

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2020.09.012

# 武汉二七商务区地下水动态模拟及最高水位预测

袁广坤

(武汉理工大学 土木工程与建筑学院, 武汉 430070)

**摘要:**采用 FEFLOW 数值模拟软件对武汉汉口片区地下水动态变化进行数值模拟,利用区域模型为二七商务区提供边界条件,从而构建商务区地下水动态变化精细化模型。通过模拟计算得到商务区东面长江抗洪墙一带承压含水层可能出现的最高地下水位为 27.5 m,由东向西地下水位呈逐渐降低趋势,在商务区内达到 22.0~25.9 m。研究成果可为该地区抗浮设计提供合理的抗浮设防水位,为准确计算地下水浮力提供参考依据。

**关键词:**临江地区;抗浮水位;FEFLOW;数值模拟

中图分类号:X143

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2020)09-109-09

## Groundwater dynamic simulation and maximum water level prediction of Erqi business district in Wuhan

YUAN Guangkun

(School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, P. R. China)

**Abstract:** FEFLOW numerical simulation software was employed to simulate the dynamic changes of groundwater of Hankou district, Wuhan. The regional model was used to provide boundary conditions for Erqi business district so as to construct the refined model of groundwater dynamic change in the studied area. The highest water level of confined aquifer got by simulation was 27.5 m around the flood control wall of the Yangtze river in the east of business district. The groundwater level gradually decreased from east to west, and finally dropped to 22.0~25.9 m within the business district. The research results can provide reasonable anti-floating fortification water level for anti-floating design in the area, furnishing the basis for accurate calculation of groundwater buoyancy.

**Keywords:** Linjiang area; anti-floating water level; FEFLOW; numerical simulation

随着中国城市建设迅猛发展,城市人口密度逐步提高,城市核心用地紧张,大型地下广场、地下停车场、地铁轨道交通等地下构(建)筑大量兴建,地下结构的规模越来越大,越来越深。随之而来的是更加复杂的土层及地下水情况,特别是武汉这类河流湖泊众多的城市,将面临更为严峻的地下结构抗浮问题。近年来,地下结构上浮事故频繁,如:2014年广州市花都区地下车库底板上浮事故<sup>[1]</sup>、2007年湖北黄石市劲牌有限公司车间地下室地面隆起事故<sup>[2]</sup>、2010年深圳坡地建筑地下室上浮事故<sup>[3]</sup>等。上述案例的地下结构上浮事故大多是由于对可能出现的地下最高水位估算不足,导致抗浮措施未到位所致。由此可见,抗浮水位的确定对抗

收稿日期:2019-12-21

基金项目:教育部科学技术研究重点资助项目(109110);武汉市城建委科技计划资助项目(201637)。

Supported by Key (Key grant) Project of Chinese Ministry of Education(109110); Science and Technology Project of Wuhan Urban Construction Commission(201637).

作者简介:袁广坤(1993—),男,硕士研究生,主要从事临江地区地下结构方向研究,(E-mail)510147135@qq.com。

浮设计尤为关键,抗浮水位设计取值过高,会导致资源上浪费;反之,将会危害到构(建)筑物的结构安全。目前,武汉临江地区抗浮设计水位取值多结合勘察期观测水位值与工程经验值,但不能有效地预测极端情况下地下水水位。

在复杂的地下水问题中,由于试验仪器、场地、材料等条件限制,往往很难对未来发展情况做出准确的评估和预测。近年来,计算机技术迅猛发展,地下水数值模拟软件亦日渐成熟,为解决复杂的地下水问题提供了新的解决办法。其中,FEFLOW 就是得到学者广泛认可的地下水数值模拟软件。由德国 WAYS 水资源研究所开发的 FEFLOW 软件对复杂的水文地质情况有优秀的处理及运算能力,通过地理信息系统输入数据,可用于模拟饱和、非饱和流场三维水流动态变化过程,其功能涵盖了地下水水量及水质问题中的各个方面<sup>[4-6]</sup>。姚丽利等<sup>[7]</sup>利用 FEFLOW 建立了北京市平原区地下水三维数值模型,得到地下水开采量和地下水水位的关系,为地下水管理提供技术依据;赵颖旺等<sup>[8]</sup>利用 FEFLOW 建立了三维地下水非均质模型,对结点控制区域的均衡性质进行研究,分析了使用 Lumped Mass 方法时的水头反常现象,经过数值分析发现,水头反常现象是由有限单元法中对流量计算引起;另外,霍再林等<sup>[9-10]</sup>建立了人工神经网络与地下水数值模拟相结合的干旱内陆区地下水水位动态模型(ANN-FEFLOW),与单一 FEFLOW 模型相比,ANN-FEFLOW 模型对干旱地区临近边界处地下水水位动态模拟精确度明显提高。

文中使用 FEFLOW 数值模拟软件,以正在设计阶段的武汉二七商务区为研究对象,建立该地区地下水水位动态变化数值模型,预测极端情况下研究区地下水水位,为武汉二七商务区及该临江地区抗浮水位设计取值提供参考依据。

