

DOI: 10.3785/j.issn.2096-7195.2022.06.001

【原位测试专栏】（专栏主持人：刘松玉）

双向水泥土搅拌桩智能化施工技术研发及实践

朱志铎¹, 万瑜¹, 刘松玉^{1*}, 刘锦平²

(1. 东南大学 交通学院, 江苏 南京 211189; 2. 南京路鼎搅拌桩特种技术有限公司, 江苏 南京 211100)

摘要: 为解决常规单向水泥土搅拌桩水泥浆沿桩体垂直分布不均匀、桩体搅拌不均匀和处理深度有限等技术问题, 成功研发双向水泥土搅拌桩技术, 有效保证搅拌桩成桩质量, 提高了搅拌桩施工效率和软基处理能力。目前双向搅拌已经是国内搅拌桩的主流施工方法, 但大量的工程实践和进一步的研究表明, 搅拌桩技术仍存在一些不足之处, 主要表现为设计与施工忽视土体成层性、施工设备自动化程度低、施工质量监控及检验方法落后等。针对这些不足, 以双向水泥土搅拌桩技术为基础, 应用物联网技术, 对水泥土搅拌桩智能化施工技术进行了研究。研究结果表明, 基于土层的精准识别实施变频喷浆, 契合土体的分层特征, 有效保证水泥浆与土体搅拌充分, 实现了水泥土搅拌桩智能化施工; 通过数据共享方式实现施工现场的远程监控, 可对搅拌桩施工全过程进行记录与监测; 实时采集、分析施工参数, 单桩施工完成即时评估其施工质量, 甄别不合格桩, 可为工后检验提供依据, 并可减少工后检验工作量。本文对水泥土搅拌桩智能化施工进行了初步探索, 实践证明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, 这不仅产生重大的经济效益, 而且有效地推进了搅拌桩技术的发展。

关键词: 双向水泥土搅拌桩; 智能化; 施工技术; 变频喷浆; 远程监控; 质量评估

中图分类号: TU472.3

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2022)06-0451-08

Research and practice of the intelligent installation technology of bidirectional cement-soil mixing pile

ZHU Zhi-duo¹, WAN Yu¹, LIU Song-yu^{1*}, LIU Jin-ping²

(1. Department of Transportation, Southeast University, Nanjing 211189, Jiangsu, China;

2. Nanjing Lu-Ding Mixing Pile Special Technology Co., Ltd., Nanjing 211100, Jiangsu, China)

Abstract: In order to solve the technical problems of conventional cement-soil mixing piles such as uneven vertical distribution of cement slurry along the pile body, uneven mixing of the pile body and limited treatment depth, the bidirectional cement-soil mixing pile technology has been successfully developed. This technology effectively guarantees the pile quality of the mixing pile, and improves the construction efficiency of the mixing pile and the soft foundation treatment capacity. At present, the bidirectional soil-cement mixing pile has been the mainstream installation method of mixing piles in China. However, some deficiencies are revealed in a large amount of engineering practice and further research. The main problems are that the design and construction ignore soil stratification, the automation degree of construction equipment is low, and the construction quality monitoring and inspection methods are backward. Concerning these problems, the intelligent installation technology of cement-soil mixing pile is researched based on the bidirectional cement-soil mixing pile and internet of things technologies. The research results show that the variable frequency spraying is implemented based on the accurate identification of the soil layer, which fits the layered characteristics of the soil. This effectively ensures that the cement slurry and the soil are fully mixed, and realizes the intelligent construction of the cement-soil mixing pile. The remote monitoring is realized through data sharing, and the whole process of installation can be recorded and monitored. Collect and analyze construction parameters in real time, evaluate the construction quality of single pile construction immediately after completion of construction, and identify unqualified

收稿日期: 2022-06-07

作者简介: 朱志铎(1963—), 男, 江苏南京人, 博士, 教授, 主要从事特殊土地基处理及环境岩土工程研究工作。E-mail: zhuzhiduo@seu.edu.cn。

*通信作者: 刘松玉(1963—), 男, 江苏靖江人, 东南大学首席教授, 博士生导师。长期从事 CPTU 原位测试以及软土地基处理相关研究。E-mail: liusy@seu.edu.cn。

piles. This can provide a basis for post-work inspection and reduce the workload of post-work inspection. This paper makes a preliminary exploration on the intelligent installation of cement-soil mixing piles. The engineering practices show that the efficiency and quality of cement-soil mixing piles are improved, and the project cost can be reduced significantly. This not only produces significant economic benefits, but also effectively promotes the development of mixing pile technology.

