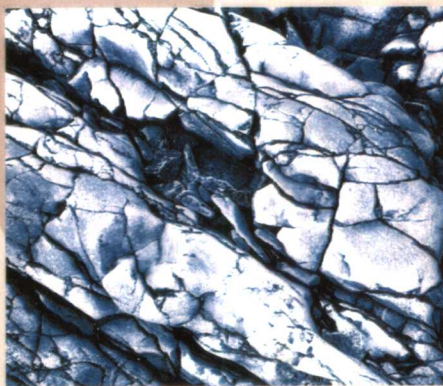


岩土工程国家重点学科专著系列

NATIONAL KEY SUBJECT GEOTECHNICAL  
ENGINEERING MONOGRAPH SERIES

# 裂隙岩体水力学基础

朱珍德 郭海庆 著



科学出版社

[www.sciencep.com](http://www.sciencep.com)

岩土工程国家重点学科专著系列

# 裂隙岩体水力学基础

朱珍德 郭海庆 著

国家自然科学基金资助研究项目

科学出版社

北 京

## 内 容 简 介

本书系统叙述了裂隙岩体水力学基本理论、方法和应用。全书共八章:第一章介绍了裂隙岩体水力学的发展现状;第二章阐述了裂隙岩体渗透结构面的水力特性;第三章探究了渗流对裂隙岩体损伤断裂的影响和机制;第四章讨论了裂隙岩体渗流场的数值计算模型与坝基裂隙岩体流变模型,提出了坝基裂隙岩体渗流与流变的耦合模型;第五章探讨了渗流对裂隙岩体损伤演化的贡献与渗透张量随裂隙损伤发展的演化,给出了裂隙岩体非稳态渗流场与损伤场耦合方程;第六章与第七章介绍了红山窑膨胀红砂岩力学、变形特性以及湿化的试验研究;第八章通过对膨胀红砂岩细观结构量化和损伤演化规律分析,给出了初步的红砂岩细观本构力学模型。

本书可供从事岩石力学研究的科技人员阅读,也可作为高等院校相关专业的研究生教材。

### 图书在版编目(CIP)数据

裂隙岩体水力学基础/朱珍德,郭海庆著. —北京:科学出版社,2007  
(岩土工程国家重点学科专著系列)  
ISBN 978-7-03-018942-4

I. 裂… II. ①朱… ②郭… III. 岩石力学—水力学 IV. TU45

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 066047 号

责任编辑:童安齐 / 责任校对:赵 燕

责任印制:吕春珉 / 封面设计:耕者设计工作室

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>

新 华 印 刷 厂 印 刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2007 年 5 月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2007 年 5 月第一次印刷 印张:16

印数:1—2 000 字数:310 000

定价:40.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈新欣〉)

销售部电话 010-62136131 编辑部电话 010-62137026(BA08)

## 前 言

人类工程活动的日益频繁,涉及裂隙岩体边坡的设计、水利水电工程渗流域控制、水库诱发地震的预测、有害核废料的处置、矿井的疏干降压排水、石油和地热能的开发以及地下水资源的开发与利用等多方面。人类工程活动的安全性,对地质环境的影响程度,地质环境对工程活动的反作用以及工程体的稳定性等问题,是科学家最为关心的问题之一。如何定量评价和预测人类工程在开挖干扰力与自然力的作用下节理裂隙岩体与地下水相互作用关系,以及裂隙岩体与地下水耦合作用对人类工程体和岩质边坡稳定性的影响,是研究裂隙岩体水力学的主要任务,也是一项具有理论研究和实际工程应用前景的重大课题。

岩体是一类力学性质很复杂的介质,属非均匀各向异性介质。裂隙岩体水力学是以水文地质学、工程地质学为基础,并运用数学、力学、渗流力学和岩体力学的理论。损伤力学、断裂力学、流变力学、分形理论与岩体的变形研究有着特别密切的关系。由于岩体结构的复杂性,导致岩体渗流的非均质性和各向异性;岩体裂隙空间是岩体的主要渗透通道,岩体裂隙显著地受应力环境的影响,因而岩体的变形实质上是渗流场、应力场、损伤场三者相互耦合的结果,这已成为岩石力学具有挑战性的课题之一。因此,为了适应科技发展的需要,撰写一本有关裂隙岩体水力学方面的专著很有必要。

全书共八章,第一章简单回顾了裂隙岩体水力学的研究历史与现状。第二章通过研究裂隙岩体渗流的特点,提出了渗透结构面的定义,而隙宽和粗糙性是描述渗透结构面几何特征的两个最基本的参数。根据裂隙面分形维数、位错值和面积接触率,采用分形几何法模拟渗透结构面的几何形态和张开度分布情况,并基于立方定律,把渗透结构面离散成为许多等大小的正方形网格,对渗透结构面的渗流特性进行数值模拟。第三章通过全应力-应变过程数控岩石渗透性及其断裂断口扫描电镜试验研究,进一步分析脆性岩石裂隙扩展损伤机理,重点探讨渗透水

