

新世纪学术专著丛书

峡谷河段高陡斜坡 岩体变形与稳定性 研究

邓荣贵 张倬元 周德培 著



西南交通大学出版社

序

水能资源开发、南水北调工程实施和交通等基础设施建设是我国西部大开发经济战略的重要组成部分。南水北调西线工程所经过的地区以及西部水能资源最富集的地区都位于青藏高原东部。由于青藏高原的强烈抬升和河流的急剧下切,在该地区形成了连绵的高山、密集的峡谷、复杂的区域地质环境和岩体力学环境条件。在该地区进行大规模的水利水电工程建设和基础设施建设,许多相关的应用基础理论和关键技术问题急需解决,峡谷河段高陡斜坡岩体变形稳定性及其工程效应问题就是其中的重大工程岩体地质力学问题之一。由于问题的复杂性,人们对峡谷河段高陡斜坡岩体特殊的变形破裂现象及发育规律尚缺乏足够的认识,对这方面的研究工作相对很少,尤其是在复杂地质环境和岩体力学环境条件下峡谷河段高陡斜坡变形破裂特征及其工程效应的研究几乎还是空白,无论是工程技术人员,还是相关的科研人员都缺乏一部系统研究类似复杂地质环境和岩体力学环境条件下峡谷河段高陡斜坡岩体变形和稳定性及其工程效应方面的专著。

由邓荣贵等研究人员所著的《峡谷河段高陡斜坡岩体变形与稳定性研究》一书,以雅砻江锦屏Ⅰ级水电站解放沟和普斯罗沟坝段为典型实例,采用了现场工程地质调查与测绘、室内外岩体力学测试、理论分析和数值模拟技术相结合的综合方法,系统全面地研究了复杂地质环境和岩体力学环境条件下峡谷河段高陡斜坡岩体变形的破裂特征、发育规律、稳定性及其工程效应,提出了高地应力环境和特殊地质构造弱面与岩性组合条件下,高陡斜坡岩体“挡土墙”和“挡土墙+压力拱”式的变形破裂模式,论述了该类变形破裂模式对水电工程建设的影响,并用数值模拟计算进行了验证,建立了考虑水坝等工程作用的高陡斜坡体变形与稳定性计算的空间模型。与此相配合的基本理论研究方面,建立了准椭圆形结构面实际平均迹线长度与探洞实测平均迹线长度的关系、空间结构面强度参数 ϕ 与剪切方向的关系以及结构面粗糙系数与结构面分维值的关系;提出了利用岩芯厚径比进行饼状岩芯分类的方法并阐述了其工程意义;建立了岩体地应力解除法测试值与室内单轴凯塞尔效应法测试值的关系和平硐围岩变形模型;提出了平硐围岩恢复变形、原始变形与超载变形概念以及确定相应变形参数的方法、岩体完整性变形曲线与非完整性变形曲线的概念,以及利用完整性变形曲线确定围岩水平地应力分量的方法。模拟加固处理或增加坝体嵌入深度进行变形分析,得出了坝址成立的初步认识。

本书作为这一方面国内唯一综合系统的学术著作,系统地阐述了在特殊而又复杂的地质环境和岩体力学环境中,峡谷河段高陡斜坡岩体变形的破裂特征、分布规律及机制,提出了一些独特的概念和观点,填补了该方面研究的空白,体现了构造地质学、工程地质学、岩体力学、计算技术与水利水电工程技术的有机结合,显示了该研究的创造性和新颖性。相信本专著的出版,不仅能对与水利水电工程及基础设施建设相关的应用基础理论研究和高陡斜坡稳定性研究及滑坡形成过程的研究有所促进,也一定能对类似岩体工程的论证及工程岩体处理利用的工程实践有所裨益。

中国工程院院士

鲜学福

2000年6月12日

前 言

我国西南部水力资源丰富的大渡河、岷江、雅砻江和黄河等干流上水能经济指标极为优越的水电站坝址，大多数位于峡谷河段。由于青藏高原强烈持续性抬升和河流强烈下切侧蚀作用，峡谷河段高陡斜坡岩体不同程度地存在特殊变形破裂现象。弄清楚峡谷河段高陡斜坡岩体变形破裂成因，正确评价其稳定性，合理而又可靠地利用破裂岩体修筑经济型水坝，是目前峡谷河段大型水电站建设的重大工程问题，也是急待解决的应用基础性课题之一。

峡谷河段高陡斜坡变形破裂的明显特征是涉及范围广、深度大，而坡体表部岩体往往相对完整。高陡斜坡岩体这种特殊变形破裂现象的出现不仅增加了坝址确定及坝型选择等可行性研究的难度，也增大了工程本身的风险，增大了工程潜在投资和降低了梯级的水能经济指标。

鉴于此，笔者根据实际需要，在综合了国内外研究现状和总结了国内外成功与失败的经验教训基础上，利用现场详细的工程地质调查及测绘、室内外岩体力学测试、理论分析和数值模拟相结合的综合研究方法，以雅砻江锦屏 I 级水电站解放沟和普斯罗沟坝段高陡斜坡为典型实例，对峡谷河段高陡斜坡岩体变形特征、稳定性以及建坝适宜性问题进行了系统研究。主要工作如下：（1）系统调查了高陡斜坡岩体岩性组合和岩体结构，建立了椭圆形结构面实际平均迹线长度与平硐实测平均迹线长度的关系；（2）建立了空间结构面强度参数 ϕ 与剪切方向的关系，以及结构面粗糙度系数与结构面峰值的关系；（3）进行了峡谷河段岩体地应力分布的理论分析和数值反演分析；（4）提出了利用厚径比进行饼状岩芯分类的方法及其工程地质意义；（5）提出了岩体地应力现场解除法测试值与室内凯塞尔（Kaiser）效应法测试值的关系；（6）建立了平硐围岩变形模型，提出了硐壁围岩恢复变形、原始变形及超载变形概念，以及确定相应变形参数的方法；（7）提出了岩体完整性变形与非完整性变形曲线的概念和利用完整性变形曲线确定岩体水平地应力分量方法；（8）建立了两种高陡斜坡岩体变形破裂新模式，并进行了岩体力学分析和数值模拟分析；（9）在考虑坝体推力的条件下，建立了高陡斜坡稳定性计算的空间模型，并进行了分析评价；（10）建立了深部破裂岩带发育的高陡斜坡与高拱坝相互作用力学模型，并进行了数值模拟分析。