## 1 研究区概况

考虑到二七商务区面积较小,除了东南侧的长江是明显的水力边界,其他几个方向上没有天然的地下水界线,很难直接定义二七商务区的边界条件。在这种情况下,首先建立具有明显水力边界的区域模型(汉口片区),利用区域模型的计算结果对二七商务区精细化模型的边界赋值,通过地下水水位监测数据与模型计算值拟合对模型参数进行修正,预测极端情况下二七商务区水头分布情况。

精细化模型区域位于武汉市江岸区二七滨江商务区核心区,北至发展大道,南至头道街,西至解放大道,东至长江边,地理坐标为  $114.324714^{\circ} \sim 114.334038^{\circ}$ ,  $30.628082^{\circ} \sim 30.638117^{\circ}$ ,绝对高程为 18~24 m 左右,东西方向长 972.5 m,南北方向长 1 572.5 m,面积约为 1.45 km<sup>2</sup>。根据国家气象中心统计武汉市 1981 年~2010 年气象数据显示,年平均气温 17.1℃,极端低温为 -12.8℃,出现在 1984 年 1 月 22 日;极端高温 39.6℃,出现在 2003 年 8 月 1 日。全年气温最高为 7 月,平均气温 29.1℃;1 月最低,平均气温 4℃。根据国家气象中心统计气象数据显示,1980 年~2010 年平均降水量为 1 316 mm,降水量在各年份中分布极不均匀,最大降水量为 1983 年的 1 894.9 mm,最小降水量为 2001 年的 899.8 mm,降雨量相差 1 倍多。30 年各月平均降水量分布,如图 1 所示,在多年数据中最高月降水量为 1998 年 7 月,连续降雨 12 d,降水量 758.4 mm。根据湖北省水资源公报中数据,2001 年~2017 年武汉市各年降水量,如图 2 所示。其中,2016 年降雨量排历史第二高值,仅次于 1983 年,可为抗浮设计研究中极端情况提供参考依据。丰水期为 4~7 月,连续 4 月降水量为 1 290.8 mm,占全年降水量 71.2%,降水量最多月份为 7 月,降水量为 510.2 mm。

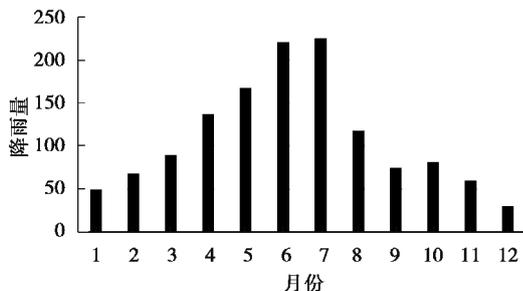


图 1 30 年平均降水量分布图

Fig. 1 Distribution map of average monthly precipitation over 30 years

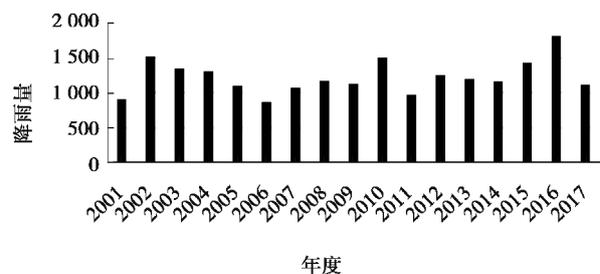


图 2 2001~2017 年武汉市各年降水量

Fig. 2 Annual precipitation of Wuhan from 2001 to 2017

收集汉口片区 261 个钻孔的地层信息,根据收集到的地层信息以及研究成果,得出研究区地层岩性及其分布特征。场地地层岩性可分为 4 层,1-1 杂填土与 1-2 素填土为模型第 1 层,第 1 层厚度为 0.1~10.84 m;2-1 粉土/粉质黏土,2-2 粉质黏土夹粉土,2-3 粉质黏土、粉土、粉砂互层为模型第 2 层,第 2 层厚度为 3.94~38.51 m;2-4 粉细砂/中粗砂,2-5 砂夹卵砾石,3-1 粉质黏土、黏土混砂、卵砾石为模型第 3 层,第 3 层厚度为 0.44~44.14 m;第 4 层为强风化泥岩(基岩)。

## 2 研究方法

使用 FEFLOW6.1 数值模拟软件,为真实有效地还原汉口片区及二七商务区地下水流场动态变化过程及特点,通过对研究区水文地质条件分析,依据渗流连续性方程和达西定律,参考学者所建数学模型<sup>[11-13]</sup>,研究区的地下水流动三维非稳定流数学模型为

$$\left\{ \begin{array}{l} K_{xx} \left( \frac{\partial H}{\partial x} \right) + K_{yy} \left( \frac{\partial H}{\partial y} \right) - K_{zz} \left( \frac{\partial H}{\partial z} \right) = \mu_d \frac{\partial H}{\partial t}, \quad (x, y, z) \in \Omega, t \geq 0 \\ \frac{\partial}{\partial x} \left( K_{xx} \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_{yy} \frac{\partial H}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left( K_{zz} \frac{\partial H}{\partial z} \right) + \epsilon = \mu_s \frac{\partial H}{\partial t}, \quad (x, y, z) \in S_0, t \geq 0 \\ H(x, y, z, 0) = H_0, \quad (x, y, z) \in \Omega, t = 0 \\ H(x, y, z, t) = H_1, \quad (x, y, z) \in S_1, t \geq 0 \\ K \left( \frac{\partial H}{\partial n} \right) \Big|_{S_2} = q(x, y, z, t), \quad (x, y, z) \in S_2, t \geq 0 \end{array} \right.$$

