

DOI: 10.3785/j.issn.2096-7195.2025.01.010

【工程应用】

复杂环境深基坑中数字化微扰动 搅拌桩的应用研究

周振¹, 杜策^{1*}, 张振^{2,3}

(1. 上海渊丰地下工程技术有限公司, 上海 201015; 2. 同济大学土木工程学院 地下建筑与工程系, 上海 200092;
3. 同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092)

摘要: 针对传统搅拌桩成桩能力不足、数字化程度低、施工扰动不可控等问题, 研发了数字化微扰动搅拌桩 (DMP 工法), 并在上海曹家渡项目中成功应用。结果表明, DMP 工法配置的数字化施工控制系统可实现按照预先输入的施工参数进行自动化成桩, 桩体成功穿越近 10 m 厚中密粉土层, 施工深度达到 44 m。通过配置多通道异形钻杆、差速叶片、地内压力监控系统, 实现施工过程对周边环境的微小扰动, 实测邻近的天然地基建及煤气管线沉降微小。DMP 工法搅拌桩的成桩质量可靠, 取芯强度大于 0.8 MPa, 形成的止水帷幕能够有效阻隔承压水。研究成果对于提升搅拌桩施工深度、成桩质量和数字化水平具有重要的实践意义。

关键词: 数字化微扰动搅拌桩; DMP 工法; 地内压力; 微扰动; 止水帷幕

中图分类号: TU753.3

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2025)01-0076-07

Application research on digital minor-disturbance soil mixing pile in deep foundation pit under complex conditions

ZHOU Zhen¹, DU Ce^{1*}, ZHANG Zhen^{2,3}

(1. Shanghai Yuan Feng Underground Engineering Co., Ltd., Shanghai 201015, China;

2. Department of Geotechnical Engineering, College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

3. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: In response to issues such as insufficient pile formation capacity, low digitization level, and uncontrollable construction disturbances in traditional deep mixing, the digital minor-disturbance soil mixing pile (DMP) method was developed and successfully applied in the Caojiadu project in Shanghai. The results demonstrate that the digital construction control system configured in the DMP equipment can automatically carry out pile forming according to pre-entered construction parameters. The piles successfully penetrated through a nearly 10-meter-thick moderately dense silty soil layer, reaching a construction depth of 44 m. Through the use of multi-channel irregular drill rods, differential-speed blades, and an in-situ pressure monitoring system, the construction process achieved minimal disturbance to the surrounding environment, with minimal settlement observed in nearby natural foundation structures and gas pipelines. The pile formation quality of the DMP method mixing piles is reliable, with core sampling strength exceeding 0.8 MPa, and the resulting waterproof curtain effectively blocks confined pressurized water. The research findings provide significant practical value for enhancing the construction depth, pile quality, and digitization level of deep mixing.

Key words: digital minor-disturbance soil mixing pile; DMP method; underground pressure; minor-disturbance; waterproof curtain

0 引言

水泥土搅拌桩是基坑围护工程中常用的止水帷

幕形式^[1], 其桩体质量直接影响到基坑工程的安全。传统的搅拌桩设备数字化程度较低, 施工质量受到人为因素影响较大, 施工完成后过程参数缺少

收稿日期: 2024-10-15; 修回日期: 2024-11-05; 录用日期: 2024-11-12

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (42372317)。

作者简介: 周振 (1982—), 男, 安徽蚌埠人, 本科, 工程师, 主要从事地基基础施工工作。E-mail: 191631316@qq.com。

*通信作者: 杜策 (1983—), 男, 甘肃嘉峪关人, 博士研究生, 高级工程师, 主要从事岩土工程设计及施工工作。E-mail: 78127107@qq.com。

记录,不利于工后分析与总结^[2]。张振等^[3]结合远程监测系统,以段灰量、搅拌次数和桩长等参数作为控制指标,建立了搅拌桩施工质量的评定办法,提高了搅拌桩施工质量管控能力。郑少河等^[4]开发了陆上四轴 DCM 智能施工控制系统,可全自动控制施工过程,实现了施工质量的过程控制。朱志泽等^[5]应用物联网技术,通过智能化施工可显著提高水泥土搅拌桩施工效率和施工质量,降低工程造价。

