

文章编号: 1007-2993(2021)04-0275-07

# 富水砂性地层深基坑单井及群井抽水试验分析

刘祥勇<sup>1</sup> 龙莹莹<sup>2,3</sup> 景旭成<sup>1</sup> 洪小星<sup>1</sup> 樊冬冬<sup>2</sup> 谭勇<sup>2</sup>

(1. 南通城市轨道交通有限公司, 江苏南通 226000; 2. 同济大学土木工程学院, 上海 200092;  
3. 四川省建筑科学研究院有限公司, 四川成都 610081)

**【摘要】** 富水砂性地层有着黏聚力低、稳定性差、渗透性强的特点, 在该地层中进行基坑施工会面临众多风险。为了探究该地层的水文地质特性, 确保基坑施工安全, 基于现场抽水试验及三维有限差分反演分析, 得出如下结论: (1) 本工程第③、⑤<sub>1</sub>、⑤<sub>2</sub>、⑤<sub>3</sub>层水位联系不密切, 第④<sub>2</sub>、⑤<sub>1</sub>、⑤<sub>2</sub>层透水性较差, 为弱透水层; 进行单井试验的⑤<sub>1</sub>层的影响半径为 135 m, 第③层的影响半径为 52 m; (2) 通过群井抽水试验和三维数值模拟反演, 测定了主要含水层的包括渗透系数、导水系数以及贮水率在内的水文地质参数; (3) 通过分析抽水试验地表沉降监测数据, ⑤<sub>1</sub>层群井抽水引起沉降在抽水结束后可以回弹 25% 左右, 而⑤<sub>2</sub>层、⑤<sub>3</sub>层群井抽水沉降回弹约 40% 左右。各个水位恢复阶段, 沉降回弹有明显滞后现象。

**【关键词】** 抽水试验; 水文地质参数; 影响半径; 地面沉降

**【中图分类号】** TU 758.11

**【文献标识码】** A

doi: 10.3969/j.issn.1007-2993.2021.04.013

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## Analysis of Single Well and Group Wells Pumping Tests for Deep Excavation in Water-rich Sand

Liu Xiangyong<sup>1</sup> Long Yingying<sup>2,3</sup> Jing Xucheng<sup>1</sup> Hong Xiaoxing<sup>1</sup>  
Fan Dongdong<sup>2</sup> Tan Yong<sup>2</sup>

(1. Nantong Rail Transit Co., Ltd., Nantong 226000, Jiangsu, China; 2. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Sichuan Academy of Building Research Co., Ltd., Chengdu 610081, Sichuan, China)

**【Abstract】** Water-rich sandy strata has the characteristics of low cohesion, poor stability, and strong permeability. Excavation construction in this strata can be risky. Hydraulic characteristics of this strata were studied to ensure the safety of construction. Based on the field pumping test and three-dimensional inversion analysis, the following conclusions are drawn: (1) The hydraulic connection between aquifers ③, ⑤<sub>1</sub>, ⑤<sub>2</sub>, and ⑤<sub>3</sub> are not strong, and layers ④<sub>2</sub>, ⑤<sub>1</sub> and ⑤<sub>2</sub> are poorly permeable. The influence radius of aquifers ⑤<sub>1</sub> and ③ are 135 m and 52 m, respectively. (2) The hydraulic parameters of the main aquifers, including permeability coefficient, hydraulic conductivity and specific storage, were determined by numerical inversion. (3) The settlement caused by the group-well pumping in aquifer ⑤<sub>1</sub> can rebound by about 25%; while the pumping-induced settlement of group-well pumping in aquifers ⑤<sub>2</sub> and ⑤<sub>3</sub> rebounds by more than 40%. At each stage of water level recovery, there is an obvious time lag of settlement rebound.

**【Key words】** pumping test; hydrogeological parameters; radius of influence; ground subsidence

### 0 引言

为满足城市的快速发展和对交通建设的迫切需求, 大量市政设施规划和修建, 不可避免地涉及到各种类型的基坑开挖。特别是在富水砂性地层中, 地下水的存在使得基坑的开挖和支护面临更多的挑战, 若不采取合适的降水措施, 地下水会对基坑造成破坏, 发生如基坑突涌、坍塌等事故, 从而导致严重的经济损失, 甚至危及生命安全<sup>[1-4]</sup>。

降水措施的采取能够在一定程度上保证基坑开

挖和支护的安全稳定。但当基坑内进行大面积的减压降水时, 基坑外水位会发生一定程度的下降, 引起地表不均匀沉降, 从而引发周边建(构)筑物变形<sup>[5-7]</sup>。止水帷幕的结构不同, 对降水的难度及周边环境的影响有较大的差异<sup>[8]</sup>。因此, 有必要在进行基坑施工前查清地层的水文地质特征, 为优化围护设计和基坑降水设计提供数据支持, 确保基坑施工安全。

