

复杂地质条件下灌注桩桩基施工技术优化与质量控制研究

齐春雷¹ 罗士然² 张杨博¹

1.中冀建勘集团有限公司 河北 石家庄 050000

2.中冀建勘集团(海南)有限公司 海南 海口 570100

【摘要】: 复杂地质条件(如岩溶、软土、破碎带等)给灌注桩桩基施工带来孔壁坍塌、缩颈、沉渣超标等诸多难题,严重影响桩基承载性能与工程安全性。本文结合工程实践,分析复杂地质灌注桩施工的技术痛点,探讨施工技术优化路径,提出针对性质量控制措施,旨在提升复杂地质环境下灌注桩施工质量,为同类工程提供技术参考。

【关键词】: 复杂地质; 灌注桩桩基; 施工技术优化; 质量控制

DOI:10.12417/2811-0528.26.05.070

1 引言

灌注桩桩基因承载能力强、适应性广,被广泛应用于桥梁、高层建筑等工程建设中。但在岩溶发育、软土分布、岩土体破碎等复杂地质条件下,施工过程易出现各类质量隐患,导致桩基工程事故频发。为解决这一问题,亟需优化施工技术流程,强化全流程质量控制,保障桩基工程稳定性与耐久性,推动建筑工程施工技术水平提升。

2 复杂地质条件下灌注桩施工技术痛点分析

2.1 孔壁稳定性不足

复杂地质中岩土体结构松散、胶结性差,加之地下水丰富,钻孔过程中孔壁易发生坍塌、缩颈现象。软土地区因土体抗剪强度低,钻孔时土体易产生侧向位移,导致孔颈缩小;岩溶地区岩面起伏大、裂隙发育,地下水渗透压力大,易引发孔壁坍塌,不仅影响钻孔效率,还会导致钢筋笼下放受阻、混凝土浇筑质量下降。同时,传统钻孔工艺中泥浆配比不合理、护筒埋设深度不足,进一步加剧了孔壁失稳风险,增加了施工返工率与工程成本。

2.2 沉渣控制难度大

沉渣厚度是影响灌注桩承载能力的关键指标,复杂地质条件下沉渣控制难度显著提升。破碎带、风化岩层地区钻孔时,岩块、碎屑易堆积孔底,难以彻底清除;软土地区钻孔过程中土体扰动大,泥浆携带的泥渣易在孔底沉淀,且地下水流动会导致沉渣二次堆积。此外,传统清孔工艺单一,多采用正循环清孔,清孔效率低,难以将孔底沉渣控制在规范允许范围内。沉渣超标会降低桩端承载力,引发桩基沉降过大,影响工程结构安全。

2.3 混凝土浇筑质量不佳

复杂地质条件下,灌注桩混凝土浇筑过程易出现离析、断

桩、夹渣等质量问题。岩溶地区存在溶洞、溶隙,浇筑时混凝土易流失至溶洞内,导致桩身混凝土不密实;软土地区桩基施工中孔壁易变形,钢筋笼下放偏差大,易与孔壁摩擦产生泥渣,混入混凝土中形成夹渣;同时,浇筑过程中导管埋深控制不当、混凝土坍落度不稳定,会导致混凝土离析,严重时引发断桩。此外,复杂地质地下水水位变化大,地下水渗入孔内会稀释混凝土,降低混凝土强度,影响桩身完整性。

3 复杂地质条件下灌注桩施工技术优化措施

3.1 孔壁稳定技术优化

针对孔壁失稳问题,需结合地质勘察结果精准优化钻孔工艺与护孔措施,实现孔壁稳定控制。首先,科学选择钻孔机械,软土、松散砂层地区优先采用冲击钻,利用冲击能反复夯实孔壁土体,增强土体密实度与抗剪强度,有效抑制侧向位移;岩溶、破碎带地区选用回旋钻,搭配牙轮钻头减少孔壁扰动,配合优质泥浆形成可靠护壁层。其次,精细化优化泥浆配比,根据地质类型动态调整泥浆比重、黏度与含砂率,软土地区采用高黏度(18-22s)、低含砂率($\leq 2\%$)泥浆,提升携渣能力与护壁效果;岩溶地区在泥浆中掺入3%-5%膨润土、0.5%-1%纯碱等外加剂,提高泥浆胶体率至95%以上,防止泥浆沿裂隙渗漏。同时,强化护筒埋设质量控制,护筒采用厚度不小于10mm的钢板制作,埋设深度需穿透软土层、砂层,嵌入稳定岩层不少于0.5m,护筒顶面高出地面0.3m或地下水位1.5m以上,周边用黏土分层夯实密实,阻断地下水渗入通道。此外,钻孔过程中严格控制钻进速度,硬岩段钻进速度不超过1m/h,软土段不超过2m/h,避免过快钻进导致孔壁扰动;若遇孔壁坍塌迹象,立即停止钻进,快速投放黏土、碎石混合物回填夯实,待孔壁稳定后再恢复施工,从源头降低孔壁失稳风险。

