



基于渗流-应力耦合的基坑井点降水 影响因素研究*

杨 灿¹, 汤德颖¹, 阿比尔的¹, 谭定杰¹, 潘 剑^{2,3}

(1. 重庆交通大学 河海学院, 重庆 400074;

2. 广西平陆运河建设有限公司, 广西南宁 530029; 3. 广西现代运河实验室, 广西南宁 530029)

摘要: 针对沿海高地下水位区深基坑开挖引发的土体渗透破坏及其导致的基坑失稳问题, 开展基于数值模拟方法的基坑井点降水影响因素研究。依托八堡船闸基坑工程, 建立基坑降水数值模型, 分析止水帷幕的深度和渗透系数、降水井的深度和布置方式对基坑孔隙水压力和地表沉降的影响规律。结果表明: 增大止水帷幕深度能降低基坑土体的孔隙水压力和地表沉降量; 降低止水帷幕的渗透系数能有效阻隔地下水向基坑内渗漏, 使地表沉降量减小; 随着降水井深度的增加, 基坑孔隙水压力逐渐减小, 地表沉降量不断增大; 当地表与基坑的距离逐渐增大, 地面沉降呈先下降后上升的趋势; 降水井的数量越多, 基坑孔隙水压力越小, 地表沉降量逐渐减小, 采用降水井坑内3个-坑外1个的布置方式使得地表沉降量最小。

关键词: 软土地基; 基坑降水; 有限元计算; 孔隙水压力; 地表沉降

中国分类号: U641.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)11-0225-08

Influencing factors of foundation pit well point precipitation based on seepage-stress coupling

YANG Can¹, TANG Deying¹, ABI Erdi¹, TAN Dingjie¹, PAN Jian^{2,3}

(1. College of River and Ocean, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

2. Guangxi Pinglu Canal Construction Co., Ltd., Nanning 530029, China; 3. Guangxi Laboratory of Modern Canal, Nanning 530029, China)

Abstract: This paper focuses on the soil seepage failure and the resulting instability of deep foundation pits caused by the excavation of deep foundation pits in coastal areas with high groundwater levels, conduct research on the influencing factors of foundation pit well-point dewatering based on numerical simulation methods. Based on the foundation pit engineering of Babao ship lock, a numerical model of foundation pit dewatering is established to analyze the effect law of the depth and permeability coefficient of water curtain, the depth and layout of dewatering well on the foundation pit pore water pressure and surface settlement. The results show that increasing the depth of the curtain can reduce the pore water pressure of foundation soil and the surface settlement. Reducing the permeability coefficient of the curtain can effectively block the seepage of groundwater into the foundation pit and reduce the surface settlement. With the increase of the depth of dewatering well, the pore water pressure of foundation pit decreases gradually, and the surface settlement increases continuously. The distance between the ground surface and the foundation pit gradually increases, and the ground settlement decreases first and then increases. The more the number of dewatering wells is, the smaller the pore water pressure of foundation pit is, the smaller the surface settlement is. The arrangement of three dewatering wells in the pit and one dewatering well outside the pit minimizes the surface settlement.

Keywords: soft soil foundation; foundation pit dewatering; finite element calculation; pore water pressure; surface settlement

收稿日期: 2025-02-19

*基金项目: 广西科技重大专项(2023AA14005)

作者简介: 杨灿(1999—), 男, 硕士研究生, 研究方向为基坑和井点降水。

通信作者: 阿比尔的(1988—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为岩土损伤力学与工程稳定性分析。E-mail: abierdi@163.com

随着经济水平提升和城市地下工程建设快速发展,基坑降水的不当不仅会造成地下水资源的浪费,还可能引发基坑周边地面沉降,从而危及邻近建筑物的安全。特别是沿海地区的地下水位较高,粉砂和粉土渗透性较强,土体的抗侵蚀能力较差^[1],基坑开挖后通常需要基坑降水工作。基坑降水会引起土体的孔隙水压力降低,导致基坑周围土体发生不均匀沉降,从而容易引发相邻建筑物发生破坏^[2-3]。因此,国内外学者针对深基坑降水对周边土体及建筑物的影响开展了大量研究,并取得一些研究成果。

