

文章编号: 1000-7598-(2005) 02-0270-07

裂隙岩体溶质运移模型研究

王锦国, 周志芳

(河海大学 土木学院地质及岩土工程系, 江苏 南京 210098)

摘要: 核废料的地下深部贮存、垃圾填埋造成的污水下渗、海水入侵、输油管道老化引起渗漏等诸多应用领域的发展, 要求从机理、试验和模型等方面发展裂隙岩体溶质运移理论。基于裂隙岩体系统溶质运移的多尺度概念模型, 分析了目前描述裂隙岩体系统中溶质运移各种数学模型的适用性和优缺点, 为选取合理的数学模型求解具体的问题提供了参考依据。最后提出了需要进一步研究的问题。

关键词: 裂隙介质; 溶质运移; 概念模型; 数学模型

中图分类号: TU 452; TB 115

文献标识码: A

Study on model of solute transport in fractured rock mass

WANG Jin-guo, ZHOU Zhi-fang

(Department of Geology and Geotechnical Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: With the evolution of many application domains, which are involved in radioactive waste repositories, sewage infiltration of resulting from refuse filling fields, seawater intrusion and leakage arising from oil pipeline aging, it is requested that theory of solute transport in fractured rocks is developed from the mechanism, experiment and model. Multi-scale conception models of solute transport in fractured rocks system are established. Furthermore, advantages and disadvantages of different mathematical models for solute transport are analyzed in present fractured rocks systems. It provides referential foundation for selecting rational mathematical model to solve concrete problems. Finally, problems needing further research are put forward.

Key words: fractured media; solute transport; conception model; mathematical model

1 前言

随着人类活动日益向地下空间的深入, 以裂隙岩体地下水及其相关的问题为主要对象的研究越来越重要。近年来, 裂隙岩体地下水受到了严重污染的威胁, 诸如核废料的地质贮存、垃圾填埋造成的污水下渗、海水入侵、输油管道老化引起渗漏等等。这些与人类生活密切相关的环境问题迫切要求对裂隙岩体地下水中污染物的运移的机制进行研究, 以便对其进行预报和控制。然而, 由于溶质运移是一个非常复杂的过程, 再加上裂隙岩体本身的复杂性, 使得这项问题的研究变得非常困难。

自 20 世纪 60 年代以来, 人们就开始了裂隙岩体地下水溶质运移的探索工作, 在试验、理论研究和计算模拟方法等方面都取得了一定的进展。然

而, 由于裂隙岩体中的渗流具有高度的复杂性, 岩体裂隙的空间几何因素、渗透参数、弥散系数等有显著的不确定性, 使得裂隙岩体渗流研究难度极大。多年来, 关于松散介质中的水、热、溶质运移研究水平, 大大超过了对裂隙岩体的研究, 裂隙岩体渗流研究进展的相对缓慢, 也从一个侧面反映了其工作的难度之大。本文对裂隙岩体中溶质运移的概念模型和数学模型进行了综述, 并提出了有待进一步研究的问题。

2 概念模型

由于裂隙岩体基质块体的渗透率远小于裂隙网络的渗透率, 使得裂隙岩体中地下水溶质运移过程具有非常强烈的非均质各向异性。人们发现, 裂隙岩体的贮水性取决于遍布于整个介质的微裂隙或孔

隙(即基质块体),而导水性则取决于较大的裂隙。通常认为,区域性的溶质运移过程主要发生在裂隙系统中,而局部性的溶质运移过程则要考虑裂隙系统和基质系统之间的物质交换作用,这对整个溶质运移的影响是不能忽视的。由于研究对象的时空尺度不同,重点研究的溶质交换过程也不同,可分为(1)分子扩散;(2)由于裂隙和基质之间存在压力梯度而引起的对流作用(局部对流);(3)由于区域压力梯度而产生的裂隙和基质的混合作用(区域对流)。图1为局部对流作用和区域对流作用的示意图^[1]。由于研究对象的时间、空间尺度各不相同,因而模拟研究溶质运移时,考虑的重点也不一样。对于较小尺度(时间、空间)问题,分子扩散作用和局部对流作用往往不能忽视,而对于尺度较大的问题则可不考虑分子扩散和局部对流的作用。

