

DOI: 10.7672/sgjs2025110034

悬挂式止水帷幕基坑预降水现场监测与 数值模拟对比研究*

周游¹, 陈少波¹, 张思煜²

(1. 上海隧道工程有限公司, 上海 200032; 2. 南京工业大学岩土工程研究所, 江苏 南京 211816)

[摘要] 悬挂式止水帷幕基坑工程施工中, 预降水过程易诱发基坑周围围护结构产生附加变形以及地表沉降等卸荷效应, 甚至影响施工安全及周边环境稳定。以南京地铁5号线虹桥站基坑工程为背景, 基于现场监测数据和数值模拟相结合的方法, 建立了考虑土体蠕变特性的三维有限元模型, 揭示了悬挂式止水帷幕条件下预降水引发的围护结构附加变形特征、内力重分布规律及邻近地表沉降空间分布特征, 总结了预降水深度对卸荷效应的非线性影响规律。

[关键词] 基坑; 止水帷幕; 降水; 监测; 数值模拟

[中图分类号] TU753

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2025)11-0034-06

Comparative Study on On-site Monitoring and Simulation of Pre-dewatering for Suspended Waterproof Curtain Foundation Excavation

ZHOU You¹, CHEN Shaobo¹, ZHANG Siyu²

(1. Shanghai Tunnel Engineering Co., Ltd., Shanghai 200032, China;

2. Institute of Geotechnical Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing, Jiangsu 211816, China)

Abstract: In the construction of suspended waterproof curtain foundation excavation engineering, the pre-dewatering process is prone to the induction of the additional deformation of the retaining structure around the foundation excavation and the unloading effect, such as ground settlement around the foundation excavation, and even affects the construction safety and the stability of the surrounding environment. Based on the foundation excavation project of Hongqiao Station of Nanjing Subway Line 5, a three-dimensional finite element model considering the creep characteristics of soil was established based on the combination of field monitoring data and numerical simulation. The additional deformation characteristics of the retaining structure, the redistribution law of internal force, and the spatial distribution characteristics of the adjacent surface settlement caused by pre-dewatering under the condition of suspended waterproof curtain were revealed. The nonlinear influence of pre-dewatering depth on the unloading effect was summarized.

Keywords: foundation excavation; waterproof curtain; precipitation; monitoring; simulation

0 引言

基坑预降水引发的卸荷效应随降水深度增大呈显著非线性增强趋势, 其引发的围护体系力学响应失稳与地层沉降控制难题已成为制约基坑工程安全控制迫切需要解决的关键技术问题^[1-3]。郑刚等^[4]对天津地铁3号线进行了现场预降水试验和

监测, 研究表明在基坑开挖前进行预降水, 地下连续墙会产生较大位移, 并会导致地面和建筑物产生沉降。曾超峰等^[5]针对较大基坑土方开挖前预降水对支护墙变形的影响进行了研究, 并结合数值模拟研究了基坑宽度对围护墙变形的影响规律。薛秀丽等^[6]研究了不同基坑宽度和预降水深度条件下被动区土压力和地基土水平向基床系数随深度的分布规律。刘文杰等^[7]以实际工程为例, 总结了基坑预降水试验对邻近地铁隧道影响的监测结果。

* 上海隧道工程有限公司科研项目(2021-SK-21)

[作者简介] 周游, 高级工程师, E-mail: 1600805773@qq.com

[收稿日期] 2025-01-22

安少楠^[8]结合基坑开挖前的现场抽水试验和监测数据,优化了基坑降水方案。罗志华^[9]以上海某基坑工程为例,证实了预降水高水位引起的围护结构变形可能超过开挖阶段产生的变形。张敏超^[10]利用数值模拟探究了预降水对悬挂式止水帷幕基坑内土层孔隙水压力的影响规律,揭示了地下水降深和周边潜水位变化规律,除了基坑止水帷幕影响预降水卸荷效应外,场地土性质、支护结构形式、预降水深度等因素都会影响基坑的预降水效应。张裕等^[11]研究了富水砂层深基坑降水开挖对邻近综合管廊的影响,得出了基坑分步降水开挖可有效控制地表与管廊沉降的结论。工程实践表明,针对悬挂式止水帷幕基坑预降水的认识有待进一步深化。

