

新型地基加固 IMS 工法施工对土体扰动的 试验研究

刘兴旺¹, 李 瑛^{*1}, 龚晓南², 江正兵³, 俞 峰⁴

(1. 浙江省建筑设计研究院, 浙江 杭州 310006; 2. 浙江大学 滨海和城市岩土工程研究中心, 浙江 杭州 310058;
3. 浙江吉通地空建筑科技有限公司, 浙江 杭州 310015; 4. 浙江理工大学, 浙江 杭州 310018)

摘 要: 在敏感环境进行地下空间开发常需要近接保护对象加固地基, 现有地基加固技术多存在环境影响大、施工质量不易保证、场地狭窄无法施工等不足。本文介绍一种新型地基加固 IMS 工法, 通过两个项目的现场试验, 对成桩过程周边土体的深层水平位移、孔隙水压力、地表沉降和土体强度等进行了系统的测试, 结果验证了 IMS 工法的微扰动特性, 且成桩质量可靠, 满足工程需要。试验表明, 土体扰动随着与钻杆距离的增大而减小, 在 1.5 m 外监测到的土体位移小于 5 mm; 竖向扰动范围主要位于地表以下 12.0 m 的深度。

关键词: 敏感环境; 微扰动; 地基加固; IMS 工法

中图分类号: TU470

文献标志码: A

文章编号: 2096-7195(2019)02-0054-05

作者简介: 刘兴旺 (1969-) 男, 博士, 教授级高级工程师, 浙江省工程勘察设计大师, 主要从事地下工程的设计、咨询和研究, 已承担深基坑工程、盾构隧道保护等相关课题二十多项。E-mail: 1125997382@qq.com。

Experimental study on soil disturbance during construction by innovative mixing system

LIU Xing-wang¹, LI Ying^{*1}, GONG Xiao-nan², JIANG Zheng-bing³, YU Feng⁴

(1. Zhejiang Prov. Institute of Architectural Design and Research, Hangzhou 310006, China;

2. Research Center of Coastal and urban Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China;

3. Zhejiang Jitong Underground Construction Technology Limited Company, Hangzhou 310015, China;

4. Zhejiang SCI-TEC University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: An innovative mixing system (IMS) for ground improvement was introduced. IMS drill comprised three different mixing blades which could reduce disturbance to surrounding soil. It was then studied by two field tests that the feasibility of IMS was applied in sensitive surroundings such as shallow foundation buildings and metro shield tunnels. Slight disturbance around IMS pile was confirmed by monitor data including deep soil displacement, pore water pressure, surface settlement and shaft resistance by CPT. Soil disturbance decreased with increasing distance from piling point and a deep soil displacement less than 5 millimeters was recorded in the distance of 1.5 meters. Disturbance mainly distributed in the range of 12.0 meters below ground surface.

Key words: sensitive surrounding; slight disturbance; ground improvement; innovative mixing system

1 前 言

城市的发展离不开基础设施的建设, 如地铁对城市交通的改善、老旧小区改造对居住环境的改善等。地铁和老旧建筑对邻近工程建设的施工要求较高, 水平变形和竖向变形常需要控制在毫米级^[1-2]。地下结构施工对软土地基敏感环境的影响可分为桩基施工、土方开挖、支撑拆除等阶段。土方开挖的影响是主要的, 并作为控制的重点, 桩基施工的

影响相对较小, 但不能忽略。实践已经表明, 如不加以控制, 桩基施工的变形与土方开挖相当, 甚至超出。渠式切割水泥土连续墙 (TRD) 施工不当可导致周边土体发生几毫米水平位移^[3], 三轴水泥土搅拌桩加固可导致周边地表产生过大沉降^[4]。

基金项目: 浙江省科技计划项目重点研发计划 (2017C03020)

收稿日期: 2019-10-08

*通讯作者: 李瑛 (E-mail: liying3104@163.com)