根据工程地质岩体力学分析、数值模拟计算和室内外测试研究成果，提出了所研究峡谷河段高陡斜坡出现的特殊变形破裂现象，是高地应力环境和河流急剧下切导致坡体地应力释放，反倾高陡斜坡下部相对软弱岩层弯曲时效性变形，中部被陡倾坡外断层切割分离的坚硬大理岩表部坡体像“挡土墙”一样向坡外卸荷变形和时效性变形，断层带松弛甚至张开，内部倾向坡外，倾角稍大于坡度的节理发育的大理岩沿节理松弛甚至张开，以及中厚层状软硬相间大理岩和绿片岩岩体侧向卸荷，在上覆岩体重力和河谷应力场作用下产生楔形体破裂，形成倾向坡外的中等倾角次生破裂面，斜坡上部薄层状砂板岩岩体沿层面剪切变形和切层拉裂，局部松动形成压力拱。即“挡土墙+压力拱”式变形破裂模式。当陡倾坡外的断层同时切割了斜坡中部的坚硬大理岩和其上部的砂板岩时，断层以外的坡体因高地应力环境和河流急剧下切导致坡体地应力释放而产生卸荷变形和时效变形，像挡土墙倾倒变形那样使断层松

弛甚至张开,内部中厚层状软硬相间的大理岩及绿片岩和上部砂板岩在自重力和河谷应力场作用下产生楔形体破裂,形成倾向坡外的中等倾角次生破裂面,即“挡土墙”式变形破裂模式。

本书共七章,第一章阐述了峡谷河段高陡斜坡研究的意义、国内外研究现状、存在的主要问题和本书的研究思路、技术路线和基本方法;第二章阐述了所研究峡谷河段区域地质环境条件和峡谷河段工程地质条件;第三章详细介绍和分析了高陡斜坡岩体结构面类型及特征、河谷高地应力现象及河谷地应力特征、斜坡岩石力学特性试验结果及岩体力学现场试验成果,建立了斜坡岩体结构模型,提出了按厚径比进行饼状岩芯分类的概念,对岩芯饼裂形成机制作了更深入的研究,详细分析了斜坡主要岩石和断层泥的力学特征,建立了硐室围岩变形类型及模型;第四章详细阐述了高陡斜坡变形破裂现象、类型及其分布规律,并详细分析了各类变形破裂现象的形成机制,提出了“挡土墙”式和“挡土墙+压力拱”式的高陡斜坡变形破裂模式,并用数值计算分析进行了验证;第五章阐述了深部破裂岩带发育的高陡斜坡稳定性计算评价的原理与方法,并在考虑库水作用、坝肩开挖深度、爆破和孔隙水压力等因素前提下,进行了稳定性评价;第七章对全书的研究成果进行了总结。

本书的主要工作是笔者在成都理工学院攻读博士学位期间,结合国家电力公司成都勘测设计研究院的委托项目研究完成的,到西南交通大学工作后,做了一些修改和补充。因此,本书在编写过程中,始终得到了导师——成都理工学院张倬元教授的悉心指导、鼓励和支持。在修改和补充过程中,也得到了西南交通大学周德培教授的帮助。在此,谨向两位老师致以崇高的敬意和衷心感谢。中国工程院院士鲜学福教授,在百忙中审阅了书稿,并为本书作序,在此表示衷心感谢。

在本书内容的研究和编写过程中,得到了成都理工学院的王士天教授、黄润秋教授、刘汉超教授、聂德新教授、王兰生教授、严明副教授和项目组其他成员的关心和帮助;国家电力公司成都勘测设计研究院的刘克远国家级勘察大师、李文纲教授级高级工程师、白荣隆教授级高级工程师及锦屏地质队有关人员的关心和帮助,他们提供了部分资料和野外工作条件;西南交通大学出版社的张雪副社长和李彤梅编辑等审阅了本书手稿,对文字和图件进行了编辑加工和清绘,并提出了许多宝贵意见;西南交通大学土木工程学院和211学科办公室的领导和工作人员对本书给予了热情关注和帮助。在此,特向他们致以诚挚的谢意。

本书的出版得到了国家自然科学基金、西南交通大学出版基金的资助。

由于复杂地质环境和岩体力学环境条件下,峡谷河段高陡斜坡特殊的变形破裂及其稳定性评价方面的研究极少,特别是本书介绍的发育于峡谷河段高陡反倾斜坡内部,以拉裂和剪张裂为主要特征的变形破裂现象极其复杂,加之笔者知识水平和经验有限,书中不足之处敬请读者赐教。

邓荣贵

2000年6月于西南交通大学

目 录

1 绪 论	1
1.1 课题研究的意义	1
1.2 国内外对峡谷河段高陡斜坡研究的现状综述	3
1.2.1 高陡斜坡研究的历史回顾	3
1.2.2 国内外高陡斜坡研究现状及发展趋势	4
1.2.3 有关问题概述	5
1.3 本课题研究方案的设计及其依据	6
1.3.1 研究方法的基本原理	6
1.3.2 研究思路及主要研究内容	8
2 峡谷河段高陡斜坡的区域地质环境概况及坝区地质环境条件研究	11
2.1 工程概况及坝区自然地理特征	11
2.2 河谷地形地貌特征	12
2.2.1 区域地形地貌特征	12
2.2.2 坝区河谷地形地貌特征	13
2.2.3 河谷地貌发育历史及其与高陡斜坡变形破坏的关系	15
2.3 地层、岩性及地质构造特征	15
2.3.1 区域地层岩性及地质构造特征	15
2.3.2 坝区地层岩性及地质构造特征	20
2.3.3 坝区地质构造与斜坡结构、形态的相关分析	32
2.4 研究区新构造活动特征分析	32
2.4.1 地壳运动特征及演变过程分析	32
2.4.2 研究区及外围地震分布及基本规律	34
2.4.3 区域地壳应力场环境分析	35
2.5 区域及坝区水文地质环境条件	36
2.5.1 区域水文地质特征分析	36
2.5.2 坝区水文地质特征分析	37
3 峡谷河段高陡斜坡岩体力学环境条件研究	38
3.1 坝区斜坡岩体结构研究	38
3.1.1 概 述	38
3.1.2 斜坡岩体结构的定量化统计研究	38
3.1.3 斜坡岩体结构面的蒙特卡洛法模拟分析	58
3.2 峡谷河段高陡斜坡应力场环境特征研究	59
3.2.1 高陡斜坡高地应力现象研究	59

