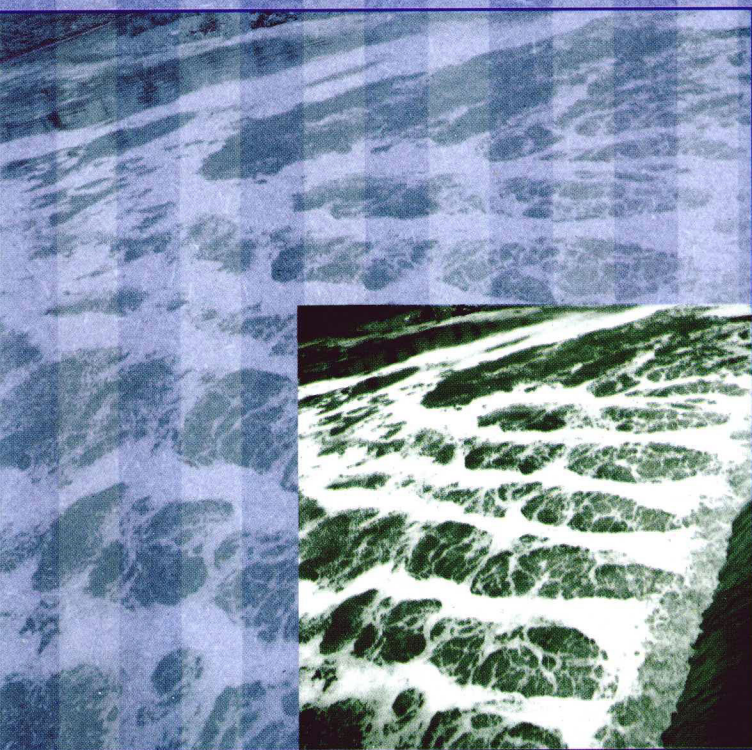


睿智风华·学术文库



杨太华◎著

水电工程中 岩体渗流耦合问题及安全风险分析



华东理工大学出版社
EAST CHINA UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY PRESS

睿智风华·学术文库

水电工程中岩体渗流耦合问题 及安全风险研究

杨太华 著



华东理工大学出版社
EAST CHINA UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY PRESS

图书在版编目(CIP)数据

水电工程中岩体渗流耦合问题及安全风险研究/杨太华
著. —上海:华东理工大学出版社, 2009. 12

(睿智风华·学术文库)

ISBN 978-7-5628-2517-3

I. ①水... II. ①杨... III. ①水利工程-岩石力学:
渗流力学-耦合-研究 ②水力发电工程-岩石力学: 渗流
力学-耦合-研究 IV. ①TV139.11

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 206224 号

睿智风华·学术文库

水电工程中岩体渗流耦合问题及安全风险研究

著 者 / 杨太华

责任编辑 / 周永斌

责任校对 / 金慧娟

封面设计 / 陆丽君

出版发行 / 华东理工大学出版社

地址:上海市梅陇路 130 号, 200237

电话:(021)64250306(营销部)

传真:(021)64252707

网址:press.ecust.edu.cn

印 刷 / 常熟华顺印刷有限公司

开 本 / 710mm×1000mm 1/16

印 张 / 13.25

字 数 / 255 千字

版 次 / 2009 年 12 月第 1 版

印 次 / 2009 年 12 月第 1 次

印 数 / 1—500 册

书 号 / ISBN 978-7-5628-2517-3/TB·28

定 价 / 58.00 元

(本书如有印装质量问题,请到出版社营销部调换。)

前 言

随着国民经济的高速发展,能源的可持续供应受到愈来愈多的关注。水电是可再生能源,是我国能源的重要组成部分,尤其是随着小浪底、三峡、二滩等一批大型水电工程的实施,及其建设或建成后的运营过程中,形成了大量工程规模大、项目多、影响因素复杂、地质地理环境条件多变、对稳定及使用要求各异、以岩土体安全稳定为主体、集地下工程、地面工程、电网工程为一体的水电工程建设体系,从而提出了一系列的岩体力学重大基础稳定性问题,其中,岩体渗流耦合相互作用的问题必须首先考虑。因此,如何更经济、有效地保证岩土体的渗流稳定性就显得十分迫切与必要,而对其稳定性进行岩体渗流耦合分析和安全风险评研究,对于保证水电建设工程的安全,乃至对整个社会的公共安全和国民经济的可持续发展均具有重要意义。

