

# 基坑工程环境水文地质评价<sup>\*</sup>

陆建生 崔永高 缪俊发

(上海广联建设发展有限公司, 上海 200438)

**摘 要:** 目前地下水引起的基坑安全及环境风险问题变得越来越严重, 为消除或减弱该类风险, 需要进行基坑环境水文地质评价。详细列举了基坑环境水文地质评价的主要内容, 即通过分析基坑及其周边的水文地质条件, 分析及预测基坑地下水控制引起的环境变化, 同时提出基坑工程地下水控制措施的建议, 对基坑设计和施工中地下水引起的基坑安全及环境风险控制有重要的指导意义。

**关键词:** 环境水文地质; 地下水控制; 环境变形; 抽水试验

中图分类号: TU473 文献标识码: A 文章编号: 1673-0836(2011)增1-1506-08

## Environmental Hydrogeology Assessment in Excavation Engineering

Lu Jiansheng<sup>1</sup>, Cui Yonggao<sup>1</sup>, Miao Junfa<sup>1</sup>

(Shanghai Guanglian Construction Development Co., Ltd., Shanghai 200438, China)

**Abstract:** The security and environmental risks caused by groundwater in excavation engineering become more and more seriously. In order to eliminate and/or reduce the risks, the environmental hydrogeology of excavation engineering need to be assessed. This article proposed the concept of foundation environmental hydrogeological assessment, which makes a proposal of groundwater control in foundation engineering by analysis of hydrogeological conditions in foundation and environmental diversification caused by groundwater control. It has important guiding significance to bracing design, dewatering design and construction, reducing accident risk largely caused by groundwater in process of design and construction. The necessity and importance of foundation environmental hydrogeological assessment were discussed by several engineering cases in this article.

**Keywords:** environmental hydrogeology; groundwater control; environmental deformation; pumping test

## 1 引言

随着城市建设的大规模发展, 深基坑工程项目大量涌现, 其规模和深度均在不断加大, 基坑安全风险变得越来越高。同时基坑周边的环境变得越来越复杂, 环境控制要求越来越高。在此背景下基坑工程地下水控制的难度变得越来越大, 不断出现因地下水处置不当而形成的基坑事故, 如2000年8月, 地铁4号线某车站未揭示的承压水导致基底隆起, 周围建筑物损伤<sup>[1]</sup>; 2003年5月, 上海地铁8

号线某车站降承压水过程中附近建筑物和管线突发严重沉降<sup>[2]</sup>。

为有效防治基坑建设过程中因地下水而可能引起的基坑安全及环境问题, 针对深大基坑或环境复杂地区, 应进行专门的基坑环境水文地质评价, 为基坑工程的设计与施工服务, 消除或减弱地下水对基坑安全及其周边环境的不利影响。

目前基坑建设中对于地下水的认识多来源于工程勘察资料, 其深度及精度受到很大制约, 远不能满足基坑工程地下水控制分析的要求, 已成为深

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2011-06-01 (修改稿)

作者简介: 陆建生 (1981-) 男, 江苏昆山人, 硕士, 工程师, 主要从事水文地质勘察、地下水综合治理方面的咨询及科研。E-mail: lujest@sina.com

基坑工程承压水风险源之一<sup>[3]</sup>。如上海某风井基坑, 邻近 30m 有运行地铁线和高架线, 因勘察中未探明第二承压含水层对基坑及周边环境的不利影响, 设计也未针对该层地下水采取特别措施, 虽后期进行了地下水的专项评估, 但因施工进度已到一定程度, 较为安全、简易、经济的工程措施已不能采用, 不得不采用风险更高、费用更高的施工措施。

本文基坑环境水文地质评价的内容主要包括水文地质条件的分析、基坑地下水控制引起的环境变化分析及基坑工程地下水控制分析。

## 2 水文地质条件分析

查明工程建设场地地下水的分布特征和水力特性, 是水文地质条件复杂地区深基坑工程地下水控制方案设计的首要条件<sup>[4]</sup>。现阶段主要利用钻探、静探等手段进行地层、含水层的划分及含水层空间分布特征的研究, 通过室内试验、抽水试验进行水力特征的分析。

### 2.1 含水层的划分及地下水类型的判定

准确划分含水层组及地下水类型是进一步开展地下水控制分析的前提条件。基坑工程水文地质与供水水文地质因其分析目的不一样, 在含水层的具体划分上有一定的差别, 如从供水水文地质学的角度判断, 粘土、粉质粘土、粉土为弱透水性, 粉土的透水作用与粘土、粉质粘土等同看待, 通常也不把其作为含水层<sup>[4]</sup>。但粉土层对基坑工程产生的作用与砂层中的地下水是相同的, 在基坑工程中应将粉土层与砂层一起视为透水层, 按含水层考虑。如上海市某工程场区内分布的第⑤<sub>3-2</sub>层灰色粘质粉土夹粉质粘土层, 在实际工程分析中即按含水层考虑, 因其承压水水位高于含水层顶板而又定义为(微)承压含水层。