式中: $\Omega$  表示研究区域; $K_{xx}$  为  $x$  主方向上的渗透系数; $K_{yy}$  为  $y$  主方向上的渗透系数; $K_{zz}$  为  $z$  主方向上的渗透系数,  $m/d$ ;  $H_0$  为初始地下水位,  $m$ ;  $H_1$  为长江、汉江水位,  $m$ ;  $S_0$  为地下水自由面;  $S_1$  为第一类边界, 表示长江、汉江定水头边界;  $S_2$  为第二类边界;  $\mu_s$  为单位储水系数,  $1/m$ ;  $\mu_d$  为给水度;  $\epsilon$  为源汇项;  $q(x, y, z, t)$  为第二类边界的水流量,  $m/d$ 。

## 3 地下水动态模拟及最高水位预测

为了获得二七商务区精细模型的边界条件,数值模型先以汉口片区水文地质条件及数学模型为基础,利用 FEFLOW6.1 为平台,经过网络剖分、给定边界条件、配置模型参数和设置模型初始条件等步骤,构建出汉口片区区域模型。然后,通过区域模型计算得出研究区边界条件,构建二七商务区精细化模型<sup>[14-16]</sup>进行分析。

### 3.1 构建区域模型

#### 3.1.1 网络剖分

在平面上,区域模型结构范围包括整个汉口片区,北至朱家河,南侧和东侧分别为汉江和长江,西侧边界为三环线,模拟区东西方向长约 19 704 m,南北方向长约 14 012 m。根据地层信息,模型划分为 4 层,第 4 层为基岩,在模型中视为隔水底板,模型底部高程高度取 -50 m。根据有限单元法对汉口片区进行三角网络剖分,对二七商务区位置的网格进行适当加密,生成有限元格网,汉口片区区域模型共有 52 356 个单元格,33 545 个节点,模型三维结构如图 3 所示。

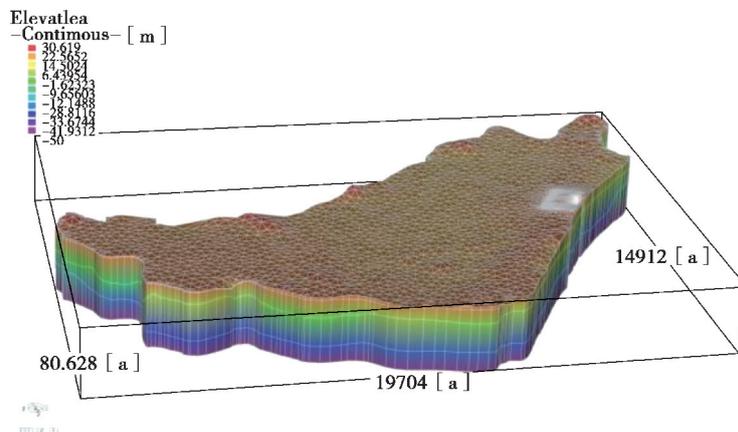


图 3 区域模型三维结构示意图

Fig. 3 3D structure diagram of the regional model

### 3.1.2 给定边界条件

模拟区东侧为长江,南侧为汉江,北至朱家河,西侧边界参照地形图界线为三环线。模拟研究主要针对东、南两侧长江及汉江水位变化对承压含水层地下水动态的影响,将模型东部边界及南部边界设为第一类边界(定水头边界),边界水头值根据实测数据赋值。不考虑朱家河对承压含水层的影响,北部设为隔水边界。根据实测资料显示,承压含水层接受长江、汉江的补给,长江、汉江为流入边界,根据水均衡原理在西部边界上设置第二类边界(定流量边界),使模拟区地下水收支达到平衡。由于模拟区内地表基本为建筑、公路覆盖,鲜有降雨直接入渗补给的区域,因此,不考虑上边界的流入、流出(降雨入渗、蒸发排泄),同时,将模型底部视为隔水底板,不考虑地下水的向下渗漏。综上所述,可将模拟区的边界条件概化为如图 4 所示。

