

文章编号: 1007-2993(2022)04-0259-08

水泥土搅拌桩在卵砾石地层的应用研究进展

梁 涛^{1,2} 钟建文³ 关岩鹏² 刘晓丽⁴ 高艳卫⁵

(1. 中国航天建设集团有限公司, 北京 100071; 2. 航天规划设计集团有限公司, 北京 100162; 3. 清华大学基建规划处, 北京 100084; 4. 清华大学水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 北京 100084; 5. 北京航天地基工程有限责任公司, 北京 100070)

【摘要】 卵砾石地层可压缩性低、抗剪强度大, 水泥土搅拌桩工法在应用于卵砾石地层时存在若干技术问题。系统总结了水泥土搅拌桩工法在卵砾石地层的应用情况, 重点对水泥土搅拌桩应用于卵砾石地层的技术难点及主要的改进措施进行了论述, 并分析了各改进方法的作用机理、适用性、利弊等。水泥土搅拌桩在穿越卵砾石地层过程中存在施工效率低下、钻具磨损大、施工质量不易控制等技术难题, 目前已有水泥土搅拌桩应用于卵砾石地层的成功案例中主要改进工艺可分为钻进、搅拌、排渣共计三大类别, 具体可细化为提高动力机头功率、控制钻头钻压及转速、提高钻具材料强度、改进钻头及搅拌叶片结构形式、使用土体改良剂等措施, 必要时可引入引孔换填、冲击破碎等工法辅助施工。但总体上应用成功的案例中, 卵砾石地层的颗粒粒径及厚度较小, 一般粒径不超过 150 mm, 且未形成系统性的卵砾石地层特征与机械设备技术参数的匹配方法。搅拌桩设备与卵砾石地层相互作用机理研究等工作亟待深化。

【关键词】 地基处理; 水泥土搅拌桩; 卵砾石地层; 止水帷幕

【中图分类号】 TU 473.2

【文献标识码】 A

doi: 10.3969/j.issn.1007-2993.2022.04.001

Research Progress on Application of Cement Soil Mixing Pile in Gravel Stratum

Liang Tao^{1,2} Zhong Jianwen³ Guan Yanpeng² Liu Xiaoli⁴ Gao Yanwei⁵

(1. China Aerospace Construction Group Co., Ltd., Beijing 100071, China; 2. Aerospace Planning and Design Group Co., Ltd., Beijing 100162, China; 3. The Construction and Planning Office, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 4. State Key Laboratory of Hydroscience and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 5. Beijing Aerospace Foundation Engineering Co., Ltd., Beijing 100070, China)

【Abstract】 Gravel stratum has low compressibility and high shear strength. There are some technical problems in the application of cement soil mixing pile method in gravel stratum. The application of cement soil mixing pile in gravel stratum was summarized, and the technical difficulties and main improvement measures of cement soil mixing pile in gravel stratum were also discussed. The action mechanism, applicability, advantages and disadvantages of each improvement method were analyzed. During the process of cement soil mixing pile crossing gravel stratum, there are technical problems such as low construction efficiency, large wear of drilling tools and difficult control of construction quality. At present, there are successful cases of cement soil mixing pile applied to gravel stratum. The main improved processes can be divided into three types, including drilling, mixing and slag discharge, which can be subdivided into improving the power of power machine head, controlling the bit weight and speed, improving the strength of drilling tool materials, improving the structural form of bit and mixing blade, and using soil modifier. If necessary, pilot hole replacement and impact crushing can be introduced to assist the construction. However, in the successful cases, the particle size and thickness of gravel stratum are small, generally no more than 150 mm in particle size, and there is no systematic matching method between gravel stratum characteristics and mechanical equipment technical parameters. The research on the interaction mechanism between mixing pile equipment and gravel stratum needs to be deepened.

【Key words】 foundation treatment; cement soil mixing pile; gravel stratum; waterproof curtain

基金项目: 中国航天建设集团有限公司科研基金(YK2020-01-01); 航天建筑设计研究院有限公司科研基金(YK2020-05); 国家自然科学基金面上项目(52079068)

作者简介: 梁 涛, 1978 年生, 男, 博士, 研究员, 主要从事岩土工程方面的科研工作。E-mail: 729693453@qq.com

通讯作者: 关岩鹏, 1988 年生, 男, 博士, 助理研究员, 主要从事工程岩土力学方面的科研工作。E-mail: hbgy2008@163.com

0 引言

目前,我国城市建设的快速发展,使得中心城区建筑物、管线、地铁隧道等日趋密集,地下空间的开发难度增大,风险提高。为了不影响周边建(构)筑物的安全,需要在地下空间开发中采取严格的地下水控制措施。传统的降水法在抽降地下水的过程中会引起周边地面及建(构)筑物的沉降,造成水资源的大量浪费,在城市地下空间开发中的应用逐渐减少^[1]。帷幕止水法作为有效防止地下水危害的技术方法之一,近年来得到了越来越广泛的应用^[2-3],但是也存在施工工艺与地层特性不匹配、施工质量难保证、开挖后堵漏困难等技术问题。

