

Analysis of Unsaturated Flow in Fractured Rock Mass
and Engineering Application

裂隙岩体非饱和渗流分析 及其工程应用

■ 胡云进 著

Analysis of Unsaturated Flow in Fractured Rock Mass
and Engineering Application

裂隙岩体非饱和渗流分析 及其工程应用

胡云进 著



ZHEJIANG UNIVERSITY PRESS

浙江大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

裂隙岩体非饱和渗流分析及其工程应用 / 胡云进著.
杭州: 浙江大学出版社, 2009. 5
ISBN 978-7-308-06768-3

I. 裂… II. 胡… III. 岩体力学—饱和渗流—研究
IV. TU45 0357.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 073654 号

内容提要

本书系统论述了裂隙岩体非饱和渗流的理论、试验、分析方法及工程应用。全书共 7 章, 主要内容包 括: 裂隙岩体非饱和渗流研究现状综述, 地表入渗影响下的岩坡稳定性研究概况介绍, 单一裂隙非饱和渗流研究, 完整岩石非饱和渗流研究, 裂隙岩体非饱和渗流有限元分析, 地表入渗影响下的岩坡稳定性研究以及上述研究成果的工程应用等。

本书可供水利水电、铁路、公路、矿山及核废料深埋处置等领域的科研人员和工程技术人员阅读参考, 也可供上述领域研究生相关课程的参考教材。

裂隙岩体非饱和渗流分析及其工程应用

胡云进 著

责任编辑 杜希武
封面设计 刘依群
出版发行 浙江大学出版社
(杭州天目山路 148 号 邮政编码 310028)
(网址: <http://www.zjupress.com>)
排 版 杭州求是图文制作有限公司
印 刷 杭州浙大同心教育彩印有限公司
开 本 787mm×1092mm 1/16
印 张 12.5
字 数 217 千字
版 次 2009 年 5 月第 1 版 2009 年 5 月第 1 次印刷
书 号 ISBN 978-7-308-06768-3
定 价 25.00 元

版权所有 翻印必究 印装差错 负责调换

浙江大学出版社发行部邮购电话 (0571)88925591

前 言

裂隙发育的岩体中地下水位以上部分是未被水充满的非饱和带,降雨和地面水体通过该带的下渗都是一个非饱和渗流过程。可以说,在自然界中,裂隙岩体非饱和渗流是普遍、客观存在的。

裂隙发育的天然岩坡和开挖边坡的滑坡多发生在雨季,这已引起国内外工程界的极大关注。虽然已认识到上述滑坡与地表入渗引起的暂态孔隙水压力的升高密切相关,但对这种暂态孔隙水压力的升高区和升高值至今也没有可靠的定量研究成果,故已有的工程设计对升高区和升高值均采用假定值,不是造成浪费就是潜伏着隐患。此外,为评价核废料深埋对地下水环境的污染以及研究地面污染物随下渗水的迁移等都将以裂隙岩体非饱和渗流的研究为基础。

由于裂隙的非饱和水力参数十分难以测量和确定(还没有可靠的直接测定裂隙非饱和水力参数的试验方法),裂隙岩体的表征单元体(REV)很大甚至有可能不存在(经典的等效连续介质模型有时难以应用),而裂隙的产状和空间展布又很复杂(离散裂隙网络模型很难应用),故裂隙岩体非饱和渗流的研究还处于其发展的初期阶段。此外,对地表入渗引发岩坡失稳也缺乏系统定量的研究成果。

总之,裂隙岩体非饱和渗流是裂隙岩体渗流力学中理论较深,研究难度较大但又迫切需要开展的一个应用基础理论的前沿课题。该课题的研究成果可广泛应用于水利、环保、能源、地质等众多的工程领域。故开展裂隙岩体非饱和渗流研究本身就是创新,其研究成果不但具有很高的学术理论价值,而且还可直接服务于国家建设。

本书正是基于裂隙岩体非饱和渗流研究的重要性和迫切性,着重介绍了作者本人在单裂隙非饱和渗流机理、单裂隙非饱和水力参数的测定和确定、有地表入渗的裂隙岩体非饱和渗流分析以及地表入渗影响下的岩坡稳定性分析等方面的研究成果;同时也简要穿插介绍了国内外学者的一些研究成果。希望能为水利水电、铁路、公路、矿山及核废料深埋处置等领域的科研人员和工程技术人员提供参考和帮助。