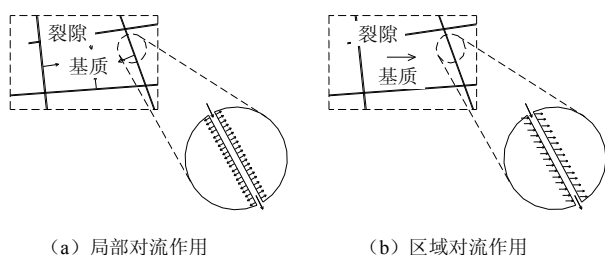


图1 裂隙岩体中的溶质交换示意图(据 Jansen 等,1999 年)
Fig.1 Schematic representation of solute transport in fractured media (Jansen et al, 1999 a)

实际的溶质运移中各种尺度的溶质交换过程均存在,为了研究的方便,可根据研究的重点不同,忽略相应的次要影响因素。

裂隙岩体中的地下水溶质运移是一个非常复杂的过程,对其进行准确的数学表达或解释,必须以裂隙岩体空间非均质变化的概念为基础。由于研究对象、研究目的的不同,按照待研究问题的空间规模大小和时间长短,可以对溶质运移模型作如下划分^[2]。

(1) 小尺度模型:主要研究单个裂隙及其附近的基质中溶质运移情况。水流和溶质运移集中在一条单裂隙附近的区域里,裂隙和基质块体可以有水量和溶质的交换(见图2(a))。模拟前要精确地弄清楚裂隙的几何特征、水力特征。

(2) 中尺度模型:研究含少量裂隙的岩体中溶质运移情况。地下水流动或溶质运移在一个相对较小的区域中发生,该区域中包含少量的裂隙。这些离散的裂隙位置及其特征必须是已知的。然而,实际情况中裂隙的特征却是随机的、不能确知的。可

以用统计规律来构造研究区的模型,来拟合真实的地质系统(见图2(b))。

(3) 大尺度模型:主要研究含裂隙较多的岩体中溶质运移问题。在这种情况下,一般假设研究区由若干个相互重叠且充满整个研究区的介质系统组成,每个介质系统都是连续的,且系统间存在着溶质交换(见图2(c))。

(4) 超大尺度模型:研究含大量裂隙,并且裂隙间的连通性较好的岩体中溶质运移问题。可以认为水流和溶质在一种连续介质中流动,区域的空间特征则认为是裂隙网络与基质的各自特征之和(见图2(d))。

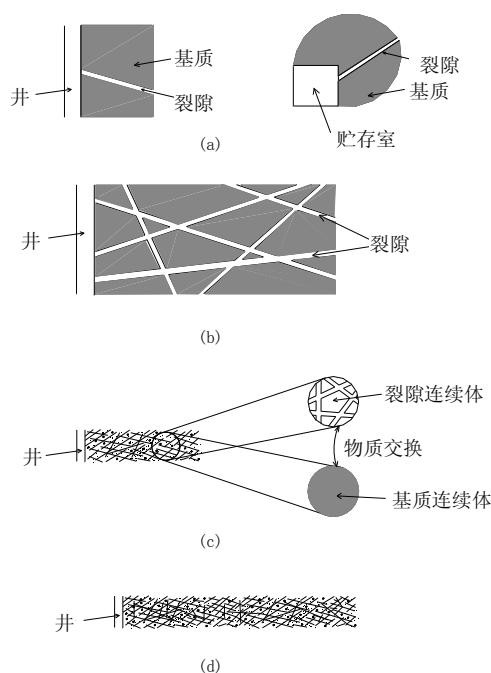


图2 裂隙岩体多尺度模型示意图(据 Bear 等,1987 年)
Fig.2 Schematic representation of the four scales of solute transport in fractured media (Bear et al, 1987a)

3 单裂隙中溶质运移研究

研究单裂隙中溶质运移是研究裂隙岩体中溶质运移机制的基础,有助于人们从微观的角度了解溶质在裂隙-基质系统中的对流扩散机理。目前大量的试验模拟、数值模拟大都集中在对单个裂隙中溶质运移的研究上。

