

DOI: 10.7672/sgjs2025070071

复杂环境下软土基坑分区开挖数值模拟及监测分析*

周云军¹, 丁盼²

(1. 绿城房地产建设管理集团有限公司, 浙江 杭州 310000; 2. 浙江理工大学, 浙江 杭州 310018)

[摘要] 城市复杂环境下软土基坑分区施工策略及开挖顺序对基坑空间变形规律和施工安全性具有显著影响。基于杭州某临水西岸公园基坑工程, 运用 ABAQUS 数值分析软件构建三维实体非线性有限元模型, 探讨了基坑开挖不同施工顺序对其侧向变形的影响规律。根据数值分析结果并结合工程现场情况, 制定具体的施工策略, 并对开挖过程进行全程监测, 评估复杂环境下基坑分区开挖方式对其变形的影响。研究结果表明, 合理的分区开挖方式可以显著减小基坑变形, 而不合理的施工策略则会增加变形控制和支撑轴力的负担。建议采用分区开挖、优化施工顺序、减少基坑暴露时间等方法, 在施工过程中要加强监测, 及时发现和处理问题, 以减轻施工对基坑自身变形及周边环境的影响。

[关键词] 基坑; 软土; 分区开挖; 数值模拟; 变形; 监测

[中图分类号] TU753.1

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2025)07-0071-06

Numerical Simulation and Monitoring Analysis of Zonal Excavation of Soft Soil Foundation Excavation in Complex Environments

ZHOU Yunjun¹, DING Pan²

(1. Greentown Real Estate Construction & Management Group Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang 310000, China;

2. Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou, Zhejiang 310018, China)

Abstract: The construction strategy and excavation sequence of soft soil foundation excavation in complex urban environments have a significant impact on the spatial deformation law and construction safety of foundation excavation. Based on the foundation excavation project of a waterside West Bank Park in the City of Hangzhou, a three-dimensional solid nonlinear finite element model was constructed by using ABAQUS numerical analysis software. And the influence of different construction sequences of excavation on its lateral deformation was discussed. A specific construction strategy was formulated in accordance with the results of the numerical analysis and the actual situation of the project site. The whole process of excavation was monitored to evaluate the influence of the excavation method on the deformation of the foundation excavation in the complex environment. The results indicate that a reasonable partition excavation method can significantly reduce the deformation of the foundation excavation, while an unreasonable construction strategy will increase the burden of both deformation control and support axial force. To reduce the influence of construction on the deformation of the foundation excavation and the surrounding environment, it is recommended to adopt the methods of partitioned excavation, optimized construction sequence, and reduced exposure time of the foundation excavation. In the construction process, monitoring should be strengthened, and problems should be found and dealt with in time to reduce the influence of construction on the deformation of the foundation excavation and the surrounding environment.

Keywords: foundation excavation; soft soil; zonal excavation; simulation; deformation; monitoring

0 引言

近年来,随着我国建筑行业及城市地下空间的飞速发展,新建基坑面临的问题日益增多,包括复杂的周边环境以及深厚淤泥等不良地质条件等,为

* 国家自然科学基金(52408405)

[作者简介] 周云军,高级工程师,国家一级注册建造师,国家一级注册造价工程师, E-mail: zhouyunjun@163.com

[收稿日期] 2024-10-20

基坑施工带来巨大挑战。针对这些问题,众多专家学者开展了广泛而深入的研究^[1-2]。竹相等^[3]针对杭州地区某深厚软土基坑工程,考虑复杂周边环境、高承压水位、深厚淤泥质土层等因素,提出采用“分区顺作+围护桩+支撑”的方案进行基坑支护结构设计。刘合寨等^[4]通过上海某基坑工程实例,分析研究了大面积不规则软土深基坑支护的重点和难点问题,提出应用“时空效应”原理,采用分区开挖土方的方式对基坑变形进行控制,研究结果表明通过分区开挖方式可以使基坑支护体系受力更加合理。刘建航等^[5]和范益群等^[6]也都提出了基坑变形的时空效应原理,认为施工措施的施作时间和顺序对基坑变形有明显影响,强调控制基坑变形要重视分层、分区或对称。

