

一种基于逾渗模型的裂隙岩石渗透系数确定方法

鲁晓兵¹, 郑委¹, 刘庆杰², 张旭辉¹

(1. 中国科学院力学研究所, 北京 100190; 2. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083)

摘要: 针对裂隙岩体提出了一种基于双重逾渗模型的渗流系数分析方法。通过变参数研究, 考察了岩体中渗流和孔压分布的不均匀; 根据裂隙长度的不同将岩体分为“孔隙控制”渗流模式和“裂隙控制”渗流模式。这种模型不仅能够同时考虑孔隙和裂隙的作用, 而且在模拟大规模裂隙网络时更加快捷简便。

关键词: 裂隙多孔介质, 双重逾渗, 渗流模式; 渗流参数

中图分类号: TU451

文献标识码: A

文章编号: 1000-0844(2011)增刊-043-05

A Method for Determining the Permeability Coefficient of Fractural Rock Based on the Percolation Model

LU Xiao-bing¹, ZHENG Wei¹, LIU Qing-jie², ZHANG Xu-hui¹

(1. Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2 Research Institute of Exploration and Development of Chinese Petroleum, Beijing 100083, China)

Abstract: A method is presented based on the double percolation model for analyzing the permeability coefficient of fractural porous rock. The results computed by this model are close to that by fractural permeability tensor theory when the porous percolation is neglected. The non-uniformity of permeability and the pore pressure are investigated by parametrical analysis. It is shown that rocks can be divided into “pore-controlling” and “fracture-controlling” modes according to the fracture length. The method can not only consider the effects of pores and fractures together, but also be more fast and simple during the simulation of fracture network in large scale.

Key words: Fractural porous media; Dual percolation; Permeability model; Permeability coefficient

0 简介

裂隙岩石是自然界中各种地质体最为普遍的一种存在形式。研究裂隙岩石的渗流特性, 对油、气、水资源开发、环境保护和温室气体埋存等工程都具有重要意义。

逾渗理论最早由 Broadbent 和 Hammersley 于 1957 年创立^[1], 用以研究无序孔隙介质中流体的流动等随机物理过程。基本理论是: 介质内部有许多“节点”, 它们经由许多“路径”连接在一起, 形成多个“节点集团”, 伴随着外部条件而逐步演化成为贯通整个孔隙介质的“节点集团”^[2]。这种经典的逾渗理论研究仅仅局限于孔隙介质, 忽略了裂隙这一主要的渗流通道。裂隙渗流理论通过建立随机裂隙网络, 研究了流体在裂隙网络中的流动, 但忽略了孔隙这一渗流通道^[3]。

近年来, 已有研究者开始将介质中的裂隙-孔隙综合起来考虑。冯增朝^[4-7]等人建立了网格模型, 采用座逾渗原理模拟孔隙介质, 并在此基础上叠加随机裂隙, 对这种裂隙-孔隙二元多孔介质的渗流连通性进行了研究。

目前关于裂隙多孔岩石渗透性研究主要是基于连续介质理论, 分为两类: 一类考虑了岩体中裂隙系统和岩块孔隙系统之间的水交替过程, 即“裂隙-孔隙双重介质模型”^[8]; 一类则忽略了两类系统的水交替过程, 本文称之为“非双重介质模型”, 着重研究裂隙的导水作用。忽略了岩体中孔隙系统与裂隙系统的水交替过程^[9]。

本文从另一角度提出一种基于裂隙岩石的双重逾渗模型的渗流特性研究方法。这种模型不仅能够同时考虑孔隙和裂隙的作用, 而且在模拟大规模裂隙网

收稿日期: 2011-04-25

基金项目, 国家重点基础研究发展计划(973计划)(2006CB705800)

