

基于数值模拟的抽水试验分析及降水设计

连芷莹, 武永霞*, 左芷雨, 徐若彤

上海工程技术大学机械与汽车工程学院, 上海

收稿日期: 2025年2月25日; 录用日期: 2025年3月18日; 发布日期: 2025年3月27日

摘 要

为降低深基坑工程的设计与施工风险有必要通过抽水试验确定各地层(特别是承压含水层)的水文地质参数。针对上海某地铁站, 通过现场抽水试验确定基坑开挖影响深度范围内地下水的分布特征和抽水影响半径等参数, 应用数值模拟的方法对实测水位进行反演, 获得了各含水层的水文地质参数; 最后应用反演后的数值模型, 对基坑工程进行了降水设计, 并预测了基坑安全水位降深下基坑外承压水的分布特征及降水引起的地面沉降。

关键词

抽水试验, 水文地质参数, 数值模拟, 水位降深, 地面沉降

Pumping Test Analysis and Dewatering Design Based on Numerical Simulation

Zhiying Lian, Yongxia Wu*, Zhiyu Zuo, Ruotong Xu

School of Mechanical and Automotive Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai

Received: Feb. 25th, 2025; accepted: Mar. 18th, 2025; published: Mar. 27th, 2025

Abstract

In order to reduce the design and construction risks of the deep foundation pit project, it is necessary to determine the hydrogeological parameters of each layer (especially the confined aquifer) through pumping tests. For a subway station in Shanghai, the distribution characteristics of groundwater within the depth of the foundation pit excavation and the influence radius of the well were determined through the on-site pumping tests. The numerical simulation method was used to inverse the measured water level, and the hydrogeological parameters of each aquifer were obtained. Finally, the dewatering plan of the excavation pit was determined by the inversion numerical model. And the groundwater drawdown and ground settlement induced by dewatering were predicted.

*通讯作者。

文章引用: 连芷莹, 武永霞, 左芷雨, 徐若彤. 基于数值模拟的抽水试验分析及降水设计[J]. 建模与仿真, 2025, 14(3): 579-588. DOI: 10.12677/mos.2025.143248

Keywords

Pumping Test, Hydrogeological Parameters, Numerical Simulation, Groundwater Drawdown, Ground Settlement

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着我国经济的迅猛发展和城市化进程的不断推进,沿海地区地下空间的开发强度显著提升,超深基坑工程的数量也日益增加。我国沿江沿海地带地下水赋存丰富,这使得大深度基坑工程往往需要应对复杂的承压水处理难题[1]。

许多学者对基坑中的承压水问题进行了研究。潘凯等[2]针对复杂巨厚承压含水层中的深基坑降水问题,通过抽水试验和数值模拟方法反演水文地质参数,并对比分析不同地下连续墙深度下的降水效果,优化了地下连续墙的设计深度。徐中华等[3]针对长江漫滩地貌单元的深基坑工程,通过现场群井抽水试验,结合单井试验解析方法和数值模拟反演分析,确定了承压含水层的合理水文地质参数,为评估基坑降水对周边环境的影响提供了依据。吴延松等[4]通过 Modflow 三维数值模拟技术,对长江下游地铁基坑抽水试验进行反演分析,预测降水对周边环境的影响,并推荐截水帷幕设计方案。李卫华等[5]以南通某地铁车站基坑为对象,通过抽水试验和数值模拟反演以确定场地水文地质参数,研究不同止水帷幕方案对基坑降水及周边沉降的影响,指出最优的围护结构和降水设计方案。陈澈[6]通过抽水试验和运行管理,进行富水层深基坑工程的减压降水设计与试验,解决了复杂地质条件下的降水难题,为类似工程提供了参考。针对上海某地铁基坑深厚承压含水层,本文通过现场抽水试验,结合单井与群井抽水试验的解析方法,初步确定水文地质参数。在此基础上,将实测数据与三维数值模拟的反演结果进行对比分析,进一步校准并得出更准确的水文地质参数。依据抽水试验数据,对基坑周边沉降情况进行预测与分析,并进行承压含水层减压降水设计,为其它深基坑工程积累了设计思路与实践经验。