常规的双轴搅拌桩施工深度约 18 m,三轴搅拌桩施工深度约 30~35 m。而随着城市的大力发展,中心城区的深基坑工程所需的止水帷幕深度日趋加大,如等厚度水泥土墙 TRD (Trench Cutting Re-Mixing Deep Wall Method) 工法等施工工艺也用于承压水控制^[6],但相比搅拌桩,其经济性欠佳。张培印等^[7]通过接长钻杆的方式,在新加坡地铁项目中施工了 52 m 深度的双轴搅拌桩,由于接钻杆的工序繁复,增加了施工难度的同时大幅度降低了施工效率,不利于大量应用。

此外,搅拌桩在邻近建(构)筑物施工时,其施工影响也不容忽视^[8]。SHEN 等^[9]基于圆孔扩张理论推导了考虑搅拌桩钻杆叶片剪切作用的圆柱扩张公式,总结了施工对周边土体的扰动主要源于搅拌叶片转动的剪切力和浆液压力引起的超孔隙水压力变化。叶观宝等^[10]分析了搅拌桩施工产生扰动的原因,主要是钻机叶片对桩周土体的挤压和拉裂

作用,以及水泥浆液压力产生的渗透和劈裂作用。以上研究对搅拌桩施工影响因素的分析已经较为全面,但受限于装备的发展,还没有能够有效控制土体扰动的搅拌桩装备应用。

数字化微扰动搅拌桩,又称 DMP 工法,是一种全新自主研发的自动化程度高的搅拌桩设备^[11]。其配置了强劲的动力系统^[12]和先进的数字化施工控制系统,具有施工微扰动的特性^[2],为基坑工程中深层地下水的控制提供了新的解决方案。本文以上海曹家渡社区项目基坑工程为背景,开展了 DMP 工法应用研究,为类似工程提供依据。

1 工程简介

1.1 基坑概况

上海曹家渡社区项目位于上海市静安区康定路以南地块内,项目地下 3 层,基坑总体呈矩形,基坑面积约 8 138 m²,围护周长为 448 m,开挖深度为 15.85 m。

基坑环境概况如图 1 所示。基坑南侧、西侧、东侧分布有多幢天然地基居民楼,这些住宅楼普遍建于 1985—1991 年间,年代较久,多采用砖混结构筏板基础。经房屋检测后显示各居民楼有不同程度的沉降及倾斜,平均倾斜率在 1.2‰~7.1‰之间,部分楼栋倾斜较为明显。

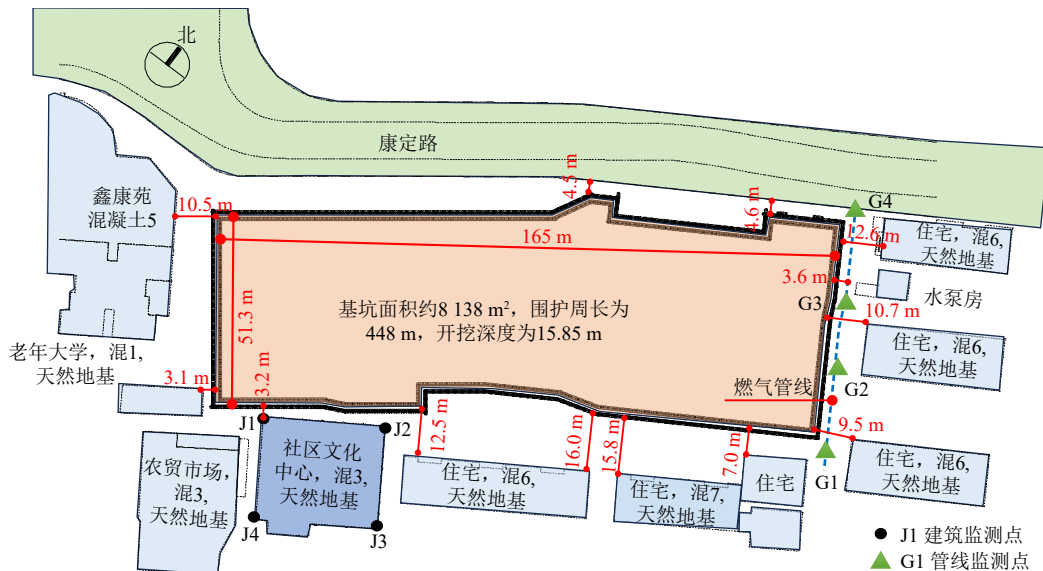


图 1 基地环境总平面图

Fig. 1 General layout of the site environment

项目用地红线紧贴小区围墙,红线内为小区的主要出入通道,基坑施工期间,需要保证居民的正常进出不受影响。同时,居民楼有较多进户管线分布,尤其分布有众多对变形较为敏感的煤气、上