假设饱水的岩体中有一条平直的等宽度的裂隙,则两裂隙间平均水流速度为

$$\bar{v} = \frac{\rho g (2b)^2 (dh/dx)}{12\mu} \quad (1)$$

式中 $\bar{v}$ 为流体平均速度; ρ 为液体密度; g 为重

力加速度; $2b$ 为裂隙开度, dh/dx 为水力梯度; μ 为动力粘滞系数。

假定裂隙中水流速度是常数, 并且假定裂隙的宽度比长度小得多。由于基质的渗透性非常低, 因而其中的溶质运移主要是分子扩散, 沿裂隙方向的运移要比在基质中的运移快得多。溶质在裂隙中运移时, 从裂隙向基质的扩散是不能忽略的, 符合 Fick 扩散定律, 裂隙向基质扩散的一维方程为

$$\frac{\partial}{\partial y}(\theta D^* \frac{\partial C}{\partial y}) = \theta \frac{\partial C}{\partial t} \quad (2)$$

式中 θ 为基质孔隙度; D^* 为分子扩散系数; C 为溶质浓度; y 为坐标方向; t 为时间。

裂隙中的溶质运移的过程主要考虑如下 7 种作用: 裂隙中的对流、沿裂隙的机械弥散、沿裂隙的分子扩散、由裂隙向基质的分子扩散、裂隙壁上的吸附作用、基质骨架内的吸附、放射性衰变, 则溶质运移控制方程可以写为^[3]

$$L(C) = \rho_b \frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial(\theta C)}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x}(\theta D_{xx} \frac{\partial C}{\partial x} + \theta D_{xy} \frac{\partial C}{\partial y} - q_x C) - \frac{\partial}{\partial y}(\theta D_{yx} \frac{\partial C}{\partial x} + \theta D_{yy} \frac{\partial C}{\partial y} - q_y C) + \lambda(\theta C + \rho_b S) \quad (3)$$

式中 L 为在研究区内的微分算子; ρ_b 为基质骨架的体积密度, 即单位体积的孔隙介质中固体颗粒的质量; S 为单位质量固体颗粒吸附的溶质总量; D_{xx} , D_{xy} , D_{yx} , D_{yy} 为弥散系数张量; q_x , q_y 为 Dracy 速度; λ 为衰变常数, 其它符号意义同前。

当线性平衡等温吸附时, 吸附的溶质浓度和溶液中的溶质浓度 C 假设为线性关系

$$S = K_d C \quad (4)$$

这里, K_d 称为分布系数。

通常的模型均假定裂隙中的溶质扩散服从 Fick 扩散定律。然而, 当考虑裂隙的分形特性时, 溶质扩散不一定服从 Fick 扩散定律^[4]。室内试验从微观的角度探讨了裂隙-基质系统溶质运移机制。Neretnieks 等^[5] (1982 年)、W. R. Haldemman 等^[6] (1991 年)、李春江等^[7] (1999 年) 通过室内试验对单个裂隙中溶质运移模拟, 探讨了裂隙-基质系统中示踪剂或放射性元素的弥散、吸附以及放射性衰变等作用。这些试验的试件均在几厘米以内, 即尺度非常小, 试验成果仅能反应该尺度下溶质运移的特征。尽管现场试验存在所需费用较大、单一裂隙难以确定等困难, 但由于实际问题的需要, 还是有许多学者对现场试验进行了研究, 如 Kentner 等^[8] (1985 年)、Fogend 等^[9] (1993 年)、Novakowski 等^[10] (1994 年)、

对现场单裂隙中示踪剂运移特征进行了研究。目前最多的报道是数值模拟, 考虑溶质从裂隙向基质的扩散、裂隙表面的吸附作用、裂隙的开度、水流速度变化、弥散度变化、放射性衰变等影响因素, 许多学者作了大量的数值模拟工作^[12~15]。

4 裂隙岩体溶质运移数学模型

对岩体地下水溶质运移进行模拟, 需要根据研究的目的、研究的范围以及实际地质情况建立合适的数学模型, 用数学的方法描述溶质在岩体中的运移模型, 可归纳为等效连续介质模型、离散裂隙网络模型、双重结构模型、广义双重结构模型、随机模型、黑箱模型等。

