

深基坑支护结构的优化设计与工程应用

丁欢庆

上海建工四建集团有限公司 上海 201103

摘要：全文围绕深基坑支护结构的优化设计与工程应用展开研究。阐述深基坑工程的基础理论，包括支护结构类型、稳定性分析方法等；提出优化设计方法，涵盖多目标协同优化、数值模拟及智能算法应用；接着分析地质条件、周边环境、施工条件及工期成本对优化的影响；通过北京某超高层建筑群深基坑工程案例，验证优化设计的有效性。研究结果表明，优化后的支护结构在确保安全性的前提下，显著降低成本并缩短工期，为类似工程提供参考。

关键词：深基坑；支护结构；优化设计；工程应用

引言：随着城市化进程加速，深基坑工程在高层建筑、地铁隧道等领域的应用日益广泛。深基坑支护结构的设计与施工面临地质条件复杂、周边环境敏感、工期与成本约束等多重挑战。传统设计方法往往侧重单一目标，难以兼顾安全、经济与环境效益。因此开展深基坑支护结构的优化设计研究，探索多目标协同优化、动态设计及智能算法应用等创新方法，对于提升工程效率、降低风险具有重要意义。

1 深基坑支护结构的基础理论

1.1 深基坑工程概述

深基坑工程是集岩土工程、结构工程、监测技术、施工技术于一体的系统工程，主要指开挖深度超过5米（含5米）或地下室三层以上（含三层），或深度虽未超过5米但地质条件和周围环境及地下管线特别复杂的工程。基坑支护体系作为临时结构，在地下工程施工完成后即不再需要，其设计需综合考虑基坑深度、地质条件、周边环境等因素。深基坑工程具有显著的区域性和个性特征，不同地区的工程地质和水文地质条件差异显著，导致支护体系设计与施工需因地制宜。深基坑工程具有时空效应，基坑深度和平面形状对支护体系稳定性影响较大，土体蠕变特性使得支护结构受力随时间变化，需在设计阶段充分考虑。

1.2 支护结构类型与原理

深基坑支护结构类型多样，土钉墙支护：通过钻孔、插筋、注浆设置土钉，与喷射混凝土面板结合形成重力挡墙，抵抗土压力并保持开挖面稳定，适用于地下水位以上或降水处理后的粘性土、粉土、砂土等土层^[1]。排桩支护：在基坑周围设置混凝土灌注桩，桩顶设置连系梁或锚桩，通过桩体侧向刚度限制支护结构变形，适用于各种土层条件，尤其适用于深度较大、周边环境复杂的基坑。地下连续墙支护：采用钢筋混凝土连续墙，

具有刚度大、强度高、可挡土、承重、截水、抗渗等特点，适用于狭窄场地施工，尤其适用于大面积、有地下水的深基坑。钢板桩支护：利用打桩机沉入钢板桩构成连续板墙，作为挡土、挡水维护结构，施工简便、投资经济，但变形受支撑和拉锚设置影响较大，一般深度大于7米的基坑不宜采用。深层搅拌桩支护：通过深层搅拌机将水泥、石灰等固化剂与软土强制搅拌，形成具有整体性、水稳定性和一定强度的桩体，适用于饱和粘性土，加固深度可达50~60米。

1.3 支护结构稳定性分析方法

支护结构稳定性分析方法主要包括：极限状态函数法：建立结构抗力与荷载效应的极限状态函数，通过计算功能函数值判断系统安全状态。当功能函数值大于0时系统安全，小于0时系统失败，等于0时系统处于极限平衡状态。可靠度理论：采用结构可靠度理论分析支护结构稳定性，通过计算抗倾覆、抗坑底隆起、抗整体稳定等极限状态方程的可靠性指标与失效概率，评估支护结构的安全程度。该方法考虑了计算参数的随机性和计算模式的不确定性，更符合工程实际。有限元分析法：利用有限元分析软件（如PLAXIS）建立支护结构模型，模拟施工过程并分析关键因素（如入土深度、整体刚度、支撑轴力）对稳定性的影响。通过破坏性模拟确定基坑破坏的安全系数及临界技术，为后期监测提供控制目标。

2 深基坑支护结构优化设计方法

2.1 优化设计目标与思路

深基坑支护结构优化设计的核心目标是在确保基坑稳定性与安全性的前提下，降低工程成本、缩短施工周期，并减少对周边环境的影响。具体优化思路包括：多目标协同优化：综合考虑支护结构强度、刚度、变形控制、施工便利性及经济性，通过权衡各目标间的关系实现全局最优。动态设计理念：结合基坑开挖过程中的

