

深基坑支护施工技术的选型与施工工艺优化

王沿娣

武汉市汉阳市政建设集团有限公司，湖北 武汉 430000

DOI:10.61369/UAID.2025040038

摘要：深基坑支护技术的科学选型与施工工艺优化是保障工程安全、控制成本、提升效率的核心环节，本文系统分析了放坡开挖、支挡式、重力式、土钉墙（复合土钉墙）及逆作法等常用支护技术的适用场景、优势与局限性，并通过综合对比明确不同工况下的优选方向；其次，围绕安全可靠、经济合理、施工可行等核心原则，阐述了定性选型（经验判断、专家咨询等）、定量选型（层次分析法、模糊综合评价等）及BIM辅助选型的具体方法，为多维度协同决策提供支撑；从施工准备阶段的数据精准化与方案精细化、关键工序的质量管控与效率提升、施工过程的信息化监测与动态调整三个层面，提出了针对性的工艺优化措施。研究成果可为深基坑工程的支护技术选型与施工实践提供科学参考，助力实现工程全周期安全、经济与环境效益的动态平衡。

关键词：深基坑支护；支护技术选型；施工工艺优化；支护结构

Selection of Deep Excavation Support Technologies and Optimization of Construction Processes

Wang Yandi

Wuhan Hanyang Municipal Construction Group Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430000

Abstract : The scientific selection and construction process optimization of deep foundation pit support technologies are core elements for ensuring project safety, controlling costs, and enhancing efficiency. This paper systematically analyzes the applicable scenarios, advantages, and limitations of common support techniques such as slope excavation, retaining structures, gravity walls, soil nail walls (composite soil nail walls), and top-down construction. Through comprehensive comparison, it clarifies the optimal direction for different working conditions. Second, centered on core principles of safety, economic rationality, and construction feasibility, it elaborates on specific methods for qualitative selection (empirical judgment, expert consultation, etc.), quantitative selection (Analytic Hierarchy Process, fuzzy comprehensive evaluation, etc.), and BIM-assisted selection, providing support for multidimensional collaborative decision-making. Third, targeted process optimization measures are proposed across three levels: data precision and plan refinement during construction preparation, quality control and efficiency enhancement for critical processes, and information-based monitoring and dynamic adjustments during construction. These findings offer scientific guidance for selecting support technologies and implementing construction practices in deep foundation pit projects, contributing to the dynamic balance of safety, economy, and environmental benefits throughout the project lifecycle.

Keywords : deep foundation pit support; support technology selection; construction process optimization; support structure

引言

随着我国城市化进程的快速推进，高层建筑、地下轨道交通、综合管廊等基础设施工程日益增多，深基坑作为地下工程施工的前置关键环节，其施工安全与质量直接决定整体工程的成败。深基坑工程往往面临地质条件复杂、场地空间受限、周边建（构）筑物密集、地下水影响显著等多重挑战，支护体系作为抵御土体压力、控制基坑变形、保护周边环境的核心保障，其技术选型的科学性与施工工艺的合理性成为工程管控的重中之重。当前深基坑支护技术呈现多元化发展态势，但不同支护类型的适用场景差异显著，若选型缺乏系统性论证，或施工工艺存在疏漏，易引发基坑坍塌、周边地面沉降、构筑物开裂等安全事故，造成重大经济损失与社会影响。本文立足工程实践需求，系统梳理常用支护技术的适用性特征，构建科学的选型决策体系，同时从施工全周期视角提出针对性的工艺优化措施，旨在为深基坑工程提供安全可靠、经济高效的技术解决方案，推动深基坑施工技术的规范化、精细化发展，为城市地下空间开发利用提供坚实技术支撑。

一、常用深基坑支护技术及其适用性分析

(一) 放坡开挖

深基坑支护施工技术复杂多样，涉及内容非常广泛，为了保证施工安全，必须在前期对施工地的土质情况进行详细勘测和分析^[1]。放坡开挖是通过放缓边坡，利用土体自身强度维持稳定，并辅以坡面防护和排水措施。其坡度设计需根据土质确定，坡面常用喷混凝土或土钉防护，并设置截排水系统^[2]。该技术仅适用于深度≤5m、土质均匀、地下水位低且场地开阔的工程，不适用于城市中心、软土及地下水丰富区域。其核心优势是施工速度快、成本低、无污染，但缺点是占地面积大、边坡变形也大，因此只适用于对变形要求不严的工程。

