



当代
杰出青年
科学文库

采动岩体 渗流理论

缪协兴 刘卫群 陈占清 著



科学出版社
www.sciencep.com

当代杰出青年科学文库

采动岩体渗流理论

缪协兴 刘卫群 陈占清 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书系统介绍了采动岩体渗流理论及其应用。全书共分四篇。第一篇是采动岩体渗流理论的试验基础,包括岩石全应力-应变过程渗透试验、峰后岩石非 Darcy 流的渗透试验、破碎岩石渗流试验等;第二篇是峰后岩石渗流的非线性动力学分析,包括峰后岩石渗流系统的动力学方程与谱截断研究、峰后岩石渗流参变系统的稳定性、峰后岩石气体渗流的分岔行为等;第三篇是破碎岩体渗流的概率随机分析,包括破碎岩体渗流的概率区间分析、破碎岩体渗流的随机理论及随机微分方程、破碎岩体渗流的随机有限元法等;第四篇是采动岩体渗流理论的应用,包括煤矿突水与瓦斯突出机理分析、采空区渗流场与瓦斯浓度分布等。本书内容涉及力学与采矿、岩土及水利工程等交叉领域,书中针对实际工程中迫切需要解决的问题,从试验、理论及应用等方面形成了系统成果。

本书可供从事力学、采矿、岩土、安全、地质、水利、国防等领域的广大科技工作者及高等院校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

采动岩体渗流理论/缪协兴,刘卫群,陈占清 著. —北京:科学出版社,2004

(当代杰出青年科学文库)

ISBN 7-03-014598-4

I. 采… II. ①缪… ②刘… ③陈… III. 矿山-岩体-渗流-流动理论 IV. TD31

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 124054 号

责任编辑:陈玉琢 贾瑞娜/责任校对:李奕莹

责任印制:钱玉芬/封面设计:王浩 陈敬

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>

源海印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2004 年 12 月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2004 年 12 月第一次印刷 印张: 21 1/2

印数: 1—1 500 字数: 405 000

定价: 60.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈新欣〉)

序

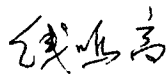
采动岩体力学是力学与矿业工程交叉的新的学科生长点,渗流理论的研究是其重要的研究方向.其研究内容在国家 973 项目“灾害环境下重大工程安全性的基础研究”,国家自然科学基金重大项目“深部岩石力学基础及应用”、国家自然科学基金重点项目“厚煤层全高开采方法基础研究”、“煤矿瓦斯灾害预防及煤层气开采中的应用基础研究”、国家杰出青年科学基金项目“复合关键层理论及其在岩层控制中的应用研究”及“八五”、“九五”、“十五”科技攻关等项目中都有显著体现.

我们知道,岩体本身就是一种天然的孔隙介质,岩体中的渗流问题是岩石力学与工程领域中的重要研究方向之一.目前,对于完整岩体中的渗流理论和试验,成果较为丰富,关于峰后破裂和破碎岩体中的渗流问题研究的成果还很少.然而,由于采动或其他岩土工程活动,常常会造成岩体开裂甚至破碎,而破碎岩体裂隙中的渗透率要远比孔隙渗透率高,这就是由于渗流而引起的重大灾害事故往往多发生在破碎岩体中的原因.1990~1999 年 10 年间,我国煤矿发生一次死亡 10 人以上的重特大事故中,瓦斯和水灾事故占 80%以上.究其原因,煤矿采场工作面底板突水事故的 79.5%是发生在有断层等构造的破裂底板中;采空区破碎岩体中的瓦斯浓度要高出工作面处几十倍,这无疑是工作面产生瓦斯事故的潜在威胁.另外,瓦斯抽放技术也与岩石破碎后渗透性显著增加有关.

根据渗流特性和研究方法的不同,采动岩体渗流可分为峰后破裂岩体渗流和破碎岩体渗流两部分.峰后岩体渗流除具有一般裂隙渗流特性外,还具有多控制参量等复杂行为特征.为了寻找峰后岩体渗流失稳和分岔的条件,开展动力学系统的非线性行为研究十分必要.采矿或其他地下工程中的破碎岩体渗流多处于较高围压作用下,破碎岩体在较高围压下发生变形将造成结构组成上的改变,进而引起渗流路径发生变化,这一过程具有很强的随机性.本书重点阐述了作者近期利用随机理论和非线性动力学对破碎岩体中渗流的研究,并在实践中得到了一定的应用.

