

软土深基坑SMW工法桩支护变形机理与控制研究

刘 斌

[上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司,上海市 200092]

摘要: 软土地区深基坑工程因土体高压缩性、低强度及显著流变特性,易引发支护结构失稳、变形超限等安全隐患。基于住房和城乡建设部2020—2024年事故统计数据,软土基坑事故占比78%。结合某污水厂基坑工程案例,系统分析软土深基坑变形机理及传统支护体系的技术瓶颈。研究表明:软土蠕变与支护结构耦合效应中的水泥土强度衰减、渗流-蠕变交互作用是变形主因,施工超挖、动载超限等扰动及设计入土深度不足等参数偏差会进一步加剧风险。以型钢水泥土搅拌桩(墙)(soil mixed wall, SMW)工法为例,揭示了其蠕变失效机理,并提出“材料—设计—施工”协同优化路径,包括低水灰比、水泥土改良等措施,形成“预警—分析决策—执行”闭环控制工法。通过2起典型基坑变形事故的实证分析,验证了卸载反压、支护补强等应急措施的有效性,成功将后续变形速率降至可控范围。为软土地区深基坑工程在勘察、设计、施工等方面提供了机理分析、控制修复及预防措施,具有显著的社会经济效益与推广价值。

关键词: 深基坑变形;控制修复;软土工程;SMW工法桩;应急措施

中图分类号: TU753.4

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2025)08-0282-05

Study on Deformation Mechanism and Control of SMW Method Pile Support in Soft Soil Deep Excavations

LIU Bin

[Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200092, China]

Abstract: Deep excavation projects in soft soil regions are prone to safety risks such as supporting structure instability and excessive deformation due to the high compressibility, low strength and significant rheological properties of soil. Based on accident statistics (2020—2024) from the Ministry of Housing and Urban-Rural Development (MOHURD), the soft soil excavation accidents accounted for 78% of cases. Combined with an excavation case of a WWTP, the deformation mechanisms of deep excavations in soft soils and the technical limitations of traditional support systems are systematically analyzed. The research shows that the strength attenuation of cement soil and the percolation-creep interaction in the coupling effect of soft soil creep and support structure are the main causes of deformation. The disturbances such as over-excavation during construction and over-limit dynamic loads, as well as parameter deviations like insufficient design depth of soil penetration, will further intensify the risks. Taking the SMW method piles as an example, the creep failure mechanism is elucidated, and a collaborative optimized path of “material - design - construction” is proposed, including the measures like low water-cement ratio cement soil modification to form a closed-loop control methodology of “warning - analysis / decision - execution”. Through empirical analysis of two typical excavation deformation accidents, the efficacy of emergency measures such as unloading counter-pressure and support reinforcement is confirmed that the subsequent deformation rates are successfully reduced to manageable levels, which provides the mechanism analysis, control remediation and preventive measures for survey, design and construction of deep excavation projects in soft soil regions, and has the significant socio-economic benefits and promotional values.

Keywords: deep excavation deformation; control remediation; soft soil engineering; SMW method piles; emergency measures

0 引言

SMW工法桩因施工扰动小、止水性能好,广泛应

用于软土深基坑工程。然而,软土的高压缩性、低强度及显著流变特性,易诱发桩体长期蠕变变形,导致支护结构位移超限甚至失稳。据住房和城乡建设部2020—2024年事故统计,SMW工法桩支护的软土基坑事故占比达41%,凸显其蠕变控制难题的严峻性。

当前研究多聚焦单一因素影响:王卫东^[1]分析

收稿日期: 2025-04-06

作者简介: 刘斌(1979—),男,硕士,高级工程师,从事市政工程技术及管理工作。

了软土基坑变形的宏观规律,但未深入SMW工法桩结构的响应;顾正瑞等^[2]关注邻江基坑空间效应,对材料时变特性考虑不足。尤其在多场耦合蠕变机理(土体流变—结构劣化—渗流交互)和“监测—设计—施工”动态协同控制方面存在明显不足。