本书主要以国家重大水电建设工程项目——“三峡水利枢纽工程”建设过程中永久船闸高边坡工程系统稳定性为基本研究素材,在系统科学方法论指导下,采用理论分析、室内外实测与计算机技术相结合的综合研究方法,对复杂边坡工程系统的渗流稳定性进行动态研究,试图通过典型复杂边坡工程系统渗流稳定性以及水电工程坝体渗流风险与安全评价的研究,初步建立起基于岩体渗流耦合作用的水电工程项目安全风险研究的基本框架与方法体系。

本书内容共有 15 章,由五个部分组成:

第一部分(第 1 章)为绪论,在对国内外有关工程岩体结构控制论、裂隙渗流理论与实践研究成果进行系统综述的基础上,结合目前大型复杂岩石工程实例分析,提出了岩体渗流耦合相互作用的概念、安全风险辨识和评估原则与研究方法。主要强调系统综合研究与理论联系实际的重要性。

第二部分(第 2、3、4、5、6 章),即第一篇 岩体裂隙结构及渗流作用。主要基于岩体结构控制论,对岩体结构的力学性质以及岩体结构对渗流的控制作用展开研究。在考察工程节理化岩石断裂力学特征的基础上,提出了“追踪裂纹断裂”的概念,并结合分形几何原理,建立起追踪裂纹断裂的分形模型,从分形几何的角度研究了节理化岩石的微观和宏观结构效应,以及使断裂韧性提高的物理力学机制,并通过实测岩样的剪切断裂面进行了验证。研究工作特别注重不规则裂隙、裂隙网络对渗流的影响,并提出了渗流地质力学模型。通过单裂隙渗流试验,发现不规则裂隙的渗流存在分形效应。对于裂隙网络对渗流的控制,主要从网络结构的随机性及连通率的计算方面展开研究。渗流对岩石的破坏主要表

现在渗流对裂隙岩体损伤断裂的作用,本章主要运用损伤力学理论,分析渗透压力对岩体损伤断裂的演化。

第三部分(第7、8、9、10章),即第二篇 岩体渗流耦合分析。主要是岩体渗流耦合作用分析。侧重点是可变形裂隙岩体的渗流应力耦合作用的力学机理分析和耦合力学模型的建立研究,主要通过裂隙岩体变形刚度的处理、渗透系数的确定、本构关系的求解和数值模拟计算来实施。在这部分,主要以三峡永久船闸高边坡工程为例,通过渗流应力耦合计算、渗流损伤耦合场计算,进一步探讨耦合作用下岩体边坡的滑动力学模型及其安全稳定性特征。

第四部分(第11、12、13、14章),即第三篇 渗流安全风险分析。侧重点在于将风险理论应用于渗流作用影响下的水电建设工程。重点介绍了渗流工程中有关风险的定义、风险分类及与风险管理的关系,总结了水电建设工程安全风险的特点和初始风险识别清单,提出了风险评价的程序和对策。在这部分,详细论述了水电工程中危险点的分析及预控方法,以及安全评价的理论、原则、程序、如何辨识水电工程建设的主要危险和有害因素,评价单元的划分和评价方法的选择,并与危险点预控方法比较,研究两者的适用范围和使用条件。书中还引用两个坝体渗流安全风险分析实例,分别介绍了渗流作用下临界比降和出逸比降的变化对于预测坝体破坏风险的意义,通过某水电工程溃坝的安全性评价,对渗流作用等多种因素影响下的坝体安全稳定性运用危险点预控进行分析、大坝失事概率计算和故障树分析。另外,通过某坝体边坡渗透变形机理分析,提出了库水位变化影响下,边坡渗透变形的自适应时间序列控制原理和库岸边坡安全稳定的预测预报方法。

第五部分(第15章)为结束语,是对该书的主要观点与结论进行总结,提出了进一步研究的课题。

本人于1992年师从同济大学土木学院地下建筑与工程系、中科院院士孙钧教授,1995年取得博士学位,主要从事岩土工程、隧道及地下建筑工程、安全技术及工程管理方面的研究工作,现为上海电力学院教师。本书主要内容是作者在导师中科院院士孙钧教授的亲自指导下完成的。原博士论文的题目是“水—裂隙岩体相互作用理论及其应用研究”。从论文选题、试验研究、理论分析到论文的撰写和定稿,无不渗透着导师的心血,在此,谨向恩师致以崇高的敬意和衷心的感谢。作者的论文工作还得到了同济大学李永盛教授、朱合华教授、黄宏伟教授、杨林德教授、袁勇教授、张子新教授、夏才初教授等多位老师的帮助,在此深表谢意。书中的部分内容参考了南京水利科学研究院水利水电工程专家姜树海教授级高工、水利水电规划设计总院高级工程师王柏乐、电力工程专家袁周和黄志坚等人的文献和著作(书中均有标注)。本书的后期研究工作还得到了上海电力学院周光耀教授、曹家麟教授、李国荣教授、施泉生教授、杨俊保教授等多位老师的关心和支持,在此深表感谢。