Key words: bidirectional cement-soil mixing pile; intelligent; installation technology; frequency grouting; remote monitoring; quality assessment

0 引言

水泥土搅拌桩是加固软土地基常用方法之一，其原理是利用水泥作为固化剂，通过特质的深层搅拌机械边钻进边往土中喷射水泥浆或水泥粉，并就地将软土和固化剂强制搅拌，通过固化剂和软土之间一系列物理化学作用，形成强度较高、整体性、水稳定好的水泥土柱体^[1]。搅拌法 1954 年研发于美国，发展于日本与北欧等国，时至今日仍然占据软基处理领域主导地位^[2]。我国于 1977 年引进搅拌法后，迅速研发出施工设备并推广应用。经过国内外数十年的应用与研究，搅拌法已经取得了长足的进步。

国外工程师及科研人员主要着重于对水泥土搅拌桩应用场景的扩展，研发思路是提升桩机土体切削与搅拌、黏结剂泵送的能力，提高施工效率。表 1 为国外近些年根据搅拌轴形式研发的新型搅拌法施工设备^[3]。这些施工设备的应用使高水泥掺量（200~320 g/m³）、大直径（Φ1.6~Φ2.4 m）的搅拌桩得以实践，其 28 d 芯样的无侧限抗压强度可达到 4 MPa 左右^[4]。随着桩体力学性能的大幅提升，水泥土搅拌桩已广泛应用于欧洲铁路高架桥、风力发电机等工程的软基处理项目^[5]。

表 1 国外近些年研发的新型搅拌法施工设备
Table 1 New installation equipment developed abroad

搅拌轴形式	设备名称
搅拌轴垂直布置	多轴搅拌设备（双轴、三轴）
搅拌轴水平布置	Mass mixing（芬兰）；CSM（德国）
链式搅拌	TRD（日本）；FMI（德国）

针对搅拌桩施工，国内学者和工程单位近年也取得了不少进展。在新型搅拌桩施工设备及工法方面，刘松玉课题组^[6]从施工技术和复合地基的思路着手，成功研发了双向搅拌桩技术，消除了搅拌桩施工的冒浆现象，提升了搅拌均匀性及施工效率，减小了施工对桩周土的扰动，加固深度可达 30 m^[7]。在双向搅拌桩技术的基础上，研发自动伸缩钻头^[8]，

提出了钉型搅拌桩^[9-14]和变截面搅拌桩技术^[15-18]，显著提高了水泥土搅拌桩单桩承载力和复合地基沉降控制效果，同时节约工程造价。联合塑料排水板，刘松玉等^[19]提出了排水粉喷桩（2D 工法），并通过工程应用论证了该工法加固软基的有效性和优越性^[20]。基于提高施工效率、桩身均匀性等目的也有不少创新性研究。谢晓东等^[21]研发了五轴水泥土搅拌桩施工技术及设备，总结提出五（六）轴水泥土搅拌墙工艺^[22]，对比二轴和三轴水泥土搅拌桩，该技术施工的搅拌桩具有最高的强度和均匀性^[23]，具有明显的经济效益和时间效益。徐超等^[24]基于对上部荷载作用下复合地基中水泥土搅拌桩桩身应力分布特征的认识，在处理深厚软土地基时提出沿桩身变掺量施工工艺。

目前，水泥土搅拌桩喷浆量设计是以设计强度为依据，通过室内配合比试验确定地基土中最软弱土层所需的水泥掺量作为整个桩体的水泥掺量，再结合水灰比、下钻速度和桩长计算均匀喷浆量并应用于现场施工。这种方法主要存在两个方面的问题：

（1）未能考虑地基土的成层性。对于软土层应提高水泥掺量，喷入足量甚至过量的水泥浆，以保证软土层范围内施工质量；对于其他土层则应根据土层条件适当降低水泥掺量，以充分利用土体本身的强度。

（2）水泥浆未充分利用。相对于最软弱土层的水泥掺量，其他土层为达到设计强度所需水泥掺量较低，由此多出的水泥将造成浪费。

《变截面双向搅拌桩技术规程》（T/CECS 822—2021）^[25]规定双向水泥土搅拌桩施工应采用“两搅一喷”的施工工艺，即在下钻过程中边喷浆边搅拌，在提钻过程中仅搅拌不喷浆。“两搅一喷”的施工工艺完全符合水泥土搅拌桩机喷浆口位于搅拌叶片下方的结构设计，但在实际施工时却常常因以下两个问题而难以实施：

（1）送浆管道堵塞。提钻过程中不喷浆，已混合的水泥土和土体中的水泥浆必然从喷浆口倒

灌堵塞送浆管道, 耽误施工。

(2) 人工不易操作。在提钻时立即停止喷浆需要人工手动操作, 较为繁琐; 由于提钻停止喷浆必然导致堵塞送浆管道, 因此引起的误工往往会使施工人员避免这样的繁琐操作。

