

岩体流变力学 特性与工程稳定性

中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司

李文纲 王仁坤 贺如平 王建洪 邓忠文 朱可俊 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

岩体流变力学 特性与工程稳定性

中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司

李文纲 王仁坤 贺如平 王建洪 邓忠文 朱可俊 著



中国水利水电出版社

www.waterpub.com.cn

·北京·

内 容 提 要

本书以大岗山水电站工程为例,对高拱坝坝基岩体的流变力学特性与工程稳定性进行了系统深入的研究。全书共6章:第1章概论,第2章岩体流变工程地质特性研究,第3章岩体流变力学特性试验研究,第4章岩体非线性流变力学模型与流变参数反演分析研究,第5章岩体三维渗流应力耦合流变模型研究,第6章岩体流变工程稳定性研究。本书对大岗山坝基岩体开挖期和运行期流变稳定性进行了分析评价,为坝基针对性基础处理提供了依据。

本书可供从事水电、水利、铁路、交通、建筑、矿山等行业的工程技术人员和有关高等院校相关专业的师生参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

岩体流变力学特性与工程稳定性 / 李文纲等著. —
北京:中国水利水电出版社, 2016. 11
ISBN 978-7-5170-4936-4

I. ①岩… II. ①李… III. ①高坝—拱坝—坝基—岩体流变学—力学性质—研究②高坝—拱坝—坝基—稳定性—研究 IV. ①TV642.4

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第284916号

书 名	岩体流变力学特性与工程稳定性 YANTI LIUBIAN LIXUE TEXING YU GONGCHENG WENDINGXING
作 者	中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司 李文纲 王仁坤 贺如平 王建洪 邓忠文 朱可俊 著
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 (营销中心)
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 19.75印张 468千字
版 次	2016年11月第1版 2016年11月第1次印刷
印 数	0001—1000册
定 价	95.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

序

众所周知，岩石（体）力学是一门富含理论内涵、实践性又很强的应用学科。岩体被广泛作为建筑物的地基以及边坡和围岩的介质，其自然属性及工程稳定性直接影响到建筑物运行与安全。随着国家西部大开发战略的实施，重大基础设施建设正以前所未有的速度展开。一批大型、巨型水电工程的建设，遇到了一系列复杂的岩石力学问题，其中高拱坝坝基岩体流变力学特性及其工程稳定性问题较为突出。虽然高拱坝要求建基于坚硬较完整岩体上，但坝基岩体往往存在一些地质缺陷，如断层、挤压错动带、软弱夹层、蚀变岩带等软弱岩带，以及坚硬、性脆、隐微裂隙发育的“硬、脆、碎”岩体，对坝基岩体稳定不利。同时，坝基岩体在开挖卸荷、大坝荷载及高渗透水压的长期作用下，将呈现出与时间有关的力学特性，主要表现为松弛、蠕变、弹性后效、时效强度和流变损伤断裂等，这些时效性的应力降低与变形，在很大程度上与坝基软弱岩带和“硬、脆、碎”岩体在开挖卸荷和长期荷载作用下产生应力松弛和流变变形密切相关。不连续性、非均质性和随时间的变化是工程岩体的基本特点，由此带来了岩体力学性质的复杂性、多变性和独特性，因而认识岩体力学性质最直接、最可靠的途径只能是对岩体（包括岩块和结构面）进行力学特性试验研究和变形监测，特别是与时间有关的岩体流变力学特性及其机理的研究。

《岩体流变力学特性与工程稳定性》一书以大岗山水电站工程为例，结合工程勘察、设计和施工实践，对高达210m的拱坝坝基岩体流变力学特性及其长期稳定性进行了系统深入的研究，首次揭示了复杂岩体流变的地质机理——受控于岩体的蚀变、结构和隐微裂隙的发育；首次采用预埋多点位移计的方法和声波长观对岩体开挖松弛变形进行了分别长达1.5年和4年的监测，证明开挖松弛变形不仅具有强烈的空间效应，还具有较为明显的时间效应，随坝体浇筑高度的增加，岩体声波逐步恢复增高，松弛岩体逐渐压密；

