



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2506596

引用格式:何如,孙仁祥,吴波,等.富水砂性地层异形基坑变形与受力规律[J].科学技术与工程,2026,26(27):11857-11871.

He Ru, Sun Renxiang, Wu Bo, et al. Deformation and stress patterns of irregular basements in water-rich sandy soil formations[J]. Science Technology and Engineering, 2026, 26(27): 11857-11871.

富水砂性地层异形基坑变形与受力规律

何如^{1,2}, 孙仁祥¹, 吴波¹, 李时林¹, 朱润¹

(1. 东华理工大学土木建筑工程学院, 南昌 330013; 2. 岩土钻掘与防护教育部工程研究中心, 武汉 430074)

摘 要 针对南昌地区狭长异形地铁车站深基坑的特点,其上部为松散杂填土,下部为富水承压砂卵石层,渗透性较强。结合实时监测数据,在地下水渗流及地表降水的影响下,为研究某地铁车站基坑的变形特性,系统分析了其地表沉降与支护结构响应。结合三维数值模拟与现场实测数据对比,验证了所建模型的准确性与分析方法的可靠性。结果表明:围护结构的变形特征整体呈现向基坑内部弯曲的“弓”字形,具体表现为两端位移较小,中间位移较大。水平位移的最大值出现在距离基坑边缘 15 m 处,约为开挖深度 H 的一半 ($0.5H$),其值在 $0.0119H \sim 0.0659H$ 。周边地表沉降呈抛物线形分布,影响范围约为 $1.0H$,最大沉降点出现在距坑边 $0.275H$ 处,沉降量约为 $0.028\%H$ 。此外,地表沉降量在不同区域表现出明显差异,其规律为标准段 > 端头井 > 异形角。此外,模拟结果能够较好地反映各支撑轴力的变化情况,且与实测数据具有良好的一致性。研究成果可为类似基坑工程的安全施工提供科学依据和理论支持。

关键词 富水砂性地层; 地铁车站; 异形基坑; 变形; 应力分布规律; 数值模拟; 支护结构

中图法分类号 TU473;

文献标志码 A

Deformation and Stress Patterns of Irregular Basements in Water-rich Sandy Soil Formations

HE Ru^{1,2}, SUN Ren-xiang¹, WU Bo¹, LI Shi-lin¹, ZHU Run¹

(1. School of Civil and Architectural Engineering, East China University of Technology, Nanchang 330013, China;

2. Engineering Research Center of Geo-technical Drilling and Protection, Ministry of Education, Wuhan 430074, China)

[Abstract] In view of the characteristics of the deep foundation pit of a long and narrow irregular-shaped metro station in the Nanchang area—where the upper portion consists of loose miscellaneous fill and the lower portion is a water-rich confined aquifer with high permeability. An analysis was systematically conducted on the surface settlement and support structure response of a metro station foundation pit under the influence of groundwater seepage and surface precipitation, in combination with real-time monitoring data. By comparing three-dimensional numerical simulations with field measurement data, the accuracy of the established model and the reliability of the analysis method were verified. It was shown that the deformation characteristics of the retaining structure generally exhibited a “bow”-shaped bending toward the interior of the foundation pit, specifically characterized by smaller displacements at both ends and larger displacements in the middle. The maximum horizontal displacement was observed at a distance of 15 m from the edge of the foundation pit, approximately half of the excavation depth H ($0.5H$), with values ranging from $0.0119H$ to $0.0659H$. The surface settlement around the foundation pit followed a parabolic distribution, with an influence range of about $1.0H$. The maximum settlement point was located at a distance of $0.275H$ from the pit edge, with a settlement magnitude of approximately $0.028\%H$. Furthermore, significant differences in surface settlement were observed among different areas, following the pattern: standard section > end well > irregular corner. Moreover, the simulation results were able to satisfactorily reflect variations in the axial force of each support and demonstrated good agreement with the measured data. The research results can provide a scientific basis and theoretical support for the safe construction of similar foundation pit projects.

[Keywords] water-rich sandy soil; metro station; shaped pit; deformation; stress distribution law; numerical simulation; support structure

收稿日期: 2025-09-12 修订日期: 2026-01-13

基金项目: 江西省地质环境与地下空间工程研究中心开放基金(JXDHJJ2022-005); 国家自然科学基金(52278397); 校级研究生创新专项资金项目(DHYC-2025133); 江西省研究生创新专项资金资助项目(YC2024-S497)

第一作者: 何如(1990—), 女, 汉族, 四川南充人, 博士, 讲师, 硕士研究生导师。研究方向: 地铁及隧道工程、爆破工程等。E-mail: hrcug09@163.com。

* 通信作者: 吴波(1971—), 男, 汉族, 四川阆中人, 教授, 博士研究生导师。研究方向: 地下空间工程。E-mail: 813792833@qq.com。

随着城市地铁车站开挖宽度的不断增加,以及承压水问题的存在,岩土工程面临的挑战也日益增多^[1-3]。地铁车站基坑的施工则是整个地铁施工建设中的核心,如何在众多复杂因素交织的背景下,保障地铁基坑从开挖到完工的全过程安全,已成为学术界广泛关注的问题^[4]。因此地铁车站基坑施工实时监测和变形与受力规律是一个具有研究意义的课题,针对富水砂性地层中的超大型异形深基坑的变形研究则尤为重要。

为确保基坑施工安全,研究者综合运用数值模拟与现场实测对比分析,揭示了基坑的变形特征、时空效应及主要影响因素,为工程实践提供了重要指导。刘性锋等^[5]、杨承志等^[6]、许明杨等^[7]采用理论分析、数值模拟与现场监测相结合的方法进行研究。利用不同软件模拟基坑开挖过程,并结合现场监测数据,分析了围护结构的位移、地表沉降和支撑结构轴力的变化。为研究狭长地铁车站深基坑分区域挖掘对附近建筑沉降变形的抑制效果,Chen 等^[8]为探讨超大型深基坑施工过程中的耦合效应,以及如何有效控制施工变形,采用理论分析与数值模拟相结合的方法,研究了超深基坑开挖过程中的渗流-应力耦合效应。通过有限元软件建立了相应的数值模型,模拟了不同施工阶段下基坑的变形与应力分布规律。李忠超等^[9]以某车站两侧清障井工程为例,通过三维数值模拟对比了四坑与双坑方案对地层、围护结构及车站本身的影响,依据结果指导施工,并以实测数据验证了模型。王位赢等^[10]通过对偏压车站围护桩进行位移与内力的原位监测,获取了施工过程中的变形数据,结合基坑开挖的数值模拟,将监测与模拟结果进行对比,综合揭示了偏压基坑的变形规律。刘腾等^[11]基于三维数值模拟与现场监测数据,分析了基坑开挖过程中双环形内支撑体系的受力与变形规律。Zhang 等^[12]为研究深基坑开挖对支护结构稳定性的影响,基于 FLAC3D 的三维模型进行数值模拟,并结合监测数据对挡土结构的水平位移、支撑的轴向力和柱子的垂直位移进行了对比验证分析。Zhang 等^[13]结合数值模拟结果,开发了机器学习模型来预测隧道变形,确定了水平距离、垂直距离和土壤弹性模量等关键影响因素,发现提高土体弹性模量可有效降低隧道变形。Zhang 等^[14]提出了一种联合人工地面冻结法的新型支护理念,即以地下连续墙为竖向支撑、冻结幕墙为水平支撑。通过模型试验与数值模拟,揭示了冻结过程中温度场的演化规律及其与连续墙的相互作用机制。卢福聪等^[15]针对车站端头基坑,建立了考虑开挖-降水-回灌全过程的三

维应力-渗流耦合模型,分析了其渗流稳定性。王圣涛等^[16]通过数值模拟和实地监测探究基坑施工力学行为的渐近性演化规律。

综上所述,现有广大学者对基坑开挖进行了大量的研究,但针对富水砂性地层的超大型异形深基坑开挖变形研究较少,因此对该类型基坑开挖过程中围护结构的变形和地表沉降的规律研究具有重大意义。为此,以南昌地铁 2 号线胡坊站基坑工程为背景,建立三维数值模型,并结合施工过程中的实时监测数据进行对比验证。系统分析基坑开挖与支护的变形规律,旨在为同类工程的安全施工与设计优化提供理论依据和技术支持。

1 工程概况

1.1 工程地质

所依托实际工程案例位于富水砂层,胡坊站位于广州路与规划滨湖大道交叉口,车站主体结构沿广州路呈东西向布置。车站结构设计为地下三层岛式站台车站,车站主体结构包含东西端头井和标准段,车站总长 631.9 m,标准段宽 22.9 m,标准段基坑深约 25.22 m。车站共设置 4 个出入口、5 组风亭、1 个安全出口。

根据地层的地质时代、成因类型、岩性特征、风化程度等工程特性,将场地内揭露的岩土层分为①第四系全新统填土层(Q_4^{ml})和植物层(Q_4^{pl})、②第四系全新统湖积层(Q_4^l)、③第四系上更新统冲积层(Q_3^{al})、⑤古近系新余群基岩(Exn)。其中填土层主要为杂填土;冲积层包括粉质黏土、中砂、砾砂、圆砾等砂层;基岩层则包括强风化泥质粉砂岩和中风化泥质粉砂岩。

