

邻近轨道交通的深大基坑同步施工技术

竺启泽, 金雪莲

(南京市测绘勘察研究院股份有限公司, 江苏 南京 210019)

摘要:为总结复杂条件下深大基坑的设计与实践经验,以南京环球贸易广场项目为例,介绍了软土富水地层条件下相邻超大超深基坑同步施工实施方案,重点说明了为实现同步施工及保护轨道交通所采取的技术措施,并对实施结果作了分析。实践表明:设计方案及采取的针对性技术措施有效解决了相邻超大超深同步实施的难题,并保证了邻近轨道交通设施的安全。本文结果可为类似条件的深基坑工程设计和施工提供参考。

关键词:深大基坑; 软土富水地层; 轨道交通; 同步实施; 缓冲区

中图分类号:TU473

文献标志码:A

文章编号:1673-8993(2025)02-0036-06

doi:10.13402/j.gcjs.2025.02.020

Synchronous construction technology of deep and large foundation pits adjacent to rail transit

ZHU Qize, JIN Xuelian

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

Abstract: In order to summarize the design and practical experience of deep and large foundation pits under complex conditions, the Nanjing Global Trade Plaza project is taken as an example to introduce the implementation plan for synchronous construction of adjacent ultra-large and ultra-deep foundation pits under soft soil and water-rich stratum. The technical measures taken to achieve synchronous construction and protect rail transit are detailed, and the implementation results are analyzed. Practice has shown that the design plan and the targeted technical measures taken have effectively solved the problem of synchronous implementation of adjacent super-large and super-deep projects, and ensured the safety of adjacent rail transit facilities. The results can provide references for design and construction of deep foundation pit engineering with similar conditions.

Key words: deep and large foundation pit; soft soil and water-rich stratum; rail transit; synchronous implementation; buffer

轨道交通是城市公共交通的主力军,同时带动着城市的发展,轨道交通沿线的物业开发成为热点。热点地区用地资源的稀缺及高昂的土地价格,促进了地下空间的开发利用,催生了大量的基坑工程。这些基坑工程规模越来越大、越来越深,距离轨道交通越来越近。基坑开挖带来地层的应力释放和重分布,会导致地层移动,围护结构也会产生水平及竖向位移,进而对周边环境造成不利影响^[1]。降水对环境的影响是多数基坑工程不可回避的问题。地下水

位降低使土中有效应力增加,土体产生固结沉降,基坑渗漏、突涌直接导致水土流失,对周边环境安全产生严重威胁^[2],甚至引发工程事故。对于需要同期建设的相邻基坑,可以采用两坑合一^[3-4]的施工方案,或中间设置缓冲区分区分期^[5-7]的实施方法。通常两基坑面积相对较小时,适合采用两坑合一方案,或基坑面积较大但较浅,可以采用放坡或悬臂支护体系时亦可采用两坑合一方案。对于超深超大基坑,采用两坑合一方案往往造价较高,且双方施工工

收稿日期:2024-05-08

作者简介:竺启泽(1981—),男,高级工程师,从事岩土工程设计咨询与研究工作。

况难以协调,工期也难以保证,此时,适宜采用先设置缓冲区、各自施工,再施工缓冲区的方法。南京环球贸易广场项目位于南京长江漫滩区域,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,地质条件、环境条件复杂。本文以该项目为例,介绍其与相邻超大超深基坑同步实施的方案选型分析情况,针对项目特点,在支护结构、地下水处理两方面提出了关键技术对策,并分析实施结果,以期为类似工程提供一点参考。

1 工程概况

1.1 工程简介

南京环球贸易广场项目坐落于南京河西中央商务区核心地段,用地面积约为3.6万平方米,总建筑面积约为41万平方米,地上建筑为3栋超高层办公楼及其周边商业裙楼,其下设地下室3层。基坑挖深为20.30~22.80 m,面积约为32 855 m²,周长约为764 m,一期基坑面积约为25 046 m²。南京环球贸易广场项目东侧为拟建“南京世界贸易中心”项目,地上建筑为超高层办公楼、酒店、酒店式公寓及商业裙楼,其下设地下室3层。基坑挖深为15.80~18.30 m,面积约为37 312 m²,周长约为797 m。两项目拟同步实施。

