

黄土潜土层深井降水三维有限元模拟研究

康 婷¹, 白应生¹, 郭增玉²

(1 空军工程大学 工程学院, 陕西 西安 710038; 2 西安理工大学 水利水电学院, 陕西 西安 710048)

[摘要] 视抽水井为定流量边界, 并假定流量沿井壁的分布是均匀的, 在此条件下建立了黄土厚潜土层深井抽水时的三维渗流模型, 并用C++语言编制了三维有限元程序, 计算了单井抽水、双井抽水时水位随时间的变化规律, 计算结果与观测结果误差较小。另计算了少陵塬隧洞第一期降水方案的降水效果, 表明其不能满足施工进度要求, 并对此方案作了修改, 在后期施工中取得了良好的降水效果。

[关键词] 黄土潜土层; 三维有限元; 深井降水

[中图分类号] TU 46⁺ 3

[文献标识码] A

[文章编号] 1671-9387(2006)04-0139-04

随着高层建筑、地铁、隧道等工程的发展, 降低地下水位的问题日益突出。如何有效评价降水方案的合理性及预测动水位, 较好地指导施工开挖进度, 是工程实践中普遍存在的一大难题。目前, 降水问题大多采用经验公式或按二维流问题来计算, 但存在与实际情况不相符合的问题。三维渗流模型在地下水资源的优化管理^[1]中比较常见, 但并不能直接应用于降水工程, 因为二者所要达到的目标不同, 所考虑的渗流场范围也不同。对地下水资源进行合理开采时, 影响范围内地下水位的下降受到严格控制, 降深一般较小, 抽水井常常当作定水头边界。在降水工程中, 受施工场地、施工工期的限制, 在短期内须将水位降到预定高度, 降深一般较大, 井壁水位随抽水时间的变化而变化。

用有限元方法模拟降水问题时, 抽水井的处理是一个难点^[2]。在以往的二维有限元分析中, 一般不将排水井作为流量边界, 而是将其作为网格的一个结点来近似地反映排水作用。文献[3]指出, 排水孔直径大小对渗流场有很大影响, 把排水井当作一个结点不能完全反映排水井的尺寸效应, 多数情况下将导致较大的计算误差。且根据本人的计算经验, 这样做极易引起水位异常。

本文结合黑河续建工程少陵塬隧洞降水工程, 将抽水井当作定流量边界处理, 并假定流量沿井壁的分布是均匀的, 参考文献[4]的方法建立了黄土区三维潜水渗流数学模型, 并参考文献[5-7]用C++语言编制了三维有限元程序, 分别计算了单井抽水和

双井抽水时地下水位随抽水时间的变化规律。同时对少陵塬隧洞第一期降水方案作了修改, 并在后期施工中取得了良好的降水效果。说明本文所建立的三维潜水渗流模型和所采用的计算方法具有一定的可靠性, 可以为黄土地区类似工程提供参考。

1 少陵塬区潜水渗流数学模型

1.1 工程概况

黑河少陵塬隧洞位于陕西省西安市长安县少陵塬区, 根据水文地质与工程地质勘察报告, 地下水位埋深为地面以下25 m左右, 而隧洞位于塬面以下35~52 m, 即地下水位最大高出洞底以上18 m。为了保证施工安全和施工质量, 隧洞开挖前必须进行人工降水。

1.2 概念模型及渗流数学模型

根据少陵塬隧洞的水文地质和工程地质勘察报告, 少陵塬区黄土层地下水为孔隙潜水, 地层岩性主要为黄土、黄土状壤土夹古土壤, 呈成层分布^[8]。群井抽水时, 降水区域内的地下水流具有明显的三维流特征, 因此将其概化为三维潜水流动, 地层概化为均质各向异性, 渗流基本偏微分方程为:

$$\frac{\partial}{\partial x} (k_x \frac{\partial \Psi}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (k_y \frac{\partial \Psi}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (k_z \frac{\partial \Psi}{\partial z}) = 0$$
$$(x, y, z) \quad U \quad (1)$$

式中, x, y, z 为迪卡尔坐标; k_x, k_y, k_z 为 x, y, z 轴方向上的渗透系数(m/h); Ψ 为水头; U 为所选定的渗流区域。

· [收稿日期] 2005-07-01

[作者简介] 康 婷(1977-), 女, 陕西佳县人, 讲师, 硕士, 主要从事岩土工程研究。

少陵塬塬面平坦广阔,因此可认为其在平面上无限延伸,地下水水面基本水平,抽水时实际定水头边界远在300~400m之外,根据计算需要,人为划定一个边界作为流量边界(称为虚切流量边界)^[1,7],依据水均衡原理,可用数学关系式表示为:

$$-K \frac{\partial \Psi}{\partial n} = v_n(t) \quad (2)$$

式中, K 为渗透系数向量; n 为虚切边界面的外法线方向单位矢量; v_n 为 n 方向的渗流速度; t 为抽水时间(h)。

渗流区获得补给时, $\frac{\partial \Psi}{\partial n} > 0, v_n < 0$; 从渗流区向外排泄时, $\frac{\partial \Psi}{\partial n} < 0, v_n > 0$; 对于隔水边界, $\frac{\partial \Psi}{\partial n} = 0$ 。