3.2.2	高陡斜坡岩体地应力测试分析	69
3.2.3	峡谷河段应力场的有限元反演分析	75
3.3	峡谷河段高陡斜坡岩体表生改造特征研究	78
3.3.1	斜坡岩体回弹强度及风化分带	78
3.3.2	斜坡岩体点荷载强度及风化分带	80
3.3.3	斜坡岩体风化带的综合分析	80
3.4	峡谷河段高陡斜坡岩体力学特性的试验研究	81
3.4.1	岩石块体的力学特性分析	81
3.4.2	岩石流变力学特性的试验研究	91
3.4.3	结构面软弱物质的物理力学特性测试分析	96
3.4.4	岩体的力学特性分析	100
3.5	峡谷河段高陡斜坡岩体力学参数选取分析	111
4	坝区峡谷河段高陡斜坡岩体变形破坏机制研究	114
4.1	坝区峡谷河段高陡斜坡变形破坏现象及其基本类型	114
4.1.1	坝区右岸顺倾斜坡变形破坏特征	115
4.1.2	普斯罗沟坝段左岸反倾斜坡变形破坏特征	118
4.1.3	解放沟坝段左岸反倾斜坡变形破坏特征	132
4.1.4	坝区左岸表层斜坡岩体变形破坏特征	134
4.2	坝区右岸顺倾斜坡变形破坏机制的岩体力学研究	136
4.2.1	顺倾斜坡蠕滑拉裂变形破坏机制分析	136
4.2.2	顺倾斜坡蠕变拉裂变形破坏机制分析	138
4.3	普斯罗沟坝段左岸下游段反倾斜坡变形破坏机制研究	138
4.3.1	变形破坏机制的岩体力学分析	138
4.3.2	变形破坏机制的数值模拟分析	142
4.4	普斯罗沟坝段左岸上游段反倾斜坡变形破坏机制研究	145
4.4.1	变形破坏机制的岩体力学分析	145
4.4.2	变形破坏机制的数值模拟分析	147
4.5	解放沟坝段左岸反倾斜坡变形破坏机制研究	149
4.5.1	变形破坏机制的岩体力学分析	149
4.5.2	变形破坏机制的数值模拟分析	150
5	峡谷河段高陡斜坡岩体稳定性研究	154
5.1	概述	154
5.2	右岸高陡顺倾斜坡稳定性分析	156
5.3	普斯罗沟坝段左岸反倾斜坡稳定性分析	159
5.3.1	下游段反倾斜坡体稳定性分析	159
5.3.2	上游段反倾斜坡体稳定性分析	161
5.4	解放沟坝段左岸反倾斜坡稳定性分析	162

5.5 开挖及爆破对典型反倾斜坡段稳定性影响的初步分析	163
6 高陡河谷斜坡对建高拱坝适宜性的工程地质研究	165
6.1 概 述	165
6.1.1 国内外拱坝工程概况	165
6.1.2 拱坝结构特点及其对地形地质条件的基本要求	166
6.2 峡谷河段高陡斜坡建高拱坝适宜性的岩体力学研究	167
6.2.1 解放沟坝段建高拱坝适宜性分析	167
6.2.2 普斯罗沟坝段建高拱坝适宜性分析	167
6.2.3 解放沟坝段和普斯罗沟坝段建高拱坝适宜性的比较分析	168
6.3 峡谷河段高陡斜坡建高拱坝适宜性的数值模拟分析	169
6.3.1 分析模型的建立、参数选取及边界条件确定	169
6.3.2 计算结果及其分析	170
7 总结与结论	174
参考文献	176

1 绪 论

雅砻江发源于青海省玉树县境内的巴颜喀拉山南麓,自西向东南流入四川省,总体上向南流经甘孜、卡拉等地,在两河口和小金河口有鲜水河及小金河汇入。在盐源县与小金河交汇后,流向突转北东,至张家河坝又急转南下,流经巴折、二滩,与安宁河交汇后至攀枝花汇入金沙江。在小金河口至巴折段,形成了环绕锦屏山、长达 150 余 km 的我国第三大天然河流弯道,与河流深切形成的相对高差达 2 000 ~ 3 000 m 的锦屏山脉,构成了锦屏山大河湾奇特的地貌景观。雅砻江水能蕴藏量丰富,可开发总量达 $2\,200 \times 10^4$ kW,为全国十大水电开发基地之一。其中,锦屏山大河湾河段水电资源得天独厚,采用一级高坝和二级截弯引水的两级开发方式,可获得 620×10^4 kW 的装机容量,约占雅砻江水能可开发量的 30%;库容达 100×10^8 m³,可提高下流官地、二滩和桐子林梯级的保证出力 50×10^4 kW 以上。对雅砻江大河湾河段水能资源的开发,从 50 年代以来,一直就受到有关部门的重视。50 年代,华东勘测设计院在水文站和解放沟就进行过初步勘测。1989 年 1 月,成都勘测设计研究院等单位全面开展了大河湾段的规划选点工作,于 1990 年 11 月完成了《雅砻江锦屏河段水电开发方式》研究报告。根据此报告及有关专家多次踏勘的结果,对该河段水能资源的开发倾向于采用锦屏一级高坝和二级隧洞引水发电的两级开发方案,两者分别利用水头 260 m 和 310 m,装机分别为 300×10^4 kW 和 320×10^4 kW。