作者简介: 鲁晓兵(1968-), 男, 副研, 主要从事岩土力学方面的研究。

络时更加快捷简便。

1 基本理论

如图 1 所示, 在双重逾渗网络中, 假设孔隙与裂隙中的流动均符合单一裂隙中的渗流规律, 且渗流区域通过裂隙相互交叉和裂隙间的孔隙发生连通, 并在逾渗集团内形成了 N 个裂隙交叉点 (如图 1 中 A 、 C 、 E 、 F 点) 或孔隙连接点 (如图 1 中 B 、 D 点)。这些交叉点/连接点构成了进行渗流计算的基本线元。其构成方式有三种: 同一裂隙上两个相邻的交叉点 (如图 1 中的线元 EF); 同一裂隙上相邻的交叉点和孔隙连接点 (如图 1 中的线元 AB 、 AD 等); 相临近两条裂隙间的连通孔隙两段的两个孔隙连接点 (如图 1 中的线元 BD 等)。假设逾渗集团内共形成了 M 个线元, 任一线元的两个交叉点/连接点在数值计算中均处理为一个节点。这样每个节点均对应于一个坐标值, 而每条线元对应应有长度 δ_i , 倾角 β_i 和宽度 b_i 。设渗流为 Poiseuille 流, 即有立方定律

$$q_i = \frac{\Delta P_i b_i^3}{12\mu\delta_i} \quad (1)$$

其中 q_i 为流量; b_i 为裂隙宽度; δ_i 为裂隙长度; ΔP_i 为裂隙两端压差; μ 为裂隙中流体的粘性系数。

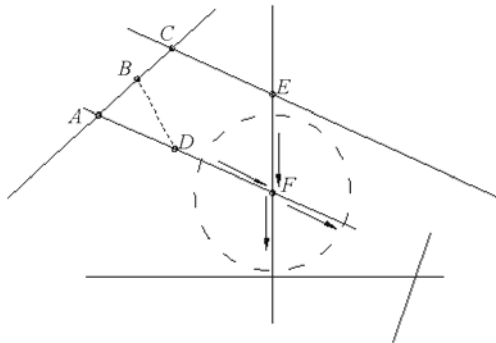


图 1 连通集团内的交叉点和线元

Fig.1 Cross point and line element inside the connective group.

网络任一节点 j 和 N 个交于节点 j 的线元组成均衡域, 按流量平衡得节点 j 处的水流方程为

$$\sum_{i=1}^N q_i = 0 \quad (2)$$

若双重逾渗网络中有 N 个节点, 则有

$$A\hat{q} = 0 \quad (3)$$

式 3 中 $\hat{q} = (q_1, q_2, \dots, q_N)^T$, $A = \{a_{ij}\}_{N \times M}$ 称为双重逾渗网络的 $N \times M$ 阶矩阵, 它描述了网络系统中线元与节点的衔接关系。元素 a_{ij} 可表示为

$$a_{ij} = \begin{cases} 0, & j \text{ 线元不衔接于 } i \text{ 节点} \\ 1, & j \text{ 线元不衔接于 } i \text{ 节点且 } q_j \text{ 指向 } i \text{ 点的方向} \\ -1, & j \text{ 线元不衔接于 } i \text{ 节点且 } q_j \text{ 指向离 } i \text{ 点的方向} \end{cases}$$

若上下边界为零流量, 左右为边界定压条件, 则双重逾渗网络渗流的数学模型为

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^{N'} q_i = \frac{\Delta P_i b_i^3}{12\mu\delta_i} = 0 \\ P|_{x=0} = P_1; P|_{x=L} = P_2 \\ \frac{\partial P}{\partial n}|_{x=0} = \frac{\partial P}{\partial n}|_{x=L} = 0 \end{cases} \quad (4)$$

根据岩石渗透张量理论^[10], 当岩石中有 n 组不同的裂隙组时, 则岩石的渗透张量如下:

$$[k] = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n k_{\alpha_i} (1 - \cos^2 \alpha_{1i}) & -\sum_{i=1}^n k_{\alpha_i} \cos \alpha_{1i} \cos \alpha_{2i} \\ -\sum_{i=1}^n k_{\alpha_i} \cos \alpha_{2i} \cos \alpha_{1i} & \sum_{i=1}^n k_{\alpha_i} (1 - \cos^2 \alpha_{2i}) \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$k_{\alpha_i} = k_{\beta_i} \frac{b_i}{d_i}, k_{\beta_i} = \frac{\gamma b_i^2}{12\mu g}$$

