

# 复杂地层中基坑降水引发的水位及沉降分析与控制对策

郑 刚<sup>1,2</sup> 赵悦宾<sup>1,2</sup> 程雪松<sup>1,2</sup> 哈 达<sup>1,2</sup> 栗晴瀚<sup>1,2</sup>

(1. 天津大学滨海土木工程结构与安全教育部重点实验室, 天津 300072; 2. 天津大学建筑工程学院, 天津 300072)

**摘要:** 在深大基坑工程中, 若止水帷幕设置不合理, 基坑内外水力联系将不能被完全截断, 这样基坑内降水不但会引起坑外土体沉降, 还会引发围护结构变形。在天津地铁 5 号线某车站基坑工程中, 由于场地地层较为复杂, 含水层不连续且存在大量透镜体, 因此在开挖前进行了预降水试验, 判断基坑内外水力联系。文章通过对预降水试验进行数据分析得出, 该基坑内外承压含水层连通, 且各含水层存在水力联系, 原设计的落底式止水帷幕未能彻底截断承压含水层, 造成了较大的围护结构变形与显著的建筑物沉降。因此, 当场地承压含水层构造较为复杂时, 应当在勘察阶段进行场地抽水试验, 或者在基坑开挖前进行预降水试验, 以全面掌握场地水文地质情况及基坑内外含水层水力联系。同时预降水前应在坑外合理设置回灌井, 避免降水引发坑外沉降, 并提前施工基坑第一道水平支撑, 增加围护结构抗侧移刚度, 减小降水引发的围护结构变形。

**关键词:** 基坑降水; 地表沉降; 悬挂式止水帷幕; 地下连续墙; 回灌技术

**中图分类号:** TU46<sup>+3</sup> **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-131X(2019)S1-0135-08

## Strategy and analysis of the settlement and deformation caused by dewatering under complicated geological condition

Zheng Gang<sup>1,2</sup> Zhao Yuebin<sup>1,2</sup> Cheng Xuesong<sup>1,2</sup> Ha Da<sup>1,2</sup> Li Qinghan<sup>1,2</sup>

(1. Ministry of Education Key Laboratory of Coast Civil Structures and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** If the arrangement of the curtain is unreasonable in deep foundation, the hydraulic connection of both side of the foundation will still exist, which lead to the ground settlement and the deformation of the diaphragm wall. In an engineering of Tianjin 5th metro station, the condition is complicated and many lens are discovered in the discontinuous aquifer. Pre-dewatering test was carried out before the excavation to judge the foundation hydraulic connection. This paper made an observation about the pre-dewatering test. After analyzing, it can be included that there's hydraulic connection in both side of the diaphragm wall. The different confined aquifer has hydraulic connection, either. The confined aquifer can't be truncated by the curtain, which caused ground settlement and clear deformation of the diaphragm wall. Therefore, in the complicated condition, pre-dewatering test before the excavation and pumping during the geological survey should be carried out to judge the connection of the aquifer and the geological condition. To decrease the ground settlement, recharge well should be built before pumping. Building the first lateral support construction can improve the lateral stiffness and reduce the deformation of the diaphragm wall caused by dewatering effectively.

**Keywords:** dewatering; ground settlement; suspended impervious curtain; diaphragm wall; recharge

**E-mail:** zhenggang1967@163.com

## 引 言

随着我国经济不断发展, 城市化进程不断加快, 合理开发地下空间成为城市发展的重要因素。近年来, 深基坑工程数量急剧增加, 基坑在开挖前, 为防止边坡失稳与坑底隆起, 常采用预降水的方式,

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFC0805407)、天津市自然科学基金(18JCQNJC07900)和国家自然科学基金(41630641)

作者简介: 郑刚, 博士, 教授

通讯作者: 程雪松, 博士, 副教授

收稿日期: 2019-02-27

同时在基坑周围布设止水帷幕。基坑止水帷幕分为落底式与悬挂式两种,落底式止水帷幕底部穿透含水层并进入隔水层一定深度,完全切断基坑内外水力联系。而悬挂式止水帷幕并未插入至隔水层,降水期间,坑外地下水将绕过止水帷幕进入坑内。实际工程中,随着开挖深度不断增大,传统落底式止水帷幕出现工期长、造价高、施工质量无法保证等现象;而悬挂式止水帷幕虽不能完全截断基坑内外水力联系,但其施工工期较短,造价低,二者各有利弊。

现阶段,国内外诸多学者针对不同形式的止水帷幕与基坑内外水位降深之间的关系进行数值模拟与分析<sup>[1-2]</sup>。金小荣等<sup>[3]</sup>利用有限元模型分析得出随着止水帷幕深度增加,基坑周围土体总沉降和不均匀沉降减小。冯晓腊等<sup>[4]</sup>通过三维有限元法针对悬挂式止水帷幕对于基坑降水的影响进行定量计算,说明了止水帷幕对抗外承压水的阻隔作用改变了地下水渗流场。肖明钊等<sup>[5]</sup>优化了止水帷幕对基坑降水定量研究的计算方法,经数值模拟试验分析得出,合理布置止水帷幕对基坑内各点水头降深影响远大于对基坑外各点水头降深的影响。