数值仿真软件的运用可以有效协助复杂环境下软土基坑的施工设计。张娇等^[7]针对上海市邻近既有隧道的某深基坑工程,通过 PLAXIS3D 有限元软件建立三维数值模型,分析了深基坑分区施工开挖方案对基坑邻近隧道变形及受力的影响。张炳焜等^[8]利用 ABAQUS 有限元软件分析了不同堆载大小和作用位置对基坑变形和稳定性的影响,展示了数值仿真软件在工程设计中的指导价值。吴胜辉等^[9]通过数值软件在开挖前对深基坑的受力进行模拟,并通过在开挖过程中布置大量测点的方式对开挖全过程进行监测,表明数值模拟分析结果可用于指导施工。

本文以杭州市江河汇某综合体基坑项目为例,结合 ABAQUS 数值仿真和现场监测数据,研究了分区开挖方式对基坑变形的影响。该项目施工环境复杂,包括多个暗埋地下管线,并且邻近河流和道路。为减小开挖施工对基坑变形的影响,首先通过数值仿真结合工程现场情况确定了最优分区开挖顺序,并全程监控开挖过程。施工过程中采用了若干基坑变形控制措施,包括分块开挖、优化施工部署、减少基坑暴露时间以及增设围护结构等。结果表明,这些措施有效控制了基坑施工过程变形,可为类似工程设计与施工提供参考。

1 工程概况

1.1 项目概况

杭州江河汇某城市综合体西岸公园基坑工程位于杭州市钱塘江与京杭大运河交汇处,基坑划分为地下车库和新塘河箱涵整体围护段两部分,整体呈矩形,基坑总面积约 12 510m²,周长 500m,地下车库基坑深度 6.5m,新塘河深度 8.5m。基坑周边环境情况复杂,东侧红线外为空地(红线外一定距

离为京杭大运河河堤),南侧为空地 and 泵站,西侧新塘河以外为一污水干管新迁改管线和新鸿基用地,北侧红线外为地铁 9 号线区间隧道(北侧地面邻近钱江路),场地内存在多条地下管线(包括污水管、电力管线和通信管线),基坑周边环境如图 1 所示。

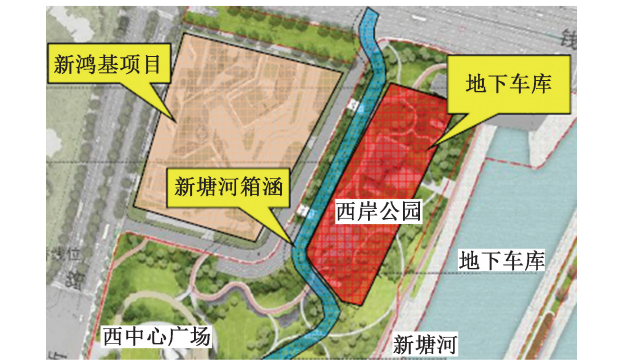


图 1 基坑周边环境

Fig. 1 Surrounding environment of the foundation excavation

1.2 工程地质条件

根据勘察报告,拟建场地岩土层在勘探深度范围内可分为 9 个工程地质层,共计 16 个亚层。基坑开挖影响深度范围内的地基土主要为杂填土、砂质粉土、粉砂等。具体土层物理力学性质如表 1 所示。

表 1 土层参数

Table 1 Characteristic parameters of soil

序号	土层名称	重度/ (kN·m ⁻³)	强度指标		渗透系数 K/ (cm·s ⁻¹)
			黏聚力 c/kPa	内摩擦角 φ/(°)	
① ₁	杂填土	18.0	8.0	10.0	3.0×10 ⁻⁴
② ₄	砂质粉土	19.3	7.0	26.0	1.0×10 ⁻⁴
③ ₄	砂质粉土	19.2	7.0	28.0	3.0×10 ⁻⁴
③ ₅	粉砂	19.6	5.0	32.0	1.5×10 ⁻³
③ ₇	砂质粉土	19.6	7.0	28.0	2.0×10 ⁻⁴

