

复杂地质条件下深基坑支护结构优化设计 与变形控制研究

施炳军¹, 刘湘²

1. 云南奕辉建筑设计有限公司, 云南 昆明 650000
2. 中国电建集团昆明勘测设计研究院有限公司, 云南 昆明 650000

DOI:10.61369/ETQM.2025090009

摘要 : 在城市化进程中, 深基坑工程常面临软弱土层、高渗透性地层、岩溶区等复杂地质条件, 导致支护结构受力不均、变形失控等风险。本文系统分析复杂地质条件的类型与特征, 揭示其对支护结构的力学作用机理, 对比不同支护形式的适用性, 提出基于数值模拟、智能算法与动态监测的优化设计方法, 并构建“预测–控制–反馈”的变形管控体系。研究表明, 通过差异化支护选型、参数智能优化及信息化施工, 可有效提升复杂地质条件下深基坑的安全性与经济性, 为同类工程提供理论与技术参考。

关键词 : 复杂地质条件; 深基坑; 支护结构优化; 变形控制

Optimised Design and Deformation Control of Deep Excavation Retaining Structures under Complex Geological Conditions

Shi Bingjun¹, Liu Xiang²

1.Yunnan Yihui Architectural Design Co., Ltd., Kunming, Yunnan 650000
2.PowerChina Kunming Engineering Corporation Limited, Kunming, Yunnan 650000

Abstract : In the process of urbanisation, deep foundation pit engineering often faces complex geological conditions such as soft soil layers, highly permeable strata, and karst regions, leading to risks such as uneven stress distribution and uncontrolled deformation in support structures. This paper systematically analyses the types and characteristics of complex geological conditions, reveals their mechanical action mechanisms on support structures, compares the applicability of different support forms, proposes an optimised design method based on numerical simulation, intelligent algorithms, and dynamic monitoring, and establishes a ‘prediction–control–feedback’ deformation control system. The study demonstrates that through differentiated support selection, intelligent parameter optimisation, and information–based construction, the safety and economic efficiency of deep excavations in complex geological conditions can be effectively enhanced, providing theoretical and technical references for similar projects.

Keywords : complex geological conditions; deep excavations; support structure optimisation; deformation control

引言

随着城市地下空间开发的深度与广度不断拓展, 深基坑工程日益增多, 而复杂地质条件给基坑支护设计与施工带来严峻挑战。传统支护设计常基于简化地质模型, 难以精准反映地层非均质性与地下水耦合作用, 易导致结构受力超限或变形过大。因此开展复杂地质条件下支护结构优化设计与变形控制研究, 对保障基坑工程安全、降低工程造价具有重要工程意义。本文结合典型地质问题, 从勘察分析、支护选型、优化设计及变形控制等维度构建系统性解决方案, 以期为工程实践提供理论支撑与技术路径。

一、复杂地质条件分析及其对基坑工程的影响

(一) 复杂地质条件的类型与特征

复杂地质岩石稳定性差，土层结构、岩性、岩相存在显著变化，如岩层中可能含有多种不同的岩石类型，且岩石的物理力学性质差异较大。复杂地质条件主要包括软弱土层、高渗透性土层、不均匀地层、破碎岩体与断层带、膨胀性土或湿陷性黄土等类型，其特殊工程性质对工程建设构成显著威胁。软弱土层中的淤泥及淤泥质土，具有高压缩性和低强度特性。在基坑工程中，此类土体力学性能差，易发生塑性变形，导致基坑底部产生隆起现象；同时支护结构承受的侧向土压力增大，易出现过大侧向位移，危及工程安全。高渗透性土层如砂层、砾石层，因渗透系数大，地下水流动能力强^[1]。在工程降水过程中，地下水渗流作用显著，极易引发管涌、流砂等不良地质现象，增加降水施工难度，提高工程风险。不均匀地层呈现软硬交替或透镜体分布特征，导致支护结构受力状态复杂。在工程荷载作用下，不同区域土体变形量存在差异，致使支护结构受力不均，产生差异沉降，影响工程结构稳定性与耐久性。破碎岩体与断层带节理裂隙发育，结构完整性差，若存在承压水，水体压力会进一步降低岩体稳定性。在工程支护过程中，破碎岩体与断层带易发生滑动、坍塌，严重威胁支护结构的整体稳定性，增加工程支护难度与风险。膨胀性土与湿陷性黄土对含水率变化响应敏感，膨胀性土遇水后，土颗粒间的水化膜增厚，土体体积膨胀；湿陷性黄土浸水后，土颗粒间的胶结强度降低，土体产生显著塌陷。两种土体含水率变化均会产生附加应力，加剧支护结构裂缝发展，破坏支护结构完整性。

