

裂隙岩体地区导热 - 对流型温度场垂向渗透系数的计算及分布特征研究

刘长吉¹, 陈建生¹, 白兰兰¹, 董海洲², 陈亮¹

(1. 河海大学 岩土工程研究所, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学 科学研究院, 江苏 南京 210098)

摘要: 阐述应用温度场方法研究裂隙岩体地区地下水渗流场参数的优点和存在垂向流作用下的导热 - 对流型温度场的地温特征。基于含水层导热 - 对流型温度场的地温曲线和渗流连续性方程, 考虑受垂向流影响的温度场, 建立地温与深度之间的函数关系, 并建立不动点迭代方程, 编制程序计算垂向渗透系数。针对渗透系数计算结果的统计特征分别构造满足正态分布、对数正态分布和均匀分布的 3 组新样本, 构造减速膨胀曲线, 对比分析渗透系数的概率分布特征。结果表明, 同正态分布和均匀分布相比, 裂隙岩体地区的垂向渗透系数更接近对数正态分布。利用温度场方法和统计学方法研究裂隙岩体地区地下水渗流场参数, 如渗透系数, 具有避免过多主、客观因素干扰, 计算过程清晰, 结果明确的特点。

关键词: 岩石力学; 渗透系数; 导热 - 对流型温度场; 减速膨胀曲线; 统计分布特征

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2007)04 - 0780 - 07

STUDY ON CALCULATION AND DISTRIBUTION CHARACTERISTIC OF VERTICAL PERMEABILITY COEFFICIENT WITHIN CONDUCTION-CONVECTION TEMPERATURE FIELD IN FISSURED ROCK ZONE

LIU Changji¹, CHEN Jiansheng¹, BAI Lanlan¹, DONG Haizhou², CHEN Liang¹

(1. *Institute of Geotechnical Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China;*

2. *Research Academy of Science and Technology, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China*)

Abstract: The advantages with the use of the temperature field method to study the parameters of groundwater seepage field and the temperature characteristic of conduction-convection temperature field affected by vertical seepage are described briefly. According to the temperature characteristic curve of conduction-convection temperature field in aquifer and seepage filtration equations, the function relationship between temperature and depth is formed, considering the characteristic of temperature field affected by vertical seepage; and the vertical permeability coefficient is calculated via iterative equation and program. Based on the statistical characteristics of above results, a few samples following the normal distribution, the log-normal distribution and the uniform distribution are created respectively. Then, the model of evanescent expander-curve is presented; and the statistical characteristics of the vertical permeability coefficient and the three kinds of distributions are studied and contrasted. The results show that the probability distribution characteristic of the vertical permeability coefficient

收稿日期: 2006 - 07 - 07; **修回日期:** 2006 - 11 - 20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50579017); 国际原子能机构 TC 项目(PRC - 08 - 015); 江苏省“六大人才高峰”项目

作者简介: 刘长吉(1979 -), 男, 2003 年毕业于河海大学土木工程专业, 现为硕士研究生, 主要从渗流理论与探测技术方面的研究工作。E-mail: nemo@hhu.edu.cn

in fissured rock zone is much close to the log-normal distribution. Several complicated factors including subjective and objective ones can be avoided; and the process and analysis results are clear using the method of temperature field and statistics to study the parameters of groundwater seepage field such as the vertical permeability coefficient in fissured rock zone.

Key words: rock mechanics; permeability coefficient; conduction-convection temperature field; evanescent expander-curve; statistical distribution characteristic

1 引言

对于有关岩土以及水文地质等方面的研究而言, 地层渗透系数等基本水文地质参数无疑是至关重要的。然而, 实际工程中的地质条件往往十分复杂, 尤其是存在地下水活动的地层, 其渗透系数受多种复杂因素影响, 难以直接测量得到, 或存在较大测量误差, 传统的野外试验方法很难揭示地层的真实性状。因此, 如何根据相对有限的已知信息来推求含水地层的物性参数, 进而研究其分布特征一直是学术界关心的问题。