基坑工程位于南京河西中央商务区核心地段,周边环境复杂。北侧为河西大街,东侧为江苏富通置业有限公司拟建世界贸易中心场地,南侧为白龙江东街,西侧为江东中路。周边市政道路均为交通干道,人、车流量大,多种重要管线分布于道路下方,如天然气、雨污水及给水管等,其中一些管材采用铸铁,对变形反应极为灵敏。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。基坑平面分布及与轨道交通平面位置关系如图1所示。

1.2 地质概况

项目位于南京市建邺区,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

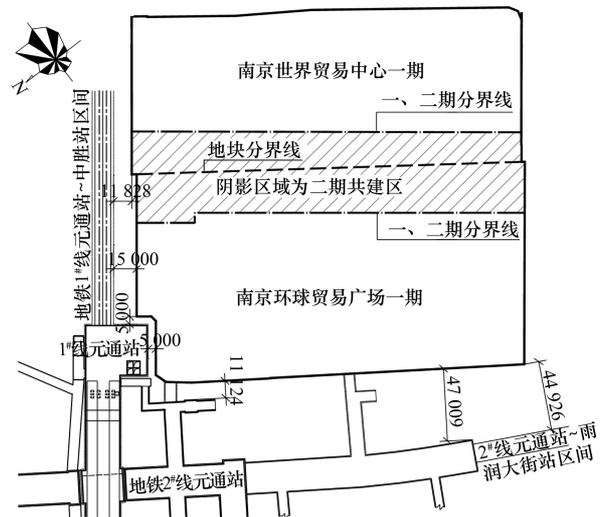


图1 项目总平面 mm

(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。

场地浅部地下水为潜水,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;深部分布承压含水层,承压含水层包括②~3、②~4、②~5层砂土及④层中粗砂混卵砾石,承压含水层厚度约为40 m,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。

1.3 基坑工程特点

结合基坑的规模、场地地质条件、环境条件以及主体建筑与结构情况,对项目特点进行分析。

(1) 基坑规模大,时空效应显著。基坑面积达32 855 m²,其中一期基坑面积约为25 046 m²,而开挖深度大面积区域达到20.30 m,塔楼区域开挖深度为22.80 m。超大规模超深基坑工程实施过程中,受各种不确定因素影响,基坑时空效应明显。结合场地软弱土层厚、地下水位高的特点,应系统、全面地分析基坑施工过程中各种风险,确保基坑实施全工况下的安全稳定。

(2) 场地工程地质条件复杂。基坑开挖影响深度内为南京长江漫滩典型的二元结构地层,基坑开挖面以上以淤泥质粉质黏土为主,呈流塑状,含水量高,压缩性高,且具有流变性和触变性,基坑开挖易引起较大变形,支护结构刚度设计应

表 1 土层物理力学指标

土层号	土层名称	容重/($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	黏聚力/ kPa	内摩擦角/($^\circ$)
①	杂填土	18.5	6	15
①-a	淤泥质填土、淤泥	17.2	6	8
①-b	素填土	18.5	10	12
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
②-4	粉细砂	19.1	8.4	31
②-5	粉细砂	19.2	8.4	32
④	中粗砂混卵石	20.0	5	35
⑤-1	强风化泥岩	21.0	20	25

与土层性状相匹配。

(3) 地下水控制需重点考虑。基坑底标高位于粉细砂层中,该层为微承压含水层,层厚约为 40 m,水量丰富。结合以往类似工程经验,地下水作用控制的合理、有效性至关重要,直接关系到基坑工程的成败,故地下水作用控制设计需重点考虑。

(4) 基坑周边环境复杂。基坑紧邻地铁一号线及二号线元通站及相邻区间,且与地铁一号线元通站最近距离为 5 m。同时,基坑周边三面均为市政道路,多种重要管线分布于道路下方,如天然气、雨污水及给水管等,其中一些管材采用铸铁,对变形反应极为灵敏。带水管线如发生破坏、出现渗漏,会直接影响其自身运营,在水流冲刷、掏蚀、浸泡下,地基受到软化或破坏,进而对道路及基坑安全造成威胁。

(5) 与相邻“南京世界贸易中心”同步实施。与相邻“南京世界贸易中心”同步实施,需采取有效措施解决基坑工程时空效应对环境的不利影响,以及两项目施工进度不一致带来的相互影响。

