

临近地铁超深基坑双重围护下的应用效果分析

陆荣荣

上海建工集团股份有限公司 上海 200082

【摘要】：随着城市地下空间开发向立体化、集约化方向发展，邻近既有地铁结构的深大基坑工程日益增多，其对地铁隧道产生的扰动风险成为工程建设的关键技术难题。本文以紧邻轨道交通的某超深基坑工程为依托，系统研究了“双重隔离围护+自动轴力伺服系统”组合施工技术的变形控制效果。该项目基坑最大开挖深度达 29 m，基坑边缘距地铁隧道仅 14 m，变形控制要求极为严格。围护体系采用直径 1200 mm 的超深隔离桩与厚度 1200 mm 的地下连续墙构成双重竖向围护结构，并耦合自动轴力伺服系统，实现基坑开挖过程中的主动变形调控。施工过程中，通过分坑错时开挖、分级施加轴力、有限元模拟优化钢筋笼吊装等关键工艺，有效保障了围护结构的稳定性与施工精度。监测数据表明，在伺服系统作用下，地下连续墙累计最大变形平均值控制在 4.3 mm 以内，隔离桩累计最大变形平均值仅为 1.1 mm，坑外土体位移波动在 0.1 mm 以内，各项变形指标均远优于规范限值。研究结果表明，双重隔离围护与伺服系统的协同作用，形成了“主动调控—逐级消能—环境隔离”的变形控制模式，显著削弱了基坑开挖对邻近地铁隧道的影响，具有优异的技术可行性与工程推广价值，可为类似临铁深基坑工程提供重要参考。

【关键词】：临铁基坑；超深基坑；双重围护；隔离桩；自动轴力伺服系统；微变形控制

Analysis of the application effect under double protection of ultra-deep foundation pits near the subway

LU Rong Rong

Shanghai Construction Group Co., Ltd. Shanghai 200082

Abstract: With the development of urban underground space moving towards three-dimensional and intensive utilization, deep and large foundation pit projects adjacent to existing subway structures have become increasingly common, and the risk of disturbance they pose to subway tunnels has become a key technical challenge in engineering construction. This paper focuses on an ultra-deep foundation pit project located next to a rail transit line and systematically studies the deformation control effect of the combined construction technology of the "dual isolation retaining structure with an automatic axial force servo system." The project has a maximum excavation depth of 29 meters, and the edge of the pit is only 14 meters away from the subway tunnel, with extremely strict deformation control requirements. The retaining system consists of ultra-deep isolation piles with a diameter of 1200 mm and underground diaphragm walls with a thickness of 1200 mm, forming a dual vertical retaining structure, coupled with an automatic axial force servo system to achieve active deformation control during the excavation process. During construction, key processes such as phased excavation of the pit, stepwise application of axial force, and finite element simulation to optimize reinforcement cage installation effectively ensured the stability of the retaining structure and construction accuracy. Monitoring data show that under the action of the servo system, the average cumulative maximum deformation of the diaphragm wall is controlled within 4.3 mm, the average cumulative maximum deformation of the isolation piles is only 1.1 mm, and the displacement fluctuation of the external soil is within 0.1 mm, with all deformation indicators far better than the code limits. The study results indicate that the synergistic effect of the dual isolation retaining structure and the servo system forms a deformation control mode of "active regulation—gradual energy dissipation—environmental isolation," which significantly reduces the impact of foundation pit excavation on the adjacent subway tunnel. It demonstrates excellent technical feasibility and engineering promotion value and can provide an important reference for similar deep foundation pit projects near subway lines.

Keywords: Proximity to railway foundation pit; ultra-deep foundation pit; double enclosure; isolation pile; automatic axial force servo system; micro-deformation control

DOI:10.12417/2811-0722.26.05.081

前言

随着现代化城市建设的快速演进与城市功能的持续迭新，新型城市地下空间开发日趋立体化与集约化。以轨道交通工程、综合管廊、大面积超深基坑地下室及人防工程为代表的地

下基础设施日益增多，构成了复杂交错的地下结构体系。然而，该体系在提升城市承载能力的同时，也带来了显著的空间制约与工程风险，给建筑工程的全过程实施提出了严峻的技术挑战与管理要求。

