2025 年 6月

软土地区自动伺服系统深基坑变形分析

Deformation Analysis of Deep Excavation with Automatic Servo System in Soft Soil Areas

吕 凯

(上海市地矿建设有限责任公司,上海 200040)

摘 要:在软土地区深基坑工程中,地层高压缩性、低渗透性及环境敏感性对支护技术提出更高要求。以 上海某调蓄池项目为背景,针对开挖深度达16.6 m(局部18.1 m),引入自动伺服系统。通过构建多维度监测 网络,系统追踪地下连续墙侧向位移、支撑轴力动态变化、周边地表沉降及坑外水土响应特征,结合自动伺服 系统的实时反馈与动态调整机制,验证其主动控制变形能力。结果表明:自动伺服系统通过压力阈值设定与多 级支撑协同,显著降低地下连续墙最大侧移至0.1% H (H 为开挖深度),较传统实测规范均值缩减 31.3%;系 统的自适应调节有效平衡了软土流变效应与开挖卸荷应力释放间的矛盾,其"预测 – 响应 – 补偿"闭环逻辑为 复杂地层基坑工程提供新思路。

关键词:自动伺服系统;深基坑;变形控制

中图分类号: TU43 文献标志码: A 文章编号: 1005-8249 (2025) 03-0084-06 **DOI**:10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2025.03.016

LV Kai

(Shanghai Geological and Mineral Construction Co., Ltd., Shanghai 200040, China)

Abstract: In deep foundation pit engineering in soft soil areas, the high compressibility, low permeability and environmental sensitivity of the strata pose higher requirements for support technology. Taking a Shanghai storage tank project as the background, for an excavation depth reaching 16.6 m (locally 18.1 m), the support system adopts an automatic servo steel support system. Monitoring data is used to track the lateral displacement of diaphragm walls, the dynamic changes of the support axial force, the surrounding ground surface settlement and the response characteristics of the water and soil outside the pit are systematically tracked. Combined with the real – time feedback and dynamic adjustment mechanism of the servo system, its active control deformation ability is verified. The research found that the servo system, through the pressure threshold setting and the coordination of multi – level supports, significantly reduced the maximum lateral displacement of the underground continuous wall to 0.1% H (H is the excavation depth), which is 31.3% lower than the average value of the traditional measured norms. Theoretical analysis shows that the self – adaptive regulation of the system effectively balances the contradiction between the rheological effect of soft soil and the stress release of excavation unloading, and its " prediction – response – compensation" closed – loop logic provides a new idea for complex stratum foundation pit engineering.

Key words: automatic servo system; deep excavation; deformation control

作者简介: 吕 凯 (1992—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向: 岩土工程。 收稿日期: 2025-04-19

0 引言

对于深基坑而言,超深基坑往往伴随着更大的 变形和更广的影响范围^[1]。自动伺服系统的应用有 效地解决了复杂城区基坑开挖时变形过大的风险, 通过实时主动补偿,明显降低了基坑变形对周边建

筑物的影响^[2]。

近年来,众多学者对软土地区深基坑开挖的变 形特性进行了深入的系统性研究。张灵熙等^[2]通过 分析地铁基坑变形数据得出采用自动伺服系统的地 下连续墙最大水平位移比常规钢支撑减少31.4%, 周边地表沉降远小于使用常规钢支撑沉降值;郑 刚^[3]通过分析基坑施工全过程各阶段变形特征,提 出了两类控制基坑变形的方法;李泽文等^[4]通过对 上海某深基坑分析发现地下连续墙在钢筋混凝土支 撑条件下最大侧移位分布在0.18%H~0.7%H(H为 开挖深度); Tan 等^[5]通过对中心岛法挖土基坑变形 数据分析发现土方开挖引起的坑底隆起向下影响范 围远超数值模拟假设范围; 宗露丹等^[6] 通过对上海 某深大基坑分析发现墙后土体侧斜与墙体侧斜相协 调,随距坑边距离增加而减小;徐中华等^[7]通过分 析软土地层 45 m 超深基坑变形形状,发现地下连续 墙的变形规律具有高度相似性,均随着开挖深度增 加而逐步增大,变形形态为"纺锤型";王卫东 等^[8-9]通过对上海地区大量深基坑监测数据总结与 分析, 探讨了在不同支护形式条件下深基坑的变形 状态,发现最大地表沉降随着开挖深度的增加而增 加,其值介于0.1%H~0.8%H之间; 应宏伟等^[10] 针对杭州深厚软黏土深基坑工程的围护墙体与土体 水平位移、周边沉降等因素进行研究,发现软黏土 中大型基坑的水平位移明显大于狭窄基坑:龙华东 等^[11]对基坑监测数据分析发现自动伺服系统的应用 很好地控制了基坑的变形;李涛等^[12]基于弹性变形 的叠加原理,探讨了拆撑过程中,地下连续墙水平 位移最大值位置会出现上移现象,上移量大约为 0.15H~0.2H; 王占生等^[13]统计分析 29 个工程基 坑变形实测数据,发现基坑围护结构最大侧移范围 在 0.13% H~0.67% H,平均值为 0.32 H;李恒一 等[14] 通过数值模拟计算科学给定了伺服钢支撑轴力 设定值,提高了伺服钢支撑系统在结构变形的控制 效果。

