

邻近轨道交通的狭长超深基坑共建设计与实践

周 慧, 金雪莲, 竺启泽

(南京市测绘勘察研究院股份有限公司, 江苏 南京 210019)

摘要: 深大基坑设置狭长缓冲区分分期实施是一种有效的控制工程风险的方式, 近年来较为常见, 对该类项目设计与实施过程的分析具有必要性。文章以位于南京河西地区的“南京环球贸易广场”与“南京世界贸易中心”两个项目共建区为例, 介绍了软土富水地层条件下相邻超大超深基坑先设置缓冲区同步施工、后共建缓冲区的实施方案, 重点说明了在两侧地下室结构均已完成的情况下, 为实现共建区狭长基坑的顺利施工、轨道交通设施的保护及工程的经济性而因地制宜采取的技术措施, 并对实施结果作了分析。实践表明: 设计方案及采取的关键技术对策很好地体现了“安全可靠、经济合理、技术可行、方便施工”的原则, 可为类似条件的深基坑工程设计和施工提供参考。

关键词: 狭长超深基坑; 软土富水地层; 轨道交通; 共建区

中图分类号: TU473

文献标识码: A

文章编号: 1673-8993(2024)12-0082-08

doi: 10.13402/j.gcjs.2024.12.166

Design and practice of co construction of narrow and ultra deep foundation pits adjacent to rail transit

ZHOU Hui, JIN Xuelian, ZHU Qize

(Nanjing Institute of Surveying, Mapping & Geotechnical Investigation Co., Ltd., Nanjing 210019, Jiangsu, China)

Abstract: The phased implementation of narrow buffer zones in deep foundation pits is an effective way to control engineering risks, which has become more common in recent years. It is necessary to analyze and summarize the design and implementation process of such projects. This article takes the co construction zone of the “Nanjing Global Trade Plaza” and “Nanjing World Trade Center” projects located in the Hexi area of Nanjing as an example to introduce the implementation plan of synchronous construction of adjacent super large and ultra deep foundation pits with buffer zones first and then co construction of buffer zones under soft soil and water rich geological conditions. The focus is on explaining the technical measures taken according to local conditions to achieve smooth construction of narrow foundation pits in the co construction zone, protection of rail transit facilities, and economic feasibility of the project, especially when the basement structures on both sides have been completed. The implementation results are analyzed. Practice has shown that the design scheme and key technical measures adopted well embody the principles of “safety and reliability, economic rationality, technical feasibility, and convenient construction”, and can provide reference for the design and construction of deep foundation pit projects under similar conditions.

Key words: narrow and ultra deep foundation pits; soft soil and water rich strata; rail transit; co-construction zone

轨道交通是城市的大动脉、生命线, 在解决交通问题的同时牵引着城市的发展, 轨道交通沿

线的物业开发成为热点, 随之带来的是沿线土地价格的飙升, 某些区域用寸土寸金形容也不为过,

收稿日期: 2024-05-29

作者简介: 周 慧(1982—), 女, 高级工程师, 从事岩土工程设计咨询与研究工作。

为使土地资源得到充分利用, 轨道交通沿线的基坑工程往往紧邻轨道交通结构^[1], 且其面积越来越大、越来越深。基坑开挖会引起地层移动、地面沉降、围护结构水平及竖向位移, 进而对周边环境产生不利影响; 地下水位的下降会造成土体固结沉降, 如发生渗漏、突涌等异常情况, 将直接导致坑外土体流失, 严重威胁周边环境安全, 甚至引发工程事故。

对于需要同期建设的相邻深大基坑, 常常采取中间设置缓冲区分区分期的实施方法, 先施工各自独立区域, 最后施工缓冲区。陈萍等^[2]介绍了上海外滩国际金融服务中心项目两个相邻 26 m 的基坑同步实施的情况, 通过对缓冲区进行土体加固及限载的措施确保了缓冲区留土的稳定性。黄开勇^[3]、郭亮亮等^[4]通过采取主楼先行、地下车库后施工的分区分期方法, 实现了与相邻地块基坑同步施工的目的。顾正瑞等^[5]通过三维数值模拟, 得出了缓冲区潜在滑裂面形态与缓冲区宽度的关系。为加快整个项目进度, 在确保安全的前提下尽量减少缓冲区的宽度, 故大型基坑的缓冲区一般为狭长型, 基坑工程的设计与施工受基坑形状及周边环境的影响有其特殊性^[6-7]。

