

# 扬中金源时代购物中心基坑降水数值模拟分析

葛 鹏<sup>1</sup>, 胡 远<sup>2</sup>, 左新明<sup>3</sup>

(1.江苏地质基桩工程公司,江苏 镇江 212000; 2.江苏科技大学土木工程与建筑学院,江苏 镇江 212000;  
3.河北省地矿局第五地质大队,河北 唐山 063000)

**摘要:**基坑降水的成功与否,将对基坑开挖和周边环境产生重要影响,因此有必要对基坑降水方案进行评估。针对扬中金源时代购物中心基坑降水问题,采用 MIDAS/GTS 对基坑降水效果进行研究。首先,依据地勘报告中提供的土体渗透系数,结合单井、双井抽水试验结果,反演出 MIDAS/GTS 中需要的土层渗流系数和边界函数;然后利用反演得到的参数,建立了考虑回灌井补水效应的三维基坑降水效果分析模型,模拟基坑内水位降深与时间的变化关系,并对基坑降水效果进行分析和评估,以期指导土方开挖工程的施工。

**关键词:**基坑降水;水文地质参数;渗透系数;MIDAS/GTS;数值分析法;反演计算

**中图分类号:**TU41 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2019)04-0063-07

## Numerical simulation analysis of foundation pit dewatering at Yangzhong Jinyuan Times Shopping Center

GE Peng<sup>1</sup>, HU Yuan<sup>2</sup>, ZUO Xinming<sup>3</sup>

(1.Jiangsu Geological Foundation Pile Engineering Co., Ltd., Zhenjiang Jiangsu 212000, China;  
2.School of Architecture and Civil Engineering, Jiangsu University of Science and Technology,  
Zhenjiang Jiangsu 212000, China;  
3.The Fifth Geological Brigade of Hebei Bureau of Geology and Mineral Resources Exploration,  
Tangshan Hebei 063000, China)

**Abstract:** Proper foundation pit dewatering will have an important impact on the foundation pit excavation and the surrounding environment, so it is necessary to evaluate the foundation pit dewatering plan. In view of the problem of foundation pit dewatering at Yangzhong Jinyuan Times Shopping Center, MIDAS/GTS was utilized to study the effect of foundation pit dewatering. Firstly, according to the soil permeability coefficient provided in the geological survey report, in combination with the single well and double well pumping test results, the soil permeability coefficient and boundary functions required in the MIDAS/GTS were inverted. Then, with the parameters obtained from the inversion, a 3-D analytical model of the foundation pit dewatering effect was established with consideration of the recharge effect of the backfilling well for simulation of the relationship between the water level drawdown and the time in the foundation pit any analysis and evaluation of the foundation pit dewatering effect, providing guide for earthwork excavation.

**Key words:** foundation pit dewatering; hydrogeological parameters; permeability coefficient; MIDAS/GTS; numerical analysis method; inversion calculation

## 0 引言

地下水控制是基坑工程的重要组成部分,越来越多的深基坑工程涉及降水问题,特别是在建筑物

密集区,基坑降水会引起周围一定范围内的地表沉降,严重时会造成邻近建(构)筑物破坏<sup>[1-3]</sup>。因此,基坑降水方案是否合理可行,关系到后续基坑工程

收稿日期:2019-01-08;修回日期:2019-03-06 DOI:10.12143/j.tkgc.2019.04.011

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:51579119);镇江市重点研发计划(社会发展)项目(编号:SH2018024)

作者简介:葛鹏,男,汉族,1977年生,高级工程师,岩土工程专业,硕士,长期从事岩土工程勘察、设计和施工管理工作,江苏省镇江市中山东路64号,522813987@qq.com。

引用格式:葛鹏,胡远,左新明.扬中金源时代购物中心基坑降水数值模拟分析[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2019,46(4):63-69.

GE Peng, HU Yuan, ZUO Xinming. Numerical simulation analysis of foundation pit dewatering at Yangzhong Jinyuan Times Shopping Center[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019,46(4):63-69.

