

紧邻地铁软土深基坑分坑快速施工技术研究

杜冠群

[上海城建市政工程(集团)有限公司,上海市 200232]

摘要:在城市快速发展背景下,紧邻地铁及地下管线的深基坑工程建设对安全与施工效率提出更高要求。针对软土地区复杂环境下的深基坑施工难题,结合上海市某大型综合开发项目实践,采用“四轴搅拌桩止水帷幕+超厚底板跳仓法+环形底板先行封闭+混凝土支撑轴力伺服系统”相结合的分坑快速施工技术体系。通过四轴搅拌桩提升止水效率,跳仓法减少后浇带设置并控制裂缝,环形底板提前形成封闭结构实现关键线路工期优化,并利用轴力伺服系统主动调控支撑变形。实施结果显示,基坑深层土体最大侧向位移控制在33.7 mm (2.56‰He),有效降低了对邻近地铁结构的影响,成功地规避春节停工带来的暴露风险,显著提升施工安全性与组织效率。该技术体系实现了变形控制与工期压缩的双重目标,为同类敏感环境下的深基坑快速施工提供了可行路径。

关键词: 基坑工程;分坑施工;紧邻地铁;软土地基;快速施工

中图分类号: U46+3

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2026)05-0363-06

Analysis on Rapid Sub-pit Construction Technology of Deep Foundation Pit in Soft Soil Adjacent to Subways

DU Guanqun

[Shanghai Urban Construction Municipal Engineering (Group) Co., Ltd., Shanghai 200232, China]

Abstract: Against the backdrop of rapid urban development, the higher requirements are proposed for the safety and construction efficiency in the construction of deep foundation pits adjacent to subways and underground pipelines. Addressing the challenges of deep excavation construction in complex soft soil conditions, and combined with the practice of a large-scale integrated development project in Shanghai, a rapid sub-pit construction technology system is adopted, which combines “four-axis mixing pile water-stop curtain + ultra-thick bottom plate jumping bin method + annular bottom plate advance sealing + concrete support axial force servo system”. The water-stop efficiency is improved through four-axis mixing piles. The jumping bin method is used to decrease the setup of post-pouring belt and the cracks are controlled. The circular bottom plate is formed into a closed structure in advance to optimize the critical route schedule. And the axial force servo system is utilized to actively regulate the support deformation. The implementation results show that the maximum lateral displacement of deep foundation pit soil is controlled at 33.7 mm (2.56‰He), the impacts on the adjacent metro structures are effectively reduced, the exposure risks brought about by work stoppage during the Spring Festival are successfully circumvented, and the construction safety and organization efficiency are significantly enhanced. The technical system has achieved the dual objectives of deformation control and schedule compression, providing a viable pathway for rapid construction of deep foundation pits in similarly sensitive environments.

Keywords: foundation pit engineering; sub-pit construction; close to subway; soft soil foundation; rapid construction

0 引言

随着我国城市化发展,基础设施已经建设的相对完善,而新建的地标建筑一般都会选址在交通较为发达的中心位置,基坑周边具备地铁、管线等复杂

环境,需要对深基坑的变形进行严格的控制^[1-2]。面对如此高的变形要求和标准,基坑设计和施工常采用“基坑分坑,分区开挖”这一模式^[3-6]。

闫高峰^[7]提出“分坑施工+轴力补偿”开挖支护方法,实现了基坑变形的精准控制与高效施工;罗嵩等^[8]利用数值模拟对分坑施工全过程进行模拟,提出两套分坑施工方案;杨益平等^[9]提出一套基坑群分坑与围护结构设计方案,并利用数值模拟对基坑

收稿日期: 2026-01-26

作者简介: 杜冠群(1977—),男,本科,高级工程师,从事施工工程管理工作。

群分区开挖的典型剖面进行分析;孙政波等^[10]通过实测与数值模拟,研究了不同分坑空间效应以及不同地中壁参数对基坑开挖变形影响,得到地中壁对空间效应的增强结论;周浩飞等^[11]对地铁规划控制区零施工场地超深超大基坑快速施工关键技术进行了研究,形成了一套完整的关键技术;朱文舟等^[12]采取优化支撑结构形式、增加斜抛撑及改进斜抛撑节点等措施加快了基坑分坑施工;刘羽等^[13]采用数值模拟与实测数据对整体开挖与分坑开挖两种方式进行分析,得到分坑开挖方式可明显减小围护的最大水平位移。王沛等^[14]根据上海软土环境,研究“大坑+条坑”的分区开挖方式对基坑隧道位移的影响,并给出部分参数的建议值。杨玉江等^[15]通过案例分析,说明采用合理的分坑施工技术可有效降低深大基坑开挖变形。