本工程所处地层主要为较强透水性的砂层,地下水水位在底板以上 5~8 m,下部砂层水量丰富,车站主体、附属基坑开挖过程中必须持续降水,采用坑内降水保证地下水位低于开挖面 2 m 以下,同时必须监测地下水水位的变化,防止降水过多导致地表及周边建筑物的沉降过大。主要存在以下风险:基坑开挖深度较深,施工过程中可能存在围护结构水平位移超限,周边地面沉降过大,基坑坍塌、坑底突涌、坑底隆起等风险;围护结构容易发生渗漏水,出现涌水涌沙。为了保证基坑开挖过程中的施工安全,主要对基坑周围地表沉降、地连墙的变形、内支撑的轴力等进行了监测,基坑平面及选取部分测点布置如图 1 所示。

1.2 基坑开挖及支护方案

基坑开挖采用明挖顺作法,基坑分三期施工,采用地下连续墙+内支撑围护方案,基坑主体结构

2 实测数据分析

2.1 监测项目和监测仪器

根据相关规范及设计要求,施工过程中需要对基坑本体及周边环境进行监测。结合工程实际情况,各监测项目以及对应所需的仪器和精度要求如表2所示。

开挖期间,每日一测,遇高风险工况(如暴雨、超挖等)时监测频率为每日2或3次;架设支护结构时监测频率为2或3日一测,重点监测内支撑轴力的变化情况。

根据《建筑基坑工程监测技术规范》,各监测项目的预警值如表3所示。

表2 监测项目以及监测仪器
Table 2 Monitoring projects and required monitoring instruments

项目	仪器	精度要求
地连墙顶部水平和垂直位移	全站仪、GNSS	≤1 mm
墙体深层水平位移	测斜仪+测斜管	分辨率0.02 mm/m
地表和建筑物沉降(垂直位移)	静力水准仪	≤1 mm
桩顶的水平和竖向位移	全站仪	≤1 mm
内支撑的轴力值的变化	振弦式轴力计	设计值的80%~90%

表3 各监测项目对应的预警值范围

Table 3 Range of warning values for each monitoring item

监测项目	预警值
地连墙顶部的水平和垂直位移	±30 mm
墙体深层水平位移	±30 mm
地表/建筑物沉降(垂直位移)	+10/-35 mm
桩顶的水平和竖向位移	±30 mm
内支撑的轴力值的变化	±5 240 kN

2.2 地连墙水平位移

如图3表示基坑开挖全过程中,典型位置地下连续墙水平变形的演化规律。选取了四个代表性监测点:ZQT-4(西部端头井)、ZQT-7(标准段)、ZQT-13(中部异形角)以及ZQT-36(东部端头井),以每十天为一个开挖工况,选取了基坑开挖过程中的五个工况进行分析,工况分别为:开挖基坑并施工冠梁、挡土板和第一道砼支撑;开挖土体至对应分区的第二道钢支撑下0.5 m处,开挖高度约为7.6 m;开挖土体至对应分区的第三道钢支撑下0.5 m处,开挖高度约为14.48 m;开挖一、二期土体至对应分区的第四道钢支撑下0.5 m处,开挖高度约为21.03 m。其变形曲线清晰地反映了开挖进程对墙体位移的影响。根据变形曲线分析,基坑开挖期

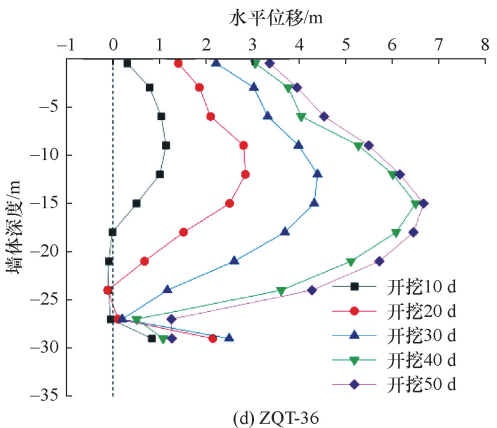
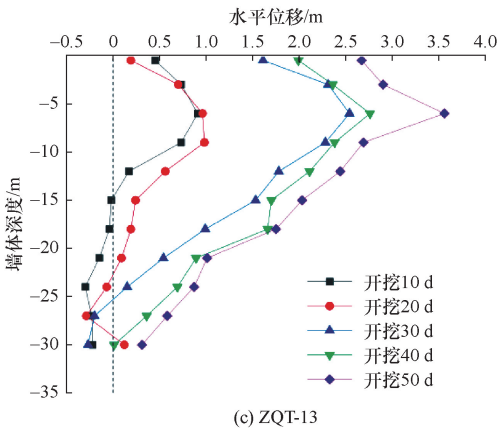
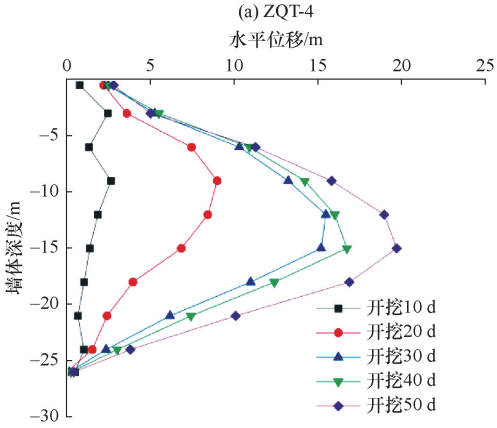
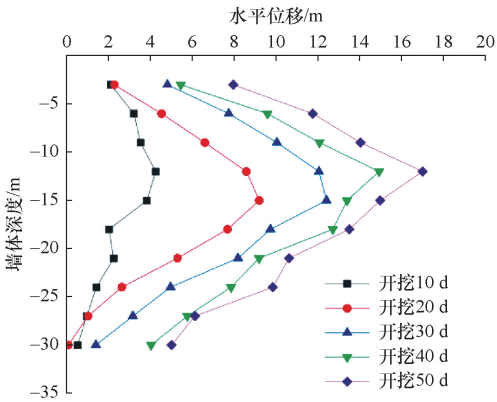


图3 不同位置监测点墙体水平位移与深度的关系曲线
Fig.3 Curve of horizontal displacement of wall versus depth for monitoring points at different locations

间,地下连续墙的水平位移随开挖深度呈现的特征是两端位移较小、中部位移较大的“弓”状分布。具体表现为,连续墙的水平位移随着深度的增加先是逐渐增大,达到某一深度后又逐渐减小,这一现象与南昌地区富水砂层中多个基坑工程的监测数据相吻合。

从图3可以观察到,四个测点的墙体深层水平位移最大值普遍出现在大约15 m深的墙体处(约为 $0.5H$, H 为最大开挖深度)除ZQT-13测点的最大位移出现在约7.5 m墙体深度处外,且最大水平位移分别为17.04 mm ($0.056\ 8\% H$)、19.77 mm ($0.065\ 9\% H$)、3.56 mm ($0.011\ 9\% H$)、6.68 mm ($0.022\ 5\% H$),相较于南昌地区其他大型深基坑,狭长型车站基坑的墙体水平位移量值更小,变形过程也更为平缓。这一现象反映出,在本地工程条件下,采用“地连墙+内支撑”的支护体系能有效保障车站基坑的稳定性。同时,开挖前的预降水措施成效显著,成功控制了富地下水对土体及支护结构的不利扰动。

2.3 桩顶水平位移

图4~图7为桩顶水平位移随时间的变化曲线。从图4中可以看出,西部端头井处的桩顶水平位移随时间(开挖深度)的变化呈先增后减的趋势。先缓慢增长直至开挖后期内支撑发挥作用使其呈线性下降趋势,峰值为7.8 mm;从图5中可以看出,异形角位置的空间约束效应以及独特的内支撑结构使得该处的桩顶水平位移随时间(开挖深度)的变化趋势为先增后趋于平稳。开挖前期、中期呈线性增长,开挖后期则趋于平稳变化,峰值为11.7 mm。从图6中可以看出,标准段处的桩顶水平位移随时间(开挖深度)呈现较为稳定的变化趋势,变化幅度不大,开挖后期桩体变形略微增大,内支撑发挥

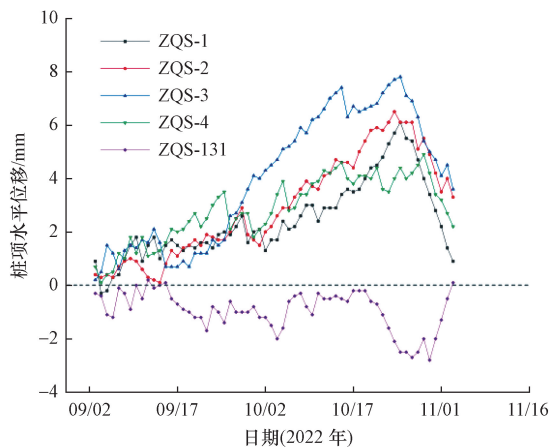


图4 西部端头井桩顶水平位移变化曲线

Fig. 4 Variation curve of horizontal displacement at the top of pile in western end wells