水等硬质管线,环境保护要求较为严苛。

1.2 工程地质与水文条件

本工程位于黄浦江以西,属于滨海平原地貌类型。基坑施工影响范围内典型地层主要有②层粉质

黏土以及③④层淤泥质土，典型土层剖面如图2所示，土层力学参数见表1。

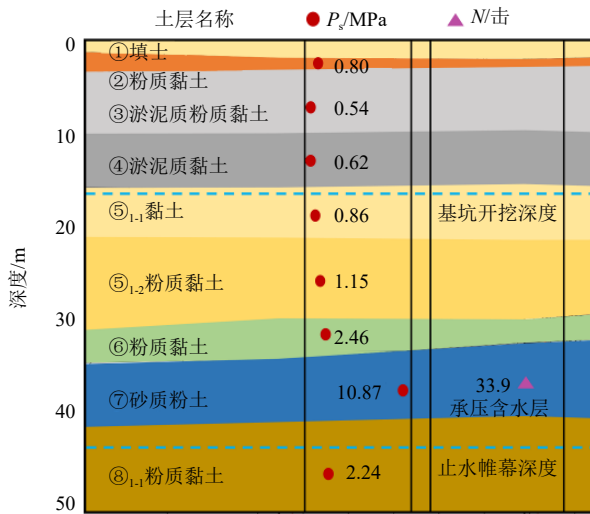


图2 典型土层剖面图

Fig. 2 Typical soil stratum profile

表1 土层力学参数

Table 1 Soil mechanical parameters

土层	$\omega/\%$	$\omega_L/\%$	e	c/kPa	$\varphi/(\circ)$
②	31.4	37.1	0.878	22	18.5
③	43.1	37.3	1.199	10	17.0
④	50.7	43.2	1.408	11	10.5
⑤ ₁₋₁	40.0	42.8	1.126	18	13.0
⑤ ₁₋₂	35.7	38.4	1.000	17	17.5
⑥	23.6	36.7	0.676	42	18.0
⑦	25.2	—	0.739	4	31.5
⑧ ₁₋₁	35.1	37.6	0.985	17	17.5

其中，基坑周边天然地基建筑的基础底位于②层粉质黏土内，但该层层厚较小，其下部分布的淤泥质土层厚度达到13 m左右，土质呈饱和流塑状态，压缩性高，并且局部夹少量有机质及薄层粉性土，土质不均匀，比贯入阻力分别为0.54 MPa和0.64 MPa，表明土体强度较低，抗变形能力较差。基坑围护施工及土方开挖也主要位于③、④层淤泥质土中，施工容易引起周边土层的扰动及变形。

同时，场地深部分布有上海市第一承压含水层第⑦层砂质粉土，根据上海市的长期水位观测资料显示，该层土的承压水水位呈年周期性变化，水位埋深约3.0~12.0 m。勘察阶段对承压水位进行了观测，实测⑦层的承压水水头埋深在4.02~4.29 m。对该层土进行抗突涌稳定性验算，得出本项目基坑临界开挖深度约为14.3 m，证明本基坑大面积区域第⑦层承压水有突涌的可能性。由于基坑周边分

布有大量天然地基住宅，环境保护等级为一级，大面积降低承压水水位势必会造成住宅较大幅度的沉降，所以需要采取合理的承压水控制措施。

2 围护结构设计

2.1 受力结构

本基坑开挖深度为16.0 m左右，按照上海市一般经验，围护结构采用地下连续墙结合3道钢筋混凝土支撑的型式。由于用地范围狭小，为减小围护结构的占地空间，地下连续墙采用两墙合一型式，其中北侧长边邻近道路区域的地墙厚800 mm，其他区域邻近住宅的地墙厚1000 mm。为降低地下连续墙施工的扰动以及提升在淤泥质土中成槽的稳定性，在地墙两侧设置槽壁加固。同时，考虑到坑外天然地基建较多，且主要分布在基坑的长边，因此在靠近居民住宅区域的第2道和第3道支撑处设置混凝土伺服支撑系统，控制开挖期间的基坑变形。