方润林^[4]运用 Abaqus 软件建立基坑降水的数值仿真模型,揭示不同降水深度下基坑周围地面沉降的变化规律;刘承磊等^[5]建立数值仿真模型分析排水作用下基坑对周边环境的影响,并利用现场试验数据验证该仿真结果的正确性;袁斌等^[6]基于数值仿真方法研究富水砂砾含水层深基坑降水的过程,发现止水帷幕能减小地表的沉降量;郑启宇等^[7]建立基坑降水的数值仿真模型,发现基坑降水对墙体变形影响较小,对坑外地表的沉降量的影响较大;董小松等^[8]研究基坑降水诱发地面沉降的变化机理及计算方法,构建渗流-地面沉降耦合模型,结果表明,考虑总应力与土体参数变化的模型能更合理地解释沉降计算值与实测值之间的差异;管凌霄等^[9]分析基坑开挖及降水共同作用对下卧隧道纵向变形的影响,利用两阶段分析法求出隧道纵向变形解析解;凌俊峰^[10]基于理论与数值仿真方法分析降水井深度、降水井出水量、土体的渗透系数、降水井与建筑物间距对周围建筑物沉降的影响规律;李汉渤^[11]针对广州南沙深软土基坑经真空预压后具有水平渗透差、竖向渗流优的特点,采用深井降水法保障干挖安全,为类似工程及规范修订提供实践参考;李松斌等^[12]基于 GMS 软件优化石灰岩上覆砂层双层透水地层中的深基坑参数,用嵌岩地连墙与深井降水组合方法证实了地连墙仅能改变局部渗流场,为类似工程提供设计参考;盛波等^[13]基于基槽观

察检验分析基坑渗漏原因并划分了渗流类型和变形特征,结合工程经验采取处理措施保障了边坡稳定,为基坑勘察提供一定的研究思路;陈猛等^[14]基于临海巨厚砂层深基坑提出深井降水方案,有效控制地下水并避免流砂管涌现象,验证了该工艺在高水位砂质地层中的可行性。

目前许多学者在基坑降水方面做了大量的研究,但大多数研究忽略了基坑开挖与降水的耦合作用,对地面沉降影响因素的研究不够深入。因此,本文依托浙江八堡船闸基坑工程,利用 Abaqus 软件建立数值仿真模型模拟基坑降水的过程,对基坑降水的周边沉降进行监测。最后,分析渗流-应力耦合作用下止水帷幕渗透系数、深度、降水井深度、布置方式等因素对基坑地下孔隙水压力及地表沉降的影响规律。本文有助于理解基坑降水过程中渗流对周边环境的具体影响,为优化深基坑的降水施工提供参考。

1 数值仿真模型

1.1 模型建立

本文建立的二维平面数值仿真模型长 400 m,高 50 m。其中,基坑长度为 46 m,基坑的开挖深度为 15 m,有限元模型见图 1。对模型进行网格划分,为提高计算效率同时保证计算精度,对基坑周围的土体进行局部加密处理,基坑周围土体的最小网格尺寸为 1 m,基坑外侧土体的最大网格尺寸为 20 m,网格划分的模型见图 2、3。

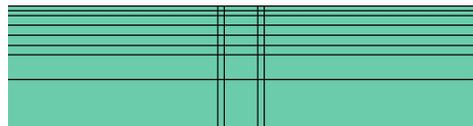


图 1 有限元模型

Fig. 1 Finite element model

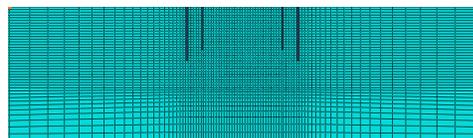


图 2 划分网格后的基坑模型

Fig. 2 Foundation pit model after grid division

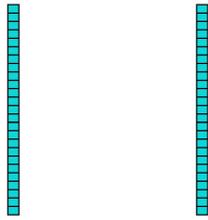


图 3 基坑两侧止水帷幕有限元模型

Fig. 3 Finite element model of sealing curtain on both sides of foundation pit

1.2 材料参数

工程地区的土体为粉砂土, 其渗透性较高, 数值模拟时需要考虑土体的渗流作用; 由于工程的围护结构较为复杂, 为减少模型计算量, 建模时将围护结构简化为止水帷幕。因此土体采用修正剑桥模型, 止水帷幕结构采用线弹性模型。其相关材料参数见表 1。

表 1 材料参数

Tab. 1 Material parameters

材料名称	重力密度 $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	杨氏模量 E/GPa	泊松比 μ	初始孔隙比 e	截距 D/m	侧压力系数 K	正常固结系数 C_v	摩擦系数 f
土体	17.50	0.04	0.30	0.75	0.80	0.53	0.08	0.50
止水帷幕	22.00	28.00	0.18	-	-	-	-	-

1.3 边界条件

模型的底部和左右两侧均设置为固定边界, 降水井的底部左右两侧井壁同样为固定边界, 基坑顶部的初始孔隙压力设置为 0。止水帷幕左右边界与土体设置摩擦接触, 止水帷幕底部与土体采用固结的方式, 见图 4。

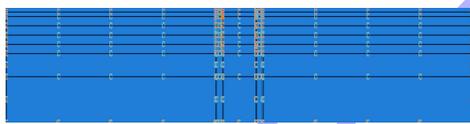


图 4 位移边界条件

Fig. 4 Displacement boundary conditions

假定孔隙水压力不发生变化, 为恒定水头边界, 采用 Drainage-only flow 边界条件来模拟基坑的降水过程。为还原基坑土体未降水之前的初始应力状态, 需要进行地应力平衡计算, 平衡结果见图 5。

