

# 伺服混凝土支撑在深基坑变形控制的监测分析

史发成

上海山南勘测设计有限公司 上海 201206

**摘要:** 伺服混凝土支撑体系作为一种先进的支护方法, 能够实现对基坑变形智能感知主动调控, 约束主动变形, 提升深基坑工程的稳定性和控制并降低风险。以上海某基坑为例, 系统解析了伺服混凝土支撑体系的控制变形效果, 验证了该体系在复杂地质环境及严苛变形控制需求下的适用性。通过分析伺服混凝土支撑与地墙变形、周围环境变形的耦合作用, 验证该体系在深基坑工程中的变形控制效能, 为同类工程的设计优化与施工管控提供了可借鉴的技术参考。

**关键词:** 软土; 时空效应; 深基坑变形控制; 地墙变形

## 引言

随着城市化的高速扩张, 地下空间开发需求激增, 深基坑工程在软土地区密集涌现, 地下空间由单层向多层发展, 出现了众多深、大基坑。基坑在施工过程中, 由于卸荷、时空效应、承压水等耦合作用, 易引发围护结构失稳、周边建构筑物损坏等连锁反应, 使得环境保护要求越来越高, 控制基坑变形逐渐成为工程的焦点。

传统控制基坑变形的技术越来越不能适应现代城市密集深基坑施工的高标准、低风险、低影响需求, 其核心矛盾在于静态设计与动态工程难以现实动态匹配。刘建航院士提出的“时空效应”理论揭示了基坑变形受时间与空间双重维度影响的本质。国内外诸多学者从基坑变形机理、工艺等方面进行研究探讨, 伺服支撑可对整个支撑体系进行动态受力调整, 能有效解决支撑轴力损失的问题。贾坚等采用数值软件模拟, 以确定自动补偿的控制阈值, 对伺服系统控制基坑变形提出了理论基础。

## 1 工程概况

### 1.1 工程背景

上海某基坑位于浦东地区, 工程整体设置四层地下室(局部设地下一层下沉式广场)。地下四层基坑面积约16400 m<sup>2</sup>, 周长约600m, 裙楼开挖深度22.95m~24.7m, 塔楼开挖深度24.05m~24.95m。下沉式广场基坑面积约510m<sup>2</sup>, 基坑总延米约195m, 基坑挖深11.9m。

主体基坑围护在北侧采用1200mm厚地下连续墙(两墙合一, 十字钢板接头), 其余侧采用1000mm厚地下连续墙(两墙合一, 十字钢板接头), 基坑中部设800mm厚地下连续墙(地中壁, 随挖随凿), 坑内沿竖向设五道钢筋混凝土支撑明挖顺作(基坑北侧第二~五道支撑采用支撑轴力伺服系统)。在地下连续墙外侧增设TRD等厚度水泥土搅拌墙, TRD深度67m, 进入⑧层不小于3m。详细参

考见表1、图1。

表1 基坑分区参数一览表

区段	净长度/m	净宽度/m	开挖深度/m	地墙深度/m
主基坑	243	59	23.05~25.05	43/46
下沉式广场 基坑	89	5~12	11.90	25

主基坑第二道支撑截面1.1m×0.9m, 第三/五道支撑截面1.2m×0.9m, 第四道支撑截面1.3m×1.0m。

### 1.2 周围环境

基坑北侧分布有轨道交通16号线高架线路(桩长45m~47m)、磁悬浮线路(桩长35m)以及轨道交通2号线地下结构, 距离基坑变形最近出分别为27m, 84m及165m。基坑南侧为在建地块, 基坑深度22m~26.5m, 地下室外墙距离该工程最近69m。其它侧均为规划道路或空地, 周边环境较为简单。参考见图1。

