

YANTIZHUJIANG
LILUN YU SHUZHIFENXI

岩体注浆

理论与数值分析

■ 罗平平 著



黄河水利出版社

岩体注浆理论与数值分析

罗平平 著

黄河水利出版社

· 郑 州 ·

内 容 提 要

本书共分8章,主要包括浆液流变模型与性能试验、裂隙岩体渗透性与可注性、注浆压力选定、浆液渗透与应力耦合理论、裂隙岩体注浆数值分析、特大型突水注浆综合治理技术、井筒工作面预注浆。

本书可作为矿业工程、水利工程、土木工程和交通工程等行业有关从事注浆的研究人员参考用书,也可作为大专院校相关专业的研究生教材或参考书。

图书在版编目(CIP)数据

岩体注浆理论与数值分析/罗平平著. —郑州:黄河水利出版社,2017.9

ISBN 978 -7 -5509 -1851 -1

I. ①岩… II. ①罗… III. ①岩体加固 - 注浆加固 - 研究 IV. ①TD325 ②TD265.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 234891 号

组稿编辑:路夷坦 电话:0371 - 66022111 E-mail:46523556@qq.com

出版社:黄河水利出版社

网址:www.yrcp.com

地址:河南省郑州市顺河路黄委会综合楼14层

邮政编码:450003

发行单位:黄河水利出版社

发行部电话:0371 - 66026940、66020550、66028024、66022620(传真)

E-mail:hhslebs@126.com

承印单位:虎彩印艺股份有限公司

开本:787 mm × 1 092 mm 1/16

印张:11.5

字数:260千字

印数:1—1 000

版次:2017年9月第1版

印次:2017年9月第1次印刷

定价:25.00元

前 言

近些年来,随着我国社会主义现代化建设的不断深入,各种土木工程的建设方兴未艾,极大地促进了我国注浆技术和注浆理论的发展。注浆技术是一项实用性强、应用范围广的工程技术,目前广泛应用于水利水电工程、地铁、边坡支护、建筑物纠偏、地基处理和矿山等各个领域。其主要用途是降低岩土体的渗透性和侵蚀、增加其强度或降低地基土压缩性。与注浆技术,包括注浆材料、注浆工艺和注浆设备的迅速发展相比,注浆理论特别是裂隙岩体的灌浆理论的发展相当滞后。

本书根据作者多年积累的技术资料、科研成果和工程实践编著而成,力求理论研究、数值分析、试验分析与工程实践相结合,重点阐述了裂隙岩体注浆理论,并结合数值分析,总结了浆液在岩体裂隙中的渗透规律。希望该书可以为土木、矿山、交通、水利等专业领域从事岩土工程的技术人员和高等院校相关专业的师生提供有益参考。

本书在编写过程中,参考了有关单位、知名专家的技术资料,并引用了其中部分内容及数据,在此表示感谢!本书由河南理工大学博士基金项目资助,还得到河南能源义煤公司地质所副所长李松营及其同仁的大力支持,在此一并感谢!

受作者水平所限,书中难免有疏漏及不足之处,敬请读者批评指正,以便改进。

作 者

2017 年 7 月

目 录

前 言

第1章 绪 论	(1)
1.1 概 述	(1)
1.2 岩体渗透性研究进展	(2)
1.3 注浆技术现状及进展	(8)
1.4 注浆理论研究现状及进展	(10)
第2章 浆液流变模型与性能试验	(15)
2.1 流体流动模型	(15)
2.2 水泥类浆液流变性	(18)
2.3 化学类浆液流变性分析	(21)
2.4 注浆材料力学性能试验研究	(22)
第3章 裂隙岩体渗透性与可注性	(38)
3.1 概 述	(38)
3.2 常规压水试验基本方法	(38)
3.3 抽水试验	(50)
3.4 交叉孔压水试验	(63)
3.5 岩体可注性及注浆准则研究	(66)
第4章 注浆压力选定	(70)
4.1 概 述	(70)
4.2 注浆总压力计算	(70)
4.3 注浆压力的经验选取法	(71)
4.4 试验法确定最大注浆压力	(73)
4.5 劈裂注浆压力	(75)
4.6 浆泡扩张模型确定最大注浆压力	(78)
第5章 浆液渗透与应力耦合理论	(85)
5.1 扩缝机制及效应	(85)
5.2 单位荷载法求解裂隙面变形	(86)
5.3 裂隙闭合模型	(87)
5.4 渗流与应力的耦合	(90)
第6章 裂隙岩体注浆数值分析	(93)
6.1 平面随机裂隙岩体注浆数值分析	(93)
6.2 空间裂隙岩体注浆数值分析	(107)
6.3 随机隙宽单裂隙浆液渗透数值分析	(120)

6.4	不规则断层注浆浆液扩散规律研究	(127)
第7章	特大型突水注浆综合治理技术	(135)
7.1	工程概况	(135)
7.2	工作面突水分析	(137)
7.3	注浆治理	(140)
7.4	注浆治理效果判断与检测	(157)
第8章	井筒工作面预注浆	(159)
8.1	工程概况	(159)
8.2	施工方案	(159)
8.3	注浆参数的确定	(162)
8.4	注浆施工工艺	(163)
参考文献		(166)

第1章 绪论

1.1 概述

注浆(grouting)作为一种比较成熟的施工技术,在矿山、市政、水利和岩土等工程领域中得到了广泛的应用。它是指利用液压、气压或电化学原理,通过注浆设备将具有充填胶结性能的材料配成的浆液注入到岩体或土体等介质中,增加被注介质的抗渗和抗震能力,以达到提高建筑物的稳定性和安全性的目的。