本文基于现场抽水试验对富水砂性地层各含水层的水文地质特征(水力联系、影响半径)及隔水层

的不透水性进行了探讨分析;结合三维有限差分反演获取了该地层主要含水层的水文地质参数。

## 1 工程概况

本文主要针对轨道交通站点的基坑展开抽水试验,以获得该站点的工程水文地质条件,给该基坑的地下水控制设计和施工提供依据。该站设定为地下三层车站,标准段埋深 26.01 m,端头井埋深 27.34~28.50 m,止水帷幕整体墙深 54 m,采用钻孔桩的桩基形式,桩长 35 m,施工方式为半盖挖顺作法。该站点周围存在多栋高层建筑(最高达 22 层),需谨慎

控制周围建筑物的变形。

### 1.1 工程地质条件

根据区域地质资料,该站点属冲—海积水网化平原 II-2 区地貌类型,其地层隶属长江下游冲积平原,第四系地层发育,一般厚度达 200 m 以上。经勘察,勘探深度范围内自上而下划分为 7 个工程地质单元层、12 个亚层。土体类型较复杂,性质差异较大,地层从下更新统至全新统一般均有发育,成因类型较多,主要有河流相、河海相等。典型地质剖面图见图 1。

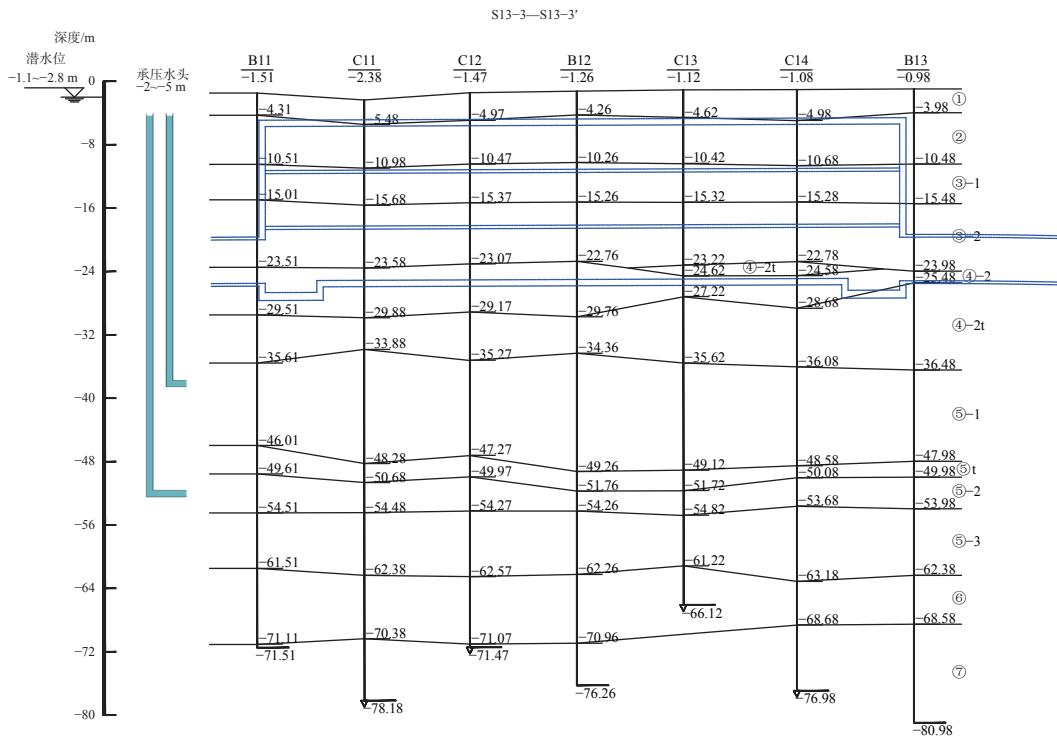


图 1 地质剖面图

### 1.2 水文地质条件

该站点临近河道,河道水位可人工控制,水位一般为 2.5~3.0 m。站点地下水主要为潜水含水层、微承压含水层及承压含水层。

潜水主要赋存于浅部粉土、粉砂、填土层中,含水层总厚度大,含水量较丰富。根据区域经验,场地潜水与周边河道水存在一定水力联系,因此该基坑工程应重视河道水位变化导致的不利影响。场地潜水水位埋深为 1.1~2.8 m,平均水位埋深为 2.18 m。

第 I 承压水一般赋存于④<sub>2</sub>层和⑤<sub>1</sub>层以下的砂土、粉土层中,即⑤<sub>1</sub>层粉砂夹粉土、⑤<sub>2</sub>砂质粉土夹粉质黏土、⑤<sub>3</sub>粉砂夹粉土、⑥层粉砂以及⑦层粉细砂,主要接受径流及越流补给,水头埋深 2~5 m。该站点承压水的上部分布了相对隔水层④<sub>2</sub>层粉质黏

土夹粉土,但是该层厚度较薄且夹粉土。根据经验,场地承压水和潜水存在一定水力联系。

## 2 抽水试验

### 2.1 试验目的

(1)通过单井和群井抽水试验,判断各含水层的水力联系及不透水性,计算第⑤<sub>1</sub>、③层的影响半径;