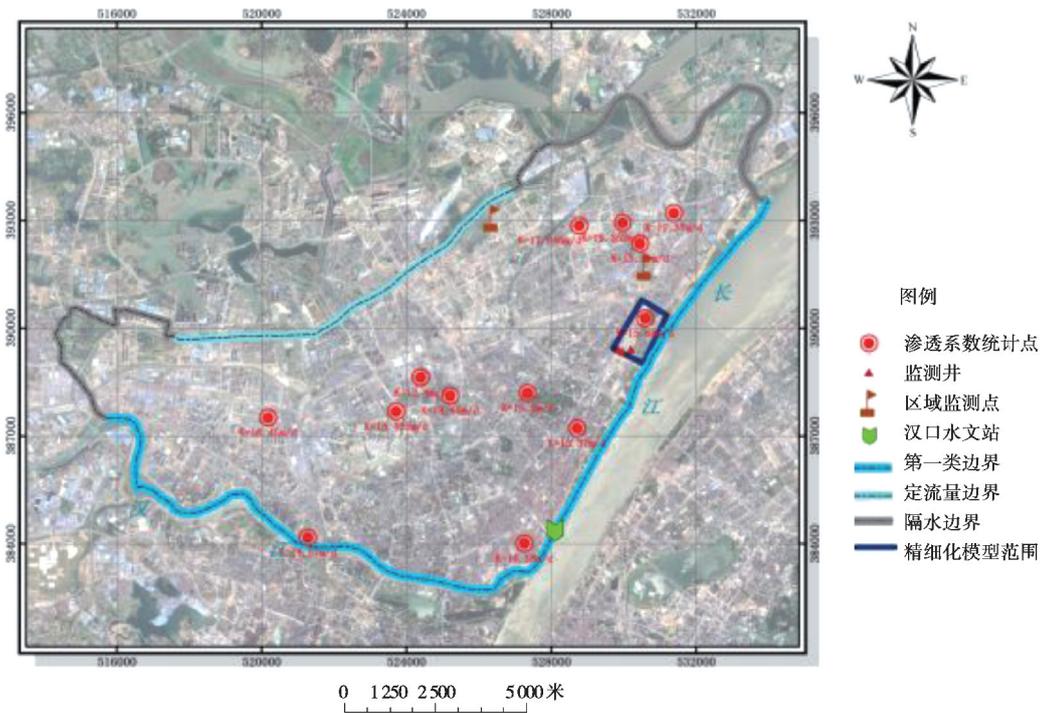


图 4 区域模型边界条件示意图

Fig. 4 The diagram of boundary conditions of the regional model

### 3.1.3 模型参数设置

地下水位动态模拟需要确定水文地质参数,而本次数值模型主要参数为渗透系数、给水度及弹性给水度。根据现场调查,结合收集到的现场 13 个钻孔的抽水试验所得水文地质资料,利用空间插值的方法给区域内第 3 地层渗透系数进行赋值。因此,在空间上第 3 地层没有统一使用 1 个渗透系数,提高了模型的准确度,使得模型与实际情况更为相符;而第 1、2、4 层参数采用中国地质调查局公布的《地下水流数值模拟技术要求》中的经验参数计算,如表 1 所示。

表 1 区域模型各层水文地质参数一览表

Table 1 Hydrogeological parameter table of each layer on the regional model

地层	渗透系数/( $\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$ )			给水度	单位弹性给水度/(1/m)
	$K_{xx}$	$K_{yy}$	$K_{zz}$		
1	0.1	0.1	0.05	0.015	$1 \times 10^{-4}$
2	0.1	0.1	0.05	0.03	$1 \times 10^{-6}$
3	参数分区	参数分区	参数分区	0.05	$5 \times 10^{-4}$
4	0.05	0.05	0.025	0.01	$1 \times 10^{-6}$

### 3.1.4 模型初始条件

根据实测资料对区域模型赋参后,采用稳定流模型,并结合监测点初始水位(2017年9月29日监测水位)进行计算,得到模型的初始条件,承压含水层初始水位及地下水渗流场如图5、图6所示。地下水接受长江、汉江补给,向西侧汇流,从江边向内陆水力梯度逐渐降低、流速逐渐变慢。根据计算得到的初始条件,取时间步长为1d,模拟时间为2017年10月1日至2017年11月30日,以月为计算时段,采用非稳定流计算得到的最终结果如图7所示。

