

文章编号：1006-6616(2001)03-0271-07

地下工程渗流场有限元模拟研究

李杰¹, 李强²

(1. 福建省建筑科学研究院, 福建 福州 350002;
2. 长江水利委员会汉江集团, 湖北 丹江口 441900.)

摘要：在水电、石油、交通等部门的地下工程中，经常会遇到地下水的渗流问题，如果处理不当，可能诱发应力恶化而影响结构稳定。本文以非饱和介质的渗流模型为基础，实现了地下洞室开挖过程中的非稳定渗流场解析。

按分期施工方案，在保持渗流场变化连续性的前提下，对各施工阶段进行了准稳定渗流分析，并在此基础上建立了地下工程非稳定渗流数值模型。其中，对于洞室系统，基于水量平衡原理，采用了子结构模型；对于防渗帷幕，采用了隔水层模型；对于排水井列，采用了杆单元模型。

根据上述模型，采用有限差分法作为数值模拟方法，编写了地下工程非稳定渗流场分析的有限元程序，实现了复杂渗流区域的渗流场的动态模拟。工程实例计算分析表明，用该模型计算的结果是合理的。

关键词：模拟；地下工程；非饱和；子结构

中图分类号：TE312 **文献标识码**：A

0 引言

三维非稳定渗流问题数值分析方法以往一般是以自由水面为边界，在饱和区内进行计算。这种方法在计算中每段都要试求自由水面边界，比较麻烦，而且也无法考虑渗流场内的初始含水量分布，因此不能全面真实地反映地下水的渗流动态。本文基于饱和-非饱和介质渗流分析模型，采用子结构模拟洞室系统，按照施工分期方案，对各施工阶段进行准稳定渗流分析，较好地实现了对帷幕井列的模拟。伴随施工进度需要保持渗流场变化的连续性，这样既能正确模拟非稳定渗流场又能反映施工方案对渗流的影响，同时，还可以大大简化非稳定渗流的复杂计算。

1 渗流基本理论

饱和-非饱和渗流模型考虑了地下水的非饱和流动，把饱和区与非饱和区耦合在一起进

行整体分析, 压力水头在饱和区为正值, 在非饱和区为负值, 零压力面就是自由水面, 即饱和区与非饱和区的分界面。

1.1 基本方程

假设水不可压缩, 在无内源的情况下, 三维饱和 - 非饱和渗流的基本方程可表示为^[1]:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x(h) \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y(h) \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z(h) \frac{\partial h}{\partial z} \right) + \omega = S(h) \frac{\partial h}{\partial t} \quad (1)$$

式中: h 为压力水头, 在饱和区为正值, 在非饱和区为负值; $K_x(h)$ 、 $K_y(h)$ 、 $K_z(h)$ 为岩土介质的主渗透系数; ω 为入渗或蒸发水量; $S(h)$ 为岩土介质贮水系数, t 为时间量。

1.2 定解条件

对于本文所考虑的非稳定渗流问题, 其定解条件可以用下列各式描述:

初始条件 $h(x, y, z, 0) = h_0(x, y, z)$

边界条件, 可分为两类:

已知水头边界 Γ_1 $h(x, y, z, t) = h_1(x, y, z, t)$

已知流量边界 Γ_2 $K_x(h) \frac{\partial h}{\partial x} n_x + K_y(h) \frac{\partial h}{\partial y} n_y + K_z(h) \frac{\partial h}{\partial z} n_z + K_2(h) n_z = -q(x, y, z, t)$ (2)

式中: h_0 , h_b 为已知函数, 分别表示初始和边界水头值; n 为边界面外法线的方向余弦; q 是边界面单元面积上的流量。 $K(h) = K_r(h)K_s$, K_s 为饱和渗透系数, $K_r(h)$ 为相对非饱和渗透系数 $0 \leq K_r(h) \leq 1$, $h \geq 0$ 时 $K_r(h) = 1$ 。 K_s 通常由实验测得。根据具体试验数据可绘出 $K_r(h)$ 与水头 h 的关系曲线即非饱和参数曲线, 如图 1 所示。 $K_r(h)$ 决定了非饱和区域内的渗透参数非线性特征。

