

DOI: 10.7672/sgjs2023110113

数字化微扰动搅拌桩技术与现场试验研究*

李青^{1,2}, 杜策³, 王理想⁴, 郁文博⁵

(1. 华东建筑设计研究院有限公司, 上海 200011; 2. 上海基坑工程环境安全控制与工程技术研究中心, 上海 200011;
3. 上海渊丰地下工程技术有限公司, 上海 201615; 4. 上海市基础工程集团有限公司, 上海 200433;
5. 上海工程机械厂有限公司, 上海 201901)

[摘要] 常规水泥土搅拌桩工艺存在桩身强度分布不均、施工扰动较大、桩体质量受人为因素影响大等问题, 故研发数字化微扰动四轴搅拌桩技术, 在成桩过程中, 4 个钻头可同时喷射浆液和气体, 与多层可变角度切削叶片共同切削土体, 辅以上下转换喷浆工艺, 解决桩身强度分布不均的难题, 有效减少水泥用量。借助异形钻杆和浆气压力自动控制功能, 降低成桩施工过程中的扰动, 成桩全过程由数字化控制系统自动完成。现场试验表明, 四轴能以 13%~15% 的水泥掺量达到 0.8MPa 的强度要求, 实现了对周边土体的微小扰动。

[关键词] 地基; 数字化; 搅拌桩; 钻杆; 自动化成桩; 试验

[中图分类号] TU472

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2023)11-0113-06

Technology and Field Testing Research on Digital Minor-disturbance Mixing Pile

LI Qing^{1,2}, DU Ce³, WANG Lixiang⁴, YU Wenbo⁵

(1. East China Architecture Design & Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200011, China;

2. Shanghai Engineering Research Center of Safety Control for Facilities Adjacent to Deep Excavations,

Shanghai 200011, China; 3. Shanghai Yuanfeng Underground Engineering Co., Ltd., Shanghai 201615, China;

4. Shanghai Foundation Engineering Co., Ltd., Shanghai 200433, China;

5. Shanghai Engineering Machinery Co., Ltd., Shanghai 201901, China)

Abstract: In practice, soil mixing piles generally have non-uniform strength, large disturbance and are vulnerable to anthropic factors. To tackle these problems, a digital minor-disturbance four-axial soil mixing pile technique is newly developed. The four augers are able to inject cement slurry and compressible air simultaneously, cutting the soil around them with the help of multiple-layer blades and drilling and withdrawing conversion grouting technique. In this way, the soil and cement slurry can be mixed uniformly. By the aid of special shaped shaft and automatic controlling of slurry and air pressure, construction disturbance is reduced. The field test results show that four-axial meet the strength requirements of can be 0.8MPa at a cement content of 13%~15% in weight, and the influence of pile construction is minor.

Keywords: foundation; digital; mixing pile; shaft; automatic piling; testing

0 引言

水泥土搅拌桩施工主要通过搅拌钻头将水泥和土体进行原位搅拌, 形成具有一定强度和抗渗性能的桩体。常用的搅拌桩包含单轴、双轴、三轴及五(六)轴水泥土搅拌桩等, 在喷浆和搅拌工艺上各

不相同。

单轴搅拌桩只有 1 根钻杆, 通过底部喷浆叶片搅拌, 因钻杆与叶片数量少, 工效较低。双轴搅拌桩包含 2 根钻杆, 中间设置单独的浆管喷浆, 2 根钻杆不具有喷浆功能, 因此两侧钻头需反复搅拌才能使中间浆管喷出的浆液在平面范围内分布均匀, 所以双轴施工时应采用两喷三搅工艺, 制约双轴施工效率。受动力和搅拌叶片数量限制, 双轴不适用于

* 上海市自然科学基金(23ZR1414700); 上海市科委科技计划项目(22dz1202900); 上海市青年科技英才扬帆计划(22YF1409600)

