

复杂地质条件下深基坑土建施工的支护结构选型与变形 监测技术研究

白雪

120105*****0029

摘要: 随着城市化进程的加速,城市地下空间开发不断向深层推进,深基坑工程在土建施工中的应用日益广泛。然而,复杂地质条件(如软土、岩溶、断层破碎带、高水位地层等)给深基坑施工带来了极大挑战,其中支护结构选型的合理性与变形监测的有效性直接关系到工程安全、周边环境稳定及施工成本控制。本文基于复杂地质条件的特性分析,系统探讨了深基坑支护结构的选型原则、常见类型及适用场景,重点研究了变形监测技术的体系构建、监测指标与实施要点,并结合工程实践经验总结了支护选型与变形监测的协同应用策略,旨在为复杂地质条件下深基坑土建施工提供理论参考与技术支撑,保障工程建设的安全高效推进。

关键词: 复杂地质条件; 深基坑; 支护结构选型; 变形监测; 土建施工

DOI: 10.69979/3060-8767.25.09.072

引言

在城市建设中,深基坑工程是高层建筑、地下轨道交通等项目的关键环节,施工质量与安全对后续工程及周边环境影响深远。复杂地质条件作为核心制约因素,常伴随土体强度低、渗透性强等问题,易引发支护失稳、边坡坍塌、建筑沉降、管线破坏等风险,超六成深基坑安全事故与支护选型不当或变形监测不到位相关,因此开展复杂地质条件下支护选型与变形监测研究极具现实意义。

近年来,国内外学者虽在深基坑支护与监测领域有较多研究,提出多种结构形式与方法,但多基于单一地质条件,针对“软土-岩层”交互、岩溶发育区等复杂地质的系统性研究仍待完善。本文立足复杂地质的多样性与特殊性,从支护选型核心影响因素入手,梳理支护类型特点与适用范围,构建多维度变形监测体系,为工程实践提供科学依据。

1 复杂地质条件的特性分析

复杂地质条件是指由多种地质因素共同作用形成的、对工程施工具有显著制约作用的地质环境,其特性主要体现在以下几个方面:

1.1 土体物理力学性质的差异性

复杂地质条件下,土体往往呈现“多层交互”或“软硬不均”的特征,例如沿海地区常见的“软土-砂层-粉质黏土”交互地层、山区城市的“残积土-风化岩-基岩”

过渡地层等。不同土层的含水率、孔隙比、压缩模量、内摩擦角等物理力学指标差异显著,导致土体的承载能力、抗剪强度与变形特性极不稳定,增加了基坑开挖过程中土体稳定性控制的难度。

1.2 水文地质条件的复杂性

高水位地层、承压水地层、岩溶裂隙水发育区等水文地质条件,是复杂地质条件下深基坑施工的重要风险源。一方面,地下水的渗流作用易引发基坑管涌、流砂等灾害;另一方面,地下水水位变化会导致土体有效应力改变,进而诱发支护结构附加内力增加与周边地层沉降,对工程安全与环境稳定构成威胁。

1.3 地质构造的不确定性

断层破碎带、溶洞、孤石等地质构造的存在,进一步加剧了深基坑施工的复杂性。断层破碎带往往伴随松散破碎的岩体,其强度低、透水性强,易导致支护结构局部受力集中;岩溶发育区的溶洞若未提前探明,可能在基坑开挖过程中出现突然塌空,引发基坑失稳;孤石的存在则会干扰支护结构施工(如桩基础成孔困难),同时增加基坑开挖的不确定性。

2 复杂地质条件下深基坑支护结构选型研究

2.1 支护结构选型的核心原则

选型需遵循四大原则:

安全优先: 支护结构需具备足够强度、刚度与稳定

性，抵御土体压力、水压力，避免失稳或过大变形；

因地制宜：结合土层分布、水文及地质构造选型，如软土地层侧重抗变形，岩质地层关注与岩体协同；

经济合理：满足安全与技术要求的前提下，优化方案降低成本，避免过度设计；

环境兼容：减少对周边建筑、管线、道路的扰动，降低环境风险。

2.2 常见支护结构类型及适用场景

四类主流支护结构特性与适配场景不同：

排桩支护：由桩体排列形成，常结合锚杆、止水帷幕，刚度大、抗侧移强，适用于“软土-砂层”交互地层、中深基坑及变形控制要求高的工程，可兼顾挡土与止水；

地下连续墙：钢筋混凝土墙体，整体刚度大、防渗好、对环境扰动小，适用于超深基坑、环境敏感区及地质构造复杂区域，还可与主体结构结合简化工序；

土钉墙与复合土钉墙：传统土钉墙施工简便、成本低，但软土或高水位地层适用性差；复合土钉墙结合搅拌桩、微型桩等，提升抗变形与防渗能力，适用于“粉质黏土-砂层”交互地层及浅中深基坑；

