

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2026.08.017

地铁深基坑抽灌一体化地下水位变化规律分析

赵迪¹, 周亮¹, 高延科², 朱玉青², 朱亚林^{2,3}, 陈菊香^{2,3}

(1. 中铁四局集团上海工程有限公司, 上海 200070; 2. 合肥工业大学土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009; 3. 土木工程结构与材料安徽省重点实验室, 安徽 合肥 230009)

摘要:对软土地区狭长地铁深基坑进行降水作业时, 基坑降水会使悬挂式止水帷幕墙底的承压含水层水头下降, 达到开挖要求。但同时受绕流作用的影响, 也会导致坑外承压水层向坑内补给, 造成坑外水位降低, 威胁基坑周边构筑物的安全。为防止坑外水位过度降低, 拟采用坑内降水、坑外回灌的抽灌一体化施工来控制不同开挖深度下坑内、坑外水位, 文章通过 Visual MODFLOW 软件对上海某地铁狭长深基坑进行分析, 探究其在抽灌一体化施工过程中的水位响应规律。结果表明: 对坑外承压水层的补给可以有效抬升其水位; 承压水层的降水过程响应较为敏感, 在 4~6 h 达到最大降深, 因此回灌井应同步开启; 回灌过程中可能会导致水位不降反升, 对周边构筑物同样会造成影响, 实际施工过程中应予以控制。

关键词:狭长深基坑; 悬挂式止水帷幕; 抽灌一体化; 水位变化

中图分类号: TU411

文献标志码: A

文章编号: 1003-5060(2026)08-1122-08

Analysis of variation law of groundwater level of pumping-irrigation integration in deep foundation pit of subway

ZHAO Di¹, ZHOU Liang¹, GAO Yanke², ZHU Yuqing², ZHU Yalin^{2,3}, CHEN Juxiang^{2,3}

(1. China Railway No. 4 Engineering Group Shanghai Engineering Co., Ltd., Shanghai 200070, China; 2. School of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 3. Anhui Key Laboratory of Civil Engineering Structures and Materials, Hefei 230009, China)

Abstract: When dewatering operations are conducted on long and narrow deep foundation pits for subway excavations in soft soil areas, the dewatering process reduces the water head of the confined aquifer beneath the suspended waterproof curtain wall, thereby meeting excavation requirements. However, simultaneously, the influence of seepage flow may cause recharge from the confined aquifer outside the pit into the pit, leading to a decline in the groundwater level outside the pit and posing potential risks to the safety of adjacent structures. To prevent excessive drawdown of the groundwater level outside the foundation pit, an integrated approach combining dewatering inside the pit and recharge outside the pit is proposed, aiming to regulate water levels both inside and outside the pit at varying excavation depths. Visual MODFLOW software is employed to simulate and analyze the hydrological responses during the implementation of integrated pumping and recharge measures in a long and narrow deep foundation pit associated with a subway project in Shanghai. The results indicate that the recharge of the confined aquifer outside the excavation pit can effectively elevate the groundwater level. The confined aquifer exhibits a more sensitive response during the dewatering process, with the maximum drawdown occurring within four to six hours; therefore, it is recommended to operate the re-

收稿日期: 2025-07-09; **修回日期:** 2025-11-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(42077249); 合肥工业大学大学生创新创业训练计划资助项目(S202510359119; S202510359143)

作者简介: 赵迪(1991—), 男, 河南宁陵人, 中铁四局集团上海工程有限公司工程师;

朱亚林(1979—), 女, 安徽庐江人, 博士, 合肥工业大学副教授, 硕士生导师, 通信作者, E-mail: zhuyalin@hfut.edu.cn.

charge wells synchronously. During the recharge process, the water level may rise rather than decline, potentially affecting nearby structures. This phenomenon should be closely monitored and controlled during actual construction.

Key words: long and narrow deep foundation pit; suspended waterproof curtain; pumping-irrigation integration; water level variation

0 引言

近几十年来,中国城镇化建设进程不断深入,配套的城市地下空间设施迎来了蓬勃发展,大规模的地下空间开挖利用带来了大量的(深)基坑工程^[1]。随着地下空间的不断发展,基坑工程的数量不断增长,其开挖深度逐渐增加,开挖长度及宽度逐渐加大。基坑工程作为一切建筑物的基础,其安全性是不可忽视的重要环节。

在深基坑工程中,地下水的防治是一项事关全局的工作,是导致基坑工程事故最直接的原因之一^[2]。根据文献[3-4]对基坑事故的调查分析,有45%~70%的基坑工程事故与地下水有关;文献[5]将深基坑渗漏灾害划分为轻微渗水无土体流失(I级)、严重渗水轻微土体流失(II级)和大量漏水漏砂(III级)3个等级。