上述方程 (1)、(2) 构成了三维饱和与非饱和渗流模型。

2 渗流场模拟

对于三维饱和与非饱和渗流模型给定的偏微分方程和定解条件, 可以用有限元法形成代数方程组进行求解。计算区域由等参单元离散, 采用八节点六面体单元, 分别对防渗帷幕、排水井列、洞室系统进行动态模拟。

2.1 渗流场有限元模拟

根据变分原理, 对于饱和 - 非饱和的非稳定渗流场的定解问题, 可以转化为某一泛函极值函数问题。经过离散化后泛函 $I(H)$ 相应分解为各单元泛函之和 (其中总水头 H 为压力水头加相对高程)。

对于渗流区域的所有单元泛函求得微分后叠加, 使其等于零 (求最小值) 就得到三维饱和 - 非饱和非稳定渗流有限元模型, 汇总方程写成矩阵形式为^[2,3]:

$$[K] \{h\} + [S] \left\{ \frac{\partial h}{\partial t} \right\} = \{F\} \quad (3)$$

其中 $\{h\}$ 为节点水头列向量, $[K]$ 为整体渗透矩阵, $[S]$ 为贮水系数矩阵, $\{F\}$ 为自由项, 式 (3) 中的系数矩阵为高度稀疏对称正定矩阵, 对方程中的时间变量差分, 可用迭代法求解方程为:

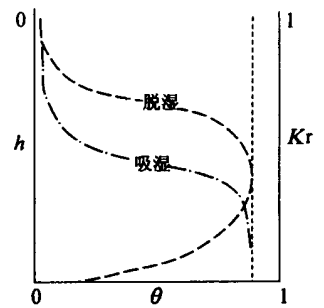


图 1 非饱和参数曲线
Fig.1 Curves of unsaturated parameter
 h . 压力水头; θ . 含水率;
 K_r . 相对系数

$$\left(\lambda [K] + \frac{[S]}{\Delta t_k} \right) \{h\}^{k+1} = \{F\} - \left((1 - \lambda) [K] - \frac{[S]}{\Delta t_k} \right) \{h\}^k \quad (4)$$

式(4)中 λ 为权数, K 表示时间步, $\Delta t_k = t^{k+1} - t^k$ 。

2.2 帷幕及并列单元的模拟

对于防渗帷幕,按照隔水层模型,利用串联和并联原理,将防渗帷幕同其所在岩体合并考虑,认为单元内还有一个隔水层单元,然后迭加合并,以构成新的单元渗透矩阵。

排水并列是降低地下水位的主要方法,本文采用杆件单元来模拟^[4]。求解时,考虑杆件单元的渗透矩阵对井周相应网络节点的贡献,即修正井周单元渗透系数。

2.3 洞室开挖单元的模拟

本文提出子结构分析方法,根据开挖方案,用子结构单元来模拟洞室区域,计算区域内的其余区则划为主网格单元。按水量平衡原理,由所划分的子结构区域和主网格区域来建立水量平衡关系。子结构是专门用于模拟洞室的特殊单元群体,子结构与主网格的联系由子结构所在主网格单元的节点承担。

按有限元的截止负压法^[5],将子结构作为主网格整体结构的一部分考虑,则可生成有限元矩阵方程:

$$[K]_{N \times N} \{h\}_N = \{F\}_N \quad (5)$$

式中: i 为迭代次数, N 为节点总数; $[K]$ 为总体渗透矩阵; $\{h\}$ 为未知节点的水头列向量; $\{F\}$ 为自由项列向量,可由边界和初始条件确定。求解式(5)便可得第 i 次迭代的节点水头。

以下省略迭代次数将式(5)分解为矩阵形式:

$$\begin{bmatrix} [K]_1 & [K]_2 & [K]_3 \\ [K]_1 & [K]_2 & [K]_3 \\ [K]_1 & [K]_2 & [K]_3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{h\}_1 \\ \{h\}_2 \\ \{h\}_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{F\}_1 \\ \{F\}_2 \\ \{F\}_3 \end{Bmatrix} \quad (6)$$