(二) 地质勘察与信息获取

为准确获取复杂地质条件信息，地质勘察需综合运用多种方法。常规勘察通过工程地质测绘、钻探取样、原位测试，分别从地表调查、岩土试样试验、现场测试等角度了解地层结构与岩土性质；物探与遥感技术利用地质雷达、地震勘探、高密度电法、卫星影像等手段，探测浅部地层、地质构造、宏观地质特征；信息化勘察与监测则通过三维地质建模直观展示地层分布，实时监测获取动态数据辅助设计。

(三) 复杂地质条件对基坑支护结构受力与变形的影响机理

复杂地质条件通过改变岩土体力学行为和水文条件，显著影响基坑支护结构的受力与变形。在力学机制上，侧向土压力因软土蠕变或膨胀土遇水膨胀而重分布，渗流力降低土体有效应力，导致支护桩弯矩突变；动态荷载如断层带附近的地震波放大效应可能加剧结构疲劳损伤。典型变形模式包括深层滑移和局部破坏^[2]。设计上需采取差异化支护、降水控制及变形协调等措施，如复合支护结构、悬挂式帷幕及可调支撑系统，以适应复杂地质条件的不确定性，确保基坑安全稳定。

二、深基坑支护结构形式及其适用性分析

(一) 常见深基坑支护结构形式

基坑支护技术伴随城市建设发展而不断演进。目前，国内外基坑支护方式多种多样，包括放坡支护、土钉墙、桩墙支护（如排桩、地下连续墙、型钢水泥土墙）、逆作拱墙、三轴搅拌桩等，这些支护结构在不同地质条件、基坑深度和环境要求下具有

不同的适用性与局限性^[3]。桩墙式支护结构以排桩和地下连续墙为代表，通过桩体或墙体抵抗土压力，适用于开挖深度较大、对变形控制要求较高的工程；重力式支护结构通常采用水泥土搅拌桩、高压旋喷桩等形成重力式挡墙，依靠自身重量维持稳定，适用于软土地层且开挖深度较浅的基坑；组合式支护结构则是将多种支护形式结合，如桩锚支护、内支撑支护，能够根据不同地质条件和工程需求灵活调整，有效控制基坑变形。

(二) 不同支护结构在复杂地质条件下的力学特性与优缺点

桩墙式支护结构中，排桩在硬土地层中承载力高、刚度大，但在软土或砂层中易产生较大位移，且施工时需注意泥浆护壁防止塌孔。地下连续墙整体性和防渗性能优越，可适应复杂地质，但造价高、施工工艺复杂。重力式支护结构在软土地层中施工简便、成本较低，能有效控制地下水渗流，然而其自重大、占用空间大，开挖深度受限，在土质不均匀或存在流砂层时稳定性易受影响^[4]。组合式支护结构中，桩锚支护通过锚索提供主动拉力，可减少墙体变形，但在破碎岩层或高水位地区，锚索锚固力可能不足。内支撑支护对基坑变形控制效果好，但支撑体系会占用大量施工空间，影响土方开挖和主体结构施工效率。