将抽水井当作定流量边界,假定流量沿井壁分

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x}(k_x \frac{\partial \Psi}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(k_y \frac{\partial \Psi}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(k_z \frac{\partial \Psi}{\partial z}) = 0, \Psi(x, y, z, 0) = H_0(x, y, z) = H_0 & \text{初始条件} \\ -K \frac{\partial \Psi}{\partial n} = v_n(t) & \text{虚切流量边界} \\ -\mu \frac{\partial \Psi}{\partial t} = q_z, \Psi = z & \text{自由水面边界} \\ -K \frac{\partial \Psi}{\partial n} = \frac{Q}{2\pi r_c h_s} & \text{抽水井边界} \end{cases}$$

式中, H_0 为初始地下水水面(m)。

2 单井抽水和双井抽水时的地下水位模拟

2.1 计算参数的选取

静水位高程以水文地质勘查报告为准。初始含水层厚度为50.4m左右。

渗透系数以现场抽水试验结果为准,取为:

$$k_x = k_y = 0.092 \text{ m/h}, k_z = 0.138 \text{ m/h}$$

大量的计算分析表明,选取的模型不同,计算所得参数尤其是给水度有很大的差异。给水度的取值主要根据单井抽水试验结果^[8]和经验值范围^[4,9]确定,即

$$\mu = 0.14$$

用C++语言编制了三维有限元程序,计算了少陵塬隧洞单井抽水、双井抽水时的水位降深,计算结果与试验观测结果模拟效果较好。对少陵塬隧洞第一期降水方案作了评价,并提出修改建议。施工实践证明第二期降水方案比较合理,有力地保证了隧洞施工的顺利进行。

2.2 单井抽水时的地下水位模拟

以9#井作为抽水井,井深75m,平均抽水流量为18m³/h,在平面上的计算区域示意图见图1。下文

布均匀,则有:

$$-K \frac{\partial \Psi}{\partial n} = \frac{Q}{2\pi r_c h_s} \quad (3)$$

式中, r_c 为抽水井半径(m); h_s 为井壁水位高程; Q 为井平均抽水量(m³/h)。

在自由水面上有:

$$-\mu \frac{\partial \Psi}{\partial t} = q_z, \Psi = z \quad (4)$$

式中, μ 为潜水含水层的给水度,无量纲; q_z 为从浸润曲线边界流入渗流区的单位面积流量在水平面上的投影。

根据上述分析,少陵塬区群井抽水时三维潜水渗流数学模型可表示为:

图2,图5,图6中的横坐标 x 均表示距计算边沿的距离。

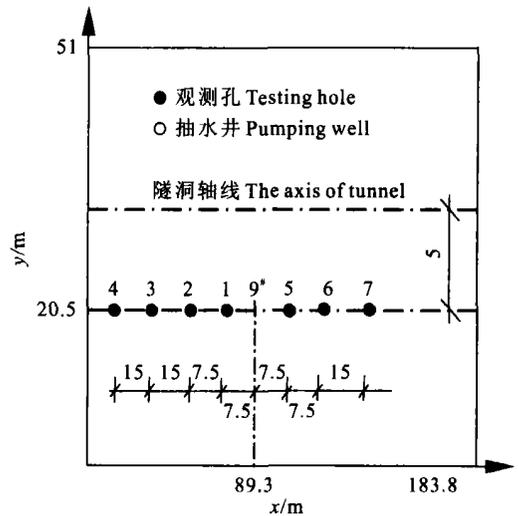


图1 单井抽水计算区域示意图

Fig. 1 Sketch of calculated range of single well pumping

计算区域内,开始时共划分为2770个单元,上机计算耗时40min左右,计算水位与观测水位随时间的变化关系如图2所示。1号观测孔处降深速度计算值与观测值随时间的变化关系见图3。由图2和图3可以看出,计算水位与观测水位模拟较好;降深速