综上所述,对变形要求较高的工程大多数都采用了分坑施工,且都在考虑如何采取相应方法实现工期节省。本文以上海市某大型综合开发项目为背景,针对紧邻地铁软土地基深基坑分坑快速施工技术进行研究,提出一套融合四轴搅拌桩止水帷幕、超厚底板跳仓法施工与环形底板先行封闭技术于一体的分坑快速施工技术体系,不仅实现了高效止水与结构换撑的协同控制,还通过时空优化显著缩短了关键线路工期,可以为类似复杂环境下深基坑分坑快速施工提供可复制、可推广的技术参考。

1 工程概况

1.1 工程项目情况

本工程位于上海市奉贤区,拟建建筑物包含7幢住宅楼,2幢近百米商业办公楼,6幢附属商业楼以及KP站等相关配套建筑。项目基坑总面积约45 700 m²,基坑总延长约940 m,设置两层地下室,普遍区域底板面标高为-10.200 m,基础底板厚度为800 mm,塔楼区域底板加厚至2 500~2 800 mm。普遍区域挖深为10.65~12.65 m,深坑区域局部落深为1.50~3.90 m。

1.2 周边环境情况

本工程东侧临近上海地铁5号线,东侧基坑边线距离地铁5号线高架边线最近约33.0 m,距离地铁5号线萧塘地铁站出站口最近约13.5 m;基坑西侧30 m为乐康苑小区,基坑西南角13 m为2颗需保护古银杏树,基坑北侧20 m为氯碱化工危险品管道,周边市政道路和管线均距离基坑较近,场地周边环

境较复杂,基坑与周边环境及基坑分坑示意如图1所示。

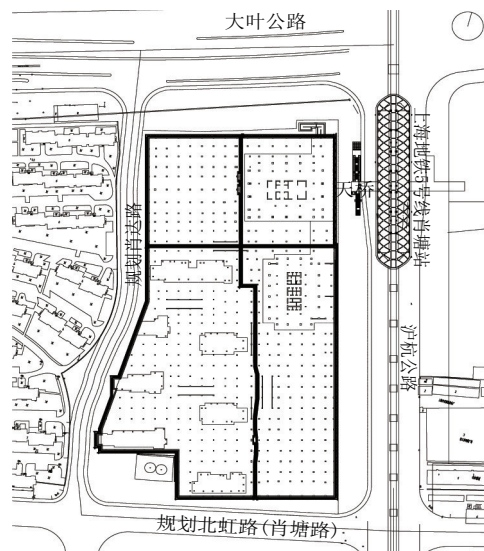


图1 基坑与周边环境及基坑分坑示意

1.3 水文地质情况

场地势整体较为平坦,局部有起伏,整个项目场地标高为4.85~6.31 m,稳定水位埋深约0.90~1.60 m,标高3.45~4.99 m,平均稳定水位埋深1.32 m,基坑开挖范围内主要由软弱黏性土、粉土及砂土组成。

2 基坑支护设计

2.1 围护形式设计

本工程基坑周边围护结构采用灌注桩结合外侧水泥土搅拌桩止水帷幕,东侧邻近地铁车站侧采用800 mm厚地下连续墙,东侧邻近地铁高架区域和北侧采用 $\phi 1000@1200$ 钻孔灌注桩,西侧及南侧侧采用 $\phi 900@1100$ 钻孔灌注桩,临时隔墙采用 $\phi 850@1050$ 钻孔灌注桩。

2.2 支撑体系

本工程基坑为方形,共分为4个分坑(A1、A2、B1、B2),其中A2分坑靠近5号线车站,水平支撑采用正交十字的布置形式,竖向设置三道支撑,下方两道垂直地铁方向为伺服轴力混凝土支撑,A1、B1和B2地块水平支撑采用对撑角撑结合边桁架的布置形式,竖向设置两道混凝土支撑,坡道区采用钢板桩结合一道水平钢支撑作为围护结构,支撑体系如图2所示。

