

文章编号: 1006 - 544X (2005) 01 - 0031 - 05

断层影响下的地下水流数值模拟

朱 斌^{1,2}, 武 强¹

(1. 中国矿业大学 (北京) 资源与安全工程学院, 北京 100083; 2. 桂林工学院 资源与环境工程系, 广西 桂林 541004)

摘 要: 地下水流在有断层影响下呈现出不连续性和各向异性的特征, 使地下水流的数值模拟过程变得复杂. 通过对研究区分布的断层进行分析, 综合选取 23 条断层作为内部边界输入计算模型中, 并用 MODFLOW 软件自身提供的墙体边界 (Wall) 模拟断层, 克服了有限差分方法对复杂边界条件模拟的缺陷. 计算表明, 研究区地下水受断层的影响显著, 断层将研究区分割成相互独立、水力联系较小的水文地质单元, 区内地下水水位周期性波动主要受大气降水的影响.

关键词: 断层; 水文地质; 地下水流数值模拟; Visual MODFLOW; 淮北

中图分类号: P641. 2

文献标识码: A

有断层存在的地区, 地下水水位往往是不连续的, 水流运动规律也相应变得复杂. 以往应用数值模拟方法模拟断层的时候是沿着断层加密网格, 对加密的单元赋以与其它单元不同的水力属性的方法来进行处理, 正如在有限元中所做的那样. 而有限差方法受方法本身的限制, 对不规则边界或断层的模拟则不是很方便, 因此通常认为有限差不如有限元灵活.

美国 Waterloo 公司产品 Visual MODFLOW 是应用有限差方法进行地下水流数值模拟计算的通用软件, 它整合了 MODFLOW、MODPATH、MT3D、ZBUD 等功能于一体, 具有地下水流场模拟、示踪剂跟踪模拟、溶质运移计算和域均衡计算等功能, 被公认为是一种成熟的地下水流数值模拟计算软件. Visual MODFLOW 目前已经发展到 Visual MODFLOW Pro 版. 新版本与老版本相比在计算结果的可视化及对数据的前后处理能力方面又有了更加显著的提高.

考虑断层的影响并充分利用 Visual MODFLOW 在地下水流数值模拟计算中强大功能, 在建立模拟模型的时候, 仔细分析研究区内断层的特性及

其展布规律, 并作为内部边界条件输入计算模型当中, 这将有助于改善有限差分方法在断层模拟这一方面的缺陷. 这方面研究国外已有部分成果^[1], 国内则仍多采用有限元的方法来进行断层的模拟^[2]. 对于大范围的、数量较多的断层影响则相应的研究成果更少.

1 研究区地质背景

1.1 区域地质构造背景

淮北市位于安徽省北部地区, 是一个以煤炭、电力为主的工业城市. 据区调资料^[3], 区内地貌单元主要有低山丘陵、山涧盆地和洪冲积平原, 大部分地势平坦, 西北略高, 东南略低, 地面高程在 28.3 ~ 33.4 m.

区内地层从老至新共有 9 层, 依次为太古界、震旦亚界、寒武系、奥陶系、石炭系、二叠系、侏罗系、白垩系、第三和第四系. 区域地质构造受控于 NNE 向新华夏系构造体系与 EW 向的纬向构造体系, 其中新华夏系构造的影响更为显著, 成为主控构造方向. 受其作用, 在研究区范围内, 自西向东分布有肖县 - 相山复背斜 (NE ~ NNE

收稿日期: 2004 - 06 - 25

基金项目: 教育部跨世纪优秀人才基金资助项目 (2000 - 16)

作者简介: 朱 斌 (1969 -), 男, 博士研究生, 讲师, 水文地质工程地质专业.

