

基于 AquiferTest 和 FEFLOW 求解水文地质参数

韩其婷¹, 刘建刚¹, 侯保升²

(1. 河海大学 地球科学与工程学院, 南京 210098; 2. 甘肃省电力设计院, 兰州 730000)

摘要: 工程由于受地下各未知因素的影响, 应用于工程计算的含水层水文地质参数与利用抽水试验及求参公式计算得出的结果有较大差距。本文利用 AquiferTest 软件对抽水试验结果进行模拟计算得出理想状态下区域水文地质参数, 结合 FEFLOW 软件对小王家矿区进行了数值模拟, 得出可以用于工程实际的水文地质参数, 通过与实测值对比发现效果较好, 模拟结果可以较好的应用于工程中的水文地质条件。

关键词: AquiferTest; FEFLOW; 数值模拟; 水文地质参数

中图分类号: P641.2

文献标识码: A

A solution of hydro-geological parameters based on the AquiferTest and FEFLOW program

Han Qiting¹, Liu Jiangan¹, Hou Baosheng²

(1. School of Earth Science and Engineering, Hehai University, Nanjing 210098, China;

2. Gansu Electric Power Design Institute, Lanzhou 710000, China)

Abstract: Affected by various unknown underground factors, the hydro-geological parameters applied to practical engineering calculations are quite different from the results calculated directly by pumping test and parameter formula. In this paper, the hydro-geological parameters in the idealized conditions of pumping test are calculated by AquiferTest program. The hydro-geological parameters obtained by numerical simulation with FEFLOW software for Xiaowangzhuang Mining area is verified good by monitoring. The simulation result matches the actual situation.

Key words: AquiferTest; FEFLOW; numerical simulation; hydro-geological parameters

0 引言

导水系数 (T) 和贮水系数 (S) 是地下水流动中非常重要的两个水文地质参数^[1]。工程中通常通过抽水试验的方法获取含水层水文地质参数, 而对与单个含水层, 进行抽水试验可以得到其理想状态下的水文地质参数, 但考虑到地下各种复杂因素的影响, 一般由计算得出的水文地质参数对整个区域的实用性较低, 为了可以应对工程的需要有必要进一步的分析得出对实际工程实用较好的水文地质参数。

AquiferTest (含水层试验) 软件是用于抽水试验资料分析、数据处理的图形化分析和研究的软件^[2]。蒋辉^[2]以及陶宗涛^[3]等认为通过 AquiferTest 求参相对人工求得的参数对比性强且更为精确、便捷。FEFLOW (有限元地下水流系统) 是一种基于 GIS 并采用有限元算法模拟地下水水流过程的模拟

系统, 可以有效地生成有限元网格, 快速轻易地定义复杂模型的属性及边界条件, 稳定、快速地进行数值模拟以及图形化地展示结果^[4]。本文以安徽小王家铁矿大尚家矿区的抽水试验资料为基础, 利用配线法的 AquiferTest 软件求参, 并使用 FEFLOW 软件进行模型识别, 得出更适用于实际工程计算的水文地质参数。

1 水文地质条件

1.1 区域水文地质条件

小王家铁矿位于安徽省东南部, 南濒长江, 北临巢湖, 地表水体丰富。矿区地层总体包括第四系松散层, 新第三系 (钙质) 细砂、粉细砂、泥岩及

收稿日期: 2014-05-05; 修订日期: 2014-08-02

作者简介: 韩其婷 (1990 -), 女 (汉族), 江苏盐城人, 硕士研究生。

砾石层岩体，三叠系中统徐家山组白云岩、白云质灰岩、灰岩岩体及岩浆侵入岩体，由石英闪长岩组成。地下水主要类型为松散岩类孔隙水和碳酸盐岩类裂隙岩溶水。勘探中揭露含水层底板深度为 -190m ~ -250m，主要含水层为 T_{2x} 岩层。基岩面上方广泛发育砂砾石层，渗透性好，且该砂砾石层与长江冲积砂砾石层联通，水文地质条件较为复杂。天然条件下，矿区接受大气降水和丰水季节长江水补给。在矿坑开采条件下，基岩上方的砂砾石层可以获得长江水补给，使矿坑有充足的补给水源。

1.2 抽水试验情况

选取 KZK802 孔进行单孔抽水试验测试岩浆侵入岩体中破碎岩体的水文地质参数，进行 3 次抽水试验。含水层厚度 51.19m，钻孔半径 0.045m，静止水位埋深 0.63m。第一次抽水试验的稳定流量为 2.073m³/d，历时 664min。第二次抽水试验的稳定流量为 1.469m³/d，历时 664min。第三次抽水试验的稳定流量为 0.95m³/d，历时 634min。