本书的主要特色成果有:(1)研制了一套可同时测定单裂隙排水和吸水时的毛

裂隙岩体非饱和渗流分析及其工程应用

细压力~饱和度关系以及非饱和渗透系数~毛细压力关系的实验装置并给出了相应的测定单裂隙非饱和水力参数的试验方法,在该实验装置上做了裂隙概化模型的试验,初步阐明了细、微裂隙非饱和渗流的机理;(2)运用分形几何等理论,考虑水和气的“圈闭”影响,提出了一种更为合理的确定单裂隙非饱和水力参数的数值试验法,该法能模拟出单裂隙排水与吸水过程间客观存在的滞后现象;(3)采用与当前岩体工程勘探水平相适应的等效连续介质理论,建立了有地表入渗的裂隙岩体饱和非饱和渗流的数学模型并研制出了相应的有限元计算程序,由于在非饱和水力参数的确定以及入渗边界的处理等方面比以往方法有所改进,使得模拟结果能更贴近实际;(4)借鉴非饱和土的抗剪强度理论,研制了地表入渗影响下的岩坡稳定性验算程序,该程序考虑了非饱和带基质吸力(即毛细压力)对岩体抗剪强度的贡献、暂态附加水荷载对岩坡稳定的不利作用,使计算结果更贴近实际;(5)应用上述研究成果,首次对大型水电工程的水垫塘岸坡进行了雾化雨入渗定量分析及雾化雨入渗影响岸坡稳定的定量研究,并提出了保护岸坡安全的具体措施。

本书的研究工作得到国家自然科学基金(50809058,59879004)、高等学校博士学位点专项科研基金(98029408)和水利部水利技术开发基金(97472603)等的资助。在此深表感谢。

本书内容主要是作者本人的研究成果,部分取材于国内外相关文献和专著。限于作者本人水平,书中难免有许多缺点和错误,热诚欢迎读者批评指正。

作 者

2009年4月8日于求是园

目 录

第一章 绪 论	(3)
第一节 裂隙岩体非饱和渗流及其定义	(3)
第二节 裂隙岩体非饱和渗流研究意义	(3)
第三节 裂隙岩体非饱和渗流研究进展	(6)
第四节 地表入渗影响下的岩坡稳定性研究现状	(24)
第五节 本书内容结构	(28)
第二章 单一裂隙非饱和渗流研究	(33)
第一节 概 述	(33)
第二节 单裂隙非饱和渗流试验研究	(34)
第三节 物模试验法测定单裂隙非饱和水力参数	(59)
第四节 数值试验法确定单裂隙非饱和水力参数	(60)
第五节 讨 论	(71)
第三章 完整岩石非饱和渗流研究	(75)
第一节 概 述	(75)
第二节 完整岩石非饱和渗流试验研究	(76)
第三节 完整岩石非饱和水力参数测定	(81)
第四节 讨 论	(82)
第四章 裂隙岩体非饱和渗流有限元分析	(85)
第一节 概 述	(85)
第二节 等效连续介质模型的建立	(86)
第三节 等效连续介质模型有限元计算格式的推导	(90)
第四节 等效连续介质模型有限元计算程序的研制	(93)
第五节 算例分析	(101)

裂隙岩体非饱和渗流分析及其工程应用

第六节	离散裂隙网络模型	(105)
第七节	双重介质模型	(109)
第八节	讨论	(112)
第五章	地表入渗影响下的岩坡稳定性研究	(117)
第一节	概述	(117)
第二节	地表入渗引发岩坡失稳的机制	(118)
第三节	地表入渗影响下的岩坡稳定验算程序的研制	(119)
第四节	算例分析	(127)
第五节	讨论	(133)
第六章	工程应用	(137)
第一节	概述	(137)
第二节	小湾电站水垫塘区岸坡降雨入渗分析	(138)
第三节	溪洛渡电站水垫塘区岸坡雾化雨入渗分析	(142)
第四节	雾化雨入渗对溪洛渡电站水垫塘区岸坡稳定性的影响	(164)
第五节	讨论	
第七章	结论与展望	(170)
第一节	总结	(175)
第二节	若干有待深入研究的问题	(177)
参考文献		(178)