2 关键技术对策

2.1 总体设计方案

工程与相邻“南京世界贸易中心”均为 3 层地下室,地下室外墙紧贴,两项目基坑面积之和达 70 000 m^2 。通过深入研究项目的建筑布局、结构特点及空间关系,发现两项目主塔楼之间距离约为 80 m,其中布设 50 m 宽共用下沉式广场。基于此,提出将 50 m 宽共用下沉式广场作为二期工程,作为两项目一期超深基坑的缓冲区。

工程支护结构体系不仅要有效控制变形、保证基坑安全,同时应经济、快捷、便于施工、缩短工期。围绕此基本原则,确定采用常规地下连续墙/灌注桩+内支撑体系顺作法施工。

2.2 竖向挡土结构

结合地质条件、基坑深度及环境保护要求的差异,在基坑外围采用刚度大、整体性好的地下连续墙作为竖向围护结构。其中,在基坑西侧北段及北侧(邻近地铁区段)地下连续墙厚度为 1.2 m,南侧、西侧南段采用 1.0 m 厚地下连续墙。一、二期分界处采用 $\varnothing 1\ 200\ \text{mm}@1\ 400\ \text{mm}$ 钻孔灌注桩作为竖向挡土结构。竖向挡土结构平面布置如图 2 所示,邻近地铁侧基坑支护结构典型剖面如图 3 所示。

2.3 主、被动区加固

主、被动区土体的工程力学性质会影响支护结构的受力与变形。在紧邻地铁区段(与地铁结构距离 $\leq 15\ \text{m}$)范围内进行主、被动区加固,加固桩均采用 $\varnothing 850\ \text{mm}$ 三轴深搅桩,深搅桩纵横向搭接 250 mm,主动区设 6~9 排加固桩,被动区设 9~