(二) 支挡式支护结构

支挡式支护结构通过桩、墙等刚性构件挡土，并辅以内支撑或拉锚限制变形，形成“挡-撑”协同受力体系。其常见形式包括钢板桩、灌注桩、地下连续墙等，适用于深度5~25m、场地狭小的城市中心工程。该技术支护刚度大、抗渗性好且地层适应性强，但成本较高、施工周期长，且拆除支撑时易对周边产生扰动。

(三) 重力式支护结构

重力式支护结构依靠自身重量和地基摩阻力平衡土压力，通过水泥土固结体实现挡土与止水一体化。适用于深度6~12m的软土地层，通过深层搅拌桩施工，并可加筋提升强度^[3]。其优势是施工无振动、低噪音、止水效果好且成本适中，但缺点是占地面积大、支护刚度较低，且抗倾覆能力依赖地基承载力。

(四) 土钉墙与复合土钉墙

土钉墙通过打入土钉并喷射混凝土面层来稳定边坡，复合土钉墙则增加微型桩或锚索以增强支护^[4]。该技术适用于特定土质且地下水位可控的基坑，施工需分层进行。其优势是施工便捷、工期短、成本低，但缺点是变形较大、对地下水敏感，且不适用于快速施工。

(五) 逆作法

逆作法利用地下结构自身作为支护，自上而下开挖、自下而上施工，实现支护与主体结构一体化^[5]。适用于深度大于10米、周边环境复杂、变形控制严格的城市中心工程。其优势是变形极小、可地上地下同步施工以缩短总工期，但技术要求高、施工组织复杂且造价也相对较高。

(六) 支护技术综合对比分析

五种基坑支护方法的选择需综合考量深度、地质、场地和成本，对于浅基坑（≤5m）和开阔场地，放坡开挖最经济快捷；在中等深度（5~15m）且成本敏感的较好土质中，土钉墙性价比高，但变形较大；针对软土富水地层的中浅基坑（6~12m），重力式支护能实现挡土止水一体化且扰动小；当面临狭小场地和复杂地质的中深基坑（5~25m）时，支挡式支护以其强大的适应性和刚度成为首选，但成本较高；而对于城市核心区变形要求严格的深基坑（>10m），逆作法凭借其极小的变形和可缩短总工期的优势成为最佳选择，尽管技术最复杂、造价也最高。

二、深基坑支护技术选型决策方法

(一) 选型基本原则

深基坑支护技术选型需以工程全周期安全与效益平衡为核心，遵循多维度协同原则。以安全可靠为首要准则，确保支护体系稳定并有效控制变形^[6]。在此基础上，需兼顾经济合理性，优化全周期成本，并评估施工可行性，确保技术方案与现场条件匹配。同时方案应满足环境友好性要求，减少施工扰动，并具备动态适应性，以应对地质变化等突发情况，实现工程全周期安全与效益的平衡。

(二) 定性选型方法

定性选型方法基于工程经验与直观分析，通过关键参数匹配筛选适配技术，适用于初步选型阶段或中小型简单工程^[7]。经验判断法是依据团队过往经验，根据深度、地质等核心参数快速筛选方案；专家咨询法是针对复杂疑难工程，组织多领域专家对方案的安全性、可行性进行论证；类比法则参考相似工程的实施效果，并结合本工程的具体差异进行调整优化。

(三) 定量选型方法

定量选型方法通过构建数学模型量化评价指标，减少主观判断误差，提升选型科学性，适用于中大型复杂工程或多方案对比场景^[8]。层次分析法（AHP）通过构建目标、准则、方案三层级结构，计算各指标权重并加权评分来排序方案；模糊综合评价法则针对“施工难度”等模糊指标，通过专家打分建立评判矩阵，量化其对选型的影响；多目标优化模型则将安全、经济、工期等设为目标函数，在约束条件下求解最优平衡方案。

