

灰土挤密桩在湿陷性黄土地基加固中的施工工艺研究

田彦虎

宁夏回族自治区第四建筑工程有限责任公司, 宁夏 固原 756000

[摘要]湿陷性黄土作为我国西北地区典型的不良地基土,其特有的结构性孔隙和遇水软化特性给工程建设带来严峻挑战。传统地基处理方法如换填法和强夯法在工程实践中暴露出造价高、能耗大、环保性差等缺陷。灰土挤密桩技术通过“挤密-固化”双重作用机制,实现了湿陷性消除与承载力提升的协同效果,现已成为处理湿陷性黄土地基的首选工艺之一。文章基于最新工程实践和理论研究,系统梳理灰土挤密桩施工工艺的关键技术环节,重点分析成孔工艺、灰土拌合、夯击参数等核心要素的质量控制要点。

[关键词]灰土挤密桩;湿陷性黄土;地基加固;施工工艺;质量控制

DOI: 10.33142/ec.v8i5.16634

中图分类号: U416.1

文献标识码: A

Research on the Construction Technology of Lime Soil Compaction Pile in the Reinforcement of Collapsible Loess Foundation

TIAN Yanhu

Ningxia Hui Autonomous Region No. 4 Construction Engineering Co., Ltd., Guyuan, Ningxia, 756000, China

Abstract: As a typical poor foundation soil in northwest China, collapsible loess presents severe challenges to engineering construction due to its unique structural pores and water softening characteristics. Traditional foundation treatment methods such as replacement method and dynamic compaction method have exposed defects such as high cost, high energy consumption, and poor environmental protection in engineering practice. The technology of lime soil compaction pile achieves the synergistic effect of eliminating collapsibility and improving bearing capacity through the dual action mechanism of "compaction solidification", and has become one of the preferred processes for treating collapsible loess foundations. Based on the latest engineering practices and theoretical research, this article systematically summarizes the key technical links of the construction process of lime soil compaction piles, focusing on the quality control points of core elements such as pore forming process, lime soil mixing, and compaction parameters.

Keywords: lime soil compaction pile; collapsible loess; foundation reinforcement; construction technology; quality control

我国湿陷性黄土分布面积达 63 万平方公里,主要分布在黄河中游地区的陕西、甘肃、宁夏等省份。这类土体具有大孔隙、强结构性特点,遇水后会显著附加沉降,对建筑物安全构成严重威胁。随着“一带一路”倡议的推进和西部大开发战略的深入实施,西北地区基础设施建设规模持续扩大,对湿陷性黄土地基处理技术提出了更高要求。灰土挤密桩技术自 20 世纪 50 年代引入我国以来,经过七十多年的工程实践和技术改良,已形成相对成熟的技术体系。现行《湿陷性黄土地区建筑规范》和《建筑地基处理技术规范》均对该技术的设计、施工和质量验收作出了明确规定。然而,在实际工程应用中,仍存在施工参数选择不当、质量控制标准不统一等问题,亟需开展系统化的工艺研究。

1 技术原理、特点及适用范围

1.1 技术原理

灰土挤密桩技术起源于 1934 年苏联阿别列夫教授提出的土体挤密理论体系,20 世纪 50 年代经我国工程界引进改良后,在西北黄土地区地基处理中展现出显著优势。该技术通过机械成孔过程中的动态挤密效应与灰土固化反

应的协同作用,形成独特的“物理-化学”复合加固机制。

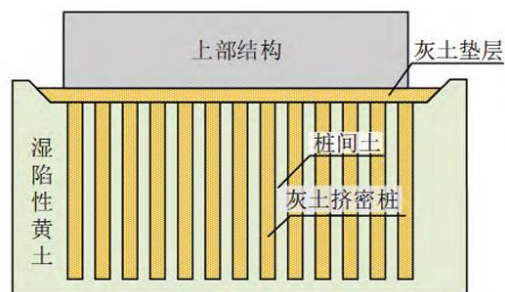


图 1 灰土挤密桩加固湿陷性黄土复合地基结构图

如图 1 所示,其核心机理表现为多维度相互作用:在成孔阶段,采用锤击或振动方式将钢套管强制贯入土层时,桩管周向产生的超孔隙水压力使土颗粒发生位移重组,形成直径约为桩管 1.2~1.5 倍的挤密影响区,此过程中土体干密度可提升 15%~25%,有效消除黄土的架空孔隙结构;在回填阶段,分层夯实的灰土与桩周改良土体构成明显的界面过渡带,灰土中的活性成分与土颗粒发生复杂的离子交换反应,生成的水化产物形成空间网状结构,使改良区

