

静压挤密桩缩孔效应分析及新型填夯一体装置

郭亮¹, 雷方超¹, 裴霏², 徐传召¹, 邢凯¹

(1. 机械工业勘察设计研究院有限公司, 西安 710043; 2. 西安交通工程学院土木工程学院, 西安 710300)

摘要: 静压挤密桩在治理黄土湿陷性方面展现出显著的技术和经济优势。然而,其施工过程中普遍存在严重的静压成孔后缩孔问题。为此,进行了专门的现场试验,通过体积折算法对比分析静压挤密桩首次与第4次成孔后的缩孔情况。研究发现,两次成孔后均出现不同程度的缩孔现象,其中,第4次成孔的整体缩孔率高达26.54%,较首次成孔时增加了101.40%。为了有效应对这一挑战,并确保挤密桩的施工质量,夯填工序的重要性尤为突出。鉴于传统重锤夯填方法在施工效率、质量控制以及环境保护等方面存在的局限性,研发一种新的填夯一体装置。该装置不仅提升了挤密桩的施工质量和效率,还推动了夯填技术的革新,实现了经济效益和社会效益的双重提升,具有推广和应用价值。

关键词: 静压挤密桩; 缩孔效应; 重锤夯填; 填夯一体装置

中图分类号: TU475+.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-1807(2025)15-0101-05

湿陷性黄土因其地质结构不稳定,难以为其上部结构提供有效的承载力,因此需要利用有效手段对其进行地基处理才能够达到有效控制沉降与变形的效果。挤密桩法是一种常见的湿陷性黄土地区地基处理方式。王亚军等^[1]通过现场试验验证了挤密桩可有效控制黄土地基的湿陷变形;李云瑜等^[2]通过大量试验测试素土挤密桩、SDDC (super down-hole dynamic consolidation, 孔内深层超强夯法) 挤密桩以及两种挤密桩组合等不同桩型均能有效提高地基承载力并改善黄土湿陷性;周勤帮等^[3]结合试验测试与理论计算分析了灰土挤密桩对湿陷性黄土地基的处理效果,得到了一种灰土挤密桩合理桩间距的计算方法;徐青等^[4]基于数值模拟研究填方灰土桩复合地基大底盘建筑倾斜全过程的变形力学行为,并提出填方区地基处理优化方案;党昱敬等^[5]验证了短螺旋挤土工艺在湿陷性黄土处理中具有显著优势;韩辅洲等^[6]根据试验数据判定大厚度黄土地基处理采用沉管挤密桩法是有效的;潘映兵等^[7]通过工程实践和实验分析验证了静压挤密桩在湿陷性黄土地基处理中的可行性和经济性。静压挤密桩因其弱振动、低噪声、低污染、易于保证

施工质量、快速施工及成本低廉等优势,在地基处理领域得到广泛应用。然而,在黄土地区的应用中,仍面临一些亟须解决的问题:桩间土影响(静压挤密桩成孔后,桩间土易受到相邻桩挤密作业的影响,导致严重的回弹缩孔现象);时间效应显著(在黄土地层中,挤密桩成孔后若未能及时回填压实,随着时间的推移,桩孔会发生较大的回缩变形);高含水率挑战(对于高含水率的黄土地层,桩孔成孔后的回弹变形更为显著,进一步加剧了施工难度和技术挑战)。这些问题的存在提示需要不断探索和创新,以提高静压挤密桩技术的应用效果和适应性。

目前,众多学者通过理论分析、现场检测实验及数值模拟分析,对静压挤密桩进行了深入研究,得出了一系列具有实用价值的结论,并提出了一系列创新性工艺技术。在施工方法上,何福江等^[8]发明了一种复合锤静压沉管挤密桩的方法,降低了施工成本并提高了成桩效率。在工程实践中,刘忠良^[9]在南水北调工程中的某II级黄土湿陷性地基中验证了沉管挤密桩的经济性。中铁西北科学研究院有限公司研发了小型静压挤密处理技术,并配套研发了静压挤密机,并在宝兰客运专线安家堡隧道进

收稿日期: 2025-02-10

基金项目: 陕西省科技厅重点研发计划(2024SF2-GJHX-47)