影响岩体注浆效果的因素主要有浆液流变性、节理特征(如产状、填充程度及填充物特性、节理发育程度和节理的连通性等)、注浆工艺、气候、注浆设备和注浆方法等。

浆液主要分为悬浮性和溶解性浆液。悬浮性浆液包括泥浆、水泥石灰浆、沥青、乳胶等。溶解性浆液主要指一些化学浆液。浆液的性质主要包括黏度、密度、流动性和颗粒大小等。工程师比较关心的是不同浆液的黏度、流动性、水灰比(W/C)、剪切强度之间的相互关系,继而研究其流变特性,结合注浆前后被注介质的强度、渗透性等的变化,来优化浆液选型及配比。

被注介质主要包括土体和岩体两大类。土壤的渗透性主要由孔隙和孔隙率的大小决定。而岩体要复杂得多,具有裂隙的岩体渗透系数要远大于岩石本身的渗透性。另外,岩石内孔隙小、孔隙率低(一般在 $0.01 \sim 0.1$),且互不相连,就工程问题而言,其渗透性通常可被忽略。裂隙岩体渗透性主要取决于裂隙开度大小、走向、延伸范围、连通情况、裂隙中的充填物及裂隙面的粗糙度等几何结构特征,这些因素与岩性、岩相和地壳运动经历密切相关。研究浆液,特别是以水泥浆为代表的宾汉姆浆液在岩体裂隙网络中的流动规律,对提高注浆工程的可操作性、经济性等具有重大实际应用意义,理论上它可以帮助我们更加准确直观地判断浆液渗透范围、注浆量的大小、完成注浆大致需要的时间和浆液渗透范围内任意地点、任意时刻的注浆压力。

裂隙岩体注浆理论研究的是浆液在裂隙中的流动规律。各向异性渗透性是裂隙岩体的基本渗透特征,只有用渗透张量的概念才能给予本质的描述。确定岩体渗透张量的主要方法有现场压水试验法、室内试验法、反演法、几何形态法和隙宽类比法等。由于二阶对称渗透张量具有6个独立参数,参数过多,运用反演法时可能会碰到解的唯一性和不稳定性问题,同时渗透系数初值及一些优化系数的选定在很大程度上依赖于经验,选择不好不仅影响计算速度,甚至还会影响计算的收敛性。交叉孔压水试验是由 Hsieh 和 Neuman 于 1985 年提出的,该法钻孔可以任意方向布置,而不必预先了解裂隙发育情况,技术比较简单,但理论相对复杂,因此对其理论做适当的简化研究对促进交叉孔压水试验具有重要意义。

常规压水试验目前应用比较广泛,普遍的目的是通过获得试验岩层的单位吸水率来

分析和评价所试验岩体的渗透性,以及把试验结果与抗渗准则(吕荣准则)进行比较,判断是否可注浆和检验注浆效果等。F. K. Ewert 认为,若水的吸收较小,则可用压水试验来比较岩体渗透性,否则完全取决于岩石的节理系统;不能用单位吸水率的大小来决定是否注浆,因为其没有考虑具体岩石类型的渗透性行为,也没有考虑地质学等方面的因素;岩体的渗透性和浆液可注性并不成比例关系。

注浆压力的确定还没有统一的准则,主要是根据被注区的水文地质条件加以经验来确定。归纳分析国内外注浆压力的确定方法,建立注浆压力的求解模型对具体注浆方法和工艺的确定无疑具有重要的学术意义和工程应用价值。

1.2 岩体渗透性研究进展

1.2.1 裂隙岩体渗透特性

与多孔介质相比,裂隙岩体渗透性要复杂得多,裂隙岩体的渗透性主要具有以下特征:

(1) 岩体主要由透水性弱的岩块和透水性强的节理组成,裂隙岩体渗透性主要取决于岩体节理性质及特征。

(2) 岩体渗透一般看作是非连续介质渗流,具有高度的非均质性和各向异性。没有裂隙和裂隙充分发育的岩体可看作是等效连续介质。

(3) 裂隙岩体渗流具有定向性。

(4) 岩体渗流一般仍认为符合 Darcy 定律,除非因在岩体局部区域存在岩溶等原因而出现紊流的情况。

(5) 岩体渗流受应力场影响明显,在复杂的裂隙系统中,裂隙交叉处会出现“偏流效应”。

岩体结构面特性分析是裂隙岩体渗流特性的研究基础,岩体结构面的几何要素包括结构面的产状、形状、规模、间距、隙宽、粗糙性和充填性等。其中,隙宽和粗糙性是描述渗透结构面集合特征的最基本参数,对岩体的力学特性和渗透特性有重要影响。岩体结构面的几何特征往往服从一定的概率分布。Snow(1968)、Bacher(1978)等发现间距一般服从负指数分布,Priest(1976)等发现迹长也服从负指数分布,Barton(1978)认为间距和迹长均服从对数正态分布,对结构面粗糙性描述方法研究成果也较多,Barton(1997)提出了节理粗糙度系数 JRC 法,谢和平等(1992 年)提出了分数维表征法。

