

复杂地质条件下桥梁基础施工技术难点与控制措施研究

文 / 刘滨锐 安徽省交控建设管理有限公司

摘要：桥梁基础施工在复杂地质条件下面临严峻挑战，传统技术难以有效应对岩溶塌陷、软土沉降及高水位渗流等问题。本文针对桩基成孔稳定性差、地基承载力不足及设备适配性低等核心难点，提出分级注浆加固、复合桩基优化及智能截水技术等创新方案，通过构建动态监测与标准化质量控制体系，实现施工风险精准防控，研究成果为复杂地质桥梁建设提供系统性解决方案，对提升工程安全性与经济性具有重要实践价值。

关键词：复杂地质条件；桥梁基础施工；技术难点；控制措施；质量控制

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.17.061

引言

桥梁作为现代交通网络的核心枢纽，其基础施工质量直接影响整体结构安全与服役寿命。当前，岩溶发育区、滨海软土地层及高水位渗流带等复杂地质环境，普遍导致桩基偏位、孔壁坍塌及沉降超标等工程事故，现有施工技术在地质条件适应性、工艺可靠性方面存在明显短板，亟待建立针对性技术体系。本文聚焦复杂地质条件与桥梁基础施工的交互作用机制，从地质风险识别、工艺创新及过程管控三个维度开展研究，旨在突破传统技术瓶颈，形成兼顾安全、效率与成本的控制策略。研究成果可为同类工程提供理论支撑与实践指导，推动桥梁施工技术向精细化、智能化方向发展。

一、复杂地质条件给桥梁基础施工带来的主要难题

（一）岩溶地质引发的塌孔与偏位问题

岩溶地区特有的溶洞、裂隙及地下暗河网络，显著增加了桥梁桩基施工的复杂性。施工过程中，钻头穿透溶洞顶板时，孔壁土体因失去支撑发生突然坍塌，泥浆护壁体系随之失效，导致成孔中断，倾斜岩层与溶洞的不规则分布进一步加剧钻孔轨迹偏移，造成桩身倾斜甚至断裂，部分区域地下水位频繁波动，加速岩溶区土体软化，形成多米诺骨牌式的连续塌陷，此类问题不仅造成施工进度滞后，更可能导致桩端持力层无法满足设计要求，直接影响桥梁整体结构安全。

（二）软土地基造成的沉降超标风险

软土地区广泛分布的淤泥质土层，因其高含水量、低承载力的特性，成为桥梁基础施工的重大挑战。施工机械振动与地下水活动共同作用下，软土发生触变效应，桩周土体强度骤降，桩侧摩阻力显著衰减。成桩后，软土的缓慢固结过程导致桩端阻力分布不均，引发差异沉降。滨海区域受潮汐影响，地下水位周期性升降持续改变土体应力状态，加剧桩基稳定性控制难度。长期监测

表明，软土区桥梁桩基沉降量普遍超过设计允许范围，严重威胁上部结构安全。

（三）高水位渗流对施工的破坏作用

高水位地层中动态渗流压力对施工的负面影响贯穿整个建设周期。钻孔阶段，地下水携带细颗粒土体持续侵蚀孔壁，导致泥浆护壁效能逐渐丧失，孔壁坍塌与缩径现象频发；渗流作用下，桩周土体有效应力降低，桩端阻力随之减弱；砂质地层中，当渗流速度突破临界值时，突发性涌砂直接破坏成孔结构，迫使施工中断。长期渗流环境还会加速钢筋锈蚀与混凝土碳化进程，缩短桩基服役寿命。某些情况下，渗流路径与施工扰动叠加，诱发周边地层沉降，形成次生地质灾害风险。

二、复杂地质桥梁基础施工技术难点解析

（一）桩基成孔稳定性控制难点

复杂地质条件下，桩基成孔稳定性受多重因素制约，岩溶区溶洞与裂隙交错分布，钻孔过程中易引发孔壁失稳，泥浆护壁体系在溶洞贯通时突然失效，导致塌孔事故频发。软土地层中，土体高压缩性与低抗剪强度特性加剧孔壁坍塌风险，地下水位波动进一步削弱土体结构强度。破碎带或断层区域，岩体破碎程度高，钻头切削过程中岩屑难以排出，造成卡钻或偏孔。



图 1：桩基成孔施工现场示意图

此外，传统护壁工艺对动态渗流压力响应滞后，泥浆性能调控精度不足，难以适应高水位地层的复杂渗透环境。这些问题的叠加使得成孔质量可控性显著降低，直接影响后续桩基承载力与耐久性。