3.2 沉渣清除技术优化

为彻底解决复杂地质沉渣控制难题,采用“二次清孔+组

合清孔”协同工艺,大幅提升沉渣清除效率与效果。第一次清孔在钻孔至设计标高后立即进行,采用正循环清孔工艺,通过泥浆泵将泥浆高压注入孔内,泥浆携带孔底大部分岩块、泥渣沿孔壁上升排出,清孔时间不少于30min,初步清除孔底堆积沉渣。第二次清孔在钢筋笼、导管下放完成后开展,切换为反循环清孔工艺,利用气举原理形成负压循环,泥浆上升速度提升至2-3m/s,携渣能力较正循环提升50%以上,能有效清除孔底残留沉渣及钢筋笼、导管下放过程中掉落的杂物。针对破碎带、风化岩层等沉渣难以清除的特殊区域,在清孔管路中增设高压射水装置,通过20-30MPa高压水流冲击孔底沉渣,将结块沉渣打散,使其充分悬浮于泥浆中,便于泥浆携带排出。同时,严格控制清孔参数与质量标准,清孔过程中实时监测泥浆指标,最终泥浆比重控制在1.05-1.10之间,黏度17-20s,含砂率 $\leq 2\%$;采用超声波沉渣检测仪精准检测沉渣厚度,端承桩沉渣厚度严格控制在 $\leq 50\text{mm}$,摩擦桩 $\leq 100\text{mm}$,检测合格后30min内必须启动混凝土浇筑作业,防止沉渣二次堆积。此外,清孔过程中安排专人记录泥浆指标、清孔时间、沉渣厚度等数据,确保清孔质量可追溯。

3.3 混凝土浇筑技术优化

聚焦复杂地质混凝土浇筑质量痛点,从配合比设计、设备管控、工艺优化多维度发力,保障桩身混凝土完整性与强度。首先,精准设计混凝土配合比,选用级配良好的5-25mm碎石骨料、中粗砂,掺入适量粉煤灰(取代率15%-20%)与聚羧酸系高效减水剂(掺量0.8%-1.2%),提升混凝土流动性、和易性与抗离析能力,确保混凝土坍落度稳定在180-220mm之间,满足复杂地质长距离浇筑需求。其次,强化导管质量管控,导管选用 $\phi 250-300\text{mm}$ 无缝钢管,每节长度2-3m,使用前进行水密性、承压试验,试验压力不低于设计浇筑压力的1.5倍,杜绝导管漏水、漏气;导管下放时控制下放速度,避免碰撞孔壁与钢筋笼,导管底部距孔底距离精准控制在300-500mm,确保混凝土顺利扩散。浇筑过程中采用“连续浇筑、分层振捣”工艺,混凝土浇筑速度控制在2-3m/h,避免中途停顿;通过测绳实时监测导管埋深,始终保持在2-6m范围内,每提升导管前确认混凝土浇筑高度,防止导管埋深过浅导致断桩、过深导致混凝土初凝堵塞导管。针对岩溶地区,浇筑前采用地质雷达探测溶洞位置与大小,小型溶洞采用黏土、碎石混合填充,大型溶洞采用注浆加固处理,形成隔水防渗层;浇筑过程中若遇混凝土流失,立即加大浇筑速度并补充混凝土,确保桩身混凝土密实。同时,安排专人监测混凝土浇筑状态,及时处理浇筑过程中的突发问题。

4 复杂地质条件下灌注桩施工质量控制措施

4.1 施工前质量控制

施工前质量控制是保障复杂地质灌注桩施工质量的基础,需围绕勘察、方案、材料、人员四大核心环节筑牢质量防线。首先,提升地质勘察精准度,采用“钻探+物探+原位测试”综合勘察手段,钻探间距控制在15-20m,对岩溶、破碎带等特殊区域加密勘探点,详细查明施工区域岩土体分布、地层厚度、地下水水位及流向、岩溶发育规模与裂隙分布等地质信息,编制包含地质剖面图、岩土体物理力学参数的详细勘察报告,为施工方案制定提供精准依据。其次,科学编制施工方案,结合勘察结果针对性设计钻孔机械选型、泥浆配比、护筒埋设、清孔浇筑等关键技术参数,对于地质条件极端复杂的区域,单独编制专项施工方案与应急处置方案(如孔壁坍塌、混凝土流失应急预案),方案经专家评审通过后方可实施。同时,严格管控施工材料质量,钢筋、水泥、骨料等主要材料进场前必须进行抽样检测,钢筋力学性能、水泥强度等级、骨料级配等指标需符合规范要求,不合格材料严禁进场;施工机械(钻机、泥浆泵、混凝土输送泵等)进场前进行全面调试与保养,重点检查钻机垂直度调节装置、泥浆泵压力参数、输送泵排量等,确保机械性能稳定可靠。此外,开展全员技术交底,向施工管理人员、操作人员详细讲解施工流程、技术要求、质量标准及安全注意事项,结合典型案例剖析复杂地质施工常见问题与应对措施,提升施工人员技术水平与质量风险意识,确保施工过程规范有序。