Lomize(1951)、Louis(1969)等通过平行板裂隙的水流试验,提出了著名的立方定律:

$$\bar{v} = \frac{\gamma d_f^2}{12\mu} J_f = k_f J_f \quad (1-1)$$

$$q = \bar{v} d_f = \frac{\gamma d_f^3}{12\mu} J_f \quad (1-2)$$

式中: $\bar{v}$ 为缝隙的平均流速, m/s ; γ 为水流重度, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^2)$; d_f 为缝隙的水力等效隙宽, m ; μ 为水的运动黏滞系数, m^2/s , 水温在 $10\text{ }^\circ\text{C}$ 时, $\mu \approx 1.3 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$; J_f 为沿缝隙切向水

力梯度; q 为分析单宽流量, m^3/s ; k_f 为缝隙水力等效渗透系数。

天然裂隙面一般是粗糙不平的。Lomize(1951)、Louis(1969)、Neuzil et al(1981)、Barton et al(1985)、Walsh et al(1981)相继对粗糙裂隙的水流特性进行了研究,根据对粗糙性定义的不同,分别提出了相应的修正立方定律。杨米加等(2001)从单裂隙的细观结构出发,分析了裂隙曲折率对流体渗流过程的影响,得出了不规则裂隙的渗流规律。王媛等(2002)对不同粗糙度描述下的单裂隙等效水力隙宽进行了有益探讨。孙役等(1999)、王恩志等(2000)对降雨入渗条件下单裂隙非饱和渗流特性进行了试验研究。速宝玉等(1995)、耿克勤等(1996)对仿天然岩体裂隙渗流特性进行了有关试验研究。Gale(1982)、Hicks et al(1996)、速宝玉等(1997)、赵阳升等(1999)、王媛(2000)、朱以文等(2002)对裂隙渗流与应力的耦合特性进行了试验研究。

目前,一些学者开始对两条裂隙及随机分布的岩体渗流特性进行研究,对微观裂隙的渗流特性也进行了有益研究。于青春等(1995)针对实例的非连续裂隙网络,就其等效介质的存在性、非连续裂隙网络系统的边界效应等水力特征进行了分析。周创兵等(1996)通过节理渗流试验,在考虑岩石节理的地质属性的基础上,将平行板模型和沟槽模型有机地结合起来,提出了适用于一般岩石节理水力特性分析的广义立方定律。速宝玉等(1997)通过大量的交叉裂隙水流的模型试验,建立了交叉水流局部水头损失理论,并通过模型试验结果与理论模式的相关性分析,确定了理论模式的修正系数。詹美礼等(1997)运用有限元理论从N-S方程(Navier-Stokes equation)出发,研究了交叉裂隙水流的基本特征。

1.2.2 裂隙岩体渗流计算模型研究进展

裂隙岩体渗流的主要计算模型有离散模型、等效连续介质模型、裂隙-孔隙双重介质模型、离散介质-连续介质耦合模型和随机渗流模型。另外,多场耦合模型的研究和应用也发展迅速。

1.2.2.1 离散模型

离散模型认为岩块本身不透水,整个地下水运动是通过裂隙网络进行的,渗流场为纯裂隙网络透水场。

目前对该模型的研究很多,最具代表性的主要有以Long(1985)和Baecher(1977)为代表研制的圆盘裂隙网络模型,它假设裂隙为圆盘状,通过裂隙半径确定裂隙大小;另一种是以Dershowitz(1985)为代表研制的多边形裂隙网络模型,它假设裂隙为多边形,需要多个裂隙角点坐标来确定其大小。这两种模型的本质差别在于裂隙端部的接触方式不同,前者尖灭于完整岩石中,后者以交接线与另一组裂隙连接。我国学者在这方面也做了一些有益的研究工作,主要有万力(1993)假定裂隙面为多边形,提出了三维裂隙网络稳定流模型;王恩志(1993)运用图理论来表述二维裂隙网络的基本构成,并参考Wittke线素法来形成渗流基本方程;王洪涛(1997)假定裂隙面为圆盘形,提出了随机裂隙网络非稳定流模型。另外,Louis(1974)、Wittke(1990)、毛昶熙等(1984)、Romero et al(1995)、Dershowitz(1996)、仵彦卿等(1997)也对离散裂隙网络模型进行过研究。该模型抓住了裂隙渗流的本质特征,较好地描述了裂隙水的运动规律,能比较真实地反映裂隙网络中的

实际渗流状态。

但离散模型也存在一些问题:

(1) 离散模型能较准确地模拟区域内裂隙较少情况,但对裂隙的几何参数及产状了解要求高,虽然可用网络模拟技术模拟裂隙网络,但裂隙渗流的水力参数生成等许多问题还没有解决,且若模拟裂隙过多,会使得模型过大而难以有效计算,因此该模型很难解决实际工程问题。

(2) 在非饱和渗流中,岩块渗透系数和裂隙的相比,一般不可忽略,除非岩块非常致密,这使得裂隙网络模型的精度受到影响。

(3) 各种各样裂隙的水力行为也是有差异的,这方面还没有成熟的基本理论。

1.2.2.2 等效连续介质模型

等效连续介质模型应用广泛,它认为孔隙和裂隙均匀分布于整个研究区域内,裂隙岩体表现出与多孔介质相似的渗流特性,水压、水位随空间点连续分布,整个渗流场的求解以岩体中流动的水服从 Darcy 定律为基础,求解的精度取决于等效渗透张量的准确确定。通常认为当裂隙密度较大,随机分布于岩体中、岩体比较破碎可按此模型进行计算研究。Snow(1969)、Long(1982)、Oda(1986)、张有天(1991)和仵彦卿等(1997)对此进行了研究。