压对岩体强度及其变形的影响,以及渗流使裂纹尖端介质软化之作用。第四章运用裂隙岩体渗流场的数值计算模型,以龙羊峡大坝为例,研究因坝基岩石的流变产生的时效位移的分析方法,并在此基础上结合大坝的位移疑点,进行渗流场与粘弹性、粘弹塑性流变应力场的耦合分析,解析该坝典型坝段的变形过程,验证提出的模型及计算方法的正确性。第五章探讨渗流对裂隙岩体应力场的力学效应,重点推导复杂应力状态下渗流对裂隙损伤演化方程的贡献,建立裂隙岩体非稳态渗流场与损伤场耦合方程,并将研究成果应用于三峡工程中永久船闸高边坡变形预测与稳定性分析。第六章通过对膨胀红砂岩进行变形性质、力学特性以及湿化性试验研究,提出确定膨胀稳定时间的理想概化数学模型,同时研究膨胀力与膨胀变形的规律以及红砂岩湿化机理。第七章以弹塑性理论为基础,研究材料固有特性,建立应力、应变及含水率等之间的本构关系,分别提出膨胀红砂岩弹性和塑性状态下的本构模型,从而编制膨胀问题的有限元计算程序,进行有限元数值模拟,并将计算结果与室内试验实测结果对比,分析各种情况下的受力特点与变化规律。第八章通过对红砂岩细观损伤演化的试验研究,详细地分析了随含水率变化的应力应变曲线、单轴抗压强度、弹性模量等变化规律,在此基础上,采用损伤力学理论,建立细观本构模型,并进行了模型验证。

本书在撰写过程中注意了学科体系的完整性,强调基本概念描述的准确性,以及基本理论推理的严密性和实用性。本书内容新颖、理论性强,为了便于读者阅读,书中对一些重要的公式进行了较为详细地推导。

书中的部分内容为国家自然科学基金课题、国家自然科学基金重点基金项目的研究成果。感谢河海大学“211工程‘十五’规划建设”的鼎力相助,才使我们较早的将成果总结与读者见面。本书第一章、第三章、第五章至第八章由笔者撰写;第二章、第四章由郭海庆副教授撰写。本书得到张乾飞博士的帮助,在此表示感谢。

著者感谢山东大学岩石力学与工程著名专家朱维申教授、李术才教授,中国科学院武汉岩土力学研究所陈卫忠教授一贯的支持和鼓励,感谢张爱军、张勇两位硕士的大力帮助,以及硕士研究生李道伟、施毅、王青、杨子良的支持。

为了对裂隙岩体水力学有全面深入的了解,书中对国内外其他研究人员取得的成果也作了扼要介绍和引用,谨此致谢。

应该指出,裂隙岩体水力学是一门正在发展着的边缘性交叉学科,有许多理论和实际应用问题尚需作进一步的研究和完善。由于作者水平及经验有限,书中存在不足之处,恳请前辈及同仁不吝赐教。

朱珍德

2006年12月

于古都南京清凉山

# 目 录

## 前言

|                                      |    |
|--------------------------------------|----|
| <b>第一章 绪论</b> .....                  | 1  |
| 1.1 问题的提出 .....                      | 1  |
| 1.2 国内外研究现状 .....                    | 7  |
| 1.2.1 岩体结构对渗流的控制问题 .....             | 7  |
| 1.2.2 渗流对岩体的作用问题 .....               | 11 |
| 1.2.3 裂隙岩体渗流场与应力场耦合问题 .....          | 13 |
| 1.2.4 裂隙岩体多场耦合问题研究 .....             | 16 |
| 参考文献 .....                           | 17 |
| <b>第二章 裂隙岩体渗透结构面的水力特性</b> .....      | 22 |
| 2.1 渗透结构面的提出 .....                   | 22 |
| 2.1.1 裂隙岩体渗流研究特点 .....               | 22 |
| 2.1.2 渗透结构面 .....                    | 22 |
| 2.2 渗透结构面的几何特征描述 .....               | 24 |
| 2.2.1 隙宽 .....                       | 24 |
| 2.2.2 粗糙性 .....                      | 24 |
| 2.3 分形渗流结构 .....                     | 26 |
| 2.3.1 孔隙介质的分形模型 .....                | 26 |
| 2.3.2 分形渗流结构 .....                   | 27 |
| 2.4 分形渗透结构渗透特性的数值模拟 .....            | 30 |
| 2.4.1 渗透结构面的分形模拟 .....               | 30 |
| 2.4.2 渗透结构面的渗流特性模拟 .....             | 32 |
| 参考文献 .....                           | 35 |
| <b>第三章 渗透压作用时裂隙岩体断裂损伤机理的研究</b> ..... | 37 |
| 3.1 概述 .....                         | 37 |
| 3.2 脆性岩石断口断裂机理的实验分析研究 .....          | 37 |
| 3.2.1 全应力应变过程数控岩石渗透性试验 .....         | 37 |
| 3.2.2 脆性岩石断口断裂机理分析与试验研究 .....        | 45 |
| 3.3 渗流对裂隙岩体损伤断裂的影响 .....             | 51 |
| 3.3.1 渗透水压对岩体强度的影响 .....             | 52 |