2. 工程概况

上海某基坑工程位于卢湾区,主体结构外包尺寸长 155 米,宽 23.6 米。车站主体采用框架逆筑法施工,基坑保护等级为一级,围护采用 1200 mm 厚地下连续墙,深度为南端头井 65 m,北端头井 57 m,标准段 55 m。车站南端头井挖深 33.3 m,北端头井挖深 33.9 m,标准段挖深 31.4 m。基坑平面图如图 1 所示。车站位于闹市区,周边保护建筑物众多,标准段西侧距卜令公寓约 16 米,北端头井距复兴商厦约 14 米,东南侧地下五层附属结构距华狮购物中心约 10 米,场地东侧存在一根直径 1000 mm 的水管大致成东西走向,横穿车站中部,车站两侧均为市中心城区道路,分布较多地下管线,且道路下方分布地铁轨道。

在深度 100.65 米的范围内,场地土层结构主要为第四系全新统至上更新统的沉积地层。综合考虑地层的岩性、沉积环境、物理力学性质及地下水条件等多种因素,将场地划分为 9 个工程地质层和 15 个具体层位。各层地质条件如图 2。由于古河道切割作用的影响,场地部分区域缺失了⑥层,并沉积了溺谷相的⑤3 层灰色粉质黏土和⑤4 层灰绿色粉质黏土。在未受古河道影响的区域,场地土层为上海市正常沉积土层,整体分布较为稳定,层面起伏较小。

