

湖南科技大学学术著作出版基金资助出版

复杂软岩特性及其高边坡稳定性研究

——以四川岷江紫坪铺水电站为例

◎ 曹运江 黄润秋 唐辉明 等著

地质出版社

国家自然科学基金项目 (41172275)

地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室开放基金项目 (GZ2005-07)

中国博士后基金项目 (20070420937)

湖南省科技厅计划项目 (2012SK3111)

联合资助

湖南省国土资源厅软科学研究计划项目 (2011-04)

湖南科技大学学术著作出版基金

复杂软岩特性及其高边坡稳定性研究

——以四川岷江紫坪铺水电站为例

曹运江 黄润秋 唐辉明 冯 涛 著
薛利民 郑海君 蔡国军 杨小芹

地质出版社

· 北 京 ·

内 容 简 介

本书是一本系统论述水电高边坡复杂软岩特性的学术专著。内容包括概论、高边坡工程地质环境条件、软岩物质组成及显微构造特征、软岩的水理性质、软岩变形强度特性、软弱结构面的力学特性试验、复杂软岩对边坡稳定性影响的敏感性分析等。全书基于现场工程地质原型调研及前期勘探资料的复核,针对紫坪铺条形山脊复杂软岩开挖高边坡的特点,本着以“地质过程机制分析—量化评价”的系统工程地质研究为指导,建立一套复杂软岩特性及其高边坡稳定性研究方法,不仅丰富了复杂软岩高边坡稳定性研究的内容,而且为类似复杂软岩条件下高边坡的稳定性评价与预测提供一种新的研究思路。针对复杂软岩所开展的一系列研究工作,有相当的学术深度和广度,反映了国内最新的研究水平。

本书可作为地质工程与地质资源、岩土工程等专业师生的参考教材,也可供土木工程领域的科研、教学与工程设计技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

复杂软岩特性及其高边坡稳定性研究:以四川岷江
紫坪铺水电站为例 / 曹运江等著. —北京:地质出版社,
2012. 10

ISBN 978-7-116-07921-2

I. ①复… II. ①曹… III. ①水电站厂房-软岩层-
边坡稳定性-研究 IV. ①TV731.1②TV698.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 239723 号

FUZA RUANYAN TEXING JIQI GAOBIANPO WENDINGXING YANJIU: YI SICHUAN MINJIANG ZIPINGPU SHUIDIANZHAN WEI LI

责任编辑:李惠娣 王秋芬 祁向雷

责任校对:张 冬

出版发行:地质出版社

社址邮编:北京市海淀区学院路 31 号, 100083

电 话:(010) 82324508 (邮购部); (010) 82324514 (编辑部)

网 址: <http://www.gph.com.cn>

电子邮箱: zbs@gph.com.cn

传 真:(010) 82324340

印 刷:北京天成印务有限责任公司

开 本:787mm×1092mm 1/16

印 张:8.5

字 数:210 千字

版 次:2012 年 10 月北京第 1 版

印 次:2012 年 10 月北京第 1 次印刷

定 价:38.00 元

书 号:ISBN 978-7-116-07921-2

(如对本书有建议或意见,敬请致电本社;如本书有印装问题,本社负责调换)

序

含有软岩和软弱结构面的岩体所构成的高边坡具有明显的时效变形特性，而时效变形特性又控制着高边坡的长期稳定性。所以开展此类高边坡的时效变形特性研究很有必要。本书作者们以建于典型的软岩组须家河煤系地层之上的紫坪铺水电站高达 200 余米的多个人工开挖高边坡为研究对象，对软岩特性及高边坡稳定性进行了为期两年多的较为系统而深入的研究，获得了以下所述的主要研究成果。通过测制精细剖面研究岩组特性和扫描电镜微观分析划分出变形纹层状页岩、泥炭煤、条带状炭质页岩和云泥质粉砂岩 4 种典型软弱岩组，同时还划分出炭质页岩型、泥化夹层型和煤线型 3 种带状“构造软岩”。通过多组软岩的崩解试验建立了软岩泥化物含量与崩解特性、崩解度和循环次数的关系，并且确定出泥糊状、碎屑状、角砾状和碎块状 4 种崩解破坏形式。应该着重指出的是作者们通过了持续一年多的压缩流变及剪切流变实验获得了大量的第一手试验数据，通过数据处理获得了大量的应变叠加与等时线簇等流变试验曲线，分别建立了压缩流变和剪切流变方程，求出了压缩流变和剪切流变参数和压缩长期单轴抗压强度和长期抗剪强度 (C_{∞} 和 φ_{∞})，这些参数是研究软岩高边坡时效变形及评价其长期稳定性的重要参数，也是最具工程实用价值的参数。为了判定软岩中开挖高边坡长期稳定性和支护措施的有效性，作者们还以有限元数值模拟法进行敏感性分析，依次分析开挖前有软岩和假定原有软岩被硬岩取代两者变形的显著差异，开挖后应力分布特征和变形趋势，支护条件下的应力特征和变形趋势。为了验证有限元分析的可信度，作者们还对工程竣工后的多点位移计监测资料进行了反馈分析，并得出两者变形特征吻合较好，通过支护有效地抑制边坡时效性的发生和发展，现有工程支护措施基本上能满足工程运行需要的结论。值得特别指出的是紫坪铺水电站是按照Ⅷ度设防烈度设计的。竣工后两年受到了 2008 年 5·12 汶川 8 级强震的检验。大坝距地震断裂仅 8km，实际影响烈度高达Ⅸ—Ⅹ度。尽管此