2.2 止水帷幕

本基坑周边环境复杂，止水帷幕需要隔断承压含水层，即第⑦层砂质粉土，以避免减压降水对周边环境的影响，由地层剖面可以看出，帷幕施工深度需要大于44.0 m才能确保隔断承压含水层。同时，第⑦层承压含水层厚度约10.0 m，呈密实-中密状态，土层比贯入阻力为10.87 MPa，标贯击数达到33.9击，土体强度显著高于其他土层，其上部的⑥层粉质黏土也是上海市土质相对较硬的土层。这对止水帷幕装备的施工深度和成桩能力都提出了较高的要求。按照此地质条件，常规可以选用的止水帷幕形式主要有TRD、铣削深层搅拌墙CSM (Cutter Soil Mixing)、素混凝土墙等措施，这些施工工艺具有良好的止水能力，但经济性欠佳，施工对周边环境的影响也相对较大，并且基坑南侧建筑距离基坑最近仅3.6 m，大型设备难以贴近施工。

数字化微扰动搅拌桩具有较强的成桩能力和良好的成桩质量，这得益于设备的桩架具有较强的挂载能力，动力头功率为264 kW，不接钻杆的施工深度可达50 m，能够满足工程隔断承压含水层的要求。同时，DMP工法具有施工微扰动的特点^[13]，相较于常规止水帷幕工艺，其更能有效保障帷幕施工期间邻近居民住宅及管线的安全。基于以上原因，基坑止水帷幕采用了DMP工法。止水帷幕剖面和平面的示意如图3所示，其中地墙外侧DMP工法桩采用套接一孔施工方式，即桩间距为1.95 m，桩长为44 m，隔断⑦层并进入其下相对不透水土

的⑧₁₋₁粉质黏土层 1.3~2.6 m; 地墙内侧 DMP 工法桩采用搭接施工方式, 桩间距为 2.60 m, 桩长为 20.75 m, 进入坑底以下约 5 m。

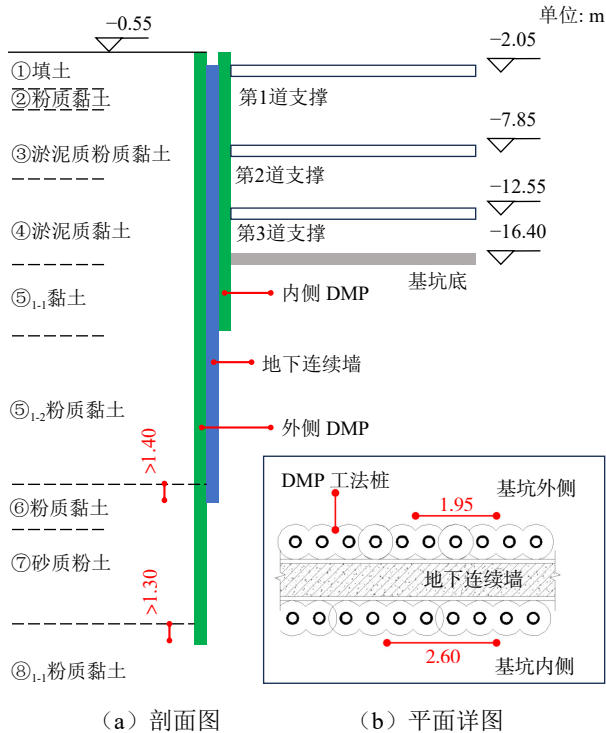


图 3 止水帷幕剖面 and 平面示意图

Fig. 3 Plan and section view diagrams of waterproof curtain

3 帷幕施工关键技术

3.1 施工微扰动

本工程环境保护要求较高, 止水帷幕紧靠居民住宅施工, 施工设备和工艺需要最大限度地降低对周边土体的扰动。DMP 工法通过 4 个方面降低对周边土层的影响^[11]: (1) 装备具有 4 根异形钻杆, 每根钻杆采用了三通道的设置, 1 根通道同钻头底部的喷气口联通, 剩余 2 根通道同钻头上下部的喷浆口联通。在钻头下沉时, 下部喷浆口喷射的浆液降低了钻头底部的土体强度, 还可以润滑钻头起到减小搅拌阻力的作用。钻杆组成如图 4 所示。