(2)通过群井抽水试验和三维数值模拟反演,测定第③<sub>1</sub>、③<sub>2</sub>、④<sub>2t</sub>、⑤<sub>1</sub>、⑤<sub>2</sub>、⑤<sub>3</sub>层各项水文地质参数,包括各含水层的单位涌水量、渗透系数、贮水系数。

### 2.2 试验井布置

为了确定水文地质参数,场地平面位置和试验井布置如图 2、图 3 所示,试验井所对应的含水层和结构如表 1 所示。

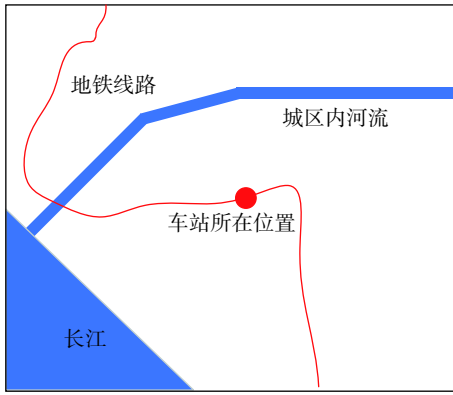


图2 抽水场地平面位置图

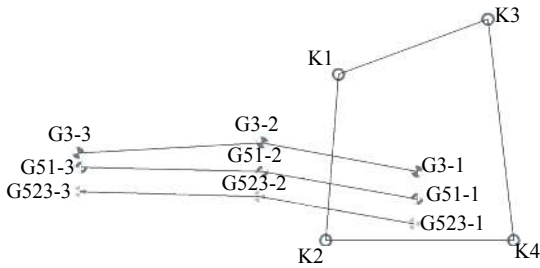


图3 抽水试验井平面布置图

表1 试验井结构统计表

层位	井号	井深/m	井径/mm	管径/mm	过滤器长度/m	过滤器放置深度/m	备注
第③层	G3-1	21	650	273	9	11~20	
	G3-2	21	650	273	9	11~20	
	G3-3	21	650	273	9	11~20	
第④ <sub>2</sub> 层	K1	34	650	273	7	26~33	
第④ <sub>2</sub> 、⑤ <sub>1</sub> 混合层	K2	38	650	273	11	26~37	
	K3	42	700	273	15	26~41	兼回灌试验井
	K4	47	650	273	10	36~46	兼回灌试验井
第⑤ <sub>1</sub> 层	G51-1	42	700	273	5	36~41	
	G51-2	42	650	273	5	36~41	
	G51-3	42	650	273	5	36~41	
第⑤ <sub>2</sub> 、⑤ <sub>3</sub> 层	G523-1	57	650	273	7	49~56	兼回灌试验井
	G523-2	57	650	273	7	49~56	
	G523-3	57	650	273	7	49~56	

### 3 结果分析

#### 3.1 初始水位量测

在正式的抽水试验前,对(微)承压水初始水位进行了连续的观测,静止水位统计信息如表2所示。由此可得,潜水静止水位埋深取2.7 m、绝对标高+3.0 m;④<sub>2</sub>层静止水位埋深取4.0 m、绝对标高+1.74 m;⑤<sub>1</sub>层静止水位埋深取4.0 m、绝对标高+1.58 m;第⑤<sub>2</sub>、⑤<sub>3</sub>层静止水位埋深取地面以下

表2 各含水层静止水位统计信息

地层	井号	井口绝对标高/m	静水位埋深/m	静水位绝对标高/m
第③层	G3-1	+5.89	2.78	+3.11
	G3-2	+5.98	2.83	+3.15
	G3-3	+6.10	2.92	+3.18
第④ <sub>2</sub> 层	K1	+6.18	4.44	+1.74
	K4	+6.21	4.51	+1.70
第⑤ <sub>1</sub> 层	G51-1	+5.72	4.09	+1.63
	G51-2	+5.85	4.27	+1.58
	G51-3	+6.25	4.63	+1.62
第⑤ <sub>2</sub> 、⑤ <sub>3</sub> 层	G523-1	+5.71	4.30	+1.41
	G523-2	+5.89	4.78	+1.11
	G523-3	+5.94	4.49	+1.45

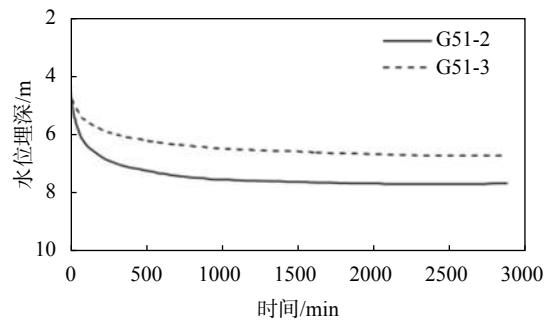
4.30 m, 绝对标高+1.11 m。

#### 3.2 单井试验

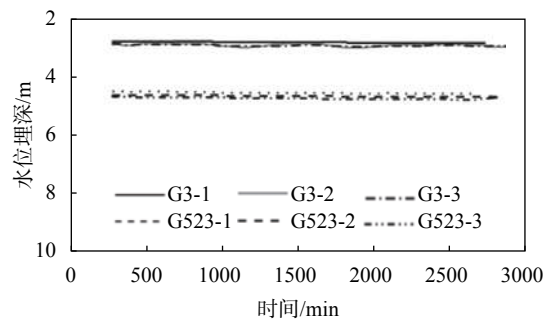
通过对第⑤<sub>1</sub>层和第③层进行单井试验,观察各观测井的水位降深情况,可以确定对应抽水井的平均涌水量和地层的透水性。同时,根据抽水井所在同一深度处的两个观测井的水位降深,可以计算得到该土层的影响半径。