由于悬挂式止水帷幕未能完全隔断基坑内外承压含水层,降水期间坑外地下水将涌入坑内,导致基坑外侧地表及周围建筑物产生沉降。周火垚等<sup>[6]</sup>提出采用悬挂式止水帷幕与深井降水相结合的方式控制地下水。郑刚等<sup>[7]</sup>通过单井单灌与群井群灌等试验证明,在悬挂式止水帷幕外合理进行回灌可以有效控制地面沉降。

相关学者对不同种类止水帷幕<sup>[8-10]</sup>及辅助控制地表沉降措施<sup>[11-12]</sup>已经有了比较深入的研究。目前,悬挂止水帷幕在实际工程中应用较少,大部分工程仍然应用落底式止水帷幕;然而,在复杂地质条件下,由于承压含水层不连续或者存在大量含水透镜体,在勘察阶段设计的落底式止水帷幕往往不能完全截断承压含水层,基坑内外常出现水力联系。而悬挂式止水帷幕工程在复杂地质条件下应用实例较少,实践理论仍不够完善。

本文介绍天津地区复杂地质条件下某地铁站深基坑原设计采用落底式止水帷幕,但由于隔水层中存在透镜体导致基坑内外水力连通的工程案例,对预降水试验中基坑内外水位变化、基坑围护结构变形及基坑外沉降发展进行分析,并对复杂地质条件下基坑内外水力联系判断、基坑降水引发的环境影响控制提出相应对策,以期类似工程提供参考。

## 1 工程概况

### 1.1 地理位置及环境

天津市地处华北平原,场地总体地势平坦。天津市地铁5号线某地铁站位于天津市南开区,场地分布有古河道,埋深7m以上,地质条件复杂。该地铁站地处天津市中心区域,车站南北向布置,东侧为别墅小区,三层框架式结构为主,柱下多采用柱下条形基础、筏板基础;东南侧为某小学及综合市场,人流较密集;西侧为水务公司,临车站为低矮平房及商铺。

### 1.2 场区地质勘测概况

场地地质剖面图如图1所示。据勘察资料显示,场区潜水静止水位埋深1.1m,⑦粉质黏土与⑧<sub>1</sub>粉质黏土为不(微)透水层,可视为潜水含水层与其下承压含水层的相对隔水层。第一承压含水层主要位于⑧<sub>2</sub>粉土和⑨<sub>2</sub>粉土层,平均水位标高-0.74m。其下⑨<sub>1</sub>粉质黏土、1粉质黏土与⑩<sub>1</sub>粉质黏土透水性较差,可视为第一承压含水层与第二承压含水层之间的隔水层。由图1可见,此场地第一承压含水层分布较为复杂,不连续,且大量存在于透镜体中。第二承压含水层主要位于⑪<sub>2</sub>粉土层,其平均水位标高-0.96m。

### 1.3 基坑及围护结构

如图1所示,此车站基坑标准段深14.53m,地连墙标准段墙趾埋深为29.03m,小里程基坑端头井段深16.48m,地连墙墙趾深30.97m,大里程基坑端头井段深16.79m,地连墙墙趾深31.29m。根据勘察报告,作为止水帷幕的地连墙可切断第一承压含水层坑内外之间横向水力联系,第二承压含水层经抗突涌验算也符合要求。

## 2 降水试验概况

### 2.1 降水试验目的

由于该场地处于建筑物、道路及管线密集的城市中心区域,止水帷幕无法彻底隔断基坑内外水力联系时,基坑降水将对周边环境造成重大影响。同时由于本场地地层分布复杂,且存在较多含水透镜体,第一承压含水层不连续,存在基坑内外水力联系较大的风险,因此本工程决定采用预降水试验判断基坑内外水力联系情况。本工程先后进行单井与群井降水等试验,观测基坑内外观测井水位降深及基坑外各监测点地表沉降值,探究基坑内外水力联