第一章

绪论

第一章 绪 论

第一节 裂隙岩体非饱和渗流及其定义

天然岩体经构造、风化、卸荷等地质作用后发育有大量的方向各不相同、尺寸各异且相互切割的裂隙,本书称这样的岩体为裂隙岩体。裂隙岩体中地下水位以上部分是未被水充满的非饱和带,通过该带的降雨或泄洪雾化雨以及地面水体的下渗(以下统称地表入渗)都是一个非饱和渗流过程。可以说,在自然界中,裂隙岩体非饱和渗流是普遍、客观存在的。裂隙岩体非饱和渗流就是研究水在非饱和裂隙岩体中的运动规律、仿真分析及其工程应用的一门学科,它是岩体水力学的一个重要分支,涉及水利、环保、能源、地质等众多的工程应用领域。裂隙岩体非饱和渗流与大家所熟悉的土体非饱和渗流有一定的相似性但也存在较大的差异。由于裂隙空间展布的复杂性、裂隙与岩块非饱和渗流特性的明显差异性以及裂隙-岩块间水交换机理的复杂性等,使得裂隙岩体非饱和渗流的室内外试验和野外观测以及理论分析计算均比土体复杂,因此国内外虽对土体非饱和渗流有相当的研究,但对裂隙岩体非饱和渗流的研究还处于其发展的初期阶段,准确地讲,只有二十多年的研究历史。

第二节 裂隙岩体非饱和渗流研究意义

据《中国典型滑坡》一书的记载,裂隙发育的天然岩坡和铁路、公路等的开挖边坡的滑坡以及岩体中地下洞室巷道的塌方多发生在雨季^[1],国外也有类似报道^[2];高坝泄洪产生的雾化雨入渗也常导致下游岸坡的滑坡^[3],这已引起工程界的极大关注。随着岩土力学、土壤水动力学以及岩体水力学的发展,国内外学者已越来越清楚地认识到上述滑坡和塌方与地表入渗引起的裂隙岩体非饱和渗流密切相

裂隙岩体非饱和渗流分析及其工程应用

关^[4]。即地表入渗会导致裂隙岩体中地下水位以上的非饱和区孔隙水压力的暂时升高,产生暂态的附加水荷载,这是导致岩坡失稳的最主要因素,另外地表入渗引起裂隙岩体力学强度指标的降低也是岩坡滑坡的重要因素^[5,6];而且裂隙发育岩坡的水头场受地表入渗的影响往往比土坡更敏感^[7]。然而对这种暂态孔隙水压力的升高区和升高值至今还没有可靠的可靠应用的定量研究成果,只是定性地认为它主要取决于裂隙网络的几何特征、裂隙产状、风化程度以及降雨强度和历时。故已有的工程设计对这种暂态孔隙水压力的升高区和升高值均采用假定值^[4],不是造成浪费就是潜伏着隐患。而上述暂态附加水荷载是岩坡稳定核算时所必须知道的。因此如何恰当估计岩坡内暂态孔隙水压力的升高区和升高值是预测岩坡滑坡和加固设计的关键,而能否恰当估计岩坡内暂态孔隙水压力的升高区和升高值取决于裂隙岩体地表入渗非饱和渗流场的准确求解。

随着核电等核工业的不断发展,大量核废料亟待处理。目前,许多国家拟采用的方案是把核废料埋于岩体深厚的非饱和带中,如美国拟把第一个高放射性核废料地下深埋区选址于尤卡山(Yucca Mountain),我国把甘肃北山作为核废料处置库的重点预选区。核废料地下处置的一大顾虑是雨水入渗到达处置库后,可能沟通核废料与地下水的水力联系,因此为了评价核废料深埋的安全性以及对地下水环境的污染等都要求对有地表入渗的裂隙岩体非饱和渗流作深入细致地研究^[8-12]。如美国 Yucca Mountain 项目以及欧共体 3D 项目的开展都是旨在研究核废料地下储存的安全问题。另外,研究地面污染物(如工业、城市生活垃圾渗滤液等)随下渗水的迁移^[13,14],也将以有地表入渗的裂隙岩体非饱和渗流的研究为基础。

此外,预防煤层开采中瓦斯的爆炸^[15]、石油二次开采^[16]以及地热能开发^[17-19]等都将涉及裂隙岩体两(多)相流(非饱和渗流的推广)的研究。

随着西部大开发的深入和南水北调等大型水利工程的上马,越来越多的岩坡和地下洞室将面临地表入渗所引发的滑坡和塌方灾害。近几年的“电荒”以及对今后更长时期内缺电的担忧使得“核电大上马”紧锣密鼓起来,预计我国今后 15 年平均每年要建一座大亚湾核电站,因而核废料深埋处置问题的研究刻不容缓。此外,随着城市化进程的加快和人们对环保问题的重视,越来越多的工业、城市生活垃圾等需要填埋处理。因此裂隙岩体非饱和渗流的研究已逐渐成为地质、水利、环保、能源等工程领域的热点。