1.3 基坑支护结构设计方案

如何确定合理的基坑支护结构是基坑开挖设计过程中必须慎重解决的问题。根据该基坑工程土质、开挖深度以及场地条件情况,结合类似工程经验,将地下车库和新塘河箱涵整体围护段基坑设置为分坑 1、分坑 2 和分坑 3 三大部分,如图 2 所示。分坑 1 面积 9 670m²,开挖深度 6.5m;分坑 2 面积 2 500m²,开挖深度 6.5m;分坑 3 面积 340m²,开挖深度 8.5m。围护体系采用 φ800@1 100 钻孔灌注桩结合 2 道钢筋混凝土内支撑的形式,止水帷幕采用 φ850@1 200 三轴搅拌桩止水帷幕,基坑分区及支撑如图 2 所示。基坑土方开挖分 3 层,第 1 层开挖到第 1 层支撑底,第 2 层开挖到第 2 层支撑底,第 3 层开挖到基坑底。为减小基坑开挖对周边环境造

成的影响,计划采用分区开挖方式施工。

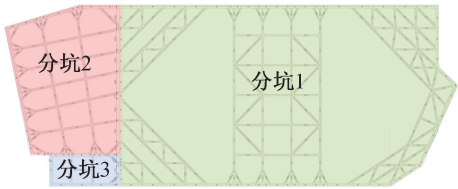


图2 基坑分区情况

Fig. 2 Division of foundation excavation

2 有限元分析与工程方案选定

为明确不同分区开挖顺序对基坑变形和安全性的影响,找到合适的开挖方案,本项目首先通过有限元软件对实际工况进行精细化仿真模拟,根据分析结果结合工程实际确定基坑开挖方案。

2.1 分析模型

首先根据基坑周边环境情况,确定三维模型尺寸以减小边界条件对计算结果的影响。为减少边界效应,模型水平和竖向尺寸均取基坑尺寸的3倍以上^[10]。本次计算模型东西方向长度600m,南北方向长度350m,深度取50m。在基坑土体附近以及围护结构处,网格局部加密。模拟分析对象完整包含了分坑1,2,3。所建立的基坑有限元模型如图3所示。

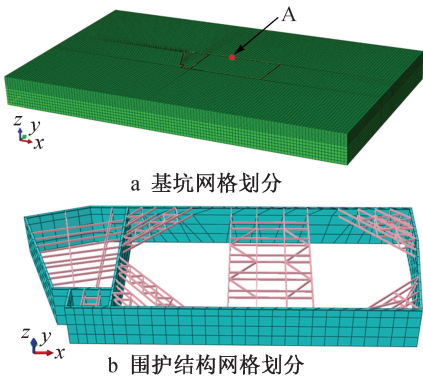


图3 有限元几何模型

Fig. 3 Finite element geometric model

为简化计算,模型采用如下假定。

1) 同一层土体视为均质且各向同性的,采用修正 Mohr-Coulomb 本构模型进行模拟,参数采用表 1

中数据。

2) 基坑围护结构、内支撑等采用弹性模型进行模拟。采用 3D 实体单元模拟围护结构,采用梁单元模拟内支撑。

3) 模型的位移边界条件为:侧边约束水平位移;底部边界采用固定约束,约束其竖向及水平向位移;地表为自由边界。

建模过程中,通过生死单元“杀死”和“激活”步骤来实现基坑土层开挖,具体描述为:首先一次性建立基坑的整体模型,然后根据施工阶段的划分将单元、边界条件等划分为不同的施工步,再按施工步骤依次“激活”相应施工步内的支撑构件,添加对应阶段的施工荷载(包括边界条件的改变),并“杀死”相应施工步内要挖掉的土层,最终实现整个施工过程的力学分析。有限元模拟过程中,定义多个分析步,不同分析步内可以添加不同的位移、荷载条件,以此模拟基坑暴露过程;另外,可通过单次开挖基坑面积的差异来反映基坑开挖的空间效应。