然而, 通常对于两个不同项目地下室零距离、需要同步建设, 且地质条件复杂、环境保护要求高、施工场地严格受限的情况则鲜有报道。本文以紧邻南京地铁一号线(后改为十号线)元通站及元通站~中胜站区间、二号线元通站及元通站~雨润大街站区间的“南京环球贸易广场”与“南京世界贸易中心”项目共建区为例, 介绍南京河西软土地区复杂环境条件下相邻超大超深基坑先设置缓冲区同步施工、后共建缓冲区的设计方案, 重点针对共建区狭长基坑提出围护结构、支撑布置、地下水控制及土方开挖等方面的关键技术对策, 以期可为相关工程提供参考与借鉴。

1 工程简介

1.1 工程概况

“南京环球贸易广场”与“南京世界贸易中心”两个项目坐落于南京河西中央商务区核心地段, 南京环球贸易广场项目用地面积约为 3.6 万 m², 总建筑

面积约为 41 万 m², 地上建筑为 3 栋超高层办公楼及 4 层商业裙房, 整体设 3 层地下室。基坑面积约为 32 855 m², 基坑周长约为 764 m, 基坑开挖深度为 20.30 ~ 22.80 m。南京世界贸易中心项目位于南京环球贸易广场项目东侧, 地上建筑为超高层办公楼、酒店、酒店式公寓及商业裙楼, 整体设 3 层地下室。基坑面积约为 37 312 m², 基坑周长约为 797 m, 基坑开挖深度为 15.80 ~ 18.30 m。

两个项目皆采用先设置缓冲区同步施工、后共建缓冲区的实施方案。其中, 共建区基坑面积约为 13 332 m², 基坑周长约为 622 m, 基坑开挖深度为 16.63 ~ 20.30 m。两个项目一期同步施工区已于 2015 年 7 月施工出 ± 0.00 , 下文将对共建区狭长基坑的设计及实施情况进行重点介绍。

项目位于南京河西中央商务区核心地段, 周边环境复杂: 四周均为市政交通干道, 人、车流量大, 道路下分布给水管、天然气管、雨污水管等重要管线, 部分材质为铸铁, 对变形极为敏感; 特别是基坑紧邻已运营的南京地铁一号线元通站及元通站~中胜站区间、二号线元通站及元通站~雨润大街站区间, 与地铁一号线元通站最近距离仅为 5 m。基坑平面及分区分期情况、与轨道交通平面位置关系如图 1 所示。

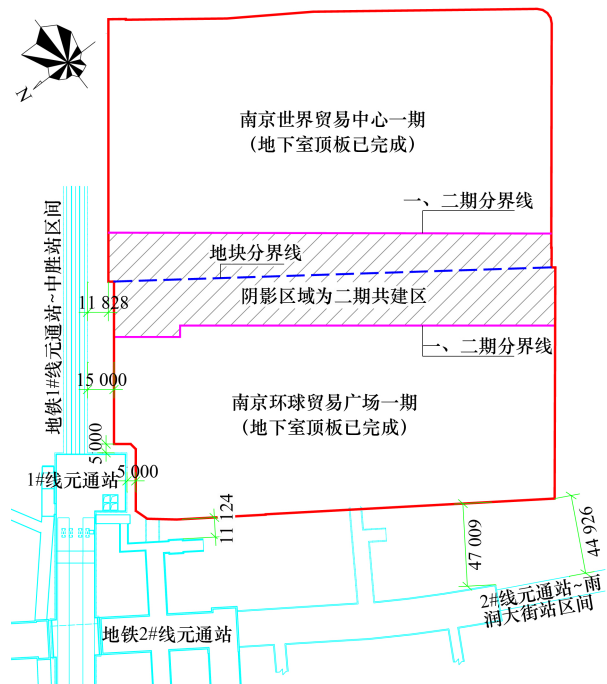


图 1 项目总平面

mm

1.2 工程地质及水文地质概况

项目场地位于南京市河西地区,隶属于长江漫滩地貌单元,基坑开挖影响范围内主要地层为①填土、②~1粉质黏土(软~可塑)、②~2淤泥质粉质黏土(流塑)、②~3粉细砂(稍密)、②~4粉细砂(中密)、②~5粉细砂(密实)、④中粗砂混卵砾石(中密~密实)、⑤~1强风化泥岩、⑤~2中风化泥岩。基坑开挖面均处于②~3或②~4层粉细砂层中。各土层物理力学指标如表1所示。

表1 土层的物理力学指标

土层号	土层名称	重度/ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	黏聚力/ kPa	内摩擦 角/($^{\circ}$)
①	杂填土	18.5	6.0	15.0
①~a	淤泥质填土、淤泥	17.2	6.0	8.0
①~b	素填土	18.5	10.0	12.0
②~1	粉质黏土	18.5	16.6	11.1
②~2	淤泥质粉质黏土	18.0	12.2	12.1
②~3	粉细砂	19.2	8.3	31.0
②~4	粉细砂	19.1	8.4	31.0
②~5	粉细砂	19.2	8.4	32.0
④	中粗砂混卵砾石	20.0	5.0	35.0
⑤~1	强风化泥岩	21.0	20.0	25.0