[作者简介] 李青, 高级工程师, E-mail: lq0501230@126.com

[收稿日期] 2023-01-24

硬土层,桩身水泥均匀性较差,最大施工深度约 18m^[1]。三轴搅拌桩包含 3 根钻杆,通过两侧喷浆、中间喷压缩空气,使中间桩的强度比两侧小,桩体在平面上存在薄弱环节。此外,三轴搅拌桩采用的浆液水胶比较大,一定程度上降低桩身强度,施工过程中置换的水泥土体积较大。五轴(六轴)搅拌桩是在双轴和三轴基础上增加钻杆和搅拌叶片数量,提高工效、使土体和浆液搅拌更充分^[2-3],但搅拌成桩原理并未改变,桩身质量和双轴、三轴搅拌桩基本相同。

水泥土搅拌桩施工时,主要由叶片搅拌导致土体挤压和拉裂作用,以及水泥浆液渗透和劈裂作用扰动土体^[4-5],但关于搅拌桩施工扰动的现场试验研究相对较少。龚灵迪等^[6]通过现场试验,比较 4 种水泥掺量的三轴搅拌桩施工对周边土体变形的影响,发现搅拌桩周边土体扰动和水泥掺量存在正相关性,当水泥掺量从 13% 提高至 20% 时,在浆液压力挤压和劈裂作用下,距桩身 2.75m 处的土体最大水平位移从 5mm 增大至 22mm。若降低搅拌桩的施工影响,需要减小搅拌钻头对土体的切割作用,并降低钻头附近的浆液压力。由于常规搅拌桩施工扰动大,在邻近市政设施、保护建筑等敏感环境中施工时,通常采用全方位高压旋喷注浆(MJS 工法)或微扰动搅拌桩(IMS 工法)等方法。

同时,常规搅拌桩施工时的搅拌下沉、提升速度、喷浆量等关键参数与操作人员经验等人为因素密切相关,导致搅拌桩施工过程不透明、关键施工参数难以追溯,难以有效管控搅拌质量。

1 四轴搅拌桩设备组成与特点

数字化微扰动四轴搅拌桩设备由搅拌系统、桩架系统、供气系统、自动制浆与供浆系统及数字化施工控制系统组成,具有功率大、施工效率高、施工扰动小、数字化程度高等优势。四轴搅拌桩包含 4 根钻杆,如图 1 所示,最大施工深度可达 45m。

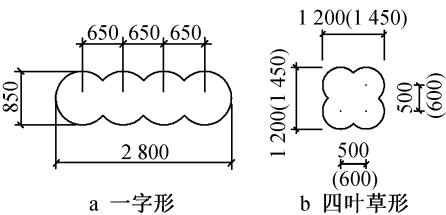


图 1 四轴搅拌桩类型

Fig.1 Type of four-axial soil mixing pile

1.1 搅拌喷射工艺

如图 2 所示,在 4 根钻杆内部均同时配置喷浆管和喷气管,成桩过程中,钻头可同时喷射浆液和

压缩空气,避免部分钻杆喷浆、部分钻杆喷气,导致桩身强度平面分布不均的问题。同时,由于每根钻杆均有压缩空气介入,可充分减小搅拌阻力,有助于在较硬的黏土和砂土中施工,有利于水泥浆液和土体充分搅拌^[7]。压缩空气可加速水泥土碳化过程,提高搅拌桩中水泥土的早期强度。

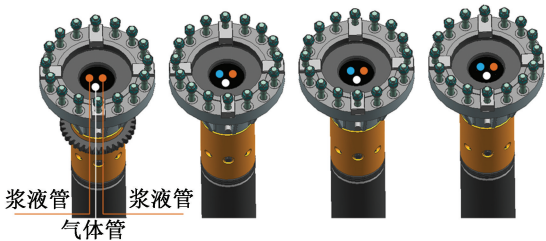


图 2 钻杆内部喷浆(气)管布置

Fig.2 Arrangement of inner slurry and air pipes

在四轴搅拌钻头上设置 7 层可变角度的搅拌叶片,单点土体搅拌次数可达 50 次,远超规范建议的 20 次。在搅拌钻头上配置差速叶片,成桩过程中不随钻杆转动,可有效防止形成黏土泥球,既增加土体搅拌次数,也防止搅拌过程中形成大土块,保证土体与浆液搅拌均匀。