2.2 分析工况

为准确模拟不同分区开挖顺序对其空间变形的影响,本次分析计算采用动态模拟施工过程的方法。主要分析工况包括:工况 1,同时施工分坑 1,2 和 3;工况 2,分坑 1→分坑 2→分坑 3;工况 3,分坑 2→分坑 3→分坑 1。

2.3 结果分析

为分析不同开挖方式对基坑施工的影响,在数值模型计算完毕之后,导出 3 种工况下基坑水平位移云图,如图 4 所示。需要注意的是,为展示基坑沿土层深度方向的云图变化,这里将基坑模型进行了剖解,仅取一侧基坑云图进行展示。进一步提取测点 A 不同深度土体水平位移,并将 3 种工况下数据绘于同一图中,如图 5 所示。

从图 4 中可以看出,无论哪种工况,基坑侧向位移最大位置均发生在基坑边缘,并基本上呈现对称分布;工况 2,3 的水平位移明显小于工况 1 的数据,这表明采取分区开挖方式确实能降低基坑水平位移。

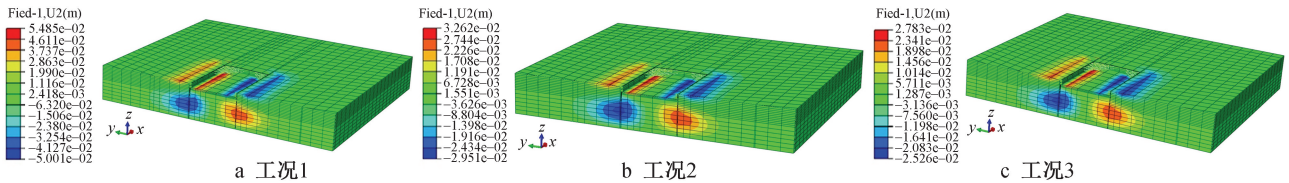


图4 数值计算云图

Fig. 4 Contour maps of numerical calculations

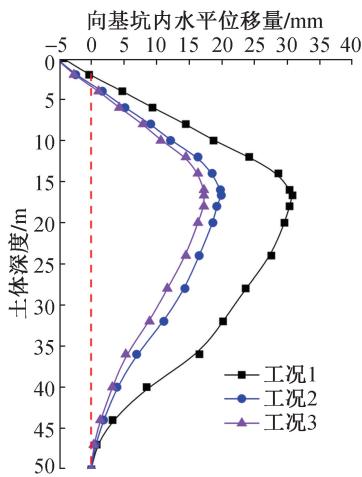


图 5 测点 A 沿深度水平位移

Fig. 5 Horizontal displacement of measurement point A along depth

图 5 给出不同工况下测点 A 沿深度方向的土体水平位移情况,可以看出,深层土体水平位移总体均呈现两端小、中间大的鼓胀形状;通过对比 3 条曲线还能看出,在其他参数不变的情况下,仅改变开挖方式也会导致不同深度水平位移不同。本研究中采用分区开挖的方式基坑水平位移比整体开挖方式小得多,减少量达到 50%;并且采用工况 3 的开挖顺序比工况 2 效果好。

从以上数值分析结果可以得出结论:采取分区开挖方式确实能减少基坑土体水平位移;并且不同的分区开挖顺序也会影响深层土体水平位移变化。

2.4 工程方案选定

根据以上模拟结果,发现按照分坑 2→分坑 3→分坑 1 的施工顺序可以最大限度减小基坑变形,降低基坑支护控制难度;同时结合工程现场实际情况,最终制定本工程施工方案,即基坑开挖按照分坑 2→分坑 3→分坑 1 逐步开挖,上一分坑开挖完毕后,再进行下一分坑开挖。

3 现场监测结果分析

3.1 基坑监测布置

本项目在基坑周边布设大量监测点,监测项目包括:深层土体水平位移、地下水位、地表沉降和水平位移、桩顶沉降以及支撑轴力。限于篇幅,这里仅给出基坑开挖造成侧向变形及支撑轴力监测结果。监测点布置如图 6 所示,其中 ZL 为支撑轴力监测点,CX 为深层土体水平位移监测点。