(2) 异形钻杆在旋转过程中形成圆形孔道, 异形钻杆和圆形孔道间形成了浆气压力释放通道, 使得搅拌钻头附近的浆气压力不至于聚集过大而挤压周边土体。(3) 钻杆设置差速叶片, 差速叶片和钻杆滑动连接, 同刚接的普通叶片在旋转时速度不一致, 都能够防止黏土粘附钻杆和泥球的形成。

(4) 搅拌钻头上配备地内压力监控系统, 成桩全过程实时监测地内压力变化。

3.2 深厚粉土成桩参数控制

止水帷幕的施工深度比较大, 浅部土层相对软弱, 而深部的⑥、⑦等土层的强度相对较高。设

计水泥掺量 18%, 要求抗压强度达到 0.8 MPa。为了便于钻进的同时提高桩体强度, DMP 工法下沉和提升阶段采用不同的水灰比, 施工参数表如表 2 所示, 其中下沉阶段水灰比相对较大, 便于钻进的同时减小施工扰动。提升阶段采用较低的水灰比, 这样桩体总的用水量将显著减小, 水泥石强度得到了保证。变水灰比由数字化施工控制系统自动控制, 减少了人工干预, 显著提升了控制精度和施工便利性。

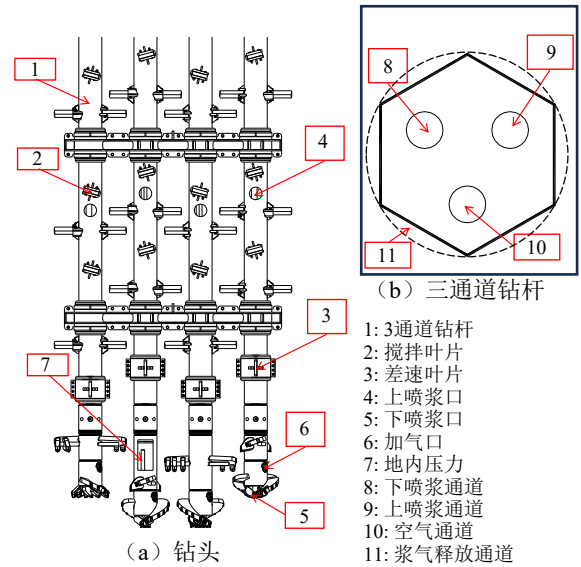


图 4 钻杆组成

Fig. 4 Composition of drill pipe

表 2 施工参数表

参数	下沉	复搅拌	提升
水灰比	2.2	1.0	1.0
钻头转速/(r/min)	25	30	30
成桩速度/(m/min)	0.8	1.2	1.2
喷浆占比/%	40	30	60
浆液流量/(L/min)	100	60	120
喷浆压力/MPa	0.2~0.6	0.4~0.6	0.2~0.5
加气压力/MPa	0.2~1.0	0.8	0
地内压力控制系数	1.6	1.6	1.6

4 工程实施

4.1 自动化施工

DMP 工法设备的成桩历程曲线整体呈“W”形, 如图 5 所示, 分下沉、复搅拌、提升 3 个阶段。施工时, 按照预先设定的参数进行自动化成桩施工, 设备配置的数字化施工控制系统按照 5 s/次的频率采集成桩数据, 单桩施工时长约 6 880 s, 即 115 min。其中下沉阶段用时较长, 约 76 min,

“W”底复喷复搅拌阶段约7 min,提升阶段约用时32 min。同时可以看出,成桩曲线在承压含水层层顶位置斜率发生突变,钻头下沉速率低于设定值,证明土体强度较高,钻进速度减缓。而提升阶段从桩底至桩顶,曲线斜率基本未发生变化,证明此时桩孔内土体已经呈现浆土混合物状态,对钻具形成的阻力较小。

