

DOI: 10.7672/sgjs2025110053

佛山软土地地区深基坑开挖变形特性研究*

武玉山¹, 畅建伟¹, 马玉龙¹, 周 阳¹, 于 磊¹, 张轩宁²

(1. 中铁七局集团西安铁路工程有限公司, 陕西 西安 710032; 2. 西安建筑科技大学, 陕西 西安 710055)

[摘要] 为研究佛山软土地地区深基坑内支撑式地下连续墙变形特性,以佛山地铁 4 号线绿岛湖北站深基坑为工程背景,采用数值模拟与现场实测相结合的方法分析基坑开挖施工过程中支护结构与周边环境的变形规律及影响因素。结果表明:基坑围护结构在浅层深度内表现为向基坑外侧偏移,随着开挖深度的增加,基坑围护结构侧移不断增大,且基坑最大侧移位置保持不变,位于深度 10~20m 范围内。基坑周边地表的沉降随距离的增大呈先增大后减小的趋势,在距离基坑 20~30m 时达到最大沉降值。因此在软弱复合地层基坑开挖时应遵循快撑快挖的原则,必要时可在基坑见底时快速架设临时支撑,有助于变形控制。

[关键词] 地铁;基坑;软弱地层;沉降;数值模拟

[中图分类号] TU753

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2025)11-0053-05

Deformation Characteristics of Deep Foundation Excavation in Soft Soil Area of Foshan Area

WU Yushan¹, CHANG Jianwei¹, MA Yulong¹, ZHOU Yang¹, YU Lei¹, ZHANG Xuanning²

(1. Xi'an Railway Bridge Engineering Co., Ltd. of China Railway Seventh Group, Xi'an, Shaanxi 710032, China;

2. Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an, Shaanxi 710055, China)

Abstract: To study the deformation characteristics of the supporting underground diaphragm wall in the deep foundation excavation in Foshan soft soil area, taking the deep foundation excavation of the Lüdao Lake North Station of Foshan Subway Line 4 as the engineering background, the deformation law and influencing factors of the supporting structure and the surrounding environment during the excavation of the foundation excavation are analyzed by simulation and field measurement. The results indicate that the retaining structure of the foundation excavation is shifted to the outside of the foundation excavation in the shallow depth. With the increase in the excavation depth, the lateral displacement of the retaining structure of the foundation excavation increases continuously, and the maximum lateral displacement position of the foundation excavation remains unchanged, which is located in the depth range of 10~20m. The settlement of the surface around the foundation excavation increases first and then decreases with the increase in the distance, reaching the maximum settlement value when the distance from the foundation excavation is 20~30m. Therefore, the principles of fast support and fast excavation should be followed in the excavation of foundation excavations in weak composite strata. If necessary, temporary support can be set up quickly when the foundation excavation is at the bottom, which is helpful for deformation control.

Keywords: subways; foundation excavation; weak formation; settlement; simulation

0 引言

软土地地区的基坑开挖是复杂且充满挑战的过程,由于其地层含水率高、低强度和易压缩性的特

点,支护结构的设计和施工尤为重要,同时基坑开挖活动不可避免地会对周边环境产生一定影响,包括邻近建筑物、道路、地下管线等。部分学者通过对实测数据的分析研究总结了软土基坑开挖变形的性状与规律^[1-4]。何润洲等^[5]依托深圳某复杂深大基坑群工程,通过有限元三维数值模拟探究了两

* 陕西省重点研发计划(2020SF-373)

[作者简介] 武玉山,高级工程师,E-mail:1483386496@qq.com

[收稿日期] 2025-01-05

侧基坑群不同施工方案对围护结构和敏感建筑的影响。夏文字^[6]选取某淤泥质地层基坑标准段围护结构墙体水平位移、地表沉降、墙顶位移、支撑轴力及地下水位监测数据,分析基坑开挖变形的特点与规律,并提出软土基坑变形的控制措施。杨忠平等^[7]依托某深基坑工程,通过有限元三维数值模拟揭示了淤泥土深长基坑开挖对邻近建筑的影响规律。王占生等^[8]以软土地区某地铁站深基坑工程为例,通过分析地下连续墙施工及深基坑开挖引起的建筑物沉降原理,提出了多种针对性保护措施,并结合实测数据对建筑物沉降和地表沉降规律进行了分析。考虑到各类软土地区的区域分布差异,基坑开挖变形的性状与规律难以具有普适性^[9-11],而当前有关佛山软土地区地铁站深基坑的实测分析和研究较少,因此对佛山地区软土基坑开挖变形特性进行研究具有重要的理论意义和实践价值。