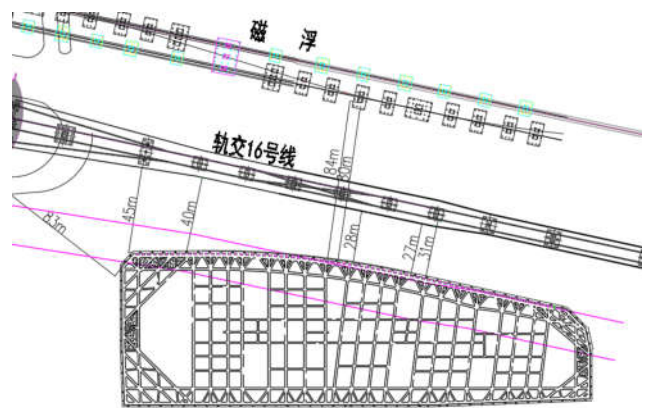


图1 基坑周边环境平面示意图

### 1.3 工程地质与水文地质

场地在勘察深度范围内揭露的地基土为第四纪全新世Q43~晚更新世Q32的沉积层, 属于古河道沉积区域, 主要由填土、淤泥质土、粘性土、粉性土、砂土及粉砂

组成。根据地基土沉积年代、成因类型及物理力学性质差异，建场范围内土层划分为7个主要层次及分属不同层次的亚层及次亚层。场地杂填土最厚达3.6m，基坑坑底主要位于⑤层灰色粘土层。

场地深部⑦层、⑨层为承压含水层，其中⑦层与⑨层存在水力联系，主基坑普遍区域存在⑦层承压水突涌

风险，无⑨层承压水突涌风险。

1.4 开挖工序与伺服混凝土支撑加载顺序

基坑共分9个区进行开挖施工，北侧第二~五道支撑采用支撑轴力伺服系统，分为A、B、C、D、E、F、G、H、I、J、⑨共9个区域顺序加载。参考见图2。

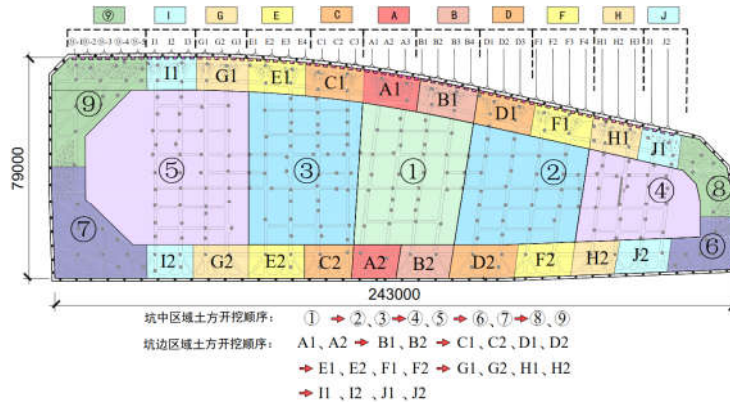


图2 基坑开挖及加载顺序平面示意图

2 伺服控制与监测数据分析

2.1 地下连续墙体深层水平位移（测斜）

软土地区基坑变形的核心趋势是变形大、速率快、持续时间长，这主要是由淤泥质粘土的高压缩性、低强度和流变性导致，受到开挖、降水等扰动的影响进一步会加剧这一趋势。开挖过程中围护结构深层水平位移（测斜）的核心趋势是开挖过程中位移持续增大，最大位移点随深度下移，且变形具有显著的空间不均匀性。

随着开挖加深，最大水平位移点会从基坑上部逐渐下移至开挖面附近。<sup>[1]</sup>

根据基坑形状及周边环境特点，针对基坑长边测斜孔的统计分析（阳角、短边区域不纳入统计范围）。基坑南侧地下连续墙选取①区、④区、⑤区功3个典型测斜孔。北侧选取①区、②区、⑤区共3个典型测斜孔。具体测点位置可参见图3所示。

