

应用 Visual MODFLOW 墙体边界模拟断层及工程实践

朱 斌^{1,2}, 武 强²

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

摘 要:地下水数值模拟计算软件 Visual MODFLOW 的墙体边界(wall)又被称为水平流障碍边界(Horizontal-Flow Barrier, HFB), 可用于模拟地下含水层系统中薄层、垂向和低透水性、对地下水水平流具有阻碍作用的物体。在分布有众多压扭性隔水断层的淮北地区, 应用墙体边界模拟断层, 用 Winston 提出的方法对与网格线呈夹角关系的断层水力参数进行修正, 选取 23 条对研究区地下水流具有控制作用的断层, 对研究区进行地下水流数值模拟。计算结果表明, 研究区地下水流受断层的影响显著, 应用墙体边界对断层进行模拟的方法能够较好地反映出断层的这种影响作用。图 7, 表 3, 参 11。

关键词:断层; Horizontal-Flow Barrier; 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

文章编号: 1672-9102(2005)02-0019-06

由 Paul A. Hsieh 和 John R. Freckleton 开发的水平流障碍边界软件包(Horizontal-Flow Barrier Package, HFB)最初是为美国地质调查局(U. S. Geological Survey, USGS)的地下水流数值模拟计算软件 MODFLOW-88 而设计^[1], 该软件包专门用于模拟薄层、垂向和低渗透性的地下水水平流障碍物的阻水作用, 在设计之初较多地应用于人工防渗墙的工程实践中^[2-4]。

加拿大 WHI(Waterloo Hydrogeologic Inc.)公司则是进行与地下水有关的相关软件开发和可视化实现的专业公司, 其主要产品 Visual MODFLOW 整合了 USGS 的 MODFLOW 软件模块, 从计算模型的建立、参数的输入到模型的运行、结果的生成、分析, 均以图形的形式进行交互处理, 并在 Windows 系统环境下对其进行可视化实现。其整合功能还包括 MODPATH、MT3D、ZONEBDGT 等, 分别针对示踪剂跟踪模拟、溶质运移计算和域均衡计算, Visual MODFLOW 目前已经发展到 Visual MODFLOW Pro 版。

在有断层存在的地区, 地下水水流呈现出不连续和各向异性特征。以往应用数值模拟方法模拟断层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, 应用墙体边界模拟断层, 通过分析研究区内断层的特性及其展布规律, 将它们作为模型内部的第二类边界条件(隔水或弱透水

边界)输入模型中, 可大大减少有限差分网格划分密度, 这有助于改善有限差分方法在断层模拟这一方面的缺陷。这方面应用国外已有部分成果^[5,6], 国内则多采用有限元的方法来进行断层的模拟^[7]。对于大范围的、数量较多的断层模拟则相应的研究成果更少。

1 墙体边界条件

1.1 墙体边界的输入

新建或打开 Visual MODFLOW 工程文件(vmf 文件), 点击输入菜单(Input)进入输入模块中, 选择边界条件菜单(Boundary)中的子菜单(Wall)进入墙体边界条件输入模块中, 软件的工具栏中提供了分配、编辑、删除和复制等几种方法, 可根据用户要求对墙体边界进行创建和修改。

墙体边界的输入参数包括边界编码(Code #), 边界所在单元的面(Face), 线段起始点和终点的墙体厚度(Thickness)和渗透系数(Conductivity)等。通过点击表示单元的方框可选择墙体边界位于单元的哪个面。

1.2 用墙体边界模拟断层

水平流障碍边界软件包——墙体边界设计的一个关键假设就是墙体的厚度(Thickness)相对于网格单元(Cell)水平方向的边长是足够小的以至于可被忽

收稿日期: 2004-07-30

基金项目: 教育部跨世纪优秀人才资助项目(编号: 2000-16)

作者简介: 朱 斌(1969-), 男, 江西遂川人, 中国矿业大学(北京)博士生, 桂林工学院讲师, 主要从事水文地质和工程地质研究。

略. 这对于大范围的, 同时又有众多断层分布地区的数值模拟是相当重要的, 因为在通常情况下, 网格单元的边长很宽, 如本算例中每个单元的宽度达 350 m, 而断层的宽度是达不到这一范围的. 利用这一假设, 研究者就可以用它来模拟断层, 而不必通过加密网格的方法来进行模拟, 从而提高了模型的计算效率.

