

复杂地质条件下桩基施工难点与对策研究

潘明亮

中国电子系统工程第二建设有限公司 江苏 无锡 236400

摘要：桩基施工质量直接决定上部结构安全，但岩溶、深厚软土、地下水异常等复杂地质条件常引发成孔困难、塌孔缩颈、桩身缺陷及承载力不足等问题。本文系统分析了三类地质条件对桩基施工的影响机理，揭示了不同因素引发质量缺陷的作用路径，并从勘察精度提升、施工工艺优化、质量控制与动态监测三个维度提出应对策略，构建了涵盖勘察、方案、工序、检测的全过程质量控制体系。研究表明，“地质先行、因地制宜、过程严控”是应对复杂地质挑战的有效路径，可为类似工程提供参考。

关键词：复杂地质；桩基施工；岩溶；软土；成孔质量

引言：桩基工程质量直接关系上部结构安全。随着城市建设用地紧张，工程场地不可避免地扩展至地质复杂区域，岩溶溶洞与裂隙、深厚软土流动性、高承压水突涌风险使施工不可预见因素显著增加。传统施工方法面对这些条件常难以保证成桩质量，塌孔、缩颈、桩身离析和承载力不足等问题时有发生，严重时甚至导致重大事故。本文立足于复杂地质条件对桩基施工的实际影响，系统梳理各类地质条件下的施工难点，并提出针对性技术对策，以期为类似工程提供实践参考。

1 复杂地质条件的类型与桩基施工难点

1.1 岩溶发育地区桩基施工难点

岩溶地层的核心特征是基岩面起伏剧烈、溶洞裂隙发育、岩体完整性差。成孔阶段，钻穿溶洞时泥浆沿裂隙大量流失，孔壁失去护壁后发生坍塌；溶洞顶板厚度不足时钻具击穿顶板造成卡钻或掉钻；多层溶洞发育区钻穿一层后若后续仍为软弱填充物，将形成“架空”结构，桩底无法落在稳定基岩上。成桩阶段，混凝土在压力下流入相邻溶洞造成超灌浪费，液面下降引起孔壁坍塌物混入桩体形成夹泥断桩。溶洞填充物的不均一性还导致桩侧摩阻力和端承力严重离散，承载性状难以准确预估。

1.2 深厚软土地区桩基施工难点

深厚软土具有高含水量、高压缩性、低强度特性，桩基施工面临的核心问题是桩周土体侧向约束不足。对于厚度较大的软土地层，钻孔灌注桩成孔成桩劣势较为突出，孔壁自稳能力差，极易出现缩颈、塌孔病害；可依据软土厚度分级选用工法，软土厚度较小时可采用套筒防护，深厚软土优先选用预制管桩（图1）。钻孔灌注

桩成孔时软土自稳能力差，孔壁易发生缩颈甚至塌孔；软土流变特性使孔壁随暴露时间延长发生蠕变收敛，下放钢筋笼难度增加。预制桩施工面临挤土效应，大量桩体贯入时超静孔隙水压力升高，土体侧向位移和隆起导致相邻桩位偏移上浮，造成桩身倾斜和接头拉裂。此外，欠固结软土在荷载作用下固结沉降速率大于桩身沉降时产生负摩阻力，增加桩身轴力和沉降量，降低桩基实际安全储备^[1]。

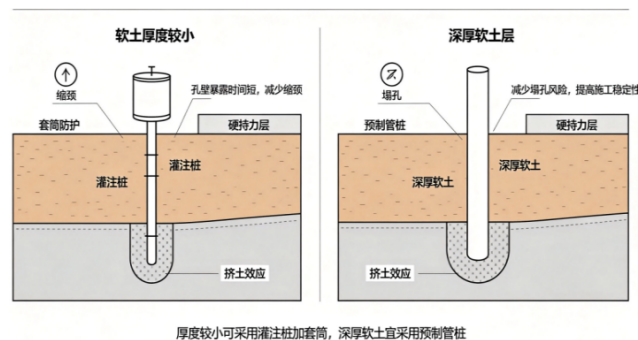


图 1 不同软土厚度条件下桩基选型对比示意

1.3 地下水异常与复杂地层组合的挑战

承压含水层被钻穿时，地下水在水头压力下沿钻孔涌出，冲刷孔壁导致坍塌，稀释冲散桩身混凝土造成离析缺陷。地下水与岩溶、断层组合时形成复杂渗流通道，注浆封堵难度极大。软硬交替地层中，钻头在界面处受力突变易造成钻孔偏斜；不同地层渗透性差异导致泥浆性能难以统一调配——渗透性强时泥浆漏失严

