

DOI: 10.7672/sgjs2024190025

# 上海深厚砂层旋挖桩施工关键技术研究\*

贾宝荣, 邵治理, 朱其凯, 方 华  
(上海市机械施工集团有限公司, 上海 200072)

**[摘要]** 东方枢纽上海东站项目所处区域地质条件特殊, 地表30m以下为深厚砂层, 第⑦层、⑨层呈连通状态, 采取常规旋挖施工工艺易缩径塌孔、孔底沉渣厚度达数米, 施工质量难以保证。通过现场试验确定施工参数, 从护壁泥浆配合比、深厚砂层成孔稳定性、施工工艺及设备改造等多方面开展研究, 分析了深厚砂性土层中旋挖桩存在的主要问题, 分别为地表孔口塌陷、抽吸负压效应和深层砂性土体缩径, 采用护筒长度优化、钻头形式改造和泥浆参数控制等针对性优化措施, 可确保深厚砂层中旋挖桩成孔质量, 进一步总结形成了软土深厚砂层特殊地质条件下旋挖桩施工关键技术。

**[关键词]** 车站; 桩基础; 旋挖桩; 泥浆护壁; 稳定性; 施工技术

**[中图分类号]** TU753.3

**[文献标识码]** A

**[文章编号]** 2097-0897(2024)19-0025-05

## Research on Key Construction Technology of Rotary Excavation Pile in Deep Sand Layer in Shanghai

JIA Baorong, SHAO Zhili, ZHU Qikai, FANG Hua

(Shanghai Mechanized Construction Group Co., Ltd., Shanghai 200072, China)

**Abstract:** The geological conditions of Shanghai East Railway Station of Eastern Hub located are special. The deep sand layer is below 30m on the surface. The 7th and 9th layers are connected. When the conventional rotary excavation construction technology is adopted, the rotary excavation pile construction is prone to shrink and collapse, and the thickness of the sediment at the bottom of the hole is as deep as several meters, hence, the construction quality is difficult to guarantee. The construction parameters are determined by a field test. The research was carried out on the aspects of wall mud mix ratio, hole-forming stability of deep sand layers, construction technology and equipment transformation. The main problems of rotary drilling piles in deep sand layers, which are surface orifice collapse, suction negative pressure effect, and deep sand soil shrinkage, were analyzed. The targeted optimization measures of casing length optimization, drilling bit form transformation and mud parameter control can ensure the hole-forming quality of rotary drilling piles in deep sand layers. The key technology of rotary drilling pile construction under special geological conditions of deep sand layers in soft soil is further summarized and formed.

**Keywords:** stations; piles; rotary digging pile; bentonite slurry; stability; construction

### 0 引言

旋挖钻机地层适用范围较广, 可以用于淤泥质土、黏土、砂土、卵石等地层<sup>[1-2]</sup>。相较于传统的正反转循环钻孔灌注桩, 旋挖桩具有自动化程度较高、

成孔速度较快、垂直度较好及泥浆用量少等优势<sup>[3]</sup>。上海滨海地区土体特性主要表现为浅部为软黏土, 深部为深厚砂性土, 尽管旋挖桩可以在不同地层中成孔, 但在软土地层尤其是砂性土层中的施工效果较硬黏土差, 主要表现为对泥浆护壁的影响。首先, 在深厚砂层中需要采用参数指标较好的泥浆才能保证护壁稳定性, 否则将发生钻孔缩径甚至坍塌等现象, 并且泥浆性能还直接影响泥皮厚度和桩底沉渣厚度, 从而阻碍桩侧与桩端阻力的发

\*上海市“科技创新行动计划”启明星项目(扬帆专项)(23YF1436800)

[作者简介] 贾宝荣, 博士, 教授级高级工程师, E-mail: jiabaorong1314@163.com

[通信作者] 邵治理, 博士, E-mail: szl\_forever@163.com

[收稿日期] 2024-03-20

挥<sup>[4]</sup>。此外,由于钻筒外壁与内壁之间的径向间隙很小,在软土中旋挖桩上下升降易发生“抽吸效应”,形成负压真空,导致钻孔缩径<sup>[5-6]</sup>。