本文以南京地铁5号线虹桥站基坑工程为背景,开展基坑预降水现场监测,并利用数值模拟开展地铁基坑预降水工况的模拟分析。

1 工程概况

南京地铁5号线虹桥站为地下2层岛式车站。车站标准段基坑总长219m、宽18.5m、深8.76m。场地地下水主要是浅部松散层中的孔隙潜水,潜水含水层由杂填土、粉砂、粉土、淤泥质粉质黏土和粉质黏土为相对隔水层。场地孔隙潜水稳定水位埋深0.80~2.70m。建设场地周边环境监测点布置如图1所示。

基坑支护结构采用800mm厚地下连续墙,基坑标准段设置4道支撑,第1道采用钢筋混凝土支撑,

其余采用钢支撑。标准段地下连续墙嵌固深度19m,墙底分别进入淤泥质粉质黏土层、粉土层。支护结构及土层情况如图2所示。受场地含水层分布影响,基坑东侧的江苏省总工会和西侧的南京饭店标准段中部地下连续墙墙底位于粉土层,形成悬挂式止水帷幕,基坑未形成全封闭止水系统。

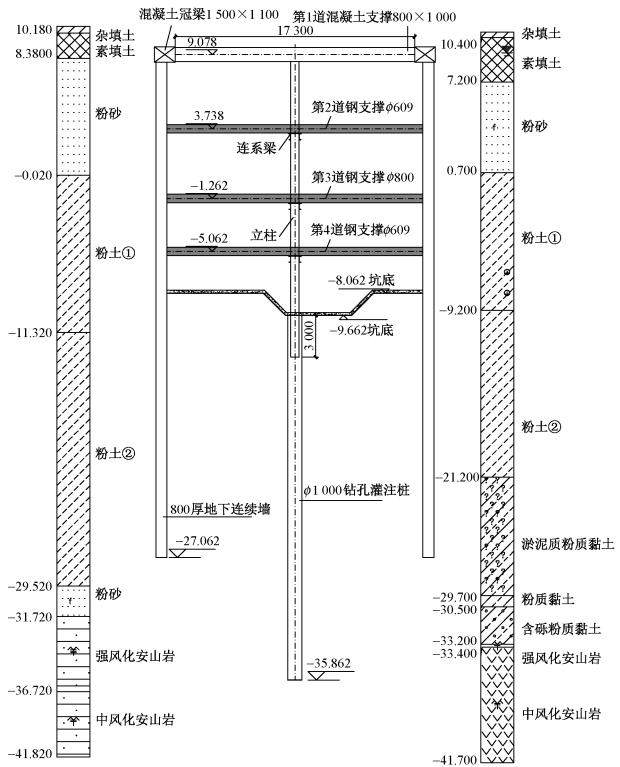


图2 基坑支护结构与降水井
Fig.2 Support structure of foundation excavation and dewatering well

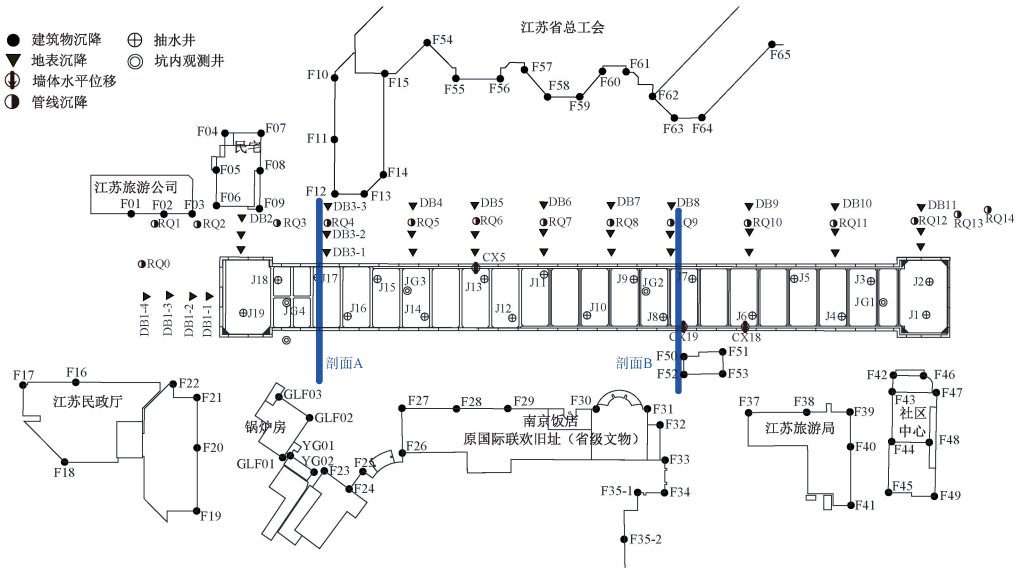


图1 基坑周边环境及监测点布置
Fig.1 Surrounding environment of foundation excavation and monitoring points layout

