

# 湿陷性黄土地区水泥土挤密防渗桩幕墙施工研究

田洁 金戈

中国水利水电第十一工程局有限公司

DOI:10.32629/btr.v8i8.4939

**[摘要]** 针对湿陷性黄土地区传统地基处理方法在城市受限场区外扩施工受限、防渗效果欠佳、工程成本偏高的技术痛点,本文提出一种水泥土挤密防渗桩幕墙施工技术。该技术依托桩体咬合结构设计与分两遍差异化成孔工艺,构建兼具地基加固与地下水阻隔双重功能的连续桩体幕墙,可在无需额外预留外扩施工空间的前提下,同步实现土体湿陷性消除与防渗屏障成型。本文系统阐述该技术的工法特点、作用机理、施工工序、操作要点及质量控制体系,并结合技术应用的效益分析,验证其在施工适配性、成桩质量、成本管控等方面的显著优势。研究表明,该技术可有效解决湿陷性黄土地区受限场区的地基处理难题,为同类工程提供可靠的技术参考与施工范式。

**[关键词]** 湿陷性黄土; 水泥土挤密桩; 防渗幕墙; 施工技术; 受限场区

**中图分类号:** TU472 **文献标识码:** A

## Research on Construction of Cement-Soil Compaction Anti-Seepage Pile Curtain Wall in Collapsible Loess Area

Jie Tian Ge Jin

Sinohydro Bureau 11 Co., Ltd.

**[Abstract]** Addressing the technical pain points of traditional foundation treatment methods in collapsible loess areas, such as limited external expansion construction in constrained sites, poor anti-seepage effects, and high engineering costs, this paper proposes a construction technology for cement-soil compaction anti-seepage pile curtain walls. This technology relies on pile interlocking structural design and a two-stage differentiated hole-forming process to construct a continuous pile curtain wall with dual functions of foundation reinforcement and groundwater barrier. Without requiring additional external expansion construction space, it simultaneously achieves the elimination of soil collapsibility and the formation of an anti-seepage barrier. This paper systematically elaborates on the construction method characteristics, working mechanism, construction procedures, operation key points, and quality control system of this technology. Combined with benefit analysis of technology application, it verifies the significant advantages in construction adaptability, pile formation quality, and cost control. The research results show that this technology can effectively solve the foundation treatment problems in constrained sites in collapsible loess areas, providing reliable technical reference and construction paradigm for similar projects.

**[Key words]** collapsible loess; cement-soil compaction pile; anti-seepage curtain wall; construction technology; constrained site

### 引言

湿陷性黄土是一种在自重或附加荷载作用下,遇水后土体结构迅速破坏并产生显著沉降的特殊土类,广泛分布于我国华北、西北等地区,其特殊的工程性质给该区域的房屋建筑、市政设施建设带来极大挑战。在湿陷性黄土地区开展工程建设时,地基处理是保障上部结构安全稳定的核心环节,目前工程实践中常用的处理方法包括挤密法、强夯法、大面积换填法等。

### 1 传统挤密法通过桩体挤密

提升土体密实度,消除湿陷性,但需向外扩展一定施工宽度,以保证桩间土的挤密效果;强夯法则利用重锤夯实能量改善土体力学性能,同样需要较大的施工场地;大面积换填法通过置换软弱土层提高地基承载力,外扩施工距离要求更高。然而在城市建成区或周边环境复杂的场地施工时,场区周边往往存在密集的道路、既有建(构)筑物、市政管线、高压变压器等设施,对施

工边界形成严格限制,传统地基处理方法因外扩空间不足难以充分发挥作用。

### 1.1 防渗加固协同性强

水泥土挤密桩的核心优势在于水泥与土体拌合后发生的系列物理化学反应,包括离子交换、水化反应、胶凝硬化等。水泥水化生成的硅酸钙、铝酸钙等水化物,可与土体颗粒紧密结合,形成具有较高强度和水稳定性的水泥土结构体;同时,桩机成孔过程中的挤密作用,能有效减小土体孔隙比,提升桩间土的密实度,从而消除地基土的湿陷性。本工法通过桩体咬合设计,将离散的水泥土桩连接成连续的防渗幕墙,既发挥了水泥土桩的加固作用,又利用桩体咬合的密闭性阻断了地下水的渗透路径,实现“加固-防渗”一体化功能,解决了传统技术加固与防渗脱节的问题<sup>[1]</sup>。