土体的渗透系数降低 1~2 个数量级^[1]。从复合地基受力体系分析,图示中的应力分布云图清晰显示荷载传递路径沿桩体向下扩散,形成深度约为 6~8 倍桩径的加固影响区,该区域内桩土模量比维持在 5:1 至 8:1 的优化区间,使得地基湿陷系数可控制在 0.015 以下。

1.2 技术特点

灰土挤密桩采用就地取材的方式,将灰土直接回填至桩孔中,无需开挖处理地基土,实现“以土治土”,大大减少了土方开挖与回填的工作量。该工艺施工方法简单、设备要求低、绿色环保,无污染,且不受开挖和回填条件的限制,适用于加固深度为 12m~15m 的地基。与其他湿陷性黄土地基处理方法相比,灰土挤密桩在造价、工期及加固效果方面均具有显著优势。

1.3 适用范围

大量研究与工程实践表明,灰土挤密桩广泛适用于处理地下水位以上的湿陷性黄土、素填土及杂填土等类型地基,处理深度一般为 3m~15m。在改善湿陷性黄土的湿陷性、提高地基的水稳定性与承载力等方面,均具有良好效果。然而,当地基土的含水率超过 24%、饱和度高于 65%时,成孔及拔管过程中易出现桩孔缩颈、周边土体隆起等问题,影响挤密效果。因此,灰土挤密桩不适用于处理地下水位以下或处于毛细饱和带的土层。

2 施工工艺流程及控制要点

2.1 施工前准备

施工前准备工作是确保灰土挤密桩施工质量的关键环节,主要包括场地平整、测量放线、材料检验及设备调试等。场地平整需清除表层杂填土、植被及障碍物,确保作业面平整度偏差不超过 $\pm 50\text{mm}$,避免因场地不平导致桩机倾斜或成孔偏位^[2]。测量放线应依据设计图纸采用全站仪进行精确定位,桩位中心点采用木桩或钢钉标记,并在周边设置控制桩以便施工过程中复核。放线完成后需进行复测,确保桩位偏差控制在规范允许范围内。材料检验重点包括石灰活性检测及土料筛选,生石灰应满足《建筑生石灰》标准中 II 级及以上要求,土料宜采用塑性指数 7~17 的黏性土,有机质含量不超过 5%,最大粒径不超过 15mm。施工设备需提前进场调试,桩机垂直度偏差应小于 1%,夯锤重量及落距应符合设计要求,确保夯击能量稳定。

2.2 成孔工艺

成孔工艺直接影响挤密效果及桩体质量,主要方法包括锤击沉管法、振动沉管法及螺旋钻成孔法等。锤击沉管法适用于地下水位以上的均质土层,采用柴油锤或液压锤将带活瓣桩尖的钢套管击入土中,锤击能量宜控制在 $1525\text{kN}\cdot\text{m}$,成孔速度保持 $0.510\text{m}/\text{min}$ 以避免土体扰动过大。振动沉管法通过高频振动使桩管贯入土层,适用于稍密至中密砂性土,激振力宜为 80120kN ,拔管速度控制

在 $1.215\text{m}/\text{min}$ 。成孔直径通常设计为 300600mm ,施工时需实时监测桩管垂直度,偏差超过 1.5%时应立即纠偏。成孔深度应比设计值超深 200300mm 以容纳桩底虚土,终孔验收时需检查孔底沉渣厚度,超过 100mm 时应进行清孔处理。成孔后应及时覆盖孔口,防止杂物落入或孔壁坍塌。

2.3 灰土拌合与回填

灰土拌合质量决定桩体强度与耐久性,配合比通常采用体积比 2:8 或 3:7。拌合前需对土料过筛去除杂质,生石灰块应提前 47 天消解并过 10mm 筛,消解后石灰膏含水量控制在 30%~35%。机械拌合时采用强制式搅拌机,先干拌 30s 使石灰与土料初步混合,再加水湿拌 60s 至颜色均匀,拌合后灰土含水量宜控制在最优含水量 $\pm 2\%$ 范围内。回填施工采用分层夯实法,每层虚铺厚度 250300mm ,使用梨形锤或平底锤夯击 46 遍,夯锤落距 600800mm ,夯击能量 $810\text{kN}\cdot\text{m}$ 。夯实时应从孔周向中心推进,确保边缘土体充分密实,相邻夯迹重叠 $1/3$ 锤径。桩顶标高以上超灌 $300\sim 500\text{mm}$,待桩体凝固后凿除松散部分。

