

# 南通市南山湖综合楼基坑工程降水数值模拟分析

殷宝兵<sup>1</sup>, 周爱兆<sup>2</sup>, 姜彬霖<sup>3</sup>

(1. 江苏省地质矿产局第三地质大队, 江苏 镇江 212021; 2. 江苏科技大学, 江苏 镇江 212000; 3. 云南旅游职业学院国土资源工程系, 云南 昆明 650221)

**摘要:** 基坑降水的成功与否, 关系到整个基坑的安全。南通市南山湖综合楼基坑开挖过程中虽建立了止水帷幕, 但仍需对基坑降水的方案进行安全评估。采用 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, 综合地勘报告中室内试验渗透系数和抽水试验的渗透系数, 反向推演出符合工程实际的渗流边界函数和渗透系数; 然后利用反推得到的计算参数, 建立三维渗流模型, 模拟群井抽水状态下水位降深与时间的变化关系, 对群井降水效果进行分析, 验证降水井设计是否合理, 指导基坑土方的开挖。

**关键词:** 基坑降水; 抽水试验; 群井抽水; 渗流模型; 安全评价

中图分类号: TU46<sup>+</sup>3 文献标识码: A 文章编号: 1672-7428(2017)10-0061-05

**Numerical Simulation Analysis on Dewatering in Foundation Pit Project of Nanshanhu Comprehensive Building in Nantong/YIN Bao-bing<sup>1</sup>, ZHOU Ai-zhao<sup>2</sup>, JIANG Bin-lin<sup>3</sup>** (1. The 3rd Geological Brigade of Jiangsu Geology & Mineral Exploration Bureau, Zhenjiang Jiangsu 212021, China; 2. Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang Jiangsu 212000, China; 3. Yunnan College of Tourism Vocation, Kunming Yunnan 650221, China)

**Abstract:** Foundation pit dewatering is the key to the whole foundation pit safety. Although the waterproof curtain was built in the foundation pit excavation of Nanshanhu complex building in Nantong, it is still necessary to make a safety assessment on the dewatering scheme of the foundation pit. 3-dimensional seepage model is established by using the MIDAS/GTS numerical analysis software, by the simulating analyzing a single well pumping test in the field and synthesizing the permeability coefficients of indoor tests in the geological exploration report and pumping tests, the seepage boundary function and the permeability coefficients fitted for the practical engineering situation are inversely deduced; then the 3-dimensional seepage model is established by using the parameters reversely derived to simulate the changing relation between water level and time in multi wells pumping. The dewatering effect of multi wells is analyzed to verify whether the dewatering design is reasonable in order to guide the foundation pit excavation.

**Key words:** foundation pit dewatering; pumping test; multi wells pumping; seepage model; safety assessment

近年来,随着城市化的不断发展,高层建筑不断涌现,深基坑工程也随之增加。在基坑施工过程中,降水成功与否对整个基坑的施工安全至关重要。在已有的工程案例中,因为降水问题导致基坑安全事故的例子屡见不鲜。因此,需对基坑预降水时间和降水深度进行安全评价,使其满足施工安全性的要求。

结合南通市南山湖综合楼基坑工程,采用 MIDAS/GTS 有限元数值分析软件,对该基坑的降水过程进行模拟。

## 1 工程概况

南通市南山湖综合楼基坑开挖深度为 17.05 ~

18.55 m,局部最大开挖深度为 24.6 m。根据场地水文地质资料,在开挖深度内上部为填土、粉土、粉砂,下部为饱和、中密、中等压缩的粉细砂及中细砂,地下水丰富,水位埋深 -0.5 m。设计采用 Ø850 mm@1200 mm 三轴深搅桩(套接一孔)作为止水帷幕,采用钻孔灌注桩+2 层钢筋砼环型支撑作为支护结构,坑内采用管井降水,水头应降至基坑底板下不小于 0.50 m。在坑内降水的同时,要注意坑外回灌井补水方案,避免强降水导致土体固结沉降,引起周边道路和管线下沉变形。