子结构解法实际上是将求解有限元方程(6)的过程分为两步进行。首先将子结构的矩阵方程化为仅刺与主网格直接联系的节点的节点方程,并通过组合算子合并入网格的矩阵方程中;其次,求解主网格的矩阵方程,并通过与子结构相联系的节点,求得子结构的矩阵方程解,如图2所示。求解过程中,可按分期方案确定子结构边界条件。

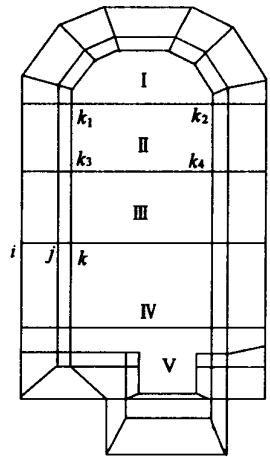


图 2 洞室子结构模型

Fig.2 Excavation substructure model

i . 主网格除去与子结构联系的节点; j . 主网格与子结构联系的节点; k . 子网格除去与主结构联系的节点。I ~ V. 分期序号; $k_1 \sim k_4$. 某期子结构节点

3 实例分析

3.1 工程概况

某地下洞室开挖工程,地下水位通常较高,岩层裂隙较发育,形成主要的贮水空间,区域内设有防渗帷幕和排水孔。有限元计算区域取 $1200\text{m} \times 150\text{m} \times 600\text{m}$ ($x \times y \times z$),有限元网格见图3所示。共有2079个单元和3750个节点,采用六面体等参单元。按裂隙介质理论,岩体裂隙的渗透特征参数如表1。渗流场分析边界条件:边坡上侧地下水位500m,下侧河谷水位50m,初始边界流量为 $5.0 \times 10^{-6} \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$,沿边坡入渗平均单位面积流量为 $1.5 \times 10^{-4} \text{m}^3$

·s⁻¹。

表 1 岩体裂隙的渗透特征参数

Table 1 Parameter of the penetration feature of fissured rock mass

岩层	主渗 $K_x/cm \cdot s^{-1}$	主渗 $K_y/cm \cdot s^{-1}$	主渗 $K_z/cm \cdot s^{-1}$	倾向 α_x	倾角 β_x	倾向 α_y	倾角 β_y	倾向 α_z	倾角 β_z
1	3.6×10^{-6}	3.2×10^{-8}	0.3×10^{-9}	71.81	75.79	315.30	9.88	227.08	315.30
2	3.6×10^{-10}	3.2×10^{-12}	0.3×10^{-12}	94.23	42.31	242.33	43.05	348.52	16.63
3	3.6×10^{-9}	3.2×10^{-10}	0.3×10^{-10}	84.52	40.53	6.55	16.02	132.33	37.62

注：倾向、倾角单位为(°)

3.2 工程渗流场计算分析

本文借助地下工程非稳定渗流场分析的有限元程序，对渗流水头、流量和坡降进行计算。针对渗流场的帷幕、井列及洞室开挖分别进行模拟，取 $y = 50m$ 剖面的结果绘制成图并对其分析如下(图 4)：

(1) 从图 4 初始渗流等值线分布中可以看出，在计算区域内，由于水头损失的累加，总水头由上侧 500m 逐步降低至下侧 50m。采用饱和非饱和分析模型，区域内压力水头有正有负，零压力点在自由水面线上。区域内部分节点处流量为零。

(2) 当考虑计算区域内防渗帷幕和排水井列时，渗流水头分布见图 5。水头分布明显受防渗帷幕的影响，水位在帷幕前后大幅度降低，在布置洞室处的总水头降低到 90% 左右，帷幕后地下水重新分布，产生幕底绕流现象。计算区域内在 96 个节点处设排水井，由图 5 可知整个水位都降低，特别是在渗流经过排水井时，总水头很快降低至 20% 以下(图 5 中 7、8 线所示)。说明要解决地下水渗流问题，通常要做到防、排结合才能达到更好的效果。

