

复杂地质条件下水利工程深基坑支护施工技术分析

李 奇

安徽水安建设集团股份有限公司 安徽 合肥 236001

摘 要：本文旨在系统性地分析复杂地质条件下水利工程深基坑支护的核心技术体系。首先，界定了复杂地质条件的内涵，并阐述了水利工程深基坑的独特性；其次，详细论述了支护结构选型的核心原则与影响因素；再次，对适用于复杂工况的多种主流支护技术（包括地下连续墙、灌注桩、复合土钉墙、冻结法及高压旋喷桩等）进行了深入剖析；随后，探讨了地下水控制、施工监测、绿色施工理念以及风险管理等关键环节的技术要点。研究表明，面对复杂地质环境，必须采取“因地制宜、动态设计、信息施工”的综合策略，通过多技术融合、精细化管理和全过程风险控制，方能有效保障水利工程深基坑的施工安全与周边环境稳定。

关键词：复杂地质；水利工程；深基坑；支护技术；地下水控制

引言

水利工程是国家经济与民生的重要基石，其深基坑工程作为关键环节，直接影响结构安全、施工进度及周边环境。深基坑通常指开挖深度超 5 米或地质、环境复杂的基坑，具有强区域性、高个性和显著时空效应。所谓“复杂地质条件”，泛指对基坑稳定构成严重威胁的地质组合，如深厚软弱土层（淤泥等）、高水位富水地层、孤石或岩土交界面、岩溶断层及破碎带等，易引发失稳、变形失控甚至工程事故。常规支护方法在此类条件下往往失效，亟需针对性技术对策。因此，系统研究复杂地质下深基坑支护技术，兼具理论价值与现实紧迫性。本文将从普适视角，全面梳理核心技术、设计理念与管理策略，为同类工程提供理论参考与实践指导。

1 深基坑支护结构选型原则与影响因素

支护结构的合理选型是整个深基坑工程成功与否的先决条件。在复杂地质条件下，这一决策过程尤为关键，必须建立在对多种因素进行综合研判的基础之上。

1.1 核心选型原则

支护结构选型应始终遵循“安全可靠、技术可行、经济合理、施工便捷、绿色环保”的基本原则。其中，安全可靠无疑是首要前提，任何设计方案都必须确保在各种工况下，支护结构自身及周边环境均处于稳定状态，并预留足够的安全储备，以防止发生坍塌、过大变形等安全事故。在此基础上，技术可行性要求所选方案必须与现场的地质、水文及施工条件相匹配，能够通过现有的技术手段顺利实施。经济合理性则是在满足安全

和技术要求的前提下，对不同方案进行成本效益分析，选择综合造价最优的方案，避免不必要的浪费。同时，施工便捷性关乎工程进度与质量控制，过于复杂的工艺会增加施工难度和不确定性，因此应优先考虑工序简洁、易于质量控制的方案。最后，绿色环保作为现代工程建设的时代要求，需优先选用低噪音、低振动、少污染、可回收的材料与工艺，最大限度减少对生态环境的负面影响。

1.2 关键影响因素

支护结构的最终确定，是多方面因素共同作用的结果。地质与水文地质条件是最根本的决定性因素，土层的物理力学参数、地下水的赋存状态以及是否存在不良地质体，直接决定了支护结构需要抵抗的土压力、水压力大小及分布形式。基坑自身的几何特征，包括开挖深度、平面形状、长宽比等，也深刻影响着支护方案的选择，深度越大，对支护结构的强度和刚度要求越高，而不规则的平面形状可能导致应力集中，需特殊处理^[1]。此外，基坑周边环境的敏感性至关重要，当邻近既有建筑物、重要管线、交通干道或历史遗迹时，对支护结构的变形控制要求极为苛刻，此时刚度大、变形小的支护形式通常是首选。主体结构的设计同样不可忽视，因为支护结构有时可与主体结构相结合，这不仅能节省投资，还能缩短工期，因此主体结构的形式、基础类型及施工顺序也是选型时必须考虑的因素。最后，施工工期的紧迫程度与季节气候等外部条件也会对方案产生影响，在工期紧张或面临雨季、冻土期等不利气候条件下，需选择适应性强、施工速度快的方案。

2 主要深基坑支护技术及其适用性分析

针对复杂地质条件,工程实践中发展并应用了多种有效的支护技术。每种技术都有其独特的机理、优势和适用范围。

2.1 地下连续墙

地下连续墙是在泥浆护壁下分段成槽、吊放钢筋笼并浇筑混凝土形成的连续地下墙体,具有整体性好、刚度大、防渗性强等优点,既能有效控制基坑变形,又可兼作主体结构外墙,广泛应用于软土、高水位及变形控制严苛的城市核心区。施工始于 C25 混凝土导墙(厚约 200mm),确保成槽精度。成槽依赖高性能泥浆,通常由膨润土、纯碱和 CMC 配制,比重控制在 1.05-1.15,以平衡土压并悬浮渣土;超深槽(>30m)需采用超声波纠偏保障垂直度。成槽后须彻底清孔,沉渣厚度控制在 10cm 以内,并通过导管法水下浇筑混凝土,首盘混凝土量需确保导管埋入混凝土 $\geq 1\text{m}$,以隔绝泥浆、保证接头质量。

