

黄河拉西瓦水电站

高边坡稳定性的系统工程地质研究

黄润秋 张倬元 王士天 著

成都科技大学出版社

ISBN 7-5616-0802-0/TU · 14

定价： 7.35 元

黄河拉西瓦水电站
高边坡稳定性的系统工程地质研究

黄润秋 张倬元 王士天 著

本成果获国家教育委员会霍英东基金会奖励
本项研究获国家自然科学基金资助

成都科技大学出版社
1991年3月

内 容 提 要

本书以经典哲学原理结合现代系统工程学思想,全面系统地阐述了复杂岩体中高陡斜坡稳定性研究的理论、方法体系及技术手段。重点阐述了高边坡岩体结构研究、地应力场分析、岩体力学特性研究、岩体变形破坏机制研究、高边坡岩体稳定性评价和风险分析以及稳定性时空预报等研究的原理与方法。全书共11章,约321千字。

本书适用于地质、能源、水利水电、冶金、国防等部门从事与高边坡稳定有关工作的生产及科研人员参考,亦可作为大专院校工程地质专业高年级学生及研究生的教学参考书。

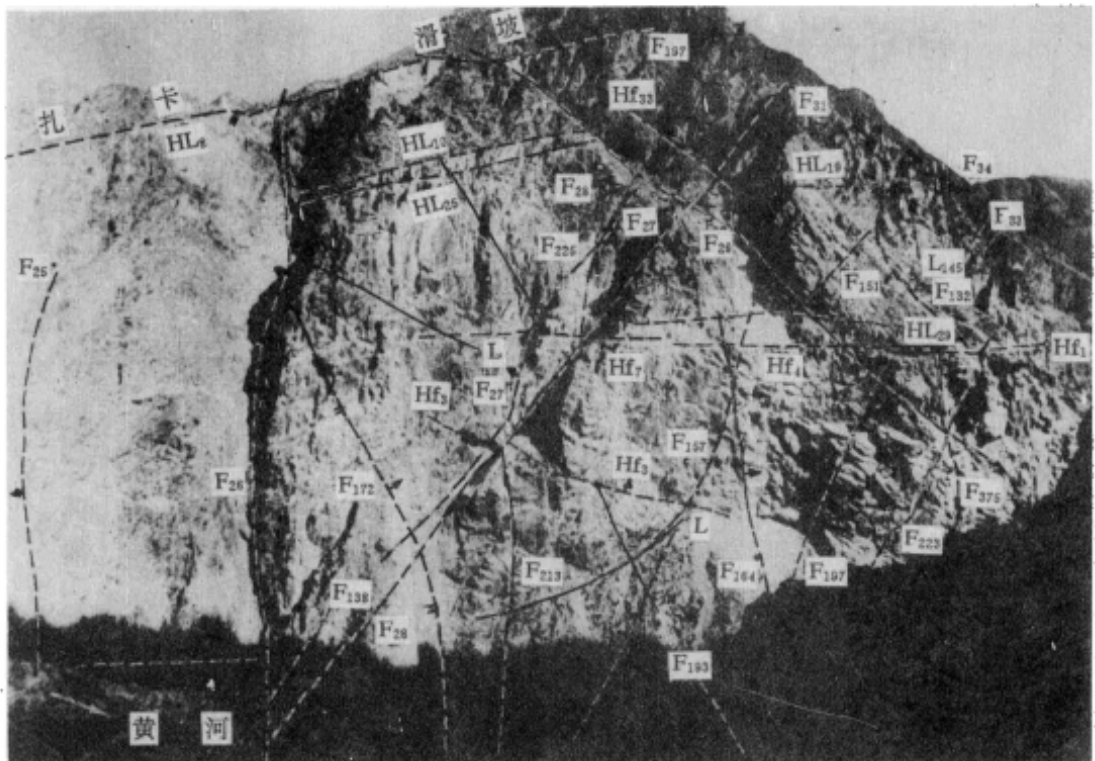
黄河拉西瓦水电站
高边坡稳定性的系统工程地质研究
黄润秋 张倬元 王士天 著
责任编辑 周兴泰 袁顺生

成都科技大学出版社出版发行
成都市前进印刷厂印刷
开本 787×1092 1/16 印张 12.875
1991年3月第1版 1991年3月第1次印刷
印数 1--1000册(精装80册) 字数 321千字
ISBN 7-5616-0802-0/TU·14

定价: 7.35 元



拉西瓦电站石门坝段景观



研究区左岸高边坡全景

目 录

导 言	(1)
第一章 区域地质概况及研究区地质条件.....	(5)
一、研究区自然地理及工程概况.....	(5)
二、区域地质概况.....	(6)
三、研究区地质条件	(11)
第二章 高边坡岩体结构特征的研究	(18)
一、坝区岩体结构形成的历史演变过程	(18)
(一) 岩体原生结构的生成	(18)
(二) 岩体结构的构造改造	(19)
(三) 缓倾角断裂的成因历史	(20)
二、岩体结构特征的定量调查统计及基体结构模型的建立	(21)
(一) 地质结构面的组构分析	(21)
(二) 结构面的岩体力学分级	(25)
(三) I类结构面地质力学特征的调查统计	(25)
(四) III类结构面的调查统计及岩体结构定量化模式的建立	(34)
(五) II类结构面的调查统计	(42)
第三章 高边坡应力场环境条件及高地应力现象的研究	(45)
一、区域构造应力场量级的有限元反演分析	(45)
(一) 地壳一定深度范围内地应力的分布形式	(45)
(二) 区域构造应力场量级的有限元反演原理	(46)
(三) 研究区区域构造应力场量级的反演分析	(50)
二、高边坡应力场的数值模拟研究	(52)
(一) 计算模型的建立	(52)
(二) 应力场模拟成果分析	(53)
三、高边坡应力场的地质力学模型试验研究	(62)
(一) 模型设计	(62)
(二) 测试及成果分析	(63)
四、地应力的 Kaiser 效应试验研究	(67)
(一) 花岗岩的 Kaiser 效应特征及地应力测试	(67)
(二) 岩石 Kaiser 效应微观机制的研究	(72)
五、岩芯饼裂机制研究	(74)
(一) 岩芯饼裂现象	(74)
(二) 饼裂发生的岩体力学条件及坝区岩饼特征	(75)
(三) 岩芯饼裂机制的有限元分析	(79)
(四) 岩芯饼裂产生的应力场条件有限元分析	(80)
(五) 岩芯饼裂机制的扫描电镜研究	(83)

