

【水利水电工程】

数值模拟技术在工程降水中的应用研究

巩立亮, 房后国, 王 宁, 黄培杰, 曹 爽

(黄河勘测规划设计有限公司, 河南 郑州 450003)

摘 要:在掌握场地水文地质条件和抽水试验成果的基础上, 利用 Modflow 建立了较为合理的渗流数值模型, 分析了某工程井点降水中承压含水层水位随时间的下降过程。结果表明: 砂砾石层渗透系数为 90 m/d, 弹性释水系数为 0.002 m⁻¹, 计算结果与 5 口长期观测井的观测数据对比误差较小; 将降水区域扩大为 3 000 m × 3 000 m, 采用第二类边界条件并增加 5 口降水井进行降水模拟, 降深效果非常好。

关 键 词: Modflow; 降水设计; 水文地质模型; 数值模拟

中图分类号: TV213 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1000-1379.2009.12.060

地下水疏干是目前制约我国一些工程建设的关键问题之一, 其服务对象主要集中在深基坑工程^[1-2]、露天煤矿开挖工程^[3]、地铁开挖工程^[4]等方面。常用的降水方法有明沟排水法、管井法、轻型井点法、喷射井点法^[5]等, 普遍采用裘布依公式^[6]进行计算, 该公式计算方法简单、计算结果明了, 适用于含水层结构和边界条件简单情况下的单井或若干井点同时抽水时的降水设计, 我国目前规范也采用其基本原理^[7]。除此之外, 还有一些同类比较的办法, 通过收集施工区域附近的工程实例, 寻找相似工程的施工经验作为参考, 并据此进行降水工程的设计计算。但这些方法在实际应用中难以考虑复杂的边界条件, 难以模拟不良地质体以及岩土体的各向异性等。另外, 如何确定有关水文地质参数是另一难点, 而数值模拟的最大优点在于能够刻画非均质、不等厚以及复杂水文地质条件下的地下流场。因此, 笔者利用数值模拟技术, 对其在某工程降水中的应用情况进行了研究。

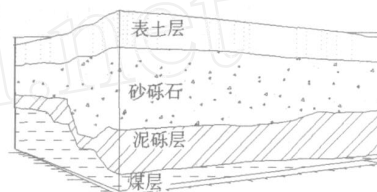


图 1 地层剖分

1 研究区域概况

1.1 工程概况

某工程降水区域位于内蒙古自治区东部, 地处呼伦贝尔高原。研究区尺寸大约为 900 m × 900 m, 近似正方形, 西、北、南边界毗邻大草场, 地面高程为 605.0 m 左右, 整个区域地表平坦, 少见起伏。

1.2 水文地质条件

根据勘察资料, 研究区内第四系松散岩层孔隙水为主要降水层, 水位埋深为 560 ~ 598 m。在第四系沉积地层中, 按岩性及沉积年代, 可以分为 4 层 (见图 1): 第一层为表土层, 厚约 15 m, 弱透水性; 第二层为砂砾石层, 厚度不均, 约 30 m, 为承压含水层; 第三层为泥砾层, 厚度不均, 较厚处约 30 m, 较薄处约 10 m, 为弱透水层; 第四层为煤层, 厚度不均, 为隔水层。

2 数值模型的建立

2.1 渗流计算原理

Modflow 应用三维有限差分方法模拟地下水流动情况, 在求解的过程中, 从空间上对含水层采用等距或不等距正交长方体剖分网格。在不考虑水密度变化的条件下, 它基于以下基本方程:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) - W = \mu \frac{\partial h}{\partial t}$$

式中: h 为水头, m; K_x 、 K_y 、 K_z 为 3 个主渗方向的渗透系数, m/s; μ 为单位贮水率, 1/m; t 为时间变量, d; W 为源汇项, m³/d, 代表流入或流出特征体单元的流量。

2.2 模拟模型的建立

根据降水施工布井图及大量钻孔资料, 对降水区域进行网格剖分 (图 2), 网格划分范围: x 方向, 473 800 ~ 474 800 m; y 方向, 5 474 800 ~ 5 475 800 m; z 方向, 600 ~ 520 m。网格划分密度为 50 行、50 列和 4 层地层, 每个计算网格的面积为 20 m × 20 m, 共 2 500 个计算网格, 其中无效计算网格 522 个、有效计算网格 1 978 个。承压降水井 47 口, 观测井 5 口。

