

岩土水力学

GEOHYDRAULICS

仵彦卿 编著



科学出版社
www.sciencep.com

岩土水力学

仵彦卿 编著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

岩土水力学(geohydraulics)是渗流力学、岩土力学、水文地质与工程地质、环境科学交叉形成的一门新学科,本书以作者多年来在国家自然科学基金项目(10572090,10172071,49572162)的研究成果为基础,融合了国内外这一领域的最新研究成果,形成独特的学科体系。全书共分9章,分别介绍岩土水力学的定义、研究内容、研究状况与趋势以及岩土水力学特性、岩土水力学基本定律、岩土水力学数学模型和数值方法、岩土水力学数学模型反演、细观岩土介质渗流与应力关系、岩土介质空隙堵塞与渗流耦合分析及岩土水力学的应用。

本书可作为岩土工程、岩土工程力学、环境科学与工程、水利工程、建筑工程、水文地质与工程地质、石油工程、地下工程等学科本科生、研究生教材以及研究者的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

岩土水力学/仵彦卿编著. —北京:科学出版社,2009

ISBN 978-7-03-023877-1

I. 岩… II. 仵… III. 岩土力学:水力学 IV. TU4 TV13

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第001417号

责任编辑:袁 琦 朱 丽 王日臣 / 责任校对:陈玉凤

责任印制:钱玉芬 / 封面设计:王 浩

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>

铭浩彩色印装有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2009年4月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2009年4月第一次印刷 印张:20 3/4

印数:1—1 500 字数:406 000

定价:58.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈路通〉)

前 言

21 世纪,人类面临着严重的资源环境问题,资源短缺导致全球性能源危机和粮食短缺,环境问题导致大气污染、水体污染、生物多样性减少等。地表以下的岩土介质属于环境的一部分,正在遭受着土壤污染和地下水污染。从生态环境角度看,研究岩土介质中污染物的迁移转化对地下环境和生态的影响、核废料深埋处置和垃圾深埋处置对地下环境的影响评价与安全设计、二氧化碳地质储存的评价与安全设计等,是岩土水力学研究的一项重要内容;从矿产资源开采角度看,岩土水力学重点研究矿山开采过程中岩土应力场与渗流场的耦合作用、对矿山开采安全性和突水的影响评价与工程防治设计;从岩土工程角度看,岩土水力学重点研究工程开挖过程中应力重分布与渗流耦合作用机理以及工程稳定性评价、涌水量预测与突水防治;从地质灾害角度看,岩土水力学重点研究岩土介质中地下水变化导致的滑坡、地面沉降、地表塌陷及水库诱发地震等的评价与预测;从地球科学角度看,研究地球板块运动与地幔流体相互作用过程(流-固耦合问题),分析板块接缝处的地应力分布和变化状况,进行地震与火山的预测,这可能是岩土水力学与地震学研究的新课题。

在过去的 30 年,地下水开采、石油天然气开采和地热能开发等领域,需要研究流体在裂隙岩体中的运动规律,以合理地制定开采方案;核废料和垃圾深埋处置工程中污染物的迁移预测,以设计合理的隔离方案,这些都使得裂隙岩体渗流问题研究得到深入开展。科学家认识到现场研究需要多学科的合作。水文学者具有很强的水力学知识,但缺少地质学、地球物理和岩土力学专业知识,在裂隙岩体渗流研究中受到限制;相反,地质学、地球物理和岩土力学方面的专业学者对于裂隙水力学难以理解。过去 30 年的实践,使我们认识到多学科交叉的重要性。

本书试图建立一个渗流力学与岩土力学的交叉学科体系,研究各种人类活动和地质过程引起岩土介质空隙变化,揭示变化岩土介质中流体流动规律;研究各种人类活动和地质过程引起流体变化,揭示岩土介质耦合作用下的力学行为。就是说,研究岩土介质中变形与渗流的相互作用规律,揭示多场耦合作用下的岩土介质渗流规律、变形规律以及地球生物环境规律。

从力学角度来看,岩土介质是一种特殊材料,也是一种处于地质环境中的受到多种耦合场作用的地质材料:它是岩土介质材料与地质环境的综合体,在天然条件下,它是多介质(孔隙、裂隙、溶隙及其复杂组合体)、多过程(物理过程、化学过程、生物过程及其地球生物化学过程)、多组分(多种物质混溶或非混溶状态)、多相流

(气相、液相和固相)、多尺度(微观、细观和宏观尺度的孔隙和裂隙,微观渗流、局地渗流、区域渗流和全球流体流动,多尺度的物质交换等)和多场耦合作用的复杂体系。在人类工程作用下,这个体系发生动态变化,现在的单学科难以解决这一复杂科学问题,因此迫切需要开辟新的学科领域。

