

深基坑支护施工技术在复杂地质条件下的应用与风险控制

文 / 张 娟 东阿县自然资源和规划局

摘要：在城市化进程加速的背景下，高层建筑、地下交通枢纽、地下商业综合体等大型工程不断涌现，深基坑工程作为地下结构施工的关键环节，其重要性愈发凸显。然而，我国地域辽阔，地质条件复杂多样，涵盖软土、砂土、岩溶、膨胀土等多种特殊地质类型。在复杂地质条件下开展深基坑支护施工，不仅对支护结构的强度、稳定性和变形控制提出了极高要求，还面临诸如土体坍塌、地下水渗漏、周边建筑物沉降等风险，施工难度和安全隐患显著增加。因此，深入研究深基坑支护施工技术在复杂地质条件下的应用与风险控制，对确保工程质量、保障施工安全、减少经济损失具有重要的现实意义。

关键词：深基坑支护；施工技术；复杂地质条件；风险控制

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.18.014

引言

在复杂地质条件下，如何优化深基坑支护体系设计及改进施工技术成为工程界的关键问题，以实际工程为例，探讨了支护体系的优化设计，包括地质勘察优化、防渗性能增强设计、墙体设计调整、锚杆系统优化及开挖分区设计等。同时，探讨了支护体系的施工技术要点，包括施工方案选择、施工难点及应对措施。通过支护体系优化设计及改进施工技术后深基坑侧壁位移和地表沉降均控制在设计允许范围内，支护结构承受的内力与变形也在安全余量之内，确保了基坑施工的安全性和稳定性。

一、复杂地质条件的特点与分类

(一) 复杂地质条件的特点

首先，复杂地质条件通常涉及多种地质结构和地层的交错分布。这些结构和地层可能包括断层、褶皱、岩浆岩、沉积岩等多种类型，它们的组合方式多种多样，使得地质环境变得异常复杂。例如，在某个山区，可能同时存在由古老地层形成的褶皱和由近期地质活动形成的断层，这些结构相互叠加，形成了一个错综复杂的地质网络。

其次，复杂地质条件下的岩石类型和性质也具有多样性。岩石可能包括砂岩、页岩、石灰岩、花岗岩等多种类型，每种岩石的硬度、孔隙度、渗透性等物理和化学性质各不相同，进一步增加了地质条件的复杂性。例如，在某个矿区，砂岩和页岩的交替出现使得开采工作变得异常困难，因为这两种岩石的硬度和稳定性差异很大，需要采用不同的开采方法和技术。

最后，复杂地质条件还可能受到多种外部因素的影响，如气候变化、人类活动等。这些外部因素会进一步加剧地质条件的复杂性，使得地质预测和治理变得更加困难。例如，在某个沿海地区，由于海平面上升和人类活动的影响，海岸线不断侵蚀，导致了严重的地质灾害。

(二) 常见复杂地质类型

(1) 软土地质：软土具有高含水量、高压缩性、低强度、低渗透性等特性，如淤泥、淤泥质土等。在软

土地层中进行深基坑施工，土体易产生较大变形，支护结构承受的土压力大，易发生基坑隆起、边坡失稳等问题。

(2) 砂土地质：砂土颗粒间黏聚力小，透水性强。深基坑开挖时，在地下水作用下易出现流沙、管涌现象，导致基坑侧壁坍塌，威胁施工安全。

(3) 岩溶地质：岩溶地区存在溶洞、溶沟、溶槽等岩溶形态，岩土体完整性差，强度不均匀。深基坑施工中，可能因溶洞处理不当引发基坑坍塌，或导致周边地面塌陷。

(4) 膨胀土地质：膨胀土遇水膨胀、失水收缩，反复胀缩变形会对支护结构产生较大的膨胀力，导致支护结构开裂、变形，影响基坑稳定性。

二、深基坑支护施工技术在复杂地质条件下的应用

(一) 排桩支护技术

排桩支护是将钢筋混凝土桩排成连续或间隔的桩列，形成支护结构。在复杂地质条件下应用广泛，尤其适用于软土、砂土等地质条件。对于软土地质，可采用钻孔灌注桩，通过合理设计桩径、桩长和配筋，提高桩的承载能力和抗变形能力。在砂土地质中，为防止流沙和管涌，可在排桩外侧设置止水帷幕，如高压旋喷桩止水帷幕，与排桩共同形成封闭的支护体系。施工时，需严格控制成桩质量，确保桩身垂直度和混凝土强度，避免出现缩颈、断桩等缺陷。图1为常见的排桩支护技术。



图1 常见的排桩支护技术

（二）地下连续墙技术

地下连续墙是在地面上采用专门的成槽设备，沿着深基坑周边，在泥浆护壁条件下，开挖出一条狭长的深槽，清槽后在槽内吊放钢筋笼，然后用导管法浇筑水下混凝土，筑成一道连续的地下墙体。该技术具有整体性好、强度高、防渗性能强等优点，适用于各种复杂地质条件。在岩溶地质中，地下连续墙能够穿越溶洞等不良地质体，有效阻隔地下水，保证基坑稳定。在软土地质和砂土地质中，也能很好地控制基坑变形，保护周边环境。但地下连续墙施工工艺复杂，对设备和施工技术要求高，成本相对较高。