温度作为能量的一种表现形式可以通过介质传递, 其在地层中是连续变化的。对于存在地下水活动的地层而言, 地层性状的不同使地下水活动方式存在差异, 从而在地层中形成不同分布形式的温度场。根据区别于正常地温分布的温度场特征可以判断其中因地下水活动所带来的影响有多少, 从而计算出地层渗透系数等基本参数。这种方法从现场实测温度出发, 有别于室内试验, 避免了诸如尺寸效应等不合理因素。介质的几何形状对介质的渗透性能影响较大, 但热传导系数仅与介质材料有关, 与介质的几何形状关系甚微。对于不存在渗流的均质和非均质岩体而言, 热传导性质基本相同。因此, 可以认为地下水的存在和运动方式是左右地温分布特征的主要因素。

很多学者进行过与温度场相关的研究。陈建生等^[1~5]利用虚拟热源法研究集中渗漏通道; 周志芳和王锦国^[6]采用数值模拟等方法, 针对地下水异常温度场特征进行了研究; 肖才忠和潘文昌^[7]由地温变化研究坝基渗流状态; 韦立德等^[8]研究了渗流场和温度场引起边坡灾害预报的有限元法; 张学富等^[9]建立了冻土渗流场和温度场耦合问题的三维数学模型, 并编制了有限元分析程序; 柴军瑞等^[10, 11]建立了温度场与渗流场的耦合模型并给出数值解法; 王如宾等^[12]进行了裂隙岩体渗流的热学效应研究, 以

上这些研究工作都取得了很多有益的成果。目前国内对于含水介质渗透系数的统计特征也进行过一些探讨^[13~15], 得出许多有价值的结论。对于裂隙岩体地区复杂的地质条件而言, 应用温度场分析方法可以不必进行过多简化, 从而避免了人为不合理因素, 能够得到较为满意的成果。

裂隙岩体地区的地层垂向渗透系数是高度离散的, 其空间分布特征可以通过概率统计的方法进行描述。笔者依据裂隙岩体地区导热 - 对流型温度场的地温曲线特征建立迭代方程计算垂向渗透系数, 并提出了构造减速膨胀曲线的方法来研究裂隙岩体地区垂向渗透系数的统计特征, 最后以工程实例进行验证。

2 导热 - 对流型温度场

自然界中的传热通常以传导、对流和辐射^[16]这 3 种方式进行。

(1) 传导始终是热量传递的主要方式, 尤其是当岩石为完全致密或岩石中的孔隙很小时, 由物质运动引起能量转移的对流传热机制会受到抑制, 可以看作仅发生固体间的热传导。

(2) 如果岩石不是致密的而是存在裂隙(死端裂隙除外), 那么就会因水流运动而产生的热量交换, 即对流传热。但应该看到的是, 对流传热进行的同时不可避免地伴随有热传导过程。

(3) 只有在高温或极高温(高于 600 °C)的情况下, 由辐射机制传递的热量占整个传热量的份额才不可忽略, 常温下可以不考虑。

本文所做研究的客观条件仅限于常温, 因此只研究条件(1)和(2)作用下的温度场。其他与能量转移有关的量, 如黏性耗热, 当不可压缩流体为低速流动时, 其与热传导所传递的热量相比非常少, 因此黏性功可以忽略不计^[17]。

地下水运动是各种地质活动中的活跃因素, 由于其易于流动且热容量大, 对地层温度场有着重要

影响。无地下水运动的地层传热以固体热传导为主，可以认为是导热型温度场；存在地下水运动的地层，除固体导热外还同时伴随因地下水流动而产生的对流传热，形成导热和对流并存的温度场，即导热 - 对流型温度场。

导热 - 对流型温度场与导热型温度场的性质是不同的。

理论上的地温梯度是指不存在地下流体(水或石油等)运动的地温梯度，温度与深度回归曲线的斜率为常数，地温曲线为直线。根据 Fourier 热传导定律，在均质地层中以传导方式传递热量时，理论地温梯度等于温度与深度相关直线的斜率，如图 1 所示。