2.2 灌注桩排桩支护

灌注桩排桩是在基坑周边钻孔、下放钢筋笼并浇筑混凝土形成的挡土结构,常配冠梁及内支撑或锚索以增强整体性。该技术适应性强、工艺成熟、成本低于地下连续墙,应用广泛。但在高水位砂层中易渗漏,需结合高压旋喷桩等止水帷幕形成封闭防水体系。成孔可采用旋挖钻、冲击钻或回转钻,依地层硬度和孤石含量选择。水下混凝土浇筑是关键:导管直径 250-300mm,使用前须通过不低于 1.5 倍孔底静水压力的水密试验;浇筑时导管埋深应控制在 2-6m,过浅易夹泥,过深易“埋管”。混凝土需良好和易性,坍落度 180-220mm,并掺缓凝剂,确保初凝前完成整桩浇筑。

2.3 复合土钉墙

在复杂地质条件下,单一的土钉墙往往难以满足要求,由此衍生出复合土钉墙技术。其核心思想是将土钉墙与其他支护元件(如微型桩、预应力锚杆、止水帷幕)相结合。例如,在软弱土层中先行施作一排微型桩,再在其上施作土钉墙,微型桩可起到超前支护和限制初始变形的作用;在高水位地区,则需先形成有效的止水帷幕,再进行土钉施工。这种组合方式极大地拓展了土钉墙的适用范围,使其成为一种经济高效的支护选择,特别适用于对造价敏感且地质条件并非极端恶劣的水利工程深基坑项目^[2]。土钉的成孔直径通常为 100-150 毫米,注浆采用水泥净浆,水灰比约为 0.4-0.5,注浆压

力需达到 0.5-1.0 兆帕,以确保浆液充分填充孔壁与土体间的空隙并形成一定范围的加固体。面层通常采用挂网喷射混凝土,厚度 80-100 毫米,内配双向钢筋网,以有效约束土体局部变形。

2.4 冻结法

冻结法是一种特殊的临时支护技术,通过在基坑周围布置冻结管,循环低温冷媒(如-28℃至-30℃的盐水或-196℃的液氮),使周围土体中的水分冻结,形成一个封闭、高强度、不透水的冻结壁。该技术特别适用于富含地下水的软弱地层(如流沙、淤泥)、城市密集区以及需要穿越既有结构下方的工程。冻结壁的厚度设计是核心,需根据地压、水压及土体热物理参数进行热工计算,通常采用经验公式或数值模拟确定。冻结管的布置间距一般为 0.8 至 1.2 米,呈梅花形或环形排列,以确保冻结壁的均匀性和完整性。冻结过程分为积极冻结期和维护冻结期,前者旨在快速形成设计厚度的冻结壁,后者则维持其稳定直至结构永久封闭。尽管冻结壁的强度和密封性极高,能有效隔绝地下水并提供强大的侧向支撑,但其能耗巨大、成本高昂,且解冻后土体会发生融沉,对周边环境可能产生二次影响,因此需谨慎评估其综合效益与潜在风险。

2.5 高压旋喷桩

高压旋喷桩是利用高压泵将水泥浆液通过钻杆端部的特殊喷嘴高速喷射,同时旋转提升钻杆,利用射流的冲击力切削土体,并与土体充分搅拌混合,从而形成具有一定强度和低渗透性的圆柱状加固体。多个旋喷桩相互咬合即可形成连续的止水帷幕或重力式挡墙。该技术施工占地小、振动和噪音低,对周边环境干扰小,特别适用于狭窄场地和既有建筑附近。其核心施工参数包括喷射压力、提升速度和旋转速度^[3]。三重管法的水压可达 35-40 兆帕,浆压为 1-3 兆帕,气压为 0.5-0.7 兆帕;提升速度通常控制在 10-25 厘米/分钟,旋转速度为 10-20 转/分钟。水泥浆液的水灰比一般为 0.8-1.5,水泥掺量依据地层情况,通常为被加固土体重的 15%-25%。它常被用作其他支护结构(如排桩)的止水补充,也可独立用于较浅的基坑支护。但其在砾石含量高的地层中成桩效果不佳,且成本相对较高,这些特点决定了其在支护体系中的特定角色和应用场景。