4.2 施工过程质量控制

施工过程是质量控制的环节,需实施全流程、精细化监测管控,及时发现并整改质量隐患,确保施工质量符合规范要求。钻孔阶段,采用全站仪实时监测孔位偏差,孔位中心偏差控制在 $\leq 50\text{mm}$ 范围内;每钻进5-10m利用测斜仪检测孔垂直度,垂直度偏差不超过1%,发现偏差立即调整钻机角度;安排专人定期检测泥浆比重、黏度、含砂率,根据地质变化动态调整泥浆配比,软土段适当提高泥浆黏度,岩溶段增加膨润土掺量,始终保持泥浆护壁效果。清孔阶段,采用超声波沉渣检测仪精准检测沉渣厚度,检测点覆盖孔底中心及周边3个点位,取平均值作为最终沉渣厚度,若沉渣超标,立即延长清孔时间或调整清孔工艺(如切换反循环清孔、增设高压射水),直至满足要求。钢筋笼制作与下放阶段,严格控制钢筋笼加工尺寸,主筋间距偏差 $\leq 10\text{mm}$,箍筋间距偏差 $\leq 20\text{mm}$,焊接接头需进行力学性能检测;下放时采用两点起吊法,缓慢下放,避免碰撞孔壁,钢筋笼安装到位后采用型钢固定牢固,防止浇筑过程中钢筋笼上浮或偏移。混凝土浇筑阶段,采用混凝土坍落度仪实时检测坍落度,每批次混凝土至少检测3次,确保坍

落度符合设计要求；通过测绳与导管理深测杆双重监测导管理深，每浇筑 1m 混凝土记录一次浇筑高度与导管理深，及时调整导管提升速度；每浇筑 50m³ 混凝土制作一组标准养护试块，同步制作同条件养护试块，确保混凝土强度达标。同时，安排专人全程记录施工过程，详细填写施工日志，记录钻孔深度、泥浆指标、清孔时间、沉渣厚度、混凝土浇筑量等数据，为质量追溯提供完整依据。

4.3 施工后质量检测

施工后质量检测是评估灌注桩施工质量的关键手段，需采用多元化检测方法，实现桩身完整性、承载能力、混凝土强度的全面检测，确保桩基工程合格。首先，桩身完整性检测采用低应变反射波法，检测覆盖率达到 100%，通过在桩顶施加瞬态激振，采集反射波信号并分析，精准判断桩身是否存在断桩、夹渣、缩颈、空洞等缺陷，对于检测发现的疑似缺陷桩，采用钻芯法进一步验证，钻芯取样位置选取缺陷疑似区域及桩身中部，通过观察芯样完整性、测量芯样强度评估桩身质量。其次，桩基承载力检测，对于桥梁、高层建筑等重要工程或地质条件极端复杂的区域，选取不少于总桩数 5%且不少于 3 根的桩基采用高应变法检测，通过重锤冲击桩顶，测量桩身应力与速度变化，计算桩基竖向抗压承载力，确保满足设计要求；对于一般工程，采用静载试验辅助验证，保障桩基承载性能稳定。

同时，混凝土强度检测，对标准养护试块与同条件养护试块进行抗压强度试验，试块强度需达到设计强度的 100%以上，若强度不足，采用回弹法、钻芯法对桩身混凝土强度进行复核。针对检测发现的质量缺陷，制定专项处理方案，桩身轻微缺陷（如局部夹渣、强度不足）采用压力注浆加固处理，注入水泥浆与外加剂混合浆液，填充缺陷区域；严重缺陷（如断桩、大面积空洞）需采取补桩措施，重新钻孔浇筑，确保桩基工程质量合格。此外，建立严格的质量验收制度，按照《建筑桩基技术规范》要求，开展分部、分项工程验收，验收内容包括施工资料、检测报告、桩身质量等，验收合格并签署验收意见后，方可进入下一道工序施工。

5 结论

复杂地质条件下灌注桩桩基施工面临孔壁失稳、沉渣超标、混凝土浇筑质量不佳等技术难题，直接影响桩基工程安全性与稳定性。本文通过分析施工技术痛点，提出孔壁稳定、沉渣清除、混凝土浇筑等关键技术优化措施，并从施工前、施工过程中、施工后三个阶段构建全流程质量控制体系。实践表明，优化后的施工技术与质量控制措施能有效解决复杂地质施工难题，提升灌注桩施工质量，降低工程事故发生率。未来，应进一步结合智能化技术，推动灌注桩施工智能化、精细化发展，不断提升复杂地质条件下桩基施工技术水平。

参考文献：

- [1] 陈亚奎.灌注桩施工技术在复杂地质条件下的优化方案[J].石材,2026,(01):73-75.
- [2] 陆健.复杂地质条件下打拔机配合旋挖钻孔灌注桩施工技术探讨[J].水泥,2025,(07):125-127.
- [3] 雒腾龙,毛泽君,彭旺,等.复杂地质条件下旋挖灌注桩施工技术研究[J].城市建筑空间,2025,32(S1):357-358.
- [4] 梁洋.钻孔灌注桩在复杂地质条件下的桥梁桩基施工应用分析[J].中国水泥,2025,(06):113-115.
- [5] 郭富媚.复杂地质条件下钢索咬合灌注桩施工技术研究[J].工程技术研究,2024,9(23):84-86.