降水井平面布置如图 1 所示,结构设计如下。

(1)降水井井径 500 mm,井深 38.0 m。

收稿日期:2017-06-27; 修回日期:2017-08-21

**作者简介:** 殷宝兵,男,汉族,1965年生,高级工程师,探矿工程专业,从事地质钻探及工程地质钻探施工管理工作,江苏省镇江市乔家门,13505284872@139.com;周爱兆,男,汉族,1982年生,副教授,博士,从事深基坑支护工程方面的研究和设计工作,江苏省镇江市,zhouaizhao@126.com。

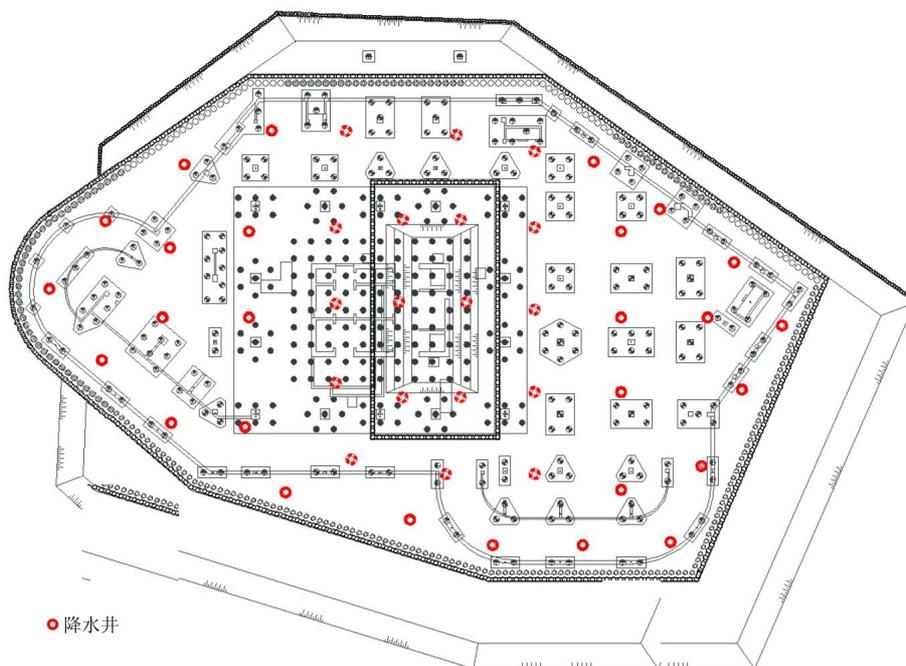


图1 降水井平面布置图

(2)降水井过滤管及井壁管采用钢质焊管,管径 219 mm,壁厚 >4 mm。

(3)自孔底至孔深 13.0 m 的承压含水层深度段环填硅质圆砾,以形成良好的人工反滤层,在孔口至孔深 13.0 m 段环填粘土球以进行管外封孔。封孔目的是将上层潜水与下部承压水封隔,以避免潜水被疏干后排水固结引起地面过大沉降。

## 2 MIDAS/GTS 渗流分析方法简介

### 2.1 渗流计算理论

在研究地下水运动基本规律时,无法得知水在岩土体颗粒空隙中每一时刻的实际流动轨迹。因此,对地下水的流动状况加以简化,只关注地下水的总体流向而不考虑渗透途径的曲折多变,认为地下水是在全部岩土空间中流动而忽视固体颗粒的存在,这种假想的流动称为渗流。根据水位、流速、流向等是否随时间动态变化,渗流可划分为稳定流和非稳定流。

一般情况下,地下水流动遵从达西定律(式 1):

$$Q = KA \frac{h_1 - h_2}{L} = KA \frac{\Delta h}{L} = KAI = vA = -K \frac{dh}{dx} \quad (1)$$

式中:  $Q$ ——过水断面的流量,  $m^3/d$ ;  $K$ ——饱和、均质土体的渗透系数,  $m/d$ ;  $A$ ——过水断面面积,  $m^2$ ;  $h_1, h_2$ ——过水断面两端的水头,  $m$ ;  $L$ ——过水断面之间的距离,  $m$ ;  $\Delta h$ ——过水断面之间的水头差,  $m$ ;