|                               |     |
|-------------------------------|-----|
| 3.3.2 地下水对泥板岩强度软化的损伤力学分析      | 58  |
| 参考文献                          | 64  |
| <b>第四章 坝基裂隙岩体渗流与流变的耦合模型研究</b> | 66  |
| 4.1 裂隙岩体渗流场的数值计算模型            | 66  |
| 4.1.1 裂隙岩体渗流场计算模型概述           | 66  |
| 4.1.2 裂隙岩体非稳定渗流场计算的有限元模型      | 69  |
| 4.2 坝基裂隙岩体流变模型的研究             | 73  |
| 4.2.1 基岩流变的基本特性及本构模型          | 73  |
| 4.2.2 工程应用                    | 85  |
| 4.3 坝基裂隙岩体渗流与流变耦合模型的研究        | 101 |
| 4.3.1 坝基渗流与应力耦合作用的机理及基本特性     | 102 |
| 4.3.2 坝基渗流与流变耦合的分析模型及有限元分析方法  | 106 |
| 4.3.3 工程应用                    | 114 |
| 参考文献                          | 120 |
| <b>第五章 裂隙岩体渗流场与损伤场耦合模型研究</b>  | 123 |
| 5.1 概述                        | 123 |
| 5.2 渗流对裂隙岩体应力场的力学效应           | 124 |
| 5.3 渗流对裂隙岩体损伤演化的作用            | 125 |
| 5.3.1 压剪应力状态下渗流对裂隙损伤演化的影响     | 125 |
| 5.3.2 拉剪应力状态下渗流对裂隙损伤演化的影响     | 126 |
| 5.4 渗透张量随裂隙损伤的演化特征            | 127 |
| 5.5 裂隙岩体非稳态渗流场与损伤场耦合方程研究      | 130 |
| 5.5.1 等效连续介质渗流场数学模型           | 130 |
| 5.5.2 等效连续介质岩体的应力场数学模型        | 132 |
| 5.6 三峡工程永久船闸高边坡裂隙岩体渗流损伤耦合变形研究 | 134 |
| 5.6.1 三峡工程永久船闸高边坡工程地质概述       | 134 |
| 5.6.2 裂隙岩体渗流损伤耦合变形的计算参数       | 136 |
| 5.6.3 计算结果分析                  | 139 |
| 参考文献                          | 144 |
| <b>第六章 膨胀红砂岩变形特性试验研究</b>      | 145 |
| 6.1 概述                        | 145 |
| 6.2 红山窑膨胀红砂岩变形性质试验研究          | 146 |
| 6.2.1 试样采取和试件制备               | 146 |
| 6.2.2 红砂岩膨胀特性试验研究             | 146 |
| 6.3 红砂岩膨胀力学特性试验研究             | 152 |

|                                  |     |
|----------------------------------|-----|
| 6.3.1 膨胀力变化规律研究 .....            | 152 |
| 6.3.2 膨胀力与膨胀变形规律的研究 .....        | 153 |
| 6.3.3 弹性模量与吸水率的关系 .....          | 155 |
| 6.4 红山窑膨胀红砂岩湿化特性试验研究 .....       | 157 |
| 6.4.1 红砂岩微观结构试验 .....            | 157 |
| 6.4.2 红砂岩湿化性试验研究 .....           | 159 |
| 6.4.3 试验结果分析 .....               | 161 |
| 6.4.4 膨胀红砂岩湿化机理 .....            | 162 |
| 参考文献 .....                       | 163 |
| <b>第七章 膨胀红砂岩本构模型研究</b> .....     | 165 |
| 7.1 概述 .....                     | 165 |
| 7.2 红砂岩的抗剪强度与含水率的关系 .....        | 166 |
| 7.2.1 工程背景与试验方法 .....            | 167 |
| 7.2.2 试验数据分析 .....               | 168 |
| 7.3 膨胀红砂岩本构模型研究 .....            | 172 |
| 7.3.1 岩土类材料的本构关系 .....           | 172 |
| 7.3.2 膨胀岩本构模型 .....              | 177 |
| 7.3.3 膨胀岩模型数值模拟及模型验证 .....       | 181 |
| 参考文献 .....                       | 198 |
| <b>第八章 膨胀红砂岩细观损伤力学试验研究</b> ..... | 200 |
| 8.1 概述 .....                     | 200 |
| 8.1.1 岩石细观损伤研究的意义 .....          | 200 |
| 8.1.2 国内外岩石细观损伤研究现状 .....        | 201 |
| 8.2 红砂岩细观损伤演化试验研究 .....          | 202 |
| 8.2.1 试验简介 .....                 | 203 |
| 8.2.2 红砂岩 RMT 单轴压缩试验 .....       | 203 |
| 8.2.3 红砂岩单轴压缩细观损伤试验 .....        | 204 |
| 8.2.4 试验成果 .....                 | 205 |
| 8.3 红砂岩细观量化及损伤演化规律分析 .....       | 212 |
| 8.3.1 程序概述 .....                 | 212 |
| 8.3.2 细观结构信息量化 .....             | 213 |
| 8.3.3 微裂纹损伤演化规律分析 .....          | 221 |
| 8.4 红砂岩细观本构模型初探 .....            | 231 |
| 8.4.1 损伤变量的定义 .....              | 231 |
| 8.4.2 红砂岩峰值应变前损伤本构方程 .....       | 233 |