为了适应学科发展和工程需要,出版一本系统论述岩土水力学的著作很有必要。作者与张倬元教授合作曾在1995年出版了《岩体水力学导论》,重点介绍岩体力学与渗流力学耦合力学机理和耦合模型。近年来,国内外这方面的研究成果不断涌现,有必要在该书的基础上,系统地总结前人的研究成果,结合作者研究团队的成果,特别是作者主持的国家自然科学基金资助的三个项目:变饱和介质中变形-渗流-化学过程耦合模型研究(10572090)、水-岩非线性动力学模型研究(49572162)、三轴条件下冻融岩石损伤过程的CT三维实时观测(10172071)所获得的研究成果,从零散的研究结果中通过系统总结、提炼,使之成为一个比较系统和比较完善的岩土水力学学科体系。

本书试图通过对岩土水力学的基本概念、基本理论、岩土水力学模型、数值方法以及岩土水力学在工程中的应用等的论述,逐步形成一套“岩土水力学”学科体系。全书共9章,第1章介绍人类工程与地质环境的相互影响、岩土水力学的基本概念、岩土水力学的研究内容以及岩土水力学研究进展;第2章阐述岩土体的水力学性质,包括空隙的结构类型、岩土体的渗透特性、地下水对岩土体力学性质的影响等;第3章介绍岩土水力学基本定律,包括多孔连续介质渗透定律、裂隙介质渗透定律、管道介质渗透定律、渗透力与渗透应力以及岩土体的渗透稳定性问题;第4章系统地论述岩土水力学数学模型与数值模拟;第5章探讨岩土水力学耦合过程的数学模型;第6章介绍岩土水力学参数确定方法;第7章论述细观岩土介质渗流与应力关系;第8章介绍岩土介质空隙堵塞与渗流耦合分析;第9章介绍岩土水力学应用方面的成果。

为了使读者能够系统地了解这一交叉领域的研究状况,作者引用了国内外这一领域众多的研究文献,作者对这些文献的作者表示感谢,这一交叉领域的发展是许许多多科学研究者共同努力的结果。作者从本人多年来的研究体会和研究成果出发,提出岩土水力学概念和学科体系,融合了诸多这一领域学者的研究成果。本书在撰写过程中注意学科体系的完备性,强调基本概念描述的准确性、基本理论推理的严密性以及基本理论的实际应用性。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的推导。本书的理论模型可广泛地应用于环境科学与工程、岩土工程、水文地质与工程地质、水文与水资源科学、采矿工程、铁道工程、水利水电工程、石油和地热田开发以及地震预报等学科领域。

作者对在岩土水力学领域作出贡献的学者表示衷心感谢,对一直关心和指导我研究的老师、同事和同行表示诚挚的谢意,对我所有的学生在这一领域的研究贡

献表示感谢。最后,衷心感谢以各种方式对本书的编写提供过帮助的人。感谢国家自然科学基金委员会三个面上项目的资助,感谢国家冻土工程重点实验室提供岩石 CT 实验条件,感谢多年来资助我研究的生产单位。

应该指出,岩土水力学还是一门新的、发展中的交叉学科,从大的层面讲,它涉及地球科学、环境科学和力学的交叉领域,无论是从宏观角度,还是从微观和细观角度看,尚有许多理论和实际应用问题需做进一步研究和完善。由于多种原因,书中可能会有许多不足和错误,作者愿与读者共同探讨,恳切希望批评指正,以促进该学科不断完善和发展。

仵彦卿

2008 年 8 月于上海交通大学

目 录

前言

第 1 章 概论	1
1.1 岩土水力学的定义	1
1.2 岩土水力学的研究内容	3
1.3 岩土水力学的研究进展	5
第 2 章 岩土体的水力学性质	17
2.1 基本概念	17
2.2 岩土体介质的特性	18
2.3 岩土体空隙的形成机理	22
2.4 岩土体地质赋存及其渗流特征	24
2.5 岩土体介质的渗透特性	34
2.6 地下水对岩土体力学性质的影响	38
2.7 岩土体的渗透稳定性问题	45
2.8 岩溶塌陷和水库渗漏问题	47
第 3 章 岩土水力学基本定律	49
3.1 多孔连续介质渗透定律	49
3.2 裂隙介质水力学定律	61
3.3 岩溶管道介质水力学定律	68
3.4 裂隙渗流与应力相互作用的基础理论	71
第 4 章 岩土介质渗流数学模型与数值方法	81
4.1 基本概念	81
4.2 多孔连续介质渗流数学模型与数值方法	83
4.3 裂隙介质渗流数学模型与数值方法	113
4.4 双重介质渗流数学模型与数值方法	121
4.5 岩溶水流系统数学模型与数值方法	128
第 5 章 岩土水力学耦合过程的数学模型	134
5.1 基本概念	134
5.2 岩土孔隙连续介质水力学耦合模型	143
5.3 岩土等效连续介质水力学耦合模型	182
5.4 岩土裂隙网络介质水力学耦合模型	189

