 DOI: https://doi.org/10.12349/edc.v8i1.8979

Research on Selection and Construction Technology Optimization and Quality Control of Deep Foundation Pit Support Structure

Congji Gong

Qingdao University of Technology, Qingdao, Shandong, 266520, China

Abstract

With the accelerated urbanization across regions, large-scale projects such as high-rise buildings, underground rail transit systems, and utility tunnels are proliferating. As a critical preliminary phase of these projects, deep foundation pit engineering directly determines the stability of subsequent construction through its safety and quality. The supporting structures of deep foundation pits must simultaneously withstand soil pressure, water pressure, and surrounding loads. The rationality of structural selection and construction technology levels are directly related to the safety of the foundation pit itself and the normal operation of adjacent buildings, structures, and underground pipelines. This paper systematically reviews the selection theories and construction technology systems for deep foundation pit support structures. By integrating specific engineering data, it establishes a selection decision-making model and quality control indicator system, thereby enriching theoretical research in the field of deep foundation pit engineering and providing data support and a research framework for future studies.

Keywords

deep foundation pit; support structure selection; construction technology optimization; quality control; data support

深基坑支护结构选型与施工技术优化及质量管控研究

宫聪基

青岛理工大学，中国 · 山东 青岛 266520

摘　要

随着各地区城市化进程的加速推进，高层建筑、地下轨道交通、综合管廊等大型工程日益增多，深基坑工程作为此类工程的关键前置环节，其施工安全与质量直接决定后续工程的稳定性。深基坑支护结构需同时承受土压力、水压力及周边荷载，选型合理性与施工技术水平直接关系到基坑自身安全及周边建（构）筑物、地下管线的正常使用。本文系统梳理深基坑支护结构的选型理论与施工技术体系，结合具体工程数据构建选型决策模型和质量管控指标体系，丰富了深基坑工程领域的理论研究成果，为后续相关研究提供了数据支撑和研究框架。

关键词

深基坑；支护结构选型；施工技术优化；质量管控；数据支撑

1 引言

当前，城市核心区域土地资源日趋紧张，建筑工程逐渐向高空和地下拓展，深基坑工程数量呈现爆发式增长。深基坑工程具有施工环境复杂、技术难度高、风险系数大等特点，据统计，深基坑工程施工阶段的安全事故发生率约为 0.87%，其中因支护结构选型不当和施工质量缺陷导致的事故占比达 62%，不仅造成巨额经济损失，还严重威胁周边环境安全。在此背景下，开展深基坑支护结构选型、施工技术优化及质量管控研究，对于降低工程风险、保障施工安全具有重要现实意义。

【作者简介】宫聪基（1991–），男，本科，助理工程师，从事土木工程研究。

2 深基坑支护结构类型及选型依据

2.1 常见支护结构类型及适用特性

深基坑支护结构类型多样，不同结构的承载能力、防渗性能、施工难度及成本存在显著差异，需结合工程实际合理选择。以下为国内应用最广泛的 4 类支护结构及核心数据参数：

2.1.1 排桩支护结构

由钢筋混凝土灌注桩或预制桩排列组成，适用于基坑深度 5-15m、土层为黏性土或粉土的工程。其单桩承载力可达 800-2500kN，基坑变形量控制在 50-80mm，施工成本约 800-1200 元 /m³。该结构施工便捷、工期短，据统计，但在

砂卵石地层中施工易出现塌孔，需配合泥浆护壁技术。

2.1.2 地下连续墙支护结构

采用现浇钢筋混凝土墙体，适用于基坑深度 15-40m 的超深基坑及复杂地质条件。墙体厚度通常为 600-1200mm，防渗系数可达 10^{-7}cm/s，基坑变形量可控制在 30mm 以内，施工成本约 2000-3500 元 /m³。在上海中心大厦深基坑工程（深度 36m）中应用该结构，成功抵御了深厚软土地区的土压力和水压力，基坑周边地面沉降量仅 22mm。但其施工工艺复杂、工期长，适用于对变形控制要求高的核心区域工程。

