

裂隙岩体非饱和渗流研究综述

胡云进, 速宝玉, 詹美礼

(河海大学水利水电工程学院, 江苏南京 210098)

摘要 综述了国内外裂隙岩体(主要是细、微裂隙岩体)非饱和渗流的研究情况. 首先, 评述了现有的测定和确定单裂隙非饱和水力参数的几种方法的优缺点, 为单裂隙非饱和水力参数的确定提供了理论依据. 其次, 分析了目前用于求解裂隙岩体非饱和渗流的四种数学模型的优缺点, 为选取合理的数学模型用于求解具体的裂隙岩体非饱和渗流问题提供了参考依据. 最后, 在上述基础上提出了一些需要进一步研究的问题.

关键词 裂隙岩体; 非饱和渗流; 非饱和水力参数; 数学模型

中图分类号 :TV139.1 **文献标识码** :A **文章编号** :1000-1980(2000)01-0040-07

由于构造、风化、卸荷等作用, 天然岩体中存在着大量的裂隙. 裂隙岩体中地下水位以上部分是未被水充满的非饱和带, 降雨入渗和地面水体的下渗都是通过该带到达稳定地下水面的非饱和渗流过程. 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. 以往, 由于裂隙岩体非饱和渗流的复杂性, 在许多工程问题中都作了简化处理^[1]. 近十多年来, 随着西方工业发达国家核电等核工业的不断发展, 大量核废料亟待深埋处理(一般埋在裂隙岩体深厚的非饱和带中), 故评价核废料深埋对地下水环境的污染以及处理核废料的选址等都要求对裂隙岩体非饱和渗流作深入细致的研究^[2,3,4]. 另外, 研究降雨入渗对地面污染物的淋滤^[5], 石油二次开采^[6]和地热能开发^[7]等也涉及裂隙岩体非饱和渗流或两(多)相流问题. 在国内, 近年来随着孔隙介质非饱和渗流和裂隙岩体饱和渗流理论的发展, 已越来越清楚地认识到雨季的岩坡滑坡、地下洞室巷道的塌方以及泄洪雾化雨导致岩质边坡的失稳等均与裂隙岩体非饱和渗流密切相关^[1](即降雨入渗等会导致地下水位以上非饱和区孔隙水压力的升高, 产生暂态的附加水荷载, 同时降低岩体的力学强度指标).

由于上述工程应用领域的需要, 国外已有不少学者相继从 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. 近年来, 国内也有学者开始了这方面的研究工作. 目前的工作主要有 (a)对单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水力参数(即毛细压力-饱和度和相对渗透率(非饱和渗透率与饱和渗透率的比值)-饱和度(或毛细压力)的函数关系)的测定和确定方面; (b)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.

1 单一裂隙非饱和渗流研究

在裂隙岩体非饱和渗流研究中, 最关键的是单裂隙毛细压力-饱和度和相对渗透率-饱和度(或毛细压力)关系的建立. 目前, 建立上述关系主要有以下三种方法: (a)物理模拟法, 即直接通过单裂隙拟稳态驱替试验和非饱和渗流试验(准确地说是二相流试验), 借用孔隙介质拟合模型拟合出经验关系式; (b)数值模拟法, 即通过建立单裂隙概化模型, 利用数值模拟法和孔隙介质拟合模型拟合出经验关系式; (c)数学推导法, 即在某些假设简化的前提下, 根据裂隙开度分布推导出上述关系式.

1.1 物理模拟法

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^[8,9]. 天然裂隙可概化为

收稿日期: 1999-06-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(59879004); 高等学校博士点学科专项基金资助项目(98029408); 水利部水利技术开发基金资助项目(97472603).

作者简介: 胡云进(1974—)男, 浙江东阳人, 博士研究生, 水力学及河流动力学专业, 主要从事裂隙岩体非饱和渗流研究.

二维非均质的孔隙介质^[10],而且两粗糙裂隙面的间隙形成的开度分布与孔隙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^[6,11].基于上述发现,不少学者认为,通过拟稳态驱替试验并借用孔隙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,可得出经验关系式.

Reitsma 和 Kueper^[6]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.拟合试验数据采用下述孔隙介质水分特征曲线的拟合模型.