场地上部地下水为潜水,主要由①层杂填土及②层淤泥质粉质黏土层中孔隙水组成;中下部的②~3层、②~4层、②~5层砂土层和④层中粗砂混卵砾石构成承压含水层,承压含水层厚度为40 m左右,层顶的②~2层淤泥质粉质黏土由于透水性弱,与砂土层渗透性差异性大,为相对隔水层,可以作为隔水顶板,隔水底板为下伏基岩。

2 项目总体实施方案

2.1 设置缓冲区分期实施

“南京环球贸易广场”与“南京世界贸易中心”两项目均为3层地下室,地下室外墙紧贴,基坑总面积达70 000 m^2 ,两项目主塔楼之间距离约为80 m,其中布设宽度为50 m的共用下沉式广场。基于此,采用先设置缓冲区同步施工、后共建缓冲区的实施方案,将50 m宽的共用下沉式广场作为缓冲区,即二期共建区,从而解决了大规模的超深基坑同步施工条件下,时空效应叠加对环境的不利影响及两项目施工进度不一致带来的

相互影响等问题。同时,下沉式广场范围无地上建筑,不影响工程关键工期。

2.2 总体设计方案

“南京环球贸易广场”与“南京世界贸易中心”两个项目一期均采用顺作法实施,基坑外围采用地下连续墙作为竖向挡土结构,一、二期分界处采用钻孔灌注桩作为竖向挡土结构。南京环球贸易广场一期设4层钢筋混凝土支撑,南京世界贸易中心一期设3层钢筋混凝土支撑。共建区采用地下连续墙加3层钢筋混凝土支撑作为支护结构。

两项目外围地下连续墙连接成整体,墙底均进入强风化不少于1.0 m,形成一个整体封闭的止水体系,项目一、二期分界区域采用三轴深搅桩悬挂式止水帷幕,在确保降水对外界环境影响最小的前提下,节省了工程造价。坑内设置管井降低地下水,保持施工面干燥;坑外布设观测井,必要时作为回灌井使用,以保护周边环境。基坑止水帷幕平面布置示意图2所示。

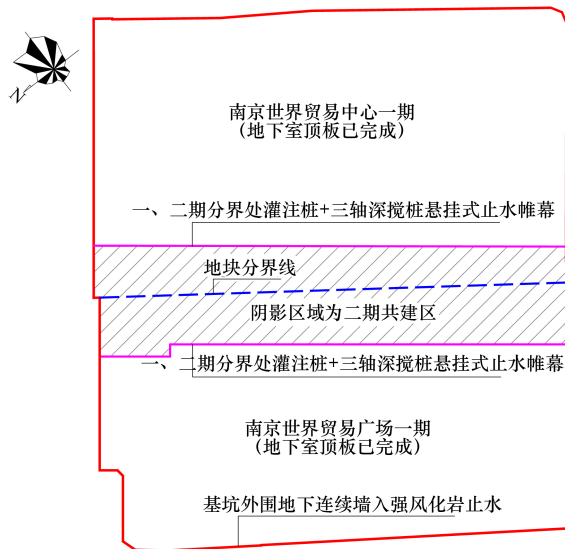


图2 基坑止水帷幕平面布置示意

3 共建区基坑工程特点

从基坑的规模与形状、场地地质条件、周围环境条件以及已建主体结构的特点来分析,项目具有特点如下。

(1) 基坑规模大,时空效应显著。共建区基坑面积约为13 332 m^2 ,基坑周长约为622 m,基坑开挖深度为16.63~20.30 m。基坑空间效应、时间效应显著,受各种不确定因素影响,在高水

位的软土地基中基坑开挖存在一定的风险,需系统、全面、整体考虑各种工况下基坑安全稳定。

(2) 场地工程地质条件复杂。基坑开挖深度范围内分布有较厚的高含水量、高压缩性的流塑状淤泥质粉质黏土,该土层工程力学性质较差,流变性、触变性明显,开挖后易出现较大变形。因此,支护体系需有足够刚度以控制基坑开挖引起的土体变形。

(3) 地下水处理需重点考虑。工程基坑开挖面已进入粉细砂含水层,该含水层厚度达40 m左右,地下水丰富,具有微承压性。根据一期工程建设的状况,虽然基坑外围地下连续墙已进入强风化岩不小于1 m,理论上已形成封闭止水帷幕,但由于在深厚承压含水层中施工超深地下连续墙经验仍然不足,坑内承压水补给量仍较大,因此,地下水处理需重点考虑。