2.1.3 土钉墙支护结构

由土钉、喷射混凝土面层及原位土体组成，适用于基坑深度 5-10m、土层为黏性土或粉质黏土的工程。土钉间距 1.5-2.5m，长度 6-12m，施工成本仅 400-600 元 /m³，具有经济性好、施工速度快的优势，在中西部地区民用建筑基坑工程中的应用占比较高。但该结构的承载能力较弱，在地下水丰富或砂层地区易出现失稳，需配合降水措施。

2.1.4 钢板桩支护结构

采用热轧型钢钢板桩拼接组成，适用于基坑深度 5-12m、临时性基坑工程。其单根钢板桩的抗弯强度可达 150-300kN·m，施工成本约 600-900 元 /m，可重复利用，周转次数达 15-20 次，能有效降低临时工程成本。但钢板桩的防渗性能较差，在地下水水位较高地区需配合止水帷幕使用。

2.2 支护结构选型核心依据

1.2.1 地质与水文条件

地质条件是选型的核心因素，黏性土地区可优先选择土钉墙或排桩支护；砂卵石或深厚软土地区需选择地下连续墙或排桩 + 内支撑体系。水文条件方面，地下水水位高于基坑底面 0.5m 以上时，需选择防渗性能强的支护结构，如地下连续墙或排桩 + 止水帷幕，止水帷幕的渗透系数需≤ 10^{-6}cm/s。据工程统计，未充分考虑水文条件导致的支护结构失效事故占比达 38%。

2.2.2 基坑深度与周边环境

基坑深度直接决定支护结构的承载要求，深度≤ 10m 可选择经济型结构（土钉墙、钢板桩）；深度 10-20m 需选择排桩 + 内支撑；深度＞ 20m 优先选择地下连续墙。周边环境方面，若基坑周边 5m 内存在重要建（构）筑物或地下管线，需将基坑变形量控制在 30mm 以内，优先选择地下连续墙；若周边环境简单，可选择排桩或土钉墙。

2.2.3 工程成本与工期要求

在满足安全要求的前提下，需平衡成本与工期。临时性基坑可选择可重复利用的钢板桩，降低成本；永久性基坑需选择耐久性好的地下连续墙或排桩。工期紧张的工程可选择土钉墙或钢板桩，施工周期较地下连续墙缩短 40%-60%[1]。

3 深基坑支护施工技术优化路径

3.1 支护桩施工技术优化

3.1.1 钻孔灌注桩施工技术优化

传统钻孔灌注桩施工易出现孔斜、塌孔、桩身夹泥等质量问题，合格率仅 85% 左右。优化措施如下：一是采用自动化定位钻孔设备，将钻孔垂直度偏差控制在 0.5% 以内，较传统设备提升 60% 的定位精度；二是针对砂卵石地层，采用“泥浆护壁 + 套管跟进”技术，泥浆比重控制在 1.2-1.4，黏度 20-25s，可将塌孔率从 18% 降至 3% 以下；三是优化混凝土浇筑工艺，采用导管埋深自动监测系统，确保导管埋深始终保持在 2-6m，避免出现断桩，混凝土浇筑合格率提升至 98% 以上。

3.1.2 预制桩施工技术优化

预制桩施工的核心问题是沉桩振动对周边环境的影响，优化措施为采用静压沉桩技术替代传统锤击沉桩，振动速度从 15cm/s 降至 5cm/s 以下，有效减少对周边土体的扰动，周边地面沉降量控制在 10mm 以内。同时，采用 BIM 技术模拟沉桩过程，提前规避地下管线，沉桩效率提升 30%，管线碰撞事故率降至 0。

3.2 地下连续墙施工技术优化

2.2.1 槽壁稳定与防渗优化

地下连续墙施工的关键是槽壁稳定，优化措施为采用“分层开挖 + 泥浆循环净化”技术，分层开挖厚度控制在 1.5-2m，泥浆经净化后含砂率≤ 3%，槽壁垂直度偏差控制在 0.3% 以内。针对接缝防渗问题，研发了“柔性接头 + 遇水膨胀止水条”技术，接缝渗透系数从 10^{-6}cm/s 降至 10^{-8}cm/s，较传统接头防渗性能提升 100 倍。

