

复杂地质条件下预制管桩施工技术应用研究

王凯 韩静 徐勇

中建八局总承包建设有限公司，上海，200120；

摘要：预制管桩因施工快、承载优、影响小，广泛应用于基础工程建设。但复杂地质条件下的施工面临诸多挑战，如软弱地基、含水层、孤石夹层等，直接影响桩基质量与工程安全。本文系统分析复杂地质条件分类与特征，梳理国内外不同地质环境中预制管桩施工的技术进展，归纳施工工艺适应性调整、装备创新、质量控制及风险管控体系。基于大量案例与数据，深入剖析常见难题及应对策略，涵盖桩身完整性保障、沉桩控制等关键技术。结合工程实践，提出优化路径与创新方向，为类似地质环境下的设计与施工提供参考。研究指出，依靠科学勘察、精细工艺设计与动态监测，才能保障施工高质量与安全性。

关键词：复杂地质条件；预制管桩；施工工艺；地基处理；质量控制；风险管理

DOI：10.69979/3029-2727.26.02.055

引言

随着城市化推进与基建规模扩大，预制管桩作为高效绿色基础施工技术，广泛应用于工业与民用建筑、港口、市政道路及桥梁工程。它施工周期短、承载力强、工地污染少，且成品标准化、安装工业化趋势明显，是现代基础工程的重要选择。不过，复杂地质条件下的桩基工程面临诸多挑战，如土体力学性质多变、地下水位高、岩土组合复杂等。传统工艺在软弱地基、流塑土等地质条件下，易出现沉桩困难、桩体变形等问题，影响工程安全与后期使用。针对此，国内外在桩基适应性设计、装备升级等方面展开大量探索。数字化勘察、智能监测等新技术的发展，为高质量施工提供支撑。本文以多类型复杂地质条件为切入点，梳理国内外典型案例与技术路径，从地质适应性等方面探讨预制管桩的高效应用，为相关工程建设提供理论与技术参考。

1 复杂地质条件的分类与工程特征

1.1 软弱地基的典型特性及其对施工的影响

软弱地基多见于沿海滩涂、河湖淤泥、冲积平原和各类人工填土区，具有强度极低、压缩性大、孔隙比高、排水能力差等显著特征。受长期沉积和水分浸润影响，软弱地基内部结构疏松、固结不充分，微小扰动即可引发显著的塑性变形。预制管桩在此类地基中的沉桩过程尤为敏感，贯入时易因地基反力不足导致桩身倾斜、贯入度不达标，甚至桩顶局部隆起。此外，软土层厚度变化和分布的不均匀性，易在成桩后产生负摩阻力，增加桩基沉降风险。桩间互扰效应显著，密集布桩时邻桩区

土体扰动加剧，影响成桩轴心受力。为提高成桩质量，施工前应详细分析地质勘察数据，合理选择桩径、壁厚及沉桩工艺，并结合地基加固措施和桩端注浆，显著提升桩基承载力和整体稳定性，确保后期结构安全。

1.2 高地下水位及含水层的施工难点

高地下水位及丰富含水层在滨海、河漫滩及城市填埋区分布广泛，水文动力复杂，具有水头压力大、渗透性强、地下水位易变动等特性。预制管桩在高水位环境下施工，极易引发土体液化、流砂、管涌和局部坍塌等工程问题。沉桩过程中，孔隙水压力骤升，不仅妨碍桩端持力层形成，还削弱桩周摩阻力，降低桩基承载能力。含水层桩端密实度不足、止水困难、渗漏与“跑水”现象普遍，严重时会影响结构安全和后续运营。为有效应对上述问题，设计阶段需全面水文地质调查，科学评估地下水位波动和含水层厚度。在施工过程中应采用套管护壁、止水帷幕、正反循环泥浆护壁与降水等多重技术手段，实现分步沉桩和实时监控水位，确保沉桩过程受控和成桩质量达标。

1.3 夹层、孤石与卵砾石层的工程挑战

夹层、孤石和卵砾石层多出现在山地丘陵、冲积扇、阶地等复杂地貌单元，地质结构呈现高度非均质性。夹层厚度、倾角和力学性质变化大，孤石、砾石分布随机，局部区域硬度极高。沉桩过程中，常出现桩端贯入受阻、桩身局部应力急剧增大，甚至导致桩体损伤、弯曲或断裂等现象。孤石和卵砾石层的“跳跃式”阻力不仅影响沉桩效率，还可能破坏桩基完整性，严重威胁结构安全。

工程应结合详实的地质勘察，采用高功率锤击、强振动或静压设备，对孤石密集区域优先实施钻孔破碎或旋挖置换，必要时调整桩型和工艺参数。实时监测贯入阻力和桩体变形，动态调整施工工艺，是提升复杂夹层与卵砾石地层桩基适应性和可靠性的关键。