次地震在距震中数千米到数十千米范围内的天然高山斜坡诱发了约 6 万处岩质滑坡，但坝区所有工程边坡却完好无损。这就进一步说明作者们的研究成果为设计提供的参数是合理的，为这些人工高边坡经超强地震检验而能保持稳定性做出了应有的贡献。相信本书的出版一定会对软岩组成的高边坡时效变形研究有所促进和借鉴。特为之作序。

洪保元 2012.7

前 言

河流水能资源开发和水资源利用是人类可持续发展的需要。中国的能源结构和发展趋势,决定了在较长的一段时间内,需要大力开发西部的水能资源。据不完全统计,我国水能资源总蕴藏量为 6.76 亿千瓦,可开发的水能资源为 3.78 亿千瓦,其中 68% 分布在西南地区。由于这一地区伴随青藏高原的快速隆升,所形成的高山峡谷地貌特征,致使这一地区开展大规模水电工程建设,不可避免地会遇到天然和人工开挖高边坡的问题。实践表明,这一地区水电工程所涉及的天然边坡高度已达 1000m 以上,开挖边坡高度已超过 500m,最高达 700m。这些边坡不仅高陡,而且地质结构和变形破坏历史极为复杂,天然边坡的稳定性评价和人工边坡的设计均难度极大,成为这一地区水能资源开发一个极具挑战性的科学和技术难题,在世界范围内也具有典型性和代表性。

本书结合四川省重点科技攻关项目——“四川岷江紫坪铺水利枢纽工程重大地质工程关键技术问题研究”,从系统工程地质学的角度,通过地质原型的深入调研和长期密切跟踪施工过程的施工地质研究,对该工程复杂环境条件下的高边坡稳定性开展了系统的研究工作;尤其是针对软岩高边坡的地质、力学特性,开展了长达近一年的软岩流变试验和软岩水理性、参数敏感性等方面的研究。这些研究成果对作者最后综合采用大型数值模拟的方法评价边坡的变形稳定性问题提供了有力的基础支撑。

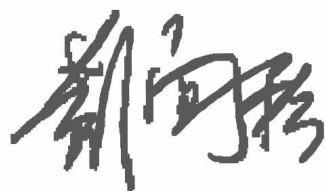
本书总体框架和研究思路由黄润秋、唐辉明、冯涛、薛利民和曹运江共同商议提出,各章节撰写分工如下:第一章由黄润秋和曹运江执笔,第二章由曹运江和黄润秋执笔,第三章由曹运江和郑海君执笔,第四章由曹运江和蔡国军执笔,第五章由曹运江执笔,第六章由曹运江、黄润秋与郑海君执笔,第七章由郑海君和曹运江执笔。全书最后由曹运江、杨小芹统稿。

该书的研究工作得到国家自然科学基金项目(项目编号:40572163, 41172275)、中国博士后基金项目(项目编号:20070420937)、成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室开放基金项目(项目编号:

GZ2005-07)、湖南省科技厅计划项目(项目编号:2012SK3111)、湖南省国土资源厅软科学研究计划项目(项目编号:2011-04)等的联合资助。

感谢张倬元教授为本书作序,感谢张老先生的一贯支持与鼓励。湖南科技大学科学技术处万文教授和土木工程学院陈秋南教授审阅本书稿,对他们所付出的艰辛劳动,表示最诚挚的感谢和崇高的敬意!同时,感谢曾经对本专著给予过极大帮助的单位和个人。

由于作者水平有限,文中欠妥之处在所难免,敬请读者不吝指正。

A stylized, cursive handwritten signature in black ink, likely belonging to Meng Qiu, the author of the preface.