2.4 桩体质量控制

桩体质量控制贯穿施工全过程,重点监控参数包括压实系数、夯击能量及桩身连续性。每根桩施工时需记录夯击次数、落距及贯入度,最后三击贯入度差值不超过 20mm 方可判定达到终夯标准。压实系数检测采用环刀法,在桩体深度 $1/4$ 、 $1/2$ 及 $3/4$ 处取样,要求不小于 0.97。桩身完整性检测采用轻型动力触探或静力触探试验,触探击数应满足设计要求的承载力指标。对于直径大于 400mm 的桩,可辅以低应变反射波法检测桩身缺陷。施工过程中出现缩颈、断桩等问题时,应立即停止作业并分析原因,采取复打、注浆或补桩等措施处理。成桩 7 天后方可进行承载力检测,静载试验加载量不应小于设计值的 2 倍,稳定标准为沉降速率小于 $0.1\text{mm}/\text{h}$ 。

3 关键施工参数优化

3.1 桩径与桩间距设计

桩径与桩间距的合理设计是确保灰土挤密桩加固效果的核心要素。桩径选择需综合考虑地基处理深度、施工设备能力及土质条件等因素。工程实践表明,对于湿陷性黄土地基,最优桩径范围为 $350\sim 450\text{mm}$ 。过小桩径会导致挤密影响区不足,过大桩径则可能引起地面隆起和土体扰动。桩间距设计应遵循“等代换率”原则,通常取 2.5~3.0 倍桩径。在重要建筑物地基处理中,建议采用三角形布桩方式,其挤密效果优于正方形布置。对于湿陷性严重的 III 级自重湿陷性黄土场地,桩间距可适当加密至 2.0~2.5 倍桩径。设计时还需考虑“有效挤密区”概念,即相邻桩体的挤密影响区应有 $30\sim 50\text{cm}$ 的重叠,确保整个处理区域形成均匀的加固体系。计算分析表明,当桩间距超过 3.5 倍桩径时,桩间土的挤密效果将显著降低。

3.2 灰土配合比优化

灰土配合比的优化直接影响桩体强度和水稳性。工程中常用的体积配合比为 2:8 和 3:7, 需根据土料性质和处理要求进行科学配比设计。石灰活性是影响配合比的关键因素, 活性氧化钙含量应不低于 60%。对于塑性指数大于 12 的黏性土, 可采用 2:8 配合比; 对于砂性土或要求较高早期强度的工程, 宜采用 3:7 配合比。水灰比控制同样重要, 最优含水量应通过标准击实试验确定, 一般控制在 18%~22% 范围内^[3]。拌合工艺方面, 建议采用“两拌三闷”法: 第一次拌合后闷料 24 小时, 使石灰充分消解; 第二次拌合后再次闷料 12 小时, 确保离子交换反应充分进行。试验数据显示, 经过优化配比的灰土桩体, 28 天无侧限抗压强度可达 0.8~1.2MPa, 水稳系数超过 0.85。

3.3 夯击能量选择

夯击能量的合理选择对保证桩体密实度至关重要。夯击能量由夯锤重量和落距共同决定, 工程中常用夯击能为 8~15kN·m。对于浅层处理, 可采用较小夯击能; 对于深层处理, 应适当提高至 12~15kN·m。夯击施工时应遵循“重锤低落”原则, 推荐锤重 150~300kg, 落距 2~4m。夯击次数通常为 4~6 击/层, 最后两击的夯沉量差应不大于 20mm。值得注意的是, 过大的夯击能量会导致土体结构破坏, 产生“橡皮土”现象; 而过小的能量则无法达到设计密实度要求。施工过程中应实时监测最后三击的贯入度, 当连续三击贯入度小于 5cm 时, 可判定该层夯击达标。对于含水量较高的土体, 可适当增加夯击次数但降低夯击能量, 避免产生孔隙水压力积聚。

3.4 施工顺序规划

科学合理的施工顺序是确保成桩质量的重要保障。推荐采用“间隔跳打”的施工方式, 具体可分为“梅花形跳打”和“行列式跳打”两种。梅花形跳打适用于大面积满堂布桩, 施工顺序呈放射状向外扩展, 相邻桩施工间隔时间不少于 48 小时。行列式跳打适用于条形基础处理, 按“隔三打一”原则推进。在群桩施工中, 必须遵循“先外后内、先长后短、先深后浅”的基本原则。对于重要建筑物地基, 建议将施工区域划分为若干小区, 完成一个区域检测合格后再进行下一区域施工。施工速度控制同样关键, 日成桩量不宜超过总桩数的 5%, 以保证有足够时间进行质量检测和问题处理。在特殊地质条件下, 如存在软弱夹层时, 应采取“预引孔”或“套管跟进”等辅助措施, 防止缩颈和塌孔现象发生。施工过程中应建立完整的质量追溯体系, 每根桩的施工参数都应详细记录并归档保存。