---

|                            |     |
|----------------------------|-----|
| 8.4.3 红砂岩峰值应变后损伤本构方程 ..... | 234 |
| 8.5 细观本构模型的验证 .....        | 236 |
| 8.5.1 引言 .....             | 236 |
| 8.5.2 本构模型的验证与分析 .....     | 239 |
| 参考文献.....                  | 241 |

# 第一章 绪 论

裂隙岩体是坝基、边坡、地下洞室等岩体工程中广泛遇到的一类复杂介质,它的强度、变形和地下水渗透性等力学变形特性将直接影响各类岩体工程的设计与施工,以及工程运营间的长期稳定性。因此,关于裂隙岩体力学的变形特性及其岩体与地下水渗流相互作用的耦合问题(即裂隙岩体水力学)一直被国内外岩石力学与工程界所关注。

裂隙岩体水力学是近 10 年来发展起来的、与岩石力学有关的一门新兴力学分支,它是借助工程地质学、地下水渗流力学和非线性现代力学理论的集成分析方法,主要研究裂隙岩体中地下水的运动规律与地下水力学耦合作用时裂隙岩体变形与破坏规律的科学。

裂隙岩体边坡的设计、水利水电工程渗流域控制、水库诱发地震的预测、有害核废料的处置、矿井的疏干降压排水、石油和地热能的开发以及地下水资源的开发与利用等,都必然涉及裂隙岩体的水力学性能的研究。工程实践迫切要求系统地、定量化地研究在人类工程开挖干扰力与自然力的作用下,节理裂隙岩体与地下水相互作用关系,以及裂隙岩体与地下水力学耦合作用对人类工程岩体稳定性的影响。裂隙岩体水力学主要以水文地质学、工程地质学为基础,利用数学、力学、渗流力学和岩体力学的理论,建立裂隙岩体水力学数学力学模型,并运用数值模拟和物理模拟的方法来研究、评价和预测裂隙岩体中地下水渗流与应力耦合所造成工程岩体的稳定性,科学指导工程施工程序设计以及地下水资源的合理开采。工程岩体稳定性问题就要求裂隙岩体水力学一方面强调工程地质体受地质过程和地质构造的影响,其力学行为有过去地质构造的烙印,同时还应考虑工程开挖干扰力的作用以及工程岩体在其作用下所发生的变形行为;另一方面要强调地下水与裂隙岩体之间发生力学方面的相互作用,因为它不断地改善着作用双方的力学性状和力学特性。

裂隙岩体水力学是解决地下水渗流与裂隙岩体耦合问题的理论基础。

## 1.1 问题的提出

人类为了生存和发展,时时开展人类工程,一方面依托于地质环境,另一方面又影响和改造地质环境;地质环境的优劣对人类工程体的稳定性、人类工程活动的正常运转施加影响。在地质环境内,岩体与地下水的相互作用,影响和改善着地质

环境的状态。在人类工程活动中,一方面由于工程的开挖,工程荷载施加于岩体之上,改变岩体内部应力场的分布,从而影响岩体的结构,引起岩体中地下水性质及地下水力学特性的改变;另一方面,由于工程岩体的出现,改变了区域性或局部地下水的补给、径流和排泄条件,形成人工干扰下的地下水渗流场,进而地下水对岩体的力学作用的强度、作用的范围以及作用的形式亦发生改变,最终影响裂隙岩体的稳定性<sup>[1]</sup>。

人类为了防洪、发电、灌溉、航运及发展渔业等目的,在大江大河上修建大坝,这是一项改造、造福人类的主要工程。工程的效益和健康安全性,是评价水利水电工程成败的关键。工程的效益指的是大坝建成后,达到预期目的的程度。若大坝存在严重坝基和坝肩渗漏,水库不能蓄到预定水位,则该大坝工程是失败的。大坝的健康安全性更为重要,如 1959 年 12 月 2 日法国 66.5m 高的 Malpasset 双曲薄拱坝在初次蓄水时溃决,顷刻间  $49 \times 10^6 \text{m}^3$  的洪水突然奔腾下泄,流速 70km/h,对下游造成重大损失,致使 384 人死亡,110 人下落不明。意大利 Vajont 拱坝坝高 265m,水库设计正常最高水位为 722.5m。1963 年 9 月,库水位上升到 700m 高程时,左岸距大坝 1.8km 处,在 1min 内大约有  $2.5 \times 10^8 \text{m}^3$  的岩石削入水库内,顿时造成高达 150~250m 的水浪,约  $3.0 \times 10^7 \text{m}^3$  洪水浸过 270m 高的拱坝,致使下游的朗加朗市镇遭到了毁灭性破坏,2500 人丧生,幸运的是大坝安全无恙<sup>[2]</sup>。