1.2 上下转换喷浆

四轴搅拌桩采用如图 3 所示的上下转换喷浆技术。在搅拌钻头上设置上、下层喷浆口,下沉时开启下喷浆口,喷出的浆液在上部搅拌叶片作用下与土体充分搅拌,转为提升时,关闭下喷浆口,同时开启上喷浆口,这样上喷浆口喷出的浆液在下层叶片作用下与土体充分搅拌,有效解决双轴和三轴提升过程中,底部喷射口喷射浆液无法被搅拌叶片充分搅拌的问题。使下沉和搅拌全过程中的浆液与土体都能得到充分搅拌,进一步改善桩身深度范围内的水泥土均匀性。

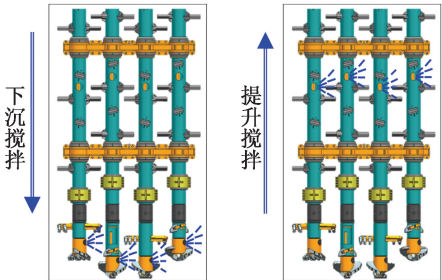


图 3 上下转换喷浆工艺

Fig.3 Technology of upper and lower conversion grouting

2 施工工艺与桩身强度特性

2.1 施工工艺及参数

四轴搅拌桩施工前应进行试成桩试验,确定好施工参数后由数字化施工控制系统实现成桩自动

化施工。结合工程经验,施工参数如表 1 所示。

与常规搅拌桩不同,四轴搅拌桩搅拌下沉与提升时所用水胶比分别为 1.0~1.5,0.8~1.0。下沉搅拌时水泥浆液水胶比较大,对土体软化作用更充分,可有效减小搅拌阻力,提高其在硬土层中的搅拌效率,下沉阶段浆液用量根据搅拌土体性质约占总浆量的 20%~60%。而提升阶段由于桩身范围内土体已经过一次搅拌,搅拌阻力大大降低,因此采用较小的水胶比以增强桩身强度和防水性能。

2.2 现场试验

湖州南浔某河道驳岸采用 L 形护坡挡土墙,如图 4 所示。挡墙下分布③淤泥质粉质黏土、④粉质黏土、⑤黏质粉土夹粉质黏土、⑥淤泥质粉质黏土。其中③淤泥质粉质黏土中的黏土含水量大、强度低,为避免施工后土体沉降过大,对上部挡土墙结构产生影响,对墙底以下 15m 范围内的土体采用 $\phi 850@650$ 四轴搅拌桩加固地基。搅拌桩水泥掺量为 13%,下沉水胶比为 1.5,提升水胶比为 0.8,下沉和提升喷浆占比分别为 30%,70%。

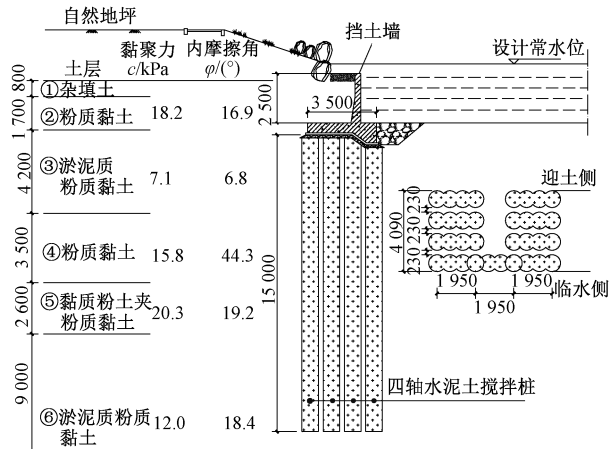


图 4 河道驳岸地基加固剖面示意
Fig.4 Profile of a bank revetment foundation reinforcement

分别选取 21,28d 龄期进行现场标准贯入试验及室内芯样抗压强度试验。如图 5 所示,标贯击数在桩顶附近较大、底部略小,中部桩身标贯技术分布较均匀。在 21d 测得的标贯击数均>15 击,尤其在墙底附近的淤泥质粉质黏土层,标贯击数接近