由于裂隙与岩块非饱和渗流特性的明显差异性以及裂隙非饱和水力参数十分难以测量和确定,加之裂隙岩体的表征单元体(REV)很大甚至有可能不存在(经典的连续介质模型有时难以应用),而裂隙的产状和空间展布又很复杂,目前尚难以

确切全面掌握(裂隙网络模型很难应用),故对裂隙岩体非饱和和渗流的室内外试验和野外观测以及理论分析计算均比多孔介质复杂。因此国内外虽对多孔介质非饱和和渗流有相当的研究^[20-31],但是对裂隙岩体非饱和和渗流的研究还处于其发展的初期阶段,准确地说,最近二十多年才起步。对单裂隙非饱和渗流特性及其与本质影响因素间的关系还缺乏统一的认识和理解,对单裂隙非饱和渗流的机理也尚未达成共识,缺乏单裂隙非饱和水力参数的准确确定方法,还没有很完善的裂隙岩体非饱和渗流的分析模型。

综上所述,裂隙岩体非饱和渗流是裂隙岩体水力学中理论较深,研究难度较大但又迫切需要开展的一个应用基础理论的前沿课题。该课题应用广泛,涉及水利、环保、能源、地质等众多的工程应用领域。故开展裂隙岩体非饱和和渗流研究不仅具有重大的理论意义,而且还有巨大的实用价值。概括起来说,研究裂隙岩体非饱和和渗流具有下述理论意义和实用价值:

(1)通过裂隙非饱和和渗流机理和规律的试验研究,可对已有的裂隙岩体非饱和和渗流理论进行检验,验证一些假设和简化的合理程度。

(2)由于裂隙岩体非饱和和渗流是裂隙岩体渗流中的一个崭新的重要组成部分,故裂隙岩体非饱和和渗流的研究成果可丰富和发展裂隙岩体渗流理论,使理论更加完善,更能反映实际。

(3)有地表入渗的裂隙岩体非饱和和渗流的研究成果有助于更准确地评价和预测雨季岩质边坡和开挖边坡的稳定性以及泄洪雾化雨对河岸边坡稳定性的影响,从而为边坡的渗控设计提供依据;同时也为人工边坡的合理设计、施工和加固以及滑坡的综合整治提供科学依据。

(4)在核废料深埋处置方面,有地表入渗的裂隙岩体非饱和和渗流的研究成果可用于预测核废料对地下水环境的污染,并为核废料安全贮存设计和选址等提供科学依据。

(5)有地表入渗的裂隙岩体非饱和和渗流的研究成果可用于研究地面污染物随下渗水的迁移扩散规律,进而为控制地面污染物的迁移和扩散提供依据,从而为大家所关心的地下水污染等环保问题的研究提供方法和分析手段。

(6)裂隙岩体非饱和和渗流的研究成果经转化和推广之后,还可应用于预防煤层开采中瓦斯的爆炸、石油二次开采和地热能开发以及超采地下水导致海水入侵等领域的研究。

总之,裂隙岩体非饱和和渗流的研究成果不但具有很高的学术理论价值,而且还可直接服务于国家建设。

第三节 裂隙岩体非饱和渗流研究进展

由于水利、环保、能源、地质等工程应用领域的需要,国外已有一些学者相继从20世纪80年代中期开始对裂隙岩体非饱和渗流进行试验和理论研究。近十年来,国内也有学者开始了这方面的研究。目前的工作主要有:①对单一裂隙非饱和渗流进行试验和理论研究,主要集中在单裂隙非饱和渗流机理的研究以及非饱和水力参数,即毛细压力—饱和度和相对渗透系数—饱和度(或毛细压力)关系的确定(或测定)方面,其中相对渗透系数是指非饱和渗透系数与饱和渗透系数的比值;②提出各种求解裂隙岩体非饱和渗流的数学模型并进行相应的数值分析,有的还应用于实际工程的研究。