二〇一二年孟秋谨识

目 录

序 前 言

第一章 概 论	(1)
第一节 工程概况	(1)
第二节 科学依据与意义	(3)
第三节 研究内容与目标	(6)
第四节 所解决的基本问题	(6)
第五节 技术路线	(7)
第六节 所完成的工作量	(7)
第七节 研究结果和成果	(8)
第二章 高边坡工程地质环境条件概况	(10)
第一节 区域地质背景	(10)
一、大地构造环境	(10)
二、构造活动与地震地质	(10)
第二节 坝区地形地貌	(12)
第三节 坝区地层岩性	(13)
第四节 坝区地质构造	(16)
一、褶皱构造	(16)
二、断层构造	(17)
三、裂隙构造	(19)
第五节 水文地质条件	(19)
第三章 软岩物质组成及显微构造特征研究	(20)
第一节 典型岩组特征	(20)
第二节 软岩岩矿鉴定分析	(25)
一、II—II'剖面岩组发育特征	(26)
二、VI—VI'剖面岩组发育特征	(27)
第三节 显微构造变形特征	(28)
一、I—I'剖面岩组显微构造特征	(28)

二、Ⅱ—Ⅱ'剖面岩组显微构造样式	(29)
三、Ⅵ—Ⅵ'剖面岩组显微构造样式	(30)
第四节 软岩成分组成及微观构造特征	(31)
第四章 软岩的水理性质研究	(32)
第一节 边坡岩体物理力学指标	(32)
第二节 软岩的崩解特性	(32)
一、软岩的崩解试验	(32)
二、软岩崩解机理分析	(35)
第三节 软岩的吸水特性	(39)
第四节 软岩的水理特性分析	(40)
第五章 软岩变形强度特性研究	(42)
第一节 概述	(42)
第二节 边坡软岩物性指标测试	(42)
第三节 点荷载法测试软岩强度指标	(44)
一、点荷载法试验的岩石破坏机理	(44)
二、点荷载测试成果分析	(45)
第四节 应力-应变全过程测试分析	(46)
一、岩石破坏机理	(46)
二、试验影响因素	(46)
第五节 压缩流变试验研究	(49)
一、试验实施方案	(49)
二、压缩流变饱水盒设计	(52)
三、压缩流变长期强度指标确定	(53)
四、压缩流变参数确定	(56)
第六章 软弱结构面的力学特性试验研究	(58)
第一节 边坡软弱结构面携剪试验研究	(59)
一、软弱结构面采样及试验方法	(59)
二、试验成果分析	(76)
三、试验成果及建议取值	(83)
第二节 边坡软弱结构面剪切流变试验研究	(85)
一、剪切流变试样采取及试验方法	(86)
二、试验仪器	(87)
三、流变试验方法	(88)
四、长期强度指标确定	(91)

五、软岩剪切流变参数确定·····	(101)
第七章 软岩对边坡稳定性影响的敏感性分析·····	(104)
第一节 概 述·····	(104)
第二节 软岩力学参数取值分析·····	(105)
第三节 边坡变形破坏形式及成因机制分析·····	(106)
一、边坡工程地质概况·····	(106)
二、边坡岩体结构及变形破坏模式分析·····	(108)
第四节 软岩对边坡影响的敏感性分析·····	(109)
一、模型的建立·····	(109)
二、开挖前软岩带的敏感性分析·····	(110)
三、开挖后边坡应力分布特征及变形趋势分析·····	(111)
四、支护条件下应力分布特征、变形趋势分析·····	(113)
第五节 监测资料分析·····	(114)
第六节 不同工况下软岩对边坡影响的敏感性分析·····	(117)
第七节 软岩对进水口边坡影响的综合评价·····	(118)
结束语·····	(120)
一、结论·····	(120)
二、存在问题·····	(121)
参考文献·····	(122)

第一章 概 论

第一节 工程概况

岷江是长江的一级支流，发源于四川西北部的岷山山脉南麓。被四川省政府列入西部大开发 1⁺ 工程的紫坪铺水利枢纽工程位于四川成都平原西部，岷江上游映秀至都江堰沙金坝河段麻溪乡。其下游 6km 处，则是闻名于世、距今已有 2268 年历史的都江堰水利工程，交通极为便利（图 1-1），工程主要参数见表 1-1。