Brooks-Corey 模型^[12]:

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

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

$$S_e = \frac{S_w - S_r}{1 - S_r} \tag{2}$$

式中: S_w ——相应于毛细压力 P_c 的水相饱和度; S_r ——束缚水饱和度.模型中 P_c 、 λ 和 S_r 为拟合参数.

van Genuchten 模型^[13]:

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

式中 P_c 、 S_e 意义同式(1); m 、 n 间关系采用 $n = (1 - m)^{-1}$; m 与裂隙开度分布有关; P_o 与进气值有关,但其值稍高于进气值.其中 P_o 、 m 、 S_e 为拟合参数.

Reitsma 和 Kueper 先根据驱替出的总水量估计出裂隙总体积,以求出每个毛细压力下的水相饱和度,再借用拟合模型(1)和(3),用非线性最小二乘法拟合出单裂隙毛细压力-饱和度关系式.

叶自桐等^[11]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 的.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.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,也会有一定的误差^[14].

为建立相对渗透率-饱和度关系,Romn^[15]用表面混合湿润的平行平板缝隙做了水和煤油的二相流试验.结果表明,两者的相对渗透率均等于其饱和度.由于天然裂隙是变开度的,把裂隙概化为平行平板缝隙是不能反映实际情况的.

另外,Persoff 和 Pruess^[16]通过天然凝灰岩裂隙的水气二相流试验和孔隙介质的拟合模型得出了相对渗透率-饱和度的经验关系式.他们所采用的拟合模型为 Corey 模型^[17],其表达式如下:

$$K_{rw} = (S_e)^4 \tag{4}$$

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

$$S_e = \frac{S_w - S_{wr}}{1 - S_{wr} - S_{gr}} \tag{5}$$

式中: S_w ——相应于 K_{rw} 的水相饱和度; S_{wr} ——束缚水饱和度; S_{gr} ——残余气饱和度.

由于非饱和渗流假设空气不流动,即气相压力维持恒定,故不同于上述水气二相流.因此通过二相流试验所建立的单裂隙相对渗透率-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非饱和渗流的相对渗透率-饱和度(或毛细压力)的关系.

1.2 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,利用数值模拟法和孔隙介质拟合模型得出单裂隙毛细压力-饱和度和相对渗透率-饱和度(或毛细压力)的经验关系式.

Pruess 和 Tsang^[10]根据裂隙开度分布和假设的开度空间相关长度用 COVAR 法^[18]生成裂隙随机样本,再概化为许多等面积(在平面上划分成等面积小矩形网格)不等开度的小平行板组合体,或者直接把实际的天然裂隙离散成许多等面积不等开度的小平行板组合体.基于毛细吸持理论的 Laplace 方程(见式(6))和毛细

压力 P_c 下开度小于 b_s 的小平行板内均充满水的假设,给定多个毛细压力值,通过计算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.

$$b_s = \frac{2\sigma \cos \theta}{P_c} \quad (6)$$

式中: P_c ——毛细压力; b_s ——对应于 P_c 的临界开度,即开始排水的最小开度; σ ——水气表面张力; θ ——弯液面与裂隙壁的接触角.

另外,他们在裂隙一对边上给定适当的毛细压力值,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^[19]和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)下的相对渗透率.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率和毛细压力的关系数据点.

然而,他们没有拟合出单裂隙毛细压力-饱和度和相对渗透率-毛细压力的关系式.

Kwicklis 和 Healy^[20]对上述 Pruess 和 Tsang 的概化模型作了改进(离散方法相同,附加了一条驱替准则),即某小平行板驱替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,确实是 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(即式(3))拟合出了单裂隙毛细压力-饱和度的经验关系式.

另外,同 Pruess 和 Tsang,他们用 VSFRAC 数值模拟法^[21]和达西定律求得一系列相对渗透率-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率-饱和度的关系数据点后,拟合出了相对渗透率-饱和度关系式.拟合表达式如下:

$$K_r = S_e^{0.5} [1 - (1 - S_e^{1/m})^m]^2 \quad (7)$$

式中: K_r ——相对渗透率; S_e, m 的意义同式(3).

上述两个数值试验法中均假设小平行板内立方定理成立,这有待于试验证实,因为立方定理是针对无限大平行光滑平板推导出来的.此外,把天然裂隙概化成等面积不等开度的小平行板组合体也不一定合适^[22].鉴于以上两点,还应通过物模试验的结果来修正.