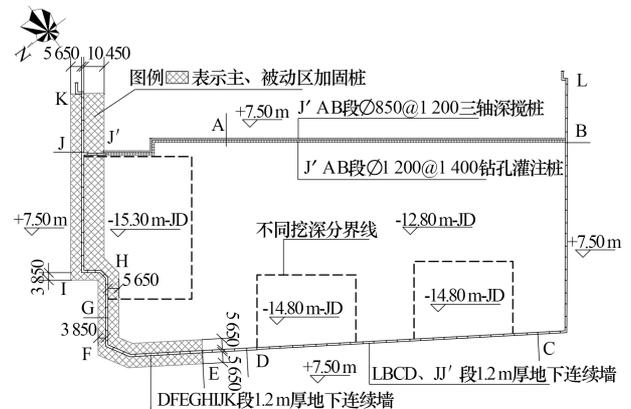


图 2 竖向挡土结构及主被动区加固平面布置 mm

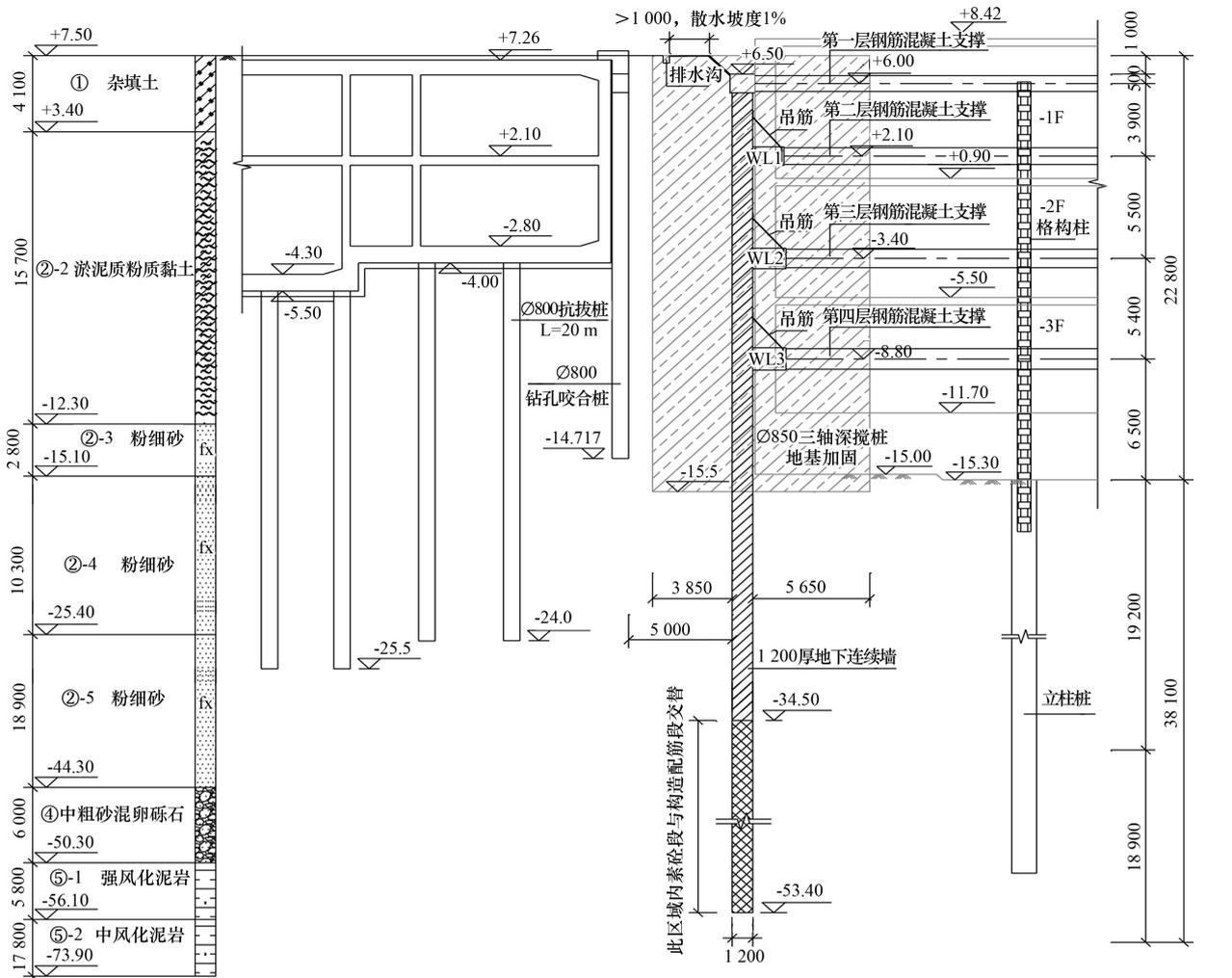


图3 邻近地铁侧基坑支护结构剖面

mm

17排加固桩,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。主、被动区加固平面布置如图2所示,加固剖面如图3所示。

2.4 水平支撑体系

基坑自上而下设4层支撑,采用刚度大、空间整体性较好的钢筋混凝土材料,设对撑、角撑及边桁架。基坑南北向长约为250m,东西向宽约为100m,采用对撑加角撑体系,东西向设1组对撑,南北向设5组对撑,基坑四周均设置边桁架,可适当形成流水作业,有利于缩短工期。支撑截面尺寸按强度与刚度结合控制原则设计,满足变形控制需求,各层主支撑截面尺寸如表2所示。同时结合第一层支撑与东西向对撑形成有效的栈桥循环道路,确保基坑土方的顺利开挖,保证基坑开挖对地铁车站及隧道的影响控制在允许值内。

支撑实景照片如图4所示。

表2 各层主支撑截面尺寸

支撑层位	支撑类型	截面尺寸/(mm × mm)
第一层	对撑	1 000 × 950
	角撑	700 × 850
第二层	对撑	1 700 × 800
	角撑	1 500 × 800
第三层	对撑	1 750 × 1 350
	角撑	1 400 × 1 200
第四层	对撑	1 750 × 1 050
	角撑	1 300 × 1 050

2.5 竖向支撑标高

通常为节约投资,第一层支撑标高在确保周边环境(围墙、管线等)安全的前提下尽量下落。项目场地标高为+7.50m,基坑边线与周边环境距离较近,不具备较大下落空间,因此将圈梁顶标高下