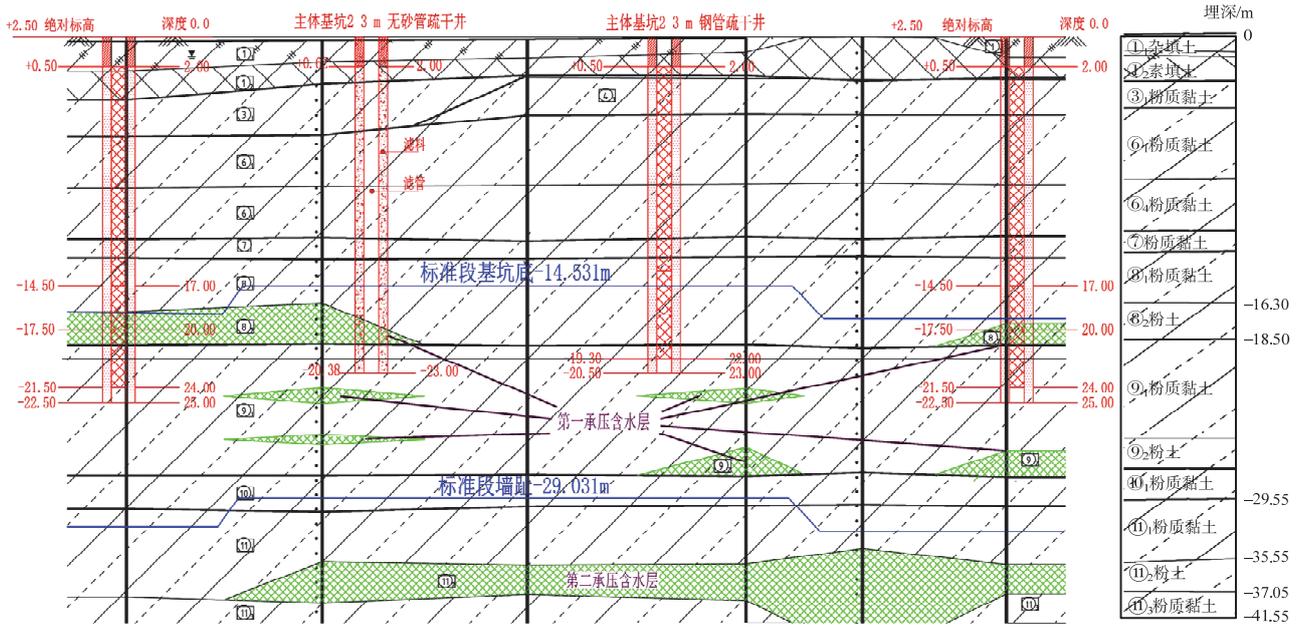


图 1 典型地质剖面图

Fig.1 Typical geological profile

系情况，以判断基坑围护结构设置是否合理。

### 2.2 井点与监测点平面布置

基坑井点平面布置及各监测点布置如图 2 所示。基坑内共布置 25 口疏干井，编号分别为 J1~J25；基坑外侧共布置 11 口潜水观测井 G0，布置 6 口第一承压含水层观测井 G1，布置 5 口第二承压含水层观测井 G2。

基坑外潜水层观测井编号从 G0-1 至 G0-11，其中 G0-1(16)~G0-8(16) 为 16m 深，G0-9(12)、G0-10(12) 为 12m 深，G0-11(8) 为 8m 深；第一承压层 G1-1(22) 为 ⑧<sub>2</sub> 层 22m 观测井，G1-2(31)~

G1-6(31) 为 ⑨<sub>2</sub> 层 31m 观测井，第二承压层 G2-1(35) 为 ⑪<sub>1</sub> 层 35m 观测井，G2-2(40) 为 ⑪<sub>2</sub> 层 40m 观测井，G2-3(34)、G2-4(39)、G2-5(47) 分别位于 ⑪<sub>1</sub> 层、⑪<sub>2</sub> 层、⑪<sub>4</sub> 层。

地表 22 组沉降监测点 DBC1-DBC22 沿基坑周围分布。每组共有 5 个测点，每个测点间相距 2m，由内至外依次编号 1~5。

地下连续墙监测点 Z 沿基坑四周布置，分别编号 1~22，相邻两监测点之间距离为 20m。其中 ZQC 为墙顶沉降监测点，ZQT 为墙身侧移墙监测点。

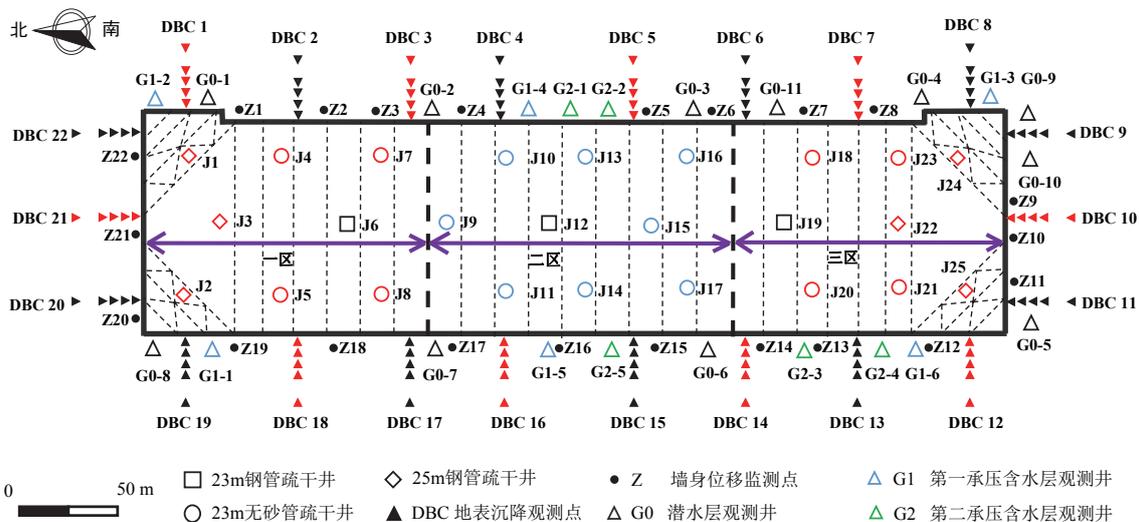


图 2 基坑各井点分布图

Fig.2 The wells distribution of foundation

### 3 降水试验过程

#### 3.1 单井降水试验

主体基坑开挖之前于 3 月 27 日 9:30 对基坑内 J3 疏干井进行单井降水试验, 24h 后停止降水, 设计水位降深 2m。期间, 对基坑内外潜水层及第一承压含水层观测井水位降深分别进行观测。

邻近抽水井 J3 的观测井水位变化如图 3 所示。坑内观测井水位有显著下降, 最大接近 2m。而基坑外潜水层观测井水位下降均小于 0.15m, 水位变化稳定。第一承压含水层观测井 G1-1(22)、G1-2(31)水位波动也相对较小, 最大水位降深为 0.38m (G1-2)。