的正常施工。在基坑工程中,降水方案达不到预期效果不仅可能导致整个基坑倒塌,而且可能波及周围建筑物,造成严重的工程事故。因此,有必要对基坑降水方案进行安全性评估。在降水方案设计时,土体的渗透系数是最基本的设计参数,其值的准确与否将对基坑降水方案的设计产生重要影响。一般工程项目降水方案中水文参数的选取都是基于地勘报告中土体室内试验获得的渗透系数,其值往往小于现场原位试验获得的土体渗透系数<sup>[4-6]</sup>,因此,在基坑抽水方案设计时需要根据地勘报告中的土体渗透系数进行一定调整,以满足基坑降水的要求。本着合理降水、按需降水的原则,提出了通过现场降水试验反演场地水文地质参数的分析方法。

针对基坑降水参数如何取值问题,国内外众多学者对其进行了广泛研究。王江思<sup>[5]</sup>在平面二维承压含水层内,采用不同方法求解渗透系数 $K$ ,并对计算结果差异性进行了研究。结果表明,在含水层不满足各向同性、等厚,边界无限远假设条件时,Theis图解法、Jacob直线图解法求解的有效渗透系数与真实场均值渗透系数相差较大,且不能较好的反映含水层的非均质性。而地质统计法和pest参数优化法可以有效的反映含水层非均质性。毛喜云等<sup>[6]</sup>利用Aquifer-Test软件对抽水试验进行了数值模拟研究,结合Mod Flow三维渗流软件对含水层水文地质参数进行数据拟合、反演,最终获得了较为准确的弱透水层和隔水层相关水文地质参数。殷宝兵等<sup>[7]</sup>利用MIDAS/GTS数值分析软件建立三维渗流模型,通过对现场单井抽水试验进行模拟分析,综合地勘渗透系数和抽水试验,反向推演出了符合工程实际的渗流边界函数和渗透系数。然后通过单井反演获得的土体渗透系数,建立基坑降水分析模型,对降水方案进行设计和指导。结果表明,采用反演获得的土层渗透系数建立的基坑降水分析模型,能够很好的指导基坑降水工程的施工。闫峭等<sup>[8]</sup>根据回灌过程中水文地质参数的特点,建立相应的反演优化模型,利用改进遗传算法求解,提出了将渗透系数设为随时间衰减而变化的优化模型。通过与现场监测结果对比,表明优化模型能够很好的模拟基坑降水、回灌过程。

本文以扬中金源时代购物中心基坑降水工程为例,以地勘报告中的土体渗透特性参数为基础,结合现场单井、双井抽水试验结果,反演出数值分析模型

中的土体渗透特性参数。然后以反演获得的土体渗透系数为基本参数,结合基坑降水、止水、回灌设计方案,对基坑降水方案进行分析和评估。

## 1 工程概况

拟建项目金源时代购物中心位于江苏镇江扬中市最繁华的商业核心地段,西至文化路,北邻江州西路,南隔扬子中路,东接前进路,基坑长277 m,宽210 m,周长约960 m,总用地面积约5.5万 $\text{m}^2$ 。地面以上有7栋高层住宅楼,1栋30层酒店,4层裙楼,3层地下室,基坑开挖深度约14 m。该区域为典型长江漫滩区地貌,根据地质钻探揭示的场地地层依次为:杂填土、淤泥质粉质粘土、粉砂夹粉土、粉砂、粉细砂、中粗砂混砾石层。场地地下水为孔隙水,赋存在场地各土层,水量丰富。基坑支护结构采用钻孔灌注桩加2层砼支撑,基坑外围采用直径850 mm、间距1200 mm、长度28.5 m的三轴深搅桩形成封闭止水帷幕(桩间土采用二重管高压旋喷处理)。降水采用管井并结合排水沟加集水坑明排方式降低地下水。

