 DOI: https://doi.org/10.12349/edc.v8i2.9294

Optimization of pile foundation construction technology for road and bridge under complex geological conditions

Xudong Xiong

China Railway 12th Bureau Group Fourth Engineering Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi, 710024, China

Abstract

As the critical load-bearing and load-transmitting structure in road and bridge engineering, pile foundation construction quality directly impacts bridge safety and durability. In complex geological conditions such as weak soil layers, karst cave areas, gravel layers, and strongly weathered rock formations, pile foundation construction often faces challenges including borehole formation difficulties, quality control issues, and high construction risks. Traditional techniques can no longer meet high-quality standards. Based on engineering practices, this paper analyzes major problems and influencing factors in pile foundation construction under complex geological conditions, and explores construction strategies adapted to such environments from aspects like geological feature identification, construction process selection, process control, and technical optimization. The study demonstrates that enhancing geological surveys, optimizing drilling and borehole formation techniques, improving quality monitoring, and implementing refined management can effectively improve the reliability and safety of pile foundation construction, providing technical support and practical references for road and bridge construction in complex geological environments.

Keywords

Road and Bridge Engineering; Complex Geological Conditions; Pile Foundation Construction; Construction Technology; Technical Optimization

复杂地质条件下道路桥梁桩基施工技术优化

熊旭东

中铁十二局集团第四工程有限公司，中国·陕西 西安 710024

摘　要

桩基作为道路桥梁工程中承载与传递荷载的关键结构，其施工质量直接影响桥梁的安全性与耐久性。在软弱土层、溶洞发育区、卵砾石层及强风化岩层等复杂地质条件下，桩基施工常面临成孔困难、桩身质量控制难及施工风险高等问题，传统工艺已难以满足高标准质量要求。本文基于工程实践，分析复杂地质条件下桩基施工的主要问题及影响因素，从地质特征识别、施工工艺选择、过程控制与技术优化等方面探讨适应复杂环境的施工策略。研究表明，通过强化地质勘察、优化钻进与成孔工艺、完善质量监测及精细化管理，可有效提升桩基施工的可靠性与安全性，为道路桥梁在复杂地质条件下的施工提供技术支撑与经验参考。

关键词

道路桥梁工程；复杂地质条件；桩基施工；施工技术；技术优化

1 引言

随着交通基础设施建设规模的不断扩大，道路桥梁工程逐渐向山区、丘陵区及地质条件复杂区域延伸。这些区域地层结构复杂、力学性质差异明显，对桥梁基础设计与施工提出了更高要求。桩基础因其适应性强、承载性能好，被广泛应用于道路桥梁工程中。然而，在复杂地质条件下，桩基施工过程中易出现塌孔、缩颈、断桩及混凝土离析等问题，严重影响桩基承载性能和结构安全。如何在复杂地质环境中优化桩基施工技术，提升施工质量和工程可靠性，已成为当前道路桥梁工程领域关注的重点。基于此，本文围绕复杂地质条件下道路桥梁桩基施工技术优化展开系统研究，具有较强的工程实践意义。

【作者简介】熊旭东（1997–），男，中国河北新乐人，本科，助理工程师，从事交通工程研究。

2 复杂地质条件对道路桥梁桩基施工的影响

2.1 复杂地质条件的主要类型及特征

复杂地质条件是影响桩基施工质量与安全的重要因素，其典型特征表现为地层结构多样、物理力学性质差异大、地下水条件复杂及地质构造发育。在软弱土层中，土体结构松散、孔隙比高、抗剪强度低，易在钻进过程中发生孔壁坍塌与沉渣堆积；在卵砾石层和砂层中，地层渗透性强且颗粒不稳定，易出现漏浆、缩孔等现象；而在岩溶及断裂破碎带区域，地层结构不连续、空隙发育，施工中常发生漏浆、塌陷