### 1.2 成桩质量稳定性优

创新采用“环保挤密桩机成孔+旋挖钻机咬合成孔”的分两遍施工工艺,是保障成桩质量的关键。第一遍成孔选用环保挤密桩机,通过桩机的挤密作用对桩周土体进行预压密实,不仅能提升土体的初始密实度,还能后续咬合桩施工奠定稳定的土体基础;第二遍成孔选用旋挖钻机,在第一遍桩体的间隙处进行取土成孔,旋挖钻机的切削成孔方式具有扰动小、成孔精度高的优势,可有效避免对先施工桩体的破坏,保障桩体咬合的密实度与完整性。分两遍差异化成孔的工艺设计,从源头上提升了防渗幕墙的整体质量稳定性,确保其防参与加固效果的长效性。

## 2 工艺原理

### 2.1 防渗幕墙形成机理

水泥土挤密防渗桩幕墙的核心作用机理在于“物理屏障+土体改性”的双重防渗体系。从物理屏障角度,将地基处理区域的最外排桩设计为咬合式布置,桩体之间无间隙紧密衔接,形成一道封闭的桩体幕墙,直接阻断外部地下水向地基处理区域的渗透路径;从土体改性角度,水泥与土体拌合后发生水化反应,生成的胶凝物质填充土体孔隙,降低土体的渗透系数,同时挤密作用提升了桩间土的密实度,使土体本身的抗渗性能得到显著改善。双重作用叠加,确保地基处理区域形成稳定的防渗体系,有效阻止地下水侵入。与此同时,水泥土桩体的挤密效应与胶凝硬化作用,能显著提升地基土的承载力与变形模量,消除土体的湿陷性,保障上部结构的沉降控制在允许范围内。防渗幕墙与内部加固桩体形成协同作用,共同构成稳定的地基受力体系<sup>[2]</sup>。

### 2.2 分两遍成孔施工原理

采用分两遍间隔成孔、分层夯实的施工工艺,其核心目的是保障桩体咬合质量与成桩效果,具体原理如下:第一遍桩施工原理:采用环保挤密桩机进行跳桩成孔,跳桩成孔可避免连续成孔导致的土体应力集中,防止孔壁坍塌。桩机的挤密作用使桩周土体的密实度提升,形成初步的桩体结构;成孔后及时分层回填水泥土并夯实,确保桩体的密实度,为第二遍咬合桩施工提供稳定的支撑。第二遍桩施工原理:在第一遍桩体的间隙处采用旋挖钻机进行取土成孔,旋挖钻机的钻头可精准切削土体,成孔精度

高,且对周边桩体的扰动极小。成孔后回填水泥土并夯实,新桩体与既有桩体紧密咬合,形成连续的防渗幕墙。分两遍施工的工艺,既保证了桩体的成型质量,又确保了咬合部位的密实度,是防渗幕墙发挥作用的关键技术保障。

## 3 施工工序流程及操作要点

### 3.1 施工工艺流程

测量定位放线→第一遍桩机环保挤密桩机跳桩成孔→孔位质量验收→水泥土分层回填夯实→第二遍桩旋挖钻机跳桩成孔→孔位质量验收→水泥土分层回填夯实→桩体成品保护→质量检测验收

### 3.2 关键操作要点

#### 3.2.1 测量定位放线

测量定位是保障桩位精度的基础工序,需严格按照设计图纸执行。首先采用全站仪进行场区平面控制网布设,确定桩位的基准控制点;然后依据挤密桩平面布置图,逐点放样确定桩位中心,在桩位中心处用钢钎打入土层20cm,灌入白灰进行标记。放样完成后,需报请监理单位进行复核验收,桩位放样的允许偏差 $\leq 10\text{mm}$ ,验收合格后方可进入下道工序。测量过程中需做好记录,确保桩位的准确性与一致性。

#### 3.2.2 分两遍成孔施工

成孔作业是施工的核心环节,需严格遵循间隔成孔原则,具体操作如下:

第一遍成孔:选用环保挤密桩机,调整桩机的垂直度,确保成孔垂直度偏差 $\leq 1/100$ 。桩机就位后,通过振动挤密的方式进行成孔,成孔深度需达到设计桩长。成孔过程中需实时监测孔深与孔径,避免出现缩孔、塌孔等问题。

第二遍成孔:待第一遍桩体水泥土达到一定强度后,选用旋挖钻机在第一遍桩体的间隙处进行成孔。旋挖钻机的钻头直径需与设计桩径匹配,成孔过程中需控制钻进速度,避免对周边桩体造成扰动。成孔完成后,需检查孔位的咬合情况,确保咬合宽度符合设计要求。

#### 3.2.3 孔位质量验收

成孔完成后,需由专人进行孔位质量验收,验收内容包括孔深、孔径、垂直度等指标。采用50m钢卷尺测量孔深,确保孔深不小于设计桩长;采用量孔器检测孔径,孔径偏差需控制在 $\pm 50\text{mm}$ 范围内;采用经纬仪检测成孔垂直度,垂直度偏差 $\leq 1/100$ 。对验收不合格的孔位,需及时进行回填重钻,直至指标达标。

#### 3.2.4 水泥土回填料拌制与回填夯实

水泥土回填料的质量直接影响桩体的强度与防渗性能,需严格控制配合比与拌合质量。水泥与土的体积配合比为1:6,土料需选用有机杂质含量 $\leq 5\%$ 的素土,经筛土机过筛后粒径 $\leq 15\text{mm}$ ,不得含有冻土、建筑垃圾、石块等杂质;水泥选用符合《通用硅酸盐水泥》标准的产品,进场前需进行复检,确保性能指标合格。混合料的含水量需控制在最优含水量 $\pm 2\%$ 范围内,拌合需均匀,避免出现离析现象。回填夯实采用分层施工工艺,选用锤重3.5t的全自动强夯机。孔底先空夯4击,处理孔底虚土;然后

分层填入水泥石, 每层填料厚度 $0.3\text{m}^3$  (对应20装载机铲斗端端的体积), 每层夯击次数为1轻7重, 确保桩体压实系数 $\geq 0.97$ 。夯填过程中需控制夯锤的落距为4m, 夯锤需对准孔中心, 避免偏夯导致桩体成型质量不佳。夯填至设计桩顶标高后, 需及时清理桩顶浮土。

### 3.2.5 成品保护

桩体施工完成后, 需做好成品保护工作, 防止桩体受损。施工前需规划好机械行走路线, 严禁重型机械在已施工桩体区域碾压; 及时清运场地内的多余土方, 平整场地标高, 避免桩头受外力碰撞; 成桩后养护期间, 禁止在桩体周边进行土方开挖、重型设备堆放等作业, 养护时间不少于7天。

### 3.3 劳动力组织

根据工程规模与施工进度要求, 配置专业化施工队伍, 主要工种及人员数量需满足施工需求, 包括项目管理人员、测量工、强夯机司机、旋挖钻机司机、装载机司机、电工、焊工及普工等。明确各岗位的岗位职责, 建立工序衔接交底制度, 确保施工组织高效有序, 各工序之间无缝衔接<sup>[3]</sup>。

## 4 材料与设备要求

### 4.1 主要材料技术指标

土料: 选用有机杂质含量 $\leq 5\%$ 的素土, 严禁使用腐殖土、淤泥质土等劣质土料。土料需经筛土机过筛, 粒径 $\leq 15\text{mm}$ , 去除其中的建筑垃圾、石块、草根等杂质。

水泥: 选用P·042.5级通用硅酸盐水泥, 产品需具备出厂合格证、质量检验报告等“三证”齐全。进场前需进行复检, 检验项目包括初凝时间、终凝时间、安定性、强度等, 其中初凝时间 $\geq 45\text{min}$ , 终凝时间 $\leq 600\text{min}$ , 确保水泥性能符合设计要求。