首次开展了“硬、脆、碎”辉绿岩岩体和软弱岩带原位大尺寸($\phi 1000$)单组长达100余天的压缩蠕变试验和原位大尺寸($500\text{mm}\times 500\text{mm}$)单组近300天的剪切流变试验,以及室内不同加卸载应力路径“硬、脆、碎”岩石三轴压缩蠕变试验和累计近3年的现场原位岩体流变试验;深入研究了软弱岩带和“硬、脆、碎”岩体的压缩蠕变特征、剪切流变特性及其流变破坏规律,揭示“硬、脆、碎”辉绿岩不同围压和加卸载方式条件下的蠕变应力门槛值;通过流变理论研究,建立了软弱岩带的变参数流变损伤模型和“硬、脆、碎”岩体的非线性黏弹塑性流变模型,并反演获取了岩体流变力学参数,进而研究复杂条件与过程(如高应力、高渗透压、高应变速率、温度-水流-应力化学耦合)的岩体流变力学特性,建立了坝基岩体三维渗流应力耦合效应的流变力学模型,开发了相应的计算分析程序,开展了坝基及边坡施工开挖期和蓄水运行期长期稳定性的数值分析,为大岗山坝基针对性基础处理提供了依据。水库蓄水以来,大坝整体安全稳定,是我国西部复杂高坝坝基岩体流变力学特性研究成果应用于设计和施工的范例。

总之,该书建立了一套较为完整的、有较强的针对性和适用性的复杂岩体流变力学特性研究的理论和方法,并在工程实践中得到了成功的应用。该书在学术上有重要创新,在应用上有新的突破,具有重要的学术价值和显著的工程实际意义,是工程岩石(体)流变力学领域一部优秀的学术专著。相信该书的出版,对提高国内外在更大范围内对岩体流变力学特性的认识水平和工程岩体的稳定性评价将产生深远的影响,并将极大地丰富岩体流变力学特性研究的理论与实践,具有重大的理论意义。

为此,我欣然作序,向广大读者推荐。

中国工程院院士
中国岩石力学与工程学会原理事长



2016年10月

前言

岩体被广泛作为建筑物的地基、边坡和围岩的介质，其自然属性及工程稳定性直接影响到建筑物运行与安全。随着我国基础设施工程建设的规模不断扩大，所遇到的岩体力学问题亦越来越复杂。工程实践与研究表明，工程岩体的失稳与破坏，在许多情况下并不是在施工期和运行初期立即发生，岩体应力与变形随时间而变化发展和不断调整，其调整的过程往往需要延续一个较长的时期。此外，岩体本身是一种十分复杂和多样的非均质材料，目前在描述和处理岩体材料力学性能方面，只能沿用弹性或弹塑性理论，存在明显的困难与不足，因此，必须考虑其性能的时间效应或其流变属性。

流变属性是指材料的应力-应变关系与时间因素有关的性质，材料的变形和应力松弛具有时间效应的现象称为流变。岩体的流变包括蠕变、松弛和弹性后效等。岩体作为一种复杂的地质体，流变特性是其重要的力学特性之一。由于岩体属于非均质、不连续、各向异性的地质介质，在长期荷载作用下，工程岩体的应力应变状态、变形破坏特征均随时间而不断发生变化，具有显著的时效特性，岩体表现出的流变特性对工程安全影响重大。

我国水电资源总量位居世界第一，其中西部水电资源占81%，但开发率较低，全国水电开发程度仅为约40%（截至2014年年底发电量）。因此，大力开发西部水电，实施“西电东送”是我国西部大开发战略的重要组成部分，也符合我国开发清洁再生能源的可持续发展国策。在西部大开发过程中，涌现出一批高拱坝，如已建成的雅砻江二滩拱坝（坝高240m）、黄河李家峡拱坝（坝高160m）、乌江构皮滩拱坝（坝高232.5m）、黄河拉西瓦拱坝（坝高250m）、澜沧江小湾拱坝（坝高294.5m）、金沙江溪洛渡拱坝（坝高285.5m）、雅砻江锦屏一级拱坝（坝高305m）以及大渡河大岗山拱坝（坝高210m），在建的金沙江乌东德拱坝（坝高265m），筹建的金沙江白鹤滩拱坝

(坝高 289m)。此外,正在勘测设计的坝高 200m 以上的拱坝有雅砻江孟底沟,金沙江叶巴滩、旭龙,怒江同卡、怒江桥、罗拉、松塔、马吉等。这些高拱坝工程规模巨大,要求建基于坚硬较完整岩体上,但这些高坝的坝肩坝基岩体内部常常分布有层间挤压带、层间和层内错动带、断层破碎带、蚀变岩带等软弱岩带和强度高、性脆、节理发育的“硬、脆、碎”岩体,对坝肩坝基稳定不利。同时,坝基岩体在开挖卸荷、坝体荷载及高渗透水压的长期作用下,将可能呈现出与时间有关的流变特性,主要表现为松弛、蠕变、弹性后效、时效强度和流变损伤断裂等,对高拱坝的施工安全及长期运行稳定产生不利影响,需要加强勘察设计论证,并采取针对性基础处理措施。当认识不到位、处理不当时,施工、运行期工程可能出现事故或留下安全隐患。因此,深入系统地开展高拱坝坝基岩体的流变力学特性与工程稳定性研究是十分必要的。其研究成果不仅对高拱坝设计具有直接的应用和推广价值,而且对于保证高坝工程的施工安全以及长期运行稳定具有十分重大的理论意义和工程应用价值。