本工程基坑开挖面积大,降水范围影响广,场地地层水平分层较为明显,砂层较厚,土体渗透系数较大。因此,降水方案设计的合理性将对基坑工程和周边环境产生重大影响。降水井平面布置如图1所示。

现场基坑降水设计投入285口降水井,并在基坑四周设置59口水位监测兼回灌作用的管井。降水井深31 m,成井孔径600 mm,井管采用 $\text{O}273$  mm钢管,滤料为中粗砂,过滤段长度21 m,沉淀管长度1 m。过滤管类型为桥式滤管,外包80目锦纶,过滤管外填中粗砂。现场单井抽水试验设置JS1、JS2、JS3三口试验井,三井间距分别为15和16 m,管井结构和降水井相同。

## 2 降水参数反演

根据勘察揭示的土层结构特征分析,地下水为孔隙潜水,赋存于场地内各土层中,水量丰富。地层杂填土较为松散,赋水性及透水性好,大气降水极易渗入到下部土层中。地层淤泥质粉质粘土夹粉土饱含地下水,整体透水性弱,水平向稍强,基坑开挖施工涉及其余土层均饱含地下水,且透水性较强。现场测定的地下水稳定水位在地表以下1 m。

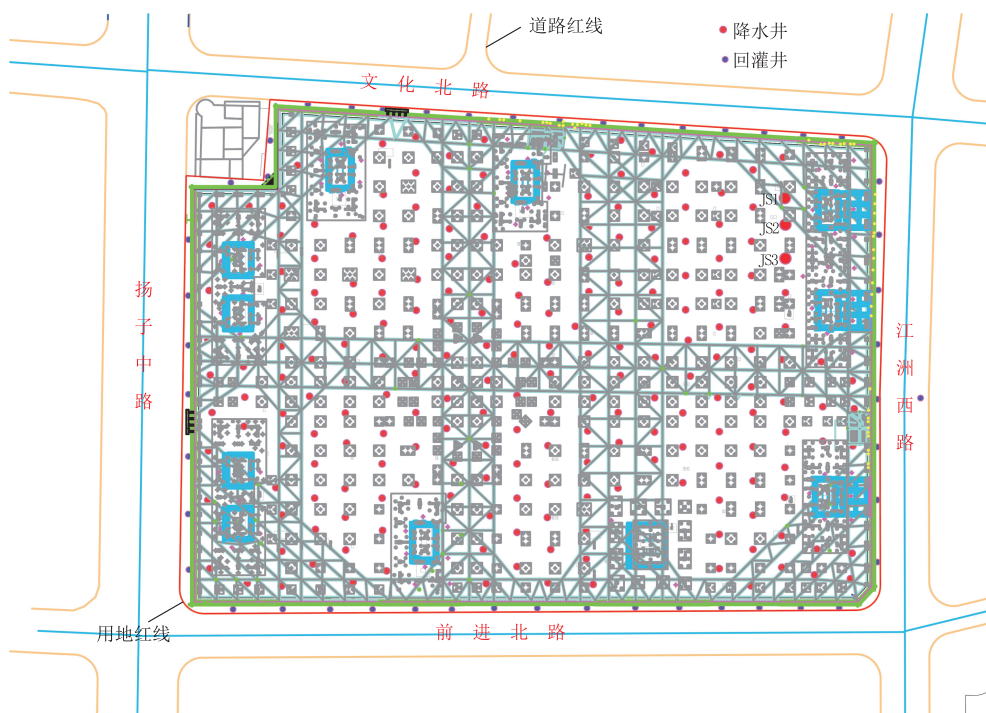


图 1 基坑降水井平面布置

Fig.1 Layout of foundation pit dewatering wells

殷宝兵等<sup>[7]</sup>指出,地勘报告提供的土层渗透系数是通过现场取样、室内试验所得,与场地实际值有所差别。考虑到本工程周边环境复杂,降水效果对工程进度影响严重,需通过现场抽水试验反演基坑降水设计参数,并结合反演的参数对基坑降水方案进行设计。