向)、闸河复向斜 (NE~NNE向)、蛭顶山-老龙脊复背斜 (NNE向) 等褶皱构造带 (图 1)。

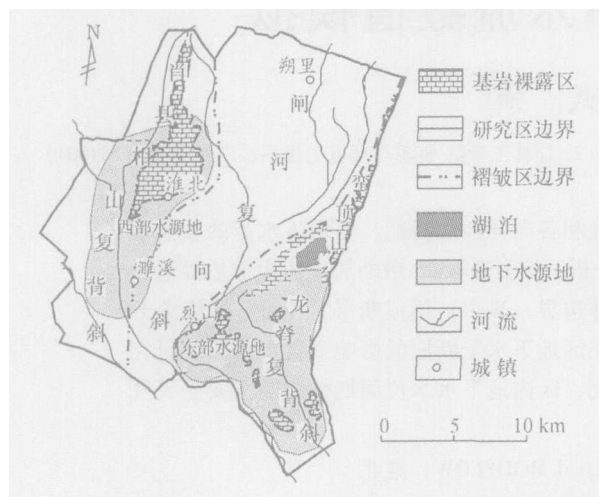


图 1 研究区范围及褶皱分布图

Fig. 1 Map of the study area and the foldbelts distribution

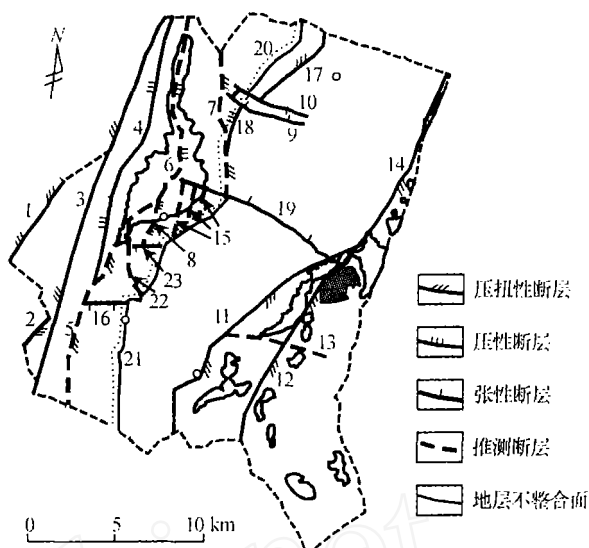


图 2 研究区断层和构造分布图

Fig. 2 Map of the faults and structure in study area

1.2 区内断层分布特征

受地质构造应力的影响,区内主要断层 37 条,按其展布方向可归纳为 NNE、NE 和 NW 向 3 组,它们均属于新华夏系构造的伴生物。

新华夏系构造的一个鲜明特点是规模巨大的高角度 (倾角 50 以上) 逆冲断层密集成带分布,尤其是在复式背斜地段^[3]。NE、NNE 向断层组即属于这一类型,其规模较大,贯穿整个研究区域。在力学性质上多为压或压扭性阻水断层。它们多分布在肖县-相山复背斜、闸河复向斜和蛭顶山-老龙脊复背斜两翼。断层走向在 15°~25°; 其中 80% 倾角在 50 以上, 65% 的断层倾向为 SE、SEE。

在研究区内, NW 向断层组无论从数量和规模上都不及 NE、NNE 向断层组, 且多为弱透水张扭性正断层。常成对出现形成地堑构造, 具有代表性的如位于闸河复式向斜中部杨庄地堑、北部河凹地堑。走向 285°~350°; 倾角 55°~84°; 50% 倾向为 NE。

为便于进行数值模拟模型的建模和计算, 从各断层组的展布规律、形成条件、水力性质等特征出发, 并结合附近地区地下水位长观资料来进行综合分析, 在不影响计算精度的前提下, 将部分距离较近的断层组进行合并, 或忽略部分断层的影响, 挑选出 23 条在建模和计算中需要考虑的断层和构造 (图 2), 表 1 列出了各断层和构造性质。