4.1 等效连续介质模型

如果研究对象为一空间跨度很大、时间跨度很长的问题, 则可以用“超大尺度模型”(图 2(d)) 来描述。在这类模型中, 整个研究区域裂隙介质可以看作是一个假想的连续介质体, 在裂隙和基质有水量和溶质充分交换作用下, 系统中的每一个点的各物理量都处于局部平衡状态。它重点研究裂隙介质整体所表现出来的宏观溶质运移特征, 首先将裂隙中溶质浓度等效平均到整个裂隙介质中, 再将其视为具有对称张量的各项异性介质, 利用多孔介质中溶质运移理论来建立运移方程。这样的模型与一个规则多孔介质相类似, 其典型单元体的定义也与多孔介质典型单元体的定义相类似。

等效连续介质模型的优点是, 可以直接应用较成熟的孔隙介质溶质运移分析方法求解裂隙介质溶质运移问题, 其有较好的可操作性。然而, 这种模型实际上并非真正意义上的裂隙介质模型, 只是沿用多孔介质理论来解决裂隙介质中溶质运移问题。平均效应实际上是对裂隙介质空间结构和渗流特征、溶质运移特征的歪曲, 并不能刻画出裂隙水的不连续性、各项异性特征。这种连续介质模型对那些裂隙密集, 且分布均匀、裂隙方向杂乱无章的视为均质裂隙介质的溶质运移问题适用性较好, 但是这类介质在自然界中分布有限。

等效连续介质模型与孔隙介质不同的是, 裂隙介质存在强烈的非均质性和各向异性, 弥散系数张量为一个 4 秩对称张量 (81 个分量), 其中有 36 个非零的独立项, 在实际问题中很难确定。

将裂隙介质等效为连续介质是目前解决实际问题的主要途径。Josselin^[16] (1972 年)、Josselin 和 Way^[17] (1972 年) 以及 Way 和 McKee 等^[18] (1981 年) 提出了将裂隙介质等效为连续介质的各向异性

弥散理论, Schwartz (1988 年) 利用上述理论模拟了不同裂隙特征情况下等效为连续介质后溶质运移的变化规律^[19]。此后, 许多学者采用等效连续介质模型求解了各种实际问题。

4.2 离散裂隙网络模型

离散裂隙网络模型是以裂隙网络中的裂隙个体为研究对象, 认为基质岩块本身不透水, 整个地下水和溶质运移是通过裂隙网络来实现的, 建立裂隙个体中水流、溶质运移方程, 将所有方程组合在一起求解, 从而可确定裂隙网络中溶质运移的特征。

这类模型充分考虑了裂隙介质的非均匀性、各项异性、非连续性等特征, 能较好地刻画出裂隙中水流和溶质运移的特征, 当基质岩块很致密, 渗透性确实可以忽略时, 具有的拟真性好、精度高的优点。但在现有的技术条件下很难被应用于实际问题中。首先, 现有的技术条件很难查清众多裂隙的几何参数(裂隙产状、开度分布、间距、迹长等)和水力学参数; 其次, 裂隙数量非常多, 裂隙网络中交叉点非常多, 计算时需要为每一个交叉点建立质量平衡方程, 未知数相当多, 计算上无法实现; 此外, 完全忽视了基质的渗透性也与实际不相符。

这种模型尽管是真正意义上的裂隙模型, 但无太大的应用价值, 仅适用于体积有限、裂隙网络简单且清楚的裂隙介质溶质运移问题。Johan 等^[20](1984 年)、Y. W. Tsang 等^[21](1987 年)、Cacas 等^[22](1990 年)、Dershowitz 等^[23](1999 年)利用随机理论模拟了裂隙网络, 建立了网络裂隙模型, 对网络裂隙介质中的溶质运移进行了数值模拟。

4.3 双重连续介质模型

双重连续介质模型常用于解决大尺度问题。双重连续介质模型认为, 裂隙介质是由储水性差而导水性很强的裂隙系统和储水性好而导水性差的基质系统共同组成的统一体。模型忽略了单个裂隙的形状、规模和空间位置对溶质运移的影响, 认为含水层中孔隙和裂隙发育是均匀的, 裂隙的分布是随机的, 孔隙率和裂隙率在各自系统中各处大致相等。双重连续介质模型假设裂隙介质为两个重叠的连续系统, 裂隙网络系统和基质系统。基质系统和裂隙系统之间的渗透性差别很大, 二者具有相对独立的渗流特征。如果取一表征体元, 其孔隙(或微裂隙)率为 n_p , 裂隙率为 n_f , 则在研究区内任意一点存在 2 个水头和 2 个浓度值, 二者可以不同, 裂隙和基质之间的水量交换与它们之间的水头差成正比, 溶质交换量与二者之间的溶质浓度差成正比。根据实际问题的特点以及模拟时的要求, 可将双重连续介