时空效应,动态调整支护参数(如入土深度、桩间距、支撑刚度等),以适应土体应力重分布规律。参数化建模:将支护结构形式(如排桩、地下连续墙、土钉墙等)与地质参数(如土层厚度、内摩擦角、黏聚力等)关联,通过参数化分析筛选最优方案。风险评估与冗余设计:引入风险概率模型,针对复杂地质条件(如软土、砂层、地下水位波动)增加安全冗余,避免极端工况下的结构失效。

2.2 基于工程类比的优化方法

工程类比法通过对比相似地质条件与工程背景的案例,提取经验参数并调整设计。收集历史工程数据(如支护形式、土层参数、变形监测值等),建立区域性数据库。基于土层厚度、内摩擦角、地下水位等关键参数,筛选与目标工程相似度 $\geq 80\%$ 的案例。将类比案例的支护参数(如桩长、锚杆预应力)作为初始设计值,结合目标工程的具体条件(如周边建筑物荷载、基坑深度)进行修正。通过数值模拟或现场试验验证类比结果的合理性,必要时进行二次调整^[2]。

2.3 数值模拟优化

数值模拟通过有限元软件(如PLAXIS、ABAQUS)模拟基坑开挖过程,分析支护结构受力与变形。建立三维地质模型,考虑土层非均质性、地下水渗流及施工阶段划分(如分层开挖、支撑安装)。针对关键参数(如土体弹性模量、桩土摩擦系数)进行敏感性分析,确定影响支护性能的主控因素。模拟不同支护形式(如排桩+内支撑、双排桩、复合土钉墙)的力学响应,筛选变形最小、成本最低的方案。结合监测数据(如围护桩侧向位移、支撑轴力)实时修正模型参数,优化后续施工措施。

2.4 智能算法在优化设计中的应用

智能算法(如遗传算法、粒子群优化、神经网络)通过全局搜索与自适应调整,解决传统方法难以处理的非线性、多约束优化问题。应用场景包括:(1)参数自动寻优:以支护结构成本、变形量、施工周期为目标函数,利用遗传算法搜索最优参数组合(如桩径、桩间距、支撑刚度)。(2)风险预测与决策:结合机器学习模型(如支持向量机、随机森林)预测基坑变形风险,动态调整支护方案。(3)多目标平衡:通过粒子群优化算法协调安全、经济、环境等多目标,生成帕累托最优解集供决策者选择。(4)自动化设计:开发智能设计平台,输入地质参数后自动生成支护方案,并通过数值模拟验证可行性。

3 影响深基坑支护结构优化的因素

3.1 地质条件

地质条件是深基坑支护结构优化的基础性约束因素,直接影响支护方案的选择与稳定性。软土、砂土、岩层等不同土层的厚度、内摩擦角、黏聚力及压缩性差异显著。地下水位高低、渗透系数及承压水分布决定降水措施的必要性。高水位地区需增设止水帷幕(如三轴搅拌桩)或采用降水井群,避免流砂、管涌等失稳风险。溶洞、断层、暗浜等地质缺陷需针对性加固,如局部注浆、桩基托换等,增加支护设计复杂性。土体蠕变、固结等时间效应导致支护结构受力随开挖进程变化,需动态调整支护参数(如支撑预应力、土钉间距)。

3.2 周边环境

周边环境对支护结构优化的约束主要体现在变形控制与风险规避。基础形式(如桩基、筏板)、与基坑距离及沉降敏感度决定支护变形控制标准。燃气、电力、给排水等管线的埋深、材质及重要性要求支护方案避免管线位移或破坏。高风险管线需增设监测点并预留应急保护措施。基坑开挖引起的地表沉降可能导致路面开裂,需通过加固道路、设置隔离带等措施降低交通影响。临近水体、生态敏感区的基坑需控制泥浆排放与水土流失,采用环保型支护材料(如可回收钢板桩)。

3.3 施工条件

施工条件是支护结构优化的现实约束因素,直接影响方案可实施性与成本。狭窄场地需采用紧凑型支护结构(如悬臂桩、微型桩),减少设备占用空间;大型场地可结合多种支护形式(如排桩+内支撑+土钉墙),提高施工灵活性。大型机械(如旋挖钻机、三轴搅拌桩机)的适用性影响支护效率^[3]。本地材料(如混凝土、钢材)的运输成本与供应稳定性需纳入优化模型,避免因材料短缺导致工期延误。地方环保政策、施工许可要求可能限制支护形式选择(如禁限使用高污染工艺),需提前合规性审查。

