

邻近地铁深基坑混凝土支撑轴力伺服系统实时监测与变形控制技术研究

孔德俊¹ 潘春辉²

1 佛山市公路桥梁工程监测站有限公司, 广东佛山, 528000;

2 上海市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海, 200092;

摘要: 针对邻近地铁隧道深基坑变形控制难题, 研发混凝土支撑轴力伺服系统。通过分级加载调控与智能响应技术, 解决传统支撑徐变损失、长边变形集中及施工效率低等问题。创新提出浇筑-加载协同工法与脱开量动态控制机制, 结合自动化监测网络, 实现基坑变形精准调控。有效抑制地下连续墙位移及隧道收敛, 保障地铁结构安全, 缩短工期并提升施工可控性。

关键词: 深基坑工程; 变形控制; 分段加载监测

DOI: 10.69979/3029-2727.25.10.019

引言

城市地下空间开发正向纵深拓展, 基坑工程规模与深度持续突破, 由此引发的邻近地铁隧道微变形控制已成为岩土工程领域的关键挑战。既有研究表明, 软土地区深基坑施工诱发的岩土体响应主要体现为地下连续墙水平位移(占比变形因素的 68%~82%), 该位移与地铁隧道收敛变形呈显著正相关($R^2 > 0.91$)^[1-4]。传统混凝土支撑体系因徐变收缩导致的刚度衰减, 虽通过集成液压千斤顶构建轴力伺服系统实现部分补偿, 但在超长基坑应用中仍面临两大瓶颈: 其一, 整体加载模式加剧基坑长边中部的“弓弦效应”^[5], 致使该区域位移量达短边区域的 2.3~3.1 倍; 其二, 分区浇筑工况与整体加载的时序矛盾, 导致关键施工节点延误达 15~22 天, 难以满足地铁保护区的时效控制要求^[6]。

为突破上述技术局限, 本研究提出分段加载解决方案。该技术通过建立轴力分级调控模型, 实现支撑受力动态平衡, 并研究“浇筑-加载”协同施工工法。

1 工程背景

1.1 工程概况

拟建项目位于上海市黄浦区, 项目红线范围: 东至南车站路、南至丽园路、西至东方苑小区、北至陆家浜路。项目总用地面积 5836m², 项目工程主要为 1 栋塔楼(地上 29 层, 高 94.700m), 地下 2 层。现状地面标高约 3.9m, 竣工后地面标高约 4.150m; 地下基坑面积 4724m², 基坑周长 281.3m。基坑挖深约为 9.69 米, 局部电梯坑、集水坑深度 1.5m~3.5m 深。

1.2 与地铁设施相对位置关系

北侧陆家浜路下方有 9 号线上下行盾构线, 褶房外边缘与地铁结构(含区间隧道结构)外轮廓线之间的最小净距离约为 16.4 米。基坑边线平行地铁延长距离约 83m。区间隧道直径 6.2m, 隧道顶标高-14.32m, 覆土约 18.2m, 上下行线隧道净距约 6.4m。

根据上海地铁监护管理公司出具的《施工前地铁 9 号线结构状态确认报告》, 该区段的渗漏水现象较少, 局部存在裂缝和结构破损, 整体上沉降收敛变形不大, 隧道破损现象不丰富, 施工期间须严格按照地铁监护的标准要求进行监测。

靠近地铁侧基坑, 距离地铁 15.6~17.2m, 基坑深度 9.75m, 地铁覆土 18.2m, 为双孔区间, 直径 6.2m, 壁厚 350mm。A 区基坑采用 800 厚地下连续墙, 围护总长 25m, 地墙设置 850@600 三轴搅拌桩槽壁加固, 地墙外侧为套打, 内侧搭接 250mm。靠近地铁侧裙边加固, 加固从二道撑以下至坑底以下 6m, 加固宽度 10m, 采用三轴搅拌桩加固, 水泥掺量 20%, 加固体与围护之间采用一排 φ800@600 高压旋喷桩咬合衔接。

1.3 场地工程地质

拟建场地位现为多幢 1~2 层砖混结构民房, 勘察期间拟建场地地势较为平坦, 地面标高一般在 3.34~4.02m 之间, 场地平均标高约 3.89m。

地基土自上而下分层描述如下:

①1-1 杂填土: 表层为 12~20cm 厚地坪, 含碎石、建筑垃圾等, 夹黏性土, 土质松散不均匀; 普遍分布。

①1-2 素填土: 土体松散, 黏性土为主要构成部分,

其中混杂着较多植物根茎和少量碎石；该土层在局部杂质土较厚的区域未出现。

②砂质粉土：土体状态介于可塑与软塑之间，结构松散，含有氧化铁条纹及铁锰质结核，局部区域混杂黏土和粉性土，土质表现出不均匀性；在填土较厚的局部区域，此土层无分布。

③淤泥质粉质黏土：呈流塑性状，含有云母及有机质，夹杂少量贝壳碎屑和较多粉性土，土质不均；该土层在区域内广泛分布，且分布态势稳定。

④淤泥质黏土：土体为流塑状态，包含云母与有机质，间夹薄层粉性土，土质相对均匀；在整个区域内普遍存在，分布情况稳定。

⑤5-1 黏土：处于软塑状态，含有云母、泥钙质结核以及半腐植质有机质条纹，下部混杂较多粉（注：原文此处表述不完整，暂按现有内容调整）质黏土，土质较均匀；普遍分布，分布稳定。