##### 3.2.1 第⑤<sub>1</sub>层单井试验

在试验期间,抽水井 G51-1 内投入额定涌水量 25 m<sup>3</sup>/h 的水泵进行抽水,试验中的实际平均涌水量为 10.42 m<sup>3</sup>/h。各井水位变化与时间关系曲线如图4所示。



(a) 同层水位降深



(b) 其他层水位降深

图4 第⑤<sub>1</sub>层单井试验水位降深历时曲线

从图4中的水位变化历时曲线可以看出,第⑤<sub>1</sub>层抽水时,同层观测井中水位明显下降;抽水持续1000 min以后,地下水位下降速度减慢,水位下降幅度渐渐趋于稳定;而上覆第③层及下伏第⑤<sub>2</sub>、⑤<sub>3</sub>层所在的观测井中水位降深很小,近似水平。由此说明第⑤<sub>1</sub>层与第③层、⑤<sub>2</sub>、⑤<sub>3</sub>层水力联系不密切。

选取距离本次抽水试验的G51-1抽水井16 m左右处的三个观测井G3-2、G51-2、G523-2,绘制三个观测井内的水位降深值与所测地层深度的关系曲线,得到M-S曲线图,如图5所示。

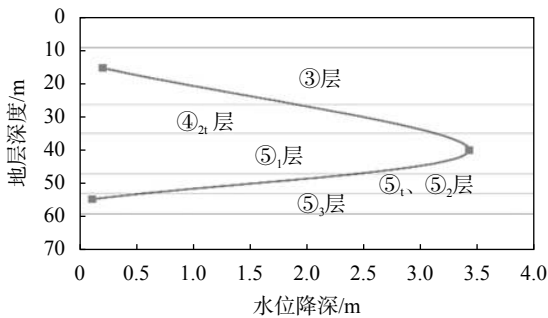


图5 M-S曲线图

通过观察降水漏斗曲线的分布(见图5),对分析土体应力的变化和地层的不均匀沉降有帮助,有利于基坑支护结构的设计<sup>[9]</sup>。

从图中可以看出,抽水井所在地层(第⑤<sub>1</sub>层)的水位降深最大,高于或低于抽水井所在地层的其他层水位降深相对较小,表明该层的渗透性差,为相对隔水层。

通过第⑤<sub>1</sub>层单井试验,得到抽水井G51-1的同层观测井G51-2、G51-3的水位降深分别为3.41 m和2.20 m。根据两个同层观测井的水位降深大小,结合影响半径的计算公式(1),可以得到第⑤<sub>1</sub>层的影响半径:

$$\lg R = \frac{s_1 \lg r_2 - s_2 \lg r_1}{s_1 - s_2} \quad (1)$$

式中:  $R$  为影响半径, m;  $s$  为观测井水位降深, m;  $r$  为观测井到抽水井的距离, m。

代入G51-2、G51-3的数据进行计算:

$$\lg R = \frac{s_1 \lg r_2 - s_2 \lg r_1}{s_1 - s_2} = 2.13$$

$$R = 135 \text{ m}$$

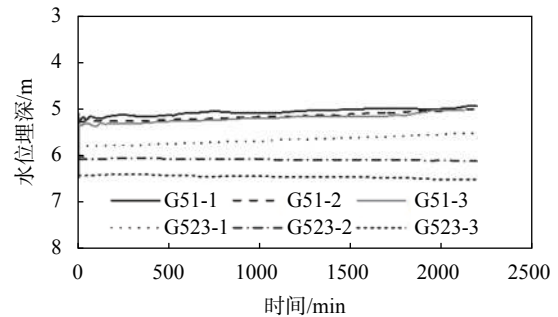
由以上计算公式可以得到第⑤<sub>1</sub>层的响半径为135 m。

### 3.2.2 第③层单井试验

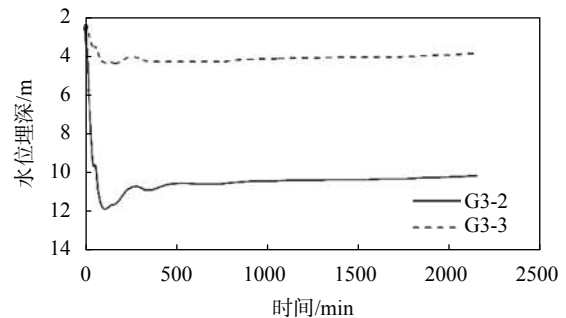
在试验期间,向抽水井G3-1内投入额定涌水量

15 m<sup>3</sup>/h的水泵进行抽水,试验中的实际平均涌水量为10.42 m<sup>3</sup>/h。各井水位变化与时间关系曲线如图5所示。

从图6中可以看出,第③层抽水时,同层观测井中水位平稳下降,抽水持续200 min以后地下水位下降到最低值,之后水位略有回升,并最终趋于稳定。而监测下伏第⑤<sub>1</sub>层及下伏第⑤<sub>2</sub>、⑤<sub>3</sub>层的观测井内水位基本无变化,说明第③层与第⑤<sub>1</sub>、⑤<sub>2</sub>、⑤<sub>3</sub>层水力联系不密切。综合第⑤<sub>1</sub>层单井试验的结果,可以推断出相对弱隔水层位于第③层和第⑤<sub>1</sub>层之间。



(a) 其它层水位降深



(b) 同层水位降深

图6 第③层单井试验水位降深历时曲线

选取距离本次抽水试验的G3-1抽水井16 m左右处的三个观测井G3-2、G51-2、G523-2,绘制三个观测井内的水位降深值与所测地层深度的关系曲线,得到M-S曲线图见图7。观察图7可以发现,随着地层深度的增加,水位降深大幅度减小,位于抽水井所测地层以下的各层水位降深均接近于0。

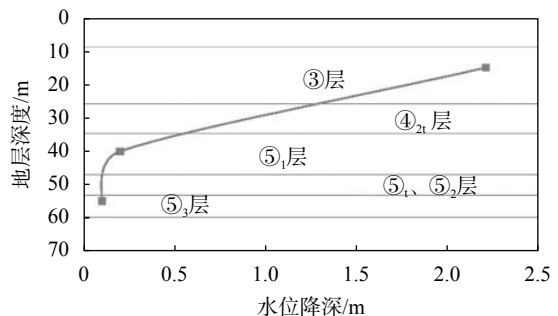


图7 M-S曲线图

通过第③层单井试验,得到抽水井 G3-1 的同层观测井 G3-2、G3-3 的水位降深分别为 2.2 m 和 0.8 m。根据两个同层观测井的水位降深大小,结合影响半径的计算公式(1),可以得到第③层的影响半径  $R$ 。

$$\lg R = \frac{s_1(2H_0-s_1)\lg r_2 - s_2s_1(2H_0-s_2)\lg r_1}{s_1 - s_2} = 1.75$$

$$R = 57 \text{ m}$$

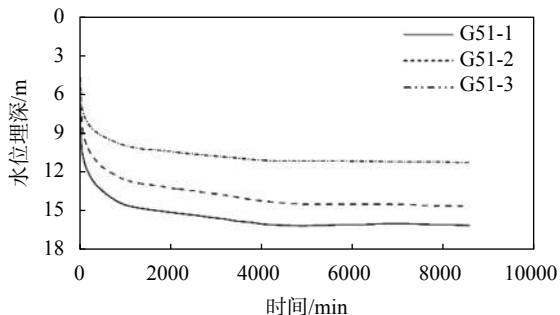
由以上计算公式可以得到第③层的影响半径为 57 m。

### 3.3 群井试验

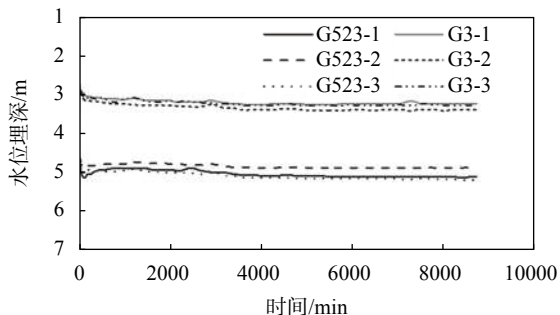
对第⑤<sub>1</sub>层和第⑤<sub>2</sub>、⑤<sub>3</sub>层开展群井抽水试验,得到抽水井的涌水量和各观测井的水位降深随时间变化的发展规律,为数值模拟的参数确定提供依据和验证。

#### 3.3.1 第⑤<sub>1</sub>层群井抽水试验

在本次群井抽水试验中,选取 K1—K4 共四口井作为抽水井,期间对观测井的水位进行跟踪观测,直到水位稳定为止。试验共历时约 6 天,其中 K1—K4 抽水井平均涌水量分别约为 1.02 m<sup>3</sup>/h、17.78 m<sup>3</sup>/h、20.96 m<sup>3</sup>/h、11.47 m<sup>3</sup>/h。各观测井水位降深与时间关系曲线见图 8。



(a) 同层水位降深



(b) 其他层水位降深

图 8 第⑤<sub>1</sub>层群井试验水位降深历时曲线

由图 8 可以看出,同层水位出现明显下降直到趋于稳定,其余各层水位变化不太明显,地下水位趋于稳定。

根据监测数据显示,同层(第⑤<sub>1</sub>层)观测井 G51-1—G51-3 水位降深分别为 11.60 m、10.01 m、8.99 m;