作用使其趋于稳定变化,峰值为8.3 mm。从图7中可以看出,东部端头井处的桩顶水平位移随时间

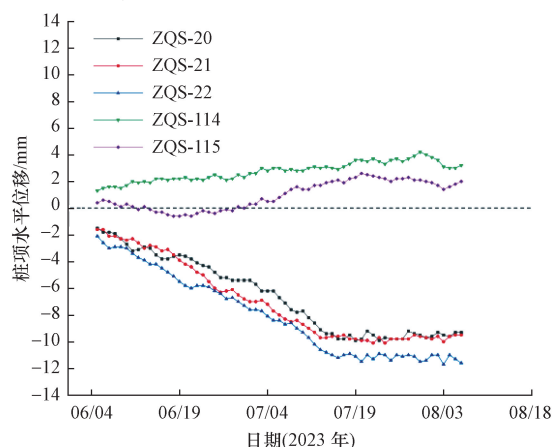


图5 中间异形角桩顶水平位移变化曲线

Fig. 5 Variation curve of horizontal displacement at the top of intermediate shaped corner pile

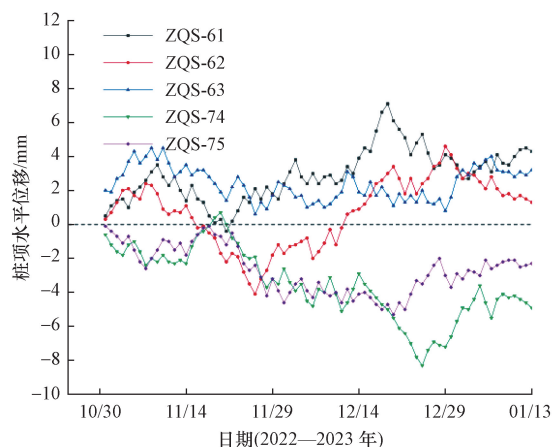


图6 标准段处桩顶水平位移变化曲线

Fig. 6 Horizontal displacement variation curve at pile tops in the standard section

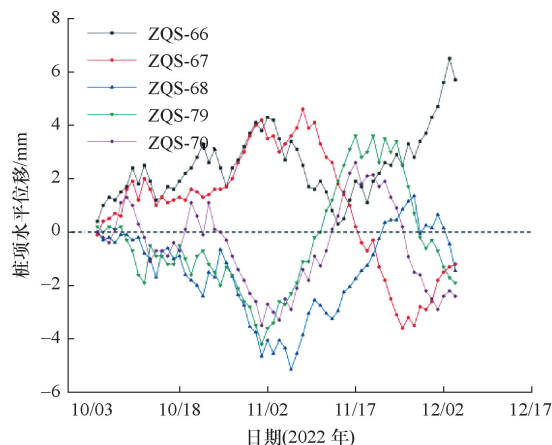


图7 东部端头井桩顶水平位移变化曲线

Fig. 7 Variation curve of horizontal displacement of pile top in the eastern end shaft

(开挖深度)的变化趋势为先增后减再增。前期先缓慢增长至开挖中期,中期之后呈线性减小至开挖后期,开挖后期又呈线性增加,这与地下连续墙的变形规律一致,峰值为 6.5 mm。监测点 ZQS-66 在开挖后期出现线性增长,这主要是由于后期在该监测点附近出现了堆载以及大型机器施工,从而增加了地面承受的荷载,使得桩顶水平位移持续增大。

整体来看,桩体呈对称变形,向基坑内为正,向基坑外为负,变形趋势基本一致。监测点测得的桩顶水平位移值均在预警值 30 mm 内。说明在基坑开挖过程中支护结构措施较好,开挖过程对桩体结构影响较小。

2.4 地表沉降

如图 8 所示为不同位置监测点地表沉降值与离基坑边距离的关系曲线。DBC4 位于西部端头井处,DBC7 位于标准段处,DBC13 位于中间异形角处,DBC36 位于东部端头井处。根据关系曲线分析,在基坑开挖过程中,地表沉降的值随着监测点与基坑边缘距离的变化呈现出一致的趋势。具体表现为,地表沉降随着距离的增加先是逐渐增大,达到峰值后逐渐减小,最终趋于零,整体呈现抛物线形态。基坑开挖引起地表沉降影响范围大约在 30 m。地表沉降达到峰值的位置,大致在距离基坑边缘 8 m 的区域。具体来说,西部端头井的最大沉降量约为 7.25 mm,标准段的最大沉降量约为 8.3 mm,中间异形区的最大沉降量约为 4.11 mm,而东部端头井的最大沉降量约为 3.52 mm。其中,最大地表沉降点距离基坑边缘 $0.275H$ (H 为基坑开挖深度),最大地表沉降量约为 $0.028\% H$,监测结果

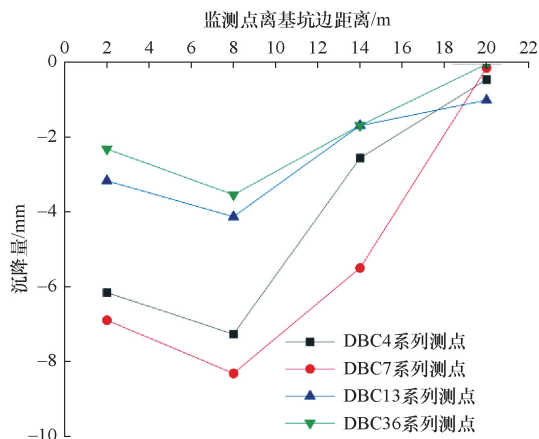


图 8 不同位置监测点地表沉降值与离基坑边距离关系曲线

Fig. 8 Curve of the relationship between the surface settlement value and the distance from the pit at different locations of monitoring points

显示,地表整体沉降量值较小,其变化趋势也较为平缓。究其原因,可能与基坑下部砂层在开挖中表现出变形速率慢、幅度小的特性有关。此沉降规律与文献[17]中关于软土地区狭长型地铁车站深基坑的数值模拟结论具有良好的一致性。

3 基坑开挖数值模拟分析

根据工程实际和实测数据,建立基坑开挖三维模型,计算基坑开挖过程中各结构水平位移、竖向位移以及各支撑轴力的变化规律。研究超大型基坑开挖过程中对围护结构变形规律的影响。

3.1 数值模型建立

根据工程资料所提供的各层土体参数,结合现场实际工程情况,利用 Midas GTS NX 动力有限元数值模拟软件参照现场实际中的基坑开挖建立数值模型。利用软件中的“应力-渗流-边坡”耦合分析模块进行基坑开挖降水的相关模拟。根据圣维南原理,模型周边尺寸选取 2~4 倍基坑大小。

在模型边界条件的设定上,顶部采用自由边界,底部施加固定约束,模型的四个侧面则对其法向位移进行约束。模型土体本构采用修正 Mohr-Coulomb 模型。

修正的摩尔-库仑模型(modified Mohr-Coulomb model)是经典摩尔-库仑模型的改进版本,适用于更复杂的地质材料和工程条件。适用于软土与硬土,如黏土、粉土、砂土等,尤其考虑应变软化或硬化行为时。部分岩石:如软弱岩层(泥岩、页岩)或破碎岩体,需考虑非线性破坏或塑性变形。人工改良土:如水泥加固土、石灰稳定土等,其强度参数可能随环境变化。

本模型的单元选择与材料定义如下:基坑周围的土体及围护结构由三维实体单元模拟;内支撑和立柱以线性梁单元进行模拟;地连墙则采用板单元。为确保模拟的真实性,所有结构构件的几何尺寸均与设计方案保持一致。具体材料属性为:地连墙和内支撑采用 C30 混凝土,立柱采用 Q235 钢。在计算分析中,所有结构均简化为线弹性材料模型。在渗流计算中引入了稳定渗流的基本假定。基于现场基坑排水设施及监测情况,在本次模拟中可合理简化地下水变化的影响。对于水力边界,模型通过在表面与侧边界的节点上指定水头值,以构建整体水力环境。对于初始地下水位,在基坑外侧设置初始水头,水头值为 -12 m。针对基坑降水这一关键过程,则在基坑内外不同土层深度的节点处施加相应水头,在每一层土体开挖支护完成后施加节点水头,用以表征不同开挖阶段的降水工况。采

用坑内降水保证地下水位低于开挖面 1 m 以下。在土层方面,模型假设各土层厚度在空间上均匀分布,且其物理力学性质为均质且各向同性。基坑模型示意图如图 9 和图 10 所示。

根据现场试验测得土体、混凝土动静力学参数,结合工程地质资料和材料模型特性合理地选取材料模型以确保数值模拟计算结果准确。数值模型中材料包括不同土层、连续墙、内支撑结构。各土层参数和支护结构参数如表 4 和表 5 所示。

表 5 支护结构力学性质参数
Table 5 Mechanical properties parameters of support structures

构件名称	容重 γ / ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	泊松比	弹性模量 E/MPa
地连墙/混凝土支撑	24	0.2	30 000
钢支撑	78.5	0.3	210 000