图 4 支撑体系实景

落 1 m, 第一层支撑中心标高设在 +6.00 m。

工程主体结构负一楼层高较大, 为 7.52 m。第二层支撑存在两种选择: 1) 置于负一层楼面标高以上 1.2 m(支撑中心标高为 +2.10 m), 满足负一层楼面施工完成后拆除第二层支撑的条件; 2) 第二层支撑适当下落(支撑中心标高为 +1.00 m), 在负二层楼面完成后, 依次拆除第三层、第二层支撑。以邻近地铁侧为例, 计算两种工况位移包络图可知, 两方案最大水平位移基本相等, 其中第一种方案浅部位移较小, 圈梁顶位移为 13.59 mm, 而第二种方案圈梁顶位移为 21.74 mm, 不利于浅部环境保护, 故第二层支撑中心标高设在 +2.10 m。

第四层支撑标高在满足土方开挖所需净空的基础上应尽量下落, 以使围护结构受力更为合理。项目大面积地下车库底板垫层底标高为 -12.80 m, 考虑土方开挖的便利性, 将第四层支撑中心标高设在 -8.80 m, 挖土净空 3.5 m。

第二层、第四层支撑标高确定后, 根据支护结构受力计算情况, 确定第三层支撑中心标高为 -3.40 m。各层支撑竖向布置如图 3 所示。

2.6 地下水作用控制设计

中间 50 m 宽下沉式广场为后期共建区域, 因此从项目总体设计角度考虑, 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、二期分界区域采用常规的三轴桩悬挂式止水帷幕, 在确保降水对外界环境影响最小的前提下, 节省工程造价。基坑分区分期及止水帷幕平面布置示意如图 5 所示。

坑内设置管井降低地下水, 保持施工面干燥。为掌握基坑降水引起坑外水位变化情况, 动态监测坑外地下水水位, 在基坑外围设置观测井, 如坑外水位下降超过报警值, 则观测井可兼作回灌井, 以平衡地下水位、保护环境。回灌井针对潜水和承压水分为

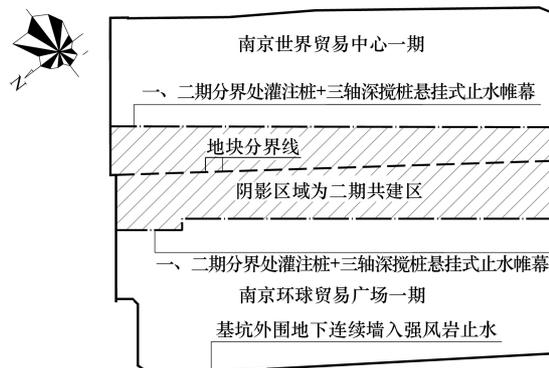


图 5 基坑分区分期及止水帷幕平面布置示意

两种, 即潜水回灌井和承压水回灌井。为确保地铁结构的安全稳定, 在地铁侧加密布置观测井(回灌井)。

3 基坑开挖对轨道交通结构影响分析

为进一步掌握基坑开挖对轨道交通结构产生的影响, 运用有限单元法分析软件, 考虑最不利工况, 进行基坑开挖全工况的数值分析。

3.1 模型建立

(1) 地质条件: 假定各层土体为各向同性体, 土体为弹塑性体, 土体本构模型选用 Drucker-Prager 模型, 输入黏聚力、内摩擦角、膨胀角 3 个参数, 未考虑材料体积膨胀, 膨胀角取 0, 土体的黏聚力、内摩擦角参数如表 1 所示。

(2) 基坑尺寸与模型计算范围: 基坑平面尺寸约为 250 m × 100 m, 深度为 20.30 ~ 22.80 m, 竖向计算深度取基坑开挖深度的 3 倍, 水平方向基坑外取基坑开挖深度的 3 倍。

(3) 土体及支护结构单元选取: 土体采用空间八结点实体单元, 地连墙、支护桩、地铁结构均采用壳单元, 支撑、圈梁、围檩、立柱均采用三维梁单元。

(4) 边界条件: 上表面为自由面, 四周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 6 所示, 共划分单元数为 109 996 个。