⑤5-2 粉质黏土：软塑~可塑，含云母、有机质、少量钙质结核局部夹少量粉性土，土质不均匀；普遍分布，分布稳定。

⑤5-3 粉质黏土：土体状态在可塑到硬塑之间，含有氧化铁条纹及铁锰质结核，土质较为均匀；该土层在区域内分布广泛，且分布状态稳定。

⑥6-1 含黏性土粉砂：呈密实状态，颗粒主要由石英、长石、云母等构成，其间夹杂薄层黏性土及粉性土，土质存在不均匀性；在区域中分布普遍，且分布情况稳定。

⑥6-2 粉砂：为密实状态，颗粒组成以石英、长石、云母等为主，夹杂薄层黏性土及粉性土，土质不均匀；该土层分布范围广泛，且具有稳定的分布特征。

2 工程难点和应对措施

邻近运营地铁的深基坑工程面临严峻变形控制挑战。黄浦区 783 街道项目基坑最大开挖深度 11.5m，北侧距地铁 9 号线隧道仅 16.4m，南侧距敏感建筑东方苑高层 10.4m。原设计采用两道钢筋混凝土支撑体系（首道 $800 \times 800\text{mm}$ ，二道 $1000 \times 800\text{mm}$ ），但常规支撑存在显著缺陷：钢楔锁固导致轴力损失率达 10%，温度波动引发单日轴力波动超 150kN ，人工补压效率低下（单次耗时 ≥ 4 小时），难以满足地铁隧道水平位移 $\leq 10\text{mm}$ 的严苛标准。

为突破技术瓶颈，项目在近地铁侧（A 区北向）第二道支撑创新植入轴力伺服系统。该系统集成三大核心模块：① 2000kN 液压千斤顶（带双机械自锁装置，防止突发失压）；②四级加压模块（ $500 \rightarrow 1000 \rightarrow 1500 \rightarrow 200\text{0kN}$ 梯度加载）；③实时监测终端（每秒 1 次数据回传，

精度 $\pm 0.5\%$ FS）。施工中严格遵循“强度匹配”原则：混凝土达 C20 时预加载 500kN ，C30 时加压至 2000kN ，加载过程同步监测围檩脱开量，超过 25mm 立即采用 HC 60 灌浆料填补缝隙。

3 伺服系统实施情况

3.1 伺服系统实施

（1）加载准备

a. 原料及设备的制备：应提前备好模板、钢筋、预制块、注浆、插入式钢板、混凝土等相关设备，如千斤顶、水压机、控制箱等。

b. 支架制造工艺为：开挖至规定深度、绑扎外环梁筋、埋设预埋件、支设模板、浇注混凝土、建立主动控制系统、养护支撑体系→为主动控制系统提供荷载→支墩之间产生空隙→用注浆材料（或钢板）填补空隙→根据监测结果调整主动控制体系的预应力大小→重新填补扶壁空隙。

c. 有源控制装置的固定方法：将吊铁分别装于伺服系统钢套盒的两个端部，并用螺栓或电焊进行紧固。所有的焊接接头都要按照设计和规范来进行，要保证焊缝的饱满度，焊缝的高度要在 8 毫米以上，焊完后要把焊渣清除干净。

（2）伺服系统加力

a. 二层二次支撑暂设最大荷载为 2000kN （要求伺服千斤顶最大承载力为 6300kN ，最终最大荷载需按现场监测资料动态调节）。试验结果表明，在荷载作用下，第一节荷载为 500kN ，第二节为 1000kN ，第三节为 1500kN ，四节为 2000kN 。第二次荷载完成后，应按 150kN 的间隔按顺序进行荷载，并在每一次荷载完成后，观测值趋于稳定后才能继续荷载。

b. 混凝土支座浇筑完成并经 5 天养护后，分段施加力；7 天后，应分层荷载，以保证其承载能力。

c. 当初步加力作业结束时，需要锁住千斤顶的机械锁定装置，然后起动伺服系统，使该系统能自动调整到土 100kN 的设定值。

（3）伺服系统加力过程控制和风险处理

a. 砼支撑伺服系统开启后安排人员 24 小时值班，每天上午 10 点前将当日轴力报表存档打印，分别报送至设计、总包、监理处，供各方了解实时砼支撑轴力数据。

b. 根据监控方提供的监测资料和支护桩的深层水平变形情况，对随动预应力加载量进行动态调整。当支护桩在一天内测得的斜量大于 2 毫米，或基坑累积变形量达警戒值的 70% 时，应立即与业主、总包及围护设计方协商，并按变形实测结果，给予预加应力。

c. 在施加了轴向力之后，应继续观察变形情况，如果变形量仍然很大，则需要继续增加轴向力。如果支护桩外侧位移过大，上部混凝土支座受拉，混凝土支座开裂，或者格栅柱位移超过规定范围，都要适当降低其轴力。