根据工程中迫切需要解决的重大难题,立足试验基础、结合数理分析、面向工程实际是本书鲜明的特点.书中第一篇是试验基础,内容涉及峰后和破碎岩体

中渗流的试验方法,这无疑丰富了采动岩体渗流的试验手段.第二、三篇分别是峰后和破碎岩体渗流的理论及数值分析,内容涉及峰后岩石渗流的非线性动力学研究和破碎岩体渗流的概率随机分析,这些为采动岩体渗流研究奠定了理论和分析基础.第四篇是工程应用,内容涉及煤矿突水与瓦斯突出机理分析、采空区渗流场与瓦斯浓度分布等,它们是作者将采动岩体渗流理论初步应用于工程实践所得到的宝贵经验.本书在试验方法、理论和数值手段及工程应用等方面都具有较大创新和较高学术价值.这些成果将为井下突水防治、煤矿瓦斯抽放以及煤与瓦斯共采提供理论和应用基础,也可作为其他岩石工程(如隧道、大坝、边坡等)渗流问题的参考.相信本书的出版定会进一步推动岩石渗流领域的理论和应用研究.



2004年9月

前 言

在水利和地下资源开采等岩石工程中,常常会遇到破碎岩体中的渗流问题。我们知道,岩体本身就是一种天然的孔隙介质,岩体中的渗流问题是岩石力学与工程领域中的重要研究方向之一。目前,对于完整岩体中的渗流理论和试验成果较为丰富,关于破碎岩体中渗流问题研究的成果还很少。然而,由于采动或其他地下工程活动,有时不可避免会造成岩体开裂甚至破碎冒落,而破碎岩体裂隙中的渗透率要远比孔隙渗透率高得多,即岩石工程中由于渗流而引起的重大灾害事故往往多发生在破碎岩体中。岩石工程中遇到的破碎岩体大致可分为两类,一类是岩体原有构造再加开挖应力作用(应力超过峰值)破碎后仍处原来位置的破碎岩体,可称原位破碎岩体;另一类是由采动(或开挖)破碎冒落后的堆积体,可称堆积破碎岩体。不论是何类破碎岩体,其渗流特性都将与完整岩体有着显著不同。

采动岩体渗流是采动岩体力学行为研究的重要方面。根据渗流特性和研究方法的不同,采动岩体渗流可分为峰后破裂岩体渗流和破碎岩体渗流两部分,前者以破裂岩体为基本介质,主要讨论裂隙渗流规律及失稳分叉条件;后者以破碎岩体为基本介质,主要讨论夹缝渗流规律及流场随机分布演化等。本书分四篇介绍采动岩体中的渗流理论及其应用。第一篇是采动岩体渗流理论的试验基础,包括岩石全应力-应变过程渗透试验、峰后岩石非 Darcy 流的渗透试验、破碎岩石渗流试验等;第二篇是峰后岩石渗流的非线性动力学分析,包括峰后岩石渗流系统的动力学方程与谱截断研究、峰后岩石渗流参变系统的稳定性、峰后岩石气体渗流的分岔行为等;第三篇是破碎岩体渗流的概率随机分析,包括破碎岩体渗流的概率区间分析、破碎岩体渗流的随机理论及随机微分方程、破碎岩体渗流的随机有限元解法等;第四篇是采动岩体渗流理论的应用,包括煤矿突水与瓦斯突出机理分析、采空区渗流场与瓦斯浓度分布等。

本书系国家自然科学基金资助项目研究成果,得到国家杰出青年基金项目“复合关键层理论及其在岩层控制中的应用研究”(项目编号:50225414)、国家自然科学基金重大项目“深部高应力的资源开采与地下工程基础研究”(项目编号:50490270)、国家自然科学基金重点项目“煤矿瓦斯灾害预防及煤层气开采中的应用基础研究”(项目编号:50134040)以及教育部博士点基金项目“峰后应力状态下的岩石渗透性研究”(项目编号:20010290003)等资助。