收稿日期: 2009-01-13

作者简介: 巩立亮 (1980—), 男, 山东临沂人, 硕士研究生, 研究方向为岩土工程及水文地质模拟。

E-mail: gongliliang@163.com

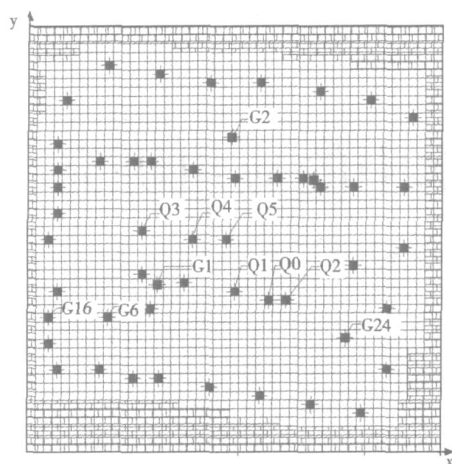


图 2 研究区网格剖分

2.3 参数取值

计算地下水水位下降所涉及的主要参数一般为单元的渗透系数 K (K_x 、 K_y 及 K_z) 及弹性释水系数 (S)。参考有关资料,对不同区域参数范围进行初步取值 (见表 1)。

表 1 降水区域渗透参数和弹性释水系数取值范围

地层	岩性	$K_x /$ ($\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$)	$K_y /$ ($\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$)	$K_z /$ ($\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$)	$S /$ m^{-1}
1	表土层	8.64	8.64	0.864	0.000 01
2	砂砾石层	42 ~ 106	42 ~ 106	4.2 ~ 10.6	0.1 ~ 0.000 01
3	泥砾层	0.000 1	0.000 1	0.000 01	0.000 01
4	煤层	1 ~ 5	1 ~ 5	0.1 ~ 0.5	0.01 ~ 0.000 01

2.4 边界条件

为了简化数据文件的输入,使物理概念更为明确,在时间上,Modflow引进应力期 (Stress Period) 的概念,将整个模拟时间分为若干个应力期,每个应力期又可分为若干个时间段 (Time Step)。在同一应力期,各时间段既可以按等步长也可以按一个规定的几何序列逐渐增长;在不同的应力期内,设置不同的外部源汇项强度。为使模型更为真实地反映实际过程,模型的西边界和南边界 (由长期观测井 G16 控制) 共分为 124 个应力期,东边界 (由长期观测井 G24 控制) 共分为 94 个应力期,北边界 (由长期观测井 G2 控制) 共分为 93 个应力期,以上均为多应力期常水头边界;计算区域底边界 ($z = 520 \text{ m}$ 处) 近似取流面边界,即该边界上认为无地下水的流入和流出。

3 降水区域水文地质模型计算结果比较分析

模型建立以后,根据野外抽水试验并结合当地施工经验,通过不断调整参数,得出降水区域优化渗透系数为 90 m/d ,弹性释水系数为 0.002 m^{-1} 。

观测井模拟结果 (图 3) 表明:在开始 40 口抽水井疏干情况下,矿区地下水降深为 8 m 左右;96 d 后在矿区中部增加了 7 口强排井 (Q0、Q1、Q2、Q3、Q4、Q5 和 Q6) (图 1),进一步使矿区降深增加,矿区中部降深达到 12 m 左右;经过 165 d 的降水后,其降深为 20 m 左右,模拟水位与观测井观测水位大体一致。其中, G2 观测井实测值和模拟值误差为 0.3 m ,在第 75 d 附近, G1 出现观测值陡升,初步认为是其附近的抽水井停泵造成

的。大部分计算水位值的最大相对差值低于 10%,这一计算结果相对于 1 km^2 这样大的计算区面积来说是很小的,计算误差完全可以满足三维计算要求,可见计算模型较为准确,模型的建立符合实际。