控制桩基施工对敏感环境的影响既需要设计理论方法的进步,也需要施工设备的改进^[5]。目前土体加固主要有深层搅拌法和高压喷射注浆法。深层搅拌法中三轴水泥土搅拌桩有较为广泛的应用,加固质量可靠,但是设备体积和自重较大,切割土体需要高压空气辅助,对周边环境有较大影响。在敏感环境条件下进行高压喷射注浆加固,近年来MJS工法应用较多,该工法设备轻巧,可多角度施工,自动排浆而对土体扰动小,但是施工速度相对较慢^[6]。

本文旨在介绍一种新型地基加固方法,即IMS工法,并通过两个现场试验研究其对土体的扰动影响。

2 IMS工法

IMS工法采用的搅拌桩机,由日本YBM(Yoshida Boring Machine)公司生产,从1997年开始不断改进,形成GI系列搅拌桩机,在日本国内市场占有率较高^[7],并以GI-130C型为最新一代代表。

GI-130C搅拌桩机具有功率大、重量轻、施工空间小、施工效率高、对土体扰动小等显著优点。该设备主机尺寸为8.8 m(长)×2.6 m(宽)×3.0 m(高),相比同类设备尺寸较小,如图1所示,最大施工质量仅为24.45 T,最大扭矩可达71.2 kN·m,加固深度超过25 m,常用钻头包括五种不同直径(800 mm、1000 mm、1200 mm、1400 mm和1600 mm),可满足不同高标准施工要求。



图1 GI-130C搅拌桩机照片

Figure 1 Picture of GI-130C mixing machine

通过对钻头的不断改进,相比传统水泥搅拌桩,IMS工法桩对周边环境的影响可显著减小,其微扰动特性主要体现在以下五个方面:

(1) 切削和搅拌能力强,减少了对周边土体的拖带作用,原理如同隐形钢护筒;

(2) 钻杆侧壁留置自然排浆通道,可使搅拌过程中的浆液压力与地层压力平衡,避免了浆液压力不断增高而对周边地层产生较大侧压。

(3) 垂直度高,可达1/200,进而减小搅拌阻力和对周边地层的扰动。

(4) 喷浆压力可控,不需要空气压力辅助。

(5) 设备自重轻,钻头底端下压压力可全程数控,主机与钻杆在地面形成的超载远小于三轴搅拌桩机,与MJS工法桩机相当,约14 kPa。钻头下压压力取决于搅拌深度和土体强度,当下部有盾构隧道等保护对象时,可保证附加荷载控制在15 kPa之内。

IMS工法桩施工与传统水泥搅拌桩有所区别。由于机械功率大,在正常施工前,桩机可在合适土层先进行干作业。为了保证质量和均匀性,搅拌桩的顶部和底部要求复搅。

3 现场试验

为了应用于敏感环境,IMS工法桩对周边土体的扰动影响通过现场试验测试。目前已完成两次现场试验和两个工程实践。

3.1 邻近老旧小区

试验A的场地为冲海相沉积平原地貌。地基土层以渗透性较强的砂质粉土和粉砂为主,主要物理力学性质列于表1。试桩处浅表的杂填土和素填土厚度为3.0 m。场地四周均为已建建筑,且以浅基础的老旧居民楼为主,地下室边线与用地红线的距离较近。原设计基坑围护墙采用钻孔灌注桩挡土和三轴水泥搅拌桩止水,试验前已基本施工完成,局部止水帷幕因距离居民楼太近而未施工。IMS工法被引入闭合止水帷幕。为严格控制居民楼的变形,确保其安全和正常使用,正式施工前在场地中央进行现场试验。

试验桩直径为1000 mm,深度为22 m,水泥掺入量为25%,水灰比为0.8~1.0,下沉速度不大于1 m/min,提升速度不大于1.0 m/min,采用一喷两搅工艺(下沉时喷浆)。监测点平面布置如图2所示,监测项目包括深层土体位移(CX1~CX3)、地面沉降(CJ1~CJ3)、孔隙水压力(K1~K3)、成桩施工前的静力触探(J1~J3)和成桩施工后的静力触探(J1'~J3')。结合场地地质条件和搅拌桩深度,每孔埋设5个孔压计,埋深分别为4.0 m、8.0 m、12.0 m、16.0 m和20.0 m。测斜管长度为25.0 m。静力触探采用双桥设备,最大深度为20.0 m。