或设备卡钻问题。

2.2 地质复杂性对成孔质量的影响

成孔质量直接决定桩基成桩效果与结构承载能力，而复杂地质条件是成孔质量波动的主要诱因。在多种土层交替分布的地层中，钻具在钻进过程中受力不均，容易出现偏孔、扩孔或缩径等问题；当穿越软硬不均地层时，孔壁易因应力集中发生局部破坏。富水地层若泥浆比重或流变性能控制不当，将加剧水土流失和孔壁坍塌风险。漏浆现象还可能导致泥浆循环系统失效，影响护壁压力平衡。成孔质量下降不仅影响钢筋笼下放的顺利性，还会造成混凝土灌注不密实、桩身强度不均等后果。因此，应结合地质特征优化钻进参数与护壁技术，确保成孔质量的稳定可控，从而为后续工序提供可靠基础。

2.3 地质条件对桩基承载性能的影响

桩基的承载性能由桩端阻力和桩侧摩阻力共同提供，而二者的发挥程度与地质条件密切相关。在复杂地质环境中，若持力层性质不稳定或厚度变化大，桩端阻力可能分布不均，导致单桩承载性能差异显著。软弱夹层或填土层中桩侧摩阻力衰减明显，难以形成足够的侧向约束力。此外，岩溶及断裂带中的空洞与裂隙会造成桩端嵌固不足，降低桩基整体承载力。施工阶段若未充分考虑地质不均性，易出现桩身倾斜、桩端悬空或局部滑移等问题，影响结构长期安全性。为确保承载性能稳定，应在设计与施工中加强地质分层分析，合理确定桩长与嵌固深度，并采用静载试验或声波检测等手段验证桩基实际承载特性，从而保障桥梁结构的安全与耐久。

3 复杂地质条件下桩基施工中存在的主要问题

3.1 成孔稳定性不足问题

在软弱土层、饱和砂层及高地下水位地区，成孔稳定性是桩基施工中最易受影响的关键问题。由于地层抗剪强度低、渗透性强，传统钻孔工艺在成孔过程中容易导致孔壁坍塌、缩径或沉渣堆积等问题。尤其在泥浆护壁工艺中，若泥浆比重、黏度或胶体率控制不当，无法形成有效的静压平衡，极易诱发孔壁失稳。此外，护筒埋设深度不足、密封性差也会加剧孔口渗漏，导致泥浆性能下降。成孔失败不仅增加重复钻进与修孔的工作量，也直接影响后续混凝土灌注质量和桩身成型完整性。因此，应通过实时监测泥浆性能、优化钻进参数及采用分层护壁技术等措施，提高成孔稳定性，降低地层扰动风险，确保施工过程安全可控。

3.2 桩身质量控制难度大

复杂地质条件下，桩身混凝土质量控制成为施工管理的重点与难点。在深孔及高地下水位环境中，混凝土灌注容易出现离析、夹泥、断桩或缩颈等质量问题。这主要源于混凝土配合比设计不合理、导管密封性不足、灌注中断或导管提升速度控制不当。地下水对泥浆及混凝土界面的扰动，也会影响桩身密实性。为此，应在灌注前进行混凝土性能试验，优化配合比以提高流动性和抗离析性能；同时在施工中保持连续浇筑，严格控制导管埋深与提升节奏，避免气泡夹层与泥浆混入。通过全过程监测混凝土流量与孔内压力，可有效保证桩身混凝土的密实度和均匀性，从而提升成桩质量与承载性能。

3.3 施工安全风险突出

在溶洞发育区、软弱夹层或地下水丰富的复杂地质环境中，桩基施工的安全风险尤为突出。地质不均、孔壁坍塌、突水及地层滑移等现象若处理不当，可能导致设备倾覆、孔体失稳或桩基报废等严重后果。施工安全隐患往往源于风险识别不足和应急预案缺失。为降低风险，应在施工前开展详尽的地质勘察与风险评估，明确地层不良因素分布与可能诱发的灾害类型；施工过程中应加强实时监测与巡检，对孔壁变形、泥浆压力、地下水位变化等参数实施动态控制。一旦出现异常，应立即启动应急处置预案，如加密护筒、局部注浆加固或降低钻速等。通过建立风险预警与应急响应机制，可显著提高施工安全水平，确保复杂地质条件下桩基工程的稳定实施。