## 2.1 MIDAS /GTS 软件介绍

在对地下水基本运动规律进行研究时,地下水在岩土体空隙中随时间的运动轨迹难以得知。故对地下水的流动状况予以简化,仅对地下水总体流向进行关注,忽略其它渗流路径,不考虑固体颗粒对地下水流动的影响,这种假想的流动称为渗流。

在 MIDAS/GTS 软件分析基坑降水时,为考虑基坑降水的时间效应,可采用考虑时间效应的非稳定渗流分析理论。流动法则采用达西定律,具体方程如下:

$$\frac{\partial}{\partial x}(k_x \frac{\partial H}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(k_y \frac{\partial H}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(k_z \frac{\partial H}{\partial z}) + Q = \frac{\partial \theta}{\partial t}$$

式中:  $H$ ——总水头;  $t$ ——时间;  $k_x$ —— $x$  方向的渗透系数;  $k_y$ —— $y$  方向的渗透系数;  $k_z$ —— $z$  方向的渗透系数;  $Q$ ——流量;  $\theta$ ——体积含水率。

该方程表示任意位置、任意时刻,微小体积水体

的流入和流出变化量。通过 MIDAS/GTS 软件建模时,主要输入参数包括土层渗透系数、节点水头及节点流量。

(1)节点水头。在 MIDAS/GTS 中,节点水头不但可以准确模拟抽水管井的位置,还可以通过稳态的常量水头或瞬态的变化水头模拟基坑地下水的回灌。

(2)节点流量。在 MIDAS/GTS 中,节点流量可以用来对井点抽水(回灌)流量进行模拟。在管井的节点水头位置处通过输入流量,可用于描述降水井抽水(回灌)的实际状态。

对于流量随时间变化的瞬态分析,可以用函数定义。使用函数时,按输入的值乘以一定的场地系数后反映到分析中,用于描述抽水井流量与时间的变化关系。

## 2.2 抽水试验方案

试验过程分为 2 个抽水阶段,JS1 单井抽水和 JS1、JS3 两井同时抽水试验。首先进行单井抽水试验,JS1 井作为抽水井,进行连续 24、36、48 h 抽水,观测记录 JS2、JS3 井内水位变化情况。然后进行双井抽水试验,同时开启 JS1、JS3 井抽水,观测记录 JS2 井内水位变化。观测记录结果如表 1 所示。

表 1 抽水试验过程记录结果  
Table 1 Records of the pumping test results

阶段	抽水井编号	观测井编号	累计时间/ h	水位降深/m			流量/ (m <sup>3</sup> · d <sup>-1</sup> )	
				JS1	JS2	JS3		
单井抽水	第一次降深	JS1	JS2、JS3	24	5.86	1.58	1.35	1224
	第二次降深	JS1	JS2、JS3	12	7.29	2.40	1.76	1615.9
	第三次降深	JS1	JS2、JS3	12	11.15	3.74	2.77	2592
	水位恢复		JS1、JS2、JS3	8				
双井抽水	第一次降深	JS1、JS3	JS2	18	13.66	6.74	17.05	5188
	水位恢复		JS1、JS2、JS3	22				

### 2.3 有限元参数反演

本文根据地勘报告提供的初始水文参数(见表 2),利用 MIDAS/GTS 软件建立如图 2 所示三维渗流数值模型。依据现场抽水试验水位降深观测记录,对各个地层的水文地质参数进行反演。计算时模型边界条件的给定应与实际工程一致,水头高度按照现场监测的稳定水位取值(地下 1 m)。

表 2 各土层水文地质参数反演结果  
Table 2 Inversion results of soil layer hydrogeological parameters