对 Malpasset 大坝失事的原因,许多专家学者进行了详细的分析,Bellier 认为 Malpasset 大坝坝肩岩体的结构面走向与拱坝推力方向平行,在坝肩岩体中形成高的压应力区,引起坝肩岩体结构面闭合,裂隙岩体渗透系数大约减小了 100 倍(相对初值),导致岩体渗流受阻,而产生了等于水库中全水头的压力作用于该岩体之上,使大坝坝肩岩体沿下游断层滑移而失稳。Wittke 认为,拱坝弧部受拉力,使大坝坝踵附近岩体受拉,倾向下游的岩体结构面张开,裂隙使帷幕短路。库区蓄水后,库水沿张开裂隙渗透,由于下游断层封堵了渗透通道,致使张开裂缝中产生等于水库全水头的静水压力,使坝肩岩体失稳。尽管这两种分析马尔帕塞大坝失稳机理不同,但分析结果都认为,Malpasset 大坝失事是由于岩体的渗透压力作用引起的裂隙岩体变形,导致大坝溃坏<sup>[1]</sup>。

意大利 Vajont 大坝上游库区大滑坡,也是由于库水位上升,引起岩体中地下水位抬升,增加了岩体的浮托力而引起的一种渗透变形和破坏。由于该水库两岸岩体渗透性良好,库水位上升迅速引起地下水水位上升,滞后时间短。因而,当库水位上升到 700m 时,在库岸边坡脚处产生较大的挤压力,正应力减小,抵抗滑坡的摩阻力减小而引起滑坡<sup>[1]</sup>。英国 Woodhead、Bilbery 坝建在粗砂岩和黏土互层岩石上,由于粗砂岩渗流产生扬压力而沿黏土层产生滑动于 1850 年失稳破坏;阿尔及利亚 Chearfas 坝地基不良,渗流对岩石软化使地基破坏;法国 Bouzey 坝在渗流作用下坝基岩石泥质胶结抗剪度下降,产生滑动;美国加州 Francis 重力拱坝 68m

高,其右岸红色砾岩强度很低,仅 6~8MPa,且属黏土胶结,干燥时坚硬,浸水后吸水碎裂,并有易于溶解的石膏等薄层,左岸云母片岩倾向河床,导致该坝于 1928 年 3 月 12 日失事,其溃决的大坝破碎成若干块体。其他如美国得克萨斯州 Austin 坝、意大利 Gleno 连拱坝、阿尔及利亚 Gabra 坝、西班牙 Vega de Tera 支墩坝等,都是由于坝基遭地下水渗透破坏而造成失事<sup>[3]</sup>。

我国的梅山连拱坝,高 88.3m、长 545m,坝基岩石为燕山期花岗岩,坚硬致密,极限抗压强度达 100~120MPa,没有大的断层,透水性较小。在坝前做了一排孔深 23~30m 的灌浆帷幕,灌后  $\omega$ (含水率)值全部达到 0.01~0.05L/(mm·m·m),全坝基作了孔距 3m、孔深 3~5m 的固结灌浆,未打排水孔。该坝于 1956 年蓄水,1962 年 11 月 6 日在右坝肩 13~16 号坝段拱台上突然出现 10 条裂缝,最长的达 24m、宽 6.5mm,沿裂缝严重漏水,坝座岩体发生明显位移。与此同时,有一个未封填好的固结灌浆孔向外喷水,水头高达 31m,可见其水压力之高。随即采取了紧急放空水库的措施,才避免了严重事故的发生。

有许多研究者对世界上所发生的大坝失事原因进行过分类统计,据维也纳世界大坝失事数据站所做的分析,失事原因最多的是漫顶和渗漏,由于渗流冲刷破坏失事的土坝高达 40%,与渗流密切相关的滑坡破坏占 15%左右。卡鲁斯夫在其发表的研究文章中指出:从 1990 年起,混凝土坝失事的原因有 70%与坝基有关,只有 30%与坝体有关。据国际大坝委员会所公布的资料以及个人收集的资料,对 82 座混凝土坝的失事原因进行了分类统计,得出:由于地基渗透、排水系统失灵与极压力有关的共 51 例,占 62.2%;由于大坝产生裂缝,沿地基滑动和由于水流冲刷引起塌方、滑坡的共 31 例,占 37.8%。另外,据统计在土坝的失事中,由于地基渗流造成的破坏以及滑动破坏(一般都与渗流问题密切相关)占相当大的比例<sup>[3]</sup>。

在矿区开采过程中,有不少岩体的变形与岩体内地下水渗透压力有关,常存在矿山采动应力、地应力和地下水渗透力相互影响、相互作用的岩体力学问题。如煤矿井中底鼓突水,就是在开采过程中岩体变形引起岩体渗透性的改变,使岩体内或下部岩体内地下水沿连通的节理裂隙运动,增强了对岩体的渗透压力,引起岩体物理力学性质的变化而导致矿井突水。在华北煤矿开采过程中,常常发生来自煤层系地层之下石灰水的矿井突水、淹井淹矿事件。华北煤系大多属石炭系,石炭系之下为大厚层的奥陶系灰岩,岩溶地下水发育,地下水头高<sup>[1]</sup>。由于矿山开采人工干扰力的作用,引起井下岩体应力场的重新分布,常使石灰水沿断层裂隙发育带、沿积陷落柱及煤系底板软弱带上井,进而进入矿井,如开滦矿务局唐山范各庄矿于 1984 年 6 月 2 日发生了世界罕见的矿井大突水,是奥陶系灰岩中地下水沿陷落柱倒入矿井,其涌入量达 2053m<sup>3</sup>/min,11h 后一、二水平矿井全淹。1954 年 12 月 5 日,唐山林西矿四水平石灰水通过断层突水进入矿井,最大涌入量达 6000 m<sup>3</sup>/h,矿井突水大多是由于人工开挖产生的地下岩体应力场的重新分布,引起陷落柱碎