为此,本研究结合典型工程案例重点解决:

- (1)揭示软土中SMW工法桩的蠕变失效机制;
 - (2)提出材料改良、设计升级与施工调控的协同优化方法;
 - (3)建立基于时效性的变形控制修复技术体系。
- 研究成果旨在为软土深基坑SMW工法桩支护提供理论依据和工程实践指导。

1 软土深基坑SMW工法桩支护存在的问题

SMW工法桩作为一种广泛应用于软土地区深基坑支护的技术,虽具备施工扰动小、止水性能好等优点,但其在软土中的蠕变问题一直是影响工程安全的核心瓶颈。结合现有研究成果及工程实践,从蠕变机理、技术瓶颈及优化方向3方面展开分析。

1.1 SMW工法桩支护的耦合作用机理

软土具有高灵敏度、低渗透性和显著流变特性,在长期荷载作用下易发生蠕变变形。SMW工法桩作为支护结构时,其蠕变问题主要表现为如下。

1.1.1 水泥土桩体强度衰减

软土中的水泥土桩体强度发展受多重因素制约。软土自身的高含水量、有机质含量及低渗透性显著影响水泥水化反应效率。施工中为便于H型钢插入常采用较高水灰比(如1.5~2.0),导致硬化后孔隙率增大。水泥掺量不足(部分工程因成本或工艺限制,掺量偏低)及外掺剂选择或使用不当,进一步削弱了桩体密实度和胶结强度。综合作用下,桩体28d无侧限抗压强度常低于设计预期(≤ 1.2 MPa),尤其在深部区域强度递减显著,使其在持续土压力下易发生塑性流动,加速整体变形。

1.1.2 H型钢-水泥土协同失效

H型钢与水泥土的黏结强度不足,导致荷载传递效率降低。软土蠕变过程中,H型钢可能因局部应力集中发生屈曲,而水泥土无法提供有效约束,形成“脱黏-滑移”连锁反应。

1.1.3 渗流-蠕变交互作用

软土渗透性差,在基坑降水过程中,若降水速率控制不当或存在局部渗流屏障,可能阻碍孔隙水压力的均衡消散,导致有效应力增长滞后。同时,长期

蠕变变形可能扰动土体结构,改变局部渗透路径,甚至诱发微裂隙,影响渗流场稳定性。这种渗流场变化与蠕变变形的相互反馈,可能加剧桩体侧向位移的不均匀累积。

1.2 SMW工法桩支护蠕变问题的技术瓶颈

1.2.1 材料与配比缺陷

传统工艺为便于H型钢插入,常采用较高水灰比,导致水泥土孔隙率增大、强度不足,抗蠕变能力显著下降。水泥掺量未达到优化设计值及外掺剂使用不当,进一步削弱桩体抗变形能力。

1.2.2 设计参数局限性

型钢入土深度未充分考虑软土流变特性,导致桩端抗隆起能力不足,加剧整体位移。支护体系刚度未与软土蠕变速率动态协调,传统计算模型忽略时间效应,导致位移预测偏差。

1.2.3 施工质量控制难点

螺旋搅拌头动力不足或提升速度波动,导致桩体存在夹层或未固化区,形成蠕变薄弱带。型钢垂直度偏差过大或未及时插入(如远超过水泥浆初凝时间窗口),导致桩-钢界面结合不良,加速蠕变分离。

1.3 SMW工法桩支护蠕变问题的优化方向

1.3.1 材料性能提升

可通过振动锤辅助H型钢下沉,降低水灰比并掺入膨润土或硅粉,提升水泥土密实度。采用硫铝酸盐水泥或纳米改性水泥,缩短养护周期并增强抗蠕变性能。

1.3.2 设计理论升级

在支护设计中引入模型或分数阶导数模型,量化软土蠕变对桩体长期位移的影响。基于“时空效应”理论优化支撑间距,采用预应力伺服系统补偿蠕变位移。

1.3.3 施工工艺革新

应用多轴搅拌机(如ZLD系列)实现转速与注浆量闭环控制,确保桩体均匀性。采用分布式光纤监测桩体应变场,结合BIM模型动态调整H型钢插入参数,控制垂直度偏差满足要求。