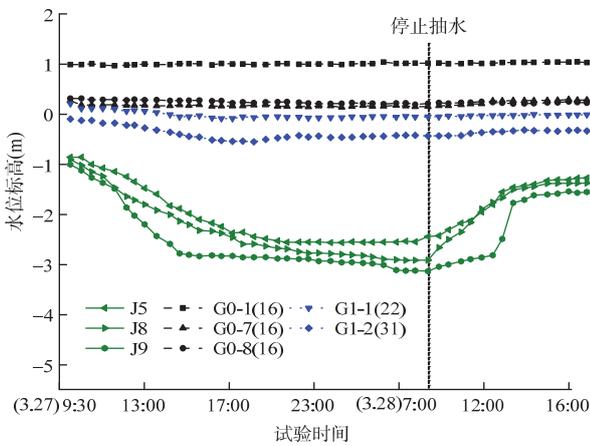


图 3 单井降水期间各观测井 s-t 曲线图

Fig.3 s-t curves during single-well pumping

由 J3 单井抽水试验可见, 地下连续墙深入⑩<sub>1</sub>粉质黏土层, 切断了与上部潜水含水层坑内外的水力联系, 因此对基坑内部进行单井疏干作业时, 坑外潜水观测井水位变化很小。在 J3 单井抽水过程中, 坑外第一承压含水层水位虽然变化较小, 但是水位变化与抽水开启过程同步, 初步判断坑内外第一承压含水层存在一定的水力联系。

#### 3.2 分区群井降水试验

基坑于 3 月 31 日 8:00 开始进行分区群井降水试验各区域井点分布及抽水工况详情见表 1。

表 1 分区群井降水试验工况

Table 1 Working condition of triple-well pumping

抽水井号	抽水起始时间	抽水时长	观测井号
一区 J1~J8	3 月 31 日 8:00	13h	G0-1~G0-8
二区 J9~J17	4 月 2 日 9:00	11h	G1-1~G1-3
三区 J18~J25	4 月 3 日 10:00	96h	

基坑外各观测井水位变化情况如图 4 所示。可

见, 基坑外潜水层观测井水位变化波动较小, 最大值不超过 0.69m, 可判断出基坑内外潜水层水力联系较弱。而第一承压含水层观测井 G1-1、G1-2、G1-3 水位降深较大, 平均降幅在 1.86m 左右。其中, J18-J25 三区降水期间, ⑨<sub>2</sub>层观测井 G1-3(31)最大水位降深达 3.45m。

分区群井降水期间, 由于开启的降水井较多, 抽水量较大, 基坑外第一承压含水层观测井 G1-1、G1-2、G1-3 水位降深明显, 最大水位降深值达 3.45m, 说明基坑内外第一承压含水层存在较为显著的水力联系。此外, ⑨<sub>2</sub>层观测井 G1-2(31)、G1-3(31)水位降深远大于⑧<sub>2</sub>层观测井 G1-1(22), 基坑外侧⑨<sub>2</sub>层水位先于⑧<sub>2</sub>层下降, 由此判断基坑内、外第一承压水⑨<sub>2</sub>层连通, ⑨<sub>2</sub>含水层间可能存在透镜体夹层。因此, 基坑增设三口补井, 对该复杂地层地质情况进行勘探, 发现在止水帷幕墙埋深附近局部存在透镜体, 符合水位变化情况。

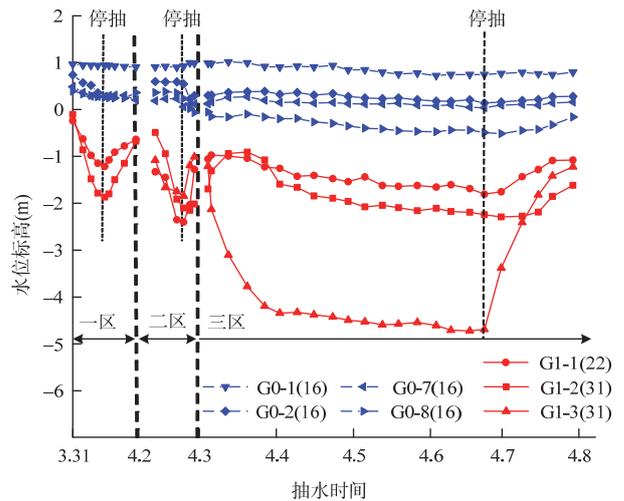


图 4 分区降水各观测井 s-t 曲线图

Fig.4 s-t curves during triple-well pumping

#### 3.3 基坑整体群井降水试验

基坑整体于 5 月 2 日 8:00 进行群井降水试验, 第一承压含水层设计水位降深 7.0m, 试验工况见表 2。

表 2 基坑群井抽水试验工况

Table 2 The wells distribution of multi-well pumping

抽水井号	抽水时间	观测井号	恢复时间
J1~J5、		J6、J12、J22	
J7~J11、	5 月 2 日	G0-1~G0-11、	5 月 5 日
J18~J21、	8:00	G1-1~G1-6、	12:00
J23~J25		G2-1、G2-2	