表 1 试验 A 地基土层主要物理力学指标

Table 1 Physical and mechanical parameters of soil in Test A

土层编号	土层名称	层厚/m	$\gamma/(\text{kN}/\text{m}^3)$	e	$w/\%$	c/kPa	$\varphi/^\circ$	E_{s1-2}/MPa	f_{ak}/kPa
① ₂	砂质粉土	6.7	19.2	0.744	26.3	7.5	30.6	8.0	120
② ₁	粉砂	3.3	19.1	0.697	22.8	3.9	32.6	9.6	140
② ₂	砂质粉土	3.0	18.7	0.846	30.1	7.7	31.0	9.0	135
② ₃	粉砂	4.0	19.4	0.680	23.9	4.4	32.6	9.5	145
③ ₂	淤泥质粉质黏土	11.0	18.1	0.972	33.7	16.2	11.2	2.9	80

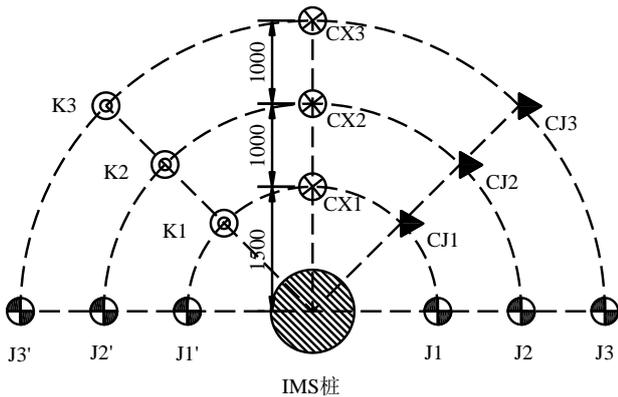


图 2 监测点平面布置 (mm)
Figure 2 Layout of monitor points

图 3 所示为深层土体位移的监测结果, 钻头下沉到底后和拔出后各进行测试。测试结果表明, 距桩心 1.5 m 处、2.5 m 处和 3.5 m 处的最大水平位移分别为 2.5 mm、2.8 mm 和 1.5 mm, 距离越近, 水平位移越大, 而且主要发生在地表以下 12 m 范围。地面沉降在试验期间微小。

图 4 所示为施工过程中孔隙水压力的变化曲线, 成桩前、下沉到底后和拔出后分别进行了测试, 结果表明基本没有变化。

图 5 所示为成桩前和成桩后的静力触探侧阻力对比, 侧阻力变化较小, 且主要发生在地表下 5.0~12.0 m 的范围。因为两次静力触探不在相同位置, 土层差异性的影响暂未考虑。

图 6 所示为成桩 15 d 后取芯的测试结果, 除了试验结果, 还增加了工程应用后两处取芯结果。试桩桩体的均匀性较差, 钻芯的无侧限抗压强度为 1.5~9.8 MPa, 且地表下 5.0~12.0 m 范围的无侧限抗压强度均在 5.0 MPa 以上。工程应用时吸纳了试验成果, 桩体的均匀性明显改善, 除顶部和底部异常外, 钻芯的 28 d 无侧限抗压强度约 3.5 MPa。