等效连续介质模型的最大优点是可用各向异性连续介质理论进行分析,在理论和解题方法上均有较成熟的基础和经验,且不必知道每条裂隙的确切位置和水力特性,只需确定岩体中少量裂隙几何水力参数的统计值,对于那些不易获得单个裂隙数据的工程不失为一个很有价值的工具。

等效连续介质模型存在以下主要问题:

(1) 裂隙岩体等效张量的确定。Long 认为给定的等效渗透张量,必须能无条件地应用于动力场相似的水流系统,否则确定等效张量时会存在以下问题:一是在某种边界条件下得到的等效渗透张量未必能准确预测另一种边界条件下的流量;二是根据流量得出的等效渗透张量未必能预估出正确的水头分布。

(2) 等效连续介质模型的有效性未必能得到保证。将裂隙岩体模拟为等效介质需具备如下条件:①裂隙岩体存在表征单元体(Representative Element Volume),且相对于研究域来说不是太大,这就要求研究域很大或裂隙高度发育。②裂隙岩体等效方向渗透率能构成某种椭圆形式,即存在对称的渗透系数张量,才能用等效连续介质理论求解。衡量裂隙岩体是否具有对称渗透张量的方法是测定其方向渗透率。设水力梯度方向渗透率为 K_j ,水流方向渗透率为 K_f ,若 $K_j^{1/2}$ 和 $K_f^{1/2}$ 在极坐标中能够点绘成一个椭圆的话,那么介质就具有对称的渗透张量。③要满足岩块与裂隙间的局部压力水头相等,即不存在水交换,这只在恒定流或近似恒定流才基本成立。

(3) 对于非饱和渗流,表征单元体和非饱和水力参数实际很难确定。

(4) 毛细压力变化时会导致等效渗透张量的渗透主轴变化。

1.2.2.3 裂隙-孔隙双重介质模型

裂隙-孔隙双重介质模型认为裂隙岩体是由孔隙性好而导水性弱的岩块孔隙系统和孔隙性差而导水性强的孔隙系统共同组成的。它考虑了两类系统之间的水交替过程,先

基于 Darcy 定律分别建立两类系统的水流运动方程,再利用两类系统之间的水交替方程将其联系起来。根据水交替方程的建立方法,该模型可分为拟稳态流模型和非稳态流模型。Barenblatt(1960)首先提出了该模型,但 Barenblatt 模型的主要缺点是不能反映裂隙岩体各向异性渗透特性。Warren(1963)模型有所进步,但只能应用于均质的正交裂隙网络。随后 Neretnieks(1980)、Lagendijk(1981)、Zimmerman(1996)、任彦卿等(1998)也对该模型进行了研究和发展。

与等效连续介质模型相比,该模型考虑了裂隙的强导水性、孔隙的过水面大以及两者之间存在流量交换等情况,因此它更接近工程实际。但由于拟稳态流模型是假定水交替量与两类系统的水头差成正比,不直接为时间 t 的显式,会影响模型精度;对于非稳态流模型,水交替方程的建立与裂隙系统的配置和形状有关,这限制了该模型的应用。因此,裂隙-孔隙双重介质模型有待进一步完善。

1.2.2.4 多场耦合模型

裂隙岩体渗流的多场耦合模型中,最典型的是渗流场与应力场的耦合模型。由立方定律可知,裂隙的过水能力和裂隙隙宽的立方成正比,可见由应力变化引起的裂隙隙宽的细微变化都会对渗流场产生重大影响,且渗流场的变化又将改变渗流体积力的变化,从而影响应力场,此即为岩体渗流场与应力场的耦合作用。

一些学者通过大量的试验研究,分别建立了各类岩石内单一裂隙渗流与应力的关系,如:Snow(1968)、Louis(1974)、Kranz(1979)、Gale(1982)。国内刘继山(1988)、耿克勤(1996)和周创兵(1996)也对此做了研究。Noorishad et al(1982)将土体 Biot 固结理论用于建立岩体渗流与应力耦合关系,进而用有限元法研究了非连续介质中的固液两相介质的耦合问题,但该法忽略了渗透性随应力的变化。王媛等(1998)提出裂隙岩体渗流与应力耦合分析的四自由度全耦合法,基本解决了渗透性随应力变化问题。陶振宇(1988)以 Louis 公式为基础对岩体渗流与应力进行耦合分析以研究水库诱发地震问题。盛金昌等(2000)、王媛等(2000)还对复杂裂隙岩体进行了渗流与应力弹塑性的全耦合分析。朱以文等(2002)用等参元逆变算法解决了渗流场与位移场分析中两场间数据传递问题。此外,Raven(1998)、王洪涛(2000)、柴军瑞等(2001)也研究了渗流场与应力场间的耦合作用。Ohnishi et al(1993)、赖远明等(1999)、陈庆中等(1999)、陈波等(2001)则研究了渗流场、应力场及温度场的三场耦合机制和作用。杨延毅(1991)、朱珍德(1999)、郑少河等(2001)则研究了渗流场与损伤场之间的耦合作用。