基坑建设过程中基坑区潜水与承压水间存在相互转化的可能性, 在水文地质评价中必须考虑到这个问题。

如昆明某基坑浅部地层为潜水含水层组, 围护设计中基坑底部采用高压旋喷进行水平封底, 形成水平止水帷幕。其剖面如图 1 所示, 水平止水帷幕下的含水层在该区段即转变为承压含水层, 必需考虑承压水对基坑的抗突涌风险。

承压水转为潜水的类型主要是基坑开挖深度进入了承压含水层, 随着开挖深度的变化, 地下水的控制模式也将由降压转变为疏干, 如上海中心基坑开挖过程中, 其下部第一承压含水层即是先降压

后转为疏干控制。

地下水类型的转变将直接影响地下水综合治理的模式, 因此基坑环境水文地质评价必须紧密结合基坑工程情况, 详细分析, 做到有的放矢。

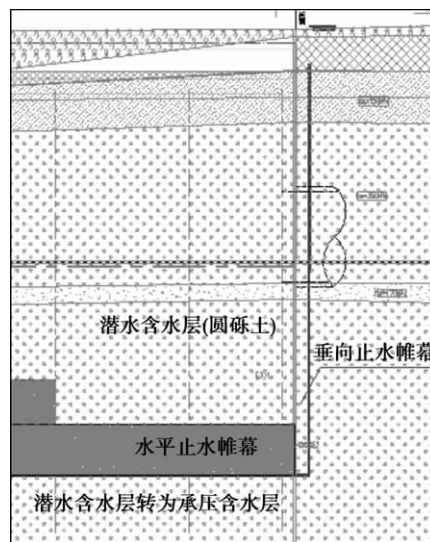


图 1 昆明某基坑地质剖面图

Fig. 1 Geological profile of one foundation in Kunming

在基坑工程地下水控制分析中地下水初始水位是一个非常重要的参数, 既是判断含水层类型的必要条件之一, 其数值也直接影响着工程分析的结果。如某基坑开挖深度 16.50 m, 其承压含水层顶板埋深 35.00 m, 含水层土体重度按  $18.0 \text{ kN/m}^3$ , 抗突涌安全系数按 1.1 考虑, 如初始水位按 3 m 考虑, 则开挖至 15.44 m 时即开始降压, 如初始水位按 7 m 考虑, 则本基坑开挖期间不需要降压。可见初始水位对后期地下水的控制产生直接的影响。

地下水初始水位的选取应在抽水试验基础上综合考虑地下水水位的年季度变化、工程施工季节的变化及周边工程的影响等多方面因素。如上海中心抽水试验期间因临近基坑降水影响, 试验期间的水位埋深达到 12 ~ 13.0 m, 降水设计时必须合理考虑该因素的影响。在有条件地区应设置长期水位观测孔, 从而得到更为可靠的分析数据。

### 2.2 含水层空间分布特征

目前基坑工程中含水层的空间分布多直接引自工程勘察资料, 而工程勘察所提供的钻孔资料多数只位于拟建场区, 对于地下水控制分析其资料却远不能满足相关要求, 特别是含水层起伏变化较大的区域, 因资料的局限性而导致水文地质概念模型的失真。

图 2 为上海某基坑拟建场区第⑦层承压含水

层厚度等值线图,该图是依据勘察钻孔资料,然后通过 Kriging 内插法得到的,很明显基坑西侧⑦层承压含水层厚度起伏变化巨大,如基坑外侧区域一定距离内的⑦层承压含水层厚度的分布不能得到有效的掌握,则直接影响地下水控制分析的准确性,是基坑地下水控制中潜在风险源之一。

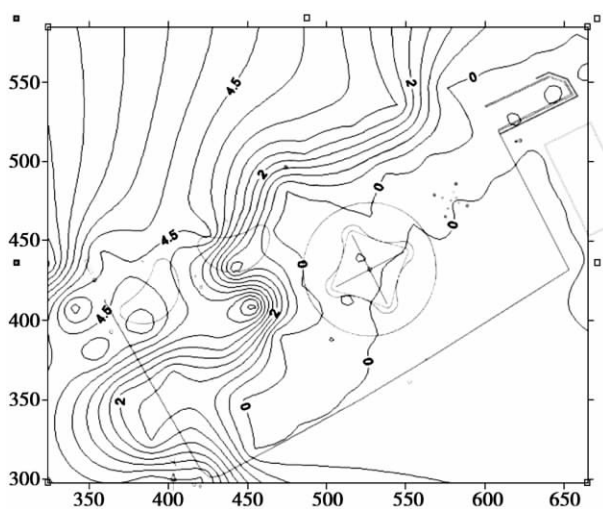


图2 拟建场区⑦层承压含水层厚度等值线图(m)

Fig. 2 The thickness isoline of the confined aquifer at construction site(m)