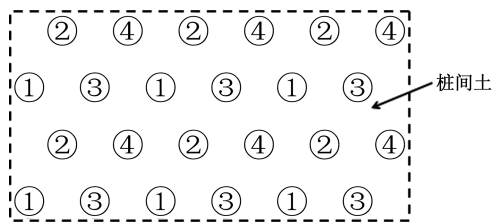
作者简介: 郭亮(1982—),女,陕西西安人,高级工程师,研究方向为工程项目管理;雷方超(1992—),男,陕西西安人,硕士,工程师,研究方向为岩土工程及地下工程;裴霏(1992—),女,陕西渭南人,硕士,讲师,研究方向为土木工程;徐传召(1985—),男,河南南阳人,硕士,高级工程师,研究方向为岩土工程;邢凯(1989—),男,陕西咸阳人,工程师,研究方向为建筑施工及安全管理。

口明洞段进行了相应的应用性试验研究^[10]。何腊平和蒋宗鑫^[11]通过不同成孔方式挤密桩处理地基效果对比说明了沉管成孔挤密桩具有相对的优势。褚双义^[12]总结了挤密桩施工过程中出现缩颈问题的原因以及所采取的技术措施。何子苗等^[13]对经沉管挤密法加固处理后的地基沉降量以及桩体位移进行对比分析,进而探讨在沉管挤密桩处理技术下,不同的桩间距所引起的复合地基加固效应。在施工设备上,刘清洁^[14]、王鼎等^[15]通过在挤密桩机设备安放内外组合管来提高湿陷沉管挤密桩成孔深度。赵文英等^[16-17]通过焊接扩大桩管增大沉管挤密桩的成孔直径,解决了拔管过程因真空(负压)效应和高含水量引起缩颈、孔底回弹的难题。

现阶段,关于静压挤密桩成孔后桩间土回弹变形的研究成果尚显不足,同时对缩孔问题的技术解决方案研究也较为欠缺。本文依托新希望锦麟天玺项目地基处理工程,针对静压挤密桩缩孔现象进行了现场试验分析,提出一种新型填夯一体装置,并详细介绍该装置的结构组成及其施工方法。

1 静压挤密桩缩孔效应分析

挤密桩通常采用跳打法施工,整个场地的桩基施工需分4遍完成,每遍施工均为隔排隔列,以此来减少相邻桩施工时的相互影响。桩位施工顺序示意图如图1所示。为了探究跳打施工过程中静压挤密桩成孔缩孔的具体情况,进行现场试验研究,桩长7.0 m,成孔直径550 mm,桩间距1 200 mm。



①、②、③、④代表桩位及桩位施工顺序

图1 桩位施工顺序示意图

1.1 试验方案

静压成孔后,将密封的塑料水袋置于桩孔内,并逐步注水,每次注入相同量的水,同时记录桩顶到水面的高度,直至桩孔完全注满。具体操作如图2所示。图3展示了使用体积法计算桩径的示意图。

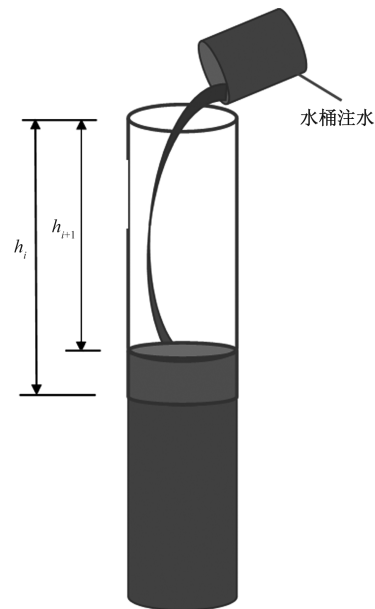
由折算公式可得此段位置的折算直径 d 。

$$d = \sqrt{\frac{4L}{\pi(h_i - h_{i+1})}} \quad (1)$$

式中: L 为每次的注水量, m^3 。



图2 桩孔注水过程



h_i 和 h_{i+1} 分别为第 i 次和第 $i+1$ 次注入水距离桩顶的高度

图3 体积法示意图

1.2 实验数据分析

1.2.1 静压挤密桩第1遍成孔

静压挤密桩首次成孔后,随机选取10个桩孔进行注水试验。由于桩孔形状不规则且结构复杂,水面过低时难以准确测量。首次注水量为300 kg,之后每次注水量为100 kg,每次注水后测量桩顶至水面的高度,并计算出折算孔径。10个桩孔试验结果的平均值见表1。