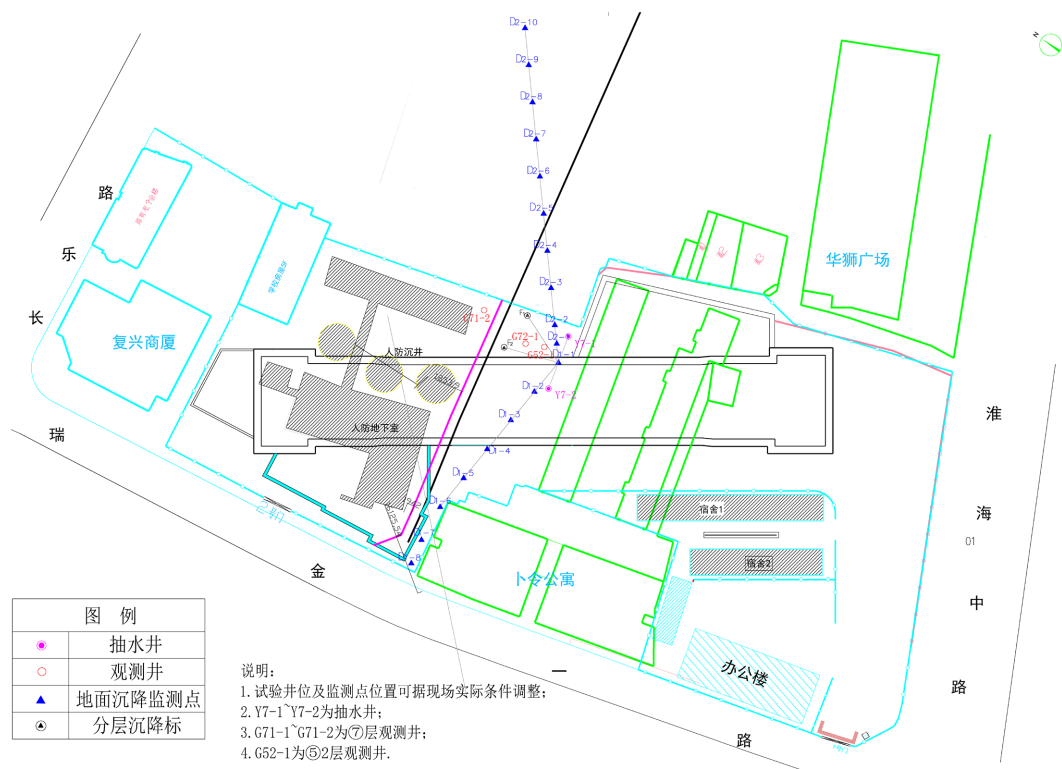


Figure 1. Environmental distribution map of the foundation pit
图 1. 基坑环境分布图

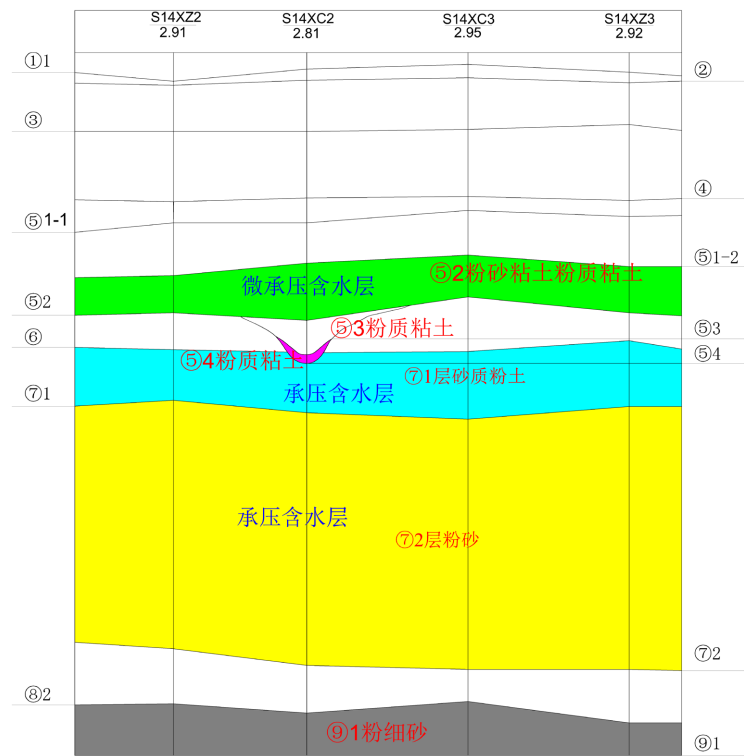


Figure 2. Typical geological planning map of the site
图 2. 场地内典型地质剖面图

场地地下水系统包含潜水层、微承压含水层和承压含水层。潜水主要存在于场地浅部土层，其水位埋深范围为 0.60~1.30 米。微承压水则主要赋存于⑤2 层，该层为粉质黏土与粉土的互层，且含有较多粉土和粉砂，水位埋深介于 4.27~4.54 米。承压水赋存于⑦1 层砂质粉土和⑦2 层粉砂中，水位埋深介于 7.41~8.36 米。

3. 抽水试验

3.1. 试验工况

为获得含水层的水文地质参数，在基坑附近进行了抽水试验。图 1 为试验井及地面沉降监测点的分布情况。在拟建场地第⑦层设置了 2 口抽水井，在⑤2 层和⑦层分别布置 1 口和 2 口观测井，试验井结构见表 1。为了解抽水对地面沉降的影响，在试验井周围布置了 2 组地面沉降监测点，每间隔 5 米或 10 米布置一个，共 18 个，监测点位置见图 1 蓝色标记。

结合本工程的地质情况，本次抽水试验重点关注⑤2 层和⑦层，共安排 1 组单井试验和 1 组群井试验，每组抽水试验结束后均进行了恢复试验，试验具体工况如表 2 所示。

Table 1. Structural parameters of test well

表 1. 试验井结构参数表

名称	井号	井数	深度/m	孔径/mm	管径/m	滤管埋深/m
抽水井	Y7-1~Y7-2	2	44	650	273	33~43
观测井	G71-1~G71-2	2	44	650	273	33~43
	G52-1	1	28	650	273	24~27

Table 2. Actual working conditions of the test

表 2. 试验实际工况

类别	抽水井	日期	抽水时间/d	恢复时间/d	流量/(m ³ h ⁻¹)
单井抽水	Y7-1	20101121~20101125	2	2	26
群井抽水	Y7-1	20101126~20101203	3	4	25
	Y7-2				22

3.2. 抽水试验结果分析

图 3 展示了抽水试验期间各观测井水位随时间的变化情况。在抽水过程中，各观测井的水位逐渐降低。抽水停止后，水位迅速回升。以群井抽水为例，G52-1 井的水位恢复至 50%大约需要 0.58 天，G7-1 井的水位恢复至 50%大约需要 0.016 天，而 G7-2 井的水位恢复至 50%大约需要 0.028 天，⑤2 层水位恢复时间与⑦层水位恢复时间差异较大，这表明⑤2 层微承压含水层与⑦1 层和⑦2 层承压含水层之间具有一定的水力连通性。⑦层承压含水层因为粉砂和粉土的存在具有较好的渗透性能，而⑤2 层因粉质黏土的存在，渗透性能相对较弱。在群井抽水达到稳定状态后，G7-1 井、G7-2 井和 G52-1 井的水位降深分别为 9.46 米、8.27 米和 7.02 米。由群井抽水与单井抽水的实测数据对比可知，抽水稳定后的降深值与抽水井数量成正比。