基坑工程中的地下水一般包含上层滞水、潜水及承压水这3种类型^[6]。对于上层滞水及潜水,可以通过设置疏干井的方式对其进行降水工作;对于承压水,主要通过降低承压水位、隔离地下水和坑底地基加固^[7]这3种方式。对于基坑围护结构采用悬挂式止水帷幕,其作用主要是切断或延长坑内外地下水绕流路径^[8],但是由于承压水层埋藏较深,止水帷幕不足以将承压水层完全隔断,受绕流作用的影响^[9],坑外地下水会向坑内补充,从而导致坑外承压水位降低造成周边构筑物的沉降。

为了控制基坑周边沉降,最直接有效的方法是控制地下水的水位,其中地下水的人工回灌是一种经济有效的措施^[10]。文献[11-12]在地下水回灌方面进行了深入研究,基于可持续发展的角度对地下水回灌优点及发展趋势进行了分析,证明了地下水回灌在基坑工程中的可行性。为了防治地面沉降,上海地区长期开展地下水的回灌工作,取得了针对地面沉降较好的防治效果^[13]。然而,受限于密集建筑群及地下设施的影响,在回灌的过程中必须严格分析土水应力的变化,防止回灌不利造成周边构筑物的二次变形。

目前,对于地下水回灌术控制沉降的理论与

试验已经有了较为成熟的研究。理论方面,文献[14]通过理论计算及数值模拟的方法研究了地下水回灌技术的可行性与实际效果;文献[15-16]利用经验分析法探究了回灌中水文地质变化规律。试验方面,文献[17-18]进行了现场回灌试验,提出了在粉土粉砂层为主的地区可以通过回灌来控制地面沉降,并提出了双井组合回灌及越流回灌理论。但是针对悬挂式止水帷幕支护下软土地区狭长深基坑地下水的回灌效应,少有学者进行深入研究。

Visual MODFLOW 有限差分软件可以很好地模拟地下水在基坑开挖过程中的变化规律^[19]。为探究在悬挂式止水帷幕围护作用下,地下水抽灌一体化施工过程中的水位响应规律,本文以上海某地铁狭长深基坑工程为背景,该地区处于软土地区,其承压含水层深厚,止水帷幕不足以完全隔断承压含水层,且基坑周边紧邻高架桥,因此对其水位及沉降控制提出了较高的要求,为精确控制施工过程中坑内、坑外的水位变化,采用 Visual MODFLOW 有限差分软件,结合现场生产性试验,对悬挂式止水帷幕围护作用下,软土地区狭长深基坑地下水抽灌一体化施工过程中的水位响应规律进行分析,同时为后续施工提供理论指导及预测。

1 工程背景

1.1 工程概况

本文研究的工程位于上海市闵行区沪闵公路,车站建设范围与沪闵路主体路幅基本一致。工程主体结构基坑周长为1 736.46 m,面积18 462.84 m²,车站内净长度为829.2 m,标准段宽度为21.8 m,端头井宽度为30.5 m,标准段(中心里程处)基坑深度约为21.152 m,端头井段基坑深度为23.226~24.888 m。主体围护结构采用地下连续墙,墙厚1 000 mm左右,地下连续墙成槽深度为47、49、54 m不等,工程区域平面图如图1所示。

由于车站长度较长,将其划分为4个分区进行分步施工,其中施工1区基坑长189.2 m,本文针对1区区段进行相关研究。



图 1 工程区域平面图

1.2 工程地质与水文地质

拟建场地勘察深度范围内揭露的与本工程建设密切相关的地下水主要有赋存于浅部地层中的潜水、全新统中下部粉土(④2层)中的微承压水及上更新统砂质粉土、砂土(⑦1、⑦2、⑨层)中的承压水。本场地内⑦1、⑦2、⑨层相互连通,水量补给丰富。②层粉质黏土、③层淤泥质粉质黏土、④1层淤泥质黏土、⑤层黏土及⑥层粉质黏土可视为隔水层;④2层砂质粉土、⑦1层砂质粉土、⑦2层粉砂、⑨层粉砂等饱和含水层,可视为透水层。水文地质剖面图如图2所示。

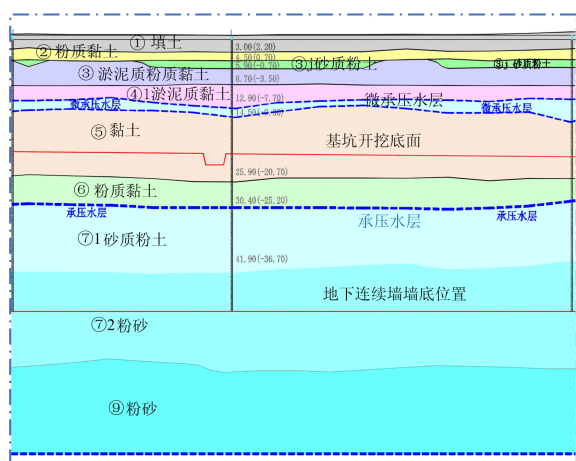


图 2 水文地质剖面图

勘察期间,实测钻探孔附近浅孔内潜水稳定水位埋深在 1.46~3.10 m、平均为 2.08 m,相应标高 4.23~2.40 m、平均为 3.34 m;微承压水稳定水位埋深在地面下 4.17~4.39 m,平均埋深为 4.27 m,相应标高 1.24~0.99 m,平均标高为 1.09 m;⑦层中的承压水稳定水位埋深约在地面下 6.15~6.34 m,平均埋深为 6.25 m,相应标高 -1.04~-0.77 m,平均标高为 -0.89 m。