1 工程概况

绿岛湖北站位于弘德北路与禅港路交叉口处,沿弘德北路呈南北向敷设,为单柱双跨 2 层车站,车站总长 239.2m,标准段基坑宽度约 19.7m,深约 17.08m,面积约 4 868m²。采用明挖顺作法施工,先开挖表层土,厚 2m,施作冠梁和第 1 道混凝土支撑,养护完成后,开挖第 2 层土,厚 6.5m,施作第 2 道混凝土支撑,开挖第 3 层土,厚 4.7m,施作腰梁和第 3 道钢支撑,最后开挖坑底土。车站支护结构采用厚 800mm 的 C35 钢筋混凝土地下连续墙+内支撑,基坑标准段地下连续墙深 32.1m,第 1 道支撑标准段为混凝土米字形撑(主撑 700mm×900mm,肋撑 500mm×700mm),水平间距为 9m,端头采用 700mm×900mm 混凝土斜撑,水平间距约 3.5m;第 2 道支撑标准段采用主撑 1 000mm×1 200mm+肋撑 600mm×800mm 的混凝土米撑,端头采用 1 000mm×1 000mm 混凝土斜撑;第 3 道支撑标准段为水平间距 3m 布置的钢支撑(ϕ 800, t =20mm),端头采用水平间距约 3m 布置的 1 000mm×1 000mm 混凝土斜撑。基坑标准段围护结构剖面如图 1 所示。

由勘察结果可知,勘测范围内地层(埋深 50m 内)以黏性土为主,土层较稳定,地层物理力学参数如表 1 所示。地层埋深 5.7m 内为杂填土,穿越强透水层中粗砂层(5.7~13.9m),埋深 13.9~23.3m 范围内为工程性质较差的粉质黏土和淤泥质土,车站基底主要位于淤泥质土及粉质黏土层。

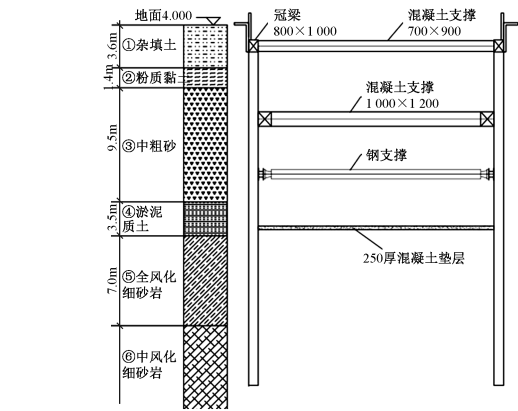


图 1 基坑标准段围护结构剖面
Fig. 1 Profile of the standard section enclosure structure of foundation excavation

表 1 基坑内土体物理力学参数
Table 1 Physical and mechanical parameters of soil in foundation excavation

地层	重度/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	黏聚力/ kPa	内摩 擦角/($^{\circ}$)	泊松比	压缩模量/ MPa
①杂填土	18.3	19.30	12.85	0.40	4.8
②粉质黏土	19.3	14.10	28.34	0.32	7.3
③中粗砂	19.5	3.00	35.00	0.30	7.0
④淤泥质土	19.9	7.82	10.33	0.43	3.4
⑤全风化细砂岩	22.9	17.90	32.27	0.27	6.3
⑥中风化细砂岩	23.9	17.90	32.27	0.24	8.5