一、单一裂隙非饱和渗流研究

单一裂隙非饱和渗流是裂隙岩体非饱和渗流的基本问题和理论基础。对单一裂隙非饱和渗流的研究主要包括非饱和水力参数的确定和非饱和渗流机理的研究^[32]。

(一)单裂隙非饱和水力参数的确定

由于目前对裂隙岩体非饱和渗流的研究一般多借鉴多孔介质非饱和渗流的分析方法,其控制方程相同于(或类似于)多孔介质非饱和渗流的控制方程—Richards方程。因此,在裂隙岩体非饱和渗流研究中,最为关键的是单裂隙毛细压力~饱和度和相对渗透系数~饱和度(或毛细压力)关系的建立。目前建立上述关系有以下三种方法:①物模试验法,即直接通过单裂隙拟稳态驱替试验和非饱和渗流试验,借用多孔介质拟合模型拟合出经验关系式;②数值试验法,即通过建立单裂隙概化模型,利用数值模拟法和多孔介质拟合模型拟合出经验关系式;③数学推导法,即在某些假设和简化的前提下,根据单裂隙开度分布推导出上述关系式。

1. 物模试验法

野外观察和室内试验发现:天然裂隙壁面是凹凸不平的,两粗糙裂隙面间的空隙空间的开度是逐点变化的^[33,34]。天然裂隙空间可概化为二维非均质的多孔介质^[35]。而且岩体两粗糙裂隙面的间隙形成的开度分布与多孔介质固体颗粒间形成的喉颈孔隙分布的持水机制有一定的相似性^[16,36]。基于上述发现,不少学者认

为可通过拟稳态驱替试验,并借用多孔介质的拟合模型来拟合单裂隙毛细压力~饱和度的试验观测数据而得出单裂隙毛细压力~饱和度的经验关系式。

Reitsma 和 Kueper^[16]用人工生成的石灰岩裂隙做了水—油互不溶混拟稳态驱替试验。拟合试验观测数据采用下述两个多孔介质水分特征曲线的拟合模型。

Brooks—Corey 模型^[37]:

$$P_c = P_d (S_e)^{-\frac{1}{\lambda}} \quad (1-1)$$

式中: P_c 为毛细压力; P_d 为进气值,即油相的起始驱替压力; λ 为反映裂隙开度分布特征的指数; S_e 为水相的有效饱和度,可表示为:

$$S_e = \frac{S_w - S_r}{1 - S_r} \quad (1-2)$$

式中: S_w 为相应于毛细压力 P_c 的水相饱和度; S_r 为束缚水饱和度。

Brooks—Corey 模型的拟合参数是 P_d , λ 和 S_r 。

Van Genuchten 模型^[38]:

$$P_c = P_o (S_e^{-\frac{1}{m}} - 1)^{\frac{1}{n}} \quad (1-3)$$

式中: m, n 间关系为 $n = (1 - m)^{-1}$ 。其中 P_o, m, S_r 为拟合参数。

他们先根据驱替出的总水量估计出裂隙总体积(假定总体积为驱替出的总水量的 1.05 倍),以求出每个毛细压力下的水相饱和度。再借用上述拟合模型,用非线性最小二乘法拟合出单裂隙毛细压力~饱和度的关系式。

叶自桐等^[36]做了天然花岗岩裂隙的水—油互不溶混拟稳态驱替试验。拟合方法和拟合采用的模型同 Reitsma 和 Kueper。所不同的是,他们把裂隙总体积也作为拟合参数,而不是估计一个值。这样处理较妥当,特别是拟合出的束缚水饱和度更准确。

由于油、气物理特性的差异,通过以上两个水—油驱替试验所得出的单裂隙毛细压力~饱和度关系式尚不能直接应用于非饱和渗流,但为单裂隙非饱和渗流的毛细压力~饱和度关系的建立提供了一种思路和方法。此外,通过上述拟稳态驱替试验所得的关系式应用于非恒定渗流计算时,会有一定的误差^[39]。

为建立相对渗透系数~饱和度关系而进行的最早的二相流试验可追溯至 1966 年。Romm^[40]用表面混合湿润(即表面由亲水的聚乙烯薄膜和亲油的蜡纸组成,改变两者所占的比例可控制水和煤油的饱和度)的平行平板缝隙做了水和煤油的二相流试验。在缝隙出口处分离出水和煤油,以测算得特定饱和度下两者的相对渗透系数。试验结果表明,两者的相对渗透系数均线性依赖于其饱和度。由于天然岩体裂隙是变开度的,故把裂隙概化为平行平板缝隙是存在问题的,因而上述

