

复杂地质条件下市政道桥基础施工关键技术研究

文 / 张玉金 山东临朐市政工程有限公司

摘要: 针对市政道桥工程中软土地基、岩溶地质、高地下水位等复杂地质条件导致的基础施工难题,采用理论分析与工程实践相结合的方法,系统研究了不同地质条件下的基础处理关键技术。通过深层水泥搅拌桩、真空预压联合堆载、CFG 桩复合地基等技术解决软土地基承载力不足问题;运用勘察探测与嵌岩桩施工工艺改进应对岩溶地质挑战;采用井点降水回灌联合技术和地下连续墙止水帷幕控制高地下水位影响。建立了基于数值模拟的参数优化方法和信息化施工管理平台,实现复合地层条件下多种基础形式的组合应用与动态调整。研究成果为复杂地质条件下市政道桥基础施工提供了系统的技术支持,可有效提高施工质量和安全性。

关键词: 复杂地质条件;市政道桥;基础施工;关键技术

【DOI】 10.12254/j.issn.2096-6539.2025.23.043

引言

市政道桥工程作为城市基础设施的重要组成部分,其施工质量直接关系到城市交通安全和运行效率。随着城市建设向复杂地质区域延伸,工程实践中频繁遭遇软土地基承载力不足、岩溶地质桩基成孔困难、高地下水位环境基坑失稳等技术难题。传统施工方法难以适应多变的地质条件,常导致工期延误、质量隐患甚至安全事故。因此,系统研究复杂地质条件下的基础施工关键技术,建立针对性强、可操作性高的技术体系,对保障市政道桥工程建设质量具有重要的理论意义和工程价值。

一、软土地基条件下的基础处理关键技术

软土地基处理需根据工程特点选择适宜的加固方案。深层水泥搅拌桩技术通过水泥与软土物理化学作用形成加固体,水泥掺量控制在 15%-18%,置换率 0.28-0.35,钻进速度 0.8-1.2m/min、提升速度 0.6-0.8m/min,水灰比 0.45-0.50,桩身强度变异系数应小于 0.25。真空预压联合堆载预压技术适用于深厚软土层,膜下真空度维持 75-85kPa,排水板间距 0.9m,分级堆载每级 20kPa、间隔 15-20d,当沉降速率降至 1mm/d 且孔压消散系数达设计值时判定固结完成。CFG 桩复合地基技术结合桩体高强度与桩土共同承载特性,桩径 400mm、28d 强度 8-10MPa,褥垫层厚度 300-400mm、压实系数 ≥ 0.94 ,实测桩土应力比稳定在 4.5-6.0,通过数值模拟验证计算沉降与实测值差异控制在 8% 以内,确保设计方法的合理性。

二、岩溶地质条件下的桩基施工关键技术

岩溶地质条件下桩基施工需采用勘察探测与工艺改进相结合的技术路线。勘察阶段采用钻探与物探联合技术,通过高密度电法、瞬态面波与探地雷达查明溶洞空间分布,强发育区按桩位逐孔勘察,钻进过程记录岩芯

采取率与漏水量判断溶洞规模,建立三维地质模型并通过 GIS 系统动态更新。施工阶段嵌岩桩采用跟管钻进或全套管护壁防止孔壁坍塌,钻进参数控制转速 15-25r/min、钻压 80-120kN 避免岩层破碎。遇溶洞时采用分段处理,空洞高度小于 2m 投放片石填充,大于 2m 时灌注低强度混凝土形成持力平台。清孔工艺采用反循环清孔,泥浆比重 1.15-1.25、含砂率小于 4%、孔底沉渣厚度不超过 50mm。混凝土灌注采用导管法,导管埋深 2-6m、坍落度 180-220mm,初灌量充分考虑溶洞充填需求,确保桩身连续完整。