2 测点布置

本文主要对基坑开挖引起地下连续墙、地表及建筑物变形进行分析,基坑测点布置如图 2 所示。

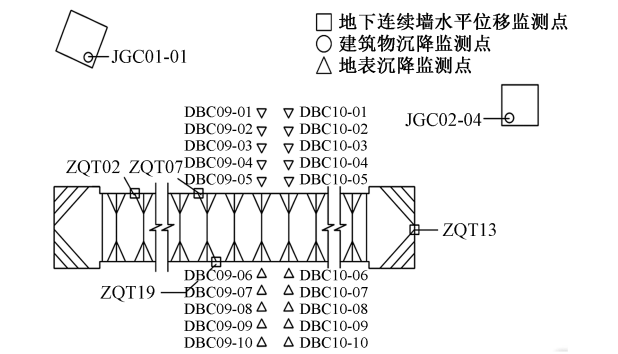


图 2 测点分布
Fig. 2 Distribution of monitoring points

3 监测结果分析

3.1 围护结构变形

选取 ZQT02,ZQT07,ZQT13,ZQT19 地下连续墙变形测点进行分析,各测点变形情况如图 3 所示。由图 3 可知,地下连续墙深层水平位移在深度较浅时主要表现为向基坑内偏移,随着深度的增加,地下连续墙深层水平位移逐渐向基坑外变形。

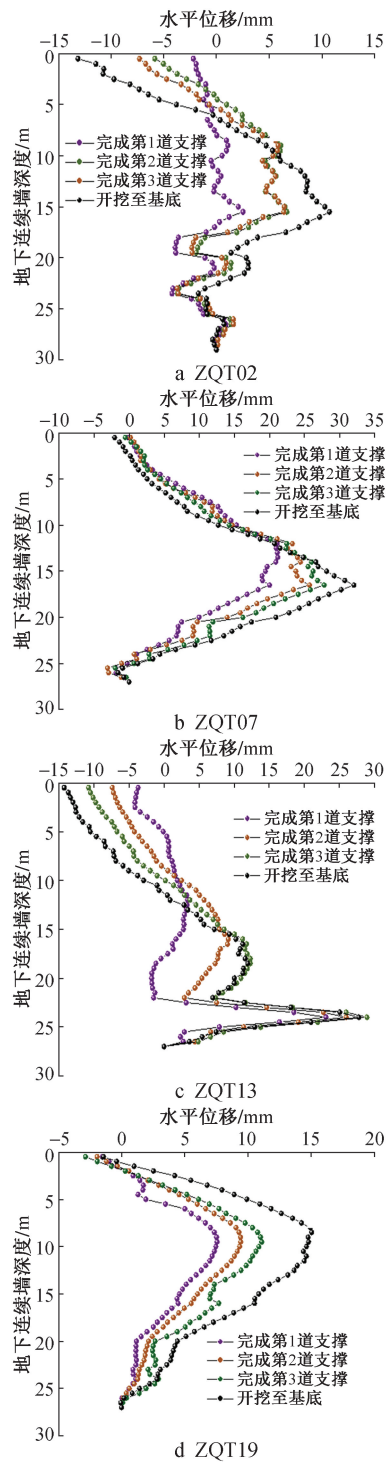


图 3 地下连续墙变形

Fig. 3 Deformation of diaphragm wall

ZQT02 号点位土体在浅层深度向基坑外侧变形,而深层土体向基坑内侧水平变形。不同工况下,向基坑外侧的地下连续墙位移最大值均发生在深度 15.5m 处。在基坑开挖至基底时,地下连续墙位移最大值为 10.72mm。

ZQT07 号点位地下连续墙深层水平位移呈拟线性的变化趋势,且各个阶段下的变形曲线趋势相

近。浅层深度的地下连续墙水平位移变化较小,但随着开挖深度的增加,逐渐向基坑外侧变形,开挖至基底时,达到位移最大值 32.02mm。

ZQT13 点位地下连续墙深层变形与 ZQT02 号点位变形相似,在完成第 1 道混凝土支撑后,地下连续墙发生显著变化,且随深度增加由基坑外侧向基坑内侧偏移。与 ZQT02 点位相比,ZQT13 号点位在基坑开挖见底时,由于坑底存在大量软土,无法形成足够的地层抗力,墙体变形往深层发展,在深 22~26m 时变形速率较大且变形量也更大,在深 24m 处达到 28.99mm。

