

复杂地质环境下的岩土工程施工技术研究

文 / 杨晓萌 江苏省环境地质调查大队

摘要: 复杂地质环境下的岩土工程施工技术作为工程建设领域的重要课题,其安全性和可靠性直接关系到工程质量。本文以软土地基、流沙层、溶洞等复杂地质条件为研究对象,针对施工过程中支护结构失稳、地基变形过大、地下水控制困难等技术难题,从地质勘察、施工工艺、支护技术和信息化管理等方面进行系统性研究和分析并提出相应的技术优化策略,旨在为复杂地质环境下的岩土工程施工提供技术支撑和实践指导。

关键词: 复杂地质环境; 岩土工程; 施工技术; 支护加固; 信息化施工

【DOI】 10.12254/j.issn.2096-6539.2025.07.026

引言

《“十四五”工程勘察设计行业发展规划》明确提出要推进岩土工程新技术研发和推广应用,特别强调在复杂地质条件下的施工安全控制。面对城市地下空间开发、重大基础设施建设等工程需求,传统岩土工程施工技术在复杂地质环境下显现诸多局限性。因此,创新施工技术、提升施工质量已成为行业发展的必然要求,对确保工程安全、提高建设效率具有重要意义。

一、复杂地质环境下的岩土工程施工技术

复杂地质环境下的岩土工程施工技术体系是一个多层次、系统性的技术集成,涵盖了从地基处理到结构支护的全过程解决方案。在深基坑工程领域,采用复合支护体系已成为主流趋势,如地下连续墙配合内支撑体系、预应力锚索与土钉墙组合等技术方案,能够有效应对深基坑变形控制难题。地基处理技术方面,根据地质条件的差异化特征,可选用高压旋喷桩、水泥搅拌桩、CFG桩等多种工艺并结合真空预压、堆载预压等荷载调节技术,实现地基承载力的优化提升^[1]。在桩基础施工领域,钻孔灌注桩因其适应性强、承载力高等优势被广泛采用,同时,预制桩在特定工程条件下也具有施工周期短、质量可控的独特优势。此外,各类新型注浆技术和智能化施工监测手段的应用,进一步提升了岩土工程施工的精准度和可控性。

二、复杂地质环境下的岩土工程施工技术面临的挑战

(一) 地质条件复杂多变

复杂地质环境的多变性体现在地层结构、岩性特征和水文条件等多个维度上。在地层结构方面,尤其是江苏沿海地区,常见软土与砂层互层分布的复杂地层构造,导致地基承载力和变形特性呈现明显的非均质性。特殊地质体的存在,如古河道、溶洞、孤石等,更增加了工程施工的不确定性。这些地质特征往往在勘察阶段难以全面查明,给施工方案的制定带来极大挑战。地层岩性的差异性也直接影响施工工艺的选择和参数确定。例如,在软土地层中,高含水量、高压缩性和低强度的特点使得传统的施工方法难以满足工程要求。软土层的流变特性和触变性质,导致开挖后地层强度显著降低,增加了

基坑失稳的风险。同时,软土层与砂层的交互分布,使得地下水控制难度加大,常常需要采用多级降水或止水帷幕等综合措施。

地下水的分布特征、水位变化规律以及水动力条件,都会对施工产生重要影响。多含水层结构下,各含水层之间的水力联系复杂,增加了工程降水和止水的难度。地下水位的季节性变化和潮汐影响,更要求施工方案具有足够的适应性和可调节性。

(二) 施工条件恶劣

施工条件的恶劣性主要表现在场地环境、气候因素和施工空间等方面的制约。在场地环境方面,许多工程位于城市密集区域,周边建筑物林立,地下管线错综复杂,这不仅限制了大型机械设备的进场和布置,还增加了施工过程中对周边环境影响的控制难度,特别是在既有建筑物附近进行深基坑开挖时,需要严格控制地层变形,避免对周边建筑物造成不利影响。

气候因素的影响同样不容忽视,季节性降雨会导致地下水位升高,增加基坑涌水和管涌风险;雨季施工还会影响土体性质,降低地基承载力。高温天气则会加速混凝土收缩,影响结构质量;而寒冷天气则可能导致施工材料性能下降,影响施工进度。这些气候因素要求施工组织具有较强的预见性和应变能力。施工场地空间的局限性也带来诸多挑战,狭小的作业面积限制了施工设备的选择和布置,增加了工序组织的难度,同时受场地条件限制,常规的支护结构和降水系统的布置可能无法满足设计要求,需要采用特殊的施工工艺或定制化的设备。