三、高地下水位环境下的基坑支护与降水技术

(一) 深基坑支护结构设计及计算方法

支护结构设计采用土压力平衡理论与有限元数值分析相结合的计算方法,根据基坑深度、周边环境与地质条件选择支护类型。支护桩采用钻孔灌注桩或 SMW 工法桩,桩径 600-800mm,桩间距根据插入深度与土层参数确定,内支撑或锚索预应力通过分步开挖变形控制反算确定。土压力计算考虑地下水位影响引入有效应力原理,水土压力计算时水压力按静水压力分布,土压力按有效重度计算主动土压力系数。支护结构内力采用等值梁法或有限元法计算,考虑支撑刚度与土体相互作用,确定桩身最大弯矩位置与数值。稳定性验算包括抗倾覆、抗隆起与抗渗流稳定性,安全系数分别不小于 1.25、1.60 与 1.50。支护结构设计成果通过 PLAXIS 或 MIDAS GTS 建模验证,分析开挖过程中支护变形与周边土体沉降,优化支撑布置方案确保变形控制在规范限值内。在工程施工前需根据场地地质勘察结果选择适配技术,针对软土地基、岩溶地质等典型条件,需明确核心施工技术及相关控制参数,以保障施工效率与安全性,具体参数要求如表 1 所示。

表 1 不同地质条件施工技术及其参数

地质条件类型	核心施工技术	关键技术参数
软土地基	深层水泥搅拌桩加固	水泥掺量 15%-18%；钻进速度 0.8-1.2m/min；提升速度 0.6-0.8m/min；水灰比 0.45-0.50
软土地基	真空预压联合堆载预压	膜下真空度 75-85kPa；排水板间距 0.9m；分级堆载每级 20kPa，间隔 15-20d
软土地基	CFG 桩复合地基	桩径 400mm；桩体 28d 强度 8-10MPa；褥垫层厚度 300-400mm，压实系数 ≥ 0.94
岩溶地质	嵌岩桩施工	转速 15-25r/min；钻压（桩径 400mm）80-120kN；孔底沉渣 ≤ 50 mm
高地下水位	井点降水与回灌联合	降水深度低于基坑底 0.5-1.0m；回灌水量为降水量 60%-80%；回灌井距 15-25m
高地下水位	地下连续墙止水帷幕	墙体厚度 600-1000mm；泥浆比重 1.10-1.25；混凝土坍落度 180-220mm

(二) 井点降水与回灌联合技术

降水方案根据含水层特性选择轻型井点或管井降水方法，井点采用环形或 U 形布置，降水深度需低于基坑底面 0.5-1.0m。回灌井布置在降水影响范围外围，井距 15-25m，回灌水量按降水量的 60%-80% 控制，通过监测井实时调整动态平衡，监测井布置在基坑周边 5m、10m、20m 处。降水过程严格控制抽水速率，初期不超过设计值的 50%，分三级逐步提升至设计流量，防止周边土体产生过大沉降，降水结束后缓慢回灌恢复地下水水位至天然状态。

(三) 地下连续墙止水帷幕施工技术

地下连续墙采用液压抓斗成槽工艺，墙体厚度 600-1000mm，槽段长度 4-6m。导墙采用 C20 混凝土现浇，顶宽 1.0-1.2m、深度 1.2-1.5m，垂直度偏差控制在 1/300 以内。成槽过程采用膨润土泥浆护壁，性能指标为比重 1.10-1.25、粘度 18-22s、含砂率小于 4%。混凝土浇筑采用导管法，导管直径 250-300mm、坍落度 180-220mm 确保自流动性。质量检测采用超声波透射法检测墙体完整性，压水试验验证渗透系数小于 $1 \times 10^{-7} \text{cm/s}$ 满足防渗要求。