由于作者水平所限及写作时间仓促,书中难免存在缺点错误,恳切希望广大同行专家与读者批评指正。

作者

2004 年 11 月

目 录

序

前言

绪论	1
0.1 采动岩体及采动岩体渗流	1
0.2 峰后岩体渗流的研究方法	2
0.3 破碎岩体渗流的研究方法	4
参考文献	7

第一篇 采动岩体渗流理论的试验基础

第 1 章 岩石渗透性的试验测试技术	11
1.1 岩石的渗透试验	11
1.2 试验技术的发展	14
参考文献	15
第 2 章 岩石全应力-应变过程渗透试验	17
2.1 岩石的全应力-应变过程	17
2.2 全应力-应变全过程中渗透试验	18
2.3 典型试验结果	23
参考文献	32
第 3 章 峰后岩石非 Darcy 流的渗透试验	33
3.1 峰后岩石的力学行为	33
3.2 峰后岩石非 Darcy 流的渗透试验	34
3.3 峰后岩石渗透的非 Darcy 流特征	48
3.4 本章小结	48
参考文献	48
第 4 章 破碎岩石渗流试验	50
4.1 破碎岩石及工程破碎岩体	50
4.2 破碎岩石的水渗流试验	56
4.3 破碎岩石的气体渗流试验	81
参考文献	84

第二篇 峰后岩石渗流的非线性动力学分析

第 5 章 非线性动力学基础及典型系统	87
5.1 非线性动力学的研究现状与展望.....	87
5.2 耗散结构与协同学.....	98
5.3 分岔与突变.....	112
5.4 混沌与分形.....	125
5.5 时间序列分析基本理论.....	136
5.6 几种典型的非线性系统.....	147
参考文献.....	168
第 6 章 峰后岩石渗流系统的动力学方程	173
6.1 峰后岩石渗流的动力学控制方程.....	173
6.2 控制方程的分离变量解.....	174
6.3 控制方程的行波解.....	175
6.4 控制方程的自相似解.....	177
6.5 系统的失稳条件.....	178
6.6 本章小结.....	179
参考文献.....	179
第 7 章 峰后岩石渗流分岔行为的谱截断研究	181
7.1 渗流系统的平衡态与演化方程.....	182
7.2 谱截断法与分岔条件.....	186
7.3 渗流系统的相轨线与对称性破缺.....	189
7.4 本章小结.....	198
参考文献.....	198
第 8 章 峰后岩石渗流参变系统的稳定性	200
8.1 峰后岩石渗流系统中渗透特性和边界条件的时变.....	200
8.2 峰后岩石非 Darcy 渗流系统的初始条件.....	202
8.3 用 Chebyshev 配点法对参变渗流系统控制方程降阶.....	202
8.4 初始条件和边界条件的变换.....	204
8.5 时变渗透特性和时变边界条件下系统的动力响应.....	206
8.6 本章小结.....	212
参考文献.....	213

第 9 章 峰后岩石气体渗流的分岔行为	214
9.1 气体渗流的控制方程	215
9.2 峰后岩石中气体渗流系统的稳定性	221
9.3 峰后岩石中气体渗流系统对周期信号的响应	225
9.4 本章小结	226
参考文献	227

第三篇 破碎岩体渗流的概率随机分析

第 10 章 随机方法基础	231
10.1 随机理论的发展	231
10.2 置信度和置信区间	234
10.3 随机过程和随机微分方程	237
10.4 随机有限元方法	240
参考文献	241
第 11 章 破碎岩体渗流的概率区间分析	244
11.1 置信区间的 SPSS 处理方法	244
11.2 破碎砂岩渗透系数的区间特征	247
11.3 破碎页岩和煤渗透系数的区间特征	249
11.4 区间分析的实用性	254
参考文献	254
第 12 章 破碎岩体渗流随机理论及随机微分方程	255
12.1 渗流的随机过程描述	255
12.2 渗流随机微分方程的工程实例分析	256
12.3 随机微分方程的一般解	259
12.4 渗透系数随机变量的场分布	260
参考文献	261
第 13 章 破碎岩体渗流的随机有限元法	262
13.1 流-固耦合的有限元分析方法	262
13.2 破碎岩体建模的控制体法	265
13.3 渗流分析的摄动随机有限元列式	277
13.4 随机场的离散处理	279
参考文献	282