4 复杂地质条件下道路桥梁桩基施工技术优化措施

4.1 施工前地质勘察与方案优化

在复杂地质条件下，桩基施工的成败在很大程度上取决于前期地质勘察的充分性与施工方案的科学性。施工前应加大勘察深度与布孔密度，重点识别软弱夹层、溶洞发育区、地下水位变化及断裂破碎带等关键不良地质要素，通过钻探、原位测试及地球物理探测等手段，系统获取地层分布特征及物理力学参数，为施工决策提供可靠依据。以某山区高速公路桥梁工程为例，初勘阶段未充分揭示局部岩溶发育情况，补充勘察后发现桩端持力层起伏较大，若按原方案施工易产生桩端悬空风险。项目团队据此对方案进行优化，将原等径桩调整为局部嵌岩桩，并在高地下水位区配套设置降水与防渗措施，有效避免了成孔塌陷与承载不足问题。实践表明，在详实地质资料基础上开展多方案比选，从结构受力、地质适应性与施工可行性等方面进行综合优化，不仅可降低施工风险与成本消耗，还能从源头提升桩基施工的安全性与可靠性，为后续工序顺利实施奠定坚实基础。

4.2 成孔工艺与设备的优化选择

在软弱土层及高地下水位条件下开展桩基成孔施工时，孔壁稳定性往往成为制约施工质量与效率的关键因素。工程实践表明，单纯依赖泥浆护壁的旋挖钻工艺难以有效应对富水软土对孔壁的扰动，易引发塌孔与泥浆失效等问题。为此，部分工程逐步引入“全套管护壁与旋挖钻联合成孔”的技术模式，通过液压全回转套管先行下放形成刚性约束，再实施旋挖取土作业，可显著削弱地下水与软弱土体对孔壁的影响。在沿江软土地区的桥梁工程中，该工艺有效控制了成孔垂直度偏差，提升了成孔效率，显示出较好的适应性。在卵

砾石层及强风化岩层条件下，地层非均质性明显，单一钻进方式难以兼顾成孔质量与施工效率，旋挖钻与冲击钻的组合应用逐渐成为可行选择。通过在覆盖层采用旋挖成孔、在遇到大粒径卵砾石或硬质夹层时切换冲击破碎，再恢复旋挖取渣，可有效降低设备卡钻与偏孔风险。随着施工技术的发展，数字化与智能化成孔手段开始融入复杂地质桩基施工实践，通过对钻进参数的实时监测与分析，结合三维成孔模型的可视化管理，施工人员能够更早识别不良地质变化并及时调整工艺措施，从而实现成孔过程的精细控制，为复杂地质条件下桩基施工质量与安全提供更为可靠的技术保障。

4.3 混凝土灌注与质量控制技术优化

混凝土灌注是保证桩身完整性与承载性能的关键环节，其工艺控制水平直接决定桩基施工质量与使用安全。在灌注前，应结合桩径、孔深及地层条件合理设计混凝土配合比，确保混凝土具有良好的流动性、保水性与抗离析性能。以某跨河桥梁工程为例，桩基处于高地下水位环境，项目在灌注前通过试配调整水胶比并掺入减水剂，有效改善了混凝土在水下灌注条件下的稳定性。施工过程中采用导管法连续灌注，严格控制导管埋深，避免因提升过快引发断桩或夹泥现象。同时，通过实时监测混凝土灌注量与孔内泥浆置换情况，确保混凝土连续、均匀上升。灌注完成后，结合声波透射与局部钻芯取样检测桩身完整性，结果显示桩身密实度良好、缺陷率明显降低。该实例表明，通过针对性优化灌注工艺并强化全过程监测，可显著提升复杂条件下桩基施工的质量与耐久性。