度的观测值与模拟值基本一致, 在开始抽水的一段时间内降深速度较大, 随着抽水时间的延长, 降速逐

渐减小。

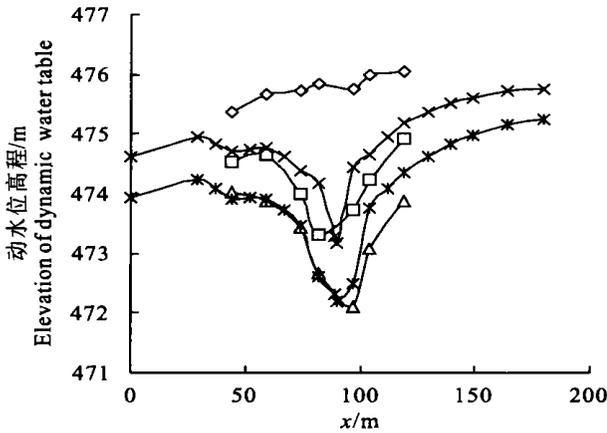


图2 单井抽水计算水位与观测水位的比较

- - - 静水位; - - - . 50 h 观测值; - - - . 100 h 观测值;
 - * - . 50 h 计算值- * - . 100 h 计算值

Fig 2 Comparison between tested and calculated water table of single well pumping
 - - - . Static water table; - - - . 50 h tested value;
 - - - . 100 h tested value; - * - . 50 h calculated value;
 - * - . 100 h calculated value

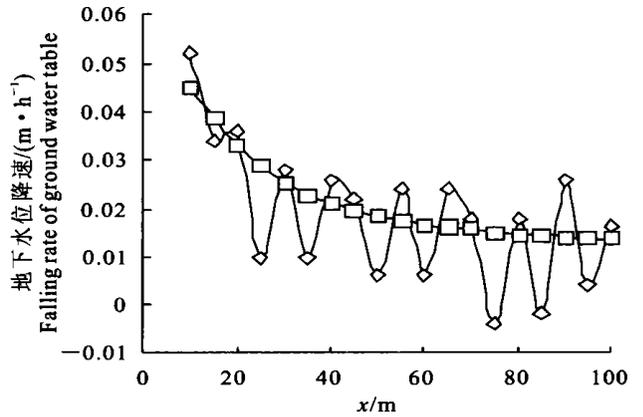


图3 1号观测孔计算降速与观测降速的比较

- - - . 观测值; - - - . 计算值

Fig 3 Comparison between tested and calculated water table fall rate in No. 1
 - - - . Tested value; - - - . Calculated value

2.3 双井抽水时的地下水位模拟

双井抽水时的计算区域如图4所示, 其中9#井和10#井为抽水井, 10#井井深60 m, 平均出水量11 m³/h; 9#井平均出水量25 m³/h。单元剖分数为2 940个, 计算结果和观测结果如图5所示。

但在计算时选取了统一的渗透参数所致。

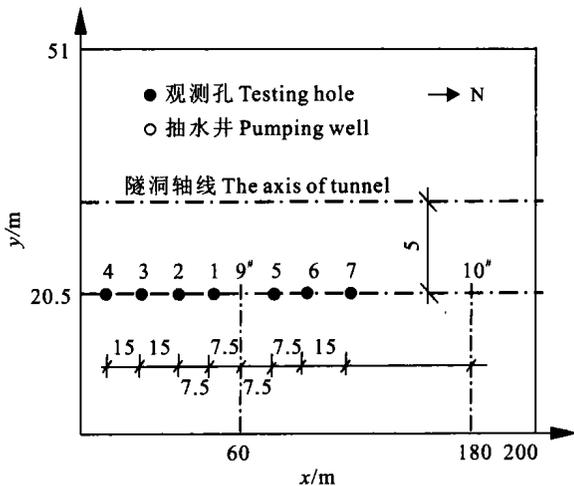


图4 双井抽水计算区域示意图

Fig 4 Sketch of calculated range of double wells pumping

从图5可以看出, 9#井以北地层的水位模拟较好, 而以南的模拟结果较差。这是因为9#井以北地层的透水性较好, 而其以南地层的透水性相对较差,

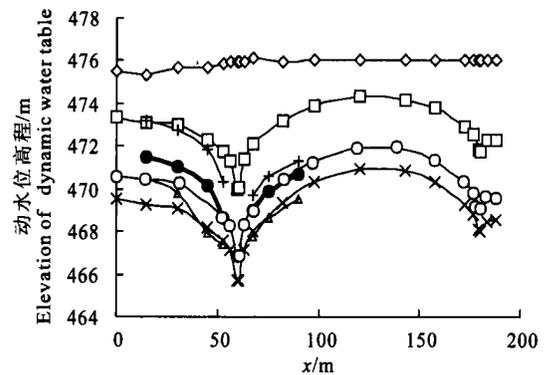


图5 双井抽水计算水位与观测水位的比较

- - - 静水位; - - - . 50 h 计算值; - - - . 100 h 计算值;
 - * - . 120 h 计算值; - + - . 50 h 观测值; - - - . 100 h 观测值;
 - - - . 120 h 观测值