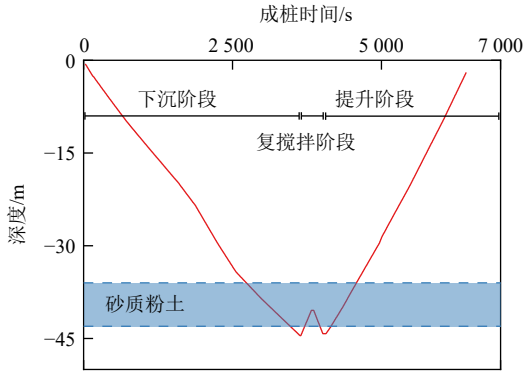


图5 成桩历程曲线

Fig. 5 Pile forming process curve

数字化施工控制系统控制浆液流量同下沉和提升速度相匹配,由图6可以看出,浆泵的压力在成桩过程中波动幅度并不大,数值集中在0.3~0.5 MPa之间,在⑥、⑦层土中,浆液压力略高于上部的⑤层土。浆液流量在浅部30 m以上按照表2所确定的 $100 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ 的流量施工,30 m以下进入强度较高的⑥⑦层土,由于钻进速度减慢,数字化施工控制系统根据程序设定的应对机制,自动提高了浆液流量,以便于钻进的同时防止段浆量不足。从电机电流曲线也可以看出,30 m以上电流值变化幅度很小,进入硬土层后,电流值显著增加。电机电流值增大间接反应了土层阻力的增加,数字化施工控制系统详细记录了施工参数,为数据分析提供了可靠依据。

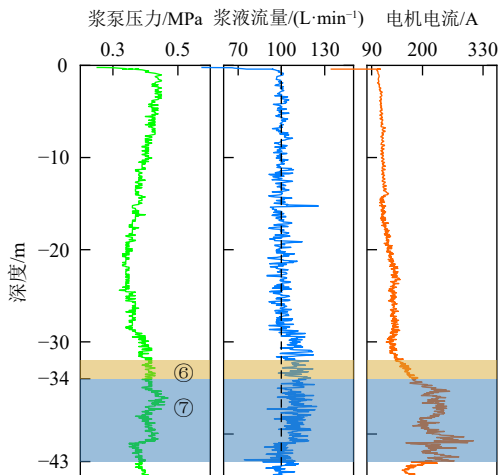


图6 成桩浆液及电流控制状况图

Fig. 6 Diagram of slurry and current control status

4.2 地内压力控制

DMP工法钻头内配置地内压力传感器,可以监测钻头位置桩孔内径向压力,数字化施工控制系统按照下式控制地内压力^[2]:

$$p = \zeta \gamma_w h / 1000 \quad (1)$$

式中: p 为地内压力控制值,MPa,为施工期间钻头中部的浆土混合物压力; ζ 为地内压力控制系数,一般取1.2~1.6; h 为计算压力点处的垂直深度,m; γ_w 为水的重度, $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$,可取10.0。

图7为试成桩过程中地内压力控制情况,地层静止土压力为 P_0 ,参照规范^[14]静止土压力计算方法计算。3根试成桩施工过程中,由数字化施工控制系统记录的地内压力在0~15.6 m范围内小于静止土压力。随着成桩深度的增加,地内压力增长明显,桩端位置显著大于静止土压力。同时可以看出,地内压力控制系数 ζ 在0~21.5 m范围内小于1.3,随着深度增加,桩孔内地内压力增大,接近控制系数1.6后,系统通过调整浆气压力减少了地内压力,使其得到了有效控制。

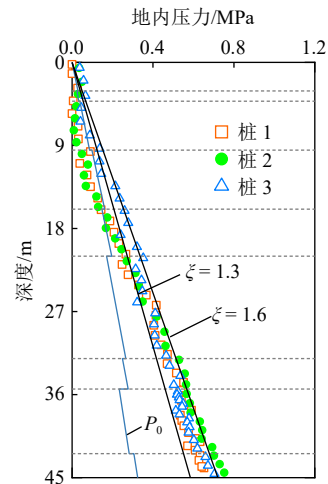


图7 地内压力控制曲线

Fig. 7 Pressure control curves of underground

图1中标注了基坑周边环境保护等级为一级的2个区域监测点的分布情况,其中基坑西南角外侧为3层天然地基的街道社区文化中心,该建筑角点沉降观测点编号为J1~J4。DMP工法桩距离建筑最近约3.2 m,北侧与之相对应的DMP工法桩共计30幅,桩长为44 m,施工用时8 d,建筑角点竖向位移监测点J1~J4数据显示,累计沉降变化分别为-0.83 mm、-0.54 mm、-0.54 mm、+0.02 mm,正值表示隆起,负值表示下沉,可以看出施工期间累计变形较小,基本可以忽略。