2 三维数值模型建立

2.1 地下水非稳定渗流三维数学模型

根据场地水文地质条件,可建立下列与之相适应的地下水三维非稳定流渗流模型^[19]:

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

其中: $S_s=S/M$, S_s 为储水率, S 为储水系数, M 为承压含水层单元体厚度; B 为潜水含水层单元体地下水饱和厚度;承压含水层时, $T=M$;潜水含水层时, $T=B$; k_{xx} 、 k_{yy} 、 k_{zz} 分别为各向异性主方向渗透系数; h 为点 (x,y,z) 在 t 时的水头值; W 为源汇项; h_0 为计算域初始水头值; h_1 为第一类边界的水头值; t 为时间; Ω 为计算域; Γ_1 为第一类边界。对整个渗流区进行离散后,采用有限差分法将上述数学模型进行离散,可得到数值模型,以此为基础编制计算程序,计算并预测降水引起地下水位时空分布。

2.2 模型尺寸及边界条件

网格划分平面图如图3所示。

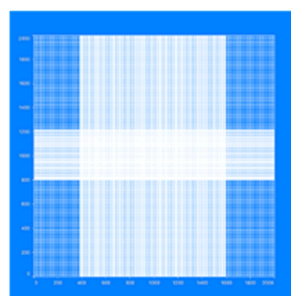


图 3 网格划分平面图

根据工程地质报告,使用 Visual MODFLOW 软件建立施工 1 区水文地质概念模型。将模型概化为三维空间上各向异性的非稳定流模型。根据基坑施工方案,1 区基坑长 189.2 m,标准段宽 21.8 m。考虑整体基坑尺寸,各向外扩张 500 m,竖向上根据水文地质报告将模型分为 9 层,忽略填土及占比较小的砂质粉土。最终模型范围(长×宽×高)分别取 2 000 m×2 000 m×

120 m。模型四周边界按定水头边界设置,采用有限差分法,因此对基坑所在区域进行网格加密,以提高模型计算的精度。

2.3 井点与地下连续墙布设

悬挂式止水帷幕,即地下连续墙,按施工图所示的范围及尺寸进行布置。除观测井外,基坑内工作井主要分为疏干井、降压井、坑外回灌井。场地井位布置平面图如图4所示。

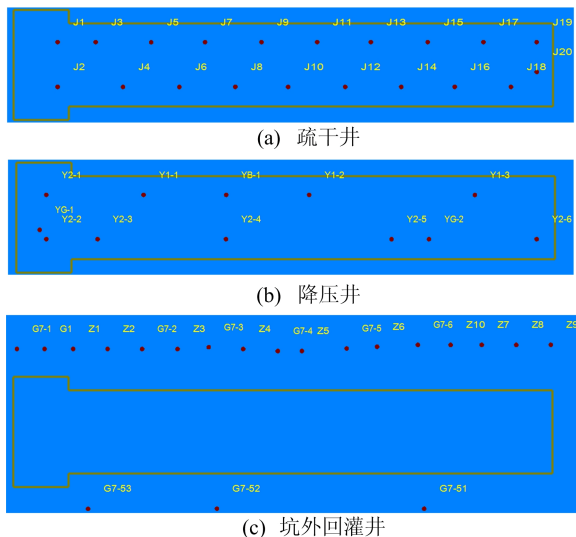


图4 场地井位布置平面图

疏干井(图4a)主要针对潜水层以及微承压水层进行降水工作,井深28 m。1区基坑面积约为4 029 m²,坑内疏干井单井有效疏干面积按20 m²每口布设,合计布设20口,即J1~J20。

降压井(图4b)主要针对⑦1、⑦2承压水层进行降水工作,共分为3种尺寸,分别为40、42、45 m。其中1区坑内布设减压井12口,端头井区域降压井3口,标准段区域降压井9口。Y2-1、Y2-2井深45 m,Y2-3~Y2-6、YB-1井深42 m,

Y1-1~Y1-3、YG-1、YG-2井深40 m。

坑外回灌井(图4c)主要针对目标承压水层进行回灌,1区东侧坑外回灌井间距按10 m布设,共18口,西侧按60 m布设,共3口,合计布设21口。监测兼回灌井G7-1~G7-7、G7-51~G7-53井深45 m,监测兼回灌井Z1~Z10井深46 m,观测井G1井深45 m。

