

# 地下工程复杂渗流场数值模拟研究与应用

张 巍 肖 明

(武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北武汉 430072)

**【摘 要】** 结合地下工程复杂渗流场三维有限元分析的实际, 用渗透张量模拟非均匀各向异性, 用改进丢单元法迭代自由水面, 用隐性的复合材料单元模拟断层, 用隔水层模型模拟防渗帷幕, 用以沟代井模拟排水并列。在此理论上编制了渗流分析的三维有限元计算程序。且用此程序成功求解了漫湾水电站二期工程地下厂房围岩的复杂渗流场, 并在此基础上分析渗流场分布的主要影响因素的影响。结果验证了程序的合理性和实用性。

**【关键词】** 地下工程; 渗流场; 数值模拟; 三维有限元法

**【中图分类号】** TV 139.14

## Study on Numerical Simulation of Seepage of Underground Engineering and Its Application

Zhang Wei Xiao Ming

(The State's Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science,  
Wuhan University, Wuhan Hubei 430072 China)

**【Abstract】** Combined with the reality of 3D FEM analyze of complicated seepage field of underground engineering, penetrability tensor is utilized to simulate the non-isotropy medium, improved abandon-element method is utilized to calculate the free surface, latent complex-material element is utilized to simulate the waterproof, slot instead of well curtain is utilized to simulate the drainage. Based on the above theory, 3D FEM calculation program for seepage analyse is compiled. Finally this program is applied on seepage analysis of 2nd Project of Manwan Underground Plant. Based on the result, the factors influencing seepage flow area are analyzed. The result testifies the rationality and practicability of the program.

**【Key Words】** underground engineering; seepage flow area; numerical simulation; 3D FEM

## 0 引言

地下工程渗流场往往十分复杂, 一般表现为透水特性和边界条件的复杂性, 如渗透的各向异性和非均匀性, 排水孔边界, 自由边界, 洞室开挖内边界等。目前国内外多用三维有限元进行模拟分析。在三维有限元求解中具体表现为网格剖分复杂、计算规模大、孔洞多、可能溢出面多、自由面形态复杂等特点。

如何对地下工程复杂渗流场各因素进行比较准确的模拟, 编制出比较高效合理的三维有限元计算程序, 使之能应用到地下工程复杂渗流场分析的工程实践中去, 是本文的研究内容。

## 1 各向异性岩体的三维渗流分析方法

渗透非均匀性只需令各单元的  $k$  值不同就能模拟。各向异性可用渗透张量  $k_{ij}$  表示的达西定

律<sup>[1]</sup>来表示成:

$$U_i = k_{ij} \frac{\partial H}{\partial X_j} \quad (1)$$

只需令各单元的渗透系数张量  $k_{ij}$  各向异性就能模拟各单元渗透的各向异性。在计算过程中表现为各单元渗透系数矩阵的各向异性, 即每个矩阵的 9 个系数  $k_{ij} (i = 1, 2, 3, j = 1, 2, 3)$  不全相同。

## 2 自由水面迭代的丢单元法及改进

在自由水面迭代的众多方法中, 弃单元法具有迭代速度快、计算精度高、用于非稳定流计算的积累误差小等优点。笔者在此法基础上作出了一点改进并用于迭代求解自由水面。

### 2.1 丢单元法的基本思路

丢单元法系以上一次有限元计算求得的节点势为基础, 用插值法与逼近法, 求出自由面与单元边线

的交点,将自由面穿越的母单元作为变形单元,自由面将单元分成上下两个区域,自由面以上的区域在下次计算时不参与计算,自由面以下为渗流计算区域,该区域逐步逼近实际渗流域,所得流场逐步逼近真实解<sup>[2]</sup>。