(4) 基坑周边环境复杂。共建区基坑紧邻地铁一号线元通站~中胜站区间,且与地铁区间隧道结构最近距离仅为13.6 m。同时基坑南北两面临路,且道路下分布给水管、天然气管、雨污水管等重要管线,部分材质为铸铁,对变形极为敏感;雨水、污水及给水管线如发生渗漏或断裂,不仅影响管线及道路正常运营,对基坑工程安全也产生不利影响。

(5) 与一期已建结构关联度高、空间关系复杂。共建区实施时基坑东西两侧一期地下室结构已施工完成,共建区支撑体系需利用一期主体结构梁板传递水平支撑力,支撑体系与主体结构关联度高。两项目各层地下室楼面标高不一致,且南京世界贸易中心地下室顶板标高变化多,支撑布置难度大。

(6) 基坑狭长、施工场地狭小。共建区基坑东西向宽度约为52 m,南北向长度约为250 m,为典型的狭长基坑。北侧紧邻地铁一号线元通站~中胜站区间,不能作为施工通道,仅南侧可作为出土和材料运输通道。东西两侧一期需进行地上结构施工,无法给共建区基坑工程施工提供作业场地。基坑设计与施工方案必须充分考虑既有的场地条件。

4 关键技术对策

4.1 竖向围护结构

共建区基坑南北两侧采用地下连续墙作为竖

向挡土兼止水结构,其刚度较大,整体性好,安全性高。南侧采用1.0 m厚地下连续墙,北侧邻近地铁,地下连续墙加厚至1.2 m,以有效控制基坑变形,保证基坑开挖对地铁隧道的影晌控制在允许范围内。墙底均进入强风化不少于1.0 m,形成封闭的止水体系。邻近地铁侧基坑支护结构剖面如图3所示。

4.2 主、被动区加固

主动区土体的工程力学性质直接影响支护结构受力及变形。被动区土体抗力的提高,将进一步减小基坑变形和坑底隆起对周边环境的影响。在共建区北侧紧邻地铁区段进行主、被动区加固,主动区设9排 $\varnothing 850\text{ mm}@1\,800\text{ mm}$ 三轴深搅加固桩,被动区采用17排 $\varnothing 850\text{ mm}@1\,800\text{ mm}$ 三轴深搅桩对土体进行格栅式加固,加固深度穿越淤泥质粉质黏土层并进入基坑底以下。主、被动区加固兼作地下连续墙槽壁加固。加固剖面如图3所示。

4.3 复杂时空关系条件下的支撑布置

共建区东西两侧两项目各层地下室楼面标高均不一致,且地下室顶板标高变化多、差异大,需利用主体结构梁板传递支撑力,支撑布置极为复杂。

4.3.1 支撑平面布置

共建区实施时基坑东西两侧一期地下室结构已施工完成,共建区支撑体系需利用一期主体结构梁板传递水平支撑力,南北两端结合东西侧一期结构布设三层角撑。角撑平面布置如图4所示。除图4中标注的钢管抛撑以外,其余水平支撑均为钢筋混凝土支撑。

共建区东西两侧为已建一期地下室结构,共建区角撑支撑在各层地下室梁板结构上,各层地下室梁板结构可看作是角撑的延伸,经计算分析,各层地下室梁板结构满足受力要求。然而,在深厚软土地区无类似超深基坑案例可供参考,为确保东、西两侧已施工地下结构的安全稳定,基于概念设计,于B1层增设两组钢筋混凝土支撑(图5)。