$I$ ——水力梯度(无量纲);  $v$ ——渗流速度,  $m/d$ 。

由外界作用到液体上的压力、重力、摩擦力等各个力的平衡条件可求得地下水运动方程。对于不可压缩流体在多孔介质中非稳定渗流的运动方程如式(2)所示:

$$\frac{1}{ng} \cdot \frac{\partial \bar{v}}{\partial t} = -\text{grad}h - \frac{\bar{v}}{k} \quad (2)$$

根据质量守恒原理:单元体含水量变化速率等于单元体与外界的交换速度。由此可得到渗流的连续性方程:

$$\left[ \frac{\partial(\rho V_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho V_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho V_z)}{\partial z} \right] \Delta x \Delta y \Delta z = \frac{\partial}{\partial t} (\rho n \Delta x \Delta y \Delta z) \quad (3)$$

式中:  $\rho$ ——液体密度,  $kg/m^3$ ;  $V_x, V_y, V_z$ —— $x, y, z$  轴方向的速度分量,  $m/d$ ;  $n$ ——孔隙度(无量纲);  $n \Delta x \Delta y \Delta z$ ——液体所占体积,  $m^3$ 。

### 2.2 MIDAS/GTS 渗流分析方法

采用 MIDAS/GTS 软件分析基坑降水,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。非稳定流分析的内部和外部边界随时间发生变化。流动法则采用达西定律,方程如式(4):

$$\frac{\partial}{\partial x} (k_x \frac{\partial H}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (k_y \frac{\partial H}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (k_z \frac{\partial H}{\partial z}) + Q = \frac{\partial \Theta}{\partial t} \quad (4)$$

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

率。

该方程意味着任意位置、任意时刻微小体积的流入和流出的变化量与体积含水率的变化量相同。简单地说,  $x, y, z$  方向的流量变化与外部流量之和以及体积含水率的变化相同。

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, 节点水头不但可以很好的模拟抽水管井的位置特征, 还可以通过稳态的常量水头或瞬态的变化水头对基坑周边的地下补充水源进行模拟。

(2) 节点流量。在 MIDAS/GTS 中, 节点流量可以用来对井点抽水流量进行描述。在管井的节点水头位置处输入流量, 可用于描述降水井抽水的实际状态。节点流量是适用于渗流/固结分析(完全耦合)的边界条件。

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。

### 2.3 计算参数反推

由于地勘报告中土的渗透系数是由室内实验所获得, 与土体实际的渗流系数存在一定的差值, 因此需根据单井抽水实验, 通过控制时间和降水水位关系曲线对渗透系数计算参数进行反向推演分析, 确定与实际抽水相符的模型参数。

#### 2.3.1 单井降水模型初始参数

根据现场抽水试验资料, 建立三维抽水试验模型。单井模型计算范围长 100 m, 宽 100 m, 深度为 80 m。抽水实验数值模型如图 2 所示, 初始输入土层渗透系数列于表 1。根据现场抽水试验降水深度-时间曲线如图 3 所示。

#### 2.3.2 分析结果

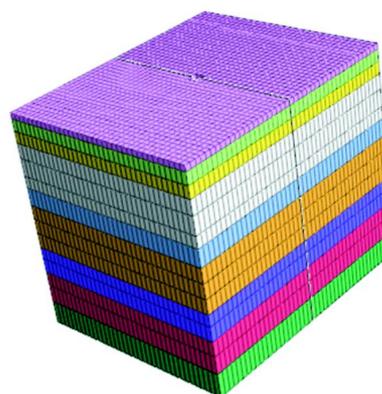


图 2 单井抽水试验模型图

表 1 初始渗透系数

土层编号	土层名称	渗透系数 $k$ 平均值 / ( $\times 10^{-5} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ )	
		水平	垂直
①	素填土	(800)	(600)
②	粉土	11	7.5
③	粉土	18	12
④	粉砂夹粉土	36	13
⑤	粉砂夹粉土	13	12
⑥	粉砂	86	62
⑦	粉土	14	10
⑧	粉砂	610	460