## 2.2 对丢单元法所作的改进

文献<sup>[3]</sup>对丢单元法作了较详细的研究,笔者在此基础上引入空单元的概念,对丢弃的单元按空单元处理,简化了计算程序,提高了计算速度。

所谓空单元是指这样一类单元。空单元内没有水流通过,单元渗透系数为零。空单元在计算时不参与形成传导矩阵。空单元内部的节点不作未知节点进行计算,不形成自由度。值得注意的是空单元与其他单元相邻的节点作未知节点进行计算,形成自由度。显然空单元的有无不会影响计算结果。在进行弃单元时,不必按实际进行丢单元丢节点和修改单元信息,只需要将单元标记为空单元即可。这样的处理简化了程序,同时提高了计算速度。

在处理逸出段时,应把逸出段侧含自由水面的单元挑出来,以对所有节点进行操作的方式释放其第一类边界条件。

算例表明,该法在迭代中自由度不断减少,从而加快了求解速度,并且体现出良好的收敛性。

## 3 断层模拟的隐式复合材料单元法

目前地下工程渗流数值模拟大都采用拟连续介质模型<sup>[4]</sup>。而实际上那些数目不多的高次序的起主要导水作用裂隙断层对渗流场的影响往往是不可忽视且需要模拟的。但由于其厚度相对周围岩体单元很小,采用加密网格法要增加很大的计算量,而且很容易出现单元形态奇异。文献<sup>[5]</sup>对断层采用等厚面单元进行模拟。这没有考虑断层厚度的影响,且忽略了沿断层面法向的流动。而且对于实际地下工程,仅实测裂隙断层往往就是纵横交错的,若按实际模拟,仅8结点等参单元的划分就非常困难。

针对上述问题,笔者提出了用隐式复合材料单元法对断层进行模拟。由于复合材料单元是隐式的,该法没有增加单元总数和结点总数,仅需对复合材料单元进行单元的渗透张量进行修正。另外,对主要断层的勘测工作相对容易。故该法只需增加少量的计算量与工作量即可满足实际工程的精度要求。

### 3.1 隐式复合材料单元法的基本思路

首先不考虑断层对工程进行前处理,另外单独组织各断层数据,包括断层的走向,倾角,开度,范围,渗透系数矩阵等。在形成整体传导矩阵前,先要

对各单元进行判断,确定断层穿过的单元,即隐式复合材料单元,对该单元的渗透系数进行等效处理即可反映断层的影响。

### 3.2 复合材料单元的渗透传导矩阵形成的基本原理

采用8结点等参单元的复合单元见图1。

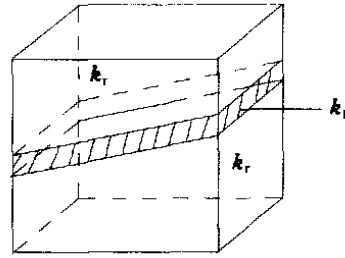


图1 复合单元示意图

设断层开度为  $b$ , 断层中心面切割单元的截面积为  $S$ , 断层的体积为  $V_f$ 。断层的渗透矩阵为  $k_f$ , 周围岩体的渗透矩阵为  $k_r$ , 周围岩体体积为  $V_r$ , 单元总体积为  $V$ 。设复合单元的等效渗透矩阵为  $k_d$ 。等效渗透系数矩阵按下式计算:

$$k_d = \frac{k_r b + k_f \left( \frac{V}{S} - b \right)}{\frac{V}{S}} \quad (2)$$

公式的推导过程作者另有专文论述。

值得注意的是,式(2)中渗透系数矩阵  $k_r$  和  $k_f$  应在相同的坐标系下的取值,每个矩阵有9个系数  $k_{ij}$  ( $i=1, 2, 3, j=1, 2, 3$ ), 故该式按矩阵运算可拆分成9个式子。由于对称性  $k_{ij}=k_{ji}$ , 共有6个独立的式子。

### 3.3 断层渗透系数矩阵 $k_f$ 的取值

断层渗透系数矩阵  $k_f$  可根据断层的勘测信息取值。断层的渗透性依断层结构面呈明显的各向异性,沿断层面切向的渗透系数远大于断层面法向的渗透系数。法向渗透系数  $k_n$  建议取断层填充物的渗透系数,没有时可取周围岩体的渗透系数。切向渗透系数  $k_t$  取工程实测值。根据断层产状可知断层走向  $\alpha$ , 倾角  $\beta$ , 则断层的渗透张量见表1,通过张量运算和坐标变换即可求出断层的渗透系数矩阵  $k_f$ 。