本书有关研究工作得到国家自然科学基金委员会地学部的大力资助(批准号:49772164)以及三峡工程开发总公司与国家自然科学基金委的联合资助项目资助,研究工作还得到上海社科基金项目资助(批准号:2008BZH004)、上海市教委重点学科项目资助(批准号:J51302)以及上海电力学院科学基金资助,同时上海电力学院出版基金为本书的出版提供资助,在此深表谢意。

本书希望能对从事水电工程建设、隧道及地下工程施工、工程管理领域教学科研的相关人员起到抛砖引玉的作用。由于作者水平及经验有限,书中存在不足及不当之处,恳请前辈及同仁不吝赐教。

杨太华

2009年8月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 研究现状及文献综述	1
1.2 研究内容	11
1.3 研究思路及研究方法	12
第一篇 岩体裂隙结构及渗流作用	
第 2 章 岩体裂隙结构的分形特性研究	17
2.1 分形理论概述	17
2.2 岩体裂隙结构分形模型的建立	21
2.3 工程应用实例	27
2.4 分析与讨论	29
第 3 章 岩体裂隙非规则几何水力学特性研究	30
3.1 单裂隙渗流试验分析	30
3.2 不规则裂隙面的理想渗流模型	31
3.3 试验结果与理想模型的比较	33
3.4 岩体裂隙渗流分形效应	34
3.5 分析与讨论	37
第 4 章 岩体裂隙渗流地质力学模型	38
4.1 岩体裂隙的水力学特征	38
4.2 裂隙渗流地质力学模型	39
4.3 裂隙岩体的几何水力学效应	41
4.4 工程应用实例	43
第 5 章 裂隙网络系统渗流控制模型	44
5.1 裂隙随机场理论的数学关系	44
5.2 等效介质渗流场的随机分析	46
5.3 裂隙网络随机渗流模型	48
5.4 裂隙网络渗流的分形模拟	55
5.5 分析与讨论	56
第 6 章 渗流对裂隙岩体损伤断裂作用的力学分析	58
6.1 岩体遇水后的强度和变形特征	58

6.2	渗流作用下的损伤力学分析	60
6.3	裂隙渗透张量随岩体损伤断裂的演化	62
6.4	工程应用实例	64
6.5	结果与讨论	67

第二篇 岩体渗流耦合分析

第7章	可变形裂隙岩体渗流应力耦合模型	71
7.1	渗流应力耦合作用的物理力学机制	72
7.2	裂隙岩体渗流耦合力学模型的建立	73
7.3	裂隙岩体渗透参数的确定	76
7.4	岩体裂隙变形刚度的处理	77
7.5	裂隙岩体渗流变形本构关系	79
7.6	分析与讨论	83
第8章	三峡船闸高边坡裂隙岩体渗流耦合场的数值模拟	84
8.1	地质建模	85
8.2	数值模型程序设计思路	87
8.3	数值模拟的实施及边界条件的处理	90
8.4	计算结果分析	93
8.5	分析与讨论	97
第9章	三峡船闸高边坡裂隙岩体的渗流损伤耦合分析	98
9.1	三峡船闸裂隙岩体的渗流特征	98
9.2	渗流损伤耦合场数学模型	100
9.3	数值模拟的实施	101
9.4	计算结果与分析	103
第10章	三峡船闸高边坡岩体渗流耦合相互作用下的滑动模型分析	105
10.1	边坡岩体的可能破坏机制	105
10.2	坡帮卸荷带可能滑动分析模型	106
10.3	分析计算原理	107
10.4	潜在滑动面稳定系数的计算分析	108
10.5	分析与讨论	109

第三篇 渗流安全风险分析

第11章	岩体渗流耦合安全风险分析方法	113
11.1	风险定义及分类	113
11.2	岩体渗流安全风险识别	119
11.3	岩体渗流安全风险评价	126

11.4	岩体渗流安全风险应对策略	131
第 12 章	水电工程中的渗流安全问题	141
12.1	水电工程中主要危险点分析	141
12.2	岩体渗流事故的安全评价	149
12.3	安全性评价与危险点分析的比较	158
12.4	结果与讨论	161
第 13 章	渗流安全风险评价实例	162
13.1	堤坝渗流安全风险分析	162
13.2	某水电工程溃坝安全评价	169
第 14 章	库岸边坡岩体渗透变形的预测预报方法	178
14.1	库岸边坡岩体渗透变形机理分析	178
14.2	自适应 CAR 模型的建立	179
14.3	库岸边坡岩体渗透变形的自适应时间序列分析	181
14.4	结果与讨论	182
第 15 章	结论	184
15.1	主要结论及成果	184
15.2	存在的问题与可能解决的途径	187
参考文献		188