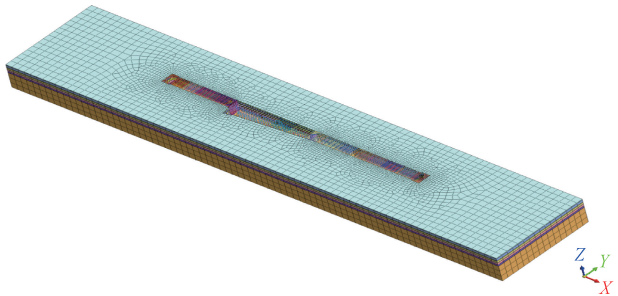


图 9 基坑三维数值模型
Fig. 9 3D numerical model of the pit

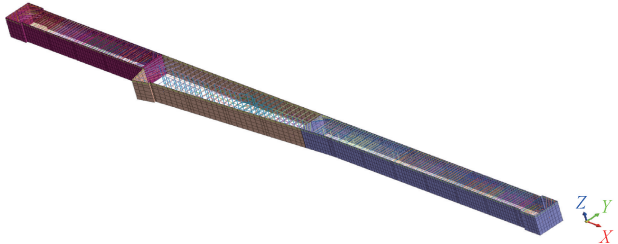


图 10 地连墙三维数值模型
Fig. 10 Three-dimensional numerical model of ground-connected wall

3.2 模拟工况

基坑开挖采用明挖顺作法,采用地下连续墙 + 内支撑围护方案,整个开挖过程分三个阶段进行,基坑主体结构施工顺序为:分层分段开挖,从两端向中间双向进行。模拟基坑施工各工况如表 6 所示。

在基坑的纵向施工中,采取从西向东的方向,使用挖掘机进行放坡分层倒退式开挖,每段纵向分区的长度控制在 10 m 以内;基坑的竖向开挖划分为 4 个主要层次,每个主要层次再细分为若干个子层,每个子层的开挖深度不超过 3 m。

在进行土方开挖时,围护结构的强度必须达到设计强度的 100%,混凝土支撑的强度也需要达到 100%,同时,地下水控制必须符合开挖的要求。施工应遵循“纵向分段、竖向分层、自上而下、中间拉槽、先支撑后开挖”的原则,严禁超挖行为。

表 6 模拟基坑施工工况
Table 6 Simulated pit construction conditions

序号	工况说明
工况一	施工围护结构(地连墙),中立柱,基坑降水
工况二	开挖基坑并施工冠梁、挡土板和第一道砼支撑
工况三	开挖一、二期土体至对应分区的第二道钢支撑下 0.5 m 处,开挖高度约为 7.6 m
工况四	开挖一、二期土体至对应分区的第三道钢支撑下 0.5 m 处,开挖高度约为 14.48 m
工况五	开挖一、二期土体至对应分区的第四道钢支撑下 0.5 m 处,开挖高度约为 21.03 m
工况六	由西向东已开挖至基底上 30 cm 人工清底
工况七	开挖三期土体至对应分区的第二道砼支撑下 0.5 m 处,施工一、二期负三层底板,拆除第四道钢支撑
工况八	开挖三期土体至对应分区的第三道砼支撑下 0.5 m 处,施工一、二期负二层底板,拆除第三道钢支撑
工况九	开挖三期土体至对应分区的第四道砼支撑下 0.5 m 处,施工一、二期负一层底板,拆除第二道钢支撑
工况十	拆除中立柱和第一道砼支撑

表 4 场地土体物理力学性质参数
Table 4 Parameters of physical and mechanical properties of site soils

土层名称	平均厚度 h/m	容重 $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	压缩模量 E_s/MPa	内摩擦角 $\varphi/(^{\circ})$	孔隙比 e	泊松比 μ	渗透系数 $K/(\text{m}\cdot\text{d}^{-1})$
杂填土	1.55	19.0	6.50	10.0	—	—	5.000
粉质黏土	8.16	19.8	8.27	17.2	0.76	0.30	0.035
中砂	6.05	19.6	8.00	28.0	0.63	0.30	90.000
砾砂	5.94	19.8	10.00	32.0	0.60	0.25	90.000
圆砾	5.45	20.0	10.00	36.0	0.50	0.25	90.000
强风化泥质粉砂岩	2.71	20.0	11.43	25.0	—	0.30	0.800
中风化泥质粉砂岩	8.65	23.5	—	40.0	—	0.33	0.100

3.3 地连墙变形分析

如图 11 所示为不同工况下基坑连续墙的变形云图。清晰地显示了围护结构呈现出向基坑内侧变形的“弓”形模式,中间区域变形显著,而顶部和底部变形相对较小,这与在南昌地铁 2 号线胡坊车站基坑围护桩监测到的变形模式相同。为揭示墙体整体变形与基坑开挖深度之间的内在联系,对 ZQT2、ZQT7、ZQT13 及 ZQT36 4 个关键位置的墙体水平位移展开了对比研究。该研究整合了现场监测数据与数值模拟结果,并将分析结果以位移曲线的形式呈现于图 12 中。从中可以看出,模拟数据与实测数据在变化趋势上大致相同,数值上也相对吻合。除了在异形角区域,墙体的最大水平位移普遍在约 15 m 深度处发生。这一对比结果证实了数值模型构建和参数确定的合理性,表明该模型适用于南昌地区富水砂质地层基坑开挖的模拟,并且计算结果是可信的。Zhang 等^[18]在对软黏土中内支撑深基坑的开挖过程进行有限元模拟时,选用了小应变硬化土模型来描述土体的力学行为。模拟结果揭示,围护墙体的水平位移曲线呈“弓”形分布特征。此外,墙体最大挠度与基坑开挖深度表现出显著的正相关性,即开挖越深,挠度越大,变形形态也愈发呈现出鼓肚状。分析结果表明,尽管围护结构的变形会随基坑开挖深度的增加而加剧,但在支撑结构逐步安装后,连续墙的变形得到了显著抑制。由此可见,支撑体系在控制围护结构水平位移方面起到了决定性作用。

地下连续墙的水平位移模拟值与实测值对比如图 13 所示。可知,根据计算值得到的地下连续墙变形规律和根据实测值得到的规律基本相同,ZQT4 (西部端头井)、ZQT7 (标准段)、ZQT13 (中间异形角)、ZQT36 (东部端头井) 处地下连续墙最大水平位移与实测值的差值分别为 0.3、2.08、1.07、0.18 mm,占实测值的比例为 1.8%、10.5%、30.0%、2.7%,平均误差为实测值的 11.25%,数值相差较小,进而说明了模型和土体参数的合理性,整体模拟精度较高。标准段变形较大的主要原因是该处内支撑结构比较单一且没有复杂的异形结构来抑制墙体的变形,还有就是施工现场长时间降雨导致该工况时间跨度较大,从而使得变形量增加。中间异形角处变形较小的主要原因是该处复杂的内支撑结构及其复杂的异形结构形成的空间角效应抑制了该处墙体的变形。实测值和模拟值得到的地下连续墙最大水平位移的位置为距离墙顶 0.43D、0.48D 处,其中 D 为地下连续墙深度。由此可知,现场监测应密切关注开挖面附近地下连续墙水平