2 复杂地质条件下预制管桩施工工艺分析

2.1 施工工艺的适应性选择与流程优化

在复杂地质条件下，预制管桩施工工艺的合理选择是确保工程顺利推进的关键。不同地质环境下，沉桩工艺需针对性调整。锤击沉桩凭借冲击力强，适用于硬质土层及夹有孤石的地基，能够有效突破坚硬障碍，但振动和噪声较大，对周边结构有一定影响。振动沉桩适用于饱和砂土、流塑土层等松散地基，其低冲击、连续振动利于减少桩体损伤，提高沉桩效率。而静压沉桩由于扰动小、振动弱，对软弱地基和城市密集区域尤为适用，可显著降低沉桩过程中的环境风险。流程优化需充分考虑地质分层、桩基布置、沉桩顺序与参数，结合数字化管理，实现对工艺参数如沉桩速度、锤击能量、静压力等的精细化调控。通过智能排布和分区作业，优化工序衔接，实现工艺动态调整，保障成桩质量一致性和安全性，有效应对地质复杂多变的施工环境。

2.2 桩基成桩质量控制关键技术

成桩质量控制是预制管桩施工的核心环节，直接关系到结构安全与工程耐久性。在复杂地质环境下，需对桩位精度、垂直度、贯入深度、桩身完整性以及桩端持力层等指标进行全过程、全方位监控。实时贯入阻力监测系统可准确反馈沉桩过程中的土层变化与阻力异常，及时调整工艺参数。桩身完整性检测常用低应变、高应变法与声波透射等无损检测技术，能够识别桩体断裂、缩径、蜂窝等缺陷。针对软弱地基，应加强静载试验、锚桩拉拔等力学性能评估，确保桩基承载力达标。在孤石或卵砾石夹层中，需重点监测桩身局部受力，通过加密监测点与多通道检测，有效预防桩体损伤。全过程质量管控需结合技术交底、过程动态监测和事后质量评估，确保成桩效果符合设计及规范标准。

2.3 创新施工装备与智能化监控应用

现代预制管桩施工装备的不断创新，是提升复杂地质条件下施工效率和质量的核心动力。重型液压锤具备强大冲击能力，适应坚硬和复杂地层，变频振动器可根

据地质条件调节振动频率，提升贯入适应性，高压静压机适合对环境敏感的软弱地基，实现低扰动、高精度沉桩。旋挖钻机则有效应对孤石、卵石层的障碍，为后续沉桩创造良好条件。智能化监控系统通过对沉桩力、桩体变形、地下水压力等多参数实时采集和分析，实现沉桩过程全息动态监测。BIM、无人机航测、地质雷达、GIS 等数字化工具的集成应用，实现了复杂工况下的数据共享与智能决策，为施工过程中的风险预警和工艺优化提供科学支撑，推动预制管桩施工向信息化、自动化、精细化方向发展。

3 复杂地质条件下的地基处理与桩基加固

3.1 地基加固技术的选用与适应性分析

复杂地质条件下，地基承载力与稳定性难以通过单一预制管桩结构完全保障，因此多需采用地基加固技术与桩基协同设计。高压旋喷法与深层搅拌法适用于软土地基，通过注入水泥浆液或掺拌固化剂，改善土体结构与力学性质，有效提升地基强度与均匀性，显著减少不均匀沉降。碎石桩和水泥土桩常与预制管桩形成复合地基体系，碎石桩强化排水和抗剪性能，水泥土桩则优化整体承载力和抗变形能力。在含有孤石、卵石夹层地基中，碎石桩能有效填充土体空隙，提高持力层连续性。化学加固如硅化处理等主要应用于地下水位高、化学成分特殊的场地。技术选用应综合考虑地质勘察结果、结构荷载需求、工期、经济性及现场可施工性，实现地基安全、经济与可持续发展之间的最佳平衡。

3.2 桩端持力层处理与桩周土体改良

在高水位区或弱持力层地基，桩端与桩周处理措施对桩基长期性能具有决定性作用。桩端注浆通过注入高强度水泥浆液填补桩底持力层空隙，提高密实度，增强桩端与地基的力学耦合，提升竖向承载力与抗拔能力。扩底技术利用桩端机械扩底装置增大承载面积，尤其适合持力层厚度有限或对抗拔有特殊要求的工程，显著提高桩基安全冗余。端板加固则在桩尖设置刚性板体，提高桩端承压分布的均匀性。桩周土体改良如喷射注浆、深层搅拌等，能够增强桩周土体的物理力学性能，提高桩周摩阻力，减少桩体侧移与沉降。针对不同地质环境，应细致分析土层结构，合理选配加固与改良方案，严控施工工艺参数，确保桩基系统的整体稳定与安全。