其中 k_{β_i} , b_i , d_i 分别为第 i 组裂隙的当量渗透系数 (LT^{-1})、裂隙平均宽度 (L)、平均间距 (L), $\cos \alpha_{1i}$, $\cos \alpha_{2i}$ 分别为第 i 组裂隙面的法线方向在参考坐标系下的方向余弦。

用双重逾渗模型计算岩石等效渗透系数时, 假设双重逾渗模型中有 N_0 条等长 (δ) 等宽 (b) 的裂隙, 但是其中只有部分是连通的, 即存在方向随机分布的 N_1 条连通裂隙。将这 N_1 条连通裂隙按如下方法简化为方向固定的 x 组。这 x 组方向分别是 $(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_x)$, 其中 $\alpha_2 - \alpha_1 = \alpha_3 - \alpha_2 = \dots = \alpha_x - \alpha_{x-1} = \alpha_0$, 将裂隙分组时, 若某一裂隙的方向能够落入区间: $(\alpha_i - \frac{1}{2}\alpha_0, \alpha_i + \frac{1}{2}\alpha_0)$ ($\alpha_i \in \{\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_x\}$), 则认为该裂隙属于方向为 α_i 的第 i 组裂隙, 并同时将该裂隙的方向设为 α_i 。前述逾渗集团内的 N_1 条裂隙经过这样的处理后, 每组裂隙的条数为 N_1/x 。再将每组裂隙按照总长度相等的原则等效成为 y 条平行的、等间距的、且任一条都能贯穿区域的裂隙。第 i 组裂隙的间距用 d_i 表示。

经上述处理后, b_i, μ 均为已知数, 计算等效渗透张量只需推导各组裂隙的 $\alpha_i \sim d_i$ 关系即可。

本文采用面积等效法计算 d_i (图 2)。计算区域为粗线方框, 虚线为第 i 组平行的裂隙, 细线框为两边与平行裂隙重合的辅助计算正方形, 粗线方框内的细线为辅助线。设粗线方框内裂隙的总长度与细线方框内裂隙总长度之比等于两个方框面积之比; 粗线方框为计算区域, 其内部裂隙总长度等于数值计算中双重逾渗网络逾渗集团中包含的第 i 组 N_1/x 条裂隙总长度。

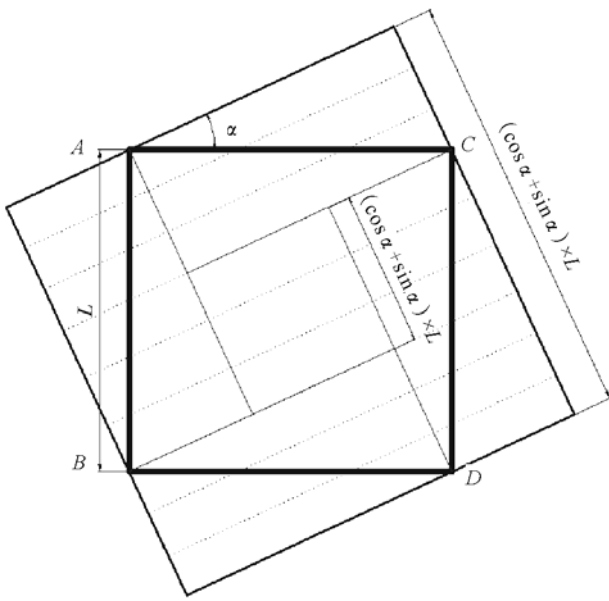


图2 等效面积法计算示意图

Fig.2 Sketch of equivalent area method.