4.3.2 支撑竖向布置

(1) 北端头支撑竖向布置

东西两侧各层角撑标高分别结合两侧地下室楼面结构标高确定,B1层板面标高与底板面标高相差12.6 m,为减少第三层支撑拆除工况对北侧

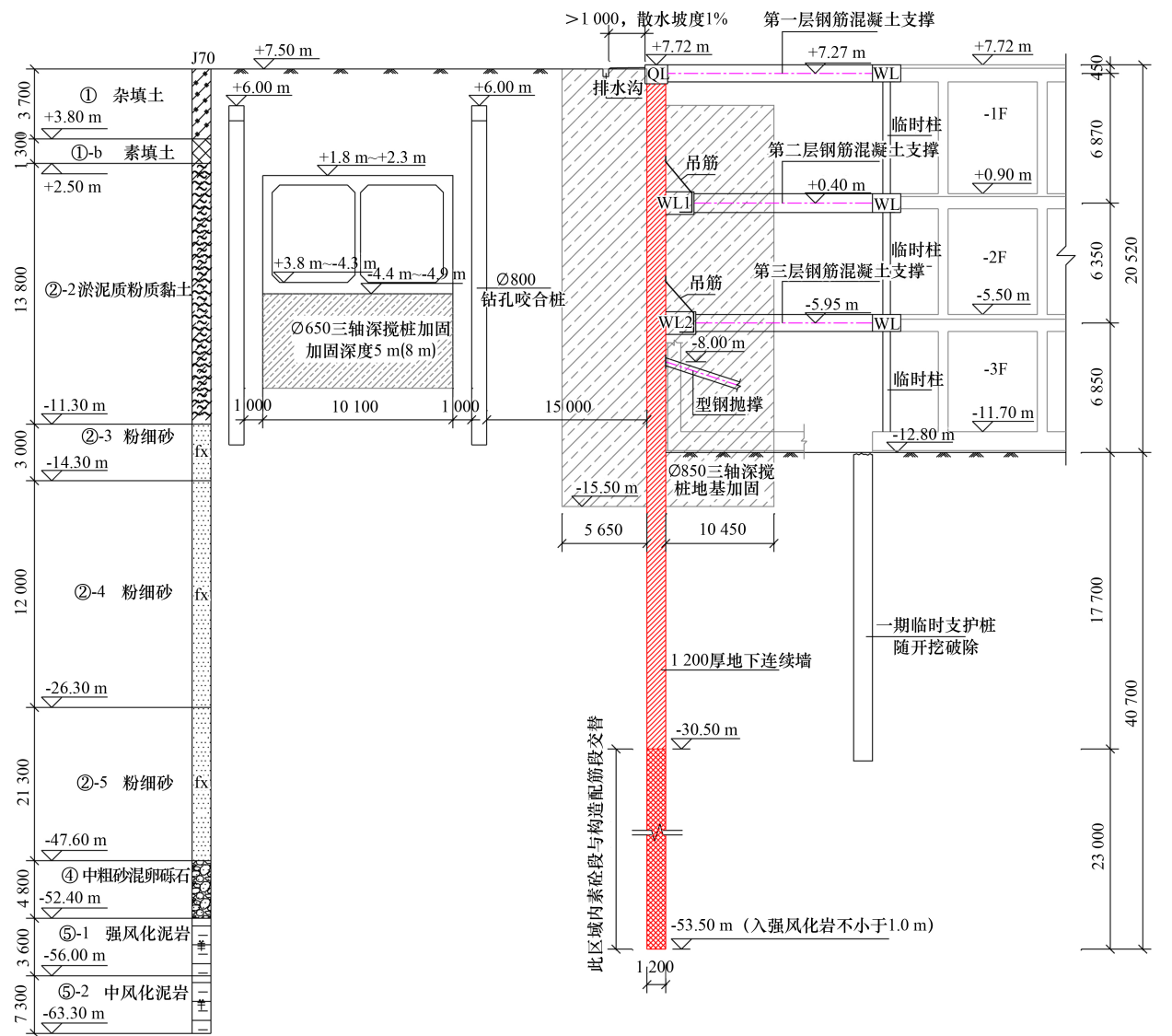


图 3 邻近地铁侧基坑支护结构剖面

mm

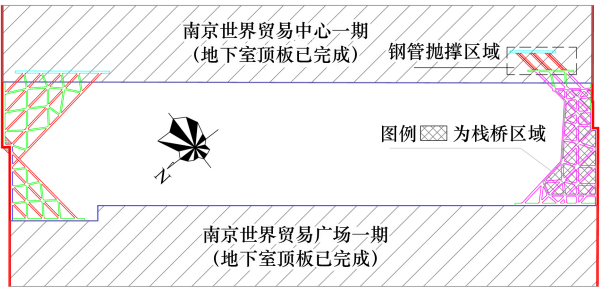


图 4 南北两端角撑平面布置 (首层支撑)