取 KZK004 孔为抽水井进行了 3 次多孔抽水试验测试三叠系中统徐家山组岩体的水文地质参数。含水层厚度 109m，钻孔半径 0.108m，静止水位埋深 0.56m。选取 KZK802 孔作为观测井，静止水位埋深 0.63m。第一次抽水试验的稳定流量为 1780.7m³/d，历时 1470min。第二次抽水试验的稳定流量为 1009.1m³/d，历时 690min。第三次抽水试验的稳定流量为 809.6m³/d，历时 713min。

取 KZK202 孔为抽水井，进行 3 次多孔抽水试验测试三叠系中统徐家山组岩体的水文地质参数。含水层厚度 103.2m，钻孔半径 0.681m，静止水位埋深 1m。KZK316 作为观测井，静止水位埋深 1.4m。第一次抽水试验的稳定流量为 2148.336m³/d，历时 1530min。第二次抽水试验过程中由于设备原因中断抽水，而且由于停电半个小时，抽水试验结果误差较大，不作为本次模拟的使用值。第三次抽水试验的稳定流量为 887.07m³/d，历时 820min。

KZK802，KZK004，KZK202，KZK316 孔的位置如图 1 所示，抽水试验参数见表 1 ~ 表 4。

2 AquiferTest 软件求解

抽水试验的试验段均为承压含水层，通过利用 Analysis 中的 Diagnostic Graph 功能分析认为，在 AquiferTest 软件中宜使用 Theis 配线法进行参数求解，得出自动拟合后利用经验法对参数曲线进行人工优化，通过移动参数曲线实现自动拟合与人工拟合的最优效果。

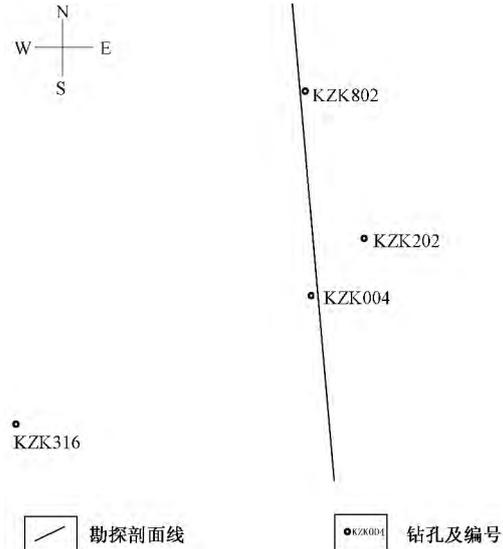


图 1 抽水试验井孔位置

KZK802 孔抽水试验参数 表 1

	第一次	第二次	第三次	平均
T (m ² /d)	9.67E-2	9.32E-2	8.09E-2	9.03E-2
K (m/d)	1.89E-3	1.82E-3	1.58E-3	1.76E-3
S	1.04E-3	9.98E-4	7.58E-4	9.32E-4
S _s (1/m)	2.03E-5	1.95E-5	1.48E-5	1.82E-5

KZK004 孔抽水试验参数 表 2

	第一次	第二次	第三次	平均
T (m ² /d)	7.97E+1	7.88E+1	5.61E+1	7.15E+1
K (m/d)	7.32E-1	7.23E-1	5.15E-1	6.57E-1
S	3.11E-2	3.03E-2	2.21E-2	2.78E-2
S _s (1/m)	2.85E-4	2.78E-4	2.03E-4	2.55E-4

KZK202 孔抽水试验参数 表 3

	第一次	第三次	平均
T (m ² /d)	7.41E+1	6.22E+1	6.82E+1
K (m/d)	7.18E-1	6.03E-1	6.61E-1
S	3.01E-2	2.43E-2	2.72E-2
S _s (1/m)	2.92E-4	2.35E-4	2.64E-4

参数均值化 表 4

	K (m/d)	S _s (1/m)
T _{3x}	6.59E-1	2.60E-4
δ _μ	1.76E-3	1.82E-5

3 FEFLOW 数值模拟

AquiferTest 软件计算出来的是岩层的理想渗透参数，而在实际工作中，由于一些因素在工程计算中的简化，岩层的渗透参数也将被等价化。下面是利用 FEFLOW 软件进行渗透系数的等价化，以便后面更多的计算应用。

3.1 水文地质概念模型

根据大尚家矿区 21 个勘探孔和矿区外围 10 个

区域钻孔资料，建立模拟的水文地质概念模型。模型的计算区是以矿区为中心成正方形区域，面积约 49km²。由于区内的小断层在钻孔中未显示，且由地质资料显示小断层相对尺寸较小，故模型中未以考虑。根据钻孔资料，第四系地层厚度达到 40m 以上，其补给排泄条件对整个地下矿区的影响较小，为简便计算，模型中剥离第四系地层。

