

# 试验场地下水流的数值模拟

张永祥, 宁国锋, 高维春

(北京工业大学 建筑工程学院, 北京 100124)

**摘要:** 为研究某市建的试验场是否对周边地下水量造成影响, 采用伽辽金有限单元法, 建立试验场浅层地下水水流模型, 使用 Fortran 语言对所建立模型进行编程, 并对试验场地下水进行了数值模拟。本次计算共分为十二个阶段, 每个阶段的时间步长为 30 d。计算结果表明: 在模型的识别阶段和验证阶段, 所有观测孔水头的计算值与观测值, 在各时段拟合相对误差率分别为 66.28% 和 88.53%, 所建模型基本可用于试验场地下水水流计算。周边地下水水位增加 94.08 mm, 试验工程建成后会对周边地区造成影响。

**关键词:** 地下水; 数值模拟; 有限元法; 预测; 试验场

中图分类号: TV138

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2012)06-0137-03

## Numerical simulation of groundwater flow in test field

ZHANG Yongxiang, NING Guofeng, GAO Weichun

(College of Civil Engineering and Architecture, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

**Abstract:** In order to study whether test field affect surrounding underground water or not, the paper used the Galerkin finite element method to establish shallow groundwater flow model of test field and used Fortran language to program to flow model and carried on numerical simulation to test field underground water. The calculation is divided into twelve stages, the time step of each stage is 30 days. The calculation results show that in the model recognition phase and confirmatory phase, all of the observation hole water head are calculated and measured, relative error rates are 66.28% and 88.53% in each period, the model can be used to conduct site groundwater flow calculation. The level of groundwater in surrounding area increases 94.08mm, test project after completion can affect the surrounding field.

**Key words:** groundwater; numerical simulation; finite element method; forecast; test field

在某市建的一个试验场, 试验场从进水后, 水位的提升势必会对周边地区造成一定影响。为更好地掌握周边地下水位随试验场水位的变化情况, 需要建立能够反映客观情况的地下水水流数值模拟模型。描述地下水系统的偏微分方程通常非常复杂, 一般很难求得其解析解, 而数值法求助于高速度的数字计算机, 为偏微分方程提供了另外一种逻辑解法, 它已经成为求解大型地下水水流问题的主要工具<sup>[1]</sup>。模型计算指的是进行地下水流动或溶质运移正反演计算, 常用的方法主要有有限差分法、有限元法、边界元法等<sup>[2]</sup>。有限元法的基本思想可归纳为: 剖分、插值、求权三部分, 即将一个连续的求解区域任意分成适当形状(三角形或四边形)的许多微小单元, 并于各小单元分片构造插值函数, 然后根据极值原理(变分法或加权余量法), 将问题化为控制所有单元的有限元方程, 把总体的极值作为各单元极值之和, 即将局部单元总体合成, 形成嵌入了指定边界

条件的代数方程组, 求解该方程组就得到各结点上待求的函数值。有限元法特别适合于几何、物理条件比较复杂的问题<sup>[3]</sup>。本文以整个试验场及附近周边作为研究对象, 在对研究区的水文地质和地下水系统分析的基础上, 建立地下水水流数值模拟模型, 采用有限单元法及 Fortran 语言编程对所建立模型进行求解, 并对其浅层地下水进行了数值模拟研究, 旨在对试验场周边地下水量问题提供一个良好的分析平台。

## 1 区域地质地貌

### 1.1 研究区地形地貌

研究区地貌属河谷的波状台地, 地形总趋势东高西低, 向河谷倾斜, 地貌形态单元为波状台地, 地形总趋势南高北低, 呈波状起伏, 相对高差较小, 海拔高度 172 ~ 192 m, 地势开阔平坦, 坡度较小。

收稿日期: 2012-08-25; 修回日期: 2012-09-10

作者简介: 张永祥(1962-), 男, 黑龙江绥化人, 教授, 博士生导师, 从事水资源管理和污染控制模拟技术等方面的研究。

通讯作者: 宁国锋(1986-), 女, 山西人, 硕士研究生, 研究方向为水资源与水环境模拟。

## 1.2 研究区地质构造

研究区地层结构由上部第四纪松散沉积物及下部白垩纪基岩组成,第四纪地层岩性主要以人工填土、粘性土及砂性土组成,总厚度 14~16 m,下部为白垩纪泥岩,厚度大于 300 m。自上而下地层岩性为:壤土、粘性土层、砂性土层、泥岩层。河漫滩上部主要由第四纪全新统粉质壤土和砂性土组成,具有上细下粗的河谷相二元结构特征,底部为白垩纪姚家组泥岩、泥质砂岩,地形略起伏。

从区域地质资料分析,该河谷地形具有东部上升,西部相对下降的地壳变化特征,由于所处大地构造相对稳定区域,因此,区内构造极不发育,从工作区的上游到下游的基岩地质图上未见有构造带通过,且新构造运动也没出现过。