2 基坑预降水数值模拟

2.1 有限元计算模型

采用 PLAXIS 2D 有限元软件进行数值模拟,由于基坑长条状的几何特性,选择平面应变有限元模型进行分析。由于场地地质条件的差异,选择图 1 中剖面 A 和剖面 B 两个典型剖面建立基坑预降水有限元计算模型,剖面 A 和剖面 B 对应的地下连续墙水平位移测点分别为图 1 中的 ZQT4 和 ZQT18。计算模型如图 3 所示。

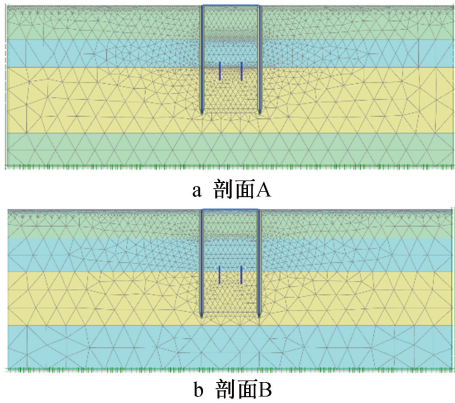


图 3 有限元模型剖面

Fig.3 Section of finite element models

采用 SSC 模型描述土的固结蠕变行为。为合理选用模型参数,采用全自动气压固结仪对场地中的粉土和粉砂进行固结蠕变试验,获得土的压缩指数 C_c 、回弹指数 C_s 和不同固结压力下的次固结系数 C_a 。SSC 模型中的修正压缩指数 λ^* 、修正回弹指

数 κ^* 和修正蠕变指数 μ^* 根据固结蠕变试验获得的 C_c, C_s, C_a 值确定。土层计算参数如表 1 所示,支护结构计算参数如表 2 所示。

基坑宽度取两侧地下连续墙的轴线间距 19.3m,计算模型的基坑外宽度取 5m。左、右边界为法向固定,模型底部为完全固定,模型顶部为自由边界。左、右两侧为定水头边界,底面为隔水边界。地下连续墙和支撑采用板单元模拟,按弹性材料分析。场地土与地下连续墙采用界面单元模拟,接触界面的强度折减参数 R_{inter} 为 0.7。支撑的抗弯刚度和抗压刚度根据支撑设置间距换算确定。为满足基坑开挖对降水深度的要求,在基坑内部布置抽水井,抽水井滤管布置在-25.000~-19.000m 处,采用抽水井对降水过程进行模拟。采用稳态地下水渗流计算基坑预降水诱发的地下水流场。

根据基坑支护结构施工工况、降水工况及预降水实际降水深度,2 个典型基坑剖面的计算步骤如表 3 所示。剖面 B 坑内水位降至-12.600m 时,地下水渗流场如图 4 所示。

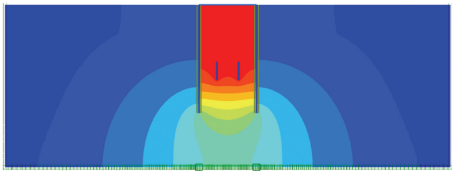


图 4 剖面 B 地下水渗流场

Fig.4 Groundwater seepage field of section B

表 1 土层计算参数

Table 1 Calculation parameters of soil

土层	重度 $\gamma/$ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	有效黏 聚力 c'/kPa	有效内摩擦角 $\varphi'/(^{\circ})$	孔隙比	渗透系数/ ($\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$)	卸载再加载 泊松比 v_{ur}	修正压缩 指数 λ^*	修正回弹 指数 κ^*	修正蠕变 指数 μ^*
粉砂	19.0	7.9	31.8	0.724	0.432 0	0.29	0.022	0.006	0.000 50
粉土①	18.1	3.5	40.2	0.940	0.043 2	0.30	0.026	0.007	0.000 65
粉土②	18.1	5.2	36.3	0.924	0.043 2	0.30	0.026	0.007	0.000 65

表 2 支护结构计算参数

Table 2 Calculation parameters of support structure

结构体	重度/($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量/MPa	泊松比	轴向刚度/($\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$)	抗弯刚度/($\text{MPa} \cdot \text{m}^{-1}$)
地下连续墙	25.0	35×10^3	0.15	28.0×10^6	1.49×10^3
混凝土支撑	26.9	35×10^3	0.15	38.5×10^5	3.88×10^2