(三) 技术要求高

复杂地质环境下的岩土工程施工对技术水平的要求体现在方案设计、工艺选择和参数控制等多个环节。在方案设计阶段,需要充分考虑地质条件的复杂性和施工环境的约束,制定兼具安全性和经济性的施工方案。施工工艺的选择需要综合考虑多种因素,如在软土地基处理中,不同工艺的适用条件、处理效果和经济性存在显著差异。高压旋喷桩技术虽然具有较强的适应性,但其参数控制要求严格;真空预压技术虽然环保效果好,但施工周期较长。施工参数的确定和调控也是技术难点,以深基坑支护为例,

支护结构的选型、嵌固深度的确定、支撑体系的布置等，都需要通过详细的计算分析和经验判断。在施工过程中，还需要根据监测数据及时调整施工参数，确保支护结构的安全性和变形控制在允许范围内，这种动态优化过程对技术人员的专业素养提出了极高要求。

（四）质量控制难度大

质量控制的难度主要源于施工过程的复杂性和质量检验的特殊性。在施工过程中，由于地质条件的不确定性，即便采用相同的施工工艺和参数，也可能出现质量差异。以钻孔灌注桩为例，桩身质量受钻进工艺、泥浆性能、混

凝土浇筑等多个环节的影响，任何一个环节的偏差都可能导致桩基础出现缺陷。质量检验方法的局限性也增加了控制难度，许多岩土工程结构都处于地下，完工后难以直接观察和检测。常规的质量检验方法，如静载试验、超声波检测等，都存在一定的局限性。例如，静载试验虽然可以较准确地评价桩基承载力，但试验成本高，且无法全面检测所有桩基。此外，质量控制还面临施工工序衔接的挑战，岩土工程施工往往涉及多个专业工序，各工序之间存在紧密的联系，如在基坑工程中，支护结构施工、降水系统运行、土方开挖等工序的合理衔接直接影响工程质量（如图1）。

复杂地质环境下的岩土工程施工技术面临的挑战

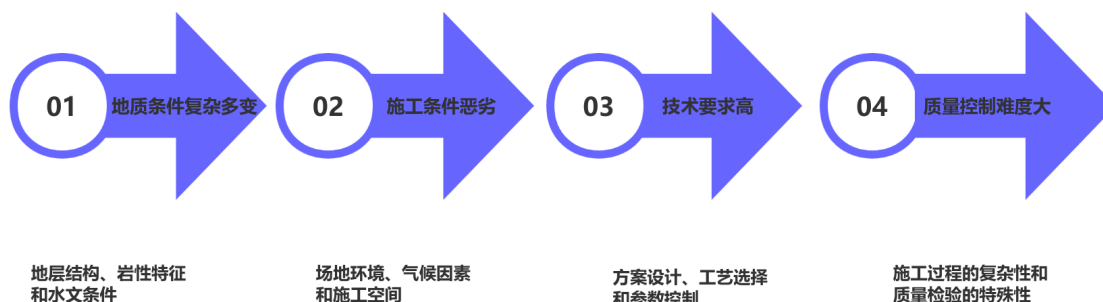


图1：复杂地质环境下的岩土工程施工技术面临的挑战

三、针对复杂地质环境下的岩土工程施工技术挑战的策略优化

（一）加强地质勘察

地质勘察是岩土工程施工的前提和基础，其精准度直接影响工程方案的可行性和经济性。根据住房和城乡建设部发布的《2023年全国工程勘察设计统计公报》显示，2023年度勘察设计领域的市场规模达到53141.9亿元，较往年仅微增0.6%。值得关注的是，在当前市场环境下，仅有八分之一的企业达成年度经营目标，绝大多数企业面临业绩下行压力，其中五分之一的企业甚至遭遇了超过30%的营收跌幅。这一数据凸显了行业发展的严峻挑战，也反映出提升勘察质量和效率的迫切需求。