在软件包数值算法设计中, 墙体的厚度并不被直接用于数值计算, 而是将墙体的渗透系数 (Conductivity) 除以它的厚度, 获得一个新的渗透系数用于最终的数值计算中^[1], 因此, 如果要用墙体边界模拟隔水断层, 为使其模拟效果好, 则可通过调整墙体厚度和渗透系数这 2 个参数来获得 1 个合理的渗透系数.

1.3 对断层参数的修正

图 1 用示意图的形式显示了两个被不同角度的闭合断层边界封闭的区域概念模型, 两模型封闭的区域面积相同. 但模型运行后, 结果会发现, 流经模型 2 中断层边界的渗漏量比流经模型 1 中的大.

产生这一问题的原因是由于 Visual MODFLOW 不能够完全用直线来拟合与网格线方向呈一定角度的断层. 图 2 显示出了用墙体边界拟合模型 2 中闭合断层边界的局部放大图, 从该图中可以看出墙体边界单元是以锯齿形来模拟与网格线呈夹角关系的断层, 这样在数值模型中墙体边界的总长度将会比概念模型中断层的总长度更长, 也就意味着有更多区域的流体流经墙体边界, 从而造成渗漏量过大的问题.

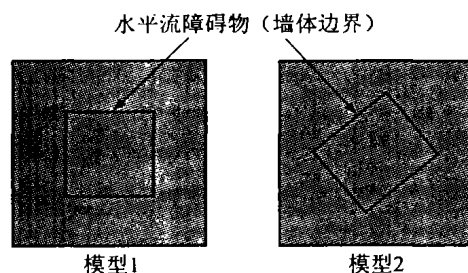


图 1 被不同角度闭合断层边界封闭的区域概念模型
Fig.1 Two models of area surrounded by closed faults with different angle

为弥补数值模型中由于墙体边界长度过长而产生的问题, 断层的水力学参数必须被修正, 文献[6]中提出了一种修正方法, 即通过减小墙体边界渗透系数的方法以修正断层的渗透系数 (见图 3), 图 3 中直角三角形两边长按下式计算.

$$HYDCHR1_{num_mod} = HYDCHR_{faults} \times \cos \alpha$$

$$HYDCHR2_{num_mod} = HYDCHR_{faults} \times \sin \alpha \quad (1)$$

式中, $HYDCHR1_{num_mod}$, $HYDCHR2_{num_mod}$ 为墙体边界数值模型水力参数; $HYDCHR_{faults}$ 为实际断层边界水力参数.

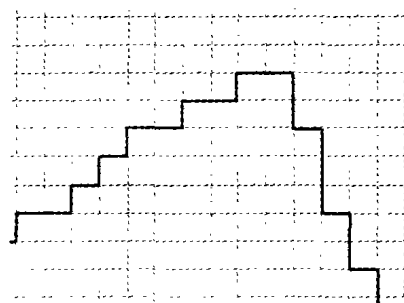


图 2 用墙体边界拟合模型 2 中闭合断层边界
Fig.2 Plot of fitting closed faults with walls in model 2

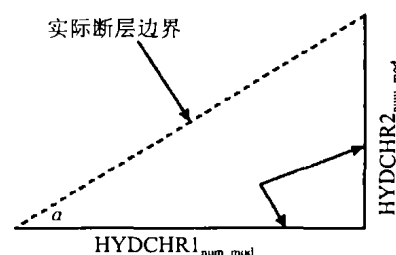


图 3 与网络呈一定角度的断层边界水力参数修正方法
Fig.3 Method of modifying hydraulic characteristic of faults angled with grid

2 工程实例

2.1 研究区地质背景

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^[8], 区内地层从老至新有九层, 分别为太古界、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. 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.

研究区内规模巨大的高角度 (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^[8], NE、NNE 向断层组即属于这一类型. 在力学性质上多为压或压扭性的阻水断层. 断层走向在 15°~25° 之间, 其中 80% 倾角在 50° 以上, 65% 的断层倾向为 SE、SEE.

NW 向断层组无论从数量和规模上都不及 NE、NNE 向断层组, 且多为弱透水的张扭性正断层. 其往往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的杨庄地堑、北部的河凹地堑.