上海苏州河吴淞江故道区的某基坑工程的典型地质剖面如图3所示。该基坑范围内的⑤<sub>2</sub>层分布均匀,其下部无⑦层,如勘察仅限于此,则将发现不了基坑东西两侧⑤<sub>2</sub>层逐渐变薄且与⑦层相通,降水设计时,将错误的定义⑤<sub>2</sub>层的边界条件,忽视⑤<sub>2</sub>层在空间分布上的特殊性,忽视⑦层对⑤<sub>2</sub>层的水平补给,进而成为基坑地下水控制中的重大风险源。

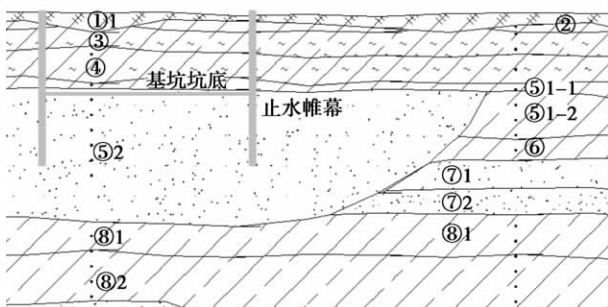


图3 上海某基坑典型地质剖面图

Fig. 3 Geological profile of one foundation pit in Shanghai

针对上述情况,在对基坑工程水文地质分析时,建议收集拟建基坑区域的区域水文地质资料和拟建基坑周边(1~1.5)R内的地层资料(其中R为目的含水层的抽水影响半径),如无合适资料建议

针对基坑临近地区增补钻孔及静探孔以补充周边地层资料。

### 2.3 水文地质参数的测定

水文地质参数宏观表征了岩土体中孔隙的性状和应力状态,是研究地下水渗流的重要指标,其数值大小直接影响地下水控制设计、施工等的准确性、可靠性和安全性。最基本的水文地质参数是渗透系数和储水系数。

#### 2.3.1 单井抽水存在存在的问题

目前水文地质参数测定最常用的方式是单井抽水试验,其分析方法多采用解析解,其中存在的问题主要包括:

(1) 解析解的使用具有严格的前提条件,而在实际工作中很难满足对应的条件,严重限制了解析解的使用;

(2) 解析解中地层概化忽视局部效应,而拟建场区自身空间尺度较小,忽视局部效应,将严重影响地下水控制分析的准确性;

(3) 地下水系统是一开放系统,在地下水控制设计中,目的含水层及其上下各层的水文地质参数均非常重要,直接制约着地下水控制措施的选取,但解析解难以获取相关系统性的水文地质参数。

#### 2.3.2 解决方法

在实际分析过程中可通过下述方法解决上述问题:

(1) 准确概化含水层模型,建立三维数值模型,利用数值法求取相关参数;

(2) 三维模型中因未知参数较多,在试验时应在经济相对允许的条件下合理布置观测井,以合理解决参数多解性问题;

(3) 围护施工完成后,地层受到较大干扰,且模型边界条件发生变化,在降水运行前应进行抽水试验,以优化地下水控制运行措施。

工程案例:上海某拟建基坑抽水试验其间,在⑤<sub>3-2</sub>层布置了4口抽水井(K1, K2, K3, K4)、1口观测井(G1),在第④、⑤<sub>1</sub>、⑤<sub>2</sub>、⑤<sub>3-1</sub>和⑧<sub>1</sub>层各布置了1口观测井(G2, G3, G4, G5, G6)(本区内缺失⑤<sub>4</sub>、⑦层)。在⑤<sub>3-2</sub>层群井抽水期间,⑧<sub>1</sub>层和⑤<sub>3-1</sub>层内观测井(G5, G6)的水位变化明显,它们与⑤<sub>3-2</sub>层的水力联系相当密切;④层观测井(G2)水位微弱起伏波动,基本不受抽水影响;⑤<sub>1</sub>和⑤<sub>2</sub>层观测井(G3, G4)水位变化相对较小,与第⑤<sub>3-2</sub>层的水力联系较弱。因此在水文地质参数反演中以G1、G5和G6的观测数据为依据建立对应

的目标函数,以 $\textcircled{5}_{3-1}$ 、 $\textcircled{5}_{3-2}$ 和 $\textcircled{8}_1$ 层的水平渗透系数、垂直渗透系数及贮水率这 9 个变量为优化变量,在三维地下水渗流数值模型的基础上,通过非线性最小二乘法,求得了对应的水文地质参数,得到了较好的拟合结果。参数结果如表 1 所示,实测数据曲线与数值模拟曲线的对比分析如图 4~图 6 所示。

表 1 数值模拟反演结果

Table 1 The result of back analysis

层位	水平渗透系数 $k_h$ (m/d)	垂直渗透系数 $k_v$ (m/d)	贮水率 $S_s$ (1/m)
$\textcircled{5}_{3-1}$	$9.12 \times 10^{-4}$	$9.86 \times 10^{-5}$	$3.06 \times 10^{-7}$
$\textcircled{5}_{3-2}$	0.472	0.112	$5.18 \times 10^{-5}$
$\textcircled{8}_1$	$1.85 \times 10^{-3}$	$4.923 \times 10^{-4}$	$3.63 \times 10^{-5}$