30。28d 标贯基数比 21d 略有增加,均>20 击,尤其在桩底附近的击数增加明显。对采集的水泥土芯样进行无侧限抗压试验,桩身范围内 21d 芯样强度均>0.8MPa,验证压缩空气的介入一定程度上增加水泥土早期强度。

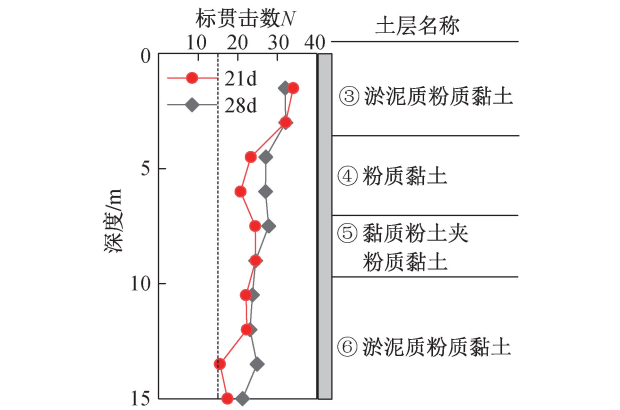


图 5 现场标准贯入击数沿深度变化曲线
Fig.5 Variation of field standard injection number along depth

现场试验表明,采用浆液和压缩空气同时喷射,结合上下转换喷浆工艺,四轴搅拌桩能实现以 13%~18%水泥掺量达到常规工程对水泥土搅拌桩强度的要求。同时由于水泥掺量小于三轴水泥土搅拌桩,施工过程中的置换土较少。

3 成桩施工微扰动控制

3.1 微扰动成桩原理

四轴搅拌桩采用如图 6a 所示的异形钻杆,在钻杆转动下沉或提升过程中,会在钻杆周边形成排浆、排气通道,当搅拌钻头附近压力超过土体原位应力时,浆液沿钻杆周边排浆通道自然排出,从而避免搅拌钻头附近浆体压力聚集增大,对土体造成挤压的情况。

另一方面,在四轴搅拌钻头上配备地内压力传感器,能实时监测地内压力变化情况,数字化控制系统根据监测数据自动调节浆气压力,可确保钻头附近地内压力保持在预估合理范围内。通过合理控制地内压力、自主排浆,大大降低搅拌和喷浆过程对原位土体应力场的影响。同时,在钻杆底部配置如图 6b 所示的差速叶片,可有效防止黏土粘附钻

表 1 施工参数建议值

土层名称	搅拌下沉速度/ ($\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$)	搅拌提升速度/ ($\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$)	加气压力/ MPa	下沉 水胶比	提升 水胶比	下沉喷浆 占比/%
淤泥质土	0.5~0.8	0.8~1.5	0.2~0.4	1.0~1.2	0.8~0.9	20~40
黏性土	0.5~1.0	0.8~1.5	0.3~0.4	1.2~1.5	0.8~1.0	30~60
粉土、砂土	0.5~1.0	0.8~1.5	0.3~0.5	1.2~1.5	0.8~1.0	30~60

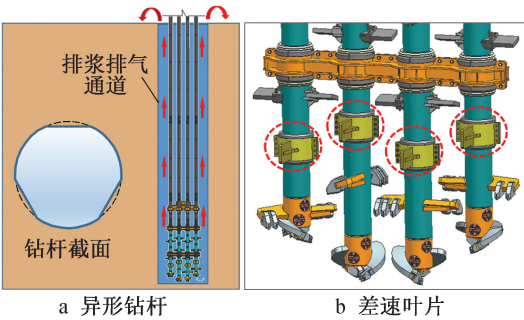


图 6 减小施工扰动措施

Fig.6 Measures to mitigate disturbance

杆和泥球形成,进一步降低因搅拌阻力过大扰动周边土体。

3.2 现场试验

1)南京地铁 6 号线明故宫站基坑加固

南京地铁 6 号线明故宫站地下结构共 5 层,周边环境条件复杂,基坑内采用 $\phi 850@650$ 四轴搅拌桩进行裙边加固,加固深度为 15m。搅拌桩水泥掺量为 13%,下沉水胶比为 1.5,提升水胶比为 0.8,地内压力控制系数为 1.3,下沉喷浆占比为 30%。在桩位附近布置如图 7 所示的地表沉降监测点及深层土体测斜点,以研究施工扰动情况。