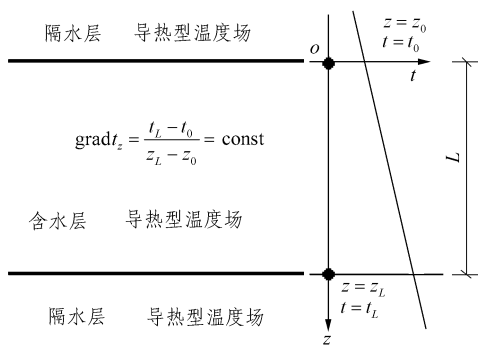


图 1 导热型温度场温度曲线

Fig.1 Temperature curve of conduction temperature field

如果地层中存在地下水渗流，受水流运动影响的地温梯度不再是常数。一般情况下，地下水沿水平方向运动是沿着或靠近等温面的，对温度场的影响不如地下水沿垂直方向运动明显^[18]，因此，这里主要讨论地下水垂向运动对地温分布的影响。当不存在其他外部热源影响，地层中存在垂直向上或向下的水流运动时，地温曲线如图 2, 3 所示。

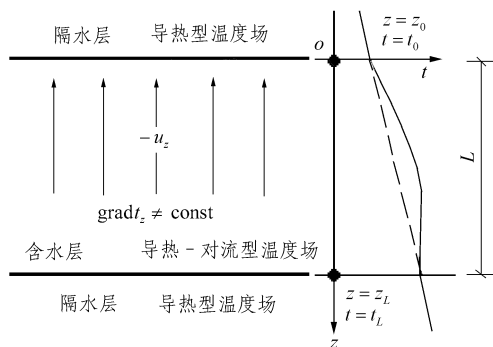


图 2 水流垂直向上时的地温曲线

Fig.2 Ground temperature curve with vertical and upward seepage

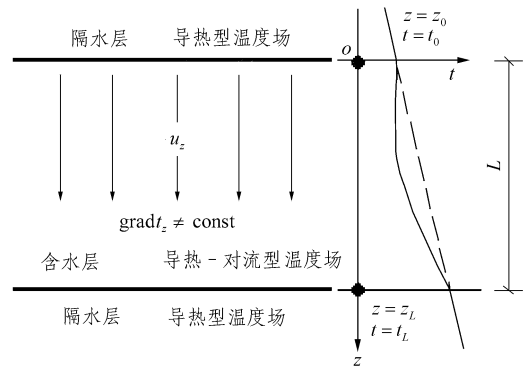


图 3 水流垂直向下时的地温曲线

Fig.3 Ground temperature curve with vertical and downward seepage

图 2, 3 中虚线表示导热型温度场的温度曲线，实线表示导热 - 对流型温度场的温度曲线。从图中可以看出，导热 - 对流型温度场的温度曲线是“上凸”或“下凹”的，前者对应垂直向上的地下水流，后者反之，据此可以判断和识别地下水流向。对于这种温度场而言，不同的垂向流速对应着不同的曲线形状，一般来说，流速越大，曲线的曲率也就越大，温度曲线越偏离理论地温曲线，如图 4 所示。

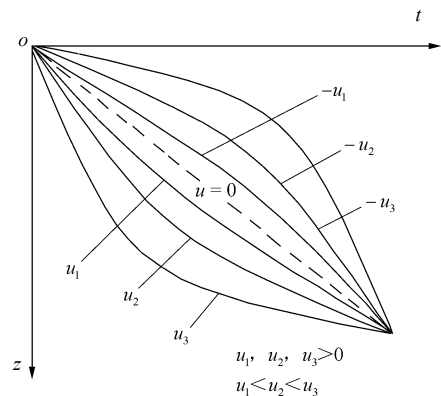


图 4 导热型和导热 - 对流型温度场垂向温度曲线

Fig.4 Vertical temperature curves of conduction and conduction-convection temperature fields

3 导热 - 对流型温度场渗透系数

此处认为含水层骨架不被压缩且水体不可压缩，可以引入渗流的连续性方程^[19]；考虑水流在水平向不参与热量交换，无温度变化，即水平向温度梯度为 0；含水地层的导热系数与地层的含水率以及介质和水的导热系数有关，这里认为地层导热各向同性；考虑计算区域附近无集中热源作用或距离集中热源较远，即认为异常地温曲线仅是垂向流作用的结果。渗流作用下同时考虑热传导和对流的能