表 1 计算模型中考虑的断层和构造性质

Table 1 Properties of the faults and structure considered into the model

序号	断层和构造	产 状		断距 /m	备 注
		走向 / (°)	倾向 / (°)		
1	刘桥正断层	15	W	70	300~500 29号断层
2	半截楼正断层	25	SE	70	>500 35号断层
3	柳元正断层	17	NWW	70	60~460 (37)号断层
4	孙圩子正断层	10	NWW	70	>200 (38)号断层
5	正断层				推测断层
6	正断层				推测断层
7	正断层				推测断层
8	正断层				推测断层
9	河凹二号正断层	285	NE	80~84	70~33 (46)号断层
10	河凹一号正断层	285	SW	60	100~15 (45)号断层
11	青龙山逆掩断层	27	SE	20~50	700 50号断层
12	孙庄压扭性断层	13~15	SEE	20~45	13*号断层
13	青谷张扭性断层	250	N	45~75	47*号断层
14	青龙山逆掩断层	27	SE	20~50	700 (50)号断层
15					推测断层组
16	西集张扭性断层	270	N	80	20~150 44*号断层
17	坡里逆断层	25	NWW	60~80	(44)号断层
18	正断层				推测断层
19	杨庄一号正断层	74~88	SW	62~75	150~247 断层
20	地层不整合面				
21	地层不整合面				
22	正断层				推测断层
23	刘庄张扭性断层	280	SSW	70	50~100 42*号断层

注: 备注中带 * 号的断层数据来自文献 [4], 其余断层数据来自文献 [3] (包括推测断层)。

2 研究区水文地质条件特征

2.1 区域水文地质条件

区内现有西部一电厂和东部二电厂两个水源地, 分别位于研究区西部的肖县-相山复背斜和东部的蛭顶山-老龙脊复背斜上 (图 1)。两水源

地都是以奥陶系灰岩岩溶裂隙水作为主要取水目的层,顶板埋藏深度东部为 0~80 m,西部为 30~60 m,并直接埋藏于第四系土壤层之下,成为下覆型岩溶裂隙承压含水层。因其埋藏深度浅,易于开采,成为淮北市工业、农业、生活的主要供水层位。

研究区中部的闸河复向斜内分布了一套二叠、石炭等含煤地层,而年代较老的、富含地下水的奥陶系灰岩则位于含煤地层的下部,成为埋藏型岩溶裂隙承压含水层。因其顶板埋藏深度深(埋藏深度在 500~600 m),不易开采,故一般不将其作为取水目的层位,而作为煤矿井突水隐患加以防治。淮北市主要的煤矿开采区——闸河煤田就位于该部位。

2.2 含水岩组划分与地下水赋存条件

根据含水介质的岩性、岩性组合、时代、含水特征,研究区可划分出 3 层含水层:

第 1 层为孔隙型潜水含水层,整个研究区范围内均有分布,含水介质主要为第四系全新统松散岩土体。

第 2 层为岩溶裂隙承压含水层,分布于研究区中部的闸河复向斜内,隐伏于第四系、第三系、二叠系之下,含水介质主要为碎屑岩夹碳酸盐岩,年代为石炭系太原组、本溪组,俗称太灰水。

第 3 层是岩溶裂隙承压含水层,分布整个研究区,含水介质为年代较老的奥陶系碳酸盐岩,俗称奥灰水。

2.3 地下水补给、径流、排泄条件

以整个区域内均有分布的奥灰水为例,地下水流总体流向为由东北转向南流动,北部透水边界均为补给边界,南部透水边界为排泄边界。研究区中部闸河复向斜埋藏型岩溶地区,该部位为奥灰水的主要径流区。东西两侧复背斜上的基岩裸露区为奥灰水的直接补给区,接受大气降水的补给。其余部分均为覆盖型岩溶地区,属于奥灰水的补给—径流区,奥灰水在该区接受第四系潜水的越流补给。

另外,在大规模人工开采条件下,地下水排泄形式发生了变化,由原来的自然排泄转变为人工排泄,即主要以研究区自备井、水源井和煤矿区排水为主。

3 用墙体边界单元模拟断层

本次数值模拟采用 Visual MODFLOW 96 版进行地下水流数值模拟的建模和运算。网格划分范围为: x 71 792~100 002 m; y 40 000~74 660 m; z 350~-2 000 m,网格划分密度为 100 行,80 列,每个单元的面积约为 350 m $\times$ 350 m,计算单位选用软件自定的缺省值。

以往应用有限差分法处理地质体中的断层,是沿着断层的延伸方向设定离断层最近的单元的水力属性为断层的水力属性(如断层的导水系数),这种方法在本例中存在一个明显的弊端就是断层的影响范围过大,因为每一个单元的宽度是 350 m,而断层的影响范围不可能达到这一宽度。

