

湿陷性黄土地基处理中起重机辅助门架强夯施工技术研究

刘子铭

西安建筑科技大学 甘肃 嘉峪关 735100

【摘要】 湿陷性黄土广泛分布于我国西北、华北地区，具有孔隙比大、结构性强、遇水湿陷、承载力低等典型缺陷，是公路、房建、市政工程施工中最常见的不良地基之一。常规履带式起重机直接强夯施工存在吊臂挠度大、落锤偏心、夯击能量损耗高、施工稳定性差等问题，难以满足大能级、大面积黄土夯实的施工要求。本文依托黄土地区市政道路地基处理工程，引入起重机增设辅助门架改造式强夯施工技术，阐述辅助门架的结构原理、设备改造方案、施工工艺流程及核心技术要点，对比传统无门架强夯与门架辅助强夯的施工效果、土体检测指标与施工效益。工程实践表明，增设辅助门架可有效约束吊臂变形、保证重锤垂直下落，大幅提升夯击能量利用率与地基夯实均匀度，显著降低黄土湿陷系数、提升地基承载力，同时降低设备损耗与施工成本，适配各类湿陷性黄土地基规模化施工，可为同类地基处理工程提供可靠技术参考。

【关键词】 湿陷性黄土；地基处理；起重机；辅助门架；强夯施工；地基加固

1 引言

湿陷性黄土是一种特殊的结构性土体，天然状态下强度较高、压缩性较低，但遇水浸润后土体骨架迅速破坏，产生大幅度不均匀沉降，极易引发建筑物开裂、路基沉陷、路面变形等工程病害，是制约黄土地区工程建设质量的核心地质难题。强夯法凭借施工效率高、加固深度大、造价低廉、工艺成熟等优势，成为湿陷性黄土地基处理的主流工艺，通过重锤高空自由下落产生的巨大冲击能，破坏黄土大孔隙结构，实现土体动力固结，从根源消除地基湿陷性、提升地基整体承载力与稳定性。

当前工程中普遍采用履带式起重机配套自动脱钩装置开展强夯施工，但传统施工模式存在明显技术短板。大能级夯击作业时，起重机吊臂受拉力与惯性作用产生大幅度挠曲变形，导致重锤下落偏移、夯点错位、能量损耗严重，不仅造成地基夯实不均匀、局部加固不达标，还会加剧吊臂疲劳损耗，存在设备倾覆、锤体晃动等安全隐患。针对该问题，在常规起重机基础上增设钢结构辅助门架，可实现导向限位、约束吊臂变形、保证重锤垂直落锤，有效弥补传统强夯设备的性能缺陷。

本文结合实际黄土地区地基处理工程，系统研究起重机辅助门架强夯施工技术，优化设备改造方案与施工工艺，通过现场试验数据验证技术可行性与应用优势，总结施工重难点与质量控制措施，为湿陷性黄土地基高效、高质量处理提供技术支撑。

2 湿陷性黄土地基特性与传统强夯施工缺陷

2.1 湿陷性黄土核心工程特性

湿陷性黄土内部发育大量架空孔隙结构，颗粒胶结强度弱，天然含水率低、渗透性强。在无浸水工况下，土体结构相对稳

定，可承担一定上部荷载；一旦遭遇雨水入渗、地下水抬升、施工积水等情况，土体胶结结构软化破坏，孔隙快速压缩坍塌，产生显著的湿陷变形。该类地基变形具有突发性、不均匀性、不可逆性特点，若处理不到位，后期极易引发工程沉降病害，严重威胁构筑物安全。本工程场地黄土湿陷系数介于 0.018~0.032 之间，属于中等一强湿陷性黄土，需通过高能级强夯彻底消除湿陷性。

2.2 传统起重机强夯施工核心缺陷

常规履带起重机无导向门架强夯施工，在湿陷性黄土地基施工中存在多重弊端。一是吊臂挠度变形大，大吨位重锤起吊及下落瞬间，吊臂弹性变形明显，导致重锤偏心下落，夯坑偏移、夯击面积不规则；二是能量利用率低，锤体晃动消耗大量动能，实际有效夯击能远低于设计值，黄土深层加固效果不足，残留湿陷性；三是施工精度差，夯点间距、夯击垂直度难以把控，地基夯实均匀性差，易出现局部薄弱区域；四是设备损耗高，长期偏心受力加剧吊臂、销轴磨损，设备故障率与维修成本大幅增加；五是安全风险高，湿陷性黄土场地承载力不均、易沉降，设备作业稳定性差，配合锤体晃动，极易引发安全事故。