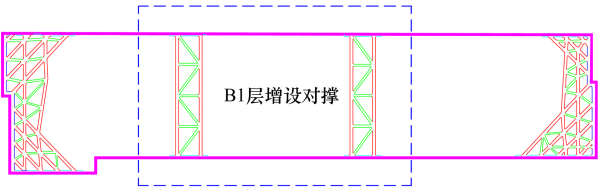


图 5 第二层支撑平面布置

地铁结构的影响,于第三层钢筋混凝土支撑下增设型钢换撑。北端头支撑及换撑竖向布置如图 6 所示。

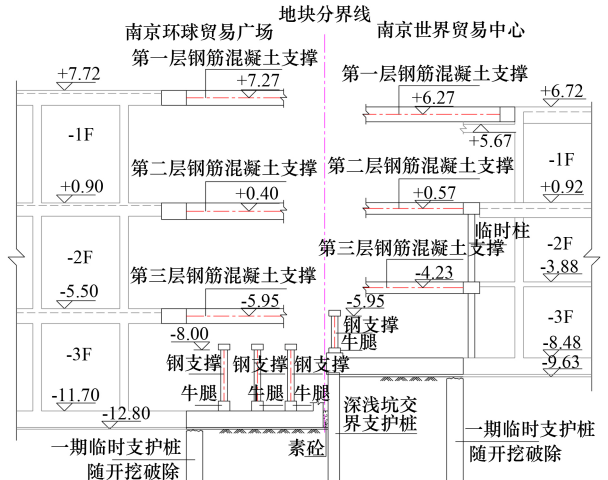


图 6 北端头支撑及换撑竖向布置

m

(2) 南端头支撑竖向布置

南侧作为出土和材料运输通道, 结合第一层支撑设置栈桥, 因此, 第一层支撑标高统一按接近地面标高的南京环球贸易广场地下室顶板标高确定。但东西南侧地下室首层板面高差达 2.05 m, 必须采用特殊的转换方式以传递水平支撑力, 为此, 采用了钢筋混凝土支撑与钢管抛撑组合的传力模式。东西两侧第二、第三层角撑标高分别结合两侧地下室楼面结构标高确定。南端头水平支撑及抛撑竖向布置如图 7 所示。

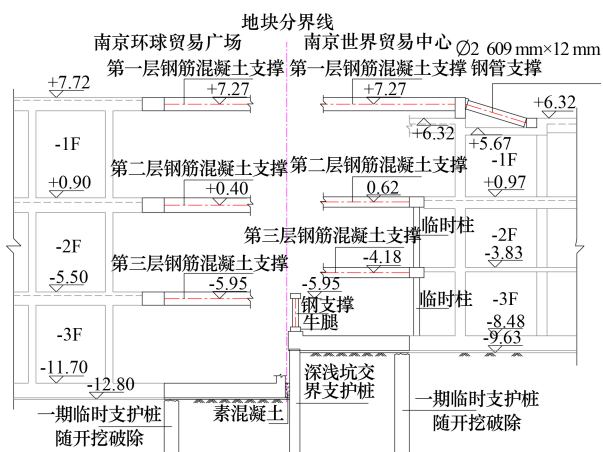


图 7 南端头水平支撑及抛撑竖向布置

4.3.3 特殊连接节点处理

(1) 支撑体系与已建一期结构连接节点

共建区需利用一期主体结构梁板传递支撑力, 因此, 支撑体系与已建结构的连接可靠性至关重要。其中, 南京环球贸易广场一侧在一期结构中预先留设了钢筋接驳器, 支撑施工期间钢筋直接连接即可, 见图 8(a); 南京世界贸易中心一侧未预留连接条件, 采用了植筋连接的方式, 见图 8(b)。

(2) 支撑围檩与地下连续墙连接节点

因东西两侧支撑标高受制于两侧一期地下室楼面结构标高, 故同一层支撑标高并不一致, 最大高差达 1.77 m, 东西两侧角撑沿地下连续墙方向将产生错动力。同时, 施工过程中可能存在一侧结构施工速度较快, 角撑先行拆除的情况, 此时也将在未拆一侧支撑与地下连续墙间产生滑动力。为平衡上述错动力或滑动力, 采用植筋方式将支撑围檩与地下连续墙连成整体, 确保支撑体系受力稳定、可靠。支撑围檩与地下连续墙连接节点大样如图 9 所示。