## 2 地下水流数值模拟

### 2.1 水文地质概念模型

2.1.1 研究区范围 研究区面积为 152 998 m<sup>2</sup>。试验场侧林地向东南延伸至稻田一线为北侧边界,蓄水池南岸至出水口一线为南侧边界,河流东岸为西侧边界,试验场东侧延伸到稻内 50 m 左右平行河大堤一线为东侧边界。研究区见图 1 所示。

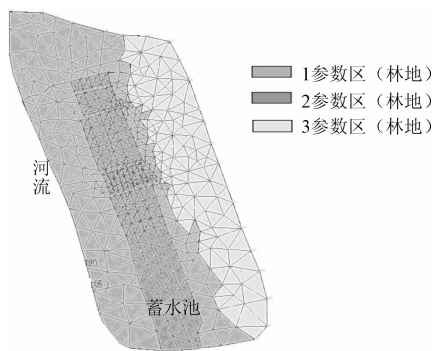


图 1 试验场研究区域图(剖分与参数分区)

2.1.2 地下水系统的概化 研究区含水层为粘性土上层滞水以及河谷砂层中孔隙潜水,局部粘性土较厚有微承压水存在,钻孔资料显示地下水埋深一般在 2.2~3.5 m。上部粘性土为弱透土层,底部泥岩为隔水层。根据含水层的岩性、厚度、导水特征等,将含水层概化为均质各向同性二维潜水含水层。研究区含水层系统侧向边界分为定水头边界和流量边界。地下水水位统测资料表明,东侧边界、北侧边界和西侧边界概化为流量边界,南侧边界概化为定水头边界。

### 2.2 数学模型的构建

对研究区概化为均质、各向同性、二维非稳定潜水地下水水流系统,可用微分方程的定解问题描述<sup>[5]</sup>:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K(H-z) \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K(H-z) \frac{\partial H}{\partial y} \right) + W - P = \mu \frac{\partial H}{\partial t} \quad (x, y) \in D, t \geq 0$$

$$H(x, y, t) |_{t=0} = H_0(x, y) \quad (x, y) \in D, t \geq 0$$

$$H(x, y, t) |_{\Gamma_1} = H_1(x, y, t) \quad (x, y) \in D, t \geq 0$$

$$T \frac{\partial H}{\partial n} |_{\Gamma_2} = q(x, y, t) \quad (x, y) \in D, t \geq 0$$

式中:  $K$  为渗透系数, m/d;  $\mu$  为给水度;  $t$  为时间长度, d;  $H$  为潜水地下水水位, m;  $z$  为隔水层标高, m;  $n$  为边界的外法线方向单位向量;  $W$  为地下水系统的补给量;  $P$  为地下水系统的排泄量;  $T$  为导水系数, m<sup>2</sup>/d;  $H_0(x, y)$  为渗流场内初始水位, m;  $H_1(x, y)$  为第一类边界水位, m;  $q(x, y, t)$  为第二类边界的单宽流量, m<sup>3</sup>/(m·d);  $\Gamma_1$ 、 $\Gamma_2$  分别为第一、二类边界。

### 2.3 网格剖分和参数的分区

在研究区单元网格剖分时对试验场氧化塘、表流湿地、生态河道、混合型植物湿地、蓄水池、稻田等处进行了加密剖分,共剖分 831 个三角单元,439 个节点。其中第一类边界结点数 3 个,即 437~439 为第一类边界结点,处理为定水头边界;第二类边界结点数 41 个,即 396~436 为第二类边界点,处理为流量边界,各结点流量通量按达西定律进行计算。

根据研究区试验工程布置、周边水文地质条件和农田分布条件,把研究区划分为三个参数区(见图 1)。各分区参数的初值按抽水试验成果给出。含水层的初始流场由实测水位资料通过插值方法获得。

### 2.4 源汇项的处理

研究区地下水含水层系统包括大气降水补给、试验工程入渗补给、农田灌溉入渗补给及河流侧向补给等;地下水的主要排泄方式为潜水蒸发、人工开采、沿河道的排泄以及侧向排泄等。

降雨入渗补给量采用多年平均降雨量与降雨入渗系数计算,入渗率为 0.15,与降雨入渗系数确定面源降雨入渗补给强度为 0.002 977 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>·d)。蒸发排泄量是通过多年平均蒸发量与蒸发率进行计算,蒸发率 0.05,确定面源蒸发强度为 0.002 77 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>·d)。试验工程入渗补给、农田灌溉入渗补给中,泛氧化塘是根据不同工况平均进、出水流量值计算的水量损耗平均表面负荷的平均值。确定渗入补给为 30% 及补给强度。其它补给处理方法类似,具体值见表 1。研究区内有 1 眼饮用水井,确定为非结点井,开采量为 0.25 m<sup>3</sup>/d。

### 2.5 模型的识别与校正

为保证所建数学模型能反映实际流场的特点,

|            | 表 1 试验工程与农田灌溉的补给量 |         |         |          | $\text{m}^3/\text{d}, \text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ |
|------------|-------------------|---------|---------|----------|---------------------------------------------------------------|
|            | 泛氧化塘              | 表流湿地    | 生态河道    | 植物湿地     | 稻田补给                                                          |
| 水量损耗平均表面负荷 | 0.0616            | 0.0062  | 0.0513  | 0.00545  | 0.0513                                                        |
| 补给强度       | 0.01848           | 0.00186 | 0.01539 | 0.001635 | 0.01539                                                       |