(四) 基于BIM技术的辅助选型

基于BIM技术的辅助选型通过三维可视化与数据集成，实现支护方案的动态模拟与多维度分析，为决策提供直观数据支撑。融合地质勘察数据构建三维地质模型，清晰揭示地层状况；然后对候选方案进行可视化模拟，排查与周边设施的碰撞风险；再结合有限元软件，量化分析各方案在开挖过程中的应力与变形，评估安全性能；在平台上整合成本、工期等多维度指标进行可视化对比，辅助决策。此外，BIM还能结合现场监测数据动态更新模型，确保方案在施工全周期内的适用性。

三、深基坑支护施工工艺优化

(一) 施工准备阶段优化

施工准备阶段优化需围绕“数据精准化、方案精细化、资源集约化”核心目标，为后续施工奠定基础。数据精准化方面，需扩大并加密地质勘察，结合物探技术排查地下障碍物，并对复杂地层进行原位测试，若数据偏差过大则启动动态补勘^[9]。方案精细化方面，要根据勘察数据细化支护参数，为关键工序制定专项方案，并模拟极端工况制定应急预案。资源集约化方面，需动态匹配设备需求，严格管控主材进场与存储，并对特种作业人员进行专项培训考核，组建跨专业小组全程指导。

(二) 关键工序施工工艺优化

关键工序优化需聚焦“质量可控、效率提升、风险降低”，针对不同支护类型的核心工序制定专项优化措施。挡土结构施工优化中，灌注桩成孔优先采用旋挖钻配合膨润土泥浆护壁，根据

土层类型调整泥浆比重，成孔后采用超声波检测仪检测孔壁垂直度，不合格孔段立即进行二次修孔；混凝土浇筑采用导管法，控制导管埋深在2~6m范围，浇筑速度不低于0.5m/h，避免出现断桩、缩颈问题；地下连续墙施工优化槽段划分，将常规6m槽段调整为4~5m短槽段（软土地层），减少槽壁坍塌风险，槽段接头采用“工字钢+刷壁”组合工艺，刷壁次数不少于5次，直至刷壁器无泥屑残留，浇筑前注入1.5m厚封底混凝土，防止接头渗漏。支撑体系施工优化需严格遵循“随挖随撑”原则，基坑开挖至支撑标高后12h内完成支撑安装，内支撑安装前先调整支撑轴线偏差至 $\pm 5\text{mm}$ 以内，钢管支撑采用法兰连接时加装密封垫圈，混凝土支撑浇筑时设置测温点，控制内外温差 $\leq 25^\circ\text{C}$ ，避免温度裂缝；锚索施工采用“二次高压注浆”工艺，一次注浆压力0.3~0.5MPa（初凝前完成），二次注浆压力1.5~2.0MPa，提升锚固力达设计值1.2倍以上；软土地区优先采用预应力鱼腹式钢支撑，通过分级张拉控制支撑变形，减少基坑侧移。土钉墙施工优化中，土钉钻孔采用干钻法或套管护壁钻法（富水地层），避免泥浆污染土体降低土钉抗拔力，注浆时采用孔底注浆工艺，确保浆液饱满度达95%以上，注浆压力维持在0.4~0.6MPa；喷射混凝土面层分两层施工，第一层初喷封闭坡面，间隔2h后进行第二层复喷，复喷前铺设Φ6@200×200钢筋网，钢筋网与土钉外露端焊接固定，提升面层整体性。止水与降水优化中，止水帷幕采用高压旋喷桩与水泥土搅拌桩组合工艺，桩体搭接长度不小于200mm（软土地层），施工时控制旋喷压力在20~25MPa，确保桩身均匀性；降水系统采用“管井+轻型井点”联合降水，管井间距根据渗透系数调整，同时安装自动化水位监测仪，实时调控抽水泵启停，将地下水位控制在基坑底以下1m，避免过度降水引发周边地面沉降。