(三) 复杂地质条件下支护结构选型的原则与策略

复杂地质条件下，支护结构选型需遵循安全性、经济性、适用性和可操作性原则。安全性原则方面，确保支护结构在施工和使用阶段能够抵抗土压力、水压力及其他荷载，避免发生整体失稳或局部破坏；经济性维度，综合考虑地质条件、基坑深度、周边环境等因素，平衡支护结构的造价与施工成本；适用性方面，根据地层特性选择适配的支护形式，如软土地层优先考虑重力式或组合式支护，岩质地层可采用排桩或地下连续墙；最后结合现场施工条件和技术水平，选择便于施工、工期可控的方案^[5]。在具体选型策略上，应通过详细的地质勘察和力学计算，分析不同支护结构在复杂地质条件下的受力特性和变形规律。例如对于存在承压水的地层，优先选择止水性能好的地下连续墙或水泥土搅拌桩形成截水帷幕；在岩溶地区，需提前对溶洞进行注浆加固后，再采用桩墙式支护结构；针对软土基坑，可采用内支撑或预应力锚索增强支护体系的稳定性。同时引入信息化施工理念，在施工过程中实时监测支护结构的位移、内力及周边环境变化，动态优化支护方案，确保深基坑工程安全高效推进。

三、复杂地质条件下支护结构优化设计

(一) 支护结构优化设计的目标与原则

支护结构优化设计以工程安全为核心，兼顾经济性与施工效率，实现综合效益最大化。安全性作为设计的首要原则，确保支护体系在复杂地质条件下具备足够的稳定性，能够有效抵抗土压力、水压力及周边环境荷载，严格控制基坑变形，防范倾覆、滑移及局部破坏等风险^[6]。经济性优化需贯穿设计全过程，通过科学选材、合理布局及工艺创新降低工程造价，同时考虑全生命周期成本，包括施工投入、维护费用及潜在风险成本。施工效率的提升同样不容忽视，优化的支护方案应便于实施，避免因结构复杂导致工期延误或作业空间受限。在具体实施过程中，设计需遵循四大原则：安全性优先原则，严格执行规范要求，对特殊地质风险进行专项分析；因地制宜原则，结合地层特性选择适配的支

护形式与参数；综合效益最大化原则，平衡安全投入与经济回报，避免过度设计或设计不足；动态优化原则，利用施工监测数据实时反馈调整设计，确保方案贴合实际地质变化。

（二）支护结构优化设计的变量与约束

优化设计变量涵盖结构、材料、施工及地质四大维度，结构变量包括排桩直径、间距、嵌入深度，地下连续墙厚度，支撑体系的水平间距与竖向布置等，直接影响结构受力性能；材料变量涉及混凝土强度等级、钢材型号、锚索预应力值，决定结构承载能力与耐久性；施工变量包含开挖分层厚度、速率、降水方案参数，关系到施工安全与效率；地质变量则通过优化岩土体力学参数，修正设计模型以匹配实际地质条件。约束条件是保障设计可行性的关键，分为力学性能、变形控制、施工条件和地质适配四类^[7]。力学性能约束要求支护结构满足抗倾覆、抗滑移稳定系数，结构内力不超过材料强度设计值；变形控制约束限制基坑侧壁水平位移与周边地表沉降，避免影响周边建筑物与管线；施工条件约束需考虑场地空间、设备能力和工艺可行性，例如在狭窄场地避免使用大型支撑设备；地质适配约束针对特殊地质设置专属限制，如膨胀土地区需控制支护结构与土体接触压力，岩溶区需确保桩基避开溶洞。

（三）复杂地质条件下支护结构优化设计方法

复杂地质条件下的优化设计需结合多学科方法，形成系统性解决方案。基于数值模拟的正向设计通过有限元软件建立三维地质 – 结构耦合模型，模拟不同工况下支护结构的受力与变形，为方案设计提供数据支撑；智能算法优化引入遗传算法、粒子群优化算法等智能技术，通过全局搜索与迭代计算，在多变量、多目标的复杂函数中寻找最优解，突破传统算法易陷入局部最优的局限；反分析与参数校准利用现场监测数据反演岩土体力学参数，修正设计模型，使理论计算更贴合实际地质条件；动态设计与反馈优化建立“设计 – 施工 – 监测 – 调整”的闭环流程，根据施工过程中揭露的地质变化或监测异常，实时优化支护参数，确保设计动态适应复杂地质环境。