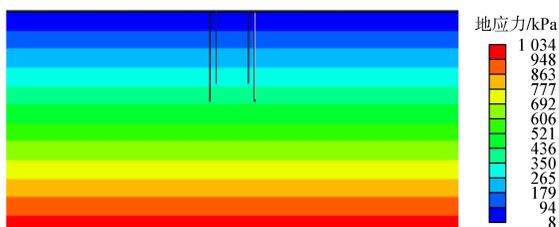
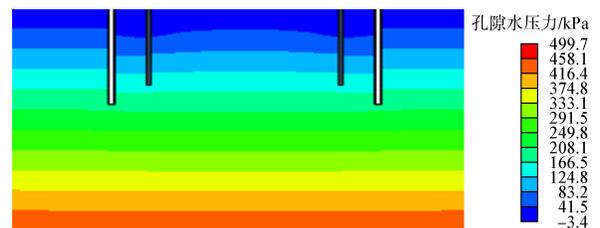


图 5 地应力平衡结果

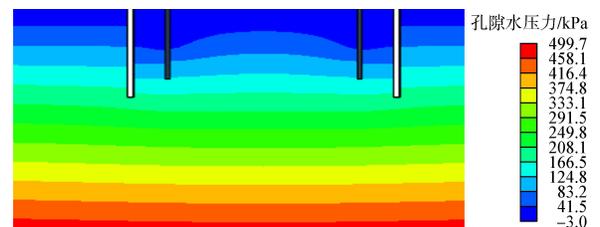
Fig. 5 Ground stress balance results

1.4 基坑降水数值模拟

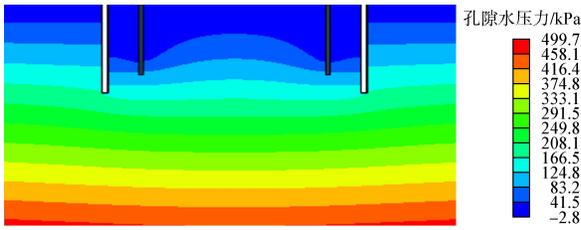
根据浙江省八堡船闸基坑开挖的施工过程, 基坑采用坑内分步降水的方式, 分 4 步降水, 每个降水步历时 2.5 d。在 Abaqus 中利用“生死单元”模拟基坑分步降水的过程, 分步降水后基坑内孔隙水压力分布云图见图 6。随着降水的进行, 基坑底部的孔隙水压力逐渐减小, 从 3.4 kPa 减小至 2.4 kPa。从孔隙水压力的分布云图可知, 降水井的降水效果呈漏斗状, 与实际规律相符, 表明所建立的数值仿真模型能较真实地模拟基坑井点分步降水的过程。



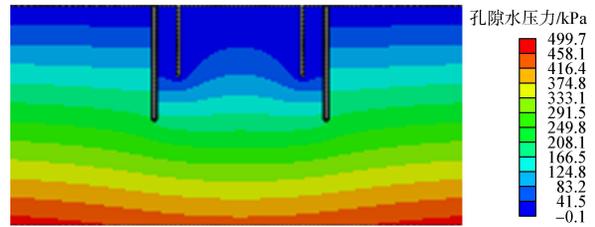
a) 第1分析步



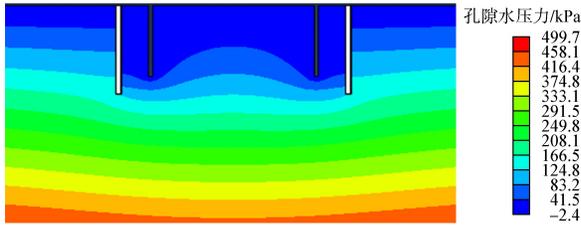
b) 第2分析步



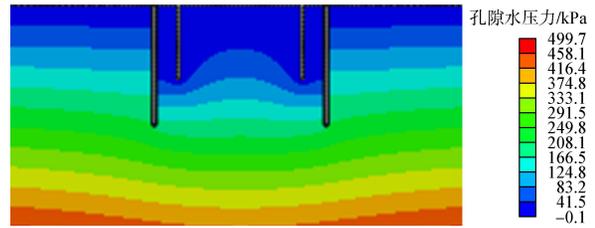
c) 第3分析步



c) 22 m止水帷幕



d) 第4分析步



d) 24 m止水帷幕

图6 基坑孔隙水压力云图

Fig. 6 Cloud map of pit pore water pressure

图7 不同止水帷幕下基坑孔隙水压力云图

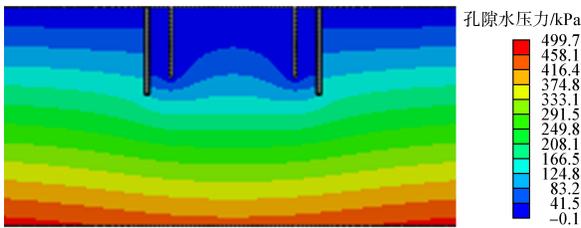
Fig. 7 Cloud map of pore water pressure in foundation pit under different sealing curtains