通过对静压挤密桩的折算公式计算,得到综合折算直径为0.478 m,缩孔率为13.18%,体积减小率为8.79%。首次注水后,折算直径降至0.455 m,缩孔率增加到17.27%。实际施工中,成孔后孔底

表1 静压挤密桩首次成孔桩孔体积法数据

注水量/kg	桩顶至水面高度平均值/m	高度差/m	理论折算孔径/m
0(初始情况)	7.000	1.846	0.455
300	5.154	0.562	0.476
400	4.592	0.548	0.482
500	4.044	0.557	0.478
600	3.487	0.564	0.475
700	2.923	0.547	0.483
800	2.376	0.555	0.479
900	1.821	0.563	0.476
1 000	1.258	0.569	0.473
1 100	0.689	0.528	0.491
1 200	0.161	0.161	0.648
1 253(满)	0.000	7.000	0.478(综合)

会出现回弹现象,同时孔壁的松散土体会掉落至孔底,导致初次注水时桩顶至孔底的实际高度小于7.00 m,因此,首段的折算直径会相应增大。此外,孔口的折算直径较成孔直径增加了17.74%,这主要是由于静压成孔过程中拔管操作对孔口周围土体结构造成了一定程度的破坏,部分土体滑落进入孔内或被带出孔口。在标准的挤密桩设计中,通常会将桩顶的一部分视作“虚桩头”。排除孔口第1段的影响,整个桩体的折算直径约为0.473 m,缩孔率为14.04%,体积减少率为10.59%。

1.2.2 静压挤密桩第4遍成孔

静压挤密桩第4次成孔后,随机选取10个桩孔进行注水试验。首次注水量为200 kg,之后每次注水量为100 kg,每次注水后测量桩顶至水面的高度,并计算出折算孔径。10个桩孔试验结果的平均值见表2。

利用折算公式计算,综合折算直径约为0.404 m,缩孔率为26.54%,体积缩小率为34.70%。首次注水后,折算直径为0.382 m,缩孔率增至30.59%。孔口的折算直径相比成孔直径增大了3.00%,若不考虑孔口第一段,整体折算直径约为0.393 m,缩孔率

表2 静压挤密桩第4次成孔桩孔体积法数据

注水量/kg	桩顶至水面高度平均值/m	高度差/m	理论折算孔径/m
0(初始情况)	7.000	1.748	0.382
200	5.252	0.669	0.436
300	4.583	0.820	0.394
400	3.763	0.958	0.365
500	2.805	0.864	0.384
600	1.941	0.790	0.402
700	1.151	0.766	0.408
800	0.385	0.385	0.567
897(满)	0.000	7.000	0.404(综合)

为28.64%,体积缩小率为38.38%。

对比前后两次工序的静压挤密桩缩孔情况,后者缩孔率相比前者增加了101.40%。第1次成孔在原状土阶段进行,桩孔之间的相互影响较小,因此成孔后缩孔率较低,孔壁较为光滑,上下变化较为均匀。而在第4次成孔前,厂区土质已经经过3次夯填挤密,密实度显著提高。因此,第4次成孔拔管后,桩孔内土体发生弹性变形,缩孔较为严重,孔壁变化不均匀且较为粗糙,特别是桩孔中部位置回弹较大。对比两次工序首次注水后的折算直径可以看出,后者孔底产生了较为明显的回弹现象。静压挤密桩成孔拔管过程中,由于静压机桩管桩尖和孔底土体之间会产生真空效应,导致孔内缩径、塌孔及成孔周围地面塌陷、开裂等问题,同时,桩间距以及土层含水率也是影响缩孔的重要因素。