第1章 绪 论

随着国民经济的高速发展,愈来愈多的交通、水利水电、能源、工民建和防护工程,被建筑在岩石地区。特别是世界第一大水利枢纽工程——我国的三峡工程在花岗岩体上的正式实施,提出了一系列的岩体力学重大基础稳定性问题,而岩体渗流耦合相互作用问题及其安全风险必须首先考虑。水电工程中,导流洞工程、开挖边坡工程、大坝坝体及基础工程涉及岩体渗流稳定状况,事关工程建设的成败与安全,对整个工程的可行性、安全性及经济性等起到重要的制约作用,并在很大程度上影响着工程的投资及使用效益,因此对其进行研究具有重大意义。

岩体渗流稳定问题伴随着人类生产建设工程的发展而发展。一方面,天然岩体是一个多相的不连续介质体,这一体系包括了大气界面的各种地质构造、地层、水文地质结构及其诸多环境要素,因而是一个开放系统。它耦合了水、岩石、裂隙及其充填物夹层,其中水是最为活跃的因素。天然岩体分布很广,是地球表层的重要组成部分,它既受大气环境的影响,同时又受岩体结构的制约。在天然状态或人为的作用下,经排泄补给过程,不仅影响大气的动态,也对固体岩石中物质的迁移、转化、变形(如石灰岩溶洞的形成和裂隙水压的变化引起地震等)、破坏(如大坝失稳、石油开采等)有直接的作用。天然岩体各组分之间的作用都不是孤立无关的,而是具有内在的联系。如何对这一体系作系统科学的研究,一直是一个新的课题。为此本文在对大量裂隙岩体结构特征、岩体渗流作用规律进行系统回顾和总结的基础上,结合我国水电工程建设实践,提出了岩体渗流耦合相互作用的系统研究方法,并对其安全风险进行分析。

1.1 研究现状及文献综述

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C. Louis教授首先提出了岩体力学这一新的学科概念^[1],到了80年代及90年代初已经取得很大的发展^[2-4]。这一课题,从一开始就与实际工程建设密切相关,特别是土木工程中所涉及的大量有关水流与岩体的相互作用问题(如基础沉陷、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,涌现出大量的研究成果,概括起来有三个方面的内容,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,以及两者的相关统一。

1.1.1 岩体结构对渗流的控制问题

自达西(1852)发现裂隙岩体中地下水的渗流规律以来,岩体结构对渗透的控制问题一直是岩石力学工作者和水利学家长期研究的课题,由于控制变量较多,因而这一研究一直没有大的突破。目前研究的重点仍然放在裂隙介质的复杂性及其对水流的控制方面。

1. 裂隙岩体渗流特性的实验研究

Lamize 和 Louis (1974)运用单裂隙试件进行单向水流的室内模型试验^[1,5],综合研究了天然裂隙表面粗糙度和波纹特性对水流速度的影响^[6],并确立了层流状态和紊流状态的单个裂隙导水系数方程^[7,8],在此基础上,运用多裂缝试件,通过三向水流试验推导出一组平行裂隙面定向导水系数表达式^[9,10]。

$$\text{层流状态:} \quad K_f = \frac{kge^2}{12\nu \cdot c} \quad (1-1)$$

$$\text{紊流状态:} \quad K'_f = k \sqrt{ge} \cdot \frac{d}{(k/Dh)} \quad (1-2)$$

式中, g —重力加速度; k —裂隙面的连续性指数; e —裂隙开度; ν —流体黏度系数; c, d —相对粗糙度确定的两个系数。

$$K = \frac{e}{b} \cdot K_f + K_w \quad (1-3)$$

上式对层流和紊流都可以用。式中, e —平均隙宽; b —裂隙的平均间距; K_f —裂隙导水系数; K_w —岩块渗透系数。

煤炭工业中,瓦斯的渗流规律,在很大程度上与水流相似。近几十年来,这一方面的实验研究已硕果累累。周世宁等(1982,1987,1988),从初步实验中探索出地应力对煤透气系数的影响与煤体吸附瓦斯后引起的膨胀规律,发表了煤样瓦斯渗透率的实验成果^[11],主要有:

(1) 孔隙压力和渗透率间的关系,基本上服从负指数方程:

$$K = U_1 \exp(-\nu_1 p) \quad (1-4)$$

(2) 渗透系数与围岩压力的关系,服从负指数规律:

$$K = a \exp(-b\sigma) \quad (1-5)$$

赵阳升(1992)通过对阳泉3#煤样、永红3#煤样孔隙瓦斯引起煤体变形的实验研究,得出了煤体在孔隙瓦斯作用下的有效应力规律,即修正的太沙基原理,以及煤体-瓦斯透气系数的关系^[12]。

J. Laura 和 N. Pyrak 等(1987),总结和分析了石英闪长岩中单一岩石裂隙

的机械变形、渗透性能和孔隙几何形态的综合试验研究结果,通过改进一种金属浇铸技术,得到了在不同的应力条件下裂隙的变形几何和渗流特征^[13-16]。

Iwai(1987)和 Schrauf(1985)在室内实验中分析了单裂隙岩体导水系数与外加渗流体的压力梯度和平均裂隙开度的关系式,并建立了非线性的函数表达式^[14,17]。孙广忠等(1988,1987)运用单裂隙闭合度的变形对导水系数影响的实验研究,得出了岩体导水系数与闭合刚度的关系^[18,19]。田开铭(1986)利用多裂隙管道试验,对交叉裂隙的水力特性进行研究,从而把裂隙岩体的渗流实验向前推进了一大步^[20]。

裂隙岩体的实验是整个岩体水力学研究的理论基础,虽然研究的时间比较长,但能够运用的成果仍然只有单裂隙实验结果,而多裂隙或交叉裂隙的成果较少,有待进一步发展。

2. 现场岩体水力学参数的试验研究

作为岩体水力学研究的一个重要内容,现场岩体水力学参数研究主要是确定现场岩体的实际渗透系数。到目前为止,大致可以归纳为两类,即抽水试验和压水试验^[1,21,24],此外,还有气体试验^[25,26]、示踪试验^[27]等。

抽水试验是确定岩体水力特性的有效方法之一。它所提供的结果能代表较大面积的岩体,比单个点上或室内试验结果可靠,适用于地下水位以下的情况。

压水试验也是确定岩体渗透性的重要方法,主要用于测定地下水位以上的岩体系统。传统的 Lugcon(1974)试验(单孔压水试验)水流形式复杂,不能分辨出是球面流、柱面流或是混合流,只能测定其平均值,无法确定其定向渗透系数^[1]。C. Louis(1974)提出了三联水探测(三段压水试验),即限控平面压水试验,克服了单孔试验的缺点,基本上反映了裂隙岩体的各向异性渗透,但是如果各组裂隙不正交或有三组以上的裂隙时,就无法保证钻孔只穿过一组裂隙^[28],因而此法的应用受到了一定的限制。

为了克服 C. Louis 三联水法的不足,Rocha 和 Franciss(1987)提出了一套采取完整岩芯确定岩体各向异性渗透系数的新方法,通过压水试验^[29],测定其实际岩体的修正渗透张量因子,这样就可以把裂隙的不连通性、粗糙度、裂隙相交处的水头损失等因素对渗透性的影响反映出来^[30],但是要在钻孔中测定渗透张量因子,难度非常大。

M. Hajime 等从 1985 年开始在日本冲绳岛附近的砂岩和页岩层中,进行了海水灌注的现场渗流和扩散试验,以了解在裂隙基岩中海水与淡水接触后的扩散现象,识别出对分析基岩扩散起重要作用的参数^[31-33]。

E. T. Brown 等(1987)发展了一种通用的可用标准件组装构成的钻孔压力测试系统,将其应用于含三组相互垂直的等间距不连续的花岗岩上,进行了一系列常压水头注入试验和压力降试验。在现场单一和少量不连续面上进行的小规

模试验结果表明,在这种规模下,连续性概念不能用于研究岩体中流体的渗流^[24,33,35]。

R. M. Deandrade (1987),在巴西中部阿古艾亚河上所建的桑塔尹莎贝尔水坝,对现场钻孔进行了两种测试,即自记试验(Andrade, 1986)和降低压力的注水试验,以确定层流条件下和可能出现的任何压力梯度下确定裂隙和不连续面的水力学特性^[37]。