5 施工管理与技术协同优化的实践应用

5.1 施工过程动态监测与调整

在复杂地质条件下开展桩基施工，必须建立完善的动态监测体系，以实现对施工全过程的实时控制。施工现场应配置泥浆比重、黏度、水位及孔壁稳定性等关键参数的在线监测装置，通过实时数据采集系统掌握成孔状态和地质变化情况。针对软弱土层或地下水丰富区域，应动态调整泥浆配比与循环速度，防止孔壁坍塌和涌水问题。施工过程中，当钻进阻力、泥浆比重或渗流压力出现异常波动时，应立即分析原因并优化钻进工艺，如调整钻具类型、钻进速度或加固措施。动态监测不仅能有效预防施工风险，还能为质量控制和后续分析提供数据支撑。通过将监测数据与数值模拟结果相结合，可实现施工过程的智能调控，确保桩基结构在复杂地质环境下的安全与稳定。

5.2 多专业协同与技术集成应用

桩基施工属于典型的多学科交叉工程，涉及地质勘察、结构设计、机械施工及质量检测等多个环节。地质工程师应参与施工全过程，对地层变化进行动态判读，为施工方案调整提供依据；结构工程师需结合受力分析结果，提出针对性的桩身加固或参数修正建议；施工单位则应根据实时监测数据实施优化操作。

5.3 施工经验总结与技术标准完善

在复杂地质条件下开展桩基施工，积累与总结工程经验具有重要的现实意义。不同地层环境对施工工艺的适应性差异较大，只有通过大量实践案例的归纳与分析，才能提炼出具有普遍指导价值的施工方法。项目结束后，应系统整理施工过程中的监测数据、质量检测结果及风险处置经验，形成针对不同地质类型的施工技术数据库。对成功的工艺措施和管理方法进行标准化固化，可为后续工程提供可复制的技术模式。行业层面则应以典型工程为基础，推动施工技术标准与检测规范的修订与完善，使规范体系更好地适应复杂地质施工的实际需求。此外，应建立技术交流与成果共享平台，促进工程经验在更大范围内的推广与应用。通过持续的经验积累与标准完善，能够有效提升桩基施工的规范化与科学化水平，为道路桥梁工程的高质量建设提供持续支撑。

6 结语

复杂地质条件下道路桥梁桩基施工面临诸多技术挑战，其施工质量直接影响桥梁工程的安全性和耐久性。通过对复杂地质特征及施工问题的系统分析可以看出，桩基施工技术优化应贯穿于工程全过程，包括前期勘察、施工方案制定、工艺选择及过程控制等多个环节。在实际工程中，只有充分结合地质条件特点，合理优化施工技术与管理措施，才能有效提升桩基施工质量，降低施工风险。未来，随着施工装备与监测技术的不断发展，复杂地质条件下道路桥梁桩基施工技术仍将持续完善，为交通基础设施建设提供更加可靠的技术支撑。

参考文献

[1] 姚乃远.桥梁桩基施工技术在复杂地质条件下的应用分析[J].中国高新科技,2025,(09):97-99.

[2] 何剑.浅议复杂地质条件下桥梁桩基施工的技术难点处理[J].科技创新与应用,2016,(17):83-84.

[3] 柳学伟.复杂地质条件下岩溶区特大桥桩基施工关键技术[J].地质灾害与环境保护,2022,33(02):98-101.

[4] 常磊.复杂地形条件下道路桥梁桩基综合施工技术[J].工程建设与设计,2022,(19):201-203.

[5] 赵方彬.复杂地质条件下盾构隧道穿越施工对既有桥梁桩基的影响研究[D].中国矿业大学,2021.