第四章 岩体力学特性的试验研究	(85)
一、岩石强度及风化分带	(85)
(一) 基本试验情况	(85)
(二) 岩体的风化分带	(86)
二、高地应力对岩石强度的影响	(88)
(一) 岩石强度各向异性的点荷载试验	(88)
(二) 岩石强度各向异性产生的机制	(89)
三、结构面力学特性的试验研究	(92)
(一) 研究途径与方法	(92)
(二) 弱面物质物理力学性质测试	(92)
(三) 结构面典型物质单元抗剪强度的试验研究	(93)
(四) 结构面抗剪强度参数的确定	(95)
四、软弱结构面流变特性及长期强度的试验研究	(98)
(一) 试验条件及方法	(98)
(二) 资料整理及弱面物质流变参数的确定	(99)
(三) 弱面物质长期强度参数的确定	(102)
第五章 高边坡地震动力学环境条件的研究	(104)
一、区域岩石圈动力学环境条件分析	(104)
(一) 区域岩石圈动力学环境条件的基本特征	(104)
(二) 构造稳定性分析及场地基本地震烈度	(105)
二、地震滑坡分析	(107)
(一) 古滑坡的因素敏感性分析	(107)
(二) 复杂滑面的 Newmark 分析	(108)
(三) 场地烈度的古滑坡分析评价	(110)
三、高边坡的地震动力反应分析	(111)
(一) 数学原理及计算模型	(111)
(二) 动力反应计算及成果分析	(113)
第六章 边坡岩体变形破坏的现象岩体力学研究	(116)
一、边坡岩体结构的表生改造	(116)
(一) 河谷下部地貌单元岩体结构的表生改造	(116)
(二) 河谷上部地貌单元岩体结构的表生改造	(119)
(三) 表生改造对岩体工程地质特性的影响	(122)
二、岩体时效变形的基本地质力学模式	(122)
三、变形的复合——Ⅱ号变形体变形机制的工程地质分析	(130)
四、滑动破坏及其机制分析	(132)
五、高边坡岩体变形破坏规律	(134)
第七章 大型滑坡发生机制分析	(136)
一、扎卡滑坡发生机制及其运动学过程	(136)
(一) 滑坡发育特征及高速滑动证据	(136)

(二) 高速滑动的动力学机制	(138)
二、泥鳅滑坡形成机制分析	(141)
(一) 滑区地貌及地质结构特征	(141)
(二) 典型滑坡现象分析	(142)
(三) 滑坡形成机制分析	(146)
(四) 滑坡形成机制的数学模拟	(147)
第八章 I号变形体破裂机制的数值和物理模拟研究	(150)
一、时效变形破裂机制的流变有限元分析	(150)
(一) 边坡流变有限元分析的基本原理	(150)
(二) 计算模型及成果分析	(153)
二、I号变形体变形破坏机制的物理模拟研究	(156)
(一) 模型设计与制作	(156)
(二) 试验及成果分析	(157)
第九章 高边坡岩体稳定性计算及评价	(160)
一、P3SA-1 岩坡稳定性计算机程序系统	(160)
二、边坡岩体稳定性的整体计算机扫描分析	(161)
三、坝区各部份工程岩体稳定性计算分析	(163)
(一) 结构体非常条件下稳定性分析及因素敏感性分析	(163)
(二) I号变形体稳定性分析	(166)
(三) 古滑坡残体稳定性分析	(170)
四、岩体滑动破坏概率分析	(171)
五、高边坡稳定性评价	(174)
第十章 高边坡岩体稳定性的空间预测	(176)
一、地质-数学模型的建立	(176)
二、预测模型的建立	(177)
三、模型的线性和模糊扩充	(180)
四、坝区及邻近岩体稳定性空间预测	(181)
第十一章 岩体失稳时间预报的“黄金分割数”法	(184)
一、岩体失稳前系统的非线性阶段及伴随的非稳态现象	(184)
二、岩体失稳前不同系统状态历时的关系	(186)
(一) 岩体失稳前系统状态历时的确定	(186)
(二) 不同系统状态历时的关系	(189)
三、讨论	(191)
致谢	(193)
参考文献	(194)

导 言

斜坡是人类生存及工程活动最常见最基本的自然地质环境之一。随着我国现代化建设事业的迅速发展,政府部门将在西南西北主要江河上修建大量的大、中型水利水电工程,以开发这些地区丰富的水能资源。而这些地区水能开发点的一些共同特征是:挽近期以来,地壳长期隆起抬升,河流急剧下切形成高山深谷。岸坡高度小则百余米,大则达 700~1000 余米,加之现代构造活动强烈,自然地质作用发育,因此,斜坡环境多数较为恶劣。而这些地区拟建的水电站工程,坝高正在向 200m 以上发展,电站装机容量正从数十万向数百万千瓦过渡,水库干流长度也将达数十~数百公里。这样的大型工程对斜坡环境质量的要求是不言而喻的。而要在前述的环境中修建这样的工程,无疑,斜坡稳定性工程地质问题将会对工程修建的可行性决策起到重要的控制作用,并在很大程度上影响着工程建设的投资及运营效益。因此,80 年代以来,人们清醒的认识必须加强复杂岩体中高陡斜坡稳定性的理论研究;必须加强重大工程边坡稳定性的应用研究。

