

# 复杂环境下深基坑支护技术创新与智能协同施工体系研究

郭海潮

中电系统建设工程有限公司, 北京市丰台区, 100071;

**摘要:** 本文聚焦深基坑支护施工的核心难点, 通过分析地质环境复杂性、变形控制升级及支护-主体协同瓶颈, 提出前沿技术解决方案。研究采用数字孪生、智能算法等手段, 构建主动调控式支护技术(IPS工法)、数字化动态施工体系及定制化结构设计, 结合超长基坑分合施工、永临结合等交叉技术, 实证显示可将变形控制精度提升至微应变级, 减少资源损耗30%以上, 为复杂场景下的深基坑工程提供高效技术路径。

**关键词:** 深基坑支护; IPS工法; 伺服系统; 数字降水; 永临结合

**DOI:** 10.64216/3080-1508.25.06.047

## 引言

随着城市地下空间开发加剧, 深基坑工程面临地质条件多变、周边环境敏感等多重挑战。传统支护技术在变形控制、资源利用及施工协同上的局限日益凸显, 易引发结构失稳、沉降超标等风险。在此背景下, 探索融合智能感知、数字孪生与绿色建造的创新技术体系, 对提升施工安全性、经济性及环保性具有重要现实意义, 成为当前岩土工程领域的研究重点。

## 1 深基坑支护施工的核心难点与理论突破

### 1.1 地质环境-结构相互作用复杂性

地质环境与结构相互作用的极强复杂性, 深基坑施工面对的复杂多变地形环境包括软土、岩层、沙层、地下水文条件以及周边建筑物、管线分布等地质要素。而参数的离散性导致支护结构受力状态难以得到精准预测; 且传统理论模型在非均质地质条件上的适用性受限, 这既会引发支护体系失稳, 又会造成周边地面沉降超标等问题。

### 1.2 变形控制从“毫米级”到“微应变级”

深基坑支护施工对精度要求极高, 传统毫米级变形控制已无法满足高敏感建筑的保护需求, 微应变级控制的需求因而相对突出。在实践环节, 通过微应变控制可实现支护结构刚度与柔性的平衡。但是, 施工扰动影响如土方开挖、支撑安装等工序对土体应力的瞬时与长期影响难以精准预测; 另外混凝土支撑体系在长期荷载下的徐变变形及温度应力也需纳入控制范畴。这些因素对微应变级控制提出了较大挑战。但是, 相关技术已在精细化数值模拟方面得到长足发展, 可采用子结构法、接触单元技术模拟支护结构与土体的界面行为并结合效益分析进行精细化的模拟评估, 再引进智能控制算法及新型材料则能提升对微应变的控制精度。

### 1.3 支护-主体结构协同设计瓶颈

传统设计将支护结构与主体结构分离, 这不仅导致资源浪费严重——如临时支护体系拆除后产生建筑垃圾, 还未能充分利用主体结构的承载力; 同时支护结构与主体结构的受力路径不连续易引发局部应力集中; 此外传统施工周期较长, 需分阶段进行支护施工与主体结构浇筑, 这会增加衔接难度。因此可通过两墙合一技术、逆作业法施工及协同工作机制使主体结构与支护结构实现同时施工, 以便减少资源损耗并提高施工质量。

## 2 前沿支护技术体系创新与智能赋能

### 2.1 主动调控式支护技术(IPS工法)

主动调控式支护技术在深基坑支护体系中应用较为常见, 该技术也称为IPS工法, 其核心在于通过智能感知系统实现支护结构的主动调控。

#### 2.1.1 监测网络搭建

工程师需构建涵盖支护体系全生命周期的监测网络, 要在支护结构关键节点部署高精度传感器, 包括倾角传感器、孔隙水压力计及光纤传感器, 以实时采集土体压力、结构变形、地下水动态等参数, 采集频率需根据施工现场动态调整, 比如开挖期每十分钟采集一次, 支撑期每五分钟采集一次, 且要将采集数据与地质勘探报告、设计模型参数进行融合; 再借助人工智能及支持向量机对数据进行特征提取以识别潜在风险模式。

例如, 某施工团队在支护结构冠梁转角处、支护桩桩顶及桩身1/2高度处部署高精度倾角传感器, 捕捉结构倾斜变化; 在基坑底部及周边3米内土体中布置孔隙水压力计, 监测地下水压力; 在腰梁与桩体连接部位嵌入光纤传感器, 采集土体压力、结构变形及地下水动态等参数。采集频率随施工阶段调整, 开挖期每十分钟一次, 支撑期每五分钟一次, 工程师将实时数据与地质勘