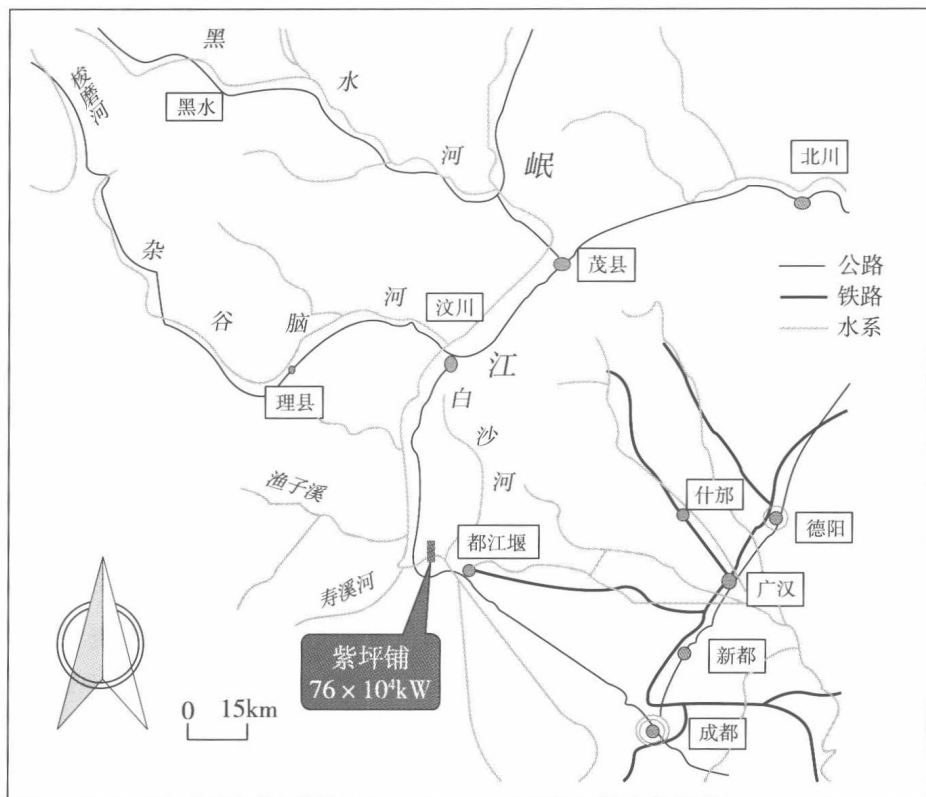


图 1-1 紫坪铺水利枢纽交通位置图

（据中国水电顾问集团成都勘测设计研究院，1994，略改）

该工程的兴建被誉为发挥最好灌溉效益、发电效益、防洪效益、生态效益，兼具供水、养殖及旅游等综合社会效益的“五利俱全”的大型水利枢纽工程（图 1-2）。同时，对提高成都府南河的治污、防洪等能力具有重大作用，可使下游防洪能力由 10 年一遇提高到 1000

年一遇,工程建成后灌区将达到 1400×10^4 亩^①,因此,被誉为都江堰的第二代工程。

表 1-1 紫坪铺水利枢纽工程主要参数一览表

量化项目	量化指标	备 注	量化项目	量化指标	备 注
正常蓄水位/m	高程 877.00	谷宽约 640	防洪库容/ m^3	1.664×10^8	
死水位/m	高程 817.00		调节库容/ m^3	7.74×10^8	
防洪高水位/m	高程 861.60		调节性能	不完全年调节	
汛限制水位/m	高程 850.00		控灌面积/亩	1400×10^4	灌区幅员面积达 3780
设计洪水水位/m	高程 871.20		总装机容量/MW	4×190	
设计洪水入库洪峰流量 $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	8300	$P=0.1\%$ (千年一遇)	多年平均发电量 $\text{kW} \cdot \text{h}$	34.17×10^8	
设计洪水下泄流量 $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	3077		年利用小时/h	4496	
校核洪水水位/m	高程 883.10		保证出力/MW	168	
校核洪水入库洪峰流量 $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	12700	洪水可能性 最大	坝型	混凝土面板 堆石坝	
校核洪水下泄流量 $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	4858		最大坝高/m	156	坝顶高程 884
水库总库容/ m^3	11.12×10^8		城市生活及工业用水 $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	50	
正常水位库容/ m^3	9.98×10^8		城市环保用水 $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	20	