本书在中国电力建设集团有限公司科技项目的支撑下,以大岗山水电站工程为例,对高拱坝坝基岩体的流变力学特性与工程稳定性进行了深入系统的研究,认识并首次揭示了岩体工程地质特性及流变地质机理;首次开展了“硬、脆、碎”辉绿岩岩体和软弱岩带原位大尺寸($\phi 1000$)压缩蠕变试验、原位大尺寸($500\text{mm}\times 500\text{mm}$)剪切流变试验、原位松弛变形监测以及室内不同加卸载应力路径三轴压缩蠕变试验,现场原位岩体流变试验时间累计近 3 年;深入研究了“硬、脆、碎”岩体和软弱岩带的压缩蠕变特征、剪切流变特性及其流变破坏规律,获取了坝基“硬、脆、碎”岩体和软弱岩带流变力学参数;进而,通过流变理论研究,建立了“硬、脆、碎”岩体的非线性黏弹塑性流变模型和软弱岩带的变参数流变损伤模型,开发了相应的流变计算程序,提出了岩体流变参数的解析反演、解析-智能反演和改进二次粒子群反演方法;建立了坝基岩体三维渗流应力耦合效应的流变力学模型。上述研究成果,成功地应用于大岗山水电站坝基及边坡岩体施工开挖期和蓄水运行期流变长期稳定性的分析评价,有效地指导了坝基基础处理设计和施工。

本书共分 6 章。第 1 章介绍目前国内外岩体流变力学的研究现状、背景,本书研究的思路、主要内容和成果;第 2 章介绍岩体流变地质机理研究的成果;第 3 章介绍岩体流变力学特性试验研究的成果;第 4 章介绍岩体非线性流变力学模型与流变参数反演分析研究的成果;第 5 章介绍岩体三维渗流应力耦合流变模型研究的成果;第 6 章介绍岩体流变工程长期稳定性分析评价及应用

于基础处理研究的成果。

本书出版得到了中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司的大力资助，作者在此深表谢意！同时，对参与本书相关内容研究的黄彦昆教授级高级工程师、邵敬东教授级高级工程师、苏红杰高级工程师等的大力指导和帮助，表示衷心感谢！

本书的完成也得到山东大学张强勇教授、朱维申教授、杨文东博士，成都理工大学沈军辉教授、苗朝博士，武汉大学陈胜宏教授、张雄博士等的大力支持和帮助，在此一并表示衷心感谢！

在本书的撰写过程中，参阅了国内外相关专业领域的大量文献资料，在此向相关作者表示衷心的感谢！

王思敬院士百忙之余为本书作序并给予高度评价，在此表示衷心的感谢！因时间紧迫，书中错漏和不妥之处在所难免，敬请读者批评指正。

中国工程勘察设计大师
国家能源水电工程研发中心技术委员会委员



2016年10月

目 录

序	
前言	
第 1 章 概论	1
1.1 研究背景	1
1.2 研究思路及主要内容	5
1.3 研究成果及创新.....	10
第 2 章 岩体流变工程地质特性研究	18
2.1 引言.....	18
2.2 典型高拱坝岩体工程地质条件.....	19
2.3 岩体建造.....	27
2.4 岩体构造改造及浅表生改造.....	31
2.5 岩体蚀变.....	43
2.6 工程岩体开挖效应分析.....	58
2.7 岩体流变工程地质特性研究.....	72
第 3 章 岩体流变力学特性试验研究	76
3.1 引言.....	76
3.2 “硬、脆、碎”岩体流变力学特性试验研究	76
3.3 软弱岩带流变力学特性试验研究	162
3.4 “硬、脆、碎”岩体与软弱岩带流变试验成果对比分析.....	190
3.5 岩体流变试验成果的地质分析	195
第 4 章 岩体非线性流变力学模型与流变参数反演分析研究	208
4.1 引言	208
4.2 “硬、脆、碎”岩体非线性流变力学模型与流变参数反演分析研究.....	209
4.3 软弱岩带非线性流变力学模型与流变参数反演分析研究	234

第 5 章 岩体三维渗流应力耦合流变模型研究	252
5.1 引言	252
5.2 “硬、脆、碎”岩体渗流应力耦合流变模型研究.....	253
5.3 软弱岩带渗流应力耦合流变模型研究	258
第 6 章 岩体流变工程稳定性研究	262
6.1 引言	262
6.2 坝基开挖稳定性分析	262
6.3 坝基岩体渗流应力耦合长期流变稳定性分析	292
6.4 坝基基础处理	296
参考文献	305