质模型分为: 双孔隙度模型, 双重渗透模型。双重连续模型的概念最初由 Barenblatt 和 Zhelcor (1960 年) 等提出, 许多学者对其进行了不断的完善和改进^[24~26]。

双重连续介质模型能在一定程度上刻画出优先流的现象, 模型考虑了裂隙系统和基质系统的物质交换, 较符合实际, 但丝毫没有涉及介质中导水裂隙具体的空间展布, 并不能表现出裂隙介质的各项异性、不连续性等特征, 模型仍建立在多孔介质渗流理论的基础上。在具体应用时, 还必须对裂隙系统的具体配置和形状作一定的假设, 同时, 裂隙系统与基质系统在同一点有 2 个不同的物理量值, 既难理解又难确定; 此外, 裂隙网络不一定能等效为连续介质来研究, 因为其表征单元体不一定存在, 或虽然存在但太大难以准确确定; 双重连续介质模型中的溶质交换项很难确定, 交换系数的精度对模型有较大的影响, 使模型在实践中的应用受到很大的限制。

4.4 离散裂隙网络-连续介质耦合模型

该模型是双重连续介质模型的发展。广义双重连续介质模型从实际的角度出发, 将裂隙介质中的裂隙按渗流所起的作用划分为主干裂隙和次要裂隙。主干裂隙由规模较大、分布稀疏的大裂隙组成, 其渗透性强, 对裂隙水的渗流起主导作用, 是裂隙水流的主要通道; 次要裂隙主要是指规模较小、分布密集、渗透性较差的小裂隙, 它们分布密度大, 数量多, 张开度和导水性差, 有较大的储存空间, 主要起储水作用。对主干裂隙网络建立非连续介质模型, 对次要裂隙网络连同基质块体建立等效连续介质模型, 将二者有效耦合在一起就构成了离散裂隙网络-连续介质耦合模型。

这种模型吸收了双重连续介质模型的建模思想, 并将非连续介质模型和等效连续介质模型有机地结合在一起, 既能充分体现水及溶质在主干裂隙中所表现出来的非均质性、不连续性和各项异性等特征, 又能反映出小裂隙和基质中表现出来的连续介质的特性, 更符合一般地质条件下裂隙介质中溶质运移的特征。但是, 由于描述连续介质的水流、溶质运移方程与离散区域的方程不同, 给数学处理带来了不便。此外, 该模型也存在水量、溶质量交换系数难以确定的问题。

目前, 还没有采用严格意义上的离散裂隙网络-连续介质耦合模型来求解溶质运移问题的成果, 仅有 Tom^[27](1997 年)提出了裂隙网络分级模型, 来模拟裂隙介质中的溶质运移。

4.5 随机模型

在裂隙介质空间变异性的影响下,地下水运动也具有相应的不确定性和空间分布不规则的特性,用确定性的方法处理地下水问题具有较大的局限性。真正对地下水污染监测治理有实际意义的是大尺度范围的宏观水动力弥散特征,于是人们为了获得宏观范围内介质的非确定性特征,随机理论成为地下水溶质运移研究中的重要工具。大尺度范围内溶质运移理论研究的主要内容是:大尺度范围内影响溶质运移的主要因素;控制大尺度范围内污染物的平均浓度所遵循的基本方程及弥散系数的基本结构。由于不可能测得含水层每一点的介质特征和水动力特征,引入了含水层空间随机场的概念。Dagan^[28](1986年)、Gelhar等^[29](1983年)研究了大范围内溶质运移的随机理论,将溶质的浓度分布视为随机函数,推导出了大尺度范围内污染物的平均浓度所遵循的基本方程。Vomvoris和Gelhar^[30](1990年)、Kapoor和Galhar^[31](1994年)研究了浓度方差的分布特征和所遵循的基本方程。野外溶质运移试验表明,溶质运移的随机理论可以较好地描述区域尺度的溶质运移。

随机理论在地下污染物运移研究的成果改变了人们对物质在地下水中的运动的传统认识。由于其切合实际需要,因而发展迅速,成为近年来地下水运移模型研究中的热点问题。国外在裂隙介质溶质运移随机理论方面的研究进展较快,国内还处于起步阶段,但总体上看,仍然处于理论研究阶段。