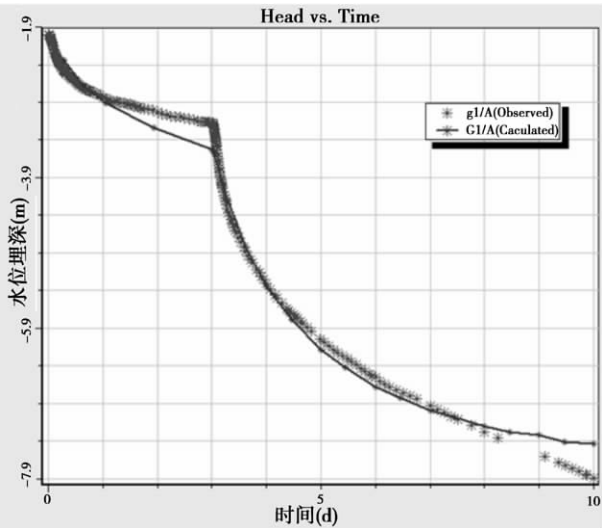


图 4 G1 井实测曲线与模拟曲线对比图

Fig.4 The curves of observed and simulation of well(G1)

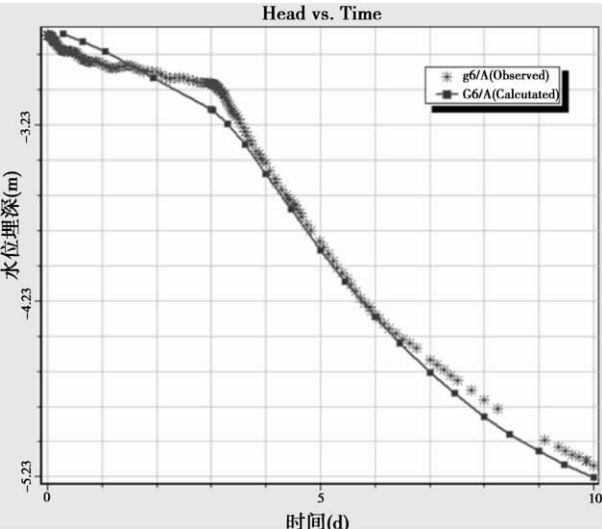


图 5 G6 井实测曲线与模拟曲线对比图

Fig.5 The observed and simulation curves of well(G6)

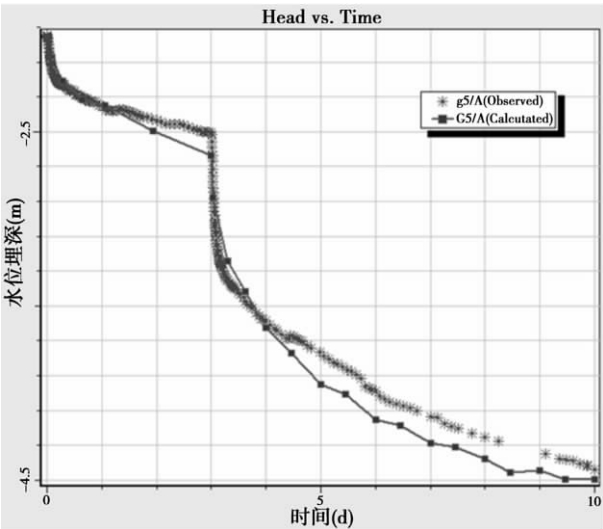


图 6 G5 井实测曲线与模拟曲线对比图

Fig.6 The observed and simulation curves of well(G5)

2.4 多层含水层间水力联系分析

地下水控制分析过程中,多层含水层间的水力联系分析直接影响后期环境变形分析及地下水控制措施的选取。

图 7 为天津某深基坑的典型地质剖面图,按勘察报告第一承压含水层与第二承压含水层间存在一层较为明显的隔水层,为辨别各含水层间的水力联系,在潜土层布置了 1 口观测井(G3),在第一承压含水层上段( $\textcircled{7}_2$ 、 $\textcircled{7}_4$ 、 $\textcircled{7}_9$ 层(26.5~33.9 m))布置了 1 口观测井(G4),在第一承压含水层中段( $\textcircled{8}_4$ 、 $\textcircled{8}_5$ 层(33.9~51.0 m))布置了 5 口井(K1、K2、K3、G1、G2),在第一承压含水层下段( $\textcircled{9}_4$ 、 $\textcircled{9}_5$ 、 $\textcircled{9}_2$ 、 $\textcircled{9}_4$ 混合层(51.6~58.8 m))布置了 1 口井(G5),在( $\textcircled{10}_2$ 、 $\textcircled{10}_4$ 混合层(62.2~69.9 m))第二承压含水层布置了 1 口井(G6)。