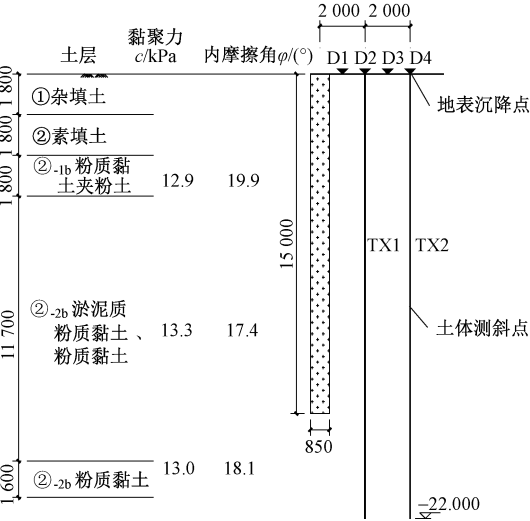


图 7 明故宫站土体变形监测点剖面布置

Fig.7 Layout of monitoring point profile of soil deformation for Ming Palace Museum Station

四轴搅拌桩施工完成后,在距试验桩中心 2,4m 处布置测斜点,土体测斜曲线如图 8a 所示。试成桩施工土体产生远离试验桩的水平位移,位移量随着与试验桩的距离不断减小。距离桩中心 2m 处最大水平位移为 4.8mm,距离桩中心 4m 处最大水平位移约 3.3mm。

地表隆起曲线如图 8b 所示,施工期间,桩周围

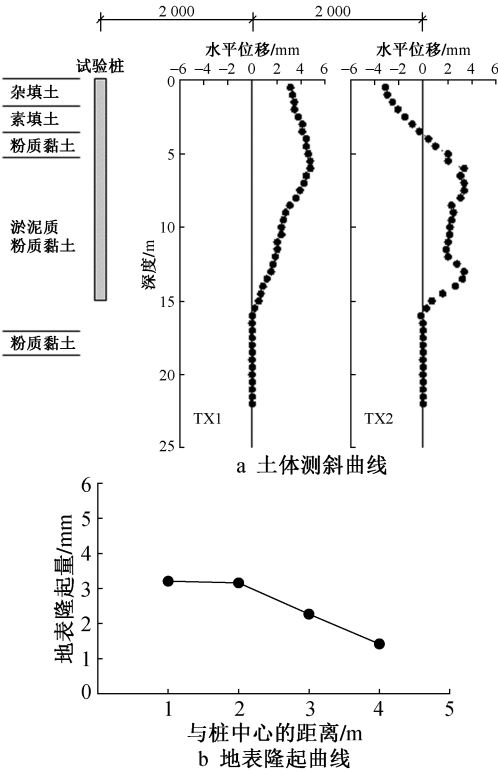


图 8 明故宫站实测曲线

Fig.8 Measured soil deformation for Ming Palace Museum Station

土体略微向上隆起。距离试桩位置越近,地表隆起越大,最大隆起量为 3.2mm。随着距离增大,隆起逐渐减小。四轴搅拌桩施工对深层土体水平位移及地表变形影响较小。

施工过程中,实测搅拌钻头处的地内压力略小于理论控制值,说明通过数字化控制系统辅以异形钻杆自主排浆(气),四轴搅拌桩能将成桩过程中引起的附加应力控制在较低水平,与桩身周边土体水平位移和地表隆起均 $<5\text{mm}$ 的现象基本一致。

2)上海宝山某基坑工法桩支护

上海宝山某基坑项目地下 1 层,基坑面积约 3.3万 m^2 ,开挖深度 5.2~6.9m,支护结构采用 $\phi 850@650$ 四轴搅拌桩内插 H700 $\times$ 300 $\times$ 13 $\times$ 24 的型钢结合钢管斜抛撑。