目前,地铁逐步发展成为城市公共交通的主动脉,其沿线及周边区域的大型地下工程项目日益增多。在地铁既有结构管控保护区内进行大规模地下空间开发,已成为当前工程建设领域亟待攻克的关键难题。为应对复杂的施工环境与严苛的变形控制要求,伴随施工技术的持续革新及工程实践的深入探索,逐步发展并衍生出钻孔灌注桩隔离围护、地下连续墙隔离围护以及伺服系统等一系列先进的基坑围护与安全保护技术。基坑的不同支护类型和地层条件,对既有隧道变形影响具有一定的差异性^[4]。

伺服系统以其出色的控载和保压技术,可以满足支撑结构对基坑围护结构变形进行有效约束的需要,从而保证周边建构物的安全和稳定^[5]。本文以邻近地铁的某实体工程项目为依托,对双重隔离围护配合伺服系统的施工技术进行了系统研究。通过分析该组合体系在基坑开挖过程中对地铁隧道稳定性的控制效果,验证了所采用方案的技术合理性,并探讨了其在类似工程中的推广应用价值。

1 工程概况

1.1 项目概况

本研究以上海市虹口区某商业办公项目为工程背景。该项目总用地面积约 1.3 万平方米,总建筑面积约 45 万平方米,地下结构为 4 层钢筋混凝土框架结构。基坑开挖深度介于 24 至 29 米之间,属上海市罕见的超深基坑类别。值得关注的是,基坑周边环境复杂,不仅分布有大量居民楼及学校等既有敏感建(构)筑物,其南侧更紧邻轨道交通区间隧道,对施工过程中的变形控制提出了极高要求。

1.2 围护概况

本工程围护结构初步设计采用隔断式地下连续墙,墙厚 1.2m,墙深介于 51m 至 61m 之间,并设置 6 道钢筋混凝土水平支撑作为内支撑体系。根据地质勘察报告,基坑开挖深度范围内所揭露的土层依次为:①1 层杂填土;②层灰黄色粉质粘土;③层灰色淤泥质粉质粘土夹粘质粉土;④层灰色淤泥质粘土;⑤1-1 层灰色粘土;⑤1-2 层灰色粉质粘土;⑤3 层灰色粉质粘土。基坑所处位置如图 1 所示。

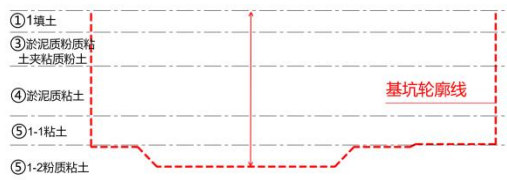


图 1 基坑土位置竖向示意图

2 临铁基坑施工的难点分析

项目南侧存在轨道交通地铁线路,实测数据显示,基坑边缘距隧道边缘仅有 14m,处于轨道交通安全保护区范围内。基坑开挖施工是一个持续卸载的过程,相关研究表明,运营线距

离基坑施工越近,受基坑开挖施工影响越大^[1]。根据上海市《基坑工程微变形控制技术标准》(DG/TJ08-2364-2021)规定:外部工程施工引起轨道交通结构的累计沉降(或隆起)量和水平位移量不应大于 10mm。该变形控制指标极为严苛,施工过程中如何确保临近隧道的安全与稳定,成为工程实施的核心技术挑战。

该项目基坑最大开挖深度达 29 m,属于超深基坑范畴。在超深基坑开挖施工时,周边土体产生的变化多处在基坑深度区间内,当达到 1.5 倍深度后,周边土体产生的变形量降低为 1/2 最大变形量^[2]。工程实践与研究表明,在多道内支撑条件下,地下连续墙的变形模式仍主要表现为中部向坑内凸出的“弓形”挠曲。根据类似工程经验,该水平位移(我们可称之为基坑的“收敛”)在土方开挖期间累计值往往超过 100mm。如此量级的变形,不仅极易导致周边道路与既有建筑结构开裂,更对紧邻的轨道交通隧道构成严重威胁:隧道结构将因土体卸荷扰动产生不均匀沉降或水平位移,引发管片接缝张开、防水失效,最终导致渗漏水事故,给地铁运行埋下重大安全隐患。

