

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20231024003

## 接杆粉喷桩施工工艺及参数对成桩质量影响研究\*

施金涛<sup>1</sup>, 江舜根<sup>2</sup>, 王建业<sup>3</sup>, 章定文<sup>1</sup>, 刘 华<sup>2</sup>, 于志龙<sup>2</sup>, 杨松松<sup>1</sup>

(1. 东南大学交通学院, 江苏 南京 211189; 2. 连宿高速公路项目建设管理办公室, 江苏 连云港 222002;  
3. 中铁六局集团有限公司, 江苏 连云港 222299)

**摘要:** 为了分析接杆粉喷桩施工工艺与施工参数对成桩质量的影响, 选取连宿高速公路典型软土地段, 采用现场试桩方法, 选取不同施工参数和施工工艺的接杆搅拌桩进行地基处理, 成桩后进行标准贯入试验、取芯率试验和28 d无侧限抗压强度试验来评价成桩质量, 以此确定最佳施工工艺和施工参数。试验结果表明, 采用自上而下施工工艺, 叶片转速60 r/min, 钻杆下钻和提升速度1.0 m/min, 水泥掺量80 kg/m是一套适用于连云港海相淤泥质土的施工参数。在实际工程中, 应结合工程地质条件与水泥土每遍搅拌次数的公式将各施工参数进行组合与匹配, 并选取合适的施工工艺, 使得加固范围内任一点的土体搅拌次数达到25次来达到较好的成桩质量和地基处理效果。常规水泥土搅拌桩由于少了接拆杆等复杂的工序, 所以成桩质量比接杆搅拌桩更好, 但是接杆搅拌桩的成桩质量也能符合规范要求。因此在一些净空受限的施工条件下, 采用接杆搅拌桩能够代替常规搅拌桩进行地基处理, 强度符合规范要求, 同样起到很好的工程应用效果。

**关键词:** 接杆式搅拌桩; 施工工艺; 施工参数; 成桩质量

**中图分类号:** TU473 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2025)02-0436-10

## Research on the Influence of Construction Technology and Parameters of Rod-Extended Deep Mixing Piles on Pile Formation Quality

SHI Jintao<sup>1</sup>, JIANG Shungen<sup>2</sup>, WANG Jianye<sup>1\*</sup>, ZHANG Dingwen<sup>3</sup>, LIU Hua<sup>2</sup>,  
Yu Zhilong<sup>2</sup>, YANG Songsong<sup>1</sup>

(1. School of Transportation, Southeast University, Nanjing 211189, China;  
2. Construction Management Office of Liansu Expressway Project, Lianyungang 222002, China;  
3. China Railway Sixth Engineering Group Co., Ltd., Lianyungang 222299, China)

**Abstract:** To investigate the influence of construction technology and parameters of rod-extended deep mixing piles on the pile formation quality, a typical soft soil site along the Liansu Expressway was selected for field trial piling. Ground improvement was conducted using rod-extended deep mixing piles with varying construction parameters and methods. Following pile formation, standard penetration tests (SPT), core recovery tests, and 28-day unconfined compressive strength (UCS) tests were conducted to evaluate pile quality and identify the optimal construction method and parameters. The test results showed that a top-down construction method, with a blade rotation speed of 60r/min, drilling and lifting speed of 1.0m/min, and a cement content of 80kg/m, was well-suited for marine silty soil

\* 收稿日期: 2023-10-24; 修回日期: 2024-01-17

基金项目: 江苏省研究生科研与实践创新计划项目(KYCX22\_0268)资助

作者简介: 施金涛(1999—), 男, 硕士研究生。主要研究方向为接杆搅拌桩。E-mail: 1181983765@qq.com

通信作者: 章定文(1978—), 男, 教授, 博导, 博士。主要从事地基处理方面的研究。E-mail: zhang@seu.edu.cn

in Lianyungang. In practical engineering applications, construction parameters should be combined and matched based on site-specific geological conditions and the empirical formula for the number of mixing passes per soil layer. Ensuring that the soil at any point within the reinforcement zone is mixed at least 25 times contributes to achieving better pile formation quality and ground improvement effects. Although conventional deep mixing piles typically demonstrate higher pile quality due to the absence of complex processes such as rod coupling and decoupling, rod-extended deep mixing piles still meet the required technical specifications. Therefore, under construction conditions with height limitations, rod-extended deep mixing piles can serve as effective substitutes to conventional piles, meeting strength requirements and achieving satisfactory engineering performance.

**Keywords:** rod-extended deep mixing pile; construction technology; construction parameters; pile formation quality

## 0 引言

搅拌桩施工过程中经常面临净空高度受限的工况,如高压线下、桥涵下、既有铁路旁等施工高度受限区域。传统搅拌桩施工技术无法满足低净空工况下的施工要求,因此研发经济高效的低净空软基处理技术是工程建设的迫切需求。

接杆搅拌桩是一种特殊的搅拌桩类型,基本原理是在钻进过程中,通过桩机拼接钻杆的办法满足设计桩深要求;提升过程中,通过拆卸钻杆的方法回收钻杆,以此降低整个桩机设备高度,从而完成限高要求下的地基处理施工。

针对净空受到限制的条件,许多学者和工程师采用了接杆式搅拌桩的方法,并对接拆杆处接头结构优化来提升工效。针对净空受到限制的搅拌桩施工问题,富志根等<sup>[1]</sup>对接杆搅拌桩施工全过程的各环节进行了工效分析,并提出了改进措施,结果表明接杆搅拌桩适用于铁路低净空条件下的临近既有线施工,适用范围广;通过优化工艺工法、减少接杆数量及完善拆、接和对中措施,可以提升接杆搅拌桩的施工工效,获得较高的经济效益。杨普锋等<sup>[2]</sup>采用了深孔大直径水泥土搅拌桩进行地基加固,实施接杆式水泥搅拌桩,通过改装常规搅拌桩机、分次接拆钻杆和接拆杆处设置搭接补强段等措施,有效保证了接杆搅拌桩成桩质量。黄荔等<sup>[3]</sup>结合工程实例探究了深层搅拌桩的接杆法施工工艺和施工要点,阐述深层搅拌桩在施工净高受限制时,采用接杆法施工工艺与常规搅拌桩质量基本无差异,且具有一定的经济效益和改装价值。