结合前述文献可知,土体地质情况是旋挖桩施工需要考虑的关键因素,在深厚砂层施工需要采取综合性措施保证成孔的稳定性。本文结合现场施工参数,对护壁泥浆性能、施工工艺及设备改造开展研究,有效解决了地表孔口塌孔、深部砂层缩径、负压效应严重及沉渣厚度过大等问题,提出了适用于上海深层砂性土施工的旋挖桩优化措施,总结了设置超长护筒、改进钻头形式和严控泥浆指标的成套旋挖桩施工控制关键技术,可为上海地区类似地层情况下旋挖桩施工提供参考。

## 1 工程概况

### 1.1 工程简介

东方枢纽上海东站桩基围护项目总占地面积0.37km<sup>2</sup>,包括车站本体、地铁、捷运、高铁等,总建筑面积约110万m<sup>2</sup>。围护形式多样,涵盖了地下连续墙、排桩+TRD止水帷幕、排桩+四轴止水帷幕、排桩+高压旋喷桩、三轴搅拌桩等。工程桩基数量5000余根,桩径为700,1000,1100mm。为满足结构承载力需求,保证成孔质量,超深、大直径 $\phi 1100$ 钻孔灌注桩采用旋挖桩施工,分布范围如图1所示。

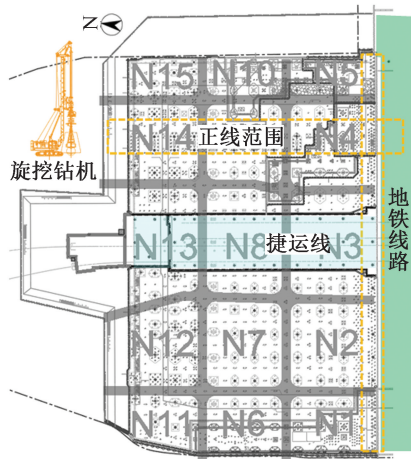


图1 桩基分布

Fig. 1 Pile foundation distribution

### 1.2 水文地质条件

上海滨海地区是典型的软土深厚砂性地层,本工程范围内分布的③层淤泥质粉质黏土、④层淤泥质黏土及⑤<sub>1</sub>层黏土为本工程主要软弱层,由于其固结历史较长,属于正常固结土。项目所处区域地质条件复杂,地层相较上海其他区域含砂量较大。由于砂土、粉砂性地质的特殊性,具有含水量高、孔隙比大、高灵敏度、有较明显的触变、流变特性。钻

孔时强度骤然降低,土体易扰动,对孔壁稳定的影响较大,在施工过程中容易出现塌孔、沉渣过大等问题。

拟建场地承压水赋存于⑦<sub>11</sub>层及以下的粉(砂)性土层中,根据上海地区经验,承压水水位一般低于潜水位,呈年周期性变化,埋深3.0~12.0m。根据勘察结果,本场地内⑦<sub>11</sub>层、⑦<sub>12</sub>层、⑦<sub>21</sub>层、⑦<sub>22</sub>层、⑨层相互连通,可视作同一含水层。赋存于⑦<sub>11</sub>层中的承压水水位埋深在地面下5.49~6.36m,相应标高0.030~-0.270m,取某典型截面土层分布如图2所示。

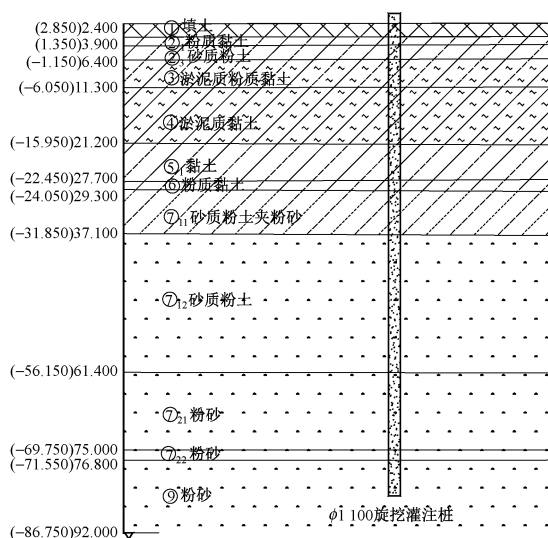


图2 土层典型剖面

Fig. 2 Section of soil layers

### 1.3 旋挖桩施工工艺

旋挖钻机主要包括伸缩钻杆和钻头,可以传递回转力矩和轴向压力,当钻头下降到孔底处,旋转钻斗并施加压力,将土挤入钻斗内,钻筒内土满时反转钻杆,捞斗底板关闭,提升钻斗将土卸于堆放地点。旋挖钻孔灌注桩选用SWDM-60型钻机进行成孔,施工流程为:施工准备→测量定位→护筒埋设→桩机就位→钻进至设计深度→清孔→测孔、检孔→下放钢筋笼→浇筑。