4 质量检验与效果评价

4.1 检测指标体系

灰土挤密桩质量检测应建立多维度、全过程的指标体系, 包括施工过程检测、成桩质量检测和复合地基验收检测三个层次。施工过程检测重点监控桩位偏差、垂直度、

成孔深度等参数。成桩质量检测主要包括桩体压实度、灰土配合比和桩身完整性。复合地基验收检测应采用标准贯入试验、静力触探试验和载荷试验相结合的方式, 其中单桩复合地基载荷试验的检测数量不应少于总桩数的 1%, 且每个单体工程不少于 3 点。对于重要工程, 还应增加桩土应力比测试和孔隙水压力监测等专项检测。所有检测数据均应建立电子档案, 实现质量追溯。

4.2 湿陷性消除效果评价

湿陷性消除效果评价应采用现场浸水试验与室内试验相结合的方法。现场检测包括探井取样和现场浸水载荷试验。室内试验需测定处理前后土样的湿陷系数、自重湿陷系数和湿陷起始压力。评价标准为: 处理后地基的湿陷系数 δ_s 应 ≤ 0.015 , 自重湿陷量计算值 Δz_s 应 $\leq 50\text{mm}$ 。对于消除全部湿陷性的工程, 尚需满足浸水载荷试验中, 在 200kPa 压力下浸水 72 小时的附加湿陷量 $\leq 30\text{mm}$ 。检测时应特别注意桩间土与桩体的协同工作性能, 通过对比桩体、桩间土及天然地基的压缩模量比值来评价加固均匀性。

4.3 长期稳定性监测

长期稳定性监测应建立“施工期+工后期”的全周期监测体系。施工期监测包括地面隆起、邻桩位移和孔隙水压力消散。工后期监测应持续不少于 2 年, 主要包括: 建筑物沉降观测、地下水位变化和桩土应力重分布。监测频率建议为: 竣工后第 1 年每月 1 次, 第 2 年每季度 1 次, 雨季前后应增加观测次数。监测数据应采用时间序列分析法进行处理, 建立沉降-时间关系曲线, 当发现异常沉降时, 应立即启动应急预案。监测报告应包含原始数据、分析结论和处理建议三部分内容。

4.4 常见质量问题防治

灰土挤密桩施工中常见质量问题包括缩颈、断桩和密实度不足三类。缩颈防治应采取“控制拔管速度+套管跟进”的技术措施, 对于已发生的缩颈, 可采用复打或高压注浆处理。断桩预防重点控制桩孔垂直度和夯击连续性, 处理措施为邻桩补强或压力注浆。密实度不足问题应通过优化夯击参数、控制填料含水量和增加检测频次来解决^[4]。所有质量问题的处理都应遵循“检测-分析-处理-验证”的工作流程, 处理完成后必须进行专项检测验证。建立质量问题案例库, 对典型问题要制定标准化处理方案, 实现经验的有效传承。

5 结语

灰土挤密桩技术作为湿陷性黄土地基处理的成熟工艺, 其技术经济优势已在大量工程实践中得到验证。本文通过系统分析施工工艺流程、关键参数优化和质量控制要点, 建立了完整的施工技术体系。研究表明, 科学的桩径桩距设计、优化的灰土配合比、合理的夯击能量以及规范的施工顺序, 是确保工程质量的关键要素。随着检测技术的进步和施工设备的升级, 灰土挤密桩工艺正朝着智能化、标准化的方向发展。未来重点关注新型固化材料的应用、

数字化施工控制系统的开发以及长期性能监测数据的积累,进一步提升该技术的可靠性和适用范围,为工程建设提供更优质的地基处理解决方案。

[参考文献]

- [1]杨高礼.挤密桩参数对黄土地基加固效果的影响研究[J].工程技术研究,2024,9(12):12-14.
- [2]任涛,朱腾宇.基于 EPS 板减载技术的高填方涵洞受力特性研究[J].铁道建筑技术,2024(9):129-131.
- [3]孙亚军.湿陷性黄土地区挤密桩应用效果研究[J].工程技术研究,2024,9(22):109-111.
- [4]李振龙.灰土挤密桩技术在高速公路施工中的应用[J].交通世界,2024(35):91-93.

作者简介:田彦虎(1977.12—),毕业院校:宁夏大学,所学专业:土木工程,当前就职单位名称:宁夏回族自治区第四建筑工程有限责任公司,就职单位职务:经理,职称级别:中级。