整体基坑同步抽水 76h, 基坑内外各观测井水

位变化情况如图 5 所示。

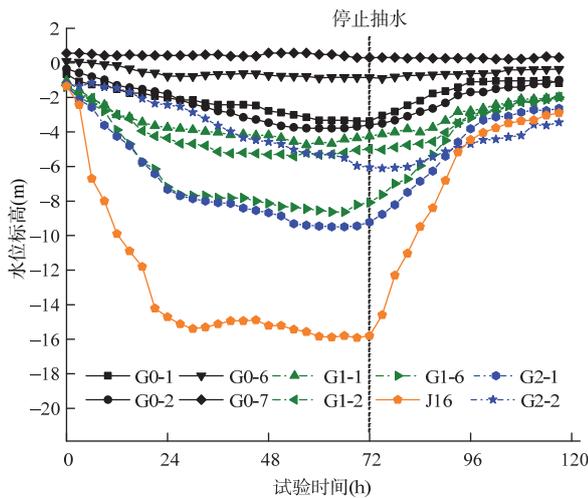


图 5 群井抽水各观测井  $s-t$  曲线图

Fig.5  $s-t$  curves during multi-well pumping

基坑内观测井水位下降迅速,例如 J16 水位降深最大值达 15.41m,停抽后水位恢复较快。

基坑外 8m 潜水观测井 G0-11(8)与 12m 潜水观测井 G0-9(12)、G0-10(12)水位波动很小,基坑外 16m 浅层观测井 G0-1(16)至 G0-8(16)水位下降幅度较大,且停抽后恢复较快,而 G1-6(16)井水位变化异常,很快就稳定,说明该点附近基坑内外存在水力联通。

第一承压水⑨<sub>2</sub>层观测井 G1-1(22)与第一承压水⑨<sub>2</sub>层观测井 G1-2(31)、G1-6(31)在基坑内群井抽水开始后水位下降迅速,但 G1-1(22)水位变化小于 G1-2(31)、G1-6(31)。⑨<sub>2</sub>层观测井 G1-1(22)水位下降为 3.72m,⑨<sub>2</sub>层观测井 G1-2(31)、G1-6(31)水位下降较为接近,达到了 7.50m。由此现象可知,基坑内外第一承压水存在较强的水力联系,且⑨<sub>2</sub>层基坑内外可能存在直接的水力联系,而坑位⑧<sub>2</sub>层水位下降是通过坑外⑨<sub>2</sub>层水位越流向坑内补给造成的。

第二承压水⑩<sub>1</sub>层观测井 G2-1(35)与⑨<sub>2</sub>层承压水观测井 G1-2(31)、G1-6(31)水位变化趋势较为一致,且 G1-6(31)降深较大,达到 7.23m。第二承压含水层⑩<sub>2</sub>层承压水观测井 G2-2(40)水位下降小于⑩<sub>1</sub>层,但最大降深仍达到 4.78m。基坑内群井疏干降水并未直接对第二承压含水层进行抽水,但仍引发第二承压含水层较大的水位下降,由此可见,此场地第一、第二承压含水层同样存在较大的水力联系。

通过基坑整体群井预降水试验可知基坑内、外

存在横向水力联系,基坑外承压水通过透镜体绕流补给至坑内,因此断定该工程止水帷幕未能完全切断基坑内外水力联系,设计中的落底式止水帷幕实为悬挂式止水帷幕。通过本试验可知,天津地区交互变化的地层中会出现隔水板与承压含水层不连续的问题,而由于地质勘查布点间距一般大于 25~30m,导致利用勘查得到的土层分布对含水层间水力联系判断困难,这种问题在地层中大量存在粉土、粉砂等含水透镜体时尤为突出。因此当场地承压含水层构造较为复杂时,若通过有限的勘察孔无法完全确定承压含水层的分布及各含水层间的水力联系,应当在基坑围护结构设计前进行场地抽水试验,或者在基坑开挖前做预降水试验,以全面掌握场地水文地质情况,避免工程事故。

#### 4 沉降及支护位移观测

当基坑止水帷幕未彻底截断坑内外水力联系时,坑内降水将造成周边地表及建筑物沉降<sup>[13-16]</sup>。经前述分析可知,该工程围护结构实际上并未完全切断基坑内外水力联系,属于悬挂式止水帷幕。预降水期间,基坑外地表沉降及支护位移变形数据具有较大研究价值,能够为研究复杂水文地质条件下,止水帷幕未彻底截断承压含水层时预降水引发的坑外沉降提供依据,为悬挂式止水帷幕基坑降水设计与基坑周边沉降控制策略提供参考,为类似工程提供借鉴。

##### 4.1 地表及建筑物沉降监测结果

群井降水试验过程中,选取紧邻基坑东侧墙体 DBC1-1 至 DBC8-1 测点,其沉降实测值如图 6 所示。其中,DBC3~DBC7 降水期间沉降累计变化量偏大,在 8.67~12.1mm,沉降最大值出现在 DBC4 测点,为 12.3mm。抽水期间,地表沉降值随抽水时间增加而增大,5 月 6 日抽水结束后,大部分地表沉降有所恢复,而 DBC1、DBC2 测点沉降值恢复速度滞后于水位回升,且出现明显沉降延迟现象,抽水结束后沉降仍继续发展。