解决这一问题的办法是采用软件输入模块中的墙体(Wall)边界条件,该边界条件可用墙体的宽度和导水系数模拟断层的宽度和导水系数,在每个单元内根据断层的延伸方向设定墙体的延伸方向,这样可以更好地模拟断层在模型中的空间形态和导水或阻水作用。

图 3 显示了在 MODFLOW 软件中建立的断层情况,同时标注了研究区内地下水位观测孔的位置。图中观测孔分别针对第四系潜水含水层(QOb1、QOb2、QOb3、QOb4),太灰水含水层(YOb1、SOB2),奥灰水含水层(ZOb016、ZOb026、ZOb020、ZOb050、ZOb5#, ZOb039、DOb046、ZOb066、YOb2、YOb3、SOB1)进行地下水水位长期监测。

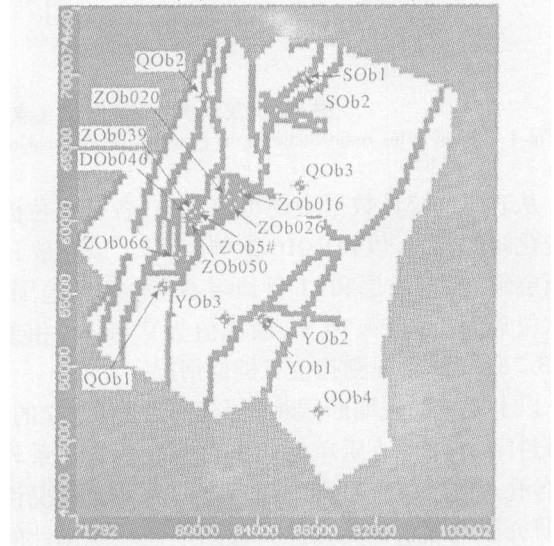


图 3 在 MODFLOW 中断层及观测孔分布

Fig. 3 Map of the faults and observation wells constructed in MODFLOW

4 结果分析

4.1 模型的参数校核

本次参数校核是采用试算的方法进行手工调参实现,调参拟和期是从 1999 - 10 ~ 2001 - 12 这 2 年多地下水位观测序列较为齐全的时期来进行参数校核的。经多次反复调整和试算,各孔观测数据与模拟计算结果的拟和效果如图 4 所示。个别观测数据与计算结果拟和效果不理想,如 DOB046 号孔。经核实,系该处自动观测仪器一段时期未能正常工作所致。其它各孔观测结果与计算结果拟和情况良好,基本能够反映出研究区奥灰水的运动规律和运动趋势。