在进行模拟预报前,必须对数学模型进行校正(识别),即利用建立的数学模型,计算观测孔所在单元的水头,并与实测水头对比,从而反求有关的水文地质参数。水文地质参数是地下水均衡计算和地下水资源计算的基础<sup>[6]</sup>。根据研究区地下水监测资料,选定 2011 年 10 月 31 日为模拟起始时间,用 2011 年 11 月 30 日的流场识别水文地质参数,模型识别阶段结果见图 2,相对误差率为 66.28%。通过适当地调整模型参数,使拟合孔实际水位与计算水位趋势保持一致,数值尽量吻合,参数识别结果见表 2。

| 表 2 各参数区渗透系数、给水度表 |       |      | $\text{m}/\text{d}$ |
|-------------------|-------|------|---------------------|
| 参数区               | 渗透系数  | 给水度  |                     |
| 1                 | 8.156 | 0.30 |                     |
| 2                 | 5.256 | 0.33 |                     |
| 3                 | 4.356 | 0.33 |                     |

选取 2011 年 12 月 30 日进行模型验证,模型验证阶段结果见图 3,相对误差率为 88.53%。模型识别和检验结果证明所建立的数学模型、边界条件、水文地质参数和源汇项的确定都是合理的,该模型可以用于地下水流系统的预报。

| 表 3 地下水水量计算表 |        |       |       |      |        |       |         | $\text{mm}$ |
|--------------|--------|-------|-------|------|--------|-------|---------|-------------|
| 参数区          | 工程渗入量  | 蒸发量   | 降雨量   | 井抽水量 | 稻田补给量  | 第一类边界 | 第二类边界   | 均衡量         |
| 1            | 1.36   | -2.87 | 10.83 | 0.25 | 0      | -3.25 | -217.01 | -210.69     |
| 2            | 281.06 | -1.29 | 4.85  | 0    | 0      | -0.41 | -12.93  | 271.28      |
| 3            | 0      | -1.79 | 6.74  | 0    | 117.71 | 0     | -28.58  | 94.08       |
| 总计           | 282.42 | -5.95 | 22.42 | 0.25 | 117.71 | -3.66 | -258.52 | 154.67      |

4 结 语

(1)地下水模拟模型的构建是一个复杂的系统工程,需要掌握大量的输入输出数据,同时对模型的边界和参数分区也要有准确的把握,一个准确的地下水模型,可以为诸多水资源问题的研究提供高效的仿真平台。本文在对某市试验场原水文地质和地下水系统进行细致分析的基础上,以掌握的大量输入数据建立了地下水水流模型。模型计算结果表明:一年以后,周边地下水量增加 94.08mm,试验工程建成后对周边地区造成一定影响。

(2)可通过在试验场周边布置少量抽水井以减少对周边地下水的渗入量。或在周边挖排水渠道等

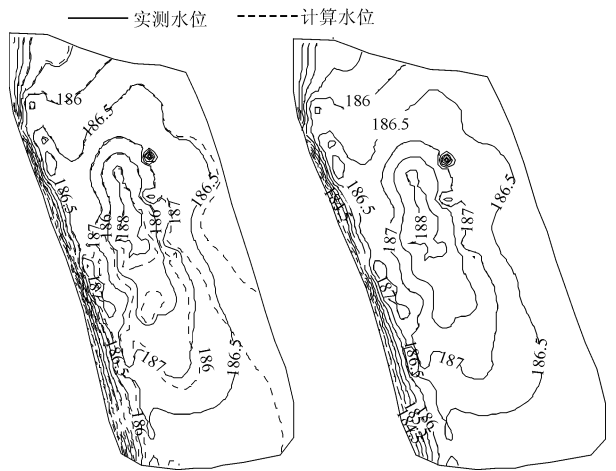


图 2 模型识别阶段拟合水位 图 3 模型验证阶段拟合水位

3 地下水位的变化预测

利用以上所建数学模型对研究区地下水水位进行模拟计算,结果显示,一年以后,模拟计算的地下水水量见表 3。周边地下水量增加 94.08 mm。研究区地下水流场由试验工程向四周逐渐升高,而初始流场是中间(试验工程)高,四周低。

措施以避免浸没问题的发生。

参考文献:

[1] 唐文元. 海河流域平原区浅层地下水数值模拟[D]. 北京:中国地质大学,2007.5.

[2] 丁继红,周德亮,马生忠. 国外地下水模拟软件的发展现状与趋势[J]. 勘察科学技术,2002(1):37-42.

[3] 郑邦民,赵 听. 计算水动力学[M]. 武汉:武汉大学出版社,2002.

[4] 吴江航,韩庆书. 计算流体力学的理论、方法及应用[M]. 北京:科学出版社,1988.

[5] 薛禹群. 地下水动力学[M]. (第二版). 北京:地质出版社,1997.

[6] 张海仑,金光炎,曹万金,等. 平原地区水资源研究[M]. 上海:学林出版社,1985.