3.3 桩基沉降控制与变形监测体系

在复杂地质条件下,桩基沉降和结构变形管理是工程安全管理的重点。施工阶段应设置分层沉降计、桩顶测斜仪、地表沉降监测点等设备,建立多级、动态的变形监测体系,实时采集沉降与位移数据。对于软弱地基及大厚度填土区域,沉降具有长期性和阶段性,需结合监测数据开展变形趋势分析与模型反演预测,适时调整施工顺序和工艺参数。针对地层差异性显著的区域,可采用多级复合桩基结构或沉降预压工艺,分散不均匀沉降,降低结构内力集中风险。系统化的变形监控不仅有助于施工过程中的风险识别与工艺调整,也为工程后期运维和质量追溯提供了详实的技术数据支撑,实现工程全生命周期的安全保障。

4 复杂地质条件下施工风险防控与工程实践

4.1 地质勘察深化与施工前风险评估

地质勘察是确保复杂地质条件下预制管桩施工安全与科学设计的前提。面对地层分布复杂、夹层多变等特点,需采用高密度布点、多手段联合的勘察技术,如钻探、标准贯入、静力触探与地质雷达,系统获取各桩位土层结构、力学参数、地下水位及孤石分布等详实数据。勘察成果应精细化至每一根桩位,全面揭示影响成桩的关键地质风险点。依托详细勘察数据,开展系统的施工前风险评估,科学识别沉桩障碍、地表沉降、突涌水等潜在风险,并据此制定针对性的应急预案和施工组织方案,从源头提升施工过程的可控性和安全性,为后续各项施工工序顺利推进奠定坚实基础。

4.2 全过程施工动态管理与风险应对

在复杂地质环境下,桩基施工需推行全过程动态管理,强化风险预控与应急能力。项目实施各阶段应建立详实的风险台账,实时记录地质变化、施工异常、设备运行等核心数据,实现风险动态可追踪。针对沉桩过程中常见的桩身倾斜、贯入受阻、桩体损伤等问题,应预设应急处置机制,包括设备参数调整、工艺优化和桩体修复措施等,确保问题快速响应与妥善解决。依托智能监测平台,对沉桩力、桩身应变、地下水位、结构变形等关键指标实时采集与分析,实现异常自动预警与施工参数动态调整,有效降低突发风险。面对极端复杂地质或超深桩基工程,建议引入专家论证和第三方监理团队,提升项目决策的科学性和风险防控的权威性,为工程全周期安全稳定运行提供技术保障。

4.3 典型工程案例分析与经验总结

国内外诸多基础设施项目为复杂地质条件下预制管桩施工积累了宝贵经验。例如,南方沿海某港区项目因软弱淤泥层厚、地下水位高,采用高压旋喷+静压管桩复合工艺,显著提升了桩基承载力,减少了后期沉降。北方某铁路桥梁项目面对卵石夹层与孤石频现,通过钻孔预处理、重锤配合与实时监测联动,有效控制了桩体贯入路径和质量。上述案例表明,复杂地质环境下,唯有因地制宜、多措并举,才能确保预制管桩施工的高效、安全与经济性。工程实践还需不断总结经验,推动新技术、新装备、新材料的推广应用,持续提升基础工程的综合水平。

5 结语

复杂地质条件下的预制管桩施工是系统性技术挑战,涵盖地质勘察、桩基设计、施工工艺等多个环节。工程规模扩大、地质条件多样化,使传统工艺难以满足高标准的质安要求,需通过工艺创新、装备升级与管理优化,适应新型地质环境。本文系统梳理复杂地质条件分类与主要技术难题,深入分析施工工艺优化、质量控制、装备创新等关键技术路径,结合工程案例提出适应性强、效果显著的施工方案。未来,数字化、智能化和绿色施工理念深化,该领域发展空间广阔。唯有依靠精细化地质勘察、系统化工艺集成和全生命周期管理,才能保障基础工程安全可持续发展,为基础设施建设提供坚实技术支撑。

参考文献

- [1] 张群瑜. 复杂地质条件下预制管桩施工技术[J]. 散装水泥, 2023, (05): 149-151.
- [2] 张勇, 吕兵, 谢明朋, 等. 复杂地质条件下预制管桩施工技术的应用[J]. 建筑技术开发, 2021, 48(22): 87-89.
- [3] 崔青. 复杂地质条件场地中桩基技术的管理与控制[J]. 上海建设科技, 2016, (03): 25-28.
- [4] 郭强. 复杂地质条件下隧洞预制管片施工病害机理及加固研究[D]. 西安理工大学, 2020.
- [5] 陈智鸿, 蓝明红, 陈景镇, 等. 滨海地区复杂地质条件下植入法沉桩施工技术[J]. 施工技术(中英文), 2022, 51(13): 27-30.