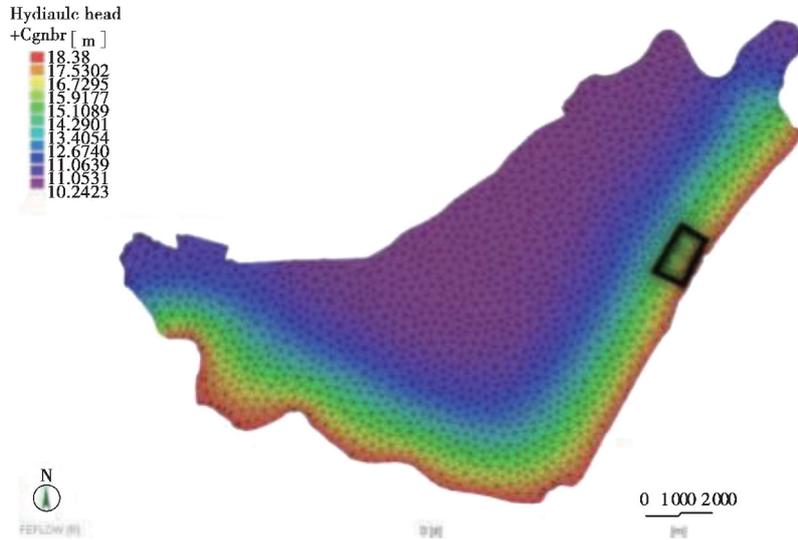


图 5 区域模型初始水位示意图

Fig. 5 Initial water level diagram of the regional model

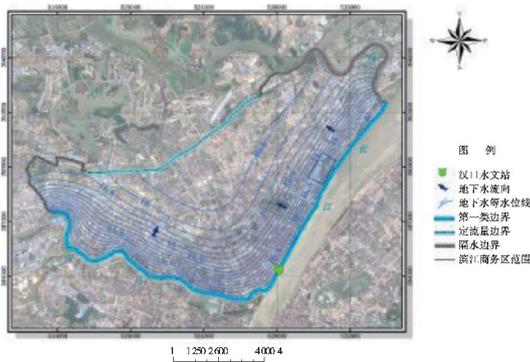


图 6 区域模型初始地下水流场

Fig. 6 Initial groundwater flow field of the regional model

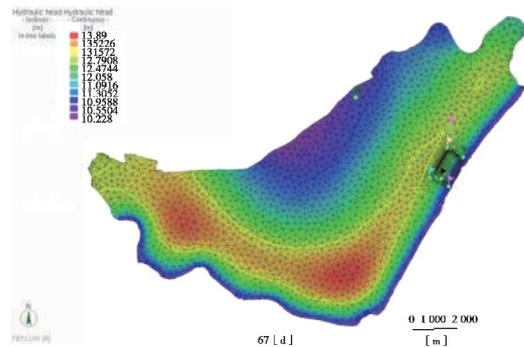


图 7 区域模型计算结果

Fig. 7 Calculation results of regional model

## 3.2 研究区精细化模型及模型校验

### 3.2.1 构建精细化模型

二七商务区精细化模型东至长江边,西至解放大道,南北边界分别为二七街和发展大道。在区域模型建模完成后,利用区域模型计算结果为研究区精细化模型建立边界条件,并在精细化模型中考虑抗洪墙,岸坡防渗装置等结构,建立精细化三维模型。采用三角网格剖分对二七商务区模型进行空间离散,对监测井及抗洪墙处的网格进行适当加密,生成有限元格网,完成共 77 560 个单元格,48 750 个节点。精细化三维模型层数及各层参数与区域模型相同,同样取时间步长为 1 d,模拟时间为 2017 年 10 月 1 日至 2017 年 11 月 30 日,采用非稳定流计算,精细化模型三维结构如图 8 所示。

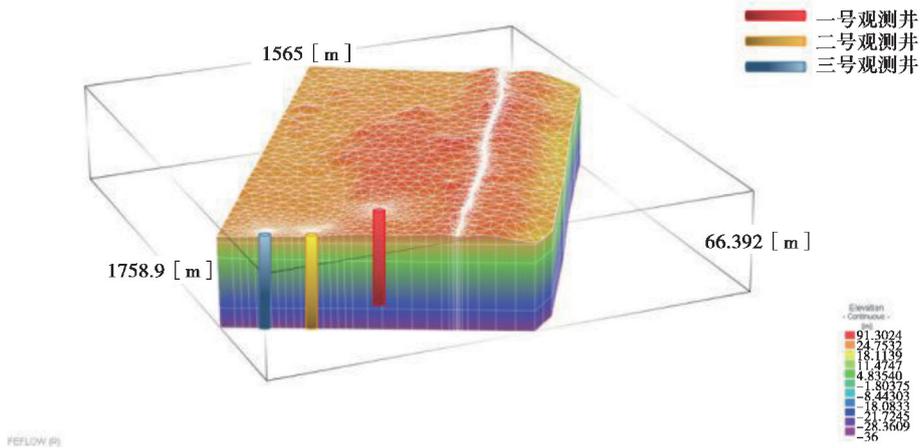


图 8 精细化模型三维结构示意图

Fig. 8 3D structure diagram of the refined model and No.1 observation well

3.2.2 模型校验

为了验证精细化模型能否准确地模拟出现场地下水流场实际情况,通过分析数值模拟值与现场监测值误差是否符合误差范围的要求以及数值模拟值与现场监测值动态变化过程是否相一致来对模型进行校验<sup>[17-18]</sup>。

为了校验模型误差范围,将精细化模型的计算结果与研究区内不同位置上的 3 个观测井的现场观测数据进行拟合对比,然后进行误差计算及分析。拟合结果如图 9、图 10、图 11 所示,模拟水位与现场监测水位误差分析如表 2 所示,其中,观测井 1 号整体误差最小,模拟效果良好。整体来说,模型与监测值绝对误差及上下波动值较小,由此可见,所构建的二七商务区精细化模型精度较高,参数赋值及模型结构合理,符合实际情况,可用于预测研究区内极端情况下最高水位。