总之,近几年来,关于现场岩体水力学参数的确定,国内外学者虽然做了大量工作,但仍无一套成熟的方法可供推广应用,研究仍处于探索阶段。

3. 裂隙岩体渗流模型研究

Barenblatt 等(1960)和 Warren 等(1963)把裂隙岩体视为一等效连续介质,即裂隙岩体是孔隙性差而导水性强的裂隙系统,或孔隙好而导水性弱的岩体孔隙系统,不考虑裂隙和洞穴的大小与位置的差别,将此一类型统称为“双孔介质”模型^[8]。Zimmerman 等(1993)在裂隙网络和裂隙与基岩块体之间渗流场中,引入时间变量,建立起非线性的渗流体系,从而提出了改进的“双孔介质”模型^[37]。

周志芳、钱考星^[38]研究了裂隙岩体透水性非均质各向异性特点,根据弹性固体-理想流体的连续介质力学的基本理论,给出了各向异性裂隙岩体三维稳定渗流的控制方程,采用三维边界元计算了坝基的渗透力。

Romm(1960)、Snow(1969, 1972)和 Louis(1974),忽略了岩体的孔隙系统,把岩体视为单纯几何分布的裂隙介质,用裂隙水力参数或几何参数(如裂隙方位、密度、张开度等)来表达裂隙岩体渗透空间结构的具体特征^[35,39,40]。Robinson(1984)、Dershowitz(1984)、Long(1983)和 Witherspoon(1985)对三维裂隙网控制参数进行研究,建立了以裂隙渗透系数为统计量的 Poisson 模型^[41-44]。Long(1982)认为该模型是将空间裂隙三维网络转化为二维圆盘模型的有效途径^[44]。Williams 和 Dershowitz(1987)通过二维与三维模型比较发现,裂隙几何特性的不同,引起水力传导系数的差异^[45]。

H. Kuriyagawa 等(1987)运用有限元热质传输程序研究了 4 km 深处温度为 300 °C 干燥岩层地热库中,注水产生裂隙延伸的现象,并提出了线性渗透率模型和非线性渗透率模型^[46,47]。Elsworth 等(1987),通过裂隙介质中渗流的物理和数值模拟研究,建立起不渗透介质中三维刚性裂隙网络求解瞬态水力学问题的一种特殊分析方法,并且运用物理热对流模型来评价该方法的有效性和精确性^[48-50]。Lamize(1951)考虑了隙壁的粗糙度,对立方定律进行了修正^[9],得到以下关系式:

$$K' = \frac{\rho g b^3}{12\mu \left[1 + 6.0 \left(\frac{e}{b} \right)^{1.5} \right]} \quad (1-6)$$

Louis(1969)得出^[5]：

$$K' = \frac{\rho g b^3}{12\mu \left[1 + 8.8 \left(\frac{e}{D_h} \right)^{1.5} \right]} \quad (1-7)$$

式中, e 为裂隙壁上的突起高度, 即绝对粗糙度; D_h 为水力直径, 其值为裂隙张度的两倍, 即 $2b$ 。该情况下裂隙开度可按下式求出:

$$b = V / (L \times W)$$

式中, V 为裂隙充水体积; L 为裂隙的长度; W 为裂隙的宽度。

当同一条裂隙的张开度 b 变化较大时, 必须考虑 b 的变化对流量的影响, Neuzil 和 Tracy (1981) 把实际的裂隙理想化为一段具有不同开度 b 的平行板^[51,52], 忽略了相邻段之间流体剪切作用的影响, 得到立方定律的修改形式如下:

$$Q = WI \frac{\rho g}{12\mu} \int_0^\infty b^3 f(b) db \quad (1-8)$$

式中的 $f(b)$ 为同一条裂隙的张开度 b 分布的密度函数。一些作者认为 $f(b)$ 的分布最接近于对数正态分布^[53-55], 此时有:

$$f(b) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma b} \exp \left[-\frac{(\ln b - \xi)^2}{2\sigma^2} \right] \quad (1-9)$$

式中, σ 和 ξ 均为无量纲的对数正态分布参数。

B. Jacob(1972)的《多孔介质流体动力学》假设岩体是均质各向同性的, 则以表征体积单元为控制单元, 根据质量守恒、能量守恒、动量守恒三大定律即可导出岩体渗流的控制方程^[55-57]。孙训正(1981)在《地下水流的数学模型和数值方法》一书中, 系统地阐述了地下水渗流的理论^[58]。朱学愚、谢春红(1990)在《地下水运移模型》中系统地推导了裂隙岩体介质中水的渗透方程及其有限元数值计算方法^[59,60]。张云(1992)研究了裂隙岩体各向异性 and 渗透系数, 以及各向异性介质中潜水非稳定流的边界元法, 预测了露天矿开采的不同阶段, 边坡岩体中潜水位的变化, 为边坡稳定性分析提供了重要参数^[61]。张有天(1990)在总结了渗流研究的主要成果以后认为, 除去个别情况外, 裂隙网络及其水力学分析均可能简化为二维问题。岩体裂隙三维网络十分复杂, 裂隙开度又很难实测, 因而裂隙网络水力学分析方法目前还难以应用^[4]。