2 结果分析

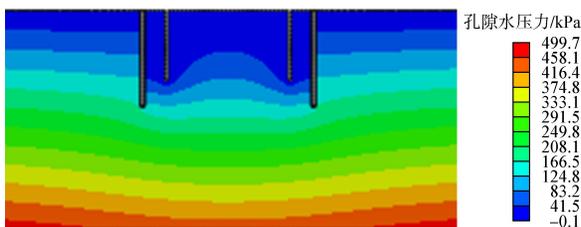
2.1 止水帷幕深度对基坑降水的影响

止水帷幕深度分别设置18、20、22、24 m，代入数值仿真模型中计算。不同止水帷幕深度下基坑降水后的孔隙水压力分布云图见图7。可以看出，孔隙水压力在降水井附近的分布情况类似于漏斗状，止水帷幕将基坑内外的孔隙水压力隔开，使止水帷幕两侧的孔隙水压力相差较大。而止水帷幕的底部孔隙水压力分布连续，这是由于地下水从止水帷幕底部绕流到基坑底部。另外，基坑底部的孔隙水压力随着止水帷幕深度的增加而逐渐减小，止水帷幕深度为24 m的孔隙水压力比帷幕深度为18 m时减小了7.2 kPa。

地表沉降量随地面与基坑距离之间的变化关系见图8。随着地面与基坑边缘距离的增大，地表的沉降量逐渐减小，表明基坑降水的影响范围随着距离的增大而逐渐减小。另外，对比不同止水帷幕深度下的地表沉降量，发现止水帷幕深度越大，地表沉降量越小，表明增大止水帷幕深度有利于减小基坑降水对周围环境的影响。



a) 18 m止水帷幕



b) 20 m止水帷幕

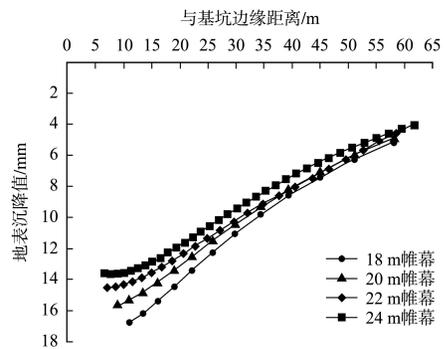


图8 不同止水帷幕深度下地表沉降的变化关系

Fig. 8 Variation of surface settlement under different sealing curtain depths

2.2 止水帷幕渗透系数对基坑降水的影响

取定降水井深度为16 m，止水帷幕深度为20 m，止水帷幕的渗透系数分别设置为 6.21×10^{-6} 、 3.44×10^{-7} 、 7.25×10^{-8} 、 8.36×10^{-9} cm/s 代入计算。不同止水帷幕渗透系数下孔隙水压力分布云