群井抽水试验中启动 K1、K2 和 K3 三口抽水井,此时观测井稳定水位降深如表 2 所示。观测井 G3 水位基本未变化,说明潜水含水层与第一承压含水层间水力联系微弱,而观测井 G6 水位降深达到了 5.91 m,说明第一与第二承压含水层间水力联系非常密切,工程勘察中所提隔水层隔水效果差,因此考虑完全切断第一承压水进行降水,其经济及功效值得商榷。

表 2 水位降深观测数据

Table 2 Observation data of water drawdown

井号	G1	G2	G3	G4	G5	G6
水位降深(m)	8.02	6.57	0.12	9.10	6.62	5.91

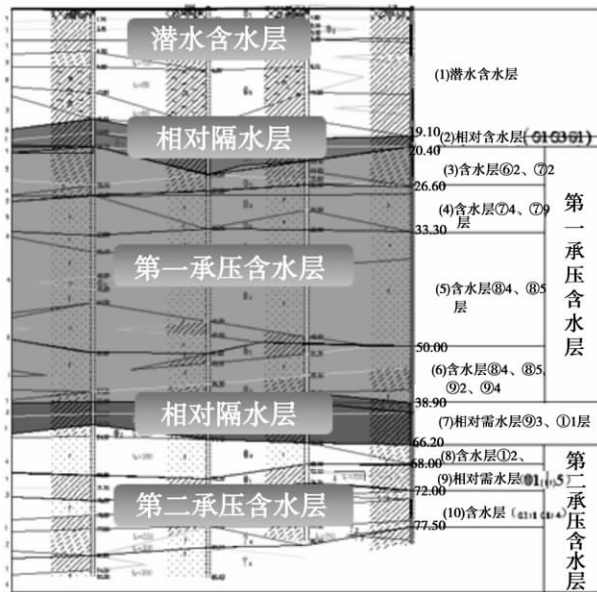


图7 天津某基坑典型地质剖面图

Fig. 7 Geological profile of one foundation pit in Tianjin

图8为上海某地铁站⑦层群井抽水时, ⑤<sub>1-1</sub>层、⑦<sub>1</sub>层顶、⑦<sub>2</sub>层底、⑧<sub>1</sub>层和⑧<sub>2</sub>层中孔隙水压力的读数变化曲线(压力变化已转为水头变化)。如图所示, 浅层⑤<sub>1-1</sub>层处孔隙水压力基本不变, 即不受⑦层抽水的影响; ⑦<sub>1</sub>与⑦<sub>2</sub>层内的孔隙水压力变化与相同井间距的观测井内水位变化基本一致; 群井试验期间, 下部⑧<sub>1</sub>层和⑧<sub>2</sub>层处的孔隙水压力因⑦层抽水而有一定的变化, 但变化较小。由此可以认为隔水层(⑤<sub>1-2</sub>、⑥和⑧<sub>1</sub>层)的隔水性良好。因此围护完全隔断⑦层的情况下, ⑦层抽水对周边环境的影响是非常有限的。

### 2.5 含水层水位恢复试验

通过含水层的水位恢复试验既可以计算含水层的水文地质参数, 也可通过水位恢复速率的分析, 确定后期降水期间降水停电的风险。

图9为上海某基坑⑤<sub>3-2</sub>层群井停抽后观测井的水位恢复曲线。水位恢复10%, 大约需要300 min; 水位恢复20%, 大约需要400 min; 水位恢复50%, 大约需要800 min。所以, 该工程现场短时间的停电, 将不会影响基坑安全。

图10为上海某基坑⑦<sub>2</sub>层群井停抽后观测井的水位恢复曲线。水位恢复10%, 大约需要1.5 min; 水位恢复20%, 大约需要2 min; 水位恢复50%, 大约需要5 min; 所以, 该基坑必须具备有能自动切换的双电源系统, 否则临时的停电, 将对基坑造成难以估量的破坏。

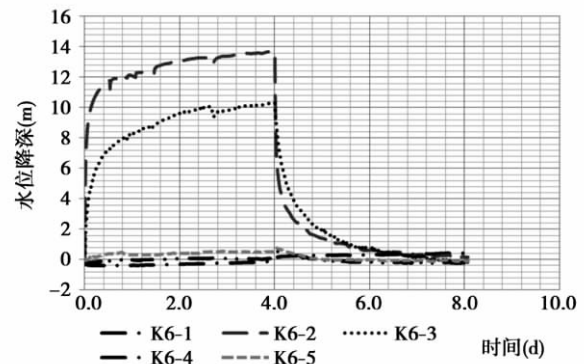


图8 群井抽水试验期间, 点水位降深变化趋势  
K6-1: 埋深18m(⑤<sub>1-1</sub>层); K6-2: 埋深28m(⑦<sub>1</sub>层);  
K6-3: 埋深43m(⑦<sub>2</sub>层); K6-4: 埋深57m(⑧<sub>1</sub>层);  
K6-5: 埋深67m(⑧<sub>2</sub>层)