2 软土地区深基坑变形控制措施

受显著流变特性(蠕变)影响,软土地区深基坑变形常呈现渐进性累积、突发加剧的特征,控制难度大、时效性要求高。需建立针对软土蠕变特性及支护体系动态响应的快速控制修复体系。以下从技术

措施、管理机制及信息化支持3方面展开论述。

2.1 应急响应流程与技术措施

针对软土深基坑变形突发性强、连锁反应明显的特点,控制措施需快速精准,核心在于抑制软土蠕变发展、快速恢复支护体系效能及稳定坑周土体。

2.1.1 土体蠕变抑制与支护体系补强

2.1.1.1 快速土体加固

对变形区域周边及潜在滑裂面土体,优先采用旋喷桩或袖阀管注浆技术进行快速加固。注浆材料选择应兼顾速凝性与后期强度发展,重点提高土体抗剪强度,抑制蠕变变形速率。例如,某工程在变形区实施注浆加固后,土体强度提升约30%,蠕变变形速率显著降低50%。

2.1.1.2 支护体系动态补强

对发生轴力损失或屈曲的钢支撑,立即施加补充预应力,或紧急增设伺服支撑系统。伺服系统可依据实时监测数据(如轴力计、测斜仪)动态调整支撑轴力,有效补偿因软土蠕变导致的支撑力松弛,维持支护体系稳定。

在支护结构变形显著部位,可增设临时型钢斜撑或内支撑,提供额外约束,分担荷载。

2.1.2 反压回填控制变形发展

对变形急剧发展的区域,采取紧急回填措施。使用砂袋或低强度素混凝土快速回填至变形区域,直至达到设计标高或形成有效反压。此方法能迅速平衡坑内外压力差,阻止变形进一步扩大。典型案例中,某软土基坑在变形加速段(位移速率达5 mm/d)回填3 m厚砂袋后,24 h内位移速率即降至1 mm/d以下,有效遏制了变形趋势。

2.1.3 动态降水与排水优化

市政深基坑施工周期常跨越雨季或不良地质段,临时支护体系的服役时间足以引发工程性蠕变变形。同时,施工机械(如挖机、渣土车)在坑边作业产生的循环动荷载(振动),会显著降低软土蠕变门槛应力,使原本稳定的土体进入加速蠕变阶段。

针对软土特性,优化降水方案以避免加剧土体蠕变或不均匀沉降。采用轻型井点与管井结合的分层、分段降水策略,严格控制水位下降速率,防止因局部水位骤降诱发土体失稳或加速蠕变。某工程通过精细化降水控制,成功将坑底因软土流变导致的隆起量减少了40%。

确保排水能力冗余,配置大功率水泵及备用电源,保证在暴雨或突发情况时能快速启动排水(目标响

应时间 ≤ 30 min),防止坑内积水软化土体、加剧变形。

2.2 应急管理机制

2.2.1 分级响应与资源储备

采用多级响应制度,根据变形程度划分预警等级(如黄色、橙色、红色),明确各等级对应的处置权限与资源调配方案。提前储备速凝剂、钢板桩、注浆机等应急物资,并与设备供应商签订快速响应协议。