图见图 9。随着止水帷幕渗透系数减小, 基坑底部孔隙水压力逐渐减小, 表明减小止水帷幕的渗透系数能够有效提升止水帷幕的隔水效果。

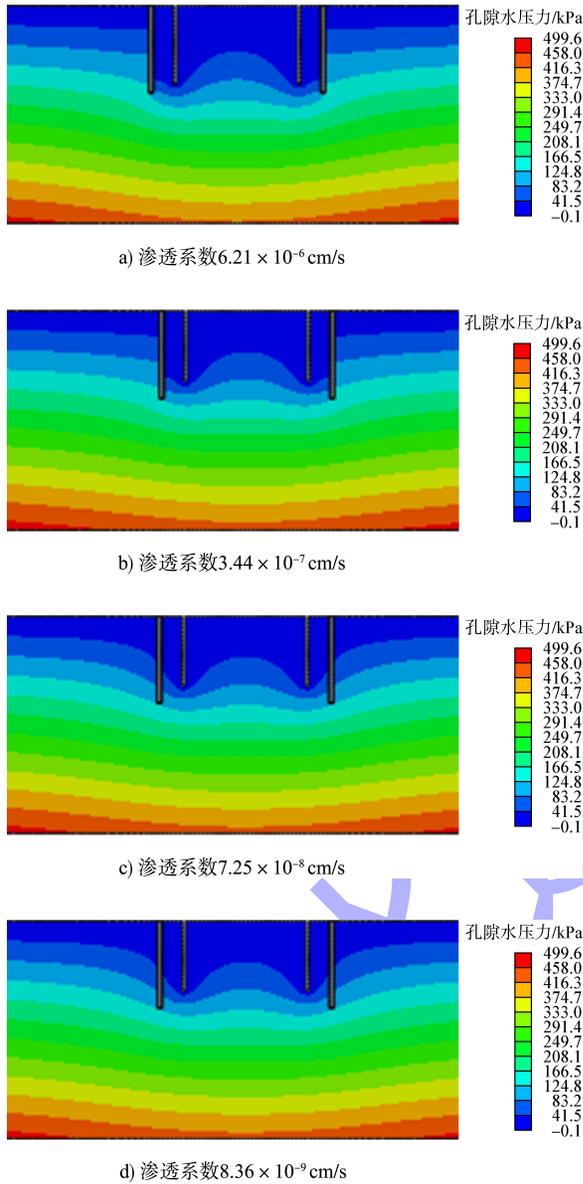


图 9 不同渗透系数下基坑孔隙水压力分布云图

Fig. 9 Cloud map of pore water pressure distribution of foundation pit under different permeability coefficients

不同止水帷幕渗透系数下基坑周围地表沉降量的变化关系见图 10。当止水帷幕渗透系数越小, 基坑周围地表沉降量也越小, 止水帷幕渗透系数为 8.36×10^{-9} cm/s 时的地表最大沉降量为 20.36 mm, 相比帷幕渗透系数为 6.21×10^{-6} cm/s 时沉降量减小了 14.13 mm, 减小幅度为 40.9%。除此之外, 距离基坑 50 m 以外的地表沉降量也对止

水帷幕渗透系数的变化较为敏感, 表明止水帷幕渗透系数对基坑降水后地表沉降量的影响较为明显。

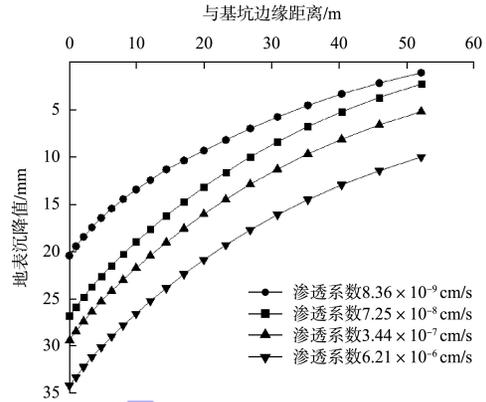


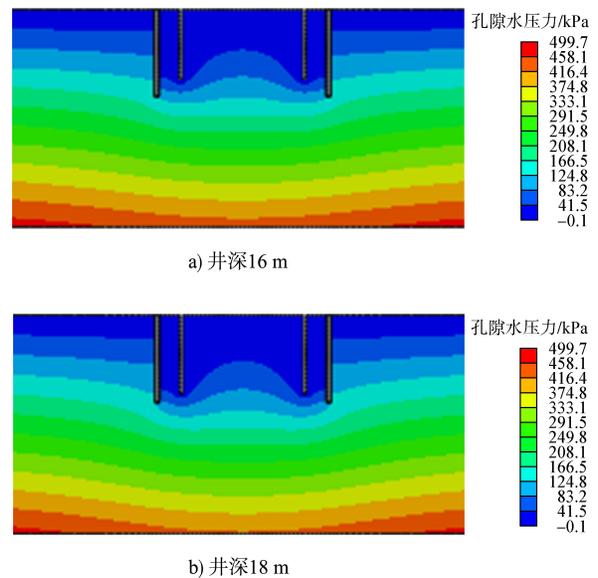
图 10 不同渗透系数下地表沉降的变化关系

Fig. 10 Variation relationship of land surface settlement under different permeability coefficients

2.3 降水井深度对基坑降水的影响

降水井深度分别设置为 16、18、20、22、24 m, 其他条件不变的情况下代入计算, 得到不同降水井深度下的孔隙水压力分布云图, 见图 11。可以看出, 止水帷幕两侧的孔隙水压力差异较大, 表明止水帷幕具有良好的隔水效果, 地下水只能通过止水帷幕底部绕流进基坑内部。

