

邻近轨交区间隧道深基坑微扰动施工技术

吴少谦

[上海公路桥梁(集团)有限公司, 上海市 200433]

摘要: 随着城市化进程的加快,城市可用土地不断减少,且基坑周边影响因素渐趋复杂,因此对深基坑工程的施工标准及风险管控要求不断提升。依托淞沪路~三门路下立交工程,分析了深基坑工程施工对周边环境影响的主要原因。根据主要原因分别采取了深基坑工程变形控制的主要施工技术和方法,包括三轴搅拌桩微扰动槽壁加固技术、坑内差异化地基加固、地下连续墙质量无损检测、型钢垫层快速稳定坑底变形技术、基坑快速开挖管理等,并通过实例验证,可为同类项目提供经验。

关键词: 深基坑;轨交区间隧道;微扰动

中图分类号: U455

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2025)11-0244-05

Micro-disturbance Construction Technology of Deep Foundation Pits near Rail Transit Section Tunnel

WU Shaoqian

[Shanghai Road and Bridge (Group) Co., Ltd., Shanghai 200433, China]

Abstract: With the acceleration of urbanization, the available land in cities is constantly decreasing, and the influencing factors around foundation pits are becoming increasingly complex. Consequently, the construction standards and risk management requirements for deep foundation pit engineering are continuously being heightened. Based on the Songhu Road - Sanmen Road Underpass Project, the main reasons for the impact of the construction of deep foundation pit engineering on the surrounding environment are analyzed. According to the main reasons, the main construction techniques and methods for deformation control in deep foundation pit engineering are respectively adopted, including the three-axis mixing pile micro-disturbance tank wall reinforcement technology, the differentiated foundation reinforcement within the pit, the non-destructive testing of underground diaphragm wall quality, the rapid and stable deformation technology for the bottom of pits with section steel cushion layers, and the rapid excavation management of foundation pit. These technologies and methods are validated through the practical cases, and can provide the experience for the similar projects.

Keywords: deep foundation pit; rail transit section tunnel; micro-disturbance

0 引言

深基坑施工在城市建设发展中占据着举足轻重的作用,其为城市地下空间开发的主要手段。因大中型城市基础设施逐步完善、城市可用土地不断减少的原因,导致城市发展空间不得不向地下空间拓展,导致深基坑工程深度越来越深;另外,城市完善的基础设施和繁忙的社会交通活动成为深基坑工程重要的障碍,对深基坑工程的施工标准不断提升,同时严重增加了深基坑工程风险事故的损失。

面对以上情况,国内各地不断提升深基坑工程

安全措施,研发或引进可应用于深基坑工程的先进施工工艺,如钢支撑伺服系统^[1]、地下连续墙 GXJ 接头^[2-3]等,刘家骥^[4]以地铁周边拓建工程为背景,通过优化开挖施工组织,围护跳打施工、钢支撑自动预应力补偿等技术,达到了对周边地铁保护微扰动的应用效果。焦卓^[5]通过试桩优化搅拌桩施工参数、合理调整施工顺序,支护体系及时形成等方法,实现了对轨交扰动的稳定可控。另外,在基坑设计上综合考虑了变形控制因素,如上海地区的深基坑工程普遍在坑内设计了坑底地基加固等。

本文依托淞沪路-三门路下立交工程,对近轨交区间隧道的深基坑微扰动施工技术展开研究,为今后类似工程施工提供参考依据。

收稿日期: 2025-04-16

作者简介: 吴少谦(1992—),男,本科,工程师,从事土木工程施工管理工作。

1 工程概况

1.1 项目概况

淞沪路~三门路下立交工程位于上海市杨浦区淞沪路、闸殷路上,见图1。其中主线780 m,匝道860 m,主要采用明挖基坑工艺施工。基坑宽15.7~36.8 m,深约0.8~20.8 m,基坑围护结构采用地下连

续墙、SMW工法桩。其中深基坑工程平行于轨道交通10号线1.1 km以上,对深基坑施工提出了较高的要求。轨道10号线区间隧道埋深约20 m,其埋深深度处于深基坑开挖范围之内;并且基坑围护距离区间隧道较近,最近处仅1.42 m,距离在5 m以内的深基坑长达100 m以上,深基坑工程施工对临近地铁区间隧道影响较为敏感。