## 2 旋挖桩成孔稳定性影响因素

### 2.1 地质条件

成孔泥浆在渗透作用下进入孔壁周围的土体空隙中,并形成一定厚度的泥皮,上海土层为上覆黏土下卧砂层分布,砂性土较黏性土而言,土颗粒孔隙较大,因此泥浆渗透效应明显,这对泥皮的形成有利。但承压含水层砂性土的渗透系数远大于黏性土,渗透系数过大又可能会造成泥浆的流失无法胶结,从而引起泥浆液面的迅速下降并造成槽壁

局部坍塌<sup>[7]</sup>,上黏下砂的地质特征下,土体粒径差异较大,成孔的关键是要在砂性土层中形成高质量的泥皮。

## 2.2 泥浆指标

泥浆护壁原理:①泥浆在渗透作用下形成一定厚度的泥皮;②必须形成一定高差的泥浆液柱压力才能平衡孔外水土压力,保证成孔稳定。泥浆性能指标如重度、黏度是孔壁稳定性的主要控制指标,对孔壁稳定有重要影响<sup>[8]</sup>。黏度对泥皮的形成十分重要,黏度较大时容易携带土粒,土粒不容易沉淀,泥浆不容易过度侵入土壁,从而形成薄而韧的泥皮,因此深厚砂层中黏度指标是十分关键的因素。泥浆重度则是在形成泥皮的基础上产生泥浆压力,较大的泥浆密度可以增大泥浆侧向压力以抵抗土体侧向变形,对于成孔稳定性十分重要。此外,在深厚砂层中施工旋挖桩,还需要控制含砂率,否则 fines 砂迅速沉淀后导致沉渣厚度可达数米以上,直接影响桩身承载力。

## 2.3 施工工艺

旋挖钻进过程中钻头不断上下往复提钻,影响孔内泥浆的正常流动和护壁性能,使孔壁周围土体中的孔隙水压力上升,易导致泥浆流失,而提升钻头在移动过程中容易碰落孔壁泥皮造成泥皮失效,从而局部缩径甚至出现整体坍塌失稳的风险。此外,由于旋挖钻头为圆筒形式,在成孔过程中与土层接触面积较大,钻头下部产生较大抽吸负压作用,也容易造成孔壁缩径、坍塌现象。

## 2.4 机械荷载

上海滨海地区场地填土厚度普遍较大、土质松散,旋挖桩机质量可达 70t 以上,机械超载会增加孔壁外侧水土压力,造成表层孔口坍塌,应当采用刚度地面或护筒加以保护。

## 3 旋挖桩施工问题及优化措施

为研究旋挖工艺在深厚砂性土层的适用性并采取针对性措施,正式施工前进行了现场试成孔试验,基于试验结果和相关文献,总结了深厚砂性土层中旋挖桩存在的主要问题,分别为地表孔口坍塌、抽吸负压效应和深层砂性土体缩径。

### 3.1 地表孔口坍塌

场地填土厚度普遍较大,上部夹大量碎石、混凝土块等杂物,并涉及较大明浜回填区(深度达 4~6m),杂填土及明浜回填区成分复杂,土质松散,表现为高压缩性软塑状。距离本工程 5km 处的类似工程采用 2m 短护筒进行旋挖桩施工,护筒底部土体发生了大面积坍塌,甚至出现护筒掩埋无法拔出