针对桩孔缩孔问题严重导致无法进行重锤夯填,施工现场往往采取洛阳铲掏孔或长螺旋钻孔方式进行处理,并严格把控填料的含水率等相关参数,从而保证工期及工程质量,但也相应增加了施工成本。为了有效应对这一挑战,并确保挤密桩的施工质量,夯填工序的重要性尤为突出。

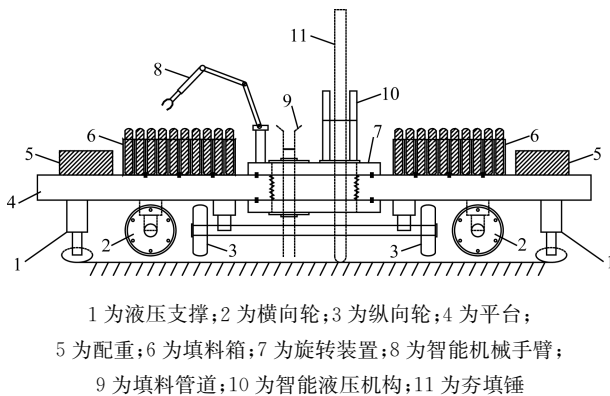
2 基于静压沉管成孔的新型填夯一体装置

2.1 传统夯填机械存在的问题

通常情况下,挤密桩成孔后会选用重量为2~3 t的重锤,利用相应的设备将重锤提升至4~6 m的高度,然后通过自由下落的方式对地基土进行重复夯打,以达到处理湿陷性土壤的效果。然而,在重锤夯实施工过程中,常常遇到一些无法避免的问题。例如,重锤夯实的次数、每次填料的量、填料的含水率等指标难以完全满足设计要求,这会严重影响挤密桩的成桩质量。此外,重锤夯实对操作人员的技术要求较高,而操作人员的责任意识淡薄,为提高效率,往往无法达到预期的夯实效果,也无法有效解决缩孔的夯扩要求。特别是在当前高标准的环境保护要求下,施工现场的填料搬运与拌合、重锤夯实产生的噪声,均会对环境造成一定影响。为了适应新形势下节能减排要求、提高工效增加市场竞争力、克服现有技术的缺陷,有必要对挤密桩重锤夯实工艺进行进一步改进。

2.2 新型填夯一体装置的结构

基于静压沉管成孔的填夯一体装置的整体结构如图4所示,主要由底部结构、中部结构和上部结构组成。底部结构包括若干液压支撑、纵向轮及横



1 为液压支撑;2 为横向轮;3 为纵向轮;4 为平台;
5 为配重;6 为填料箱;7 为旋转装置;8 为智能机械手臂;
9 为填料管道;10 为智能液压机构;11 为夯填锤

图 4 新型填夯一体装置结构示意图

向轮;中部结构包括平台及置于平台中心的旋转装置,旋转装置位于平台中心,其侧壁通过滚动齿轮与平台连接,上下环形端板通过滑轮与平台连接,从而实现 360° 旋转;上部结构包括配重、填料箱及夯填装置。夯填装置的填料管道和智能液压机构分别通过旋转装置上部的滑动平台连接,可根据实际挤密桩间距进行调节。夯填锤贯穿于液压机构中,智能机械手臂则靠近填料管道一侧连接于旋转装置上部。填料箱内部通过隔板分割为若干个空间,每个空间内放置有预制好的填充料,分别位于平台的左右两侧。

2.3 新型填夯一体装置的施工方法

(1) 调节间距。根据挤密桩成孔的间距,通过调节旋转装置上部的滑动平台,使填料管道与夯填锤的间距与挤密桩成孔间距保持一致。

(2) 调整位置。通过纵向轮和横向轮调整装置的整体位置,使填料管道和夯填锤与挤密桩孔对应。

(3) 搬运填料箱。将装满填充料的填料箱通过机械搬运至平台对应位置。

(4) 调节水平度。通过液压支撑调节平台的水平度,确保填料管道和夯填锤的垂直度。

(5) 设定夯填高度。根据设计要求及每次填充料的量,设定液压机构每次传送夯填锤的高度,以保证挤密桩成桩的密实度要求。

(6) 填料作业。智能机械手臂从填料箱中抓取一个填充料,放入填料管道中。智能机械手臂通过自身伸缩功能使填充料通过填料管道中的切割刀片,使填充料袋破碎,填充料通过填料管道进入孔内。智能机械手臂将破碎的填充料袋放置一旁回收。