3.2.2 混凝土浇筑优化

采用“溜槽 + 导管联合浇筑”技术，确保混凝土浇筑速度≥ 2m/h，避免出现冷缝；在混凝土中掺入复合型外加剂，提升混凝土的和易性和早期强度，28d 抗压强度可达 C40 以上。同时，采用超声波检测技术实时监测混凝土浇筑质量，及时调整浇筑参数，混凝土密实度合格率有效提升 [2]。

3.3 降水与土方开挖技术优化

3.3.1 降水技术优化

深基坑降水需避免出现周边地面沉降，优化措施为采用“分层降水 + 动态监测”技术，根据土层渗透性布置降水井，渗透系数＞ 10^{-3}cm/s 的砂层采用大口井降水，间距 8-12m；渗透系数＜ 10^{-5}cm/s 的黏性土采用轻型井点降水，间距 1.5-2.5m。同时，建立地下水位动态监测系统，监测频率每 2h 一次，将地下水位控制在基坑底面以下 1-1.5m，周边地面沉降量控制在 20mm 以内。

3.3.2 土方开挖技术优化

传统土方开挖易出现超挖、开挖顺序不合理导致支护

结构受力失衡，优化措施为采用“分层分段开挖＋限时支护”技术，分层厚度≤ 3m，分段长度≤ 10m，开挖完成后 24h 内完成支护作业。采用挖掘机＋长臂液压抓斗联合开挖，配合 BIM 技术模拟开挖流程，避免机械碰撞支护结构 [3]。

4 深基坑支护工程质量管控体系构建

4.1 施工前期质量管控

4.1.1 地质勘察质量管控

地质勘察是支护设计与施工的基础，需确保勘察数据的准确性。管控措施：一是明确勘察范围，勘察深度需达到基坑底面以下 5-8m，对于复杂地质条件需加深至 10m 以上；二是增加勘察点密度，每 100 ㎡至少设置 1 个勘察点，核心区域加密至每 50 ㎡ 1 个；三是采用综合勘察技术，结合钻探、物探、原位测试等方法，勘察数据准确率提升至 95% 以上。据统计，因勘察数据不准确导致的设计失误占比达 27%，加强勘察质量管控可有效降低此类风险。

4.1.2 设计文件审核管控

建立三级设计审核制度，一级审核由设计团队内部完成，重点审核支护结构选型合理性；二级审核由第三方专业机构完成，重点审核计算模型与参数取值；三级审核由建设、施工、监理单位联合完成，重点审核设计方案的可施工性。审核内容包括支护结构承载力计算、变形量计算、防渗设计等，确保设计文件符合规范要求。

4.2 施工过程质量管控

4.2.1 原材料质量管控

原材料是工程质量的核心，需严格把控进场检验。钢筋、水泥、混凝土等主要材料需提供出厂合格证和检验报告，进场后按规范抽样检测，钢筋力学性能检测合格率需达 100%，水泥强度检测合格率需达 100%，混凝土配合比需经试验室确定，严禁现场随意调整。

4.2.2 施工工序质量管控

针对关键工序（支护桩成孔、混凝土浇筑、地下连续墙成槽、降水井施工等）建立旁站监理制度，监理人员全程监督施工过程，做好监理记录。每道工序完成后需进行质量验收，验收合格后方可进入下道工序。例如，支护桩成孔后需检测孔深、孔径、垂直度，偏差超出规范要求的需整改后重新验收；混凝土浇筑完成后需检测强度和完整性，强度不足的需进行加固处理 [4]。

