(5) 工程处理措施。无论是两岸山体变形不对称性问题,还是左岸山体稳定性问题,鉴于它们对于工程的重要性,都必须给予恰当的工程处理。但是,由于左岸山体变形范围巨大,采样何种工程措施,在什么部位、什么范围内进行处理,才能既满足工程要求,又不造成过分浪费,是必须认真研究的问题。

由此可见,与本课题相关的问题包括三类:左岸山体变形机制模式与岩体参数问题是作为基础和背景的工程地质问题;两岸山体变形不对称性及其工程效应和左岸山体稳定性问题是决定工程选址和直接威胁工程安全的两个重要的工程地质问题;而工程处理措施则是为了避免和缓解山体变形与稳定性问题所必须合理解决的工程技术问题。

第二阶段工作主要对以下几个方面内容进行了深化研究:

(1) 对原有的勘探平硐进行了复核调查,重点研究了左岸边坡各勘探剖面未来各种潜在的破坏控制面组合,并对它们在各种工况下的稳定性进行了验算。

(2) 对新增的勘探平硐采用录像、照相、编录等形式进行了研究,详细调查了两岸雾化区边坡的微地貌形态,确定了可能存在的不稳定坡体边界。

(3) 进行了大量的节理裂隙测量;细致分析了它们在边坡各部位的变化;并考察了边坡各部位在自然条件下稳定性情况和变形破坏形式的差异;对部分层面及构造结构面进行了野外的简易摩擦试验。

(4) 对两岸边坡的稳定性现状进行了详尽的分析和论述,并提出了边坡稳定性分区。

(5) 采用美国 Itasca 公司开发的数值计算软件 FLAC^{3D}对各种工况下边坡的变形与稳定性进行了详尽的数值模拟。

(6) 进一步提出了工程处理措施以及监测布置方案的建议。

承担第三阶段研究工作任务后,中国科学院地质与地球物理研究所立即组织人员进驻工程现场,进行了工程地质深入研究工作。第三阶段工作主要有以下三个方面的研究内容:

(1) 深入研究边坡基本工程地质条件,细化枢纽区各部位边坡岩体的变形破坏模式,对锦屏一级水电站边坡进行工程地质综合分区。

(2) 预测自然边坡和工程边坡未来的变形破坏模式,并就边坡的整体稳定性和工程岩体稳定性分别作出评价。

(3) 分别针对山体稳定性、工程岩体稳定性以及随机块体稳定性提出了加固的措施建议,并就典型地段进行了设计。

0.3 高陡岩质边坡变形与稳定性分析评价的“五步工作方法”

在本项研究工作中,我们逐步形成了下面的高陡岩质边坡变形与稳定性分析评价的“五步工作方法”。

1) 地质条件分析,建立边坡地质模型

高陡岩质边坡变形与稳定性分析评价工作的第一步,是要弄清边坡的工程地质条件:包括地质环境条件、边坡自身的地质条件,以此为基础,确定边坡的地质模型类型。

高陡岩质边坡的地质环境条件主要包括区域地质构造背景和区域地壳活动性状况、区域地应力场演化与地震稳定性、河流演化历史与边坡形成过程、边坡应力场,以及与之相关联的地理、气候因素等。目前边坡应力场分布特征通常受河流演化历史与边坡形成过程的影响,可通过应力量测或数值模拟获得。边坡自身的地质条件主要是指边坡的形

态特征、地层组合、控制性地质结构面及其与边坡的几何关系、边坡水文地质特征等。边坡地质模型是一个主要反映边坡自身地质条件的地质结构模型。

按照《高陡岩质边坡变形与稳定性评价工程地质工作方法》(伍法权,2004),边坡地质结构可以按边坡的介质特征分为两个大类:层状介质边坡和非层状介质边坡。层状介质主要包括沉积岩和负变质岩等成层结构特征较显著的介质;非层状介质则包括此外各种类型的介质。层状介质边坡地质结构可以按边坡介质类型和边坡中控制性地质结构面倾角 α 以及控制性地质结构面与边坡主临空面的倾向夹角 δ 三个要素组合进行分类,如层状陡倾顺向边坡等。对于非层状介质边坡,可直接按介质类型划分,如块状均质边坡等。

锦屏一级水电站左岸边坡地质结构类型可以划为上软(中—薄层砂板岩)下硬(厚层大理岩)的层状中倾角反向边坡,而右岸边坡可以划为均一厚层大理岩中倾角顺向边坡。

2) 裂缝形迹鉴定,确认细观变形机制

高陡边坡中变形裂缝形迹的鉴定,是确认边坡整体变形破坏机制、进行边坡稳定性状态判定的重要基础。但是,变形裂缝迹象的鉴定是一项细致的工作,必须认真地对每个重要裂缝的形态、裂隙面特征、充填胶结物质、两盘相对位移关系及张开和位错量、裂隙两盘伴生破裂形迹等进行细致考查鉴别,以便判定其力学成因。