模拟的目标层是三叠系中统徐家山组 (T₂x) 灰色白云岩、白云质灰岩、灰岩含水层和岩浆岩地层，主要是燕山期酸性侵入岩体，两者之间有一定的水力联系。将整个模型概化为均质各向同性。

对模型进行垂向参数分区：第一层为上第三系地层 (N)，岩性主要为灰绿色 (钙质) 细砂、粉砂岩、泥岩和砾石层。第二层为三叠系徐家山组地层。第三层为岩浆岩 (δ_μ)，主要由石英闪长岩组成，厚度大于 200m。第四层为基岩部分，视为隔水边界。矿区距离长江及巢湖较近，水量补给充足，平水期认定水位为长江水位。由于计算区域边界未超出影响半径，设定选区的边界条件为定水头边界，水位为长江水位。

3.2 数学模型

依据概化的物理模型，相应的数学模型为：

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x} \left(K \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K \frac{\partial H}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K \frac{\partial H}{\partial z} \right) = S_s \frac{\partial H}{\partial t} \\ H(x, y, z, t) |_{t=0} = H_0(x, y, z) \quad (x, y, z) \in D, t \geq 0 \\ H(x, y, z, t) |_{\Gamma_1} = H_0(x, y, z) \quad (x, y, z) \in \Gamma_1, t \geq 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中，K 为渗透系数 (m/d) (x、y、z 方向的分量相等)；H 为地下水水头 (m)；S_s 为含水层的贮水率 (1/m)；H₀ 其初始水头 (m)；H₁ 为模拟期内 Γ₁ 为边界处的地下水水位 (m)；t 为时间 (d)；D 为模拟区范围；Γ₁ 为第一类边界。

模型采用 Triangle 方法进行网格剖分，共剖分出节点 20000 个，模型如图 2 所示。

3.3 模型识别

由于地层多为裂隙介质，未能对各个地层进行渗透试验。利用 FEFLOW 和抽水试验的资料对模型进行检验，以得出最符合工程计算时的渗透参数。根据 AquiferTest 得出部分地层的渗透系数和贮水率，其他地层的贮水率可以根据水文地质手册和岩层的岩性特征给出经验值。