2.4 土层参数设置

本节对数值模型中土层的参数进行设置,通过对现场的生产性试验进行数值模拟,来验证模型及土层参数设置的合理性。根据现场水文地质勘察报告设置各地层水文地质参数,见表1所列。

表1 地层主要水文参数

层号	水平渗透系数/(m/s)	垂直渗透系数/(m/s)	贮水率/m ⁻¹
②	5.0×10^{-8}	5.0×10^{-9}	1.0×10^{-5}
③	5.0×10^{-8}	5.0×10^{-9}	1.0×10^{-5}
④1	5.0×10^{-9}	5.0×10^{-10}	1.0×10^{-5}
④2	5.0×10^{-6}	5.0×10^{-7}	5.0×10^{-4}
⑤	3.0×10^{-8}	3.0×10^{-9}	1.0×10^{-5}
⑥	5.0×10^{-8}	5.0×10^{-9}	1.0×10^{-5}
⑦1	2.3×10^{-5}	1.7×10^{-6}	1.5×10^{-4}
⑦2	5.6×10^{-5}	3.8×10^{-6}	2.0×10^{-4}
⑨	2.3×10^{-4}	2.3×10^{-5}	3.0×10^{-4}

3 模型验证

依据现场施工计划及要求,针对1区现场已有的生产性试验进行数值模拟,模型验证分为单井-群井抽水模拟验证和抽灌一体化进程模拟验证。

3.1 单井-群井抽水模拟验证

根据现场的单井-群井抽水试验,分批次开启Y2-3、Y2-5、Y2-4、Y2-6、Y2-2的抽水试验,平均单口井抽水量约为30 m³/h,通过坑内及坑外观测井进行水位观测。在进行数据拟合后,数值模型计算所得水位降深等值线图如图5所示。

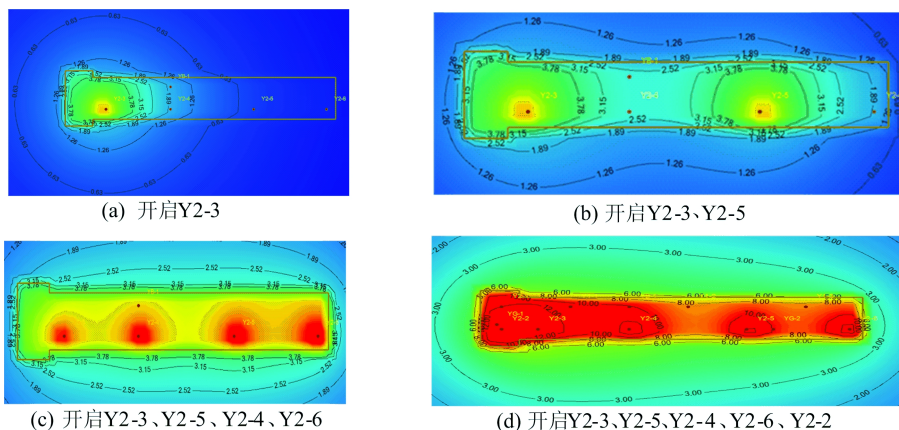


图5 群井抽水试验模拟降深等值线图

由图 5 可知,降深等值线以降水井为中心呈漏斗状分布,受抽水时间以及出水量的影响,其影响范围与最大降深均有不同,随着抽水时间和出水量增加,降水井周围的降深均变大。在止水帷幕处有一定数值上的突变,可见止水帷幕阻拦了坑外地下水向坑内流动。

为了确定数值计算结果与现场试验结果的误差,选取最后一组群井抽水试验,提取现场试验观测水位进行进一步数据对比,结果见表 2 所列。由表 2 可知,平均拟合误差控制在实际降深的 2.8%左右,群井抽水试验的拟合情况较好。

表 2 计算结果与试验结果对比

观测井位	试验降深/m	模拟降深/m	误差/%
YG-1	12.42	12.93	4.1
YG-2	8.99	9.51	5.8
Y1-2	8.82	8.45	4.2
G7-1	2.85	2.86	0.4
G7-2	3.52	3.34	5.1
G7-3	3.49	3.44	1.4
G7-5	3.39	3.33	1.8
G7-51	3.74	3.87	3.5
G7-52	3.99	4.02	0.8

数值计算结果与现场试验结果对比如图 6 所示。由图 6 可知,数值模拟拟合规律较好,可以真实反映基坑降水规律。综上,由降水引起的观测井水位变化与实际较为相符,说明模型尺寸及土层参数设置合理,可以使用该模型对降水进行相关计算及预测。