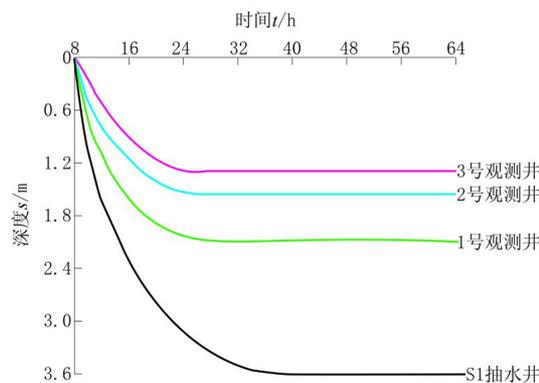


图 3 降水深度-时间关系图(控制降水稳定时间为 24 h)

基于上述参数, 通过数值分析计算, 得到不同时间段水位如图 4 所示。

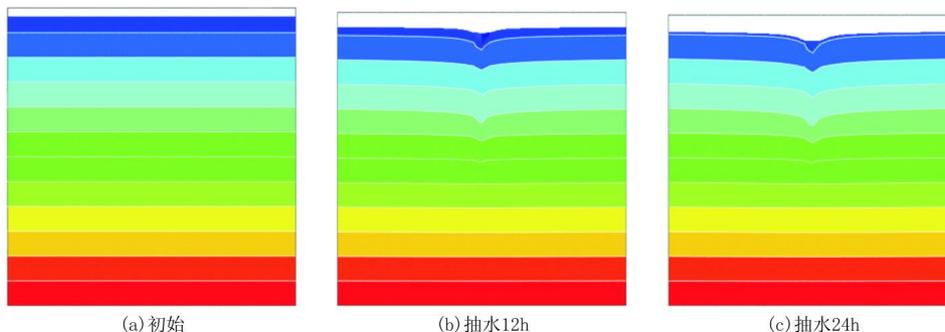


图 4 不同时间段水位云图

根据计算结果进一步绘制抽水24 h后水位线图,并与抽水试验对比,当两者吻合时,则计算参数能够反映真实抽水效果。通过多次试算,反推确定土层渗透系数如表2所示,模拟水位线与抽水试验水位线吻合,如图5所示。

2.4 群井抽水三维数值分析

2.4.1 计算模型

采用MIDAS/GTS建立三维数值分析模型如图6所示,计算范围为长320 m,宽220 m,土层计算深度

表2 反演渗透系数参数

土层编号	土层名称	渗透系数 $k$ 平均值/( $m \cdot d^{-1}$ )	
		水平	垂直
①	素填土	6.91	5.18
②	粉土	1.36	1.36
③	粉土	1.56	1.04
④	粉砂夹粉土	3.11	3.12
⑤	粉砂夹粉土	1.12	1.04
⑥	粉砂	7.43	5.35
⑦	粉土	1.21	0.86
⑧	粉砂	5.27	3.97

