

软土地基区域建筑桩基施工沉降控制新技术研究

蒙核量¹ 张淑芳²

1. 武汉市测绘研究院 湖北 武汉 430022

2. 武汉市洪山区城市更新服务中心 湖北 武汉 430070

摘要：软土地基含水率高、压缩性大、流变特性显著，桩基施工易产生不均匀沉降与工后持续变形，传统沉降控制技术精度有限、工期较长，难以适配复杂深厚软基工况。本文分析软土沉降机理与传统工艺短板，研究桩端后注浆、挤扩支盘桩、智能分层预压三类新型减沉技术。结合数值模拟与实际工程验证，新技术可有效优化桩土受力状态、严控沉降变形，综合效益突出，可为软土地基桩基施工沉降治理提供可靠技术参考。

关键词：软土地基区域；建筑桩基施工；沉降控制；新技术

引言：我国滨海及软土分布区域广泛，软土地基力学性能薄弱，在桩基施工扰动与荷载作用下易出现固结滞后、长期流变沉降等问题，严重影响建筑基础稳定性与工程使用寿命。传统沉降控制技术无法满足高标准、复杂软基的施工要求。基于现有工程痛点，本文系统探究软基桩基沉降成因，创新优化沉降控制工艺，通过模拟分析与现场实测试验验证技术成效，为软土地区建筑桩基工程提质增效提供技术依据。

1 软土地基桩基施工沉降机理及传统技术分析

1.1 软土地基基本工程特性

(1) 软土物理力学指标：软土具有高含水率、大孔隙比特点，土体结构疏松。其压缩模量小、抗剪强度低，受外荷载易发生变形、稳定性差，且渗透系数小，孔隙水排出缓慢，是地基长期缓慢沉降的核心诱因。(2) 软土流变与固结沉降特性：软土沉降分为三类，瞬时沉降是施工荷载引发的土体瞬间弹性变形；固结沉降由孔隙水缓慢排出、土体压密形成，是主要沉降形式；次固结沉降为土体固结后，土颗粒长期流变产生的持续微沉降，受时间和土体性质影响较大。(3) 复杂工况下软基沉降变异特征：深厚软土沉降量大、周期长；分层软土因各土层力学性能差异，易出现不均匀沉降；高含水软土固结滞后，沉降变形具备较强持续性与不确定性。

1.2 建筑桩基施工沉降产生机理

(1) 桩基施工扰动沉降机理：钻孔、成桩、灌注等施工工序会破坏软土原生结构，打破原有应力平衡，造成土体松散、孔隙扩张，引发施工期即时沉降。(2) 桩土相互作用沉降机理：桩基荷载传递过程中，桩侧摩阻力与桩端阻力分布不均，桩周土体受力失衡，土体压缩变形存在差异，进而产生桩基不均匀沉降。(3) 后期次沉降产生机理：施工完成后，软土流变效应持续存在，

残余孔隙水压力缓慢消散，土体持续微量压缩，引发桩基长期持续性次沉降。

1.3 传统桩基沉降控制技术及其局限性

(1) 常规沉降控制技术类型：传统软基桩基沉降控制技术以排水固结法、垫层换填法、常规桩端注浆、桩基加密布置为主，是常规施工主流工艺。(2) 传统技术施工工艺与控制原理：通过排水降压、置换软土、加固桩端土体、分散桩基荷载的方式，抑制土体压缩变形，仅适用于常规浅层软土地基沉降控制场景。(3) 传统技术应用局限性：传统技术沉降控制精度不足，难以满足高标准工程要求，且存在工期长、造价高的问题。对深厚、含水复杂软基加固效果较差，无法有效解决土体后期流变引发的回弹沉降问题^[1]。

2 软土地基桩基施工沉降控制新技术研究

2.1 新型桩端后注浆耦合加固技术

(1) 技术核心原理：该技术依托浆土耦合加固机理，针对软土孔隙大、固结慢、承载力低的短板，利用高压浆液渗透、填充、挤密桩端及桩周松散土体空隙。浆液凝固后与原状软土结合为整体，形成优质复合加固层，改良桩端软弱土体结构，提高土体刚度与承载力，优化桩土荷载承载体系，有效约束桩端土体压缩变形，从根本上控制桩基施工及工后沉降问题。(2) 技术施工工艺流程：采用标准化施工流程，依次为钻孔成桩、桩底清孔、预埋注浆管路、桩身混凝土灌注、养护、分级压力注浆、稳压封孔。施工关键需保证桩底清孔彻底，杜绝厚沉渣影响加固效果；注浆作业需待桩身混凝土达到设计强度后实施，采用分级注浆方式，避免一次性高压注浆扰动桩周原状软土，保障浆液稳步渗透固化^[2]。

(3) 关键施工参数设计：适配深厚软土工程特性，核心参数如下：浆液水灰比控制在0.5~0.6，满足软土渗

透固结要求；分级注浆压力稳定在2.0~2.5MPa，单桩注浆量依据桩径、软土厚度动态调整；分层注浆间隔30~40min，保证上层浆液初步固结，确保整体加固均匀、稳定。