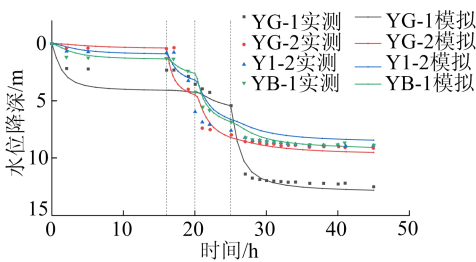


图 6 水位降深对比曲线

3.2 群井抽灌模拟验证

对于加压回灌进行模拟,本试验开启 Y2-2~Y2-6、Y1-1、Y1-3、YB-1 共 8 口降水井,坑外回灌 16 口,降水井平均抽水量约为 20 m³/h,回灌井平均注水量约为 4.83 m³/h,抽灌一体化施工过程的数值模拟计算等值线图如图 7 所示。对比群井抽水试验,坑外观测井水位较之改变更小,说明回灌井起到了抬升坑外承压水水位的作用,受止水帷

幕的影响,对坑内水的补给效果不明显,说明回灌井可以做到在不影响坑内降水要求的前提下抬升坑外的承压水水位。

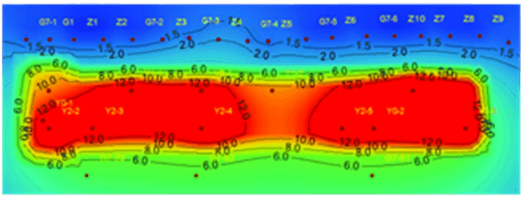


图 7 群井抽灌试验模拟降深等值线图

提取部分观测井数据进一步对拟合结果进行分析,对比结果见表 3 所列。由表 3 可知,平均误差控制在 7.6%左右,可以较好模拟抽灌一体化施工过程中的实际情况。

表 3 拟合结果对比

观测井位	试验降深/m	模拟降深/m	误差/%
Y1-2	8.69	9.87	12.7
YG-1	9.38	10.57	12.6
G1	1.51	1.45	3.9
G7-4	1.68	1.70	1.2

坑外观测井 G1、G7-4 水位降深随时间变化曲线如图 8 所示。由图 8 可知,在开启回灌井后,坑外水位有了明显的抬升,回灌井持续运行一段时间后,水位趋于稳定。

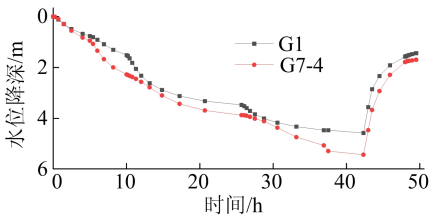


图 8 坑外观测井水位降深变化曲线

综上所述,基于 Visual MODFLOW 数值模拟软件能够为地下水抽灌提供良好的水位模拟分析,在实际降水工程中,可利用地质勘测报告中所提供的土体参数进行数值建模,确定降水所需基坑内抽水井的抽水量。同时,在数值模型验证过程中所得水位变化规律与实际相接近,因此可以利用该模型对抽灌一体化施工进程进行分析,为施工过程提供理论指导和预测。

4 抽灌一体化施工过程中水位响应规律

为防止基坑底板可能出现的地下水突涌现

象,在基坑开挖前需对承压水层进行降水。为了保证施工过程安全,在施工前需进行生产性抽水试验及数值模拟计算来确定降水计划,保证施工过程中不会发生地下水突涌造成的影响。在对承压水层降水过程中,应秉持按需降水的原则,不可过多降低承压水水位。

在抽取承压水的过程中,会导致场地影响半径内水位的总体下降和基坑周边地面产生沉降,对周围构筑物造成影响。在本次施工中,采用悬挂式止水帷幕对坑外水位进行控制,止水帷幕可以对潜水层起到很好的阻隔作用,但考虑施工成本,止水帷幕并未完全贯穿承压水层,在绕流的作用下会导致坑外水位产生较大影响,造成周边构筑物的沉降。因此需在施工过程中合理布设坑外回灌井,保证基坑外水位的相对稳定。

4.1 降水设计

根据《岩土工程勘察规范》(DGJ 08-37—2012)第 12.3.3 条中公式^[20]可知:在基坑底板至承压含水层顶板之间,土的自重压力应大于承压水含水层顶板处的承压水顶托力,基坑底板抗突涌验算示意图如图 9 所示。基坑底板抗突涌稳定条件为:在基坑底板至承压含水层顶板之间,土的自重压力应大于承压水含水层顶板处的承压水顶托力。承压水位控制计算式为:

$$\frac{P_s}{P_w} = \frac{\sum h_i \gamma_{si}}{H \gamma_w} \geq F_s \quad (2)$$

其中: P_s 为承压含水层顶面至基底面之间的上覆土压力; P_w 为初始状态下(未减压降水时)承压水的顶托力; h_i 为承压含水层顶面至基底面间各分层土层的厚度; γ_{si} 为承压含水层顶面至基底面间各分层土层的重度,取 18.00 kN/m^3 ; H 为高于承压含水层顶面的承压水头高度; γ_w 为水的重度,一般取 10.00 kN/m^3 ; F_s 为安全系数,一般取 $1.05 \sim 1.20$,本工程取 1.05 。