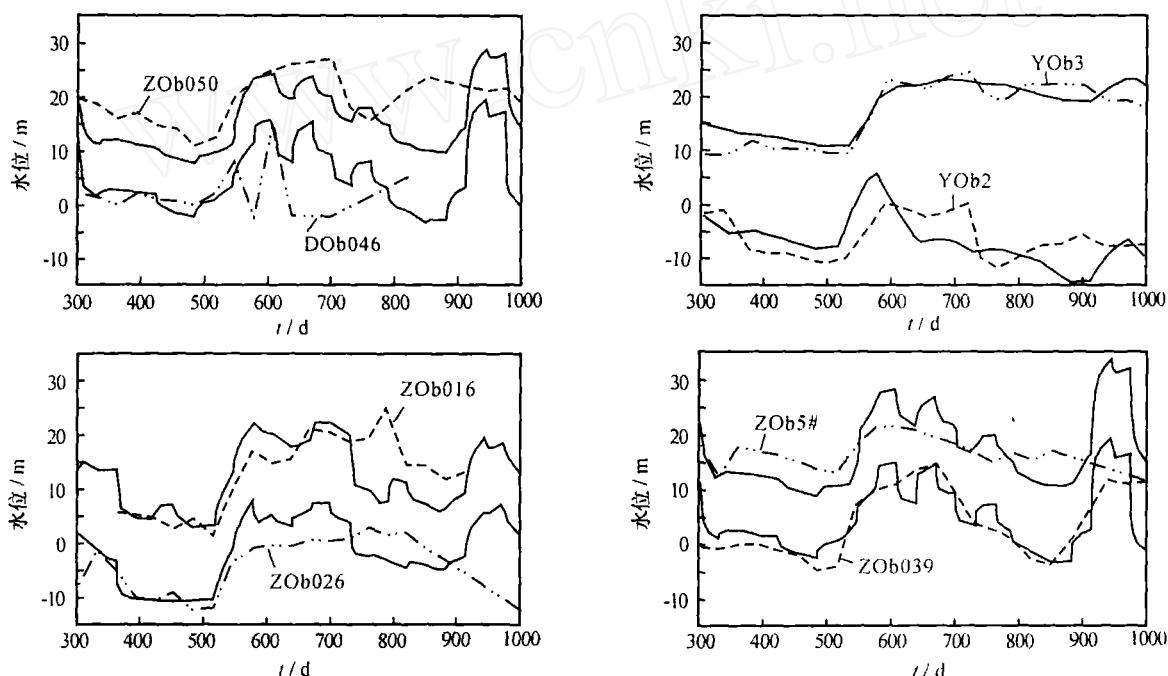


图 4 奥灰水水位观测数据 (点线) 与模拟计算结果 (实线) 拟和图

Fig. 4 Plot of fitting results between the groundwater level monitoring (dash line) and the simulation (solid line) to Ordovician aquifer

从表 3 的统计数据中还可以看出,各孔水位波动变化幅度较大。以 ZOb016 为例,实际上该孔被 15 号断层组, 19 号断层和 21 号地层不整合面所包围,其水位最大值为 24.76 m,最小值为 0.98 m,相差达 23.78 m,其它观测孔也有类似情况。

以上现象均说明断层将研究区分割成独立的、相对封闭的水文地质单元,相互之间水力联系较小。各孔观测水位近乎同周期有规律的变化情况说明,研究区地下水位受同样具有周期性和规律性的大气降水的影响显著。

4.3 模拟计算结果对断层的识别效果

4.2 断层对地下水位的影响

为了显示出断层对地下水水位的显著影响,现特选取 4 对 8 个具有代表性的奥灰水水位观测孔,每对观测孔选取的原则是两观测孔距离较近,且它们之间至少有一条断层通过。

从表 3 和图 4 中可以看出,各对观测孔之间地下水位存在较大差异,以 ZOb039 和 ZOb5# 观测孔为例,两孔间距为 330.49 m,水位统计平均值相差达 13.00 m,两孔之间存在一条 8 号隔水断层。该断层同样影响了 ZOb050 和 DOB046 两个观测孔的水位,两者水位统计平均值相差 17.16 m,而两孔相距仅 390.51 m。其它两对观测孔 (ZOb016 和 ZOb026, YOb2 和 YOb3) 也有同样的现象发生。

表 3 选取的奥灰水观测孔水位观测数据统计

Table 3 Statistical results of groundwater level monitoring to Ordovician aquifer from observation wells selected

观测孔	孔间距 /m	水位 /m				孔间断层
		平均值	最大值	最小值	标准差	
ZOb016	1032.57	12.41	24.76	0.98	6.95	15
ZOb026		-3.89	2.77	-12.6	5.22	
ZOb039	330.49	3.77	14.53	-4.67	6.43	8
ZOb5#		16.77	21.57	11.49	2.89	
ZOb050	390.51	19.38	26.84	10.87	4.65	8
DOB046		2.22	14.36	-2.12	4.45	
YOb2	2607.04	-5.09	0	-11.76	3.97	11
YOb3		15.73	24.3	9.38	5.30	

利用某一时间模拟计算结果可形成网格文件 (Grid 文件), 生成研究区某一时刻地下水位流场图。再运用滤波的方法, 进行数字图像处理, 其目的是要提取所需要的数字信号, 或平滑不需要的噪声信息, 使处理后的图像显示出所期望看到的结果, 如本例中的断层信息。这里选择第 365 天的时候研究区数值模拟计算结果, 将它形成网格文件, 并进行图像处理。图 5 是运用二阶导数滤波器进行数字图像处理后的结果, 该滤波器是一种通用的、能够对边界进行定位的滤波器, 经处理后的图像能够较清晰地显示出断层分布轮廓, 显示清晰与否, 与断层附近抽水井分布多少有关, 抽水井分布较少的地方, 因抽水量小, 断层影响不明显, 故个别地方断层显示不清晰, 如 14 号断层, 11 和 12 号断层北段等。