接杆式粉喷桩相比于高压旋喷桩,可大幅降低造价,对周围环境的扰动小,且粉体固化剂可以吸收软土地基中的水分,适合高含水率软土加固<sup>[4]</sup>。但接杆式粉喷桩由于自身多节拆接杆的工艺特点,使得工效较常规搅拌桩有所降低,且拆接杆可能会影响搅拌桩的成桩质量。所以接杆式粉喷桩的大规模推广应用,需要对接杆搅拌桩的成桩质量施工工艺和影响参数开展研究。

综上所述,目前缺乏对施工工艺及参数对接杆搅拌桩成桩质量影响的研究。为此,本研究详细介绍了接杆搅拌桩现场试桩试验和检桩结果,分析了施工工艺流程及参数(叶片转速、钻杆下钻和提升速度、水泥掺量等)对接杆搅拌桩的标贯击数、无侧限抗压强度 $q_u$ 、取芯率等的影响规律,通过对施工参数和工艺进行组合和优化来提高成桩质量,并对比分析了接杆式搅拌桩和常规搅拌桩的经济性和技术性。

## 1 试验场地工程地质条件与试验方案

### 1.1 场地地质条件

试验场地位于连宿高速公路徐圩至灌云段项目区域,试验段浅部分布素填土、黏土;中部分布较厚的淤泥层,深部分布粉质黏土夹粉土。该场地的软土层厚度较大,工程性质差,所以应该采用处理后的地基作为路基、涵洞等小型构筑物持力层,择优选择搅拌桩的处理方式。

根据岩土工程勘察,得到场地地表下25 m范围内的土层分布。沿深度方向自上而下典型土层的物理力学参数见表1。

表1 土层物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of soil layers

层号	土层名称	土层厚度 $h/m$	孔隙比 $e$	含水率 $w/\%$	重度 $\gamma/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	塑性指数 $I_p$	液性指数 $I_L$	直接快剪		压缩试验	
								$C_k/kPa$	$\varphi_k/(\text{°})$	压缩系数 $\alpha_{1-2}/(\text{MPa}^{-1})$	压缩模量 $E_s/\text{MPa}$
1-1	素填土	0.9	0.81	28.6	18.7	17.2	0.38	10.7	11.4	0.29	4.97
2-1	黏土	1.2	1.08	27.8	19.18	20.0	0.24	44.2	13.1	0.22	8.49
2-2	淤泥	9.6	1.82	37.1	18.02	24.1	0.51	24.5	7.2	0.48	4.41
3-1	粉质黏土夹粉土	14.6	0.77	27.3	19.15	14.7	0.48	34.5	13.0	0.29	6.21

## 1.2 试验方案

针对净空受限工况,提出适用于低净空条件下的接杆粉喷桩软基处理技术。如图1所示,试验段高压线净高19.1 m,接杆搅拌桩桩机设备高度为3.5 m,满足净高施工要求。采用自上而下分节钻杆喷粉搅拌和自下而上分节钻杆喷粉搅拌两种施工工艺,对比分析两种施工工艺的成桩质量优劣,并总结各自适用条件。



图1 现场试桩试验  
Fig.1 Field piling test

自上而下施工工艺步骤为:(1)桩机定位;(2)打开送粉泵,钻进第一节钻杆,喷粉搅拌再提升复搅;(3)接入第二节钻杆;(4)钻进第二节钻杆,喷粉搅拌再提升复搅……;(5)完成最后一节钻杆粉喷搅拌施工;(6)关闭送粉泵,进行提升搅拌,分别拆除各节钻杆,直至最后一节钻杆提出地面,完成单桩施工。如图2所示,每一段搅拌桩都经过了4次搅拌,即一喷四搅。

自下而上施工工艺步骤为:(1)桩机定位;(2)将第一节钻杆打入地层;(3)将第二节钻杆打入地层……;(4)直至将最后一节钻杆打入地层;(5)开启送粉泵,在最后一节钻杆深度范围内喷粉搅拌并提升复搅;(6)在最后一节钻杆深度范围内完成粉喷搅拌后关闭送粉泵;(7)开启送粉泵,在倒

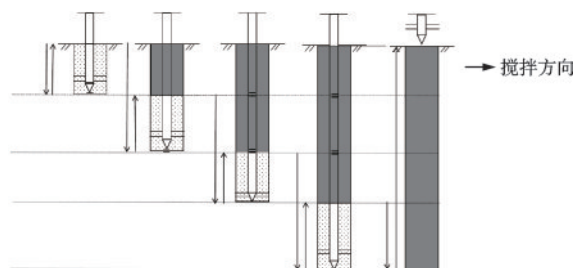


图2 自上而下施工工艺(一喷四搅)

Fig.2 Top-down construction method (one injection and four mixings)

数第二节钻杆深度范围内喷粉搅拌并提升复搅……;(8)直至完成第一节钻杆深度范围内的喷粉搅拌,完成单桩施工。如图3所示,每一段搅拌桩都经过了3次搅拌,即一喷三搅。

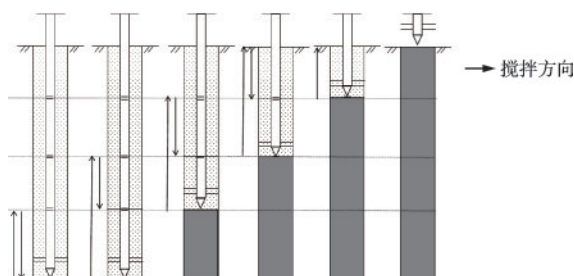


图3 自下而上施工工艺(一喷三搅)

Fig.3 Bottom-up construction method (one injection and four mixings)

《建筑地基处理技术规范》<sup>[5]</sup>指出,当加固范围内土体任一点的水泥土经过20次的拌合,其强度即可达到较高值。每遍搅拌次数  $N$  由公式(1)计算。

$$N = \frac{h \cos \beta \sum Z n}{V} \quad (1)$$

式中, $h$ 为搅拌叶片的宽度(m); $\beta$ 为搅拌叶片与搅拌轴的垂直夹角( $^{\circ}$ ); $\sum Z$ 为搅拌叶片的总枚数; $n$ 为搅拌头的回转数(rev/min); $V$ 为搅拌头的提升速度(m/min)。