编号	土层名称	渗透系数 $k$ 初始值(平均值)/ ( $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ )		渗透系数 $k$ 反演值(平均值)/ ( $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ )	
		$K_H$	$K_V$	$K_H$	$K_V$
1	淤泥质粉质粘土夹粉土	0.44	0.39	0.15	0.03
2	粉砂夹粉土	6.45	5.01	3.25	1.21
3	粉砂	11.84	9.50	9.89	3.67
4	粉细砂夹薄粘土	12.26	11.58	11.56	4.16
5	粉细砂	12.70	10.10	12.54	5.34
6	中粗砂	18.50	12.00	17.46	5.92
7	中粗砂混卵石	20.00	15.00	23.18	13.27

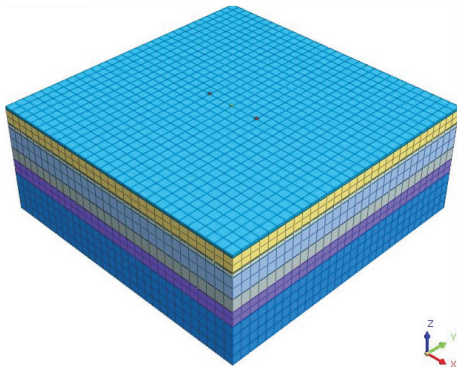


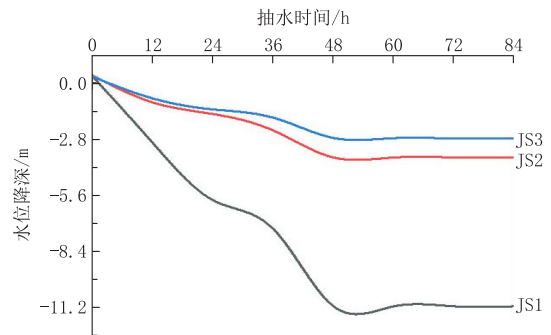
图 2 单井抽水试验模型

Fig.2 Single well pumping test model

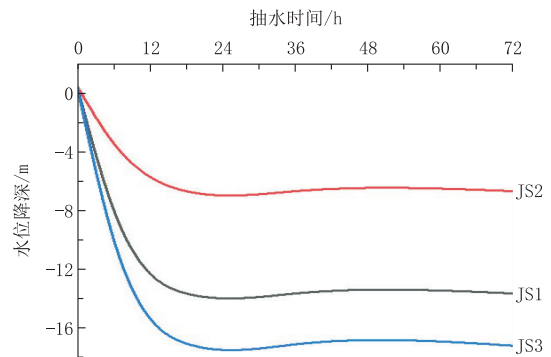
为了降低模型尺寸对模拟结果的影响,本文单井、双井抽水试验计算模型为:长 500 m,宽 500 m,高 80 m,模型共计实体单元 80500 个。基坑降水模型边界设置参考文献[9—15],文中计算模型设置边

界为排水条件,边界水头按照现场测量的井内初始水位,设置边界水头为 58.5 m。降水井根据现场抽水泵出水量统计结果取值  $51 \text{ m}^3/\text{h}$ 。