1.1 课题研究的意义

1959 年 12 月 2 日,世界上最薄的拱坝,法国的马尔帕塞双曲拱坝,因坝基(肩)岩体的过大变形发生溃决,库水冲向下流的弗雷斯小镇,使 400 余人丧生。3 年后的 1963 年 10 月 9 日夜,世界上最高拱坝——意大利瓦依昂拱坝坝基,因近坝库岸大滑坡而失稳,库水形成的涌浪直泄而下,造成下游 2 600 余人死亡,而拱坝本身仍完好无损。这两起水库失事是世界上水坝事故中最为不幸的悲剧。据调查,我国运行中的大、中型水库,有 46% 的大坝坝基不同程度地存在类似问题,另有 14% 的水库库岸存在稳定性问题^[4]。据了解,我国某高拱坝因坝址选择欠佳,斜坡建坝适宜性较差,使坝肩(基)处理工程量大大增加,导致工期延误近 3 年,增加投资上亿元;某地下厂房因地质条件分析不充分,选址不当,而因此延误工期 1 年多,增加搞资 5 000 余万元。由此可见,无论是坝基岩体、地下厂房围岩,还是库岸斜坡岩体,其稳定性决定着水电工程的安全,从某种意义上讲,对水电工程岩体的研究比对拱坝本身的研究更为重要。

我国为了解决日益增长的能源需求、水资源利用及生态环境不断恶化等问题,一大批巨型、大型水电站工程相继进入规划、设计、施工及运行阶段。这些水电工程大坝高度已接近或超过 300 m,涉及到的自然斜坡高度接近 2 000 m,施工形成的临时高边坡达 400 余 m,永久性高边坡亦超过 300 m。多数巨型、大型水电工程将修建在地震高烈度区,以及峡谷、斜坡表生改造强烈、岩性及构造复杂的河段上。然而,许多水能富集的河段,虽然地形和岩性适宜建高混凝土拱坝,但斜坡及坝基(肩)岩体在原始地质构造条件下的次生改造,使斜坡岩体对建高拱坝的适宜性大大降低。在这类复杂条件下,高拱坝应选择工程地质条件最佳的坝段,以保证施工或运行时坝基岩体不致产生过大变形甚至破坏,地质弱面不致于活动,斜坡不致于失稳,作为坝基(肩)的斜坡岩体对建高拱坝的适宜性更强,即使出现上述岩体力学现象但其规模最小。如果上述岩体力学现象不可避免,应采取何种设计和治理措施,在绝对避免类似于瓦依昂和马尔帕塞水坝悲剧的前提下,使投资更趋合理。这些问题是所有水电站工程,尤其是巨型、大型高拱坝工程建设不可回避的问题。例如,黄河的拉西瓦、李家峡,雅砻江的二滩、锦屏 I 级、金沙江的溪落渡、向家坝,红水河的龙潭,澜沧江的小湾等水电站工程都存在类似问题。因此,深入研究这些问题,对深切河谷高陡斜坡的稳定性及建高拱坝的适宜性作出合理评价和预测是十分必要的。

随着坝高的大幅度增加,峡谷河段高陡斜坡岩体的变形稳定性和建高拱坝适宜性的研究得到了各界的高度重视,有关内容相继被列入了国家重点攻关课题,国家自然科学基金委也将高陡斜坡列为鼓励研究方向。例如,结合长江三峡水电站工程可行性论证开展的“顺倾高边坡变形破坏机制研究”,结合雅砻江二滩和黄河李家峡等水电站工程可行性论证开展的“高坝坝基岩体工程研究”,结合红水河龙潭等水电站工程可行性论证开展的“反倾高边坡稳定性研究”等。以前,人们吸取了瓦依昂和马尔帕塞大坝失事的教训,对顺层高边坡及坝基岩体的研究比较重视,但近年来的勘探实践表明,反倾高边坡变形稳定性问题愈来愈突出,与顺倾高边坡相比,反倾高边坡变形乃至破坏更具有不可预见性和偶然性。过去,虽然对水电工程高陡斜坡变形稳定性进行了许多研究,取得了一些突破,研究工作也正在不断深入,但由于地质环境条件及斜坡岩体结构的复杂性,过去的研究仍具有较大的局限性。总体上看,峡谷河段高陡斜坡变形稳定性及建高拱坝适宜性研究仍处在经验积累和理论探索阶段。作者通过文献检索,尚未发现类似于本文将涉及的地质环境、岩体力学环境条件下,峡谷河段高陡斜坡岩体深部变形破裂机制和稳定性研究成果。因此,本研究成果无疑对类似问题研究的开展和深入起到积极作用。

拟建的锦屏 I 级水电站,为雅砻江下游近期规划建设的龙头梯级,位于雅砻江大河湾开始段,坝高 314 m,总库容和有效库容分别达 100 亿 m^3 和 60 亿 m^3 ,总装机容量 300 万 kW,水能经济指标十分优越,现为预可行性论证研究阶段,初步选择了水文站、三滩、解放沟和普斯罗沟四个坝段作为预可行性研究阶段的四个候选坝段。其中,水文站和三滩坝段宜采用当地材料坝型,解放沟和普斯罗沟坝段宜采用混凝土高拱坝。据该梯级河段的筑坝材料分布情况、施工场地、运输和地形等条件,坝型的选择首先应考虑混凝土薄拱坝。所以,本文以解放沟和普斯罗沟两坝段的峡谷河段高陡斜坡稳定性及建高拱坝适宜性为研究对象。

该水电站坝区基岩岩性以大理岩、砂板岩和后期侵入的基性煌斑岩脉为主。区域上,

该水电站工程坝区位于川滇 SN 向菱形断块中段东部,由鲜水河断裂带、理塘河断裂带、锦屏山断裂带、八窝龙断裂带及木里弧形构造带围限的较小断块——九龙断块东南部。坝区构造以 NNE—NEE 向的陡倾角断裂和紧闭式褶皱为主。区域地壳的持续抬升和河流急剧下切,形成了高达 1700 余 m,平均坡度 50 余度的高陡顺倾和反倾高陡斜坡,加上后期区域构造应力场、河谷应力场和深切高陡斜坡所特有的表生改造的综合作用,研究坝段左岸反倾斜坡深部产生了张剪裂变形破坏,出现了特殊的松动岩体。在此条件下修建高拱坝,必然会产生一系列与工程建设密切相关的岩体力学问题,不解决这些问题就不能充分利用该河段丰富的水能资源和较为优越的地形条件。据区域工程地质资料分析,这些问题不仅在雅砻江大河湾地区,乃至在青藏高原东部周边地区都具有较强的代表性,所以,这些重大工程岩体力学问题的解决,对该地区的水电资源开发建设具有重要的实际意义。