表 3 数值模拟计算步骤

Table 3 Calculation steps of simulation

计算步骤	施工工况	数值模拟内容(剖面 A)	数值模拟内容(剖面 B)
1	初始阶段	初始地应力平衡	
2	地下连续墙和支撑施工	设置地下连续墙及首道支撑(1d)	
3	第 1 层降水	水位降至-11.200m	水位降至-8.600m
4	第 2 层降水	水位降至-17.150m	水位降至-12.600m

2.2 数值模型参数校准

利用有限元数值模拟与现场实测结果进行对比,从而检验参数选取的合理性,如图 5 所示。地表沉降和地下连续墙水平位移的模拟值和实测值在分布规律上相似,但模拟值偏大。数值模拟值大于实测值,说明有限元计算中土体的刚度值设置偏小,试验得到的 λ^* 和 κ^* 偏大,分析原因可能为试样在采取、搬运和试验过程中被扰动,试样被扰动得到的 λ^* 和 κ^* 不能真实反映现场原状土的压缩特性和卸荷回弹特性。为使有限元数值模拟结果能合理反映基坑的预降水效应,通过数值模拟计算结果与现场监测数据的对比和反分析确定有限元修正计算参数,有限元修正压缩指数 $\bar{\lambda}^*$ 为 $0.5\lambda^*$,有限元修正回弹指数 $\bar{\kappa}^*$ 为 $0.5\kappa^*$,后续有限元计算分析均采用 $\bar{\lambda}^*$ 和 $\bar{\kappa}^*$ 进行计算。

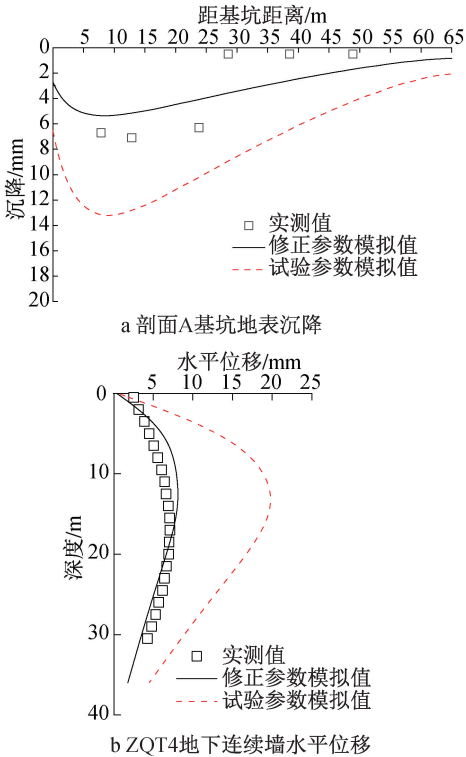


图 5 数值模拟参数校准

Fig. 5 Simulation parameters calibration

3 数值模拟结果分析

3.1 支护结构水平位移

基坑预降水导致地下连续墙两侧水土压力不平衡,压力差作用下地下连续墙产生向坑内的位移,如图 6 所示。地下连续墙产生向坑内的位移,由于墙顶设置了混凝土支撑,墙顶位移受到支撑约束,地下连续墙侧向位移呈鼓腹形分布,地下连续墙水平位移的数值模拟结果与实测结果沿深度分

布形态相似,ZQT4 和 ZQT18 水平位移的实测最大值分别为 8.1mm 和 8.4mm。

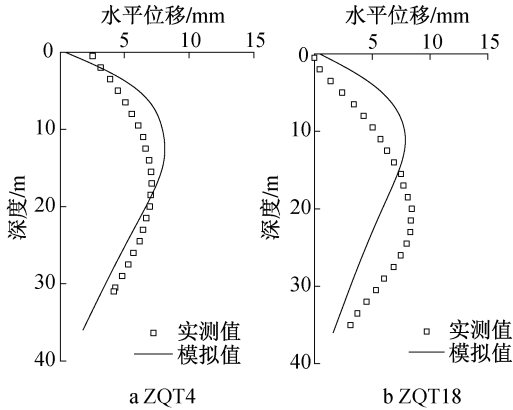


图 6 地下连续墙水平位移实测与数值模拟结果对比
Fig. 6 Comparison between field and simulation of diaphragm wall measurement