2.3 相邻基坑工况设计

本工程基坑采用顺作法,分4个大坑开挖,每个基坑每层土方开挖分为若干段,基坑各施工工况如图3所示。

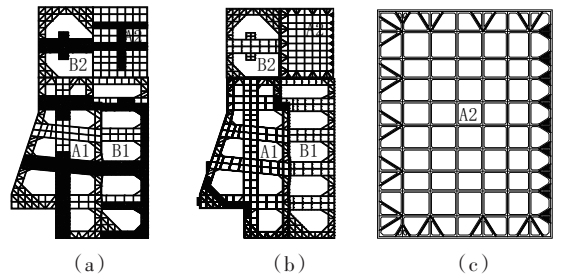


图2 支撑布置示意

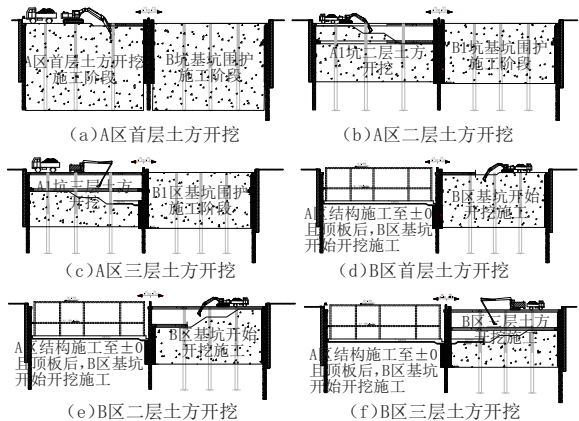


图3 基坑施工工况

2.3.1 A 区基坑施工工况 (A1、A2)

(1) 场地平整,施工完成 A 区场地地坪硬化、地下连续墙、围护排桩、三轴水泥土搅拌桩、四轴水泥土搅拌桩、工程桩、加固体、临时立柱桩;

(2) A 区浇筑第一道混凝土压顶梁和支撑杆件;

(3) A 区第一道支撑完成并达到设计要求后,完成第一层土开挖,施工第二道混凝土围檩和支撑杆件;

(4) A1、A2 区第二道支撑完成并达到设计要求后同时向下开挖,其中 A1 区直接开挖到基底位置,浇筑垫层、基础底板及周边换撑板带,A2 区继续开挖二层土,施工第三道混凝土围檩和支撑杆件;

(5) A2 区第三道支撑达到设计要求后,基坑内土方向下开挖至基底位置,浇筑垫层、基础底板及周边换撑板带;

(6) 待基础底板全部达到设计要求后,拆除 A1 区第二道混凝土支撑和 A2 区第三道混凝土支撑,浇筑地下一层梁板,并设置临时换撑构件;

(7) 待地下一层结构满足设计要求,拆除 A1 区第一道混凝土支撑和 A2 区第二、三道混凝土支撑,并浇筑地下首层梁板,设置临时换撑构件。

2.3.2 B 区基坑施工工况 (B1、B2)

(1) A 区基坑地下结构全部施工完成后,B 区浇筑第一道混凝土压顶梁和支撑杆件;

(2) B 区第一道支撑全部形成并达到设计要求

后,开挖第一层土,施工第二道混凝土围檩和支撑杆件;

(3) B 区第二道支撑完成养护后,基坑内土方向下开挖至基底位置,浇筑垫层、基础底板及周边换撑板带;

(4) 待基础底板全部达到设计要求后,拆除 B 区第二道混凝土支撑,完成地下一层浇筑;