第四篇 采动岩体渗流理论的应用

第 14 章 峰后岩体突水和瓦斯突出	285
14.1 水渗流系统的失稳概率	285
14.2 层状岩体渗流的失稳条件	287
14.3 岩石渗流失稳突变学机理	295
14.4 气体渗流系统的失稳概率	303
参考文献	306
第 15 章 采空区渗流场与瓦斯浓度分布	307
15.1 煤矿开采工作面的 U 型和 J 型通风系统	307
15.2 采空区支承压力分布特征	310
15.3 采空区渗流场与瓦斯分布规律的数值模拟	313
参考文献	321
附录 渗流分析基础	322
A.1 Darcy 定律及雷诺数条件	322
A.2 渗流基本微分方程和定解条件	323
A.3 渗透过程的流-固耦合特性	325
A.4 渗透系数张量	327
A.5 非 Darcy 流动	328
A.6 气体渗流特征	330
参考文献	331

绪 论

0.1 采动岩体及采动岩体渗流

就广义而言,采矿、地下空间、土木、交通、水利等工程中遇到的破碎岩石结构体都可称为采动岩体。如仅涉及矿山岩石力学领域,采动岩体则具体指随着矿体采出,受采动应力场作用的特定区域岩体(或称围岩),它不同于通常研究的固体介质,往往是由破坏后的各种块状岩体所组成,破断、运动、裂隙渗流是其最显著的力学行为特征。如在煤矿开采中,一般情况下覆岩受采动影响后均要发生破坏,直至引起地表移动(或称地表沉陷);破碎岩体的行为会对采矿工程、岩体内部液体和气体运移及地面建筑和环境带来严重影响等。应采矿等相关领域研究的需要,对采动岩体固流体力学行为的系统研究已形成学科交叉特别是力学与矿业工程相结合的一门新的学科生长点。

矿山岩石力学在基础研究方面取得的成就已大大促进了采矿工程的发展和生产技术与方法的变革。20世纪60年代初,因岩石弹塑性理论在地下采矿工程稳定性分析中的应用,人们认识到地下工程围岩既可能是一种载荷,也可能是一种能承受载荷的结构,并提出了以新奥法为代表的新的岩石支护与施工方法。新方法充分发挥了围岩的自承能力,大大降低了对人工支撑结构与支撑材料承载强度的要求,产生了巨大的经济效益。70年代,岩石黏弹、黏弹塑性理论研究使岩石流变学取得了巨大的进展,为预测采矿工程中围岩的长期稳定性提供了理论基础。岩石刚性压力试验机可以测定岩石由变形至破坏的应力应变全过程,它为研究岩石破坏后的力学行为、采场矿压分析、矿柱设计、岩体失稳研究、岩爆与地震机理研究提供了实验基础。岩石多孔介质力学理论及渗流理论的研究为采油工艺、煤矿瓦斯抽放技术和地下水渗流问题奠定了基础^[1]。

但是,采动岩体力学作为矿山岩石力学的研究重点,如果将其定论为一门完整独立的学科分支还为时尚早,它的三个支撑部分:采动岩体静力学、采动岩体动力学和采动岩体流体力学,都有赖于分析采动岩体破裂-失稳-运动的过程,也就是说不能再基于传统的连续介质小变形固体力学。岩石材料本身由于不均匀存在缺陷等已经被认为最具吸引力的固体介质,由破裂破碎岩石组成的采动岩体无疑是对力学工作者进一步提出了严峻的挑战。