四轴搅拌桩深 18m,水泥掺量为 13%。地表沉降监测点及深层土体测斜点如图 9 所示。

微扰动四轴搅拌桩试成桩后,在距试验桩中心 2,4,6m 处布置测斜点,土体测斜曲线如图 10a 所示。可以看出,试成桩过程中土体普遍产生朝向试验桩的水平位移,位移量随距桩体的距离不断减小。在距离桩身 2m 处,最大水平位移发生 8m 深度处,数值为 1.96mm;在 4m 处最大水平位移为 1.63mm;而在 6m 处整体位移较小,最大水平位移 $<1\text{mm}$ 。

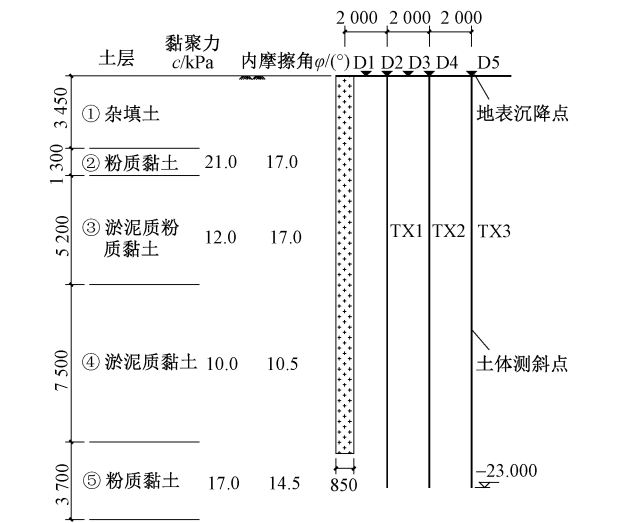


图9 土体变形监测点剖面布置

Fig.9 Layout of soil deformation monitoring point profile

四轴搅拌桩施工期间,周边地表隆起曲线如图10b所示。成桩过程中,周边土体略微向上隆起。距离试桩位置越近,地表隆起越大,最大隆起量约1.2mm。随着距离增大,隆起量逐渐减小。总体而言,搅拌桩施工对地表沉降影响非常小。