4.6 黑箱模型

地下水溶质运移过程实质上是地下水-岩作用的过程。水-岩作用研究有2个分支:一支是侧重水动力学,研究地质环境中水动力场与水化学场、应力场相互作用的时空分布规律、类型、规模及其环境效应;另一支是侧重水化学,探讨地球中水的起源、水质时空分布规律及其影响因素、地球中水的地球化学演化,分析不同条件下水-岩作用的地球化学特征及其地质效应、环境效应。

用数学的方法描述物质在地下水中的迁移,可以归纳为两种模型,即分布式模型和“黑箱”模型(集中参数模型,有的称之为系统方法)。前面介绍的5种模型均属于分布式模型。分布式模型是与近代描述地下水运动的数学模型相对应的,而黑箱模型对于研究物质在很复杂的大尺度体系中运移问题是很适合的。分布式模型主要研究溶质在介质中的运移过程(包括对流、弥散、吸附、离子交换等物理化学作用),而黑箱模型则不需要知道溶质在介

质中运移的具体过程,只要知道这种过程的综合效应就可以来预测或反求输出或输入信息。

Fried于1975年将黑箱模型应用于水质评价,其数学表达式为

$$S(t) = Ae(t) \quad (5)$$

式中 $S(t)$ 为输出; A 为传递函数; $e(t)$ 为输入。

该模型并不涉及系统内部的状态和机制,而仅关心溶质的输出效应。它对于复杂大尺度系统中溶质运移有一定的应用价值。

在溶质运移的野外试验观测资料还不够丰富的情况下,黑箱模型是目前模拟大范围溶质运移规律的有效模型之一。目前国内外有不少学者采用黑箱模型,对污染物通过地下水系统总的变化值作了定量研究,并取得了较好的效果。

5 有待进一步研究的问题

随着科学技术发展,裂隙岩体地下水系统中溶质运移问题在越来越多的应用领域中受到了重视。但对其机理的认识还不够深入,离实际应用更是有-定的距离,特别在对核废料存放安全性进行预测及地下水污染的预测控制方面,是该研究领域中最具挑战性的课题之一。对裂隙岩体中溶质运移的研究,在许多方面还有待于进一步研究的问题:

(1) 目前的研究均假设裂隙岩体中水流满足Darcy定律,溶质的弥散符合Fick定律。笔者认为,对于裂隙中(特别是对放射性污染研究有重要意义的微裂隙中)水流及溶质运移的机理,有必要进一步进行概化模型试验,弄清单裂隙中溶质运移机理。

(2) 裂隙岩体的各向异性特征明显,溶质运移的弥散度是一个4阶张量,对于三维问题,包含81个分量。目前仅对多孔介质中的弥散度做了试验研究,对于裂隙岩体尚未有试验介绍。此外,各种模型中所要知道的参数(质量交换系数、放射性衰变系数、交换吸附系数等等)如何确定,也是有待于解决的问题。

(3) 由于裂隙岩体强烈的非均质性,导致溶质运移有明显的尺度效应。溶质运移主要是沿着裂隙网络进行,存在着多种水平的非均质尺度。各种不同尺度的模型中溶质运移参数的取值往往不同,如何将实验室测得的结果应用于大尺度的模型中,参数如何转化是人们一直努力解决的问题。

(4) 数值模拟过程中采用的弥散度参数与观测尺度、数值网格尺度以及要预测的尺度之间的相互关系很难确定。现在已经有学者开始对模拟网格

尺度与裂隙尺度之间的关系进行了探讨^[32, 33]。

(5) 人们已认识到裂隙面形态和裂隙中溶质运移具有一定的分形特征^[4, 34, 35], 但在已有的研究中, 用分形理论去分析建模还做的较少, 应进一步应用分形理论对裂隙岩体中的溶质运移进行研究。

(6) 以往的研究考虑较多的是示踪剂运移模型, 考虑浓度变化的强迫对流作用以及流体粘滞性变化等因素的模型还有待于人们进一步的研究。

(7) 裂隙岩体系统中溶质运移的预测需要对系统特征进行描述, 必须确保所有重要的特征和过程都被包括在模型中, 然而, 这并不是一件简单的事情, 目前还没有一种能完整地描述裂隙岩体中溶质运移特征的模型。