3 关键配套技术体系

3.1 地下水控制技术

“治基坑,先治水”。在复杂地质条件下,地下水

的有效控制往往是工程成败的关键。主要技术包括降水、截水和回灌。降水通过在基坑内外设置井点,将地下水位降至开挖面以下,疏干土体,提高其抗剪强度,但大规模降水可能引起周边地面沉降,需谨慎使用。截水则是通过设置止水帷幕来阻隔基坑内外的水力联系,从源头上阻止地下水流入基坑,这是保护周边环境最有效的方法。回灌技术则是在降水的同时,在基坑外围设置回灌井,将部分抽出的地下水经过滤后重新注入含水层,以维持基坑外侧的地下水位,有效减缓因降水引起的地面沉降。将降水、截水与回灌有机结合,实现“抽灌平衡”,是兼顾工程需求与环境保护的先进理念。

3.2 施工监测与信息化技术

深基坑工程是一个动态变化的过程,理论计算与实际情况难免存在偏差。因此,必须建立完善的施工监测系统,实现信息化施工。监测内容主要包括支护结构的顶部水平位移与沉降、深层水平位移(测斜)、支撑轴力、锚杆拉力、周边地表及建筑物沉降、地下水位变化、土压力及孔隙水压力等。其目的在于验证设计参数的合理性,实时掌握基坑及周边环境的变形与受力状态,并及时发现险情征兆,为动态设计调整和应急响应提供科学依据^[4]。信息化施工的核心是将监测数据实时反馈给设计和施工单位,形成“监测-分析-决策-调整”的闭环管理。当监测数据接近预警值时,立即采取加强支护、调整开挖顺序或速率等措施,将风险扼杀在萌芽状态,从而实现对工程全过程的主动、精准管控。

3.3 绿色施工技术

在“双碳”目标背景下,深基坑工程也需践行绿色发展理念。这体现在多个方面,例如优先选用可循环利用的钢材(如H型钢、钢管支撑)替代一次性混凝土支撑,并推广使用高性能、低能耗的新型支护材料。在施工过程中,应优化施工组织,减少机械设备空转,并采用低噪音、低振动的施工工艺(如静压桩、旋挖钻)以降低对周边社区的干扰。同时,对施工废水进行沉淀处理后循环利用,可以有效节约水资源。此外,对钻孔泥浆、废弃混凝土等施工废弃物进行分类处理和资源化利用,也是减少环境污染、实现可持续发展的重要举措。

4 施工风险分析与管理

复杂地质条件下的深基坑工程是典型的高风险项目,必须建立全过程的风险管理体系。这一过程始于风险识别,在施工前系统性地梳理可能存在的风险源,如地质勘察误差、支护结构失效、地下水突涌、周边建筑沉降超限、恶劣天气影响等。随后进行风险评估,对识别出的风险进行定性和定量分析,确定其发生的可能性和后果严重程度,从而划分风险等级。针对高等级风险,必须制定专项控制措施,例如对于高承压水风险,需进行专门的抗突涌验算,并准备应急封堵预案;对于邻近重要建筑,需制定严格的变形控制标准和应急预案。最后,编制详尽的专项应急预案,明确应急组织、物资、通讯和处置流程,并定期组织演练,确保一旦发生险情,能够迅速、有效地进行处置,最大限度减少损失,保障人员和财产安全。

5 结语

复杂地质条件对水利工程深基坑支护提出严峻挑战。本文研究表明:首先,支护方案必须“因地制宜”,无普适技术,成功关键在于精准匹配地质条件;其次,单一技术难以应对多重风险,复合支护体系(如“排桩+止水帷幕+内支撑”)将成为主流,通过技术融合实现协同增效;再次,“动态设计、信息施工”是核心方法论,依托实时监测数据动态优化设计与施工,可主动管控风险;最后,工程应兼顾安全、绿色与高效,在保障安全前提下推行绿色施工、优化资源,推动可持续发展。综上,唯有以系统思维整合技术、强化全过程精细化管理,方能有效应对复杂地质挑战,确保水利深基坑工程安全顺利实施,支撑国家重大基础设施建设。

参考文献

- [1] 魏久坤. 水利工程深基坑支护技术在复杂地质条件下的应用研究[J]. 水上安全, 2025, (22): 193-195.
- [2] 刘金豹. 复杂地质条件下水利工程深基坑开挖与支护技术创新[J]. 水利技术监督, 2025, (12): 325-327+340.
- [3] 孟博霞. 复杂地质条件下水利工程深基坑复合支护施工技术[J]. 河南水利与南水北调, 2025, 54(09): 40-41.
- [4] 许琨. 水利工程基坑支护施工技术优化研究[C]// 江西省汽车工程学会. 工程技术创新发展学术研讨会论文集(第一册). 新疆宏远建设集团有限公司, 2026: 1394-1397.