ZQT19 点位地下连续墙深层水平位移呈抛物线形,在深 8.5m 时达到变形最大值 15.05mm。由于 ZQT07 点位北侧为钢筋加工区和预制 U 形槽加工区,地面堆载较大,因此基坑对称两侧变形相差较大。

综上所述,基坑最大土体深层水平位移在各个开挖工况下基本控制在 10~35mm,未超出设计规定值 40mm。

3.2 地表沉降

基坑场地环境复杂,各类因素均会对地层造成扰动,选取对称分布在基坑南北两侧的地表沉降测点 DBC09-01~DBC09-10 和 DBC10-01~DBC10-10 为研究对象,对基坑开挖过程中的周边地表历时沉降和最大沉降随基坑距离变化情况进行分析,各测点沉降情况如图 4 所示。由图 4 可知,基坑南侧的沉降均值明显大于基坑北侧,基坑周边的地表沉降随与基坑距离的增大呈先增大后减小的趋势,在距离基坑 20~30m 时达到最大值,且控制在 5~20mm,均未达到预警值。

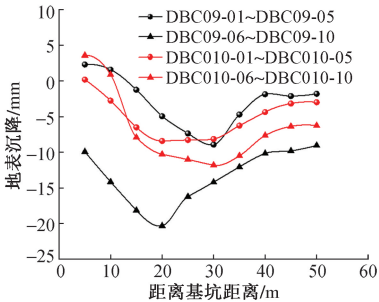


图 4 地表沉降变化

Fig. 4 Surface subsidence changes

3.3 周边建筑物变形

绿岛湖北站基坑西北侧和东北侧分别设有 135kV 高压电塔,基坑开挖对其变形控制要求严格,因此分别选取距离基坑最近的高压电塔沉降测点 JGC01-01 和 JGC02-04 进行位移时程分析,如图 5

所示。由图 5 可知,随着基坑首层土体逐渐开挖,周边建筑物先发生沉降,测点 JGC01-01 和 JGC02-04 均于 40d 时分别达到最大沉降值-2.31,-3.33mm。在架设支撑后,周边建筑物竖向变形逐渐由沉降向隆起转变,由于 JGC01-01 和 JGC02-04 分别位于基坑东西两侧,JGC01-01 于 75d 到达拐点变形值 1.04mm,而 JGC02-04 在 60d 时出现拐点。支撑架设完成后进行最后一层土体开挖,此时两处测点位出现少量沉降,在架设最后 1 道钢支撑后沉降逐渐减小且于 90d 时到达最大地表隆起值 3.82mm 和 5.2mm。

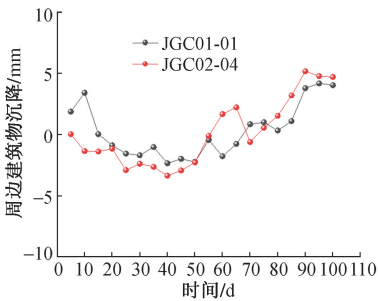


图 5 周边建筑物竖向位移历时曲线

Fig. 5 Duration curve of vertical displacement of surrounding buildings

4 有限元分析

4.1 模型建立及参数选取

通过 MIDAS 有限元软件建立有限元基坑开挖模型(见图 6),基坑围护结构主要包括地下连续墙、混凝土支撑和钢支撑,地下连续墙材料为 C35 钢筋混凝土,第 1,2 道支撑为 C30 钢筋混凝土米字支撑,第 3 道支撑标准段为 $\phi 800$ 钢支撑,支护结构材料参数取值如表 2 所示。

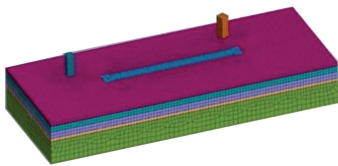


图 6 基坑数值分析模型

Fig. 6 Numerical analysis model of foundation excavation

模型尺寸为 $500\text{m}\times 200\text{m}\times 50\text{m}(x\times y\times z)$,对模型设置约束条件,整个模型左、右两侧界面设置横向位移约束,前后两侧界面设置纵向位移约束,下部土体边界面设置固定约束,顶面不施加任何约束。