3.2 周围地表沉降

预降水引起坑内外水位下降,导致土体产生固结变形,地下连续墙侧向位移同样引起坑外土体变形,两者叠加造成坑外地表沉降。预降水诱发的基坑周边沉降随远离基坑而减小,如图 7 所示。剖面 A 坑外最大地表沉降监测值在距离基坑 12.8m 处,为 7.1mm,距离基坑 5~25m 范围内的沉降明显,而距离基坑 30m 处,预降水引起地表沉降很小。剖面 B 坑外最大地表沉降监测值在距基坑 13m 处,为 4.5mm。

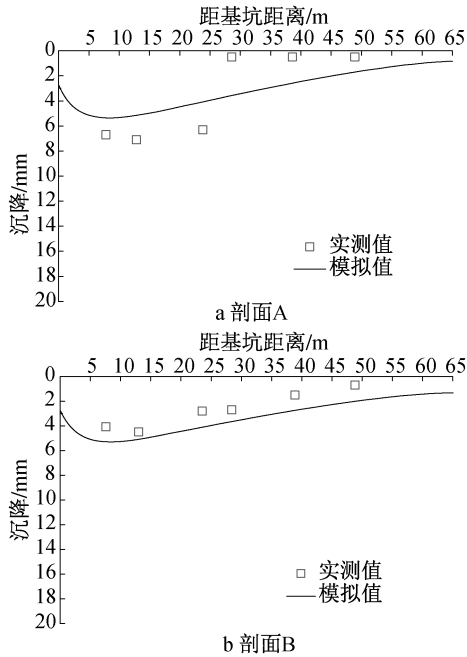


图 7 地表沉降实测与数值模拟结果对比
Fig. 7 Comparison between field measurement and simulation of surface settlement

3.3 支护结构附加内力

基坑降水造成基坑产生附加变形,也引起支护结构产生附加内力,在地下连续墙与支撑连接处产生了附加弯矩和剪力,最大弯矩为 258kN·m,最大剪力为 231.9kN,地下连续墙产生 244kN·m 附加弯矩。地下连续墙轴力沿深度由小变大的分布特性,表明地下连续墙侧面存在负摩阻力。基坑降水对支护结构体系产生了负面影响,给基坑工程施工带来安全隐患。

4 预降水深度对基坑的影响

为更好地探究基坑预降水卸荷效应的影响,以单一粉土层建立有限元模型,探究预降水深度对基坑的影响。

4.1 坑外地表沉降

不同坑内降水深度下坑外地表沉降分布曲线如图 8 所示。随着降水深度的增加,坑外地表沉降逐渐增大。地表沉降曲线呈凹槽形,与基坑开挖引起的地表沉降分布形态相似,与坑外地下水降深的分布形态不一致。地下水降深最大值在基坑边缘处,而地表沉降最大值在距离基坑约 11m 处。由此可知,坑外地表沉降由两部分组成,一部分为坑外地下水位下降引起的土体变形,另一部分为地下连续墙侧移导致的坑外土体变形。值得注意的是,坑内停止降水后,地下水位恢复,坑外地表沉降也随之减小。水位恢复 20d 后,坑外地表沉降分布曲线形态没有明显变化,但坑外最大地表沉降减小了 43%,说明基坑预降水使土体发生不可恢复的塑性变形。