图 4 为抽水试验期间地面沉降随时间的变化图。从单井抽水初始阶段到双井抽水终止阶段，地面发生一定沉降，变化幅度较小，在 0~2 mm 之间。停止抽水后，地面沉降发生了一定程度的隆起，并在 2~3 日后达到最大值。其主要原因为抽水试验期间试验区所处位置在清障，故沉降停止抽水后地面沉降回弹量较大。但从地面沉降的整体趋势来看，抽水引起的水文变化会对环境造成一定的影响。

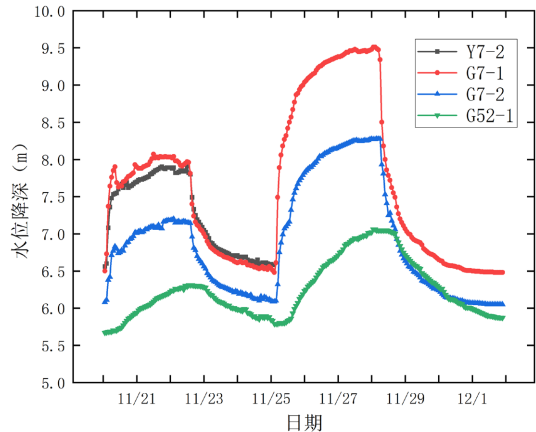


Figure 3. Variation of groundwater drawdown during pumping test
图 3. 抽水试验期间地下水降深变化

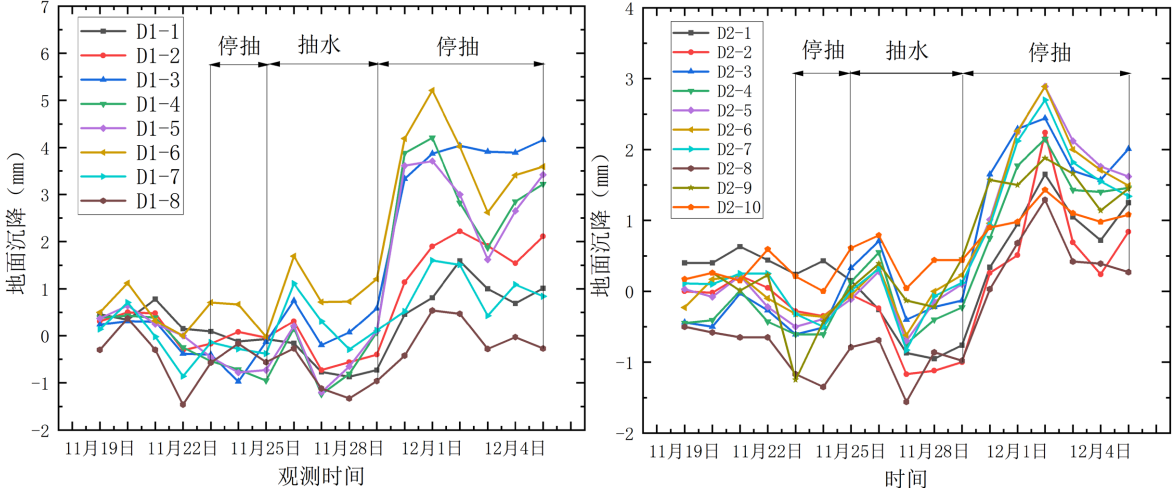


Figure 4. Variation of ground settlement during pumping test
图 4. 抽水试验期间地面沉降值随时间变化

4. 数值模拟

为了获取场地含水层的水文地质参数并最终制定合理的减压降水设计方案及预测降水对环境的影响，采用三维地下水数值模型及一维固结理论进行仿真计算。

4.1 .理论模型

4.1.1. 三维渗流模型

根据本工程的工程地质及水文地质条件，建立地下水三维非稳定流数值模型，其主要的计算原理如下[7]：

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x} \left(k_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) - W = \frac{E}{T} \frac{\partial h}{\partial t} & (x, y, z) \in \Omega \\ h(x, y, z, t)|_{t=0} = h_0(x, y, z) & (x, y, z) \in \Omega \\ h(x, y, z, t)|_{\Gamma_1} = h_1(x, y, z, t) & (x, y, z) \in \Gamma_1 \end{cases} \quad (1)$$