3 起重机辅助门架强夯系统设计与工作原理

3.1 辅助门架结构设计

本次施工采用履带起重机+门式导向架+自动脱钩装置的改造式强夯系统，辅助门架采用装配式钢结构，主材为 Q235 工字钢与槽钢，整体为双柱门式框架结构。门架立柱高度 22m，适配 18m 以内常规落距强夯作业，立柱底部设置加宽配重底座，保证门架整体稳定性；顶部设置导向滑轮与限位轨道，与起重机吊臂平行布置，重锤钢丝绳贯穿导向轨道，实现竖向限位。

门架整体可拆卸、可移动，适配场地转场施工，安装便捷、通用性强。

门架与起重机采用分体协同作业模式，不改动起重机主体结构，仅通过导向约束实现精准落锤，改造成本低、不影响设备原有使用功能，完全适配湿陷性黄土大面积施工场景。

3.2 核心工作原理

辅助门架强夯技术核心原理为竖向导向、挠度约束、精准传能。传统施工无导向约束，重锤起吊、下落过程易受惯性、风力、吊臂变形影响产生水平偏移；增设辅助门架后，导向轨道严格限制钢丝绳水平位移，强制重锤沿竖向垂直下落，彻底解决落锤偏心、夯点偏移问题。同时门架分担部分竖向拉力，有效抑制起重机吊臂挠曲变形，最大限度降低动能损耗，保证设计夯击能完整作用于黄土地基，精准破坏黄土孔隙结构，提升深层土体固结效果，全方位保障地基加固质量。

3.3 施工核心参数确定

结合本工程湿陷性黄土厚度与湿陷等级，通过现场试夯确定施工参数：采用 $3000\text{kN}\cdot\text{m}$ 夯击能级，重锤重量 18t ，落距 16.8m ；夯点间距 4.5m ，正方形网格布置；施工采用“点夯+满夯”组合工艺，点夯每点夯击 $8\sim 10$ 击，最后两击平均夯沉量 $\leq 50\text{mm}$ 终止，满夯夯击能 $1000\text{kN}\cdot\text{m}$ ，每点 3 击，搭接夯幅 $1/4$ ，确保表层地基密实均匀。

4 辅助门架强夯标准化施工工艺流程

4.1 施工前期准备

清理施工场地表层杂草、淤泥、软弱浮土，平整场地并轻微碾压，保证作业面平整度，避免设备倾斜失稳；精准测量放线，采用全站仪布设夯点网格，石灰标记夯点位置，偏差严格控制在 $\pm 5\text{cm}$ 以内；完成辅助门架组装、调试与固定，检查导向轨道、滑轮、配重结构稳定性，校准起重机脱钩装置，确保设备协同运行正常；提前检测场地土体含水率，黄土最优含水率控制在 $18\%\sim 22\%$ ，含水率超标时晾晒处理，偏低时适度洒水补湿，保障夯击密实效果。

4.2 门架就位与精准夯击

按照放样点位移动起重机与辅助门架，使导向轨道中心与夯点中心对齐，调整门架垂直度与水平度，固定底座配重，杜绝作业过程中门架偏移、晃动。启动起重机起吊重锤，沿导向轨道匀速提升至设计落距，锁定高度后触发自动脱钩装置，重锤垂直自由下落完成夯击作业。单次夯击完成后，观测夯坑成型状态，记录夯沉量，依次完成单点位设计夯击次数。

4.3 夯坑回填与场地整平

单点夯击完成后，及时采用素黄土回填夯坑并平整压实，避免雨水汇集浸泡地基；完成整片区域点夯施工后，更换低能级参数开展满夯作业，搭接夯实表层松散土体，消除表层孔隙与残余湿陷性，使整个施工场地形成均匀密实的加固层。

4.4 静置养护与检测验收

强夯施工完成后，场地静置养护 28d ，为土体孔隙水压力消散、土体固结提供充足时间。养护完成后开展现场检测，通过原位静载试验、土工试验检测地基承载力、土体干密度、湿陷系数等核心指标，验收合格后方可进入下道工序。

5 施工效果对比与数据分析

为验证辅助门架强夯技术的应用优势，选取本工程两块同等地质条件试验区域，A 区采用传统无门架强夯施工，B 区采用辅助门架强夯施工，施工能级、夯击次数、场地条件完全一致，养护期满后开展指标检测，核心数据对比如表 1 所示。

检测指标	传统无门架强夯 (A 区)	辅助门架强夯 (B 区)	规范合格标准
地基承载力特征值 (kPa)	185	235	≥ 220
土体平均干密度 (g/cm^3)	1.58	1.72	≥ 1.65
土体湿陷系数	0.0058	0.0019	≤ 0.002
有效加固深度 (m)	5.2	6.5	≥ 6.0
夯点偏移偏差 (cm)	12.6	3.2	≤ 5.0

由检测数据可知，传统无门架强夯施工后地基湿陷系数未完全达标，加固深度不足，夯点偏移偏差大，土体夯实均匀性较差；增设辅助门架后，地基承载力、干密度、有效加固深度显著提升，湿陷系数降至规范合格范围内，夯点精度大幅提升，彻底消除黄土湿陷隐患。同时现场统计得出，门架辅助施工能量利用率提升 28% ，单区域施工工期缩短 22% ，设备故障率降低 60% ，施工质量与经济效益双重提升。