5.5	岩土双重介质水力学耦合模型	196
第6章	岩土水力学参数确定方法	197
6.1	基本概念	197
6.2	数学模型反演的数值方法	198
6.3	岩土水力学模型参数确定的卡尔曼滤波最优估计方法	204
6.4	岩土水力学参数反演的神经网络模型	207
6.5	岩土水力学参数反演的最小二乘支持向量机方法	210
6.6	岩土水力学参数反演的粒子群优化算法	212
6.7	岩土水力学参数反演的遗传算法	214
第7章	细观岩土介质渗流与应力关系	217
7.1	基本概念	217
7.2	细观尺度岩石损伤-破裂过程的 CT 观测	221
7.3	CT 尺度岩石渗透水压力作用下的渗流特性分析	231
7.4	CT 尺度岩石应力作用下渗流特性试验分析	238
第8章	岩土介质空隙堵塞与渗流耦合分析	246
8.1	基本概念	246
8.2	岩土介质空隙生物堵塞机理初步分析	247
8.3	岩土介质微生物淤堵研究现状	248
8.4	岩土介质微生物淤堵与渗流关系研究	255
8.5	岩土介质化学淤堵与渗流关系研究	264
8.6	进一步研究的问题	269
第9章	岩土水力学的应用问题	271
9.1	岩土介质流-固耦合引起的地质灾害与工程灾害机理	271
9.2	尾矿坝渗流场与应力场耦合分析	277
9.3	隧道工程区岩体渗流场与应力场耦合分析	287
9.4	水利工程中建筑物渗透稳定性分析	299
	参考文献	312

第 1 章 概 论

1.1 岩土水力学的定义

人类工程(human engineering)是指人类为了改善其生存环境,在地球表面或地表之下构筑的一系列建筑物的总称。包括地上工程(ground engineering)和地下工程(underground engineering),地上工程的基础部分和地下工程都属于地质工程(geological engineering)。人类工程活动,一方面要依托于地质环境(geological environment),另一方面又影响和改造地质环境。地质环境的优劣直接影响工程活动的正常运转和工程体的稳定性。在地质环境内,岩土体与其中的地下水相互作用,影响和改变着地质环境的状态(应力状态、生物地球化学状态、温度状态以及流体流动状态等)。

在天然状态下,地质环境中岩土体和地下水之间的相互作用可归纳为两个方面:一是地下水与岩土体之间发生机械的、物理的、生物的和化学的相互作用,使岩土体和地下水的性质或状态不断地发生变化;二是地下水与岩土体产生相互的力学作用,这个过程不断地改变着作用双方的力学状态和力学特性。地下水对岩土体的力学作用表现在岩土体空隙中的静水压力和动水压力作用。排水降低地下水位,会使土体固结和土颗粒流动引起压密变形,使土体渗透系数和孔隙率减小;补给地下水升高地下水位,会使土体空隙空间增大,使土体渗透系数和孔隙率增大。地下水位升高使岩体发生劈裂扩展、剪切变形和位移,增加岩体中结构面的空隙度和连通性等,从而增加岩体的渗透性能(渗透系数增大)和储存性能(孔隙率、给水度或弹性释水系数增大)。岩土体对地下水的作用力主要是通过改变岩土体内应力状态,来改变岩土体的结构特征:对土体来说,主要是固结或沉降作用使土体孔隙率和渗透系数减小;对岩体来说,岩体内的结构面是力学性能软弱的部位,对应力状态改变特别敏感,应力的改变会引起岩体中节理裂隙开度的改变,从而影响岩体的渗透性能。

在人类工程活动作用下,一方面由于工程的开挖,工程荷载施加于岩土体之上,改变岩土体内部应力场的分布,从而影响岩土体的结构,引起岩土体中地下水性态的改变和地下水力学特征的改变;另一方面,由于工程体的出现,改变了区域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。地下水对岩土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,最终影响岩土体的稳定性。

综上所述,人类工程活动与地质环境密切相关,要保持人类工程活动与地质环境的协调性,正确评价人类工程与地质环境的关系、地下岩土体渗流场与岩土体应力场的相互力学作用及其对自然岩土体和工程岩土体的稳定性和工程体的安全性的影响,就成为岩土水力学要解决的重要课题。

土质和岩质边坡的设计、水库诱发地震的预测、有害核废料和卫生垃圾的深埋处置、矿山开采过程中的洞室稳定与突水问题,铁路、公路的土质和岩质边坡与隧洞的稳定问题以及隧洞的突水问题,水利水电工程中土质和岩质边坡、地下厂房、大坝等的稳定及渗流控制问题、石油和地热能的开发及地下水资源的开发与利用等,都必须涉及岩土的水力学性能研究。工程实践迫切要求系统地量化研究人类工程力作用下,岩土体与地下水的相互作用关系、岩土体与地下水力学耦合作用对人类工程体稳定性的影响。岩土水力学的形成与发展,就是从满足上述需要而逐渐发展起来的一门边缘性交叉学科。