以上海某项目开挖深度 16.6 m (局部开挖 18.1 m)的方形基坑为背景,对自动伺服系统在深 基坑中的应用进行分析,通过研究地下连续墙的侧 向位移、支撑轴力、周边地表沉降、坑外地下水位 等关键数据,揭示自动伺服系统在软土地基深基坑 工程应用中的优势。

1 工程案例

1.1 工程概况

Table 1

上海市调蓄池工程,基坑平面尺寸为38.6 m× 12.9 m,开挖深度在16.6 m(局部区域为18.8 m)。 施工周边存在多个既有建筑和新建建筑,特别是新 建建筑采用PHC管桩作为其基础结构,更加大了基 坑开挖安全的风险,依据上海市基坑工程规范,基 坑安全等级、基坑环境保护等级均为一级。

调蓄池基坑采取明挖法施工,围护采用 800 mm 厚地下连续墙结合内衬墙"两墙合一"设计,墙身 长 38 m,局部深坑区域墙身长 40 m,两墙之间接头采 用锁口管接头。地下连续墙两侧采用 ϕ 850@ 600 mm 三轴水泥土搅拌桩进行槽壁加固,坑内土体采用 ϕ 850@ 600 mm 三轴水泥土搅拌桩进行裙边加固及坑 底抽条加固,槽段接缝处采用 ϕ 2 400 mm 的 RJP 摆 喷 180°加固技术。地下连续墙墙底达⑦₂ 层,考虑基 坑开挖深度,设计未进行隔断承压含水层。基坑整 体布置了 4 道支撑,而在局部深坑区域增设了第五道 支撑;第一道支撑采用钢筋混凝土结构,其支撑断 面为 800 mm × 1200 mm,第二、三、四、五道采用 ϕ 609 mm × 16 mm 自动伺服控制钢支撑。

工程 50.0 m 深度范围内主要土层物理力学参数 见表 1。场地地下水有潜水和承压水两种类型。潜水 水位埋深 0.3~1.5 m,在较深的⑦₁、⑦₂、⑧层粉 (砂)性土中存在承压水含水层。承压水含水层水位

> 表1 各主要土层物理力学参数 Physical and mechanical parameters of major soil layers

土层名称	重度γ /(kN・m ³)	孔隙比 e	压缩模量 E/MPa	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 φ⁄ (°)	静止侧压力 系数 K ₀
素填土①1-2	18.8	0.851	6.02	17	23.5	
粉质黏土②1	18.5	0.912	4.92	17	18.5	0.44
砂质粉土②3	18.7	0.830	11.01	5	29.0	0.36
淤泥质粉质黏土③	17.8	1.075	3.61	12	16.5	0.50
淤泥质黏土④	16.8	1.395	2.44	13	12.0	0.56
粉质黏土⑤	18.1	1.003	4.71	16	19.5	0.48
粉质黏土⑥	19.3	0.752	6.72	40	18.5	0.43
砂质粉土⑦1	18.9	0.781	7.72	9	30.0	0.36
粉砂⑦2	18.9	0.752	12.23	3	35.5	0.34
粉砂夹粉质黏土⑧	18.9	0.767	13.85	2	34.5	0.35

呈年周期性变化,一般均低于潜水位,承压水水位 埋深的变化幅度一般在 3.0~12.0 m。勘察期间测得 第⑦₁层承压水稳定水位埋深为 4.49~4.66 m,相应 标高为 0.27~0.46 m。

1.2 监测点布设

桩基和围护工程施工流程为:工程桩灌注桩施工、槽壁加固施工、地下连续墙施工、坑内加固及 RJP工法桩施工。根据分层开挖步骤,整个过程可细 分为7个工况,见表2。各测点平面布置见图1。