在现场试验中改变接杆粉喷桩的施工参数,包括叶片转速、钻杆的下钻和提升速率、水泥掺入量等,经过现场设备数据调研, $h=0.2\text{ m}$ , $\beta=60^\circ$ , $\sum Z=4$ ,根据式(1)计算不同工况的土体搅拌次数,参数选取见表2。施工成桩28 d后对搅拌桩桩身取芯和标准贯入试验,根据芯样的无侧限抗压强度、取芯率、标贯击数等评价成桩质量,分析成桩质量和施工参数的内在关联,总结不同地质条件下推荐选用施工参数的方法。

表2 试验施工参数选取表

Table 2 Selection of test construction parameters

叶片转速/ ( $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ )	钻杆下钻和 提升速度/ ( $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$ )	水泥掺量/ ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}$ )	搅拌次数
30、40、50、 60、70	0.8	80	15、20、25、 30、35
60	0.6、0.8、1.0、 1.2、1.4	80	17、20、24、 30、40
70	1.0	70、75、80、 85、90	28

搅拌桩桩身芯样及其强度指标的获取方法如下:检测孔位布置在水泥搅拌桩桩头,并偏离中心100 mm,用岩芯管连续取芯。在不同深度处(0~2 m, 2~3.5 m, 3.5~5 m, 5~6.5 m, 6.5~8 m, 8~9.5 m, 9.5~11 m, 11~12.5 m)进行标准贯入试验并获得标贯击数,并根据搅拌桩芯样长度计算取芯率(芯样长度与取芯进尺长度的比值),用于判断桩身强度及桩体连续性<sup>[6]</sup>。选取典型芯样,进行室内无侧限抗压强度试验。

将接杆搅拌桩与常规搅拌桩的成桩质量进行对比,结合两种搅拌桩的施工原理、成桩质量,分析接杆搅拌桩和常规搅拌桩的优缺点。依据《建筑地基处理技术规范》<sup>[5]</sup>,单桩承载力与芯样无侧限抗压强度平均值、桩身强度折减系数 $\eta$ 、桩体截面积成正比,试验结果计算中, $\eta$ 取常数,常规搅拌桩和接杆搅拌桩桩径均为0.5 m,即桩体截面积相同,由此可计算搅拌桩单桩的承载力。

## 2 施工工艺对成桩质量的影响

接杆搅拌桩有自上而下和自下而上两种施工工艺。自上而下施工工艺为一次喷粉,四次搅拌;自下而上施工工艺为一次喷粉,三次搅拌。自上而

下比自下而上施工工艺多了一个送气、旋转、提升复搅的过程,因此施工时长更长,但搅拌更加均匀。现场施工桩长为12 m,每节钻杆长度为3 m,需4节钻杆拼接施工。当桩长较长时,在满足限高条件适当增加每节钻杆长度,可减少拼接钻杆次数,提高施工效率和成桩质量<sup>[7]</sup>。

自上而下和自下而上工艺因施工工序存在差异,导致对成桩质量有明显的影响<sup>[8]</sup>。图4为两种工艺对应不同深度处取芯率的分布曲线。由图4可见,采取自上而下施工工艺的芯样更加完整,取芯率平均为58.1%;采取自下而上的施工工艺,芯样长度平均为54.3%。因此就取芯率这一指标,采取自上而下的施工工艺的成桩质量更好。

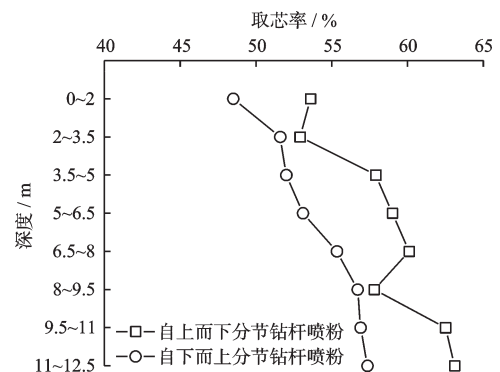


图4 两种施工工艺对取芯率的影响

Fig.4 Effect of two construction techniques on core recovery rate

图5为叶片转速60 r/min,钻杆下钻和提升速度1.0 m/min,水泥掺量80 kg/m时两种不同工艺桩身的标贯击数实测结果。由图5可知,采用自上而下的施工工艺时标贯击数更高。经计算,自上而下工艺的水泥土搅拌桩的标贯击数要比自下而上的高28.95%。因此就标贯击数这一指标,自上而下的施工工艺对应的成桩质量要比自下而上的更好<sup>[9]</sup>。

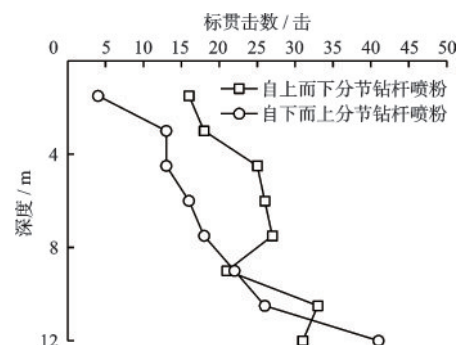


图5 两种施工工艺对标贯击数的影响

Fig.5 Effect of two construction techniques on standard penetration test N-Value



图6中采取自上而下工艺对应的无侧限抗压强度 $q_u$ 最大值可以达到2.76 MPa。经计算,其它条件不变的情况下,采取自上而下施工工艺的水泥土搅拌桩芯样要比自下而上的芯样 $q_u$ 同比增长37.05%。自上而下施工工艺在土层交界处下钻速度比自下而上慢,保证了垂直度,桩体连续均匀,地基处理效果好。上述指标均表明了自上而下施工工艺更适合现场条件<sup>[10]</sup>。