Louis(1974)提出了岩石水力学(rock hydraulics)的概念,他把岩石水力学作为岩石力学的一部分。岩石与岩体有很大的不同,岩体是岩石的集合体,其内部存在着不连续面、断层、节理裂隙。岩石的渗透性极弱,岩体的渗透性取决于裂隙(成岩裂隙、构造裂隙或后期改造裂隙)的发育程度,一般裂隙的渗透性很强,是岩石渗透性的百倍以上。另外,岩体裂隙中的地下水具有渗透压力,通过作用于岩体的裂隙隙面而使岩体变形。因此,把处于一定地质环境之中,经受过地质建造、地质构造和地质改造作用形成的地质体——岩体与地下水相互力学作用规律的科学,称为岩体水力学(rock mass hydraulics),并把它作为一门独立的学科,这是仵彦卿与张倬元 1995 年提出的。岩体水力学是应用渗流力学和岩体力学的基本理论,以动态的地质结构体为基础,研究自然岩体和工程岩体与地下水相互力学作用规律的科学。这个定义包含两层含义:一方面研究在人类工程力和天然地应力场作用下,岩体中地下水的运动规律;另一方面研究在地下水渗透力(seepage forces)作用下的岩体渗透稳定性问题,以正确指导工程设计与施工以及地下水资源合理开采。它是一门新兴的、正在发展中的边缘性交叉学科。

当研究岩土体系统中气体(非饱和带中的气体、煤系地层中的瓦斯气以及含油盆地中的天然气等)、液体(含水层中的地下水、油田中的油以及非水相的液体等)及固体(岩石或土)之间的相互力学作用时,涉及岩土体与渗流力学的耦合问题。此时岩体水力学可拓宽为岩土水力学。

岩土水力学(geohydraulics)是研究岩土体介质中流体(包括气体和液体)与变形岩土体相互作用规律的科学。一方面研究复杂岩土体介质中渗流和物质迁移(多介质岩土体中流体的传力、传热和传质过程)对岩土体介质力学性质的影响;另一方面研究受各种力场(渗流场、应力场、温度场、溶质场、电场、生物地球化学场等)作用下的变形岩土介质对其中的渗流和物质迁移的影响。这一交叉学科领域

涉及水文地质与工程地质、岩土工程、环境科学与工程、水利工程、石油工程、铁道工程、公路工程、海洋工程等诸多领域,也涉及地震地质与工程、地球板块动力学(地幔岩浆流动与地壳板块相互作用引起的地壳运动)。

1.2 岩土水力学的研究内容

地球上的岩土体受到地球重力、高流体压力、构造应力和热荷载等力场的作用,岩土体内存在孔隙和不同尺度的裂隙(断层、节理、大裂缝和微裂缝等)。对于松散土体孔隙介质来说,一般认为是等效连续介质,可以看作是充满流体的。松散土体研究的关键是土体的形成条件(冰积物、坡积物、洪积物、冲积物、湖积物、海相沉积物等)和岩性(含水层、隔水层、透水层、弱透水层等),对于特殊土体来说,如黄土和裂隙化黏土,裂隙是地下水的通道,形成优势流问题。对于岩体来说,裂隙或岩溶管道是流体运动的重要通道,因此,在矿产寻找(断层或裂隙是热液矿床形成的通道)、石油天然气藏开采、地下水资源开采、地热开采中,岩体裂隙或断层的寻找至关重要。另外,在环境工程中,地表或河湖污染物通过裂隙通道运移到地下水中,造成地下水污染,污染物运移通道的寻找也是至关重要的。在地下矿山开采工程和地下洞室工程中,为了防止突水事件发生,寻找裂隙通道是关键。

因此,岩土水力学涉及四个关键问题:一是岩土体介质特性,尤其是空隙(孔隙、裂隙、溶隙)特性如何描述?如孔隙分布的均质性、各向异性、连通性,裂隙的分布位置、密度、方向、产状、充填状况等。二是流体在岩土介质中如何流动和物质迁移?三是岩土体介质在各种场的作用下如何变化?如孔隙空间的变化、裂隙宽度变化,变化条件下流体在岩土体介质中流动和迁移转化规律如何?四是在不同工程中,岩土水力学如何解决现实问题?