基坑东侧分布有直径150 mm钢制燃气管,埋深为0.85 m,管线监测点编号为G1~G4,DMP

工法桩距离燃气管约 3.6~4.5 m, 此区域同样施工 30 幅 44 m 长止水帷幕桩, 用时 8 d, 燃气管线实测变形在 +0.25~-0.43 mm 内, 属于微小变形。

由此可见, DMP 工法桩施工引起的变形较小, 土层扰动得到了有效地控制。

4.3 成桩质量

基坑开挖, 坑内减压降水井开启后, 出水量逐渐减小, 部分井出现断流情况, 同时坑外环境监测点附加变形不明显, 证明止水帷幕有效阻隔了承压水, 坑内降水并未引起坑外水位的明显变化, 说明 DMP 工法搅拌桩的成桩质量可靠, 形成的止水帷幕能够有效阻隔承压水。

DMP 工法搅拌桩芯样无侧限抗压强度沿深度分布如图 8 所示, 可以看出桩体强度满足设计要求的 0.8 MPa, 同时在淤泥质土中芯样强度相对较低, 黏土中强度略高, 粉土中强度超过 1.0 MPa, 这同 TIMONEY 等^[15]的研究相一致。基坑开挖后地墙接缝没有明显漏水情况发生, 证明止水帷幕成桩质量较好。

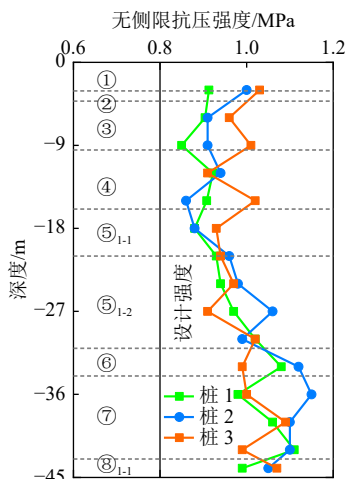


图 8 钻孔取芯强度

Fig. 8 UCS of the pile

5 结 论

本文通过在上海曹家渡项目中成功应用了数字化微扰动搅拌桩, 现场实测搅拌桩施工引起的天然地基构筑物沉降较小, 止水帷幕有效封闭了承压含水层, 具体结论如下:

(1) 装备配置的数字化施工控制系统可实现按照预先输入的施工参数进行自动化成桩, 降低了搅拌桩施工的人工干预程度, 提高了施工的数字化水平。

(2) 数字化微扰动搅拌桩在上海地区标贯大于 33 击的粉土层中施工深度达到 44 m, 成桩速度

约 115 min/幅, 验证了 DMP 工法在上海地区的施工能力。

(3) 数字化微扰动搅拌桩通过配置的三通道异形钻杆、差速叶片、地内压力控制系统, 有效减小了施工过程对邻近地层的扰动, 实测邻近天然地基建建筑沉降 -0.83~+0.02 mm, 管线变形 +0.25~-0.43 mm, 属于微小扰动。