（二）地基承载力达标技术瓶颈

地基承载力不足是复杂地质桥梁施工的核心矛盾，岩溶区溶洞顶板厚度不足或桩端持力层缺失，导致桩基无法有效传递荷载。常规注浆加固工艺对大型溶洞充填不密实，浆液扩散范围受限，难以形成连续承载结构，软土地层中，桩侧摩阻力与端阻力同步衰减，传统桩基设计理论无法准确反映土体流变特性对承载力的长期影响，现有检测手段对隐蔽性缺陷识别能力不足，如桩底沉渣厚度超标或桩身缩径等问题，易造成承载力虚高误判。同时，高水位渗流持续弱化桩土界面力学性能，进一步加剧承载力衰减速率。突破这些瓶颈需从材料改性、工艺创新与检测技术升级等多维度寻求解决方案。

（三）施工设备与地质条件适配性问题

既有施工设备在复杂地质环境下面临严峻适配性挑战，旋挖钻机在岩溶区遭遇坚硬岩层时进尺效率骤降，钻齿磨损速率加快，而在破碎带施工时又因岩体松散导致成孔精度失控。传统注浆设备压力调控范围狭窄，无法满足溶洞分级充填与断层带高压补强的差异化需求；软土区桩基施工中，振动沉桩设备引发周边土体剧烈扰动，反而加剧孔壁坍塌风险；高水位地层作业时，常规排水设备处理能力不足，渗流反压作用导致成孔周期延长。设备智能化程度偏低，缺乏地质参数实时反馈与工艺自适应调整功能，难以实现“一孔一策”的精细化施工。提升设备地质适应性需从动力系统优化、工作模块重构与智能控制系统集成等方面实施技术改造。

三、复杂地质桥梁基础施工核心控制技术

（一）岩溶塌陷防控成套技术

岩溶地区桥梁桩基施工需要构建多层次防控体系，首先采用三维地质雷达进行大范围扫描，结合钻孔CT成像技术精准定位溶洞分布，通过电磁波反射信号与岩芯取样数据的交叉比对，建立溶洞三维地质模型，明确顶板厚度、填充物类型及地下水活动规律。针对中小型溶洞，采取分阶段注浆策略：初期注入低粘度水泥浆充填主腔体，中期采用速凝材料封闭裂隙通道，后期补注高强胶结剂增强岩体整体性。遇到多层串联溶洞时，实施钢护筒嵌套支护——逐节下放特制护筒至溶洞底部，通过法

兰盘螺栓连接形成连续刚性支撑结构，确保钻孔穿越过程中的孔壁稳定。施工过程中，孔内摄像系统实时捕捉岩体剥落、泥浆异常渗漏等现象，同步分析声波透射数据，动态调整注浆压力与护筒下压节奏。突发塌孔时，立即启动双液速凝注浆应急程序，两种组浆液经混合器高压注入塌陷区，快速形成临时固结体，阻断塌方连锁反应，为后续抢险创造安全条件。这套系统化技术组合显著提升了成孔成功率和桩基承载力可靠性。

（二）软土地基加固创新方案

软土地基加固需突破传统工艺局限，构建复合型技术体系。真空-堆载联合预压技术通过铺设双向拉伸土工膜形成密闭空间，插入塑料排水板建立竖向排水通道，利用真空泵持续抽取孔隙水，同时在膜上分层堆载砂石料，通过负压与正压协同作用加速软土排水固结，大幅缩短地基处理周期。研发改性水泥土材料，在常规水泥浆中添加特殊活性成分，纳米级颗粒填充水泥水化产物空隙并催化二次反应，显著提升固化土体抗压强度与抗渗性能。优化桩基结构设计，采用变截面桩与扩大头桩组合方案，桩身上部采用较小直径减少土体扰动，桩端扩展至更大直径增加持力层接触面积，通过荷载传递路径优化改善承载力分布状态。施工过程中，采用静力触探仪分层测定土体力学参数，根据实测数据动态调整桩长与桩径，确保桩基穿越软土夹层时满足设计承载要求。该方案通过材料改良、工艺创新与动态调控的有机结合，系统性解决软土区桩基沉降超标难题。

（三）高水位渗流施工保障技术

高水位渗流环境下的施工保障需建立立体防控网络。采用高压旋喷桩与塑性混凝土墙组合式截水帷幕，旋喷桩沿基坑外围形成连续圆柱体群，桩体高水泥掺量确保抗渗强度；塑性混凝土墙嵌入基岩一定深度，墙体低渗透特性形成第二道防水屏障，双结构协同作用显著降低基坑渗流量。优化泥浆护壁体系，开发复合功能性浆液，根据渗流速度动态调整浆液性能：常规渗流段采用标准黏度浆液维持孔壁稳定，强渗流段添加聚合物增粘剂提升浆液抗冲刷能力，确保高渗透压力下孔壁完整性。配置模块化应急排水系统，深井降水管穿透含水层抽取地下水，明沟导流系统设置多级沉淀池过滤含砂污水，双系统联动实现地下水位精准调控。突发涌砂时，孔口安装分级过滤装置，初级滤网拦截粗颗粒砂砾，次级滤筒捕集细砂微粒，配合孔底压力平衡阀调节内外水头差，