裂隙岩体非饱和渗流分析及其工程应用

试验结果是不能反映实际情况的。

Merrill^[41]在玻璃平板所构造的模型裂隙和砂岩裂隙上做了水油二相流试验。试验结果表明在整个试验流速范围内,水相饱和度值均聚集在 0.72(对玻璃平板裂隙)和 0.62(对砂岩裂隙)附近,因此无法成功获得相对渗透系数与饱和度的关系。

Nicholl 和 Glass^[42]在纹理玻璃板所构造的模型裂隙上测定了湿润相的相对渗透系数,发现相对渗透系数与饱和度的三次方成正比。纹理玻璃板所构造的模型裂隙仍不能很好的反映实际岩体裂隙的持水和导水特性。

Persoff 和 Pruess^[43]通过天然凝灰岩裂隙的水气二相流试验和多孔介质的拟合模型得出了相对渗透系数~饱和度的经验关系式。他们所采用的拟合模型为 Corey 模型^[44],其表达式如下:

$$K_{rw} = (S_e)^4 \quad (1-4)$$

式中: K_{rw} 为水相的相对渗透系数; S_e 为水相的有效饱和度,可表示为:

$$S_e = \frac{S_w - S_{wr}}{1 - S_{wr} - S_{gr}} \quad (1-5)$$

式中: S_e 为水相的有效饱和度; S_{wr} 为束缚水饱和度; S_{gr} 为残余气饱和度。

赵阳升等^[45,46]在由有机玻璃板构造的模型裂隙上做了水气二相流试验,得出的相对渗透系数~饱和度关系如下:

$$K_{frc} = aS_w + b \quad (1-6)$$

式中: K_{frc} 为水相的相对渗透系数; S_w 为水相的饱和度; a, b 为拟合参数。

Bertels 等^[47]研制了一种运用 CT 扫描技术来测定饱和度的实验技术,运用该技术在人工生成的玄武岩裂隙上做了排水试验(即气驱水试验)。试验结果表明,水相的相对渗透系数随饱和度急剧变化,远非线性关系。但他们没有进一步拟合出相对渗透系数与饱和度的关系式。

Indraratna 等^[48]应用特制的三轴仪进行了高轴压和围压下的岩体裂隙水—气二相流试验。同时,基于质量、能量守恒原理及 Poiseuille 流动定律,提出了一种概化的分层二相流模型,并用试验成果验证了分层二相流模型。应用分层二相流模型得出了相对渗透系数、饱和度、毛细压力及流速之间的关系。

由于非饱和渗流是假设空气不流动,即气相压力维持恒定,故不同于上述二相流试验,因此通过二相流试验所建立的单裂隙相对渗透系数~饱和度关系不适用于非饱和渗流,但可借鉴上述方法建立单裂隙的相对渗透系数~饱和度(或毛细压力)的关系。

孙役等^[49]采用垂直放置的单裂隙(由一块有机玻璃板和一块预制混凝土板合并而成)进行了不同隙宽、不同饱和水位、不同降雨强度下的一系列非饱和渗流模拟实验,建立了裂隙隙宽与毛细压力、饱和度与毛细压力、裂隙隙宽与饱和度以及毛细压力与非饱和渗透系数之间的实验关系。其中饱和度与毛细压力的实验关系为:

$$S = \frac{1}{1 + ae^{bh}} \quad (1-7)$$

式中: S 为饱和度; h 为毛细压力; a , b 为拟合参数。

毛细压力与非饱和渗透系数的实验关系为:

$$K_s = \frac{aK_0}{1.0 + ae^{bh}} \quad (1-8)$$

式中: K_s 为非饱和渗透系数; K_0 为饱和渗透系数; h 为毛细压力; a 为毛细作用引起的渗透性衰减系数; a , b 为拟合参数。

由于所采用的裂隙是由有机玻璃板和混凝土板合并而成的,其形态不同于天然裂隙,故所建立的实验关系只能定性地描述天然裂隙非饱和渗流。

2. 数值试验法

由于控制和测量裂隙中水相的饱和度均较困难,而且做物模试验既费时又费钱,故有些学者致力于通过建立单裂隙概化模型,利用数值模拟法和多孔介质拟合模型得出单裂隙毛细压力~饱和度和相对渗透系数~饱和度(或毛细压力)的经验关系式。