陶振宇(1987)对节理岩体含水层三维概化模型进行比较后认为, 用概化模型来研究裂隙岩体含水层地下动态, 既克服了一维概化将裂隙岩体含水层当成均匀孔隙介质含水层的不足, 也避免了考虑实际裂隙带来的繁琐, 是可取的。陈胜宏(1991)把块状结构岩体视为由空间透水平面组成的渗流网络, 推导了其分

片求和的变分方程,然后利用黏弹塑性块体理论几何分析时得出的块体系统信息对其实现了自动有限元离散,推求结构面上各点的水头函数值^[2,62]。

实际上,裂隙宽度很不均匀,依立方定律,绝大部分水流集中在缝宽较大的少数沟槽内。Tsang (1987)把这一现象称为 Channeling 而提出沟槽流模型^[63]。Monero 和 Tsang(1988)根据岩芯裂隙面的实测资料,进行统计分析,并用计算机生成了统计意义上的等效裂隙,结果表明在整个模拟范围内,呈现出明显的沟槽现象^[27,64]。

1.1.2 渗流对岩体的作用问题

从本质上讲,这一作用包括了物理力学和化学两个方面的内容,现今岩石力学主要研究渗流体对岩体的物理力学作用及其对本构关系的影响。

J. L. 塞拉芬(1978)认为地下水通常处于一定的压力之下,并随深度的增加而增大^[65],这一水压是影响裂隙岩体性能的基本要素,它们的变化会引起岩石材料中应力的改变,从而导致地壳的破裂和变形,影响大型建筑物的基础,隧道及矿山坑道和施工^[66-69]。

Louis 等(1967,1970)通过分析测试^[5,35]认为渗透压力对裂隙岩体的作用,由三种体积力构成:

(1) 在一组平行节理中由水的黏性产生的切向力(F_i):

$$F_i = n_i \gamma_i J_i \quad (1-10)$$

(2) 静水压力或阿基米德压力:

$$A = -p_w(1-n)S \quad (1-11)$$

(3) 动水压力或渗透力:

$$S = \gamma_w(1-n)J \quad (1-12)$$

式中, J 为空间总水力坡度; J_i 是节理组 K_i 的水力坡度; n_i 是节理组 K_i 的孔隙率($n_i = e_i/b_i$)。

Witherspoon(1981)和 Raven(1985)曾作出过渗流-应力关系曲线,与 Louis 提出的关系曲线相比有较大的差异,原因是他们没有考虑剪切变形因素^[70,71]。

梁尧词(1988)和段小宁(1992)通过试验证明岩体中的渗透压力对岩体的变形有重要影响,动水压力导致裂隙开度的增加,岩体变形影响岩体的稳定性^[72,73]。张天有(1989)认为渗流分析的重要目的是通过渗流荷载下的应力分析,以判断岩体稳定性和设计加固措施,并用固定网格法成功地求解出自由面的渗流场^[74]。

殷有泉等(1990)讨论了有渗透作用的破裂带和均匀介质围岩系统稳定的尖

角突变模型^[75,76]。李成江(1988)通过对非饱和围岩的实验研究,得出了自由膨胀应变与含水量呈线性关系,水分的运动决定着含水量的分布,因而决定了本构关系模型的各岩体参数的取值^[77]。周维垣等(1991)从裂隙损伤力学的角度,阐述了渗流对裂隙损伤的断裂扩展过程的渗透张量方程^[78]。

陶振宇等(1991)对水库诱发地震进行了深入研究后,发现裂隙水,一方面是诱震的因素,另一方面又具有减震效应。岩体中的液体对岩体某些地质力学参数有化学及物理上的影响,如泥化、侵蚀、冲刷及润滑等现象,对工程极为不利^[2]。

曲焰(1980)通过对一复活古滑坡群为期三年的长期观测,发现蠕变滑动与降雨量有明显的关系^[79],经回归分析得指数函数:

$$y = a \cdot e^{bx} \quad (1-13)$$

式中, y —蠕变位移; x —月降雨量。

从而证明了水对边坡岩体蠕变位移有直接的影响。

晏同珍(1980)阐述了地下水富集对滑坡的普遍性及其地学意义。根据块体极限平衡原理建立了其稳定性分析的通用模型,坡后裂隙充水危险程度的判别通式,引入了敏感分析概念,认为大量滑坡的发生和复活等本质上是地下水充填,并沿潜在滑动面缓慢渗流运动,坡体在渗透压力作用下,沿平缓弱面下滑,产生滑坡^[80]。