的情况。本工程试成孔时,首先在未埋设钢护筒的前提下成孔至 4m 深,在 30min 内即发生明显土体缩径现象,缩径达到 10cm 以上,如图 3 所示。

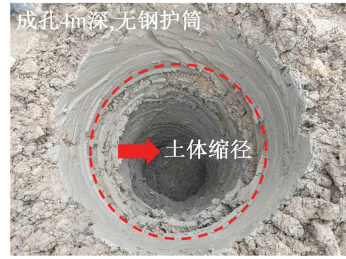


图 3 现场地表坍塌

Fig. 3 The ground surface collapsed

造成地表孔口坍塌的原因主要是土层性质较差且地表荷载较大,旋挖机械竖向荷载可达 100kPa 左右,且荷载作用位置距离孔口较近,对表层软弱土体产生明显的侧向挤压作用。挤压作用主要影响浅部一定深度内的土体,该深度以下挤压作用不明显。采取的对应措施主要是钢护筒护壁,保证孔壁稳定。若钢护筒长度不足,会导致护壁深度较浅,还会导致护筒底部土体孔壁失稳;如护筒过长,达到 10m 以上,护筒垂直度将难以保证,直接影响成桩质量。因此,为保证地表成孔不坍塌,优化了钢护筒长度,设计钢护筒延长至 8m 以隔断地表荷载对软弱土层的影响。

### 3.2 抽吸负压效应

旋挖钻机成孔作业时,钻具在充满护壁泥浆的孔内反复提升下降,钻头外壁与孔壁间距很小,成孔时土颗粒成团粘结在钻头外壁上,会堵塞钻头上下之间的过流间隙,从而影响泥浆的上下贯通对流。在钻头下部会产生抽吸负压效应,此时钻头下部压强很小,削弱了原有泥浆压力的护壁效果,在较厚的承压含水层中,会导致地层承压水头增加,泥浆流失,发生局部缩径甚至塌孔风险。

为降低对孔壁泥皮的扰动,避免孔内负压形成,本工程针对性地改进了旋挖钻具。钻具主要由钻具护壁、刀盘、挡板转动轴、挡板组成,将钻具护壁由圆筒形状改造为部分凹进区域的形状,如图 4 所示。该凹槽呈弧形,弦长 40~50cm、弦高 8~10cm,形成可供泥浆通过的通道,钻进和提升钻具时可使泥浆从该凹槽处补充至孔底。通过改进旋挖钻具,可以减少对孔壁泥皮的干扰,避免形成抽吸负压,现场实际采用了两种截面形式的钻头,平截面和凹截面,如图 5 所示。

当钻具与孔壁间隙较大时,钻头下部的负压效应削弱,可提高钻具的提升速度和成孔效率。文献

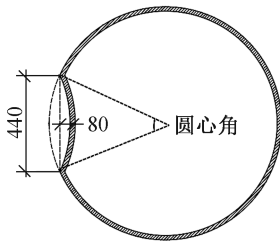


图 4 钻具截面改造设计

Fig. 4 The transformation design of drilling tools section



图 5 钻具截面

Fig. 5 The cross-section transformation of drilling tools

[5]建立了钻头提升速度和过流面积的关系,并给出了钻具提升的临界破坏速度公式:

$$V_{失稳} = \frac{D_1^2 - D_2^2}{D_2^2 - d^2} \sqrt{2 \left( 1 - \frac{\rho_2}{\rho_1} \right) gH + 2 \frac{\rho_2}{\rho_1} gh} \quad (1)$$

式中: $D_1, D_2, d$  分别为孔径、钻具外径、钻杆外径; $\rho_1, \rho_2$  分别为泥浆密度和水密度; $g$  为重力加速度; $H$  为钻头上部泥浆柱高度; $h$  为泥浆液面高度和水头高度的差值。

钻头改造分平截面和凹截面两种形式,考虑截面对应圆心角分别为  $30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$  3 种钻头形式,得到的极限提升速度如表 1 所示,其中按照工程实际资料,未改造的钻头形式  $D_1, D_2, d$  分别是 1.15, 1.1, 0.35m; $\rho_1, \rho_2$  分别为  $1.06\text{g/cm}^3$  和  $1.0\text{g/cm}^3$ ;  $H$  取 80m; $h$  为 1m。其中  $D_2$  取不同截面钻头角度的等效钻具外径。

表 1 钻头提升速度

Table 1 Lifting speed of drill bits (m·s<sup>-1</sup>)