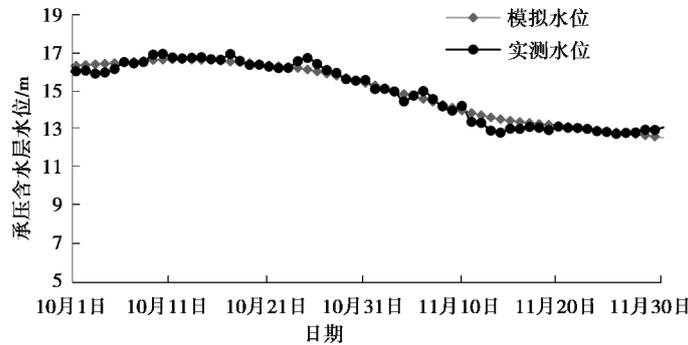


图 9 1 号观测井实测-模拟拟合曲线

Fig. 9 The fitting curve of simulation

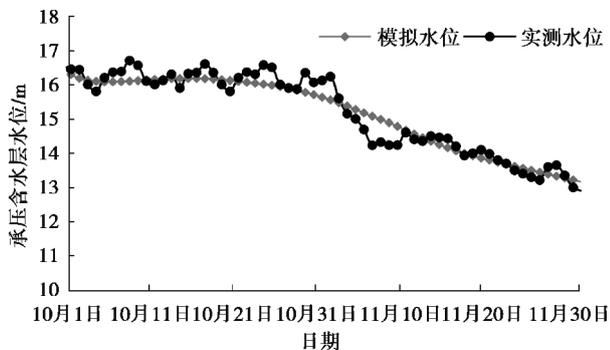


图 10 2 号观测井实测-模拟拟合曲线

Fig. 10 The fitting curve of simulation and No.2 observation well

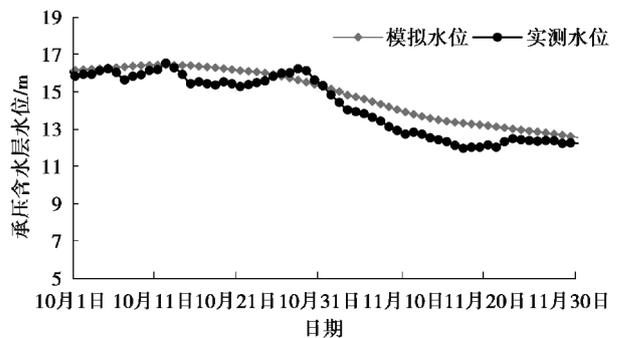


图 11 3 号观测井实测-模拟拟合曲线

Fig. 11 The fitting curve of simulation and No.3 observation well

表 2 观测井实测—模拟误差分析表

Table 2 The error analysis between observation well and simulation

观测井编号	最大误差/m	最小误差/m	平均误差/m	相关系数
1 号监测井	0.709 7	0.007 7	0.202 6	0.985 6
2 号监测井	1.345 7	0.035 1	0.637 2	0.967 6
3 号监测井	0.848 3	0.006 6	0.256 0	0.963 1

3.3 极端地下水位预测及抗浮设计水位参考值

武汉长江历史最高水位 27.63 m,假设未来某年出现这种极端情况,利用区域模型模拟该年地下水动态变化情况,并在精细化模型边界添加控制点,通过区域模型计算得到精细化模型的边界条件,利用精细化模型计算结果作为初始条件,在最高水位情况下考虑到自抗洪墙至长江一线会被江水淹没(如图 12 所示),在淹没时间足够长,达到 30 d 的情况下,通过模拟计算得到的二七商务区承压含水层水头分布情况平面图及剖面图,如图 13、图 14 所示。极端情况下抗洪墙西侧一带可能出现的最高地下水位为 27.5 m,地下水位向研究区一侧呈逐渐降低的趋势。研究区东边界临江大道距离江边抗洪墙大约 200 m,水位为 25.3~25.9 m;而研究区西边界解放大道处水位降低至 22.0~22.5 m。因此,在研究区范围内地下水位为 22.0~25.9 m。