受第四纪以来震荡式抬升、地层及构造等因素的综合控制,岷江在沙金坝河段由东北向折转向西,绕沙金坝顺时针迂回,形成凸向左岸的 180° 曲流河谷,使右岸山体成为三面临空、被河曲围抱的长约 1000m、底宽 400~650m 的单薄条形山脊,为一完整的沙金坝向斜构造,平面上呈“Ω”形。工程区水工建筑物都布置在右岸条形山脊内,根据工程枢纽区建筑物布置的需要,工程在坝区的相应部位开挖形成多个高陡边坡(最大可达 300 多米)。综合研究表明,开挖边坡受控于地层岩性、沙金坝向斜构造、微地貌等多重因素。加之地质条件极为复杂,边坡岩体卸荷强烈,质量相对较差,尤其是大量的层间剪切破碎带(多层煤系软弱地层)、向斜南东翼边坡中下部的 F_3 等断层及坝前倾向 NW 的一系列逆冲叠瓦推覆构造带的间接影响,形成对边坡稳定不利的岩体结构组合。区内软岩分布较广,大致可划分出泥化夹层、煤、炭质页岩、泥质粉砂岩等四种典型岩组。软岩的发育特征、空间展布形态直接关系到边坡整体稳定性和支护措施方案设计,对大坝基础的沉降与渗漏都会带来明显不利的影响。因此坝区边坡稳定性问题相当突出,需要全方位关注,寻求解决工程边坡岩体稳定性的控制性因素至关重要。

① 1 亩 $\approx 666.7 \text{m}^2$ 。

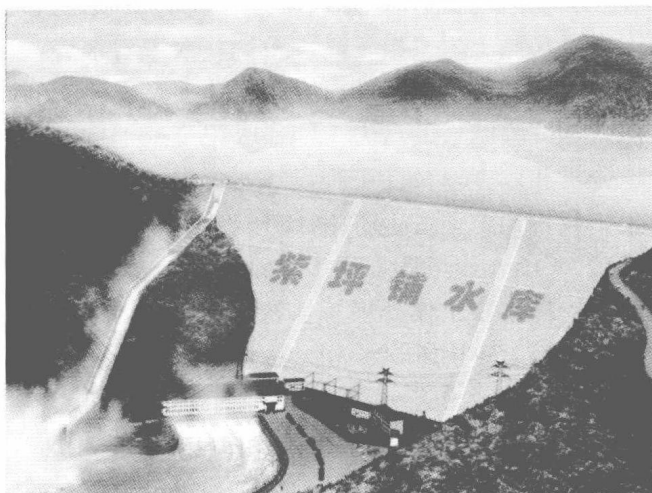


图 1-2 紫坪铺水利枢纽工程
(据中国水电顾问集团成都勘测设计研究院, 1994)

根据水工建筑物布置, 需要在相应部位开挖形成多个高陡边坡: 两岸坝肩及接头段边坡、1[#]和2[#]泄洪洞进(出)水口边坡、引水发电洞进水口边坡、溢洪道边坡及厂房后边坡等。上述工程边坡开挖后坡高最大可达300m左右。显然, 在这样复杂的地质环境条件下进行大规模工程开挖, 边坡稳定性问题极为突出。例如, 2002年2[#]导流洞出水口边坡施工开挖中, 就出现覆盖层滑坡, 并引起上部边坡变形破坏, 导致严重后果。

因此, 为确保工程施工期和运行期高边坡的稳定安全, 结合施工开挖过程所揭露的地质条件变化, 尤其是软岩工程特性, 进一步开展高边坡稳定性地质-工程研究, 从而为边坡合理设计与支护措施的确定提供科学依据是非常必要的。

第二节 科学依据与意义

软岩是世界上分布最广泛的一种岩石, 其中的泥岩和页岩就占地球表面岩石的50%左右。据不完全统计, 在水利水电工程建设中, 约有2/3均涉及软岩的工程地质问题。软岩是一种特定环境下具有显著变形的复杂力学介质, 给工程设计、施工带来一系列特殊问题, 因而软岩的研究引起国内外广泛的关注。软岩工程问题从20世纪60年代起就作为世界性难题被提出来。我国自20世纪70年代以来, 软岩工程遍及边坡工程、大坝工程、大型深埋地下长隧道工程等基础工程, 是当今科技攻关和工程实践的难点和热点之一。软岩由于其工程地质性质极差, 往往制约着工程建设的规模, 并对各类工程建筑的施工及运营起相当大的危害作用。如我国的长江葛洲坝工程, 由于在施工前对坝基下的软弱夹层研究不足, 成为停止施工一年的重要原因之一; 又如, 1959年12月2日21时10分左右, 法国的马尔帕塞(Malpasset)因左坝头沿片麻岩中的软弱夹层(绢云母页岩)发生滑动, 导致坝体破裂。其软弱岩体力学性质迫切需要进行深入研究。

软岩在浸水条件下, 其力学性质大幅度降低, 甚至导致完整岩体解体。如举世闻名的

意大利瓦依昂 (Vajont) 水坝, 高 258m, 在当时是最高的拱坝。近坝库区的山体由石灰岩和黏土岩组成, 由于当时对黏土岩未给予高度重视, 水库蓄水后, 黏土岩浸水膨胀而推动山体下滑。对于软岩浸水后的力学性质的研究, 目前多是现象学的研究, 通过试验分析一些普遍规律, 不够深入, 试验结果的潜力未能最大限度地挖掘。