将渗流速度控制在安全阈值内。施工全程部署自动化监测网络，渗压计与流速仪实时采集数据并上传至调控平台，系统智能生成截水帷幕补强方案与排水设备启停指令，形成渗流风险预警-处置-反馈的闭环管理机制。



图 2: 桥梁钻孔灌注桩施工

四、复杂地质条件下桥梁基础施工全过程质量控制体系

(一) 施工前地质精准勘察方法

复杂地质桥梁施工前，必须摸清地层真实情况，先用地质雷达扫描配合钻孔 CT 成像，把电磁波反射信号和岩芯取样数据交叉比对，画出溶洞、断层的位置走向，搞清楚地下水怎么流动。沿着桥轴线每隔一段距离打横断面，分层探测土体软硬、岩层完整程度。碰到岩溶区溶洞边界模糊的难题，上跨孔弹性波 CT 技术——多角度布置发射器和接收器，把溶洞形状、里面填的啥东西弄得明明白白。软土区域就用静力触探仪往下扎，配合十字板测土体抗剪强度，看看不同深度土质变化。所有勘探数据塞进地质信息平台，用智能分析模型筛出高风险地段，自动生成带颜色标记的风险分布图，施工方案照着这个图来定才靠谱。

(二) 施工过程质量管控标准

施工过程质量控制需建立标准化、动态化的管理机制。桩基成孔阶段，制定孔深、孔径与垂直度三重检测标准：采用激光测距仪复核孔深偏差，超声波孔壁检测仪扫描孔径收缩区域，陀螺仪监测系统实时反馈钻孔垂直度。泥浆护壁性能实施分级管控，针对不同地质段设定黏度、含砂率与胶体率阈值，高渗流区泥浆黏度提升至标准值的 1.5 倍，含砂率严格控制在 5% 以内。混凝土灌注过程执行“双控”标准，导管埋深维持在 2-6 米区间，灌注连续性与塌落度波动范围不得超过工艺规范。隐蔽工程验收采用“初检-复检-抽检”三级流程，桩身完整性检测中，超声波透射法

覆盖全桩长，低应变法重点核查桩顶以下 5 倍桩径区域。施工参数异常时，启动动态调控程序，根据地质雷达复查数据调整注浆压力或护筒下压速率，确保工艺适配地质条件变化。

(三) 事故应急响应与纠偏机制

建立“预警-处置-修复”全链条应急管理体系。施工风险预警系统集成多参数监测数据：孔壁位移超限、泥浆液位骤降或地下水位异常波动时，自动触发声光报警并生成风险定位图。突发塌孔事故执行“三分钟响应”机制，人员设备紧急撤离后，启用速凝注浆设备对塌陷区实施高压填充，同步下放备用钢护筒形成临时支护。桩基偏位纠偏采用液压顶推系统，通过反力架与位移传感器联动控制，分阶段施加水平推力，每次顶推量不超过 2 厘米，全程监测桩身应力变化。软土区桩基沉降超标时，启动桩侧注浆补强工艺，在桩周对称钻孔注入膨胀性浆液，通过土体挤压效应恢复桩基承载力。应急处理后，采用地质雷达与荷载试验进行效果验证，并将处置数据导入案例库优化应急预案。

结语

复杂地质条件下桥梁基础施工需建立地质适应性技术体系，整合岩溶区立体防控、软土复合加固及高水位截渗技术，系统提升桩基成孔质量与承载性能。动态勘察机制实现地质风险超前识别，标准化管控流程确保施工参数精确控制，分级应急体系有效控制事故影响范围，研究成果形成涵盖勘察、施工与监测的全周期解决方案，为特殊地质桥梁建设提供可复制技术路径。后续研究应侧重智能监测装备开发与生态工艺创新，推动桥梁施工向绿色低碳、数字智能化方向转型。

参考文献

- [1] 蒋新平. 复杂地质条件下桥梁基础施工技术的创新 [J]. 大众标准化, 2025, (04): 43-45.
- [2] 贾炜, 姚银威. 岩溶地区公路桥梁桩基施工技术难点与对策应用 [J]. 工程建设与设计, 2025, (01): 195-197.
- [3] 毛杰. 桥梁基础施工技术的创新与挑战 [J]. 汽车画刊, 2024, (10): 263-265.
- [4] 邢曙光. 市政工程桥梁桩基础施工中常见问题及防治措施 [J]. 居业, 2024, (06): 46-48.
- [5] 罗聿曼. 新建桥梁基础施工对既有桥桩的影响性分析及防控技术研究 [D]. 长沙理工大学, 2022.