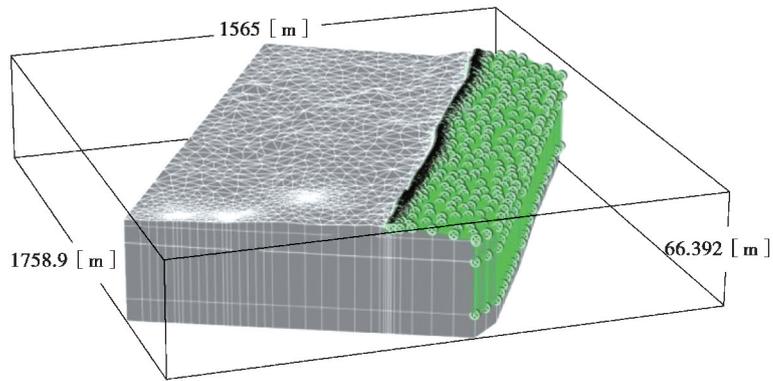


图 12 抗洪墙至长江一线淹没示意图

Fig. 12 The inundation diagram from flood control wall to the Yangtze river

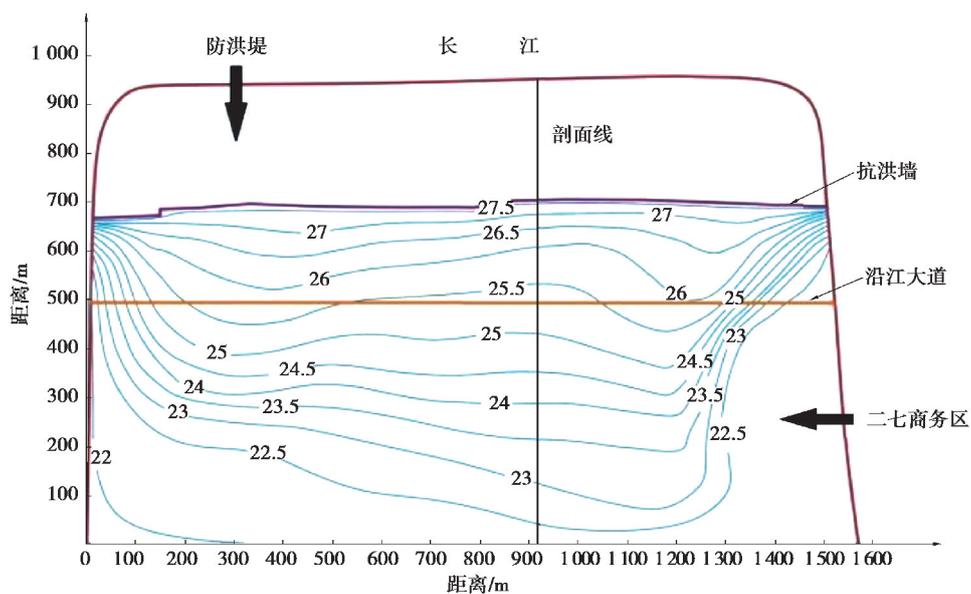


图 13 极端情况下二七商务区地下水流场平面图

Fig. 13 The floor plan of groundwater flow field in Erqi business district in extreme cases

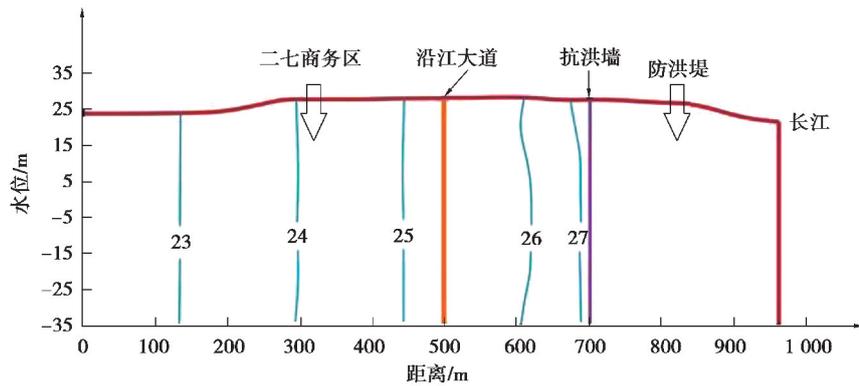


图 14 极端情况下二七商务区地下水流场剖面图

Fig. 14 The profile of groundwater flow field in Erqi business district in extreme cases

## 4 结 论

武汉地区河流湖泊众多,大量构(建)筑物临江而建,使得地下水情况变得更加复杂。文中利用软件 FEFLOW 先对汉口片区构建区域模型,利用区域模型为二七商务区精细化模型确定边界条件,构建研究区模型,对研究区地下水位动态变化进行数值模拟,预测了研究区内极端情况下最高水位。

1)数值模拟计算结果与实际勘察水位对比结果显示,模拟结果与实际水位相似,误差较小,数值模拟计算能真实反映研究区地下水流场变化过程。

2)数值模拟计算得到的二七商务区承压含水层水头分布,在研究区东边抗洪墙西侧一带可能出现的最高地下水位为 27.5 m,地下水位向西呈逐渐降低的趋势,在研究区范围内逐渐降低至 22~25.9 m。