水: 采用清洁的自来水或饮用水, 严禁使用污水、废水等含杂质的水进行拌合。

### 4.2 主要机具设备配置

施工机具设备需根据工程规模合理配置, 确保设备性能稳定, 满足施工需求: 施工机具: 环保挤密桩机、旋挖钻机、全自动强夯机、装载机、筛土机、挖掘机; 测量仪器: 全站仪、自动安平水准仪、50m钢卷尺、经纬仪、量孔器; 检测工具: 土工试验仪器 (环刀、烘箱、电子秤等), 用于检测水泥石的含水量、压实系数等指标; 安全环保设备: 雾炮机、配电箱、安全警示标志、夜间照明设备等。所有设备进场前需进行检修调试, 施工过程中定期维护保养, 确保设备运行稳定, 避免因设备故障导致工期延误。

## 5 安全与环保措施

### 5.1 安全施工措施

安全教育培训: 所有施工人员进场前需接受三级安全教育与职业健康培训, 特种作业人员 (如强夯机司机、电工、焊工等) 必须持证上岗。定期开展安全技术交底与应急演练, 提高施工人员的安全意识与应急处置能力。临时用电安全: 施工现场临时

用电严格执行“三级配电、两级保护”制度, 配电箱需设置防雨、防砸防护设施, 电缆线需架空或埋地敷设, 严禁乱拉乱接。严禁使用绝缘老化、破损的电气线路, 定期对用电设备进行检查维护。机械设备安全: 挖掘机、强夯机、旋挖钻机等大型设备作业时, 需划定安全作业半径, 设置安全警示标志, 严禁无关人员进入作业区域。强夯机运转时安全距离 $\geq 8\text{m}$ , 夯扩作业时安全距离 $\geq 6\text{m}$ 。设备操作人员需严格按照操作规程作业, 严禁违规操作。孔口安全防护: 成孔后若未能及时回填, 需采用硬质盖板覆盖孔口, 防止人员、机具掉入。夜间施工时需配置足够的照明设备, 确保施工区域照度 $\geq 15\text{W}/\text{m}^2$ , 照明灯具需采取防砸措施。

### 5.2 环保施工措施

扬尘污染控制: 土方开挖、回填、水泥石搅拌等易产生扬尘的作业, 需采用雾炮机洒水降尘; 五级以上大风天气停止所有扬尘作业。水泥、灰土等细颗粒材料采用密闭仓库存放, 运输过程中加盖篷布, 防止扬尘泄漏。场地环境管理: 施工现场设置标准化围挡, 围挡高度不低于2.5m; 危险作业区悬挂禁止通行、严禁烟火等警示牌。施工现场设置排水系统, 确保场地无积水, 废水经沉淀处理后排放。及时清理施工道路及场区周边100m范围内的泥土与建筑垃圾, 保持场地整洁。噪声污染控制: 合理安排施工时间, 避免在夜间22:00至次日6:00进行强噪声作业。强夯机、旋挖钻机等设备需采取降噪措施, 降低施工噪声对周边居民的影响<sup>[4]</sup>。

## 6 结束语

水泥石挤密防渗桩幕墙施工技术通过创新桩体咬合结构设计, 实现了湿陷性黄土地区受限场区地基加固与防渗阻隔的协同目标。该技术具有施工范围可控、成桩质量稳定、经济效益显著、安全环保等优势, 且质量控制体系与安全环保措施完善, 可有效弥补传统地基处理技术在受限场区的应用局限。后续研究可进一步聚焦智能化施工技术与该工法的融合, 如采用BIM技术进行桩位放样与施工过程模拟, 利用自动化监测设备实时监控桩体成型质量; 同时, 针对不同湿陷性黄土等级、不同地下水水位条件, 优化施工参数, 拓展工法的应用场景, 为湿陷性黄土地区地基处理工程提供更具针对性的技术方案。

### [参考文献]

- [1]胡金山.水泥石夯扩挤密桩对湿陷性黄土层水平应力的影响[J].铁道建筑,2023,63(6):127-131.
- [2]罗金波,房雷,路少山,等.水泥石挤密桩处理湿陷性黄土地基研究[J].粘接,2022,49(3):149-152.
- [3]黄卫平,马壮.水泥石挤密桩法对宁夏黄土湿陷性处理的试验研究[J].大众科学,2024,45(14):95-97.
- [4]徐昕.湿陷性黄土路基灰土挤密桩施工质量通病及防治措施[J].工程技术研究,2021,6(17):148-149.