

某厂区防渗工程地下水数值模拟

李凯^{1,2}, 简文彬^{1,2}, 周倍锐^{1,2}

(1. 福州大学 环境与资源学院, 福建 福州 350108; 2. 福州大学 岩土工程与工程地质研究所, 福建 福州 350108)

摘要: 根据某厂区的水文地质条件, 在建立水文地质数学模型的基础上, 运用有限差分数值计算软件对该厂区地下水的渗流规律进行数值分析, 并运用其跟踪模拟子模块对该厂区地下水的水质点进行了粒子示踪模拟。通过研究区埋设的孔隙水压力计测试成果的验证, 该模型模拟结果与厂区地下水渗流场的实际情况较为吻合, 即厂区地下水会从西北部地区向西南部和南部的梅坝溪及东北部的下道湖溪渗流。模型可用于该厂区地下水动态模拟和预测, 及污染物运移途径研究, 可以为厂区的防渗工程提供可靠依据。

关键词: 有限差分法; 地下水; 渗流场; 数学模型; 数值模拟

中图分类号: TU753

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2012)01—0078—05

Numerical Simulation for Groundwater in Seepage Control Project of a Mining Factory

LI Kai^{1,2}, JIAN Wen-bin^{1,2}, ZHOU Bei-ru^{1,2}

(1. College of Environment and Resources, Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350108, China;

2. Institute of Geotechnics and Engineering Geology, Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350108, China)

Abstract: According to the hydrogeological conditions of a mining factory, and on the basis of the establishment of hydrogeological mathematical model, the numerical analysis model of the groundwater of the area is established by using the finite difference software for numerical calculation, and the sub-module is also used to trace and simulate the groundwater particles. The model is verified by the relevant data recorded by the pore water pressure meter. The simulation results from the model are in good agreement with the actual situation, that is, the groundwater of this mining factory would flow from the northwest area to Meiba Creek in the south and southwest area, and to Xiadaohu Creek in the northeast area. The model could be used for the dynamic simulation and forecasting of the groundwater in the factory, and for the research of the transport pathway of pollutants, at the same time, it could also be used to provide reliable bases for the seepage control project in the factory.

Keywords: finite difference method; groundwater; seepage field; mathematical model; numerical simulation

0 引言

研究区为某一厂区, 总占地面积约 600 km², 厂区生产过程中会形成大量的废水, 处置不当形成渗漏会造成对地下水、地表水的严重污染, 原材料及成品的堆存不当也可能造成土壤污染。因此需要采取防渗帷幕等措施, 隔离地下水与可能的废水的水力联系。

本文在概化了研究区的水文地质条件的基础上, 建立研究区水文地质数学模型, 利用有限差分数值软件及其跟踪模拟子模块建立研究区地下水数值模型, 模拟出厂区地下水渗流场的特征, 并通过现场所埋设的孔隙水压力计测得的相关资料及其处理结果, 验证了模型用于厂区地下水动态模拟和预测及污染物运移途径研究的合理性与正确性。研究成果可为研究区的防渗工程提供重要的依据。

收稿日期: 2011-11-09

修稿日期: 2011-12-25

作者简介: 李凯(1988—), 男(汉族), 山西临汾人, 硕士研究生, 研究方向为岩土工程与地质工程。

通讯作者: 简文彬(1963—), 男(汉族), 福建永定人, 教授, 博导, 主要从事岩土工程与地质工程方面的教学与科研工作。

1 研究区水文地质条件

本场区属中切割低山区,原始地形地势呈北高南低的大体趋势,最高海拔约 684.34 m,原始地形最低侵蚀基面标高约 610 m,最大高差约 75 m。现场地已平整成梯状,整平标高为 641.38 m~628.91 m,由北向南呈梯状展布。

场区的汇水面积约 1.0 km²。根据场地地层分布情况,场地内地下水可划分为四个水质地质单元,即上层滞水含水单元、松散岩类孔隙水含水单元、风化壳网状裂隙水含水单元、基岩构造裂隙水含水单元等四种。

上层滞水含水单元:含水层主要为素填土①层,属弱透水层,富水性差,水量贫乏,其补给来源主要受大气降水。其地下水静止水位埋深一般为 1.00 m~5.00 m,水位起伏较大。

松散岩类孔隙水含水单元:主要分布冲洪积区及山间洼地内,含水层主要为粉质粘土②层,以潜水为主,属弱透水层,富水性一般较差,水量较贫乏,其补给来源受侧向地下水的补给和河水下渗补给。其地下水静止水位埋深一般为 0.50 m~2.00 m。地下水水位标高与地形形态大致相同。