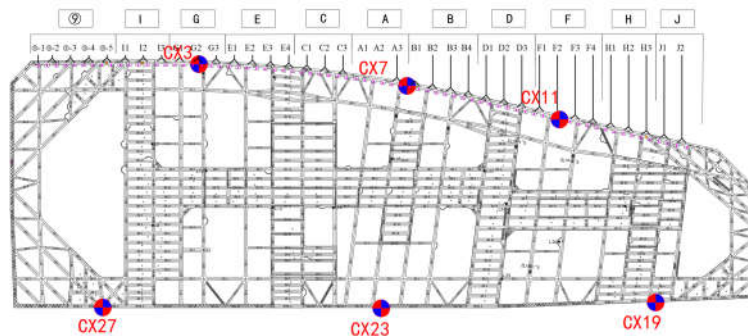


图3 围护墙体测斜和地表沉降测点设置示意图

下表2为基坑南侧地墙在开挖期间的典型深层水平位移数值。

表2 基坑南侧围护墙体测斜最大值一览表

测点编号	基坑宽度/m	开挖深度/m	围护墙深度/m	底板浇筑最大值mm/深度m	一道支撑拆除最大值mm/深度m
CX19 ④区	55	25.05	46	79.54/20.0	89.09/18.0

续表：

测点编号	基坑宽度/m	开挖深度/m	围护墙深度/m	底板浇筑最大值mm/深度m	一道支撑拆除最大值mm/深度m
CX23 ①区	74	25.05	46	48.43/22.5	64.77/18.0
CX27 ⑤区	81	25.05	46	72.78/21.5	80.83/20.5

上表监测结果显示，最终变形最大点出现在基坑底部，基本符合软土地质变形规律。在第五层土方开挖至底板浇筑完成阶段，各测斜孔变形出现明显的增大

趋势，至基坑底板浇筑完成达3.97%*c*H(H为基坑开挖深度)。基坑底板浇筑完成后至支撑全部拆除完成，增量达27.75mm，深度12.5m。

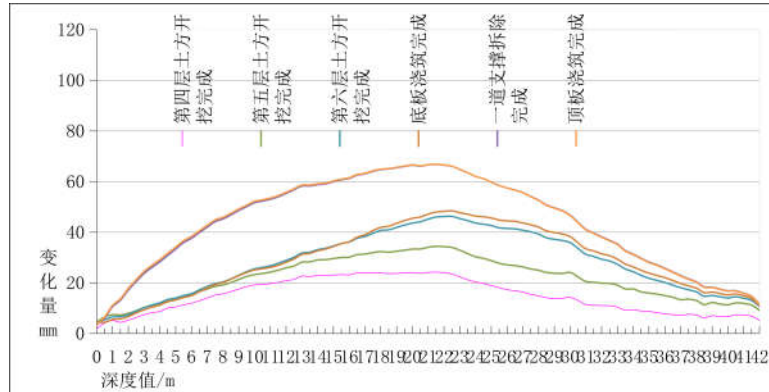


图4 基坑南侧围护墙体深层侧向水平位移变化曲线示意图

从上图4可以看出，设置在基坑北侧的伺服系统并未对基坑南侧地墙变形起到明显的抑制作用。开挖阶段，最大位移点呈现出随基坑开挖深度增加逐渐下移的变形规律；支撑拆除期间，随着拆除位置逐渐上移，变形趋势也同步上移。分析可能原因：①基坑宽度较宽因素，超长支撑实际有效的荷载轴力传递不足；②考虑到基坑的空间效应及支撑的三维空间位置因素，无法准确的将轴力进行传递；③混凝土支撑浇筑后强度达设计强度的80%以上后即进行开挖，混凝土强度和刚度存在“时间差”，轴力传递不均。

下表3为基坑北侧地墙伺服混凝土支撑侧在开挖期间的典型深层水平位移数值。

表3 基坑北侧围护墙体测斜最大值一览表

测点编号	基坑宽度/m	开挖深度/m	围护墙深度/m	底板浇筑最大值mm/深度m	一道支撑拆除最大值mm/深度m
CX3/⑤区	55	25.05	46	53.48/24.5	56.77/24.0
CX7/①区	74	25.05	46	49.60/26.0	52.42/24.0
CX11/②区	63	25.05	46	46.27/25.5	51.27/25.5