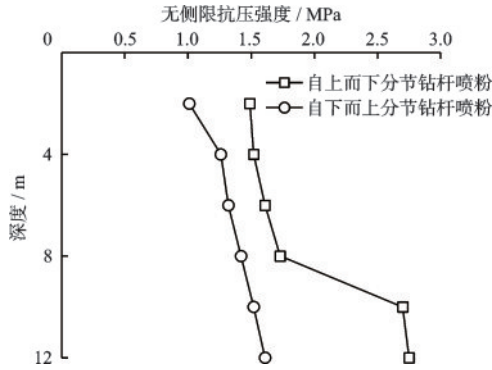


图6 两种施工工艺对无侧限抗压强度的影响

Fig.6 Effect of two construction techniques on unconfined compressive strength

### 3 施工参数对成桩质量的影响

#### 3.1 叶片转速对成桩质量的影响

根据式(1),叶片转速快的搅拌桩每遍搅拌次数多,强度更高。但叶片转速过高会导致土体在叶片上形成泥团,影响施工效率。因此通过现场试桩分析了叶片转速在30、40、50、60、70 r/min工况下的成桩质量差异(标贯击数、 $q_u$ 、取芯率)。

图7为不同叶片转速下桩身芯样标贯击数随深度变化。由图7可知,当叶片转速增加时,标贯击数也增大,这与理论分析结果吻合<sup>[11]</sup>。当叶片转速达到60 r/min后,桩体强度的增长幅度减小。因此叶片转速存在最优值60 r/min,在该转速下施工效率最高且成桩质量较好。叶片转速从30 r/min增加到40 r/min、从40 r/min增加到50 r/min、从50 r/min增加到60 r/min时,标贯击数分别增长了14.93%、15.82%、10.24%,但是叶片转速从60 r/min增加到70 r/min时,标贯击数变化不大<sup>[12]</sup>。

图8为不同叶片转速下 $q_u$ 随深度变化关系。由图8可知,叶片转速的增大使 $q_u$ 也增大,在各个深度均有明显的体现,但是现场叶片转速需结合钻机额

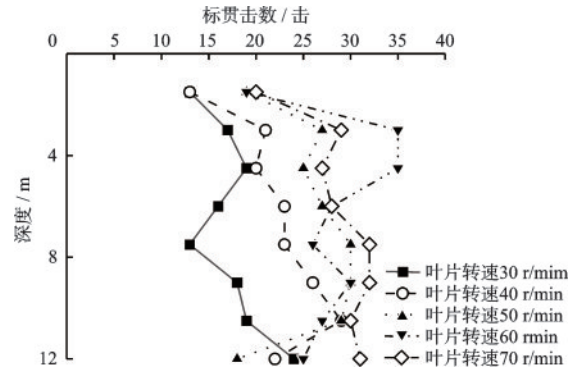


图7 不同叶片转速下标贯击数随深度变化关系

Fig.7 Variation of standard penetration test N-value with depth under different blade rotation speeds

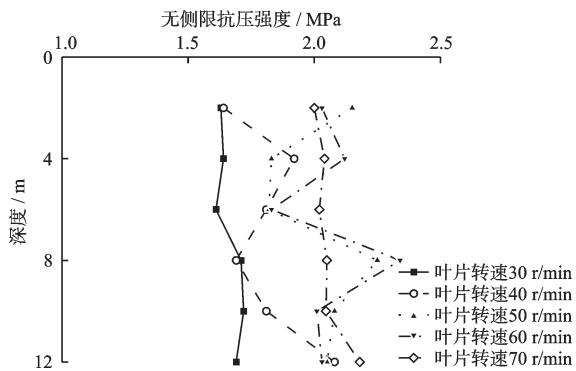


图8 不同叶片转速下无侧限抗压强度随深度变化关系

Fig.8 Variation of unconfined compressive strength with depth under different blade rotation speeds

定值与地质条件选择,并且在达到60 r/min后叶片转速对 $q_u$ 提升效果不明显,叶片转速从30 r/min增加到40 r/min、从40 r/min增加到50 r/min、从50 r/min增加到60 r/min时, $q_u$ 分别增长了7.57%、8.39%、6.93%,但是叶片转速从60 r/min增加到70 r/min时 $q_u$ 出现了小幅度的下降,此时需要对其它参数进行对应的改变,将施工参数重新组合来提高成桩质量。取芯率计算结果与标准贯入试验和无侧限抗压强度试验规律一致,也验证了现场叶片转速存在最优值60 r/min<sup>[13]</sup>。

将各组工况按照式(1)计算每遍搅拌次数,作出搅拌次数与 $q_u$ 关系曲线如图9所示,其中 $q_u$ 取该工况对应的所有芯样无侧限抗压强度的平均值。由图可知当搅拌次数达到24、25次时 $q_u$ 达到较高的值,对应工况的施工参数为: $n=60$  rev/min,  $V=1.0$  m/min,  $N=h\cos\beta \sum Zn/V=0.2 \times \cos 60^\circ \times 4 \times 60/1.0=24$ 次。

根据式(1)和现场试验可知,叶片转速快的搅拌桩桩体强度更高。这是因为,增大叶片转速时,

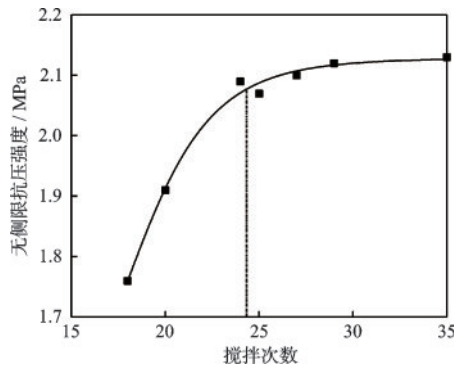


图9 搅拌次数  $N$  与无侧限抗压强度关系

Fig.9 Relationship between number of mixing passes ( $N$ ) and unconfined compressive strength

水泥与土混合物被搅拌得更加充分和均匀,水泥土结构离散性小,强度高。搅拌轴转速小时,容易在拟加固土中形成螺旋状切割,搅拌不均匀,影响桩身水泥土强度<sup>[14]</sup>。

当场地地质条件变化,搅拌桩穿越细砂、粉砂层等土体,或者当土体粘性较大、含水率较低时,叶片转速应适当减小,否则土体容易在搅拌头上固结,使叶片切土效果大幅下降,影响搅拌效果<sup>[15]</sup>。此时为了达到合理的搅拌次数,钻杆下钻和提升速度也应适当减小,保证地基处理效果。