人们对斜坡稳定性研究最早是从滑坡现象开始的,早期的工作是把滑坡作为一种地貌现象加以观察描述,是地貌学或普通地质学研究的对象之一。上世纪末及本世纪初,伴随发达国家近代工业革命而兴起的大规模土工建设,诱发了大量滑坡,并造成很大损失,这时,人们才把斜坡失稳现象提高到与人类工程活动有关的灾害地质过程的高度加以研究。早期对斜坡稳定性的研究主要是从两方面进行的:一是借用土力学中极限平衡的概念,根据三个静力平衡条件计算斜坡极限平衡状态下的总稳定性(Fellenius, Peterson, 1916; Karl Terzaghi, 1926; Bishop, 1955);二是从斜坡所处的地质条件及滑坡现象上对滑坡发生的环境及机制进行分析,但基本上都是定性单因素的。50 年代,我国许多工程地质工作者在滑坡研究中采用了苏联的“地质历史分析”方法,但该方法偏重于定性描述和分析。60 年代初的瓦依昂滑坡及 60 年代中期以来我国一些水电工程和露采矿山遇到的大型滑坡和岩体失稳事件,首先使工程地质学家们认识到斜坡是一个时效变形体,斜坡的演变是一个时效过程或累进性破坏过程,每一类斜坡都有其特定的时效变形形式或时效变形过程(L. Muller, 1963, 1965; 张倬元、王思敬, 1970s, K. Y. LO, 1980s),这些过程所包含的力学机制只有用近代岩石力学理论才能解释,从而使有关斜坡稳定性研究进入了模式机制研究或内部作用过程研究的新阶段。这一阶段,在知识结构上的一个重大变化就是要求工程地质工作者熟练掌握近代岩石力学理论。进入 80 年代以来,工程地质学及边坡科学研究进入了蓬勃发展的新时期。一方面随着计算理论和计算机科学的长足进展,数值模拟技术已广泛应用于斜坡稳定性研究。上述模式机制的研究不再停留在现象的定性分析阶段,而是采用数值模拟(或物理模拟)手段定量或半定量地再现边坡变形破坏过程和内部机制作用过程,从整体上、理性上认识斜坡变形破坏机制,认识斜坡稳定性的发展变化。与此同时,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。显然,这一新阶段的知识结构为:现代工程地质学=传统工程地质学+经典岩石力学+现代数学力学。除手段和理论的更新外,社会实践给当今边坡科学研究提出的课题不论在

数量上或是在复杂程度上也都达到了前所未有的水平。除了前已指出的大型水电站工程的修建外,据报道,到本世纪末国内露采矿山边坡将高达 500—600m,国外将出现 700m 以上的人工边坡。更值得指出的是,进入 80 年代以来,我国大规模滑坡活动进入了一个新的活跃期,相继发生了湖北盐池河岩崩(80 年 6 月),长江鸡扒子滑坡(82 年 7 月),甘肃洒勒山滑坡(83 年 3 月),三峡新滩滑坡(85 年 7 月)及新近发生在四川巫溪县境内的两起岩崩事件(87 年 9 月,88 年 1 月)。共计死亡人数 550 余人,财产损失达数千万元,并造成上亿元的事后处理费,引起了有关产业部门的高度重视。这一社会需要是推动 80 年代我国边坡科学研究百花齐放,百家争鸣新局面出现的又一主要动力。据作者对 1979~1987 年国内公开及内部发行的 60 余种刊物的检索,这期间它们共刊载工程地质文献 1239 篇,其中有关斜坡稳定性研究的就有 224 篇,占 18.08%,位于各工程地质问题研究之首。1985~1987 年国外数十种刊物计发表工程地质文献 2694 篇,其中斜坡稳定性研究的约占 7%,仅次于废料处置、环境工程地质及区域稳定工程地质而位居第四。

虽然当前边坡稳定科学研究已具有相当的规模和水平,但不少有识之士还不得不指出:“当前我们对这一问题研究还不够系统、深入”。这主要表现在:第一,忽视边坡所赋存的地质环境条件的研究;第二,专题性研究多,系统性研究少,尤其是复杂岩体中高陡边坡稳定性研究国内外工作均为少见;第三,滑坡研究多,未失稳边坡研究少,作者上述统计的 224 篇关于斜坡稳定性研究文献中,仅有 21% 涉及未失稳边坡稳定性评价,另有 5% 涉及时空预报问题,两者仅占总文献量的 26%;第四,对一些大型复杂工程岩体失稳破坏的内部作用过程还缺乏更深入的认识,因而,稳定性评价及时空预报决策水平还比较低。正是在这样的形势下,作者们于 80 年代中期,结合黄河上游拉西瓦大型水电站工程高陡斜坡稳定性评价的科学研究实践,对复杂岩体中高边坡稳定性评价这一重大课题开展了系统深入的理论研究和实际应用探讨。

拟建的黄河拉西瓦水电站位于青海省贵德县境内,龙羊峡峡谷出口段,上距即将竣工的龙羊峡电站 35km。大坝设计坝型为双曲薄拱坝,最大坝高 250m,水库正常蓄水位 2452m,总库容 $1056 \times 10^6 \text{m}^3$,电站总装机容量为 $372 \times 10^4 \text{kW}$,为黄河上游拟建的最大的梯级水力发电枢纽工程。在区域上,坝区位于受 NNW 向区域性大断裂夹持的瓦里贡山隆起带西缘,坝区自印支期以来,经历了多期构造运动,形成了多组不同方向、不同级次规模的地质结构面。尤其是 Q_2 末期以来,黄河深切成谷,形成高达 700 余米,平均坡度为 50° 以上的花岗岩高陡斜坡,加上一定量级的区域构造应力场作用,不仅使斜坡岩体经历了较强烈的表生改造作用,导致斜坡岩体结构更趋复杂化,而且在谷坡下部形成了高地应力区。这些条件与该区所处的特定地震地质环境,就构成了该斜坡岩体复杂的岩体力学环境条件。在这样的条件下,修建高坝大水库,就必然会产生一系列与工程建设密切相关亟待研究解决的工程地质问题,高边坡稳定性问题就是其中之一。