4.2.3 施工监测质量管控

建立全方位监测体系，监测内容包括基坑周边位移、沉降、支护结构内力、地下水位等。监测点布置：基坑周边每 10-15m 设置 1 个沉降监测点，每 5-8m 设置 1 个位移监测点；支护结构内力监测点布置在受力较大部位，间距 8-12m。监测频率：施工阶段每 12h 一次，基坑稳定后每 24h 一次，出现异常情况时加密至每 1h 一次。监测数据需实时分析，当位移或沉降速率超过 3mm/d 时，需立即停止施工，采取加固措施。

4.3 施工后期质量管控

4.3.1 基坑回填质量管控

基坑回填需在支护结构稳定后进行，回填土需采用级配良好的素土，含水量控制在 18%-22%，分层回填厚度≤ 30cm，采用小型压路机碾压，压实度≥ 95%。严禁采用建筑垃圾或冻土回填，避免回填不实导致支护结构受力失衡。回填完成后需进行压实度检测，检测不合格的需重新回填碾压。

4.3.2 工程质量验收与评估

工程完工后，组织建设、设计、施工、监理等单位进行联合验收，验收内容包括支护结构质量、监测数据、施工资料等。对验收中发现的问题，制定整改方案，限期整改完成。同时，开展工程质量评估，总结施工过程中的经验与不足，为后续工程提供参考。

5 案例分析

以某城市轨道交通车站深基坑工程为例，该工程基坑深度 22m，周边 3m 内存在市政管线和居民楼，地质条件为深厚软土（承载力特征值 80kPa），地下水水位位于基坑底面以上 1.2m。

5.1 支护结构选型

结合工程条件，选择地下连续墙＋内支撑支护体系，地下连续墙厚度 800mm，内支撑采用钢筋混凝土支撑，间距 6m。该选型方案经计算，支护结构承载力满足要求，基坑变形量可控制在 25mm 以内，符合周边环境的变形要求。

5.2 施工技术优化

采用“分层开挖＋泥浆循环净化”地下连续墙施工技术，泥浆含砂率控制在 3% 以内；降水采用大口井＋轻型井点联合降水技术，地下水位控制在基坑底面以下 1.5m；土方开挖采用 BIM 模拟＋分层分段开挖技术，分层厚度 2.5m，分段长度 8m[5]。

5.3 质量管控措施

建立三级质量管控体系，施工前期加强地质勘察，勘察点密度加密至每 50 ㎡ 1 个；施工过程中对地下连续墙成槽、混凝土浇筑等关键工序实施旁站监理，监测频率每 12h 一次；施工后期严格把控回填质量，压实度检测合格率达 98%。

工程实践表明，该工程支护结构施工合格率达 99.5%，基坑最大变形量 22mm，周边地面沉降量 18mm，未对周边管线和居民楼造成影响，施工工期较计划缩短 18%，成本降低 20%，实现了安全、高效、经济的施工目标。

6 结论

深基坑支护结构选型、施工技术优化及质量管控是保障基坑工程安全的核心环节。本文通过研究得出以下结论：一是支护结构选型需综合考虑地质水文条件、基坑深度、周

边环境、成本与工期等因素，合理选择排桩、地下连续墙、土钉墙等结构类型；二是施工技术优化可显著提升施工效率与质量，如自动化钻孔、静压沉桩、分层降水等技术的应用，可降低事故率、缩短工期；三是构建全流程质量管控体系，从施工前期勘察审核、施工过程工序监测到后期验收评估，可有效保障工程质量。

参考文献

[1] 杨明. 高层建筑深基坑支护结构选型及变形监测技术研究[J].城市建设,2025,(25):77-79.

[2] 牟海涛. 关于土建基础工程中深基坑支护施工技术探讨[J].城市建设理论研究(电子版),2025,(29):60-62.

[3] 马志明,刘志鹏,田鹏. 深基坑工程中支护结构选型与优化分析[J].城市建设,2025,(12):43-45.

[4] 夏祺. 建筑工程深基坑支护结构设计研究[J].价值工程,2025,44(16):55-58.

[5] 曾德彬. 深基坑支护结构选型与施工技术实践[J].中国建筑金属结构,2025,24(10):16-18.