粗线框面积为 $A_1 = L^2 = \lambda^2$ 。细线框面积为 $A_2 = [(\sin \alpha + \cos \alpha)L]^2 = [(\sin \alpha + \cos \alpha)\lambda]^2$ ；细线框内裂隙组总长： $(\sin \alpha + \cos \alpha) \cdot \mu \lambda N_1 / x$ ；等效裂隙的条数为： $|\sin \alpha + \cos \alpha| \cdot \mu N_1 / x$ ；于是裂隙的间隔 d_i 为

$$\frac{1}{d_i} = \frac{1}{\lambda} \cdot \left[\frac{\mu N_1}{x} - \frac{1}{|\sin \alpha + \cos \alpha|} \right] \quad (6)$$

于是有

$$k_{ei} = k_y \frac{b}{d_i} = \frac{k_y b}{\lambda} \cdot \left[\frac{\mu N_1}{x} - \frac{1}{|\sin \alpha + \cos \alpha|} \right] = \frac{y b^3}{12 \mu \lambda} \cdot \left[\frac{\mu N_1}{x} - \frac{1}{|\sin \alpha + \cos \alpha|} \right] \quad (7)$$

代入式(5)得到渗透系数张量为

$$[k] = \begin{bmatrix} \sum_{\alpha} k_{ei} (1 - \cos^2 \alpha_i) & -\sum_{\alpha} k_{ei} \cos \alpha_i \cos \alpha_i \\ -\sum_{\alpha} k_{ei} \cos \alpha_i \cos \alpha_i & \sum_{\alpha} k_{ei} (1 - \cos^2 \alpha_i) \end{bmatrix} \\ = \frac{y b^3}{12 \mu \lambda} \cdot \begin{bmatrix} \sum_{\alpha} \left(\frac{\mu N_1}{x} - \frac{1}{|\sin \alpha_i + \cos \alpha_i|} \right) (1 - \cos^2 \alpha_i) & -\sum_{\alpha} \left(\frac{\mu N_1}{x} - \frac{1}{|\sin \alpha_i + \cos \alpha_i|} \right) \cdot \cos \alpha_i \cos \alpha_i \\ -\sum_{\alpha} \left(\frac{\mu N_1}{x} - \frac{1}{|\sin \alpha_i + \cos \alpha_i|} \right) \cdot \cos \alpha_i \cos \alpha_i & \sum_{\alpha} \left(\frac{\mu N_1}{x} - \frac{1}{|\sin \alpha_i + \cos \alpha_i|} \right) (1 - \cos^2 \alpha_i) \end{bmatrix} \quad (8)$$

以及渗透率张量为

$$[K] = \frac{b}{12 \lambda} \cdot \begin{bmatrix} \sum_{\alpha} \left(\frac{\mu N_1}{x} - \frac{1}{|\sin \alpha_i + \cos \alpha_i|} \right) (1 - \cos^2 \alpha_i) & -\sum_{\alpha} \left(\frac{\mu N_1}{x} - \frac{1}{|\sin \alpha_i + \cos \alpha_i|} \right) \cdot \cos \alpha_i \cos \alpha_i \\ -\sum_{\alpha} \left(\frac{\mu N_1}{x} - \frac{1}{|\sin \alpha_i + \cos \alpha_i|} \right) \cdot \cos \alpha_i \cos \alpha_i & \sum_{\alpha} \left(\frac{\mu N_1}{x} - \frac{1}{|\sin \alpha_i + \cos \alpha_i|} \right) (1 - \cos^2 \alpha_i) \end{bmatrix} \quad (9)$$

由该理论计算得到的结果会因裂隙的粗糙分组而很难避免不均匀性，这里取 x 、 y 两个方向渗透率的平均值作为裂隙区域的渗透率：

$$K = \sqrt{K_{11} K_{22}} \quad (10)$$

2 双重逾渗模型渗透性的变参数计算

设计算区域为 100 m^2 ，裂隙条数设为 900 条，裂

隙长度均匀分布，裂隙位置随机分布，裂隙角度随机分布，裂隙宽度符合指数分布且平均值为 0.1 mm ，孔隙直径统一取为 0.001 mm ，裂隙宽度复合指数分布且平均值为 0.1 mm ，孔隙直径统一取为 0.001 mm 。