	表 2 各施工阶段划分表	
Table 2	Division table of construction stages	

	施上内谷	完成时间
Stage1	基坑开挖至绝对标高4.200,形成第一道混凝土支撑	2024/6/9
Stage2	基坑开挖至绝对标高-0.335,形成第二道钢支撑支撑	2024/7/26
Stage3	基坑开挖至绝对标高-4.605,形成第三道钢支撑支支撑	2024/8/7
Stage4	基坑开挖至绝对标高-8.305,形成四道钢支撑支支撑	2024/8/14
Stage5	基坑开挖至绝对标高 – 11. 600,浇筑普遍区域底板	2024/8/29
Stage6	基坑开挖局部深区域至绝对标高-13.100,浇筑深区域底板	2024/9/2
Stage7	逐步回填地下室结构并拆除支撑	2024/11/13



2 结果与分析

2.1 地下连续墙侧向位移

图 2 为地下连续墙典型监测点在各工况下的侧向 位移时空演变规律。随着基坑开挖深度的递增,各 测点位移呈现渐进式增长趋势,其位移极值点沿墙





深方向发生同步迁移,整体位移分布呈现典型"纺 锤体"演化模式。

基坑底板浇筑完成阶段结构回筑阶段(Stage7) 典型测点最大侧向位移峰值为18.19 mm,谷值为 16.51 mm,对应δ_{hmax} = (0.093%~0.1%) *H*。由于 第二至第五道支撑均采用钢支撑自动伺服系统,其 位移量较常规支护位移量显著降低,实测最大侧向位 移值仅为常规统计均值 0.32% H 的 31.3%。基坑侧向 水平位移的累计最大值被设定为不超过 0.18% H 实际 测量数据,最大侧向位移仅达到了预警值的 55.8%。

2.2 支撑轴力分析

图 3 为各道典型支撑轴力随时间的变化规律。在 Stage2~Stage5 各道支撑体系形成后,其轴力均在下 层土方开挖过程中呈现快速增长态势;而随着后续

土方开挖深度的增加,轴力增幅显著趋缓并进入平 稳发展阶段。在支撑拆除阶段(Stage7)同样存在支 撑轴力突变现象,当下层支撑拆除后,在结构墙体 未完成承载体系转换前,相邻上层支撑轴力会产生 瞬时激增,直至墙体结构形成有效承载机制后,轴 力值方恢复稳定状态。





Fig. 3 Axial forces of supports in diaphragm walls under various working conditions

第一至第四道支撑轴力峰值分别为5 638.1、2 901.9、2 312.9 及1 903.5 kN,其极值点集中出现 在基坑长边中部南北向对撑区域。当第三道钢支撑 拆除后,第二道支撑落深区轴力值呈现反超现象, 其监测数据明显高于中部南北对撑部位的对应数值。

根据设计图纸可知,首道支撑轴力预警值设定为 7 000 kN,第二至四道支撑轴力预警值为 3 200 kN。 各支撑轴力与抗压承载力比值维持在 0.59 至 0.90 区 间,分析数据表明支撑体系整体处于正常工作状态, 在设计强度要求范围。相较于第三、四道支撑 0.59~0.72 的比值区间,第一道(0.80)及第二道(0.90) 支撑呈现出更为显著的承压特性,其力学响应明显 高于下部支撑体系。

2.3 地下连续墙墙顶竖向位移

由图4可知,在土体开挖及临时支撑施工阶段(Stage2~Stage6),受土体卸荷回弹作用影响,地下 连续墙出现短暂隆起现象,其中最大隆起值0.68 mm 为基坑西侧中部测点Q8。随着基坑开挖深度逐级增



Fig. 4 Vertical displacement diagram of the top of the diaphragm wall

加,结构自重效应逐渐主导变形特征,墙体呈现持续 下沉态势并逐步趋于稳定,最大沉降值达 3.14 mm, 发生于基坑东侧长边 1/3 点处的测点 Q7。

2.4 周边地表沉降

由图5可知,在整个基坑施工期间,所有监测点 的地表沉降量均呈现出持续下降的趋势。特别是在基

2

坑开挖阶段(Stage2~Stage5),地表沉降尤为显著。

到了 Stage6 阶段,随着底板的浇筑完成,地表 沉降开始趋于稳定。然而,在拆除临时支撑和进行 结构回填的阶段(Stage7),地表再次出现了缓慢的 沉降现象,直至结构回筑至地表。在这一过程中, 各监测点的沉降速率逐渐放缓,最终趋于稳定。



图 5 周边地表沉降曲线图 Fig. 5 Peripheral surface settlement curve

由图 6 可知,南侧和西侧测点 DB1 ~ DB10 的监测点记录的最大沉降量各不相同,其中 DB6 沉降量最大,达到 10.27 mm。相对地,在东侧和北侧测点DB11 ~ DB20 中,除了 DB19 和 DB20 的沉降量相对较小外,其余监测点的沉降量较大且分布较为均匀,其中 DB15 沉降量最大,达到 11.03 mm。