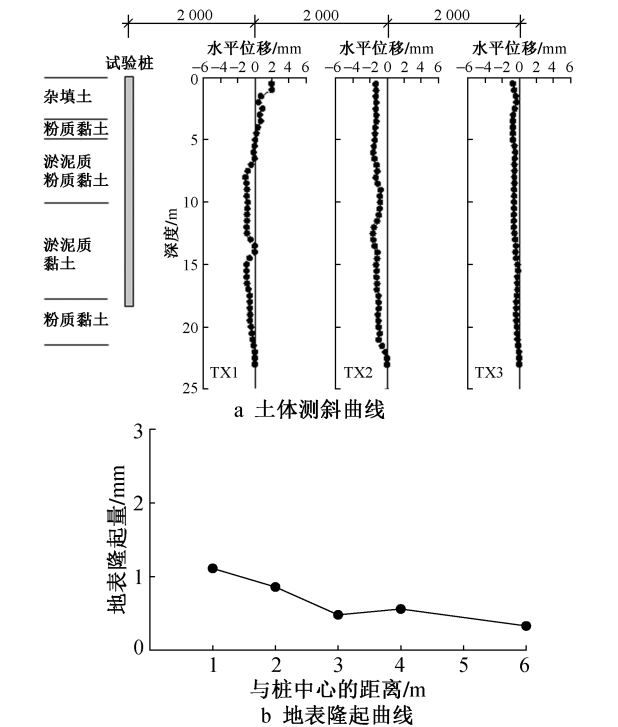


图10 实测土体测斜曲线和地表隆起曲线

Fig.10 Curve of measured soil inclinometer and surface uplift

相比传统水泥土搅拌桩,全方位高压旋喷注浆(MJS工法)和微扰动搅拌桩(IMS工法)能显著减小成桩施工引起的周边土体水平位移及地表沉降。

工程实践中,上述两种方法被公认为微扰动施工工艺,常用于周边环境要求较高的项目中。微扰动四轴搅拌桩、MJS工法高压旋喷桩、IMS工法水泥土搅拌桩施工过程中,周边土体及地表变形监测数据如表2所示。可以看出,微扰动四轴搅拌桩施工过程中,在距桩身2m处,土体水平位移及竖向隆起量均控制在5mm左右,与MJS工法及IMS工法相当,可实现成桩施工对桩周土体的微小扰动。

表2 不同类型工法施工扰动对比

Table 2 Comparison of construction disturbance for different techniques

工法	地区	最大土体水平位移/mm	最大地表竖向位移/mm	文献
MJS工法	上海	6(距2m处)	4(2m处)	[8]
MJS工法	上海	8(距1m处)	—	[9]
MJS工法	宁波	9.5(距1m处)	—	[10]
IMS工法	—	2.8(距2.5m处)	—	[11]
四轴搅拌桩	南京	4.8(距2m处)	3.2(1m处)	本文
四轴搅拌桩	上海	2.0(距2m处)	1.2(1m处)	本文

4 数字化施工控制

将四轴搅拌桩设备配置数字化施工控制系统,包含定位、控制和监控子系统(见图11),可控制成桩自动化施工、实时记录施工过程参数,并对成桩过程进行监控,对异常情况进行预警。

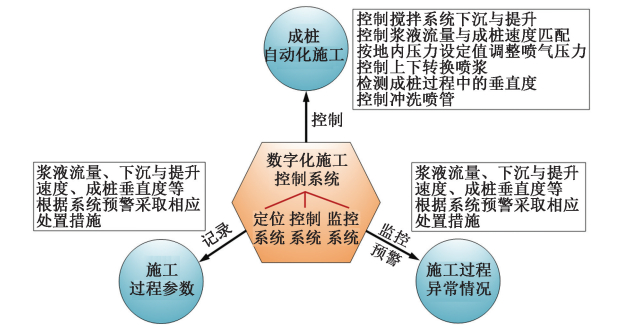


图11 数字化施工控制系统

Fig.11 Digital construction control system

将试成桩确定的施工参数输入数字化施工控制系统后,设备根据设定的参数能自动完成搅拌桩施工。通过该系统能实现分段精确控制,如图12所示,在各区段内可分别控制搅拌系统的下沉与提升速度,匹配浆液流量与成桩速度,按地内压力设定值调整喷气压力,控制上下转换喷浆,检测桩身垂直度等,通过不同参数设定能更加高效地解决不同类型土层中搅拌桩施工面临的问题,提高搅拌桩施工经济性。在不发生异常报警情况下,施工全过程不需人工操作,大大降低人为因素对搅拌桩施工质量的影响,提高搅拌桩成桩质量可靠性、一致性。

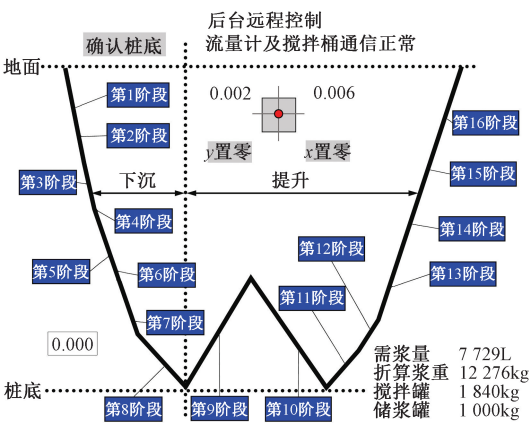


图 12 分段自动施工控制示意

Fig.12 Stae automatic construction controlling

数字化控制系统借助精密传感器可监控搅拌速度、喷浆量、浆液压力与流量、地内压力等关键参数,并能对异常施工情况进行预警,增加搅拌桩施工过程中的透明度及突发问题处置时效性。数字化系统可捕捉施工全过程参数,通过网络模块将施工参数实时上传至云平台,保证数据的有效性、安全性,便于进行分析和检查。