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, 挑选出 23 条在建模和计算中需要考虑的断层 (图 4), 表 1 列出了各断层性质及其在计算

中所采用的水力参数.

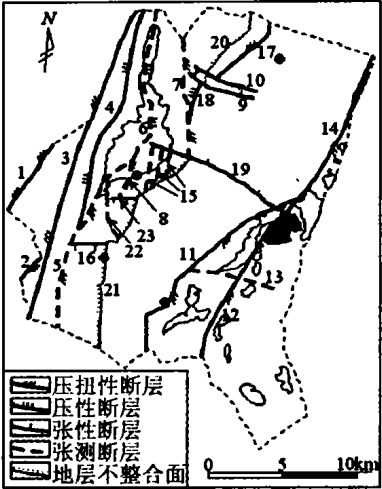


图4 研究区断层分布图

Fig.4 Map of the Faults in Study Area

表 1 计算模型中考虑的断层性质及水力参数

Tab.1 Properties and hydraulic characteristic of faults considered into model

序号	断层名称	产状			断距 /m	水力参数		备 注
		走向	倾向	倾角/°		宽度/m	渗透系数 /m·d ⁻¹	
1	刘桥正断层	15°	W	70	300~500	10	0.1	29号断层
2	半截楼正断层	25°	SE	70	>500	10	0.1	35号断层
3	柳元正断层	17°	NWW	70	60~460	10	0.1	(37)号断层
4	孙圩子正断层	10°	NWW	70	>200	10	0.1	(38)号断层
5	正断层					10	8.64e-15	推测断层
6	正断层					10	8.64e-8	推测断层
7	正断层					10	0.1	推测断层
8	正断层					10	8.64e-8	推测断层
9	河凹二号正断层	285°	NE80°	-84	70~33	10	0.1	(46)号断层
10	河凹一号正断层	285°	SW	60	100~15	10	0.1	(45)号断层
11	青龙山逆掩断层	27°	SE20°	-50	700	50	8.64e-16	50号断层
12	孙庄压扭性断层	13°~15°	SEE20°	-45		50	8.64e-16	13*号断层
13	青谷张扭性断层	250°	N45°	-75		50	8.64e-16	47*号断层
14	青龙山逆掩断层	27°	SE20°	-50	700	10	0.1	(50)号断层
15						20	8.64e-26	推测断层组
16	西张集张扭性断层	270°	N	80	20~150	10	0.01	44*号断层
17	坡里逆断层	25°	NWW60°	-80		10	0.01	(44)号断层
18	正断层					10	0.1	推测断层
19	杨庄一号正断层	74°~88°	SW62°	-75	150~247	10	0.1号断层	
20	地层不整合面					10	0.1	
21	地层不整合面					10	8.64e-15	
22	正断层					60	0.1	推测断层
23	刘庄张扭性断层	280°	SSW	70	50~100	20	0.1	42*号断层

注:备注中带*号的断层数据来自文献[9],其余断层数据来自文献[8](包括推测断层).

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:

- 1) 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沉积物.
- 2) 岩溶裂隙承压含水层,分布于研究区中部的闸

2.2 研究区水文地质条件

区内现有2个水源地,分别位于研究区东西两侧的复式背斜上——11号断层以东的慢顶山~老龙脊复背斜和21号地层不整合面以西的肖县~相山复背斜,2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.

研究区中部则为闸河复向斜,其中分布了一套二迭、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(埋藏深度在500~600 m),不易于开采,故一般不将它作为取水目的层位,而为煤矿井主要充水含水层.淮北市主要的煤矿开采区闸河煤田就位于该部位.

河复向斜内,隐伏于第四、第三、二迭系之下,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,故又称太灰水.