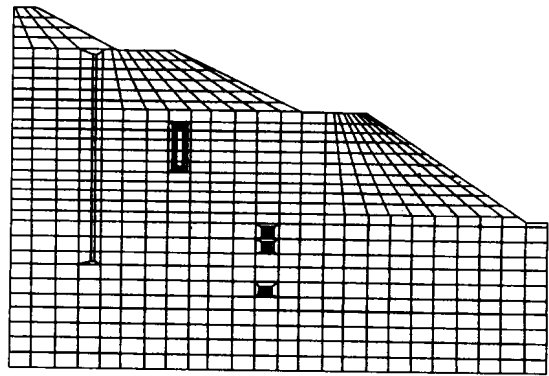


图 3 有限元计算分析网格

Fig.3 Finite element analysis mesh

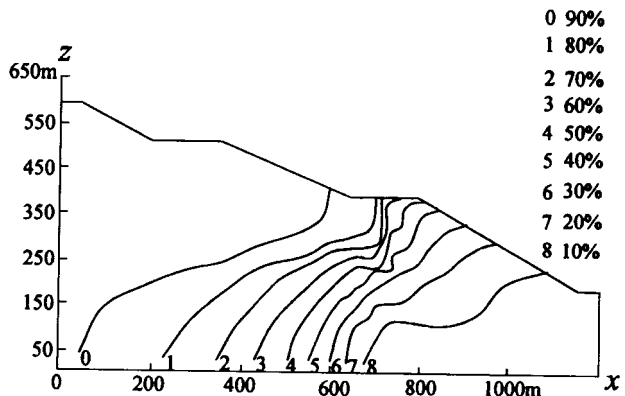


图 4 初始渗流等势线

Fig.4 Initial seepage isogram

等势线数值为总水头占区域水头差的百分比

(3) 伴随着洞室的开挖，渗流场变化较大，渗流水头分布见图 6。洞室形成后，洞室周围的平均水头很快降低。由于开挖施工，洞室周围产生新增渗流量，其中洞室总的渗流量为 $0.034\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ 。

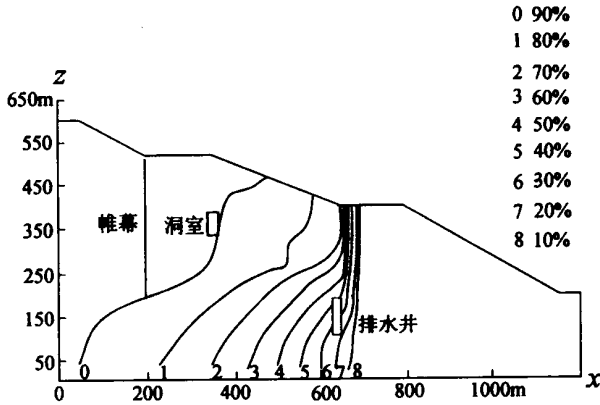


图 5 防渗帷幕与并列渗流等势线

Fig.5 Seepage isogram with curtain and well
等势线数值为总水头占区域水头差的百分比

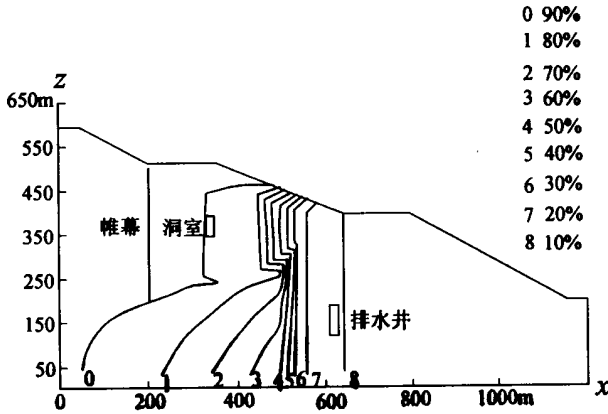


图 6 洞室开挖后渗流等势线

Fig.6 Seepage isogram after excavation
等势线数值为总水头占区域水头差的百分比

(4) 考虑到帷幕、并列及洞室开挖等主要因素的相互影响，计算得到渗流水头分布如图 7。可以看出，渗流总水头等势线向边坡内侧移动，并且变化比较均匀平缓，在帷幕、排水孔等处等势线改变比较明显。计算出区域内沿 x 轴方向各截面流量约为 $1.25\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ ，其中洞室周围总的渗流量为 $0.083\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ 。在下游坡面附近渗透坡降较大，平均值为 0.35。在防渗帷幕、排水井的防、排联合作用以及洞室开挖的相互影响下，对降低地下水位、降低水力梯度以及改善地下水分布是有利的。