以卵砾石地层止水帷幕为例,卵砾石地层是山区河床、山前冲洪积带的一种常见地层,在我国北京、成都、沈阳等重点城市均有分布^[4]。该地层可选用的施工工艺较多,但均存在不同程度的技术问题。地下连续墙施做止水帷幕存在造价高、施工工艺复杂、接头易漏水等问题。旋喷桩止水帷幕的桩体直径不易控制,在卵砾石地层的成桩质量较差^[5]。咬合桩止水帷幕需严格控制混凝土的初凝时间、咬合时间等参数,导致该工法造价高,施工效率低,成桩质量不易控制。水泥土搅拌桩具有对周边地层影响小、抗渗性能好、工期短、造价较低等优点,在软土地层应用较为广泛,但在卵砾石地层条件下的成功案例较少。

综上,卵砾石地层条件下的止水帷幕施工工艺存在成本高、施工工艺复杂、施工质量难于控制等技术问题,这些技术问题增加了城市地下空间的开发难度。本文立足于岩土工程行业应用较为广泛的水泥土搅拌桩止水帷幕工法,系统论述了水泥土搅拌桩在应用于卵砾石地层的技术难点,总结了已成功的应用案例中针对卵砾石地层所做出的主要改进方法,并分析了各改进方法的作用机理、适用性、利弊等,可为其他类似地层条件下的水泥土搅拌桩工程提供借鉴。

1 水泥土搅拌桩应用于卵砾石地层的技术难题

1.1 卵砾石地层的工程地质特性

卵砾石地层是在一定的水动力作用下搬运沉积的产物^[6],在我国分布广泛。根据地形及水动力条件的不同,卵砾石地层成因可以分为洪积、冲积、滨海沉积、冰水沉积及三角洲沉积等大类^[7]。

卵砾石地层中,卵石成分多以硬质岩为主,形状多为圆状或棱状^[8]。粒径约为20~200 mm,部分地区的卵砾石地层中也会含有大于200 mm的漂石。其地层的物理力学特性主要表现为孔隙大、透水性

强、硬度大、压缩性低、抗剪强度大^[9-10]。

卵砾石地层的卵石一般为硬质岩在水动力作用下运动冲刷形成,普遍抗压强度较大,耐磨性好^[11],卵石抗压强度可以达到100 MPa以上。

卵砾石地层颗粒级配受地层形成时期的水动力作用下的搬运沉积环境影响,颗粒粒径离散性较大^[12],如牟迪在分析成都地铁4号线二期西延线地层时,认为该地层颗粒级配曲线呈“L”形,级配曲线虽然连续但不平滑,级配不良,小粒径卵石含量较少^[13]。刘永勤等在对北京地铁九号线多数样品的颗粒级配进行分析时,发现曲线呈“L”形,级配曲线不连续,级配不良,尤其缺少中间颗粒^[14]。级配不良的卵砾石地层易造成孔壁坍塌及漏浆。

在密实度方面,松散卵砾石地层的标准贯入击数在40以下^[15],稍密、密实卵石层一般采用重型动力触探、超重型动力触探方法测定密实度,密实卵石层超重型动力触探 N_{120} 动探击数在10击/10 cm以上^[16]。

1.2 主要技术问题

水泥土搅拌桩工法是利用专门深层搅拌工具^[17],使用水泥浆作为加固剂,在地基内部钻进时将原有土层和水泥浆进行搅拌,使原土层特别是将淤泥层、回填土层等软土结构硬结成桩体,从而提高土层的承载、止水能力的一种施工工艺^[18]。目前常用的有单轴、双轴、三轴、五轴几种形式,由于其施工效率高、施工方便、止水效果好等优点而被广泛应用。主要应用领域为地基处理、截水帷幕、基坑支护等岩土工程,在软土地层应用较为广泛,在卵砾石地层应用成功案例较少。

由于卵砾石地层压缩性低、抗剪强度大等物理力学特性,水泥土搅拌桩在穿越卵砾石地层过程中会遇到诸多技术问题^[19],主要的技术难题可归纳为施工效率低下、钻具磨损大、施工质量不易控制等问题。

1.2.1 钻进效率低下

传统水泥土搅拌桩的钻头为螺旋叶片,主要的钻进方式为螺旋钻进。其钻进原理为硬合金切削软土层的破碎机理,利用小切削角的螺旋叶片,通过较大的下压力旋入地层。该钻进方法对软土土层扰动小,钻进效率较高,但不完全适应卵砾石地层。代婷婷等^[20]认为,对于软土层螺旋式叶片效果好,但是对于卵砾层卵石越挤压越紧,螺旋式钻头无法钻进,而且卵石对螺旋式前进头磨损较严重。王飞指出大粒径的卵砾石会阻挡叶片的切入,叶片难以将卵砾石从原始地层中剥离出来^[21],造成钻头与地层反复摩擦,

降低钻进效率, 增加钻齿崩落风险, 出现钻进缓慢、卡钻甚至无法钻进的情况, 部分工点需要依靠引孔等辅助工法完成施工^[20]。

1.2.2 钻具磨损大

水泥土搅拌桩施工时, 需要与土层进行摩擦, 钻具不可避免地会出现磨损, 在软土地层中钻进时, 磨损在合理的施工损耗范围内。应用于卵砾石地层时, 存在多个加速钻具磨损的因素:

①卵砾石地层中的卵石是耐磨性较大的硬质岩在河流等的长期冲刷中形成的。高明忠等认为硬质岩石本身具有很强的耐磨性, 易增加钻具磨损^[22]。

②卵砾石地层中的卵石与其他土体的硬度、强度相差较大, 导致钻具上各处受力不均。如图 1 所示, 钻具滑动至强度较高的卵石处, 在将卵砾石从原始地层剥离的过程中会承受较大的冲击荷载。高明忠等认为冲击荷载易引起钻头的叶片崩落, 导致钻具的非正常损坏^[22]。

③卵石的密度较大, 如果泥浆的密度未得到有效控制, 易导致卵石无法有效悬浮, 沉淀于正在施工的搅拌桩底部, 被钻头、叶片反复挤压破碎, 造成不必要的磨损。同时, 大量卵石堆积于钻头, 转动阻力加大, 转速下降, 严重时会造成埋钻事故。

上述原因会导致钻具磨损较大, 更换钻具间隔时间减小。而频繁更换钻具会进一步导致施工成本上升、工效降低, 形成恶性循环。

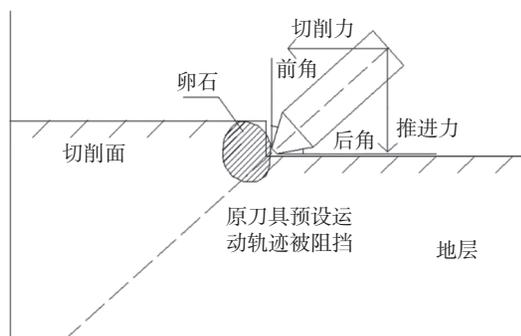


图 1 卵石阻挡叶片钻进路径^[21]

2 成功案例总结

表 1 给出了部分国内水泥土搅拌桩应用于卵砾石地层的案例^[23-27], 整体上看, 应用成功的案例中, 地层厚度、卵石粒径普遍较小, 卵砾石地层厚度一般不超过 7 m, 卵石粒径一般不超过 15 cm。福建莆田某工程二层地下室基坑 SMW 工法桩卵砾石层厚度虽然达到了 13 m, 但是其采用了引孔工法辅助施工, 并非完全依靠改进三轴搅拌桩机械设备及工艺完成施工^[23]。

表 1 卵砾石地层条件下水泥土搅拌桩工法成功案例

工程名称	卵砾石地层特性	改进方法
福建莆田某工程二层地下室基坑 SMW 工法桩 ^[23]	最大厚度约 13 m, 卵石含量约 50% ~ 55%, 砂粒含量 30% ~ 40%, 一般卵石粒径 3 ~ 6 cm, 少数颗粒可大于 10 cm	提高动力机头功率, 改进钻头及搅拌叶片结构形式, 使用加固剂, 钻进困难时进行引孔换填工作
北京地铁 10 号线北土城东路站一芍药居站区间隧道明挖段 SMW 工法桩 ^[24]	卵砾石层厚 1 ~ 3 m, 卵石粒径一般为 20 ~ 30 mm, 最大 100 mm, 亚圆形, 含量达 55%	提高动力机头功率
杭州某电梯试验塔基坑 SMW 工法桩 ^[25]	卵砾石层厚 4.3 ~ 4.8 m, 粒径一般为 20 ~ 100 mm, 局部含漂石	提高动力机头功率, 改进钻头及搅拌叶片结构形式
丽水市丽水绿城秀丽春江基坑项目止水帷幕 ^[26]	含圆砾地层厚 1.4 ~ 6.5 m, 圆砾含量约占 35% ~ 40%, 直径多介于 2 ~ 6 cm, 最大约 15 cm, 次圆状质地坚硬	改进传统三轴搅拌桩机的钻头、叶片和动力头
遂宁市观音湖下穿隧道 SMW 工法桩 ^[27]	卵石粒径多小于 15 cm	引孔辅助施工, 利用旋挖机 (钻头直径为 0.8 m) 进行导孔后回填

综合分析各成功应用于卵砾石地层的案例, 主要采用的改进措施可归类为 6 个:

①提高动力机头功率, 通过大功率动力设备提高钻进扭矩, 完成钻进。

②控制钻头钻压及转速。

③改进钻具, 通过提高钻具材料强度、改进钻头结构形式等方法, 提高钻具与卵砾石地层的匹配程度。

④改善搅拌叶片结构形式, 如由螺旋状叶片改为刀片式叶片, 提高搅拌效率。

⑤使用土体改良剂, 使用膨润土等作为泥浆的辅助材料, 提高泥浆浮力, 降低钻进、搅拌摩擦力, 提高钻进效率。

⑥引入辅助工法, 通过其他工法破碎或取出卵砾石地层中的卵石, 降低水泥土搅拌桩的施工难度。但此方法在一定程度上会导致成本升高、工效降低。

目前, 卵砾石地层条件下水泥土搅拌桩的成功案例较少, 部分改进工法虽有应用成功的案例, 但对改进措施缺乏系统性的理论分析, 留下了较大的科学

研究的空白区。现阶段针对卵砾石地层的钻头设计和使用技术仍然处于主要依赖经验的状况^[28]。大部分改进工法未形成卵砾石地层特征参数与钻头、钻杆形式的匹配方法及系统性的钻进、排渣、搅拌成套的施工质量控制工艺。