风化壳网状裂隙水含水单元:主要分布于第四系更新统残坡积层或强风化岩层内,赋存于残坡积砂质粘土及强风化岩网状孔隙、裂隙中,接受大气

降水和基岩裂隙水补给,一般向河谷方向排泄。透水性较差,富水性差,地下水位及涌水量受大气降水季节控制明显,变化大,水位埋深一般 2.0 m~10.0 m,多为潜水,局部为微承压水。

基岩构造裂隙水含水单元:主要赋存于基岩中,含水层为基岩中的各种构造裂隙,具半承压性,场地内未见该层地下水位涌出。主要接受大气降水入渗补给,大多数地段构造裂隙水量一般较小,富水性差,水量贫乏,在构造带导水向内透水性较强,水量丰富,具微承压。

厂区地下水迳流方向受地貌控制明显,四周分别被梅坝溪和下道湖溪分割,形成独立的自然边界,因而可确定厂区为相对独立的水文地质单元。厂区整平后的标高与梅坝溪水库库水面高差约 20 m~30 m,总体上来说,一般上部的贮水量相对较少,其主要受大气降水及厂区生活、生产的弃水补给,而中下部的贮水量丰富,受大气降水、上部地下水的下渗及河水的侧向补给。

根据地质调查及水文试验结果:厂区内相对富水性区域主要分布厂区的西北角及东北角一带。厂区的北侧相对地势较高,南侧地势相对较低,出露的地层岩性多为残、坡积土层,全~强风化花岗岩,下部为中风化花岗岩,导水性总体上较差。研究区典型水文地质剖面图如图 1 所示。

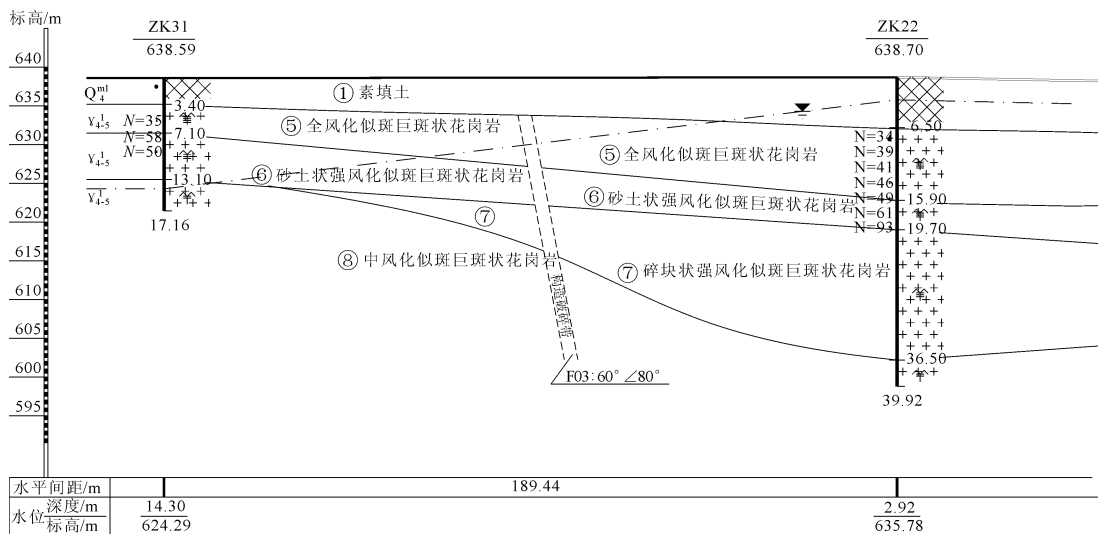


图 1 研究区典型水文地质剖面图

2 地下水数值模拟

2.1 水文地质模型的概化

为建立研究区的地下水流模拟模型,首先要对

实际水文地质条件加以概化,建立水文地质概念模型。根据该区的水文地质条件,厂区西北部及东部边界属于山区,在山谷易形成汇水区,是模拟区的补给区,概化为给定水头边界;东北部为下道湖溪,概

化为河流边界;南部及西南部为梅坝溪,溪水与地下水水力联系密切,因此将其作为河流边界或第一类边界处理。根据勘察资料,钻孔揭示深度范围内,没有连续的隔水层,因此,除局部地下水为微承压,地下水整体不存在承压含水层,故将含水层在垂向上概化为 1 层,即第四系潜水含水层。根据区内含水层类型、岩性、厚度和渗透性等,将含水层内部结构