基坑共开挖 17.08m,分 4 次进行,开挖深度位置为该道支撑底,直至开挖到基底,施工步骤模拟如表 3 所示。

表 2 支护结构材料参数取值			
Table 2 Parameter values of supporting structure materials			
结构参数	重度/ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	弹性模量/ GPa	泊松比
C35 钢筋混凝土	25.5	35	0.25
C30 钢筋混凝土	25.0	30	0.20
钢支撑	78.5	206	0.30

表 3 施工步骤模拟	
Table 3 Construction steps simulation	
工况	开挖过程模拟
1	初始地应力平衡
2	激活周边建筑物
3	激活地下连续墙和冠梁
4	开挖至地表以下 2m
5	设置第 1 道支撑
6	开挖至地表以下 8.5m
7	设置第 2 道支撑
8	开挖至地表以下 13.2m
9	设置第 3 道支撑
10	开挖至地表以下 17.08m

4.2 计算结果与监测结果对比

测点 ZQT07 点位地下连续墙墙体水平位移数值模拟的计算结果如图 7 所示。由图 7 可知,基坑开挖过程中各阶段地下连续墙墙体上部和底部的水平位移很小,在深 8~24m 范围内变形最明显,且变形及速率随着开挖阶段的进行不断增大,开挖至基底时,在墙体深度 15.5m 达到变形最大值 31.84mm。由于计算中未考虑土体中水的渗流影响,实测数据与模拟值存在差异,但整体变形规律与实测数据基本相符。

选取每次支护完成和开挖到基底的测点进行分析,随着基坑开挖,周边土体先发生沉降后发生隆起变形,且地表沉降最大点的位置基本不变,位于距离基坑 20m 处,计算得到的最大沉降量为 18.99mm,与实测数据相近。设置第 1~2 道支撑发生的土体沉降较大,这是由于第 2 层土体较厚,开挖量大、开挖时间长、架设支撑慢,因此在软弱复合地层基坑开挖时应遵循快撑快挖的原则,必要时可在基坑见底时快速架设临时支撑,有助于变形控制。

5 结语

- 1) 基坑围护结构侧移在浅层深度内表现为向基坑外侧偏移,随着开挖深度的增加,基坑围护结构侧移不断增大,且基坑最大侧移位置保持不变,位于深度 10~20m 范围内。
- 2) 基坑周边的地表沉降随与基坑距离的增大呈现先增大后减小的趋势,在距离基坑 20~30m 时达到最大沉降,基坑南侧存在大量路面堆载,其地

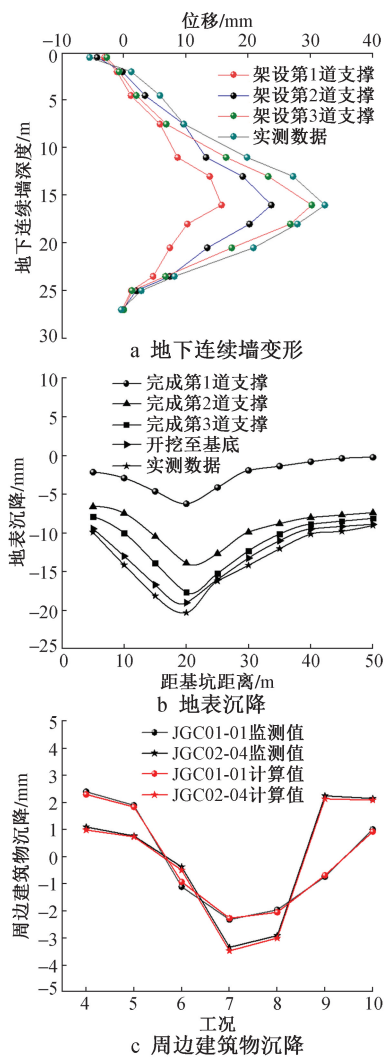


图7 实测数据与数值模拟结果对比

Fig.7 Comparison of measured data and simulation results

表沉降均值明显大于基坑北侧,因此在基坑开挖施工中应合理控制路面堆载。

3)在软弱复合地层基坑开挖时应遵循快撑快挖的原则,必要时可在基坑见底时快速架设临时支撑,有助于变形控制。

参考文献:

[1] 熊一帆,应宏伟,张金红,等.考虑时空效应的杭州软黏土超深基坑地表沉降分析方法[J].上海交通大学学报,2025,59(1):48-59.
XIONG Y F,YING H W,ZHANG J H,et al. Analysis method for ground settlement induced by ultra-deep excavation in Hangzhou soft clay considering time-space effect[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University,2025,59(1):48-59.