（三）土钉墙支护技术

土钉墙支护是利用土钉与土体之间的相互作用，形成一个能自稳的土体-土钉复合体，以抵抗墙后传来的土压力。适用于地下水位以上或经降水后的非软土基坑，对于土质较好、直立性较强的砂土、粉土和黏性土等地质条件较为适用。在施工过程中，通过钻孔、插入土钉、注浆等工序，使土钉与土体紧密结合，提高土体的抗剪强度和整体稳定性。土钉墙支护具有施工简便、成本低、工期短等优点，但对土体的性质要求较高，在软土等不良地质条件下应用受限。

（四）锚杆支护技术

锚杆支护是将锚杆一端锚固在稳定的岩土体中，另一端与支护结构相连，通过施加预应力，将不稳定岩土体或结构物锚固在稳定的岩土体上，以提供足够的抗拔力和约束力。常用于岩质基坑和土质较好的深基坑支护。在岩质基坑中，锚杆可直接锚固在坚硬的岩石中，能有效控制基坑变形。在土质基坑中，可结合排桩或地下连续墙使用，增强支护结构的稳定性。施工时，需准确确定锚杆的长度、直径和锚固深度，合理控制预应力施加大小，确保锚杆的锚固效果。

（五）组合支护技术

在复杂地质条件下，单一的支护技术往往难以满足工程需求，因此常采用组合支护技术。例如，排桩-锚杆组合支护，利用排桩抵抗土压力，锚杆提供水平拉力，增强支护结构的整体稳定性，适用于土质较差、基坑深度较大的情况。地下连续墙-内支撑组合支护，通过地下连续墙止水和挡土，内支撑系统提供支撑力，有效控制基坑变形，在复杂地质和周边环境要求高的工程中应用广泛。组合支护技术能够充分发挥不同支护技术的优势，根据具体地质条件和工程要求进行优化组合，提高支护效果。

三、复杂地质条件下深基坑支护施工的风险因素分析

（一）地质勘察风险

准确的地质勘察是深基坑支护设计与施工的基础。然而，由于复杂地质条件的隐蔽性和不确定性，地质勘察可能存在勘察范围不足、勘察方法不当、勘察数据不

准确等问题。例如，未能准确查明岩溶地区溶洞的分布和规模，或对软土地层的力学参数取值不准确，会导致支护结构设计不合理，无法满足实际工程需求，增加施工风险。

（二）支护结构设计风险

支护结构设计需综合考虑地质条件、基坑深度、周边环境等多种因素。在复杂地质条件下，设计人员若对地质条件认识不足，或未充分考虑施工过程中的各种工况，可能导致支护结构选型不当、参数计算错误。如在砂土地质中，未合理设计止水帷幕的深度和厚度，可能引发流沙、管涌等事故；在膨胀土地质中，未考虑土体胀缩对支护结构的影响，会导致支护结构破坏。

（三）施工过程风险

（1）土方开挖风险：土方开挖顺序和方法不当是深基坑施工中的常见风险。在复杂地质条件下，若未按照分层、分段、对称、均衡的原则进行开挖，可能导致土体应力失衡，引发基坑侧壁坍塌。同时，开挖速度过快，会使土体来不及适应应力变化，增加支护结构的变形和受力。

（2）降水施工风险：复杂地质条件下的降水施工难度大，若降水方案不合理，可能出现降水效果不佳，导致基坑内积水，影响施工安全和质量；或降水过度，引起周边地面沉降，对周边建筑物和地下管线造成破坏。例如，在砂土地质中，降水过程中可能引发流沙现象，危及基坑稳定。

（3）支护结构施工风险：支护结构施工质量直接关系到基坑的安全。在施工过程中，可能存在排桩成桩质量差、地下连续墙槽壁坍塌、土钉注浆不饱满、锚杆锚固力不足等问题。这些质量缺陷会削弱支护结构的承载能力和稳定性，增加基坑事故发生的概率。

（四）周边环境风险

深基坑工程通常位于城市密集区域，周边存在建筑物、地下管线、交通设施等。复杂地质条件下，基坑施工引起的土体变形和地下水变化可能会对周边环境造成影响。如基坑开挖导致周边建筑物基础沉降、倾斜，地下管线破裂、变形，影响城市正常运行和居民生活安全。此外，周边环境的变化也可能反过来影响基坑的稳定性，形成恶性循环。

（五）自然灾害风险

复杂地质条件下，深基坑工程还面临着自然灾害的威胁。暴雨、洪水等强降水天气会导致地下水位急剧上升，增加基坑水压力，可能引发基坑突涌、边坡失稳等事故。地震等地质灾害会破坏岩土体的结构，改变土体应力状态，对支护结构造成巨大冲击，严重威胁基坑安全。