以上的研究工作不能很好地解释应力作用对裂隙面渗透性的影响机制,为此人们提出一些理论模型,如洞穴模型、凸起模型及洞穴-凸起结合模型。Gangi(1978)首先提出钉床模型,将裂隙面上的凸起比拟成具有一定概率密度分布形式的钉状物,并以钉状物的压缩来反映应力对渗流的影响。Walsh(1981)则将描述裂隙力学变形性质的洞穴模型进行研究和推广。Tsang(1981)在上述两模型的基础上提出了洞穴-凸起结合模型,它以洞穴模型反映裂隙面的变形性质,以凸起模型反映裂隙面的渗流特性,认为随着应力的增加,不仅引起洞穴直径的减小,还引起凸起接触面积的增加,该模型很好地解释了单裂隙面渗流、力学及耦合特性。另外,Esaki(1992)、耿克勤(1996)对岩体的剪切渗流耦合进行过试验研究。

1.2.3 裂隙岩体渗透系数确定

裂隙岩体渗透系数的主要获得方法有实验室法、反演法、几何形态法和现场试验法四类。速宝玉(1995)用人工粗糙面缝隙模拟天然岩体裂隙进行物理模型试验,对天然岩体裂隙渗流机制及其规律做了探讨,在总结洛米捷(Г. М. Ломизе)及路易斯(C. Louis)研究成果的基础上提出了一个改进计算模式。由于条件限制,通常只对单一裂隙的岩体进行试验,且人造裂隙与天然裂隙的差异,室内试验往往很难满足实际工程要求,实验室法通常只能做一些基础理论研究。目前,裂隙岩体渗透系数的确定主要还是采用后三种方法。

1.2.3.1 几何形态法

渗透张量概念首先由 Ferrandon(1948)提出,其后 Snow(1969)和 Romm(1966)应用于裂隙岩体,提出了裂隙岩体的渗透张量,更好地描述了裂隙岩体渗流各向异性特征。其方法是假定裂隙无限延伸,根据裂隙组数、间距、隙宽及产状,推导出裂隙岩体的渗透张量。该方法认为每一系统的裂隙方向、密度和宽度都是绝对稳定的,这种假设不符合裂隙网络实际存在不均一性,故完全通过裂隙宽度、间距以及方位统计而求得渗透张量的方法具有局限性。

Oda(1985)采用统计理论推求岩体的渗透张量。周创兵(1996)根据渗流能量叠加原理提出了确定双场耦合条件下裂隙岩体渗透张量的新模型。周志芳等(1999)通过坐标轴的旋转、压缩和再旋转变换,推导出了有越流任意各向异性含水层中地下水三维井流问题的计算公式,在此基础上提出了采用抽水试验资料图解和优化相结合的方法确定任意各向异性岩体渗透张量。由于天然岩体裂隙随机分布,方保镕(1994)先用灰色聚类法将裂隙按透水性强弱进行分类,后用层次分析法确定某组裂隙渗透系数,该法具有较高的精度。杨天鸿等(2003)以现场岩体渗透结构面概率模型统计资料为依据,采用离散介质方法建立裂隙网络模型,提出了计算岩体结构面网络的等效渗透张量法。王洪涛(1997)提出了使用有限差分法计算各向异性渗透系数的数值方法和差分单元渗透性的计算公式。陈洪凯等(1999)根据对岩体结构面及地下水渗透量的调查和观测,概化出渗透结构面及其分组,利用极值控制法求出渗透结构面的渗透系数,进而求出岩体初始渗透张量,再基于初始渗透张量及观测流量利用有限元法反求岩体等效渗透张量。

1.2.3.2 反演法

反演法是一种优化方法,它根据地下水动态观测资料或抽水试验资料已获得的水头分布,反求渗透系数、给水度和贮水度等参数,可分为直接反演法和间接反演法。直接反演法把渗流控制方程中水头作为已知参数,代入观测值,直接求解要求的未知参数,是按分析地下水位和实测地下水位最为接近的原则决定各岩体分区渗透系数的最佳搭配;间接反演法又称试误校正法,首先对研究区域内的岩体结构及水文地质特性进行考察,确定岩体各分区的相对渗透性质、渗透主方向及地下水补给等,然后基于分析假定一组参数代入渗流控制方程求解渗流场中的水头分布,比较计算值和实测值,逐渐修正参数和边界、初始条件,直到基本吻合。直接反演法计算稳定性差,计算量较大,对实测资料要求高,一般采用间接反演法。由于渗透张量具有6个独立参数,参数多,必须注意反问题的适定性问题,即探讨解的存在性、唯一性和连续性问题。

Philip(1960)首先提出了求解一维非线性渗流反问题的精确解法,标志着渗流反问题研究的开始。Sagar(1975)将反问题分为五类:求水力学参数,如渗透张量、给水度、贮水系数等;求汇源项,包括蒸发入渗量;求初始条件;求边界条件;以上各种类型组合。朱岳明等(1992)结合测压管水位反分析了复杂渗流场中的主要水力特性参数,并建立了测压管水位的反分析确定性混合模型。周志芳等(1999)对工程水力学反问题进行了研究,提出了确定岩体渗透系数的结构面控制反演法和确定岩体渗透张量的半解析法。张奇(1994)由大坝原型观测资料对坝基岩体的渗透性做了反分析,得到了基岩的裂隙张开度及渗透张量。吴中如(2000)利用观测孔观测水位和渗漏量,对基岩渗透系数和坝体混凝土渗流扩散系数进行了反演分析。李晓峰(2001)通过把CT技术中的Random变换推广到渗流力学中,研究了在渗透系数相差不大的渗流场中椭圆形偏微分方程的系数反问题。郑东健(2001)引入了库水位滞后影响函数和等效水位,建立了考虑滞后效应的测压管水位混合模型。刘杰和王媛等(2003)利用水头实测资料,以裂隙组的渗透系数比例因子为待反演的参数向量,提出了一种混合遗传算法,为求解裂隙岩体无压渗流参数反问题等计算量大的系列问题提供了新的途径。朱岳明和张燎军等(1997)对极小化目标函数设置惩罚附加项,研究了非均质各向异性岩体三维复杂渗流场反问题的解。黄远智等(2000)把非线性规划理论引入裂隙岩体渗流反馈分析计算中,通过理论分析和试验验证,寻求到了一种有效的适合裂隙岩体渗流运动特点的反馈分析方法。