对于复杂岩体力学环境条件下高陡边坡稳定性研究这样复杂的课题,必须有正确的方法论作为科学研究及科学思维的指导,当今“三大论”方兴未艾,但并不排斥经典思维科学的地位。这里作者提出以经典的哲学原理结合现代系统工程学思想作为本文所进行研究工作的总体方法论。

高边坡稳定性研究中的哲学原理体现在以下几方面:

(1) 边坡变形破坏过程的唯物主义历史观 与自然界所有事物一样,边坡自其诞生,

就预示着有其发展、消亡过程。边坡以变形表明其发展,以失稳破坏宣告其消亡,代之而起的是新的边坡,新一轮变形破坏。边坡就是以这样的方式参与岩石圈表层地质作用过程和地貌改造过程的。应用这一原理,就是要求我们在边坡变形破坏过程的分析中,坚持“地质历史分析”,坚持“将今论古”,理清发展线索,掌握变化规律,从而达到预知未来的目的。

(2) 变形破坏过程是一个量变到质变过程 绝大多数边坡失稳事件的发生决非偶然,而是变形量长期积累导致最终质变发生的必然结果。从统计物理学角度,量变过程是系统的稳态变化,线性发展过程;质变过程是系统的非线性、非稳态过程。深刻理解这两个相关过程,抓住过程变化的临界点,可以对滑坡发生的时间预报提出合理的途径。由于量变质变规律是事物发展的共性,因此,这一原则几乎适用于所有灾害事件(如地震等)的预测预报。

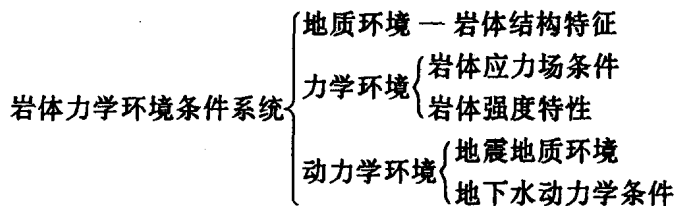
(3) 变形破坏过程是岩体应力状态与岩体强度之间矛盾斗争的过程 当岩体的强度适应不了其所处的应力状态,岩体就以变形或位移的方式调整掉超载应力,以求达到新的平衡,其结果就表现为岩体的变形或破坏。因此,应力状态与岩体强度之间的矛盾斗争是贯穿整个变形破坏演变过程的主要矛盾,是后者的内涵。所以,边坡稳定性研究过程中要抓住这一主要矛盾,深入研究边坡应力场的形成及演变过程。

(4) 斜坡变形破坏的发生既有渐变也有突变或灾变 斜坡依靠其自身动力完成其演化,这是一个渐变过程。在边坡变形破坏演变过程中,渐变是绝对的,但也有不少斜坡在诸如地震、高强度暴雨等突发因素的作用下其演化过程或被加速或被提前终止,这就是突变或灾变,它们在整个斜坡演进过程中是相对的。突变或灾变因素实际上反映了斜坡的外动力学环境。因此,客观地分析研究区灾(突)变因素的类型及强度,对机制研究及稳定性预测预报都有重要意义。

经典思维科学对指导认识事物的某些侧面不无裨益,但复杂岩体力学环境条件下的高陡斜坡稳定性研究涉及面之广,程度之复杂,可谓是一个系统工程问题。如何把各个侧面的研究有机的结合起来,为实现稳定性评价及预测这一系统总目标服务,则是经典思维科学所难于解决的。而现代科学的主导思维方法——“系统分析方法”,则无疑是解决这一问题的最好途径。据“系统分析方法”的基本思想,作者认为边坡稳定性研究应遵循以下系统工程地质学分析原理:

(1) 研究系统的总体目标在于稳定性评价及时空预测预报决策,系统目标的实现则取决于理清斜坡变形破坏过程的整体发展线索,也就是变形破坏力学机制及其演进。而后者则受控于斜坡所赋存的地质、力学环境及动力学环境——统称之为岩体力学环境条件。因此,高陡边坡稳定性研究系统目标的实现应遵循这样的途径,即:岩体力学环境条件的研究→变形破坏机制的研究→稳定性计算分析→目标实现。

(2) 岩体力学环境条件系统本身又是由若干相互制约,相互影响的要素(或子系统)构成的复杂系统,该系统的构成如下:

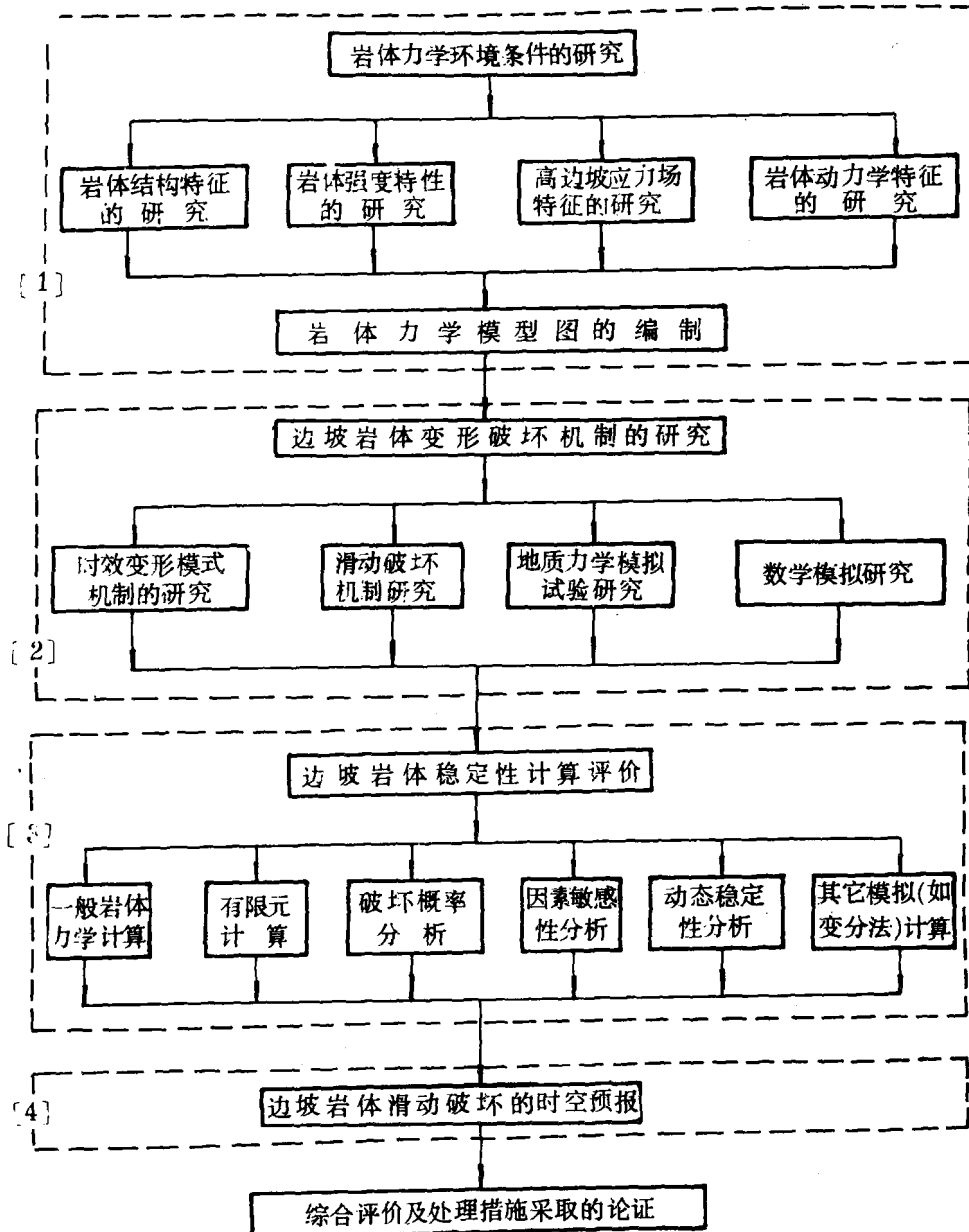


因此,稳定性研究系统总目标的实现,必须首先从研究分析岩体力学环境条件系统中各

要素或子系统以及它们的相互关系入手。

综上所述,我们提出了一个复杂岩体力学环境条件下高陡斜坡稳定性研究的途径与方法图示(见下图),以此作为本课题研究的总体思路。本书第2、3、4、5章阐述的是有关高边坡岩体力学环境条件的研究;第6、7、8章主要阐述对变形破坏机制的研究;第9、10、11章主要阐述高边坡岩体稳定性的评价及时空预测预报分析。

复杂岩体力学环境条件下高陡斜坡稳定性研究的技术途径示意如下:



第一章 区域地质概况及研究区地质条件

一、研究区自然地理及工程概况

拟建的黄河拉西瓦水电站位于青海省贵德县与贵南县交界处,龙羊峡峡谷的出口段,上距龙羊峡电站河道距离 32.8km,距贵德县城 26km,距西宁市 132km,均有公路相通(图 1-1),交通尚方便。

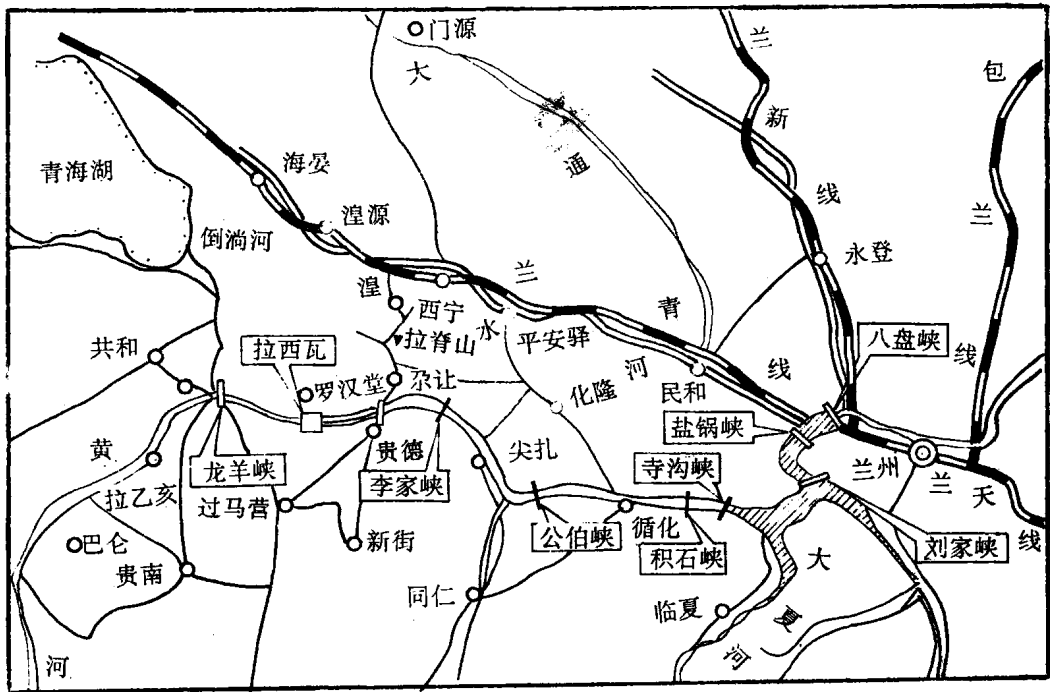


图 1-1 研究区交通位置图

拉西瓦水电站是黄河上游干流龙羊峡至青铜峡河段规划拟建的第二个梯级电站。也是整个黄河流域最大的一个梯级开发。电站设计正常高蓄水位 2452m,与龙羊峡电站尾水相接,总库容 $1056 \times 10^6 \text{m}^3$;最大坝高 250m,总装机容量 $372 \times 10^4 \text{kW}$,多年平均发电量 97.4 亿度。枢纽布置可行性研究阶段推荐采用混凝土双曲拱坝右岸全地下式厂房方案。电站目前正处于初步设计阶段。