1.2 国内外对峡谷河段高陡斜坡研究的现状综述

高陡斜坡是地球表面形态特征之一,也是地球内外营力综合作用的产物。随着我国经济实力的增强和科学技术水平的提高,水能资源的大规模开发工作已经开始。在我国,水能资源的 70% 富集在西部地区,这些地区受大地构造作用,地壳长期持续抬升,河流急剧下切形成高山峡谷,出现高陡的高陡斜坡,高度从数百米到千余米,部分高陡斜坡甚至达 2000 m,平均坡度为 $40^{\circ} \sim 80^{\circ}$ 。80 年代以来,结合我国西部大江大河水电基地的规划,在许多大型水电站工程建设工作中,各部门在借鉴国内外经验的同时,开展了许多有关深切河谷高陡斜坡稳定性及建坝适宜性的研究。

1.2.1 高陡斜坡研究的历史回顾

纵观国内外对峡谷河段高陡斜坡研究的历史,可大致将其分为三个阶段:

(1) 70 年代以前,对峡谷河段高陡斜坡的研究主要从高陡斜坡崩塌(滑)造成的地质灾害出发,定性的分析峡谷河段高陡斜坡失稳的地质环境条件,进而利用类比法对峡谷河段高陡斜坡的稳定性进行初步评价。其特点为:① 以崩塌、滑坡现象为主要研究内容;② 以崩塌、滑坡特征与地形、地貌、地层岩性、地质构造和人类生产活动等之间的关系为研究重点;③ 研究方法主要为定性描述和分析。

(2) 70 年代~80 年代初,为了适应山区交通、水电等工程建设需要,开展了大量的区域工程地质条件研究,在大量野外实地调研的基础上,总结、分析各类峡谷河段高陡斜坡的工程地质条件与工程地质问题的空间分布规律,为区域经济规划提供了大量的基础地质资料,同时结合大型水利水电、铁路和公路建设工程的论证工作,进行重点区域工程地质条件分析,解决了许多与水利水电和交通工程有关的峡谷河段高陡斜坡的重大工程地质问题。本阶段研究的特点为:① 理论更先进。开始引入现代统计数学、断裂力学、弹塑性力学、流变力学等理论和现代测试技术及计算机技术。② 研究内容更广泛。重点研究峡谷河段高陡斜坡的地形、地貌、地层岩性、地质构造、岩体结构等地质条件外,还广泛研究了与峡谷河

段高陡斜坡变形破坏有关的河谷应力场,从地质历史的观点出发,在深入研究斜坡岩体(石)力学特性时间效应的基础上,对峡谷河段高陡斜坡变形破坏进行动态分析和动态跟踪监测。

③ 研究方法更先进。广泛应用物理模拟和数值模拟方法,使研究的深度不局限于峡谷河段高陡斜坡变形破坏现象,而且从斜坡的变形破坏过程、动力源等方面去探讨峡谷河段高陡斜坡的变形破坏机制,总结归纳出了峡谷河段高陡斜坡变形破坏的类型和模式,在此基础上进行有效的评价和预测。④ 应用方面。适应了拱坝高度和规模迅速发展的需要,研究了峡谷河段高陡斜坡变形稳定性对拱坝的适宜性,分析评价了作为坝肩高陡斜坡岩体的抗滑稳定性和变形适应性,以及库岸的稳定性,为政府决策提供了科学依据。

(3) 80年代至今,在对区域工程地质条件研究的基础上,一方面根据水能资源开发规划、水系特征进行了流域性的高陡斜坡工程地质条件的研究,如“川滇小江地区斜坡变形与破坏研究”等;另一方面,结合特大型水利水电工程论证工作,开展了大型河谷高陡斜坡的专题研究,如“长江上游重大高陡斜坡、滑坡的变形破坏机制研究和稳定性评价”等。本阶段在前两个阶段研究的基础上,从系统论的观点出发,将峡谷河段高陡斜坡的变形破坏视为河谷发育、地质历史过程的一部分,更广泛地考虑高陡斜坡的地质环境效应,并将水利水电等工程活动作为人类施予的附加作用,置于上述地质过程中进行系统性分析,研究它们间的相互作用。研究方法上广泛引入现代数学力学、分形几何学、损伤力学、测试分析及岩土体改造技术等领域的最新成果。

1.2.2 国内外高陡斜坡研究现状及发展趋势

峡谷河段高陡斜坡稳定性岩体力学问题的核心是峡谷河段高陡斜坡的岩体结构力学效应。随着水电工程建设等人类工程活动规模的日益增大,所面临的峡谷河段高陡斜坡工程岩体问题愈来愈多,近几年,国内外一些重大坝工事故的发生和特大型水电工程论证过程中遇到的峡谷河段高陡斜坡工程地质问题(如拉西瓦高陡斜坡、向家坝马步坎高陡斜坡、长江三峡黄腊石滑坡、锦屏 I 级电站的高陡斜坡等)已充分说明了这一点。近 10 年来,对峡谷河段高陡斜坡工程岩体研究有了较大进展,其现状和发展趋势主要有如下特点:

(1) 地质原型调研在研究工作中的基础地位继续被人们重视。近年来,在继承传统工程地质研究方法、重视实际地质条件调研的同时,不断引入相关学科先进的调查、测量和分析方法,促进了对高陡斜坡研究向量化发展,大大提高了地质基础资料的有效利用率,研究成果的实用性不断增强。

(2) 有关的基础理论和斜坡岩体介质基本性质的研究不断加强和深化,斜坡岩体力学本构关系、变形破坏机制等方面的研究有了进一步发展;统计数学、模糊数学、计算数学、弹塑性力学、断裂力学、流变力学、损伤力学的理论和方法逐步应用于高陡斜坡稳定性研究,有力地促进了高陡斜坡工程岩体研究的发展。

(3) 近代哲学理论在峡谷河段高陡斜坡工程岩体研究中起着愈来愈大的指导作用,系统论、协同论、突变论的引入,使认识高陡斜坡工程岩体的思想方法发生了根本性变化,峡谷河段高陡斜坡工程岩体研究的深度和广度有了突破性进展。

(4) 学科综合的优势在峡谷河段高陡斜坡稳定性及建高拱坝适宜性研究中愈来愈明显。几十年来,岩体工程成功与失误的实例,逐步使人们认识到,只有将与岩体工程有直接或间

接关系的学科紧密结合,才能真正解决工程岩体实际问题,促进工程岩体研究在理论和实践两个方面的发展。

(5) 岩体工程结构和工程岩体相互作用效应的研究得到进一步重视,人们逐步认识到介质物理力学性质的突变必将导致某些物理量(应力、应变等)或几何量的不连续变化,只有深刻认识到这一点,才能解决不同介质结构变形之间的协调性。

