

复杂地质条件下建筑地基基础施工技术的创新应用

杨正龙

新疆塔建三五九建工有限责任公司 新疆 阿拉尔 843300

摘要：随着城市化进程的加速，建筑工程面临着日益复杂的地质条件挑战。本文深入探讨了在复杂地质环境中，如湿陷性黄土、软土、岩溶等地区，传统地基基础施工技术的局限性，以及创新技术的研发与应用。通过对多种创新施工技术的原理、优势及实际工程案例的分析，展示了这些技术在提高地基稳定性、承载能力，降低施工成本和缩短工期等方面的显著效果。同时，本文还对创新技术的发展趋势进行了展望，为建筑行业在复杂地质条件下的可持续发展提供参考。

关键词：复杂地质条件；建筑地基基础；施工技术；创新应用

1 引言

建筑地基基础是建筑物的关键组成部分，其质量直接决定建筑的稳定性与安全性。在地质条件简单区域，传统施工技术可满足工程需求，但随着建筑领域拓展，越来越多项目需在复杂地质条件下开展，如湿陷性黄土地区、软土地基、岩溶地貌区域等^[1]。这些区域易出现地基沉降、塌陷、土体失稳等问题，严重威胁工程质量与安全。为应对挑战，建筑行业加大研发投入，涌现出一系列创新技术。它们不仅能有效解决复杂地质施工难题，还在提高效率、降低成本、减少环境影响等方面优势显著。因此，深入研究这些创新技术的应用，对推动建筑行业可持续发展意义重大。

2 复杂地质条件对建筑地基基础施工的挑战

2.1 湿陷性黄土地区

湿陷性黄土在我国分布广泛，其主要特点是在自重或一定压力下受水浸湿后，土体结构迅速破坏，发生显著的下沉现象。这种特性给地基基础施工带来了极大的挑战。传统的地基处理方法，如挤密法，在施工过程中易受人为因素与客观条件的干扰，常出现多填料、少夯击现象，致使桩体直径与桩间土挤密效果难以达到工程质量要求^[2]。为保障工程质量，部分工程不得不采用工艺繁杂的混凝土灌注桩地基处理方案，这不仅拉长了工期，还大幅增加了工程造价。

2.2 软土地基

软土地基具有含水量高、孔隙比大、压缩性高、抗剪强度低等特点。在软土地基上进行建筑施工时，地基容易产生较大的沉降和不均匀沉降，导致建筑物开裂、倾斜甚至倒塌。此外，软土地基的承载能力较低，难以满足大型建筑物的荷载要求。常规的地基加固工法，如多轴搅拌和高压旋喷注浆等，在复杂软土地质条件下，

容易出现搅拌或喷射不均匀的情况，导致加固的地基整体强度低和不稳定，给施工带来极大的隐患。

2.3 岩溶地貌区域

岩溶地貌区域地下溶洞、暗河等发育，地质条件极为复杂。在该区域进行建筑地基基础施工时，可能会遇到地基塌陷、漏水等问题。由于溶洞的存在，地基的完整性和稳定性受到严重破坏，使得传统的地基处理方法难以适用。施工前需要对地下溶洞的位置、大小、分布情况等进行详细探测，制定合理的施工方案，否则将给工程带来巨大的安全风险。

3 创新施工技术在复杂地质条件下的应用

3.1 旋挤压灌挤密桩技术（SSPG）

3.1.1 技术原理

旋挤压灌挤密桩技术（SSPG）采用旋挤压灌一体机，利用专用钻具将土体挤压成孔，成孔施工不出土，挤密至设计深度后提钻，同时由孔底向上压灌流态自密实的可固结材料成桩，实现成孔压灌一次成桩。

3.1.2 技术优势

该技术能将软弱地基处理深度提深至地下25米以上，对于湿陷等级高、处理厚度大（>20米）的场地尤为适用，可有效消除场地湿陷性，提升地基承载力。在满足工程建设质量的前提下，SSPG技术较灌注桩可节省20%-40%的投资成本，实现经济效益与工程质量的双重提升^[3]。此外，该技术还具有简化施工工序、提高成桩质量的优点。它将传统的成孔、回填二道工序简化为成孔压灌一次成桩，平均成桩时间约30分钟，较以往施工时间缩短一半以上。同时，一次成桩的作业模式极大程度减少了人工操作过程中的不确定性，降低了原材料质量波动、地基土含水率变化以及天气状况等因素对成桩的干扰，实现成桩质量可控、数据可溯。

3.1.3 实际工程案例

延安原油储备库项目地处IV级自重湿陷性黄土区域,地基施工面临高挖高填、高边坡、黄土湿陷等一系列严峻的技术挑战。中国能建西北院选用旋挤压灌挤密桩技术(SSPG)进行地基处理,成功解决了项目地基施工难题。该技术在固原、庆阳、洛川等多个典型深厚湿陷性黄土地区也已成功完成试验,未来有望为湿陷性黄土、杂填土、素填土、松散和稍密粉土及砂土等各类场地工程的地基处理提供更优质高效的解决方案。