1.3 数学推导法

在缺少试验资料时,可对单裂隙非饱和渗流作某些假设和简化,根据裂隙开度分布,通过数学推导给出单裂隙毛细压力-饱和度和相对渗透率-毛细压力(或饱和度)的关系式.

Wang 和 Narasimhan^[4]在推导上述两个关系式时假设(a)裂隙中所有流动沟槽均互相平行,且水流方向也平行于流动沟槽;(b)裂隙壁面接触点引起水流的弯曲远小于气泡(非饱和渗流时气相占据的空间)引起的水流弯曲,故仅引进气泡阻碍因子 τ 来修正非饱和渗流时水流的迂曲.基于上述两条假设推导出的单裂隙相对渗透率为

$$K_r = \tau \frac{b_s^3}{b_1^3} \quad (8)$$

$$\text{其中} \quad b_1^3 = \int_0^{b_{\max}} b^3 f(b) db \quad b_s^3 = \int_0^{b_s} b^3 f(b) db$$

式中: $b_{\max}$ ——裂隙的最大开度; $f(b)$ ——裂隙开度分布函数; τ ——气泡阻碍因子; b_s 意义同式(6).

根据毛细吸持理论,单裂隙饱和度可表示为

$$S = b_s / b_1 \quad (9)$$

$$\text{其中} \quad b_s = \int_0^{b_s} b f(b) db \quad b_1 = \int_0^{b_{\max}} b f(b) db$$

式中 $b_s, b_{\max}$ 和 $f(b)$ 的意义同式(8).

根据式(8)(9)(6)及开度分布函数 $f(b)$,即可建立毛细压力-饱和度和相对渗透率-毛细压力的关系式.

周创兵等^[23]根据某种假设的入侵概念模型推导出的饱和度表达式为

$$S = 1 - \frac{b}{b_s} \xi \quad (10)$$

其中
$$\xi = \int_{b_s}^{b_{\max}} f(b) db \qquad b_s = \int_{b_s}^{b_{\max}} b f(b) db \qquad b = \int_0^{b_{\max}} b f(b) db$$

式中 $f(b)$, b_s 和 $b_{\max}$ 的意义同式 (8).

根据式 (10) 推求的相对渗透率为

$$K_r = \left[1 - \frac{b}{b_s} (1 - S) \right]^3 \tag{11}$$

式中 b_s , b 和 S 的意义同式 (10).

根据式 (10) (11) (6) 及开度分布函数 $f(b)$, 即可建立毛细压力-饱和度和相对渗透率-毛细压力的关系式.

只要测量准确, 用物模试验法所建立的毛细压力-饱和度和相对渗透率-饱和度(或毛细压力)关系应比另外两种方法建立的更符合实际. 数值试验法和数学推导法的优点在于方便快捷, 不像物模试验法那样费时费钱. 尤其是数值试验法, 若模型概化得合理, 所建立的毛细压力-饱和度和相对渗透率-饱和度(或毛细压力)关系能较好地符合实际. 在缺少试验资料而又已知裂隙开度分布且精度要求不太高的场合, 数学推导法不失为一种快捷、方便的方法. 但是, 物模试验法在研究裂隙非饱和渗流特性和机理方面具有不可替代的地位. 另外, 在精度要求高的情况下, 数值试验法和数学推导法的结果需通过物模试验的结果来修正. 此外, 物模试验法和数值试验法采用孔隙介质的拟合模型, 还有待于物模试验证实.

除上述三种确定非饱和和水力参数的方法外, Pruess 等^[24]和 Bodvarsson 等^[25]还根据地热井的现场观测资料分析得出了水-水蒸气二相流的相对渗透率-饱和度关系, 结果与 Romm 的类似. 但是由于水和水蒸气是同一种物质, 故水-水蒸气二相流有别于非饱和渗流^[10]. 而且由于在现场很难同时测得流速、压降和饱和度, 故用现场测试法测定相对渗透率-饱和度关系不易行得通.