表1 断层渗透张量的取值

| 项目    | 主值    | 主方向/°               |                    |
|-------|-------|---------------------|--------------------|
|       |       | 倾向                  | 倾角                 |
| $k_1$ | $k_t$ | $\alpha + 90^\circ$ | $\beta$            |
| $k_2$ | $k_t$ | $\alpha$            | 0                  |
| $k_3$ | $k_n$ | $\alpha - 90^\circ$ | $90^\circ - \beta$ |

## 4 渗控措施的模拟<sup>[6]</sup>

### 4.1 灌浆帷幕的模拟

用隔水薄层单元模拟灌浆帷幕, 将隔水薄层单元同其所在岩体合并考虑, 认为单元内还有一个薄层单元, 然后利用串并联原理, 将该单元矩阵耦合于整体渗透传导矩阵中。

### 4.2 排水孔幕的模拟

在以沟代并列基本构思的基础上, 用渗流阻力附加单元法进行模拟。

渗径补偿单元是一种虚拟的单元, 它在渗流场的单元剖分中并不存在, 故没有增加单元结点数目, 实际计算时是对渗径补偿单元求其单元渗透矩阵, 再将该阵化为对并列线上各剖分点的贡献从而将渗径补偿单元的求解耦合于整个渗流场的求解过程中。

## 5 计算程序

### 5.1 计算程序框图(见图2)

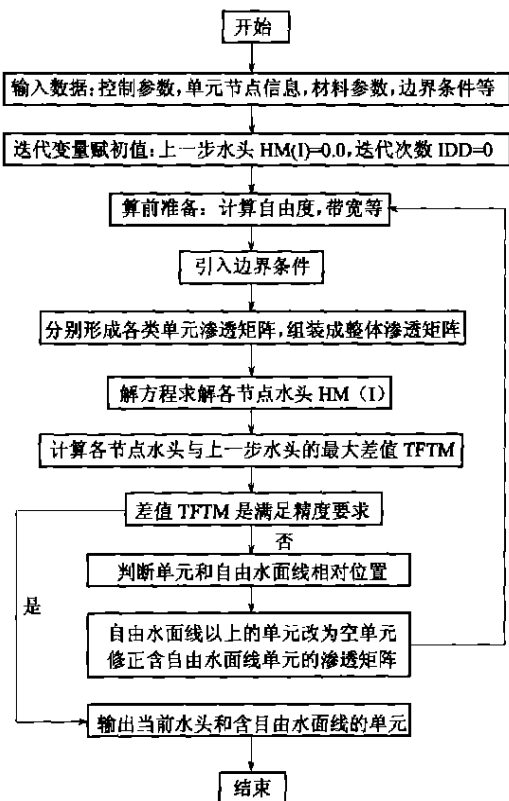


图2 计算程序框图

### 5.2 程序主要内容

1) 各向异性渗流计算。2) 自由面迭代。3) 断层模拟。4) 各渗控措施模拟。

## 6 工程实例

### 6.1 工程概况

漫湾水电站二期工程地下厂房位于云南澜沧江右岸, 地下水位较高, 节理裂隙较发育。影响厂区渗

流的主要断层有 F402, F401, F405, F403, F407, F412。区域内设有灌浆帷幕, 厂房四周及顶拱以上设有排水孔幕和排水廊道。有限元计算区域取  $453.46 \text{ m} \times 190 \text{ m} \times 325.61 \text{ m}$  ( $x \times y \times z$ ), 共剖分了 4 532 个单元和 5 316 个结点。渗流边界条件上游水位 1 062.50 m, 下游水位 952.86 m。各区域不同岩体渗透系数按工程资料见表 2。各断层切向渗透系数按建议值取周围岩体的 1 000 倍, 法向渗透系数取断层填充物的渗透系数。