6 施工重难点与质量安全控制措施

6.1 核心施工重难点

一是湿陷性黄土地地松软，设备行走易沉降，导致门架倾斜、夯点偏移，施工精度难以把控；二是黄土含水率敏感，含水率过高易出现夯坑积水、土体弹簧，过低则夯实密实度不足；三是门架与起重机协同对位精度要求高，对位偏差会直接影响落锤垂直度；四是大能级夯击振动大，易引发周边土体松动，需严控施工顺序与夯击节奏。

6.2 质量控制措施

严格把控场地预处理质量，松软区域铺设碎石垫层硬化，保证设备作业面平整稳定；施工前精准检测土体含水率，动态

调整干湿状态, 适配强夯施工要求; 每次移位后复核门架垂直度与夯点位置, 杜绝偏差施工; 严格执行试夯制度, 根据试夯数据优化夯击次数、落距等参数; 分区分层施工, 遵循“先外围后中心、先深后浅”的夯击顺序, 保证土体均匀固结; 施工完成后做好场地排水防护, 严禁雨水浸泡夯后场地, 避免二次湿陷。

6.3 安全管控措施

强夯作业区域设置硬质围挡与警示标识, 严禁无关人员进入作业半径内; 作业前全面检查门架螺栓、导向轨道、钢丝绳、脱钩装置, 杜绝设备带病作业; 大风、雨雪天气立即停止施工, 防止门架失稳、锤体晃动引发安全事故; 操作人员持证上岗, 严格按照操作规程作业, 杜绝违规操作; 定期检查门架结构稳定性, 及时紧固松动构件, 保障设备协同作业安全。

7 工程应用成效

本工程采用起重机辅助门架强夯施工技术, 顺利完成大面积中等一强湿陷性黄土地基处理作业, 施工全过程无质量缺陷与安全事故。经第三方检测, 施工后场地土体湿陷性完全消除, 地基承载力、密实度、加固深度均满足设计及规范优良标准, 地基均匀性显著提升, 彻底解决了传统强夯施工精度差、能量损耗大、加固效果不足的技术难题。相较于传统工艺, 该技术无需大型专用强夯设备, 仅通过简易门架改造即可提升施工质量与效率, 设备改造成本低、周转性强, 大幅节约工程投资,

适配黄土地区大面积地基处理施工, 推广价值极高。

8 结论与展望

8.1 结论

本文通过分析湿陷性黄土地基特性与传统强夯施工缺陷, 系统研究起重机辅助门架强夯施工技术的结构原理、施工工艺与应用效果, 结合工程实测数据得出以下结论: 湿陷性黄土的大孔隙、遇水湿陷特性是地基处理的核心难点, 传统无门架强夯施工存在精度低、能量损耗高、加固效果不均等问题, 难以彻底消除土体湿陷性; 增设钢结构辅助门架可有效约束吊臂变形、实现垂直精准落锤, 大幅提升夯击能量利用率与施工精度, 显著优化黄土加固效果; 该改造式施工技术工艺简单、改造成本低、安全性强, 可有效提升地基承载力、消除湿陷隐患, 施工质量与经济效益显著优于传统工艺, 完全适配湿陷性黄土地基规模化施工。

8.2 展望

本次研究针对常规能级、常规厚度湿陷性黄土地基, 后续可针对超厚湿陷黄土、高填方黄土等复杂工况, 优化门架结构尺寸与高级强夯参数, 完善适配极端工况的施工体系。同时可结合智能化监测技术, 实时监测落锤垂直度、夯沉量、土体变形数据, 进一步提升施工精准度与智能化水平, 推动黄土地区地基处理施工技术标准化、精细化发展。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 50025-2018 湿陷性黄土地区建筑规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.
- [2] 中华人民共和国住房和城乡建设部. JGJ 79-2012 建筑地基处理技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- [3] 王建军, 李刚. 履带吊辅助门架强夯技术在湿陷性黄土地基中的应用[J]. 施工技术, 2023, 52(14): 89-92.
- [4] 张旭东, 赵凯. 改良式门架强夯施工工艺及地基加固效果分析[J]. 公路交通科技, 2024, 41(05): 36-41.
- [5] 刘鹏飞. 湿陷性黄土场地强夯施工质量控制与参数优化研究[J]. 工程建设与设计, 2023(18): 156-158.
- [6] 陈明, 王浩. 导向门架辅助强夯法处理深厚湿陷性黄土试验研究[J]. 地基基础工程, 2022, 30(03): 78-83.
- [7] 周磊. 黄土地区地基强夯施工设备改造与效率提升技术[J]. 城市道桥与防洪, 2024(03): 142-145.