在大量的边坡失稳分析和调查以及在工程设计实际中, 可以看到岩质边坡的失稳大都沿各种软弱结构面发生。我国对软弱结构面的研究始于 20 世纪 50 年代 (如狮子滩水电站), 而后在坝基、隧道、矿山、边坡等工程中, 都遇到过软弱结构面问题, 才开始引起各方面的重视, 各部门各单位结合工作开展了软岩结构面的研究。20 世纪 60 年代, 软弱结构面的研究进入了成因分类、室内外试验相结合选择抗剪强度的阶段。人们对软弱结构面的重视也比较早, 工程地质学者更进一步认识到软弱结构面对岩体变形和破坏特征具有优先控制作用。20 世纪 70~80 年代进入软弱结构面的深入研究阶段, 对其组成成分、微观结构、应力与应变关系、演变趋势、电算及模型试验等进行综合研究。可以说, 到目前为止, 特别是最近几年对软弱结构面的研究已取得突破性进展。

在研究初期, 对软弱结构面以研究其物理力学参数为目的, 例如 20 世纪 60 年代, 主要对其成因、室内现场试验进行研究。20 世纪 70 年代初期, 陈宗基教授对葛洲坝水电站的软弱结构面问题进行大量、系统而富有成效的研究, 提出了著名的第三屈服值 (流变屈服极限), 此值对工程的长期稳定性有重要意义, 被国际上誉为“陈氏屈服值”。通过研究软弱结构面黏粒含量与抗剪强度参数之间的定量关系, 能够对软弱结构面强度的本质及黏粒含量影响抗剪强度的机理有较深的认识。研究表明, 软弱结构面的抗剪强度随着充填的厚度增大而减小, 颗粒愈细的充填物具有这一效应愈明显。

软弱结构面的强度参数取值多以试验 (如携带式剪切仪剪切试验, 简称携剪试验, 下同) 为基础, 结合软弱结构面的其他特征 (如赋存环境与工程的相互作用等) 进行综合分析。试验研究仍是探索软岩特性的直接研究手段。就边坡软岩而言, 研究的重点将是扩容膨胀、崩解、软化、流变和黏性时效等问题。

软岩 (软弱结构面) 的变形不仅表现出弹性和塑性, 而且其变形破坏除与构造应力有关外, 还受到时间因素的影响, 即具有流变性。流变一词最早由古希腊哲学家 Heractitus 提出, 意思是万物皆流, 即所有物质都有流变性。流变学作为一门研究物质流动与变形的学科, 近年来其研究也迅速发展起来, 世界各国尤其是工业发达国家纷纷成立了流变学会, 如英国、德国、法国、荷兰、瑞典、日本、墨西哥、加拿大等。由 Bingham 建议于 1929 年成立了美国流变学会, 被公认为流变学历史的新纪元。

流变 (亦即蠕变) 是岩石材料的固有力学性质之一, 也是用来解释和分析地质构造运动和进行岩体工程长期稳定性预测的重要依据。岩土体的流变现象则到处可见: 法国有一坝体, 高 22m, 长 520m, 建在 6m 厚的裂隙黏土质砂岩上。建成 11 年, 由于岩 (土) 体的蠕变引起位移加速, 导致破坏。意大利比萨斜塔的下沉则是砂层地基中的黏土透镜体蠕变和挤压所引起的。前苏联有一个码头, 在剪应力长期作用下, 大约以 10mm/a 的速度产生位移, 在 70~100 年时间内最大蠕变位移达 50~100cm, 对码头结构产生严重的影响。很多水电站的施工期和运营期都很长, 工程边坡的稳定性不可避免地要与岩 (土) 体的流变有关。由于岩 (土) 体的流变对人们的生产生活产生重要的影响, 对其进行流变特性的研

究已日益引起人们的重视。

岩土流变的特性,国外学者对岩体流变特性的研究开展较早,国内外研究者较少注意。岩土流变的研究大致可追溯到20世纪30年代,1939年Griggs通过对砂岩、泥页岩、粉砂岩进行的大量试验研究得出:在较小的应力条件下,即荷载达到其极限强度的12.5%~80%时,岩体就表现出蠕变的特性。20世纪40年代,荷兰的佛拉格门(Flaggeman)大桥、齐特兹(Zuiderzee)海堤及软土铁路路基因流变而破坏,才引起了科学界对流变的重视。国内对岩体蠕变特性的研究起步较晚,但进步很快。1948年,陈宗基和荷兰的Geuze E. C. W. A首先开始对土流变学进行了系统的研究。1950年代以来,国内外已对软岩流变的本构规律进行过大量的研究。20世纪60年代,陈宗基教授等学者率先开展了流变学在岩土工程领域的研究,此后许多学者先后在这一领域作出了卓越贡献。可用流变试验说明岩石或岩体的流变特性如何,日本Kumagai N.曾根据始于1977年长达27年之久的流变试验,提出了令世人瞩目的花岗岩流变参数(王思敬,2004)。