屑充填物松动、断裂性质的改变(天然的压性断层,由于人工开采而松动)或煤系地层底板破坏,在高水头压力作用下,引起矿井突水<sup>[1]</sup>。

边坡的变形失稳,从根本上来说是边坡自身求得稳定状态的自然调整过程,而协助它趋于稳定的作用因素有自然因素和人类活动因素。就自然因素而言,地震是导致边坡变形,失稳的直接因素,1995年1月17日日本神户地震诱发崩滑达630多处,自然因素的第二个主要方面是大气降水与洪水<sup>[4]</sup>。人类为了生存与发展,一方面依赖于自然界,另一方面又要改造自然界,但不合理的工程活动和对自然界的过分改造有孕育或诱发出新的问题的倾向。

现今地球上生活着60多亿人口。已经构成了地球环境中前所未有的地质灾害的人为因素,这种人为因素的作用,无时不在冲击着人类自身赖以生存的地球环境。全世界每年因翻耕土地,建筑爆破移动的土石方量多达4000km<sup>3</sup>,从地下开采出的矿石和建材达1000多亿吨。由于砍伐森林,导致水土流失现象加剧,滑坡、崩塌、泥石流等自然灾害日趋严重。工业化的发展,导致大气中CO<sub>2</sub>含量迅速增长,空气受到严重污染,气候变得反复无常,温室效应日渐明显,各种自然灾害频率加快。人类在创造文明的同时,却又在迈向更大的危险区。劳埃德和廷伯莱克在“人世界最大的威胁”一文中指出,生存环境遭受破坏所带来的灾难,将取代核战争的恐怖而成为21世纪人类面临的重大威胁。过去的20多年中,全世界约280万人死于各种自然灾害,有约8.2亿人受到严重影响<sup>[4]</sup>。

区域开挖促使或加剧边坡体变形或直接诱发边坡失稳的事例举不胜举。新滩滑坡距三峡坝址25km,在长江左岸,且与右岸链子崖危岩体相连,1985年6月12日,约3000×10<sup>4</sup>m<sup>3</sup>块石,包括碎石和黏土的等堆积层顺坡而下,最大滑速4m/s,摧毁新滩古镇,毁房1569间。滑坡入江土石约2000×10<sup>4</sup>m<sup>3</sup>,激浪使航运受阻。鸡扒子滑坡距三峡坝221km,在云阳老县城下游1km处的长江左岸,1982年7月17日,体积约1500×10<sup>4</sup>m<sup>3</sup>的土石滑动,前缘约180×10<sup>4</sup>m<sup>3</sup>土石入江,填高江底30余m,形成急流险滩,断航7天。巴东新县城区由五个小区组成,散布在长江南岸10km的岸坡上,距三峡坝址72km,新城区降雨充分,坡陡沟多,地形破碎,主要分布三叠系中统巴东组(T2b)泥岩、砂岩和泥灰岩。

黄蜡石滑坡距三峡坝址64km,是发育在三叠系上部 and 侏罗系下部的砂岩、泥岩夹泥灰岩组成的逆向斜坡上的滑坡体,总体积4000×10<sup>4</sup>m<sup>3</sup>,主体滑坡体积1800×10<sup>4</sup>m<sup>3</sup>,有长期活动史。诱发其再活动的主要因素是降雨入渗,严重威胁航运、经济建设和居民安全。链子崖危岩体距三峡坝址25km,是由大量裂缝切割的分离体组成,发育在长江右岸底部为厚2~4m煤层的石灰岩顺斜向陡坡中。因煤层开挖和陡坡卸荷载形式,总体积315×10<sup>4</sup>m<sup>3</sup>,严重威胁航运、经济建设和居民安全。茅坪滑坡位于湖北清江隔河岩水库库区近尾部左岸,下距隔河岩水库大坝66m,上距正在施工的水布垭坝址25km。它是目前库区规模最大、变形最严重的一