内支撑支护：由钢或混凝土支撑提供内部约束，刚度大、变形小，适用于基坑形状复杂、变形控制要求极高的工程，能适配软土或岩质地层的局部地质变化，但施工工序较多。

2.3 支护结构选型的决策流程

需经五步骤确定方案：

勘察与风险识别：通过地质勘察明确地层、水文及构造，识别管涌、坍塌等风险；

需求分析：根据基坑规模、周边环境要求，确定支护的强度、刚度与防渗需求；

提出备选方案：基于地质与需求，提出2-3种可行方案（如排桩+锚杆、地下连续墙+内支撑等）；

方案比选优化：从安全、技术、经济、环境四维度比选，确定最优方案；

验证与调整：通过数值模拟或模型试验验证方案，存在隐患则调整参数（如加深支护、优化支撑布置）。

3 复杂地质条件下深基坑变形监测技术研究

3.1 变形监测技术体系的构建

复杂地质条件下，深基坑变形监测需搭建“全方位、

多维度、实时化”体系，覆盖监测对象、指标、方法与数据处理四大核心环节，以精准掌握基坑及周边环境变形动态，为安全预警提供支撑。

3.1.1 监测对象与监测指标

监测对象涵盖五类核心主体，各主体对应关键监测指标：

支护结构：水平位移、竖向位移、倾斜、内力及裂缝开展情况；

基坑周边土体：地表沉降、深层水平位移与土体分层沉降；

周边建筑物：基础沉降、倾斜、裂缝开展及结构振动；

地下管线：竖向位移、水平位移与变形速率；

地下水水位：水位变化与水位降深速率。

3.1.2 监测方法的选择

监测方法分为传统与自动化两类，需结合地质条件适配选用：

传统监测方法：包括全站仪（测位移）、水准仪（测沉降）、测斜仪（测深层位移）、钢筋计与应力计（测支护内力）、水位计（测水位）等。此类方法精度较高，但受人为因素影响大、监测频率低，适用于地质稳定、变形缓慢的工程。

自动化监测方法：依托GNSS、InSAR、光纤传感、无线传感网络等技术，实现数据实时采集与分析。例如GNSS可24小时连续监测，适用于变形快、风险高的工程；光纤传感能通过埋置传感器监测应变与温度，反映支护内力与土体变形；InSAR可监测大范围地表沉降，适配建筑密集区。

复杂地质条件下多采用“传统+自动化”组合模式，如支护结构位移用GNSS自动化监测结合全站仪复核，深层土体变形用测斜仪人工监测结合光纤传感，地下水水位用自动化设备实时监测，确保数据准确及时。

3.2 变形监测的实施要点

3.2.1 监测点布置原则

遵循“全面覆盖、重点突出”原则，聚焦三类关键区域布置监测点：

地质条件薄弱区：如断层破碎带、溶洞发育区、软土集中区，需加密监测点，例如软土分层处加设分层沉降监测点，断层附近增设支护内力监测点；

周边环境敏感区：如临近建筑物、管线、道路的区

域，需在建筑基础、管线拐点、路面设监测点；
支护结构关键部位：如排桩桩顶与弯矩最大处、地下连续墙转角与接头、内支撑节点与跨中，需设位移与内力监测点，反映支护受力变形状态。

3.2.2 监测频率与预警值设定

监测频率需随开挖进度与变形情况动态调整：开挖前测初始值确定基准；开挖期间按深度调整频率，深度越大、越临近设计开挖面，频率越高；开挖完成后变形稳定则降低频率，变形加快则提高频率。

预警值设定需结合地质、支护类型与环境要求，参考相关规范采用“三级预警”：黄色预警时加强监测、分析原因；橙色预警时暂停开挖、检查支护并加固；红色预警时立即停工、启动应急方案。

3.2.3 监测数据处理与分析

数据处理遵循“及时、准确、规范”原则，流程包括：数据采集传输（人工记录录入或自动化实时上传）、数据预处理（剔除异常值、修正基准值）、数据分析反馈（用趋势、对比、空间分析等方法判断安全状态，异常时生成报告反馈给设计施工单位，为决策提供依据）。

4 支护结构选型与变形监测的协同应用案例分析

4.1 工程背景

某城市地铁车站深基坑工程，地处“软土-岩层”交互、高水位复杂地质区，周边分布多栋砖混结构住宅及多条地下管线，周边建筑物对沉降敏感。该区域地层自上而下含杂填土、淤泥质黏土、粉质黏土及中风化砂岩，地下水位较高且存在岩溶裂隙水，淤泥质黏土层抗剪强度低，易引发边坡滑移与管涌风险。

