Support Structure Selection and Deformation Monitoring Analysis for Deep Foundation Pit Engineering

Chan Zhang

Chongqing Niuyuan Construction Engineering Co., Ltd., Chongqing, 401147, China

Abstract

Deep foundation pit construction involves complex environments and high risks. The rational selection of support structures is crucial for ensuring construction safety and engineering quality, requiring comprehensive consideration of core factors such as geological conditions (e.g., soil layer characteristics, groundwater distribution), excavation depth, surrounding buildings, and underground pipeline layouts. Deformation monitoring of support structures serves as a vital safeguard for construction safety, necessitating real-time tracking of critical parameters like retaining structure displacement and surface settlement to dynamically monitor the stability of the support system and surrounding environment. This paper focuses on analyzing key selection factors including geological conditions and environmental factors, compares the applicability and advantages of mainstream support schemes, details core monitoring technologies for retaining structure horizontal displacement, surface settlement, and support axial force, and ultimately proposes scientifically feasible engineering implementation strategies to provide references for the safe and efficient advancement of deep foundation pit projects.

Keywords

deep foundation pit engineering; deep foundation pit support structure; selection; deformation monitoring

深基坑工程支护结构选型与变形监测分析

张婵

重庆牛源建筑工程有限公司，中国·重庆 401147

摘　要

深基坑工程施工环境复杂、风险较高，支护结构的合理选型是保障施工安全与工程质量的关键，需综合考量地质条件（如土层特性、地下水分布）、开挖深度、周边建（构）筑物及地下管线布局等核心因素。支护结构变形监测是施工安全的重要保障，需实时跟踪围护结构位移、地表沉降等关键参数，动态把控支护体系及周边环境的稳定状态。本文重点分析地质条件、周边环境等选型关键因素，对比主流支护方案的适用场景与优劣，详细介绍围护结构水平位移、地表沉降、支撑轴力等监测技术核心内容，最后提出科学可行的工程实施策略，为深基坑工程安全高效推进提供参考。

关键词

深基坑工程；深基坑支护结构；选型；变形监测

1 引言

我国近年来城市化发展速度加快，深基坑工程规模更大、基坑更深且结构更加复杂，如果支护结构不能发挥其应有的效能，就会造成严重后果，诸如坍塌，导致周边建筑开裂等[1]。为避免这种不良现象发生，就要对支护结构合理选型并实施变形监测，以提高深基坑工程的安全性。

2 深基坑工程支护结构选型的关键因素

2.1 地质条件

工程所在区域不同，土层分布有很大的差异。比如，沿海地区以软土区域居多，有大量的厚层淤泥质黏土，含水量高、压缩性高且强度低，开挖施工的过程中，容易铲射跟侧向挤出现象或者底部隆起问题。这种类型的地层要求支护结构有很强的抗变形能力。通常而言，所选择的结构形式刚度大，有很强的整体性，比如，地下连续墙等，可限制墙体位移，避免渗流破坏现象。内陆地区多为砂性土或者粉质黏土，可以选用排桩结合水帷幕等，成本比较低。

2.2 地质条件

深基坑的深度超过 10m，土压力并不是线性增长，需要配置多道内支撑或者锚索。低于 10m 的浅基坑则不然，土质良好的情况下，可应用土钉墙或者放坡开挖等技术操作方法，工程造价显著降低。需要注意的是，即便深度不是很大，如果在软弱地层中，支护措施依然不能盲目简化。

【作者简介】张婵（1981–），女，中国重庆人，本科，工程师，从事土木工程研究。

2.3 周边环境

城市中心区域的基坑工程附近通常有各种建筑物，诸如楼房、厂房、市政管线等等，即便地面沉降幅度不是很大，或者墙体位移些微的位移，所造成的损害也是巨大的。所以，这种类型的工程中，支护结构对于自身有足够的承载力，保证结构稳定，同时还要具有良好的止水性能变形特性比较低，所选择的结构类型要无缝连接，具有良好的截水效果。（表 1：支护结构选型关键因素 ）

表 1 支护结构选型关键因素

选型维度	核心指标	方案
地质条件	土体抗剪强度、地下水位	软土区优先地下连续墙（抗渗性强）
开挖深度	＞ 15m 需刚性支护	排桩 + 锚杆（适用于中等深度基坑）
周边环境敏感性	建筑物距离、管线保护要求	钢板桩（快速施工，减少扰动）