上述现象也可以通过图 7 基坑外水位变化与地表沉降关系中观察到。基坑外地表沉降随降水进行迅速增大,停止抽水后,基坑内外水位迅速恢复,地表沉降变化略有延迟,在抽水结束后 24h (即图中 96h 时),地表沉降仍未有明显回弹现象。停抽 24h 后,基坑外部分测点,例如 DBC3~5,出现回弹现象,而 DBC1~2 测点仍不断增加。该现象说明

地表沉降恢复通常滞后于水位恢复，此外，不同测点沉降恢复时间不同，说明基坑不同位置处基坑内外水力联系大小不同，抽水停止后，地表沉降恢复较早的位置基坑内外水力联系较大。

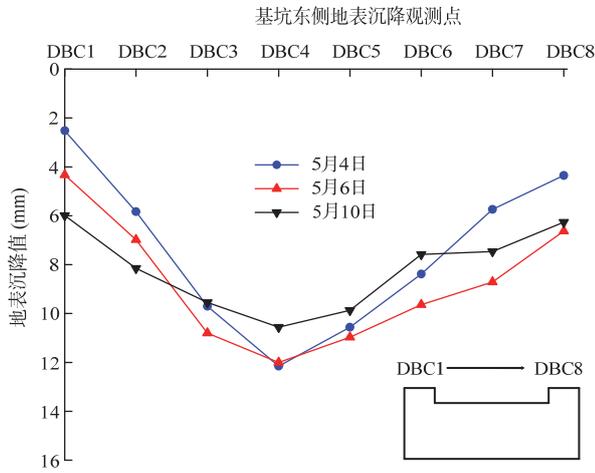


图 6 地表沉降观测值  
Fig.6 Settlement of the foundation ground

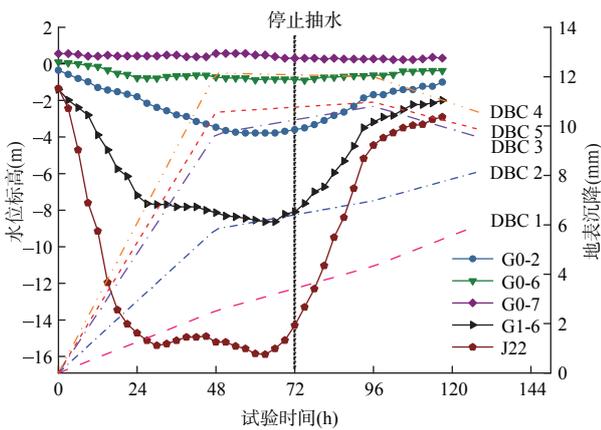


图 7 水位变化与沉降关系图  
Fig.7 The relation of displacement and groundwater level

5月6日抽水结束后，基坑东侧地表沉降情况如图8所示。地表沉降最大值出现在距基坑4m远的2号测点附近。距基坑4m之外，随着距基坑距离的增大，地表沉降值逐渐越小<sup>[17]</sup>，但是减小的速度较慢。在距基坑10m处沉降仍然较大，由此说明承压层水位降低引发的地表沉降范围非常大。天津市工程经验表明，第二承压水层水位下降引起基坑外地表沉降的范围可能达到百米以上。

基坑预降水期间，基坑西侧距离基坑约13m的泵房最大沉降值达11.42mm，基坑东侧距离基坑约34m的住宅楼沉降最大值达8.74mm。由此可见，预降水引发的基坑外承压含水层水位降低

对周边建筑物产生了较大影响，且影响范围较大，位于基坑两倍开挖深度以外的建筑物仍然出现了显著的沉降。

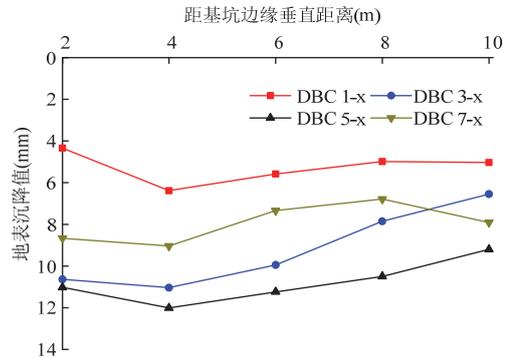


图 8 基坑东侧地表沉降观测值  
Fig.8 The settlement value of east foundation

#### 4.2 围护结构变形监测结果

基坑位于软弱土层中，需要严格控制围护结构变形对周边环境的影响，基坑预降水也会引发围护结构变形，进而增大周边地层变形<sup>[18]</sup>。本次降水试验期间对地连墙墙顶沉降和墙体测斜进行了监测。

降水期间，东西两侧地下连续墙沉降值较大，其中东侧墙体中部沉降值最大值达到7.23mm，东侧墙体两端沉降值小于中部；西侧墙体中部区域沉降最大值达5.91mm。基坑南北两侧地下连续墙最大沉降值小于东西侧墙体沉降值。

预降水期间，基坑东侧地下连续墙最大相对侧移值如图9所示。基坑东侧地连墙中部位置ZQT3测点在地下10m~12.5m处测斜值最大，水平位移值达到6.29mm。东侧地连墙两端与中间相比水平位移相对较小，该现象主要与基坑围护结构的空腔效应有关。预降水过程中，基坑围护结构水平位移最大值出现在基坑西侧，地连墙最大水平位移值为