(4) 数字化微扰动搅拌桩成桩均匀, 取芯强度超过 0.8 MPa, 形成的止水帷幕能够有效阻隔承压水。

研究成果对于提升搅拌桩施工深度、成桩质量和数字化水平具有重要的实践意义。

参考文献

- [1] JAMSAWANG P, VOOTTIPRUEX P, TANSENG P, et al. Effectiveness of deep cement mixing walls with top-down construction for deep excavations in soft clay: case study and 3D simulation[J]. *Acta Geotechnica*, 2019, 14: 225-246.
- [2] 杜策, 张振, 张力, 等. 微扰动四轴搅拌桩数字化施工应用研究[J]. *水文地质工程地质*, 2023, 50(6): 112-119.
DU Ce, ZHANG Zhen, ZHANG Li, et al. Application of digital construction of the minor-disturbance four-axial soil mixing pile[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2023, 50(6): 112-119.
- [3] 张振, 沈鸿辉, 程义, 等. 基于物联网技术的水泥土搅拌桩施工质量评价[J]. *施工技术*, 2020, 49(19): 7-11.
ZHANG Zhen, SHEN Honghui, CHENG Yi, et al. Construction quality evaluation of cement deep mixed column based on internet of things technique[J]. *Construction Technology*, 2020, 49(19): 7-11.
- [4] 郑少河, 陈越, 周小科. 陆上四轴深层水泥搅拌桩机研制及施工关键技术[J]. *地基处理*, 2023, 5(3): 238-247.
ZHENG Shaohu, CHEN Yue, ZHOU Xiaoke. Development of land four-shaft deep cement mixing rig and key construction technology[J]. *Journal of Ground Improvement*, 2023, 5(3): 238-247.
- [5] 朱志铎, 万瑜, 刘松玉, 等. 双向水泥土搅拌桩智能化施工技术研发及实践[J]. *地基处理*, 2022, 4(6): 451-458, 465.
ZHU Zhiduo, WAN Yu, LIU Songyu, et al. Research and practice of the intelligent installation technology of bidirectional cement-soil mixing pile[J]. *Journal of Ground Improvement*, 2022, 4(6): 451-458, 465.

- [6] 王卫东, 翁其平, 陈永才. 56 m 深 TRD 工法搅拌墙在深厚承压含水层中的成墙试验研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(11): 3247-3252.
WANG Weidong, WENG Qiping, CHEN Yongcai. Experimental investigation of construction of a 56 m deep constant thickness cement-soil wall using trench cutting re-mixing deep wall (TRD) method in deep aquifers[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2014, 35(11): 3247-3252.
- [7] 张培印, 王维, 程长宏. 超深双轴搅拌法在海相沉积软黏土地层中的应用[J]. 地基处理, 2021, 3(2): 176-180.
ZHANG Peiyin, WANG Wei, CHENG Changhong. Application of biaxial ultra deep mixing method in marine sedimentary soft clay[J]. *Journal of Ground Improvement*, 2021, 3(2): 176-180.
- [8] PAN H S, TONG L Y, WANG Z S, et al. Effects of soil-cement mixing wall construction on adjacent shield tunnel linings in soft soil[J]. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2022, 47: 13095-13109.
- [9] SHEN S L, MIURA N, KOGA H. Interaction mechanism between deep mixing column and surrounding clay during installation[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2003, 40(2): 293-307.
- [10] 叶观宝, 王艳. 如何控制水泥土搅拌法对土体的扰动[J]. *地下空间与工程学报*, 2007, 3(2): 263-267.
YE Guanbao, WANG Yan. How to control soil disturbance by cement mixing method[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2007, 3(2): 263-267.
- [11] 李青, 杜策, 王理想, 等. 数字化微扰动搅拌桩技术与现场试验研究[J]. *施工技术 (中英文)*, 2023, 52(11): 113-118.
LI Qing, DU Ce, WANG Lixiang, et al. Technology and field testing research on digital minor-disturbance mixing pile[J]. *Construction Technology*, 2023, 52(11): 113-118.
- [12] 刘玉霞, 吴健, 龚秀刚. 微扰动四轴搅拌桩工法及所用施工装备[J]. *工程建设*, 2023, 55(8): 42-47.
LIU Yuxia, WU Jian, GONG Xiugang. Construction method and equipment of micro disturbance four axial mixing pile[J]. *Engineering Construction*, 2023, 55(8): 42-47.
- [13] 王卫东. 软土深基坑变形及环境影响分析方法与控制技术[J]. *岩土工程学报*, 2024, 46(1): 1-25.
WANG Weidong. Analytical methods and controlling techniques for deformation and environmental influence of deep excavations in soft soils[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2024, 46(1): 1-25.
- [14] 上海市住房和城乡建设管理委员会. 基坑工程技术标准: DG/TJ 08—61—2018[S]. 上海: 同济大学出版社, 2018.
Shanghai Municipal Commission of Housing and Urban-rural Development. Technical Code for Excavation Engineering: DG/TJ 08—61—2018[S]. Shanghai: Tongji University Press, 2018.
- [15] TIMONEY M J, MCCABE B A. Strength verification of stabilized soil-cement columns: a laboratory investigation of the push-in resistance test (PIRT)[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2017, 54(6): 789-805.