研究区处于青藏高原东部,具有显著的大陆性气候特征,冬寒夏凉,干燥少雨,太阳辐射强,日温差大。据贵德县气象站的资料,全年平均气温为 7.2°C ,绝对最高气温 34°C ,最低气温 -21°C 。年平均降雨量 255.8mm,蒸发量 2096mm。降雨多集中在 7~9 月份,冬春两季干燥多风,风速一般 2.2m/s,最大可达 18m/s。本区居民以藏、汉、回族为主,多集中居住在坝区下游平均海拔 2200~2300m 的贵德川地,以农业为主兼营牧业。川地盛产小麦、蚕豆、土

豆等,是青海省的主要产粮区之一,海拔 2600m 以上的广大山区和台地,荒无人烟,极少垦植,主要从事牧业生产。黄河在坝址以上流域面积 132160km²,多年平均流量为 650m³/s,实测最大流量 5430m³/s,洪水多发生在 7~9 月。峡谷段河道平均比降为 6.7‰,从龙羊峡至拉西瓦河段内集中落差 235m。

二、区域地质概况

研究区位于青藏断块北部边缘地段,贵德新生代断陷盆地与瓦里贡山—岗察寺新生代隆起带的交会部位。区域地层出露较为简单,以三叠系变质岩、印支期花岗岩及新生代陆相沉积层为主。构造形迹以断裂为主,褶皱不甚发育。断裂构造总体呈 NNW 和 NWW 两个方向展布。

(一) 地层岩性

按其时代由老到新分述如下:

1. 三叠系下统龙羊峡群(T₁ln)

该套地层区内可分为上、下两个亚群。下亚群(T₁ln₁)为一套浅海相碎屑岩建造,由于受后期构造变动和岩浆作用的影响,发生了一定程度的变质作用,表现出浅变质岩特征。岩性为灰~深灰色变质砂岩、绿帘石化灰岩夹薄层状板岩、页岩。主要分布在龙羊峡谷的进出口、差其卡沟~曲合棱沟、热水沟~东龙沟一带。该套地层的上亚群(T₁ln₂)为一套灰绿色中酸性熔岩和火山碎屑岩,以安山岩和安山质晶屑凝灰岩为主,分布在曲乃亥河段。

2. 印支期侵入岩(γ₅)

区内印支期侵入岩体主要出露于黄河北岸当家寺一带,并构成瓦里贡山主体。其次沿龙羊峡谷一带也有规模相对较小的岩体零星出露,它们多呈岩基或岩株状侵入于下三叠统变质岩之中。其岩性主要为中—粗粒花岗岩和花岗闪长岩,局部地区显示出似斑状结构和细粒结构特征。在岩体与围岩的接触带上广泛发生程度不同的围岩蚀变作用。该岩体的另一明显特征在于岩体中发育有纵横交错的花岗细晶岩和石英岩脉。中科院进行的这一地区花岗岩同位素年龄测定结果为 187~214Ma,属中、晚三叠纪。

3. 第三系上新统(N₂)贵德组

为一套湖相沉积。区内仅出露于曲乃亥盆地和贵德盆地,厚度 200~600m,与下伏三叠系地层(T₁)呈角度不整合接触关系。按其岩性特征可将其分为三段:下段为暗桔红色、紫红色、桔黄色中厚层泥岩和中—粗砂岩;中部为紫红色、土黄色、灰色泥岩与中—细砂岩互层,并夹有数层灰绿色泥岩条带;上部为浅土黄色、灰色泥岩和粉—细砂岩互层。以上各层均表现出半固结状态特征。

4. 第四系

区内第四系地层及堆积物颇为发育,其成因类型主要有河湖相、冲积、洪积以及重力堆积等,依其时代顺序分述如下:

(1) 下更新统(Q₁)河湖相沉积层 此套地层广泛分布于共和、贵德盆地、瓦里贡山山顶等地。在共和、曲乃亥和贵德盆地与下伏 N₂ 地层呈整合接触关系,然而在瓦里贡山和拉西瓦泥鳅山顶部等处却以角度不整合关系直接超覆于 T₁ 变质砂岩和印支期花岗岩之上。据龙羊峡库区出露的该套地层完整剖面,自下而上可分为七层。I、II 层为棕红色、灰黄色及杂

色粘土,底部夹有薄层粗砂;Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ层为黄色、红褐色、灰色粘土夹灰黄色、灰绿色亚砂土及砂土条带;Ⅵ、Ⅶ层为淡黄色、深灰色亚砂土、砂土及粉砂。上述七层总厚度为769m。

(2) 上更新统(Q₃)河流阶地堆积 在贵德盆地和共和盆地广泛发育的黄河阶地中,根据区测资料,四级及其及以上各级阶地均属于Q₃时期的堆积物。这些阶地堆积物具有明显的二元结构特征,其下部为分选、磨圆均较好的灰色砂卵砾石层,上部为灰色粉砂及亚砂土。阶地类型均属基座阶地,其基座一般为Q₁湖相地层,局部地段为T₁变质砂岩和印支期花岗岩。