从图3发现：(1)在 p 增大时，区域内发生贯通所需要的裂隙平均长度减小。(2)裂隙长度刚刚达到逾渗阈值时，等效渗透率非常小；随着裂隙平均长度的增大，等效渗透率会略有增大；直至裂隙长度达到 $p=0$ 条件下发生逾渗的长度时，等效渗透率迅速增加，并接近 $p=0$ 时的曲线。这表明，以双重逾渗模型模拟的裂隙岩石中，渗透性质体现在两个尺度：裂隙尺度和孔隙尺度，孔隙尺度的等效渗透率较裂隙尺度有数量级差距，裂隙岩石的等效渗透率则是两者之间的有机结合。在裂隙长度较短，不足以依赖裂隙网络发生逾渗时，孔隙连通起到控制作用，研究区域的等效渗透率为孔隙级别；在裂隙长度较长，足以发生裂隙网络逾渗时，孔隙的连通作用不再是控制因素，流体从更顺畅的裂隙中流动，即裂隙网络起到控制作用，研究区域的等效渗透率为裂隙级别，两者之间的临界值附近会发生等效渗透率的跃迁。

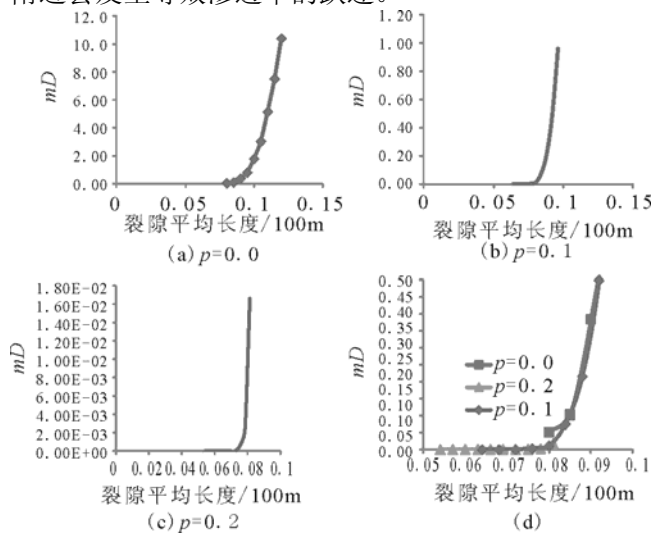


图3 p 取不同值时，渗透系数随裂隙长度的变化

Fig.3 Permeability coefficient versus fractural lengths under different p .

为了直观地比较孔隙裂隙介质处于“孔隙控制”渗流和“裂隙控制”渗流模式时的异同，本文分别选取上述两个模式的代表性样本个体，绘出样本个体的压力分布和渗流骨架图（图4）。

图4(a)、(b)为在 $p=0.2$ ， $\mu=0.054$ ，刚刚达到逾渗阈值条件时某一样本个体的压强分布图和渗流骨架图，此时研究区域处于“孔隙控制”渗流模式。可

以看出，渗流从左边界靠近左下角的位置突破进入区域内部，压强分布图中该处突破位置压力等值线明显向右边界突出，并保持较高的压强，这与渗流骨架图中区域左下角的入渗通道保持一致；此外，渗流骨架图中的骨架分布区域与压强分布图中的高压区域(>5 MPa)在位置和轮廓上也保持一致；压强分布图中高压力梯度（即等值线密集）区域出现在渗流骨架与非连通区域的交界处。