现场施工常常采用“两搅两喷”的替代方法, 即将总的喷浆量一分为二, 分别在下钻和提钻过程中喷入土体并搅拌。下钻过程中喷入的水泥浆锐减, 且提钻过程中喷入的水泥浆不可能得到充分搅拌, 无法充分发挥加固作用, 水泥土搅拌桩施工质量难以保证^[26]。这也从侧面反映出水泥土搅拌桩施工设备自动化程度低, 过度依赖人工控制。此外, 目前水泥土搅拌桩施工过程监管主要由旁站监理完成, 较为落后。

针对上述问题, 本文基于双向水泥土搅拌桩和物联网技术, 进行了对水泥土搅拌桩智能化施工的研究。研发水泥土搅拌桩智能化施工控制系统, 提出水泥土搅拌桩智能化施工工艺; 考虑土体成层性, 提出基于土层识别的变频喷浆, 针对性加固软土层; 全面监测搅拌桩关键施工参数, 通过数据共享的方式实现对施工现场的远程监控; 分析单桩施工数据, 即时评估单桩施工质量。最后通过工程应用对水泥土搅拌桩智能化施工效果进行验证与评价。水泥土搅拌桩智能化施工提高了桩机的自动化、智能化水平, 降低了搅拌桩施工对人工的依赖, 对保证搅拌桩施工质量具有重要意义。

1 双向水泥土搅拌桩技术

1.1 研发思路

常规单向水泥土搅拌桩主要问题表现在成桩质量难以保证、处理深度偏浅等, 可归纳为以下几个方面:

(1) 水泥浆沿桩体垂直分布不均匀

由于土压力、孔隙水压力沿桩体的垂直变化, 以及土压力、孔隙水压力、喷浆压力的相互作用, 造成水泥浆沿钻杆上行, 冒出地面。因此, 水泥土搅拌桩往往存在桩体上部水泥含量较高, 越往下水泥含量越少的现象。这使水泥土搅拌桩的有效桩长和有效处理深度大大减小, 同时也制约了水泥土搅拌桩的应用范围。

(2) 桩体搅拌不够均匀

由于搅拌叶片的同向旋转, 很难把水泥土充分搅拌均匀, 造成水泥土中有大量土块和水泥浆块, 影响了桩体的强度。

(3) 水泥土搅拌桩的有效桩长和有效处理深度大大减小, 限制了水泥土搅拌桩的应用

针对上述问题, 东南大学在充分研究水泥土搅拌桩的加固机制和影响水泥土深层搅拌桩成桩质量和桩身质量因素的基础上, 经过多年探索, 研制出双向水泥土搅拌桩及其施工工艺, 同时研制了施工机械。经十余年推广应用, 双向水泥土搅拌桩技术已经成为搅拌桩的主流施工方法, 并形成了行业技术规范。

双向水泥土搅拌桩具有下列优点:

(1) 对常规设备进行适当改进, 易于推广。

(2) 通过外钻杆叶片的反向搅拌, 阻断浆液上冒途径, 不会出现冒浆现象。保证水泥土搅拌桩桩体中的水泥掺入量, 提高水泥浆分布均匀性。

(3) 正反向旋转叶片同时双向搅拌, 把水泥浆控制在两组叶片之间, 使水泥土充分搅拌均匀, 保证了成桩质量, 特别是水泥土搅拌桩深层桩体质量。

(4) 由正反向叶片同时旋转、切割、搅拌水泥土体, 使工效提高一倍以上。

1.2 双向水泥土搅拌桩设备

双向水泥土搅拌桩是指在水泥土搅拌桩成桩过程中, 由动力系统带动分别安装在内、外同心钻杆上的两组搅拌叶片, 同时正、反向旋转搅拌水泥土而形成的水泥土搅拌桩。

该装置对常规单向水泥土搅拌桩成桩机械的动力传动系统、钻杆以及钻头进行改进, 采用同心双轴钻杆, 在内钻杆上设置正向旋转搅拌叶片并设置喷浆口; 在外钻杆上安装反向旋转搅拌叶片, 通过外钻杆上叶片反向旋转过程中的压浆作用和正、反向旋转叶片同时双向搅拌水泥土的作用, 阻断水泥浆上冒途径, 把水泥浆控制在两组叶片之间, 保证水泥浆在桩体中均匀分布和搅拌均匀, 确保成桩质量 (图 1)。