以上对单裂隙非饱和渗流的试验和理论研究均集中在非饱和和水力参数的测定和确定方面. 此外, Fourar 等^[26]用光滑的和人工粗糙的平行玻璃平板做了水-气二相流试验, 初探了裂隙二相流的渗透特性和机理, 发现相对渗透率不仅是饱和度的函数, 而且还和流速有关. 另外, 从观察到的流动状态来看也更接近于二相管流, 而不是二相达西流, 即惯性力起控制作用, 流动不符合达西定律. 由于他们采用的水、气流速均远大于实际情况, 再加上人工粗糙缝隙的开度变化要比天然裂隙的开度变化剧烈, 而这两个因素均夸大了惯性力的作用, 故用上述试验结果解释天然裂隙的非饱和渗流特性是值得怀疑的.

2 裂隙岩体非饱和渗流的数学模型研究

用数值法求解裂隙岩体非饱和渗流场需建立合适的数学模型. 目前已有的数学模型可划分为以下四种: (a) 等效连续介质模型 (b) 离散裂隙网络模型 (c) 双重介质模型 (d) 离散介质-连续介质耦合模型.

2.1 等效连续介质模型

等效连续介质模型就是根据流量相等原则把岩块-裂隙系统等效成连续介质, 并用理查德方程^[27]或其推广式^[3]描述非饱和渗流. 方程中出现的非饱和水力参数通过取一表征体元根据其内裂隙和岩块的相应参数及体积比重来推求^[3], 进而用传统的孔隙介质非饱和渗流分析方法来求解渗流场.

应用等效连续介质模型求解裂隙岩体非饱和渗流场的主要代表有: Dykhuizer^[27]; Peters 和 Klavetter^[3]; 以及 Pruess, Narasimhan 和 Tsang^[7]等.

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非饱和渗流分析方法来求解裂隙岩体非饱和渗流问题, 故其可操作性好. 不足之处主要有四点: (a) 把裂隙网络等效为连续介质, 不能很好地刻画出裂隙的特殊导水作用, 故其拟真性不好; (b) 该模型的适用范围很受限制, 因为不是所有的裂隙岩体均可等效为连续介质; (c) 表征体元的大小和等效的非饱和水力参数很难准确确定; (d) 对裂隙岩体非饱和渗流, 最重要的是, 当毛细压力变化时其等效渗透张量的渗透主轴会变化, 故用等效连续介质模型处理存在误差.

2.2 离散裂隙网络模型

离散裂隙网络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来反映的. 其基本思路是: 假定达西定律适用于单裂隙的非饱和渗流, 由达西定律和水流连续原理推导出裂隙非饱和渗流的控制方程, 再把裂隙网络离散成许多单元(三维裂隙网络用面元, 二维裂隙网络用线元), 根据确定的单裂隙非饱和水力参

数,用伽辽金有限元法或积分有限差分法求解以单元结点水头为未知数的控制方程,得出渗流场。

应用离散裂隙网络模型求解裂隙岩体非饱和渗流场的主要代表有张有天和刘中^[1],以及 Kwicklis 和 Healy^[20]等。

离散裂隙网络模型能较好地描述裂隙岩体的非均质各向异性,故当岩块很致密,确实可忽略其渗透性时,具有拟真性好、精度高的优点。

但该模型需要明确研究域中全部有效裂隙的几何参数(裂隙的产状、开度分布、间距和迹长等),这在实际工程中是较难办到的,一般情况下只能抓住主要和次主要的裂隙,否则不但使现场勘测工作量大,而且会使模型过大而难以实现。虽然裂隙网络模拟生成技术在解决这一难题上取得了重大进展^[28-29],但目前还有许多问题有待解决^[30]。综上可知,该模型可操作性较差。另外,对非饱和渗流,岩块的非饱和渗透系数与裂隙的非饱和渗透系数相比一般不可忽略^[4,31],否则会导致该模型的拟真性降低。

2.3 双重介质模型

双重介质模型是一种双连续介质模型,其认为岩块孔隙系统和裂隙系统连续充满整个研究域,即把裂隙岩体看作是具有不同水力参数的两种连续介质的叠加体。这两种连续介质中的非饱和渗流均采用理查德方程来描述,并依据两种介质间的水交换项来联立求解各自的渗流场,最后取两种介质中的水头平均值作为最终渗流场的水头值。

应用双重介质模型求解岩体非饱和渗流场的主要代表有:Gerke 和 van Genuchten^[21],以及 Zimmerman, Hadgu 和 Bodvarsson^[32]等。