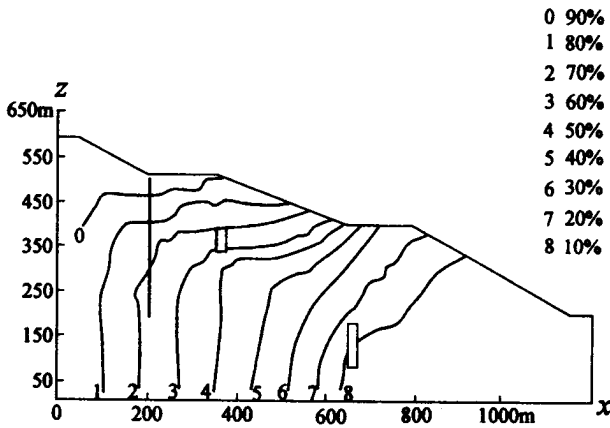


图 7 竣工后稳定渗流等势线

Fig.7 Stable seepage isogram after completion
等势线数值为总水头占区域水头差的百分比

4 结论

本文针对饱和-非饱和渗流问题,基于水量平衡原理提出了子结构法分析模型。采用有限元法,实现了对复杂渗流区域的防渗帷幕、排水井列、洞室开挖的模拟,操作简单,有较好的使用效果。

子结构模型中洞室区域水头边界条件可采取近似给定,如假定洞周某点压力水头等于零,但由于洞室与排水孔通常应当是联合作用的,所以这种近似方法在饱和-非饱和渗流模拟中的适用性还有待进一步研究。

参 考 文 献

- [1] 张有天,刘中. 降雨过程裂隙网络饱和和非饱和非恒定渗流分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 1997, 16 (2): 104 ~ 111.
- [2] 杜延龄,许国安. 渗流分析的有限元法和电网络法 [M]. 北京:水利电力出版社, 1988.
- [3] 毛昶熙. 渗流计算分析与控制 [M]. 北京:水利电力出版社. 1988.
- [4] Hua Yin-jian. FE modeling of seepage in embankment soils with Piping zone [J]. 岩石力学与工程学报, 1998, 16 (6): 679 ~ 686.
- [5] 赵坚,沈振中. 尾矿坝复杂排水系统渗流计算方法改进 [J]. 河海大学学报, 1997, 25 (2): 110 ~ 113.

THE STUDY OF FINITE ELEMENT SIMULATING OF SEEPAGE IN THE UNDERGROUND ENGINEERING

LI Jie¹, LI Qiang²

(1. Fujian Architecture Institute, Fuzhou 350002, China; 2. Hanjiang River Group, Danjiangkou 441900, China.)

Abstract : In the underground engineerings of waterpower, petroleum and traffic, the problem of seepage often happens. If it is not deal with correctly, worse stress will be induced, which will influence the stability of structure. Based on the model of unsaturated seepage, the analysis of unsteady seepage is accomplished.

In this paper, according to the construction by stages, under the continuity premise of seepages variance, the quasi-steady seepage for every stages is analyzed and accordingly a numerical model of three-dimensional unsaturated seepage is constituted. Based on the principle of water quantity balance the excavation is simulated with the model of substructure; the waterproof curtain with the model of interlayer; the drainage with the model of shank element.

According the above models a finite element program of unsaturated and unsteady seepage analysis is compiled using finite difference method and the dynamical simulating of seepage field in complex region is done. The analysis and calculation of engineering case show that the results obtained by calculation of above models are reasonable.

Key words : simulating; underground engineering; unsaturated; substructure