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x} \left[K \frac{\partial h}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[K \frac{\partial h}{\partial y} \right] + W = \mu_s \frac{\partial h}{\partial t} & (x, y) \in D, t \geq 0 \\ h(x, y, 0) = h_0(x, y) & (x, y) \in D \\ h(x, y, t) = f(x, y, t) & (x, y) \in \Gamma_1, t \geq 0 \\ K_n \frac{\partial H}{\partial n} | \Gamma_2 = q(x, y, t) & (x, y) \in \Gamma_2, t \geq 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: D 为渗流计算域; K 为沿 x, y 坐标轴方向的渗透系数(m/d); h 为点 (x, y) 在 t 时刻水头值(m); h_0 为含水层的初始水头(m); f 为不同时刻的河水位(m); μ_s 为潜水含水层贮水系数; t 为时间(d); W 为源汇项(m/d); K_n 为边界法线方向的渗透系数(m/d); Γ_1 为第一类边界; Γ_2 为第二类边界; q 为渗流区第二类边界上的单位面积流量(m³/d); n 为边界的外法线方向。

2.3 模拟区域及网格划分

本文采用有限差分数值计算方法进行地下水流数值模拟的建模和运算。计算模型覆盖整个厂区并包含厂区西南侧和南侧的梅坝溪,网格划分范围为南北方向 900 m,东西方向 1 200 m,模型空间范围共计 1 080 km²,在对河流地段进行网格加密后,网格

概化为非均质各项同性,地下水在其中流动符合达西定律。综上所述,将研究区地下水流系统概化为有入渗补给的潜水含水层非均质各向同性二维非稳定地下水流系统^[1]。

2.2 地下水渗流数学模型的建立

根据上述水文地质模型的概化,可以建立与其相对应的地下水流数学模型,其微分方程如下^[2-3]:

划分密度为 58 行、30 列和 1 层潜水含水层,所有分层界限(层顶标高、层底标高)均从模拟区内平面图及剖面图等勘探资料中提取。未加密单元的面积 900 m²(30 m × 30 m),加密的河流单元面积为 450 m²(30 m × 15 m),计算单位选用软件自定的缺省值^[4]。

2.4 参数选取

模型所涉及参数主要包括渗透系数、多年平均降雨量(降雨强度)及降雨入渗补给系数、多年平均蒸发量等重要指标,以及贮水率、给水度等重要参数。本次计算充分应用了大量勘探资料中压水、抽水试验成果,首先对厂区的渗透系数取各测点的平均值,并对各个方向上的渗透系数进行了初步选取,然后通过模型识别与校正后,最终确定参数^[5]如表 1、表 2。

表 1 模型计算参数

渗透系数 K /(cm·s ⁻¹)			年平均 降雨量 /mm	降雨入渗 补给系数	年平均 蒸发量 /mm	贮水率 S_s /(cm ⁻¹)	给水度 S_y
K_x	K_y	K_z					
3.54×10^{-4}	3.54×10^{-4}	3.54×10^{-4}	1681.9	0.2*	1672.2	3×10^{-6}	0.2

注:带 * 号数据为根据《水文地质手册》多年平均降雨入渗补给系数表选取的经验值。

表 2 河流边界参数

河水位/m		河床底部标高/m		河床平均厚度 /m	河床渗透系数 /(m·s ⁻¹)	河流平均宽度 /m
起始点	结束点	起始点	结束点			
620	590	619.5	589.5	0.1	1.0×10^{-4}	25

2.5 粒子跟踪

水质点示踪可划分为向前和向后 2 种方法。所谓向前示踪就是指将一定数量的示踪水质点定义在地下水系统补给区,水质点由补给区示踪移动至排泄区,而向后示踪则是将一定数量的示踪水质点定

义在地下水系统排泄区或排泄点,水质点由排泄区或排泄点反向示踪追溯到补给区后停止^[6]。因此,水质点向前示踪最后停止的位置,就是污染物最后运移的位置。本文取厂区电解车间为研究区,在其中设置了 5 个向前示踪粒子,进行污染物粒子示踪

模拟。

2.6 模型识别及验证

在建立空间物理模型以后,首先要进行初始渗流场的拟合,对初始水位以及各个参数进行校正。本文利用 2011 年 8 月 13 日至 2011 年 9 月 20 日的孔隙水压力计观测数据及其处理成果,对本模型进行识别及验证。地下水水位标高等值线比较如图 2、图 3 所示。