双重介质模型能在一定程度上刻画出优先流现象^[21],并且考虑了岩块、裂隙间客观存在的水交换,故具有较好的拟真性。把裂隙网络等效为连续介质来研究,故其可操作性也较好。

但是,裂隙网络不一定能等效为连续介质,因为其表征体元不一定存在,或虽存在但太大,故该模型的适用范围较受限制。同时,双重介质模型中水交换项较难准确确定,而水交换项的精度又影响着该模型的拟真性。此外,由于研究域是两种连续介质的叠加体,其内每一点处有两个水头值,取平均值作为最终渗流场中的水头值,也有待于进一步探讨。

2.4 离散介质-连续介质耦合模型

岩体中的裂隙可根据其迹长和开度大小划分为主干裂隙和次要裂隙。离散介质-连续介质耦合模型的基本思路是:用离散裂隙网络模型描述主干裂隙中的水运动;用等效连续介质模型描述次要裂隙和孔隙中的水运动;由次要裂隙和孔隙等效成的连续介质充满整个研究域;离散的主干裂隙按产状分布于连续介质之中。该模型的耦合条件是:裂隙水头作为连续介质域的水头边界,离散介质域与连续介质域间的水交换量作为离散介质域的流量边界。

从所检索的大量文献来看,还未发现用严格符合上述意义的耦合模型来求解裂隙岩体非饱和渗流场的例子。仅有的类似于上述耦合模型的两个模型均未把次要裂隙等效为连续介质来处理^[31,33],故只能用于求解裂隙少且分布很理想化的情形(如裂隙等间距平行分布^[33])。

离散介质-连续介质耦合模型综合了等效连续介质模型在刻画次要裂隙和孔隙中水运动的优点和离散裂隙网络模型在刻画主干裂隙中水运动的优点,既能反映裂隙特殊的导水作用,又能体现岩块的贮水作用。由于众多的次要裂隙能等效为连续介质来处理,而主干裂隙又较少,故该耦合模型很好地解决了精度与可操作性之间的矛盾。由于用离散裂隙网络模型来描述主干裂隙系统,而主干裂隙是导致裂隙岩体表征体元过大或不存在的重要因素,故能解决双重介质模型用连续介质概化裂隙系统所存在的问题。

但是,由于描述连续介质域水运动与描述离散介质域水运动方程的不同,给数学处理带来了不便。另外,离散介质-连续介质耦合模型同样存在着水交换量难以准确地确定的问题。

3 结论及需要进一步研究的问题

裂隙岩体非饱和渗流的研究是近十多年来开展起来的,目前已引起国内外越来越多学者的关注,但仍处于其发展的初期阶段,对其机理的认识还不够深入,离实际应用更是还有一定的距离。通过对现有试验和理论成果的分析,笔者认为尚需在以下几个方面作进一步的研究。

a. 从检索的文献看,目前对单裂隙非饱和渗流的试验和理论研究主要集中在非饱和水力参数的测定和

确定方面,对机理和渗流特性的研究太少,故有必要进一步进行概化模型试验,搞清单裂隙非饱和渗流机理,以指导非饱和水力参数的确定。

b. 由于裂隙空间与孔隙介质的孔隙空间之间存在差异,故能否采用孔隙介质的拟合模型来建立单裂隙毛细压力-饱和度和相对渗透率-饱和度(或毛细压力)关系还有待于更多的试验来证实,尤其是相对渗透率-饱和度(或毛细压力)关系的建立,有待于通过大量天然裂隙非饱和渗流试验和理论分析概括出切实符合裂隙非饱和渗流特性的拟合模型。

c. 尽管人们已认识到裂隙面形态和裂隙赋存规律均具有一定的分形特征^[34,35],但在已有的研究中,用分形几何等非线性数学理论去分析归纳建模做得太少,故将分形理论应用于裂隙岩体非饱和渗流研究有待于进一步加强。

d. 目前一般根据裂隙岩体表征体元是否比研究域小来判断裂隙岩体能否等效为连续介质来处理,但确定裂隙岩体表征体元大小的通用方法过于复杂,故需提出一种简便准确确定表征体元大小的方法,为数学模型的合理选取提供依据。

e. 较符合实际的双重介质模型和离散介质-连续介质耦合模型的拟真性在一定程度上取决于水交换项公式的准确性,而现有的水交换项公式虽形式简单,但精度不是很高,特别是文献[2]中的水交换项公式^[32]更是如此,故如何建立一个简单而又精确的水交换项公式,有待于进一步研究。

f. 把裂隙岩体(或裂隙网络)等效为连续介质来处理,需确定等效的非饱和水力参数,而目前确定等效的非饱和水力参数的体积平均法和微观法均有待于进一步探讨。

参考文献:

- [1] 张有天,刘中.降雨过程裂隙网络饱和/非饱和、非恒定渗流分析[J].岩石力学与工程学报,1997,16(2):103~111.
- [2] Gerke H H, van Genuchten M T. A dual-porosity model for simulating the preferential movement of water and solute in structured porous media[J]. Water Resour Res, 1993, 29(2): 305~319.
- [3] Peters R R, Klavetter E A. A continuum model for water movement in an unsaturated fractured rock mass[J]. Water Resour Res, 1988, 23(3): 416~430.
- [4] Wang J S Y, Narasimhan T N. Hydrologic mechanisms governing flow in a partially saturated fractured porous medium[J]. Water Resour Res, 1985, 21(12): 1861~1874.
- [5] Kueper B H, Haase C S, King H. Leakage of DNAPL from waste impoundments constructed in fractured rock and clay: Theory and case history[J]. Can Geotech J, 1992, 29: 234~244.
- [6] Reitsma S, Kueper B H. Laboratory measurement of capillary pressure-saturation relationships in a rock fracture[J]. Water Resour Res, 1994, 30(4): 865~878.
- [7] Pruess K, Narasimhan J S Y, Tsang Y W. On thermohydrologic conditions near high-level nuclear wastes emplaced in partially saturated fractured tuff 2. Effective continuum approximation[J]. Water Resour Res, 1990, 26(6): 1249~1261.
- [8] Gentier S, Billau D, van Vliet L. Laboratory testing of the voids of a fracture[J]. Int J Rock Mech Rock Eng, 1989, 22: 149~157.
- [9] Shapiro A M, Nicholas J R. Assessing the validity of the channel model of fracture aperture under field conditions[J]. Water Resour Res, 1989, 25(5): 817~825.
- [10] Pruess K, Tsang Y W. On two-phase relative permeability and capillary pressure of rough-walled rock fractures[J]. Water Resour Res, 1990, 26(9): 1915~1926.
- [11] 叶自桐,韩冰,杨金忠等.岩石裂隙毛管压力-饱和度关系曲线的试验研究[J].水科学进展,1998,9(2):112~117.
- [12] Brooks R H, Corey A T. Hydraulic properties of porous media[M]. Font Collins: Hydrol Pap 3, Colo State Univ, 1964. 71~109.
- [13] van Genuchten M T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soil[J]. Soil Sci Soc Am J, 1980, 44: 892~899.
- [14] 郭东屏,张石峰.渗流理论基础[M].西安:陕西科学技术出版社,1994. 237~283.
- [15] Romm E S. Fluid flow in fractured rock (in Russian) [M]. Moscow: Nedra Publishing House, 1966. 67~95.
- [16] Persoff P, Pruess K. Two-phase flow visualization and relative permeability measurement in natural rough-walled rock fractures[J]. Water Resour Res, 1995, 31(5): 1175~1186.
- [17] Corey A T. The interrelationship between gas and oil relative permeabilities[J]. Prod Mon, 1954, 19: 38~41.
- [18] Williams S A, El-Kadi A I. COVAR: A computer program for generating two-dimensional fields of autocorrelated parameters by matrix