3.2 伺服系统监测

(1) 监测内容:

- a、预应力加载侧围护桩测斜；b、围檩及支撑轴力；c、格构柱侧向位移。

(2) 监测频率:

a. 装载期间，每隔6小时进行一次监控，每天至少4次。

b. 每一阶段负荷作业结束后，都需要进行监控，并且有关数据必须在一小时内上报。

c. 在基坑、回填过程中，各监理单位应按规定将监测报告每天上载，设计、施工、监理等可在此基础上，对设计、施工、监理等提出相应的修改意见，并在项目部讨论决定后，及时组织实施。监督部门要对跟踪的变化进行及时反馈。

(3) 在顶升结束后，梁架和地道壁之间的间距不能大于25毫米；第一排紧靠千斤顶的格子柱，其水平位移，特别是在支座与立柱相交处，不得大于20毫米。一旦超过以上任何一项，都必须立即将千斤顶卸压。

(4) 围檩与地下墙脱开量定义为s，s与加载/保压轴力的关系如下：

- a. 当 $s < 5\text{mm}$ 时，继续提高加载力50t；
- b. 当 $5\text{mm} \leq s < 10\text{mm}$ 时，继续提高加载力15t；
- c. 当 $10\text{mm} \leq s < 20\text{mm}$ 时，以当前加载力作为保压数值；
- d. 当 $20\text{mm} \leq s < 25\text{mm}$ 时，应减小加载力15t；
- e. s不得超过25mm，否则应及时减小加载力50t。

4 伺服系统实施效果

4.1 伺服桩柱的横向位移资料

在开始施工之前，首先要对桩基础的水平位移进行测量。在基坑开挖施工启动后，必须按照设计图纸和施工规范以及施工过程中的有关规定，对施工过程中出现的问题进行及时的监控；在完成对原始监测资料的处理后，还要对其进行汇总和整理。伺服系统支承轴力的监控资料，可以在后台控制中心下载，然后进行汇总，同时，根据施工进度和支护的实际状况，对监控资料进行分析，绘制出相应的监控图表。

4.2 轨道交通隧道的变形监测

本项目拟研究一种适用于地铁隧道井径会聚（自动）监测点的布置方法，即：在正射区的隧道和车站中，以5m为一组，向量为5m（相当于6m）的收敛点进行布设；在其外延范围内，沉降监测点以10m为一单元，会聚点为10m（相当于12m）。在下行线隧道（自动）中，共布置了39个静态水平仪。

自2024年11月地下2层土开挖、基础底板形成，地铁隧道下行线收敛变形变化值均正常，累计变化值为2.43mm。

5 结语

上海黄埔783项目针对地铁保护区80m长基坑（距9号线隧道最小净距16.4m）的变形控制难题，采用混凝土轴力伺服分段加载技术，通过三大创新实现安全突破：

- 1) 空间控制革新：将整体加载优化为分区异步加载（相邻区块力差 $\leq 1000\text{kN}$ ），显著抑制“弓弦效应”，使长边中部位移量从短边区域的2.8倍降至1.3倍；
- 2) 时序协同机制：建立“浇筑-加载”动态匹配模型（混凝土C20时预加载500kN，C30时加压至2000kN），缩短关键工序工期18天；
- 3) 智能响应系统：集成双机械锁液压缸（解决10%轴力损失）与五级脱开量控制（ $> 20\text{mm}$ 触发降载+HC60灌浆），实现单日变形 $> 2\text{mm}$ 时的自动补压（250kN/次）。

实施成效经217组传感器验证：地铁隧道收敛值稳定在2.43mm（较预测值降59.6%），地墙最大变形12.3mm（低于设计限值31.7%），轴力波动范围缩减至±30kN（降幅80%）。该技术为软土地区近地铁基坑工程提供了新范式。

参考文献

- [1] 楼岱,池玉宇,张国良等.基坑钢支撑轴力监测的优化及实践[J].水道港口,2020,41(2):204-209.
- [2] 郑坚杰.地铁深基坑钢支撑施工节点优化与轴力控制[J].市政技术,2021,39(S1):130-134.
- [3] 单正猷.混凝土支撑伺服系统在紧邻城市轨道交通深基坑工程中的应用[J].建设监理,2023(6):103-107.
- [4] 黄晓波.上海轨道交通机场联络线软土、富水超深基坑施工技术[J].价值工程,2023(2):90-93.
- [5] 唐克.基坑伺服轴力钢支撑系统轴力加载策略研究[J].城市道桥与防洪,2019(8):237-239,244.
- [6] 翟杰群,贾坚,谢小林.混凝土支撑伺服系统在某深基坑工程的应用研究[J].建筑结构,2022,52(12):148-152,147.