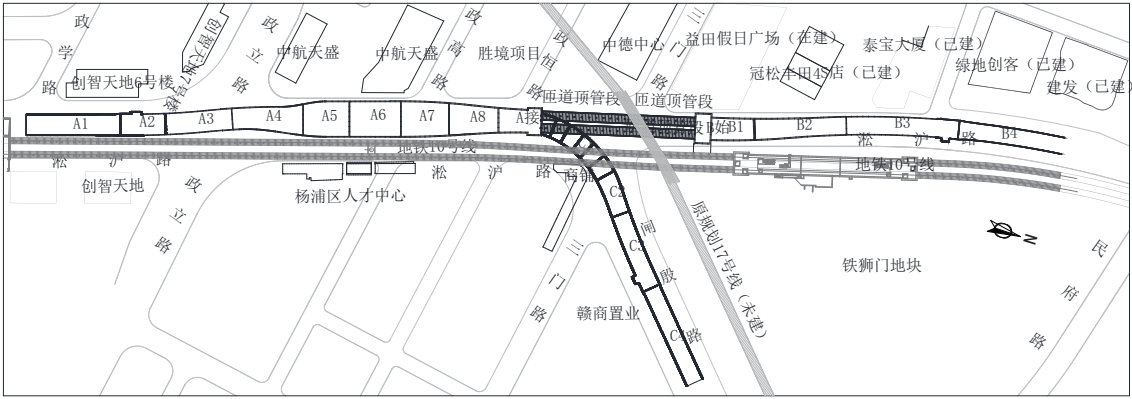


图1 淞沪路-三门路下立交工程总平面图

1.2 水文地质条件

工程主要的不利土层为④层淤泥质黏土、②₃₋₁砂质粉土及②₃₋₂粉砂,其中②₃₋₁砂质粉土渗透性强,并具有一定的液化特性,对围护结构防渗较为不利。

基坑坑底土层主要为④层淤泥质黏土、②₃₋₁砂质粉土及⑤粉质黏土,见图2及表1。工程沿线承压水为⑦层承压水,其顶部埋深为27.47~28.75 m,则深度大于13.6 m以上的基坑均需要采取降压措施。

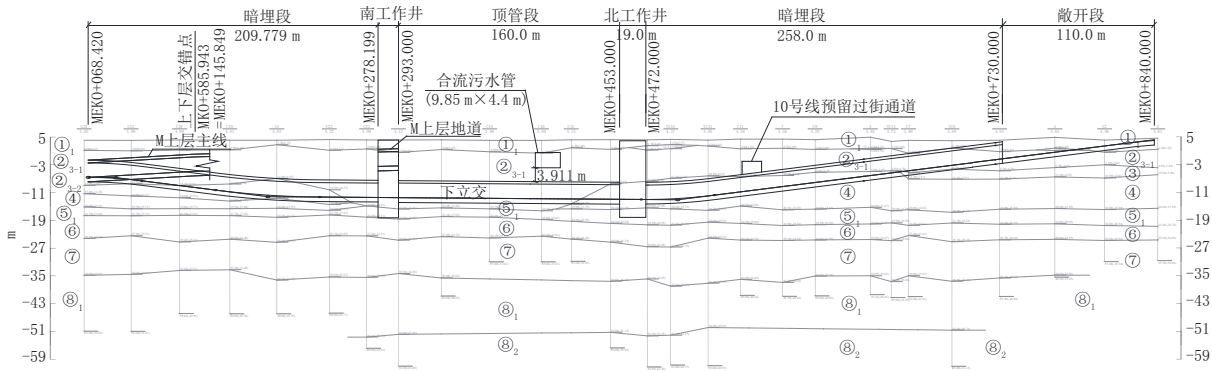


图2 工程地质纵剖面图

工程勘探深度范围内地下水主要为赋存于浅部土层中的潜水和第⑦层粉性土的承压水。勘察期间测得的地下水静止水位埋深一般为0.4~2.38 m。场地承压水分布于第⑦层黏质粉土夹粉质黏土中,埋深一般在3~12 m,低于潜水水位,并呈周期性变化。