(6) 地质力学定性(概念)模型分析与数值、物理模拟、现代测试方法的结合得到进一步加强,人们逐渐意识到只有将上述几种方法相互结合、相互补充和完善,才能为复杂工程岩体的研究提供有力的工具,使分析模型和结果更符合客观实际。

(7) 工程实例的总结和分析将继续得到重视,工程实例为工程岩体研究理论和新技术开发提供了条件,实际监测资料也是验证和完善工程岩体研究新理论、新方法正确与否的标准和素材,是提高人们对岩体工程的认识水平和判断能力的前提条件。

(8) 引进岩土工程学的最新研究成果,使工程岩土体研究的实用性不断增强,岩体自身的承载能力将得到进一步发挥。随着人们对峡谷河段高陡斜坡岩土体物理力学特性认识的深入、岩体改造技术的提高,在对待较差岩体问题上,将会产生从“如何除掉”到“如何保护和利用”的飞跃。因此,岩土体的改造和利用是一种必然的发展趋势。

1.2.3 有关问题概述

高陡斜坡岩体存在于一定的地质环境中,其形成和发展经受了地质历史时期中各种内外营力地质作用的改造和影响,是一种受多种因素制约的复杂材料。这种复杂性主要表现在斜坡岩体的不连续性、非均质性、各向异性以及赋存条件的差异性,制约因素以不同方式的组合,构成了工程岩体的复杂模式,而在人类工程活动或工程荷载作用下,工程岩体的变形、破坏形式和机制等则显示出极大的差异性。因此,要正确认识高陡斜坡岩体的环境条件和物理力学属性,达到充分和有效地利用岩体这种天然建筑材料的目的,还有一个漫长的过程。从某种意义上讲,目前的工作才刚刚起步。总体上看,现有的理论和技术方法还远远不能圆满地解决岩体工程实践中提出的重大工程地质岩体力学问题,归纳起来主要有以下几个方面:

(1) 虽然引入了许多新概念、新理论和新方法,但对于工程岩体,有些概念还不清楚、不完善,概念之间的界限不够明确。例如,工程岩体和工程地质体,有的文献^[46]认为工程岩体仅涉及开挖部位,工程地质体包括影响范围的岩体及人为工程环境。那么,开挖部位代表一个范围,范围的界限如何划分,工程地质体指影响范围,范围的界限又如何划分;又如高陡斜坡,斜坡坡度和高度究竟是多少才算高陡斜坡等等,这些都有待于完善和明确。

(2) 尽管人们对高陡斜坡研究了几十年,但还没有一份公认的、较为完备的斜坡分类方案,有关文献往往一谈到斜坡分类就转到斜坡变形破坏类型的范畴。

(3) 斜坡岩体结构的特征征还难以较为客观地描述,尽管人们应用现代统计数学对岩体结构进行分析(如用 monte-carlo 法随机模拟岩体的结构网络),但模拟结果还无法与岩体力学参数建立起较为客观的定量关系,并将此用于高陡斜坡体变形和破坏的力学分析和数值模拟分析。

(4) 高陡斜坡的边界条件也无法较为客观地确定, 目前所用的各种测试和分析方法所得到的结果, 因斜坡岩体结构的随机性和岩体力学模型的过份简化 (对复杂的岩体介质而言) 等因素, 其客观性不够。

(5) 因斜坡岩体介质和所处地质环境及岩体力学环境的复杂性、演变性, 岩体力学参数的准确确定还难以做到, 目前采用的各种测试分析方法获得的结果还仅仅是统计意义上的均值或范围。

上述问题表明, 目前对高陡斜坡变形稳定性的研究还很不够, 要达到客观的定量分析研究, 还有一个漫长的历程。

1.3 本课题研究方案的设计及其依据

1.3.1 研究方法的基本原理

据系统论的观点, 重大水电工程建设活动、地质环境和岩体力学环境构成了一个开放系统。因此, 深切河谷高陡斜坡稳定性及建高拱坝适宜性的工程地质研究是一个系统学的课题。峡谷河段高陡斜坡是由地质环境子系统、岩体力学环境子系统、工程活动效应子系统、工程结构子系统构成, 这些子系统又由若干次级子系统组成 (图 1.1), 并随着时间推移, 子系统之间按自身的协调规律交换能量, 既保持其本身动态平衡又保持整个大系统的动态平衡。整个开放系统以时间为参量, 由单纯自然地质过程的动态平衡状态, 过渡到自然地质环境与人工环境条件下的动态平衡状态 (图 1.2)。所以, 深切河谷高陡斜坡稳定性及建高拱坝适宜性的研究应与工程建设及运行作用相结合: 首先研究深切河谷高陡斜坡在自然地质环境和岩体力学环境条件下, 自身性态的演变特征; 然后研究和预测在工程建设和工程运行过程中, 改变着的地质环境和岩体力学环境条件下, 高陡工程斜坡的变形破坏特征及斜坡对建高拱坝的适宜性。