3 主要改进措施分析

3.1 提高动力机头功率

随着机械、电力等工业的发展,水泥土搅拌桩动力机头的机械功率不断提高。现有部分水泥土搅拌桩机械性能等参数如表2所示^[23-24, 29]。机械动力机头功率的提高为水泥土搅拌桩在卵砾石地层的适应性提供了有力支撑。目前已有多个工点证实该措施在提高水泥土搅拌桩在卵砾石地层的钻进效率方面有效,如北京地铁10号线北土城东路站—芍药居站区间隧道明挖段工程,利用日本引进的三轴850搅拌机进行SMW桩墙施工,成功穿越了厚度约2m的含卵石的砂层透镜体(最大粒径41mm),该设备功率达到了180kW(90kW×2)^[24]。部分工点的三轴搅拌桩施工机械功率已经达到了225kW^[30]。

表2 部分国内外深层搅拌机械技术参数^[23-24, 29]

机型	轴数	叶片直径/mm	搅拌转速/(r·min ⁻¹)	功率/kW
DJB-14D	1	500	60	2×22
GZB-600	1	600	50	2×30
SJB-30	2	700	43	2×30
SJB-40	2	700	43	2×40
GDP-72	2	700	46	2×37
ZKD65-3	3	650	17.6	2×45
ZKD58-33	3	850	16	2×75
日本550SMW	3	650	16.5/33.1	2×55
日本850SMW	3	850	15.6/31.3	2×90
ZLD180/85-3-M2-CS	3	850	中14.2/外14.2	2×90
ZLD220/85-3-M2-CS	3	850	中13.8/外13.8	2×110

单纯提高动力机头功率并不能完全解决水泥土搅拌桩在卵砾石地层的成桩问题。主要原因如下:

①水泥土搅拌桩动力设备功率受到电机、发动机制造工业的技术能力、制造成本等诸多条件的限制。

②为保证设备的正常运转,水泥土搅拌桩的钻具、钻杆、搅拌叶片等机械设备在施工过程中均有受力状态、稳定性方面的要求。提高动力功率的同时需要采用与其动力功率匹配的机械结构。否则易导致设备因受力过大而磨损、变形甚至损坏,造成损失。

如福建莆田某二层地下室工程基坑水泥土搅拌桩采用了高功率动力机头,为保证不降低机械设备稳定性,采用了质量较大的JB160A步履式全液压三支点打桩架^[23]。该水泥土搅拌桩成功穿越了厚度约5m的卵石层。

③过大的钻头扭矩会引起钻头与卵砾石地层接触力的不平衡,影响钻头的导正性,易引起偏钻问题。

3.2 控制钻头钻压及转速

钻头的钻压及转速是钻进过程中的基本技术参数^[31]。对于卵砾石地层,加大钻压可提高一定的钻进速度,但易导致钻头的过度磨损。钻头转速过快会对钻头切削刃的冷却产生不良影响,加剧切削刃的提前磨损、磨钝。在卵砾石地层钻进时,过高的转速将会导致钻头与破碎面产生相对“打滑”现象,对钻进的辅助作用较小,但会对钻头寿命产生不利影响。同时,在功率不变的情况下,降低转速可以在一定程度上提高扭矩^[32]。王金龙等认为卵砾石地层需慢转速钻进,同时采用主卷扬钢丝绳吊钻杆的方式控制钻压,采用正反交替转动的方法预松地层钻进^[9]。

3.3 改进钻具

研发具有高钻进效率并可以与高功率动力设备相匹配的三轴搅拌桩施工钻具,是提高水泥土搅拌桩工效的另一发展方向^[33]。改进钻具有两个主要的方向:①降低钻头磨损程度;②提高钻进效率。

在降低钻头磨损程度方面,有多种解决方法^[34]。首先,改善钻具的制造材料,使用硬度大、耐磨性好的合金材料可以降低钻头磨损程度^[35]。如Feng和Lu等采用了高强度合金钢构件组合钻头降低钻头磨损^[36]。代婷蓉等提出圆砾层中的水泥土搅拌桩钻头应采用含钨硬质合金钢材料^[20]。何智钢等建议钻齿采用钨钴钛合金材质^[37]。其次,采用钻头镶齿工艺,通过将耐磨性好、便于更换的斗齿、截齿安装于钻头易于磨损的特定部位,待镶齿磨损到一定程度时进行更换,以避免出现钻头的整体磨损或者损坏。如莫凡等提出了一种适用于复杂地质情况下的三轴搅拌机钻头,该设备中使用了牙型的副钻头^[38]。第三,缩短钻头,缩短钻头可降低钻头与卵石的接触面积,以达到降低钻头磨损的效果。李小青等提出了一种超级三轴水泥搅拌桩设备,通过将传统的1.3m长钻头缩短至0.8m,降低了钻头磨损^[39]。

在提高钻进效率方面,主要通过改进钻头的结构形式以提高水泥土搅拌桩对卵砾石地层的适应性。学界提出了多种设计思路改进钻头的结构形式。如曾令新等提出了一种适用于穿透卵砾石土质的三轴