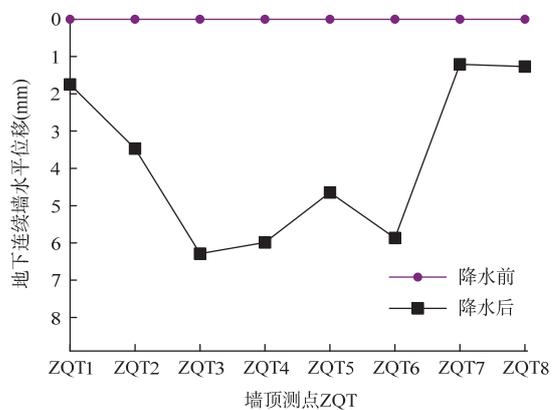


图 9 基坑东侧地连墙水平位移  
Fig.9 The maximum displacement value of east wall

8.06mm。由此可见,此基坑尚未正式开始进行降水和开挖,由于地连墙未能彻底截断止水帷幕,预降水试验引发的围护结构最大水平位移就达到了基坑深度的 0.05%,已达到整个基坑施工过程控制值的 33% (取本基坑围护结构水平位移控制值为 0.14% 基坑深度)。

#### 4.3 基坑外沉降与围护结构变形控制策略探讨

由前述可知,由于本案例中止水帷幕未能彻底截断不连续的承压含水层,基坑内预降水造成了较大的围护结构变形与显著的建筑物沉降。因此对于此类水文地质条件较为复杂的深基坑工程,基坑内外存在水力联系的风险较高,在预降水前应在坑外设置足够数量的承压含水层回灌井,预降水期间,若观测到坑外承压层水位有下降现象,立即开启回灌井,防止降水引发严重的坑外地层及建构筑物沉降<sup>[7,19]</sup>。

此外,预降水期间,基坑围护结构发生了较大的变形,这也会引发较大的坑外土体变形,因此同样需要加以控制。此时可采取在预降水前设置基坑第一道水平支撑的方式,此措施能够大幅度减小预降水过程中地连墙墙顶侧移,进而减小整个围护结构变形<sup>[20]</sup>。

## 5 结论

本文对天津市某位于复杂地层中的地铁站基坑预降水试验进行了介绍与分析,得出以下结论。

(1) 本工程案例中,第一承压含水层不连续,且存在较多的含水透镜体,通过基坑预降水试验发现基坑内外第一承压含水层局部连通,且第一、二承压含水层与潜水层存在水力联系,原设计的落底式止水帷幕未能完全截断承压含水层。基坑内预降水造成了较大的围护结构变形与显著的建筑物沉降。

(2) 当场地承压含水层构造较为复杂时,若通过有限的勘察孔无法完全确定承压含水层的分布及各含水层间的水力联系,应当在勘察阶段进行场地抽水试验,或者在基坑开挖前做预降水试验,合理布置各含水层监测点,以全面掌握场地水文地质情况及基坑内外含水层水力联系,避免基坑降水对周边环境造成重大影响。

(3) 由本案例可知,采用悬挂式止水帷幕,预降水阶段即引发较大的围护结构变形与坑外沉降。因此当基坑采用悬挂式止水帷幕,或虽然设计

为落底式止水帷幕,但基坑内外存在水力联系的风险较高时,预降水前应在坑外合理设置回灌井以随时控制基坑外承压层水位,避免降水引发的坑外沉降。同时应在预降水前施工基坑第一道水平支撑,增加围护结构抗侧移刚度,减小降水引发的围护结构变形。

#### 参考文献

- [1] 田志强,陈锐,王子哲,等.深基坑开挖及降水引起的邻近浅基础沉降分析[J].地下空间与工程学报,2012,8(增1):1483-1490 (Tian Zhiqiang, Chen Rui, Wang Zizhe, et al. Settlement of shallow foundation induced by adjacent deep excavation and dewatering [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2012, 8(S1): 1483-1490 (in Chinese))
- [2] Zhang Y Q, Wang J H, Chen J J, et al. Numerical study on the responses of groundwater and strata to pumping and recharge in a deep confined aquifer [J]. Journal of Hydrology, 2017, 548: 342-352
- [3] 金小荣,俞建霖,祝哨晨,等.基坑降水引起周围土体沉降性状分析[J].岩土力学,2005,26(10):54-60 (Jin Xiaorong, Yu Jianlin, Zhu Shaochen, et al. Analysis of behaviors of settlement of pit's surrounding soils by dewatering [J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(10): 54-60 (in Chinese))
- [4] 冯晓腊,谢武军,卢智强,等.悬挂式止水帷幕对基坑降水的影响[J].土工基础,2006,20(4):33-36 (Feng Xiaola, Xie Wujun, Lu Zhiqiang, et al. Effects of suspended impervious curtain on foundation dewatering [J]. Soil Engineering and Foundation, 2006, 20(4): 33-36 (in Chinese))
- [5] 肖铭钊,冯晓腊,陈新国,等.悬挂式止水帷幕对基坑降水影响的定量研究[J].市政技术,2009,27(增2):286-289,292 (Xiao Mingzhao, Feng Xiaola, Chen Xinguo, et al. Study on the influence of pensile curtain to dewatering [J]. Municipal Engineering Technology, 2009, 27(S2): 286-289, 292 (in Chinese))
- [6] 周火焱,王华钦,张维泉.悬挂式止水在基坑工程中的应用[J].岩土工程学报,2012,34(增1):470-473 (Zhou Huoyao, Wang Huaqin, Zhuang Weiquan. Application of pensile impervious curtain to excavations [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(S1): 470-473 (in Chinese))
- [7] 郑刚,曹剑然,程雪松,等.天津第二粉土粉砂微承压含水层回灌试验研究[J].岩土工程学报,2018,40(4):592-601 (Zheng Gang, Cao Jianran, Cheng Xuesong, et al. Experimental study on artificial recharge of second Tianjin silt and silty sand micro-confined aquifer [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(4): 592-601 (in Chinese))
- [8] 卢智强,冯晓腊,王超峰.悬挂式止水帷幕对基坑降水的影响[J].隧道建设,2006(5):5-7,20 (Lu Zhiqiang, Feng Xiaola, Wang Chaofeng. Effects of pensile curtains on dewatering of foundation pits [J]. Tunnel Construction, 2006(5): 5-7, 20 (in Chinese))
- [9] 刘伟.深厚富水地层深基坑新型止水封底帷幕的设计