采动岩体渗流是采动岩体力学行为研究的重要方面。根据渗流特性和研究方法的不同,采动岩体渗流可分为峰后破裂岩体渗流和破碎岩体渗流两部分,前者

以破裂岩体为基本介质, 主要讨论裂隙渗流规律及失稳分叉条件, 后者以破碎岩体为基本介质, 主要讨论夹缝渗流规律及流场随机分布演化等。

1952 年法国 Malpasset 大坝失事的主要原因之一, 是没有预测到建坝后应力的变化造成坝基下断层的渗透性增加将近 100 倍。近年来, 在深部核废料库工程建设中也实测到岩体构造加高应力作用会使围岩的渗透系数增加 1~2 个数量级^[2]。统计资料显示^[3~5], 在 1990~1999 年, 我国煤矿发生一次死亡 10 人以上事故近 700 次, 死亡人数愈 10 000 人, 在这些重特大事故中, 瓦斯和水灾事故占 80% 以上。2001 年全国煤矿事故死亡 5670 人, 瓦斯事故死亡 2436 人, 占总死亡人数的 43%。究其原因, 这些煤矿事故与水、瓦斯在采动岩体中的渗流密切相关, 煤矿采场工作面底板突水事故的 79.5% 是发生在有断层等构造的破裂底板中, 采空区老塘破碎岩体是天然瓦斯仓库, 其中的瓦斯浓度要高出工作面处几十倍。与此相反, 因为岩体裂缝隙渗透率要远比孔隙渗透率高得多, 煤矿工程师们也常常利用采动支承压力作用下煤层塑性破碎后的渗透性显著增加原理, 实施本层瓦斯抽放技术, 水力压裂采集瓦斯也是同样的道理。由此可见, 研究以破裂破碎岩体介质为特征的采动岩体渗流对提高采矿生产效率、保障安全工作环境、丰富矿山岩石力学内涵都具有非常重要的现实意义。

0.2 峰后岩体渗流的研究方法

存在宏观裂隙是峰后岩体的主要特性, 从 1951 年 Lomize 进行裂隙岩体中流体流动试验开始, 含裂隙岩体的渗流研究至今已有 50 余年的历史^[6~12]。其中, Levy 从理论上讨论了单一方向裂隙中的渗流, 白矛利用拓扑学建立了裂隙网络模型, 王洪涛研究了主干裂纹与网络状裂纹并存的情况, Lage 提出单裂隙空间平板模型, 陈胜宏、赵阳升对块体结构中渗流作了较多探讨等。这些试验和理论模型均可称作拟连续介质模型^[12], 即岩块孔隙系统在岩体渗流中占的分量很小, 可以忽略, 从而把岩体看成单纯的按一定几何规律分布的裂隙介质, 考虑到裂隙的方位、密度、张开度及位置等几何参数, 确定裂隙岩体的渗透参数, 并以此来作为基本参数来建立裂隙岩体渗流模型。

拟连续介质模型有等效连续、离散网络和等效-离散耦合三种处理方法^[13]。等效连续是将裂隙水流等效平均到整个岩体中, 把裂隙岩体模拟成具有对称渗透张量的各向异性连续体, 然后利用经典的连续介质理论进行分析。该方法突出的优点是可以沿用各向异性连续介质理论进行分析, 无论在理论上还是在解题方法上均有雄厚的基础和经验, 而且不需知道每条裂隙的确切位置和水力特性, 对于那些不易获得单个裂隙资料的工程问题不失为一个很有价值的工具。但不足之处是

裂隙岩体等效渗透张量的确定存在困难,等效连续的有效性也不一定能得到保证。

离散网络法是在搞清每条裂隙的空间方位、隙宽等几何参数的前提下,以单个裂隙内基本公式为基础,利用流入和流出各裂隙交叉点流量相等的原则建立方程,然后通过求解方程组获得各裂隙交叉点的水头值。由于寻找方程组的解析解比较困难,有时甚至不可能,因此有限元法是模拟离散裂隙网络最为有效和便捷的手段。离散网络法对岩体中的每条裂隙都加以具体的模拟,并力图得到裂隙体系中各点的真实渗流状态,显然在裂隙较多时,工作量庞大,特别是三维问题,甚至不可能实现;另外,裂隙分布具有随机性,要建立真实裂隙系统也十分困难。

等效-离散耦合法是为结合等效连续和离散网络两种方法的优点而提出的。即对于裂隙密度较小的区域采用离散网络处理,对裂隙密度大的区域再进行等效连续(也称分区混合法);或者在同一区域,对数目不多的起主要导水作用的大中型裂隙采用离散网络法,而对于由这些大中型裂隙切割成的块体中的数目较多的小裂隙进行等效连续(也称统一域混合法)。这种处理既可以避免离散网络对每条裂隙进行模拟而带来的巨大的工作量,又能保证等效连续的有效性,但裂隙程度的界定不好掌握,而且裂隙界定与工程性质往往密切相关。