搅拌机钻头, 包含叶式锥形前进头, 通过降低钻头与卵砾石地层的接触面积, 以增大钻头对地层的压强, 提高钻进效率^[40]。马晓华等提出了一种空心钻头和锯齿形钻具。在钻进过程中, 钻具的锯齿可将卵石分散开并避免卡钻, 提高钻进速度^[41]。

3.4 改进叶片结构形式

传统的三轴搅拌桩钻机采用螺旋式叶片, 该叶片在卵砾石地层中搅拌阻力较大, 不利于整体搅拌效率。改进思路可分为 2 个: ①通过将螺旋式叶片改为独立式叶片, 进一步降低搅拌阻力; ②减小搅拌叶片直径(见图 2)。

独立式叶片应用较为广泛, 丽水市丽水绿城秀丽春江基坑、杭州某电梯试验塔基坑等项目均应用独立叶片搅拌水泥土浆, 马晓华等提出独立叶片应每 3 个为 1 组, 等间距布设于钻杆上, 倾斜方向应分别为水平、倾斜向上、倾斜向下^[41]。王金龙等提出了含两层独立叶片的水泥土搅拌桩设备, 该设备叶片上布置多个可将卵石向外拨动的耙钉^[9]。

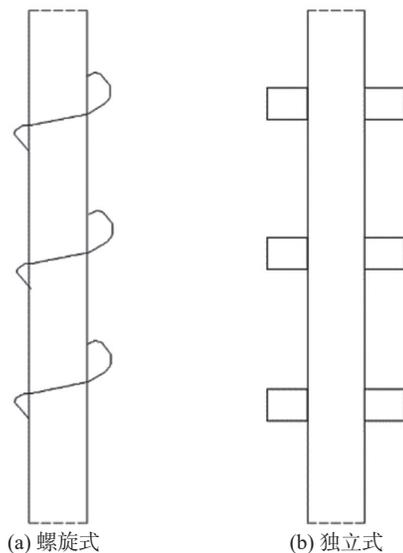


图 2 螺旋式叶片与独立式叶片^[44]

在减小搅拌叶片直径方面, 何智钢等提出了一种可收缩的搅拌叶片, 可通过反转钻杆收缩叶片, 用来预破碎或预松动硬土层^[37]。由于减小搅拌叶片直径会导致搅拌效率降低, 搅拌桩径减小, 故该方法应用不广泛。但该方法可应用于某些特殊工况, 如钻进缓慢时, 可通过减小叶片直径降低钻杆、钻头阻力。

3.5 使用土体改良剂

为了降低钻具与土层间摩擦力, 提高钻进效率, 提高泥浆浮力, 可在水泥浆加固剂中加入一定量的土体改良剂^[42-43]。常见的土体改良剂可分为矿物类、不溶性聚合物、水溶性聚合物、表面活性材料等 4 类^[19],

主要的功能为降低土体的摩擦角, 减少钻头、搅拌叶片与土体的摩擦, 提高土体的流塑性、止水性等。

除了水泥砂浆常用的外加剂粉煤灰、石膏、减水剂、缓凝剂以外, 还可掺入一定量的膨润土^[44-45]。膨润土在卵砾石地层条件下的水泥土搅拌桩施工中的应用较多, 它具有增加泥浆的比重, 形成泥皮抑制漏浆, 降低水泥土的渗透系数等功能。福建莆田某工程二层地下室基坑 SMW 工法桩采用了膨润土作为水泥浆液的添加剂, 降低了搅拌桩桩体对钻头、钻杆粘结阻力^[23]。刘全林等建议卵砾石地层条件下水泥浆液中的膨润土的比例为 5%^[46]。

土体改良剂在排渣作用方面的效果有限, 仅可以使部分粒径较小的砾石悬浮, 无法将大部分卵砾石排出至地表, 因此无法彻底解决卵砾石积聚在孔底被重复破碎的情况。

3.6 引入辅助工法

若卵砾石地层厚度较大或者内部存在大粒径卵石, 通过改进机械设备仍无法施工时, 可引入其他工法进行辅助施工。

引孔施工是较为常见的辅助工法^[47], 引孔的主要工作方法为依靠钻机、旋挖机等机械设备将卵砾石地层挖除以降低施工难度。引孔的孔径可以小于水泥土搅拌桩的桩径。但引孔会引起水泥土搅拌桩机械设备钻进时的稳定性, 增加地层力学参数的离散性, 可采用引孔后回填桩土料的方式提高钻进稳定性^[48]。刘全林等提出了利用搅拌桩设备的单轴钻具进行间隔引孔的方法, 可在一定程度上降低施工难度^[46]。上述方法可以降低钻进难度, 同时可以预先排出钻孔中部分卵砾石至地表, 但也无法完全解决排渣工艺问题, 特别是无法彻底解决卵砾石积聚在孔底被重复破碎的情况。