2 深基坑对10号线区间隧道的影响分析

通过对工程地质、周边环境因素及施工工艺等因素的分析,深基坑施工对10号线区间隧道的变形影响主要存在以下几个方面:

(1)三轴搅拌桩槽壁加固施工土层的扰动引发的区间隧道变形。临近区间隧道一侧的三轴搅拌桩

下沉和上提施工对地层局部容易产生较大集中荷载,同时对地层土体结构具有较高破坏力。如果三轴搅拌桩快速连续施工,则容易对区间隧道产生较大变形;

(2)砂质粉土及粉砂层渗透性强、易液化,围护结构渗漏引发周边地层变形的风险远高于粘性土层,因此围护结构渗漏对区间隧道产生较大风险;

(3)基坑施工管理与施工方法不当直接加大了开挖时基坑变形,可直接导致临近地铁区间变形增大;

(4)基坑支护结构方式对基坑变形影响明显,可诱发临近地铁区间隧道的变形。

表 1 土层特性表

层序	土名	层底埋深/m	土层描述
① ₁	人工填土	1.00~3.70	杂填土,含碎石、砖块等建筑垃圾;底部以黏性土为主;
② ₁	粉质黏土	2.1~4.3	含氧化铁斑点及铁锰质结核,土质自上而下渐软;
② ₃₋₁	砂质粉土夹粉质黏土	6.3~20.8	含云母、有机质,部分孔以黏质粉土为主,土质不均;
② ₃₋₂	粉砂	12.4~18.95	颗粒成分以石英、长石为主,局部夹砂质粉土及细砂;
③	淤泥质粉质黏土	10.0~12.0	含云母、有机质,夹薄层粉土
④	淤泥质黏土	18.2~21.7	含云母、有机质条纹,层底夹少量黏土
⑤ ₁	粉质黏土	20.6~29.8	含云母、有机质,夹薄层粉土,局部夹粘土、淤泥质粉质黏土
⑤ ₂	黏质粉土	24.7	含云母、有机质,夹黏性土
⑤ ₃	粉质黏土	29.0~34.8	含云母、有机质
⑥	粉质黏土	26.8~31.0	含氧化铁条纹及铁锰质结核,局部层底夹粉性土
⑦	砂质粉土夹粉质黏土	36.5~42.4	含云母、有机质,夹黏质粉土,部分孔以黏质粉土为主
⑧ ₁	粉质黏土	53.5~60.0	含云母、有机质条纹,上部含多量黏土,土质尚均匀

3 深基坑微扰动施工关键技术

3.1 三轴搅拌桩槽壁加固施工关键点

本工程三轴搅拌桩槽壁加固为两种形式,外侧为 $\phi 850$ 套打三轴搅拌桩,内侧为 $\phi 650$ 搭接三轴搅拌桩。为保护临近地铁 10 号线区间,近轨行区段施工前,通过在远离地铁侧进行搅拌桩非原位试桩试验,在相应距离土层布置深层土体测斜、土层分层沉降、空隙水压力等监测点,对各种施工参数与工艺进行了效果验证。形成了一套有效的、独特的三轴搅拌桩槽壁加固控制技术,核心参数及工艺控制为:

- (1)先施工外侧再施工内侧;
- (2)外排 $\phi 850$ 套打三轴搅拌桩:采用两搅两喷,跳三打一^[6]顺序施工,相邻两幅桩间隔至少 3 d,见图 3。搅拌桩水灰比控制在 1.2,下钻和上提速度分别控制在 0.3 m/min、0.6 m/min,水泥浆液流量控制为 180 L/min,理论搅拌桩水泥掺量为 22%。
- (3)内排 $\phi 650$ 搭接三轴搅拌桩采用两搅两喷,跳一打一顺序施工,相邻两根三轴间隔 3 d,见图 4。搅拌桩水灰比控制在 1.2,下钻和上提速度分别控制在 0.5 m/min、1.2 m/min,水泥浆液流量控制为 180 L/min,