软岩的时间效应除了表现在风化作用强烈且迅速之外,还表现在其流变特性实质。岩石流变性的研究广泛地涉及工程地质分析、地震机制、大型岩体工程长期稳定性评价、核废料及其他有害物质在地层深部的长期贮存,因而引起了岩石力学与岩土工程界的广泛关注,使理论发展得到实际应用的巨大推动。流变是一个时间效应的问题,而实际工程中软岩的蠕变是个长时间的过程,这个过程可以长达几十年至几百年。而在软岩的蠕变研究中,室内试验仍是目前研究流变现象的主要手段。在实验室研究中,由于技术以及各方面的实际条件所限制,软岩的蠕变试验只可能进行几小时或几天,少数试验进行几个月,极少数进行数年。而整个实验时间与软岩的蠕变过程相比只是极小的部分,但又不得不将短时间的蠕变试验结果外推到长时间的实际蠕变过程中去,因此,在软岩(软弱结构面)的蠕变试验中,充分考虑时效变形特性,在分级加载时,时间尺度效应对何时施加下一级荷载的标准起着关键性的作用。用最短的试验时间得到正确的蠕变曲线,使在短时间内得到的室内蠕变试验能正确地反映野外岩体蠕变的真实情况。

岩石流变特性研究的核心内容之一是流变模型的建立与应用。关于岩石流变模型的研究,目前已有许多可供选择的模型被建立起来。对于不同类型的岩石,可选用相应的流变模型来描述其特性。从已有的研究成果看,用虎克体(H)、牛顿体(N)、圣维南体(S)三个基本线性元件组成的复合流变元件模型,来拟合软岩的实验室或现场原位蠕变试验数据,以获得其流变本构模型的研究方法,能把软岩复杂的流变性质直观地表现出来,并且其数学表达式可直接描述蠕变、应力松弛及稳定变形,为大多数研究者所接受并采纳。

建在层间剪切破碎带(煤系地层)发育的水利枢纽工程,全世界屈指可数。随着我国西部水电进一步开发,研究软岩(软弱结构面)的时效变形性是一个不可回避的现实问题,涉及枢纽区开挖边坡(含软岩、软弱结构面)的长期强度问题,更是关系到水利水电工程建设的成败与否。基于此,软岩(软弱结构面)的时效变形性作为全面研究软岩流变的补充和深化。

第三节 研究内容与目标

1) 软岩水理性研究, 主要从软岩的吸水性, 遇水后发生泥化、软化和崩解进行系统的试验研究。根据崩解度及崩解物形态对几组典型软岩进行分类。

2) 软岩(软弱结构面)时效性研究, 通过对工程区软岩(软弱结构面)长期的直剪流变试验研究, 从流变元件模型出发, 利用实际工程边坡的流变数据, 研究软岩流变模型。采用流变元件模型是为了把复杂的性质用直观的方法表现出来。因为流变元件模型有助于从概念上认识变形的弹性分量和塑性分量, 并且其数学表达式能直接地描述蠕变及其稳定变形, 进而用流变元件模型解释边坡软弱岩体的各种特性, 同时, 确定软岩(软弱结构面)流变参数。软岩的时效变形明显, 是坝区多个开挖边坡岩体可能沿软岩带蠕滑拉裂破坏的潜在因素, 因此, 软弱岩带对边坡及其未来的稳定性起主要的控制作用。

3) 边坡(含软岩、软弱结构面)敏感性研究, 主要研究软岩变形与强度随时间的变化规律, 应用破坏准则探讨软岩内部矿物颗粒间变形破坏机制。

4) 软岩对边坡的敏感性分析研究, 合理而准确的强度参数取值, 是边坡抗滑稳定性评价的重要环节。强度参数具有理想的变异特性, 因此有必要通过有限元计算, 开展强度参数的敏感性研究。根据边坡所发育的软岩饱水携剪试验和直剪流变试验结果计算、分析, 并提出合理化的工程建议, 研究水库蓄水后开挖边坡的长期稳定性问题。