根据本项目设计图纸周边地表沉降允许值为 0.15%*H*,即为24.9~27.15 mm,实测测点沉降值远 小于设计沉降允许值。



2.5 坑外地下水位

由图7可知,整个基坑开挖阶段大部分坑外水位 监测点的水位变化量迅速下降,尤其是在 Stage2 ~ Stage4 阶段,坑外水位下降幅度显著。如,SW3、 SW4、SW8 等监测点的水位下降幅度超过了400 mm。 在 Stage5 ~ Stage6 阶段,坑外水位变化有所缓解,但 仍持续下降。在整个 Stage2 ~ Stage6 阶段,出现短 暂的上升趋势,但随后又继续下降。Stage7 阶段水 位变化量趋于稳定,下降趋势明显减缓,部分监测 点出现小幅上升趋势。坑外水位的最大变化量为 694 mm,远低于设计中规定的地下水位变化累计允 许值 1 000 mm。

3 结论

通过地下连续墙侧向位移、支撑轴力动态变化、 周边地表沉降及坑外水土响应特征研究,得到如下 主要结论:

(1)自动伺服系统通过实时动态调控,在软土 地层中展现出优于传统支护手段的变形抑制能力。 其特有的应力补偿机制使围护结构位移量相较于常 规基坑缩减 31.3%。



图 7 坑外水过随上元曲线图 Fig. 7 Curve of water level outside the pit under different working conditions

(2)围护结构变形呈现与深度相关特性,最 大位移量与开挖深度呈 0.1%线性关系,小于区 域工程经验值。支撑轴力变化呈现"开挖阶段快 速上升→后续阶段增幅趋缓→拆撑时瞬时激增" 三阶段特征。

(3)自动伺服系统通过预应力精准补偿,将基坑施工引发的周边地表沉降约束在较小范围 (≤11.03 mm)。仅为允许值的40.6%~44.3%,证 明该技术对既有建筑密集区的施工安全提升具有工 程实践价值。

通过多维度数据互验分析,揭示了自动伺服系 统在时空维度上的协同控制机制,为优化深基坑工 程的环境影响评估模型提供了新的参数标定方法。 该技术特别适用于受变形控制指标严格约束的城市 核心区地下空间开发项目。

参考文献

- LIU G B, JIANG R J, et al. Deformation characteristics of a 38 m deep excavation in soft clay [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2011, 48 (12): 1817-1828.
- [2] 张灵熙,张雯超,颜静,等.软土地区地铁车站深基坑变形伺服 控制分析 [J].施工技术(中英文),2023,52 (17):55-60.
- [3] 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.
- [4] 李泽文,谭勇,廖少明,等.上海超深基坑地下连续墙的空间 变形特性实测分析 [J].岩土工程报,2024,46 (11):2380-

2390.

- [5] TAN Y, WANG D L. Characteristics of a large scale deep foundation pit excavated by central – island technique in Shanghai soft clay [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2013, 139 (11): 1875-1893.
- [6] 宗露丹,徐中华,王卫东.软土超深大基坑工程施工监测分析[J].施工技术(中英文),2021,50(13):163-169,181.
- [7] 徐中华,王卫东,宗露丹,等. 软土地层45 m 级超深基坑工程 实测变形性状分析 [J]. 建筑结构,2024,54 (10):118-127.
- [8] 王卫东,徐中华,王建华.上海地区深基坑周边地表变形性状 实测统计分析 [J].岩土工程学报,2011,33 (11):1659-1666.
- [9] 王卫东, 沈健, 胡耘. 软土超大面积基坑群工程安全与环境控制设计与实践 [J]. 建筑结构, 2024, 54 (4): 30-40.
- [10] 应宏伟,杨永文. 杭州深厚软黏土中某深大基坑的性状研究 [J]. 岩土工程学报, 2011, 33 (12): 1838-1846.
- [11] 龙华东,周辉,涂洪亮,等.钢支撑伺服系统在富水软弱地层 深基坑施工中的应用 [J].铁道建筑,2022,62 (2):137-140.
- [12] 李涛,王彦龙,杨依伟,等. 深基坑内支撑拆除时地下连续墙水平位移计算方法 [J]. 地下空间与工程学报,2023,19
 (6):1992-2003.
- [13] 王占生,张佳莉,杜江涛.地铁车站基坑变形规律分析——以 苏州地区为例 [J].土工基础,2021,35 (1):1-5.
- [14] 李恒一,何晟亚,徐海岩. 钢支撑伺服系统数值模拟计算方法 研究 [J]. 城市轨道交通究, 2023, 26 (12): 127 - 133, 138.