与拟连续介质模型相区别的是双重介质模型,又称双孔模型。该模型不再忽略孔隙作用,认为裂隙与孔隙共同组成渗流通道。裂隙岩体中裂隙系统渗透性强,孔隙性差,而岩块孔隙系统则是孔隙发育,渗透性差,因此双重介质模型的研究方法是分别将裂隙系统与孔隙系统看作连续体,先单独研究,再考虑裂隙系统与岩块孔隙系统的水力交换。

双孔模型的开创性工作当属 Barenblatt 等^[14]以唯象学为基础在 1960 年做出的。Barenblatt 模型尽管考虑了裂隙与孔隙系统渗流的差异,但它假设二者均为各向同性、均质,与实际相差较大,特别是裂隙系统更是如此。Warren 与 Root^[15]对此提出了改正,他们将岩体中随机分布裂隙表示成为正交裂隙网络分隔的相同的长方体所拼成的理想模型。并假设渗透主轴与每一方位裂隙组平行,垂直于各主轴的裂隙组等间距分布,裂隙宽度不变,但是沿着各主轴的裂隙组的间距与宽度可以不同。也就是说它是一个均质各向异性的模型。这之后,Streletsova^[16]又在 Barenblatt 模型的基础上考虑了裂隙岩体的弹性效应,并提出了一些修正。由于双孔模型要建立水交替方程,需要更多的参数,参数确定上也有困难,因而双孔弹性理论的发展和使用受到一定的制约。

考虑应力与渗流的耦合作用历来受到渗流专家们的重视^[17~26]。最早研究流体-固体变形耦合现象的是 Terzaghi,他首先提出了有效应力(effective stress)概念,并建立了一维固结模型。此后, Biot 建立了比较完善的三维固结理论。这方面近期

的工作有: Cieszko 在他的研究中是将流固分开来考虑的, 本构方程假设互为独立, 由内能建立平衡方程; Khalili 用均一化方法处理了双重孔隙介质中的流动和变形, 其控制微分方程是一组平衡方程; Costa 在他的非牛顿流体饱和流能量传输的研究中, 用了统一场的概念, 即将流体与固体基视为一个混合连续体, 每个空间都同时存在两种温度和两种速度; 杨延毅、周维恒建立了裂隙岩体的渗流与损伤耦合分析的模型; 王媛用四自由度耦合法处理了裂隙岩体渗流与应力耦合问题等。

除具有一般裂隙渗流特性外, 峰后岩体渗流还是含有多个控制参量的、以偏微分方程组描述的动力系统, 具有分岔、突变、混沌等复杂行为特征^[27]。为了寻找峰后岩体渗流失稳和分岔的条件, 以揭示煤矿突水和瓦斯突出等动力灾害的发生机理, 开展动力学系统的非线性行为研究十分必要。在浩瀚的动力学非线性领域, 从耗散结构到协同学, 从分岔、突变到混沌、分形、时变, 各种模型都有广泛的应用。在处理方法上, 属于解析法的有经典数理方程法、平均法、渐近法、摄动法、多尺度法、Melnikov 法等, 属于数值方法的有谱截断、辛(Symplectic)算法、胞映射、人工神经网络、配点法等。本书在第二篇的章节中将详细讨论利用动力学非线性理论和方法处理峰后岩体渗流方面的工作。

0.3 破碎岩体渗流的研究方法

水利交通等工程中的堆石体可被视为广义范畴的破碎岩体。对于堆石体^[28,29], 一般用临界孔隙比和结构孔隙比来度量结构孔隙特性, 采用形状因子 C_f 来定量表征颗粒形状, 用级配曲线及其特征粒径和级配参数来表示颗粒级配等。石块能通过筛孔的边长称为过筛尺寸, 在渗流问题中, 对水力半径影响最大的是最大断面上的最小尺寸, 它接近过筛尺寸, 是堆石的代表尺寸。