(7) 首次夯实。旋转台旋转 180°, 夯填锤借助液压机构进行第 1 个孔的第 1 段夯实。

(8) 完成首个单元。重复步骤(6)和步骤(7),完成第 1 个单元挤密桩的成桩工作。

(9) 移动装置。如图 5 所示,通过液压支撑、纵向轮及横向轮将装置移至第 2 单元区域位置,重复步骤(4)~步骤(8),完成第 2 个单元挤密桩的成桩工作。

(10) 完成整排桩。重复步骤(9),完成第 1 排挤密桩的成桩工作。通过液压支撑、纵向轮及横向轮将装置移至第 2 排区域位置,重复步骤(4)~步骤(9),完成第 2 排挤密桩的成桩工作,以此类推。

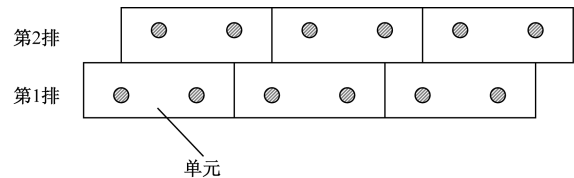


图 5 新型填夯一体装置夯填顺序

2.4 新型填夯一体装置的特点

基于静压沉管成孔的新型填夯一体装置解决了现有技术中存在的填料与夯施工效率低、施工质量难以把控、重锤夯实的次数、每次填料的量、填料的含水率等指标无法完全满足设计要求以及环境保护等问题。该装置采用袋装填充料,根据挤密桩的设计要求,调整袋装的大小、填料的含水率和填料的配合比,从而保证了挤密桩填料的质量,并减少了施工现场拌料对环境的污染。该装置的纵向轮和横向轮保证了设备的前后左右移动,相比传统的履带式行走机构更加方便灵活。旋转装置可实现 360° 旋转,填料管道与夯填锤对称设置,可根据桩间距调整两者的间距,填料与夯实工序互不影响,提高了施工效率。根据每次填充料的量和挤密桩密实度的要求,可以设置每次压实下沉的高度,有效保证了挤密桩的成桩质量。相比传统的重锤夯实工艺,该装置噪声小、结构简单、方便灵活、施工效率高,施工质量能够得到有效保证,且无扬尘,有利于环境保护。

3 结论

静压挤密桩在治理黄土湿陷性方面表现出显著的技术和经济优势,但在施工过程中存在严重的缩孔问题。依托实际工程项目针对静压挤密桩缩孔现象进行了现场试验分析并提出相应的解决方案,有利于推进湿陷性黄土地基处理技术的进一步发展。

(1) 研究发现,第 4 次成孔的整体缩孔率高达 26.54%,较首次成孔增加了 101.40%,若不解决缩孔问题直接进行夯实回填,地基处理的效果将不能达到设计要求。为解决这一问题,提出了新型填夯

一体装置,该装置不仅能够提升施工质量和效率,并能推动夯填技术的革新,进一步实现经济效益和社会效益的双重提升。

(2)传统重锤夯填方法在施工效率、质量控制和环境保护方面存在局限性。新型填夯一体装置通过优化结构设计解决了这些问题。该装置采用袋装填充料,可根据设计要求调整填料的大小和含水率,确保填料质量,并减少环境污染。装置的纵向轮和横向轮保证了设备的灵活性,旋转装置可实现360°旋转,提高了施工效率。该装置噪声小、结构简单,施工质量能够得到有效保证,且无扬尘,有利于环境保护。