综合以上对施工原理、计算公式以及现场成桩质量的检验结果分析,叶片转速控制在 60 r/min 为最佳施工参数,可以达到较好的地基处理效果。

### 3.2 钻杆下钻和提升速度对成桩质量的影响

通过试桩试验可以发现,改变钻杆下钻和提升速度,会影响成桩质量。具体表现为:钻杆下钻和提升速度  $V$  值从 1.4 m/min 下降到 0.6 m/min 对应的成桩质量(标贯击数、取芯率、 $q_u$ )提升。结合公式  $N = h \cos \beta \sum Zn / V$ ,  $V$  值减小能提升  $N$  值。

当  $V$  值减小到一定程度时,不仅成桩用时增加、施工效率降低,且桩体强度增长不明显。图 10 为不同  $V$  值下标贯击数随深度的变化曲线。由图 10 知,虽然  $V$  值与成桩质量负相关,但是当  $V$  值下降到 1.0 m/min 后再降低时标贯击数增长已经不明显,施工效率下降。 $V$  值从 1.4 m/min 下降到 1.2 m/min 和从 1.2 m/min 下降到 1.0 m/min,标贯击数分别增长了 27.23% 和 26.03%,再减小  $V$  值对标贯击数影响不大。而且  $V$  值越小,成桩用时越长,综合工程实际, $V$  值为 1.0 m/min 为最匹配现场的工况<sup>[16]</sup>。

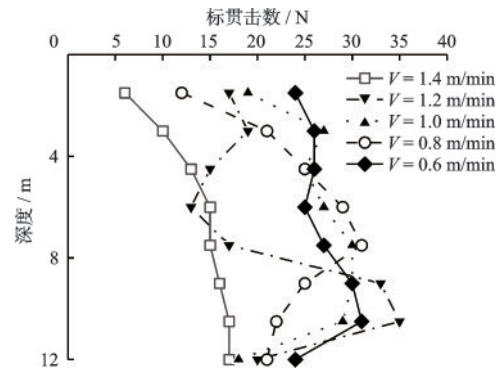


图10 不同  $V$  值下标贯击数随深度变化关系

Fig.10 Variation of standard penetration test  $N$ -value with depth under different  $V$  values

图 11 为  $V$  值与无侧限抗压强度的关系曲线。不同深度芯样的  $q_u$  随  $V$  值减小而增大, $V$  值从 1.4 m/min 下降到 1.2 m/min 和从 1.2 m/min 下降到 1.0 m/min 时  $q_u$  分别增长了 18.13% 和 27.21%,而  $V$  值从 1.0 m/min 下降到 0.8 m/min 时  $q_u$  变化不大甚至略微变小,这可能与预计水泥粉提前消耗完,桩身不均匀有关<sup>[17]</sup>。且  $V$  值过小会延长工期,施工效率低。取芯率计算结果与标准贯入试验和无侧限抗压强度试验规律一致,也验证了现场  $V$  值存在最优值 1.0 m/min。

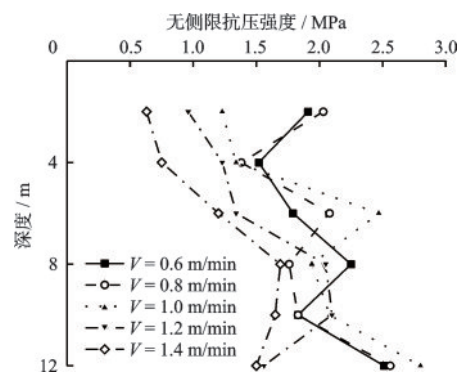


图11 不同  $V$  值下无侧限抗压强度随深度变化关系

Fig.11 Variation of unconfined compressive strength with depth under different  $V$  values

如果  $V$  值偏大,虽可减少每根桩的施工时间,但也存在以下问题:(1)快速下钻时遇到硬块或者障碍物,会导致设备损坏;(2)水泥土搅拌不均匀,在桩身某些部位不能固结成块,甚至某段出现空心桩的情况,影响地基加固效果;(3)当粉喷桩桩长大于 10 m 时,比如本工程中桩长为 12 m,底部喷粉阻力较大, $V$  值过大不能确保固化剂的设计喷入量;(4)  $V$  值的增大会导致  $N$  变小,即搅拌次数降低,影

响成桩质量。(5)较大的V值会导致搅拌叶片旋转速率与之不匹配,在水泥土中形成螺旋状切割,搅拌不均匀。(6)在穿越软硬交界的土层时,V值过大会导致垂直度不能得到保证,成桩不稳定。

如果V值偏小,虽然水泥搅拌会更加均匀,固化效果更好,但是也有以下3个问题:(1)施工用时增加,施工效率下降;(2)在复搅提升时预计的水泥掺量不够用,影响水泥的使用效率;(3)成桩用时偏长,影响相邻桩搭接施工。综上可知,V值需要精准地和其它施工参数(叶片转速、水泥掺量)进行组合分析,一味追求施工速度来提高生产率,则各参数之间难以匹配,影响成桩质量。

当场地条件变化,搅拌桩穿越含水率低、黏性大的土层,或者中等密实的粘性土、黄土、含有较多碎石砾石的土体、较硬土层时,V值需要适当减小,以免损坏设备,出现糊钻、空心等现象,降低施工效率。此时叶片转速也应适当降低,与V值匹配,达到较好地基处理效果的同时,节约成本。

综合以上对施工原理、计算公式以及现场成桩质量的检验结果分析,V值控制在1.0 m/min为最佳施工参数,可以达到较好的地基处理效果。

### 3.3 水泥掺量对成桩质量的影响

通过成桩试验可以发现,改变水泥掺量,会影响成桩质量。其它条件不变时,水泥掺量从70 kg/m增加到90 kg/m时对应的成桩质量(标贯击数、取芯率、 $q_u$ )逐渐提升<sup>[18]</sup>。

当水泥掺量达到一定程度时再增加水泥用量,桩体强度的增长不明显。图12为不同水泥掺量下标贯击数随深度变化曲线。由图12可知,虽然水泥掺量与成桩质量在一定范围呈正相关,但当达到80 kg/m后,继续增加水泥用量,标贯击数增长不明显。当水泥掺量从70 kg/m增加到90 kg/m时标贯平均击数分别为19.875、21、23.625、23.125、23.875击。

