

地下水现场弥散试验参数计算

卢德生 缪俊发 茹以群
(同济大学, 上海 200092)

【摘要】 通过现场弥散试验测定浅层含水层的水动力弥散参数,用有限分析法模型模拟弥散试验场,为建立滨州市浅层地下水溶质运移模型提供依据。

【关键词】 弥散试验;有限分析法;弥散参数;溶质运移模型

【Abstract】 A dispersion test is carried out in field in order to get the dispersion parameters of the shallow aquifer. FEM model is used to simulate the dispersion process in the test area.

【Key words】 dispersion test; finite element method (FEM); dispersion parameter; resolvable substance migrating model

0 引言

滨州市地处山东省北部,位于黄河北岸,属黄河下游冲积平原。为了建立滨州市浅层地下水的溶质运移模型,在模型结构确定的情况下,需要确定含水层的弥散参数。由于实验室模拟与野外就地测量得到的参数有很大差异,因此弥散参数宜在现场测定。为此进行了一次天然流场下的二维水动力弥散试验。以现场试验资料计算水动力弥散参数。

需要的弥散参数主要是各向同性多孔介质的纵向弥散度和横向弥散度。建立现场弥散试验场的溶质运移模型,用有限分析法求解,将计算结果与实测资料拟合,最后确定弥散参数。

1 现场弥散试验

现场弥散试验点选在滨州市蒲城水库北面的蒲园公园内。该处浅层含水层的岩性为粉砂和砂质粉土,颗粒较细,下层较上层密实。地下水位天然埋深 1.0~1.5 m,水力坡度为 0.082,水质类型为 $\text{HCO}_3^- - \text{Cl}^- - (\text{Na}^+ +$

$\text{K}^+) - \text{Mg}^{2+}$ 型,矿化度 0.80 g/L。

现场弥散试验井共四个,其布置见图 1。 $0^\#$ 井为示踪剂注入井, $1^\#$ 、 $2^\#$ 、 $3^\#$ 井为观测井。 $1^\#$ 井沿 $\text{NW}10^\circ$ 方向布置,距注入井 6 m, $2^\#$ 井沿正北方向布置,距注入井 10 m, $3^\#$ 井沿 $\text{NW}25^\circ$ 方向布置距注入井 15 m,四口井均为井径 $\phi 40$ cm,深 8 m 的非完整井。成井后先进行洗井,使井壁孔隙通畅。

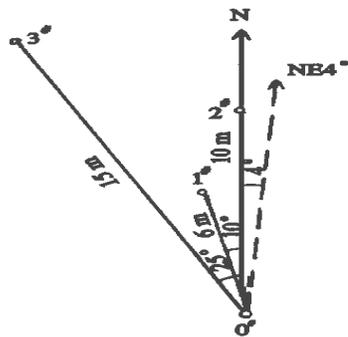


图 1 弥散试验井位置图

试验选用食盐作为示踪剂, 模拟溶质的运移情况。示踪剂投放前, 先测定各井中静止水位和本底浓度, 然后将配制好的浓度为 ρ_0 ($\rho_0 = \rho(\text{NaCl}) = 50 \text{ g/L}$) 的 NaCl 示踪剂 1 000 L, 在短时间内 ($t = 61 \text{ s}$) 注入井中。

示踪剂投放后, 定时在观测井中采取水样, 现场进行水质分析, 测定观测井中 Cl^- 离子浓度的变化。采样时间先疏后密, 当观测到示踪剂后, 取样时间加密。

试验时示踪剂 NaCl 的浓度通过 Cl^- 离子浓度来确定, Cl^- 离子浓度变化采用 SFX-2A 型数字电导仪测定。为观测示踪剂在垂直方向上的变化, 试验中分别在 1[#]、2[#]、3[#] 观测井中水下的 2.2 m 和 5.0 m 深度采样。现场试验持续 12 d。