量方程为

$$\left. \begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_x \frac{\partial t}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_y \frac{\partial t}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_z \frac{\partial t}{\partial z} \right) - \\ & c_w \rho_w \left[\frac{\partial(tu_x)}{\partial x} + \frac{\partial(tu_y)}{\partial y} + \frac{\partial(tu_z)}{\partial z} \right] = 0 \\ & \frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} = 0 \\ & \frac{\partial t}{\partial x} = \frac{\partial t}{\partial y} = 0 \\ & \lambda_x = \lambda_y = \lambda_z = \lambda \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: t 为温度($^{\circ}\text{C}$); $\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z, \lambda$ 为地层导热系数($\text{W}/(\text{m} \cdot ^{\circ}\text{C})$), 取 $2.5 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^{\circ}\text{C})$; c_w 为水的质量比热容($\text{J}/(\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C})$), 取 $4.2 \times 10^3 \text{ J}/(\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C})$; ρ_w 为水的密度(kg/m^3), 取 $1.0 \times 10^3 \text{ kg}/\text{m}^3$ 。

化简式(1)得

$$\frac{\partial^2 t}{\partial z^2} - \frac{c_w \rho_w u_z}{\lambda} \frac{\partial t}{\partial z} = 0$$

其边界条件为

$$\left. \begin{aligned} & t|_{z=0} = t_0 \\ & t|_{z=L} = t_L \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: t_0 为计算区间上边界温度, t_L 为下边界温度。

设 $\beta = \frac{c_w \rho_w u_z}{\lambda}$, 可以得到温度与深度之间的函数关系:

$$\left. \begin{aligned} & t = t_0 - (t_0 - t_L)(e^{\beta z} - 1)/(e^{\beta L} - 1) \\ & z = 0 \\ & t = t_0 \\ & z = L \\ & t = t_L \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

该超越方程可通过迭代方法求解, 建立不动点迭代方程:

$$\beta_{i+1} = \frac{\ln[a(e^{\beta_i L} - 1) + 1]}{z} \quad (i = 1, 2, \dots) \quad (4)$$

其中,

$$a = \frac{t - t_0}{t_L - t_0}, \quad z \neq 0$$

经证明, 该迭代方程满足存在性和收敛性条件。

通过迭代计算, 可以得到各个计算点的垂向流速, 继续假设各个计算点的垂向流为理想达西流, 即水流在垂向符合达西定律 $u_z = Ki$, 从而得到各个计算点的渗透系数 $K = \frac{u_z}{i} (i \neq 0)$ 。

4 样本减速膨胀曲线

将计算所得渗透系数作为原始样本 Ω_0 , 然后通过给定的概率函数生成一组随机数样本 Ω (Ω 的生成基于 Ω_0 的统计特征, 如数学期望和方差), 对 Ω_0 和 Ω 的特征进行研究。本文采用构造减速膨胀曲线的方法分析裂隙岩体地区垂向渗透系数样本的统计特征。减速膨胀是指从所研究样本的数学期望出发, 同时向区间端点增加对应步长若干次, 每次必定有 0 个或至少 1 个样本进入这个容量增长着的样本空间, 对于正态分布而言, 样本容量增长的速度是逐渐减小的, 最终样本空间中样本个数等于样本总体容量时, 该过程结束。这个样本容量逐渐增加, 样本空间逐渐膨胀的过程即样本空间减速膨胀, 过程曲线即减速膨胀曲线。具体步骤如下:

(1) 生成 $[0, 1]$ 范围内均匀分布的随机数
本文采用混合同余法^[20], 其递推公式为

$$\left. \begin{aligned} & x_i = \text{mod}(Ax_{i-1} + C, M) \\ & \gamma_i = \frac{x_i}{M} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中: A, C, M 均为正整数。

(2) 对 Ω_0 的数学期望和总体方差进行估计^[21]

采用矩法, 其中方差选用无偏估计量 S^{*2} , 计算公式为

$$S^{*2} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2$$

则由 $\mu = \bar{X}$, $\sigma^2 = S^{*2}$ 生成 Ω 。以正态分布随机数 Y 为例, 采用统计近似法, 数学期望为 μ , 方差为 σ^2 , 公式为

$$Y = \mu + \frac{\sigma \left(\sum Rn_i - \frac{n}{2} \right)}{\left(\frac{n}{12} \right)^{\frac{1}{2}}} \quad (i = 1, 2, \dots, n)$$