在具体实践中，应构建“物探+钻探+原位测试+室内试验”的多维度勘察体系。采用地震波反射法、电法等物探技术进行快速普查，精确划分地层分布范围；重点区域布设钻探点，钻探深度应满足地基影响深度要求，一般不小于基坑开挖深度的2倍。同时，开展静力触探、标准贯入、旁压等原位测试，获取土层工程性质参数。根据《城乡规划工程地质勘察规范》（CJJ 57-2012）的要求，在软土地层发育区域，勘察点间距应控制在15—20米范围内，且应在每个主要构筑物范围内布设不少于3个勘察点。针对特殊地质体，如软土、流沙层等，需进行专项勘察，采集连续土样进行室内试验，全面评价其工程特性。完整的勘察资料应包括钻孔柱状图、工程地质剖面图、各项试验成果，以及地下水动态观测数据等。

（二）选择合适的施工技术和设备

基于精准的地质勘察成果，科学选择施工技术和设

备是确保工程质量的关键环节。新型智能化施工装备在提升施工精度和效率方面具有显著优势，特别是在软土地基处理领域，装配式真空预压系统的推广应用能使预压周期较传统工艺缩短且沉降控制精度提高。

在实际工程中，应根据地质条件特征选择适宜的施工工艺组合。对于软土地层，可采用真空预压与堆载预压联合技术，配备智能化真空度监测系统，实现预压过程的精准控制。该系统通过分区域布置真空压力感应器，结合自动化控制装置，可实时调节各区域的压力分布，确保整体沉降的均匀性。系统还配备了自动化排水装置，能够及时排出压密过程中产生的孔隙水，加快固结进程。在砂层地基处理中，优先选用高压旋喷桩技术，配备自动记录搅拌参数的智能化旋喷设备，确保桩体的均匀性。现代化的旋喷设备配备了智能控制系统，可根据地层特性自动调节喷射压力、提升速度和旋转角度，确保注浆均匀和桩体质量。在复杂地层中设备能够根据钻进阻力的变化自动调整施工参数，有效应对地层变化带来的挑战。深基坑支护则需因地制宜，在狭小空间宜采用自钻式土钉墙技术，配备全液压多功能钻机；对于深度超过15米的基坑，推荐采用液压成槽机施工的地下连续墙并配备超声波检测仪实时监控槽壁垂直度。此外，新一代智能液压挖掘机的应用，通过北斗定位系统实现厘米级精确开挖，大幅提升了施工质量和效率。相关设备选型应重点关注设备功率匹配性、作业半径适应性以及智能化控制水平，确保设备性能与工程需求相匹配^[2]。在功率匹配方面，需综合考虑地层特性和施工工况，选择适当功率等级的设备；作业半径则需要根据场地条件和施

工需求进行优化；智能化控制系统的选择则要注重数据采集能力和自动化程度，确保能够满足精细化施工的要求。同时，还要考虑设备的维护便利性和零部件供应保障，确保设备在施工过程中的持续可靠运行。

（三）加强支护与加固

支护与加固工程是确保岩土工程安全的核心环节，其重要性随着工程规模的扩大和地质条件的复杂化而日益凸显。采用综合支护体系的深基坑工程其变形控制效果较单一支护方式具有明显地提升。针对不同工程地质条件和施工环境，采取针对性的支护加固措施至关重要。

在具体实施策略上，应建立“主动支护+被动防护+实时监测”的三位一体支护体系。对于深度超过20米的深基坑，优先采用地下连续墙作为主要支护结构，其厚度应通过有限元分析确定，一般不小于800毫米，混凝土强度等级不低于C35。地下连续墙应采用液压成槽设备施工并通过超声波检测确保成槽垂直度偏差控制在 $\frac{1}{300}$ 以内。内支撑系统宜采用热轧H型钢并预加轴力以减小支护结构变形。在软土地层发育区域，应在坑底设置多道隔水帷幕，帷幕深度需通过渗流分析确定，确保具备足够的抗渗性能。对于基坑周边存在重要建筑物或市政管线的情况，应采取隔离防护措施，避免基坑开挖对相邻结构产生不利影响。同时，编制应急预案并组织相关人员培训与演练，提高快速响应和处置突发事件的能力。实时监测是支护安全的重要保证，在关键部位如降水井周边、支撑端头等处，可采用双液浆体注浆技术进行二次加固，注浆压力宜控制在1.5-2.0MPa范围内。还应建立完善的监测体系，在关键位置布设测斜管、测压管和沉降观测点，实现对支护结构和周边环境的全方位监控。根据《建筑基坑工程监测技术标准》（GB 50497-2019）的要求，一级基坑监测点间距不应大于10米，监测频率在开挖阶段不应少于每日一次。随着新材料、新技术的发展，绿色、智能化将成为支护与加固技术发展的重要方向。