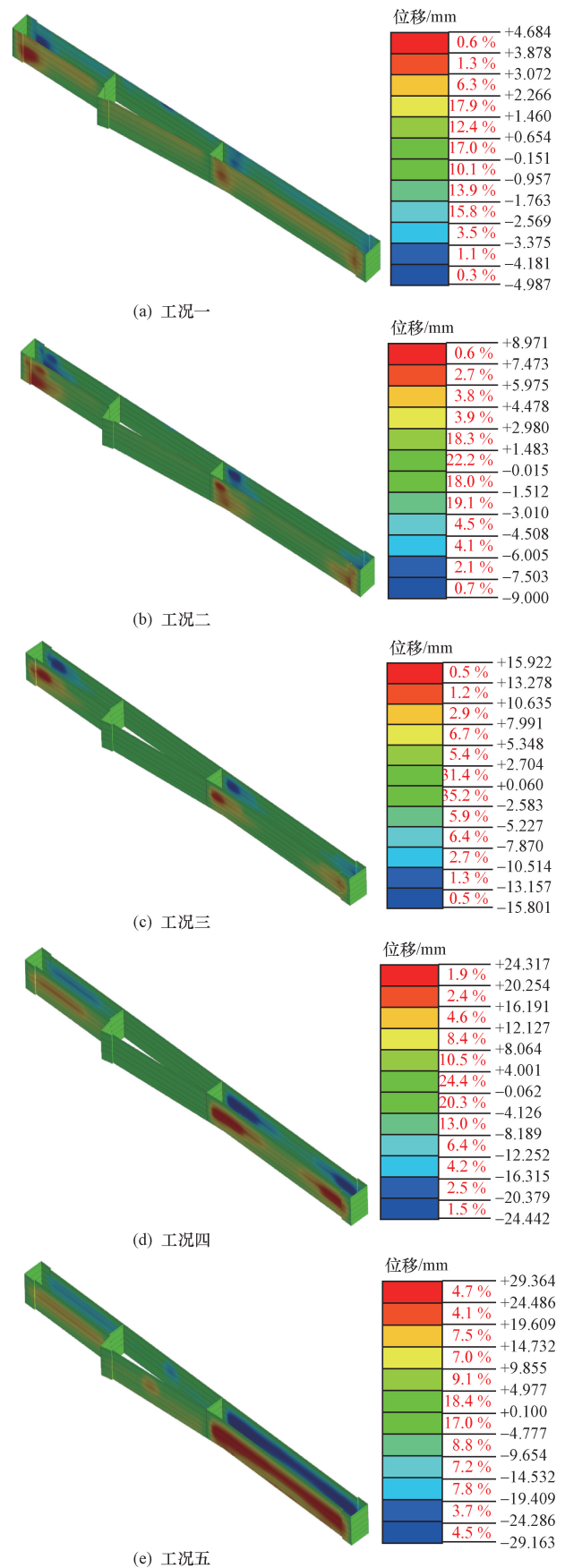


图 11 地下连续墙变形云图

Fig. 11 Deformation cloud diagram of diaphragm wall

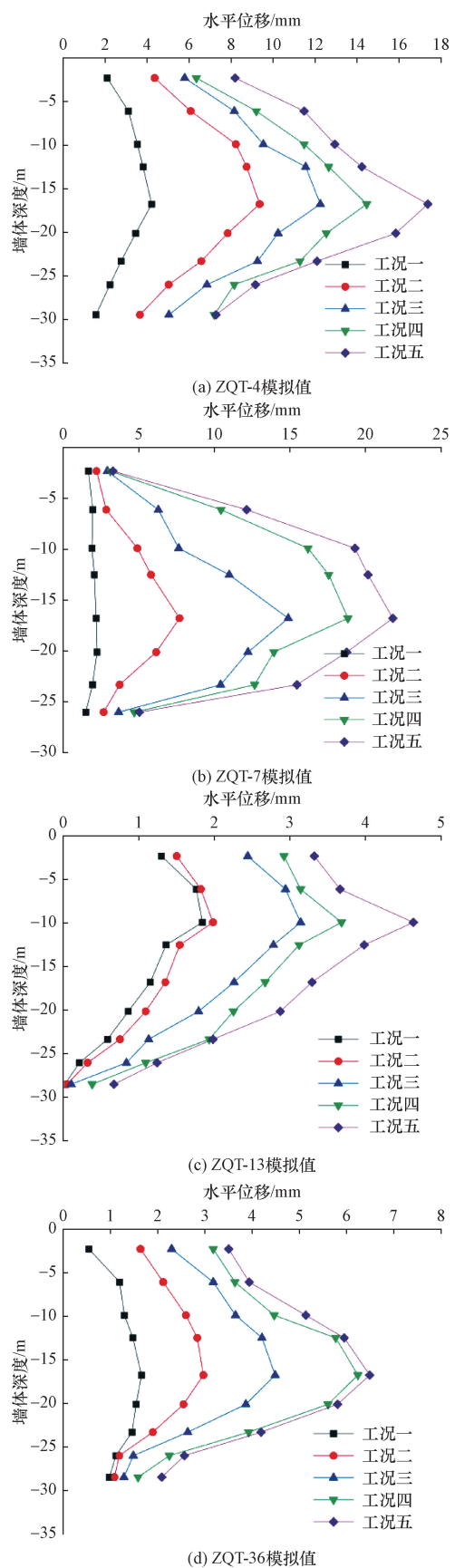


图 12 不同位置模拟墙体水平位移与深度的关系曲线
Fig. 12 Curve of horizontal displacement versus depth of simulated wall at different locations

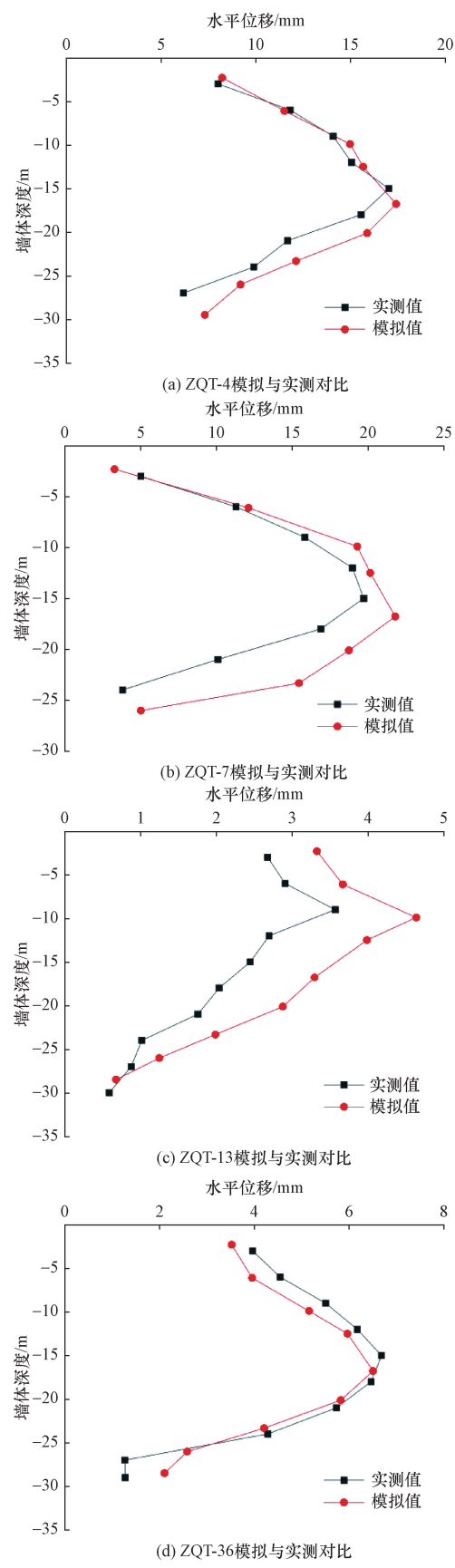


图 13 不同位置的墙体水平位移监测值与模拟值对比
Fig. 13 Comparison of measured and simulated horizontal displacement values for walls at different locations

位移的变化,特殊情况下应进行加密监测,确保围护结构水平位移变化速率在规范允许范围内。

基坑开挖会引起支护结构两侧土压力的重分布,从而导致其发生形变。其中,围护结构顶部的水平位移是衡量基坑整体变形状态的关键指标,对于评估其安全稳定性具有决定性意义。基于此,对数值模拟数据进行了分析,重点提取了 ZQT4、ZQT7、ZQT13 与 ZQT36 监测点处的墙顶水平位移模拟值,如图 14 所示。

在基坑开挖过程中,墙顶表现出向坑内移动的趋势。如图 14 所示,以东部端头井的 ZQT4 监测点为例,其墙顶水平位移随开挖深度的增加而增大。然而,当开挖深度超过 15 m 后,由于支撑结构开始发挥有效的约束作用,墙顶位移的增长态势得到了抑制,并逐渐趋于稳定。在开挖深度达到 14 m 时,墙顶水平位移达到峰值,为 7.24 mm。其他位置监测点 ZQT7、ZQT36、ZQT13 处墙顶的水平位移较小且较为接近,同样也是随着基坑开挖逐渐增大,但增幅较为缓慢。当开挖深度为 12、16、20 m 时,墙顶水平位移的峰值分别为 2.67、3.06、2.78 mm。随着基坑开挖的进行和内部支撑的安装,墙顶的水平位移逐渐呈现稳定化的趋势。

为探究围护结构墙顶竖向位移与基坑开挖深度的内在联系,提取了 ZQT4、ZQT7、ZQT13 及 ZQT36 四个监测点的模拟数据,并据此绘制了二者的关系曲线,如图 15 所示。

由图 15 可知,各监测点的变形规律具有相似性:随着开挖深度的增加,围护结构普遍表现出先隆起加剧后趋于稳定的趋势。其内在机理在于,基坑开挖导致土体卸载,改变了坑底土体的原始应力状态,从而引发基底隆起,并带动围护结构产生向上的位移。而后续支撑结构的架设以及围护结构自

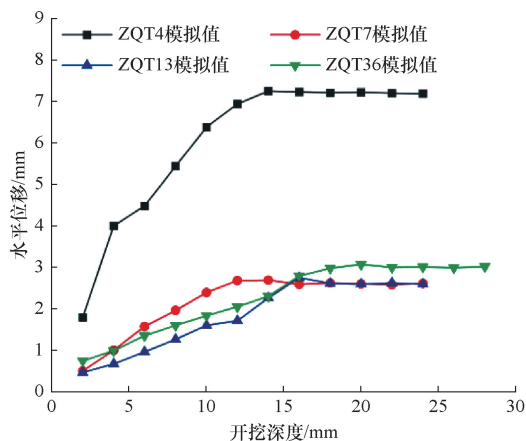


图 14 地连墙墙顶水平位移曲线

Fig. 14 Horizontal displacement curve of the top of the wall of the ground-connected wall

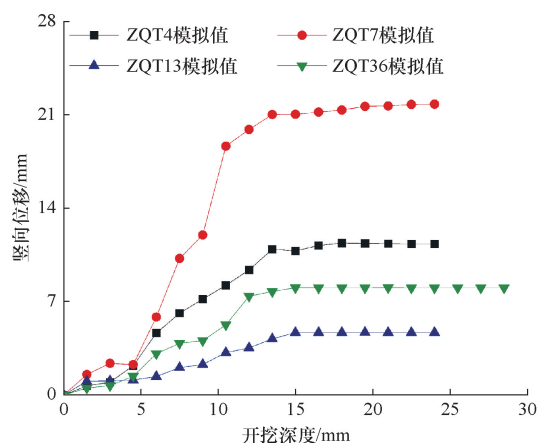


图 15 地连墙墙顶竖向位移曲线

Fig. 15 Vertical displacement curve of the top of the wall of the ground-connected wall