参考文献

- [1] 王亚军,白晨帆,蒋应军,等. 挤密桩对大厚度黄土地基浸水沉降的影响[J]. 铁道建筑, 2024, 64(12): 1-8.
- [2] 李云瑜,贾世平,苏天涛. 湿陷性黄土地区多桩型挤密桩复合地基加固效果对比研究[J]. 兰州理工大学学报, 2024, 50(5): 147-152.
- [3] 周勤帮,段伟,王凯,等. 灰土挤密桩加固湿陷性黄土地基效果分析[J]. 科技和产业, 2024, 24(11): 238-246.
- [4] 徐青,张树筱,杨宏,等. 填方灰土桩复合地基大底盘建筑倾斜特性数值分析[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(14): 5951-5962.
- [5] 党昱敬,程少振,刘天翔. 从刚性桩复合地基发展历程看短螺旋挤土工艺刚性桩复合地基综合技术优势[J]. 施工技术(中英文), 2022, 51(1): 8-12.
- [6] 韩辅洲,李福来,李晨雁. 沉管挤密桩在大厚度黄土区域地基处理中的应用研究[J]. 中国建材科技, 2021, 30(6): 137-138.
- [7] 潘映兵,王力,王世斌,等. 素土沉管挤密桩在湿陷性黄土地区高层建筑地基处理中的应用案例分析[C]// 2024年建筑结构技术交流会议论文集(第二册). 北京:《建筑结构》编辑部, 2024: 493-500.
- [8] 何福江,姜暑芳,刘福友,等. 一种复合锤振动沉管挤密桩工方法:CN201210491466.7[P]. 2013-03-13.
- [9] 刘忠良. 素土挤密桩在渠道湿陷性黄土中的应用[J]. 水科学与工程技术, 2018(6): 73-75.
- [10] 米维军,贾黎,贾燕,等. 宝兰客专黄土隧道地基静压挤密处理效果探讨[J]. 铁道工程学报, 2015, 32(11): 98-101, 119.
- [11] 何腊平,蒋宗鑫. 自重湿陷性黄土地区复合地基处理对比试验研究[J]. 工程勘察, 2019, 47(10): 19-24, 41.
- [12] 褚双义. 浅谈灰土挤密桩缩颈的技术处理[J]. 建材与装饰, 2020(19): 14, 16.
- [13] 何子苗,薛鹏,李松徽. 基于沉管挤密法的湿陷性黄土地基加固效果分析[J]. 山西建筑, 2021, 47(3): 54-56.
- [14] 刘清洁. 大厚度回填或自重湿陷性黄土场地施工沉管挤密桩的设备与方法: CN201210555775.6 [P]. 2013-03-27.
- [15] 王鼎,葛忻声,甄正,等. 内外套管组合沉管夯扩法在大厚度湿陷性黄土地基中的现场试验研究[J]. 建筑结构, 2019, 49(6): 134-137.
- [16] 赵文英,张君涛,郭强. 沉管挤密桩成孔用扩大头桩管: CN201620296916.0[P]. 2016-11-09.
- [17] 赵文英. 高含水量湿陷性土挤密技术研究与应用[R]. 西安: 陕西建工机械施工集团有限公司, 2023.

Analysis of Shrinkage Effect in Static Pressure Densification Piles and a Novel Fill-tamp Integrated Device

GUO Liang¹, LEI Fangchao¹, PEI Fei², XU Chuanshao¹, XING Kai¹

(1. China JIKAN Research Institute of Engineering Investigations and Design Co., Ltd., Xi'an 710043, China;

2. School of Civil Engineering, Xi'an Traffic Engineering Institute, Xi'an 710300, China)

Abstract: Static pressure densification piles exhibit significant technical and economic advantages in addressing the collapsibility of loess. However, during construction, there is a widespread issue of severe shrinkage after static pressure hole formation. To address this, specialized field tests were conducted using the volume conversion method to compare and analyze the shrinkage conditions of static pressure densification piles after the first and fourth hole formations. It is found that shrinkage occurred to varying degrees after both hole formations, with the overall shrinkage rate after the fourth hole formation reaching as high as 26.54%, an increase of 101.40% compared to the first hole formation. To effectively tackle this challenge and ensure the quality of pile construction, the importance of the tamping and filling process stands out. Given the limitations of traditional heavy hammer tamping methods in terms of construction efficiency, quality control, and environmental protection, an innovative fill-tamp integrated device has been developed. This device not only improves the quality and efficiency of densification pile construction but also advances tamping and filling technology, achieving dual improvements in economic and social benefits, and it has value for promotion and application.

Keywords: static pressure densification pile; shrinkage effect; heavy hammer compaction; fill-tamp integrated device