- 3) 岩溶裂隙承压含水层,分布于整个研究区,含水介质为年代较老的奥陶系碳酸盐岩,俗称奥灰水,本

次计算过程中取奥灰含水层顶板以下 3 m 至岩溶发育下限(约 250 m)作为主要含水段。

2.3 地下水流补给、径流、排泄条件

以整个区域内均有分布的奥灰水为例,地下水流的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,这两种边界属于模型的第二类边界条件,其补排量均用 Visual MODFLOW 软件自身提供的 GHB(General Head Boundary)边界条件输入,具体数值依边界处水位梯度和模拟期间降水量的不同而不同,如水位梯度大的地方和降水量大的时期补排量大,反之则小,取值范围在 8.0~400.0 m^2/d 。

奥灰水在垂向上主要接受两种补给:大气降水补给和越流补给。闸河复向斜埋藏型岩溶地区为奥灰水的主要径流区,因该区奥灰水埋藏深,故仅接受少量的越流补给,其补给量由软件在计算过程中自行确定。东西两侧复背斜上的基岩裸露区为奥灰水直接补给区,接受大气降水补给,可用软件自身提供的 Recharge 边界软件包输入。根据模拟期(1999 年)当年各月降水量统计资料,其取值范围在 0.0~132.7 mm/月。东西两侧复背斜上的覆盖型岩溶地区,属于奥灰水的补给一径流区,奥灰水在该区接受第四系潜水的越流补给,其补给量也由软件在计算过程中自行确定。

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,该部分水量总计约有 80 000.0 m^3/d 。

3 结果分析

3.1 模型的参数校核

对水文地质参数的试验研究有较多的文献提及^[10,11]。图 5 显示了在计算模型中观测孔分布及奥灰含水层参数分区情况,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 年 10 月至 2001 年 12 月这两年多地下水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合效果如图 6 所示,奥灰含水层各参数分区水力参数如表 2 所示。

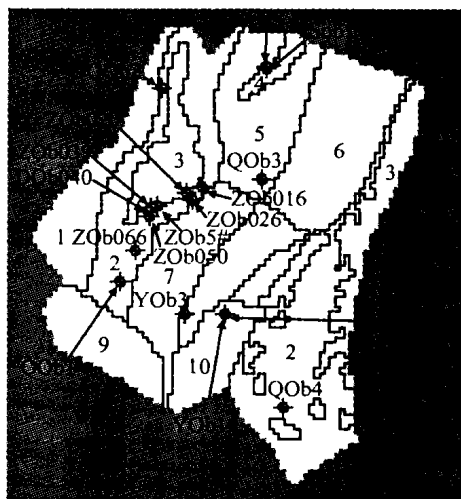


图5 建立在 Visual MODFLOW 数值模拟模型中的观测孔分布位置及奥灰含水层参数分区

Fig.5 Allotment of observation wells and hydraulic parameter zoning of ordovician aquifer constructed in visual MODFLOW numerical simulation model

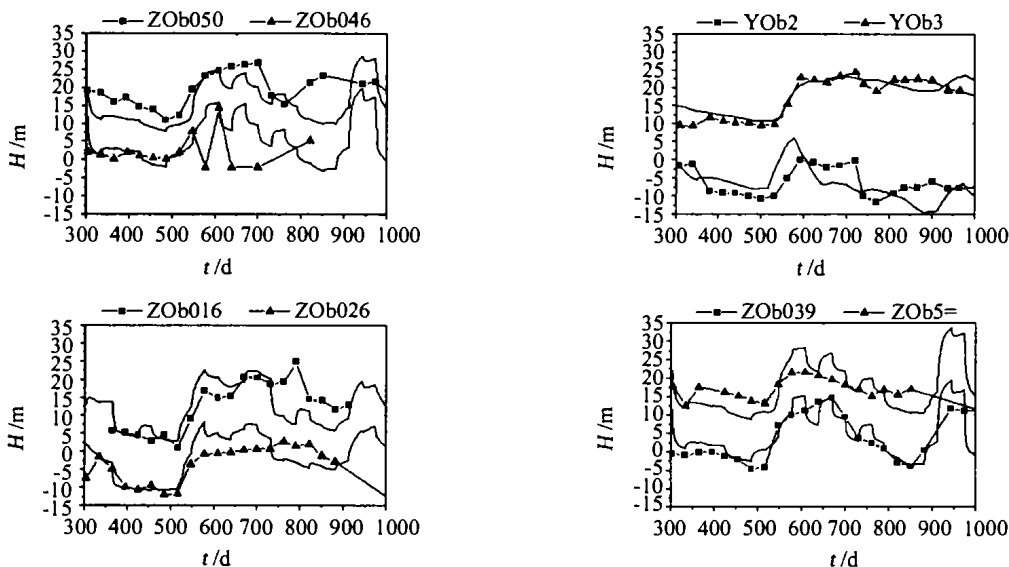


图6 奥灰水水位观测数据(标志线)与模拟计算结果(实线)拟合图

Fig.6 Plot of fitting results between the groundwater level monitoring (symbol line) and the simulation(solid line)