[2] 李泽文,谭勇,廖少明,等.上海超深基坑地下连续墙的空间变形特性实测分析[J].岩土工程学报,2024,46(11):2380-2390.
LI Z W,TAN Y,LIAO S M,et al. Field tests on performance of diaphragm wall for an ultra-deep excavation in Shanghai soft ground[J]. Chinese journal of geotechnical engineering,2024,46

(11):2380-2390.

[3] 蔡子勇,刘屹硕,乔世范.深厚软土狭长基坑地连墙变形特性[J].科学技术与工程,2023,23(36):15561-15571.
CAI Z Y,LIU Y Q,QIAO S F. Deformation characteristics of diaphragm wall in deep and narrow foundation pit in soft soil[J]. Science technology and engineering, 2023, 23 (36): 15561-15571.

[4] 朱殷航,徐中华,王卫东,等.软土地层超深基坑支护结构变形特性三维分析[J].地下空间与工程学报,2023,19(S2):767-777.
ZHU Y H,XU Z H,WANG W D,et al. Three-dimensional analysis of the deformation characteristics of the support system of a super-deep excavation in soft soils[J]. Chinese journal of underground space and engineering,2023,19(S2):767-777.

[5] 何润洲,罗胜亮,杨忠平,等.深厚淤泥土深大基坑群同步开挖对紧邻建筑的影响[J].地下空间与工程学报,2024,20(2):577-586.
HE R Z,LUO S L,YANG Z P,et al. Influence of synchronous excavation of deep and large foundation pits with deep silt soil on adjacent settlement-sensitive buildings[J]. Chinese journal of underground space and engineering,2024,20(2):577-586.

[6] 夏文宇.佛山淤泥土深基坑变形实测分析及控制措施[J].地下空间与工程学报,2022,18(S2):1056-1062.
XIA W Y. Deformation measurement analysis and control measures of deep foundation pit in Foshan silt soil[J]. Chinese journal of underground space and engineering, 2022, 18 (S2): 1056-1062.

[7] 杨忠平,刘浩宇,周小涵,等.深厚淤泥土深长基坑开挖对邻近建筑的影响[J].地下空间与工程学报,2022,18(3):1015-1024.
YANG Z P,LIU H Y,ZHOU X H,et al. Influence of deep foundation pit excavation on adjacent buildings under unfavorable geological conditions of deep silt soil[J]. Chinese journal of underground space and engineering,2022,18(3):1015-1024.

[8] 王占生,杜江涛.软土地区深基坑超邻近建筑物施工的保护技术[J].城市轨道交通研究,2023,26(5):198-203.
WANG Z S,DU J T. Protection technology for super-adjacent buildings during deep foundation pit construction in soft soil area[J]. Urban mass transit,2023,26(5):198-203.

[9] 张榜武.软土地区紧邻既有地铁站深基坑施工安全技术[J].施工技术(中英文),2024,53(18):125-128.
ZHANG B W. Construction safety technology of deep foundation excavation adjacent to existing subway station in soft soil area[J]. Construction technology,2024,53(18):125-128.

[10] 李列娟,董红刚,马炳剡,等.软土地区复杂基坑支护综合施工技术[J].施工技术(中英文),2024,53(16):92-96.
LI L J,DONG H G,MA B Y,et al. Comprehensive construction technology of complex foundation excavation support in soft soil area[J]. Construction technology,2024,53(16):92-96.

[11] 梁本龙,彭京锐.滨海深厚软土超大基坑开挖变形特征研究[J].施工技术(中英文),2024,53(11):103-108.
LIANG B L,PENG J R. Excavation deformation characteristics of super large excavation in coastal deep soft soil[J]. Construction technology,2024,53(11):103-108.