3.2 深层土体水平位移监测结果

本基坑选取了 17 个水平位移监测点,分布于分坑 1,2,3 周围。这里给出了深层土体水平位移变化

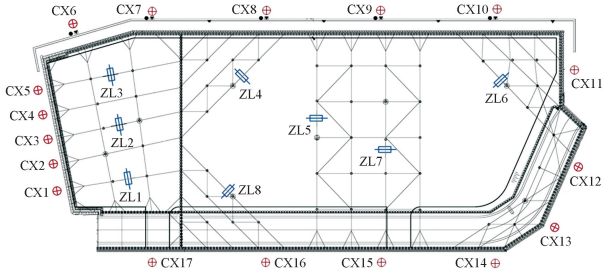


图 6 基坑监测点布置情况

Fig. 6 Layout of monitoring points in the foundation excavation

较大的 6 个测点在不同阶段的开挖曲线(见图 7),具体为测点 CX3,CX7,CX8,CX14,CX15,CX17。图中正值表示向坑内,负值表示向坑外。

从图 7 中可以看出深层土体水平位移的变化规律基本一致。从空间分布上来看,水平位移沿深度的分布基本呈现出典型的鼓胀形曲线,水平位移沿深度的增加而增大;随着基坑开挖,鼓胀形曲线形状也越来越明显;从时间分布上看,基坑开挖一开始,土体水平位移较小,随着开挖的进行,深层土体水平位移逐渐增大,开挖到基坑底时达到最大值。

对比各测点曲线可以发现,最大值发生在测点 CX14,CX15 位置,其中测点 CX15 最大水平位移达到 23.57mm,深度在 7m 处,这主要是因为测点 15 处于分坑 1 的基坑边缘中部位置,此外还在沿河一侧,土层地质较软弱,在土压力作用下容易发生侧向变形。这表明在基坑中部位置处需要引起足够的重视,同时可以通过优化部署,采取增设围护结构等措施控制基坑变形发展。

3.3 支撑轴力监测结果

分坑 1 和 2 钢筋混凝土支撑轴力时程响应曲线如图 8 所示,从图 8a 可以看出,所有监测点的支撑轴力随着时间的增加均呈现一定波动性。分坑 2 中轴力较大的支撑是位于中间位置的支撑 2,轴力值最大达到 2 450kN,这主要是因为基坑中间位置处地下连续墙变形较大,造成支撑产生较大的轴力。此外,可以看出随着基坑开挖的进行,支撑轴力均呈现先增大后减小趋势,这主要归因于下部土体的开挖引起的回弹卸力。

从图 8b 可以看出,位于基坑中间位置的支撑 5 和支撑 7 轴力较大,最大达到 3 120kN,而位于基坑坑角位置处(支撑 4,6,8)的轴力相对偏小,软基地区的“坑角效应”作用较明显,这在一定程度上削弱了坑角处土压力作用在内支撑上的大小。