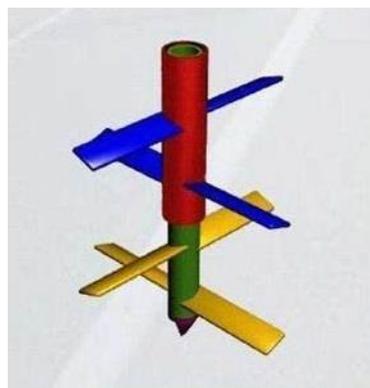


图 1 双向水泥土搅拌桩钻头

Fig. 1 Mixing wing of bidirectional cement-soil mixing pile

1.3 施工工艺

双向水泥土搅拌桩施工工艺如图2所示。

双向水泥土搅拌桩的施工工艺和常规水泥土搅拌桩的施工工艺基本相似。具体操作步骤如下：

(1) 整平场地。

(2) 双向搅拌桩机定位：起重机悬吊搅拌机到指定桩位并对中。

(3) 搅拌下沉：启动双向搅拌桩机，使双向搅拌桩机钻杆沿导向架向下切土，开启送浆泵，向土体喷水泥浆，双向搅拌桩机钻杆上分别正反向旋转的叶片同时旋转搅拌水泥土。

(4) 双向搅拌桩机钻杆持续下沉并搅拌水泥土，直到设计深度。

(5) 搅拌提升的同时，双向搅拌桩机钻杆上正反向旋转的叶片继续搅拌水泥土。

(6) 提升、搅拌到地表上或设计标高以上50 cm，完成双向水泥土搅拌桩的施工。

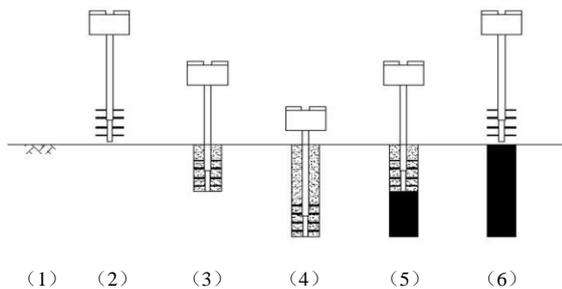


图2 双向水泥土搅拌桩施工工艺流程图

Fig. 2 Construction procedure of bidirectional cement-soil mixing pile

2 双向水泥土搅拌桩智能化施工控制系统、设备及工艺

2.1 双向水泥土搅拌桩智能化施工控制系统

双向水泥土搅拌桩智能化施工基于物联网技术与理念，通过提升施工设备自动化和智能化水平，降低水泥土搅拌桩施工对人工控制的依赖，严格实施标准化施工及全方位监管，以保证水泥土搅拌桩施工质量。

双向水泥土搅拌桩智能化施工控制系统主要由数据采集模块、监控主机、在线式自动制浆站、云端服务器和远程监控模块组成，如图3所示。数据采集模块负责采集施工深度、喷浆量、钻杆电流、桩体垂直度等各项施工数据，并有线传输至监控主机。监控主机对施工数据进行分析处理后上传至云端服务器，同时控制在线式自动制浆站实时调

整喷浆量。在线式自动制浆站按照设定的水灰比自动制备及保存水泥浆，并上传制浆数据至云端服务器。远程监控模块供业主、施工、监理和设计等项目相关单位随时登陆云端服务器查看或下载各项施工数据及处理结果，掌控现场每台桩机施工状况，实现对施工现场的远程监控。

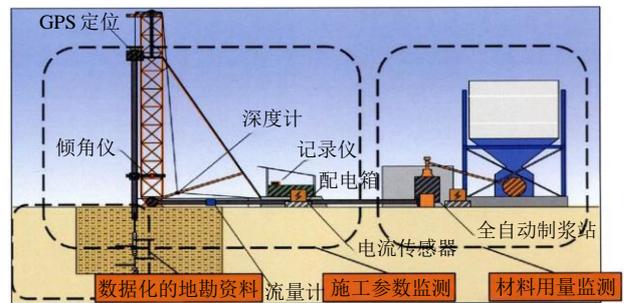


图3 双向水泥土搅拌桩智能化施工控制系统结构

Fig. 3 Structure of intelligent construction control system for bidirectional cement-soil mixing pile

2.2 双向水泥土搅拌桩智能化施工设备

双向水泥土搅拌桩智能化施工控制系统基于目前常用的双向水泥土搅拌桩机研发，通过在双向水泥土搅拌桩机上安装测斜仪、深度仪、电磁流量计、电流计等传感器及监控主机（图4），同时配置在线式自动制浆站，即完成对常规双向水泥土搅拌桩施工设备的智能化升级。