从上表3的监测数据可以看出，累计最大点出现在基坑底部，符合软土地质的变形规律。各监测孔累计最大点变形值明显小于基坑南侧围护墙的变形值。由于受到伺服系统的约束，基坑底板浇筑后至支撑拆除完成，增量最大值为5mm，明显小于南侧值。

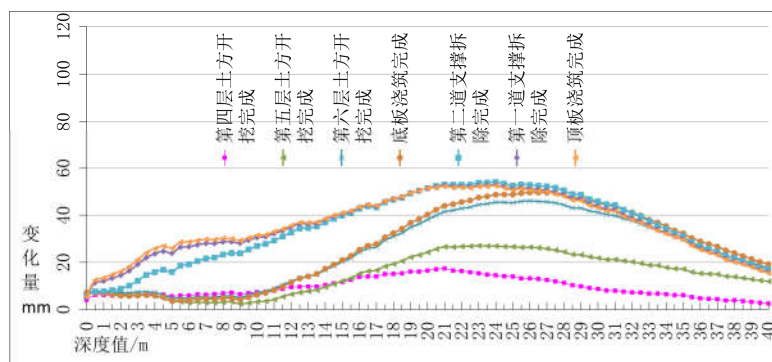


图5 基坑北侧围护墙体深层侧向水平位移变化曲线示意图

从上图5可以看出，设置在北侧的伺服混凝土支撑对抑制基坑北侧地墙变形起到了非常明显的约束作用。至第四层土方开挖完成（约15m），其变形量为南侧地墙的50%。第五、六层土方开挖至底板浇筑完成，变形量呈明显增大趋势，原因是支撑拆除过程中，随着混凝土伺服

系统的卸载，部分应力得到释放，导致拆除深度区域的变形有所增大。<sup>[2]</sup>

伺服系统采用每级50t进行加载，每级加载完成后根据测斜变化量确定保压值。第二道支撑保压值200t，极限值350t。保压值计划分四级加载，第一级至50t、第二级

至100t、第二级至150t、第三级至200t，分别对应C15、C20、C25、C30强度。保压值锁定后：开挖期间当支撑位置单日测斜变形超过2mm或累计变形达到设计报警值（也是目标控制值）70%时，加力值根据变形数据以50t一档逐级增加，并根据变形数据稳定情况再继续加载。<sup>[3]</sup>

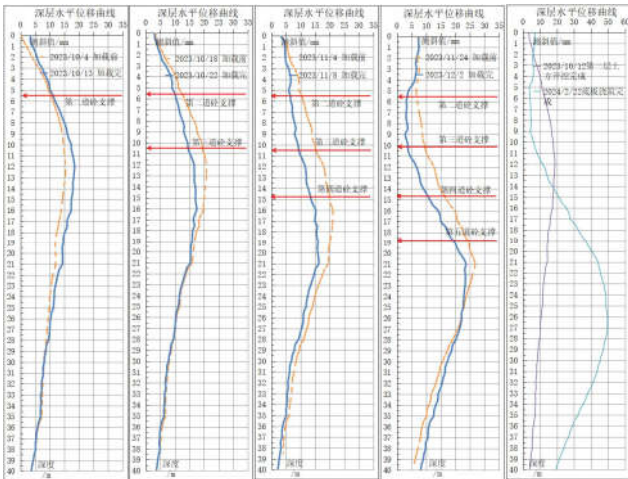


图6 伺服回顶围护墙体深层侧向水平位移变化曲线示意图

从上图6可以看出，第二道混凝土支撑在伺服加载作用下，最大回顶位移发生在支撑位置（深度约5.5m）；在该支撑点上下约5m范围内，回顶位移呈现递减趋势。第三道混凝土支撑在伺服加载后，最大回顶位移同样出现在支撑位置（深度约10.5m）；在该支撑点上下约10m范围内，回顶位移同样呈现递减趋势。第四道混凝土支撑在伺服加载后，最大回顶位移出现在支撑位置（深度约15m）；在该支撑点上下约10m范围内，回顶位移呈现递减趋势。第五道混凝土支撑在伺服加载后，最大回顶位移出现在第三道支撑位置下方（深度约12m）；在该最大回顶位移点上下约10m范围内，回顶位移呈现递减趋势。<sup>[4]</sup>