(5) 待地下一层结构梁板达到设计要求后,拆除首道支撑并浇筑地下首层梁板。

3 分坑快速施工技术体系

3.1 四轴搅拌桩

本工程临地铁及北侧临近管线区域的隔水帷幕采用 $\phi 850@650$ 四轴水泥土搅拌桩,采用套接一孔法施工其成桩历程如图 4 所示。

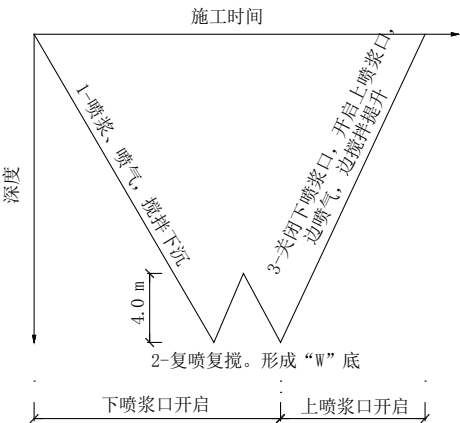


图4 成桩历程曲线

四轴水泥土搅拌桩采用专用设备进行施工,下沉水灰比 1.5,提升水灰比 1.0,下沉喷浆占比 30%,提升占 70%,下沉速度控制在 0.5 ~ 0.8 m/min,并保持 1 m/min 以内匀速提升。施工时对地内压力实时监测,当地内压力值超过正常设定值时,可通过减小加气压、降低搅拌下沉或提升速度,降低地内压力。

常规的三轴搅拌桩,单桩施工周期较长,以 30 m 桩长、1 m/min 的下沉/提升速度为例,完成单桩需要 90 min,加固工程量约 44.85 m³。而四轴搅拌桩施工效率为三轴的 1.37 倍,相同条件下加固量达 61.5 m³。

3.2 超厚底板跳仓法施工

本工程底板厚度总体来说有 800、2 200、2 500、2 800 mm 四种厚度,原设计伸缩后浇带超 3 000 m,在进行跳仓法设计时,考虑沉降后浇带保留,温度后浇带采用跳仓法取消。

基础底板“跳仓法”施工段的划分布置如图 5 所示,2 800 mm 的底板分块最大尺寸 85 m,超过 40 m,

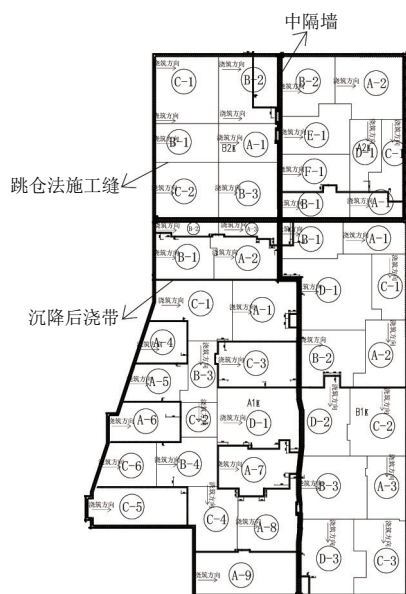


图5 基础筏板跳仓划分布置图

对此区域底板分仓进行验算,计算结果如表1所示。

表1 混凝土收缩变形不同条件下影响修正系数

M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11
1	1.06	1.1	1.2	1	1	1.03	0.61	1.3	0.9	1.07

3.2.1 绝热温升

$$T(t) = \frac{WQ}{Cp}(1 - e^{-mt}) = \frac{378 \times 306.893}{0.96 \times 2450} \times (1 - 2.718^{-0.4 \times 7}) = 46.3^{\circ}C$$

3.2.2 水化热引起温差

$$T_2 = T_0 + \frac{2(T(t) - T_0)}{3} = 15 + \frac{2 \times (46.323 - 15)}{3} = 35.882^{\circ}C$$
$$T = T_y(t) + T_2 + T_3 = 2.976 + 35.882 + 8 = 46.858^{\circ}C$$

3.2.3 最大仓格尺寸

$$L_{max} = 1.5 \sqrt{\frac{H \times E_c}{C_x}} \operatorname{arch} \frac{|\alpha T|}{|\alpha T| - \varepsilon_p}$$

式中: C_x 为外约束介质的水平变形刚度,取0.03 N/mm; H 为底板厚度,取2 800 mm; E_c 为混凝土弹性模量,验算7 d时间点的仓格间距,取14 867 N/mm²; α 取1.0×10⁻⁵; ε_p 取1.766×10⁻⁴;最终计算得 L_{max} =85.476 m>85 m。

总计将4个分坑底板共计划分了46个仓格,其中编号中A、B、C、D、E表示混凝土浇筑先后顺序,间隔时间需大于7 d,编号中-1、-2、-3、-4、...,仅区分不同位置区域,不表示先后顺序。