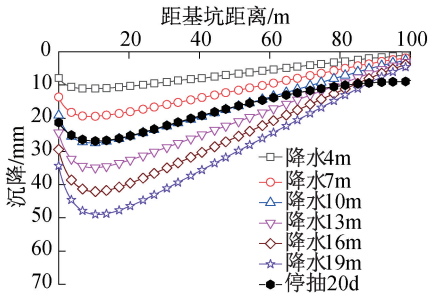


图 8 坑外地表沉降

Fig. 8 Surface settlement outside the foundation excavation

4.2 坑内中心沉降

不同降水深度下坑内中心地表沉降随深度的分布曲线如图 9 所示,随着降深的增加,坑内中心地表沉降逐渐增大。坑内中心沉降最大值在地表处。

由图 8,9 可知,坑内最大地表沉降为坑外最大地表沉降的 1.4 倍左右。由此可知,由于地下连续墙发挥了阻隔部分坑内外地下水流动的作用,导致

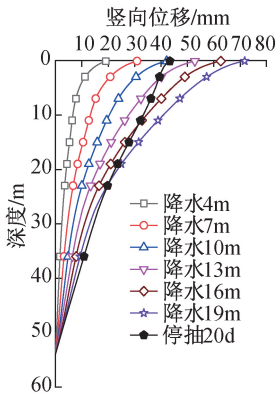


图 9 坑内中心沉降

Fig. 9 Surface settlement in the foundation excavation

抽水并抽水过程中,坑内外的降深分布不同,因此坑内外降水导致的地表沉降也不同。

4.3 地下连续墙水平位移

地下连续墙水平位移同样随着坑内地下水位的下降而不断增大,分布形式沿深度方向呈内凹型分布模式,地下连续墙最大水平位移发生在距离地面 1/3 地下连续墙长度处,如图 10 所示。地下水位恢复 20d 后,地下连续墙的水平位移逐渐恢复,但水平位移最大值减小了 52%,说明地下水位恢复后,地下连续墙发生回弹变形。

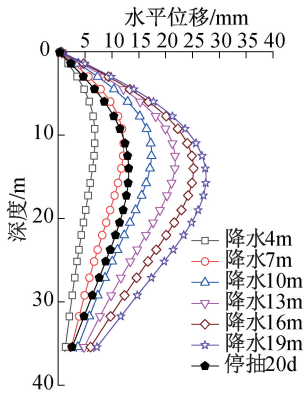


图 10 地下连续墙水平位移

Fig. 10 Horizontal displacement of diaphragm wall

4.4 支护结构内力

地下连续墙轴力、剪力、弯矩沿深度方向的分布曲线如图 11 所示。由图 11 可知,地下连续墙的内力随着预降水深度的增加而增大,最大轴力发生在距离地面 2/3 地下连续墙长度处。因在地下连续墙顶端设置了刚性支撑,使得地下连续墙与支撑连接处产生了最大剪力和最大弯矩。与地下连续墙变形特性相似,随着地下水位恢复,地下连续墙内外两侧压力差减小,其内力也随之减小。最大轴力、最大剪力和最大弯矩分别减小了 38.0%,

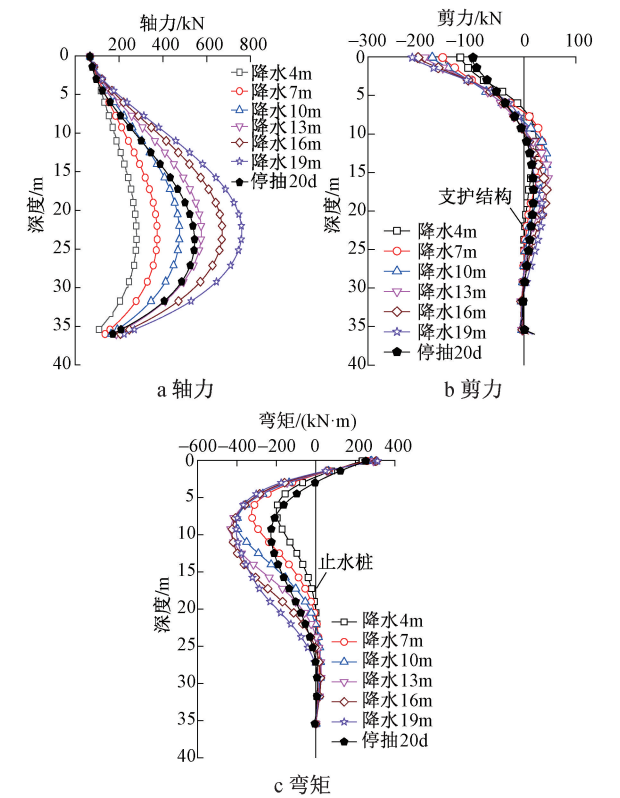


图 11 地下连续墙内力分布

Fig. 11 Internal forces distribution of diaphragm wall

54.5%,47.2%。

5 地下连续墙入土深度对基坑的影响

地下连续墙入土深度与坑外地表沉降、坑外地下水降深的关系如图 12 所示。随着地下连续墙入土深度的增加,可逐渐提高地下连续墙抗侧向变形的能力,在减少地下连续墙侧向水平位移的同时,减少坑外地表沉降。

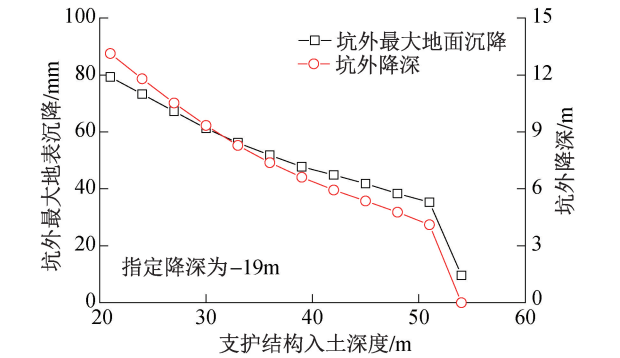


图 12 支护结构入土深度对预降水效应的影响

Fig. 12 Influence of soil penetration depth of support structure on pre-dewatering effect