3 双重隔离围护施工方案

3.1 总体部署

为解决邻近地铁超深基坑的微变形控制难题,本项目基坑围护体系采用了“双重竖向围护+主动控制”的创新型设计方案。具体而言,该方案由直径 1200 mm 的隔离桩与厚度 1200 mm 的地下连续墙构成双重侧向挡土结构,并耦合自动伺服系统,实现对基坑变形的主动调控。相较于传统“地下连续墙+钢筋混凝土支撑(静力支撑体系)”的被动承载模式,本方案通过双重围护体的隔离效应与伺服系统的轴力实时调节,理论上可将临铁基坑开挖引起的变形严格控制在 10 mm 容许范围内,从而保障邻近地铁隧道的结构与运营安全。该组合围护体系的竖向结构布置如图 2 所示。

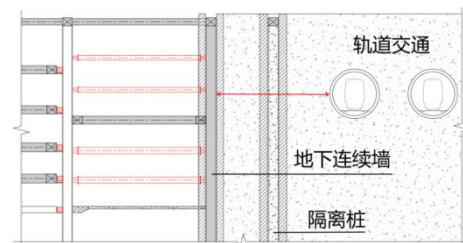


图 2 基坑临铁竖向围护意图

为最大限度降低施工对地铁运营的扰动,本工程采用分坑错时开挖的施工策略。如图 3 所示,整个基坑通过中隔墙分隔为 A、B、C、D 四个独立基坑。施工流程严格执行“先撑后挖、再撑再挖”的原则:首先进行 B 区开挖与结构施工,待其出土 0.00 并完成结构换撑后,依次启动 C 区、D 区及 A 区的同法施工。通过这种分坑跳挖、及时换撑的工序安排,实现对土体卸荷速率与围护结构变形的有效控制。

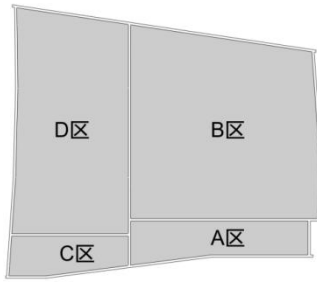


图3 基坑分坑示意图

3.2 具体施工方案

以A区为例, 首先进行隔离桩施工, 其施工工艺与传统钻孔灌注桩一致, 采用间隔跳打法施工, 具体跳打顺序如图4所示。作为地铁保护措施, 隔离桩桩深通常超过100米, 属于超深钻孔灌注桩。为确保成孔质量及孔壁稳定, 在钻孔作业前, 需在孔位两侧预先施工水泥土搅拌墙进行土体加固(该工艺称为CMG工法), 并辅以人工泥浆护壁。

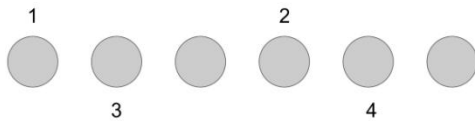


图4 隔离桩跳打施工顺序示意图

隔离桩施工完成后, 随即展开地下室连续墙施工作业。地下连续墙施工前, 为增强槽壁稳定性, 在其两侧采用三轴搅拌桩进行槽壁加固处理。鉴于A区为距轨道交通最近的施工区块, 坑内水平支撑体系采用自动轴力伺服超预撑, 支撑构件选用钢支撑。该超前预撑的施工下放原理与地下连续墙钢筋笼的下方工艺相似, 在完成设计轴力施加后, 采用流态固化土进行回灌。

土方开挖作业严格遵循既定施工组织设计, 按照“时空效应”原则实施分层、分段开挖。开挖过程中, 随开挖进度同步施工钢筋混凝土水平支撑, 并安装伺服控制设备。在整个施工期间, 依据基坑变形监测数据对伺服系统进行动态调控, 直至地下室结构完成出零(即地下室顶板施工完毕)。

3.3 施工关键技术

针对该项目隔离桩桩径达1200mm的实际情况, 依据《上海市基坑工程管理办法》相关规定, 直径超过1m的钻孔灌注桩不得采用GPS型钻孔桩机械施工。对于此类大直径超深成孔作业, 市面可适用的成孔钻机型号较为有限。经多方案参数比选, 项目最终选用SQ45全液压循环钻机(最大成孔直径2000mm, 成孔深度150m)进行隔离桩成孔施工。鉴于隔离桩成孔深度较大, 传统清孔工艺难以满足本工程质量控制要求。为确保成孔质量, 在一清、二清工序中, 均采用气举反循环清孔工艺, 即利用空压机将压缩空气输入风管, 从而在导管内形成负压, 压缩空气和泥浆形成浆气混合物, 经风管底部的气举喷头排出^[7]。经实践, 该工艺各项指标均达到成孔质量要求, 相关检测