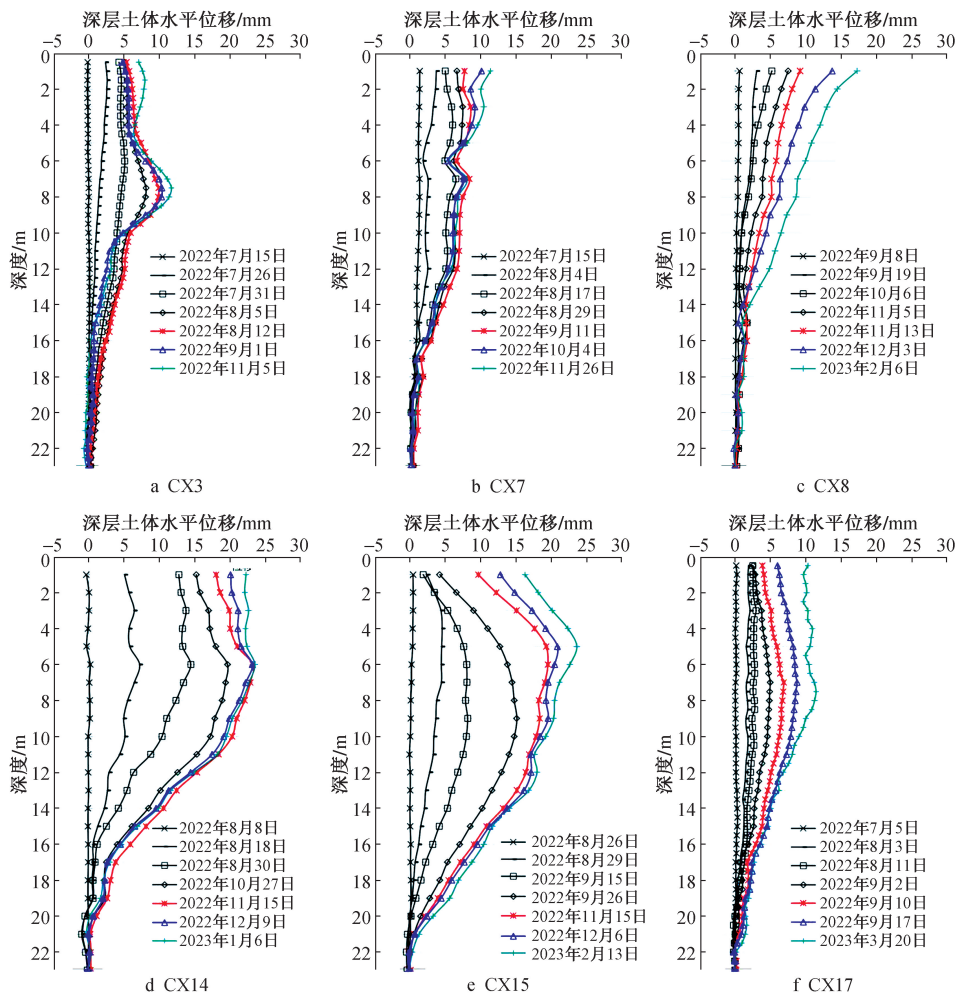


图 7 深层土体水平位移监测数据

Fig. 7 Monitoring data of horizontal displacement

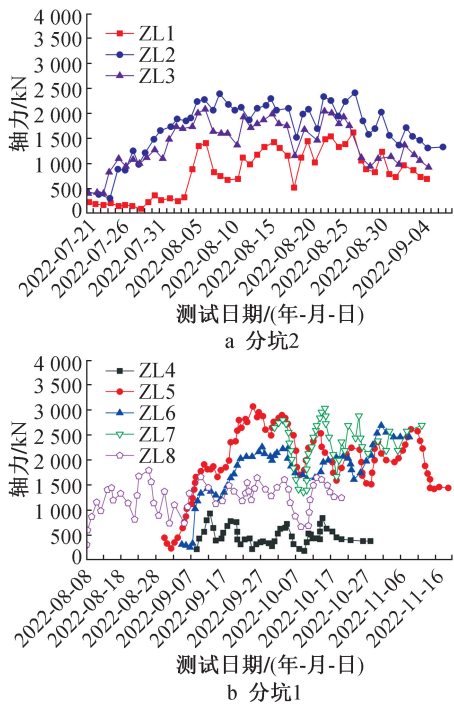


图 8 支撑轴力监测数据

Fig. 8 Monitoring data of axial forces

4 结语

1) 本基坑位于杭州软土地区,周边环境复杂,工程采用分区分层开挖和增设围护结构等措施减小基坑变形。施工过程中临河侧由于基坑暴露时间稍长,导致该侧深层土体位移变化明显。建议复杂环境下基坑开挖必须采取“分区开挖、优化施工顺序、减少基坑暴露时间”等方式,减小基坑一次性开挖暴露面积以及暴露时间。

2) ABAQUS 数值计算结果表明,基坑工程分区分层开挖可以明显减小基坑侧向变形;不同的分区分层开挖顺序也会影响基坑变形大小。实际基坑工程设计和施工前可以借助有限元软件提前进行分析,优化施工部署。

3) 基坑不同深度处土体水平位移和支撑轴力分布规律体现了基坑开挖过程中的空间效应;施工期间要做好监测,密切关注基坑动态变化,同时要做好应急预案。

参考文献:

[1] 张希黔,华建民,黄乐鹏,等. 引领我国超高层建筑高质量发

展的创新施工技术[J]. 施工技术(中英文),2021,50(13):6-19.