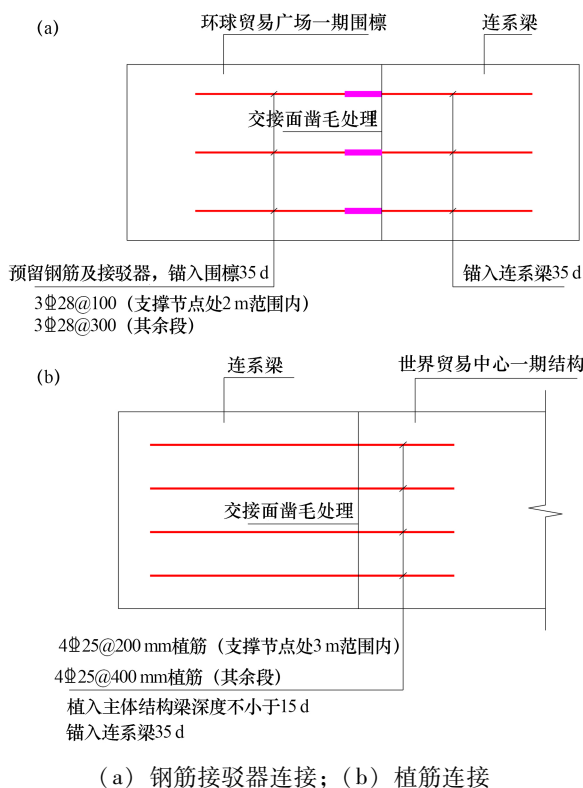


图 8 支撑与已建一期结构连接节点大样

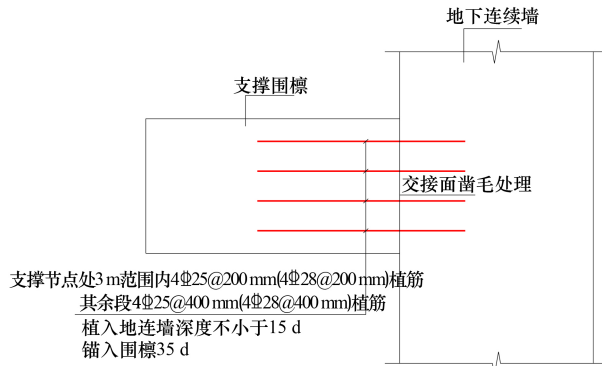


图 9 支撑围檩与地下连续墙连接节点大样

4.4 土方开挖

受共建区基坑形状及施工场地的制约, 采用分区分块的方式进行土方开挖, 结合后浇带的分布, 将基坑分为 I、II、III、IV 4 个区(图 10), 由北向南退挖, 设置多级平台接续出土, 于基坑南端布设栈桥及出土口, 解决了软土超深基坑单向出土的难题。现场开挖实景照片如图 11 所示。

4.5 分区降水

为减少降水对周边环境及一期已建结构的影响, 严格执行按需降水原则, 结合土方开挖次序, 分区分阶段启动降水井。各分区土方开挖阶段启动降水井布置如图 11 所示。

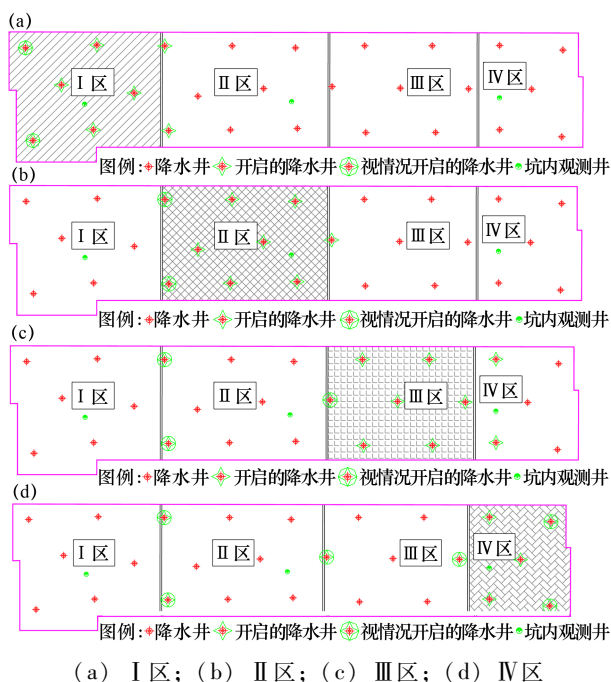


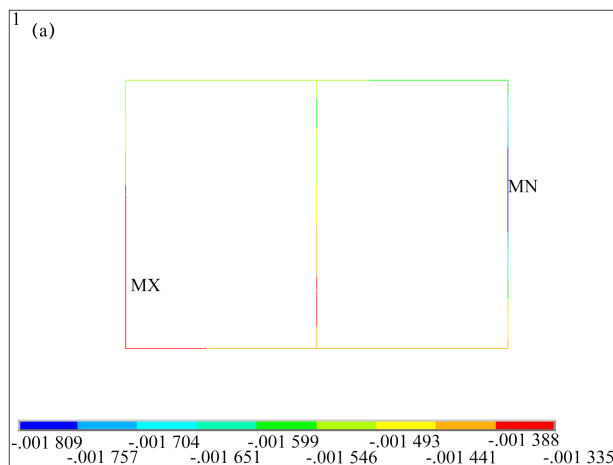
图 10 共建区各分区开挖阶段启动降水井平面布置



图 11 土方开挖实景

4.6 基坑开挖对环境影响分析

为了较准确地了解共建区基坑土方开挖对南京地铁一号线元通站~中胜站区间产生的附加变形,



运用有限元分析软件, 考虑最不利的基坑开挖工况, 进行基坑开挖过程的二维有限元数值模拟。

模型计算范围: 竖向计算深度取基坑开挖深度的 3.5 倍; 水平方向基坑外为基坑开挖深度的 3 倍。边界条件: 上表面为自由面, 两侧边界面约束法向位移, 底部约束竖向位移。模型划分网格如图 12 所示。