第 1 章 概 论

1.1 研究背景

我国水电资源总量位居世界第一，其中西部水电资源占 81%，但开发率较低，全国水电开发程度仅为约 40%（截至 2014 年年底发电量）。因此，大力开发西部水电，实施“西电东送”是我国西部大开发战略的重要组成部分，也符合我国开发清洁能源的可持续发展国策。在西部大开发过程中，我国西部地区涌现出一大批已建、在建和筹建的高拱坝，如已建成的雅砻江二滩拱坝（坝高 240m）、黄河李家峡拱坝（坝高 160m）、乌江构皮滩拱坝（坝高 232.5m）、黄河拉西瓦拱坝（坝高 250m）、澜沧江小湾拱坝（坝高 294.5m）、金沙江溪洛渡拱坝（坝高 285.5m）、雅砻江锦屏一级拱坝（坝高 305m）以及大渡河大岗山拱坝（坝高 210m），在建的金沙江乌东德拱坝（坝高 265m），筹建的金沙江白鹤滩拱坝（坝高 289m）。此外，正在勘测设计的坝高 200m 以上的拱坝有雅砻江孟底沟，金沙江叶巴滩、旭龙，怒江同卡、怒江桥、罗拉、松塔、马吉等。这些高拱坝工程规模巨大，均要求建基于坚硬较完整岩体上，但坝基往往存在一些地质缺陷，如断层、挤压错动带、软弱夹层、蚀变岩带等软弱岩带，以及坚硬、性脆、隐微裂隙发育的“硬、脆、碎”岩体，对坝基稳定不利。同时，坝基岩体在开挖卸荷、坝体荷载及高渗透水压的长期作用下，将可能呈现出与时间有关的变形特性，主要表现为松弛、蠕变、弹性后效、时效强度和流变损伤断裂等，对高拱坝的施工安全及长期运行稳定产生不利影响，需要加强勘察设计论证，并采取针对性基础处理措施。当认识不到位、处理不当时，施工、运行期工程可能出现事故或留下安全隐患。如法国马尔帕赛拱坝，坝高 66.5m，右岸上部发育平行坝基的断层，大坝于 1959 年 12 月 2 日突然溃决，造成 400 余人死亡；我国安徽省梅山连拱坝，坝高 88m，1962 年 11 月 6 日右岸坝基突然大量渗漏水，坝体出现几十条裂缝，大坝处于危险状态，被迫放空水库进行加固；陈村重力拱坝，坝高 76.3m，1977—1979 年低水位运行时，发现大坝下游面 105.00m 高程处水平向大裂缝明显扩展，拱冠部位裂缝扩展 1.39mm，河床 10 个坝段的缝深超过 5m，坝体出现严重缺陷；佛子岭连拱坝，坝高 75.9m，1993 年 11 月下旬河床 13 个垛墙顶向下游的位移量都超过了历史最大值，被迫控制水位运行。这些拱坝出现较大变形与破坏，在很大程度上与坝基岩体软弱岩带等在荷载长期作用下产生流变变形密切相关。因此，深入系统开展高拱坝坝基岩体的流变力学特性

与工程稳定性研究是十分必要的，其研究成果不仅对高拱坝设计具有直接的应用和推广价值，而且对高拱坝施工开挖安全、运行长期稳定具有重大的工程意义和社会意义；同时，极大丰富了岩体流变力学特性研究的理论与实践，具有重大的理论意义。

岩体被广泛作为建筑物的基础以及边坡和围岩的介质，其自然属性及工程稳定性直接影响到建筑物运行与安全。工程实践与研究表明，工程岩体的失稳与破坏，在许多情况下并不是在施工期和运行初期立即发生，岩体应力与变形随时间而变化发展和不断调整，其调整的过程往往需要延续一个较长的时期。此外，岩体本身是一种十分复杂和多样的非均质材料，目前在描述和处理岩体材料力学性能方面，只能沿用弹性或弹塑性理论，存在明显的困难与不足，因此，必须考虑其性能的时间效应或其流变属性。