4.2 支护结构选型过程

4.2.1 风险识别与备选方案

核心风险包括：软土层易滑移、高水位与岩溶裂隙水易致管涌、周边建筑对沉降敏感。基于风险分析，提出两类备选方案：

方案一：排桩+锚杆+水泥土搅拌桩止水帷幕；

方案二：地下连续墙+内支撑+高压旋喷桩止水帷幕。

4.2.2 方案比选与确定

从四维度对比方案：

安全性：方案一在软土层中锚杆锚固力不足，基坑侧向变形易超出建筑允许范围；方案二地下连续墙刚度

大、内支撑约束强，变形可控，且止水帷幕可阻断岩溶裂隙水，安全性更优。

经济性：方案一初始造价较低，但需额外投入周边建筑加固费用，且可能因工期延误产生间接成本；方案二初始造价较高，但无需额外加固，工期可控，综合成本更合理。

技术性：方案一在岩质地层中锚杆成孔难度大，易出现施工问题；方案二地下连续墙适配“软土-岩层”交互地层，钢支撑安装便捷，施工效率更高。

环境影响：方案一锚杆施工可能扰动周边管线；方案二对土体扰动小，钢支撑可回收，环境兼容性更佳。

综合分析后，确定采用方案二（地下连续墙+内支撑+高压旋喷桩止水帷幕）。

4.3 变形监测方案设计与实施

基于选定支护方案，采用“传统监测+自动化监测”组合模式设计方案：

4.3.1 监测点布置

支护结构：在地下连续墙顶部设位移监测点，墙身关键深度设内力监测点，钢支撑关键部位设轴力监测点；

周边土体：在基坑周边设地表沉降监测点，土层界面处设分层沉降监测点，地质薄弱区设深层水平位移监测点；

周边环境：在周边建筑基础与墙面设沉降、倾斜监测点，地下管线关键节点设位移监测点，基坑周边设地下水水位监测孔。

4.3.2 监测方法与频率

支护结构：连续墙位移采用GNSS自动化监测与全站仪定期复核，内力、轴力采用传感器自动化采集；

周边土体：地表沉降、深层位移、分层沉降采用传统仪器定期监测；

周边环境：建筑与管线变形采用传统仪器定期监测，地下水位采用自动化设备实时监测。

特殊时期（开挖至软土层、岩溶裂隙水区）提高监测频率，确保捕捉变形异常。

4.3.3 监测预警值

参考相关技术标准与工程需求，分三级设定预警值，涵盖支护结构位移与内力、周边土体变形、周边建筑与管线位移及地下水水位变化，明确不同预警等级的响应要求。

4.4 监测实施效果与协同应用分析

工程施工期间，变形监测显示：支护结构变形、周边土体变形、周边建筑与管线变形均控制在预警值内，地下水位稳定，无安全风险。

支护选型与变形监测的协同作用体现在三方面：

风险防控协同：支护方案从结构上阻断风险，监测通过实时跟踪验证方案有效性，形成双重保障；

动态调整协同：开挖至关键地层时，监测发现变形速率接近预警值，基于数据及时调整支撑参数，实现风险动态控制；

成本控制协同：监测数据证明支护方案安全，避免额外加固投入，自动化监测也降低人工成本，契合经济性目标。

5 结论与展望

5.1 研究结论

研究表明，复杂地质条件的土体差异、水文复杂及构造不确定特性，是影响深基坑支护选型与变形风险的关键，需提前勘察识别风险；支护选型需遵循“安全、适配、经济、环保”原则，通过多维度比选确定方案，复杂地层需重点关注支护抗变形与防渗能力；变形监测需构建“全方位、实时化”体系，采用“传统+自动化”模式，聚焦薄弱区与敏感区，科学预警控风险；二者协同通过“防控-验证-调整”机制，可有效降风险、控成

本、护环境。

5.2 研究展望

未来可从四方向深入：一是结合BIM、AI研发智能支护系统，实现方案自动优化；二是推广GNSS、光纤传感等技术，构建监测预警决策一体化平台；三是研发环保支护材料与低碳工艺，推动绿色施工；四是研究多灾害耦合风险，提升防控全面性与可靠性。

参考文献

- [1] 方雄, 杨瑾薇, 牛勋强. 复杂地质条件下深基坑支护施工技术[J]. 施工技术, 2015(S2): 3. DOI: CNKI:SUN:SGJS. 0. 2015-S2-027.
- [2] 孙晓阳, 周军红. 复杂地质条件下基于变形控制的深基坑支护设计与施工优化[J]. 施工技术, 2012, 41(4): 5. DOI: CNKI:SUN:SGJS. 0. 2012-07-015.
- [3] 邹梦玲. 复杂地质条件下超深基坑支护与地下水控制施工技术及安全保障措施[C]//2025 智慧设计与建造经验交流会论文集. 2025.
- [4] 曾谊辉. 复杂地质条件下异形深基坑支护桩受力分析与优化[D]. 重庆交通大学[2025-10-01].
- [5] 黄训平. 复杂地质条件下深基坑支护技术与监测分析[J]. 山西建筑, 2010, 36(12): 2. DOI: 10. 3969/j. issn. 1009-6825. 2010. 12. 066.