- decomposition[A]. In : Int Groundwater Model Cent Holomb Res Inst. Rep IGWMCFOS29[C]. Golden : Colo Sch of Mines ,1986. 23 ~ 87.
- [19] Pruess K. Development of the general purpose simulator MULKOM[A]. In : Earth Sci Div ,Annual Report 1982 Rep LBL-15500[C]. Berkeley Calif : Lawrence Berkeley Lab ,1983. 1 ~ 63.
- [20] Kwicklis E M ,Healy R W. Numerical investigation of steady liquid water flow in a variably saturated fracture network[J]. Water Resour Res ,1993 29(12) :4091 ~ 4102.
- [21] Healy R W ,Kwicklis E M. Modeling of flow and solute transport through a variable aperture partially saturated fracture abstract[J]. U S Geol Surv ,1991 :91 ~ 125.
- [22] Glass R J ,Nicholl M J ,Yarrington L. A modified invasion percolation model for low-capillary number immiscible displacement in horizontal rough-walled fractures :influence of local in-plane curvature[J]. Water Resour Res ,1998 34(12) :3215 ~ 3234.
- [23] 周创兵 ,叶自桐 ,熊文林. 岩石节理非饱和渗流特性研究[J]. 水利学报 ,1998 (3) :22 ~ 25.
- [24] Pruess K ,Bodvarsson G S ,Stefansson V ,et al. The Krafla geothermal field ,Iceland 4 ,History match and prediction of individual well performance[J]. Water Resour Res ,1984 20(11) :1561 ~ 1584.
- [25] Bodvarsson G S ,Pruess K ,Stefansson V ,et al. East Olkaiia Geothermal field ,Kenya ,1 ,History match with production and pressure decline data[J]. J Geophys Res ,1987 92(B1) :521 ~ 539.
- [26] Fourar M ,Bories S ,Lenormand R ,et al. Two-phase flow in smooth and rough fractures :measurement and correlation by porous-medium and pipe flow model[J]. Water Resour Res ,1993 29(11) :3699 ~ 3708.
- [27] Dykhuizen R C. Transport of solutes through unsaturated fractured media[J]. Water Res ,1987 21(12) :1531 ~ 1539.
- [28] Dershowitz W S ,Gordon M ,Kafritsas J C ,et al. A new three dimensional model for flow in fractured rock[J]. Int Assoc Hydrogeol ,1985 , 17 :441 ~ 448.
- [29] 万力 ,李定方 ,李吉庆. 三维裂隙网络的多边形单元渗流模型[J]. 水利水运科学研究 ,1993 (4) :347 ~ 353.
- [30] 王恩志 ,王洪涛 ,孙役. 三维裂隙网络渗流数值模型研究[J]. 工程力学 ,1997(增 2) :520 ~ 525.
- [31] Salam A A ,Chrysikopoulos C V. Unsaturated flow in a quasi-three-dimensional fractured medium with spatially variable aperture[J]. Water Resour Res ,1996 32(6) :1531 ~ 1540.
- [32] Zimmerman R W ,Hadgu T ,Bodvarsson G S. A new lumped-parameter model for flow in unsaturated dual-porosity media[J]. Advances in Water Resources ,1996 19(5) :317 ~ 327.
- [33] Nitao J J ,Buscheck T A. Infiltration of a liquid front in an unsaturated fractured porous medium[J]. Water Resour Res ,1991 27(8) :2099 ~ 2112.
- [34] 周创兵 ,熊文林. 不连续面的分形维数及其在渗流分析中的应用[J]. 水文地质工程地质 ,1996 23(6) :1 ~ 5.
- [35] Acuna J A ,Yortsos Y C. Application of fractal geometry to the study of networks of fractures and their pressure transien[J]. Water Resour Res ,1995 31(3) :527 ~ 540.

Review of the Research on Unsaturated Seepage Flow in Fractured Rock Masses

HU Yun-jin , SU Bao-yu , ZHAN Mei-li

(College of Water Conservancy and Hydropower Engineering , Hohai Univ. , Nanjing 210098 , China)

Abstract: In this paper ,the research of unsaturated seepage flow in fractured rock masses at home and abroad is systematically reviewed(here ,the fracture mainly means fine or tiny fracture). Firstly ,the advantages and disadvantages of present measurement and determination methods of unsaturated hydraulic parameters for a single fracture are commented upon. These comments provide a theoretical basis for the determination of unsaturated hydraulic parameters for a single fracture. Secondly ,the advantages and disadvantages of four mathematical models currently used to solve unsaturated seepage flow in fractured rock masses are analyzed and their application in engineering is also introduced. These analyses provide reference for the selection of proper mathematical models used to solve specific unsaturated seepage flow in fractured rock masses. Finally ,some problems are put forward which need to be further researched.

Key words fractured rock mass ,unsaturated seepage flow ,unsaturated hydraulic parameter ,mathematical model