3.2 无损土体固化技术

3.2.1 技术原理

无损土体固化技术通过微孔注入自主研发的特种复合材料,在1-90秒内实现土体快速固结,形成强度高的结构体,从而提升地基承载力。该技术还配备智能监测系统,可实时调控抬升精度,确保建筑结构零损伤。

3.2.2 技术优势

无损土体固化技术具有微创、高效、环保的特性,彻底改变了传统地基加固工程中大规模开挖、停工停产的行业痛点。其对地质条件的适应性强,在软土地基处理中,固化材料可深入土体3米范围,形成抗剪强度提升3-5倍的复合地基,有效抑制沉降^[4]。在喀斯特地貌区,通过注浆压力智能调控系统,可同步填充溶洞空隙、改良软土特性。

3.2.3 实际工程案例

江苏苏州一2000平方米厂房因长期生产导致地面沉降15厘米,设备运行精度严重受损,恒祥宏业采用无损土体固化技术,通过20天施工完成地坪抬升,平整度恢复至 ± 10 毫米以内。安徽阜阳一栋11层住宅楼因地质条件复杂出现倾斜,倾斜率超规范3.75‰,项目团队通过毫米级抬升技术,在15天内将倾斜值从120毫米降至10毫米,倾斜率恢复至0.6‰,全程无需住户撤离,实现“零干扰”纠偏。

3.3 数智化赋能桩基打桩工程技术

3.3.1 技术原理

以静钻根植桩工法为例,数智化技术在桩基施工中的应用涵盖了施工的各个阶段。在钻孔阶段,利用高精度定位技术确保钻孔位置的准确性,通过自动化控制系统调整钻孔速度和方向;在注浆和扩孔过程中,智能监测技术实时监测注浆压力、注浆量和扩底直径等参数;在植桩阶段,自动化控制系统根据桩身自重和地质条件,精确控制植桩速度和力度。

3.3.2 技术优势

数智化技术实现了桩基打桩工程的自动化和智能化

施工,减少了人工干预,提高了施工效率。高精度定位技术和智能监测技术确保了桩基施工的准确性和质量,通过精确控制桩位、桩身垂直度、入土深度等参数,避免了因施工误差导致的质量问题^[5]。同时,该技术通过优化施工方案、减少材料浪费和人工成本,降低了桩基打桩工程的施工成本,并实现了对桩基施工过程的实时监控和预警,增强了施工安全性。

3.3.3 实际工程案例

在复杂地质条件下,如软土、岩溶等地层,数智化技术发挥了重要作用。在软土地基中施工时,通过智能监测技术实时监测土壤位移和应力变化,结合自动化控制系统调整打桩参数,避免因打桩引起的土体扰动和桩身倾斜。在岩溶地区,利用高精度定位技术和地质雷达探测技术,提前探测地下溶洞的位置和分布情况,制定合理的施工方案,并通过自动化控制系统精确控制打桩设备的运行,确保桩基能够顺利穿过溶洞区域,保证桩基的承载能力。

3.4 深层地基加固工艺(D-RJP施工工法)

3.4.1 技术原理

张靖皋长江大桥北航道桥南锚碇项目团队创新采用大面积深层地基加固技术,改良既有工艺,采用650mm大直径引孔,使引孔垂直度可达 $L/600$,较原工艺提高3倍以上,有效保证了桩基施工垂直度;优化工艺参数,创新性提出D-RJP施工工法,结合复喷工艺,确保桩径的同时有效提升桩体强度稳定性。

3.4.2 技术优势

该技术解决了在基础软弱覆盖层厚、不存在满足桥梁基础结构设计要求的持力层和天然隔水层的复杂地质条件下的地基加固难题。通过创新研发智能建造系统,实现对深层地基加固建造过程智能化管控及正反向溯源,助力隐蔽工程质量管理精细化、信息化和智能化。

3.4.3 实际工程案例

张靖皋长江大桥北航道桥南锚碇位于江心洲,基础软弱覆盖层厚,地质条件复杂。项目团队通过技术攻坚,采用深层地基加固工艺,完成了深层地基加固的第1481根桩,已完成总加固数量的60%,为大桥的建设奠定了坚实的基础。

3.5 上海金泰CSM工法设备在盾构作业端头地基加固施工技术

3.5.1 技术原理

上海金泰的SC液压铣削搅拌钻机采用双轮搅搅拌墙工艺,利用液压动力驱动铣轮旋转,对土体进行切削搅拌,并同时注入水泥浆等固化材料,形成连续的搅拌

墙,从而实现地基加固。

3.5.2 技术优势

该技术施工高效、环境友好、适应性强、质量可靠。对于地层起伏较大、分布不规则的软基地质,能够有效避免搅拌或喷射不均匀的问题,保证加固的地基整体强度和稳定性,成为盾构端头加固的理想选择。