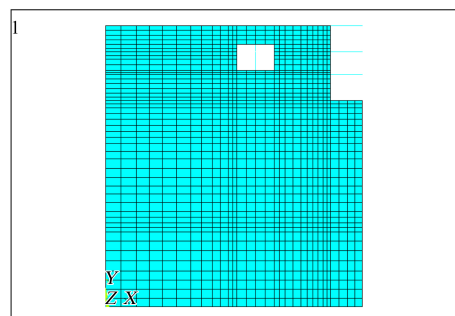
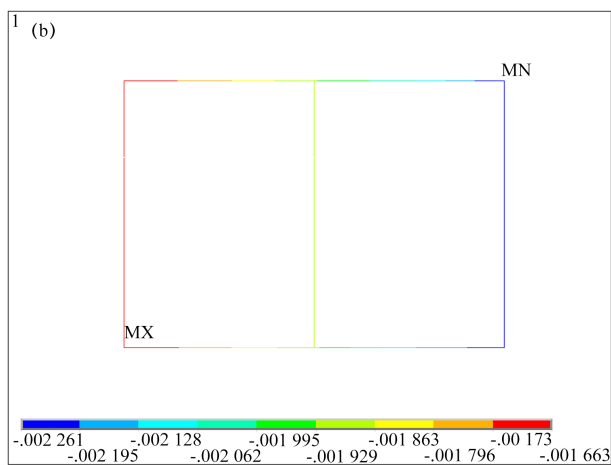


图 12 二维有限元模型

区间隧道位移数值分析结果如图 13 所示。计算结果表明, 共建区基坑土方开挖期间, 地铁区间隧道位移较小, 最大水平位移为 1.8 mm, 最大沉降 2.3 mm, 说明共建区基坑开挖对地铁区间隧道影响较小, 可满足南京地铁管理部门相关要求。

4.7 实施结果

共建区基坑工程于 2015 年 12 月开始第一层土方开挖, 2016 年 7 月北侧 I 区开挖至基坑底标高, 开始施工底板并向南退挖, 后逐步施工底板、拆除第三层支撑、施工 B2 层楼面结构、拆除第二层支撑、施工 B1 层楼面结构、拆除第一层支撑、施工 ± 0.00 板, 于 2017 年 5 月完成 ± 0.00 板施工。



(a) 水平; (b) 竖向

图 13 地铁区间隧道结构位移

监测数据表明,共建区基坑施工过程中,基坑支护结构内力及变形、周边环境变形及地下水位升降等测项均在可控范围内,没有对周边道路、管线、地铁隧道结构及其他建(构)筑物造成明显不利影响,表明本工程的设计及施工方案合理可行,满足工程建设需求,同时较好地保护了周边环境。

5 结 论

共建区基坑工程规模大、风险高、场地地质条件复杂,紧邻南京地铁一号线元通站~中胜站区间,环境保护要求高。共建区实施时基坑东西两侧一期地下室结构已施工完成,需利用一期主体结构梁板传递水平支撑力,支撑体系与主体结构关联度高、空间关系复杂,且基坑呈南北狭长型、施工场地极为狭小。针对上述特点与难点,文章采取了一系列关键技术措施:采用地基加固、增强支护结构刚度等措施以有效控制基坑变形;复杂时空关系条件下支撑体系布置与节点处理,兼顾了安全性与经济性;设置多级平台的由北向南退挖结合端部栈桥的方式,解决了软土超深基坑单向出土的难题;分区分阶段启动降水井以减少降水对周边环境及一期已建结构的影响。目前,项目基坑工程已竣工。实施及监测结果表明:采

用的各项应对措施合理、有效,满足共建区工程建设需求,同时保证了周边环境特别是轨道交通的安全及正常运行,可以为类似软土富水地层条件下分期分区实施的约束条件众多的基坑工程设计和施工提供借鉴。

参考文献:

- [1] 文海涛,黄新晨. 基坑开挖对相邻小净距地铁隧道影响的数值分析[J]. 工程建设,2023,55(2):43-47.
- [2] 陈萍,王卫东,丁建峰. 相邻超大深基坑同步开挖的设计与实践[J]. 岩土工程学报,2013,35(增刊2):555-558.
- [3] 黄开勇. 软土地区相邻深大基坑同步施工设计实践[J]. 地下空间与工程学报,2019,15(增刊2):743-750.
- [4] 郭亮亮,刘全芝,陆志军,等. 利用缓冲区解决相邻深基坑同步开挖技术难题[J]. 建筑施工,2015,37(11):1256-1257.
- [5] 顾正瑞,徐中华. 缓冲区宽度对同步开挖基坑群变形影响分析[J]. 地下空间与工程学报,2023,19(增刊1):269-277.
- [6] 周尧. 狭长型深基坑支护体系优化与深基坑施工探究[J]. 中国建材科技,2022,31(4):86-89.
- [7] 顾晓卫,王达,张霄,等. 复杂小场地下的狭长深基坑分块施工探讨[J]. 市政技术,2017,35(4):181-184.