结果表明，基坑在完成第二道混凝土支撑时，深层水平位移（测斜）曲线呈现出“弯弓弧线”的形态。随着下方混凝土支撑的依次完成并进行伺服加载，深层水平位移（测斜）曲线转变为“S”型，显示出伺服系统加载具有显著效果。<sup>[5]</sup>

### 2.2 邻近轨道交通16号线高架线路变形

基坑开挖对北侧地铁高架结构的影响呈现时空特征。在开挖至第二道支撑（4m）深度时，变形量最大值为-4.11mm。当继续向下开挖至第二~五道支撑时，随着伺服荷载加载地墙变形明显收敛，北侧地铁高架墩柱呈现出一定的上抬趋势，至基坑底板施工结束，墩柱变形

反弹至-1mm以内。如下图7所示。

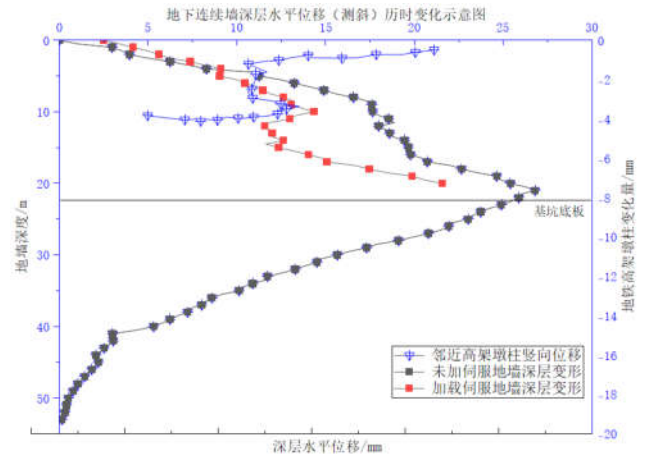


图7 伺服加载与邻近地铁墩柱变形对比

### 结论

本工程通过在上海某深基坑中应用伺服混凝土支撑系统，有效控制了基坑北侧地墙变形及邻近轨道交通16号线高架线路的变形。

监测数据表明，基坑开挖过程中，伺服加载后地下连续墙变形明显收敛，地铁墩柱从下沉趋势转变为抬趋势，最终变形控制在-1mm以内，显著优于常规支撑方案。针对软土地区基坑变形大、速率快的特点，伺服系统通过实时调节支撑轴力，成功抑制了围护结构深层水平位移的发展，最大变形控制在3.97% $\sigma$ H以内。该工程实践验证了基坑开挖过程中伺服混凝土支撑技术在敏感区域深基坑变形控制中的有效性，为类似复杂环境下基坑工程提供了可借鉴的技术经验。

### 参考文献

- [1]李俊奇,吴德良,戴加东,周本辰,孙汉清.伺服钢支撑对深基坑变形控制监测分析[J].低温建筑技术,2025,47(6):101-104.
- [2]王立虎.混凝土支撑轴力伺服控制技术在深基坑中的应用[J].低碳世界,2025,15(3):100-102.
- [3]许花.钢筋混凝土支撑预应力伺服系统在软土地区深大基坑中的应用研究[J].建筑施工,2025,47(2):300-304.
- [4]孙汉清,卢景义,陈卫南,许宁,毛千明,邱晓焯.基于混凝土支撑轴力伺服技术的深基坑开挖数值模拟与监测分析[J].土木工程,2024,13(8):1364-1379.
- [5]徐铭泽.混凝土伺服支撑系统在近铁深基坑中的应用[J].建设监理,2025(8):132-136+142.