流变属性就是指材料的应力-应变关系与时间因素有关的性质，材料变形过程中具有时间效应的现象称为流变现象。岩体的变形不仅表现出弹性和塑性，而且也具有流变性质。岩体的流变包括蠕变、松弛和弹性后效等。蠕变是当应力不变时，变形随时间增加而增长的现象。松弛是当应变不变时，应力随时间增加而减小的现象。弹性后效是加载或卸载时，弹性应变滞后于应力的现象。岩体作为一种复杂的地质体，流变特性是其重要的力学特性之一。由于岩体属于非均质、不连续、各向异性的地质介质，在长期荷载作用下，工程岩体的应力应变状态、变形破坏特征均随时间而不断发生变化，具有显著的时效特性，岩体表现出的显著时间相关性对工程安全影响重大。可见，对复杂的岩体材料的流变特性及其工程长期稳定性进行系统深入研究，不仅能够丰富和拓宽岩石力学学科研究领域的内容，而且可以为实际岩体工程提供有价值的成果，具有重要的理论意义。

20世纪30年代以来，国外开始对岩石流变特性及其本构关系开展试验与理论研究。1939年Griggs根据对砂岩、泥岩、粉砂岩等进行的蠕变试验，提出采用对数型经验公式来描述岩石流变本构关系。

我国的岩石流变力学研究始于20世纪50年代末期，岩石力学的先驱者陈宗基先生对砂岩进行过8400h的蠕变试验，研究了岩石的封闭应力、蠕变和扩容现象，建立了岩石流变扩容方程。

20世纪80年代，中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司（以下简称成都院）在二滩水电站对坝基蚀变玄武岩进行了现场柔性承压板（ $\phi 1000$ ）岩体压缩蠕变试验；2000年在溪洛渡水电站对坝基层间层内错动带开展了现场柔性承压板（ $\phi 1000$ ）岩体压缩蠕变试验；2003年在锦屏一级水电站对坝基绿片岩、层间挤压带进行了现场柔性承压板（ $\phi 1000$ ）岩体压缩蠕变和室内中型剪切流变试验；2006年在大岗山水电站对坝基辉绿岩脉及断层破碎带进行了现场中心孔刚性承压板（ $\phi 1000$ ）岩体压缩蠕变试验；2010年在锦屏一级水电站对坝址左岸 f_{42-9} 断层开展现场中心孔刚性承压板（ $\phi 1000$ ）岩体压缩蠕变和室内中型剪切流变试验。2009年中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司在白鹤滩水电站对坝基柱状节理玄武岩进行现场柔性双枕法（ $30\text{cm} \times 50\text{cm}$ ）岩体压缩蠕变和层内错动带剪切流变试验。通过上述一系列现场原位岩体压缩蠕变试验、室内岩石流变力学试验、理论分析、数值仿真和现场监测等，取得了一批具有价值的成果，在对高拱坝坝基岩体流变力学特性与工程稳定性的研究中进行了有益的探索，并初步应用于工程设计。岩体流变力学试验研究成果见表1.1。

表 1.1 部分高拱坝工程岩体流变试验成果

工程名称	岩性及地质特征	压缩蠕变		剪切流变				备注
		E_{∞} /GPa	E_{∞}/E_0 /%	f	f_{∞}/f /%	c /MPa	c_{∞}/c /%	
二滩	纤闪石化玄武岩, 微风化-新鲜, 碎裂-镶嵌结构	0.80~1.50	83.0					现场
溪洛渡	弱风化上段含屑角砾型错动带 (Lc-8 层内错动带)	0.22	61.6					现场
锦屏一级	层间挤压错动带, 平均厚度 20~22cm, 风化蚀变, 挤压较紧密。带内夹片状碎屑及泥质物质, 厚度 3~20mm	2.93	71.9					现场
		3.82	78.0					
	钙质绿泥石片岩, 新鲜, 片理发育良好			0.38	88.6	0.10	20.0	室内
	钙质绿泥石片岩, 微新, 片理发育程度相对较差			0.85		0.70		
大岗山	弱风化下段, 弱卸荷, 辉绿岩脉	0.54~0.89	88.3					现场
	辉绿岩脉	0.21~0.29	88.3					
白鹤滩	柱状节理玄武岩	13.17	89.7					现场
	层内错动带			0.29	81.0	0.01	13.0	

目前, 国内外学者对软岩、软弱岩带进行了不同加载条件下的单轴、三轴压缩蠕变试验, 但针对坚硬、性脆、隐微裂隙发育的“硬、脆、碎”岩体, 尚未开展其在不同应力路径下的室内三轴压缩蠕变试验; 对岩石流变力学特性的试验研究也主要集中在室内试验方面, 而由于现场流变试验耗资费时、难度较大, 仅开展了少量现场岩体压缩蠕变试验, 现场岩体剪切流变试验, 尤其针对“硬、脆、碎”岩体更是处于空白状态。

岩石(体)流变力学特性的研究现状具有以下显著特点:

1. 研究对象

(1) 流变试验研究对象仍以岩石为主, 仅少数工程进行过岩体压缩蠕变试验, 试验结果不能全面反映岩体流变的实际特性。工程岩体由结构面分割并形成一定的结构类型, 其蠕变变形和长期强度受结构面和结构体两方面流变特性的影响。因此, 有必要进行结构面和含结构面岩体的流变试验。

(2) 流变试验主要集中在软岩流变力学特性研究方面, 坚硬岩石(花岗岩、灰岩、辉绿岩)流变力学特性的研究相对较少。主要是人们对软岩和软弱岩带具有明显的流变特性认识较深, 对坚硬岩石流变特性的认识还有待深化。

2. 研究内容

(1) 变形研究较多, 强度研究少。已有的岩体流变试验研究, 以压缩蠕变试验为主, 剪切流变试验开展较少。

(2) 尚无人开展“硬、脆、碎”岩体的流变力学试验, 包括岩石室内三轴压缩蠕变试

验、岩体现场压缩蠕变试验及剪切流变试验。

(3) 岩体卸荷松弛时间效应研究少。通过大量加载试验及理论分析,已建立起反映岩体在加载条件下发生变形破坏的较为完整的理论。然而,由于卸荷松弛与连续加载具有完全不同的应力路径,两者所引起的岩体变形和破坏特性,无论在力学机理还是力学响应上都有很大差异,故沿用连续加载强度理论来预测工程岩体在开挖卸荷作用下的力学特性及其稳定性,显然会产生明显的误差。

在工程界,对岩体松弛及时效变形测试的主要方法有地震声波法、超声波测井法、探地雷达、微地震监测、钻孔全景图像测试及多点位移计监测等。国内利用声波长观及钻孔全景图像测试对坝基岩体的松弛情况进行监测是最近几年才发展起来的。

3. 研究设备和方法手段

(1) 早期流变力学试验设备与方法较落后,试验条件仅能在一定程度上还原原始赋存环境,随科技的发展正在逐渐改进。

(2) 研究方法和手段的不足主要体现在以下方面。

1) 仅开展了少量现场岩体压缩蠕变试验,未开展现场岩体剪切流变试验。由于现场岩体流变试验人力物力投入大、技术难度大、试验周期长,而室内岩石流变试验条件易控制、成本较低,故室内岩石流变力学试验研究开展较多。

2) 宏观研究多,微观研究少。由于目前测试技术的制约及研究方法的不完善,在微观观上对岩石流变特性大多是定性的研究,量化的研究成果较为少见。

3) 岩体流变力学特性与其内在地质机理研究结合少。坝基岩体作为地质体的一部分,其地质本质性包括物质组成、结构构造,赋存环境(地应力、地下水、温度)等。如高地应力条件下岩石自然埋藏中挤压紧密,岩石结构效应淡化,其物理力学性能强于低应力条件下的岩石。当岩石从高应力向低应力状态转化时,聚集的应变能释放,伴随着体积膨胀,结构松弛,结构效应显化,同时物理力学性能下降,甚至比长期低地应力条件下的岩石更差。

通过宏观岩石流变试验,得到了各种岩石的流变力学特性,但由于缺少对岩石所处宏观地质环境及流变微细观物质、结构变化的研究,对岩石流变机理无法解释清楚。只有既对岩石流变的力学现象进行深入的认识,还要对岩石流变的本质进行深入研究,才能从岩石赋存环境及微细观结构变化的角度把握岩石流变力学特性及其规律。

4. 理论水平尚未成熟

国内对岩石流变力学特性的研究随着葛洲坝、二滩、三峡等大型水电工程的兴建而成为岩石力学研究的热点,但至今,理论水平尚不成熟。国内外流变研究重视岩石流变力学试验的设计与研究及在此基础上的流变本构模型的建立与参数选取,相对忽视从地质科学的角度作出流变力学行为的解释,研究理论缺少地质机理的分析。

5. 工程应用

岩石流变的本构模型研究是岩石流变力学理论研究中最基本也是最重要的组成部分,同时也是将试验研究成果用于工程实践的必经环节。经过数十年的研究,岩石力学与工程界已经积累了许多关于岩石流变本构模型的理论研究成果。

但是现有岩石流变模型主要是通过对流变试验结果进行分析,建立符合试验曲线的元

件组合模型或经验模型，而元件组合模型和经验模型无法描述加速流变阶段，尽管有些学者也提出了一些可以描述岩石加速流变阶段的非线性流变元件模型，但由于这些模型方程复杂，模型参数多，目前多停留在理论研究阶段，离实际应用尚远，与工程应用结合甚微。