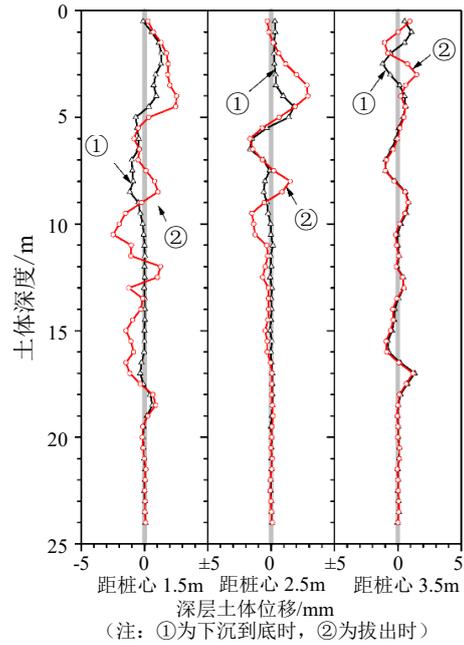


图 3 深层土体位移分布

Figure 3 Distribution of deep soil displacement

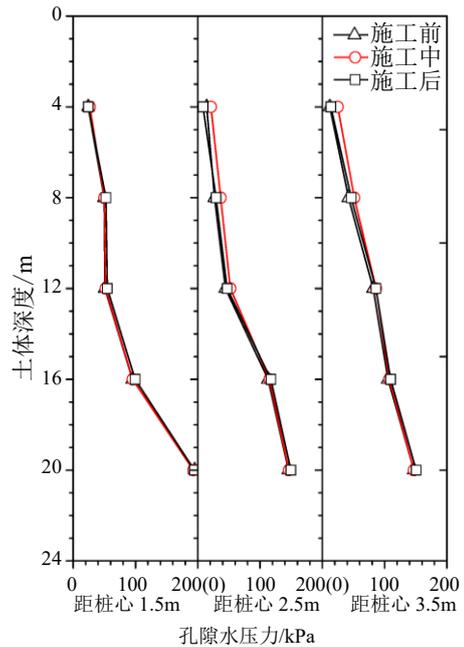


图 4 孔隙水压力分布

Figure 4 Distribution of pore water pressure

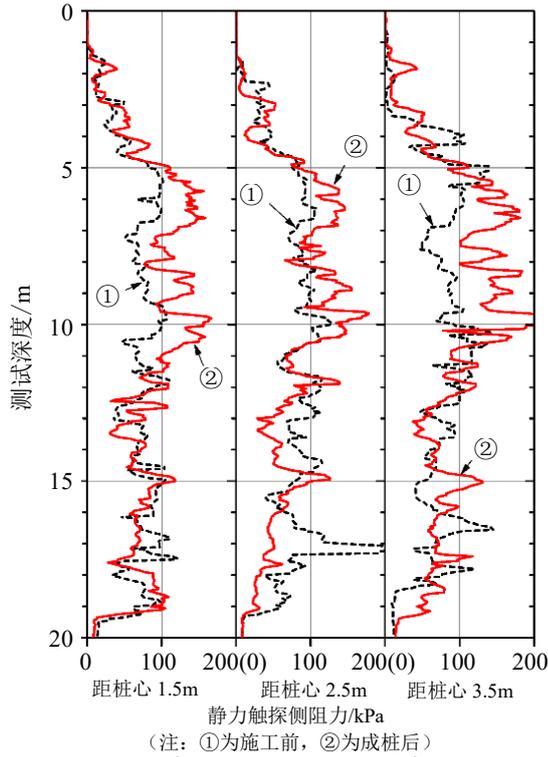


图5 试桩前后静力触探侧阻力
Figure 5 Shaft resistances by CPT

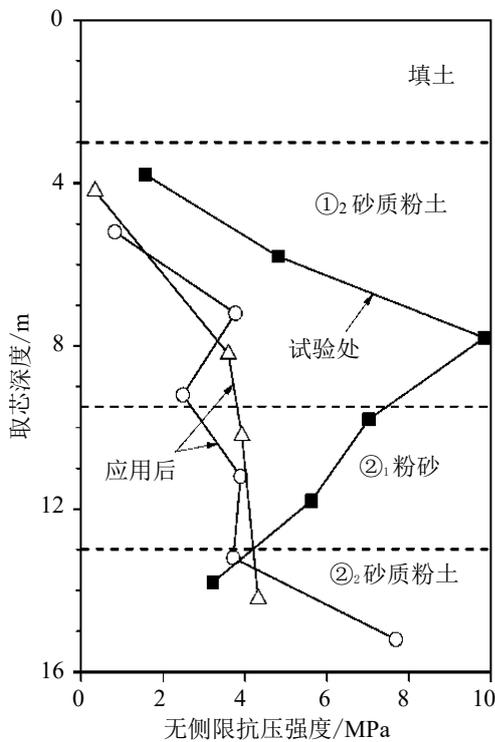


图6 桩体取芯强度

Figure 6 Unconfined compressive strength of drilling core

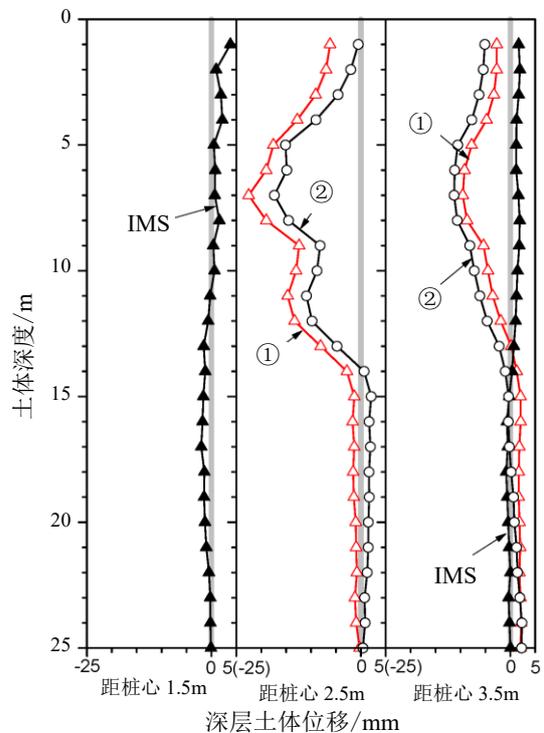
3.2 邻近盾构隧道

试验 B 处于城市主干道一侧。场地为冲海相沉积平原地貌。地基土以软黏土为主，主要物理力学性质列于表 2。试桩处浅表的杂填土和素填土厚度为 3.0 m。