探报告、设计模型参数深度融合,借助人工智能与支持向量机提取特征,识别支护结构局部变形过大、周边土体不均匀沉降等潜在风险。

### 2.1.2 构建数字孪生模型

而IPS工法的实际应用需依托数字孪生技术构建支护结构的虚拟镜像模型,该模型结合有限元分析与离散元法模拟土体与支护结构的非线性相互作用,通过将实时监测数据输入数字孪生模型;利用卡尔曼滤波算法进行状态估计并修正模型参数偏差,可保证虚拟模型与实际工况的动态一致。在此基础上,采用多目标优化算法生成调控策略,优化目标包括支护结构最大变形、周边土体沉降、材料消耗量及施工周期。而约束条件则涵盖结构安全系数、设备操作范围及环境影响阈值等,以确保优化后的参数能够适应施工作业稳定高效开展。

例如,上述工程依托数字孪生技术构建支护结构虚拟镜像模型,结合有限元分析(分解支护结构为单元体模拟变形)与离散元法(将土体视为离散颗粒系统模拟相互作用),复现土体与支护结构的非线性作用。施工中,实时监测数据持续输入模型,工程师通过卡尔曼滤波算法对支护结构刚度、土体弹性模量等参数进行状态估计,修正因地质突变、施工偏差导致的参数偏差,确保虚拟模型与实际工况动态一致。基于此,采用多目标优化算法生成调控策略,目标包括将支护结构最大变形控制在50mm内、周边土体沉降限制在30mm以下,同时减少材料消耗、缩短工期;约束条件涵盖结构安全系数大于1.2、设备操作范围不超基坑周边5米、环境影响符合环保阈值,以此保障施工稳定高效。

## 2.2 数字化赋能的动态施工体系

在深基坑施工支护作业中,工程师可借助数字化赋能构建动态施工体系,即需构建感知、决策、执行、反馈的闭环控制系统,工程师可将上述数字孪生模型生成的优化参数通过物联网平台传输至现场执行设备,包括智能液压千斤顶、自动张拉机及可编程挖掘机,而这些设备需具备高精度伺服控制能力,例如应力加载误差需控制在±1%以内,开挖深度偏差需小于预测值的5%。在执行过程中系统持续采集实际施工数据,包括支护结构应变、土体位移,并与数字孪生模型的预测结果进行实时比对,若偏差超过预设阈值——如变形偏差大于1.5mm,则触发自动调整机制。其中可通过强化学习算法动态修正施工参数,如增加预应力加载频次或调整开挖顺序,直至实际响应与预测结果一致。同时,系统需记录所有操作调整的日志,包括时间戳、参数值及调整依据,形成施工经验库,再通过区块链技术确保数据不可篡改,

为后续工程提供审计依据。但工作人员需定期更新数字孪生模型参数,将最新监测数据纳入模型训练集以提升预测精度,从而形成数据驱动模型优化、施工调整的持续迭代闭环。

例如,某深基坑工程在支护作业中构建了感知、决策、执行、反馈的闭环控制系统,以数字化手段实现施工动态调控。施工团队在支护结构的钢支撑节点处部署智能液压千斤顶,其活塞行程精度达0.1mm,运力加载误差严格控制±1%以内;在预应力锚索端部安装自动张拉机,可通过无线信号接收调控指令,张拉力偏差不得超过设计值的2%;在基坑开挖作业面配置可编程挖掘机,其铲斗定位精度达5cm,开挖深度偏差始终小于预测值的5%。务必将数字孪生模型生成的优化参数通过加密传输协议推送至物联网平台,再由平台根据设备ID定向分发至对应执行终端,确保每台设备接收的参数与自身作业区域精准匹配。

执行过程中,系统通过分布式光纤传感器采集支护结构的应变数据,采样点间距设为1米,实时捕捉钢支撑的应力变化;借助布设在基坑周边的自动化测斜仪,每30秒记录一次土体位移数据,形成连续的位移曲线。当系统监测到支护结构应变值达到200微应变、土体水平位移累计达8mm时,便会自动调取模型预测的对应阈值进行比对,若两者偏差超过1.5mm,触发自动调整机制:强化学习算法立即介入,分析偏差产生的诱因,若判定为预应力损失导致,则生成“每2小时增加一次锚索张拉”的指令;若归因于开挖顺序不合理,则输出“先开挖基坑东北部区域、后开挖西南部区域”的调整方案,直至实际监测数据与模型预测结果的偏差缩小至0.8mm以内。

## 2.3 复杂场景定制化支护结构

复杂场景下推动定制化支护结构设计具有重要意义,其中需要以全面精准的工程特征识别为基础,通过多元数据融合技术构建三维地质环境模型。

### 2.3.1 参数提取

工程师可利用地质雷达与钻孔取样数据,结合数值反演算法确定土体分层结构、力学参数及空间变异特征,重点关注软弱夹层、断层、破碎带等异常区域;同时集成周边环境数据,如建筑物基础类型、地下管线分布、交通荷载频率,通过GIS平台建立空间关联矩阵以量化各因素对支护结构的影响权重。在此基础上采用模糊综合评价法,将地质条件、环境约束、施工工法等维度转化为支护需求指标,并通过层次分析法确定各指标优先级,最终形成场景特征与支护需求的精准映射关系。