一些学者对渗流场反问题的适定性和参数可辨识性进行了研究。Tikhonov(1963)提出了工程反问题定解的广义适定性,Chavent(1974)对渗流参数的可辨识性进行了研究,认为如果渗流参数是不可辨识的,则对于不同的初值条件将得到不同的反演结果。刘杰等(2002)也对渗流参数的适定性问题进行了研究。

近年很多学者开始应用人工神经网络反演岩体渗透系数。Morshed(1988)基于人工神经网络结合遗传算法反演求解了受烃污染的含水层粒径分布指数及渗透系数。张乾飞等(2001)运用人工神经网络方法对大坝分区渗透系数进行反分析。李守巨等(2002)基于人工神经网络方法,根据岩体渗流场的水头观测数据和注水试验先验信息,建立了一种含水层参数识别数值方法。

1.2.3.3 现场试验法

现场试验法主要有常规压水试验法、三段压水试验法、交叉孔压水试验法和竖井注水试验法等。

常规压水试验的主要目的有:

(1)获得试验岩层的单位吸水量,通过特定公式转换为岩层的渗透系数,进而分析和评价岩体的渗透性。

(2)把试验结果与抗渗准则进行比较,决定是否需要注浆和检验注浆效果。目前广泛使用的是吕荣准则,即若坝高 $H \geq 30$ m,且 $Lu \geq 1$,或若坝高 $H < 30$ m,且 $Lu \geq 3$,需要注浆。

(3)获得 P/Q 图(压力/流量图),从 P/Q 图可以得到最大注浆压力,求解岩体的原始渗透率,了解试验岩体的变形性,查明岩体的透水性程度,以及对岩体进行分类。该法的主要缺点是试验精度不高。

三段压水试验法首先由 Louis et al(1970,1971)提出,其原理是用压水试验分别确定单组裂隙的渗透系数,然后根据每组裂隙的产状把渗透系数叠加获得岩体的渗透张量。三段压水试验法特点是为排除其他裂隙组的影响,压水孔必须尽可能与所试验一组裂隙正交,当裂隙组数多,岩体裂隙分布复杂时,该条件很难满足,只能选取主要三组裂隙进行试验,精度还是不高。另外,该试验设备复杂,造价高,只适合做标准试验。

交叉孔压水试验是 Hsieh 和 Neuman(1985)提出的。该法优点是不要求预先了解裂隙的情况,钻孔可沿任意方向布置,技术方法简单。缺点是理论复杂,不易被工程界理解和掌握。

竖井注水试验法主要是通过竖井向裂隙岩层中大量注水,在岩体中形成规模较大的人造渗流场,通过研究该流场的地下水运动规律达到了了解裂隙岩体渗透特性的目的。

1.3 注浆技术现状及进展

1.3.1 注浆材料研究进展

注浆材料一般分为溶解性浆液和悬浮性浆液。溶解性浆液主要包括一些化学浆液,悬浮性浆液主要包括水泥类浆液。

早期注浆工程所采用的浆液主要是黏土、火山灰和生石灰等简单材料。在 1826 年硅酸盐水泥问世之后,水泥类浆液开始被广泛应用于工程,如 1845 年美国沃森采用水泥砂浆来浇筑一个溢洪道陡槽基础,1864 年巴洛采用水泥浆液来做充填注浆,1876 年 Thomas Hawksley 以及 1885 年 Wrkinipple et al 先后将硅酸盐水泥浆液应用于工程,取得了很好的效果。

普通硅酸盐水泥具有颗粒粗,很难透入 0.2 mm 开度的岩体裂隙中,且所配浆液稳定性和可注性差、稀浆凝结时间长以及浆液结石收缩等缺点。为解决普硅水泥浆的上述缺点,超细水泥(MC)于 20 世纪 80 年代在日本首先得到应用,随后受到广泛应用。超细水泥最大粒径小于 20 μm ,平均粒径小于 5 μm 并且还还具有无毒、结石强度高、可注性好等特点。为提高水泥浆液的可注性,近年国外还发明了一种湿磨水泥制浆技术(WMC),普通水泥经湿磨后,平均粒径可达 4~10 μm ,比表面积一般达 7 000~10 000 cm^2/g 。在配浆方面,普遍认为稳定性浆液要优于稀浆,稳定性浆液不析水沉淀,在压力作用下没有多余水排出,凝结后能形成坚固密实的结石。

为改善普通水泥浆液性能,通常掺入些掺合料,如黏土、膨润土、水玻璃、粉煤灰、火山灰等。目前不同材料组合形成的各类浆液,如水泥黏土类浆液、水泥水玻璃类浆液、水泥粉煤灰类浆液被研制并被广泛应用。