降水井抽水时间与观测井的实际水位变化关系如图 3 所示。利用 MIDAS/GTS 建立的三维渗流分析模型,通过反演计算获得水位变化如图 4 所示。



(a) 单井抽水



(b) 群井抽水

图 3 水位降深与抽水时间关系

Fig.3 Relationship between water level drawdown and time

如图 3、4 所示,通过对比单井与双井数值模拟的降水水位与实际监测的降水水位结果,反复调整数值模拟中的土层参数,最终得到的反演结果如表 2 所示。

## 3 基坑降水效果模拟计算分析

### 3.1 有限元模型





(a) 单井JS1连续抽水24 h



(b) 单井JS1连续抽水36 h



(c) 单井JS1连续抽水48 h

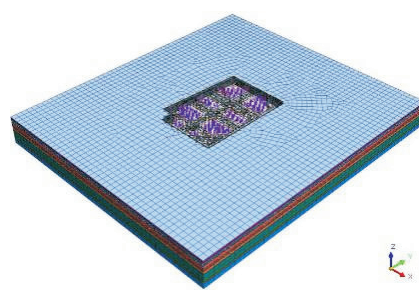


(d) 双井JS1和JS3连续抽水18 h

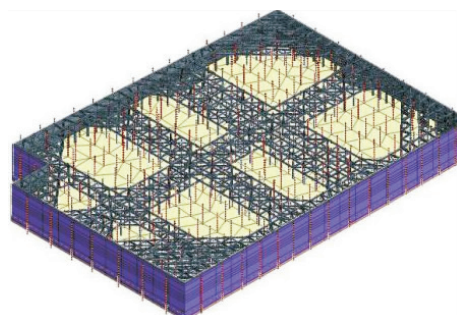
图 4 水位变化的数值模拟结果

Fig.4 Numerical simulation results of the water level change

利用 MIDAS/GTS 建立基坑降水三维渗流分析模型,模型设置如图 5 所示。结合现场监测井水位深度,模型初始水位深度定义为地下 1 m,各土层水文参数采用表 2 反演结果。根据基坑平面尺寸、层特点及基坑降水设计方案,本次降水设置 285 口降水井,出水量根据单井抽水试验水泵出水总量求得平均单井出水量  $120 \text{ m}^3/\text{d}$ ;回灌井一共设置 59 口,分别围绕在基坑止水帷幕的外侧;止水帷幕采用板单元模拟,厚度取  $0.85 \text{ m}$ ,长度取  $28.5 \text{ m}$ ,渗透



(a) 计算模型轴视图



(b) 降水井、回灌井布置效果图

图 5 基坑降水三维渗流模型

Fig.5 3-D seepage model of foundation pit dewatering

特性设置为不透水。

### 3.2 基坑降水效果模拟

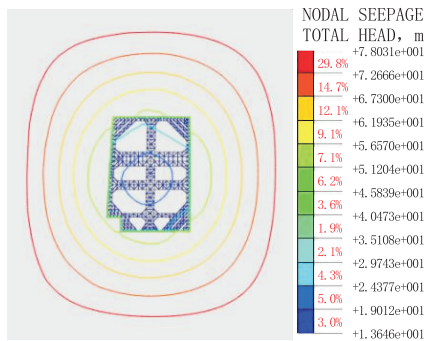
根据项目施工计划,在支护桩和止水帷幕施工完毕后即开始基坑降水施工。考虑到场地中包含渗透系数较大的砂卵石层,本次基坑降水方案采用“一降到底”的设计方案,即一次性将水位降低至坑底的设计要求,然后进行基坑开挖。同时,为了减少因为基坑降水导致的周边沉降,在止水帷幕的外侧按照设计方案添加回灌井,以补充地下水的流失<sup>[8,9,11]</sup>。基坑降水效果随时间变化的三维分析结果如图 6 所示。

### 3.3 基坑降水效果分析

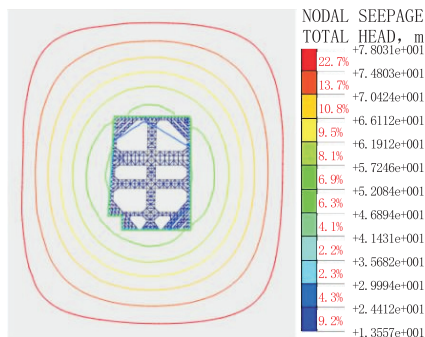
(1)如图 6 所示,原始考虑回灌井的设计方案能够有效的降低地下水位,抽水井和回灌井同时工作 20 d 基本能够满足基坑挖深条件下的水位降低要求,抽水 24 d 降低的水位高度能够满足基坑开挖最大设计深度的要求。

(2) $28.5 \text{ m}$  止水帷幕的设计能够很好的满足基坑开挖止水的要求。在降水计算过程中,由于降水深度较深,使得基坑的影响半径达到了  $250 \text{ m}$ 。因此在基坑降水施工过程中,应对回灌井的回灌效果和周边场地的沉降进行监测,防止基坑降水对周边环境产生影响。