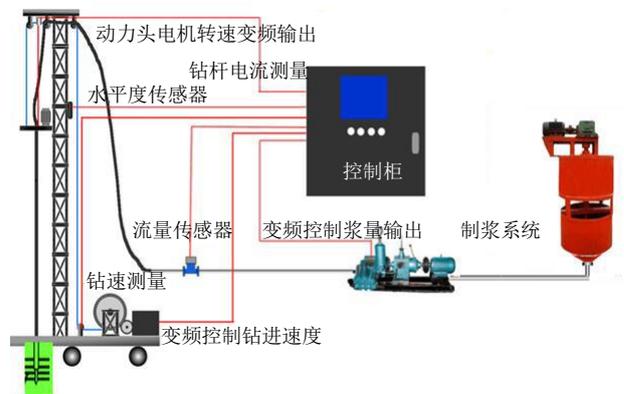


图4 双向水泥土搅拌桩智能化施工设备

Fig. 4 Intelligent construction equipment of bidirectional cement-soil mixing pile

2.3 施工工艺

双向水泥土搅拌桩智能化施工实施变频喷浆的施工工艺，即下钻时根据所遇土层实际条件实时调整喷浆量，保证软土层喷入足量甚至过量的水泥浆，在其他土层少喷浆；提钻时则切换为少量均匀喷浆，防止钻杆堵塞。

下钻时实时调整喷浆量基于准确识别土层。双向搅拌桩配置内、外两根钻杆，内钻杆嵌套于外钻

杆内, 在下钻搅拌过程中不接触土壤, 主要受土壤对搅拌叶片的阻力作用。内钻杆所受阻力可用其驱动电机的电流值定量表征。根据现场实测, 当土层条件较差时, 内钻杆所受阻力较小, 电流值较低; 当土层条件较好时, 内钻杆所受阻力较大, 电流值较高。结合施工场地的地质勘察报告、试桩试验和室内配合比试验, 建立内钻杆电流-土层-喷浆量的定量关系。双向水泥土搅拌桩智能化施工按以下步骤进行:

(1) 桩机就位, 打开监控主机, 将内钻杆电流-土层-喷浆量的定量关系输入监控主机。

(2) 输入桩号, 点击监控主机屏幕上的“开始”按钮。

(3) 切土下沉。桩机启动, 沿导向架向下切土, 监控主机根据内钻杆电流实时判别土层, 调整喷浆量, 两组叶片同时正、反向旋转切割、搅拌土体, 搅拌机持续下沉, 直到设定深度。

(4) 提升搅拌。搅拌机提升, 两组叶片同时正反向旋转搅拌水泥土, 喷浆速度下降并固定为 20 L/min, 在地表或设计桩顶标高以上 50 cm 处停止。

(5) 点击监控主机屏幕上的“完成”按钮, 结束一根桩的施工。

(6) 桩机移位, 点击“桩号自增”按钮, 按上述步骤(2)~(5)施工下一根桩。

3 双向水泥土搅拌桩智能化施工质量控制

双向水泥土搅拌桩智能化施工质量控制包括远程监控和即时单桩质量评估两个方面的内容。

3.1 远程监控

远程监控基于远程数据共享的方法, 将所有施工数据及数据分析处理结果上传、存储于云端服务器, 供业主、施工、监理和设计等单位随时自行登陆云端服务器查看或下载, 实现对施工现场实际施工情况的远程监控。

3.2 单桩施工质量评估

即时单桩质量评估选取桩长、喷浆量和垂直度作为单桩施工质量评估指标, 每根单桩施工完成时, 监控主机先根据采集的施工数据进行单项指标评分, 再对单向指标的评分进行加权后得到单桩施工质量评分, 最后根据单桩施工质量评分确定单桩质量等级。

单桩质量等级如表 2 所示, 单桩质量评估方法如表 3 所示。任意一个单项指标评分为 0, 则该桩单桩质量等级直接判定为 D。单桩质量等级为 A 或 B 的桩判定为合格桩, 单桩质量等级为 C 或 D 的桩判定为不合格桩。不合格桩应立即采取返工、补桩等措施进行补救。

表 2 单桩质量等级评定表

Table 2 Quality rating of single pile installation

单桩施工质量评分 S	$90 \leq S \leq 100$	$80 \leq S < 90$	$70 \leq S < 80$	$S < 70$
单桩质量等级	A	B	C	D

表 3 单桩施工质量评分表

Table 3 Quality score of single pile installation

实际值与设计值的偏差 Δ	单项指标评分			单桩施工质量评分
	桩长	喷浆量	垂直度	
$\Delta < 2\%$	100	100	100	$S = \sum S_i \times P_i$
$2\% \leq \Delta < 5\%$	80	80	80	
$5\% \leq \Delta < 8\%$	60	60	60	
$\Delta \geq 8\%$	0	0	0	