2.2 挤扩支盘桩减沉新技术

(1) 挤扩支盘桩减沉机理：挤扩支盘桩在传统灌注桩基础上增设多级支盘结构，通过挤扩成型的盘体大幅扩大桩身有效受力面积，改变单一桩端受力模式。上部竖向荷载可通过桩身、桩侧、支盘多路径分散传递至深层密实土层，有效降低桩端集中应力，大幅减小软土压缩变形量，显著提升桩基抗沉降能力。(2) 差异化支盘布置设计：依据软土分层分布、力学参数差异化特征开展针对性设计，针对浅层软弱厚土层增设2~3级支盘，增大荷载扩散范围；中层过渡土层优化支盘直径与间距，避免应力重叠；深层持力层合理布置底端支盘，实现多层土体协同承载，适配不同厚度、不同性状的软土地基工况。(3) 施工质量控制要点：施工中严格把控挤扩成型工序，确保支盘尺寸规范、成型饱满，杜绝塌孔、缩径问题；混凝土灌注全程连续作业，防止桩身出现断桩、夹渣缺陷；同步开展桩身完整性检测，及时修正施工偏差，避免桩基结构缺陷引发的不均匀沉降与后期变形^[3]。

2.3 智能分层预压减沉调控技术

(1) 技术调控原理：该技术针对软土流变、固结滞后特性，采用分层分级预压方式，逐级施加预压荷载，加速桩周软土孔隙水排出，缩短土体固结周期，提前完成大部分固结沉降。同时依托智能监测数据动态调控施工参数，消除软土残余变形，有效控制施工沉降与工后次固结沉降。(2) 智能监测系统布设：搭建一体化实时监测体系，在桩基周边布设沉降监测点、孔隙水压力传感器、土体位移监测设备，全程实时采集沉降变形、孔隙水压力消散速率、土体水平位移等核心数据，为施工动态调控提供精准数据支撑。(3) 动态调控施工方法：摒弃传统固定预压模式，根据实时监测数据动态调整预压荷载大小、分级次数与预压时长。当土体沉降速率趋于稳定、孔隙水压力完全消散后，方可进行下一级加载，实现软土沉降的精准可控，有效解决深厚软基长期流变、沉降滞后难题。

3 新技术沉降控制效果数值模拟与对比分析

3.1 数值模拟模型构建

(1) 模拟软件选取与基本假设：本文采用Midas GTS NX有限元软件开展数值模拟，土体选用摩尔-库伦本构模型，桩基采用线弹性本构模型，注浆加固层采用硬化弹

塑性本构模型。模拟假定地层均匀分层、桩土界面紧密接触，忽略温度、地震等外界干扰，贴合软土桩基实际施工工况。(2) 模型尺寸与网格划分：结合沿海典型深厚软土工程工况，建立尺寸60m×60m×40m的三维模型，约束模型底部竖向与水平位移、侧面水平位移。采用渐变网格划分，桩周核心区域网格精度0.5m，外围土体网格精度2m，同时分层赋值软土、粉质黏土、持力层等土体物理参数，保障模拟精度^[4]。(3) 荷载与施工工况设定：严格还原全流程施工工况，依次模拟场地初始应力平衡、桩基钻孔成桩、分层荷载施加、新技术加固处理、后期180d固结沉降全过程。上部结构施加均布荷载120kPa，精准复刻实际工程受力与沉降变形过程。

3.2 传统技术与新技术沉降模拟结果分析

(1) 桩基总沉降量对比分析：模拟结果显示，无加固工况桩基最大沉降达48.2mm，传统排水固结法沉降为32.6mm，桩端后注浆、挤扩支盘桩、智能预压新技术沉降分别为15.3mm、13.8mm、16.5mm，新技术整体沉降控制效果较传统技术提升45%以上。(2) 不均匀沉降控制效果对比：传统技术处理后桩基最大差异沉降达8.5mm，存在轻微结构倾斜风险；三类新技术处理后差异沉降均控制在3mm以内，有效消除软基桩基差异化沉降问题，大幅提升建筑结构稳定性。(3) 桩土应力分布对比：传统技术易出现桩端应力集中，峰值应力达385kPa；新技术可优化桩土荷载分配，桩侧摩阻力均匀提升，桩端峰值应力降至220kPa左右，有效缓解土体局部应力集中引发的沉降变形。

3.3 新技术沉降控制影响因素参数分析

(1) 施工参数对沉降的影响：模拟表明，注浆压力2.0~2.5MPa、水灰比0.55为最优注浆参数；支盘直径扩大至桩身2.5倍时减沉效果最佳；预压荷载80~100kPa可平衡沉降控制效果与施工工期。参数超标易引发土体扰动，参数不足则加固效果薄弱。(2) 软土参数对施工效果的影响：软土厚度10~20m、含水率45%~60%、压缩模量2.5~4.0MPa区间内，新技术适配性良好；当软土含水率超65%、厚度超25m时，沉降控制精度小幅下降，需优化参数辅助加固。(3) 最优施工参数组合确定：通过多组正交模拟对比，最终确定适配深厚软土地基的最优参数体系，即注浆压力2.2MPa、支盘间距6m、分级预压荷载90kPa，该组合可实现桩基总沉降与不均匀沉降的双重最优控制^[5]。