冲击破碎是辅助水泥土搅拌桩施工的另一可行方法, 对于大粒径卵石、漂石, 可通过孔内冲击破碎等方法, 将大粒径卵石等转化为小粒径砾石, 再进行水泥土搅拌桩施工^[49-50]。何智钢等提出了一种硬土层预破碎三轴水泥搅拌桩钻具。该钻具附带冲击钻, 可对卵砾石地层进行预破碎后, 再进行下一步的钻进、搅拌施工^[37]。冲击破碎同样增加了施工工艺复杂性, 同时引入了新的施工问题, 冲击破碎的主要动力来自于冲击器的向下的冲击力, 在破碎卵石的同时, 在钻进过程中对该位置周边的地层有挤密的作用。对周边地层的挤密在一般的成孔施工中有利于成孔速度, 但在止水帷幕施工中会导致两侧搭接孔的钻进施工更加困难, 甚至无法成孔。

综上,辅助工法会增加水泥土搅拌桩施工工艺的复杂性,降低工效,增加成本。辅助工法不可避免地会引起各施工工艺间的配合问题。因此,辅助工法可作为处理卵砾石地层内漂石的辅助措施,不建议作为提高水泥土搅拌桩卵砾石地层适应性的主要改进方向。

4 施工工艺分析

4.1 施工工艺分类

水泥土搅拌桩施工工艺可大致分为钻进、搅拌、排渣三类。各施工工艺相对独立而又联系紧密,各施工工艺间主要联系如图3所示。排渣工艺的效率提升可有效缓解钻进工艺中岩渣积聚在孔底,产生重复破碎的状况,同时降低了搅拌所需力矩。钻进工艺中的破岩效率的提升可有效提高搅拌混合效率及排渣效率。而搅拌效果是水泥土搅拌桩成桩效果的最终体现形式。

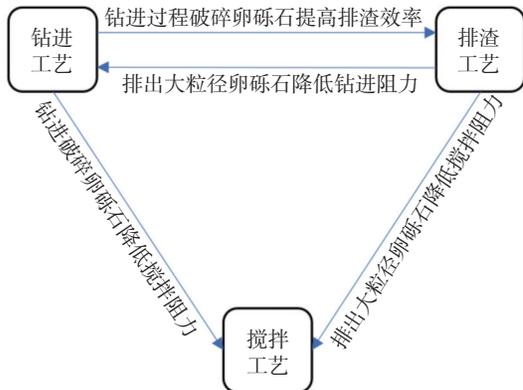


图3 水泥土搅拌桩施工工艺间主要联系

如图4所示,各改进工艺思路主要集中在钻进工艺方面,这是由于卵砾石地层硬度较大,“钻进工作无法完成”是水泥土搅拌桩应用于卵砾石地层所面临的首要问题。除了改进叶片结构形式,其他改进措施对钻进工艺均有一定程度的关联性。

在搅拌工艺方面,主要有改进叶片结构形式及使用土体改良剂两类措施,改进叶片结构形式可以提高搅拌效率,使用土体改良剂可以降低搅拌阻力。

在排渣工艺方面,改进措施较少,只有使用土体改良剂及引入辅助工法两类措施,土体改良剂在排渣作用方面的效果有限,仅可以使部分粒径较小的砾石悬浮,无法将大部分卵砾石排出至地表,因此无法彻底解决卵砾石积聚在孔底被重复破碎的情况。辅助工法中的引孔措施,可以预先排出钻孔中部分卵砾石至地表,但也无法完全解决排渣工艺问题。

4.2 发展方向

根据水泥土搅拌桩技术在卵砾石地层的应用情

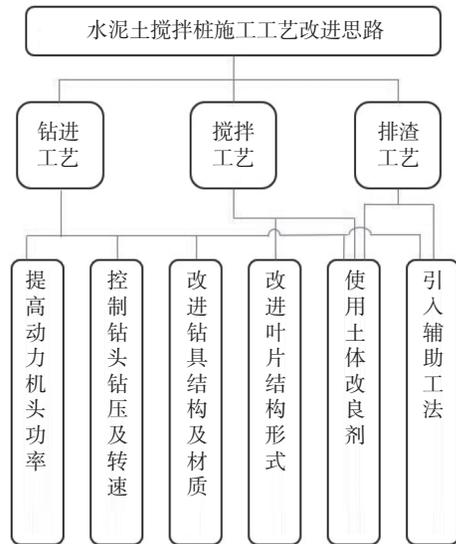


图4 水泥土搅拌桩改进施工措施分类

况,较为可行的发展方向如下所述:

(1)钻具结构的改进。目前学界提出了多种钻具结构的改进方式,但未形成系统性、量化的卵砾石地层特征参数与钻具结构的匹配方法。该方向的工作亟待深化研究。

(2)施工质量的控制。由于钻进硬地层所需的施工机械的扭矩较大,因此更易造成钻孔偏斜等问题,垂直度控制等施工质量的控制问题是未来的一个主要发展方向。

(3)排渣工艺的改进。在实际应用效果上,排渣工艺的作用应当受到进一步重视。将大粒径卵石排出至地表可有效降低钻进及搅拌所需力矩,同时进一步降低埋钻风险。

5 结论

本文系统地归纳、总结了水泥土搅拌桩工法在卵砾石地层的应用情况,并系统分析了各改进工艺的适用性,形成了以下结论:

(1)卵砾石地层压缩性低、抗剪强度大,该地层条件下的水泥土搅拌桩施工存在钻进效率低下、钻具磨损大等问题。目前水泥土搅拌桩应用卵砾石地层的成功案例较少。已成功的案例中,卵砾石的厚度较小(一般厚度不超过5 m),卵石平均粒径不超过150 mm,部分成功案例引入其它工法辅助施工。

(2)针对于卵砾石地层的工程特性,水泥土搅拌桩主要改进工艺可分为钻进、搅拌、排渣共计三大类,上述三类施工工艺相对独立而又联系紧密,可进一步具体细化为提高动力机头功率、控制钻头钻压及转速、提高钻具材料强度、改进钻头及搅拌叶片结构形式、使用土体改良剂、引入辅助工法等措施。

(3)卵砾石地层硬度较大,钻进无法完成是水泥土搅拌桩应用于卵砾石地层所面临的首要问题,因此已成功的实际案例中,改进工艺思路主要集中在钻进工艺方面。但大部分改进方法仍然在螺旋钻进方法的框架内,对卵砾石破碎效果有限,无法根本解决大粒径卵砾石沉于孔底与钻头反复摩擦、崩断截齿等问题。

(4)在排渣工艺方面,改进措施相对较少,只有使用土体改良剂及引入辅助工法两类措施,土体改良剂泥浆仅可以使部分粒径较小的砾石悬浮,引孔措施仅可以预先排出钻孔中部分卵砾石至地表。上述措施无法彻底解决卵砾石积聚在孔底被重复破碎的情况。排渣工艺的作用应当受到进一步重视,将大粒径卵石排出至地表可有效降低钻进及搅拌所需力矩,同时进一步降低埋钻风险。缺少排渣工艺的辅助,钻进工艺的改善效果将显著降低。

(5)虽然卵砾石地层条件下水泥土搅拌桩出现了部分成功案例,但整体上仍然缺乏对卵砾石地层条件下水泥土搅拌桩的钻进及搅拌机理的深入研究。大部分针对卵砾石地层的改进措施未形成系统性、量化的卵砾石地层特征参数与水泥土搅拌桩设备的匹配方法。搅拌桩设备与卵砾石地层相互作用机理研究工作亟待深化。

参 考 文 献

- [1] 王卫东. 超深等厚度水泥土搅拌墙技术与工程应用实例 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.
- [2] BELLATO D. Experimental study on the hydro-mechanical behavior of soils improved using the CSM technology [D]. Padova: University of Padova, 2013.
- [3] DENIES N, HUYBRECHTS N. Deep Mixing Method: Equipment and Field of Applications[J]. Ground Improvement Case Histories, 2015; 311-350.
- [4] 申玉生, 陈先智, 卢治仁, 等. 富水圆砾地层地铁车站超深基坑施工关键技术 [M]. 北京: 中国铁道出版社有限公司, 2019.
- [5] 周济民, 李名淦. 北京地区地铁车站深基坑地下水控制技术 [J]. 地下空间与工程学报, 2014, 10(S2): 2042-2048.
- [6] CHIOU J S, TSAI C C, et al. Analysis of in situ bridge columns with exposed caisson foundations in a gravel stratum under lateral loading[J]. Advances in Structural Engineering, 2019, 23(3): 424-37.
- [7] 苏 艺, 苏 斌, 陶连金. 砂卵石地层盾构施工及列车运行环境振动影响 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2015.
- [8] GUAN C, YANG Y. Field study on the waterstop of the rodin jet pile method in a water-rich sandy gravel stratum[J]. Applied Sciences, 2019, 9(8): 1709-1724.
- [9] 王金龙, 吴 瑜. 一种型钢水泥土搅拌墙在卵石层中的成桩方法: CN111455978A [P]. 2020-07-28.
- [10] ZHANG L, GUO Z, LIANG Z. Tri-axial confining numerical test and settlement analysis of the gravel layer[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2020, 24(3): 2572-2580.
- [11] WEI Y, YANG Y, TAO M. Effects of gravel content and particle size on abrasivity of sandy gravel mixtures[J]. Engineering Geology, 2018, 243: 26-35.
- [12] ZHANG S, GAO F, HE X, et al. Experimental study of particle migration under cyclic loading: effects of load frequency and load magnitude[J]. Acta Geotechnica, 2021, 16(2): 367-380.
- [13] 牟 迪. 成都地铁四号线砂卵石层分布规律及工程特性研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2012.
- [14] 刘永勤, 金 淮, 高 涛, 等. 北京地铁九号线沿线卵石地层特性研究[J]. 铁道建筑技术, 2011, 39(S2): 28-32.
- [15] 江 华. 北京典型砂卵石地层土压平衡盾构适应性研究 [D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2012.
- [16] 王 煜. 成都地区砂卵石层超重型动力触探击数规律[J]. 四川地质学报, 2000, (2): 118-121.
- [17] LARSSON S. State of Practice Report Session 6: Execution, monitoring and quality control[C]. Proceedings of the International Conference on Deep Mixing, 2005.
- [18] 周书东. 水泥土搅拌桩(墙)应用现状[J]. 工业建筑, 2013, 43(S1): 446-449.
- [19] 潘秀明, 雷崇红. 北京地铁砂卵石砾岩地层综合工程技术 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2012.
- [20] 代婷蓉, 潘中艇, 钱纪恩, 等. 圆砾层三轴搅拌机钻头及施工方法: CN111155934A [P]. 2020-05-15.
- [21] 王 飞. 盾构直接掘削大直径钢筋混凝土群桩研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2014.
- [22] 高明忠, 张 茹, 龚秋明. 砂卵石地层条件下盾构掘进机理与实践 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- [23] 钟贵荣. SMW工法桩在卵石层及风化岩地层深大基坑工程中的实践[J]. 福建建设科技, 2016, (5): 9-12.
- [24] 余家兴, 宋德聪, 刘增祥. SMW工法在北京地区深基坑支护中的应用研究[J]. 市政技术, 2009, 27(5): 510-514.
- [25] 沈杰超, 马晓华, 朱怀甫, 等. 超级三轴(SSMW)工法在深厚卵石层中的围护施工应用[J]. 施工技术, 2018, 47(1): 32-35.
- [26] 张晓峰, 楼志群, 金旭勇, 等. 超级三轴水泥土搅拌桩在圆砾层中的施工[C]//2014年建筑科技与管理学术交流论文集, 2014.
- [27] 王养锋. 下穿隧道卵石地层组合式SMW搅拌桩施工技