Fig. 8 The curve of water drawdown vs time in the multiple-well pumping water test period

K6-1: placed in 18m(⑤<sub>1-1</sub>); K6-2: placed in 28m(⑦<sub>1</sub>); K6-3: placed in 43m(⑦<sub>2</sub>); K6-4: placed in 57m(⑧<sub>1</sub>); K6-5: placed in 67m(⑧<sub>2</sub>)

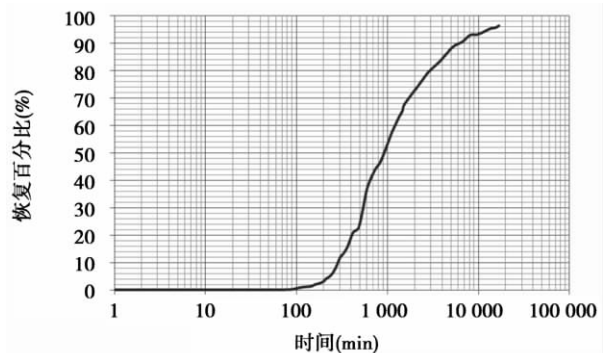


图9 水位恢复比率历时曲线 s-lgt

Fig. 9 Water recovery ratio vs time curve

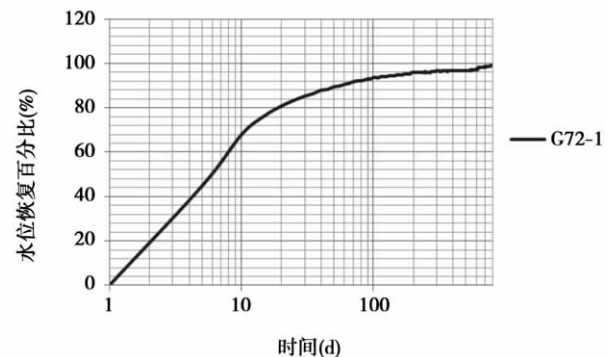


图10 水位恢复比率历时曲线 s-lgt

Fig. 10 Water recovery ratio vs time curve

## 3 环境水文地质分析

基坑工程的环境水文地质分析主要指地下水

水位升降引起的环境变形和地下水资源环境分析。

### 3.1 环境变形分析

基坑降水过程中, 原有基坑周围的水土应力平衡受到破坏, 土体发生变形, 变形达到一定程度就会危及到地下管线、道路、地面建筑的安全, 严重时给工程建设带来无法估量的损失和影响。而实际过程中因地层的复杂性, 沉降理论的不完善性等多方面原因, 依靠纯理论分析不能准确的预测降水对环境变形的影响。为了提高环境变形预测的精度, 可在群井抽水试验期间布设地表沉降点和分层沉降点来监测环境变形, 进而来分析预测基坑开挖期间因降水引起的环境变形。抽水试验期间的环境变形可从下面几个方面着手分析。

#### 3.1.1 距抽水中心不同距离的地表沉降变化趋势

通过分析距抽水中心不同距离处的沉降量, 可大致了解因降水而形成的沉降漏斗大小。

图 11 为上海某基坑⑤<sub>3-2</sub>层群井抽水 7 d 后距抽水中心不同距离处的沉降值。随着与群井抽水区域之间距离的增大, 地面沉降有逐渐减小的趋势。抽水区域中心位置的实测最大沉降 9.8 mm, 试验期间环境变形的影响范围约为 60 m。

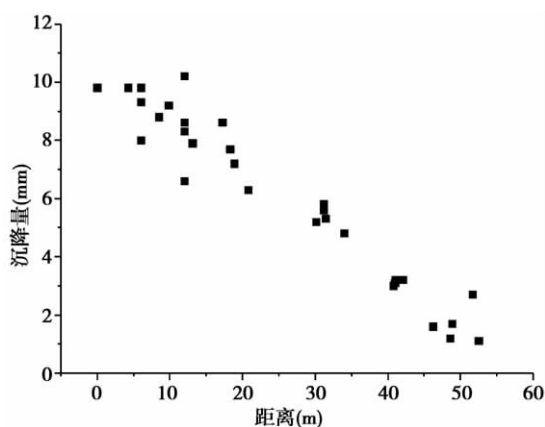


图 11 上海某基坑⑤<sub>3-2</sub>层群井抽水 7 d 后距抽水中心不同距离处的沉降变化趋势

Fig. 11 Ground settlement vs distance from pumping center curve in the ⑤<sub>3-2</sub> layer of foundation pit in Shanghai

图 12 为上海某基坑⑦层群井抽水 7 d 后距抽水中心不同距离处的沉降值。随着与群井抽水区域之间距离的增大, 地面沉降有逐渐减小的趋势。抽水区域中心位置的实测最大沉降 13 mm, 试验期间环境变形的影响范围约为 100 m。