处堆积层滑坡。茅坪滑坡滑动面大致追踪至泥盆系上统页岩夹岩灰岩岩层层面,因此也可以称此滑坡为“准基岩顺层滑坡”。有由差异分化形成的倾向坡外的基岩顶面,成为此松散堆积层滑坡发育的控制性界面,是该滑坡的突出特征。茅坪滑坡平面上呈狭长条带状,前后缘高程为 160~570m,高差 410m,主滑方向约为 SE160°。滑坡纵向长约 1600m、前缘宽 600m,滑坡可直抵江中,总体坡度 15°~20°。滑坡东侧为由差异风化形成的白岩基岩陡壁,陡壁长约 2000m、高约 200m,走向为 SE150°;西侧为南北发育带的娑婆溪自然冲沟。滑坡总体上由具有不同风化程度的崩塌堆积成因的灰岩块石、碎石夹土组成,堆积物多呈架空状,因而渗透性较好。滑体厚度变化为 5~87m,平均厚度约 40m,体积约  $2.35 \times 10^7 \text{m}^3$ 。滑床基岩为泥盆系上统砂页岩地层,不具透水性。滑坡前缘尚发育两处规模较大的寄生次级滑坡,即茅坪街滑坡和四大天王滑坡,体积分别为  $4.5 \times 10^6 \text{m}^3$ 、 $2 \times 10^6 \text{m}^3$ ,其中茅坪街滑坡前缘地形陡峻,坡度达 25°~65°,并向江中突出。该滑坡在隔河岩水库蓄水前所未见任何变形迹象,1993 年 4 月 10 日,隔河岩水库开始蓄水,库水位由 132m 抬升至 183m,水位抬升 50m,滑坡出现明显变形迹象,主要表现为顺下伏基岩层面整体下滑。

以上所述,无论是水电工程,还是矿井开采工程,都存在人类工程干扰力、岩体地应力和地下水渗透力之间的相互影响、相互作用和耦合作用问题。据统计,90%以上的岩质边坡破坏与地下水渗透力作用有关;60%矿井事故与地下水作用有关;30%~40%的水电工程大坝失事是由渗透作用引起的。因而,研究人类工程作用力、岩体地应力及地下水渗透力的相互作用关系及耦合问题,是裂隙岩体力学的主要任务,也是一项具有理论研究和实际工程应用前景的重大课题<sup>[1]</sup>。

近 10 年来,随着国民经济建设的迅猛发展,基本建设规模的不断扩大,人类在向空间发展的同时,地下空间的开发也在不断地走向深入。上千米乃至数千米的矿井、巷道比比皆是,如沈阳采屯矿开采深度达 1197m、山东孙村煤矿开采深度达 1283m、南非的西部深井金矿达 3700m<sup>[5]</sup>;水电工程引水隧洞的不断埋深,如锦屏二级水电站最大埋深达 2525m,南水北调西线工程最大埋深 1150m;公路隧道,如穿越阿尔卑斯山朗峰圣达隧道,埋深 2500m;核废料的深层地质处理已达数百米乃至上千米;中国核废料处置库拟建在深度达 700m 的花岗岩中;油气工程已达 3000~4000m;能源储存工程达 1000m,国家战略能源储备中大型地下储气库及储油库也将在深部地下空间中建造。上述深埋上千米的工程,在开挖、施工与运营的过程中,往往带来很多难以预测的问题,如岩爆、瓦斯突出、突水、顶板大面积垮落和采空区失稳等一系列灾害性事故频频发生。为了避免突发性地质灾害对人民生命和财产造成危害,同时也为了尽量减少重大灾害的发生,必须对深埋岩体在开挖时引起的特征。如赋予复杂的地质环境,以及高地应力、高渗透力等进行深入细致的研究。

我国是一个多山的国家,丰富的水力资源尚有大部分未开发出来,从分布来看,这些资源大多集中在西南和西北地区的崇山峻岭中。今后 10 年之内预计将有相当多的大型水力发电工程和蓄能电站进入兴建期。其中相当多数都设计有大型或超大型地下洞室群作为主要的水工建筑物,如锦屏二级水电站地下厂房位于东雅砻江的大水沟,按常规的三洞室方案布置,主厂房、主变室、尾水调压室三大洞室平行布置,主厂房尺寸为  $335.2\text{m} \times 25.20\text{m} \times 75.10\text{m}$  (长 $\times$ 宽 $\times$ 高)。拉西瓦水电站枢纽主厂房开挖尺寸  $309.75\text{m} \times 30.0\text{m} \times 73.84\text{m}$ ,轴线 NE25°;副厂房与主厂房同轴线,位于主厂房左端,开挖尺寸为  $32\text{m} \times 27.8\text{m} \times 42.0\text{m}$ ;主变开关室在主厂房下游侧,与主厂房轴线平行,通过母线洞与主厂房相通,开挖尺寸为  $354.75\text{m} \times 29.0\text{m} \times 53.0\text{m}$ 。锦屏一级水电站主地下厂房尺寸为  $284.8\text{m} \times 25.5\text{m} \times 66.7\text{m}$ 。这些水电站也会出现一些深埋长引水隧洞,例如锦屏二级水电站引水隧洞自景峰桥至大水沟,共四条,开挖洞径 12m,衬砌后洞径 11m,隧洞洞线平均长度约为 16.60km,深埋一般在 1660m 以上,最大深埋可达 4000m,获得水头 2200m;南水北调西线工程有长 73km、最大埋深 1100m 的长引水隧洞等。由于西部地区的特殊地形条件(山高谷深,地势异常险峻),这些大型室群和深埋大的引水隧洞遇到极为复杂的地质条件、高地应力、高外水压力等问题,如下所述。