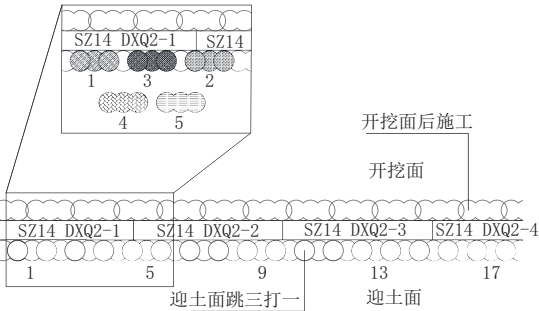


图 3 外侧槽壁加固施工流程示意图

理论搅拌桩水泥掺量为 20%。

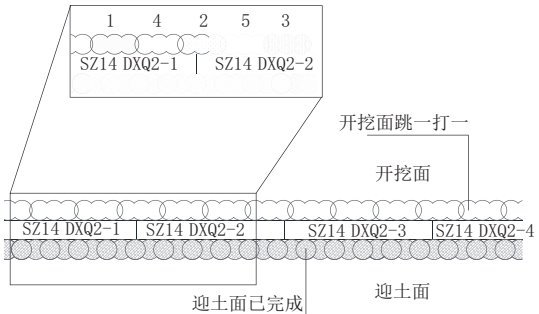


图 4 内侧槽壁加固施工流程示意图

3.2 支护结构

对地铁区间隧道影响较大的深基坑均采用地下连续墙结构。根据基坑的深度不同,地下连续墙不仅深度增加,而且厚度也进行了调整,地下连续墙厚包含 1.0、0.8 m 两种。

地墙采用防渗性能较好的 GXJ 结构和十字钢板接头。

支撑选择钢支撑伺服系统,充分发挥钢支撑伺服系统主动加载功能和变形实施监测和控制的功能,对支撑轴力进行实时分析,指导深基坑工程下一步开挖和支撑轴力加载。

对于超宽基坑,采用两柱三段式钢支撑,既然保证了钢支撑的稳定,又加快支护施工速度。

3.3 差异化地基加固

基坑采用了差异化地基加固,在存在地铁区间隧道一侧进行加强加固措施,裙边加固深度由 3 m 增加到 6 m,从而提升了坑内临近地铁区间一侧土体的整体性与强度,对基坑坑底处围护结构变形控制提供了有力的支撑作用,见图 5。

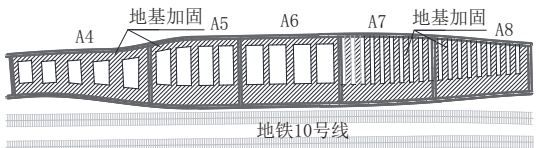


图 5 坑内差异加固示意图

3.4 地下连续墙无损检测

采用跨孔雷达检测技术,对地下连续墙施工质

量进行无损检测,检测设备见图6。检测时,利用地下连续墙预埋测斜管进行检测^[7],不增加任何辅助设施。该方法具备分米级缺陷识别能力,可对地墙内部缺陷位置实施精准定位,其检测结果可提前发现地墙施工缺陷,并为修复方案地确定提供有效指导,通过提前干预,减少开挖过程中对地铁的扰动。

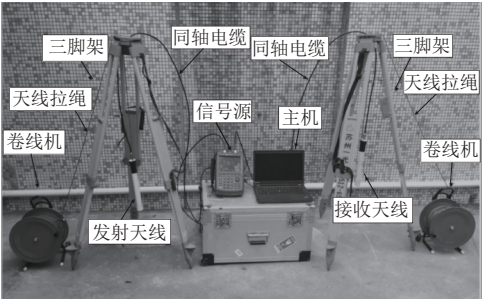


图6 无损检测设备组成

3.5 基坑开挖管理

减少基坑开挖面的无支撑暴露时间,是减少基坑开挖围护变形的重要方式。现场结合地铁停运时间,严格制定基坑施工管理制度,通过减小分仓,分层开挖,快速支撑,减少超挖等具体实施方案,来保证基坑的稳定。开挖时先开挖中间后两侧,每开挖完一仓土(具备的两根支撑安装的空间为一仓)之后,8h内完成本仓土支撑安装。土方开挖期间24h连续作业,无突发情况中途不得停止,以最短时间完成分基坑开挖。