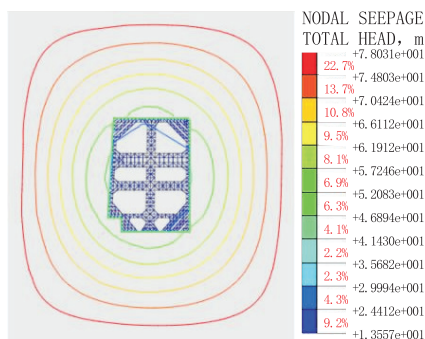
(3)根据单井和双井抽水试验资料,采用反演



(a) 基坑连续抽水12 d



(b) 基坑连续抽水20 d



(c) 基坑连续抽水24 d

图6 不同施工阶段水位等值线

Fig.6 Water level contours in different construction stages

分析法计算土体最大渗透系数为 23.18 m/d, 基坑涌水量较大, 因此在施工过程中应密切关注抽水井的工作情况和止水帷幕的止水效果, 保证基坑工程的安全施工。

#### 4 现场实际效果

扬中金源时代购物中心基坑降水工程严格按照设计方案进行施工, 期间共进行了 12 次观测, 观测到的降水深度与有限元计算结果误差在  $-0.5 \sim 1.2$  m 范围内, 很好的满足了基坑开挖降水的要求。现场开挖效果如图 7 所示。



图7 基坑施工现场

Fig.7 Foundation pit construction site

#### 5 结论

本文采用 MIDAS/GTS 软件, 通过先反演计算模型参数, 后进行数值分析的方式对扬中金源时代购物中心基坑降水工程进行研究, 获得以下结论:

(1) 深基坑支护必须重视降水工作, 尤其是在土体渗透系数较大、地下水位较高、饱和性砂土层较厚的地区更应引起重视。

(2) 利用现场单井和双井的抽水试验监测结果, 结合地质勘探报告中的土层渗透系数的相关资料, 反演计算出 MIDAS/GTS 基坑三维降水计算的相关土层参数。

(3) 采用 MIDAS/GTS 对扬中金源时代购物中心基坑降水工程进行数值模拟分析, 评估了考虑回灌井基坑降水方案的合理性, 并指导基坑降水工程的施工。

(4) 基坑降水施工后, 通过监测数据与模拟数据的对比, 验证了采用数值模拟方法进行降水效果模拟的正确性。

#### 参考文献 (References):

- [1] 汤建铭, 王钰. 珠江特大桥承台基坑突涌事故处理降水设计与施工[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2018, 45(11): 50-55.  
TANG Jianming, WANG Yu. Dewatering design and implementation for treatment of water kick-in at a bridge cap foundation pit in the Pearl River[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2018, 45(11): 50-55.
- [2] 张聚斌. 基坑降水的地下水位控制与工程降水综合利用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2007, 34(3): 22-25.  
ZHANG Jubin. Control on ground water table for foundation pit dewatering and comprehensive utilization of engineering dewatering[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2007, 34(3): 22-25.
- [3] 梁成华. 哈尔滨松花江边超深基坑降水实践[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2016, 43(6): 81-83.