3.3 基坑底板四周先行封闭技术

本工程A2分坑基坑深度大、工况复杂,3道混凝土

土支撑体系施工及2 800 mm超厚底板钢筋绑扎为关键线路工序,工期占比显著;且整体底板施工周期横跨春节假期,劳动力组织与工序衔接难度陡增。原设计方案采用“先坑中坑结构施工、后大面积底板浇筑”的串行工序,存在两大核心矛盾:一是坑中坑(电梯井、集水井)空间狭窄、钢筋密集,施工效率低下,易成为工期瓶颈;二是最后一层土方开挖后,需在短时间内完成整体底板浇筑以控制坑底隆起,否则基坑长时间暴露会增加围护风险,对现场劳动力调配、材料供应及多专业协同提出严苛挑战。

针对上述难题,项目部提出“环形闭合支撑+坑中坑分步开挖”的时空协同支护方法,基于“外围闭合、内部拉结”的设计逻辑,将基坑围护结构的侧向土压力转化为内部水平支撑力,形成“围护结构-环形底板-中隔墙支撑”的协同受力体系(见图6)。先行施工环形底板占基坑总面积60%,结合跳仓法,边挖边浇筑,避免传统“先整体开挖、后底板施工”的串行工期损耗。

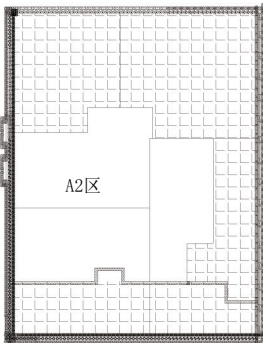


图6 环形底板施工方案

环形底板于春节前10 d完成浇筑,春节期间完成混凝土养护,春节后直接开展坑中坑结构施工,避免了节后基坑暴露时间过长导致的变形风险。同时,环形底板形成后,坑中坑开挖可依托底板作为作业平台,现场文明施工程度高,且环形底板的侧向约束作用可降低坑中坑开挖对围护结构的扰动。

3.4 混凝土支撑轴力伺服系统

本工程A2分坑邻近已建地铁5号线肖塘站区域,为了减小基坑变形对地铁站影响,A2分坑的第二~三支撑采用带轴力补偿系统的混凝土支撑,共计使用56套混凝土支撑轴力伺服系统,伺服系统构造图如图7所示。

该混凝土支撑轴力伺服系统将深基坑混凝土支撑的轴力由被动受压、松弛变形转变为主动加压、调控变形,包括现场控制柜、液压泵站及液压千斤顶补偿节,按照控制柜:液压泵站:补偿节=1:3:24比例

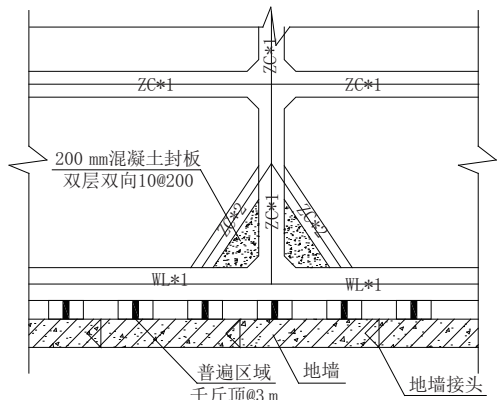


图7 混凝土支撑轴力伺服系统构造图

进行配备。

现场混凝土支撑浇筑完毕后,强度达到C15开始吊装伺服系统,就位后将油管及位移线与泵站连接,最后完成主控与泵站连接。液压千斤顶分级逐次加载,根据本道支撑及围檩强度分别达到C15、C20、C30时分别加载。第一级加载至50 t,第二级加载至100 t,第三级加载至150 t,每级加载前应在前一级稳定后进行,且应检查各个受力部分有无异常。

在中央监控系统中设置伺服端轴力上下限预警机制,轴力上下限报警值详如表2所示,当伺服端支撑轴力达到报警值时,需暂停调整轴力,待讨论并分析原因后,再申请调整伺服支撑轴力。

表2 轴力上、下限报警值表 单位:kN

支撑类型	伺服端轴力下限	伺服端轴力上限
混凝土支撑	1 500	3 000

4 基坑变形分析

A2分坑东侧紧邻地铁车站,环境保护等级为1级,故选取A2分坑地连墙部分进行监测情况分析,基坑及地铁监测点平面布置如图8所示,图9所示为底板施工阶段深层土体测斜监测情况。