因此，岩石流变特性的研究必须由外及内、从现象到本质、将宏观与微观相结合，这样才能将岩石流变特性研究透彻，掌握其内在规律，提高理论水平，从而对其进行有效的控制和利用，更好地为工程建设服务。

本书旨在通过对高拱坝坝基“硬、脆、碎”岩体和软弱岩带的工程地质特性深入研究，以及一系列岩体流变力学特性试验研究，从而达到：①研究高拱坝坝基岩体的流变力学特性与工程稳定性分析评价理论与方法体系。②揭示高拱坝坝基“硬、脆、碎”岩体和软弱岩带的非线性流变变形特征及破坏特性。③研究高拱坝坝基岩体的非线性流变力学模型、流变参数优化反演方法。④进行高拱坝坝基岩体施工开挖稳定与运行长期稳定的分析评价。

1.2 研究思路及主要内容

1.2.1 主要关键技术问题

(1) 以“硬、脆、碎”岩体和软弱岩带为主要研究对象，从岩体建造、构造和浅表生改造、蚀变特征等宏观与微观分析及声波波速监测等研究入手，揭示岩体流变地质机理，该研究尚属首次，是研究的关键技术。

(2) 新开展的具有“硬、脆、碎”特征的岩体流变力学特性试验，其取样易碎，制样难度大，要做到不扰动条件原状制样，是研究的关键技术。

(3) 研究坝基“硬、脆、碎”岩体和软弱岩带的流变力学特性，除开展现场原位常规变形（承压板直径505mm）和强度试验外，还需开展现场原位大尺寸中心孔承压板（直径1000mm）压缩蠕变试验，首次开展原位剪切流变试验，以及“硬、脆、碎”岩体室内三轴常规与流变强度试验研究。因此如何开展上述原位大尺度流变力学试验及原状制样就成为研究的关键技术。

(4) 现场原位“硬、脆、碎”岩体和软弱岩带剪切流变试验研究历时长，往往一组试验时间长达250~300天，岩体松弛观测达500天，如何在试验过程中有效控制压力、温度及湿度稳定，是又一关键技术。

(5) 根据流变试验成果，应用相关力学理论，通过研究，探索建立坝基“硬、脆、碎”岩体和软弱岩带的流变损伤本构模型和相应计算分析方法是有效揭示高拱坝坝基岩体非线性流变力学特性的关键技术。

(6) 坝基岩体的流变力学参数是进行高拱坝坝基稳定计算的重要参数，如何建立快捷、简便、准确的流变参数优化反演方法是本书的又一关键技术。

(7) 高拱坝坝基岩体开挖至坝体浇筑需要较长的周期，因此坝基岩体施工开挖的稳定性研究也是关键技术。

(8) 坝基长期稳定是高拱坝安全运行的重要保证，而坝基渗流也是影响坝基稳定的重

要因素，因此考虑坝区渗流场和应力场的耦合效应，探索建立坝基渗流应力耦合流变模型和相应计算分析方法也是研究坝基长期稳定的关键技术。

1.2.2 研究方法

主要依托大岗山等大型水电高拱坝工程，采用工程地质调研、室内外常规试验和大尺寸原位流变力学试验、松弛监测、声波检测监测等多种手段，综合应用工程地质学、岩体力学、流变力学、损伤力学、渗流力学等理论方法，借助计算编程、数值分析等计算手段，系统地开展研究工作。