根据计算,降水目标结果见表 4 所列。由表 4 可知,若水头按水勘报告水头 6.23 m 计算时,平均开挖临界值达到 15.76 m 时,赋存于第⑦层中的承压水在基坑开挖时可能会发生基坑突涌,应采取减压措施保证基坑安全。

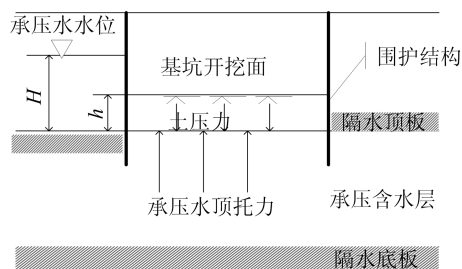


图 9 基坑底板抗突涌验算示意图

表 4 降水目标及降压井运行计划

序号	开挖工况	开挖深度/m	安全承压水头埋(6.23 m)	降深量/m	运行井数	开启时间	运行井编号
1	首道支撑	1.52	6.23	0	0		
2	第 2 道支撑	5.82	6.23	0	0		
3	第 3 道支撑	10.07	6.23	0	0		
4	第 4 道支撑	14.27	6.23	0	0		
5	临界值	15.76	6.23	0	0		
6	第 5 道支撑	18.07	10.19	3.96	4	开挖前 1 d 开启	Y2-3~Y2-6
7	标准段底板	20.67	14.65	8.42	5	开挖前 1 d 开启	Y2-2~Y2-6
8	北端头井底板	23.22	18.23	12.00	6	开挖前 1 d 开启	Y2-1~Y2-6

4.2 降水计划

本节针对动态抽灌一体化施工进度进行数值模拟计算及预测,探究在整个深基坑开挖过程中坑内降水、坑外回灌下、基坑内外的水位响应规律。根据计算结果,整个基坑开挖过程中对承压水需进行 3 次降水,分别为第 5 道支撑开挖前,开启坑内 Y2-3、Y2-4、Y2-5、Y2-6 这 4 口降压井,平均单口井出水量约为 $255.0 \text{ m}^3/\text{d}$;标准段底板开挖前,开启坑内 Y2-2、Y2-3、Y2-4、Y2-5、Y2-6 这 5 口降压井,平均单口井出水量约为 $348.8 \text{ m}^3/\text{d}$;北端头井底板开挖前,开启坑内 Y2-1、Y2-2、Y2-3、Y2-4、Y2-5、

Y2-6 这 6 口降压井,平均单口井的出水量约为 $348.0 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

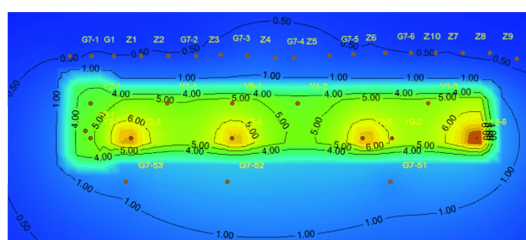
3 次降水施工对应所需的最少降深分别为 3.96 、 8.42 、 12.00 m ,考虑施工连续性 & 计算要求,每次降水时长持续 5 d 。同时同步开启坑外回灌井,保证坑外水位稳定,根据施工要求,坑外水位降深不得超过 1.5 m 。

4.3 抽灌一体化动态施工过程数值模拟

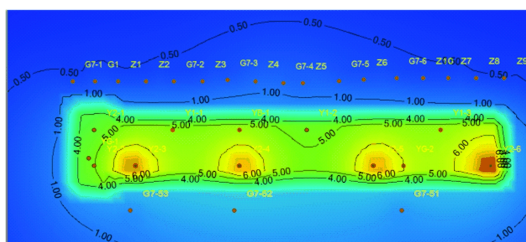
第 1 次降水为第 5 道支撑开挖前,承压水头降深要求为 3.96 m ,降压井在开挖前 1 d 开启,持续时间 5 d 。在降水过程中保持回灌井为开启状

态进行回灌,要求坑外观测井水位降深不能大于 1.50 m。第 1 次降水 1.5 d 后的承压水头降深等值线图如图 10 所示。由图 10 可知,降压井运行 1 d 后承压水头降深达到开挖要求,坑内平均降深在 5 m 左右,坑外观测井降深在 0.50 ~ 0.60 m,满足坑外控制要求。

第 2 次降水为标准段底板开挖前,要求承压水头降深不小于 8.42 m。在降压井总运行 6、10 d 后的承压水头降深等值线图如图 11 所示。由图 11 可知,降压井总运行 6 d 后承压水层水头降深达到开挖要求,坑内平均降深在 9.00 m 左右,坑外观测井降深在 0.60 ~ 0.80 m,满足坑外控制要求。