#### 3.1.2 地表沉降量随抽水时间的变化趋势

通过试验期间沉降随时间的变化, 推出相应的关系, 为后期沉降预测服务。

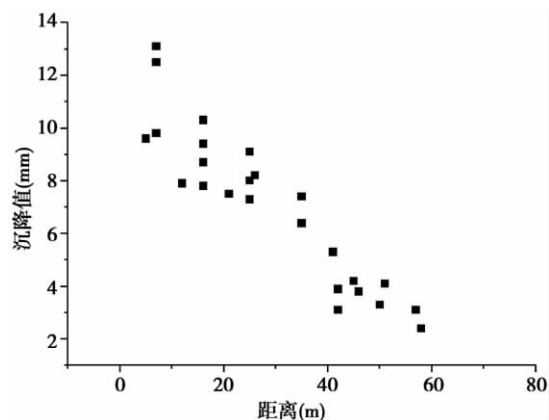


图 12 上海某基坑⑦层群井抽水 7 天后距抽水中心不同距离处的沉降变化趋势

Fig. 12 Ground settlement vs distance from pumping center curve in the ⑦ layer of foundation pit in Shanghai

图 13 与图 14 为上海某基坑⑤<sub>3-2</sub>层群井抽水时分别距离抽水中心 31.2 m 和 48.8 m 处沉降量随抽水时间的变化趋势图。按一维固结理论, 沉降与时间成指数关系, 因此按指数函数对其数据进行拟合。通过拟合可得如下结果:

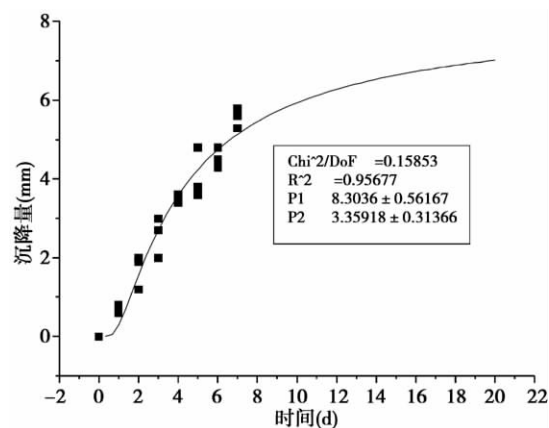


图 13 地表沉降随时间的变化关系曲线 ( $D = 31.2$  m)

Fig. 13 Ground settlement vs time curve (Distance = 31.2 m)

距离抽水中心 31.2 m 处, 如抽水不停止且相关抽水条件不变, 则该处的最大可能沉降量为 8.30 mm, 也即抽水第 7 d 的沉降量为最终可能沉降量的 62%。

距离抽水中心 48.8 m 处, 如抽水不停止且相关抽水条件不变, 则该处的最大可能沉降量为 4.25 mm, 也即抽水第 7 天的沉降量为最终可能沉降量的 33%。

很明显, 离抽水中心点距离越远, 则沉降量与最终可能沉降量的比值越小, 也即沉降稳定时间越长。

为进一步提高拟合精度, 在以后试验中群井抽

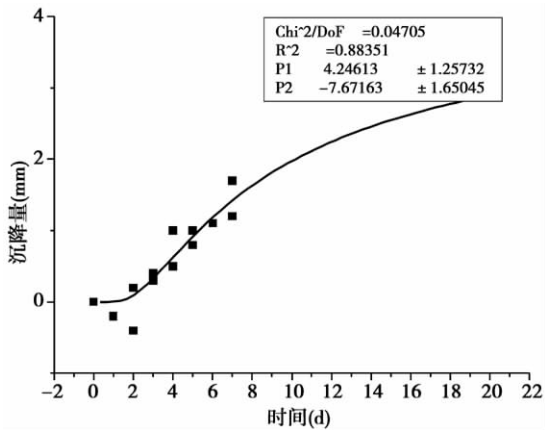
图14 地表沉降随时间的变化关系曲线( $D=48.8\text{ m}$ )

Fig. 14 Ground settlement vs time curve (Distance = 48.8 m)

水试验的沉降观测时间应加长。

### 3.1.3 沉降恢复速率

按目前积累的数据,在群井试验结束后,地表均有一定的回弹,如上海某基坑⑤<sub>3-2</sub>层群井抽水试验停止7 d后地表的平均回弹值为24.93%。而在上海另一基坑⑦层群井抽水试验停止7 d后地表的平均回弹值达到了42.86%。进而可近似认为砂土比粉土具有更好的回弹性。

### 3.1.4 土层的变形趋势

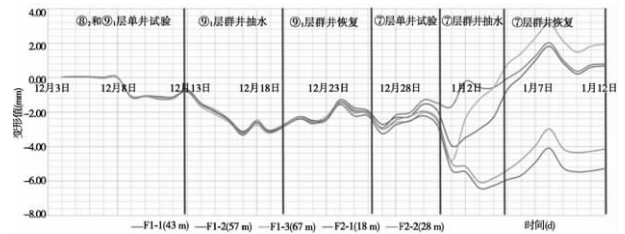
根据目前的研究进展,地面沉降理论一般可分为:经典弹性地面沉降理论、准弹性地面沉降理论和地面沉降的流变学理论。