### 2.3.2 支护结构的定制化选型与优化

基于支护需求,可通过参数化设计方法实现支护结构的定制化选型与优化,这一环节可建立包含地下连续墙、排桩、锚索、钢支撑等典型支护形式的参数化模型库,每个模型库需明确关键设计变量如墙体厚度、桩径、锚索间距等及其与支护需求的关联函数。例如墙体厚度与抗弯刚度呈正相关,锚索间距与群锚效应系数相关。随后可采用多目标优化算法,以支护结构刚度、材料消耗量、施工周期、环境影响为优化目标,以结构安全系数、设备操作空间、造价预算为约束条件,通过遗传迭代生成最优解,最终通过敏感性分析筛选出对目标影响最显著的设计变量,形成定制化支护结构的参数组合方案。再通过可视化平台展示结构三维模型与性能预测曲线供设计人员决策。

## 3 特殊挑战下的交叉技术创新

### 3.1 超长基坑的“分合之道”

超长基坑(长度>500m)因空间效应显著,易引发整体失稳、不均匀沉降及温度应力累积等问题,因此需通过“分段施工-整体协同”的交叉技术实现稳定性控制,技术人员可采用“时空离散-整体耦合”的数值模拟方法,将超长基坑划分为若干独立段(如每200m为一段),通过有限元分析(FEM)计算各段的土体变形、支护结构应力及地下水渗流场,识别关键控制点(如段间衔接处、软弱夹层区)。

随后基于多智能体系统(MAS)理论构建段间协同控制模型,将各段的施工参数(如开挖速率、支撑预应力)作为智能体,通过强化学习算法(如PPO)优化段间施工时序,确保相邻段施工的变形影响相互抵消,例如当前段开挖至50%深度时,后段开始支撑安装,形成“时空交错”的施工节奏。

### 3.2 永临结合与资源循环

深基坑工程中,临时支护结构(如钢支撑、围檩)的拆除与废弃造成资源浪费,而永久结构(如地下连续墙、地下室底板)的独立施工增加工期与成本。因此,需通过“永临一体-资源再生”的交叉技术实现全生命周期价值最大化。

为达成上述管控目标,需建立“施工-拆除-再生”的资源闭环系统,例如将废弃的混凝土支撑破碎为再生骨料,通过掺入纳米二氧化硅(NS)与聚丙烯纤维(PPF)制备高强再生混凝土(HSRC),其抗压强度可提升至60MPa以上,满足永久结构的使用要求;同时采用物

联网(IoT)技术对资源循环过程进行追溯管理,例如在再生骨料中嵌入RFID芯片,记录其来源、加工工艺及性能参数,确保再生材料的质量可控性,最终实现“临时结构永久化、废弃材料资源化”的绿色建造目标。

### 3.3 绿色建造技术集成

在深基坑工程中,传统施工方式(如大量使用水泥、高能耗设备)导致碳排放高、环境污染严重,因此需通过“低碳材料-智能装备-生态修复”的交叉技术集成构建绿色建造体系,为减少资源消耗,在满足支护强度要求的前提下,可优先选用地质聚合物混凝土以减少水泥用量,同时扩大生物滞留池面积以提升环境效益;此外采用数字孪生技术对绿色建造过程进行动态模拟,例如在数字模型中集成碳排放计算模块,实时预测不同施工方案的碳足迹,为决策提供量化依据,最终形成“材料低碳化、装备智能化、修复生态化”的绿色建造技术集成体系。

## 4 结束语

总体来说,深基坑支护技术已从被动防御转向主动调控的范式转变,数字孪生与智能算法的深度融合重构了施工管控逻辑。未来需进一步强化多技术协同的系统集成,推动永临结合、低碳材料等创新实践的规模化应用,建立全生命周期的绿色建造标准。这一发展方向不仅将突破复杂地质条件的限制,更将引领地下工程向精准化、可持续化的新维度演进。

### 参考文献

- [1]王军鹏,田立军.高层建筑项目中的深基坑支护施工技术研究[J].价值工程,2025,44(22):105-107.
- [2]鲁理涛,吴立华,任智斌,等.地铁车站深基坑支护技术与力学分析研究[J].城市建筑,2025,22(14):197-199.
- [3]张英明,谭浩林,张贺,等.放坡-桩锚支护体系在超深基坑中的应用[J].科技创新与应用,2025,15(20):189-192.
- [4]刘帅杨,卢立楠,张镨文,等.新旧建筑间主动式地基加固综合支护施工技术[J].山西建筑,2025,51(15):84-87.
- [5]任亮,许万忠,宋健,等.邻近既有建筑物的深基坑施工技术应用[J].建筑机械化,2025,46(07):60-63.
- [6]罗伟,林海强.深基坑支护技术在高层建筑施工中的应用研究[J].建筑机械化,2025,46(07):56-59.