钻头	0°	30°	45°	60°
平截面	1.08	1.13	1.24	1.46
凹截面	1.08	1.18	1.41	1.87

可以看出,截面形式上凹截面优于平截面,随着截面角度加大到  $60^\circ$ ,平截面和凹截面的钻斗容量下降了 11% 和 14%,但提升速度分别增加了 35% 和 73%,明显提高了成孔工效。此处列举的两种截面形式可供类似工程参考。

### 3.3 砂性土体缩径

通常在黏土地层中成孔,主要关注的泥浆指标是泥浆重度,使得槽壁内外形成一定高差的泥浆液柱压力,且黏土层中容易形成质量较好的泥皮,因此无需过多关注泥浆黏度<sup>[9]</sup>。而在深部承压砂层中成孔,砂土层开挖扰动易形成流砂状态,不利于泥皮形成,需要关注的最主要指标是泥浆黏度。一方面,由于砂性土孔隙较大渗透性好,泥浆黏度较小时泥浆容易流失不易胶结,泥浆护壁失效从而导致孔壁缩径或失稳。另一方面,砂层中泥浆悬浮泥砂含量大,如泥浆黏度较小,则不容易携带泥砂颗粒,土粒容易沉淀从而槽底将形成较厚的泥砂沉淀物,对清孔作业和成孔质量不利。

试成孔钻头尺寸为 1 150mm,地表孔口采用 8m 长钢护筒,内径为 1 300mm。成孔结束的孔径检测数据如图 6a 所示,在地表处钢护筒范围内,实测孔径为钢护筒直径。在护筒范围下方,未出现塌孔缩径现象。土层缩径主要在 30m 以下砂层中,缩径量达到 50mm 左右。成孔结束 16h 后,孔径进一步减小,在深度方向上表现为孔壁变形的空间效应(见图 6b)。

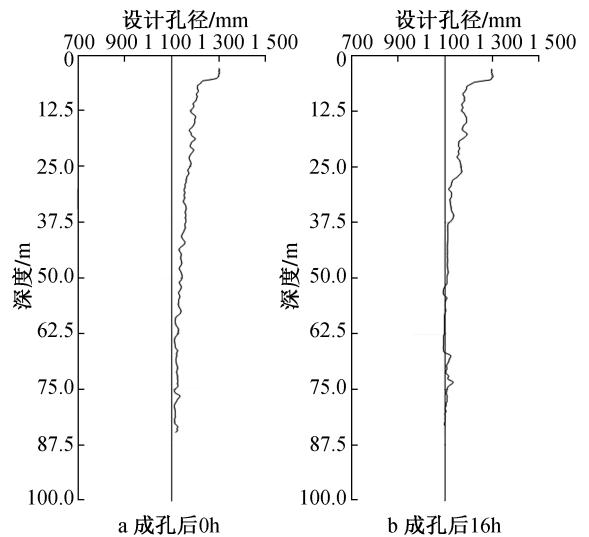


图 6 孔径实测曲线

Fig. 6 Measured curve of the hole diameter

实际上,成孔开挖过程中,渗透作用形成泥皮和悬浮泥砂颗粒均会对泥浆黏度造成损耗,随着开挖进行,黏度逐渐降低,各项指标如表 2 所示,试成孔完成 16h 后,孔底沉渣厚度增加了 1m 以上,孔径最小值减少约 20mm。因此孔壁变形还与成孔时间有关,整体上表现为孔壁变形的时空效应。

主要控制措施如下:旋挖机施工过程中泥浆不循环,因此需要在制浆时采用较大黏度的人造新

表2 成孔指标

Table 2 Hole formation indicators mm

指标	0h	8h	16h
平均孔径	1 154	1 148	1 134
最小孔径	1 111	1 103	1 092
沉渣厚度	30	500	1 380

浆,便于成槽时槽壁泥皮的形成。同时控制浆液密度,便于槽孔内泥砂在较短的时间内沉淀,提高孔内清孔速度,也保证了混凝土浇筑速度。试成孔泥浆配合比为 1t 水加 160kg 钠基膨润土、1.6kg 纤维素、2kg 工业碱,配制的新浆相对密度 1.07、黏度 34s、含砂率 0.1。