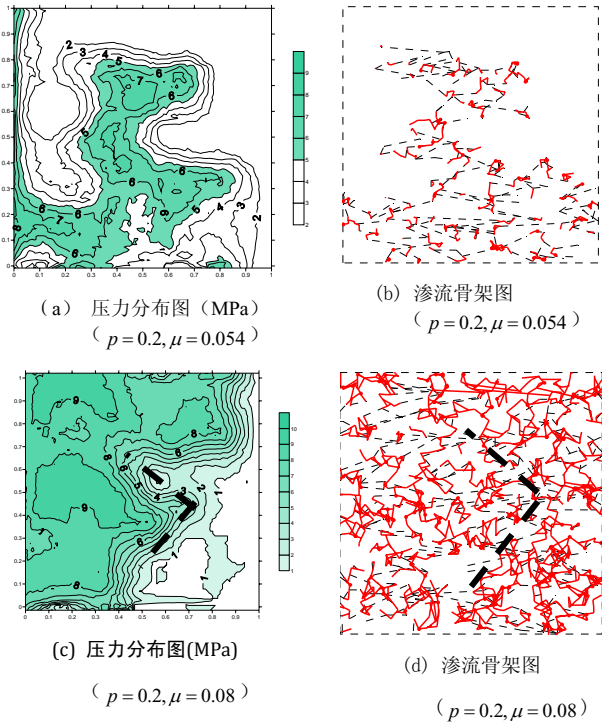


图4 在 $p=0.2, \mu=0.054$ 和 $\mu=0.058$ 时的
压力分布图和渗流骨架图

Fig.4 The pressure distribution and the seepage framework
at $p=0.2, \mu=0.054$ and $\mu=0.058$.

图 4 (c)、(d) 是 $p=0.2, \mu=0.08$ ，即裂隙网络已经发育到可以独立承担连通条件时某一个样本个体的压强分布图和渗流骨架图，此时研究区域处于“裂隙控制”渗流模式。可以看出，渗流骨架基本填满研究区域，压强分布也基本按照从左边界向右边界递减的规律充填整个研究区域；在渗流骨架中裂隙密集的区域，压力梯度较低（即等值线稀疏），高压力梯度区域出现在两个密集的“连通裂隙团”之间“依靠孔隙连接”的局部部位，如错误！未找到引用源。中虚线所标示。

两个模式中高压力梯度区域分布不同，主要原因是：(1)在“孔隙控制”模式，渗流骨架分布区域有限，研究区域大部分为非渗流区，压力为零；渗流骨架中起主要连通作用的是孔隙，裂隙与裂隙之间几乎无连接，又因裂隙宽度较大过流阻力小，裂隙在渗流骨架

中的作用可以看作是孔隙连接中的无阻尼中转点，从而使渗流骨架整体的过流阻力较为均匀。在骨架与非骨架区域的交界面处，由于压强突变，造成压力梯度很大，表现为等值线密集，但由于两者无连通通道这种压力梯度对于渗流没有影响。(2)在“裂隙控制”模式，渗流骨架充满研究区域，故不存在非渗流区的“零压区”；在渗流骨架中大部分裂隙能够相互搭接，构成裂隙通道，形成阻力较小的“连通裂隙团”；连通裂隙团之间往往由孔隙或者极少数量的裂隙连接，称为“链”，从而使这些孔隙通道或者裂隙通道成为阻力较大的区域，这使得压力梯度在这些“链”的附近集聚，表现为等值线密集；在靠近边界的区域，由于刺穿边界的裂隙数量较之附近“连通裂隙团”中的裂隙数量迅速减少，也表现为压力梯度较大，等值线密集。

3 结语

主要结果如下：

(1) 将裂隙渗流中的立方定律引入双重逾渗模型，使得双重逾渗模型能够用以计算和模拟水力连通的裂隙岩石的渗透性。

(2) 本文的双重逾渗模型结果与基于裂隙渗透张量理论的结果比较表明，两者结果在忽略孔隙逾渗时相近。由本文模型能得到反映临界连通状态的低渗岩体渗透系数，弥补了岩体裂隙渗透张量理论这方面的不足。