3 主流支护方案对比

3.1 地下连续墙

地下连续墙施工，所使用的主要工具是专用抓斗或者铣槽机，泥浆护壁条件下开挖沟槽，之后吊放钢筋笼并进行混凝土浇筑，形成连续墙体。墙体厚度为 0.6-1.5 米且非常整体，对于侧向土压力极具抵抗力，且具备优良的止水性能，地下水丰富且防渗要求高的场地，采用这种方法效果良好。比如，某工程基坑深度达到 34 米，地下连续墙厚度为 1.5 米，配合六道环形内支撑，不会产生渗漏且变形幅度非常小。

3.2 钻孔咬合桩 + 内支撑

该技术操作中，先施工素混凝土桩（A 桩），之后在其间进行切割咬合施工钢筋混凝土桩（B 桩），构成全封闭围护结构。由于 B 桩切割 A 桩的时候回实现物理咬合，界面密实度高，没有接缝，防水性能与地下连续墙接近。比如，某商业综合体项目中，由于场地比较狭小，不能放置大型抓斗设备，施工单位改使用全套管钻机进行直径 1 米、间距 1.75 米的咬合桩施工，结合三道钢支撑，使得最大水平位移不超过 25mm。但是，该工艺要求设备有很高的精度，施工过程中容易产生很大的振动和噪音。

3.3 排桩 + 高压旋喷止水帷幕

排桩通常使用间距 1.2-1.8 米的钻孔灌注桩或者预制桩，采用冠梁连接方式形成整体受力体系；止水帷幕则还通过高压旋喷技术将水泥浆液注入土体，形成柱列式或者格栅式阻水屏障。这种方案具有很强的灵活性，可基于地质情况对桩长以及帷幕深度进行调整，造价低于地下连续墙的 30%-40%。实践应用中，会产生桩间漏水问题，特别是砂层或者粉土层中，旋喷桩不能正确搭接，容易导致漏通道。所以，很多工程项目需要辅助双重止水措施，通常会增设水泥搅拌桩或者注浆补强，这样就导致成本增加。

3.4 土钉墙

土钉墙是在边坡内部逐层打入钢筋或者钢管（即土钉），并与喷射混凝土面层共同发生作用，形成复合重力式挡土结构。这种方法的施工进度快，材料消耗量少。但是，这种支护方式比较被动，需要土体自身参与受力，如果遇到软土或者被雨水浸泡，容易出现整体滑移。所以，软土地基或者重要建筑物附近不能采用这种支护方式。（表 2：支护方案对比表）

表 2 支护方案对比表

支护类型	适用场景	优势	局限性
地下连续墙	软土、超深基坑（>20m）	刚度大、抗渗性强	造价高，需专业设备
钻孔咬合桩 + 内支撑	软土、需截水工程	无缝连续墙，无需额外截水措施	施工噪声大，需全套管钻机
排桩 + 高压旋喷止水帷幕	中等深度基坑（10-15m）	施工灵活，造价适中	桩间易漏水，需辅助止水
土钉墙	土质较好、浅基坑（<10m）	经济性好，施工便捷	变形较大，不适用于软土

4 变形监测内容

4.1 围护结构水平位移

围护结构水平位移通常采用测斜仪埋设于墙体内的 PVC 测斜管中，沿深度方向每隔 0.5 米读取一次数据，绘制位移 - 深度曲线。在软土地区，典型的位移形态呈“弓字型”，即顶部位移较小，中部向外凸出，最大值出现在开挖面附近（约 0.5-0.7 倍开挖深度处）。

4.2 地表沉降

地表沉降可反映基坑开挖对周围土体的扰动程度。一般使用精密水准仪按固定测点进行周期性测量，精度可达 ±0.1mm。沉降曲线多呈“凹槽形”，即靠近基坑边缘沉降最大，随距离增加逐渐减小 [2]。若沉降速率持续超过 3mm/d 或累计值逼近预警值（如 30mm），则需立即启动应急预案。在某枢纽项目中，曾因连续暴雨导致降水井失效，监测发现某断面日沉降达 4.2mm，项目部迅速组织回填反压并加强抽排水，成功避免了更大范围的地层移动。

4.3 支撑轴力

支撑轴力能够将支护系统的受力状态体现出来。钢支撑常配备振弦式或光纤式轴力计，实时传输数据至监控平台。正常情况下，轴力随开挖深度逐步增大，呈阶梯式上升。但若某次开挖后轴力突增超过设计值的 80%，则提示存在超载风险，需检查是否超挖或支撑预加力不足 [3]。某项目曾