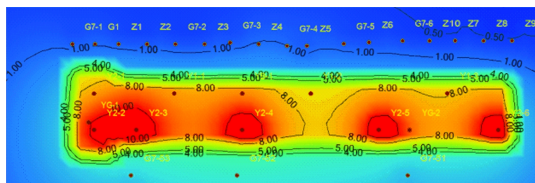


(a) 降水运行 1 d

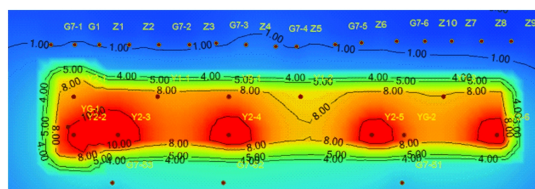


(b) 降水运行 5 d

图 10 第 1 次降水后承压水头降深等值线图



(a) 降水运行 6 d



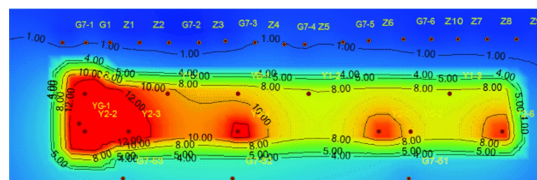
(b) 降水运行 10 d

图 11 第 2 次降水后承压水头降深等值线图

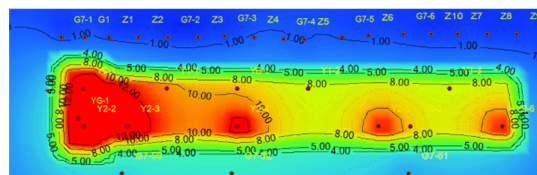
第 3 次降水为北端头井底板开挖前,要求端头井内承压水头降深不小于 12.00 m。由于本次开挖工作针对北端头井底板,因此需保持标准段内降压井出水量不变,额外开启坑内 Y2-1 降压井,增大 Y2-2 降压井的出水量,降压井总运行

11、15 d 后的承压水头降深等值线图分别如图 12 所示。

由图 12 可知,降压井总运行 11 d 后承压水层水头降深达到开挖要求,端头井内观测井降深在 12.30 m 左右,坑外观测井降深在 0.80 m 左右,满足坑外控制要求。



(a) 降水运行 11 d

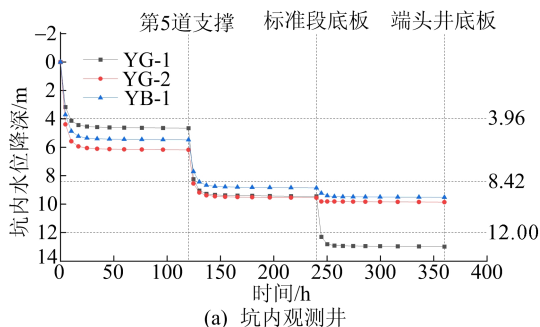


(b) 降水运行 15 d

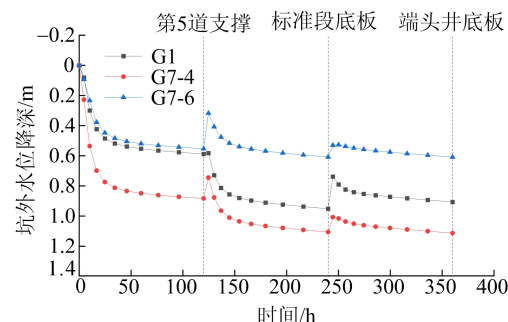
图 12 第 3 次降水后承压水头降深等值线图

4.4 水位响应规律分析

为了精确分析在抽灌一体化动态施工过程中的水位响应规律,提取坑内 YG-1、YG-2、YB-1 这 3 口观测井、坑外 G1、G7-4、G7-6 这 3 口观测井数据绘制成曲线并进行分析,结果如图 13 所示。



(a) 坑内观测井



(b) 坑外观测井

图 13 观测井水位降深变化

由图 13 可知,对于坑内观测井,在降压井运行 4~6 h 后水位趋于稳定,降深均达到设计所需

要求。在不同开挖步之间,降压井增开或加大抽水量,造成的水位响应较为敏感,因此实际施工中应控制水井抽水量的变化,防止造成水位突然改变对施工的影响,同时应设置预备井,防止水井故障造成严重后果。

对于坑外观测井,回灌时水位响应较坑内观测井而言较为延缓,在8~10 h后水位趋于稳定。这可能是由于地连墙的隔水作用,造成坑外水位变化有一定的滞后性,总体坑外水位降深控制在1.10 m范围,满足坑外降深不超过1.50 m的要求,说明抽灌一体化施工可以在保证坑内降水达到要求的情况下保持基坑周围水位的相对安全。同时,值得注意的是,在每个开挖步之间由于回灌量的改变可能会导致坑外水位不降反升,平均改变量在0.20 m左右,在可控范围内,实际施工中应注意回灌井回灌量改变造成的影响。