通常, $n = 12$ 时其近似程度已经足够好, 因此有

$$Y = \mu + \sigma \left(\sum_{i=1}^{12} Rn_i - 6 \right) \quad (6)$$

式中: Rn_i 为 $[0, 1]$ 上服从均匀分布的随机数。生成的一组 Y 值就是 Ω 。

(3) 构造减速膨胀曲线

以 Ω 的数学期望 μ 为起点分别向 Ω 的最小值 K_{\min} 和最大值 K_{\max} 靠近, 生成一系列新的样本 Ω_i , 直至 $\Omega_i = \Omega$ 。这个逐渐靠近的过程使得 Ω_i 广义减速膨胀(之所以说“广义”, 是因为膨胀可能等速, 如均匀分布), 膨胀过程可以通过在相应区间内分割和累加微段实现。设 Ω 的样本容量为 N , Ω_i 的样本容量为 N_i , 对 Ω 进行 n 次分割和累加, 即 Ω_i 共膨胀 n 次, 第 i 次的样本容量为

$$N_i \in \left[\mu - (\mu - K_{\min}) \frac{i}{n}, \mu + (K_{\max} - \mu) \frac{i}{n} \right]$$

($i = 1, 2, \dots, n$)

然后计算 N_i 对于 N 的百分含量 $P_i = \frac{N_i}{N} \times 100\%$,

$P_i \in [0, 1]$, P_i 可称为 Ω_i 的膨胀率, 这样就得到一条 i - P 曲线, 即样本 Ω_i 的减速膨胀曲线。

一般情况下, 符合不同分布的样本减速膨胀曲线形状不同。为找出更优的分布曲线, 可考虑多选几种分布函数进行计算, 然后将这些曲线同原始样本 Ω_0 的减速膨胀曲线(或离散的减速膨胀点)进行对比, 观察它们之间的相似性, 事实证明这种方法是有有效的。