(3) 全新统(Q₄) 按其成因可分为:a)阶地堆积:包括黄河及其支流1~3级阶地和漫滩堆积;b)洪积物,构成山前沟口洪积扇及冲出锥。

(二) 地质构造

区域上地质构造以断裂发育为主要特征,据走向可将其分为NNW,NWW及NE~NEE三组,其中以前两组最为发育,如图1-2所示。

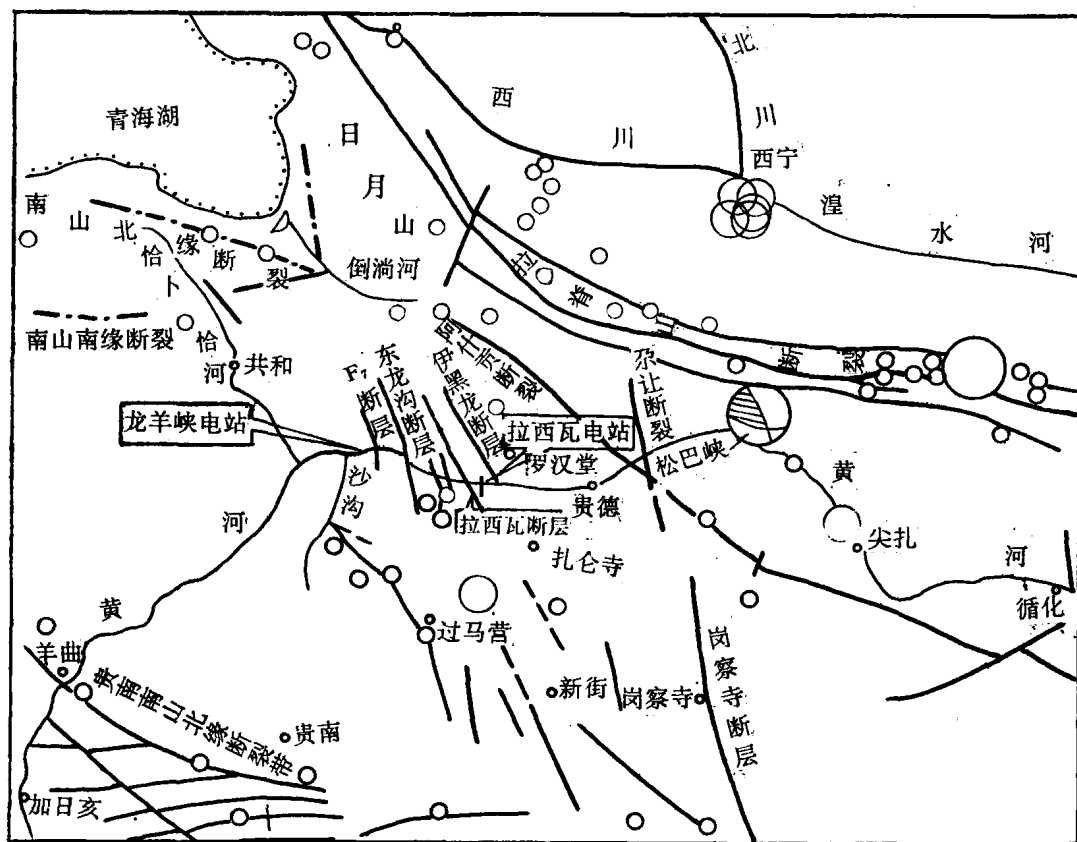


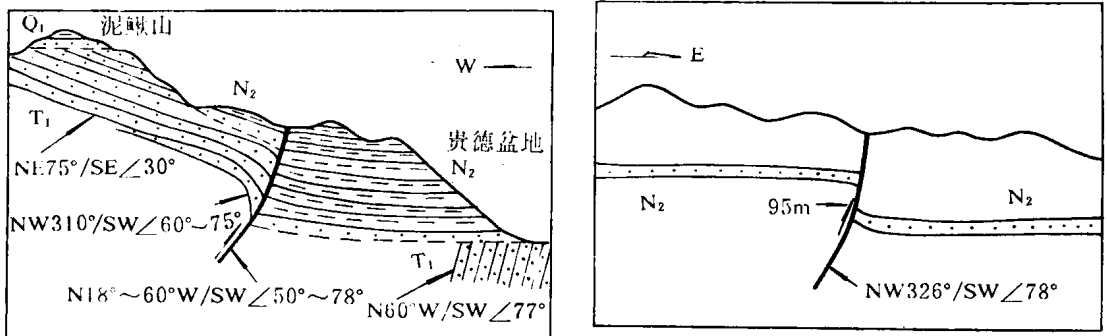
图1-2 拉西瓦电站区域构造纲要及地震分布图
(据文献[5],略有删减)

1. 北北西组

该组断裂走向北西330°~350°,以倾向南西为主,倾角一般60°~75°,是河西系的主要

构造成份。此组断裂尤以龙羊峡谷段最为发育(原称龙羊峡断裂组),它们明显地控制着这一地区的地貌和新生代沉积的发育(详见新构造运动一节),并使两盘基岩顶面的高差达 200~500m 不等,且均表现为上盘高于下盘,说明其挽近时期的活动以强烈的逆断为主要特征。另外,在这组断裂带内最新断面上普遍见有清晰的近水平顺扭擦痕,表明晚期有过顺扭走滑活动。根据它们所错动的地层判断,此组断裂的逆断活动至少延续于整个 $N_2 \sim Q_1$ 期间,而顺扭走滑活动发生的时间则更晚一些。研究区正好位于这组断裂东侧的伊黑龙断层和西侧的拉西瓦断层所夹持的断块隆起内。现将这两条断层的特征分述如下:

(1) 伊黑龙断层(F_1) 位于研究区下游约 2.5km 的龙羊峡谷出口处。总体产状 NW330°/SW \angle 60°~70°,为控制贵德盆地西缘的边界断层,全长约 20~25km。该断层在峡谷出口处的泥鳅山附近破碎带宽 100~200m,由角砾岩、片状岩、糜棱岩及高炭化断层泥物质组成;下三叠统(T_1)地层逆冲于上新统(N_2)之上,两盘地层均有牵引褶曲现象(图 1-3a)。逆断错距达 480m,从而控制了断层两侧的地貌和 N_2 、 Q_1 地层的沉积。在罗汉堂西北见此断层逆冲错断 N_2 地层,断距 95m(图 1-3b)。上述事实表明,该断裂早期(Q_1 以前)表现为多次的强烈逆冲活动;挽近以来,从断面上的水平擦痕可以判断转为顺扭走滑活动。在泥鳅山东坡及尼那对岸的沙果沟,该断层上覆的五级阶地均完好,探槽揭露也证明砾石层无构造破坏形迹。据此可判断自五级阶地形成以来该断层无强烈活动。据北京地壳应力研究所的热释光测年资料,五级阶地砾石层的年龄为 9.3 ± 0.5 万年。