1.2.1 岩土体介质特性研究

这一部分研究内容主要在第2章论述。这一部分重点研究内容有:

(1) 岩土体介质地质赋存及其渗流特征分析,首要任务是从地质学角度分析岩土体的形成条件(岩性变化)、地质构造(断层、节理和裂隙分布)和地质改造(地球内动力的变质作用和外动力风化作用等)。如松散湖滨带沉积物、河流冲积物和山前洪积物的渗透性很好,而坡积物、湖心沉积物和冰积物的渗透性差;黄土具有垂向节理发育,垂向渗透性大于水平方向的渗透性,具有明显的各向异性。对于岩体来说,由于岩性和节理裂隙分布的高度非均质和离散性,岩体的渗透性具有明显的非均质性和各向异性特点。

(2) 岩土体介质孔隙特性研究,研究岩土体空隙的形成机理、空隙的结构类型及不同类型空隙介质的渗流特征。

(3) 岩土体介质的渗透特性研究,研究孔隙、裂隙和溶隙的渗透系数(张量)的描述。

(4) 地下水对岩土体介质力学性质的影响研究,定量研究地下水对岩土体力学表述。

(5) 岩土体渗透稳定性研究。

1.2.2 岩土介质渗流与物质迁移规律研究

这一部分研究内容主要在第3章和第4章论述。这一部分重点研究内容有:

(1) 岩土介质渗透定理、多孔连续介质渗透定理(Darcy 定理)、非饱和多孔连续介质渗透定理、裂隙介质水力学定理(立方定理)、岩溶管道介质水力学定理。

(2) 岩土介质物质迁移规律研究,重点研究岩土介质溶质迁移定理(Fick 定理)、岩土介质溶质迁移的对流弥散模型等。

(3) 岩土介质渗流数学模型和数值方法,主要研究不同介质类型渗流数学模型和数值方法。

1.2.3 岩土介质与流体多场耦合机理与模型研究

这一部分研究内容主要在第3章、第5章、第7章和第8章论述。这一部分重点研究内容有:

(1) 岩土介质多种力耦合机理研究,包括岩土介质渗流与应力耦合关系研究、渗流与温度关系研究、渗流-温度-应力耦合关系研究、变形-渗流-化学过程耦合关系研究、变形-渗流-溶质迁移-生物过程耦合关系研究、细观尺度渗流-应力关系研究等。

(2) 岩土介质多场耦合模型研究,重点研究渗流场-应力场耦合模型、渗流场-温度场-应力场耦合模型、变形场-渗流场-溶质运移场耦合模型、应力场-渗流场-溶质运移场-地球化学场耦合模型、变形场-渗流场-溶质运移场-生物过程耦合模型,以及研究这些模型的数值解法和参数反演方法,研究模型的灵敏度分析和随机性分析,以及模型的预测问题等。

1.2.4 岩土水力学工程应用研究

这一部分研究内容主要在第6章和第9章论述。这一部分重点研究内容有:

(1) 在资源领域应用,如地下水资源量计算、石油天然气储量计算、地热资源计算、岩盐矿床开采分析、地浸法铀矿开采分析等。

(2) 在环境领域,如核废料的深埋处置库的安全评价和设计、垃圾填埋工程的渗滤液防渗问题、污水的土地和湿地处理问题、CO₂ 地质储存的安全性和储存量评价和预测、有毒有害物质通过岩土介质孔隙和裂隙渗漏污染土壤和地下水的预

警、土壤-地下水污染修复工程等。

(3) 在岩土工程和矿山开采领域,如建筑基坑排水与地面沉降、城市过量抽取地下水导致地面沉降、地下洞室渗透稳定性和防渗问题、矿山突水和涌水量预测等。

(4) 在边坡工程中,如大气降水引起边坡失稳或滑坡的机理与过程、边坡排水设计和渗透稳定性评价。

(5) 在水利工程中,如大坝渗透稳定性分析和排水降压、坝基和坝肩渗透稳定性问题、库区水位升降的库岸稳定性问题,以及水库诱发地震问题等。

1.3 岩土水力学的研究进展

1.3.1 孔隙介质渗流问题研究

19 世纪初,Fourier (1822)热传导模型广泛地应用到电学中的电流定律(即欧姆定律)、毛细管流(Poiseuille and Hagen)和传质过程中的分子扩散(Fick 定律)、Fourier 热传导模型为多孔介质渗流和溶质运移研究奠定了理论基础。