ZHANG X Q, HUA J M, HUANG L P, et al. Innovative construction technology leading the high quality development of super high-rise buildings in China[J]. Construction technology, 2021, 50(13):6-19.

[2] 徐日庆,郭忠,丁盼,等. 盾构施工振动对邻近建筑物影响与控制方法研究综述[J]. 隧道建设(中英文),2021,41(S2):14-21.

XU R Q, GUO Z, DING P, et al. Overview on influence of vibration induced by shield construction on adjacent buildings and its control measures[J]. Tunnel construction, 2021,41(S2):14-21.

[3] 竹相,付耀,胡琦. 富阳地区软土深基坑施工问题分析及应对措施[J]. 地基处理,2024,6(S1):85-94.

ZHU X, FU Y, HU Q. Problems and corresponding solutions in construction of soft soil deep foundation pits in Fuyang area[J]. Journal of ground improvement, 2024,6(S1):85-94.

[4] 刘合寨,周元,尤波. 软土地区大面积不规则深基坑支护设计实践与分析[J]. 岩土工程技术,2018,32(4):212-217.

LIU H Z, ZHOU Y, YOU B. Practice and analysis of large area and irregular deep excavation supporting design in soft soil area[J]. Geotechnical engineering technique, 2018, 32(4):212-217.

[5] 刘建航,刘国彬,范益群. 软土基坑工程中时空效应理论与实践(下)[J]. 地下工程与隧道,1999(4):10-14.

LU J H, LU G B, FAN Y Q. Theory and practice of space time effect in soft soil foundation pit engineering (II) [J]. Underground engineering and tunnels, 1999(4):10-14.

[6] 范益群,钟万勰,刘建航. 时空效应理论与软土基坑工程现代设计概念[J]. 清华大学学报(自然科学版),2000,40(S1):49-53.

FAN Y Q, ZHONG W Z, LIU J H. Theory of time-space effect and modern design concepts in soft soil pit engineering [J]. Journal of Tsinghua University (science and technology), 2000 (S1):49-53.

[7] 张娇,王卫东,李靖,等. 分区施工基坑对邻近隧道变形影响的三维有限元分析[J]. 建筑结构,2017,47(2):90-95.

ZHANG J, WANG W D, LI J, et al. Three-dimensional finite element analysis of the impact of zoned excavation on adjacent tunnels[J]. Building structure, 2017,47(2):90-95.

[8] 张炳焜,程世涛,李彦骏. 堆载对排桩支护深基坑稳定性的影响研究[J]. 施工技术(中英文),2024,53(3):65-69.

ZHANG B K, CHENG S T, LI Y J. Study on stability of deep excavation supported by row piles with surcharge [J]. Construction technology, 2024, 53(3):65-69.

[9] 吴胜辉,刘军,李永轩,等. 复杂边界深基坑土方开挖及支护施工综合关键技术[J/OL]. 施工技术(中英文),1-10.

WU S H, LIU J, LI Y X, et al. Comprehensive key technologies for earthwork excavation and support construction of deep foundation excavation[J/OL]. Construction technology, 1-10.

[10] 张坤勇,张梦,孙斌,等. 考虑时空效应的软土狭长型深基坑地连墙变形计算方法[J]. 岩土力学,2023,44(8):2389-2399.

ZHANG K Y, ZHANG M, SUN B, et al. A calculation method for deformation of diaphragm wall of narrow deep foundation pit in soft soil considering spatio-temporal effect[J]. Rock and soil mechanics, 2023,44(8):2389-2399.