拟建工程为处于地铁保护区的市政隧道。为控制变形，大量的地基加固设置在盾构隧道顶部和两侧。地基加固采用 MJS 工法桩。出于节省工期的目的，IMS 工法桩的扰动影响试验在地铁保护区外进行，且进行了高压喷射注浆工法的对比试验。IMS 工法桩的施工工艺和监测方案与试验 A 相同。高压喷射注浆工法的成桩长度为 15.0 m，水泥掺量为 40%，水泥浆压力为 40 MPa，浆液流量 160~180 L/min，空气压力 0.7~1.05 MPa，空气流量 1.0~2.0，钻孔转速为 3 r/min，提升速度约为 2.5 cm/s。

测试结果与试验 A 类似，图 8 和图 9 仅显示了深层土体位移和钻孔取芯的监测结果。

如图 7 所示，IMS 工法桩对土体的扰动较小，成桩后距桩心 1.5 m 处和 3.5 m 处的最大水平位移分别为 3.8 mm 和 1.9 mm，而且主要发生在地表浅部，该数值均小于高压喷射注浆工法的测试结果。图 8 表明，桩体均匀性较好，14 d 无侧限抗压强度均在 1.0~2.0 MPa，IMS 工法桩强度相对较高。



(注：①为高压喷射注浆后，②为高压喷射注浆成桩 24h 后)