1.2.3 研究技术路线

具体研究技术路线见图 1.1。

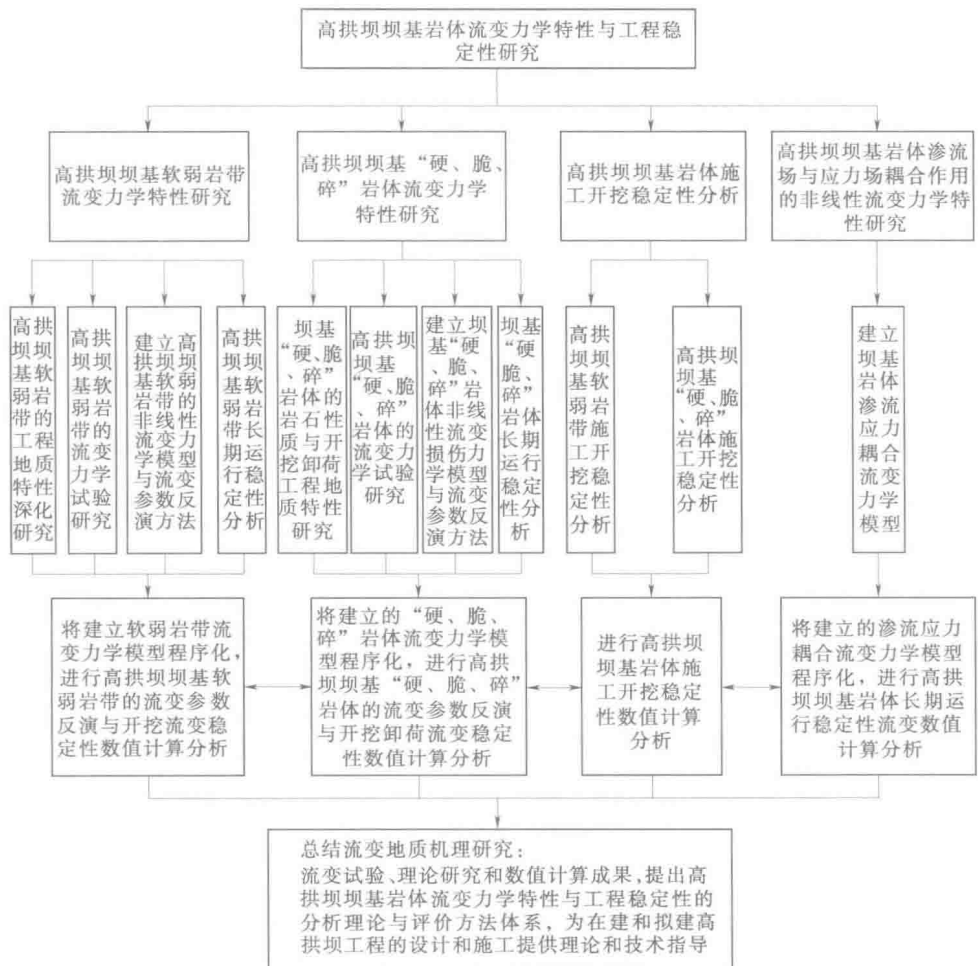


图 1.1 研究技术路线图

1.2.4 研究内容

依托大岗山水电站工程，重点开展以下研究：

(1) 开展工程地质特性的深化研究, 进一步系统深入地揭示大岗山坝基“硬、脆、碎”岩体及软弱岩带的发育特征、岩石的微观结构及工程地质性状。

(2) 开展高拱坝坝基“硬、脆、碎”岩体的岩石性质、开挖卸荷松弛监测、岩体工程地质特性和岩体力学特性研究。

(3) 开展高拱坝坝基“硬、脆、碎”岩体的现场压缩蠕变、剪切流变及室内常规物理力学性质试验、室内三轴压缩蠕变试验, 重点研究“硬、脆、碎”岩体的非线性流变变形特征与破坏特性。

(4) 开展高拱坝坝基软弱岩带的现场压缩蠕变、剪切流变及室内常规物理力学性质试验, 重点研究坝基软弱岩带的非线性流变变形特征与破坏特性。

(5) 根据坝基岩体流变试验成果, 研究建立高拱坝坝基“硬、脆、碎”岩体和软弱岩带的非线性流变力学模型及流变参数反演方法。

(6) 开发非线性流变力学计算程序, 对高拱坝坝基岩体施工开挖稳定进行流变数值计算分析。

(7) 研究探索坝基岩体的渗流场与应力场的耦合作用效应。

(8) 进行高拱坝坝基岩体施工开挖稳定与长期运行稳定的分析评价。

研究工作量见表 1.2, 代表性试验点位布置见图 1.2。

表 1.2 研究工作量表

研究工作内容		单位	工作量	备注
勘探及 资料 整编	典型工程坝基岩体工程地质条件资料收集整理	项	1	大岗山等 10 个工程
	平洞掘进及地质编录	m/条	255.1/6	
	钻孔	m/孔	90/13	
	现场及室内试验地质素描	组	9	辉绿岩
		组	6	软弱岩带
	声波检测	m/孔	6723.4/435	9~12 个月长期监测
	钻孔图像测试	m/孔	933.1/45	9~12 个月长期监测
辉绿岩 试验	辉绿岩岩石磨片鉴定	组	20	
	辉绿岩电镜扫描	组	14	
	辉绿岩岩石 X 衍射分析	组	5	β_1
	辉绿岩岩石物理力学性质试验	组	6	
		组	19	前期
	辉绿岩岩石三轴压缩试验	组 (件)	1 (7)	β_1
		组 (件)	3 (30)	前期
	辉绿岩岩石三轴压缩蠕变试验	组 (件)	4 (14)	β_1
	辉绿岩岩体变形试验	点	2	现场原位, β_{133}
		点	27	前期
辉绿岩岩体压缩蠕变试验	点	2	现场原位, β_{133}	
	点	1	前期	