对比不同降水井深度下基坑底部的孔隙水压力发现, 随着降水井深度的增加, 基坑底部孔隙水压力逐渐减小, 降水井井深对基坑底部孔隙水压力有较大影响。



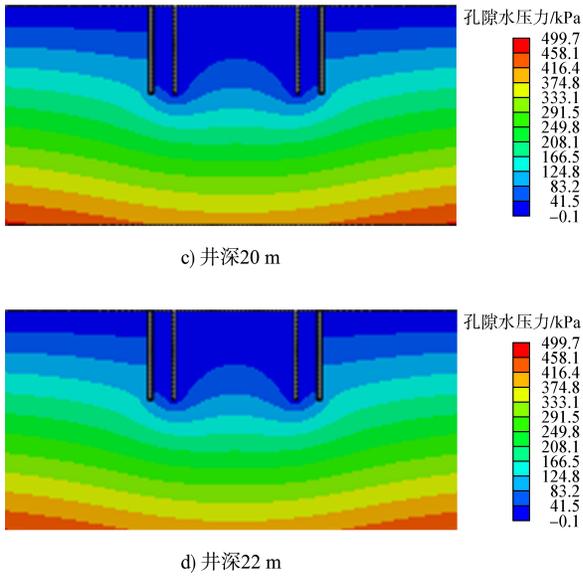


图 11 不同降水井深度下基坑孔隙水压力云图

Fig. 11 Cloud map of pore water pressure in foundation pit under different dewatering well depths

不同降水井深度下基坑周围地表沉降量的变化关系见图 12。基坑地表的_{最大}沉降量随着降水井深度的增大而增大，降水井深度为 22 m 时地表最大沉降量为 27.42 mm，降水井深度为 16 m 时，地面最大沉降量为 18.25 mm。降水井深度从 16 m 增加到 22 m 后，地表最大沉降量增加了 9.17 mm，增幅为 50.2%。另一方面，随着地表与基坑距离的增大，地表沉降量呈先增大后逐渐减小的趋势，当地表距离基坑 8 m 时，地表的沉降量达到最大。当地表与基坑的距离超过 45 m 后，降水井深度对地表沉降量的影响不大。

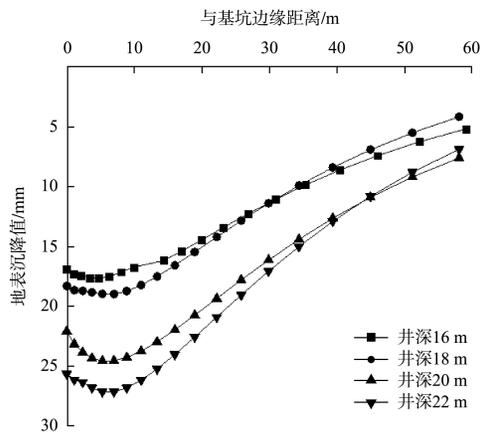


图 12 不同降水井深度下地表沉降的变化关系

Fig. 12 Variation relationship of surface settlement under different dewatering well depths

2.4 降水井布置方式对基坑降水的影响

将降水井深度设置为 16 m，止水帷幕深度设置为 20 m，考虑不同降水井布置方式进行计算，采用坑内设置与坑外设置相结合的方式进行布置，计算工况见表 2。不同降水井布置方式下的孔隙水压力分布云图见图 13。可以看出，坑内的降水井数量越多，基坑底部的孔隙水压力越小。

表 2 不同降水井布置方式工况

Tab. 2 Working conditions of different dewatering well layout

工况	基坑内降水井数量/个	基坑外降水井数量/个
1	2	1
2	2	2
3	3	0
4	3	1

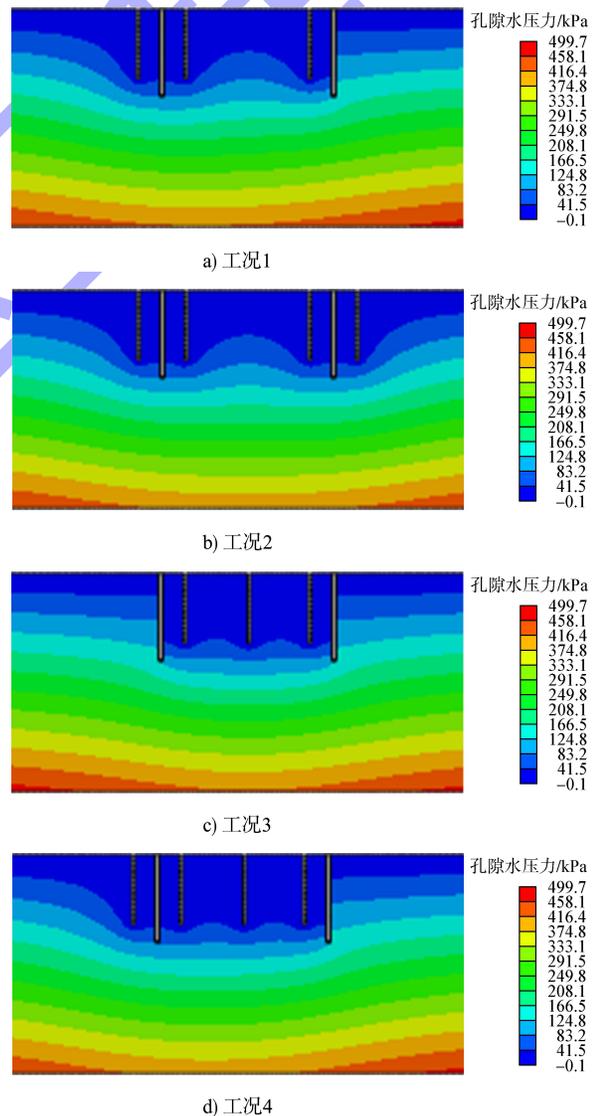


图 13 不同降水井布置方式下孔隙水压力分布云图

Fig. 13 Cloud map of pore water pressure distribution under different dewatering well layout