四、支护结构变形预测与控制技术

（一）变形预测方法

变形预测方法主要分为理论计算、数值模拟和数据驱动三类，理论计算法基于经典土力学理论，如朗肯土压力理论、库仑

土压力理论，结合经验公式估算支护结构内力与变形，适用于地质条件简单、对精度要求不高的工程。数值模拟法借助有限元软件（如 ANSYS、ABAQUS）建立三维地质 – 结构模型，通过模拟开挖、支护、降水等施工工况，直观呈现变形发展过程，能有效处理复杂地质与边界条件，但计算结果依赖参数准确性^[8]。数据驱动法则利用监测数据构建预测模型，常见的有灰色预测模型、神经网络模型和支持向量机模型^[9]。灰色预测模型适用于数据量少、信息不完全的场景；神经网络模型通过学习历史数据特征，可实现非线性变形预测；支持向量机模型在小样本数据下具有良好的泛化能力^[10]。实际工程中，常将多种方法结合，如用数值模拟提供理论变形趋势，以监测数据校准模型参数，提升预测精度。

（二）变形控制关键技术

设计阶段，通过合理选择支护形式与参数增强结构刚度，如软土地区采用刚度大的地下连续墙结合内支撑体系，或在排桩间增设旋喷桩形成组合支护；针对地下水问题，设计有效的截水帷幕与降水方案，减少水位变化对土体的影响。施工过程中，严格遵循“分层分段、限时支撑”原则，控制开挖深度与暴露时间，及时施加支撑预应力；采用信息化施工技术，根据实时监测数据动态调整施工参数，如发现墙体位移速率加快，可提前增设临时支撑或调整开挖顺序。动态监测是变形控制的关键防线，通过在支护结构及周边环境布置位移、沉降、应力监测点，利用自动化监测系统实时采集数据，结合预警阈值（如日变形量超过 3mm 或累计变形量达到 30mm 时触发预警），一旦出现异常立即启动应急预案，采取注浆加固、回填反压等措施控制变形发展，确保基坑工程安全。

五、结语

复杂地质条件下深基坑支护设计需突破传统经验方法，通过精细化勘察、多形式组合支护、智能优化算法与动态监测技术的协同应用，实现对结构受力与变形的精准调控。未来研究可进一步融合物联网、人工智能等新技术，构建智能化基坑安全管控系统，提升复杂环境下地下工程的可靠性与经济性。

参考文献

- [1] 曾昭艺. 复杂地质条件下明挖宽大基坑施工技术研究 [J]. 建筑机械化, 2025, 46(05): 150–153.
- [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(07): 44–48.
- [3] 宗长青, 宋康南. 复杂地质条件下深基坑支护设计与优化分析 [J]. 城市建设理论研究 (电子版), 2025, (02): 115–117.DOI:10.19569/j.cnki.cn119313/tu.202502039.
- [4] 林华湘, 胡泽铭, 蔡宏岩, 等. 临海复杂地质条件下深基坑支护优化设计 [J]. 工程技术研究, 2023, 8(07): 161–163.DOI:10.19537/j.cnki.2096-2789.2023.07.051.
- [5] 宁冠翔. 复杂地质条件下深基坑支护设计及施工技术应用要点——以山西省某市中医院门诊楼项目为例 [J]. 房地产世界, 2023, (10): 145–147.
- [6] 游应峰. 复杂地质条件下深基坑支护方案研究及稳定性分析 [J]. 江西建材, 2023, (01): 175–176+183.
- [7] 张道通. 复杂环境及地质条件下深基坑支护施工技术 [J]. 城市住宅, 2021, 28(08): 225–227.
- [8] 潘铠瑜. 敏感环境及复杂地质条件下深基坑支护工程设计 [J]. 路基工程, 2016, (02): 148–153.DOI:10.13379/j.issn.1003-8825.2016.02.32.
- [9] 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): 106–107.DOI:10.13719/j.cnki.cn14-1279/tu.2010.12.145.
- [10] 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, 44(S2): 104–106.