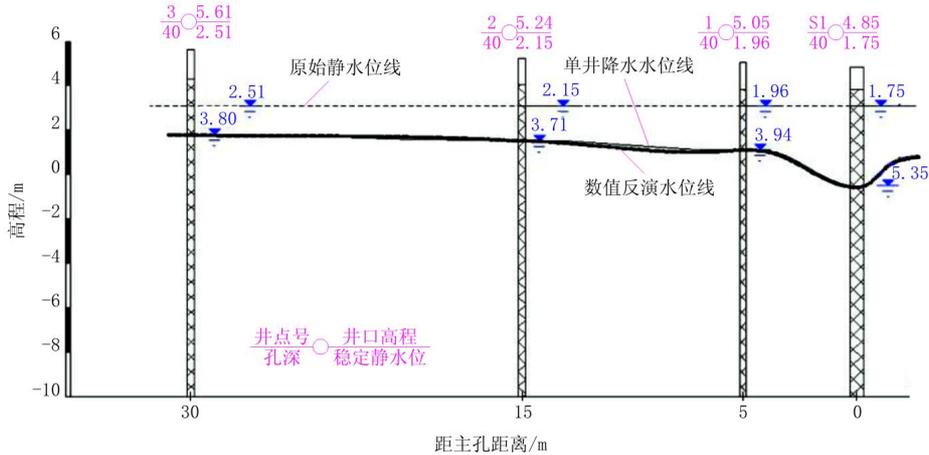


图5 24 h模拟降水与实际降水水位线对比图

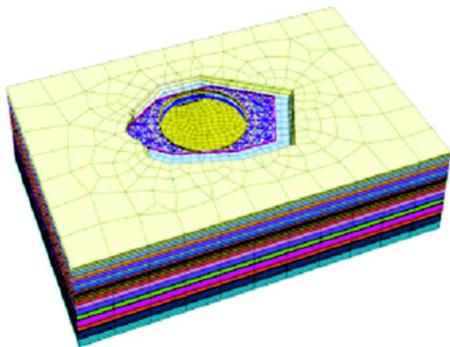


图6 计算模型轴视图

绘制抽水4、12、20 d降水深度等值线图,如图10所示。

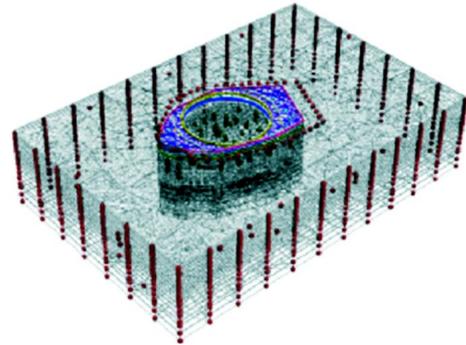


图7 降水边界条件透视图

72 m。根据初步设计的降水井布置方案(合计45口降水井),设定降水边界条件如图7所示。计算参数采用2.3节反向推演的计算值。

2.4.2 计算结果分析

如图8及图9为本基坑抽水20 d时降水深度云图轴视图和地下水水头分布剖面图。由图可见,最大降深达到26 m,坑底普遍降深达到20 m。剖面图反映,止水帷幕存在,对坑外水头下降有一定的抑制作用,可有效降低降水对周边环境的影响。

为直观反映基坑降水深度与时间的关系,进一步

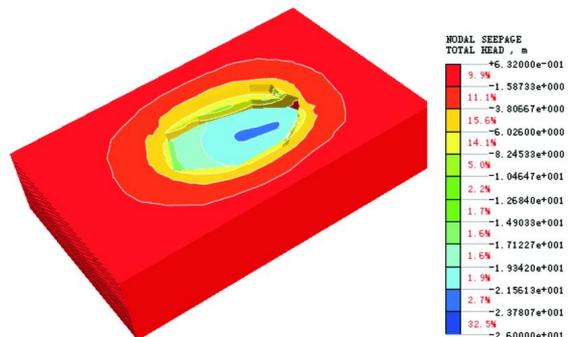


图8 抽水20 d后场地降水深度云图

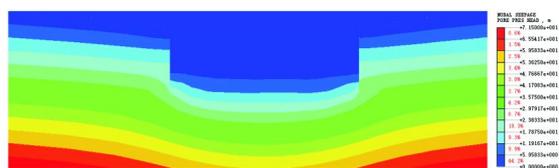
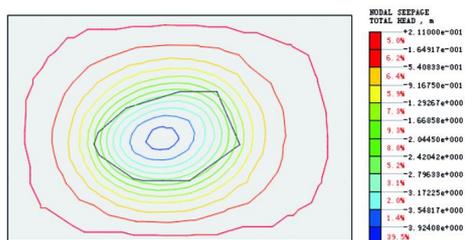
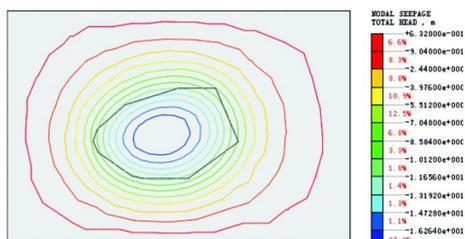