图13为水泥掺量与无侧限抗压强度的关系曲线。水泥用量达到80 kg/m以后,搅拌已经趋于饱和、强度逐步稳定。水泥掺量从70 kg/m变化到90 kg/m时, $q_u$ 值平均为1.90、2.05、2.22、2.26、2.29 MPa。水泥作为固化剂,在一定范围内增加用量,水泥结构产生的胶凝物和晶体成分随之增多,固化效果更好,水泥搅拌桩的强度和韧性提高。但水泥掺量过大也会导致施工难度增加、桩体开裂等

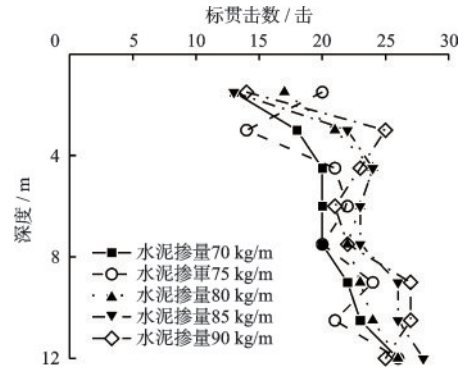


图12 不同水泥掺量下标贯击数随深度变化

Fig.12 Variation of standard penetration test N-value with depth under different cement contents

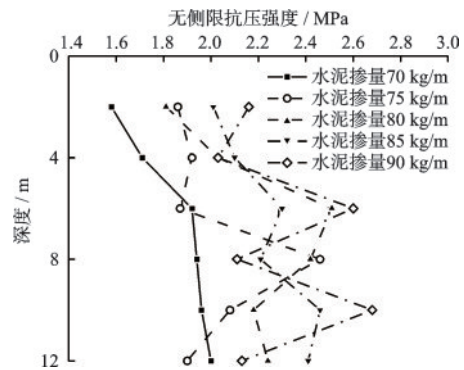


图13 水泥掺量与无侧限抗压强度的关系

Fig.13 Relationship between cement content and unconfined compressive strength

问题,进而影响搅拌桩的成桩质量。取芯率计算结果与标准贯入试验和无侧限抗压强度试验规律一致,也验证了现场水泥掺量存在最优值80 kg/m。

叶片旋转数计算式如下:

$$N_{br} = N_{mb} \left( \frac{R_p \alpha_{cvi}}{V_p \alpha_{cv}} + \frac{R_w}{V_w} \right) \quad (2)$$

式中, $N_{br}$ 为搅拌次数; $N_{mb}$ 为搅拌叶片总数; $V_p$ 为下钻速率(m/min); $V_w$ 为提升速率(m/min); $R_p$ 为下钻时叶片转速; $R_w$ 为提升时叶片转速; $\alpha_{cvi}$ 为下钻时水泥掺入速率( $\text{kg}/\text{m}^3$ ); $\alpha_{cv}$ 为水泥掺入总量( $\text{kg}/\text{m}^3$ )。从公式(2)可知,为提高成桩质量,需要将叶片转速、V值、水泥掺量进行组合。结合地质条件,保证 $N_{br}$ 的值达到20次,但也不宜过多,否则会导致效率的低下和资源的浪费。若只改变其中的一个参量,虽可达到更高的搅拌次数,但成桩质量的提升远不及将几个施工参数同时进行适当调整达到的效果好,而且只大幅度地调整一个参数可能会损坏机器<sup>[19]</sup>。经计算,以60 r/min的叶片转速,1.0 m/min的V值、80 kg/m的水泥掺量计算得到的N为24



次,符合规范要求的20次。

综合以上对公式(2)和试桩结果的分析,80 kg/m的水泥掺量是最优工况。在工程计算设计中将水泥土每点搅拌次数达到25次以达到较好的地基处理效果。

#### 4 接杆搅拌桩与常规搅拌桩成桩质量对比分析

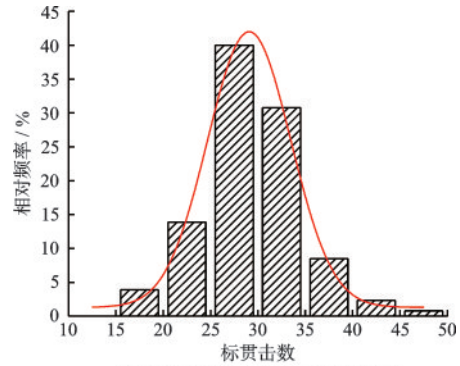
如表3所示,在处理软土地层时,接杆搅拌桩在经济上比高压旋喷桩有优势,但由于需要频繁拆接钻杆,工序较多,其成桩质量和经济优势略低于常规双向搅拌桩。所以,在满足限高要求条件下,若要大规模推广应用接杆搅拌桩,需进一步提高其成桩质量。

表3 经济技术优势对比

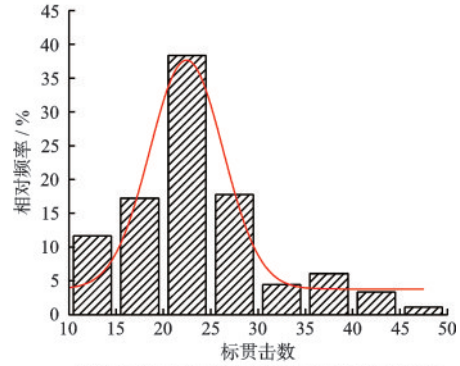
Table 3 Comparison of economic and technical advantages

方案	工效/(m·台班 <sup>-1</sup> )	单价/(元·m <sup>-1</sup> )
常规双向搅拌桩	100~130	40~50
接杆搅拌桩	65~85	65~80
高压旋喷桩	40~50	110~180