表2 漫湾水电站二期工程不同区域岩体的渗透系数  $\text{cm}^2/\text{s}$

| 区 域 | I + II a类岩体段         | II b + IV类岩体段        |
|-----|----------------------|----------------------|
| 区域一 | $8.0 \times 10^{-6}$ | $6.0 \times 10^{-5}$ |
| 区域二 | $1.0 \times 10^{-4}$ | $3.5 \times 10^{-4}$ |
| 区域三 | $7.0 \times 10^{-5}$ | $2.5 \times 10^{-4}$ |
| 区域四 | $1.5 \times 10^{-4}$ | $4.0 \times 10^{-4}$ |

### 6.2 渗流场计算工况

根据工程资料建立有限元网格模型见图 3。现拟渗控方案示意图见图 4。为分析各种因素对渗流场的影响, 并验证程序的合理性, 分 4 种工况进行计算: 1) 不模拟断层; 2) 灌浆帷幕完全失效; 3) 厂房四周及顶部排水孔幕完全失效; 4) 正常运行工况。

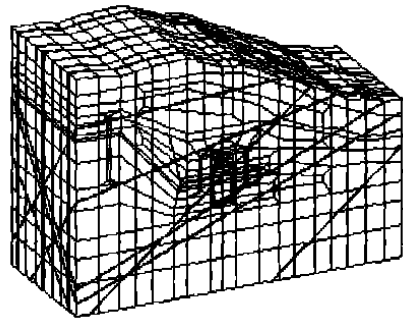


图3 有限元计算模型网格

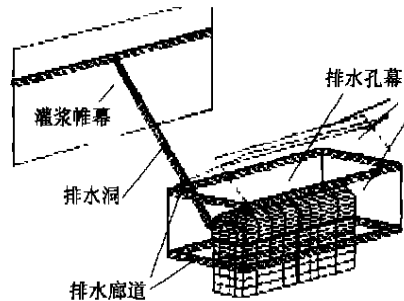


图4 现拟渗控方案示意图

计算和后处理后, 计算工况 1~4 下沿 1# 机组中心线剖面等势线图分别见图 5~图 8。将各工况与正常运行工况进行比较分析。

### 6.3 主要渗流影响因素分析

1) 工况 1: 图 5(不模拟断层)和图 8 相比, 由于

断层的影响,厂区自由水面有所升高,从整体上看断层对厂区渗流的影响是不利的。这是由断层产状和强渗透性决定的。

排水孔幕渗控效果很大,本工程厂区几乎全部在地下水水面线以下,排水孔幕绝不能失效,应注意维护。一旦局部失效,应立即采取补救措施。

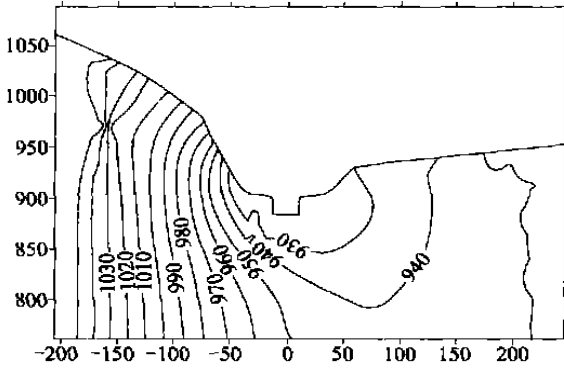


图5 沿1#机组中心线剖面等势线图(工况1)

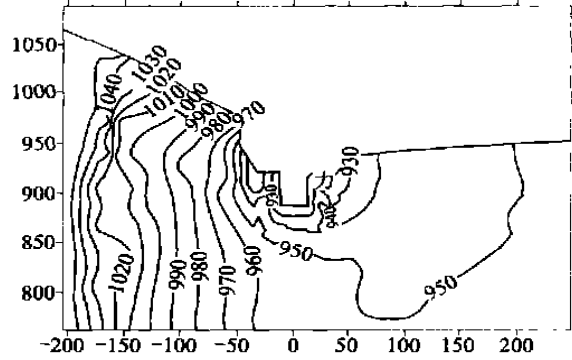


图8 沿1#机组中心线剖面等势线图(工况4)