将实测浓度资料绘制成 $\rho \sim \lg t$ 曲线, 1[#]、2[#] 观测井 2.2 m 和 5.0 m 处的 $\rho \sim \lg t$ 曲线见图 2 ~ 图 5。

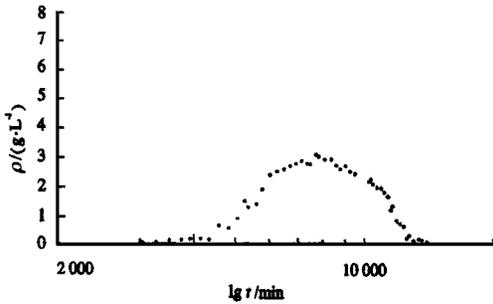


图 2 1[#] 观测井 2.2 m 深处实测浓度曲线

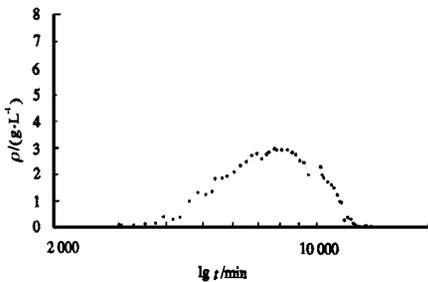


图 3 1[#] 观测井 5.0 m 深处实测浓度曲线

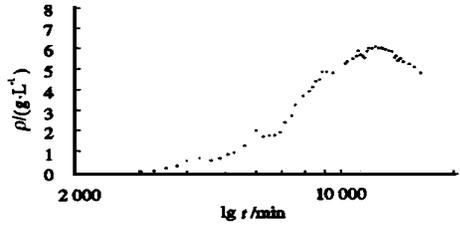


图 4 2[#] 观测井 2.2 m 深处实测浓度曲线

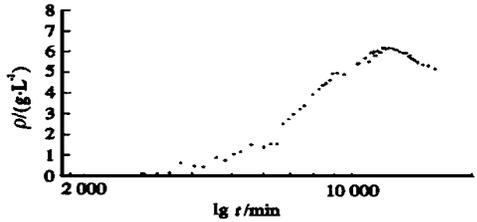


图 5 2[#] 观测井 5.0 m 深处实测浓度曲线

由于 3[#] 观测井偏离地下水主流向较多, 未观测到示踪剂的影响。

2 有限分析法

示踪剂选用 NaCl 溶液, Cl^- 离子在地下水中的运移过程中基本是稳定的, 与含水层介质的吸附作用可以忽略。模拟区内二维溶质运移的控制方程为:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = D_{xx} \frac{\partial^2 \rho}{\partial x^2} + 2D_{yy} \frac{\partial^2 \rho}{\partial x \partial y} + D_{yy} \frac{\partial^2 \rho}{\partial y^2} - v_x \frac{\partial \rho}{\partial x} - v_y \frac{\partial \rho}{\partial y} - \frac{w}{n} \cdot \rho \quad (1)$$

式中: ρ —— 溶质的浓度, g/L ;

t —— 时间变量, d ;

D_{xx} 、 D_{yy} 、 D_{yy} —— 水动力弥散系数张量的分量, m^2/d ;

v_x 、 v_y —— 分别为 x 和 y 方向上地下水的实际流速, m/d ;

w —— 单位体积含水层的抽水量, t/m^3 ;

n —— 有效孔隙度。

模拟区内地下水运动主要受地下水天然流场控制, 溶质运移以对流弥散为主, 分子扩

散忽略不计,则弥散系数可由下式表示:

$$\begin{aligned} D_{xx} &= (\alpha_L v_x^2 + \alpha_T v_y^2) / v \\ D_{yy} &= (\alpha_L - \alpha_T) v_x v_y / v \\ D_{yx} &= (\alpha_T v_x^2 + \alpha_L v_y^2) / v \end{aligned} \quad (2)$$

式中: α_L 、 α_T ——纵向和横向弥散度;