使用试错法进行模型的识别，模型模拟得出结果水位与抽水试验观测水位进行比较，得到的结果如图 3 ~ 图 5 所示。

由图 3 ~ 图 5 可以看出，KZK802 单孔抽水第三次抽水水位拟合线中，降深偏大，模型的计算水位

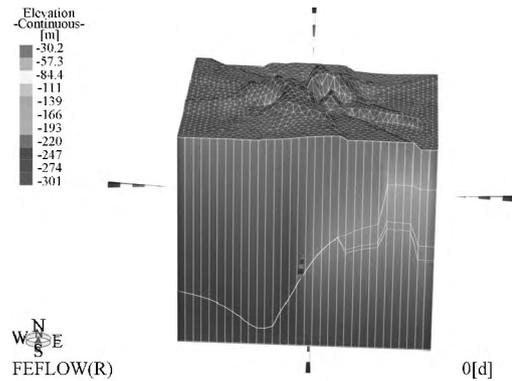


图 2 三维计算区域图

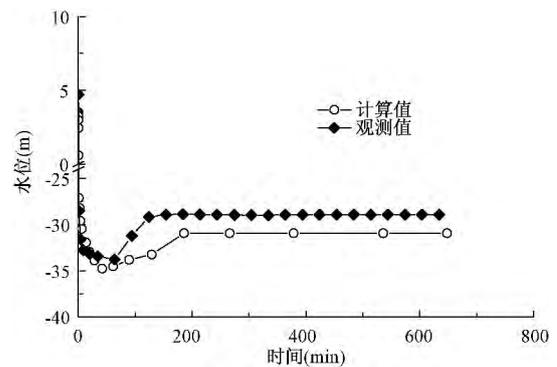


图 3 KZK802 单孔抽水第三次抽水水位拟合过程线

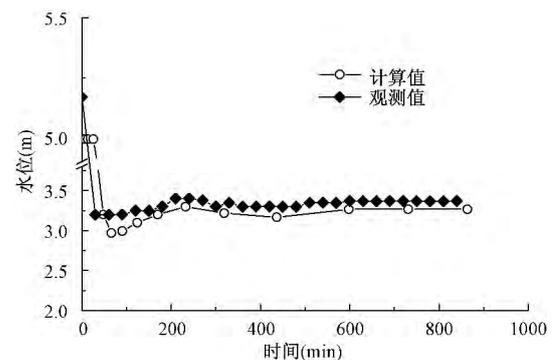


图 4 KZK004 多孔抽水第三次抽水观测孔 KZK802 水位拟合过程线

与抽水试验观测水位的绝对误差在 ± 3m 以内的达到 80% 以上，说明渗透系数偏大；KZK004 多孔抽水 KZK802 观测孔水位拟合线中，模型的计算水位与抽水试验观测水位的绝对误差在 ± 1m 以内的达到 80% 以上；KZK202 多孔抽水 KZK316 观测孔水位拟合线中，计算水位与抽水试验观测水位的绝对误差在 ± 1m 以内的达到 85% 以上，而其降深速率较快，说明贮水率偏大。由于抽水试验中的人为因素造成的误差不可避免，通过 FEFLOW 进行模拟的结果与抽水试验数据的相对误差符合较小，说明所建立的数值模拟模型基本正确，可以用于以后的工

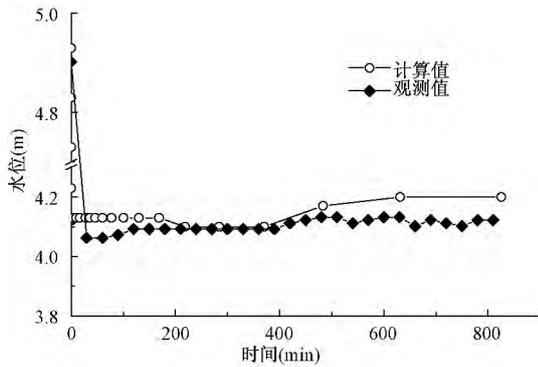


图 5 KZK202 多孔抽水第三次抽水观测孔 KZK316 水位拟合过程线

程计算。由此，得出如表 5 所示的渗透系数和贮水率。

水文地质参数取值 表 5

地层	渗透系数 K (m/d)	贮水率 S_s (1/m)
N	0.52	4.5×10^{-5}
T_2x	0.78	2.8×10^{-4}
δ_μ	0.00053	1.0×10^{-5}

4 结语

1 利用 AquiferTest 软件对抽水试验的资料进行计算，得出理想状态下的含水层参数： T_2x 地层

中渗透系数为 $6.59E - 1$ (m/d)，贮水率为 $2.60E - 4$ (1/m)； δ_μ 地层中渗透系数为 $1.76E - 3$ (m/d)，贮水率为 $1.82E - 5$ (1/m)。

2 利用 FEFLOW 软件建立水文地质模型，并进行模型的识别，得出可以用于实际工程计算的水文地质参数： N 地层中渗透系数为 0.52 (m/d)，贮水率为 4.5×10^{-5} (1/m)； T_2x 地层中渗透系数为 0.78 (m/d)，贮水率为 2.8×10^{-4} (1/m)； δ_μ 地层中渗透系数为 0.00053 (m/d)，贮水率为 1.0×10^{-5} (1/m)。

3 由于 AquiferTest 软件对抽水试验资料的计算不考虑其他因素的影响，而 Theis 公式的假定条件就是理想化的，由其计算出来的结果可以作为 FEFLOW 模拟的一个参考条件。在实际计算中，利用 FEFLOW 进行模型识别得出的水文地质参数更适合使用到实际工程计算中。

参 考 文 献

- [1] 刘立才, 陈鸿汉, 张达政. 梯度法在水文地质参数估值中的应用 [J]. 水文地质工程地质, 2003, 3: 39~41.
- [2] 蒋辉等. 基于 AquiferTest 的抽水试验参数计算方法分析 [J]. 水文地质工程地质, 2011, 38 (2): 35~38.
- [3] 陶宗涛, 闫志为. 基于 Aquifer Test 的水文地质参数计算方法研究 [J]. 水利科技与经济, 2012, 18 (12): 25~27.
- [4] Hans-JÉrg G Diersch. FEFLOW 有限元地下水水流系统 [M]. 谷源泽, 译. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2001.

会 讯

由全国建筑工程勘察科技情报网、内蒙古勘察设计协会工程勘察与岩土分会、全国建工勘察华北情报站、中国建筑学会工程勘察分会主办的“2014 年全国工程勘察学术大会”于 2014 年 8 月 14 - 17 日在呼和浩特市召开。

本次会议得到了各省情报站及学会会员单位的积极响应，共收到论文近 200 篇，其中 140 余篇刊登在《工程勘察》2014 年第一期增刊中，24 篇被选为优秀论文。参加会议的注册代表人数达 260 余人，有 30 余位代表在大会上作了精彩的学术报告并与参会代表进行了热烈的现场交流。本次会议交流主要以年轻的工程师和科技人员为主，展示了他们近年来出色的工程实践和研究成果，论文和学术报告的内容广泛而丰富，带给工程勘察行业技术人员和管理人员很多的启迪。本次学术大会富有成效，取得了圆满成功。

《工程勘察》编辑部 供稿