化学浆液主要有水玻璃(water glass)类、丙烯酰胺(acrylamide)类、丙烯酸盐(acrylate)类、木质素(lignin)类、聚氨酯(polyurethane)类、脲醛树脂(urea-formaldehyde resin)类及环氧树脂(epoxy resins)类浆液等。化学浆液凝结时间可控制,能使浆液在适宜的时间到达适宜的地点。一般其黏度比水泥浆液的要低,因此所需的注浆压力更小,而且浆液中没有颗粒材料,理论上化学浆液可渗透进任何具有合理宽度和大小的裂隙或孔隙的岩

土介质中。但大多化学浆液具有一定的毒性,且价格昂贵,这限制了化学浆液的发展。开发绿色环保无污染、可注性好、固结强度高、凝结时间易于控制、施工方便和价格便宜的化学浆液成为一个主要研究方向。

1.3.2 注浆法的现状及进展

根据注浆压力的大小,现行注浆方法可分为静压注浆和高压喷射注浆。其中,静压注浆又分为渗透注浆、劈裂注浆、压密注浆和电动化学注浆四种。根据施工工艺和施工设备,高压喷射注浆可分为单管法、二重管法、三重管法和多重管法等多种工法;根据喷嘴的不同运动方式,又可分为定喷、摆喷和旋喷三种。

许多压密注浆的应用与压密无关,Byle (1997)认为压密注浆通常用词不当,他于1997年提出了有限运动位移注浆法(Limited Mobility Displacement Grouting),认为压密注浆只是其中的一类。

日本最近开发了控制裂隙方向注浆法(Fracture Direction Controlled Method),是在地基中与河流方向垂直的截面上人为造成割裂缝之后,注入浆液使浆液进入裂缝、孔隙,最终形成蜘蛛网状浆液脉络。

瑞士大坝专家 Lombardi (1998)提出的GIN注浆法(Grouting Intensity Number)目前受到广泛应用,该方法是使用单一水灰比的稳定浆液,按注浆强度值GIN进行注浆控制的一种注浆方法。GIN值可用注浆孔段的最终注浆压力 P (MPa)和单位注浆量 V (L/m)的乘积表示: $GIN = P \cdot V$ (MPa · L/m)。GIN注浆法的工艺特点是要求必须进行注浆全程的实时监控。GIN注浆法从理论上解决了注浆帷幕的形成机制,但它对地质条件很少给予重视,很难改进岩体注浆效果。在具有宽裂隙岩体中注浆,使用GIN注浆法几乎不能形成搭接的注浆帷幕。

为解决核废料填埋过程中对微细裂隙的封堵,日本等国开始采用高频率脉冲压力驱动浆液的振动注浆法,该法极大地提高了浆液的流动性和可注性,减少了悬浊浆液在细裂隙入口处的堵塞现象。

要根据注浆目的、被注区具体的岩性以及地质构造条件等因素来合理选择注浆法。一般来说,渗透注浆适用于渗透性强的岩体和土体;压密注浆适用于比中砂细的砂土和能够充分排水的黏土;充填注浆适用于对大型溶洞或岩溶管道的封堵;劈裂注浆主要用来形成坝体防渗墙等。

1.3.3 注浆工艺现状及进展

注浆次序分孔序和段序。孔序分顺序注浆和跳孔注浆,段序分自上而下和自下而上分段法注浆。也有专家把注浆次序分为上行式、下行式、混合式和循环式四种。注浆控制分为过程控制和标准控制。过程控制是把浆液控制在所要注浆的范围内;标准控制是控制浆液达到注浆要求。

过程控制主要调整浆液性质和注浆压力、流量,调整的依据是地质条件和注浆理论。标准控制方法主要有定浆量控制法、定压控制法和定时控制法。

注浆压力是注浆工程中的一个重要参数。岩体注浆中对最大安全注浆压力的影响因

素主要有岩体强度、岩体渗透性及节理特征、浆液性质及水文地质条件等。目前国内外还没有更具说服力、占统治地位的最优注浆压力公式。一般根据注浆段深度或被注区上覆岩层重量来选择注浆压力。Grundy (1955) 建议注浆压力可为被注区上覆岩层重量的 2 倍,Zaruba (1962) 认为注浆压力至少应该等于注浆孔底以上岩层的压力。在北美,一般注浆压力不超过上覆岩层压力,而欧洲则为 5 倍甚至更高于上覆岩层压力。

由于注浆工程是隐蔽工程,施工质量不能在短期内发现,在发达国家已普遍采用先进的自动化设备来监测整个注浆过程。在美国,计算机辅助注浆评价系统(CAGES)开始应用于注浆工程,它可以以实时图形显示浆液流量、注浆压力、注浆时间、浆液扩散半径等的趋势,监视注浆作业过程,根据显示结果可以评价初始浆液的适宜性和注浆岩层的实时吸浆量。国内目前主要采用 GJY 型注浆自动记录仪和 LJ-Ⅱ型注浆压水测控系统等,可以做到对注浆参数的自动记录。电子信息和自动化技术在注浆中的应用必然是今后注浆工程中的一个重要发展方向。

为保证注浆能力和注浆的稳定性,确保煤底板(奥)灰岩含水层注浆加固改造效果,目前国内越来越多的煤矿开始建设地面注浆系统,可采用手动和自动控制。自动注浆系统采用专用控制软件,自动控制制浆量、浆液比重、注浆压力和注浆流量,保证了注浆工作的正常连续进行,避免了人为因素造成的注浆困难。