四、复合地层条件下的施工技术集成应用

(一) 地质条件快速识别与施工方案动态调整

地质条件识别采用随钻监测技术，通过钻机扭矩、钻进速度、循环液消耗量与钻头磨损程度综合判断地层变化。建立地层特征参数数据库，将实时钻进参数与数据库对比实现地层自动识别，识别精度通过机器学习算法优化达到 85% 以上。动态调整机制包括钻进工艺参数优化、桩长调整与桩端持力层重新选择，当遭遇与勘察报告差异较大的地层时，立即进行补充勘探验证地质条件。施工方案调整流程为：异常信息采集-地质条件确认-方案比选论证-专家审查-实施调整-效果验证，全流程控制在 48 小时内完成避免工期延误。技术决策支持系统集成 BIM 模型与地质信息模型，三维可视化展示调整方案的空间关系与施工影响范围，通过参数化设计快速生成多个备选方案并进行技术经济比较，选择最优

方案实施。

(二) 多种基础形式的组合应用技术

复合地层条件下基础形式组合设计遵循因地制宜原则，软土区域采用水泥搅拌桩复合地基、岩溶发育区采用嵌岩桩、地下水丰富区采用沉井基础，通过基础形式过渡段设计实现不同基础类型的衔接。过渡段长度按刚度渐变原则确定，采用渐变桩长或渐变桩间距方式，过渡段长度不小于基础宽度的 2 倍。承台设计考虑不均匀沉降影响，采用加厚承台或设置抗拔桩控制差异沉降，承台厚度较常规设计增加 20%~30%，配筋率相应提高。施工组织采用分区分段流水作业，软土处理区先行施工完成地基加固，桩基施工区同步进行钻孔作业，缩短关键工期路径。质量控制重点监测过渡段沉降差，通过沉降观测点加密布置，观测频率提高至每日 2 次，累计沉降差超过设计允许值的 80% 时采取预应力张拉或注浆加固措施调整。复合地层条件下市政道桥基础形式组合及过渡段设计如图 1：

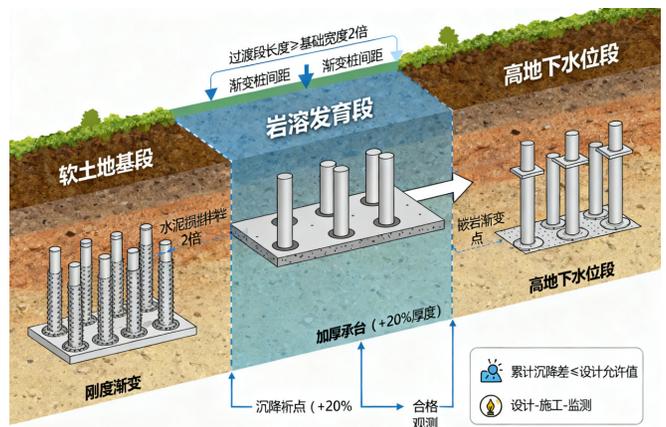


图 1 复合地层条件下市政道桥基础形式组合及过渡段设计示意图

不同基础形式的荷载传递机理通过数值模拟分析，确保上部结构内力分布均匀，避免应力集中导致结构开裂。为实现各施工环节质量闭环管理，需针对不同技术制定明确的质量控制重点及合格判定依据，确保施工成果符合设计及规范要求，具体标准如表 2 所示。

表 2 质量控制重点及合格标准

施工技术类别	质量控制重点项目	合格标准
深层水泥搅拌桩	桩身完整性、复合地基承载力	桩体强度变异系数 < 0.25; 现场载荷试验沉降量符合容许值
真空预压处理	固结完成判定、地基承载力	沉降速率 ≤ 1mm/d; 孔压消散系数达设计值; 加固后地基承载力满足设计要求
嵌岩桩施工	清孔质量、混凝土灌注	泥浆含砂率 < 4%、比重 1.15-1.25; 导管理深 2-6m; 孔底沉渣 ≤ 50mm
基坑支护结构	稳定性验算、支护变形	抗倾覆安全系数 ≥ 1.25、抗隆起 ≥ 1.60、抗渗流 ≥ 1.50; 变形控制在规范限值内
地下连续墙	墙体完整性、防渗性能	超声波检测无缺陷; 压水试验渗透系数 < 1 × 10 ⁻⁷ cm/s
复合地层基础衔接	过渡段沉降差	累计沉降差 ≤ 设计允许值; 沉降观测频率 ≥ 1 次 / 日, 异常时及时加固