（四）实施动态设计与信息化施工

随着数字建筑产业的快速发展，动态设计与信息化施工已成为建筑行业转型升级的必然趋势。根据《2023—2024年中国数字建筑产业发展研究年度报告》数据显示，2023年建筑建造施工数字化应用中，精细化管理应用规模达157.5亿元，占比65.8%；智能化建造应用规模63.4亿元，占比26.5%。这表明以精细化管理为目标的数字化转型已成为行业发展的主流模式。

在具体实践中，数字工地建设已从最初的“数据人为录入、大量硬件堆砌、聚焦监管观摩”发展到“数据自动采集、业务驱动应用、数据驱动管理”的高级阶段。现代化的数字工地系统实现了岗位作业数字化、现场生产工业化、业务管理一体化。通过物联网技术实现施工现场的数据自动采集，借助人工智能技术进行数据分析和决策支持，实现了从“如何管”到“如何做”的价值跃迁。在设计与施工协同方面，基于BIM技术的一体化

解决方案实现了设计意图的精准传递，通过数字驱动确保施工过程的精细化管理。这种协同模式不仅提高了项目效率，也为工程质量控制提供了有力保障。通过数字技术赋能，实现了项目全过程的标准化、规范化和智能化管理，为复杂地质环境下的岩土工程施工提供了有力的技术支撑（如表1）。

表1 实施动态设计与信息化施工

发展阶段	早期阶段	高级阶段
数据处理方式	数据人为录入	数据自动采集
硬件应用	大量硬件堆砌	智能化设备集成
管理重点	聚焦监管观摩	数据驱动管理
应用形式	<ul style="list-style-type: none"> • 单点监控 • 简单记录 • 被动管理 	<ul style="list-style-type: none"> • 岗位作业数字化 • 现场生产工业化 • 业务管理一体化 • 物联网技术 • 人工智能技术 • BIM技术
核心技术	基础信息化	
管理目标	如何管	如何做
应用效果	基础监管	<ul style="list-style-type: none"> • 设计意图精准传递 • 施工过程精细化管理 • 项目全过程智能化

四、复杂地质环境下的岩土工程施工技术实践案例

某城市地下综合管廊项目（2023年）是典型的复杂地质环境工程，工程位于沿海软土地区，基坑开挖深度达18米，地层以淤泥质软土和粉细砂互层为主，地下水位埋深2.5米，且受潮汐影响明显。项目北侧紧邻既有地铁线路，对变形控制要求严格。项目团队通过高密度物探和钻探结合的勘察方案，精确查明了场地内软土层分布规律和地下水补给通道。在支护设计中，采用1000毫米厚地下连续墙作为主要支护结构，并创新性地应用了变刚度内支撑系统，实现支护结构变形的精准控制。最终项目实现了基坑最大水平位移控制在18毫米以内，周边地表沉降不超过15毫米，各项技术指标均优于规范要求，为同类工程提供了可借鉴的成功经验。

结语

通过对复杂地质环境下岩土工程施工技术的系统研究，证实了信息化手段、智能监测等新技术在工程实践中的重要价值。展望未来，随着5G、物联网、人工智能等技术的深度应用，岩土工程施工将向着智能化、精准化方向发展。建议进一步加强新材料、新工艺的研发，推进BIM技术与传统施工的深度融合，构建更加完善的施工质量控制体系，为工程建设事业的可持续发展提供有力支撑。

参考文献

[1] 张萌, 胡新元. 复杂地质环境背景下岩土工程勘察技术研究 [J]. 中国新技术新产品, 2024, (20): 96-98.
 [2] 黄辉雄. 复杂地质条件下岩土工程勘察设计和施工的质量控制因素分析 [J]. 西部探矿工程, 2023, 35(10): 1-3.

作者简介：杨晓萌（1989.07），女，汉族，山东省淄博市人，本科，中级工程师（水工环），主要从事工作：地质调查研究。