2.2.2 专家会诊与协同处置

多专业联合决策,组建岩土、结构、监测专家团队,通过BIM模型模拟变形发展趋势,制定针对性方案。施工-设计联动实时共享监测数据,动态调整设计参数。

3 典型工程实证分析

3.1 案例概况

某污水处理厂位于沿海地区港区内,该污水厂清洁排放提标工程范围内包含一座新建MSBR处理池(见图1),施工工期1 a。

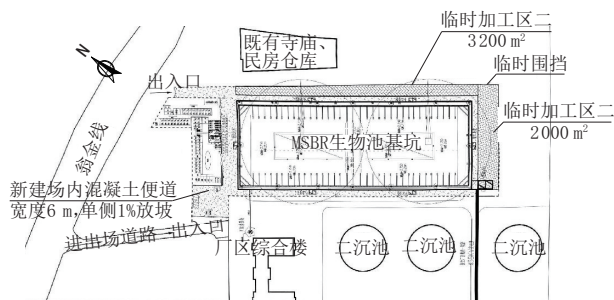


图1 基坑平面布置与周边环境

3.1.1 工程地质情况

勘察区第四系厚度巨大,受古地理环境及古气候冷暖交替的影响,第四系成因复杂。河湖相地层一般为灰黄色、褐黄色黏性土,性质较好;海相地层一般为灰色黏性土,性质较差。

在勘探所达深度范围内,地基土共划分为5个工程地质层组,细分为12个亚层。主要土层包括杂填土、粉质黏土、淤泥质粉质黏土夹粉土等。场地内未发现有岩溶、崩塌、泥石流等不良地质,但可能存在地下旧有基础、地下管线等会影响基坑开挖。

3.1.2 水文及地下水情况

工程周边河道常水位为1.02 m,20 a一遇洪水位2.82 m,50 a一遇洪水位3.04 m,历史最高洪水位3.05 m。孔隙潜水主要分布在浅部土层中,富水性中等,水位变化受大气降水、附近河流和微地貌控制。承压水主要赋存于深部土层中,对基坑开挖有一定影响。

3.1.3 深基坑设计参数

基坑支护周长为 621.4 m,坑底标高为-2.600 ~ 3.750 m,基坑深度为 6.10 ~ 7.75 m。采用喷射混凝土护坡+SMW 工法桩+水泥搅拌桩坑底裙边加固+一道竖向(水平)钢管斜(角)撑的支护体系。基坑设计等级为二级,基坑工程安全等级和重要性系数为 1.0。基坑支护结构安全保证期为 1 a。

放坡开挖 2 m 至放坡平台标高,施工 SMW 工法桩,坡底加固和冠梁施工,分区分段盆式开挖。斜抛撑区域按 1:2.5 放坡,留三角土暂不开挖。分层开挖土体,每层不超过 2 m(硬土中),淤泥和填土等软土中不超过 1.0 m。至底板垫层底标高上留 300 mm 土方,人工开挖至底板垫层底标高。浇筑中心区域底板和支墩。中心区域底板和支墩混凝土强度达到 80% 后加装斜支撑。挖除坑内预留土坡,施工剩余底板和底板传力带。桩顶冠梁、钢筋混凝土底板支墩混凝土强度等级为 C 30,保护层厚度 30 mm,型钢与冠梁间隔离材料采用不易压缩的材料。斜抛撑采用 $\phi 609$ 钢管。坑底加固采用 $\phi 850@600$ 格栅式水泥搅拌桩,桩顶标高-1.750 m,桩长 4 m。基坑东西侧有斜抛撑,南北侧无斜抛撑。基坑围护的剖面图如图 2 所示。

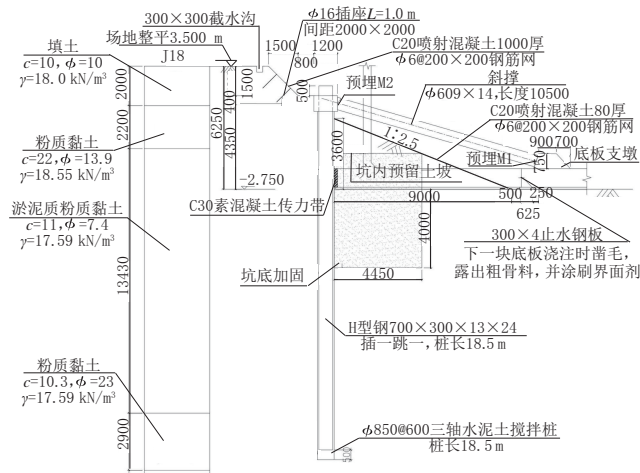


图2 基坑围护的剖面图(单位:mm)