而上覆第③层最大水位降深约为 54 cm,约占第⑤<sub>1</sub>层同距离观测井水位降深的 5%;下伏第⑤<sub>2</sub>、⑤<sub>3</sub>层最大水位降深约为 71 cm,约占第⑤<sub>1</sub>层同距离观测井水位降深的 6%。由此可见,第③层、第⑤<sub>2</sub>、⑤<sub>3</sub>层与第⑤<sub>1</sub>层水位联系不密切,再次证明了第④<sub>2</sub>层透水性较差。

选取距本次抽水试验中心约 16 m 处的三个观测井 G3-2、G51-2、G523-2,绘制观测井内水位降深与地层深度的关系曲线,如图 9 所示。从图中可以看出,降水漏斗曲线呈倾倒的 v 字形分布,仅抽水井所在的地层发生了较大的水位降深。表明④<sub>2</sub>和⑤<sub>1</sub>隔水层透水性较差,为相对隔水层。

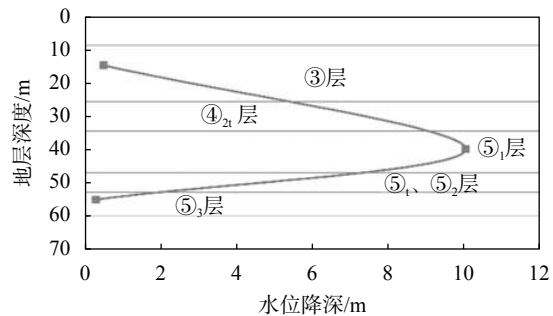


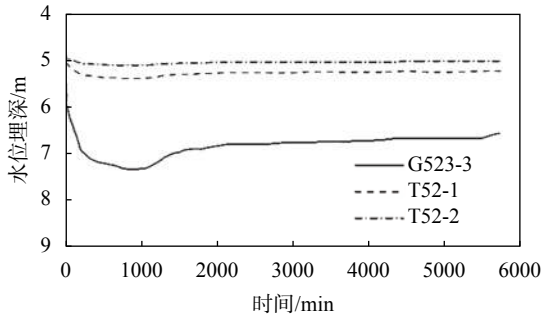
图 9 M-S 曲线图

#### 3.3.2 第⑤<sub>2</sub>、⑤<sub>3</sub>层群井试验

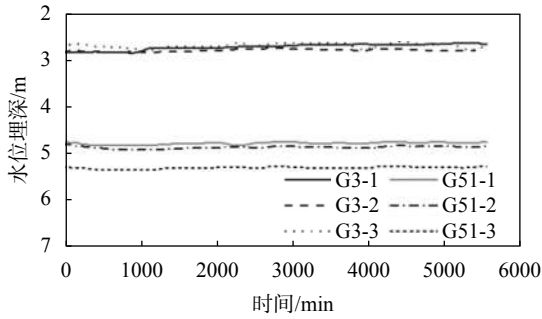
选取抽水井 G523-1、G523-2 共 2 口井对第⑤<sub>2</sub>、⑤<sub>3</sub>层进行群井抽水试验,期间对观测井的水位进行跟踪观测,直到水位稳定为止。试验共历时约 4 天。其中, G523-1、G523-2 抽水井平均涌水量分别为 14.02 m<sup>3</sup>/h、16.19 m<sup>3</sup>/h。在抽水期间,各观测井水位降深与时间关系曲线如图 10 所示。由图 10 可以看出,同层水位中观测井 G523-3(测第⑤<sub>3</sub>层水位)的水位降深最大,观测井 T52-1、T52-2(测第⑤<sub>1</sub>层水位)水位降幅变化相对较小。且根据监测数据, G523-3 最大水位降深为 1.68 m,与其处于同位置的 T52-2 观测井水位降深约为 0.21 m,占 G523-3 的 12.5%。由此可见,第⑤<sub>1</sub>层与第⑤<sub>3</sub>层存在一定程度水力联系(见图 11),但透水性较差,说明第⑤<sub>2</sub>层为弱透水层。而上覆的第⑤<sub>1</sub>层水位(由观测井 G51-1—G51-3 监测)基本无变化,说明第⑤<sub>1</sub>层的隔水性较好,为相对隔水层。

#### 3.4 土层水文参数确定

根据本工程的工程地质和水文地质条件,结合抽水试验结果,建立地下水渗流的三维计算数值模型,采用数值模拟反演分析的方法计算含水层的水文地质参数。这种方法已被广泛用于水文地质参数的求解<sup>[10-12]</sup>,在分析抽水试验结果求解含水层水文地质参