5 工程实例

青海龙羊峡水库地质条件复杂, 坝区岩体经多次构造运动, 断裂发育。右坝肩的 4#和 6#钻孔相邻, 地温曲线在相同高程内极为相似, 如图 5, 6 所示。

可以认为水平向无温差, 温度梯度为 0, 满足前述计算所需基本条件, 可以用式(3)进行计算。6#

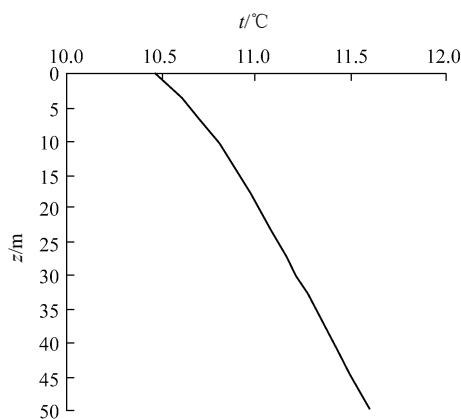


图 5 4#钻孔地温曲线

Fig.5 Ground temperature curve of borehole No.4

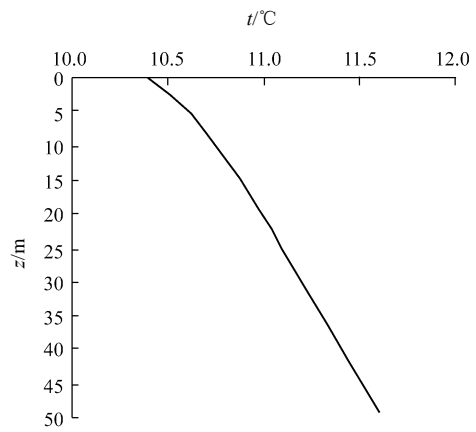


图 6 6#钻孔地温曲线

Fig.6 Ground temperature curve of borehole No.6

钻孔地温曲线为“上凸”型, 如图 5~7 所示, 可判断该钻孔附近区域存在向上的垂向流。

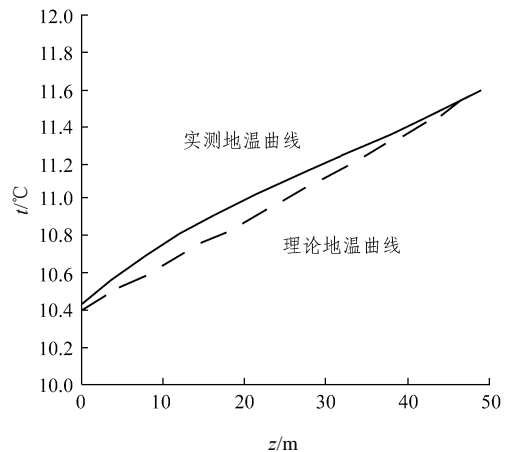


图 7 6#钻孔实测及理论地温曲线

Fig.7 Measured and theoretical curves of ground temperature of borehole No.6

迭代计算程序框图如图 8 所示。其中, 计算点 z 取 1 m; i 取 1; ε 取 1×10^{-10} ; n_{\max} 取 10 000。迭代计算收敛很快, 结果如表 1 所示。

原始样本 Ω_0 即为表 1 所列出的 K 。为了对不同分布的模拟结果进行对比, 找出更优的分布曲线, 笔者在这里分别选取正态分布、对数正态分布和均匀分布进行计算。这里取 $n = 100$, 与之对应的 Ω_0 膨胀过程点以及正态分布、对数正态分布和均匀分布的减速膨胀曲线如图 9 所示。从图中可看出, 与正态分布和均匀分布相比, 对数正态分布的拟和效果较好, 尤其是在靠近数学期望的区域, 对数正态分布明显优于其他两类分布, 在 $i \in [0, 35]$ 区间内的拟和效果最好。由于方差的存在, 随着 i 值逐渐增加, 对数正态分布的减速膨胀曲线逐渐偏离了数据点。

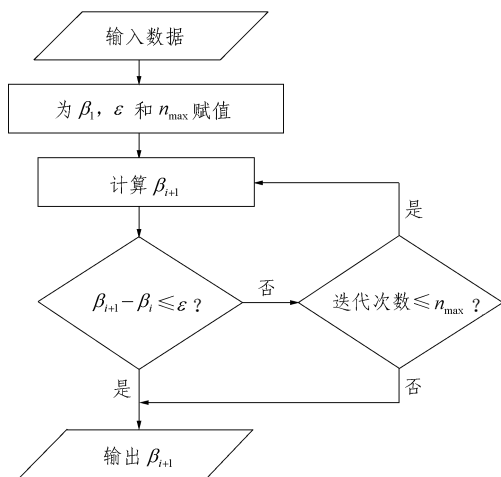


图 8 迭代计算程序框图

Fig.8 Schematic diagram of iterative calculation algorithm

表 1 垂向渗透系数计算结果

Table 1 Calculation results of vertical permeability coefficient

z/m	$K/(10^{-9} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1})$	z/m	$K/(10^{-9} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1})$
1	51.05	26	0.01
2	21.47	27	3.32
3	8.91	28	2.27
4	1.08	29	0.62
5	15.29	30	6.78
6	24.35	31	14.17
7	18.82	32	12.17
8	14.29	33	10.14
9	10.43	34	8.05
10	17.82	35	5.89
11	24.41	36	15.13
12	21.02	37	12.86
13	17.96	38	10.48
14	15.18	39	7.94
15	12.61	40	5.22
16	10.20	41	2.44
17	7.92	42	0.50
18	14.09	43	12.87
19	11.89	44	9.22
20	9.79	45	4.94
21	7.75	46	1.34
22	5.77	47	0.09
23	3.83	48	0.00
24	1.92	49	0.01
25	0.38		