1.4 注浆理论研究现状及进展

与注浆工艺、注浆设备和注浆材料的快速发展相比,注浆理论特别是裂隙岩体的注浆理论发展却很缓慢。裂隙岩体注浆理论可以归纳为多孔介质注浆理论、裂隙介质注浆理论、拟连续介质注浆理论等。

1.4.1 多孔介质注浆理论

多孔介质注浆理论首先得到应用和发展。1938 年 Maag 推导出牛顿浆液在砂层的球形扩散公式,其理论模型见图 1-1,扩散公式为

$$H - h_0 = \frac{Q\beta}{4\pi kt} \left(\frac{1}{r_0} - \frac{1}{R} \right) \quad (1-3)$$

$$R = \sqrt[3]{\frac{3kHr_0 t}{\beta n}} + r_0 \quad (1-4)$$

式中: H 为注浆点总压力水头,cm; h_0 为注浆点静水压力水头,cm; Q 为注浆量,cm; R 为浆液的扩散半径,cm; k 为土体的渗透系数,cm/s; β 为浆液黏度与水的黏度之比; n 为土体的孔隙率; t 为注浆时间,s; r_0 为注浆孔半径,cm。

常见的球形扩散公式还有 Raffle - Greenwood 公式

$$t = \frac{nr_0^2}{Kh} \left[\frac{\beta}{3} \left(\frac{R^2}{r_0^2} - 1 \right) - \frac{\mu - 1}{2} \left(\frac{\beta}{r_0^2} - 1 \right) \right] \quad (1-5)$$

$$H - h_0 = \frac{Q}{4nk} \left[\beta \left(\frac{1}{r_0} + \frac{1}{R} \right) + \frac{1}{R} \right] \quad (1-6)$$

假定 $\beta=1$, 并且 $(H-h_0)$ 一定, 当 R 从 r_0 变化到无穷大时, 从式(1-3)可以看出 Q 从无穷大变化到 $4\pi kr_0 t (H-h_0)$, 如果一直注浆下去, 注浆量 Q 还是无穷大。而应用 Raffle - Greenwood 公式(1-6), Q 则从 $4nkr_0 (H-h_0)/3$ 变化到 $4nkr_0 (H-h_0)$ 。可见, Raffle - Greenwood 公式更为合理, 这是因为 Raffle - Greenwood 公式不仅考虑了地下水的静压作用, 而且认为注入的浆液驱使土中孔隙水的运动并产生黏性阻力损失。另外, Magg 公式没有考虑土体自身的力学指标(如变形模量和剪切强度等), 而这势必影响浆液的扩散。

另外, 还有柱形扩散公式

牛顿浆液
$$R = \sqrt{\frac{2kht}{n\beta \ln(R/r_0)}} \quad (1-7)$$

上式的理论模型见图 1-2。

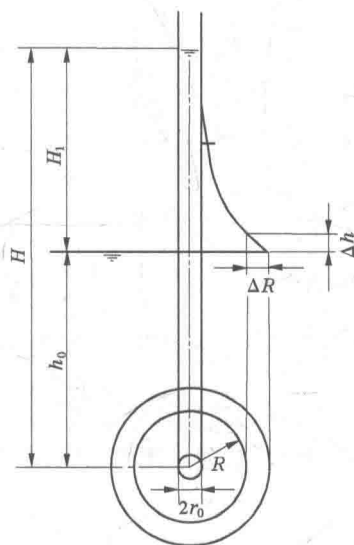


图 1-1 Maag 浆液球形扩散模型

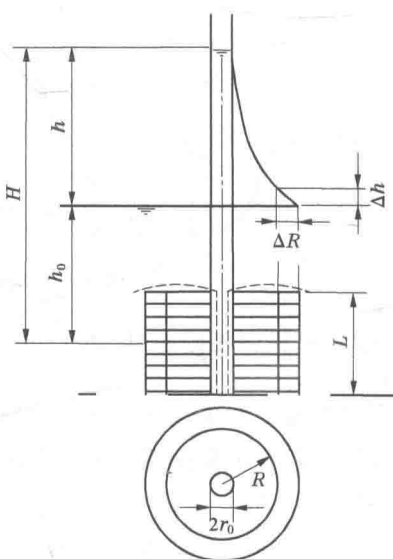


图 1-2 浆液柱形扩散模型

宾汉姆浆液
$$R = \sqrt{\frac{\left[\frac{E(P_0 - P_R)}{A\mu} - BCR \right] 2t}{n \ln(R/r_0)}} \quad (1-8)$$

式中: $E = m^{0.1} d_0^4 / 1.2 D_0^2$, m 为裂隙岩体的单位厚度裂隙率; d_0 为孔隙直径; D_0 为土颗粒直径; P_0 和 P_R 分别为浆液在注浆孔壁和 R 处的注浆压力; μ 为浆液的塑性黏度; R 为浆液的扩散半径; A 为试验常数; $B = \tau_0 / \mu$; n 为土体的孔隙率。

从上述浆液的扩散公式可以看出, 浆液在多孔介质中的扩散半径 R 为时间 t 、浆液黏度 μ 、土体孔隙率 n 、土体渗透系数 k 以及注浆压力 P 的函数, 即 $R = f(t, \mu, n, k, P)$ 。

若应用于各向异性岩体, 则可将式(1-7)中的地层渗透系数 k 换为裂隙岩体的等效渗透系数 k_f

$$k = \frac{e}{D} k_f \quad (1-9)$$

式中: k_f 为裂隙的渗透系数; e 为裂隙张开度; D 为裂隙间距。