因支撑安装滞后，导致第三道支撑初始轴力仅为设计值的50%，墙体位移迅速扩大，后经紧急补张拉才得以控制。

5 工程实施策略

深基坑工程的成功，需要采用科学有效的实施策略。具体的实施要点如下：

5.1 选型策略要前置化、精准化

深基坑工程的初步设计环节，要实施专项岩土工程分析，结合使用 BIM 模型，对多个方案进行比选 [4]。如果工程为软土超深基坑，可以将地下连续墙与混凝土内支撑结合使用，结合使用有限元软件模拟方式掌握不同工况下的位移场以及应力场，对支撑间距以优化，并合理配置刚度。

具体的操作中，将三维实体模型建立起来，涵盖基坑几何尺寸、土层分布、地下连续墙、混凝土内支撑以及周边环境等。设定边界条件，水平位移约束模型两侧，与基坑之间的距离超过 3 倍开挖深度，底部固定约束 [5]。土体应用 HS-Small 小应变本构模型，对于软土非线性变形以及小应变刚度衰减特性都能够精准模拟。地下连续墙以及支撑应用弹塑性梁单元，此环节要对混凝土开裂刚度折减充分考虑，折减系数 0.3–0.5。

每一步开挖之后，都要对位移场重新色互助，对先撑后挖时序模拟操作。

进行敏感性分析操作过程中，对支撑水平间距以调整，比如从原来的 10m 调整为 8m 或者 12，比较位移以及支撑轴力变化情况，当间距缩短，位移减小幅度介于 5–15%，但是，支撑数量有所增加，就会提升成本。对支撑截面刚度进行调整，比如增大截面高度或者配筋率，刚度提升幅度达到 20%，位移则会减小 8–12%，但是需要对节点承载力进行验算。平衡点优化过程中，位移达到规定标准的前提下，选择允许间距的最大值。顶层支撑刚度可适当降低，承受土压力比较小，底层支撑就要相应地增强。

5.2 监测频率要动态化、差异化

频率监测中，按照常规的方法，每天进行一次观测，但是，当遇到雨季，临近有敏感设施或者出现异常征兆的时候，就要增加频率，即每天 2-3 次，必要的情况下，还要进行 24 小时持续监测。对于预警机制要分级设定，黄色预警可以达到 70% 限值、红色预警则会超过 85%，且响应流程明确。

5.3 坚持信息化施工理念

基于实际测量所获得的数据对土体力学参数以反演，以此为依据进行原始设计假设修正，包括开挖顺序以及支撑时机都要动态调整。

反演操作中，应用 BP 神经网络建立位移与土体参数的非线性映射关系。采用数值模拟方法，运行 FLAC3D 进行正演计算，训练样本集生成。采用正交试验方法设计参数组合，计算量会减少。

进行分区分层开挖施工中，基于反演参数对变形敏感区预测，低风险区域要优先开挖。比如，某地铁半盖挖法替代全盖挖，工期缩短 8 个月。支撑时机控制中，应用位移速率阈值法，如果墙体位移速率超过 3mm/ 天时，需要提前施加支撑。预应力锚索动态张拉，根据反演结果进行锁定荷载调整，使得松弛效应减少。

开挖施工中，要分层进行、分块进行，保证对称性并限时完成，不能存在超挖抢工的问题，以真正意义地实现信息化引领，管理精细化。

6 结语

通过研究明确，深基坑工程施工过程中，要重点关注两个方面的内容，即选型适配性和监测实时性。选择支护类型的时候，要以地质勘察所获得的数据信息作为依据，且对各种支护方案比选，将最优组合确定下来。对于支护变形情况进行监测的过程中，要严格按照原则执行，并将产生的数据实时反馈至施工现场的管理人员已及时调整。随着智能技术的普及，监测智能化方向发展，主要发挥作用是智能传感设备，结合使用数值模拟技术，使得深基坑工程安全推进并提高可控性。

参考文献

[1] 吕昊轩.深基坑工程中的支护结构选型与稳定性分析[J].陕西建筑，2025(4):25-28.

[2] 柯勇峰.岩土工程中深基坑支[1] 吕昊轩.深基坑工程中的支护结构选型与稳定性分析[J].陕西建筑，2025(4):25-28.

[2] 柯勇峰.岩土工程中深基坑支护结构优化设计与施工控制[C]//智慧建筑与智能经济建设学术研讨会论文集（一）.2025.

[3] 李经宇，于英霞，代均德，等.超大深基坑支护结构综合选型及变形规律研究[J].河南大学学报（自然科学版），2023(6):53-54.

[4] 张传虎.西宁某深基坑土钉墙支护数值模拟与现场监测[D].安徽建筑大学，2021.

[5] 张晓丽.深基坑咬合桩组合支护施工技术及现场监测研究[J].工程机械与维修，2022(3):178-181.