其中基于流变学理论的地面沉降理论分析与计算,能更全面、更确切地解释地面沉降现象的发生过程与规律,更准确地预测地面沉降。但运用流变学理论分析和预测地面沉降,也带来新的问题,即计算沉降所必需的地层参数数目增多,对于实际应用,有一定的局限性。

与常规机理不同,王建秀、吴林高等<sup>[5]</sup>根据上海地铁9号线宜山路车站承压水减压诱发沉降存在着分层沉降分异(分叉)和各层分层沉降之和与地面沉降量值不等的现象。

在上海某车站水文地质勘察中,利用多点位移计也进行了相应的土层变形观测,结果如图15所示,也得到了类似的结果。

过去基于环境控制的抽水试验中,监测数据多为地表监测,分层沉降监测数据较少,针对降水过程中各土层间的协调变形机制研究较少。未来可通过布设高精度分层沉降标来分析降水引起沉降变形机理,为进一步提高环境变形预测的能力做准备。



随着水文地质条件、基坑工程特点和周边环境的不同, 基坑工程地下水控制措施也将有所差别, 本文受篇幅限制, 将不再展开。

## 5 结 论

针对基坑环境水文地质评价的工作程序及内容进行了一些探讨。基坑环境水文地质评价首先应查明工程建设场地地下水的分布特征和水力特性, 详细分析基坑地下水控制引起的环境变化(包括地下水水位升降引起的环境变形和地下水资源环境变化), 最后在此基础上提出基坑工程地下水控制措施的建议。

随着城市的快速发展, 深、大基坑越来越多, 周边环境条件及要求越来越严, 地下水引起的基坑安全及环境风险问题变得越来越严重。目前基坑事故中地下水引起的环境事故占到了一半以上, 因此加强基坑环境水文地质评价对基坑设计和施工中地下水引起的基坑安全及环境风险控制有重要的指导意义。

(上接第 1473 页)

土地区超大直径盾构施工, 浅覆土区域隧道管片的上浮将影响到地面。为减小地表变形及地面建筑物的沉降, 可采取提高同步注浆质量、同步施工快速跟进的方法。

## 3 结 论

(1) 切口压力的设定对正面土体沉降量影响较大, 在施工过程中应密切关注切口位置的地表沉降量并及时调整压力。对于超大直径泥水平衡盾构, 单次压力调整不宜过大, 切口压力波动不超过  $\pm 0.002$  MPa。

(2) 穿越建筑物过程中, 采用重浆模式, 可有效降低穿越期间地表以及房屋沉降。采用“双控”同步注浆模式, 以砂与粉煤灰为主要原材料的高密度单液浆施工可以有效减小地表后期的沉降。

(3) 对于超大直径泥水平衡盾构, 浅覆土段隧道管片上浮对地表建筑物沉降有一定影响。由于隧道开挖卸荷引起隧道上浮而易造成地表隆起, 从

## 参考文献 (References)

- [1] 刘国彬, 王洪新. 上海浅层粉砂地层承压水对基坑的危害及治理 [J]. 岩土工程学报, 2002, 24(6): 790-792.
- [2] 陈在华. 深基坑降水技术的应用及对周围环境影响的分析 [J]. 安徽建筑, 2004, 11(3): 83-86.
- [3] 刘军, 潘延平. 轨道交通工程承压水风险控制指南 [M]. 上海: 同济大学出版社, 2008.
- [4] 高文新, 刘永勤, 庞炜, 等. 天津市区影响超深基坑工程的地下水分布特征和水力特性 [A]. 中国城市规划协会城市勘测专业委员会科技工作部编. 全国城市勘测新技术研讨交流会论文集 [C]. 城市勘测专业委员会科技工作部出版社, 2007: 295-304.
- [5] 王建秀, 吴林高, 朱雁飞, 等. 地铁车站深基坑降水诱发沉降机制及计算方法 [J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(5): 1 010-1 019.
- [6] 唐益群, 徐超. 21 世纪上海城市发展的若干环境地质问题 [J]. 地下空间, 1997, 17(2): 95-98.

而引起房屋基础(房屋 1) 上抬。在施工过程中可通过优化同步注浆管理、同步施工及时跟进等措施加以解决。

(4) 盾构穿越房屋 60 d 后, 两栋房屋累计沉降量最大分别为 25.5 mm 和 32.2 mm, 不均沉降系数分别为 0.8‰ 和 1.0‰, 满足房屋沉降控制的要求。

## 参考文献 (References)

- [1] 周文波. 盾构法隧道施工技术及应用 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004.
- [2] 金建峰, 吴辉, 吴雅峰. 盾构施工引起的地表沉降规律分析 [J]. 科学技术与工程, 2007, (5): 3 785-3 788.
- [3] 陈锦云. 泥水盾构地表沉降控制措施 [J]. 广东土木与建筑, 2005, (11): 28-30.