身的重量,则有效抑制了这种隆起变形,使其发展逐渐放缓并最终稳定。各监测点的变形趋势大致相同,当基坑开挖至深 13.5 m 时,变形趋于稳定,位移峰值分别为 11.39、21.80、4.69、8.04 mm。其中在西部标准段的监测点 ZQT7 处,当基坑从 9 m 开挖至深 10.5 m 时,墙顶竖向位移从 11.99 mm 增加到 18.66 mm,变化速率最大。随后,随着第二、三、四道钢支撑的安装,变化速率逐渐降低。

3.4 基坑周边地表沉降分析

如图 16 所示为模拟基坑开挖过程中地层竖直方向上的位移云图,可以明显观察到,基坑周边区域出现了显著的沉降现象,其中最大沉降点并未紧邻基坑,而是与基坑保持了一定的距离。此外,坑外地表沿着基坑边缘形成了一个沉降的“凹槽”,显示出地表沉降具有明显的空间效应。特别值得注意的是,基坑的异形角点附近沉降量相对较小,远小于其他位置。

为了更深入地分析坑外地表的沉降情况,绘制出图 17 来展示不同位置地表沉降的变化曲线。总体

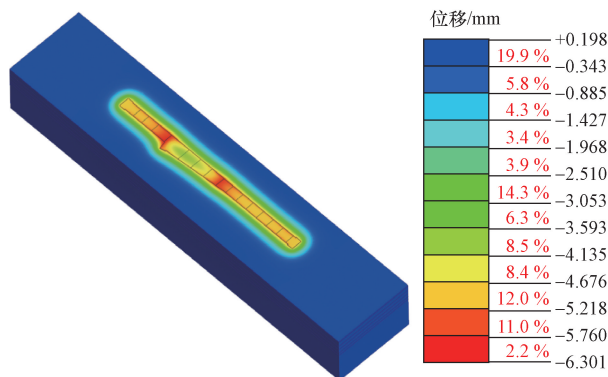


图 16 土层总体沉降变形云图

Fig. 16 Cloud map of overall settlement deformation of soil layer

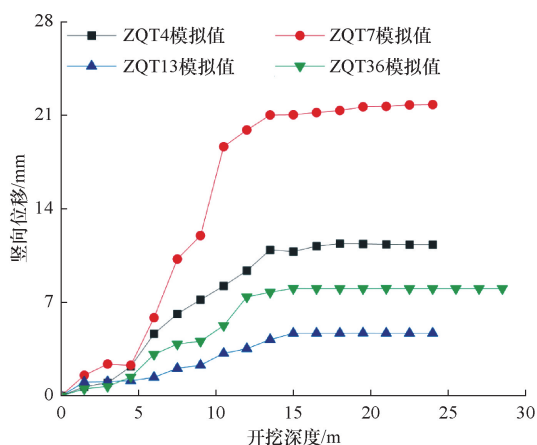


图 17 不同位置地表沉降值随离基坑边距离的变化曲线

Fig. 17 Variation curve of surface settlement value with distance from pit edge at different locations

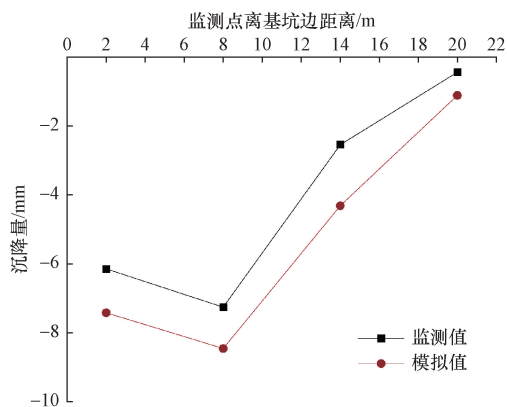
来说,这些曲线普遍呈现出一种“√”形变化趋势,即先快速增大,随后逐渐减小。具体而言,各位置的最大地表沉降均出现在距离基坑 8 m 的位置处。当距离基坑 30 m 左右时,沉降值已经接近于 0,因此可以基本认定,该基坑的开挖影响范围在 0 ~ 30 m。

通过对比图 18 所示的监测数据与模拟结果,可以发现两者数值差异较小,最大沉降点的沉降值及其与基坑的距离均较为接近。王卫东等^[19]在分析了大量软土地区基坑开挖数据后指出,对于墙后地表沉降呈现凹槽形的基坑,紧邻墙后的地表沉降量通常在 0 ~ 0.5% H (H 为基坑开挖深度),最大地表沉降多出现在距离围护墙 0.3 H ~ 1.0 H 的位置,而在 1.0 H ~ 4.0 H 范围内,沉降逐渐减小至可忽略水平,墙后地表沉降的影响范围通常不超过 4.0 H 。其中,1.0 H 范围内为沉降最大区域,1.0 H ~ 4.0 H 范围为沉降过渡区。针对南昌 2 号线胡坊站车站基坑的实测值与模拟值分析显示,最大地表沉降值均出现在约 0.27 H 处,紧邻墙后的地表沉降量也均在 0 ~ 0.031% H 范围内,这与上海软土地区基坑开挖地表沉降规律相吻合。然而,Zhang 等^[20]在研究新加坡上土下岩地层车站基坑开挖时发现,最大地表沉降点出现在 1.0 H 处,与本文结果存在一定差异,这可能与地下富水状态的不同有关。

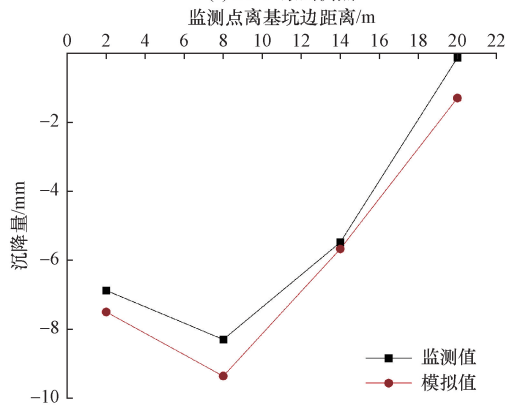
3.5 土层渗透系数对基坑外地表沉降及围护结构变形的影响

土层渗透系数是决定基坑降水施工难度与安全性的关键参数。本工程范围广、地层复杂,渗透系数变化显著。为探究其影响规律,研究选取 0.25、0.5、1.0、2.0 及 4.0 倍基准渗透系数 K 进行对比,分析其对基坑变形的作用。

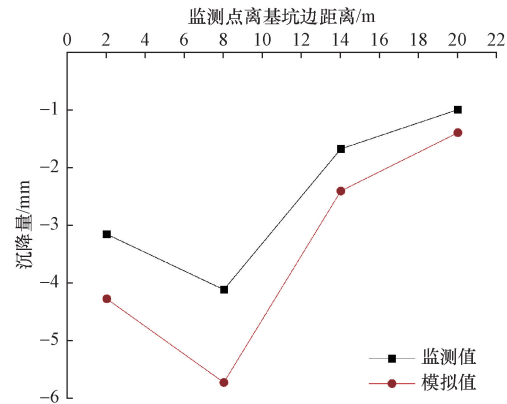
如图 19 所示为不同渗透系数条件下的坑外沉



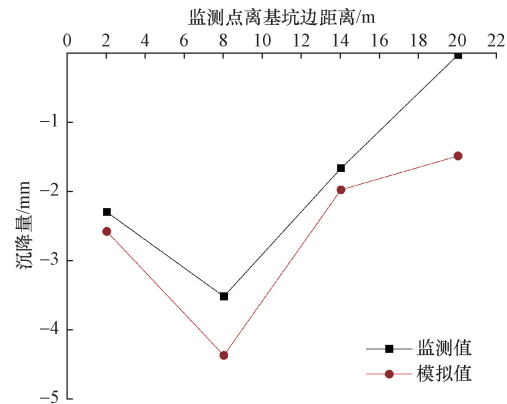
(a) DBC4系列测点



(b) DBC7系列测点



(c) DBC13系列测点



(d) DBC36系列测点

图 18 不同位置的地表沉降监测值与模拟值对比

Fig. 18 Comparison of monitored and modelled surface settlement values at different locations

降曲线。为排除模型边界水头条件对变形显示的干扰,并更清晰地对比其中的规律,分析范围限定在坑外 30 m 区域内。结果表明,渗透系数变化导致的沉降规律与其他变量影响明显不同:沉降曲线虽仍呈“V”形,但影响范围并非局限于基坑近场,而是覆盖了降水的整个影响区域。在 0~30 m 范围内,沉降量随渗透系数增大而显著增加。当系数从 0.25K 增至 4K 时,最大沉降值由 7.36 mm 上升至 11.26 mm,增幅达 53.0%,证实二者存在正相关关系。其主要机理在于,高渗透性土体中降水引发的渗流作用更强,导致土颗粒骨架结构的应力重分布幅度更大,从而产生更显著的沉降。此数值模拟结果与工程经验基本一致——后者表明渗透系数每倍增一次,沉降量增加 1.0~1.2 mm。