- 与施工[J]. 矿业安全与环保, 2018, 45(5): 83-86 (Liu Wei. Designing and construction of new type of water stop bottom curtain for deep foundation pit in thick stratum with abundant water [J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2018, 45(5): 83-86 (in Chinese))
- [10] 张莲花, 孔德坊. 沉降变形控制的基坑降水最优化方法及应用[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(10): 1171-1174 (Zhang Lianhua, Kong Defang. Optimum method of dewatering controlled by surrounding settlement and its application [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(10): 1171-1174 (in Chinese))
- [11] Harris D I, Mair R J, Love J P, et al. Observations of ground and structure movements for compensation grouting during tunnel construction at Waterloo station [J]. Geotechnique, 1994, 44(4): 691-713
- [12] 张尚根, 陈志龙, 曹继勇. 深基坑周围地表沉降分析[J]. 岩土工程技术, 1999(4): 7-9 (Zhang Shanggen, Chen Zhilong, Cao Jiyong. Analyze of the settlement surrounding by the deep foundation [J]. Geotechnical Engineering Technique, 1999(4): 7-9 (in Chinese))
- [13] 王建秀, 郭太平, 吴林高, 等. 深基坑降水中墙-井作用机理及工程应用[J]. 地下空间与工程学报, 2010, 6(3): 564-570 (Wang Jianxiu, Guo Taiping, Wu Lingao, et al. Mechanism and application of interaction between underground wall and well in dewatering for deep excavation [J]. Chinese Journal of Underground space and Engineering, 2010, 6(3): 564-570 (in Chinese))
- [14] 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): 117-121 (Shi Chenghua, Peng Limin. Ground surface settlement caused by foundation pit excavation and dewatering [J]. China Civil Engineering Journal, 2006, 39(5): 117-121 (in Chinese))
- [15] 戴斌, 王卫东. 受承压水影响深基坑工程的若干技术措施探讨[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(增 1): 1659-1663 (Dai Bin, Wang Weidong. Discussions on technologies of deep foundation pit projects affected by confined water [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(S1): 1659-1663 (in Chinese))
- [16] 李琳. 工程降水对深基坑性状及周围环境影响的研究[D]. 上海: 同济大学, 2007 (Li Lin. Study on the effect of surrounding by deep foundation dewatering [D]. Shanghai: Tongji University, 2007 (in Chinese))
- [17] 时伟, 刘继明, 章伟. 深基坑桩锚支护体系水平位移试验研究[J]. 岩土力学与工程学报, 2003, 22(1): 2355-2358 (Shi Wei, Liu Jiming, Zhang Wei. Testing study on horizontal displacement of anchor-pile bracing structure for deep foundation pit [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(1): 2355-2358 (in Chinese))
- [18] 曾超峰, 薛秀丽, 郑刚. 软土区基坑预降水引起支护墙侧移的典型参数影响研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(11): 3295-3303, 3318 (Zeng Chaofeng, Xue Xiuli, Zheng Gang. A parametric study of lateral displacement of support wall induced by foundation pre-dewatering in soft ground [J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(11): 3295-3303, 3318 (in Chinese))
- [19] 蔡来炳, 周红波. 城市轨道交通深基坑工程承压水风险与控制研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2015, 35(5): 617-623 (Cai Laibing, Zhou Hongbo. Risk of the artesian water and control measurements for the deep excavation of urban rail transit engineering [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2015, 35(5): 617-623 (in Chinese))
- [20] 曾超峰. 工程降水引起基坑及土体变形机理、规律及控制策略研究[D]. 天津: 天津大学, 2014 (Zeng Chaofeng. Study on deformation mechanism, behavior and control strategy of excavation and ground under dewatering [D]. Tianjin: Tianjin University, 2014 (in Chinese))

郑 刚 (1967— ), 男, 博士, 教授。从事土力学及岩土工程方面研究

赵悦镔 (1996— ), 男, 硕士研究生。从事土力学及岩土工程方面研究。

程雪松 (1985— ), 男, 博士, 副教授。从事土力学及岩土工程方面研究

哈 达 (1990— ), 男, 博士研究生。从事土力学及岩土工程方面研究。

栗晴瀚 (1995— ), 男, 硕士研究生。从事土力学及岩土工程方面研究。