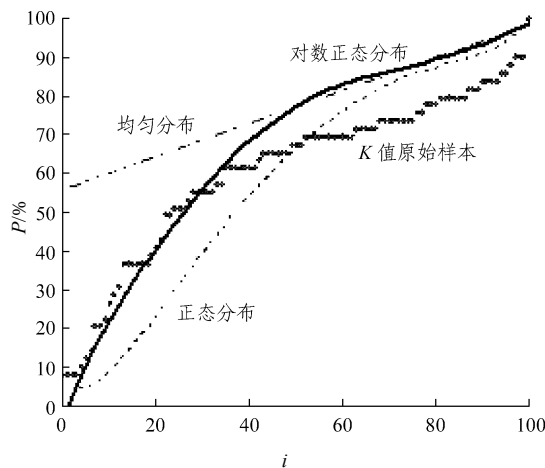


图 9 减速膨胀曲线

Fig.9 Evanescent expander-curves

6 结 论

(1) 利用温度场计算渗透系数能有效避免许多客观因素的干扰, 有利于提高计算结果的可靠度。

(2) 研究了裂隙岩体地区垂向渗透系数的统计规律, 提出构造减速膨胀曲线的方法, 认为裂隙岩体地区的垂向渗透系数符合对数正态分布。

(3) 这种方法便于程序实现, 过程清晰, 结果明确。

(4) 有必要继续进行水平向渗透系数空间统计规律的研究。

对于实际工程而言, 向上的垂向流比向下的垂向流更常见, 对于主要成分为无黏性土的地层, 向上的垂向流可能会带来管涌、流土等事故隐患, 因而对存在向上垂向流的地层进行研究有重要的工程意义。

参考文献(References):

[1] 陈建生, 董海洲, 吴庆林, 等. 虚拟热源法研究坝基裂隙岩体渗漏通道[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(22): 4 019 - 4 024. (CHEN Jiansheng, DONG Haizhou, WU Qinglin, et al. Detection of leakage passage in fissure rock with assumptive heat source method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(22): 4 019 - 4 024.(in Chinese))

[2] 董海洲, 陈建生. 利用孔中温度场分布确定堤坝渗透流速的热源法模型研究[J]. 水文地质工程地质, 2003, 30(5): 40 - 43.(DONG Haizhou, CHEN Jiansheng. Model research on heat source method by using water temperature distribution in borehole to determine seepage velocity of dyke[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2003, 30(5): 40 - 43.(in Chinese))