其中: $T = \begin{cases} M & \text{承压含水层} \\ B & \text{潜水含水层} \end{cases}$; $E = \begin{cases} S & \text{承压含水层} \\ S_y & \text{潜水含水层} \end{cases}$;

式中: S 为储水系数; S_y 为给水度; M (m) 为承压含水层厚度; B (m) 为潜水含水层厚度; k_{xx} , k_{yy} , k_{zz} 分别为渗透系数 k (m/d) 在 x 、 y 、 z 方向上的分量; h (m) 为水头值; W (d^{-1}) 为单位体积流量, 表示水流的源或汇; h_0 (m) 为初始水头值; h_1 (m) 为第一类边界的水头值; t (d) 为时间; Ω 为计算域; Γ_1 为第一类边界。

4.1.2. 地面沉降理论

基于太沙基一维固结理论计算场地降水引起的地面沉降, 地表沉降量 S_{sub} 的计算公式为

$$S_{sub} = \sum_{i=1}^n S_i = \sum_{i=1}^n \frac{r_w \Delta h_i}{E_i} H_i \quad (2)$$

式中: H_i 为第 i 层土层厚度; Δh_i 为地下水位变化值; E_i 为第 i 层土的压缩模量, r_w 为水的容重, n 为土层数量。

4.2. 数值模型的建立与求解

设定计算模型的大小时需要确保涵盖所有重要的水文地质特征和边界条件。模型四周边界定义为第一类水头边界, 边界条件设置在抽水井影响半径以外, 故设计长为 1186 m、宽为 1079 m、深为 110 m 的物理模型。为提升计算精度, 在网格剖分过程中, 需在关键区域进行局部加密, 由边界向基坑逐步加密网格, 基坑区域的网格密度最大(平面网格尺寸为 4 m $\times$ 3.7 m)。本次数值模拟是基于水文地质概念建立的含水层三维模型。在模型划分中, 地层自上而下分为 10 层, 平面网格划分为 71 行、77 列。三维模型的网格划分结果如图 5。

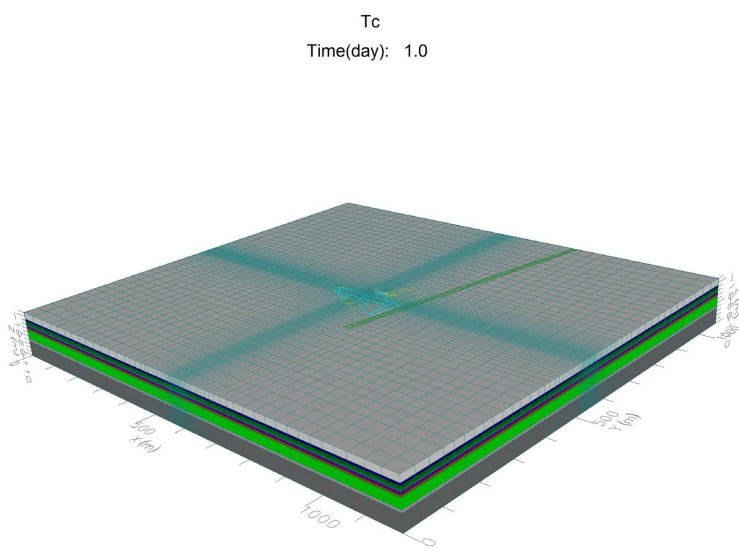


Figure 5. Three-dimensional finite element model
图 5. 三维有限元模型

4.3. 水文地质参数的反演与分析

利用数值模型确定水文地质参数, 结果如表 3 所示。图 6 呈现了抽水试验期间各观测井的水位拟合曲线。反演分析结果表明, 图中各观测井的数值模拟水头变化与实测水头变化规律一致。实际测量与数值模拟之间的水位降深误差均控制在 10% 以内, 故数值模拟结果可准确呈现抽水试验期间观测井水位的