Fig 5 Comparison between tested and calculated water table of double wells pumping
 - - - . Static water table; - - - . 50 h calculated value;
 - - - . 100 h calculated value; - * - . 120 h calculated value;
 - + - . 50 h tested value; - - - . 100 h tested value;
 - - - . 120 h tested value

3 少陵塬隧洞降水方案评价

少陵塬隧洞第一期降水方案井距120 m, 沿洞

轴线右侧布置,距洞轴线5.0m,连续抽排4个月计算的控制点处的地下水位线如图6所示。

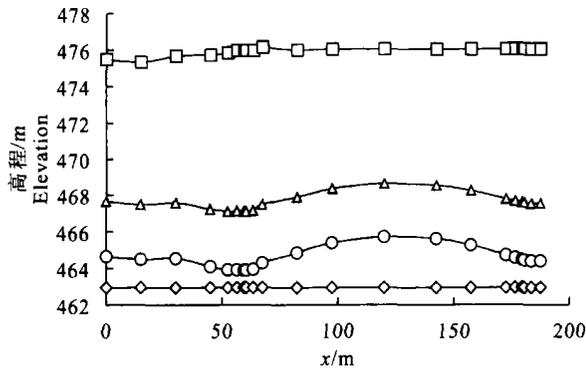


图6 第一期降水方案控制点水位随时间的变化关系

- - - 洞底高程; - - - 静水位高程; - - - 抽水2个月后的水位高程; - - - 抽水4个月后的水位高程

Fig. 6 Variation of water table with time for first dewatering plan in dominated dot

- - - The elevation of the tunnel bottom;
- - - The elevation of static water table;
- - - The elevation of water table after pumping two months;
- - - The elevation of water table after pumping four months

由图6可知,连续抽排4个月都不能将水位降到预定高度,必须修改降水方案。经过多次计算分析和专家论证,将井距改为30m,又因9#井以南地层渗透性较差,在施工过程中又进行了局部加密,对降水方案进行修改后,在后期施工中才取得了良好的效果。

4 结论

本文结合少陵塬隧洞降水工程建立了三维潜水渗流数学模型,将抽水井当作定流量边界,并假定流量沿井壁的分布是均匀的。计算过程中,为了便于单元网格剖分,将抽水井等效为正方形孔。分析了单井、双井抽水时水位随时间的变化规律,计算结果与观测结果误差较小,说明所建立的模型及计算方法比较合理。

在实际施工中计算分析了少陵塬隧洞第一期降水方案,并根据计算结果进行了修改,于是在后续施工中取得了良好的效果。说明所建立的模型比较符合少陵塬区深井抽水时地下水渗流特征,所采取的计算方法合理可靠,可供黄土地区类似工程参考。

[参考文献]

- [1] 张蔚榛 地下水非稳定流计算和地下水资源评价[M]. 北京: 科学出版社, 1983
- [2] 薛禹群, 吴吉春 地下水数值模拟在我国——回顾与展望[J]. 水文地质工程地质, 1997(4): 21-24
- [3] 张有天, 陈平, 王镭 有排水孔的三维渗流场的有限元——边界元耦合分析[J]. 水利学报, 1989(5): 30-37
- [4] 薛禹群 地下水动力学原理[M]. 北京: 地质出版社, 1986
- [5] 王勳成, 邵敏 有限单元法基本原理和数值方法[M]. 北京: 清华大学出版社, 1997
- [6] 杨菊生, 揽生瑞 有限元程序设计[M]. 陕西西安: 西安交通大学出版社, 1990
- [7] 罗焕炎, 陈雨孙 地下水运动的数值模拟[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1986
- [8] 刘守慧 少陵塬隧洞工程抽水试验报告[R]. 陕西西安: 陕西省水电工程局, 1999
- [9] 李佩成 黄土含水层给水度合理取值的研究[J]. 水利学报, 1999(11): 38-41

Three dimensional finite simulation of deep well dewatering in loess phreatic stratum

KANG Ting¹, BAI Ying-sheng¹, GUO Zeng-yu²

(1 The Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an, Shanxi 710038, China;

2 The Water Conservancy and Water Electricity Institute, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shanxi 710048, China)

Abstract: Three dimensional seepage model of deep well dewatering in loess phreatic stratum was set up. Deep wells were regarded as invariable rate of flow boundary. It was supposed that the rate of flow was even on the wall of wells. Three dimensional program with computer language C++ was made in this paper. The rule in the change of groundwater table with time was analyzed on single well pumping and double wells pumping. The error between calculated results and tested results was small. The dewatering effect of No. 1 plan in Shaolingyuan was also analyzed and the result showed that this plan could not meet the work speed. Therefore the plan was optimized based on calculation. From then on, dewatering effect was very good.

Key words: phreatic stratum of loess; three-dimensional finite element; deep well dewatering