重,渗透性弱时泥皮过厚降低侧摩阻力。地层中有机质或腐蚀性成分对混凝土和钢筋构成长期腐蚀威胁,影响桩基耐久性。

1.4 复杂地质条件下桩基质量缺陷类型

复杂地质条件下桩基典型质量缺陷可归纳为四类:一是孔壁稳定性问题,包括塌孔导致桩身夹泥、缩颈导致截面不足、扩颈导致混凝土超耗,其中缩颈最难事后检测和补救。二是桩身完整性问题,孔壁坍塌物混入桩体形成夹泥空洞,导管拔脱造成断桩离析,严重削弱承载能力。三是桩底质量问题,岩溶区沉渣清理不彻底或混凝土与填充物混掺,桩端无法形成有效应力扩散面,承载力大幅降低。四是桩身偏位问题,软土挤土效应和钻杆偏斜使桩位偏差和垂直度超限,改变设计受力状态,甚至侵占相邻结构空间。

2 复杂地质条件下的桩基施工对策

2.1 岩溶地区的桩基施工对策

岩溶地区施工应以“探明为先、分类处理、过程控制”为原则。施工前须进行一桩一孔超前钻探,查明桩端持力层以上3倍桩径且不小于5米范围内溶洞的分布、规模、填充状态和顶板厚度。浅层小溶洞(高度小于2米、顶板厚度大于2米)可采用冲击钻冲孔穿透后灌注混凝土填充;大型溶洞、串珠状溶洞及顶板厚度不足时应预先注浆或高压旋喷加固,待浆液凝固后再施工;溶洞规模巨大时下放钢护筒穿越溶洞,在护筒内部钻孔浇筑,完全隔离溶洞影响。灌注混凝土时应提高坍落度(180~220mm)并保持足够速度,确保漏浆情况下连续上升,灌注量按“理论方量+溶洞填充方量”估算,提前做好超灌预案,根据溶洞规模、形态和填充状态选择最适宜的处理方式。

2.2 深厚软土地区的桩基施工对策

深厚软土地区施工应以“控制变形、减少扰动、强化监测”为技术路线。灌注桩在深厚软土中局限性明显,宜区分软土厚度选型:厚度较小时配套套筒保障孔壁稳定;厚度大时优先采用预制管桩规避缩颈塌孔风险。灌注桩应优化泥浆性能,比重提高至1.25~1.35、粘度控制在22~30s,形成致密泥皮增强孔壁自稳能力。成孔后钢筋笼2小时内下放,混凝土4小时内开始灌注,压缩孔壁暴露时间。预制桩施工中减少挤土效应为首要任务,沉桩从中央向四周推进或一侧退打;重要工程设置应力释放孔减少超静孔隙水压力累积。每日沉桩不宜超过8~10根,相邻桩位间隔不少于24小时。负摩阻力问题可在桩身中下部涂刷沥青或套设塑料套管切断传递路

径,并在设计中预留下拉荷载,适当增加桩长或桩径补偿承载力损失。

2.3 地下水控制与复杂地层钻进技术

地下水控制的核心思路是从“被动应对”转向“主动控制”。对可能揭露承压水层的桩位,应在施工前进行水文地质专项勘察,查明含水层层位、水头高度和渗透系数,预先确定泥浆比重和堵漏材料配比方案。钻进过程中,泥浆比重应根据涌水速度动态调整——涌水量较小时提高泥浆比重(1.30—1.40)平衡水头压力;涌水量较大时采用化学浆液预先注浆封堵,形成止水帷幕后再行钻进。导管法灌注水下混凝土时,导管埋深应保持在2—6米之间,首批混凝土灌注量应确保导管埋入混凝土深度不小于0.8—1.2米,形成足够厚度的混凝土覆盖层隔绝地下水。针对软硬交替地层的钻进偏斜问题,应采用“轻压慢进、勤测斜、及时纠”的操作原则。在软硬交界面处,钻压降至正常值的50%—60%,钻速降至正常值的60%—70%,待完全进入硬层后再恢复正常参数。每钻进2—3米测斜一次,发现偏斜及时用纠斜钻头或回填硬块石料重新钻进的方式调整,将孔斜率控制在1%以内。

2.4 全过程质量控制与动态监测

复杂地质条件下桩基施工需要构建覆盖全过程的质量控制体系与动态监测机制。施工前质量控制包括地质资料二次复核、施工方案专项论证和关键岗位技术交底。每根桩开钻前,技术负责人应结合超前钻探资料向机组人员详细交代该桩位的地层特征、预判风险和应对措施,确保操作人员充分预判。施工过程质量控制应建立关键工序停检点制度——成孔后进行孔径和垂直度检测;清孔后沉渣厚度应小于端承桩50mm、摩擦桩100mm;钢筋笼下放全程观测并记录;二次清孔合格后方可灌注混凝土,并实时记录灌注方量和导管埋深。成桩后应进行桩身完整性检测(低应变法或声波透射法)和承载力检测(静载试验或高应变法),检测比例和标准符合设计规范要求^[2]。动态监测方面,沉降监测在软土地区应贯穿整个施工过程,每日观测一次,发现异常沉降速率及时预警。孔内水位监测用于判断泥浆漏失和地下水变化趋势,水位异常波动可能预示孔壁坍塌或溶洞贯穿。桩位位移监测在预制桩施工中每日进行,偏位超限时应立即停止施工并查明原因。