(a) 同层水位降深



(b) 其他层水位降深

图 10 第⑤<sub>1</sub>、⑤<sub>3</sub>层群井抽水试验水位降深历时曲线

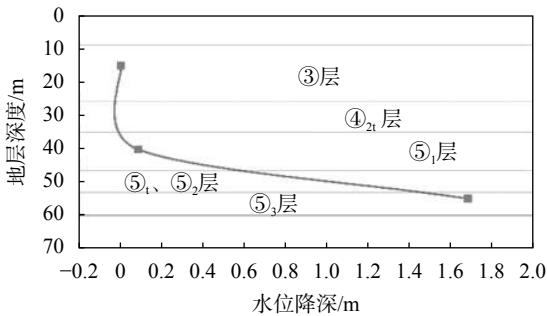
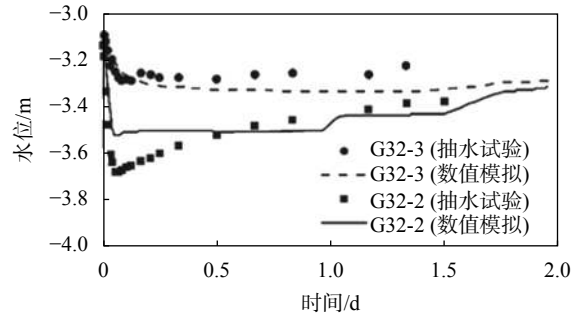


图 11 M-S 曲线图

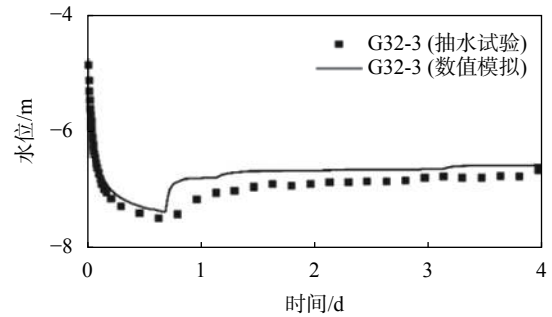
数时,数值方法更有优势,尤其是在复杂水文地质条件下。其过程为:在三维计算模型中设置抽水井,将抽水试验井涌水量代入三维数值模型中,进行群井抽水试验的数值模拟计算。对比计算结果和实测的观测井水位变化,不断调整并优化相关水文地质参数,得到合理的承压水分析参数。图 12 为抽水试验观测井的实测降深曲线与数值模拟取得的计算降深曲线的对比。

从抽水试验的模拟分析结果(见图 12)可以看出,三种抽水试验中数值模拟得到的水头降深和实测水头降深的规律变化基本一致,说明数值模拟结果能够很好地反映群井和单井抽水试验降水过程中的观测井水位变化,满足工程精度要求。

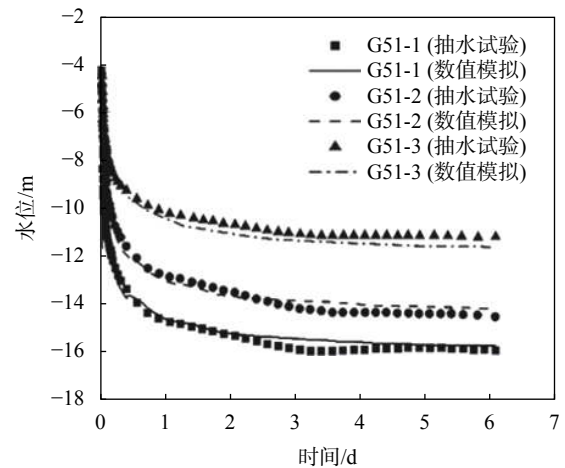
通过以上的三维数值计算反演分析,获得的主要含水层的水文地质参数见表 3,包括各地层的渗透系数、导水系数和贮水率。



(a) 第⑤<sub>1</sub>层群井抽水试验



(b) 第③层群井抽水试验



(c) 第⑤<sub>2</sub>、⑤<sub>3</sub>层群井抽水试验

图 12 抽水试验三维数值反演分析

### 3.5 沉降监测数据分析

为了初步掌握降水对地层沉降变形的影响规律,在试验场地布置了若干个地面沉降监测点,选取了 10 个监测点的数据进行绘制,得到地面累计沉降随时间变化的历时曲线(见图 13)。首先进行了第⑤<sub>1</sub>层单井试验抽水试验,然后依次是第⑤<sub>1</sub>层群井抽水试验、第③层单井抽水试验,最后是第⑤<sub>2</sub>、⑤<sub>3</sub>层群井抽水试验。

从图 13 中曲线可以看出,第⑤<sub>1</sub>层单井试验抽水期间沉降量较小,单井抽水水位恢复后,沉降恢复较为缓慢;第⑤<sub>1</sub>层群井试验抽水时间较长,抽水期间内地面缓慢下降,水位恢复后,沉降回弹约 25%,