注: P_i 为单项指标在总分中的占比, 其中桩长占比 $P_1=40\%$, 喷浆量占比 $P_2=40\%$, 垂直度占比 $P_3=20\%$ 。

4 工程实例

4.1 工程概况

武汉市某软基处理工程采用水泥土搅拌桩智能化施工, 水泥土搅拌桩设计参数为: 桩长为 15 m,

桩径为 0.6 m, 正三角形布桩, 桩间距为 1.5 m。水泥浆水灰比为 0.5, 水泥掺量为 87 kg/m。28 d 取芯强度要求不低于 0.6 MPa。施工场地内各土层物理力学指标如表 4 所示, 根据地勘资料、现场试桩试验、室内配合比试验建立的内钻杆电流-土层-喷浆量定量关系如表 5 所示。

表4 施工场地内土层物理力学指标

Table 4 Physico-mechanical characteristics indexes of soil at construction site

土层	层厚/m	含水量 w/%	重度 $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^3)$	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$	压缩模量 E_s/MPa	天然地基承载力特征值 f_{ak}/kPa
① ₋₁ 杂填土	0.5~1.0	28.6	21.0	15	6	3.0	70
② ₋₁ 粉质黏土	3.3~4.2	35.2	20.3	16	7	1.5	90
③ ₋₁ 黏土	1.8~3.5	21.4	22.6	30	8	6.0	100
④ ₋₁ 淤泥	≈5.0	41.9	18.1	15	5	2.0	40
④ _{-2b} 黏土	>2.0	23.7	23.2	30	15	6.5	130

表5 施工场地内钻杆电流-土层-喷浆量关系

Table 5 Relationship of internal shaft current-soil layer-grouting amount at construction site

土层	内钻杆电流/A	喷浆量/(L·m ⁻¹)	
		下钻	提钻
① ₋₁ 杂填土	30~40	55	10
② ₋₁ 粉质黏土	50~60	15	10
③ ₋₁ 黏土	40~50	35	10
④ ₋₁ 淤泥	20~30	75	10
④ _{-2b} 黏土	40~50	35	10

4.2 单桩质量评估分析

单桩施工完成时, 监控主机根据采集的施工数据对单桩施工质量进行了评估, 随机选取3根单桩(编号为C1、C2和C3)的施工质量评估结果如表6所示。从单项指标评分结果可以看出, 喷浆量的控制效果最好, 实际值与设计值偏差均控制在满分范围内; 桩长控制效果次之, 仅C1的实际桩长与设计桩长略有偏差; 垂直度控制效果较差, 评分均为80。从单桩质量评估结果来看, 随机选取的3根单桩质量等级分别为B、A、A, 均为合格桩。

表6 C1~C3 单桩施工质量评估

Table 6 Installation quality assessment of single column

桩号	单项指标评分						单桩施工质量评分 S	单桩质量等级
	桩长/m		喷浆量/(L·min)		垂直度			
	Δ	S_i	Δ	S_i	Δ	S_i		
C1	2.9%	80	1.9%	100	4.3%	80	88	B
C2	1.7%	100	1.5%	100	4.3%	80	94	A
C3	1.6%	100	1.4%	100	4.2%	80	94	A

4.3 双向水泥土搅拌桩智能化施工效果

随机选取的3根单桩的喷浆量随深度的变化如图5所示。从图中可以看出, 在下钻过程中, 监控主机准确识别了土层并实时调整了喷浆量, 在④₋₁淤泥层喷入了足量的水泥浆, 在其他土层也按照设定的喷浆量做了准确的调整。提钻时自动切换为少量均匀喷浆模式, 有效防止钻杆堵塞的同时避免了水泥浆浪费, 提高了水泥浆利用率。

施工完成28d后对C1~C3进行了取芯检测, 在每个土层分别取样做无侧限抗压强度测试, 测试结果如图6所示。从图中可以看出, ④₋₁淤泥层范围内的桩体强度超过了0.6 MPa, 满足设计要求。位于其他土层内的桩体强度同样达到了设计要求的0.6 MPa, 且均未超过0.7 MPa。从强度曲线来看, 上部桩体的强度略高于下部桩体强度。整体而言, 单桩施工质量合格, 这也验证了4.2节中的单桩施

工质量评估结果的准确性和可靠性。

综上, 双向水泥土搅拌桩智能化施工可实施准确有效的土层识别和变频喷浆, 有效保证了软土层范围内的桩体强度及搅拌桩整体的均匀性; 监控主机在单桩施工完成时作出的单桩施工质量评估准确可靠, 可在一定程度上代替工后取芯检验。