3)根据数值模型预测研究区地下水位变化范围,可按区域分区设置抗浮水位,建议抗浮水位取 22~25.9 m。

### 参考文献:

- [1] 朱东风,曹洪,骆冠勇,等.截排减压抗浮系统在抗浮事故处理中的应用[J].岩土工程学报,2018,40(9):1746-1752.  
ZHU Dongfeng, CAO Hong, LUO Guanyong, et al. Application of interception and drainage anti-floating system in treatment of uplift accidents[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(9): 1746-1752. (in Chinese)
- [2] 陈政治,马哲胜,詹红中,等.地下建筑抗浮失效案例分析及处理[J].资源环境与工程,2009,23(1):47-51.  
CHEN Zhengzhi, MA Zhesheng, ZHAN Hongzhong, et al. Analysis on failure anti-floating case of underground buildings and its countermeasure[J]. Resources Environment & Engineering, 2009, 23(1): 47-51. (in Chinese)
- [3] 汪四新,屈娜.某坡地建筑地下室抗浮问题绿色技术处理方法[J].建筑技术,2012,43(10):925-928.  
WANG Sixin, QU Na. Dealing with the problem of sloping building bsaement's anti-uplift with green technological methods[J]. Architecture Technology, 2012, 43(10): 925-928. (in Chinese)
- [4] 李凡,李家科,马越,等.地下水数值模拟研究与应用进展[J].水资源与水工程学报,2018,29(1):99-104.  
LI Fan, LI Jiake, MA Yue, et al. The research and application progress of numerical simulation on groundwater[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2018, 29(1): 99-104. (in Chinese)
- [5] 王浩,陆垂裕,秦大庸,等.地下水数值计算与应用研究进展综述[J].地学前缘,2010,17(6):1-12.  
WANG Hao, LU Chuiyu, QIN Dayong, et al. Advances in method and application of groundwater numerical simulation[J]. Earth Science Frontiers, 2010, 17(6): 1-12. (in Chinese)
- [6] Trefry M G, Muffels C. FEFLOW: a finite-element ground water flow and transport modeling tool[J]. Ground Water, 2007, 45(5): 525-528.
- [7] 姚丽利,胡立堂,龚芳芳,等.北京市平原区地下水开采量反演的数值模拟方法[J].北京师范大学学报,2017,53(4):436-442.  
YAO Lili, HU Litang, GONG Fandfang, et al. Numerical simulations for groundwater withdrawal inversion in Beijing plain[J]. Journal of Beijing Normal University, 2017, 53(4): 436-442. (in Chinese)

- [8] 赵颖旺, 武强. 有限单元法模拟地下水流的水头反常现象——对流量计算的作用[J]. 水科学进展, 2018, 29(1): 50-56.  
ZHAO Yingwang, WU Qiang. Abnormal waterhead phenomenon in groundwater flow simulation by using the finite element method: caused by the computation of advection fluxes[J]. Advances in Water Science, 2018, 29(1): 50-56. (in Chinese)
- [9] 霍再林, 冯绍元, 康绍忠, 等. 神经网络与地下水流动数值模型在干旱内陆区地下水位变化分析中的应用[J]. 水利学报, 2009, 40(6): 724-728.  
HUO Zailin, FENG Shaoyuan, KANG Shaozhong, et al. Application of ANN and FEFLOW model to simulate groundwater level variation in arid inland area[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 40(6): 724-728. (in Chinese)
- [10] Huo Z L, Feng S Y, Kang S Z, et al. Numerically modelling groundwater in an arid area with ANN-generated dynamic boundary conditions[J]. Hydrological Processes, 2011, 25(5): 705-713.
- [11] 孙继成, 张旭昇, 胡雅杰, 等. 基于 GIS 技术和 FEFLOW 的秦王川盆地南部地下水数值模拟[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2010, 46(5): 31-38.  
SUN Jicheng, ZHANG Xusheng, HU Yajie, et al. Numerical simulation of groundwater system in the south of Qinwangchuan basin based on GIS technique and FEFLOW[J]. Journal of Lanzhou University(Natural Science), 2010, 46(5): 31-38. (in Chinese)
- [12] 安振东, 刘贯群, 张焘, 等. 建筑物场区地下水位预测与抗浮水位确定——以青岛啤酒城改造为例[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2015, 45(4): 103-109.  
AN Zhendong, LIU Guanqun, ZHANG Tao, et al. The prediction of groundwater level about building area and determination of anti-floating water level: taking the transformation of Qingdao beer city for example[J]. Periodical of Ocean University of China, 2015, 45(4): 103-109. (in Chinese)
- [13] Li J, Mao X M, Li M. Modeling hydrological processes in oasis of Heihe River Basin by landscape unit-based conceptual models integrated with FEFLOW and GIS[J]. Agricultural Water Management, 2017, 179: 338-351.
- [14] 李彩梅, 杨永刚, 秦作栋, 等. 基于 FEFLOW 和 GIS 技术的矿区地下水动态模拟及预测[J]. 干旱区地理, 2015, 38(2): 359-367.  
LI Caimei, YANG Yonggang, QIN Zuodong, et al. Simulation and prediction on variations of groundwater in mining area based on FEFLOW and GIS[J]. Arid Land Geography, 2015, 38(2): 359-367. (in Chinese)
- [15] Lavigne M A, Nastev M, Lefebvre R. Numerical simulation of groundwater flow in the Chateauguay river aquifers[J]. Canadian Water Resources Journal, 2010, 35(4): 469-486.
- [16] Pasanen A H, Okkonen J S. 3D geological models to groundwater flow models: data integration between GSI3D and groundwater flow modelling software GMS and FeFlow © [J]. Geological Society, London, Special Publications, 2017, 408(1): 71-87.
- [17] Giambastiani B M S, McCallum A M, Andersen M S, et al. Understanding groundwater processes by representing aquifer heterogeneity in the maules creek catchment, namoi valley (new south Wales, Australia) [J]. Hydrogeology Journal, 2012, 20(6): 1027-1044.
- [18] Feng S Y, Huo Z L, Kang S Z, et al. Groundwater simulation using a numerical model under different water resources management scenarios in an arid region of China[J]. Environmental Earth Sciences, 2011, 62(5): 961-971.

(编辑 陈移峰)