(a)泥鳅山剖面

(b)罗汉堂剖面

图 1-3 伊黑龙断层剖面图

(2) 拉西瓦断层(F_2) 该断层位于研究区上游约 1.5km 处。主断面总体产状为 NW330°~340°/NE \angle 40°~55°,断层破碎带宽 30~50m 不等,沿拉西瓦沟东侧延伸长约 20km。它作为泥鳅山隆起和曲乃亥凹陷的分界线,明显地控制着两侧地貌及新生代地层的发育分布。有资料表明^[5],新生代以来此断层的新活动性仍可分为两期:前期逆断活动的强度较之伊黑龙断层为弱,断层两盘基岩顶面高差仅有 200m(图 1-4a)。后期顺扭活动的证据有二:一是沿断面到处可见清晰的近水平擦痕,其产状一般为 SW \angle 24°;另在该断层破碎带上复的 Q_1 地层中发育有一个与主干断层斜交,总体走向近南北的地堑式正断层系(图 1-4b),它们显然是其下伏主干断层顺扭走滑活动所导致。根据其产状、断距以及与下伏主干断层走向间的关系进行计算,垂直于该次级正断层组的水平拉张量为 2.6m,主干断层的顺

扭走滑位移量约 5.64m。

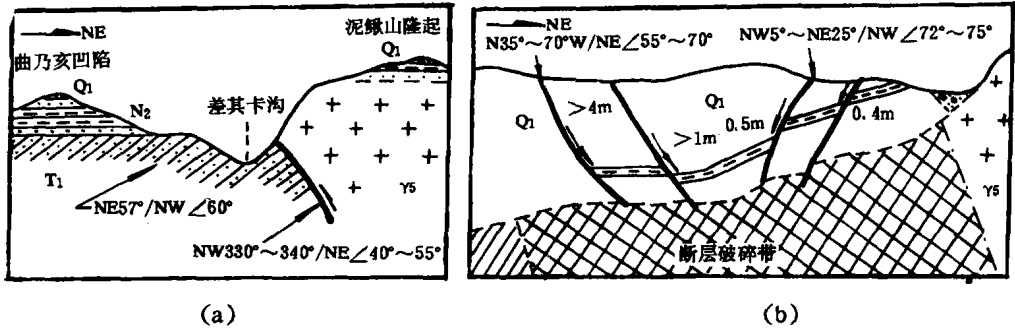


图 1-4 拉西瓦断层剖面示意图

2. 北西西组

区域上北西西向构造主要由所谓青藏“歹”字型外围构造成份和祁吕系前弧西翼构造成份组成。总体呈北西 $290^{\circ}\sim 300^{\circ}$ 方向展布,包括一系列北西西向的压性、压扭性断裂和褶皱(以断裂为主),主要断裂构造分述如下:

(1) 拉脊山断裂带 该断裂带东起民和南侧,向西呈近东西向延伸至湟源南侧后转为 NWW 向沿青海湖东侧延伸,长达数百公里,北距研究区约 $35\sim 45\text{km}$ 。断裂西段可见前震旦系地层冲覆于第三系地层之上,是一条具有多期活动性的压扭性深大地壳断裂。挽近期以来,该断裂带表现出较为强烈的反扭走滑活动,沿带地震活动频繁,是一条现代地震活动带。1986 年 12 月 22 日曾在其东端茶甫一带发生过一次 5.4 级地震。

(2) 青海南山北缘断裂 沿青海湖南岸向东延伸至倒淌河附近,长约 170km ,西距研究区约 $70\sim 80\text{km}$ 。为一隐伏高角度地壳断裂,近年来已被物探证实。该断裂具有长期活动历史,新生代以来仍在断续活动。在地貌上构成青海湖与青海南山的分界线,并控制了两侧三叠系地层的发育。

(3) 青海南山南缘断裂 沿青海南山南坡山麓地带呈 NWW 向延伸,长约百余公里,西距研究区约 $60\sim 70\text{km}$,亦属高角度隐伏断裂。在地貌上控制着青海南山与共和盆地的分界线。据其所控制的第四系地层沉积厚度的变化,可认为该断裂的新活动性具有西段强、东段弱的特点。

(4) 南山—德欠寺—阿什贡断裂 该断裂呈北西 $300^{\circ}\sim 320^{\circ}$ 方向展布于青海南山—德欠寺—阿什贡一线,延伸长百余公里,东距研究区 $20\sim 30\text{km}$ 。其南东段和北西段可见前震旦系地层逆冲于三叠系地层之上,在阿什贡一带 N_2 地层呈陡立状,牵引构造发育。可见破碎带宽 $10\sim 20\text{m}$ 。

(三) 地貌及新构造运动

区域地貌特征严格受断裂构造体系的发育控制。前述的 NWW 向断裂和 NWW 向断裂在区域内构成菱形网络式的构造格架,而断裂的逆冲活动又使得断块式的抬升区和凹陷区相间出现,从而构成了区域内断块隆起区和断陷盆地区相间出现的总体地貌格局。这一基本地貌格局大致形成于早更新世(Q_1)的末期~中更新世(Q_2)中期。这以后,地壳的整体脉动式抬升使得黄河急剧下切,从而在由坚硬地层组成的隆起区形成深切峡谷地貌,而在湖相沉积厚度巨大的凹陷盆地则形成宽谷甚至辫状水系的河流地貌特征。从整体来看,区域内的贵德