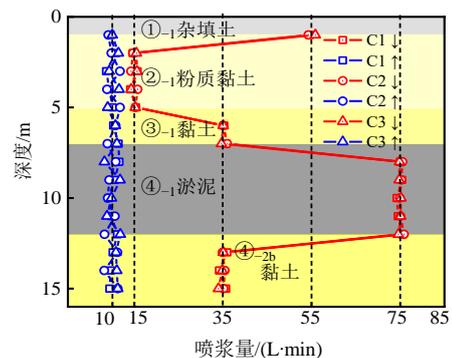


图5 C1~C3 喷浆量-深度曲线

Fig. 5 Grouting amount-depth curves of C1~C3

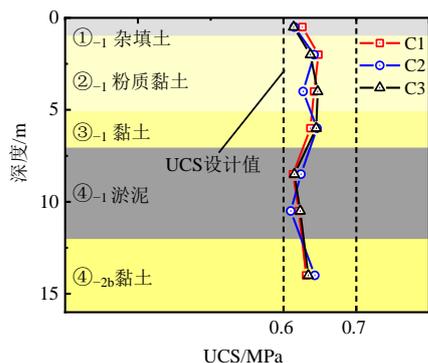


图6 C1~C3 28 d 龄期取芯检测 UCS 结果

Fig. 6 28-days coring detection UCS results of C1~C3

5 结论

本文应用物联网技术,以双向水泥土搅拌桩技术为基础,着眼于提升施工设备自动化、智能化水平,研发水泥土搅拌桩智能化施工技术,基于土层精准识别建立变频喷浆模式,通过数据共享实现施工现场的远程监控以及根据施工数据实时评估单桩施工质量,并进行了工程应用,主要得出以下结论:

(1) 双向水泥土搅拌桩主要解决了常规单向水泥土搅拌桩应用中的技术难题,确保了成桩质量,提高了施工效率,加深了软基处理深度,具有很好的适用性和经济性。

(2) 双向水泥土搅拌桩智能化施工可通过内钻杆电流准确识别实际土层条件,实施变频喷浆。变频喷浆契合桩机喷浆口在下、搅拌叶片在上的结构布置,符合土体成层性特征。

(3) 双向水泥土搅拌桩智能化施工可全程监控关键施工参数,通过云端服务器与工程相关单位共享数据,实现对施工现场的远程监控,有效保证施工过程管理与质量控制。

(4) 双向水泥土搅拌桩智能化施工可通过对施工数据的深入分析,在单桩施工结束即时对其施工质量进行评估,有效预测不合格桩,可在一定程度上为工后检验提供参考,降低工后检验工作量。

(5) 工程应用表明,双向水泥土搅拌桩智能化施工可按照设定程序实施标准化施工,降低了搅拌桩施工对人工的依赖,有效保证搅拌桩施工质量,具有显著的社会经济效益。

参考文献

[1] LIU S Y, DU Y J, PUPPALA A J. Field investigation on

performance of T-shaped deep mixed soil cement column-supported embankments over soft ground[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2011, 138: 718-727.

[2] TOPOLNICKI M. 20-years of deep soil mixing in Poland and lessons learned[C]//International On-line Conference of Deep Mixing: Best Practice and Legacy, 2021.

[3] TERASHI M, KITAZUME M. QA/QC for deep-mixed ground: current practice and future research needs[J]. Ground Improvement, 2011, 164(13): 161-177.

[4] TOPOLNICKI M. General overview and advances in deep soil mixing[C]//XXIV Geotechnical Conference of Torino Design, Construction and Controls of Soil Improvement Systems, 2016.

[5] TOPOLNICKI M, SOLTYS G. Novel application of wet deep soil mixing for foundation of modern wind turbines[C]//Proceedings of the 4th International Conference on Grouting and Deep Mixing, 2012.

[6] 刘松玉, 易耀林, 朱志铎. 双向搅拌桩加固高速公路软土地基现场对比试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(11): 2272-2280.

LIU Song-yu, YI Yao-lin, ZHU Zhi-duo. Comparison tests on field bidirectional mixing column for soft ground improvement in expressway[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(11): 2272-2280.

[7] 刘松玉, 席培胜, 储海岩, 等. 双向水泥土搅拌桩加固软土地基试验研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(3): 560-564.

LIU Song-yu, XI Pei-sheng, CHU Hai-yan, et al. Research on practice of bidirectional deep mixing cement-soil columns for reinforcing soft ground[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(3): 560-564.

[8] 刘松玉, 宫能和, 冯锦林, 等. 钉型水泥土搅拌成桩操作方法: 中国, 200410065863.3[P]. 2007-09-12.

LIU Song-yu, GONG Neng-he, FENG Jin-lin, et al. Operation Method of T-Shape Cement Soil Mixing Pile: China, 200410065863.3[P]. 2007-09-12.

[9] 刘松玉, 朱志铎, 席培胜, 等. 钉型搅拌桩与常规搅拌桩加固软土地基的对比研究[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(7): 1059-1068.