主要是通过软岩(软弱结构面)崩解试验、直剪流变试验及单轴压缩流变试验来研究紫坪铺枢纽区边坡内软岩的崩解特性、流变特性、流变机理。其中, 软岩(软弱结构面)瞬时变形试验主要通过携剪试验来完成并进行对比研究; 时效变形试验则借助于直接剪切流变仪所开展的流变试验研究。完成天然和饱水状态下的携剪试验、崩解试验、直剪流变试验、单轴压缩流变试验等, 期望通过大量的试验数据分析处理, 建立软岩(软弱结构面)的时效变形规律和流变本构方程。探讨流变机理, 求得软岩长期强度: 内聚力 C 、内摩擦角 φ , 以及流变参数: 剪切模量、弹性模量、黏滞系数。最后选用各种试验参数结果, 运用数值模拟方法, 对软岩发育边坡进行敏感性分析, 来模拟、分析坝区边坡运营的长期稳定性。

第四节 所解决的基本问题

本研究是以“四川岷江紫坪铺水利枢纽工程重大地质工程关键技术问题的系统研究”课题作依托, 选取边坡中所发育的特殊煤系地层软岩(软弱结构面)作为研究对象, 研究软岩(软弱结构面)的时效变形性(流变性)。利用自行设计的崩解仪和成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家专业实验室、四川大学水利水电学院、成都铁荣科工贸公司自主联合开发研制的集岩石多种流变(直剪流变、压缩流变等试验)于一体的新型试验仪。同时, 在流变仪系统内, 自行设计了几个不同规格的饱水盒, 可以全自动、全程饱水采集流变数据, 完成软岩(软弱结构面)天然状态或饱水状态蠕变的全程跟踪, 确定

时间与变形量之间的定量关系，达到研究软岩（软弱结构面）时效变形的目的。最后应用到紫坪铺枢纽工程边坡运营期中，解决实际问题，并向类似工程边坡推广应用。

课题研究完成后，把握了以下三个基本问题：

- 1) 崩解块度与时间的把握。
- 2) 流变试样的制备，软岩（软弱结构面）作为一种软弱易碎的特殊岩体，制备方法的选取显得非常重要。
- 3) 采集海量流变数据的系统处理，选取合适的软岩（软弱结构面）流变本构模型。利用有限元数值模拟方法，研究含软岩（软弱结构面）开挖边坡的长期稳定性问题。

根据拟解决的基本关键问题，获得如下方面的认识：

- 1) 结合工程边坡实际，就崩解度与循环崩解次数、崩解物破坏样式的关系，厘定出崩解岩类型和崩解破坏形式；
- 2) 饱水软岩（软弱结构面）流变特性的边坡工程应用。

第五节 技术路线

本书以软岩特性作为具体的研究主题，其研究思路及技术路线如图 1-3 所示。

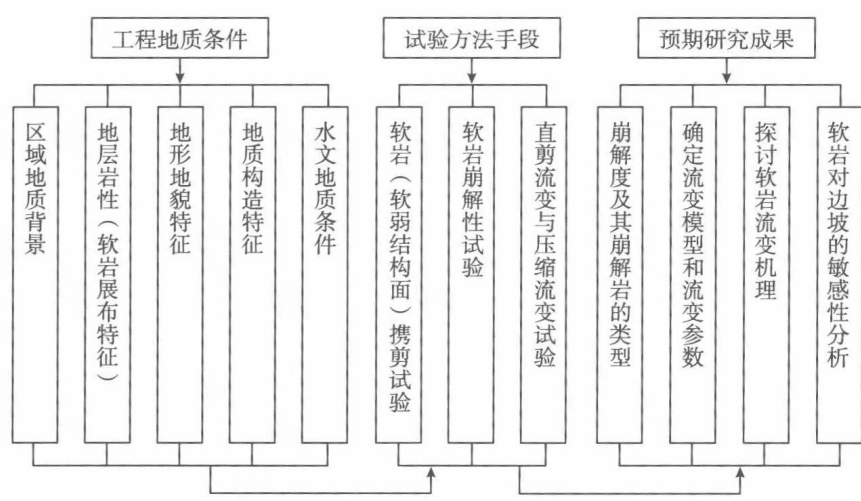


图 1-3 研究思路及技术路线

第六节 所完成的工作量

软岩的发育及其不利的物理力学性质将是制约边坡岩体稳定性的“瓶颈”，会对边坡的整体稳定性起到不同程度的控制作用。鉴于此，根据工程开挖边坡的施工特点与进度、稳定性评价及其研究需要，在对紫坪铺水电工程枢纽区基本地质条件及其各边坡岩体结构与变形破坏模式等研究基础上，开展对边坡岩体中工程部位所发育的软岩（软弱结构面）特性的一系列物理力学试验研究，所研究的试验成果，则为边坡的整体变形及稳定性评价