(3) 根据岩体内裂隙长度不同分为“孔隙控制”渗流模式和“裂隙控制”渗流模式，两者的临界点为单独考虑裂隙网络渗流时发生裂隙逾渗所需的裂隙平均长度。

(4) 裂隙平均长度低于临界值，处于“孔隙控制”渗流模式，这时等效渗透系数低，过流区域只覆盖研究区域的局部，压力梯度积聚在渗流骨架与非渗流区域的交界面上；裂隙平均长度高于临界值时，处于“裂隙控制”渗流模式，等效渗透系数较“孔隙控制”渗流高几个数量级，过流区域覆盖全部区域，压力梯度积聚在“裂隙团”之间的连接“链”上。

[参考文献]

[1] Broadbent S R, Hammersley J M. Percolation Processes [J].
Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society, 1957,
53(03): 629-641.

[2] G R Grimmett. Percolation-2.ed. [M]. Germany: Springer,1999.

[3] John A, Hudson John P, Harrison. Engineering Rock Mechanics [M].[S.1]:

Elsevier Science Ltd., Second impression, 2000.

- [4] 冯增朝,赵阳升,文再明.煤岩体孔隙裂隙双重介质逾渗机理研究[J].岩石力学与工程学报, 2005, 24(2):236-240.
- [5] 冯增朝,赵阳升,吕兆兴.强随机分布裂隙介质的二维逾渗规律研究[J].岩石力学与工程学报, 2006, 25(supp.2):3904-3908.
- [6] 吕兆兴,冯增朝,赵阳升,等.孔隙裂隙双重介质的三维逾渗数值模拟研究[J].岩土力学, 2007, 28(Supp.):291-294.
- [7] 冯增朝,赵阳升,吕兆兴.二维孔隙裂隙双重介质逾渗规律研究[J].物理学报, 2007, 56(05): 2796-2801.
- [8] Barenblatt G I. Basic concepts in the theory of seepage of homogeneous liquids in fissured rocks[J]. Journal of Applied Mathematical Mechanics, 1960, 24 (5): 1286-1303.
- [9] Long J C S, Gilmour P, Witherspoon P A. A method for steady fluid flow in random three dimensional networks of disc-shaped fractures[J]. Water Resources Research, 1985, 21 (8): 1105-1115.
- [10] 周维垣,杨强.岩石力学数值计算方法[M].北京:中国电力出版社, 2005.

(上接 37 页)

[参考文献]

- [1] 陈环,鲍秀清.负压条件下土的固结有效应力[J].岩土工程学报, 1984, 6 (1): 39-47.
- [2] 阎澍旺,陈环.用真空加固软土地基的机制与计算方法[J].岩土工程学报, 1986, 8 (2): 1-10.
- [3] 高志义.真空预压法的机理分析[J].岩土工程学报, 1989, 11 (4): 45-56.
- [4] 陈环.真空预压法机理研究十年[J].港口工程, 1991, 53 (4): 17-26.
- [5] 冯国栋主编.土力学[M].北京:水利电力出版社, 1989.
- [6] 刘杰.土石坝渗流控制理论基础及工程经验教训[M].北京:中国水利水电出版社, 2006.
- [7] 张力霆,齐清兰,王健,等.粘土铺盖裂缝淤填固结的理论及试验研究[J].岩土工程学报, 2007, 29 (3): 333-337.
- [8] 孟昭即.对真空预压影响深度的探讨[J].地基处理, 2003, 14 (3): 44-48.
- [9] 明径平,赵维炳.真空预压中地下水位的研 究[J].水运工程, 2005, 372 (1): 1-6.
- [10] 方俊,华姜旭.真空预压过程中地下水位变化的状况、原因及建议[J].地基处理, 2006, 17 (2): 22-32.
- [11] 刘汉龙,李豪,彭颖,等.真空—堆载联合预压加固软基室内试验研究[J].岩土工程学报, 2004, 26 (1): 145-149.
- [12] 李柏乔.真空预压处理软土地基的若干问题[C]//中国土木工程学会第十届土力学及工程学术会议论文集.重庆:重庆大学出版社, 2007: 254-258.