当地下连续墙嵌固深度未达到 54m 时,地下连续墙形成了悬挂式止水帷幕,地下连续墙入土深度直接影响预降水引起的地下水流动。坑外地下水降深与最大地表沉降有良好的一致性。随着地下

连续墙入土深度的增加,对坑外地下水的阻隔作用增强,坑外最大地表沉降随之减小,坑外地下水降深和地表沉降的减小速率减小。工程实践中,在兼顾经济效益和保证坑外沉降控制要求的前提下,可适当增加止水结构的长度,以减少基坑的预降水效应,建议止水结构入土深度取 2/3 倍地下水流动区域厚度为宜。

6 结语

1) 现场实测与数值模拟值对比发现,地表沉降和地下连续墙水平位移在分布形态上具有相似的规律性,但数值模拟值偏大。通过现场监测数据反分析表明,当 $\bar{\lambda}^* = 0.5\lambda^*$ 和 $\bar{\kappa}^* = 0.5\kappa^*$ 时,模拟计算值与实测值在数值上更接近。

2) 基坑预降水引起支护结构产生附加内力,表明地下连续墙侧面存在负摩阻力,对支护结构体系产生了负面影响,给基坑施工带来安全隐患。

3) 随着降水深度的增加,坑外地表沉降、支护结构内力逐渐增大,水位恢复后,坑外地表沉降分布曲线、支护结构内力曲线形态没有明显变化,但数值未完全恢复,说明基坑预降水造成土体发生不可恢复的塑性变形。

4) 在兼顾经济效益和保证坑外沉降控制要求的前提下,可适当增加止水结构的长度,以减小基坑的预降水效应,建议止水结构入土深度取 2/3 倍地下水流动区域厚度为宜。

参考文献:

[1] 毕志华,贾兴隆,赵善乐,等. 富水砂卵石地层地铁站基坑降水优化研究[J]. 施工技术(中英文),2022,51(15):94-98.
BI Z H, JIA X L, ZHAO S L, et al. Optimization of foundation excavation dewatering for subway station in water-rich sandy cobble stratum [J]. Construction technology, 2022,51(15): 94-98.

[2] 徐进,王旭东,陈征. 考虑潜水的三维地下水流半解析数值方法[J]. 岩土工程学报,2015,37(12):2290-2295.
XU J, WANG X D, CHEN Z. Semi-analytical numerical method for three-dimensional groundwater flow considering water-table response [J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2015,37(12): 2286-2291.

[3] 罗利,付华永,陈奇,等. 临海富水地层地铁隧道施工降水试验研究[J]. 施工技术(中英文),2023,52(24):136-142.
LUO L, FU H Y, CHEN Q, et al. Analysis of dewatering test during construction of subway tunnels in coastal water-rich stratum[J]. Construction technology, 2023,52(24): 136-142.

[4] 郑刚,曾超峰. 基坑开挖前潜水降水引起的地下连续墙侧移研究[J]. 岩土工程学报,2013,35(12):2153-2163.
ZHENG G, ZENG C F. Lateral displacement of diaphragm wall by dewatering of phreatic water before excavation[J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2013, 35(12): 2153-2163.



图 10 塔式起重机拆除
Fig. 10 Tower crane dismantling

及结构板抗冲切能力进行分析,结合现场实施情况,得出以下结论。

1)在多层框架结构楼板上行驶大型汽车式起重机时,采用回顶体系增强结构安全性是可行的。

2)楼板及回顶架体均满足承载力及变形要求。吊装作业时,楼板抗冲切能力满足要求。

3)在考虑回顶体系与结构主体协同受力下,充分发挥原有结构承载能力,回顶架体可从非筏板层进行回顶,减少架体材料投入,从而降低施工成本。

参考文献:

[1] 李朝来,宋志强,缪应璟,等. 基坑内支撑切割块水平转运与结构楼板协同承载计算分析[J]. 建筑结构,2023,53(S2): 2543-2547.
LI C L,SONG Z Q,MIAO Y J, et al. Calculation and analysis of collaborative bearing capacity of structural floors for horizontal transportation of support cutting blocks in the foundation pit[J]. Building structure,2023,53(S2):2543-2547.