5 结 论

1) 在生产性试验中,模拟结果与试验结果拟合程度较好,在对承压水层的抽、灌、抽灌一体工况下均能提供较好预测效果,抽灌一体化施工可以很好地保证坑内水位达到开挖要求,同时保持坑外水位的相对稳定。

2) 基于 Visual MODFLOW 建立的数值模型,可以较准确地模拟悬挂式止水帷幕围护下狭长深基坑抽灌一体化开挖过程中坑内外的水位响应,通过设置相关参数可以较为准确得出水位变化大小及规律。

3) 在抽灌一体化动态模拟过程中,针对不同开挖步,通过实时调整降压井及回灌井的出水量,使水位达到设计要求,实现了在动态变化中控制坑内外的水位。在模拟过程中,坑内水位先快速降低后保持稳定,坑外回灌水位变化相对坑内稍有延缓。

4) 基坑降水工作中,坑内承压水位在降压井开启4~6 h后趋于稳定,坑外水位稍有延缓,在8~10 h后趋于稳定。因此,在开挖前应至少提前半天开启降压井进行降水工作,并同步开启回灌井。在不同开挖步之间,回灌量的改变可能会导致短小时内坑外水位不降反升,因此在不同开挖工况下,回灌量大小应进行提前计算和试回灌,防止因回灌量突然变化造成坑外水位过度抬升造成周边构筑物的破坏。

[参 考 文 献]

[1] 王卫东. 软土深基坑变形及环境影响分析方法与控制技术

[J]. 岩土工程学报, 2024, 46(1): 1-25.

- [2] 陈永才,李镜培,邸国恩,等. 某深基坑降水对周边环境的影响分析及处理措施[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(增刊1): 319-322.
- [3] 唐业清. 基坑工程事故分析与处理[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999.
- [4] 蒋红星,李龙,冯芳. 深基坑支护工程中的地下水防治问题研究[J]. 中国煤田地质, 2003, 15(1): 41-43.
- [5] 刘俊城,谭勇,樊冬冬. 深厚富水砂土地铁深基坑变形性状及频发地连墙渗漏灾害分析[J]. 岩土工程学报, 2026, 48(5): 1036-1048.
- [6] 丁春林. 软土地区承压水基坑突涌稳定算法研究综述[J]. 地下空间与工程学报, 2007, 3(2): 333-338.
- [7] 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(增刊1): 1659-1663.
- [8] Liu J C, Tan Y, Liao S M. Protection of a 193.5-m high concrete tube-shape TV tower close to subway excavations[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2023, 37(5): 04023043.
- [9] 郑刚,曹剑然,程雪松,等. 考虑承压含水层间越流的地下水回灌现场试验研究[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(9): 1609-1618.
- [10] 陆建生,潘伟强. 上海某枢纽基坑工程浅层承压水回灌试验分析[J]. 地下空间与工程学报, 2014, 10(4): 810-817, 828.
- [11] Kuroda K, Hayashi T, An T D, et al. Groundwater recharge in suburban areas of Hanoi, Vietnam: effect of decreasing surface-water bodies and land-use change[J]. Hydrogeology Journal, 2017, 25(3): 727-742.
- [12] Hida N. An overview of experiences of basin artificial recharge of ground water in Japan[J]. Journal of Japanese Association of Hydrological Sciences, 2007, 37(4): 295-302.
- [13] 石振华,李传尧. 城市地下水工程与管理手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1993.
- [14] 俞建霖,龚晓南. 基坑工程地下水回灌系统的设计与应用技术研究[J]. 建筑结构学报, 2001, 22(5): 70-74.
- [15] Taneja D S, Khepar S D. Effect of artificial ground-water recharge on aquifer parameters using cavity well[J]. Groundwater, 1996, 34(2): 335-340.
- [16] Dong Y H, Zhao P G, Zhou W B. Effect of artificial aquifer recharge on hydraulic conductivity using single injection well[C]//2011 International Symposium on Water Resource and Environmental Protection (ISWREP). Xi'an: IEEE, 2011: 2115-2117.
- [17] 郑刚,曾超峰,薛秀丽. 承压含水层局部降压引起土体沉降机理及参数分析[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(5): 802-817.
- [18] 曾超峰,薛秀丽,罗鹏. 基坑工程地下水回灌对土层变形的影响[J]. 工程建设, 2017, 49(11): 1-5.
- [19] 黄应超,徐杨青. 深基坑降水与回灌过程的数值模拟分析[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(增刊2): 299-303.
- [20] DGJ 08-37—2012 岩土工程勘察规范[S].

(责任编辑 吴 亮)