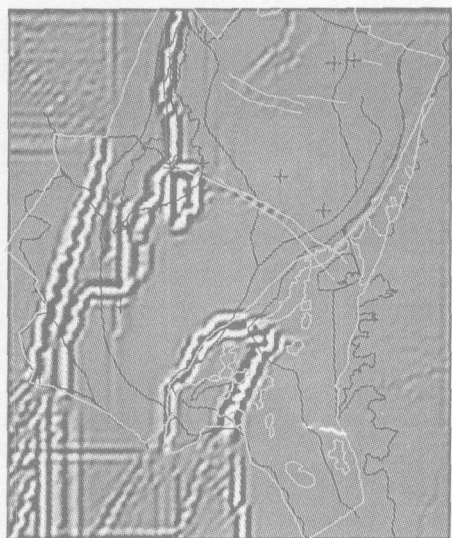


图 5 由模拟计算结果形成的断层影像

Fig. 5 Faults image formed out of the simulation results

5 结束语

(1) 应用数值模拟的方法对淮北这种断层分布众多的地区进行数值计算, 需要仔细分析各条断层的性质和展布规律, 并依据各断层的重要程度进行取舍, 把它作为内部边界输入模型当中, 这将有助于建立符合淮北市实际情况的地下水流数值模拟模型。

(2) 应用 MODFLOW 的墙体边界 (Wall) 功能, 可模拟出断层在模型中的空间分布及其属性信息 (隔水边界或透水边界), 克服了有限差分方法对断层模拟的固有缺陷。

(3) 实际计算结果表明, 研究区地下水受断层的影响显著, 断层将研究区分割成相互独立、水力联系较小的水文地质单元, 区内地下水水位周期性波动主要受大气降水的影响, 图 4 和图 5 能够将断层的影响较好地反映出来。

参考文献

- [1] John Marler, Shemin Ge. The permeability of the Elkhorn fault zone, South Park, Colorado [J]. Groundwater, 2003, 41 (3): 223 - 233.
- [2] 罗元华, 叶贵均, 武强, 等. 焦作能源工业基地水资源合理开发利用研究 [R]. 北京: 中国矿业大学北京校区, 1997: 114 - 122.
- [3] 安徽省区调队. 砀山、宿县、灵璧幅 1:20 万区域地质调查报告 [R]. 合肥: 安徽省地质局, 1977.
- [4] 安徽省第一水文地质工程地质队. 安徽省淮北市北部岩溶区水文地质普查报告 [R]. 蚌埠: 安徽省地质局, 1990: 1 - 34.
- [5] Wu Qiang, Yin Zhongmin, Wu Xun. Groundwater study in the Weersele area, Overijssel, the Netherlands [M]. 北京: 石油工业出版社, 2001: 47 - 74.
- [6] Moench A F. Importance of the Vadose zone in analyses of unconfined aquifer tests [J]. Groundwater, 2004, 42 (2): 223 - 233.

Numerical Simulation of Groundwater under the Influence of Faults

ZHU Bin^{1,2}, WU Qiang¹

(1. Institute of Resource and Safty Engineering, China University of Mining Technology of Beijing, Beijing 100083, China;

2. Department of Resources and Enviromental Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China)

Abstract: Under the influence of faults, the groundwater flowing characteristics of disconuity and aniso-tropy make the process of groundwater numerical simulation more complex. Through analysis of faults located in study area, 23 faults are considered as inner boundaries in simulation model, and simulated these faults with the function of Wall Boundary offered by Visual MODFLOW. The results of an example indicate that the groundwater level in study area is influenced evidently by the existence of faults dividing the study area into geohydrologic units with less connection in hydraulic relationship, and the periodic fluctuation of groundwater level is mainly impacted by precipitation in study area.

Key words: faults; hydrageology; groundwater numerical simulation; Visual MODFLOW; Huaibei