不同降水井布置方式下地表沉降量与基坑距离的变化关系见图 14, 降水井的布置方式对基坑周围地表沉降量有重要影响。当坑外有 1 个降水井时, 坑内 3 个降水井的地表最大沉降量为 18.37 mm, 坑内 2 个降水井的地表最大沉降量为 29.94 mm, 两者相差 11.57 mm, 表明坑内降水井的数量对基坑周围地表沉降量的影响较大。当坑内有 2 个降水井时, 坑外 2 个降水井与坑外 1 个降水井的基坑地表沉降量相差不大; 但对于 30 m 以外的地面沉降量两者相差 12.1 mm, 表明坑外降水井数量对基坑外的地表沉降量有显著影响。这是由于基坑内降水井数量越多有利于减小基坑内部孔隙水压力, 而基坑外降水井数量的增加能减小基坑外侧地下水向基坑内渗流, 从而使基坑周围地表沉降量减小。

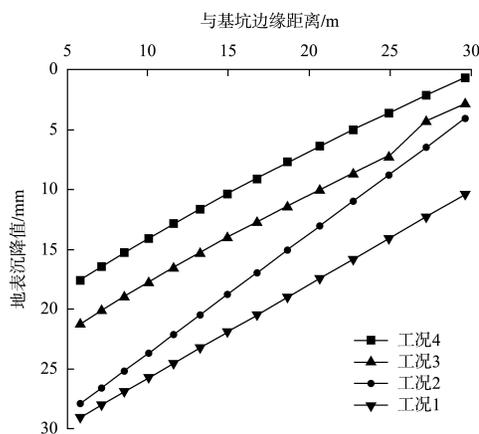


图 14 不同降水井布置方式下地表沉降量变化关系

Fig. 14 Variation relationship of land surface settlement under different dewatering well layout

3 结论

1) 通过数值模拟结果发现, 基坑分步降水过程中降水井形成的漏斗状水力梯度分布特征与实际规律相吻合, 验证了模型的准确性。

2) 基坑降水过程中提高止水帷幕的深度与渗透系数能有效减少基坑底部孔隙水压力和周围地表沉降量。选取合理的止水帷幕参数, 能显著降低地下水渗流效应, 同时可增强基坑降水的防渗效果。

3) 在基坑降水过程中, 随着降水井深度增加, 基坑底部孔隙水压力递减而地表最大沉降量

递增, 但当地表与基坑距离超过 45 m 后, 降水井深度对沉降量的影响趋于弱化。

4) 坑内外降水井布置方式对基坑降水影响不同, 坑内井数量增加可降低基坑底部孔隙水压力并减少地表沉降, 坑外井数量增加能有效抑制外侧地下水渗流, 采用坑内 3 个-坑外 1 个的降水井布置方式使得地表沉降量最小。

参考文献:

- [1] 梁健伟, 房营光. 极细颗粒黏土渗流特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(6): 1222-1230.
LIANG J W, FANG Y G. Experimental study of seepage characteristics of tiny-particle clay[J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2010, 29(6): 1222-1230.
- [2] 郑刚, 石建成, 程雪松, 等. 天津某地铁车站深基坑突涌事故分析[J]. 建筑结构, 2024, 54(21): 132-137.
ZHENG G, SHI J C, CHENG X S, et al. Analysis on deep foundation pit water intrusion accident of a subway station in Tianjin[J]. Building structure, 2024, 54(21): 132-137.
- [3] 杨文浩. 浅议某软土地区浅小基坑渗透破坏事故[J]. 工程质量, 2024, 42(1): 104-106, 112.
YANG W H. Discussion on seepage damage accident of shallow foundation pit in a soft soil area[J]. Engineering quality, 2024, 42(1): 104-106, 112.
- [4] 方润林. 基坑降水引起地面沉降的数值分析[J]. 土工基础, 2015, 29(3): 156-158.
FANG R L. Numerical analysis of deep excavation dewatering induced ground subsidence[J]. Geotechnical foundation, 2015, 29(3): 156-158.
- [5] 刘承磊, 孙怀军, 张洪岩. 沿海地区某基坑降水数值模拟研究分析[J]. 中国水运(下半月), 2016, 16(2): 93-94.
LIU C L, SUN H J, ZHANG H Y. Numerical simulation of a foundation pit dewatering in coastal area[J]. China water transport (the second half of the month), 2016, 16(2): 93-94.
- [6] 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.
YUAN B, WU Y X, LIAO S H, et al. Optimization of deep excavation pit dewatering in water-rich sand and gravel