1. 在饱和孔隙介质渗流研究

Henri Darcy (1803~1858)通过砂柱实验发现通过砂柱的渗流量与水力梯度成正比,这就是著名的达西定律(Darcy,1856)。达西是第一位把 Fourier 定律扩展到天然孔隙介质中的渗流研究的学者,达西定律的建立,标志着渗流力学的形成或水文地质学定量化的开始。Jules-Juvenal Dupuit(1804~1866)运用势理论证明了达西定律是忽略惯性效应的 de Prony 方程的一种特例,即理想化的细管砂柱中的地下水稳定流问题(Dupuit,1857)。Dupuit(1863)根据水头剖面描绘了自流井盆地并流特征,并且解决了具有自由面含水层中稳定流方程(裘布衣公式)。Karl Terzaghi (1883~1963)用温度类比孔隙压力,用含热量类比含水量,用热传导率类比黏土渗透率,用比热类比黏土压缩性,首次把非稳态热传导方程应用到多孔介质流体流动问题, Terzaghi(1923)定义了有效应力(effective stress),并且解决了用于分析黏土柱固结问题的一维地下水非稳定流方程。泰斯(Charles Theis, 1900~1987)研究了井流问题,他在辛辛那提大学数学家 Clarence Lubin 教授的帮助下推导出地下水非稳定井流公式(Theis,1935),应用非稳定地下水井流公式用潜水含水层资料估算给水度。Jacob(1940)根据多孔介质的垂向压缩性、水的压缩性以及含水层的孔隙率,给出了泰斯公式中储水系数的物理意义,他的分析显示泰斯非稳定井流公式适合于承压含水层,而不适用于潜水含水层中的井流问题。Hubbert(1940)定义了地下水系统的流体势,描述了水利传导率的性质。Biot (1941)把太沙基的一维固结理论扩展到三维,通过有效应力把流体流动与基质变

形耦合起来。Jacob (1946)和 Hantush (1966)把地下水非稳定井流公式扩展到多层含水层系统中地下水非稳定的井流计算,包括越流层。Scheidegger (1954)提出了对流-弥散方程,并定义了弥散度参数。Clough(1960)把有限元引用到地下水流数值计算中,Bear(1960)把弥散张量引入多孔介质溶质依赖速度扩散的宏观描述。

2. 非饱和孔隙介质渗流研究

Edgar Buckingham (1867~1940)应用 Fourier 热传导模型定义了土壤毛细水势,并证明了土壤水运动由重力和毛细水势梯度驱动,土壤水力传导率是毛细水势的函数(Buckingham, 1907)。Willard Gardner(1883~1964)发明了毛细水势仪,实现了土壤毛细水势的测量,第一次根据实测土壤毛细水势定量表述土壤含水量和水力传导率(Gardner et al., 1922)。Richards(1931)描述了非饱和非稳定非线性偏微分方程。

1.3.2 单裂隙渗流问题研究

Lomize(1951)在室内进行了单裂缝水力学试验,用实验方法证明了单裂隙岩石中地下水运动的立方定律(cubic law),即:

$$q = \frac{\gamma b^3}{12\mu} J_f = \frac{gb^3}{12\nu} J_f \quad (1-1)$$

式中, q 为岩体裂隙中的单宽流量(L^2T^{-1}); b 为裂隙隙宽(L); J_f 为裂隙内水力梯度(无量纲); μ 为地下水的动力黏滞系数($ML^{-1}T^{-1}$); g 为重力加速度(LT^{-2}); ν 为地下水的运动黏滞系数(L^2T^{-1}); γ 为地下水的容重($ML^{-2}T^{-2}$); ρ 为地下水的密度(ML^{-3})。

此后,Louis(1967)、Louis 和 Maini(1970)、Moreno 等(1988)等,先后提出了粗糙裂隙面的单裂隙地下水渗流公式,在式(1-1)的基础上增加了裂隙粗糙度的修正系数。

1.3.3 裂隙系统渗流研究

关于裂隙系统中地下水运动问题的研究,起步于 20 世纪 60 年代,主要是岩体裂隙渗流模型研究,岩体裂隙水力学参数的确定等方面的研究。

第一类岩体裂隙系统渗流模型,认为裂隙岩体是一种具有连续介质性质的物质。把这种连续介质看成是由两种介质组成,即以裂隙介质导水、孔隙岩块介质储水为其特征,分别建立裂隙介质渗流模型与孔隙介质渗流模型,用裂隙与孔隙岩块间水量交替公式连接,组成一个耦合方程式,在方程式中存在两种水头,这一模型的代表是 Barenblatt 等(1960)提出的被称为“双重介质”渗流模型(flow model in double porosity media),即:

$$K_p \left(\frac{\partial^2 H_p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H_p}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 H_p}{\partial z^2} \right) = S_{ps} \frac{\partial H_p}{\partial t} - \alpha (H_p - H_f) \quad (1-2)$$

$$K_f \left(\frac{\partial^2 H_f}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H_f}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 H_f}{\partial z^2} \right) = S_{fs} \frac{\partial H_f}{\partial t} + \alpha (H_p - H_f) \quad (1-3)$$

式中, K_p, K_f 分别为孔隙岩块和裂隙介质的渗透系数 (LT^{-1}); S_{ps}, S_{pf} 分别为孔隙岩块和裂隙介质的储水率 (L^{-1}); α 为孔隙岩块与裂隙介质之间的水量交换系数; H_p, H_f 分别为孔隙岩块与裂隙介质中地下水水头 (L)。