K. G. 斯塔格等(1987)认为所有的矿物颗粒的表面都具有为裂隙水润湿和吸附的物理化学机理,而水分的吸附会沿着裂缝接触的地方侵入到表面内,从而减低岩体的强度^[65]。

W. B. Walsh(1981)研究了裂隙岩体的有效应力规律^[81,82]。Robin(1973)指出,有效应力 p_w 是与围压 p_a 和孔隙压力 p_p 相关的^[83]:

$$p_w = p_a - \alpha p_p \quad (1-14)$$

大部分文献表明 α 值为 1.0,而 J. B. Walsh 得出 α 等于 0.9,对于抛光的节理表面而言,Kranz(1979)算得张性节理^[84] $\alpha = 0.56$ 。Witherspoon, Galo 和 Gowd 等分析了液体注入对多孔岩石断裂特性的影响^[21,23,85]。A. W. Skempton 和 Hubert(1959,1960)分析了水对裂隙和非裂隙砂岩的应力释放的影响^[86,88]。对岩体的作用还表现在对岩体的损伤力学特性的影响^[89,90]。石油部门为了提高油田回采率而进行了广泛的水压致裂技术研究^[91,92]、核废料的处理^[93]、地应力的测量。N. C. Huang 等(1990),T. J. Boozé(1990),D. Elsworth(1989)研究了弹性孔隙介质中高温流体渗流驱动裂纹扩展的理论与分析方法。

总的来说,工程中水对岩体的作用是不可忽视的问题,而且愈来愈引起广大工程技术人员的关注。

1.1.3 裂隙岩体渗流耦合场及安全风险研究

实际工程中,大量岩质边坡的失稳、地基基础沉降、坑道崩塌等破坏性灾害事故的发生,不仅仅是一个岩体对水的作用问题或单纯的水对岩体的作用问题,而是两者的耦合作用,特别是近几年,核废料的贮存及有害物质的处理,涉及应力场、渗流场、温度场和裂隙变形场的耦合,以及岩体中水的渗流与传导物质的耦合^[98,99],中外学者对此作了大量的研究,主要表现在:

1. 多相介质耦合场数值模拟

Louis(1967,1970)提出水力模型与力学模型相耦合的概念,并确定渗透力所需的基本数据与介质中水流势的分布,用有限元法进行了模拟计算^[35,100]。Hart(1984)推导了多相介质完全水-热-力学耦合模型的本构方程,描述了裂隙岩体相互作用的数值模拟技术^[101,103]。Hoorishad(1992)提出了一种基于微分结构张量的混合 Newton-Raphson 数值计算方法^[104-107],Zimmerman(1993)对单相流体-裂隙耦合非线性扩散方程进行了数值模拟^[37]。渗流-损伤耦合作用的本构方程也有很大发展,其有限元模拟也在工程中得到应用^[78]。

孙钧等(1993)研究了岩石力学与工程中开挖二次应力场与地下水渗流场以及温度场的耦合作用问题^[99]:

$$\sigma_{ij} = g(F_{ri}) \quad (1-15)$$

$$F_{ij} = f(K_{ri}) \quad K_{ij} = L(\sigma_{ri}) \quad (1-16)$$

于是 $K_{ij} = G(k_{mn})$

显然,需要反复迭代才能使耦合应力场达到平衡与稳定。

关于岩体渗透系数的变化建议采用以下公式:

$$K = K_0 \exp(-\alpha \sigma_0) \quad (1-17)$$

式中, K_0 为初始渗透系数; σ_0 为有效应力; α 为试验系数。

对式(1-17)迭代求解,是以时间域内作有限差分,再在空间域内作有限元离散,反复迭代,直至应力场达到稳定为止。

陶振宇等(1988,1991)在研究水库诱发地震时,对应力场与渗流场的耦合分析进行了深入研究^[109],库区向库区裂隙岩体渗透产生的动水压力 F_{ij} 会改变岩体的原始应力状态,而动水压力又直接依赖于水库水深、水文地质条件、岩体的渗透张量 K_{ij} 及其组合。

常晓林(1987)推导了各向同性连续介质的等效渗透系数与应变状态的耦合关系,并对抽水井和压力隧洞进行了耦合计算^[110]。许梦国(1990)首先用蒙特-卡洛(Monte-Carlo)法模拟岩体裂隙的分布^[111],然后根据模拟结果分别形成渗流和岩体应力有限元分析的单元网络,并进行数学分析,利用位移连续性的条