数据详见表1, 可为同类工程提供参考借鉴。

表1 泥浆指标检测表

序号	项目	项目	技术指标	
1	泥浆指标	泥浆比重	孔深<60m	≤1.15
			孔深≥60m	≤1.20
		泥浆粘度		18"~22"
2	沉渣厚度	二次清孔	≤50mm	
3	含砂率	二次清孔	≤4%	

隔离桩桩径大、桩身长, 钢筋笼的下放又是另一个难题, 经分析, 若采用常规平躺式起吊工艺, 由于钢筋笼自重较大, 起吊过程中笼体受力状态与其设计受力模式不符, 易产生不可控变形, 进而导致就位困难甚至需要返工修补。为解决此问题, 在施工前可采用有限元分析方法进行钢筋笼吊装工况模拟(详见图5所示), 系统评估不同吊点布置及吊装长度对笼体应力的影响。根据模拟分析结果, 确定最优吊装长度, 并在应力集中区域设置加强钢筋, 以提升笼体刚度。钢筋笼起吊前对吊点进行加强^[6], 确保吊装过程安全可控, 钢筋笼就位精度满足设计要求。

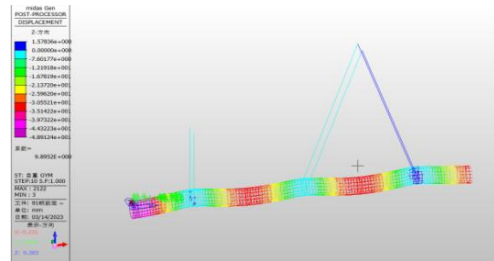


图5 钢筋量吊装有限元模拟分析图

项目采用的自动轴力伺服钢支撑系统(即超前预撑系统), 在开槽下放施工过程中, 由于槽内土体被清除, 将不可避免地引起两侧地下连续墙的扰动及变形。为确保围护结构稳定, 伺服调控系统正式分级加载前, 般需先进行预加载, 且每级加载时均应达到对应的混凝土强度, 直至达到设计加载值^[3]。该项目自动伺服钢支撑加载递推序列为: 500kN→1000kN→2000kN→3000kN→3500kN。加载过程中, 须同步对沟槽周边土体及墙体进行变形监测。通过分级施加预应力, 可根据墙体实时变形响应, 有效推出-2mm~-3mm的负位移(即向坑外方向的微调), 实现围护结构的变形主动控制。待设计轴力施加完成并稳定后, 方可进行流态固化土回填作业。严禁在未施加轴力的情况下进行后续土方开挖施工, 以避免土方扰动对支撑体系造成不利影响, 确保支撑系统的受力状态始终处于设计可控范围内。

4 效果分析

根据首块临铁基坑C区土方开挖过程中实施监测显示, 在自动轴力伺服系统作用下, 基坑深度范围内地下连续墙变形量

范围在-0.4~3.5mm之间，每日位移增量在0.0~0.3mm范围内，累计最大变形值平均在4.3mm左右；隔离桩变形量范围在-1~1.0mm之间，每日位移增量在0.0~0.2mm范围内，累计最大变形值平均在1.1mm左右；坑外土体位移监测基本处于0.1mm范围内波动。详见图6所示。