2) 工况2: 灌浆帷幕失效时(见图6)。在灌浆帷幕附近等水头线位置较正常运行工况明显有所降低,等水头线变得相对稀疏,这表明帷幕灌浆失效后,其周围水头升高,水头变化相对缓慢。这反过来体现了灌浆帷幕的阻水作用。

### 7 结论

1) 本文结合地下工程渗流复杂性的实际,探讨了复杂渗流场数值模拟的原理和方法,并编制了复杂渗流场分析的三维有限元计算程序,对复杂渗流场各影响因素进行了较准确的模拟。

2) 工程实例4种工况的计算结果对比分析表明,渗流各主要影响因素对渗流的影响得到了比较合理的反映。厂区的渗控方案以“厂外堵排为主,厂内排水为辅”为原则,有效地控制了厂区地下水,使厂区的渗控效果达到了预期的目的。

3) 本次渗流分析规模较大,渗透参数复杂,计算网格复杂,域内可能溢出面甚多,边界条件复杂,断层纵横交错,是一个难度十分大的渗流场分析问题。

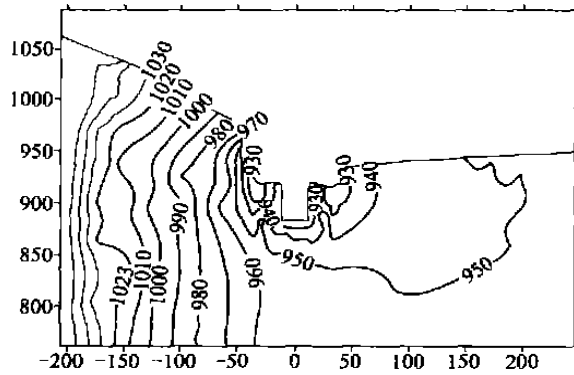


图6 沿1#机组中心线剖面等势线图(工况2)

3) 工况3: 厂房四周及顶部排水孔幕完全失效时(见图7)。自由水面显著上升,这反过来说明了排水孔幕的渗控效果。因排水降压作用显著,渗透压力主要耗散在排水廊道及排水孔幕的外围。可见

### 参考文献

- 1 朱伯芳. 有限单元法原理与应用(第二版). 北京: 中国水利水电出版社, 1998. 247
- 2 彭 华, 等. 有自由面渗流分析的单元法及其应用. 人民长江, 1997, 28(8): 38~40
- 3 黄 蔚, 等. 三维无压渗流场的有限元算法研究. 水利学报, 2001(6): 33~36
- 4 郑少河, 等. 复杂裂隙岩体水力学模型的研究. 人民长江, 1999, 30(9): 31~33
- 5 杜延龄, 等. 渗流分析的有限单元法和电网络法. 北京: 水利电力出版社, 1992: 132~137
- 6 毛昶熙, 等. 渗流数值计算与程序应用. 南京: 河海大学出版社, 1999. 264~267
- 7 何光渝, 等. Visual Fortran 常用数值算法集. 北京: 科学出版社, 2002. 1~62

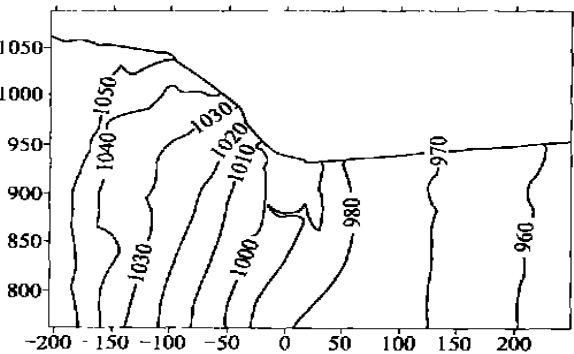


图7 沿1#机组中心线剖面等势线图(工况3)

收稿日期: 2004-11-25