Warren 和 Root(1963)提出了类似的模型。他们认为,岩体裂隙发育具有均质的正交裂隙系统,裂隙互相连通,每一方位裂隙组平行一个渗透主轴。垂直于每一主轴的裂隙组等间距分布,隙宽不变,但沿各主轴的裂隙组的隙间距和隙宽不相同。每个岩块为孔隙系统,具有均质各向同性渗流特点。孔隙和裂隙之间存在水量交换。

Streletsova(1976)也提出了类似的双重介质渗流模型。他认为,岩体是由裂隙和岩块组成。把岩体看作为由裂隙系统分割开的许多水平岩块组成,岩块水平方向无限延伸,岩块厚度和裂隙隙宽不变,且岩块厚度远远大于裂隙隙宽,裂隙中的水流是水平流,岩块中的水流是垂向流。于是,得出承压含水层中渗流偏微分程式为:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(T_{xf} \frac{\partial H_f}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(T_{yf} \frac{\partial H_f}{\partial y} \right) = S_f \frac{\partial H_f}{\partial t} + \alpha_1 S_p \int_0^t \frac{\partial H_f}{\partial t} e^{-\alpha_1(t-\tau)} d\tau \quad (1-4)$$

式中, $T_{xf} = K_{xf}M, T_{yf} = K_{yf}M$ 分别为 x, y 方向上的导水系数 (L^2T^{-1}), M 为含水层厚度 (L); α_1 为延迟指数的倒数; S_f, S_p 分别为裂隙介质和孔隙岩块的储水系数。

对于轴对称井流问题而言,依据式(1-4),抽水条件下井中地下水水位降深可写成:

$$T \left(\frac{\partial^2 s_f}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial s_f}{\partial r} \right) = S_f \frac{\partial s_f}{\partial t} + \alpha_1 S_p \int_0^t \frac{\partial s_f}{\partial t} e^{-\alpha_1(t-\tau)} d\tau \quad (1-5)$$

式中, T 为均质各向同性含水层的导水系数 (L^2T^{-1}); s_f 为裂隙介质系统中地下水水位降深 (L)。

另外, Duguid (1977)、Huyakorn (1983)、Neretnieks 等 (1984)、Dykhuizen (1990)、王恩志(1991)、仵彦卿(1998)也分别研究了双重介质渗流模型,这些学者卓有成效的研究,促进了岩体双重介质渗流模型的发展。

第二类岩体渗流模型,把岩体看成是由单一的按几何形态有规律分布的裂隙介质组成,岩体中的岩块渗透性极弱,可忽略不计。用裂隙水力学参数和几何参数(如裂隙产状、裂隙间距和隙宽等)来表征裂隙岩体内渗透空间结构的具体布局,所以在这类模型中,裂隙的大小、形状和位置都在考虑之列。这类岩体渗流模型称为

岩体裂隙网络系统渗流模型(flow model in fractured network system)。

第二类岩体渗流模型以前苏联学者 POMM(1966)、美国学者 Snow(1969)、法国学者 Wittke 和 Louis(1966)的研究成果为代表。

POMM 和 Snow 以裂隙统计为基础,创立了岩体裂隙渗透率张量(permeability tensor)理论。他们先后提出假设,即使不同方向裂隙组在裂隙网络系统中相互连通,一个方向上裂隙组的裂隙水流(fissure water 或 fracture water)丝毫不受另一方向裂隙组裂隙水流的干扰。据此,可将实际介质按裂隙网络的各方向裂隙组分解成几个只具唯一方向裂隙组的虚构介质,则通过实际介质的水流等于把这些虚构介质的水流叠加起来,于是得:

$$v = \sum_{i=1}^M v_i = \sum_{i=1}^M \frac{\gamma b_i^3 \lambda_i}{12\mu} (I - a_i a_i) J_i \quad (1-6)$$

式中, v 为裂隙网络系统中地下水渗流速度矢量($L^2 T^{-1}$); v_i 为第 i 组裂隙介质中地下水渗流速度矢量($L^2 T^{-1}$); b_i 为第 i 组裂隙的平均裂隙隙宽(L); λ_i 为第 i 组裂隙的平均密度(L^{-1}); I 为单位矢量; a_i 为第 i 组裂隙隙面的法向单位矢量; J_i 为裂隙网络系统中地下水水力梯度矢量; M 为裂隙组的总数目。式(1-6)还可写成:

$$v = K_i J_i = \frac{\gamma}{\mu} k_i J_i \quad (1-7)$$

式中, $k_i = \sum_{i=1}^M \frac{b_i^3 \lambda_i}{12} (I - a_i a_i)$ 为裂隙介质的渗透率张量(permeability tensor) (L^2);