4 工程应用与效果验证

4.1 工程概况

(1) 项目场地地质条件：本工程场地为典型滨海深

厚软土地基,表层分布18.5m厚淤泥质软土,土体平均含水率58.2%,压缩模量仅3.1MPa,土体压缩性高、稳定性差。场地地下水位埋深1.2~2.0m,地下水丰富且渗透性强,施工过程易出现土体软化、孔隙水压力积聚,存在不均匀沉降、土体滑移等地质风险。(2)工程桩基设计参数:本项目采用钻孔灌注桩基础,桩径800mm,有效桩长32m,单桩竖向抗压设计承载力2800kN。依据现行规范要求,桩基总沉降控制限值 $\leq 20\text{mm}$,相邻桩基不均匀沉降差值控制在 $\leq 3\text{mm}$,对沉降控制精度要求较高。(3)工程施工重难点:场地软土厚度大、流变特性显著,传统工艺固结周期长、加固不彻底;地下水活跃易扰动桩周土体,极易引发施工期沉降超标和工后次生沉降。整体施工核心难点为精准控制沉降变形、规避长期流变沉降,亟需高精度减沉加固技术。

4.2 新技术现场施工应用方案

(1)总体施工部署:结合场地复杂软基工况,采用“智能分层预压+桩端后注浆+挤扩支盘”组合新技术施工方案。遵循先场地预压固结、后桩基成孔施工、最后桩端注浆加固的顺序开展施工,分层分步控制土体变形,保障桩基施工稳定性。(2)关键工序施工实施:施工中严格落实智能分层预压调控技术,逐级施加预压荷载;挤扩支盘桩精准控制支盘成型位置与尺寸,保证荷载均匀传递;桩端后注浆采用分级稳压注浆工艺,规避注浆不均、土体扰动等问题,确保各工序加固效果达标。(3)施工质量保障措施:建立全过程质量管控体系,严格查验水泥、砂石等原材料性能;对成孔、挤扩、注浆、预压等关键工序实行逐道验收;布设实时监测设备,动态把控施工状态,从源头规避施工质量缺陷。

4.3 现场监测与效果分析

(1)监测方案布设:在桩基及周边土体布设沉降、土体位移、孔隙水压力、桩身应力监测点位,施工期每2小时监测1次,工后前3个月每周监测2次,后期每月监测1次,全面采集施工及运营期变形数据。(2)施工期沉降监测结果分析:施工全过程桩基沉降变化平稳,最大施工期沉降仅9.6mm,沉降速率均匀可控,无突发沉

降、土体塌陷现象,证明新技术可有效保障软基桩基施工稳定性。(3)工后长期沉降效果分析:工后180d监测显示,桩基最终沉降量稳定在12.3mm,不均匀沉降差值 $\leq 2.1\text{mm}$,远优于规范限值及传统技术32mm的沉降控制效果,长期沉降稳定性优势显著。

4.4 技术经济效益分析

(1)技术效果效益:相较于传统加固技术,新技术沉降控制精度提升60%以上,彻底解决深厚软基工后回弹、长期流变沉降难题,大幅提升建筑基础整体安全性与耐久性。(2)经济与工期效益:新技术无需长时间预压养护,整体工期缩短20%,同时减少后期沉降修复成本,综合工程造价降低8%,具备良好的经济优势。(3)推广应用价值:该组合技术适配深厚软土、分层软土、富水软土等复杂工况,可广泛应用于滨海软土地区房建、市政桩基工程,适配性强、效果稳定,具备极高的工程推广价值。

结束语

本文系统研究了软土地基桩基沉降机理及新型控制技术,对比验证了三类新技术的减沉优势,有效弥补了传统工艺沉降控制精度不足、适配性差的缺陷。工程实践表明,新技术可显著降低桩基总沉降与不均匀沉降,缩短施工工期、节约工程成本。该技术体系适配各类复杂软土工况,稳定性与实用性较强,可为同类软基桩基沉降控制工程提供借鉴,具备广阔的推广应用前景。

参考文献

- [1]吴安康.基坑开挖中软土地基支护与桩基施工探究[J].城市建筑空间,2022,29(S2):892-894.
- [2]薛瑞涛.房屋建筑施工中深厚软土地基处理技术分析[J].江西建材,2023,(05):311-315.
- [3]张宝,梁广朋.建筑软土地基应力分析及分层回填施工技术[J].江苏建筑,2022,(S2):49-52.
- [4]张晓辉.建筑工程施工中软土地基处理技术的应用[J].城市建筑空间,2022,29(S1):201-204.
- [5]胡政国.住宅建筑施工中的软土地基处理技术分析[J].住宅与房地产,2024,(20):104-106.