选取常规双向搅拌桩进行试桩,其中施工参数与第4节接杆搅拌桩对应相同。对130个标贯击数N的数据进行整理,如图14(a)所示。大部分深度处的常规水泥土搅拌桩的标贯击数N分布在25~30击,占比达到了40%,且均值的95%置信区间为(27.9,29.6),以此样本估计全线所有常规搅拌桩标贯均值在此范围内分布;将所有接杆搅拌桩的标贯击数N分布图作于图14(b),大部分接杆搅拌桩的标贯击数N分布在20~25击,占比为38.33%,且均值的95%置信区间为(20.7,23.6),以此样本估计全线所有接杆搅拌桩标贯击数在此范围内分布。计算均值可得,常规搅拌桩标贯击数27.8击,接杆搅拌桩标贯击数23.2击。因此,就标贯击数这一指标,接杆式水泥土搅拌桩的强度虽略低于常规搅拌桩,但符合规范要求。对比两者频率分布正态曲线,常规搅拌桩方差 $\sigma^2=24.86$ ,而接杆搅拌桩方差 $\sigma^2=91.65$ ,这表明变化接杆搅拌桩施工工艺和参数对成桩质量影响很大,造成频率分布波动。所以需要结合3、4节的内容在试桩后确定适合的施工工艺和参数,减少数据波动的同时,提高成桩质量。经计算,采用3、4节中 $n=60$  rev/min,  $V=1.0$  m/min,



(a) 常规搅拌桩标贯击数N频率分布



(b) 接杆式水泥土搅拌桩标贯击数N频率分布

图14 两种搅拌桩标贯击数N频率分布

Fig.14 Frequency distribution of standard penetration test N-value for two types of deep mixing piles

水泥掺量80 kg/m,自上而下施工工艺的试桩,其平均标贯击数为27.9,达到常规搅拌桩的成桩质量水准<sup>[20]</sup>。

为了使结果更可靠,将常规搅拌桩的 $q_u$ 的频率分布整理如图15(a)所示。常规水泥土搅拌桩大部分芯样的 $q_u$ 分布在2~2.5 MPa,占比达到了37%,并且95%置信区间为(2.39,2.92),以此样本估计全线所有常规搅拌桩 $q_u$ 均值在此范围内分布,满足规范设计大于等于0.5 MPa的要求。将接杆式水泥土搅拌桩的 $q_u$ 频率分布绘制图15(b)。由图可知,大部分芯样的 $q_u$ 分布在1.5~2 MPa,占比达到50%,并且95%置信区间为(1.70,2.06),以此样本估计全线所有常规搅拌桩 $q_u$ 均值在此范围内分布,大于等于规范要求的0.5 MPa。常规搅拌桩 $q_u$ 均值为2.60 MPa,接杆搅拌桩 $q_u$ 均值为1.99 MPa。所以需要结合2、3节的内容在试桩后确定适合的施工工艺和参数,减少数据波动的同时,提高成桩质量。经计算,采用2、3节中 $n=60$  rev/min,  $V=1.0$  m/min,水泥掺量80 kg/m,自上而下施工工艺的试桩,其平均 $q_u$ 为2.26 MPa,在所有试桩的接杆搅拌桩中处于高水平。



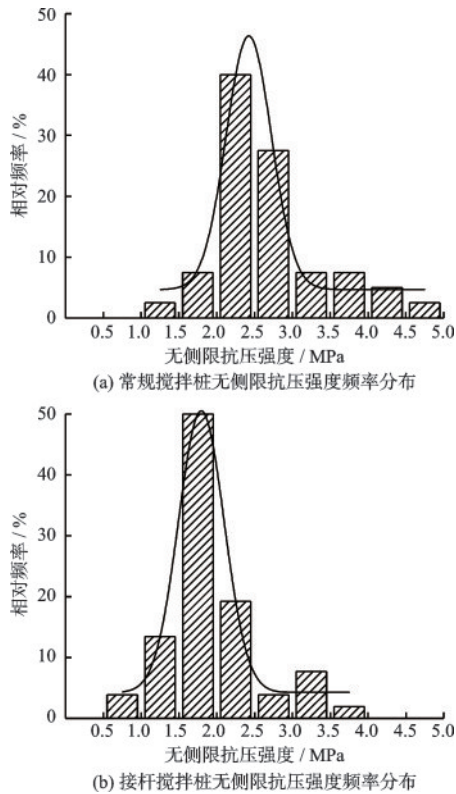


图15 两种搅拌桩无侧限抗压强度频率分布

Fig.15 Frequency distribution of unconfined compressive strength for two types of deep mixing piles

综上,所有试桩的接杆搅拌桩的强度都达到标准,即江苏省地方标准《公路工程水泥搅拌桩成桩质量检测规程》<sup>[6]</sup>,并且采用匹配的最佳施工工艺和参数可以达到较好的成桩质量。因此在一些净空受限的施工条件下能够代替常规搅拌桩,同样起到很好的工程应用效果。

## 5 结论

针对低净空条件下接杆搅拌桩处理后地基承载力,通过现场试验分析了施工工艺和施工参数对接杆搅拌桩成桩质量的影响,得到以下结论:

(1)采取自上而下施工工艺的芯样更加完整,取芯率平均为58.1%;采取自下而上的施工工艺,芯样长度平均为54.3%。现场接杆搅拌桩施工采用自上而下施工工艺比自下而上的标贯击数提高了28.95%, $q_u$ 提升37.05%,成桩质量更好。

(2)叶片转速在60 r/min时能保证现场最佳成桩质量。搅拌桩叶片转速快时成桩质量会更好,但转速过快会导致土体容易在搅拌头上形成固结,大幅降低叶片搅拌效果,并在土中形成螺旋状切割。

(3)钻杆下钻和提升速度 $V$ 值控制在1.0 m/min时能保证现场最佳成桩质量。 $V$ 值过大,在下钻过程中遇到硬块或者障碍物,会导致设备损坏,而且水泥填充不均匀; $V$ 值过小,虽然水泥搅拌会更加均匀,但是施工用时会增加,施工效率会下降。

(4)水泥掺量为80 kg/m能保证现场最好的成桩质量。在一定范围增加水泥用量,固化效果会更好,但用量过大会引起搅拌时水泥与土体不充分搅拌,不能形成一个均匀硬化的整体。实际操作时需结合地质条件将公式中的水泥掺量与叶片转速和 $V$ 值进行组合,将水泥土每点搅拌次数达到25次以达到较好的地基处理效果。

(5)常规水泥土搅拌桩由于少了接拆杆等复杂的工序,所以成桩质量比接杆搅拌桩更好,但是接杆搅拌桩的强度符合规范要求。因此在一些净空受限的施工条件下能够代替常规搅拌桩,同样起到很好的工程应用效果。