合理的单裂隙概化模型需依据裂隙开度分布来建立。目前推求裂隙开度分布主要有以下四种方法:① 轮廓仪扫描法^[50],即用千分表等水准仪沿裂隙上下壁面的若干迹线测得许多个点离基准面的距离,叠合上下壁面求得裂隙面许多个点处的开度,再推求出裂隙开度分布;② 注伍德合金或环氧树脂的仿形法^[51,52],即往裂隙中注入伍德合金或环氧树脂,待凝固后,把裂隙切成许多薄片,成像放大后测得许多个点处伍德合金或环氧树脂凝固物的厚度,最后推求出裂隙开度分布;③ 拟稳态驱替试验法^[16],即根据拟稳态驱替试验建立的毛细压力~饱和度关系式和某种入侵概念模型推求出裂隙开度分布;④ 针对透明的仿形裂隙(根据天然裂隙铸成^[33,43]),运用光吸收技术求得许多个点处的开度,再推求出裂隙开度分布^[53,54]。此外,还有核磁共振法^[53]等。

Pruess 和 Tsang^[35]根据裂隙开度分布和假设的开度空间相关长度用 COVAR 法^[55]生成裂隙随机样本,再概化为许多等面积不等开度的小平行板组合体;或者

裂隙岩体非饱和渗流分析及其工程应用

直接把实际的天然裂隙离散成许多小平行板组合体。根据毛细吸持理论的 Laplace 方程(见式(1-9)),给定一个毛细压力 P_c ,可求得一个临界开度 b_c 。他们假设开度小于 b_c 的所有小平行板内均充满水,由此通过计算求得相应于该毛细压力的水相饱和度 S_w 。给定多个毛细压力可求得多个类似于物模试验的毛细压力~饱和度关系数据点。然后在裂隙一对边上给定适当的毛细压力,另一对边视为不透水边界,并假设充水的小平行板内立方定理成立。用 MULKOM 数值模拟法^[56]求得该边界条件下裂隙总渗流量,再根据达西定律求得裂隙在该毛细压力(取入口、出口毛细压力的平均值)下的非饱和渗透系数,然后除以饱和渗透系数得相对渗透系数。给定多个不同的入口、出口毛细压力值,可求得一系列相对渗透系数和毛细压力的关系数据点。不过他们没有拟合出单裂隙毛细压力~饱和度和相对渗透系数~毛细压力的经验关系式。

$$b_c = \frac{2\sigma\cos\theta}{P_c} \quad (1-9)$$

式中: P_c 为毛细压力; b_c 为相应于 P_c 的临界开度; σ 为水气界面张力; θ 为接触角。

Kwicklis 和 Healy^[57]对上述 Pruess 和 Tsang 的概化模型作了改进,即在生成裂隙充水域时,附加了一条入侵标准,认为入侵与否除依据毛细吸持理论外,还应考虑与周围的小平行板间有无水力联系。显然这更贴合实际天然裂隙的持水机制,是对 Pruess 和 Tsang 概化模型的改进。他们据此求得一系列毛细压力~饱和度的关系数据点,并用 Van Genuchten 模型拟合出了单裂隙毛细压力~饱和度的经验关系式。同 Pruess 和 Tsang,他们假设对每一小平行板立方定理成立,并在裂隙一对边上给定适当的毛细压力,另一对边视为不透水边界。以每个小平行板中心点的水头为未知量,取相邻小平行板开度的调和平均值作为小平行板间的等效水力开度,用 VSFRAC 数值模拟法^[58]求得所有小平行板中心点的水头值,再根据这些水头值和小平行板间等效水力开度求得该毛细压力(取入口、出口毛细压力的平均值)下的总渗流量,然后据达西定律求得非饱和渗透系数,除以饱和渗透系数后即得相对渗透系数。给定许多不同的入口、出口毛细压力值,求得一系列相对渗透系数~毛细压力的关系数据点,根据上述毛细压力~饱和度的关系式换算为相对渗透系数~饱和度的关系数据点后,根据 Mualem 理论^[59],用 Van Genuchten 模型拟合出相对渗透系数~饱和度关系式。拟合表达式如下:

$$K_r = S_r^{0.5} [1 - (1 - S_r^{\frac{1}{m}})^m]^2 \quad (1-10)$$

式中: K_r 为相对渗透系数; S_r, m 的意义同式(1-3)。

Vandersteen 等^[60]对上述 Kwicklis 和 Healy 的概化模型作了改进。对排水过