#### 4 结语

旋挖桩适用范围较广,理论上可在不同软土、硬岩地层施工。然而在深厚砂性土层条件下施工旋挖桩,需要解决地表孔口塌陷、抽吸负压效应和土体孔壁缩径的难题。采用护筒长度优化、钻头形式改造、泥浆参数控制的针对性优化措施,可确保深厚砂层中旋挖桩成孔质量。通过施工参数分析,得到以下几点结论。

1) 采取钢护筒可有效隔断地表荷载造成的孔口塌陷,护筒深度不宜过浅或过深,钢护筒为 8m 时可保证孔壁稳定且不影响成桩垂直度。

2) 优化的钻头截面形式分平界面和凹截面两种,提高截面对应圆心角可有效增加钻具提升速度,提高成孔工效。

3) 在 30m 以下的砂性土层中,缩径较为明显,孔壁变形和深度、成孔时间有关,整体上表现为孔壁变形的时空效应。

4) 泥浆性能是影响孔壁稳定性的关键因素,砂性土层须在渗透胶结作用下形成高质量泥皮,才能保证泥浆发挥护壁作用,因此黏度是砂性土层的关键泥浆参数,遇较厚砂层时应适当提高黏度指标。

5) 旋挖桩在厚砂层的施工尚需积累经验、系统总结及充分验证。应当以桩基工程的功能特性为前提,在设计和施工中充分考虑多元化、复合型桩型,例如复杂情况下可考虑采用钢、混凝土完全预制桩或水泥土-预制混凝土劲芯复合桩等非取土桩类型。

#### 参考文献:

[1] 蒲仁月. 建筑深基坑工程中旋挖桩的施工技术研究[J]. 中

外建筑, 2017(8): 225-226.

PU R Y. Study on construction technology of rotary excavation pile in deep foundation pit construction[J]. Chinese & overseas architecture, 2017(8): 225-226.

[2] 于好善. 中国桩工施工工法的里程碑——旋挖钻机施工法[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2007(9): 78-81.

YU H S. The milestone of Chinese pile construction method: Rotary drilling rig construction method. [J]. Drilling engineering, 2007(9): 78-81.

[3] 周红军. 旋挖钻进技术适用性的初步研究[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2009, 36(8): 39-45.

ZHOU H J. The study on applicability of rotary drilling technique [J]. Drilling engineering, 2009, 36(8): 39-45.

[4] 戴洪军, 郭纪中, 韦华. 砂土地层中沉渣对旋挖桩承载力的影响[J]. 岩土工程技术, 2007(4): 209-213.

DAI H J, GUO J Z, WEI H. Sediment influence on the bearing capacity of swivel-driven pile in the sandy soil strata [J]. Geotechnical engineering technique, 2007(4): 209-213.

[5] 丁建中, 龚进. 旋挖钻机钻头提升速度的探讨[J]. 建设机械技术与管理, 2007(3): 79-81.

DING J Z, GONG J. An investigation into raising speed of drilling screw-type cutter of rotary drilling rig[J]. Construction machinery technology & management, 2007(3): 79-81.

[6] 王伟. 旋挖钻进埋钻事故的处理实例及预防措施[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2004(8): 21-22.

WANG W. Examples of handling and preventive measures for buried drilling accidents in rotary drilling [J]. Drilling engineering, 2004(8): 21-22.

[7] 丁勇春, 李光辉, 程泽坤, 等. 地下连续墙成槽施工槽壁稳定机制分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(S1): 2704-2709.

DING Y C, LI G H, CHENG Z K, et al. Analysis of trench face stability of diaphragm wall panel during slurry trenching [J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2013, 32(S1): 2704-2709.

[8] 罗云峰. 地下连续墙成槽施工中的泥浆性能研究和探讨[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(S2): 447-450.

LUO Y F. Properties of cement slurry in trenching construction of diaphragm walls [J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2010, 32(S2): 447-450.

[9] 杨勇. 复合钠基膨润土泥浆护壁机理及其工程应用[J]. 地下空间与工程学报, 2010, 6(4): 838-844.

YANG Y. Stability-maintaining mechanism of compound sodium-based bentonite slurry and its application in practical engineering [J]. Chinese journal of underground space and engineering, 2010, 6(4): 838-844.