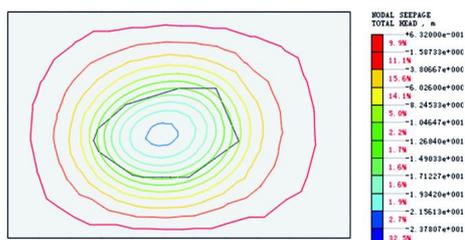
图 9 抽水 20 d 后场地地下水水头分布图



(a) 抽水 4d 后



(b) 抽水 12d 后



(c) 抽水 20d 后

图 10 不同时段场地降水深度等值线图

由上述水位降深等值线图可见,降水 4 d 时,坑内水位下降至  $-4.3\text{ m}$ ;降水 12 d 时,坑内水位下降至  $-17.8\text{ m}$ ;降水 20 d 时,坑内水位下降至  $-26\text{ m}$ 。止水帷幕存在,对抗外水头下降有一定的抑制作用,可有效降低降水对周边环境的影响。

### 3 计算结果分析

(1)初步设计降水方案能够有效降低地下水位,抽水 12 d 后基本能够满足坑底大面积挖深条件水位降深要求,抽水 20 d 后能够满足最大挖深(坑中坑)开挖设计水位降水深度。

(2)止水帷幕存在对抗外水位下降有一定的抑制作用,由于止水帷幕底仍处于透水层,降水对抗外地下水有一定影响,计算反映基坑降水影响半径达 200 m,降水施工过程应严格控制降水对周边环境的影响,做到按需降水,如有必要可考虑周边布置回灌

并减少坑外水位降深。

(3)根据抽水试验资料,采用反推分析法计算土体平均渗透系数为  $1.2\text{ m/d}$ ,基坑涌水量较大,在降水过程中应密切关注降水井的工作状况和止水帷幕的止水效果。

### 4 现场实际效果分析

基坑于 2014 年 7 月 15 日开始挖土,8 月 25 日完成了上部大面积的整平开挖后,28 日正式进入基坑范围内的出土工作,10 月 20 日基坑到底。在开挖期间,严格依据 MIDAS/GTS 数值分析软件建立的场地降水深度等值线图控制每次的挖土深度,不可超挖,所以开挖十分顺利。

开挖期间共完成了 25 轮次的观测,水位变化范围较小,变化范围  $-0.55\sim 1.2\text{ m}$ ,没有超出预警值范畴,没有出现地面异常沉降现象。坑内水位的预降也比较成功,基本上没有影响到挖土工作,在 100 d 的短时间内完成如此深的基坑的土方开挖工作,受到了项目业主单位和相关专家的高度好评。现场开挖效果见图 11。



图 11 基坑开挖到底效果

### 5 结语

(1)深基坑支护设计必须重视基坑降水工作,尤其是在渗透性良好、地下水位较高、以饱和状态的砂性土为主的地区更需引起重视。

(2)根据现场抽水试验数据、室内渗透系数实验数据,采用 MIDAS/GTS 大型有限元分析软件,可以反推确定土层渗透系数,为建立三维渗流模型提供准确参数。

(3)采用 MIDAS/GTS 建立三维数值分析模型,根据初步设计的降水井布置方案及设定的降水边界

(下转第 69 页)

由图4可以看出,钻具在下落初始时,是一个加速度逐渐减小而速度不断增大的过程。当加速度为0时,便进入了匀速运动阶段。加速的时间与匀速运动时速度的大小主要受到钻具质量、长度及钻井液的粘度与密度的影响,且以钻具的长度与质量的影响最大。表2列出了长度为1.0 m不同质量条件下在丁酸丁酯下落试验中所得到的加速时间。

表2 1.0 m 钻具在丁酸丁酯中下落时加速时间 s

$V_p /$ ( $m \cdot s^{-1}$ )	钻具质量/kg			s
	20.4	21	22	
0.340				0.54
0.325			0.66	
0.310		0.86		
0.301	0.90			

由表2可知,钻具下落时的加速运动时间越短,钻具的下落速度越快。从所有的钻具下落试验结果来看,钻具加速运动时间都非常短,主要以匀速运动为主。这说明了钻具在钻孔内运动时,环空中钻井液是处于层流运动状态,钻井液在钻具表面上所产生的粘滞阻力将很快与钻具在钻井液中的所受到的重力达到平衡。