- [3] 王新建, 陈建生, 陈亮. 天然示踪法在贮灰场土坝渗漏探测中的应用[J]. 水利水电科技进展, 2005, 25(6): 67 - 71, 74.(WANG Xinjian, CHEN Jiansheng, CHEN Liang. Application of natural tracer method to leakage detection for ash field earth dam[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2005, 25(6): 67 - 71, 74.(in Chinese))
- [4] 陈建生, 董海洲, 余波, 等. 利用线热源法研究堤防集中渗漏通道[J]. 地球物理学进展, 2003, 18(3): 400 - 403.(CHEN Jiansheng, DONG Haizhou, YU Bo, et al. Using line-heat-resource method to study concentration leakage passage of dike[J]. Progress in Geophysics, 2003, 18(3): 400 - 403.(in Chinese))
- [5] 刘建刚, 陈建生. 平面热源法在北江石角段堤基渗漏分析中的应用[J]. 水利水电工程学报, 2002, (3): 63 - 65.(LIU Jiangan, CHEN Jiansheng. Application of plane heat source method to leakage analysis for Shijiao Reach of Beijiang Dike[J]. Hydro-science and Engineering, 2002, (3): 63 - 65.(in Chinese))
- [6] 周志芳, 王锦国. 河流峡谷区地下水温度异常特征分析[J]. 水科学进展, 2003, 14(1): 62 - 66.(ZHOU Zhifang, WANG Jinguo. Abnormal characteristics analysis of groundwater temperature field in canyon areas[J]. Advances in Water Science, 2003, 14(1): 62 - 66.(in Chinese))
- [7] 肖才忠, 潘文昌. 由温度场研究坝基渗流初探[J]. 人民长江, 1999, 30(5): 21 - 23.(XIAO Caizhong, PAN Wenchang. Preliminary analysis of dam foundation seepage through temperature field[J]. Yangtze River, 1999, 30(5): 21 - 23.(in Chinese))
- [8] 韦立德, 杨春和, 徐卫亚. 渗流场和温度场引起边坡灾害预报的有限元法[J]. 金属矿山, 2005, (7): 17 - 20.(WEI Lide, YANG Chunhe, XU Weiya. Finite element method for forecast of slope disaster caused by seepage field and temperature field[J]. Metal Mine, 2005, (7): 17 - 20.(in Chinese))
- [9] 张学富, 喻文兵, 刘志强. 寒区隧道渗流场和温度场耦合问题的三维非线性分析[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(9): 1 095 - 1 100.(ZHANG Xuefu, YU Wenbing, LIU Zhiqiang. Three-dimensional nonlinear analysis for coupled problem of seepage field and temperature field of cold regions tunnels[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(9): 1 095 - 1 100.(in Chinese))
- [10] 柴军瑞, 韩柱群, 仵彦卿. 岩体一维渗流场与温度场耦合模型的解析演算[J]. 地下水, 1999, 21(4): 180 - 182.(CHAI Junrui, HAN Zhuqun, WU Yanqing. Checking computations on one-dimensional coupling model coupling temperature-seepage in rock mass[J]. Groundwater, 1999, 21(4): 180 - 182.(in Chinese))
- [11] 黄涛, 杨立中. 隧道裂隙岩体温度-渗流耦合数学模型研究[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(5): 554 - 558.(HUANG Tao, YANG Lizhong. A study on mathematical model of coupling temperature-seepage of fractured rock mass in tunnels[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999, 21(5): 554 - 558.(in Chinese))
- [12] 王如宾, 欧阳永保, 丁红瑞. 关于裂隙岩体渗流的热学效应分析[J]. 灾害与防治工程, 2005, (1): 59 - 62.(WANG Rubin, OUYANG Yongbao, DING Hongrui. Calorific effect analysis of seepage in fractured rock mass[J]. Disaster and Control Engineering, 2005, (1): 59 - 62.(in Chinese))
- [13] COOLEY R L. A method of estimating parameters and assessing reliability for models of steady state groundwater flow. I. theory and numerical properties[J]. Water Resources Research, 1977, 13(2): 318 - 324.
- [14] 张征, 刘淑春. 地下水环境评价中分布参数随机性的空间统计分析[J]. 环境科学学报, 1999, 19(4): 410 - 414.(ZHANG Zheng, LIU Shuchun. Spatial statistical analysis of randomness of spatial distributed parameters in groundwater environmental assessment[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 1999, 19(4): 410 - 414.(in Chinese))
- [15] 李伟, 束龙仓. 湖区地层垂向渗透系数概率分布特征分析[J]. 水利水电科技进展, 2005, 25(2): 20 - 22.(LI Wei, SHU Longcang. Probability distribution characteristics of vertical hydraulic conductivity in substrate of lake areas[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2005, 25(2): 20 - 22.(in Chinese))
- [16] 沈显杰, 杨淑贞, 张文仁, 等. 岩石热物理性质及其测试[M]. 北京: 科学出版社, 1988.(SHEN Xianjie, YANG Shuzhen, ZHANG Wenren, et al. Thermophysical properties and test of rock[M]. Beijing: Sciences Press, 1988.(in Chinese))
- [17] 林睦曾. 岩石热物理学及其工程应用[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 1991.(LIN Muzeng. Rock thermophysics and its engineering application[M]. Chongqing: Chongqing University Press, 1991.(in Chinese))
- [18] 康永华, 耿德庸. 煤矿井下工作面突水与围岩温度场的关系[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1996.(KANG Yonghua, GENG Deyong. The relation of emerge water and temperature field of wall rock in the working face of coal mine[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 1996.(in Chinese))
- [19] 薛禹群, 朱学愚, 吴吉春, 等. 地下水水力学[M]. 北京: 地质出版社, 1997.(XUE Yuqun, ZHU Xueyu, WU Jichun, et al. Dynamics of groundwater[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1997.(in Chinese))
- [20] 吴飞. 产生随机数的几种方法及其应用[J]. 数值计算与计算机应用, 2006, (1): 48 - 51.(WU Fei. Several methods of creating stochastic numbers and applications[J]. Journal of Numerical Methods and Computer Applications, 2006, (1): 48 - 51.(in Chinese))
- [21] 王俊德. 水文统计[M]. 北京: 水利电力出版社, 1993.(WANG Junde. Hydrology statistics[M]. Beijing: Water Resources and Electric Power Press, 1993.(in Chinese))