基坑开挖期间,采用数字化管理系统,充分监控作业机械和作业人员,保障工程安全、人员安全,见图7。

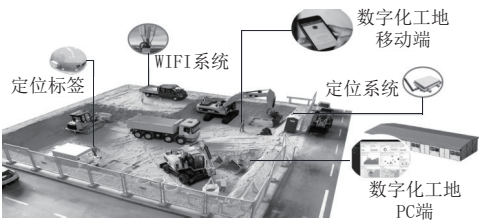


图7 施工现场智能监控系统总览

3.6 型钢垫层应用

为达到基坑时空效应控制需求,通过型钢垫层达到主动控制的目的,选用H200×200型钢,按照设计钢支撑间距,沿基坑横断面进行通长布置,安装过程中,确保型钢腹板与两侧围护桩紧密接触,形成连续传力路径。

该措施可有效地将围护结构变形节点由传统的底板施工阶段前移至垫层施工阶段,能够快速建立围护结构反向约束体系,抑制围护结构位移及基底隆起,从而起到减少对周边土体及地铁变形影响作用。

4 基坑变形实例分析

A6基坑为地道渠化段,为全线最宽基坑,也是距离在运营轨交隧道最近的基坑。现以A6深基坑的监测数据对基坑施工对周边环境的影响进行数理分析。A6基坑深基坑宽36 m,坑底深度14.1~15.5 m。围护结构采用800 mm厚地下连续墙、墙深40.5 m,地下连续墙内外侧均采用搅拌桩槽壁加固,地铁区间隧道距离基坑外侧槽壁加固均在2 m左右,见图8。基坑支护结构采用1道混凝土支撑+3道钢支撑,各钢支撑距离地面深度依次约为5.2、9.2、11.9 m。基坑测点及地铁区间隧道布置见图9。

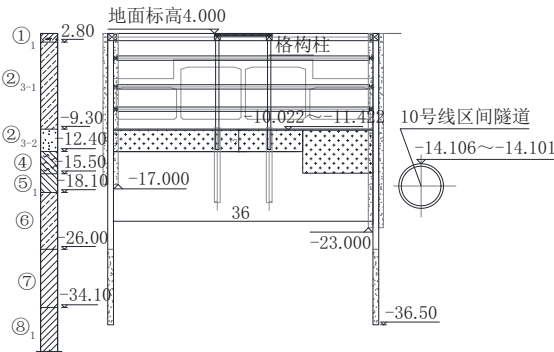


图8 A6基坑与地铁区间位置关系示意图

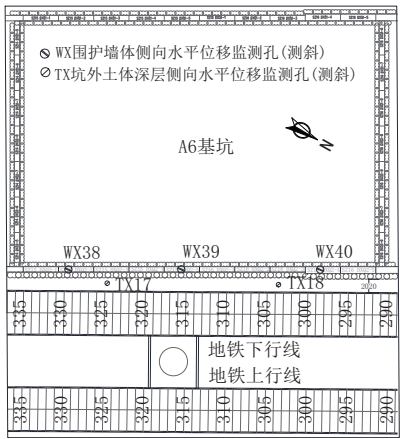


图9 监测点位及地铁区间位置关系图

4.1 坑外深层土体水平位移分析

由于监测孔距离地铁区间较近,而监测工作多数在地铁运行期间进行,导致监测数据一定程度受到地铁列车振动干扰,使得监测数据曲线有一些波动。图10显示土体深层水平位移最大数值约12.3 mm,处于坑底以下2 m左右(地铁区间隧道顶部以上2 m左右)。总体上,采用差异化加固、钢支撑伺服系统等措施后,基坑周边变形可控。通过图10可以发现,基坑收底后,坑底处未得到有效支撑,暴露时间过长,造成基坑坑底及以下发生显著的水平变形,并且