表2 奥灰含水层各参数分区水力参数

Tab. 2 Table of hydraulic characteristics of zones in ordovician aquifer

分区号	水平渗透系数 $K_x, K_y/m \cdot d^{-1}$	垂直渗透系数 $K_z/m \cdot d^{-1}$	贮水系数 S_i/m^{-1}
1	12.10	$8.64e-6$	$3e-5$
2	20.74	$8.64e-6$	$1e-5$
3	24.97	$8.64e-6$	$1e-5$
4	5.18	$8.64e-6$	$3.5e-5$
5	12.61	$8.64e-6$	$3.5e-5$
6	11.66	$8.64e-6$	$3e-5$
7	27.65	$8.64e-6$	$1.2e-5$
8	25.92	$8.64e-6$	$1e-5$
9	10.37	$8.64e-6$	$2e-5$
10	5.18	$8.64e-6$	$1e-5$

3.2 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,现特选取四对八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.表3列出了所选取的各对观测孔水位观测数据统计结果.

表3 选取的奥灰水观测孔水位观测数据统计

Tab. 3 Statistical results of groundwater level monitoring to ordovician aquifer from observation wells selected

观测孔	孔间距 /m	平均值 /m	最大值 /m	最小值 /m	标准差	孔间 断层
ZOb016 ZOb026	1032.57	12.41 -3.89	24.76 2.77	0.98 -12.6	6.95 5.22	15
ZOb039 ZOb5 #	330.49	3.77 16.77	14.53 21.57	-4.67 11.49	6.43 2.89	8
ZOb050 DOb046	390.51	19.38 2.22	26.84 14.36	10.87 -2.12	4.65 4.45	8
YOb2 YOb3	2607.04	-5.09 15.73	0 24.3	-11.76 9.38	3.97 5.30	11

从表3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 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.图6的拟合结果反映了这一现象.

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,表3反映出其水位最大值为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.

3.3 模拟计算结果对断层的识别效果

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研究者所期望看到的结果如本例中的断层信息.这里选择第365 d的研究区数值模拟计算结果.图7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.

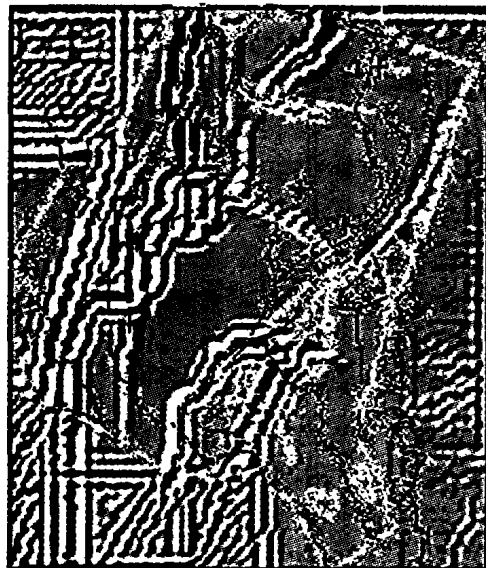


图7 由模拟计算结果形成的断层影像图

Fig.7 Faults image map formed from simulation results

4 结束语

(1) 应用 Visual MODFLOW 的墙体边界(Wall)条件模拟断层,可提高有限差分方法对具有复杂边界条件、区内又具有众多断层分布地区的实用性,大大减少了网格划分密度,从而提高了模型的计算效率.

(2) 为了更好地模拟与水平方向呈一定角度的实际断层边界,克服由锯齿现象所带来的水量渗透过多的问题,需要对断层的水力参数进行一定的修正,以便将实际断层边界水力参数转换成墙体边界水力参数——模型计算参数,以提高模拟计算精度.