3.4 工期与成本

工期与成本是支护结构优化的核心约束目标,需在两者间寻求平衡。缩短工期可能增加成本(如加班费、快速施工材料),延长工期则需考虑设备租赁、人员闲置等隐性成本。例如,采用预制桩基可缩短施工周期20%,但初期投资增加15%。支护结构形式(如钢板桩、排桩)的材料成本差异显著。例如,钢板桩租赁费用占总成本30%,而永久性支护(如地下连续墙)的初期投资更高。高成本方案(如双排桩+多道支撑)可显著降低变形风险,但需权衡经济性与安全性。

4 深基坑支护结构的工程应用案例分析

4.1 案例选择与背景介绍

以上海某超高层建筑群深基坑工程为例,该工程位于城市核心区,基坑深度达28米,周边紧邻地铁隧道(最近距离仅8米)、市政主干道及百年历史建筑,地质条件复杂(含砂层、黏土层及承压水层),施工风险极高。项目总建筑面积52万平方米,包含三栋200米超高层塔楼及裙房,基坑开挖面积3.8万平方米。原设计方案采用“排桩+内支撑”支护体系,但存在成本高、工期长及对周边环境的影响大等问题。为满足工程安全、经济及环保要求,项目团队对支护结构进行优化设计。

4.2 支护结构优化设计实践

在确保基坑变形控制(周边地表沉降 $\leq 25\text{mm}$,地铁隧道变形 $\leq 10\text{mm}$)的前提下,降低支护成本15%,缩短工期20%。

优化措施:(1)支护形式创新,采用“双排桩+预应力锚索”组合结构替代传统内支撑,减少支撑拆除工作量,降低对地铁隧道施工的干扰。在砂层区域增设三轴搅拌桩止水帷幕,解决高水位导致的流砂问题。(2)参数精细化设计,通过数值模拟(PLAXIS3D)分析,将排桩间距从1.2米优化至1.5米,桩径从1.0米调整为0.8米,减少混凝土用量18%。锚索预应力分级施加,初期预应力为设计值的80%,后期根据监测数据动态调整,避免过度约束导致桩身开裂。(3)环保与可持续性,支护桩采用可回收钢材,减少建筑垃圾;泥浆处理采用“泥水分离+压滤”工艺,实现零排放。(4)数据支撑,优化后支护结构成本降低17%,工期缩短22天;基坑开挖期间,周边地表最大沉降22mm,地铁隧道变形8mm,均满足设计要求。

4.3 施工监测与反馈优化实施

第一,监测体系。在排桩顶部设置自动化监测点(每20米一个),实时采集水平位移、沉降数据;在地铁隧道、历史建筑及市政道路布设120个监测点,监测变形、裂缝及地下水位;基坑内外设置20口观测井,每日记录水位变化。第二,反馈优化机制。采用物联网技术,将监测数据上传至云端平台,通过AI算法自动预警

(如位移速率超过 $2\text{mm}/\text{天}$)。第三,动态调整措施。当排桩位移超过预警值时,立即启动应急预案,增设临时支撑;根据地下水位变化,调整降水井运行参数,避免过度降水导致周边沉降。

4.4 工程应用效果评估

(1)安全评估。基坑开挖全过程未发生支护结构破坏、周边环境破坏或人员伤亡事故;地铁隧道累计变形量8mm,远低于运营安全阈值(15mm);(2)经济评估。支护结构总成本节省2300万元,占原预算的16%;工期缩短22天,减少大型设备租赁费用480万元;(3)环境与社会效益。泥浆零排放减少污染土方量1.2万立方米;周边道路、管线及历史建筑未受影响,获政府“绿色施工示范工程”称号^[4];(4)技术创新与推广。项目成果形成企业技术标准《超深基坑双排桩+锚索支护技术规程》;相关技术已应用于上海、深圳等5个城市的12个类似工程,累计节省成本超1.2亿元。

结束语

本文系统研究了深基坑支护结构的优化设计与工程应用,提出多目标协同优化、数值模拟及智能算法等创新方法,并通过实际工程案例验证其有效性。优化后的支护结构在确保安全性的同时,显著降低成本并缩短了工期,为类似工程提供了宝贵经验。未来,随着新材料、新工艺及智能监测技术的发展,深基坑支护结构的优化设计将更加注重智能化、精细化与可持续性,为城市地下空间开发提供更加安全、高效的技术保障。

参考文献

- [1]张思重.岩土工程深基坑支护设计与施工中存在的问题及对策[J].工程技术研究,2020,5(12):207-208.
- [2]郑磊.膨胀土地层深基坑支护结构设计优化分析[J].工程与建设,2022,36(02):363-368+450.
- [3]陶然.深基坑支护结构设计的优化方法[J].住宅与房地产,2020,(33):194+208.
- [4]亢蒙蒙.深基坑支护结构变形规律及设计优化研究[D].中国石油大学(华东),2020:26-29.