- LIANG Chenghua. Practice of ultra-deep foundation pit dewatering by Songhuajiang River[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2016, 43(6): 81—83.
- [4] 曹祖宝, 李建文, 王新锋. 基于矿井突水反演计算水文地质参数方法研究[J]. 煤炭科学技术, 2015, 43(5): 111—114.
- CAO Zubao, LI Jianwen, WANG Xinfeng. Study on method of mine water inrush for inverse calculation of hydrogeological parameters[J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(5): 111—114.
- [5] 王江思. 水文地质参数反演方法对比[J]. 城市地理, 2015, (16): 67.
- WANG Jiangsi. Comparison of inversion methods of hydrogeological parameters[J]. Cultural Geography, 2015, (16): 67.
- [6] 毛喜云, 张强, 于升才, 等. 基于 AquiferTest 和 ModFlow 求解哈尔滨河漫滩地区水文地质参数[J]. 天津建设科技, 2017, 27(6): 56—59.
- MAO Xiyun, ZHANG Qiang, YU Shengchai, et al. Finding hydrogeological parameters for the river flood plain area in Harbin based on AquiferTest and ModFlow[J]. Tianjin Construction Science and Technology, 2017, 27(6): 56—59.
- [7] 殷宝兵, 周爱兆, 姜彬霖. 南通市南山湖综合楼基坑工程降水数值模拟分析[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2017, 44(10): 61—65, 69.
- YIN Baobing, ZHOU Aizhao, JIANG Binlin. Numerical simulation analysis on dewatering in foundation pit project of Nanshanhu Comprehensive Building in Nantong[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2017, 44(10): 61—65, 69.
- [8] 闫峭, 马聪, 周维博. 地下水回灌过程中水文地质参数的反演[J]. 灌溉排水学报, 2015, 34(7): 88—92.
- YAN Qiao, MA Cong, ZHOU Weibo. Hydrogeology parameters inversion during the process of groundwater recharge[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2015, 34(7): 88—92.
- [9] 胡斌, 程丽蓉, 丁爱中, 等. 指示点法在地下水数值反演模型中的应用[J]. 工程勘察, 2015, 43(2): 39—45, 51.
- HU Bin, CHENG Lirong, DING Aizhong, et al. The application of the pilot point method in groundwater numerical inversion model[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2015, 43(2): 39—45, 51.
- [10] 石晓青. 基于稳定流抽水试验确定水文地质参数的方法对比[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(2): 152—155.
- SHI Xiaqing. Based on the steady flow pumping test method analysis of hydrogeological parameters[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15(2): 152—155.
- [11] 周子侯, 秦志泉. 单孔稳定流抽水试验计算渗透系数对比研究[J]. 矿产勘查, 2018, 9(4): 706—713.
- ZHOU Ziyu, QIN Zhiqun. Comparison of the permeability coefficients for single hole steady water pumping test[J]. Mineral Exploration, 2018, 9(4): 706—713.
- [12] 中国地质调查局. 水文地质手册[M]. 北京: 地质出版社, 2012.
- China Geological Survey. Hydrogeology handbook[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2012.
- [13] 王国富, 王倩, 路林海, 等. 济南轨道交通某深基坑降水与回灌数值分析[J]. 地下空间与工程学报, 2017, 13(5): 1280—1288.
- WANG Guofu, WANG Qian, LU Linhai, et al. Numerical analysis on dewatering and recharging of a deep foundation pit of Jinan railway[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2017, 13(5): 1280—1288.
- [14] 冯雨润. 北京某地铁站基坑降水数值模拟与沉降研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2015.
- FENG Yurun. Numerical simulation of a Beijing metro foundation pits dewatering and land-subsidence[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2015.
- [15] 杨冬雪, 李志虎. 拉萨地区邻河基坑管井降水案例分析[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2018, 45(7): 90—93.
- YANG Dongxue, LI Zhihu. Case analysis of tube well dewatering of the foundation pit neighboring river in Lhasa Region[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2018, 45(7): 90—93.
- [16] 张飞, 李镜培, 孙长安. 内撑式深基坑承压水抗突涌稳定数值模拟技术[J]. 地下空间与工程学报, 2017, 13(4): 1098—1105.
- ZHANG Fei, LI Jingpei, SUN Changan. Numerical simulation technology for hydraulic heave stability of deep braced excavation under confined water[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2017, 13(4): 1098—1105.
- [17] 王霆. 南京长江漫滩区基坑开挖与降水对既有地铁隧道影响的数值分析[J]. 都市快轨交通, 2016, 29(3): 81—86.
- WANG Ting. Study on the effect of pit excavation and dewatering on metro tunnels in floodplain area of Nanjing Yangtze River[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2016, 29(3): 81—86.

(编辑 周红军)