$K_i = \frac{\gamma}{\mu} k_i$ 为裂隙介质的渗透系数张量(hydraulic conductivity tensor) ($L T^{-1}$)。

Wittke 和 Louis(1966)将裂隙岩体的渗透问题概化为一系列单个裂隙组成的裂隙网络,运用线单元法建立了裂隙网络水流的线索模型。该模型以真实裂隙网络展布为基础,按照连续流条件建立裂隙节点水均衡方程式,再按每个闭路的水位差代数和为零来建立回路方程式,组合这些方程组构成了裂隙网络水流系统的线索模型。

Wittke 的模型在实际应用中困难较大,原因是无法查清岩体中裂隙的展布规律。而渗透系数张量理论应用于解决实际岩体的渗流问题,相对比较简单,它是把裂隙系统等效成各向异性的连续介质系统,它的关键就是计算岩体各向异性渗透系数张量。关于求取各向异性渗透系数张量的压水试验法是 Snow(1966)首先提出的,后经由 Rocha 和 Franoiss(1978)、Louis(1970, 1974)、Hsieh 和 Neuman(1985)的研究,又分别有了校正系数法、三段压水试验法和交叉孔压水试验法。

抽水试验法确定岩体渗透系数张量,是由 Papadopoulos(1965)首次提出来的。Hantush(1966)、Way(1982)和 Neuman(1984)先后对确定各向异性渗透系数张量的抽水试验方法做了进一步研究,取得了重要的成果。

在我国,岩体裂隙系统渗流问题研究较晚,但发展较快。田开铭(1986),在实验室内进行了非等宽、交叉裂隙的水力学试验,提出了交叉裂隙具有“偏流效应”,后发展成偏流理论。田开铭与万力(1989)合作撰写的《各向异性裂隙介质渗透性的研究与评价》专著,系统地介绍了裂隙介质渗透系数张量的各种确定方法。王恩志(1991),提出了“似双重介质”渗流模型。毛昶熙、张有天、陶振宇等在裂隙岩体渗流研究方面也做出了重要贡献。仵彦卿(1993,1994)、仵彦卿和张倬元(1995)研究了裂隙岩体渗流模型和渗流系数张量的确定方法。

1.3.4 岩溶介质渗流问题研究

岩溶含水层具有不同于其他含水层(如:松散孔隙含水层、基岩裂隙含水层)的特点:极其复杂的渗透介质特性、高度非均质各向异性、大空隙性、高的流速、大流量以及深部岩溶的高渗透水压力等,使得传统的水文地质研究方法,如:钻孔、抽水试验及分布式模型等难以适合于岩溶地下水研究(Bakalowicz, 2005)。

Mojstisovics (1880)第一次认为岩溶地区具有特殊的地表形态和主要地下水文特征。Cvijic (1893)和 Kruber (1900)从地形景观上把石灰岩山区定义为岩溶地区。在20世纪初,关于岩溶研究形成了两个研究领域,即研究岩溶地表景观特殊的岩溶地貌学和研究岩溶地下水特征的岩溶水文学。

Droge (1974)和他的研究团队(Razack, 1980)认为岩溶网络模式由裂隙网络模式决定,岩溶主要管道沿主要断层、裂隙以及较小的裂缝发育。然而,现在的大多数岩溶水文地质学家认为岩溶网络与裂隙网络有着很大的差别。Palmer (2000)认为:空隙类型(粒间孔隙、层面或裂隙)和水力条件(补给和水力梯度)驱动岩溶管道网络或溶洞模式。岩溶地下水研究主要围绕两大问题展开。

1. 岩溶含水层的结构和功能

如何确定岩溶网络的存在、几何形状以及空间分布,一直是岩溶地下水文学研究的难点。传统的水文地质研究方法广泛地用在岩溶地下水研究中,地质框架尤其是裂隙分布的详细描述对岩溶含水层结构研究是一个有效的方法,这一方法是由法国的 Droge 团队在20世纪70年代提出的,他们假定岩溶网络是以地质构造形成的断层和裂隙为基础发展起来的(Grillot, 1977; Razack, 1980)。Eraso (1986)研究显示从地下水补给区到泉出露之间由于裂隙的连通性和水力梯度的存在,地下水流并不是沿地质结构控制的裂隙网络流动,而是有选择的。然而,传统的水文地质方法提供了一个区域岩溶含水层的框架,具体的地下水流系统的判断还要考虑裂隙的连通性和地下水流梯度分布。由 Mangin(1974)第一次提出的水动力学方法(Mangin, 1974, 1984; Marsaud, 1996)、水热学方法(Andrieux, 1976)以及各种天然示踪剂,如水生微小动物(Rouch, 1980)、主要无机溶解固形物(Bakalowicz, 1979; Plagnes, 1997)和同位素(Bakalowicz et al., 1974; Bakalow-