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}, \text{ 为平均实际流速。}$$

由于对流弥散方程定解问题的复杂性,因此主要采用数值法求解。在对流弥散方程中,当弥散项占主导地位时,使用各种常见的数值方法都能得到令人满意的结果。但当方程中的对流项占主导地位时,各种常见的数值方法都会遇到困难——产生弥散与过量这两类误差,数值解出现振动,而且算不准陡的浓度峰面。本文采用有限分析求解该方程,该方法能较好地克服上述困难。

有限分析法将计算区划分成正方形单元(参见图6中的阴影部分,四边形单元可通过坐标变换转化为正方形单元),每个单元包含9个结点,在每个正方形单元上求近似的解析解,然后建立含9个结点未知量的代数方程,最后联合成一个代数方程组,求解该方程组即获得各结点上的未知浓度值。由有限分析法建立的一个单元上的代数方程为:

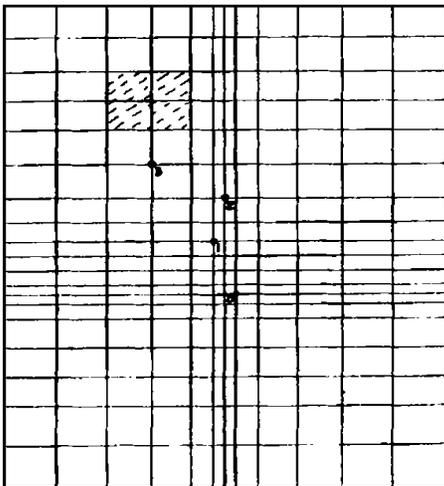


图6 试验场网格剖分图

$$\begin{aligned} \left[1 + \frac{\phi_i}{\alpha_1^p \Delta t} \right] c_9^{k+1} = \\ \sum_{i=1}^8 \phi_i c_i^{k+1} + \left[\frac{\phi_i}{\alpha_1^p \Delta t} - \frac{w \phi_i}{n \alpha_1^p} \right] c_9^k \end{aligned} \quad (3)$$

其中: ϕ_i 、 ϕ_i ($i=1, \dots, 8$)、 d_i^p 的表达式参见文献[1]。

上标 $k+1$ 、 k 表示计算时间段。

3 弥散试验场的模拟计算

划定弥散试验场的模拟计算区为 $50 \text{ m} \times 40 \text{ m}$ 的矩形区域,将计算区剖分成 228 个矩形单元,260 个结点(见图6)。注入井和观测井均位于结点上。在计算时间段内,溶质运移未影响到四面边界上,因此四面边界上的边界条件可定为:

$$\rho(x, y, t) \Big|_{\Gamma} = 0$$

而初始条件为:

$$\begin{aligned} \rho(x, y, t) \Big|_{t=0} &= 50 \text{ g/L}, \text{ 当 } x=0, y=0 \\ \rho(x, y, t) \Big|_{t=0} &= 0, \text{ 当 } x \neq 0, y \neq 0 \end{aligned}$$

由每4个单元组成一个大单元(含9个结点)建立方程(3),最终形成198维含有198个未知量的方程组,求解该方程组就可求得 $k+1$ 时段各结点上未知的浓度值。

先假定 α_L 和 α_T 的值,将计算的浓度值与实测值进行拟合比较,如拟合效果不佳,则修正 α_L 和 α_T 值,直至拟合效果满意为止,此时的 α_L 和 α_T 值即为所要求的值。

经反复拟合计算,最终确定纵向弥散度 α_L 为 0.61 m,横向弥散度 α_T 为 0.08 m。

4 结论

现场弥散试验定解问题采用有限分析法求解,求解过程表明该方法数值稳定性良好。此次模拟计算对以有限分析解建立滨州市浅层地下水的溶质运移模型奠定了基础。

参 考 文 献

- 1 王宥智,陈雨孙. 非稳定弥散对流方程的有限分析解. 工程勘察, 1992, (2): 25~30

收稿日期: 1998-11-26