表 3 水文地质参数表

层号	土层名称	渗透系数平均值/(m·d <sup>-1</sup> )		导水系数/(m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup> )	贮水率/(10 <sup>-4</sup> ·m <sup>-1</sup> )
		水平	垂直		
第③ <sub>1</sub> 层	粉砂夹粉土	1.1	0.5	5.83	3.2
第③ <sub>2</sub> 层	粉砂	2.2	1.1	17.16	8.5
第④ <sub>2</sub> 层	粉质黏土夹粉土	0.02	0.004	0.16	0.2
第④ <sub>3</sub> 层	砂质粉土夹粉质黏土	1.2	0.12	4.56	0.1
第⑤ <sub>1</sub> 层	粉砂夹粉土	3.0	0.41	38.40	1.8
第⑤ <sub>2</sub> 层	粉质黏土夹粉土	0.02	0.002	0.04	0.8
第⑤ <sub>2</sub> 层	砂质黏土夹粉质黏土	0.15	0.03	0.60	2.4
第⑤ <sub>3</sub> 层	粉砂夹粉土	3.2	0.5	22.40	14.0

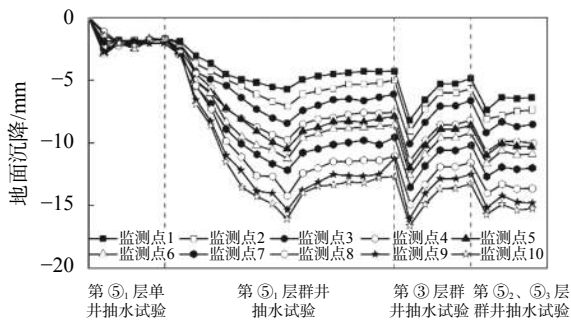


图 13 地面累计沉降随时间变化历时曲线

并最终达到稳定;第③层单井试验抽水时间较短,但地面沉降较为明显,水位恢复后,地面沉降迅速回弹至稳定;第⑤<sub>2</sub>、⑤<sub>3</sub>层群井试验抽水完成后,地面沉降的发展表现出了一定滞后性,水位恢复后,地面沉降回弹约 40%。由此可以看出,抽水试验降水引发的沉降相对稳定后,后期的水位恢复后短期内沉降不能恢复,滞后效应明显。

#### 4 结论

通过对深基坑所在站点展开抽水试验,对富水砂性地层中各含水层的水力联系、不透水性及影响半径进行了分析;通过群井抽水试验和三维数值模拟反演,测定了主要含水层各项水文地质参数;并结合抽水试验地表沉降监测数据,对降水引起的地表沉降进行初步的探讨分析。为后续基坑降水系统设计提供数据支持,确保基坑施工安全,主要结论如下:

(1)本次试验期间观测到的静止水位数据可以作为后期降水设计的参考,并应充分考虑水位季节性变化情况。

(2)根据水位降深值,计算了单井试验所在地层的降水影响半径,其中第⑤<sub>1</sub>层的影响半径为 135 m,第③层的影响半径为 52 m。

(3)本工程第③、⑤<sub>1</sub>、⑤<sub>2</sub>、⑤<sub>3</sub>层水位联系不密切,第④<sub>2</sub>、⑤<sub>1</sub>层透水性差,可作为相对隔水层,第⑤<sub>2</sub>

层透水性较差,为弱透水层。

(4)试验抽水后产生了一定的沉降量,水位恢复后,地面沉降并不能完全恢复,回弹约 40%。因而,在后期基坑降水过程中,应采取抽灌一体化来控制保护对象因降水引起的附加变形。

#### 参 考 文 献

- [1] 施成华,彭立敏. 基坑开挖及降水引起的地表沉降预测[J]. 土木工程学报, 2006, 39(5): 25-32.
- [2] 吴昌瑜,李思慎,谢红. 深基坑开挖中的降水设计问题[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(3): 92-94.
- [3] 杨天亮,叶观宝,吕远强. 地面沉降流固耦合模型在深大基坑降水工程中的应用[J]. 工程勘察, 2008, (3): 27-29, 35.
- [4] 刘承磊,肖传宁,侯志敏,等. 基于群井抽水试验的基坑降水与地面沉降关系研究[J]. 地下水, 2019, 44(4): 94-96.
- [5] SHEN S L, XU Y S. Numerical evaluation of land subsidence induced by groundwater pumping in Shanghai[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2011, 48(9): 1378-1392.
- [6] 杨勇,李国敏,窦艳兵,等. 抽取地下水引起地面沉降的研究现状与进展[J]. 工程勘察, 2010, 38(11): 32-37, 91-93.
- [7] WANG Y Q, WANG Z F, CHENG W C. A review on land subsidence caused by groundwater withdrawal in Xi'an, China[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2018, 78(4): 2851-2863.
- [8] 袁斌,武永霞,廖少明,等. 基于数值模拟的富水砂砾地层深基坑降水方案优化[J]. 工程勘察, 2017, 45(1): 34-39.
- [9] 刘林. 黄土场地深基坑降水试验与数值模拟研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2012.
- [10] 方樟,肖长来,马喆,等. 大型基坑降水工程弱透土层水文地质参数的计算[J]. 工程勘察, 2010, 38(4): 39-43.
- [11] 杨建民,郑刚,焦莹. 天津站抽水试验数值反演分析[J]. 土木工程学报, 2010, 43(9): 125-130.
- [12] 钟建文,李罡,牛磊,等. 基于抽水试验的参数反演和基坑降水过程数值分析[J]. 工程勘察, 2019, 47(7): 36-41, 72.