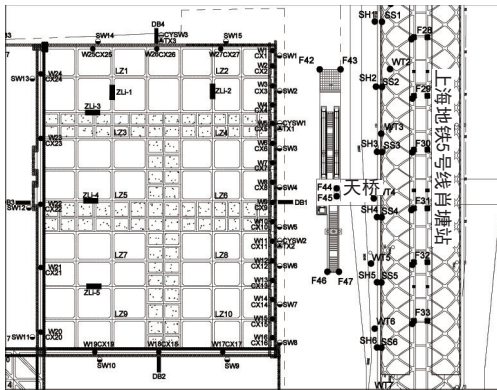
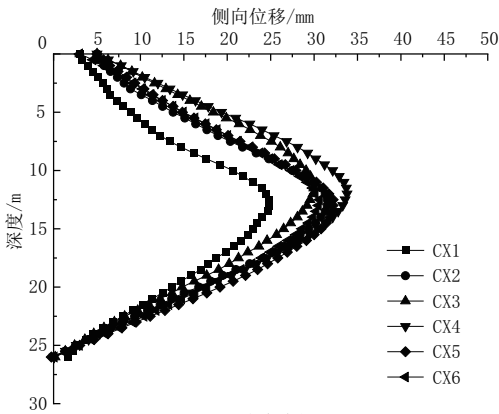
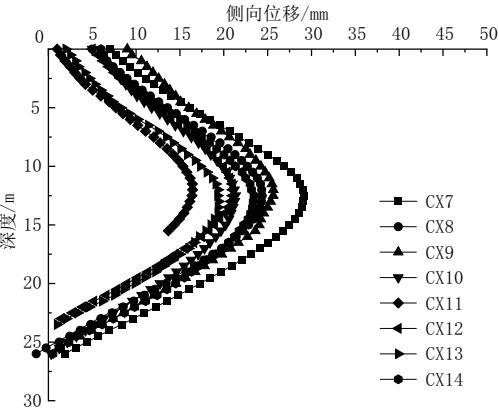


图8 A2分坑基坑监测点布置图

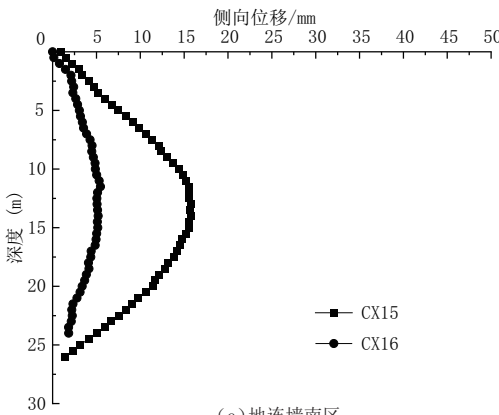
A2分坑北侧与南侧是最先开挖与浇筑底板,中间土方保留以减小基坑变形,基坑北侧监测点



(a) 地连墙北区



(b) 地连墙中区



(c) 地连墙南区

图9 底板施工阶段土体侧向变形曲线

CX1~CX6的测斜数据基本一致,且呈现开挖界面两端变形小,中间变形大的规律,土体最大侧向变形33.7 mm,为2.56‰He。基坑南侧开挖截面较小,仅有18 m,监测点CX15~CX16土体最大侧向变形5.46 mm,为0.42‰He。在南北侧底板浇筑完成后进行中部土开挖,由于南北两侧底板已封闭,对基坑底部有较强支撑作用,且中部土方开挖时间要晚于南北两侧1个月,暴露时间相对较短,因此CX7~CX14土体最大侧向变形相对于基坑北侧较小,最大值29.16 mm,为2.2‰He,基坑施工期间基坑围护结构变形满足一级基坑的要求。

5 结 语

在紧邻地铁、管线密布、环境复杂的软土地基条件下,深基坑工程面临着变形控制严、工期压力大、安全风险高等多重挑战。本文以上海市某大型综合开发项目为依托,创新性地提出并成功应用了“四轴搅拌桩+跳仓法+环形底板先行+混凝土支撑轴力伺服系统”三位一体的分坑快速施工技术体系。

实践表明,该技术体系不仅有效提升了止水帷幕的施工效率与质量,通过跳仓法优化大幅减少了后浇带设置,缓解了超厚底板的收缩开裂风险,更重要的是,基坑深层土体最大侧向位移仅为33.7 mm (2.56‰He),采用环形底板先行封闭策略,实现了关键线路的时空优化,显著缩短了基坑暴露时间,南北侧底板封闭后中部开挖区域变形进一步降低(2.2‰He),充分证明该技术体系在控制变形、提升效率、保障邻近设施安全方面的卓越表现。

本技术体系将结构换撑与施工节奏深度融合,形成了“外围闭合、内部分步”的协同支护模式,提升了整体施工的安全性及组织效率。研究成果将为城市核心区、敏感环境下的深基坑快速化、精细化施工提供了可复制、可推广的技术路径。

参考文献:

[1] 郑刚,朱合华,刘新荣,等.基坑工程与地下工程安全及环境影响

控制[J].土木工程学报,2016,49(6):1-24.