参考文献

- [1] Jansen D, Forkel C, Lagendijk V, Kongeter J. Evaluating the capability of scale dependent multi-continuum modeling in fractured permeable formations based on field, laboratory and numerical experiments[A]. **Computer Methods in Water Resources**[C]. Rotterdam: A. A. Balkema, 1999. 93—100.
- [2] Bear J, Berkowitz B. Groundwater flow and pollution in fractured rock aquifers[J]. **Developments in Hydraulic Engineering**, 1987, (4): 175—238.
- [3] G E Grisak, J F Pickens. Solute transport through fractured media: 1 The effect of matrix diffusion[J]. **Water Resources Research**, 1980, 16 (4): 719—730.
- [4] 辛厚文. 分形介质反应动力学[M]. 上海: 上海科技教育出版社, 1997: 36—39.
- [5] Neretnieks, I., T. Eriksen, P Tahtinen. Tracer movement in a single fissure in granitic rock: some experimental results and their interpretation[J]. **Water Resources Research**, 1982, 18 (4): 849—858.
- [6] W R Haldeman, Y Chuang, T C Rasmussen, D D Evans. Laboratory analysis of flow and solute transport through a fracture embedded in porous tuff[J]. **Water Resources Research**, 1991, 27 (1): 53—65.
- [7] 李春江, 郭志明, 林章基. 花岗岩体裂隙中核素 ^{125}I , $^{134}\text{Cs}^+$ 的弥散渗透试验[J]. 水文地质工程地质, 1999, 26 (6): 45—47.
LI Chun-jiang, GHO Zhi-ming, LIN Zhang-ji. Study on experiment of I^{125} and Cs^{134} dispersion and permeability in fractured granite[J]. **Hydrogeology and Engineering Geology**, 1999, 26 (6): 45—47.
- [8] Kentner S. Novakowski, Gordon V. Evans, David A. Lever, and Kenneth G. Raven. A field example of measuring hydrodynamic dispersion in a single fracture [J]. **Water Resources Research**, 1985, 21 (8): 1 165—1 174.
- [9] Lars Birgersson, Luis Moreno, and Ivars Neretnieks. A tracer migration experiment in a small fracture zone in granite[J]. **Water Resources Research**, 1993, 29 (12): 3 867—3 878.
- [10] K S Novakowski, P A Lapcevic. Field measurement of radial solute transport in fractured rock[J]. **Water Resources Research**, 1994, 30 (1): 37—44.
- [11] Roy C. Sidle, Bertel Nilsson, Martin Hansen, Johnny Fredericia. Spatially varying hydraulic and solute transport characteristics of a fractured till determined by field tracer tests, funen, denmark[J]. **Water Resources Research**, 1998, 34 (10): 2 515—2 527.
- [12] G E Grisak, J F Pickens. Solute transport through fractured media: 2. Column of fractured till[J]. **Water Resources Research**, 1980, 16 (4): 731—739.
- [13] Jahan Noorishad, Mohsen Mehran. An upstream finite element method for solution of transient transport equation in fractured porous media[J]. **Water Resources Research**, 1982, 18 (3): 588—596.
- [14] E A Sudicky, E O Frind. Contaminant transport in fractured porous media: analytical solutions for a system of parallel fractures[J]. **Water Resources Research**, 1982, 18 (6): 1 634—1 642.
- [15] Christopher A. Kennedy, William C Lennox. A control volume of solute transport in a single fracture[J]. **Water Resources Research**, 1995, 31 (2): 313—322.
- [16] De Josselin de Jong G. Dispersion of a point injection in an anisotropic porous medium[R]. [s.l.]: [s.n.], 1972.
- [17] De Josselin de Jong G, S C Way. Dispersion in fissured rock[R]. [s.l.]: [s.n.], 1972.
- [18] S C Way, C R Mckee. Restoration of in-situ coal gasification sites from naturally occurring flow and dispersion[J]. **In Situation**, 1981, 5 (2): 77—101.
- [19] R C Schwartz, A S R Juo, K J McInnes. Estimating parameters for a dual-porosity model to describe non-equilibrium, reactive transport in a fine-textured soil[J]. **Journal of Hydrology**, 2000, 229 (3): 149—167.
- [20] Johan Andersson, Allen M. Shapiro, Jacob Bear. A stochastic model of a fractured rock conditioned by measured information[J]. **Water Resources Research**, 1984, 20 (1): 79—88.
- [21] Y W Tsang, C F Tsang. Channel model of flow through fractured media[J]. **Water Resources Research**, 1984, 23(1): 79—88.
- [22] M C Cacas, E Ledoux, G de Marsily, B Tillie. Modeling fracture flow with a stochastic discrete fracture network:

- calibration and validation 2. The transport model[J]. **Water Resources Research**, 1990, 26 (3): 491—500.
- [23] W S Dershowitz, C Fidelibus. Derivation of equivalent pipe network analogues for three-dimensional discrete fracture networks by the boundary element method[J]. **Water Resources Research**, 1999, 35 (9): 2 685—2 691.
- [24] R C Dykeuizen. A new coupling term for dual-porosity models[J]. **Water Resources Research**. 1990, 26 (2): 351—356.
- [25] H H Gerke, M T Van Genuchten. Evaluation of first-order water transfer term for variably saturated dual-porosity flow models[J]. **Water Resources Research**, 1993, 29 (4): 1 225—1 238.
- [26] Robert W Zimerman, Gang Chen, Teklu Hadgu, Gudmundur S Bodvarsson. A numerical dual-porosity model with semianalytical treatment of fracture/matrix flow[J]. **Water Resources Research**, 1993, 29 (7): 2 127—2 137.
- [27] Tom Clemo, Leslie Smith. A hierarchical model for solute transport in fractured media[J]. **Water Resources Research**, 1997, 33 (8): 1763—1783.
- [28] Dagan G. Statistical theory of groundwater flow and transport: pore to laboratory to formation and formation to regional scale[J]. **Water Resources Research**, 1986, 22 (9): 120—134.
- [29] Gelhar L W, C L Axness. Three-dimensional stochastic analysis of macrodispersion in aquifer[J]. **Water Resources Research**, 1983, 19 (1): 161—180.
- [30] Vomvoris E G, L W Gelhar. Stochastic analysis of the concentration variability in a three dimensional heterogeneous aquifer[J]. **Water Resources Research**, 1990, 26 (10): 2 591—2 602.
- [31] V Kapoor, L W Gelhar. Transport in three-dimensional heterogeneous aquifer, 1. Dynamics of concentration fluctuations[J]. **Water Resources Research**, 1994, 30 (6): 1 775—1 788.
- [32] S H Lee, M F Loudh, C L Jensen. Hierarchical modeling of flow in naturally fractured formations with multiple length scales[J]. **Water Resources Research**. 2001, 37 (3): 443—455.
- [33] 王锦国, 周志芳. 裂隙岩体地下水溶质运移的尺度问题[J]. 水科学进展, 2002, 12(2): 239—245.
WANG Jin-guo, ZHOU Zhi-fang. Scale problem on groundwater solute transport in fractured rock[J]. **Advances in Water Science**, 2002, 12(2): 239—245.
- [34] 王锦国, 周志芳. 基于分形理论的裂隙岩体地下水溶质运移模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(8): 1 358—1 362.
WANG Jin-guo, ZHOU Zhi-fang. Simulation solute transport fractured rocks based on fractal theory[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**. 2004, 23(8): 1 358—1 362.
- [35] 周志芳, 王锦国. 裂隙介质水动力学[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2004. 170—182.

新书介绍

岩体结构面抗剪强度经验估算

该书由杜时贵著。建筑科学类。16开 301千字 188页,平装估价:36.00元,2005年1月出版,ISBN7-5028-2599-1。

该书系统介绍了岩体结构面抗剪强度经验估算的理论、机理、方法和工程应用,内容主要包括结构面表面形态基本特征、粗糙度系数的定向统计测量、智能 JRC 测量仪及其使用, JRC-JCS 模型的磨擦学机理、经验估算方法的试验对比研究、经验估算方法的工程应用等。全书以结构面粗糙度系数定向统计测量为基础,通过经验估算方法的力学机理探讨,试验对比分析和工程应用研究,完善了经验估算方法,使经验估算方法实用化,为岩体结构面抗剪强度参数的获取提供了一种简便经济、实用的方法。

可供水利、交通、采矿及相关专业设计、施工监理技术人员,相关专业本科生,研究生参考。