(3) 实际计算结果表明,研究区地下水受断层的影响显著,尤其是在隔水断层分布较多的地区,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,这使得相距很近的观测孔之间水位差异很大,墙体边界的设置可将这一现象模拟出来。

参考文献:

- [1] HSIEH P A, FRECKLETON J R. Documentation of a Computer Program to Simulate Horizontal—Flow Barriers Using the U S Geological Survey Modular Three—Dimensional Finite—Different Ground—Water Flow Model[R]. U S Geological Survey Open—File Report, 1992.
- [2] THOMAS A O, DRURY D M, NORRIS G, O'HANNESIN S F, VOGAN J L. The In—situ Treatment of Trichlorethene—contaminated Groundwater Using a Reactive Barrier—Results of Laboratory Feasibility Studies and Preliminary Design Considerations[A]. van den Brink W J, Bosman R, Arendt F. Contaminated Soils' 95 [C]. The Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1995. 1 083-1 091.
- [3] PHILIP L K. An Investigation into Contaminant Transport Process through Single—phase Cement—bentonite Slurry Walls [J]. *Engineering Geology*, 2001, 60: 209-221.
- [4] HARBAUGH A W, BANTA E R, HILL M C, McDonald M G. Modflow—2000, the U. S. Geological Survey Modular Ground—Water Flow Process[R]. U S Geological Survey Open—File Report 00—92, 2000.
- [5] MARLER J, SHEMIN G. The Permeability of the Elkhorn Fault Zone, South Park, Colorado[J]. *Groundwater*, 2003, 41 (3): 223-233.
- [6] WINSTON R B. Upgrade to MODFLOW-GUI; Addition of MOD-PATH, ZONEBDGT, and Additional MODFLOW Packages to the U. S. Geological Survey MODFLOW—96 Graphical—User Interface[R]. U S Geological Survey Open—File Report, 1999.
- [7] 罗元贵, 叶桂均, 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, 1997.
- LUO Yuan-hua, YE Gui-jun, WU Qiang, *et al.* Study on the Rational Development of Water Resource in Jiaozuo city Considered as Energy Industry Base[R]. Beijing: China University of Mining & Technology, 1997.
- [8] 安徽省区调队. 杨山、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.
- Group of Regional Geological Survey of Anhui Province, Regional Geological Investigation with a scale of 1 : 200,000 into Dangshan, Suxian, Lingbi area[R]. Hefei: Geological Bureau of Anhui Province, 1977.
- [9] 安徽省第一水文地质工程地质队. 安徽省淮北部岩溶区水文地质普查报告[R]. 合肥: 安徽省地质局, 1990.
- No. 1 Group of Hydrogeology and Engineering Geology of Anhui Province, General Hydrogeological Investigation into the Karst Region Located in North Huaibei city of Anhui Province[R]. Hefei: Geological Bureau of Anhui Province, 1990.
- [10] WU Qiang, YIN Zhong-min, WU Xun. *Groundwater Study in the Weerselo Area Overijssel the Netherlands*[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2001.
- [11] MOENCH A F. Importance of the Vadose Zone in Analyses of Unconfined Aquifer Tests[J]. *Groundwater*, 2004, 42 (2): 223-233.

Application of Wall Boundary in Visual MODFLOW to simulate faults and its practice

ZHU Bin^{1,2}, WU Qiang²

(1. Guilin Institute of Technology, Guilin 541004, China; 2. China University of Mining Technology, Beijing 100083, China)

Abstract: The Horizontal—Flow Barrier (HFB) Package, or Wall Boundary as it is referred to in Visual MODFLOW designed for groundwater numerical simulation, was developed to simulate thin, vertical, low—permeability features that impede the horizontal flow of groundwater. The groundwater numerical simulation to study area was carried through, simulating the faults by use of Wall Boundary, adjusting the hydraulic characteristics of the faults, which are at an angle to grid, through the method brought forward by Winston, and selecting 23 faults controlling the groundwater flowing in Huaibei city, which there are a number of compresso—shear and water—resisting faults. The results indicate that the groundwater flow in study area is influenced evidently by these faults, the method of faults simulation applying Wall Boundary could reflect the impact of the faults to the groundwater flow better. 7figs., 3tabs., 11refs.

Key words: faults; Horizontal—Flow Barrier; groundwater numerical simulation; Visual MODFLOW; Huaibei

Biography: ZHU Bin, male, born in 1969, Ph. D., lecturer, hydrogeology and engineering geology.