在细粒堆石体中, 水头损失坡降 i 一般认为与视流速 v 服从 Darcy 定律^[29~32]

$$v = Ki \quad (0-1)$$

式中, K 为渗透系数。

可以将通过堆石体孔隙的水流和通过细管的水流进行模拟。由 Darcy 定律, 水流通过管子的水头损失是

$$i = \frac{\lambda v^2}{2Dg} \quad (0-2)$$

层流时

$$\lambda = \frac{64}{Re} = \frac{64\mu}{vD} \quad (0-3)$$

则

$$i = \frac{32\mu v}{gD^2} \quad (0-4)$$

式中, D 为管子内径; v 为平均流速; g 为重力加速度; Re 为雷诺(Reynold)数; μ 为流体运动黏滞系数。

对于细颗粒堆石体中的层流渗流, 其湿周是颗粒尺寸 d 的函数, 类似式(0-4)可写出

$$i = \frac{C\mu v}{gd^2n} \quad (0-5)$$

式中, d 为颗粒尺寸; C 为无因次常数; n 为孔隙率。

细粒堆石体与土有不少相似之处, 求解土渗透系数则可用经验公式^[33~35]。以无黏性土为例:

(1) 哈增公式

$$K = Cd_{10}^2 \quad (0-6)$$

式中, d_{10} 为有效粒径; C 为系数, 其值为 100~150。

(2) 柯森公式

$$K_{18} = 780 \frac{n^3}{(1-n)^2} d_9^2 \quad (0-7)$$

式中, K_{18} 为温度 18℃ 时的渗透系数; n 为孔隙率; d_9 为等效粒径。

(3) 扎乌叶布列公式

$$K_{18} = C \frac{n^2}{(1-n)^2} d_{17}^2 \quad (C = 135 \sim 350) \quad (0-8)$$

式中, d_{17} 为等效粒径。

(4) 康德拉且夫公式

$$K_{18} = 105n(\eta D_{50})^2 \quad (0-9)$$

$$\eta = \frac{D_n}{D_{100-n}} \quad (0-10)$$

式中, D_n 和 D_{100-n} 为颗粒粒径, 小于该粒径的质量分别占总质量的 $n\%$ 和 $(100-n)\%$; n 为孔隙率; D_{50} 为中间粒径, 小于该粒径的质量占总质量的 50%。

(5) 水利水电科学研究院公式

$$K_{10} = 234n^3 d_{20}^2 \quad (0-11)$$

式中, K_{10} 为温度为 10°C 时的渗透系数; d_{20} 为等效粒径.

上述各式表明, 决定无黏性土渗透系数的主要原因是颗粒组成和孔隙率, 其中颗粒组成可以等效粒径表示. 各公式的主要区别是等效粒径各自不同, 除导致常数项各异外, 还决定了公式的不同适用范围.

对于无围压和低围压粗颗粒堆石体, 层流关系一般认为是不存在的, 水头损失与流速的大于一次方成正比^[29, 32, 36-40]. 如

$$v = ai^b \quad (0-12)$$

式中, a 和 b 是常数. 但此类方程式与介质特性和所用的单位制有关. 对于细粒堆石体中的层流, 指数 b 取 1; 而随雷诺数加大, b 值亦增大, 已经知道引用过的最大值约为 $1.85^{[29]}$. 根据与管流对照, 充分发展的紊流, b 值应接近于 2. 在大雷诺数时需计入动能水头损失, 这部分水头损失与 $v^2/2g$ 成正比, 另外水力平均半径 m 又与颗粒尺寸成正比^[38], 故

$$i = \frac{Bv^2}{gdn^2} \quad (0-13)$$

式中, B 为摩阻系数, 由试验测得, 应为雷诺数的函数; d 为颗粒直径.

一些近期研究也分别就低围压粗粒堆石体的渗流特性进行了讨论^[41-46]. Li 基于管流和 Taylor 平均水力半径的定义研究堆石体非 Darcy 流的相关性, 得到了摩擦系数和雷诺数以及水力梯度和整体流速的关系; Hansen 研究了一维试验和数值结果应用于二维非 Darcy 渗流问题的可行性; Martins 建模计算了通过堆石结构不同区域不同雷诺数瞬态渗流的平均流速; Jiang 自建坡度可调的堆石水槽实验研究了堆石体水力特性, 得出渗流流速与岩块半径成正比, 与渗流路径长度成反比的结论; Pradip 在粗糙颗粒介质非 Darcy 渗流的研究中, 讨论了有汇流行为时公式 (0-12) 中 a 和 b 常数的取值和作用; Panthulu 用自电位和电阻率的地质物理方法探测水在土石坝堆石体中的渗流路径等.