动态变化，符合工程精度标准。

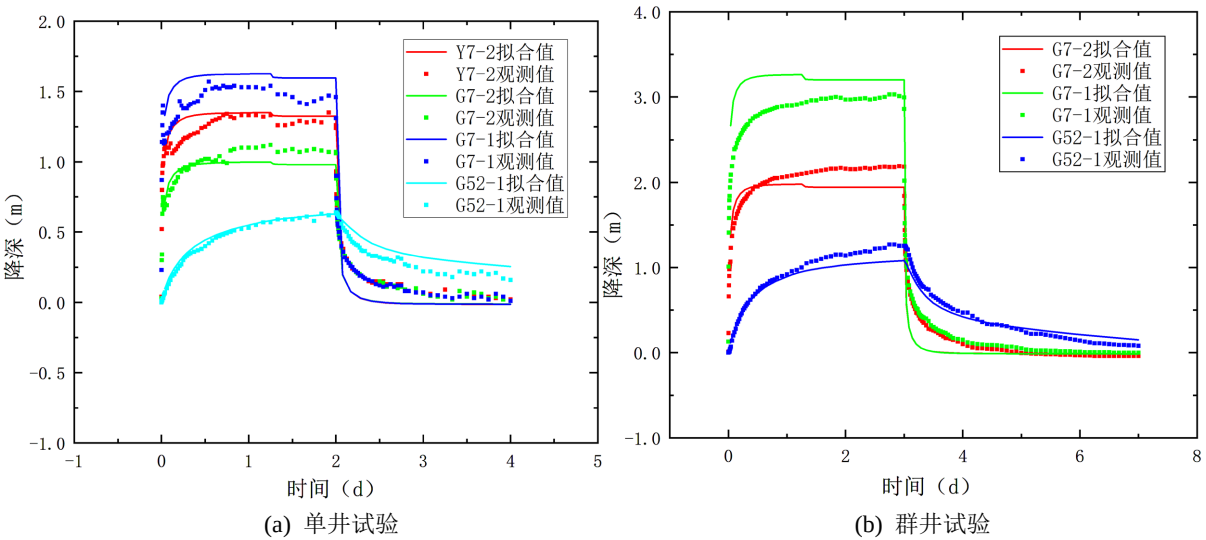


Figure 6. Comparison between observed and calculated groundwater drawdown during pumping tests
图 6. 抽水试验中地下水降深的观测与计算对比

Table 3. Numerical simulation inversion results
表 3. 数值模拟反演结果

含水层	水平渗透系数 kh (m/d)	垂直渗透系数 kv (m/d)	贮水率 Ss (1/m)
⑤2	0.5	0.1	9e-5
⑤3	0.03	0.01	5e-6
⑤4	0.01	0.003	1e-6
⑦1	3.5	0.9	3e-4
⑦2	9.4	1.9	8e-5
⑧2	0.1	0.03	6e-5

5. 基坑降水设计

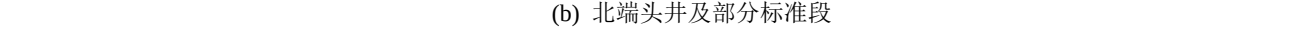
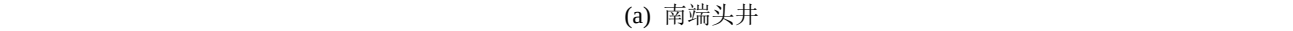
5.1. 基坑底板抗突涌稳定性验算