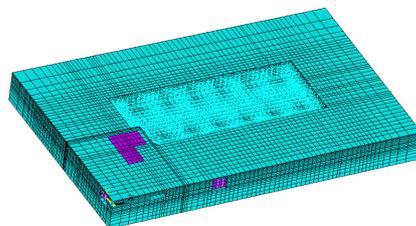


图 6 三维有限元模型

3.2 数值分析结果

地铁结构位移数值分析结果如图 7 所示。由

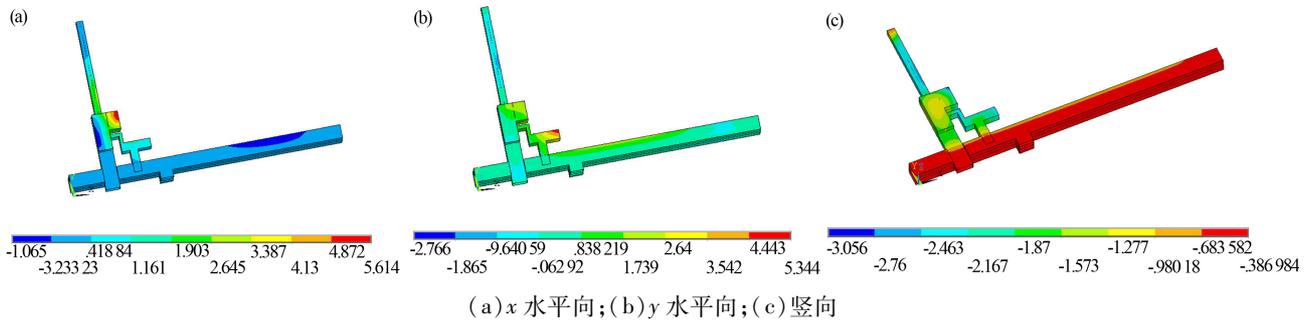


图7 地铁结构位移

mm

图7可知:工程基坑土方开挖期间,地铁结构位移较小,最大水平位移值为5.61 mm,最大沉降为3.06 mm,说明基坑工程施工对地铁区间隧道及车站的影响较小,可满足地铁部门相关要求。

4 实施结果

项目一期工程第一层土方于2013年9月开始开挖,2014年6月开挖至基坑底标高,2014年8月完成地下室底板浇筑,2015年7月地下室顶板施工完成。相邻“南京世界贸易中心”项目一期工程同步建设,早于本项目完成地下室顶板。

基坑围护结构及地铁结构位移的模拟计算结果及实测数据对比结果如表3所示。由表3可知:地铁结构水平位移实测值小于计算值,地铁结构沉降及围护结构水平位移均略大于计算值。项目邻近段地铁均为现浇钢筋混凝土结构,结构刚度较大,模拟计算时亦未考虑地铁围护结构的有利影响(其对水平位移的传递有一定的隔离作用),故其水平位移相对较小。而场地存在深厚软土,加之基坑施工时间较长,其徐变影响较大,故围护结构水平位移及地铁结构沉降相对较大,但均在可控范围内。其余支撑体系内力与变形、周边环境变形及地下水位升降等指标均可控。基坑施工期间,邻近轨道交通、市政道路及管线等运行正常,验证了工程设计方案的合理性。

表3 模拟计算结果与监测数据对比

mm

监测项目	计算值	实测值
地连墙深层水平位移(邻近地铁侧)	23.7	28.7
地连墙深层水平位移(其余侧)	26.7	34.5
地铁结构沉降	3.1	6.1
地铁结构水平位移	5.6	2.7

5 结语

本项目基坑工程规模大、风险高、场地地质条件复杂、周围环境保护要求高,且需与相邻深大基坑同步实施。针对项目的特点及难点,采取了设置缓冲区分期实施、地基加固、增强支护结构刚度、封闭止水及坑外回灌等一系列关键技术措施。工程竣工后,项目基坑实施情况符合参建各方预期,说明各项技术措施合理、有效,保证了周边环境,特别是轨道交通的安全及正常运行,满足了相邻基坑同步建设的需求,可以为类似软土富水地层条件下大规模超深复杂基坑工程设计和施工提供参考。

参考文献:

- [1] 刘国彬,王卫东. 基坑工程手册(第二版)[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2009.
- [2] 竺启泽,金雪莲,樊有维. 软土地区紧邻地铁区间隧道深基坑工程设计和实践[J]. 建筑技术开发,2017,44(19):117-119.
- [3] 黄俊光,李健斌,王伟江,等. 系列超深超大基坑群设计实践与探索[J]. 地下空间与工程学报,2022,18(4):1317-1327.
- [4] 竺启泽,耿晔宽,张怀生. 特殊工况下圆环支撑的拆换撑设计和实践[J]. 工程建设,2017,49(8):56-59.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.