5 结语

1)4 个钻头可同时喷射浆液、压缩空气,辅以上下转换喷浆施工工艺,可实现成桩全过程土体和水泥浆液的充分搅拌,桩体强度分布均匀,现场采集的水泥土芯样在 21, 28d 的无侧限抗压强度均>0.8MPa。

2)现场实测数据表明,在距四轴搅拌桩中心 2m 处,由施工引起的土体水平位移及竖向隆起量均<5mm,与全方位高压旋喷注浆(MJS 工法)和微扰动搅拌桩(IMS 工法)工艺相当,四轴搅拌桩能够实现成桩施工对桩周土体的微小扰动。

3)四轴搅拌桩技术数字化程度高,能分段精细化控制成桩自动化施工,人为干预因素少。施工过程中,能实时监控重要参数,并预警异常情况,提高搅拌桩施工过程中的透明度及问题处置时效性。

参考文献:

[1] 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 S Y, YI Y L, ZHU Z D. Comparison tests on filed bidirectional mixing column for soft ground improvement in expressway [J]. Chines journal of rock mechanics and engineering, 2008, 27(11): 2272-2280.

[2] 赵春风, 邹豫皖, 赵程, 等. 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 C F, ZOU Y W, ZHAO C, et al. Experimental research on strength of five-axis cement-soil mixed piles [J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2014, 36(2): 376-381.
[3] 周玉石. 五轴水泥土搅拌桩不同成桩模式的对比分析[J]. 建筑施工, 2018, 40(5): 643-647.
ZHOU Y S. Comparison and analysis of different pile-forming patterns of five-axis cement-soil mixing piles [J]. Building construction, 2018, 40(5): 643-647.
[4] 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, 2008, 3(2): 263-267.
YE G B, WANG Y. How to control soil disturbance by cement mixing method [J]. Chinese journal of underground space and engineering, 2008, 3(2): 263-267.
[5] 沈水龙, 许烽霜, 常礼安. 深层搅拌桩周围土体劈裂的研究与分析[J]. 岩土力学, 2006, 27(3): 378-388.
SHEN S L, XU Y S, CHANG L A. Research and analysis of soil fracturing around deep mixing pile[J]. Rock and soil mechanics, 2006, 27(3): 378-388.
[6] 龚灵迪, 周萌, 赖允瑾, 等. 三轴搅拌桩施工挤土效应的试验研究[J]. 土木工程, 2020, 9(9): 864-874.
GONG L D, ZHOU M, LAI Y J, et al. In-situ test study of the squeezing effect on adjacent soil due to tri-axial cement mixing piling [J]. Journal of civil engineering, 2020, 9(9): 864-874.
[7] PULLER M. Deep excavations: A practical manual [M]. 2nd edition, 2003.
[8] 洪成波. 上海软土地层 MJS 工法施工及应用研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2017.
HONG C P. Study on construction and application of the MJS for soft soil stratum in Shanghai [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017.
[9] 李春涛. MJS 工法桩在对建筑物保护中的应用技术研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2013.
LI C T. Investigation of application of MJS technique in protection of buildings and structures [D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2013.
[10] 毛祖夏, 杨兰强, 李佳明. MJS 工法与高压旋喷桩(双重管)挤土效应对比试验研究[J]. 隧道建筑(中英文), 2021, 41(10): 1699-1707.
MAO Z X, YANG L Q, LI J M. Experimental study on compaction effect between metro jet system method and high-pressure jet grouting pile (double-tube) [J]. Tunnel construction, 2021, 41(10): 1699-1707.
[11] 刘兴旺, 李瑛, 龚晓南, 等. 新型地基加固 IMS 工法施工对土体扰动的试验研究[J]. 地基处理, 2019, 10(2): 54-58.
LIU X W, LI Y, GONG X N, et al. Experimental study on soil disturbance during construction by innovative mixing system [J]. Chinese journal of ground improvement, 2019, 10(2): 54-58.