在裂缝形迹鉴定中,要注意对新形成裂缝和原有裂缝的区分。新形成的裂缝一般具有新鲜断口和一定形式的新迹象,它更能反映近期岩体应力状态。在近地表常温常压条件下新形成的裂缝多数为拉张破裂或剪切破裂,或者拉张—剪切复合成因破裂。但是,我们通常所见的裂缝多为迁就追踪已有的结构面,主要是构造成因的结构面。这种情况下判定结构面相对位移的成因和形成时代常常较为困难。但多数情况下构造裂缝是在围压较高的情况下形成的,多相对紧闭,若裂缝显著张开,则可能有后期作用的成分。若构造裂缝在现时压剪应力作用下发生位错,通常可能造成结构面上的物质压碎成粉状,其物质测年可以较为可靠地确定后期错动时代。这些都可以作为新生裂缝的鉴定依据。

3) 变形规律分析,确定整体变形破坏模式

边坡整体变形破坏模式必然通过大量个体裂缝的变形迹象来体现,而众多的裂缝变形迹象在空间上必然表现出一定的规律性,这种规律性就是所说的边坡变形破坏模式。因此,在对大量的裂缝进行细观的鉴定后,应当进行裂缝变形现象的空间分布与变化规律分析,推断边坡不同部位的变形破坏机制差异和总体规律,由此提出边坡变形破坏模式。

根据静态条件下边坡应力场计算结果,边坡形成过程对边坡应力场的调整将导致如下变化:坡肩部位出现或大或小的“张应力”区(实际上这个张应力区只是一个计算结果,客观上可能表现为松弛变形进行调整;若采用“无张应力”计算分析方法,即可反映出这个调整过程);坡面附近最大主应力平行于坡面倾向线,中间主应力平行于坡面走向线;坡脚附近出现剪应力相对集中区。由此,边坡岩体将可能出现与之一致的变形破坏形迹,如坡肩和表层岩体可能顺边坡倾向方向相对下坐,形成张剪性下错和张裂;而坡脚部

位岩体则可能出现表层压剪下错变形迹象。这些现象都会从远离边坡表面区域向坡内区域逐渐收敛。

在进行边坡变形破坏模式分析时,应当具有“三个层次”的概念,即从山体、工程岩体和表层随机块体三个层次来考虑岩体变形破坏模式。表层随机块体是指边坡表层数十厘米到数米范围内,被各类四级结构面(谷德振,1979)切割出的岩石块体。一般来说,这些块体可能在重力作用下以简单的单滑面、楔形体等形式发生破坏滑动或倾覆、崩塌。工程岩体是指在与工程开挖相对应的尺度范围内,岩体由于受三级及三级以上结构面(谷德振,1979)交切形成的,或以不规则方式交切连通围限的岩体。这类岩体的变形破坏模式大多为块体或层状滑动模式。山体是指与工程相关联的相对较大范围内的岩体。这种山体一般受二级地质结构面(谷德振,1979)或其组合控制发生变形和滑动破坏;或在不存在控制性结构面时,受坡体应力场控制发生较大范围的变形,沿不规则弧形面发生较大范围的滑动破坏。

4) 定性综合判断,判定边坡稳定状态

根据边坡工程地质条件、变形破坏迹象及其分布特征对边坡稳定性状态做出判断,是边坡工程地质工作的一项基本任务。边坡稳定性状态的地质判断,重点在于山体范围和工程岩体范围的判断。

值得指出的是,由于边坡稳定性的计算分析受太多不确定因素的影响,因此地质判断常常可能比看似精确的计算分析来得更可靠,具有更为重要的工程意义。这实际上已成为工程地质人员,乃至一些有经验的工程设计人员的共识。一个经常遇到的现象是:计算分析得到的边坡稳定性系数如果与现场地质判断的稳定性状态相矛盾时,人们很自然地会从计算分析中找问题,如计算模型、边界条件是否合理,参数选取是否恰当,计算方法是否合适,等等。人们总会通过对上述因素进行各种调整,直至计算结果与地质判断基本一致为止。