（三）施工过程信息化与动态优化

施工过程优化需依托“实时监测、数据反馈、动态调整”闭环管控体系，实现施工全周期精准管控^[10]。监测体系优化需科学布设监测点位，基坑边坡顶部每20~30m设置1个位移监测点，周边建筑物四角及中点设置沉降监测点，支护结构关键截面布设应力监测点，监测设备优先采用自动化监测系统，数据采集频率根据施工阶段调整，监测数据精度控制在位移 $\pm 1\text{mm}$ 、应力 $\pm 2\%$

以内。数据反馈机制需搭建“现场-云端”一体化监测平台，实时传输监测数据并自动生成趋势曲线，平台内置预警模块，当监测值达到预警值时自动推送短信至管理人员，超报警值时触发声光报警；技术小组需每日分析监测数据，对比理论计算值与实际监测值差异，若位移速率超过0.5mm/d，立即排查施工工序，形成《每日监测分析报告》指导次日施工。动态调整优化需建立“监测数据-工艺参数”联动机制，例如当基坑侧移接近预警值时，放缓开挖速度，或增设临时钢支撑（间距3~4m）；若发现某区域土钉抗拔力不足，立即补打加密土钉，并调整注浆压力至0.7MPa；当地质条件与勘察结果不符，及时调整支护参数，例如将灌注桩桩长增加2~3m，或在软土夹层位置增设水泥土搅拌桩加固。此外，针对施工过程中的工序衔接优化，采用BIM技术模拟施工进度，预判工序冲突，提前调整施工顺序，例如先完成基坑周边锚索张拉，再进行中间区域土方开挖，减少工序等待时间；同时建立质量追溯体系，对每根灌注桩、每道锚索记录施工人员、设备型号、材料批次等信息，若出现质量问题可快速定位责任环节，实现施工过程可追溯、可管控。

四、结语

深基坑支护工程作为地下空间开发的核心前置环节，其技术选型的科学性与施工工艺的精细化直接关系到工程安全、经济成本与周边环境稳定。本文通过系统梳理放坡开挖、支挡式、重力式等常用支护技术的适用边界，构建了定性与定量相结合、BIM技术辅助的多维度选型体系，同时从施工准备、关键工序、过程管控三个维度提出了针对性的工艺优化路径，形成了“选型-施工-管控”全周期技术解决方案。随着地下工程向更深、更复杂的方向发展，深基坑支护技术仍面临软土富水地层支护优化、极端工况风险防控、智能化施工技术融合等新挑战。未来可进一步加强支护材料与结构的创新研发，深化BIM、大数据、物联网等数字化技术在选型决策、施工监测、动态调控中的深度应用，推动支护技术向智能化、绿色化、集成化方向发展。

参考文献

- [1] 陈戈.深基坑支护施工技术[J].工程技术研究,2020,5(9):55-56. DOI:10.3969/j.issn.1671-3818.2020.09.025.
- [2] 成小军.深基坑支护施工技术分析[J].河南建材,2024(7):83-85.
- [3] 陈岩.深基坑支护施工技术[J].中国房地产业,2019(29):98.
- [4] 李永强.深基坑支护施工技术[J].中国房地产业,2018(26):26-27. DOI:10.3969/j.issn.1002-8536.2018.26.023.
- [5] 高龙.深基坑支护施工技术及其稳定性分析[J].砖瓦世界,2025(9):16-18. DOI:10.3969/j.issn.1002-9885.2025.09.006.
- [6] 杨鹏,沈焯楠.深基坑支护施工技术与管理[J].石材,2024(7):54-56.
- [7] 曾凡,曾然.深基坑支护施工技术探讨[J].建材与装饰,2021,17(5):29-30. DOI:10.3969/j.issn.1673-0038.2021.05.015.
- [8] 董阔.深基坑支护施工技术浅谈[J].建材与装饰,2021,17(14):11-12. DOI:10.3969/j.issn.1673-0038.2021.14.006.
- [9] 魏鹏鹏.深基坑支护施工技术探析[J].河南建材,2024(4):134-136.
- [10] 刘波明.深基坑支护施工技术探讨[J].工程技术研究,2017(10):92-93. DOI:10.3969/j.issn.1671-3818.2017.10.053.