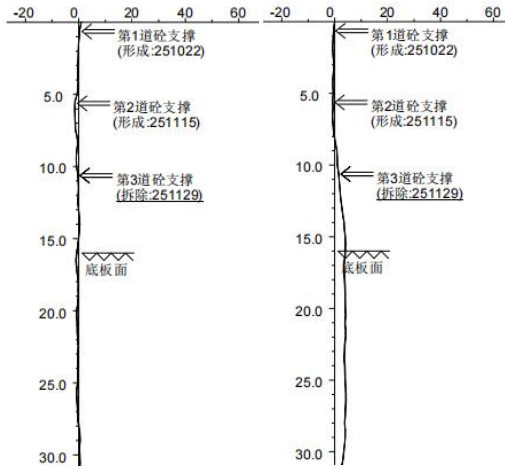


图6 双重隔离测斜位移监测图

上述监测数据表明，在自动轴力伺服系统的动态调控下，基坑围护结构及周边土体变形均处于高度收敛状态。从变形量级来看，地下连续墙最大累计变形平均值控制在4.3mm以内，远小于一般软土地区同类基坑围护结构变形控制值（通常为20~80mm），反映出伺服系统对围护结构侧向位移具有极强的抑制能力。隔离墙变形更为微小，最大累计变形平均值仅为1.1mm，说明在伺服系统作用下，围护结构与隔离结构之间形成了良好的变形协调机制，有效削弱了基坑开挖对邻近敏感结

构的差异变形影响。

从变形发展过程分析，地下连续墙与隔离桩每日位移增量分别控制在0.3mm与0.2mm以内，变形速率平稳，未出现突变或持续增长趋势，表明基坑开挖过程中围护结构已进入稳定变形阶段，伺服系统能够实时响应土压力变化，及时调整轴力，维持“微变形”状态。坑外土体位移监测数据波动幅度在0.1mm以内，进一步验证了伺服系统对坑外土体扰动控制的有效性，周边环境未出现明显的沉降或隆起响应。

5 结语

本文通过对双重围护的超深基坑的实践，依托“地下连续墙+隔离桩”构成的双重围护体系，并结合自动轴力伺服系统的主动控制，实现了对地铁结构及周边环境的精细化保护。该双重围护体系的优势主要体现在以下2个方面：

(1) 地下连续墙作为主体围护结构，承担基坑侧向土压力主荷载，在伺服系统调控下，变形速率平稳；隔离桩作为次级围护结构，进一步削弱了围护墙变形向地铁方向的传递，显著低于围护墙变形量。两道结构在空间上形成“主—辅”协同工作机制，有效实现了变形逐级衰减。

(2) 在双重围护体系的共同作用下，基内的土体扰动几乎未传递至地铁结构所在区域。相比单一围护结构，双重体系通过空间叠加效应和刚度匹配设计，显著提升了坑外环境控制能力，特别适用于对变形敏感的地铁保护区段。

综上，双重围护体系结合自动轴力伺服技术，形成了“主动调控—逐级消能—环境隔离”一体化的变形控制模式，在地铁深基坑工程中展现出卓越的地铁保护能力。具有显著的技术先进性与工程推广价值。

参考文献：

- [1] 邓稀肥,刘子阳,陈涛,等.临近地铁线超深基坑施工伺服系统钢支撑应用及分析[C]//《施工技术》杂志社,亚太建设科技信息研究院有限公司.2022年全国土木工程施工技术交流会论文集(下册).中铁四局集团有限公司;,2022:523-526.
- [2] 孙斌,刘恒,刘婷婷.超深基坑开挖对临近地铁与地层的影响及控制措施[J].石材,2025,(07):56-58.
- [3] 张忆州.混凝土支撑伺服调控系统在敏感环境深大基坑工程的应用研究[J].建筑工,2025,47(08):1268-1272+1282.
- [4] 郑越涛,田亮,杨俊超,等.隔离桩设计参数对基坑施工引起近邻既有隧道位移影响研究[J].岩土工程学报,2025,47(S2):127-132.
- [5] 智慧渊,厉风.钢支撑自动伺服系统应用分析[J].现代交通技术,2023,20(02):78-82.
- [6] 王正飞,孙永旺,赵志涛,等.大直径钻孔灌注桩 T63 高强钢筋直螺纹连接整笼吊装施工技术[C]//《施工技术(中英文)》杂志社,亚太建设科技信息研究院有限公司.2024年全国工程建设行业施工技术交流会论文集(上册).中建八局第三建设有限公司;2024:333-335.
- [7] 邓立雄,贺礼,李海成.气举反循环清孔工艺在深厚沙层钻孔灌注桩工程中的应用[C]//中国水利学会地基与基础工程专业委员会.2023水利水电地基与基础工程技术创新与发展.中国水利水电第八工程局有限公司;中国中铁大桥局集团第四工程有限公司;2023:343-347.