四、复杂地质条件下深基坑支护施工的风险控制策略

（一）加强地质勘察工作

（1）优化勘察方案：根据工程特点和地质条件，制定详细、合理的勘察方案。扩大勘察范围，增加勘察

点数量,采用多种勘察手段相结合的方式,如钻探、物探、原位测试等,全面获取地质信息。对于复杂地质区域,可进行专项勘察,深入了解不良地质体的分布和性质。

(2) 提高勘察精度:选用先进的勘察设备和技术,提高勘察数据的准确性和可靠性。加强对勘察人员的培训和管理,确保勘察工作规范、严谨。对勘察数据进行认真分析和验证,必要时邀请专家进行论证,为支护结构设计提供准确的地质依据。

(二) 科学进行支护结构设计

(1) 合理选型:设计人员应充分了解复杂地质条件的特点,结合工程实际需求,综合考虑各种支护技术的优缺点,选择合适的支护结构类型。对于地质条件特别复杂的工程,可采用组合支护技术,并进行多方案比选,优化设计方案。

(2) 精确计算:利用先进的计算软件和方法,对支护结构进行精确计算和分析。考虑多种工况下的荷载组合,如土压力、水压力、地面超载、地震作用等,确保支护结构具有足够的强度、稳定性和变形控制能力。同时,对设计结果进行敏感性分析,评估地质参数变化对支护结构的影响,提高设计的可靠性。

(三) 严格把控施工过程

(1) 规范土方开挖:制定科学合理的土方开挖方案,明确开挖顺序、方法和速度。按照分层、分段、对称、均衡的原则进行开挖,每层开挖深度不宜过大,分段长度应根据支护结构的受力情况合理确定。加强对开挖过程的监测,及时调整开挖方案,确保土体应力平衡和支护结构稳定。

(2) 优化降水施工:根据地质条件和工程要求,选择合适的降水方法和设备。制定详细的降水方案,合理确定降水井的布置、深度和数量。在降水过程中,加强对地下水位和周边环境的监测,控制降水速度和降深,避免降水对周边环境造成不良影响。同时,做好应急预案,防止出现降水事故。

(3) 确保支护结构施工质量:加强对支护结构施工过程的质量控制,严格按照施工规范和设计要求进行施工。对排桩、地下连续墙、土钉、锚杆等关键工序进行重点监控,确保成桩质量、槽壁稳定性、注浆饱满度和锚固力等符合要求。建立质量检验制度,对施工完成的支护结构进行检测和验收,不合格的工程坚决返工处理。

(四) 加强周边环境保护

(1) 环境调查与评估:在工程开工前,对周边环境进行详细调查,包括建筑物的结构类型、基础形式、使用年限,地下管线的种类、位置、埋深等。进行环境影响评估,预测基坑施工对周边环境的影响程度和范围,制定相应的保护措施。

(2) 实施监测与预警:在基坑施工过程中,对周边建筑物、地下管线和地面沉降等进行实时监测。设置合理的监测点和监测频率,及时获取监测数据。建立预警机制,当监测数据超过预警值时,立即采取措施进行处理,如调整施工方案、对建筑物进行加固等,确保周边环境安全。

(五) 做好自然灾害防范

(1) 制定应急预案:针对暴雨、洪水、地震等自然灾害,制定相应的应急预案。明确应急组织机构和人员职责,准备充足的应急物资和设备,如沙袋、水泵、发电机、抢险工具等。定期对应急预案进行演练,提高施工人员的应急处置能力。

(2) 加强灾害预警与防范:与气象、地震等部门建立联系,及时获取灾害预警信息。在灾害来临前,采取相应的防范措施,如加固支护结构、停止施工、疏散人员等。灾害过后,对基坑工程进行全面检查和评估,及时修复受损部位,确保工程安全。

结语

在复杂地质条件下进行深基坑支护施工,技术难度大、风险因素多,对工程安全和周边环境影响显著。通过合理应用排桩支护、地下连续墙、土钉墙、锚杆支护及组合支护等施工技术,深入分析地质勘察、支护结构设计、施工过程、周边环境和自然灾害等风险因素,并针对性地采取加强地质勘察、科学设计、严格施工管理、保护周边环境和防范自然灾害等风险控制策略,能够有效提高深基坑支护工程的安全性和可靠性。未来,随着工程建设技术的不断发展,应持续加强对复杂地质条件下深基坑支护施工技术和风险控制的研究,不断创新和完善相关技术与方法,为城市地下空间开发和基础设施建设提供有力保障。

参考文献

- [1] 李自江. 复杂地质条件下深基坑支护体系优化设计与施工技术改进 [J]. 四川水泥, 2025, (03): 161-162+171.
- [2] 龙江. 复杂城市环境下深基坑支护与施工优化技术研究 [J]. 中国建筑金属结构, 2025, (04): 85-87.
- [3] 徐浩, 倪志胜. 复杂地质条件下深基坑支护施工技术研究 [J]. 新城建科技, 2025, (01): 153-155.
- [4] 朱婷婷. 复杂地质条件下深基坑支护结构稳定性施工技术研究 [J]. 安徽建筑, 2025, (01): 135-137.
- [5] 曹红卫. 复杂环境及地质条件下深基坑支护施工技术 [J]. 城市建设理论研究(电子版), 2023, (21): 143-145.
- [6] 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.