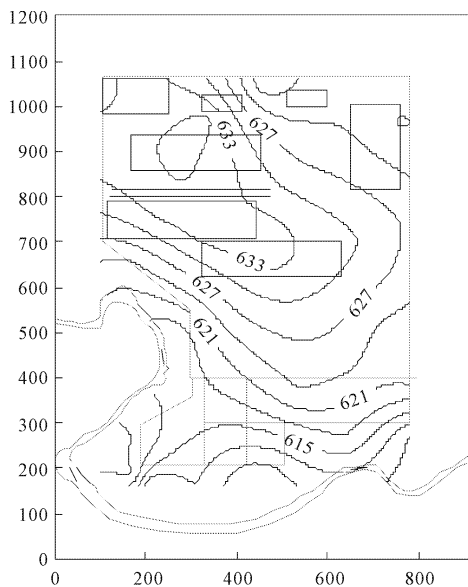


图 2 场区实测地下水水位等值线图(水位标高:m)

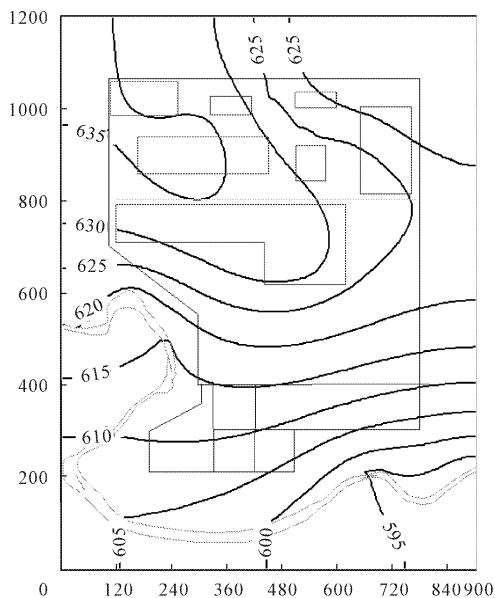


图 3 模拟地下水水位等值线图(水位标高:m)

将模拟地下水水位等值线图与 Surfer8.0 所绘实测地下水水位等值线图^[7]对比可以发现,两者拟合比较好,说明所建立的水文地质数学模型是基本正确的,边界条件概化、水文地质参数及源汇项的

定都是比较合理的,所建立的模型较为真实地反映了模拟区地下水系统的特征,仿真性强^[8],可以用于该厂区地下水渗流变化规律的分析 and 预测。

3 模型应用

3.1 渗流分析

厂区模拟地下水渗流场如图 4 所示,图中有方向的箭头,表示了水流的大小和方向,模拟区平均渗流速度 1.9×10^{-6} m/s,最大渗流速度 2.8×10^{-6} m/s。

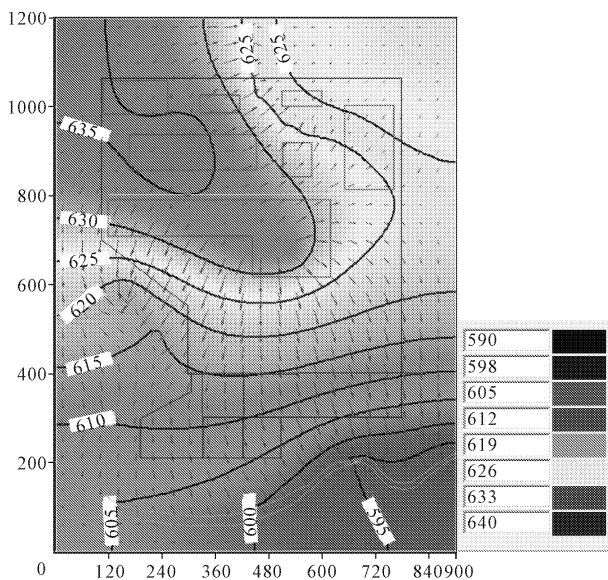


图 4 地下水渗流场等值线示意图(水位标高:m)

由图 4 可知,厂区西北部地下水水位最高,中部次之,东北部、西南部及南部水位较低,地下水以西北部汇水区为中心向四周渗流,厂区的东北部、西南部和南部为主要渗流方向,渗流速度较大,渗流速度整体呈现由小到大再逐渐变小的规律。由此可知,地下水主要通过含水层向西南部和南部的梅坝溪及东北部的下道湖溪排泄。

3.2 粒子示踪

在电解车间研究区指定的 5 个向前示踪粒子,MODPATH 程序将追踪这些粒子经过地下水系统的路径。示踪粒子随时间运移情况如图 5、图 6 所示,图中有方向箭头所组成的迹线,不仅表示了水流方向,也可以作为时间标志以决定一个粒子到达某一目的地的时间长度。

由图 5、图 6 可知,在 3 650 d 内,第 1 个粒子正在向西南方向的梅坝溪中运移,第 5 个示踪粒子在厂区向东北方向运移;在 7 300 d 内,第 1 个粒子已