图7 深层土体位移分布

Figure 7 Distribution of deep soil displacement

表2 试验B地基土层主要物理力学指标

Table 1 Physical and mechanical parameters of soil in Test B

土层编号	土层名称	层厚/m	$\gamma/(\text{kN}/\text{m}^3)$	e	$w/\%$	c/kPa	$\varphi/^\circ$	E_{s1-2}/MPa	f_s/kPa
③ ₁	粉土夹淤泥质土	3.9	19.2	0.820	29.1	9.0	25.1	6.7	42.0
④ ₁	淤泥质黏土	5.8	18.0	1.161	42.0	16.6	9.5	2.7	14.6
④ ₂	粉质黏土夹粉土	8.0	18.7	0.930	32.7	16.6	11.5	4.2	10.8
⑥ ₁	淤泥质黏土	5.6	18.0	1.134	39.9	17.2	9.3	2.9	9.7

注：表中所示指标均由天然状态土体测试所得；层厚为现场试桩处数值； γ 、 e 和 w 分别为土体重度、孔隙比和含水量；抗剪强度指标 c 和 φ 由固结快剪试验获得； E_{s1-2} 为土体的压缩模量， f_{sk} 为地基承载力特征值， f_s 为静力触探侧壁摩阻力。

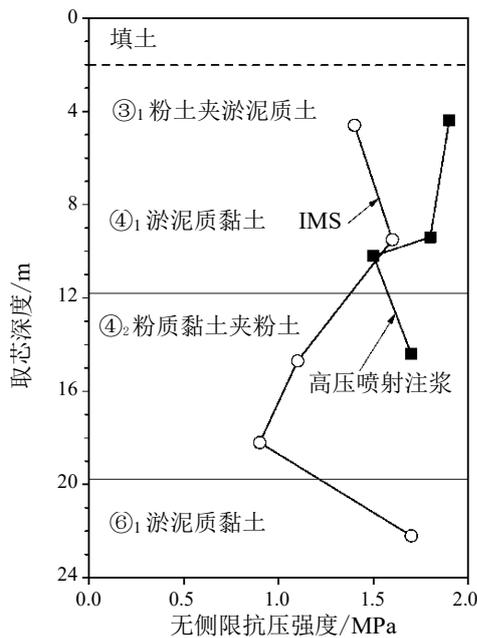


图8 桩体取芯强度

Figure 8 Unconfined compressive strength of drilling core

4 结 论

本文介绍了新型地基加固IMS工法，该工法采用先进的搅拌设备，具有施工空间小、施工效率高、土体扰动小、成桩质量高等显著优点。IMS工法桩现场试验及测试结果表明：

- (1) 搅拌施工对周围土体的扰动微小，适用于粉砂土地基和软黏土地基敏感环境下的地基加固；
- (2) 搅拌施工对周围土体的扰动主要发生在

地基浅部，约为深度12m以上范围，施工时应加以注意；

(3) 地基各土层的土体性质对桩体水泥土无侧限抗压强度影响较大；

(4) 搭接连续搅拌施工对周围土体扰动的累积效应需要进一步深入研究，以确定相邻桩合理的施工间歇时间和水平距离。

参考文献：

- [1] 刘念武, 陈奕天, 龚晓南, 等. 软土深开挖致地铁车站基坑及邻近建筑变形特性研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(4): 1515-1525.
- [2] 李瑛, 陈金友, 黄锡刚, 等. 大面积卸荷对下卧地铁隧道影响的数值分析[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(S2): 643-646.
- [3] 王卫东, 陈永才, 吴国明. TRD水泥土搅拌墙施工环境影响分析及微变形控制措施[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(S1): 1-5.
- [4] 熊海贝, 刘强, 康加华, 等. 基坑围护结构施工对邻近历史保护性建筑物的影响[J]. 结构工程师, 2010, 26(3): 135-139.
- [5] 郑刚, 龚晓南, 谢永利, 等. 地基处理技术发展综述[J]. 土木工程学报, 2012, 45(2): 127-146.
- [6] 张品, 钟志全, 陈仁朋, 等. MJS桩加固对上覆地铁运营隧道影响研究[J]. 地下空间与工程学报, 2019, 15(4): 1164-1171.
- [7] 沈水龙, 蔡丰锡, 顾伟华. 有明黏土中搅拌桩施工时的孔隙水压力[J]. 岩土力学, 2006, 27(4): 648-652.