1) 高地应力问题。锦屏二级水电站的引水隧洞埋深大、地应力高,在长探洞中实测最大主地应力值为 42MPa,经回归分析,引水隧洞线附近大主地应力最大值约 54MPa。锦屏一级水电站地下厂房区属于高地应力区,最大主应力为 20~37.5MPa。

2) 高外水压力、大流量问题。锦屏二级水电站的 5km 长探洞勘探和试验研究表明,探洞中单点最大集中涌水量达  $4.91\text{m}^3/\text{s}$ ,稳定流量  $2\sim 3\text{m}^3/\text{s}$ ,根据预测,在不采取预注浆处理的情况下,引水隧洞可能遭遇的稳定涌水流量将达到  $8\text{m}^3/\text{s}$  左右,单点最大流量  $5\sim 6\text{m}^3/\text{s}$ 。从长探洞封堵后的水压力观察,其最大水压力可达 10.22MPa。

如此复杂的地质条件、高地应力与高外水压力联合作用下长大引水隧洞的建设国内外尚无首例,其开挖与运行期的安全性问题已成为亟待解决的世界性岩石力学难题。也就是说,与一般的地应力与渗透压作用相比,高地应力、强渗透压的联合作用有其固有的特殊性,岩体变形破坏机理与防治方法是极其不同的。在开挖过程中,由于高地应力释放,使坚硬脆性岩体发生成层剥落和弹射现象(即岩爆,例如拉西瓦、天生桥、二滩、布鲁革等水电站地下洞室载开挖过程中由于高应力就发生这种现象;红透山铜矿在开采到地下 900m 深处发生了 0.5~0.8m 厚的岩片弹射破坏;锦屏二级水电站地下厂房段 PD1 洞岩爆发生的部位大多在洞顶和两拱肩,并以片状剥落为主,最大岩爆坑深度为 60cm,岩爆量级为轻微至中等,剥落的岩片成薄片板状,厚度自数毫米到几厘米不等)。在高应力作用下,由于能量的突然释放

造成硬岩岩片发生突然的剥落或弹射破坏,其破坏区并不大。围岩位移在开始初期并不大,在弹射性破坏瞬间增大很多。因此,基于塑性区的大小来判别、反馈分析将得不到合理的结果。高围压的长期作用使得岩体脆性转为延性,发生大变形,并产生围岩成洞困难、运行期变形过大以及衬砌结构破坏等突出问题。在强渗透压力作用下节理裂隙岩体内节理裂隙宽度增大,裂纹长度也将增大,进而加剧工程岩体强度的弱化。针对上述如此大流量,已发生紊流的情况,就不能采用达西定律进行理论计算与数值模拟。高应力与高外水压力、大流量下的渗流的联合作用将使得问题变得更为复杂。由于隧洞外水压力巨大、地应力高,常规的衬砌支护措施将无法承载而失稳,需要提出新的设计理念和理论。

围绕上述问题,必须对裂隙岩体水力学进行综合和系统、深入地研究。它涉及力学、结构、材料等多学科的交叉,是应用基础研究中科学发展前沿的课题。其对推动裂隙岩体水力学等学科的发展有重要意义,也是我国西部能源开发利用工程建设中,迫切需要解决的重大工程关键技术问题,其研究成果具有十分广泛的应用前景。

## 1.2 国内外研究现状

20 世纪 60 年代末、70 年代初,法国国家地质矿产局矿产地质研究所 Louis 首先提出了岩体水力学这一新的学科概念<sup>[6]</sup>,到了 80 年代及 90 年代初已经有了很大的发展,特别是土木工程中涉及的大量有关水流与岩体的相互作用问题(基础沉降、边坡失稳、隧道崩塌等),大都可以用这一学科的理论和方法来加以解决。因此,近年来,有关岩体水力学方面涌现出大量的研究成果,概括起来有三个方面,即岩体结构特性对渗流的控制作用、渗流对岩体的作用机理以及两者的相互耦合问题<sup>[7]</sup>。

### 1.2.1 岩体结构对渗流的控制问题

早在 20 世纪 40 年代,苏联学者在室内进行了岩体裂隙水力学实验,用实验方法证明了单裂隙岩体中地下水运动的立方定律,即

$$q = \frac{\gamma b^3}{12\mu} J_t = \frac{gb^3}{12\nu} J_t \quad (1.2.1)$$

式中, $q$  为裂隙内单宽流量( $L^2T^{-1}$ ); $b$  为裂隙张开度( $L$ ); $J_t$  为裂隙内水力梯度(无量纲); $\mu$  为地下水的动力粘滞系数( $ML^{-1}T^{-1}$ ); $g$  为重力加速度( $LT^{-2}$ ); $\nu$  为地下水运动粘滞系数( $L^2T^{-1}$ ); $\gamma$  为地下水的容重( $ML^{-2}T^{-2}$ ); $\rho$  为地下水的密度( $ML^{-3}$ )。

Louis 等(1974)<sup>[6,8]</sup>运用单裂隙试件进行单向水流的室内模型,综合研究了天