使得土体水平最大变形点上移。坑底以上土层开挖时候,基坑采用随挖随撑的措施,而基坑收底需要将大范围的土体全部挖除,导致坑底位置大范围的围护结构不能及时得到有效支撑,从而导致基坑收底时土体水平位移显著增大。因此,基坑收底过程中,采用分区分块收底,在变形敏感区域,适当增加型钢垫层,及时浇筑混凝土,对基坑的变形稳定具有一定的作用。

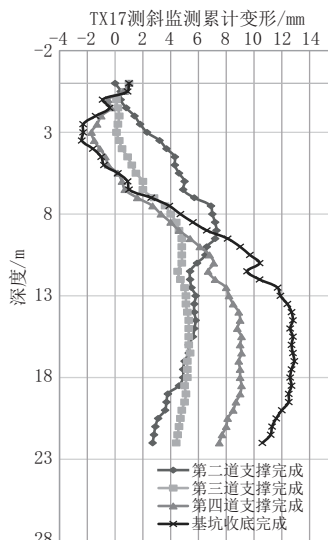


图10 TX18 深层土体水平位移

4.2 坑外深层土体水平位移分析

根据地铁轨道下行线监测数据,进行分阶段隧道水平收敛情况进行分析,见图11。

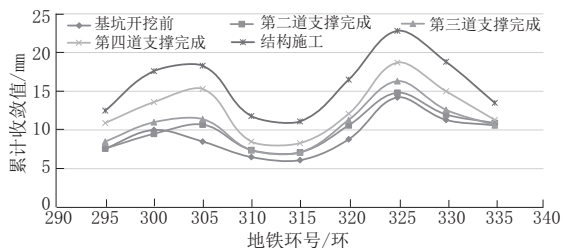


图11 基坑施工期间地铁区间隧道收敛变形

如图11所示,A6基坑开挖施工期间,10号线区间隧道最大水平收敛变形8.6 mm,发生在325环位置。工程施工期间累计水平收敛变形22.8 mm,该数

值包含工程施工影响和工程施工之外的其他因素影响,地铁区间隧道总体变形可控。

5 结 语

明挖深基坑技术是地下空间开发最为成熟、研究最广的工艺。越来越多的城市更新工程的首要控制要点已经发展成为对周边建筑物的保护。深基坑施工过程中,对各类工序的微扰动施工措施和灾害检测技术急需发展研发。

本文依托淞沪路~三门路下立交工程,结合工程实例,分析介绍了周边存在重要保护建筑物的深基坑微扰动综合控制关键技术,主要形成如下结论:

(1)围护结构和地基加固实施的方法和效果,直接影响基坑变形,尤其是在渗透性强的粉砂地层,极易出现流沙、管涌现象,施工中,可通过非原位试验和无损检测技术进行提前干预,从而减少缺陷,为软土地区复杂环境、复杂地层中的深基坑工程施工提供了工程实践经验。

(2)伺服钢支撑系统通过主动控制,对基坑变形进行有效干预,型钢垫层能够减少底板形成前的坑底隆起影响,对变形控制具有积极作用。

参考文献:

- [1] 贾尚华. 伺服、普通钢支撑下基坑测斜对比分析研究[J]. 建筑施工, 2020, 42(10): 1997-1999.
- [2] 曾俊杰. 软土地层超深地下连续墙GXJ接头施工工艺[J]. 隧道与轨道交通, 2021(增刊1): 150-152.
- [3] 吴晓皓. 地下连续墙施工中的GXJ接头应用研究[J]. 建筑施工, 2018, 40(4): 463-464; 467.
- [4] 刘家骥. 紧邻既有运营地铁的换乘车站微扰动拓建技术研究[J]. 建筑施工, 2024, 46(10): 1673-1678.
- [5] 焦卓. 临近地铁侧微扰动施工措施的研究[J]. 山西建筑, 2021, 47(9): 80-82.
- [6] 刘飞, 韩建勇. 近地铁轨行区微扰动三轴搅拌桩试验研究[J]. 建筑施工, 2020, 42(10): 1838-1840.
- [7] 贾尚华, 陶利. 跨孔雷达在地下连续墙完整性检测中的应用研究[J]. 隧道与轨道交通, 2020(4): 23-26.