对于非承压情况, 考虑非线性的动能水头损失, Stephenson 给出了一维堆石体流动的连续性方程和动力学方程^[29]

$$K_2 \left[\frac{1}{2} y \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} + \left(\frac{\partial y}{\partial x} \right)^2 \right] + \sqrt{\frac{\partial y}{\partial x}} n \frac{\partial y}{\partial t} = 0 \quad (0-14)$$

$$\frac{\partial y}{\partial x} + \frac{v}{gn^2} \cdot \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{1}{gn} \cdot \frac{\partial v}{\partial t} = \frac{Bv|v|}{gdn^2} \quad (0-15)$$

式中, x 为流动方向; $q = vy$ 是单宽流量; $K_2 = \sqrt{\frac{gdn^2}{B}}$, B 为摩阻系数; 绝对值是考

虑方向性的要求。

以上成果大都出自水利工程的相关文献,所处理的问题均是在小围压或围压不予考虑的情况。而采矿或其他地下工程中多数遇到的是高围压下破碎岩体的渗透,这部分的研究报道目前还很缺乏。另外,上述研究成果很多是试验基础上的经验公式,用于其他工程问题的有效性一般难以保障。由此可见,对破碎岩体渗流的系统性研究还有待继续深入。破碎岩体组构有很强的随机性,甚至在承压过程中,破碎岩体组构还在不断地发生变化,因此基于破碎岩体的渗流自然也是随机的^[47],概率论、数理统计、随机过程和随机微分方程等都是处理随机问题有效的方法。本书在第三篇的章节中将详细讨论利用概率统计和随机方法处理破碎岩体渗流这方面的工作。

参 考 文 献

- 1 钱鸣高,缪协兴. 采动岩体力学——一门新的应用力学研究分支学科. 科技导报, 1997(3): 29~32
- 2 潘别桐, 吴旭君. 工程岩体渗透性研究现状和趋向. 地质科技情报, 1988(7): 61~67
- 3 周世宁, 鲜学福, 朱旺喜. 煤矿瓦斯灾害防治理论战略研讨. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2001
- 4 钱鸣高, 缪协兴, 许家林, 茅献彪. 岩层控制的关键层理论. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2000
- 5 蒋曙光. 综放采场瓦斯运移规律三维模型试验及数值模拟的研究. 中国矿业大学博士学位论文, 1995
- 6 Witherspoon P A et al. Mechanical and hydraulic properties of rock related to induced seismicity. Engineering Geol., 1977, 11: 35~45
- 7 Levy T. Fluid flow in a porous medium with unidirectional fissures. CR Acad Sci Ser II, 1990, 310(6): 658~690
- 8 Bai M, Lin D Z, Roegiers J C. Study of flow and transport in fracture network using percolation theory. Appl. Math. Model, 1998, 22(4~5): 277~291
- 9 王洪涛, 聂永丰. 耦合岩体主干裂隙和网络状裂隙渗流分析及应用. 清华大学学报, 1998, 38: 23~26
- 10 Lage J L. Contaminant transport through single fracture with porous obstructions. J Fluids Eng, 1997, 119(1): 180~187
- 11 陈胜宏. 块状结构岩体渗流分析方法的探讨. 水利学报, 1991: 27~31
- 12 赵阳升. 矿山岩石流体力学. 北京: 煤炭工业出版社, 1994
- 13 王媛, 速宝玉, 徐志英. 裂隙岩体渗流模型综述. 水科学进展, 1996, 7: 276~282
- 14 Barenblatt G I, Zheltov I P, Kochina N. Basic concepts in the theory of seepage of homogeneous liquids in fissured rocks. Prikl. Mat. Mekh., 1960, 24: 852~864
- 15 Warren J E, Root P J. The behavior of naturally fractured reservoirs. J Soc Petrol Eng., 1963, 3: 245~255
- 16 Streltsova T D. Hydrodynamics of groundwater flow in a fractured formation. Water Resources Research, 1976, 12: 405~414
- 17 Terzaghi K. Theoretical Soil Mechanics. New York: Wiley, 1943
- 18 Biot M A. General theory of three-dimensional consolidation. Int. J Appl. Phys., 1941, 12: 155~164
- 19 Biot M A. General solution of the equation of elasticity and consolidation for porous material. J. Appl. Phys., 1956, 78: 91~96
- 20 Biot M A. Theory of elasticity and consolidation for a porous anisotropic solid. J. Appl. Phys., 1954,