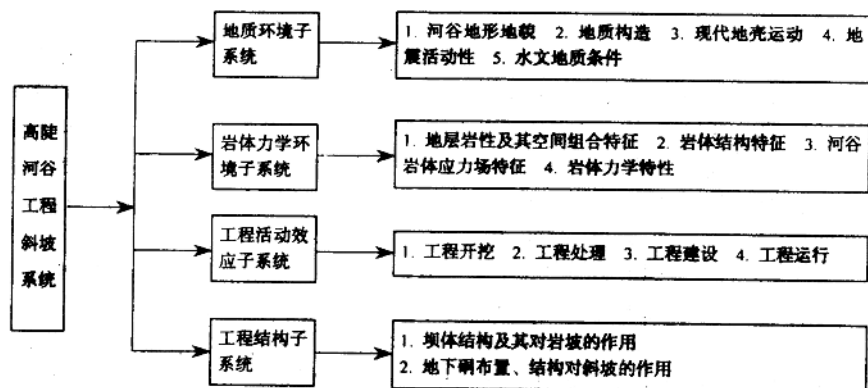


图 1.1 高陡河谷工程斜坡系统结构

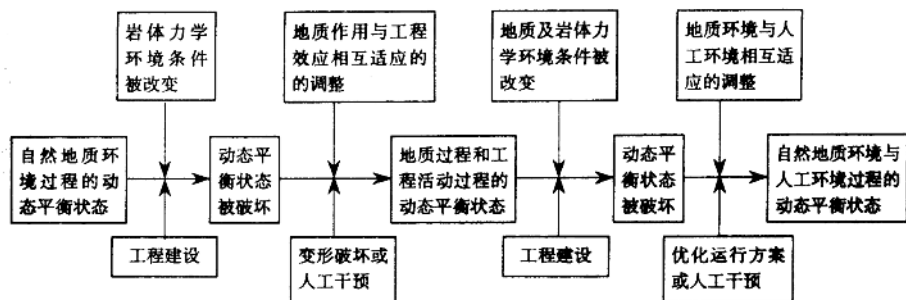


图 1.2 自然环境动态平衡状态到自然与人工环境动态平衡状态的过渡

在对上述过程总结和研究的的基础上，本文提出了深切河谷高陡斜坡的系统动态平衡分析法。该方法强调深切高陡斜坡系统中各因素（子系统）的相互耦合作用，即在时间参量条件下，把高陡斜坡岩体、地质环境、岩体力学环境和工程活动四大子系统放在相应的重要地位，先研究它们自身的演化特点和规律，再研究它们之间的相互作用。现将这一方法的基本原理简述如下：

(1) 深切河谷高陡斜坡处在不断演变的过程中，它的形成经历了漫长的地质历史过程，同时饱受了变形破坏的改造，在内外各种营力综合作用下，处于动态平衡状态（见图 1.2）。此过程表明，高陡斜坡从变形到局部性破裂，最终发展到一定规模的整体失稳破坏，继之是新形态的斜坡，又开始新一轮的变形破坏过程。因此，应该以动态的观点认识高陡斜坡的变形破坏特征及演变规律，坚持地质历史分析法，追踪高陡斜坡的演变轨迹。人类工程活动的作用规模相对于地质作用来说小得多，但其强度（速度）远远超过地质作用，其结果往往会改变地质作用的形式，成为一种诱发性因素，加速高陡斜坡的演变进程，通过变形破坏达到新的动态平衡状态。所以，应重视工程活动诱发性作用的突变论分析方法，根据工程特性、规模、施工方式、运行方案等对高陡斜坡体的作用规律，对建高拱坝适宜性进行分析和论证。

(2) 人类工程活动是在高陡斜坡形成和演变的某种特定的地质及岩体力学环境中进行的，它们之间必然产生相互联系、相互作用、相互制约，而工程活动涉及到的高陡斜坡体作为工程岩体的一部分，在水工工程结构（包括库水）与地壳岩体之间起到了一种“桥梁”作用，在特定的地质和岩体力学环境中，既受到工程建设和工程运行的强烈影响，又受到地壳环境的制约，即峡谷河段高陡斜坡在地质及岩体力学环境条件下的稳定性态，决定着高陡斜坡对建高拱坝的适宜程度。反过来，高拱坝工程建设及运行又以其特殊方式直接作用于高陡斜坡体，或通过改变地质环境和岩体力学环境（如地应力场和地震活动等）间接地作用于峡谷河段高陡斜坡岩体。这样，高拱坝工程涉及的峡谷河段高陡斜坡实际就转化为高陡工程斜坡问题。因此，应以系统论和协同论的理论和方法来研究高陡工程斜坡的稳定性及建高拱坝的适宜性。

(3) 以高陡斜坡的变形、稳定性为主要研究目标，以研究地质环境和岩体力学环境为前提，以研究工程结构特性为基本内容，以研究高陡斜坡对建高拱坝适宜性为目的，将是一种高陡斜坡河段修建高拱坝可行性论证的有效方法。作为工程地质学的研究任务，研究工程直接涉及或影响到的斜坡岩体的变形破坏特征和建高拱坝的适宜性，是本课题研究的主要内容。所以，应在弄清高陡工程斜坡岩体的物理力学特性和结构特征等自然属性的基础上，预测高陡工程斜坡在地质环境、岩体力学环境条件及工程活动影响下，其自然属性的变化趋势。高陡工程斜坡在特定的地质环境及岩体力学环境中形成、演变，呈现目前的形态，并在工程

建设和工程运行过程中,始终以地质环境及岩体力学环境为载体,而受到制约,因此,首先应研究地质环境和岩体力学环境条件的特征及演变规律,预测高陡斜坡在工程活动过程中的变化趋势。研究高陡工程斜坡的最终目的,是要弄清高陡工程斜坡对建高拱坝的适宜性,即能否建高拱坝,其技术和经济适宜程度怎样,所以,本课题的研究还将强调高陡工程斜坡对高拱坝建设及运行的反应,预测在人工活动参与下的演变趋势,为高拱坝的类型、规模的设计论证提供工程地质参数。总之,研究时应分清主次,既抓住工程斜坡体,又不忽视其环境因素和影响因素,系统、全面地评价和预测高陡工程斜坡岩体的自然属性和工程属性。

(4) 高陡斜坡经历了各种地质作用,内外残留了许多“创伤”,使斜坡成为一种由不同成份、不同物理力学性质、不同水理性质的岩石(土)单元构成的结构体。这些单元体在工程活动等诸多因素综合作用下,按其各自的属性作出不同的反应。对高拱坝工程来说,软弱单元体(弱面或弱带)和关键块体起着一定的控制作用,只要这些单元体不适应工程活动的作用,就会产生过量变形(或位移),进入新的动态平衡状态,适应新的作用条件。由于单元体之间的相互作用,可能产生连锁反应,导致大规模的崩塌或滑坡,使地形条件优越的斜坡对建高拱坝的适宜性降低或消失。因此,对高陡斜坡的稳定性评价和建高拱坝适宜性的研究,应当重视结构弱面的影响,抓住对建高拱坝适宜性影响最大的结构单元体,对提高本课题的研究水平和正确性具有重要意义。