3.5.3 实际工程案例

海太长江隧道工程主体项目HT-A3标地质条件复杂,各土层埋深不一、层厚多变,且土层性状差异显著,地基均匀性较差,整体强度低,自稳能力不足,加固深度最深要达到35.6米。浙江土工岩土科技有限公司采用上海金泰CSM工法设备对多轴钻机进行替代,成功完成地基加固施工,取得了良好的加固效果,验证了其在实际工程中的可行性和有效性。

4 创新技术的发展趋势

4.1 智能化与自动化

随着人工智能、大数据、物联网等技术的深度渗透,建筑地基基础施工正加速向智能化与自动化转型。智能传感网络将实现地质参数、施工荷载、桩体应力等数据的实时采集,通过5G技术传输至云端数据中心,经AI算法快速生成地质模型与施工方案^[6]。如智能打桩机可根据实时监测的土层阻力自动调节锤击力度与频率,旋挖钻机搭载的视觉识别系统能精准避开地下管线与溶洞。自动化装备集群将成为主流,如无人摊铺机与智能注浆机器人协同作业,实现从成孔到固化的全流程无人化施工。数字孪生技术的应用可构建施工全过程的虚拟镜像,通过模拟仿真提前预判施工风险,动态优化施工参数,使地基处理精度控制在毫米级,大幅降低人为操作误差。

4.2 绿色环保

在“双碳”目标驱动下,绿色低碳成为地基施工技术创新的核心准则。新型环保固化材料将逐步替代传统水泥,如工业固废制备的碱激发剂可减少60%以上的碳排放,生物酶固化剂能实现土体无污染加固。低扰动施工工艺持续升级,静音液压锤较传统柴油锤噪音降低25分贝以上,模块化钢结构支护体系可重复利用8次以上,建筑垃圾回收率提升至90%。施工全过程将建立碳足迹追踪系统,通过光伏供电设备、电动工程机械等清洁能源应用,实现单位产值能耗下降30%。生态友好型工法如植被混凝土桩基,既能满足承载要求,又能恢复地表生态,

实现工程建设与自然保护的协同发展。

4.3 多元化与综合化

复杂地质的复合特性推动技术体系向“跨界融合”演进。针对海陆交互相软土,将真空预压与电渗排水技术结合,形成“负压-电场”协同加固体系,固结速度提升2倍以上。在岩溶发育区,地质雷达探测与无损注浆技术联动,实现溶洞定位-填充-加固的一体化处理。智能材料与结构体系深度融合,如自修复混凝土桩体可通过微胶囊技术自动愈合裂缝,碳纤维增强复合材料桩兼具高强度与耐腐蚀性,适应盐碱地等特殊环境。未来将形成以地质条件为输入、以数字平台为中枢、以多技术组合为输出的定制化解决方案,实现“一种地质场景、一套复合技术”的精准施工模式。

5 结论

复杂地质条件给建筑地基施工带来诸多挑战,传统技术存在明显局限。通过技术创新,旋挤压灌挤密桩、无损土体固化、数智化桩基施工、深层地基加固及上海金泰CSM工法等技术应运而生。这些技术在工程中优势显著,有效解决了复杂地质施工难题,提升了地基稳定性与承载能力,同时降低成本、缩短工期。随着科技发展,地基施工技术将向智能化、自动化、绿色环保及多元化综合化方向发展。建筑行业需积极应用创新技术,提升复杂地质施工能力,助力行业可持续发展,未来还需加强技术研究应用,完善体系以应对更复杂的地质与工程需求。

参考文献

- [1]张瑞云,刘云浩,李腾.复杂地质条件下既有建筑地基基础加固技术研究[J].新型建筑材料,2024,51(04):36-40.
- [2]范小倩.复杂地质条件下高层建筑地基承载力预测方法研究[J].河北水利电力学院学报,2025,35(01):58-64.
- [3]王彦羽.基于复杂地质条件的高层建筑地质勘察技术[J].中国建筑金属结构,2025,24(05):28-30.
- [4]刘政,张立君,冉松滔.复杂岩溶地质条件下建筑地基处理的技术研究[J].城市建设理论研究(电子版),2024,(30):106-108.
- [5]张瑞云,刘云浩,李腾.复杂地质条件下既有建筑地基基础加固技术研究[J].新型建筑材料,2024,51(04):36-40.
- [6]李玲.基于复杂地质条件的高层建筑地基处理探究[J].工程抗震与加固改造,2024,46(01):188.