(三) 施工过程数值模拟与参数优化

数值模拟采用 FLAC3D 或 ABAQUS 建立三维有限元模型, 土体本构关系选用修正剑桥模型或摩尔-库仑模型, 通过三轴试验与固结试验标定模型参数。模拟工况包括地基处理、桩基施工、基坑开挖与结构施工全过程, 每个工况划分为多个施工步骤反映实际施工顺序。计算结果输出地表沉降、支护位移、土体应力与孔隙水压力分布云图, 与现场监测数据对比验证模型可靠性, 偏差控制在 15% 以内。参数优化采用正交试验设计方法, 选取水泥掺量、桩间距、降水深度与支撑刚度等关键参数, 通过多方案模拟计算建立参数与变形的响应关系。敏感性分析确定各参数对变形的影响权重, 优先优化敏感性高的参数, 通过迭代计算寻找最优参数组合。优化成果形成施工控制标准, 编制不同地层条件下的施工参数推荐表, 指导现场施工参数快速选择, 提高施工效率并保证工程质量。

(四) 信息化施工管理平台构建

信息化平台架构采用云计算与移动互联网技术, 建立数据采集层、数据处理层与应用展示层三层体系结构。数据采集层集成监测传感器、施工设备与视频监控, 通过物联网技术实时传输数据至云端服务器, 采集频率根据数据类型设定, 变形监测数据每小时采集一次, 施工参数实时采集。数据处理层采用大数据分析技术, 对海量监测数据进行清洗、存储与分析, 建立预测模型预判施工风险, 异常数据自动触发预警机制推送至管理人员移动终端。应用展示层开发 Web 端与移动端应用, 提供 BIM 模型浏览、施工进度展示、质量检测报告查询与风险预警推送等功能。施工全过程留痕管理通过电子签名与时间戳技术, 确保数据真实性与可追溯性, 质量验收

资料自动生成符合归档要求的电子文档。平台集成施工模拟动画, 通过虚拟现实技术进行技术交底与安全教育, 提升参建人员对复杂工况的理解能力, 减少施工失误与安全事故发生率。

结语

通过建立地质条件快速识别机制、多种基础形式组合应用技术和基于数值模拟的参数优化方法, 实现了施工方案的动态调整与精细化控制。信息化施工管理平台的构建为施工全过程质量管控提供了有效手段。研究成果已在多个工程中成功应用, 显著提高了施工效率和工程质量。未来应进一步加强人工智能技术在地质识别和风险预警中的应用, 推动施工技术向智能化、精准化方向发展, 为市政道桥工程建设提供更加可靠的技术保障。

参考文献

[1] 曹小琦. 复杂地质条件下道路改建路基土石方施工技术优化 [J]. 散装水泥, 2025, (03): 127-129.

[2] 阳军, 胡坤, 阳平, 等. 复杂地质条件下城市道路更新明挖下穿隧道施工难度与应对措施探究 [J]. 居业, 2025, (05): 79-81.

[3] 周文博, 刘静. 城市道路在复杂地质条件下线路选择及边坡治理理念研究 [J]. 城市道桥与防洪, 2024, (11): 91-93+22.

[4] 张涛. 山区复杂地质条件下道路工程施工技术难题及解决方案 [J]. 交通建设与管理, 2024, (05): 89-91.

[5] 敬麒麟, 王宇, 吕玉海. 基于地质环境分析的复杂山区道路防护工程设计 [J]. 科技资讯, 2024, 22 (18): 195-197.

作者简介: 张玉金(1975-08-), 男, 汉族, 山东潍坊人, 本科, 工程师, 研究方向: 城市道路与交通工程。