- strata based on numerical model [J]. Engineering investigation, 2017, 45(1): 34-39.
- [7] 郑启宇, 夏小和, 李明广, 等. 深基坑降承压水对墙体变形和地表沉降的影响[J]. 上海交通大学学报, 2020, 54(10): 1094-1100.
- ZHENG Q Y, XIA X H, LI M G, et al. Effect of water reduction in deep foundation pit on wall deformation and surface settlement [J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2020, 54(10): 1094-1100.
- [8] 董小松, 朱留杰, 靳文超, 等. 考虑基坑降水中总应力与土体参数变化的渗流-地面沉降耦合模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2024, 43(S2): 4052-4061.
- DONG X S, ZHU L J, JIN W C, et al. Study on the coupling model of seepage-land subsidence considering variations in total stress and soil parameters during foundation pit dewatering [J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2024, 43(S2): 4052-4061.
- [9] 管凌霄, 徐长节, 王雪鹏, 等. 基坑开挖及降水引起下卧隧道变形的解析解[J]. 岩土力学, 2023, 44(11): 3241-3251.
- GUAN L X, XU C J, WANG X P, et al. Analytical solution of deformation of underlying shield tunnel caused by foundation pit excavation and dewatering [J]. Rock and soil mechanics, 2023, 44(11): 3241-3251.
- [10] 凌俊峰. 邻近基坑降水对索菲亚教堂地面沉降的影响[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.
- LING J F. The influence of dewatering of nearby foundation pit on the settlement of Sofia Church[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007.
- [11] 李汉渤. 大型深基坑盆式开挖深井降水法应用研究[J]. 水运工程, 2013(9): 169-174.
- LI H B. Application of deep well dewatering method in basin excavation of large deep foundation pit[J]. Port & waterway engineering, 2013(9): 169-174.
- [12] 李松斌, 谢小明, 肖莹萍. 超大面积港池深基坑截渗与降水分析[J]. 水运工程, 2015(10): 182-187.
- LI S B, XIE X M, XIAO Y P. Seepage and precipitation analysis of ultra-large-area basin deep foundation pit[J]. Port & waterway engineering, 2015(10): 182-187.
- [13] 盛波, 邓凌谨. 株洲航电枢纽二线船闸基坑渗流特征及工程措施[J]. 水运工程, 2019(3): 141-145.
- SHENG B, DENG L J. Seepage characteristics and engineering measures of foundation pit of second-line ship lock of Zhuzhou navigation-hydropower junction[J]. Port & waterway engineering, 2019(3): 141-145.
- [14] 陈猛, 冯波, 钱巍, 等. 临海巨厚砂质含水层深基坑深井井点降水实践[J]. 水运工程, 2017(5): 163-167.
- CHEN M, FENG B, QIAN W, et al. Application of deep well in a foundation pit dewatering in thick sandy aquifer close to sea[J]. Port & waterway engineering, 2017(5): 163-167.

(本文编辑 王璁)

(上接第 201 页)

- [7] 江木春, 袁锐, 牛作鹏. 三维激光扫描技术在北江航道沿线水上物外观测量中的应用[J]. 水运工程, 2022(11): 160-164.
- JIANG M C, YUAN R, NIU Z P. Application of 3D laser scanning technology in the appearance measurement of aquatic objects along Beijiang channel [J]. Port & waterway engineering, 2022(11): 160-164.
- [8] 刘友群, 敖建锋. 基于多信息深度学习的 3D 点云语义分割[J]. 激光与红外, 2021, 51(5): 675-680.
- LIU Y Q, AO J F. 3D point cloud semantic segmentation based on multi-information deep learning [J]. Laser & infrared, 2021, 51(5): 675-680.
- [9] QI C R, YI L, SU H, et al. Pointnet++: deep hierarchical feature learning on point sets in a metric space [J]. Computer vision and pattern recognition, 2017(6): e02413.
- [10] NONG X Z, BAI W F, LIU G L. Airborne LiDAR point cloud classification using PointNet++ network with full neighborhood features[J]. PloS one, 2023, 18(2): e0280346.
- [11] 乐英, 杨冰雁. 基于 PointNet++ 的煤场点云分割与识别方法[J]. 中国工程机械学报, 2023, 21(3): 199-203.
- LE Y, YANG B Y. Point cloud segmentation and recognition method of coal yards based on PointNet[J]. Chinese journal of construction machinery, 2023, 21(3): 199-203.

(本文编辑 王璁)