3.1.4 周边环境

基坑周边有厂区内道路、新建市政道路、翁金线等重要道路,以及综合楼、污水厂二层池等建(构)筑物。基坑范围内无任何既有地下管线。

3.2 基坑变形情况一

3.2.1 施工情况

基坑工程西南角于 2022 年 3 月 18 日开始施工 SMW 工法桩,3 月 19 日完成。4 月 9 日开始施工冠梁,4 月 12 日施工完成。5 月 2 日开始进行南侧生物池

西南侧单元土方开挖施工。

3.2.2 事发过程

5 月 5 日下午 14:00 左右,基坑开始有较大变化,西侧、南侧便道均有不同程度的开裂、变形。5 月 4 日及以前监测数据稳定,5 月 5 日位移突然变大,超过基坑监测报警值。

3.2.3 控制修复措施

发现围护结构失稳后,立即停止西南侧基坑土方作业施工,并采用土方回填、反压,防止基底隆起、围护结构进一步变形。

3.2.4 原因分析

地勘报告与实际地质情况存在差异,分析可能是地质复杂性和前道工序大面积预应力管桩(本工程结构桩基为 PHC 群桩)施工造成土体扰动、土质特性变化造成。

在基坑支护设计说明中明确提出:施工过程中若发现实际地质条件与勘察报告存在重大差异,须立即通知设计单位进行复核与方案调整。本文工程中,前期大面积预应力管桩施工对土体产生显著扰动及其引发的土质特性变化,应被视为重要的地质条件差异,须及时反馈,并复核设计。

根据土质和裙边加固受扰动后的特性变化计算对比如下:(1)工况一为按地勘报告推荐的土体参数计算,计算坑底裙边加固的强度;(2)工况二为前期工程桩(预应力管桩)施工扰动致土体强度弱化,计算坑底裙边加固影响;(3)工况三对土体按扰动后参数 c 、 φ 值降低考虑,坑底裙边加固考虑受扰动后失效。基坑围护计算模型断面如图 3 所示。

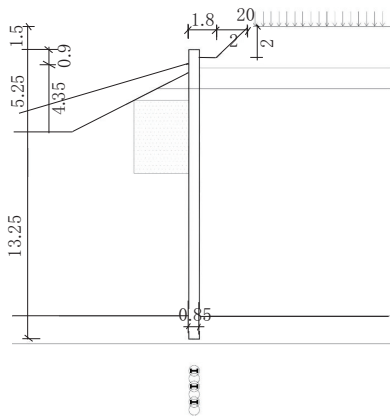


图3 基坑围护计算模型断面图(单位:m)

按上述工况,考虑土体参数折减及坑底加固扰动,计算得到开挖后基坑三角留土区域土体产生的附加竖向位移(隆起)增量分布(见图 4、图 5)。图 6 所示云图直观反映了开挖扰动对坑底土体隆起变形