## 5 结论

(1) 试验验证了钻具在孔内下降过程中存在着加速与匀速2种运动状态,且均受到钻具质量、长度、钻井液粘度与密度的影响,而以钻具的质量与长度影响最大。

(2) 钻具的质量与长度对于钻具匀速运动时速度的影响均呈线性关系。随钻具质量的增加而增大,随钻具长度的增加而减小。

(3) 钻井液的粘度与密度对钻具下落速度均有影响,而以粘度的影响更为显著,且这种影响随着钻具质量、长度的增加及温度的下降而逐渐增大。

## 参考文献:

- [1] P. G. Talalay, N. S. Gundestrup. Hole fluids for deep ice core drilling areview[D]. Copenhagen. 1999.
- [2] 王莉莉,赵大军,徐会文,等. 南极冰层取心钻探酯基钻井液抗低温性能试验[J]. 世界地质, 2013, 32(4): 862 - 866.
- [3] 宋佳宇,徐会文,韩丽丽,等. 南极冰层钻进铠装钻具升降运动特性分析与试验[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2014, 41(7): 12 - 15.
- [4] 韩俊杰,韩丽丽,徐会文,等. 极地冰层取心钻进超低温钻井液理论与试验研究[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2013, 40(6): 23 - 26.
- [5] 刘宁,徐会文,韩丽丽,等. 脂肪酸酯分子结构对酯基钻井液性能的影响[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2014, 41(9): 63 - 66.
- [6] 韩俊杰. 极地冰钻升降钻具时孔内水力学特性试验研究[D]. 吉林长春: 吉林大学, 2014.
- [7] 徐会文,韩丽丽,韩俊杰,等. 南极冰层取心钻探酯基钻井液的理论与试验[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2013, 40(S1): 279 - 282.
- [8] 鄢泰宁,杨凯华,译. 冰层机械钻探技术[M]. 湖北武汉: 中国地质大学出版社, 1998.
- [9] P. G. Talalay, N. S. Gundestrup. Hole fluids for deep ice core drilling[J]. National Institute of Polar Research, 2002, 56: 148 - 170.
- [10] 张凌,蒋国盛,蔡记华,等. 低温地层钻进特点及其钻井液技术现状综述[J]. 钻井液与完井液, 2006, 23(4): 69 - 73.

(上接第65页)

条件,可以绘制时间-降水深度等值线图。

(4) 采用MIDAS/GTS建立三维数值分析模型,可以对已有的降水方案进行较全面的安全评价,从而指导降水施工,确保基坑安全。

## 参考文献:

- [1] 戴根宝,曹海明,杨民,等. 南京长江第四大桥北锚碇沉井基坑降水与地面沉降模拟预测[J]. 勘察科学技术, 2011, (4): 37 - 42.
- [2] 中国土木工程学会土力学及岩土工程学会. 深基坑支护技术指南[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- [3] 常林越,沈健,徐中华. 敏感环境下深基坑的设计与三维数值分析[J]. 铁道工程学报, 2011, (11): 52 - 58.
- [4] 燕建龙,赵治海,杨利全,等. 基坑降水设计中水文地质参数计

算方法分析探讨[J]. 工程勘察, 2011, (3): 40 - 44.

- [5] 周念清,唐益群,娄荣祥,等. 徐家汇地铁站深基坑降水数值模拟与沉降控制[J]. 岩土工程学报, 2011, (33): 1950 - 1956.
- [6] 陈华明. 软土地区深基坑管涌事故原因分析[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2012, 39(2): 67 - 69.
- [7] 李广信,等. 高等土力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- [8] 梁卫东,张俊平,张耀,等. 深基坑工程中地下水问题的研究[J]. 施工技术, 2005, 34(6): 60 - 61.
- [9] 刘历波,王晓磊,史三元. 基坑开挖过程中地下水渗流数值模拟[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2013, 30(3): 13 - 16.
- [10] 丁春林. 软土地区承压水基坑突涌稳定计算法研究综述[J]. 地下空间与工程学报, 2007, 3(2): 333 - 338.
- [11] 时钟. 高富水、强透水卵石地层深基坑降水设计与实践[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2017, 44(5): 78 - 83.
- [12] 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.