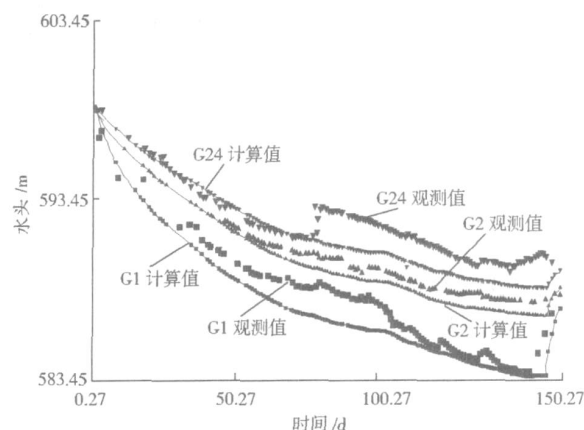


图 3 观测井地下水水位观测数据和模拟计算结果比较

4 模型预测

在以上模型的基础上,不改变水文参数,研究区域扩大为 $3\,000 \text{ m} \times 3\,000 \text{ m}$,边界圈定第二类流量补给边界,补给量根据天然流场结合 Darcy 定律计算得出,模型西北边界的补给量为 $0.035 \sim 0.045 \text{ m}^3 / (\text{m} \cdot \text{d})$,西南边界的排泄量为 $-0.009 \sim -0.035 \text{ m}^3 / (\text{m} \cdot \text{d})$ 。新增加 5 口降水井进行降水疏干的预测模拟。在 47 口井工作 165 d 后,其降深为 20 m 左右,250 d 后,52 口井在抽水量不变的条件下,降深几乎达到 30 m ,降深效果非常好。图 4 为观测井 G2 在 250 d 内地下水水位的变化曲线,可以看出 3 个清晰的降深台阶:第一阶段为模型的前 96 d,第二阶段为 96 ~ 165 d,第三阶段为预测加 5 口井后的 165 ~ 250 d。在此模型的基础上,可以调整井的排列布置和抽水量,通过分批次、分时间段增加降水井的数目来满足实际降水需要。

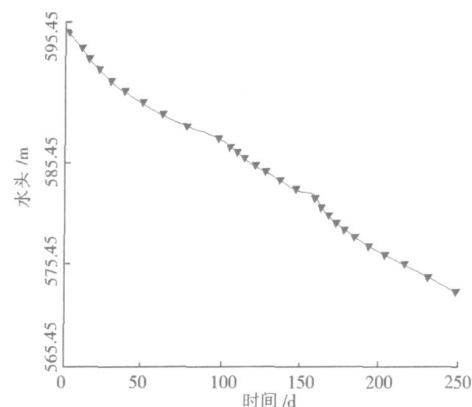


图 4 观测井 G2 观测 250 d 水位变化曲线

5 结 论

(1) 通过大量的数值调参试验工作,最终确定了某工程降水疏干砂砾石层渗透系数为 90 m/d ,弹性释水系数为 0.002 m^{-1} ,计算结果与 5 口长期观测井的观测数据对比误差较小,是较符合工程降水的数据模型。

(下转第 126 页)

表 2 类围岩结构计算结果 (断面宽 12.0 m)

埋深	项目	初次支护		二次支护		钢拱架	锚杆	围岩
		弹性	塑性	弹性	塑性			
浅埋	$\frac{1}{\sigma_{max}}/MPa$	0.15	0.15	0.05	0.05	54.90	85.60	-1.81
	$\frac{2}{\sigma_{min}}/MPa$	-8.31	-8.31	-8.21	-8.21	-191.80	0.00	0.04
	W_{max}/m	0.003		0.004	0.004			
偏压	$\frac{1}{\sigma_{max}}/MPa$	0.42	0.43	0.33	0.33	25.40	11.80	0.02
	$\frac{2}{\sigma_{min}}/MPa$	-6.78	-6.78	-7.05	-7.05	-34.10	-3.84	-1.56
	W_{max}/m			0.002	0.002			
深埋	$\frac{1}{\sigma_{max}}/MPa$	0.17	0.17	0.00	0.17	36.00	8.72	0.16
	$\frac{2}{\sigma_{min}}/MPa$	-7.26	-7.26	-8.46	0.00	-9.31	-0.41	-3.56
	W_{max}/m			0.003	0.003			

表 3 类围岩结构计算结果 (断面宽 12.0 m)

项目	类			类		
	衬砌	锚杆	围岩	衬砌	锚杆	围岩
$\frac{1}{\sigma_{max}}/MPa$	0.38	5.12	0.37	0.20	1.46	0.27
$\frac{2}{\sigma_{min}}/MPa$	-7.51	-0.62	-3.23	-1.99	-0.41	-1.63
W_{max}/m	0.002			0.0006		

表 4 类围岩结构计算结果 (断面宽 8.5 m)

埋深	项目	初次支护		二次支护		钢拱架	锚杆	围岩
		弹性	塑性	弹性	塑性			
浅埋	$\frac{1}{\sigma_{max}}/MPa$	0.84	0.75	1.37	0.92	107.00	72.50	0.17
	$\frac{2}{\sigma_{min}}/MPa$	-17.80	-9.83	-14.30	-8.65	-26.90	-4.59	-5.05
	W_{max}/m			0.008	0.012			
偏压	$\frac{1}{\sigma_{max}}/MPa$	6.05	0.43	6.38	1.00	167.70	56.40	2.63
	$\frac{2}{\sigma_{min}}/MPa$	-13.10	-10.10	-11.90	-8.81	-92.20	-16.60	-9.31
	W_{max}/m			0.007	0.009			
深埋	$\frac{1}{\sigma_{max}}/MPa$	1.22	0.17	0.91	0.29	113.00	50.30	0.17
	$\frac{2}{\sigma_{min}}/MPa$	-11.80	-5.78	-9.85	-5.50	-17.00	-2.72	-5.05
	W_{max}/m			0.006	0.008			