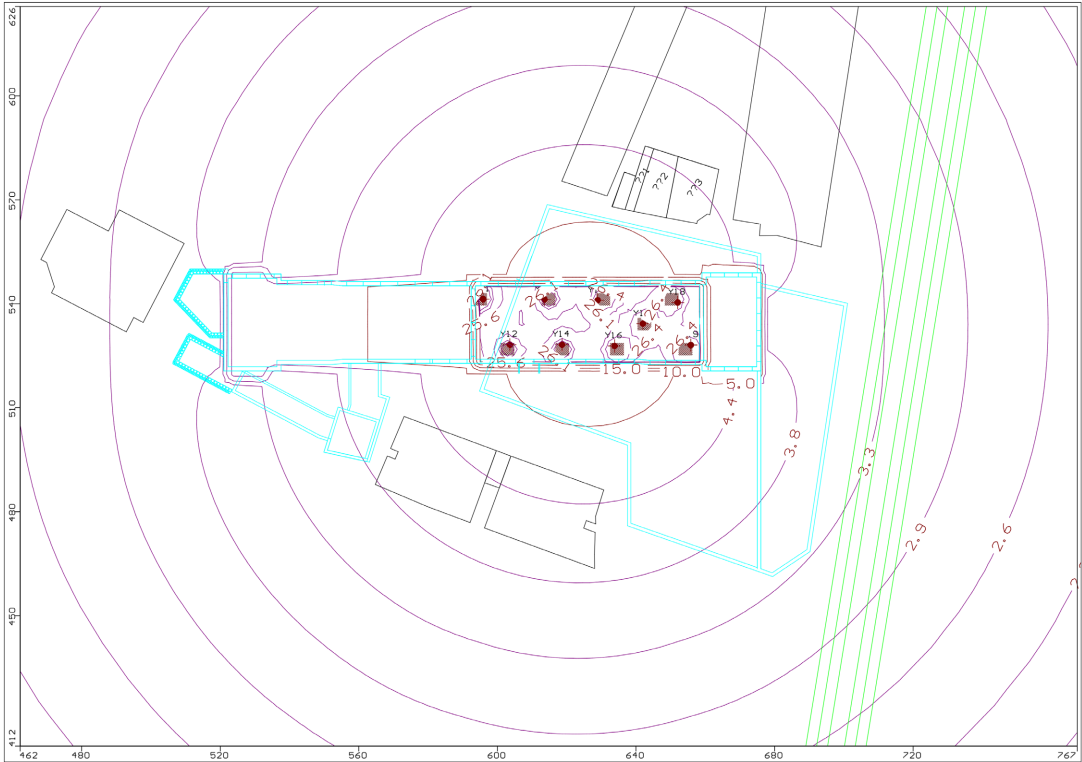
对承压含水层进行基坑底板抗突涌稳定验算。基坑底板至承压含水层顶板间的土压力大于安全系数下承压水的顶托力时，基坑可以安全开挖，即：

$$\sum h \cdot \gamma_s \geq F_s \cdot \gamma_w \cdot H$$

其中： h (m)为基坑底至承压含水层顶板间距离； γ_s (kN/m³)为基坑底至承压含水层顶板间的土厚度加权平均重度； H (m)为承压含水层顶板以上的承压水头高度； γ_w (kN/m³)为水的重度，取 10 kN/m³； F_s 为基坑抗突涌安全系数。

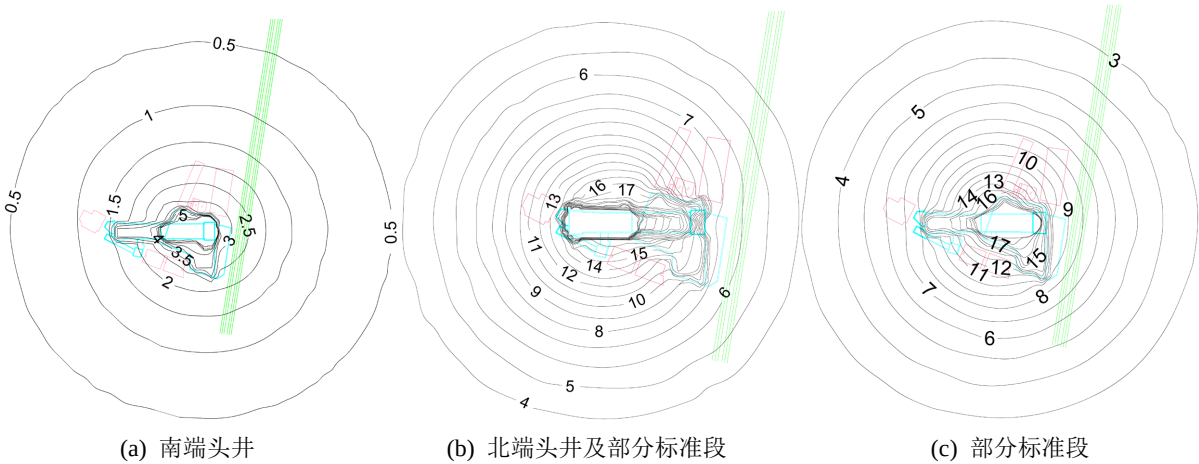
根据本次抽水试验成果进行计算，在安全系数为 1.1 时，⑤2 层临界开挖标高为-8.24 m (-9.76 m)，⑦层临界开挖标高为-13.17 m，⑨层临界开挖标高为-30 m。本工程最大开挖标高为-30.28 m，故不需要降低⑨层承压水水位。