LIU Song-yu, ZHU Zhi-duo, XI Pei-sheng, et al. Comparison between T-shaped deep mixing method and traditional deep mixing method for soft ground improvement[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(7): 1059-1068.

- [10] 朱志铎, 刘松玉, 席培胜, 等. 钉形水泥土双向搅拌桩加固软土地基的效果分析[J]. 岩土力学, 2009, 30(7): 2063-2067.
ZHU Zhi-duo, LIU Song-yu, XI Pei-sheng, et al. Analysis of effect of T-shaped bidirectional soil-cement deep mixing columns reinforcing soil foundation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(7): 2063-2067.
- [11] 易耀林, 刘松玉, 李涛, 等. 钉形搅拌桩单桩承载力及荷载传递特性的数值模拟研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(6): 1843-1849.
YI Yao-lin, LIU Song-yu, LI Tao, et al. Numerical simulation of bearing capacity and load transfer behavior of single T-shaped deep mixing column[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(6): 1843-1849.
- [12] 易耀林, 刘松玉. 钉形搅拌桩复合地基荷载试验的三维数值模拟[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2008, 38(5): 821-827.
YI Yao-lin, LIU Song-yu. 3D numerical analysis on bearing tests of T-shaped cement-soil deep mixing column composite foundation[J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2008, 38(5): 821-827.
- [13] YI Y L, LIU S Y, PUPPALA A J. Bearing capacity of composite foundation consisting of T-shaped soil-cement column and soft clay[J]. Transportation Geotechnics, 2018, 15: 47-56.
- [14] YI Y L, LIU S Y, PUPPALA A J. Vertical bearing capacity behavior of single T-shaped soil-cement column in soft ground: laboratory modeling, field test, and calculation[J]. Acta Geotechnica, 2017, 12: 1077-1088.
- [15] 易耀林, 刘松玉, 赵玮, 等. 变径双向水泥土搅拌桩施工技术[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(增刊 2): 387-390.
YI Yao-lin, LIU Song-yu, ZHAO Wei, et al. Installation of variable diameter soil-cement double mixed column[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(S2): 387-390.
- [16] 向玮, 刘松玉, 经绯, 等. 深长变径搅拌桩荷载传递规律的试验研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(9): 2765-2771.
XIANG Wei, LIU Song-yu, JING Fei, et al. Field test research on load transfer law of long soil-cement deep mixing columns with different cross-sections[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(9): 2765-2771.
- [17] 易耀林, 刘松玉, 杜延军, 等. 变径水泥土搅拌桩单桩承载力试验研究[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2010, 40(2): 352-356.
YI Yao-lin, LIU Song-yu, DU Yan-jun, et al. Filed test on bearing capacity of single diameter-varied soil-cement deep mixed column[J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2010, 40(2): 352-356.
- [18] 向玮, 刘松玉, 经绯, 等. 变径水泥土搅拌桩复合地基承载特性的试验研究[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2009, 39(2): 328-333.
XIANG Wei, LIU Song-yu, JING Fei, et al. Bearing capacity of composite foundation of soil-cement deep mixing columns with different cross-section parts[J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2009, 39(2): 328-333.
- [19] 刘松玉, 杜广印, 洪振舜, 等. 排水粉喷桩加固软土地基(2D工法)的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(8): 869-875.
LIU Song-yu, DU Guang-yin, HONG Zhen-shun, et al. On combined method of dry mixing with vertical drain and its practice in soft ground improvement[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(8): 869-875.
- [20] 杜广印, 李海涛, 刘松玉, 等. 粉喷桩施工过程对桩周土影响机理分析[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2010, 40(4): 835-839.
DU Guang-yin, LI Hai-tao, LIU Song-yu, et al. Analysis of effect mechanism on soils between piles in dry jet mixing construction[J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2010, 40(4): 835-839.
- [21] 谢晓东, 卢寿根, 谢益飞, 等. 一种五轴水泥土搅拌桩装置及施工方法: 中国, 201210014492.0[P]. 2012-07-04.
XIE Xiao-dong, LU Shou-gen, XIE Yi-fei, et al. A Five Axis Cement Soil Mixing Pile Device and Its Construction Method: China, 201210014492.0[P]. 2012-07-04.
- [22] 赵春风, 邹豫皖, 赵程. 基于强度试验的五轴水泥土搅拌桩新技术研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(2): 376-381.
ZHAO Chun-feng, ZHOU Yu-wan, ZHAO Cheng. Experimental research on strength of five-axis cement-soil mixed piles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(2): 376-381.
- [23] 郑赉济, 梁志荣, 李伟, 等. 五轴水泥土搅拌墙在地下两层基坑中的应用[J]. 地下空间与工程学报, 2014, 10(增刊 2): 1860-1865.