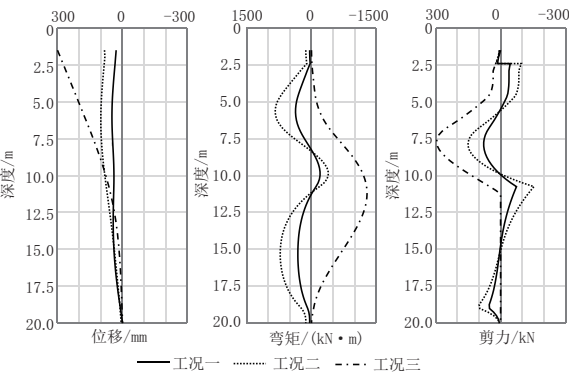


图4 各工况位移及内力计算曲线对比

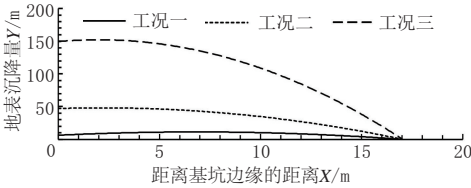


图5 各工况下地表沉降计算曲线对比

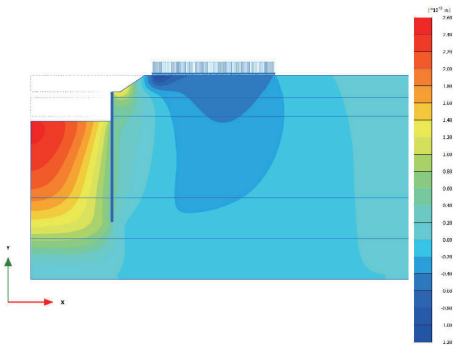


图6 三角区留土开挖后的土体竖向位移增量分布云图

的加剧程度及影响范围,为判断潜在隆起风险区域和制定针对性控制措施(如加强该区域监测、优化开挖顺序)提供依据。

详细的计算结果对比如表1所示。

表1 各工况下侧移和沉降对比		单位:mm
工况	围护体侧向位移	地表沉降
工况一	15.2	17.0
工况二	52.5	51.6
工况三	299.8	152.2

从设计角度分析,H型钢插入持力层深度相对较短,整体稳定系数偏小。基坑内侧预留土坡受开挖扰动,抗剪强度降低。SMW工法桩悬臂围护形式变形量较大,且基坑尺寸较大。

3.2.5 后续避险措施

调整基坑内侧预留土坡坡比,增加基坑底板分块数量。减少基底无支撑暴露时间,加强基坑周边荷载管控,完善排水系统。根据变形情况采取增加斜撑、卸载等措施。

3.3 基坑变形情况二

3.3.1 施工情况

6月初,全部基坑SMW工法桩及冠梁施工完成并达到设计强度,随后开始陆续开挖北池一单元土方,开挖期间监测数据报警。

3.3.2 事发过程

6月14日,混凝土罐车通行导致基坑发生较大变形,西侧施工混凝土便道下沉,冠梁混凝土破裂。基坑累计最大变形量达到533.84 mm。

3.3.3 控制修复措施

发现变形后立即封闭西侧施工便道。召开会议明确下阶段措施。采取吨袋填土反压,拆除临时堆场及便道区域土方。待监测数据稳定后加快基坑底部施工,安装斜钢支撑。

3.3.4 原因分析

地质情况复杂,H型钢插入持力层深度不足,基坑围护整体稳定系数偏小。基坑边超载超过设计要求,土方开挖未严格执行分层、分段开挖,坑内预留土坡喷锚施工不及时。

3.3.5 后续避险措施

采用刚度更大的围护体系,考虑施工荷载,调整基坑底板分块布局。严格控制临时坡比,限制基坑外超载,加快开挖区域后续结构施工。发现不稳定现象及时反馈,采取加固措施,变形失稳后及时卸载或回填。

4 结 语

本文以某污水厂中的MSBR处理池基坑为典型案例,全面分析了其地质条件、设计方案、施工过程、修复措施等,并对软土深基坑SMW工法桩支护变形机理与控制进行了研究。

软土深基坑SMW工法桩发生变形的主要原因:(1)勘察与实际地质条件差异直接导致支护设计安全裕度不足;(2)设计方案未能充分考虑施工扰动对土体参数的弱化效应,也未预留动态调整空间;(3)支护体系选型或参数与基坑规模、周边环境的匹配性不足;(4)施工中未能严格遵守设计规定的分层、分块开挖、支撑安装时限、坑边超载限制等关键参数发生大变形后的控制和修复的关键措施如下:a.形成和落实变形控制应急预案;b.以监测结果驱动决策。

基于本文内容,尚有以下问题有待进一步探讨:(1)软土SMW桩蠕变是多因素耦合作用的结果,需进一

(下转第301页)