如图 20 所示为不同土体渗透系数下围护结构的变形情况。分析可知,当地连墙所处土层的渗透系数由 0.25K 增加至 4K 时,其最大水平位移从 17.55 mm

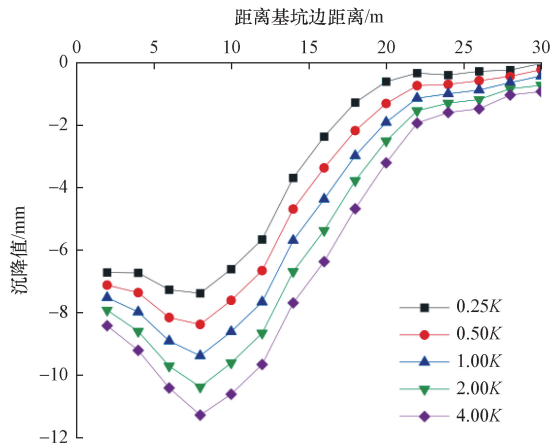


图 19 不同渗透系数下基坑外侧土体沉降变化情况

Fig. 19 Variation in settlement of soil outside the excavation pit at different permeability coefficients

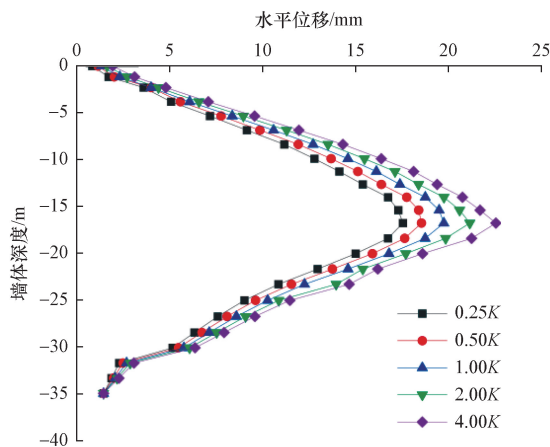


图 20 不同渗透系数下基坑墙体水平位移变化情况

Fig. 20 Variation in horizontal displacement of excavation wall under different permeability coefficients

相应增大到 21.70 mm,增幅约为 23.6%,两者呈现出明显的正相关趋势。与其他因素影响的区别在于,渗透系数的变化不仅显著影响开挖段的地连墙位移,也对其嵌固段的变形产生了全局性作用。这主要是因为系数增大意味着孔隙水排出加快,基坑降水过程中超静孔隙水压力得以迅速消散,使得有效应力快速增长,土体固结压缩效应更为明显。该过程增大了围护结构两侧的土体应力差,从而加剧了结构向坑内的水平位移。此外,位移的增幅随着渗透系数的增大呈现逐渐减缓的趋势:渗透系数从 0.25K 增至 0.5K 时,位移增幅约为 4 mm/K;0.5K 增至 1K 时,降为 2.4 mm/K;1K 增至 2K 时,进一步降至 1.4 mm/K;2K 增至 4K 时,则仅为 0.7 mm/K。这一非线性关系可能表明,当土体渗透性达到某一临界值后,渗流场分布趋于稳定,揭示了渗透系数与土体力学行为之间存在复杂的耦合效应。

基于以上分析,针对全长 642.9 m、地质条件复杂的狭长形异形基坑案例,揭示了不同土体渗透系数下围护结构的变形规律。因此建议,在类似富水砂卵石地层工程中,应对渗透系数 ≥ 2 倍基准值的区域实施重点变形监测,并综合采用预加固或分阶段降水等控制措施。该结论为复杂地质条件下基坑工程的安全施工与动态优化提供了理论依据和实践基础。

3.6 支撑轴力变化

如图 21 所示为不同施工阶段基坑内支撑的轴力分布云图。当土体开挖至 -2.3 m 深度并首次架设第一道支撑时,其轴力沿基坑标准段长边方向分布。随着开挖持续加深至 -9.5 m,坑内支撑所承受的轴力相应显著增大。从各阶段内支撑的轴力云图中可以明确看出:钢(砼)内支撑主要处于受压状态;随着开挖卸荷的进行,坑周土体对支护结构的压力持续增加,进而导致内支撑轴力逐步增长。

内支撑对围护结构变形控制有着至关重要的作用。提取了模拟中各支撑轴力变化数据,分析了其随基坑开挖深度的变化规律,并绘制成曲线,如图 22 所示。可知,随着基坑开挖深度的增加,各支撑点的轴力逐渐增大,至一定深度后趋于稳定。同时,下部支撑点的轴力普遍高于上部,显示出基坑开挖引起的应力分布不均。其中西部标准段处的支撑轴力最大,支撑的轴力峰值分别为 -1 296.29、-1 713.19、-2 696.71 kN;中间异形角处的支撑轴力最小,支撑的轴力峰值分别为 -689.76、-1 052.45、-1 706.99 kN。从轴力峰值来看各处的轴力变化值都在控制值 $\pm 6 782$ kN 范围内。

从图 22 还可看出,在施加新的支撑后,该支撑

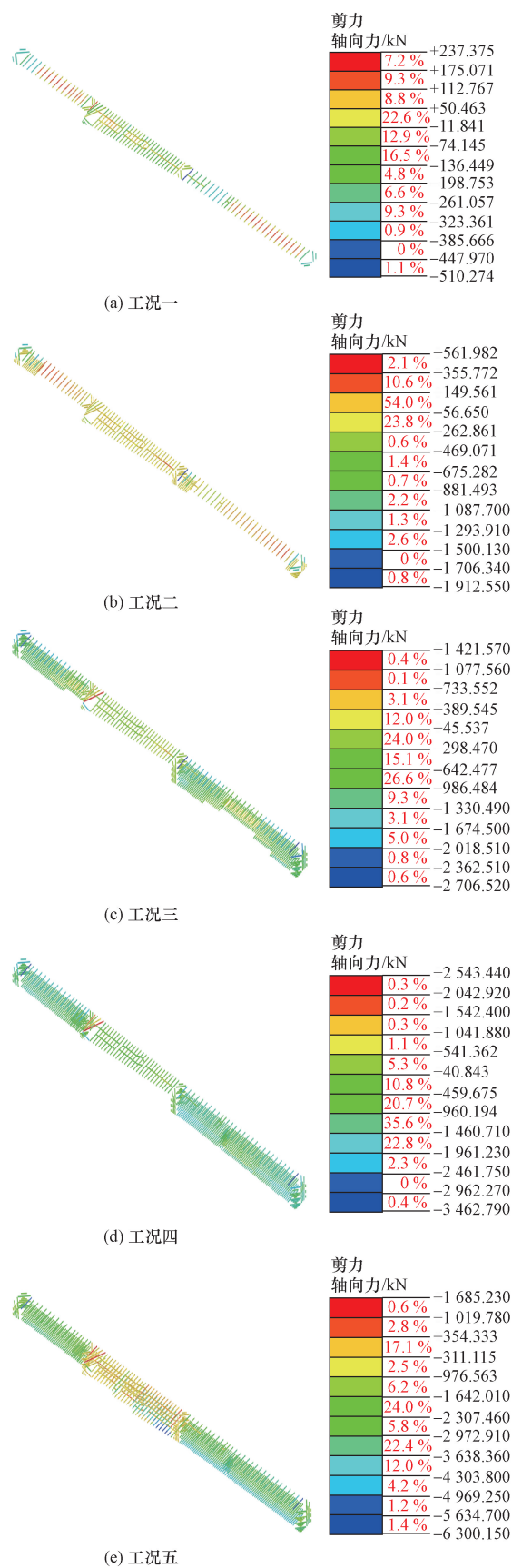


图 21 不同工况下内支撑轴力值云图

Fig. 21 Contour plot of axial force values in internal supports under different operating conditions