[2] 林泓志,侯文崎,秦学锋,等. 大跨度地下无柱车站临时支撑

卸载方案优化与现场监测[J]. 建筑结构学报,2023,44(3): 294-302.

LIN H Z,HOU W Q,QIN X F,et al. Optimization for temporary support unloading scheme and on-site monitoring of large-span column-free underground station [J]. Journal of building structures,2023,44(3):294-302.

[3] 刘林钊,谢显鹏,满宁宁,等. 施工电梯基础与地下室顶板一体化深化设计思路与施工要点分析[J]. 科技创新与应用,2024,14(6):112-115.

LIU L Z,XIE X P,MAN N N,et al. Analysis of the integration of the construction elevator foundation and the basement roof, deepening the design ideas and construction points [J]. Technology innovation and application,2024,14(6):112-115.

[4] 宋志强,刘洋. 顶部行走履带吊的既有地下结构与支撑架协同承载计算[J]. 建筑结构,2023,53(S2):1623-1630.

SONG Z Q,LIU Y. Calculation of cooperative bearing capacity of existing underground structure and support frame of crawler crane with top walking [J]. Building structure, 2023, 53 (S2): 1623-1630.

[5] 揭志祥,叶国新,于立海,等. 复杂工况下多台汽车吊行走楼板加固支撑研究[J]. 钢结构,2014,29(7):70-72.

JIE Z X,YE G X,YU L H,et al. Research on the reinforced floor slabs for several mobile cranes to pass through under complicated conditions[J]. Steel construction,2014,29(7):70-72.

[6] 胡长明,赵云波,汪杰,等. 模板支撑体系与混凝土楼板协同作用的有限元分析[J]. 工业建筑,2014,44(5):106-110.

HU C M,ZHAO Y B,WANG G,et al. Finite element analysis of cooperative effects of formwork-supporting system and concrete floors[J]. Industrial construction,2014,44(5):106-110.

(上接第 39 页)

[5] 曾超峰,郑刚,薛秀丽. 大面积基坑开挖前预降水对支护墙变形的影响研究[J]. 岩土工程学报,2017,39(6):1012-1021.

ZENG C F, ZHENG G, XUE X L. Wall deflection induced by pre-excavation dewatering in large-scale excavations[J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2017, 39(6): 1012-1021.

[6] 薛秀丽,李淼坤,曾超峰. 开挖前降水作用下基坑围挡结构-地层相互作用机制[J]. 河海大学学报(自然科学版),2019, 47(5):440-446.

XUE X L, LI M K, ZENG C F. Interaction mechanism between retaining wall and soil under pre-excavation dewatering [J]. Journal of Hohai University (natural sciences), 2019,47(5): 440-446.

[7] 刘文杰,何旭峰. 基坑预降水试验及其对地铁隧道的影响分析[J]. 工程建设与设计,2018(23):74-75,78.

LIU W J, HE X F. Pre-dewatering test of foundation pit and the influence on subway tunnel [J]. Construction & design for engineering, 2018(23): 74-75,78.

[8] 安少楠. 软土地区地铁深基坑降水与地表沉降规律分析研究[D]. 石家庄:石家庄铁道大学,2019.

AN S N. Analysis and research on dewatering and surface

settlement of metro deep foundation pit in soft soil area [D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2019.

[9] 罗志华. 基坑开挖前降水对围护变形影响分析[J]. 水利与建筑工程学报,2021,19(2):185-190.

LUO Z H. Analysis of dewatering before foundation pit excavation influence on enclosure deformation [J]. Journal of water resources and architectural engineering,2021,19(2):185-190.

[10] 张敏超. 潜水区悬挂式帷幕基坑开挖前预降水引起的变形特性研究[D]. 重庆:重庆大学,2019.

ZHANG M C. Study on deformation characteristics by pre-dewatering before excavation of foundation pit with suspended impervious curtain in phreatic aquifer [D]. Chongqing: Chongqing University, 2019.

[11] 张裕,王俊鹏,钟伟慈,等. 富水砂层深基坑降水开挖对邻近综合管廊的影响[J]. 施工技术(中英文),2024,53(9):73-78.

ZHANG Y, WANG J P, ZHONG W C, et al. Influence of dewatering excavation of deep foundation excavation in water-rich sand layer on adjacent comprehensive pipe gallery [J]. Construction technology,2024,53(9):73-78.