经运移到西南部的梅坝溪中,第 5 个粒子已经运移到东北部的下道湖溪中,第 3、4 示踪粒子正在向正东方向运移。

因此,在目前的水文地质条件下,未进行防渗设施设置时,厂区电解车间的污染物将会分别向厂区东北部和西北部运移,20 a 之内会到达厂区西北部的梅坝溪上游及东北部的下道湖溪,对溪水直接造成污染。

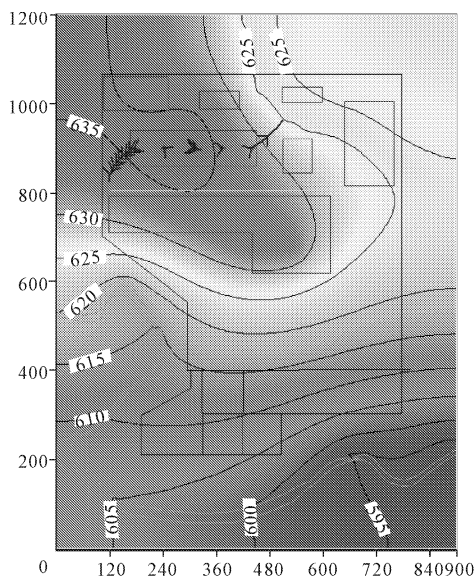


图 5 粒子运移 10 a 示踪示意图

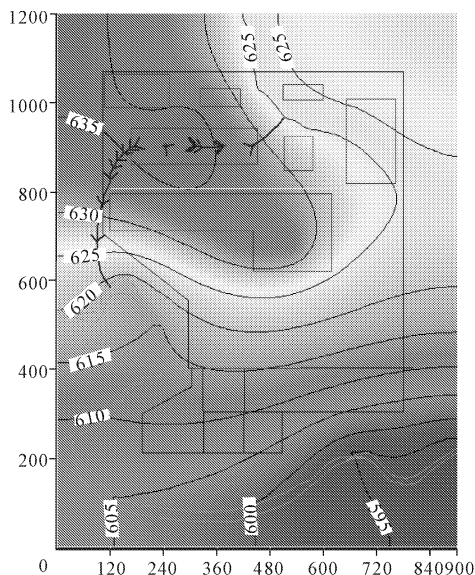


图 6 粒子运移 20 a 示踪示意图

4 结 语

(1) 本文所建立的水文地质概念模型和数学模型是正确的,所选取的参数、计算的源汇项及设定的边界条件都是基本合理的,符合该厂区的实际情况,可用于厂区渗流场分析、地下水动态变化规律的研究及污染物随时间运移情况的预测。

(2) 由模拟地下水渗流场可知,厂区西北部地下水水位最高,中部次之,东北部、西南部及南部水位较低,地下水以西北部汇水区为中心向西南部和南部的梅坝溪及东北部的下道湖溪渗流。

(3) 在厂区目前的水文地质条件下,未进行防渗设施设置时,厂区西北部的电解车间附近的污染物将会向东北部的下道湖溪和西北部的梅坝溪运移,20 a 之内会直接对溪水造成污染。建议结合水文地质勘察结果和实际的工程经验,在厂区的相应段设置防渗帷幕或构筑防渗墙等设施,以防渗漏污水对地下水、梅坝溪和下道湖溪水环境造成污染。

参考文献:

- [1] 孙爱华,朱士江. Visual MODFLOW 在八五三农场地下水数值模拟中的应用[J]. 中国农村水利水电, 2009, (3): 24-27.
- [2] 薛禹群, 地下水动力学[M], 北京: 地质出版社, 1997: 35-46.
- [3] 孙训正. 地下水流的数学模型和数值方法[M]. 北京: 地质出版社, 1981: 25-51.
- [4] 赵松江, 孙书勤. MODFLOW 在四川天台滑坡地下水渗流场模拟中的应用[J]. 灾害学, 2007, 22(1): 50-53.
- [5] Varni M R, Usunoff E J. Simulation of regional-scale groundwater flow in the Azul River basin, Buenos Aires Province, Argentina[J]. Hydrogeology Journal, 1999, 7(2): 180-187.
- [6] 马从安, 李克民, 石磊, 等. Visual MODFLOW 在露天矿地下水模拟中的应用[J]. 环境工程, 2011, 29(1): 98-101.
- [7] 朱士江, 杨正权, 马永胜. 基于线性插值的二维流场数值模拟可视化[J]. 水利与建筑工程学报, 2007, 5(4): 108-110.
- [8] 任友山. 应用 Visual MODFLOW 预报傍河工程点地下水水位[J]. 黑龙江水专学报, 2008, 35(1): 26-29.