当然,作出一个接近实际情况的地质判断并不是一件容易的事情。不同的介质,不同的结构,不同的边坡岩体变形形式、破坏前允许变形量是存在较大差异的。一般说来,坚硬厚层的边坡,岩体张裂和错动变形会相对集中成带,各裂缝张开度较大,错动也较明显,各张裂带之间可能存在较为完整连续的岩体;对于层厚较小的相对软弱易碎的地层,岩体变形则分散出现在密集的裂缝中,单个裂缝的变形量一般并不大。目前还很难给出不同介质、不同地质结构、不同规模的边坡的破坏变形量判断标准。但是基于边坡总体变形状况,对边坡稳定性状态做出一个粗略的判断还是可能的,不过这需要相对较为丰富的经验。

作为边坡稳定性地质判断的一个基本准则,我们提出了“下限判断法”的概念。对于一个边坡,不管其变形如何严重,如果它尚未失稳破坏,我们就可以判定它的稳定性状态为 $K > 1$ (K 为稳定性系数),当 K 比1.0大时,表示边坡具有一定稳定性安全裕度。这实际上是不通过计算,在工程地质常识范围内确定了边坡稳定性系数的“下限”。如果通过地质分析或测年等方法确认边坡已经存在了一定的地质时期,则可以认定边坡在这一时期经历了相应于地震安全性研究确定的地震烈度、若干年一遇的最大降雨强度,以及这些因素组合的考验。

但是,仅有下限是远远不够的,我们还需要利用各种逼近手段来缩小边坡稳定性系数的区间。只有当地质判断把边坡稳定性系数框定在一个较小的区间内时,这个判断才是有实际工程意义的。如果边坡变形现象反映出边坡岩土体强烈松动,或者变形现象有不断加剧的趋势,并且可能导致整体破坏,当然应当认为边坡稳定性状态较差,稳定性系数偏向接近于1.0或者上述分析得出的“下限”。当然,如果边坡“安如泰山”,并无变形破坏迹象,则其稳定性状态可能较好。这种情况下,对边坡稳定性系数的区间下限可以做出较高的判断。

在边坡变形量不大,不足以在每个裂隙上表现出明显的变形迹象时,进行适当的宏观变形监测,以便于进行边坡稳定性状态的判断也是十分必要的。

5) 分析计算评价,提出工程处理建议

作为边坡工程地质工作的重要组成部分,也是为工程设计提供重要的参考依据,对边坡的稳定性状态进行计算评价是一个重要的环节。边坡稳定性计算评价的关键内容是提出工程参数和确定计算边界条件及其计算模型。应当说计算参数和计算条件与模型是密切相关的两个部分。许多情况下,虽然计算参数经历过反复论证和专家审查,但对于不同部位特定的计算模型和变化的计算工况,以及边界条件的千变万化,特别是较复杂的计算边界组合,千篇一律地使用参数,也会使计算结果相去甚远。因此,提出参数和结合计算模型合理地使用参数是同等重要的工作。

边坡稳定性计算方法的选取也是一项需要慎重对待的工作。目前工程上比较信得过的方法是极限平衡法,大多数规范也严格规定以这类方法作为基本评价计算方法。但是,极限平衡法也只是一种粗略的方法,而且各种具体的计算方法由于假定条件的差异而使计算结果还存在一定的差异。数值计算方法通常认为是一种辅助的、验证性的方法。事实上数值方法也难以与人们关于稳定性的概念和谐地接轨。

提供工程处理建议,也是工程地质工作者的基本任务之一。目前存在一种倾向,设计人员不信任地质判断,也觉得地质判断不可捉摸,只要求地质人员提供设计参数指标;而地质人员也乐得少承担责任,不愿深入涉及设计工作,满足于提供参数。结果是,尽管双方极力沟通,反复对参数进行讨论推敲,地质工作与设计仍然严重脱节。事实上,许多地质作用是不能用参数概括的,常常出现按照地质参数并计入安全系数进行设计,仍然出现预料不到的问题。反思这些教训,地质人员适度介入设计工作,至少将地质工作带人计算评价、工程处置方案设计中是有必要的。

在工程地质人员对工程处理设计的建议中,最重要的是对处理方案的建议。工程地质人员对处理对象的地质特性、变形破坏模式、稳定性现状和发展趋势更为清楚,更能够有条件有针对性地提出总体处理要求。在提出工程处理方案建议时,工程地质人员应当有岩体变形破坏层次的清晰概念,保证山体稳定性和工程岩体稳定性,并提出相应的岩体变形破坏模式、边界、设计参数和处理措施建议。一般来说,对于表层随机块体的工程处理已经成为常规问题,工程地质人员与设计人员之间的交流较为容易。

0.4 本书内容

本书是对以往三阶段关于锦屏一级水电站枢纽区边坡稳定性研究的系统总结。全