[2] 朱国权,陆幸,司壹恒,等.邻近基坑开挖顺序对既有隧道的变形影响分析[J].宁波大学学报(理工版),2021,34(5):89-94.

[3] 周圣平,邱承双,周嘉斌,等.深基坑肋墙换撑施工技术[J].建筑施工,2020,42(3):329-331.

[4] 马辉.分坑施工法在大型深基坑施工中的应用研究[J].建筑施工,2016,38(5):546-548.

[5] 阳吉宝,陈建兰,谢芝蕾,等.运用分坑施工法控制深基坑周边环境变形的数值分析研究[J].建筑施工,2014,36(10):1106-1109.

[6] 闫高峰.紧邻地铁营业线的超深基坑施工方法研究[J].建筑科技,2025,9(8):169-172.

[7] 郑刚.软土地区基坑工程变形控制方法及工程应用[J].岩土工程学报,2022,44(1):1-36;201.

[8] 罗嵩,陈思明,白伟,等.近接运营线路超长深基坑分坑施工方案比选研究[J].路基工程,2023(2):173-178.

[9] 杨益平.综合交通枢纽地下深基坑分坑设计与变形分析[J].城市道桥与防洪,2025(8):287-290.

[10] 孙政波,张文涛,赵俊键,等.软土地区超深基坑分坑及地中壁空间效应研究[J].广西大学学报(自然科学版),2025,50(4):770-785.

[11] 周浩飞,王德飞,陈家康,等.邻近地铁规划控制区超深超大基坑快速施工关键技术[J].施工技术(中英文),2025,54(18):107-112.

[12] 朱文舟,付效铎,张冲,等.超大基坑分坑施工提前开挖施工技术研究[J].建筑科技,2025,9(6):161-164.

[13] 刘羽,王科,胡威,等.深厚软土地区深大基坑分坑开挖设计与分析[J].建筑结构,2023,53(增刊2):2473-2479.

[14] 王沛,任洁,翟杰群.上海软土地区基坑侧向隧道位移控制措施研究[J].地下空间与工程学报,2022,18(增刊1):466-471.

[15] 杨玉江,邵亚萍.分坑技术在饱和软黏土深大基坑变形控制中的应用[J].岩土工程技术,2020,34(6):321-324;328.

(上接第351页)

[9] 张宝刚,齐金朋.不锈钢复合钢板在铁路钢桥上的应用技术[J].钢结构,2013,28(01):51-55;45.

[10] 佚名.协会标准为不锈钢复合钢板在铁路桥梁工程的应用提供技术支撑——中国工程建设标准化协会标准《铁路钢桥不锈钢复合钢板应用技术规程》编制组成立暨第一次工作会议召开[J].工程建设标准化,2021(5):84-84.

[11] Q/725-1323-20104 铁路(公路)桥梁用不锈钢复合钢板[S].

[12] Pereira D, Ferreira M G S, Almerida Padinha E. Some aspects of the application of electrochemical measurements for the assessment and selection of zinc rich primers[J]. Key Engineering Materials, 1991(20):

1225-1234.

[13] Shreepathi S. Electrochemical Impedance Spectroscopy Investigations of Epoxy Zinc Rich Coatings Role of Zn Content on Corrosion Protection Mechanism [J]. Progress in Organic Coatings, 2001, 69(2): 184-192.

[14] 范军旗.铁路不锈钢复合桥面焊接工艺研究[J].金属加工(热加工),2012(16):57-59.

[15] 杨峰,齐金朋.合肥铁路枢纽南环线(114.75+229.50+114.75)m钢桁柔性拱焊接工艺试验研究[J].铁道标准设计,2011(7):58-65.

[16] GB/T 4334-2020 金属和合金的腐蚀 不锈钢晶间腐蚀试验方法[S].