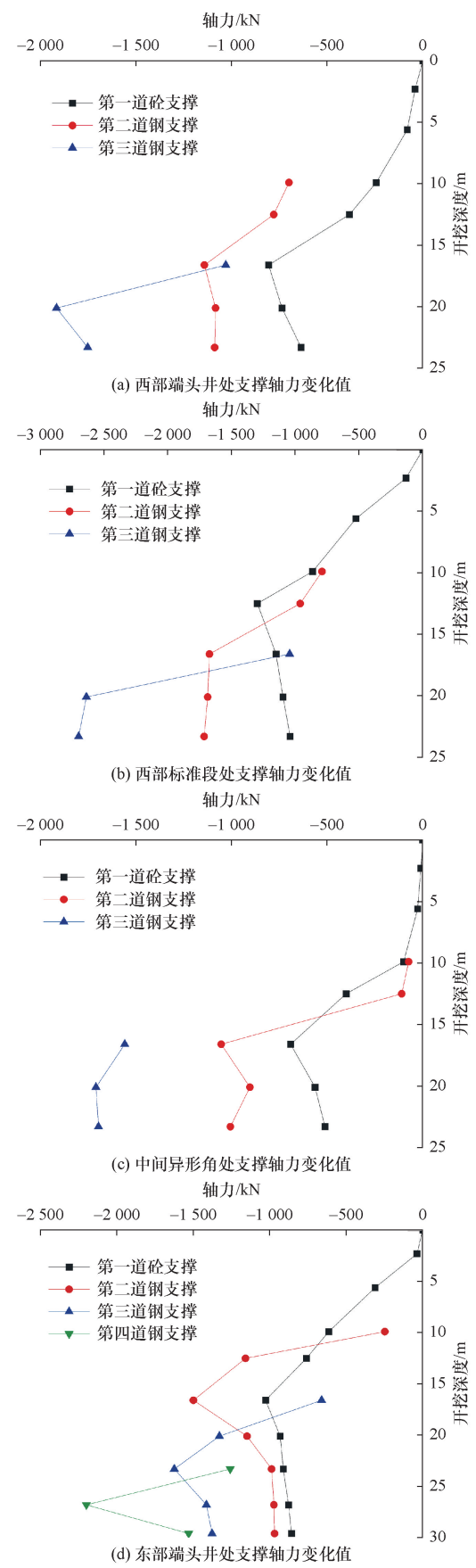


图 22 支撑轴力变化曲线

Fig. 22 Variation curve of support axial force

的轴力会迅速增大,而先前支撑的轴力则逐渐稳定或轻微下降,这表明随着基坑的持续开挖,下部支撑的作用更为显著^[21]。

4 结论

鉴于南昌地区富水砂性地层的独特工程条件,对车站深基坑开挖过程中的变形进行了详细监测与深度探究。通过构建有限元模型进行对比分析,得出以下结论。

(1)随着基坑开挖,基坑顶部逐渐向坑内移动,且在支撑结构的作用下,围护结构整体呈现“弓”形变形特征,即两端变形较小,中间变形较大。最大水平位移出现在约 15 m 处,相当于 0.5 倍最大开挖深度 H ,其值范围为 0.011 9 H 至 0.065 9 H 。在支撑施加部位,变形显著减小,凸显了支撑结构在限制围护结构水平变形中的关键作用。

(2)基坑周边地表沉降呈现典型的抛物线形态,其影响范围扩展至约 H 。最大沉降点位于距离基坑约 0.275 H 的位置,最大地表沉降量约为 0.028% H 。此外,地表最大沉降量遵循标准段 > 端头井 > 异形角的分布规律。

(3)随着基坑的开挖,桩顶水平位移基本呈先增后减或趋于平稳的趋势。

(4)通过构建三维数值模型进行计算,所得墙体变形及地表沉降结果与实际监测值高度吻合,同时该模型有效展现了支撑轴力随开挖进程的动态演化趋势。

参 考 文 献

- [1] Yin Q, Fu H L. Analysis of foundation pit excavation deformation and parameter influence of pile-anchor-ribbed-beam support system [J]. Applied Sciences, 2023, 13(4): 2379.
- [2] 于景志, 刘燕, 宋享桦, 等. 地铁基坑开挖对紧邻桥桩及支护结构变形的影响[J]. 济南大学学报(自然科学版), 2023, 37(6): 734-738, 745.
Yu Jingzhi, Liu Yan, Song Xianghua, et al. Influence of underground pit excavation on deformation of immediately adjacent bridge piles and supporting structures [J]. Journal of Jinan University (Natural Science Edition), 2023, 37(6): 734-738, 745.
- [3] 董凯, 孔恒, 郭飞, 等. 承压水地层地铁宽基坑围护结构的变形特征[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(2): 683-691.
Dong Kai, Kong Heng, Guo Fei, et al. Deformation characteristics of wide pit enclosure structure of metro in pressurised water stratum [J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(2): 683-691.
- [4] 吴恩琦, 朱超杰, 杨子烨, 等. 基坑开挖与地铁动载对邻近电力管线的影响[J]. 科学技术与工程, 2025, 25(30): 13056-13063.
Wu Enqi, Zhu Chaojie, Yang Ziye, et al. Effects of excavation works and dynamic loads from underground railways on adjacent power pipelines [J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(30): 13056-13063.
- [5] 刘性锋, 刘禹, 李辉, 等. 地铁站深基坑桩撑支护开挖变形[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(33): 14332-14341.
Liu Xingfeng, Liu Yu, Li Hui, et al. Excavation deformation of deep foundation pit pile support in metro station [J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(33): 14332-14341.
- [6] 杨承志, 尹紫红. 内支撑布置对深基坑变形的影响[J]. 科学技术与工程, 2025, 25(16): 6913-6921.
Yang Chengzhi, Yin Zihong. Influence of internal bracing arrangement on deformation of deep excavations [J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(16): 6913-6921.
- [7] 许明杨, 王海涛, 郭涛, 等. 地铁车站深基坑工程降水开挖数值分析[J]. 建筑结构, 2022, 52(S2): 2256-2261.
Xu Mingyang, Wang Haitao, Guo Tao, et al. Numerical analysis of precipitation and excavation in deep foundation pit project of metro station [J]. Building Structure, 2022, 52(S2): 2256-2261.
- [8] Chen D, Wang Z, Jiang K, et al. Study on the coupling effect and construction deformation control of large deep foundation pit groups involving iron considering the coupling effect of seepage stress [J]. Thermal Science and Engineering Progress, 2024, 54: 102780.
- [9] 李忠超, 贺振昭, 梁荣柱, 等. 地铁车站两侧零距离深基坑开挖影响数值模拟[J]. 中国铁道科学, 2025, 46(4): 68-78.
Li Zhongchao, He Zhenzhao, Liang Rongzhu, et al. Numerical simulation of the impact of zero-distance deep excavation on both sides of subway stations [J]. China Railway Science, 2025, 46(4): 68-78.
- [10] 王位赢, 黄全强, 潘珂, 等. 偏压受力车站围护结构变形规律分析[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2024, 49(4): 726-736.
Wang Weiying, Huang Quanqiang, Pan Ke, et al. Analysis of deformation law of station enclosure under bias stress [J]. Journal of Guangxi University (Natural Science Edition), 2024, 49(4): 726-736.
- [11] 刘腾, 李兆平, 王佳豪, 等. 复杂异形深基坑双环形内支撑体系设计及受力变形特性[J]. 都市快轨交通, 2023, 36(6): 90-98.
Liu Teng, Li Zhaoping, Wang Jiahao, et al. Design and force deformation characteristics of double-ring internal support system for complex shaped deep foundation pit [J]. Urban Express Railway Transport, 2023, 36(6): 90-98.
- [12] Zhang L Y, Zhu J M. Numerical simulation and field monitoring analysis for deep foundation pit construction of subway station [J]. Structural Durability & Health Monitoring, 2023, 16(4): 397-416.
- [13] Zhang W G, Han H, Sun W X, et al. Surrogate modeling of deep excavation impacts on existing tunnels in soft clay using finite element simulations and machine learning [J]. Geodata and AI, 2026(8): 100100.
- [14] Zhang S, Yue Z R, Lu X Z, et al. Model test and numerical simulation of foundation pit constructions using the combined artificial ground freezing method [J]. Cold Regions Science and Technology, 2023, 205: 103700.
- [15] 卢福聪, 索潇, 吴波, 等. 承压富水地层地铁车站基坑降水与回灌施工渗流稳定性及地面变形研究[J]. 城市轨道交通研究, 2023, 26(1): 155-160.

- Lu Fucong, Suo Xiao, Wu Bo, et al. Study on seepage stability and ground deformation of underground station pit descending and recharge construction in pressurised water-rich stratum[J]. Urban Rail Transit Research, 2023, 26(1): 155-160.
- [16] 王圣涛, 李然, 申志军, 等. “T”形地铁换乘站深大基坑施工力学响应数值研究与现场实测[J]. 铁道标准设计, 2025, 69(9): 136-145, 155.
- Wang Shengtao, Li Ran, Shen Zhijun, et al. Numerical study and field measurement of mechanical response of deep and large foundation pit construction in “T”-shaped metro interchange station[J]. Railway Standard Design, 2025, 69(9): 136-145, 155.
- [17] 赵泳皓, 甄洁, 栗晴瀚, 等. 软土地区超深基坑对既有地铁变形影响分析[J]. 岩土工程学报, 2025, 47(S2): 205-211.
- Zhao Yonghao, Zhen Jie, Li Qinghan, et al. Analysis of the influence of ultra-deep excavations in soft soil areas on the deformation of existing metro structures[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2025, 47(S2): 205-211.
- [18] Zhang W G, Anthony T C, Xuan F. A simple prediction model for wall deflection caused by braced excavation in clays[J]. Computers and Geotechnics, 2015, 63: 67-72.
- [19] 王卫东, 徐中华, 王建华, 等. 上海地区深基坑周边地表变形性状实测统计分析[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(11): 1659-1666.
- Wang Weidong, Xu Zhonghua, Wang Jianhua, et al. Statistical analysis of measured surface deformation properties around deep foundation pits in Shanghai[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(11): 1659-1666.
- [20] Zhang W G, Goh A T C, Gohk H, et al. Performance of braced excavation in residual soil with groundwater draw down[J]. Underground Space, 2018, 3: 150-165.
- [21] 赵意晋, 刘恒, 蔡晓慧, 等. 深厚软土地层中异形地铁车站深基坑开挖三维数值模拟分析[J]. 南京工业大学学报(自然科学版), 2023, 45(5): 563-572.
- Zhao Yijin, Liu Heng, Cai Xiaohui, et al. Three-dimensional numerical simulation analysis of deep foundation pit excavation for shaped metro station in deep and thick soft ground layer[J]. Journal of Nanjing University of Technology (Natural Science Edition), 2023, 45(5): 563-572.