## 参考文献:

- [1] 富志根,时洪斌,毛忠良.接杆搅拌桩在低净空条件下铁路软土地基加固中的应用研究[J].路基工程,2020(2):114-118.  
Fu Z G, Shi H B, Mao Z L. Research on the application of extension mixing pile in railway soft soil foundation reinforcement under low clearance conditions[J]. Roadbed Engineering, 2020(2): 114-118. (in Chinese)
- [2] 杨普锋.接杆式水泥搅拌桩在软基处理工程中的应用[J].城市道桥与防洪,2022(2):163-167.  
Yang P F. Application of extension rod cement mixing pile in soft foundation treatment engineering[J]. Urban Road and Bridge and Flood Control, 2022(2): 163-167. (in Chinese)
- [3] 黄荔,林奇.深层搅拌桩接杆法施工在工程中的应用[J].福建建设科技,2005(4):9-48.  
Huang L, Lin Q. Application of deep mixing pile extension method in engineering [J]. Fujian Construction Technology, 2005(4): 9-48. (in Chinese)
- [4] 刘松玉,洪振舜,陈蕾,等.粉湿喷桩加固软土地基的选择方法研究[C]//中国建筑学会地基基础分会2006年学术年会论文集地基基础工程技术新进展.南昌:水利水电出版社,2006:242-248.  
Liu S Y, Hong Z S, Chen L, et al. Study on the selection method of powder wet jet grouting pile for strength-

- ening soft soil foundation[C]//Proceedings of the 2006 Academic Annual Meeting of the Foundation and Foundation Branch of the Chinese Architecture Society: New Advances in Foundation Engineering Technology. Nanchang: Water Resources and Hydropower Publishing House, 2006:242-248. (in Chinese)
- [5] 建筑地基处理技术规范:JGJ 79—2012[S].北京:中国建筑工业出版社,2012.
- [6] 公路工程水泥搅拌桩成桩质量检测规程:DB32/T2283—2012[S].南京:江苏省质量技术监督局,2012.
- [7] 地下工程地基处理施工规程:QJ/STEC 007—2012[S].上海:上海隧道工程股份有限公司,2012.
- [8] 罗铃,杨腾飞,夏泽民,等.超深桩施工中桩机接杆工艺的研究[J].建筑施工,2016,38(7):869-871.  
Luo L, Yang T F, Xia Z M, et al. Research on the pole extension technology of pile machine in ultra deep pile construction[J]. Architecture Construction, 2016, 38(7): 869-871. (in Chinese)
- [9] 宫能和,谌启发,毛忠良,等.低净空多节式钻杆拼接对中机构:CN201820742154.1[P]. 2018-12-11.  
Gong N H, Chen Q F, Mao Z L, et al., Low clearance multi section drill pipe splicing alignment mechanism: CN201820742154.1 [P]. 2018-12-11. (in Chinese)
- [10] 毛忠良,宫能和,储海岩,等.低净空搅拌桩钻杆节拼接装置:CN201810821716.6[P]. 2020-02-04.  
Mao Z L, Gong N H, Chu H Y, et al. Low clearance mixing pile drill pipe joint splicing device: CN201810821716.6[P]. 2020-02-04. (in Chinese)
- [11] 韦应彬,周彬,崇天阳,等.水泥土搅拌桩复合地基在软基处理中的应用[J].施工技术,2017,46(增):40-43.  
Wei Y B, Zhou B, Chong T Y, et al. The application of cement-soil mixing pile composite foundation in soft foundation treatment [J] Construction Technology, 2017, 46(Sup): 40-43. (in Chinese)
- [12] 闫楠,郑晨,白晓宇,等.水泥土搅拌桩复合地基承载特性现场试验[J].科学技术与工程,2019,19(19):247-253.  
Yan N, Zheng C, Bai X Y, et al. Field test on bearing characteristics of cement-soil mixing pile composite foundation [J] Science, Technology and Engineering, 2019, 19(19): 247-253. (in Chinese)
- [13] Chi W, Yong F X, Ping D. Plate load tests of composite foundation reinforced by concrete-cored DCM pile [J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2014, 32(1):85-96.
- [14] 彭伟,胡鑫.水泥搅拌桩在超软土地基中的施工技术介绍[J].建筑安全,2017,32(4):7-9.  
Peng W, Hu X. Introduction to construction technology of cement mixing pile in ultra soft soil foundation [J]. Building Safety, 2017, 32(4): 7-9. (in Chinese)
- [15] 刘军鹏.铁路路基软基处理水泥搅拌桩施工工艺分析[J].中国新技术新产品,2018(2):91-92.  
Liu J P. Analysis on the construction technology of cement mixing pile for soft foundation treatment of railway subgrades [J]. New Technologies and Products in China, 2018(2): 91-92. (in Chinese)
- [16] 陈富,李海涛.黄骅港地区深层水泥土搅拌桩施工工艺研究[J].岩土工程学报,2015,37(增):156-160.  
Chen F, Li H T. Research on the construction technology of deep cement soil mixing piles in huanghua port area [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(Sup): 156-160. (in Chinese)
- [17] Jelisic N, Leppanen M. Mass stabilization of organic soils and soft clay[J]. Geotechnical Special Publication, 2003, 28(120): 552-561.
- [18] 万瑜.水泥土搅拌桩智能化施工控制系统应用研究[D].南京:东南大学,2019.  
Wan Y. Research on the application of intelligent construction control system for cement soil mixing piles [D]. Nanjing: Southeast University, 2019. (in Chinese)
- [19] 何开胜.水泥土搅拌桩设计计算方法探讨[J].岩土工程学报,2003,25(1):31-35.  
He K S. Discussion on the design and calculation method of cement soil mixing pile [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, 25(1): 31-35. (in Chinese)
- [20] 朱志铎,万瑜,高波,等.水泥土搅拌桩施工智能化控制技术[J].土工基础,2019,33(4):393-397.  
Zhu Z D, Wan Y, Gao B, et al. Intelligent control technology for cement soil mixing pile construction [J]. Geotechnical Foundation, 2019, 33(4): 393-397. (in Chinese)

(本文编辑:苏泽云)