(c) 部分标准段

Figure 7. Predicted groundwater drawdown contour (unit: m)
图 7. 地下水降深预测等值线图(单位: m)



(a) 南端头井

(b) 北端头井及部分标准段

(c) 部分标准段

Figure 8. Predicted ground settlement contour after dewatering 240 days (unit: mm)
图 8. 减压降水 240 天后预测地面沉降等值线图(单位: mm)

利用模型反演验证所得的含水层水文地质参数,将现阶段的围护设计深度(南端头井 65 m,北端头井 57 m,标准段 55 m)赋予模型中。因⑤2 层已基本被围护结构隔断,故此研究仅对⑦层的水位降深情况进行模拟分析。为满足基坑开挖至最深处的承压水位降深要求,南端头井处需布置 2 口降压井;北端头井及部分标准段处需布置 8 口降压井;部分标准段处需布置 7 口降压井。

图 7 为各基坑的水位降深预测等值线图,图 8 为减压降水 240 天后地表沉降预测等值线图。根据上

述预测结果,在满足不同区域安全承压水位埋深的条件下,预测坑外⑦层承压水位最大降深分别为:南端头井 0.85 m、北端头井及部分标准段 4.3 m、部分标准段 3.5 m。经过 240 天减压降水,基坑外侧最大地面沉降分别为:南端头井 5 mm、北端头井及部分标准段 17 mm、部分标准段 17 mm。结果表明,基坑内承压水水位可满足基坑开挖要求。

6. 结论

(1) 抽水过程中,⑤2 层与⑦层降深幅度与稳定时间相关性较强,⑦2 层承压含水层水位恢复速度很快,故⑦层承压含水层中的粉砂渗透性较好,⑤2 层砂质粉土与粉质粘土渗透性较差,⑤2 层与⑦层水力联系较为密切。

(2) 沉降监测结果显示,降水引起的水位变化会对周边环境造成一定的影响。

(3) 由抽水试验及数值模拟反演求出了场地内各含水层的水文地质参数。其中主要研究地层的水文地质参数如下:⑤2 层、⑦1 层、⑦2 层的水平渗透系数分别为 0.5 m/d, 3.5 m/d, 9.4 m/d;垂直渗透系数分别为 0.1 m/d, 0.9 m/d, 1.9 m/d;储水率分别为 9×10^{-5} , 3×10^{-4} , 8×10^{-5} 。

(4) 通过建立的三维非稳定流数值模型,利用反演求得的参数进行了降水设计并通过数值模型预测减压降水对周边环境的影响,承压水位降至安全水位时基坑外最大水位降深为 4.3 m,最大地面沉降为 17 mm。

参考文献

- [1] 郑刚,石建成,程雪松,等. 含水层未截断条件下超深基坑回灌控制沉降技术研究[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(S2): 7-10.
- [2] 潘凯,武永霞,陆建生. 复杂地层环境抽水试验分析及降水优化设计[J]. 上海工程技术大学学报, 2024, 38(3): 291-297.
- [3] 徐中华,宗露丹,王卫东,等. 基于群井抽水试验的承压含水层水文参数反演分析[J]. 地下空间与工程学报, 2024, 20(S1): 180-187.
- [4] 吴延松. 三维数值模拟(modflow)在基坑抽水试验中的应用[J]. 科学技术创新, 2024(5): 130-133.
- [5] 李卫华,刘天任,洪小星,等. 南通某地铁车站基坑抽水试验分析[C]//中国建设科技集团股份有限公司,中国建筑学会工程总承包专业委员会,亚太建设科技信息研究院有限公司,《施工技术》杂志社. 2019 年全国土木工程施工技术交流会暨《施工技术》2019 年理事会年会论文集(上册). 南通城市轨道交通有限公司,同济大学土木工程学院, 2019: 25-30.
- [6] 陈澈. 富水层深基坑工程减压降水设计与试验研究[J]. 科技与创新, 2022(10): 32-35+38.
- [7] 骆祖江,李兆,任虎俊. 矿井涌水量预测数值模拟研究[J]. 煤炭科学技术, 2015, 43(1): 33-36.