(5) 高陡斜坡是在特定的区域地质环境中形成的,河流走向、坡面形态的随机性,斜坡面与岩层层之间关系的多样性,地质构造、不同地层岩性空间组合的复杂关系等因素的共同作用,决定了高陡斜坡应力场、变形及破坏特性的复杂性,需要从“重点解剖”的思想出发,根据上述因素,以具有代表性河段或地貌单元为具体研究对象,进行深入研究,遵循从“个别”到“一般”的认识原则。因此,本课题将以具有代表性的锦屏 I 级水电站坝区峡谷河段高陡斜坡为典型进行研究。

(6) 高陡斜坡稳定性及建高拱坝适宜性的研究是大型水电工程论证工作的一个难题,研究的斜坡体是一种处于变化的地质环境中,并受到工程活动强烈改造的、非均质及各向异性的非连续介质体。所以,应当在对高陡河谷工程斜坡结构及岩性特征进行详细野外调研的基础上,运用现代数学力学和计算机科学的最新概念、最新原理和方法,对“定性模型”进行论证、修改和完善,利用完善的模型,分析峡谷河段高陡斜坡对建高拱坝的适宜性,从而作出客观地评价和有效预测。

以上从六个方面简述了高陡斜坡稳定性评价及建高拱坝适宜性研究所遵循的基本原理。根据这一原理,使地质环境、岩体力学环境、高陡斜坡体和工程活动等因素有机地结合起来研究,达到合理利用地质环境和岩体力学环境条件的目的。

1.3.2 研究思路及主要研究内容

在上述原理指导下,本文从系统动态平衡等思维方式出发,将研究思路、主要研究内容及技术路线概括为图 1.3 所示的建模过程。在课题研究过程中,始终遵循上述研究思路,首先采取野外实地调研的方法和查阅有关资料,对研究区的岩性、地质构造及地下水等地质环境条件进行分析;采取室内和野外相结合、定性和定量相结合的方法,分析研究区内峡谷河段高陡斜坡岩体结构、地应力场及岩体物理力学性能等岩体力学环境条件;然后,根据峡谷

河段高陡斜坡体变形破裂现象的调查资料,分析峡谷河段高陡斜坡变形破裂特征,建立峡谷河段高陡斜坡变形破坏的定性(概念)模型,再用数值模拟方法研究峡谷河段高陡斜坡的变形破坏机制,验证和完善已建立的定性模型。在此基础上,对峡谷河段高陡斜坡的稳定性进行分析评价和预测,最后用岩体力学分析和数值模拟方法研究高拱坝对峡谷河段高陡斜坡作用特征和峡谷河段高陡斜坡变形和强度对建高拱坝的适宜性,进而评价和预测峡谷河段高陡斜坡对建高拱坝的适宜程度。

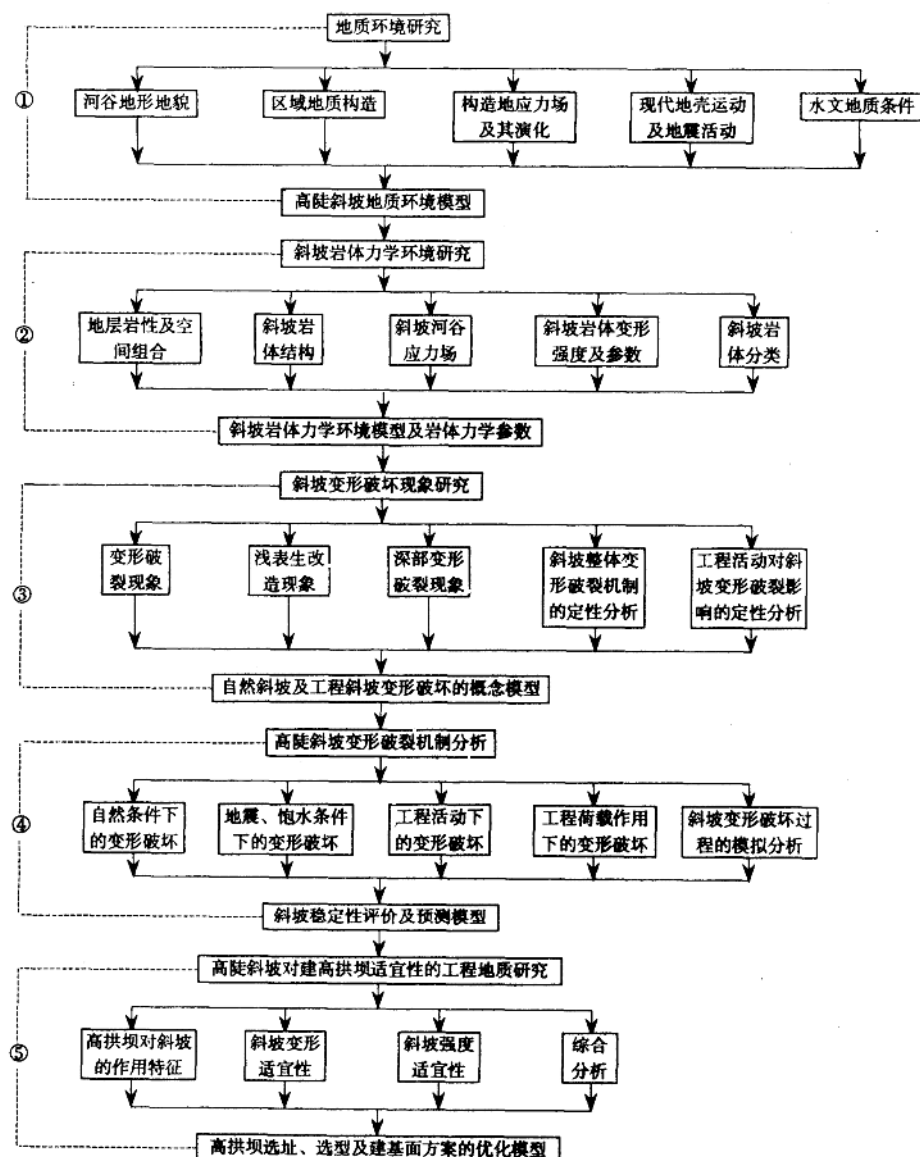


图 1.3 研究思路及主要内容

在本项研究中，王士天教授、黄润秋教授、陈建平教授、严明博士和许强博士参加了野外部分调研工作。在野外工作中，得到了国家电力公司成都勘测设计研究院有关领导和技术人员的大力支持和帮助。