- 术[J]. 工程建设与设计, 2017, (1): 148-150.
- [28] 马德坤. 牙轮钻头工作力学 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2009.
- [29] 徐至钧. 水泥土搅拌法处理地基 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.
- [30] 王义军. 三轴搅拌桩入岩施工技术[J]. 隧道建设, 2015, 35(5): 478-483.
- [31] TIAN K, GANESH R, DETOURNAY E. Influence of bit design on the stability of a rotary drilling system[J]. *Nonlinear Dynamics*, 2020, 100(1): 51-75.
- [32] 彭振斌, 孙平贺, 曹 函. 复杂地层钻探技术 [M]. 长沙: 中南大学出版社, 2016.
- [33] KITAZUME M, TERASHI M. The Deep Mixing Method [M]. Florida: CRC Press, 2013.
- [34] MOMENI S, MOSELEY S, ANTE M, et al. The wear of WC-Co drill bits during rotary-percussive drilling of reinforced concrete[J]. *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials*, 2017, 62: 202-209.
- [35] ZHANG K, WANG D G, WANG Z Q, et al. Friction and wear behavior of wear-resistant belts in drill joints for deep and ultra-deep wells[J]. *Strength of Materials*, 2013, 1(2): 192-195.
- [36] FENG S J, LU S F. Failure of a retaining structure in a metro station excavation in Nanchang City, China[J]. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 2016, 30(4): 1-12.
- [37] 何智钢, 李 嘉, 刘 洋, 等. 硬土层预破碎三轴水泥搅拌桩钻具: CN205894066U [P]. 2017-01-18.
- [38] 莫 凡, 黄 贵, 高宗立, 等. 一种适用于复杂地质情况下的三轴搅拌机钻头: CN205858186U [P]. 2017-01-04.
- [39] 李小青, 马晓华, 占 宏, 等. 一种超级三轴水泥搅拌桩设备: CN104420462A [P]. 2015-03-18.
- [40] 曾令新, 贾祥怀, 廖亚国, 等. 一种适用于穿透圆砾层土质的三轴搅拌机钻头: CN103437712B [P]. 2015-11-25.
- [41] 马晓华, 朱怀甫, 郭 峰, 等. 一种卵石地层超级三轴搅拌桩及其搅拌方法: CN106089084A [P]. 2016-11-09.
- [42] ZHEN Z, GE X, ZHANG J. Soil conditioning tests on sandy and cobbly soil for shield tunneling[J]. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2021, 25(4): 1229-1238.
- [43] PEILA D, MARTINELLI D, TODARO C, et al. Soil conditioning in EPB shield tunnelling – An overview of laboratory tests[J]. *Geomechanics and Tunnelling*, 2019, 12(5): 491-498.
- [44] 刘国彬, 王卫东. 基坑工程手册 (第2版) [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
- [45] 龚晓南. 深基坑工程设计施工手册 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999.
- [46] 刘全林, 宋伟民, 张 涵, 等. 超硬土层三轴水泥土搅拌桩施工方法: CN102979095A [P]. 2013-03-20.
- [47] YU D G. Self-centering positioner and principle for locating and guiding deep-hole drills using oil films[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, 92(6): 639-649.
- [48] 张生雨, 白汉民, 王冬生, 等. 基于卵石的换土搅拌止水帷幕施工方法: CN105735332A [P]. 2016-07-06.
- [49] LI Y, PENG J, LI K, et al. An abrasive water jet assisted back reaming technique based on percussion drilling for reducing non-production time in geothermal energy development[J]. *Geothermics*, 2020, 89: 101967.
- [50] SLIWA T, SAPIŃSKA-LIWA A, KORZEC M, et al. Investigation of old exploration boreholes in the Lublin Basin with regard to potential rotary-percussion drilling of shale gas wells[J]. *Energies*, 2021, 14(10): 2734.

收稿日期: 2021-09-06