表 5 类围岩结构计算结果 (断面宽 8.5 m)

埋深	项目	初次支护		二次支护		钢拱架	锚杆	围岩
		弹性	塑性	弹性	塑性			
浅埋	$\frac{1}{\sigma_{max}}/MPa$	0.14	0	0.06	0	34.80	13.90	0.25
	$\frac{2}{\sigma_{min}}/MPa$	-5.48	0	-5.19	0	-11.70	-5.66	-3.29
	W_{max}/m			0.003	0			
偏压	$\frac{1}{\sigma_{max}}/MPa$	5.12	0	5.12	0	145.00	2.53	
	$\frac{2}{\sigma_{min}}/MPa$	-9.08	0	-9.14	0	-8.96	-8.36	
	W_{max}/m			0.006	0			
深埋	$\frac{1}{\sigma_{max}}/MPa$	0.20	0	0.017	0	10.90	0.18	
	$\frac{2}{\sigma_{min}}/MPa$	-5.43	0	-5.92	0	0.855	-4.49	
	W_{max}/m			0.002	0			

表 6 类围岩结构计算结果 (断面宽 8.5 m)

项目	类			类		
	衬砌	锚杆	围岩	衬砌	锚杆	围岩
$\frac{1}{\sigma_{max}}/MPa$	0.15	3.48	0.04	0.88	1.13	0.02
$\frac{2}{\sigma_{min}}/MPa$	-4.86	-0.28	-1.15	-2.18	-0.29	-0.52
W_{max}/m	0.001					

隧道交叉处大断面洞室,最大跨度达 23.58 m,已超出了目前隧道工程设计和施工规范的范围,无规范可循。大断面洞室、连拱断面和小净距断面的设计,除采用复合式衬砌、支护参数采用工程类比法确定外,还对支护参数进行了分析计算。从计算结果看,大断面洞室结构受力最大,可以通过增加衬砌厚度、加强配筋、适当减小倒角半径等措施改变受力状态,减小结构受力,以确保支护安全。

4 结 语

计算结果表明,各类围岩隧道的支护结构是安全可靠的,施工方案是可行的,但隧道在Ⅱ、Ⅲ类围岩存在浅埋、偏压和多处隧道平面、立面交叉,施工难度较大。根据隧道的施工进展情况,加强了施工过程中的专项监控,并结合监控量测数据,进行反馈计算和设计。工程于 2006 年投入运行以来,运行情况良好,达到了预期设计效果。

参考文献:

- [1] 重庆交通科研设计院. JTG D70—2004 公路隧道设计规范 [S]. 北京:人民交通出版社, 2004.
- [2] 蔡小林, 吴从师, Svoboda G. 小净距浅埋隧道的支护设计探讨 [J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24 (9): 5943 - 5949.
- [3] 吴向阳. 典型类比分析法 [J]. 公路, 1997 (7): 20 - 26.

【责任编辑 吕艳梅】

(上接第 124 页)

(2) 将降水区域扩大为 3 000 m × 3 000 m, 采用第二类边界条件并增加 5 口降水井进行降水模拟, 结果表明 250 d 后降水几乎达到 30 m, 降水效果非常好。

致谢: 在论文撰写过程中得到了吉林大学建设工程学院张延军教授、四川农业大学倪福全教授的支持与帮助, 在此表示谢意。

参考文献:

- [1] 徐耀德, 童利红. 利用 Modflow 预测某基坑降水引起的地面沉降 [J]. 水文地质工程地质, 2004 (6): 96 - 98.
- [2] 熊文林, 王宇, 冯晓腊. 三维有限单元法在武汉中山广场降水工程中的应用 [J]. 土工基础, 2002 (6): 2 - 6.
- [3] 薛禹群, 吴吉春, 谢春红, 等. 元宝山露天煤矿地下水疏干数值模拟 [J]. 煤炭学报, 1996 (6): 255 - 260.
- [4] 索晓明. 浅说沈阳地铁降水方案选择 [J]. 隧道建设, 2005 (3): 1 - 6.
- [5] 华祥征. 基础工程设计与施工 [M]. 长春: 吉林大学出版社, 1996.
- [6] 薛禹群. 地下水动力学 [M]. 北京: 地质出版社, 2001.
- [7] 建设部综合勘察研究设计院. JGJ/T111—98 建筑与市政降水工程技术规范 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1998.

【责任编辑 翟成亮】