3 复杂地质条件下桩基施工质量控制体系

3.1 施工前地质勘察的精细化要求

勘察精度直接决定施工方案的有效性。常规勘察布

孔间距大、深度有限,往往难以揭示溶洞、孤石、软弱夹层等局部地质异常。复杂地质条件下应采用“一桩一孔”或“一桩多孔”模式,查明每根桩位处的地层结构和持力层条件。勘察手段应多样化组合,钻探获取岩土样品,物探(跨孔地震波CT、地质雷达)弥补钻探局限性,揭示钻孔间的地质异常体。勘察成果应形成每根桩的“地质断面图”,标注地层界面、异常体位置和范围、地下水条件等关键信息,为编制个性化施工指导书提供依据。勘察信息应完整传递至现场管理和操作人员,避免勘察与施工脱节。精细化勘察不仅是获取地质数据的过程,更是将地质信息有效转化为施工决策依据的系统工程,需建立从勘察到施工的信息传递链路,确保每根桩的施工人员清楚掌握桩位的地质风险特征。

3.2 施工方案的专项论证与动态调整

复杂地质条件下的施工方案应针对具体地质条件专项设计,而非采用标准化模板。编制应基于逐桩勘察成果,对不同地质类别桩位分类制定工艺参数——岩溶区明确溶洞穿越方案和超灌控制措施;软土区明确泥浆性能指标和最大空孔时间;承压水层明确泥浆比重调整方案和导管理深要求。施工方案应经专家论证后实施,针对大型溶洞、高承压水等极端情况形成应急预案。现场地质条件与勘察资料不符时,应立即停止施工,补充勘察后重新制定参数。建立“勘察—方案—施工—反馈—调整”的动态闭环机制,是复杂地质条件下桩基施工质量控制的核心方法论,其本质是将地质不确定性纳入施工管理的主动应对范畴,通过持续的信息更新和方案优化,实现质量风险的动态消减^[3]。

3.3 关键工序的质量控制要点

成孔质量控制:钻机就位稳固,钻进参数根据地层变化及时调整——软土层低转速、大排量循环防扩径;硬岩层慢进尺、低转速防偏孔。每钻进2—3m测斜,终孔后采用超声波孔壁检测仪全面检测孔径和垂直度。清孔质量控制:采用两次清孔工艺,终孔后清除大颗粒沉渣;下放钢筋笼和导管后采用气举反循环工艺,沉渣厚度控制端承桩 $\leq 50\text{mm}$ 、摩擦桩 $\leq 100\text{mm}$,清孔后泥浆含砂率 $\leq 8\%$ 、粘度 $\leq 28\text{s}$ 、比重 ≤ 1.25 。混凝土灌注质量控制:导管使用前进行水密性和承压试验,首批灌注量确保导管埋深不小于0.8—1.2m;灌注过程连续作业,每灌入2—3车测量一次混凝土面高度,保持导管埋深2—

6m,超灌高度不小于1.5m。关键工序控制的核心在于将质量标准转化为可操作的技术参数和检验流程,实现每道工序从“事后检查”向“过程控制”的转变。

3.4 质量检测与缺陷预防

检测方法应形成多层次组合:低应变法适用于普查,速度快但精度有限;声波透射法精度高,对夹泥和离析缺陷定位准确,适用于大直径桩;钻孔取芯法最为直观,在低应变或声波透射发现异常时采用。承载力检测选取代表性桩位进行静载试验,数量不少于总桩数的1%且不少于3根。岩溶区桩基应增加桩底持力层钻探验证,确认桩底以下3倍桩径且不小于5m范围内无溶洞或软弱夹层。缺陷预防从三个层面建立机制:工艺层面制定操作细则(超灌预警、空孔时间限制);管理层面建立工序交接验收和质量可追溯制度,每根桩形成完整施工记录档案;应急层面针对塌孔、卡钻等事故制定专项应急预案,储备必要物资确保快速响应。多层次检测与全过程预防相结合,形成“检测发现隐患—预防消除隐患”的闭环管理,是保障复杂地质条件下桩基质量的关键路径^[4]。

结束语

复杂地质条件下的桩基施工是岩土工程领域最具挑战性的课题之一。岩溶、软土、地下水异常等地质因素通过不同的作用机理影响成孔稳定性和成桩质量,其危害形式多样、隐蔽性强、后果严重。应对这些挑战的根本路径在于“地质先行、因地制宜、过程严控”——以精细化勘察揭示地质风险,以针对性工艺应对地质特征,以全过程监测保障施工质量。将复杂地质条件的处理从“被动应付”转变为“主动管控”,是提升桩基工程质量水平的必由之路。

参考文献

- [1] 孙宗杨,陈仕君.高原环境下桥梁桩基施工的难点与解决对策分析[J].中国厨卫,2025,24(3):214-216,219.
- [2] 刘海泉.山区复杂地形桥梁基础施工难点与对策[J].人民交通,2026,536(5):47-49.
- [3] 李泽林.复杂地质条件下桩基施工难点及质量控制对策[J].中国建筑装饰装修,2025(24):171-173.
- [4] 周全林.厚淤泥地质条件下桩基施工难点技术研究[J].城镇建设,2022(8):82-84.