

不同地基加固工艺对周边环境变形影响分析

姜叶翔¹, 李瑛^{2*}, 顾翀³

(1. 杭州市地铁集团有限责任公司, 浙江 杭州 310017; 2. 浙江省建筑设计研究院, 浙江 杭州 310006;
3. 浙江理工大学, 浙江 杭州 310018)

摘要: 当施工场地周边环境较为复杂时, 如邻近既有地铁盾构隧道或浅基础老旧建筑, 地基加固对周边环境变形的影响应严格控制。结合现场监测数据和数值分析结果, 对渠式切割水泥土地下连续墙 (TRD)、全方位高压旋喷桩 (MJS) 和三轴水泥搅拌桩 (SMW) 等地基加固工艺对周边环境变形的影响规律进行了分析。3种工艺对周边环境变形的影响均可控制在毫米级, 综合考虑其他因素后适用于对应复杂环境条件下的地基加固。研究结果显示周边土体变形随与加固位置的距离增大而变小, 并可通过调整施工参数来减小。周边环境变形还与被加固土层性质、加固设备自重和机动性等因素有关。杭州地铁的多项工程已证实 TRD 和 MJS 对周边环境变形的影响较小。

关键词: 地基加固; 土体扰动; 复杂环境; 施工参数

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 2096-7195(2020)04-0335-05

Analysis of soil disturbance for different ground improvement methods

JIANG Ye-xiang¹, LI Ying^{2*}, GU Chong³

(1. Hangzhou Metro Group Co., Ltd., Hangzhou 310017, China;

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

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

Abstract: When the surrounding environment of the construction site is relatively complex, such as adjacent to existing subway shield tunnels or old buildings with shallow foundations, the impact of ground improvement on the surrounding environment deformation should be strictly controlled. Combined with field monitoring data and numerical analysis results, the effects of ground improvement methods on the soil deformation to surrounding environment are analyzed, such as trench cutting re-mixing deep wall method (TRD), metro jet system pile method (MJS) and soil mixing wall (SMW). The effect of the three methods on the soil deformation of surrounding environment can be controlled at the millimeter level, which is suitable for ground improvement under complex environmental conditions. The research results show that the surrounding soil deformation decreases with the increase of the distance from the reinforcement location, and can be reduced by adjusting the construction parameters. The soil deformation of surrounding environment is also related to factors such as soil properties, the weight and mobility of the equipment. A number of subway projects in Hangzhou have confirmed that TRD and MJS have little impact on the soil deformation to the surrounding environment.

Key words: ground improvement; soil disturbance; complicated environment; construction parameters

0 引言

随着城市化程度不断加深, 岩土工程逐渐由稳定性控制转向变形控制。周边环境复杂时, 如邻近

既有轨道交通盾构隧道或浅基础老旧建筑, 保护对象的变形须控制在毫米级, 变形控制要从地基加固开始, 地基加固工艺的选择十分重要。目前建筑行业常用的地基加固工艺有渠式切割水泥土地下连

收稿日期: 2020-06-27

基金项目: 浙江省科技计划项目重点研发计划 (2017C03020)。

作者简介: 姜叶翔 (1979—), 男, 浙江杭州人, 本科, 高级工程师, 主要从事地铁保护及工程建设安全管理工作。E-mail: 38919553@qq.com。

*通讯作者: 李瑛 (1985—), 男, 江西九江人, 博士, 高级工程师, 主要从事岩土工程的设计和研发。E-mail: liying3104@163.com。

续墙 (TRD)、全方位高压旋喷桩 (MJS) 和三轴水泥搅拌桩 (SMW) 等。地基加固对周边环境变形的影响程度除与自身工艺特点有关外, 还与地基土体性质、周边环境特点等因素有关。基于工程需要, 本文旨在归纳总结 TRD、MJS 和 SMW 这 3 种地基加固工艺的原理和对周边环境变形的影响程度, 并提出减少影响的方法。

1 TRD 成墙影响分析

TRD 是采用锯链式切割箱垂直挖掘, 水平推进搅拌, 形成无缝连接的等厚度水泥土搅拌连续墙, 是富水含砂地层深基坑的优良止水帷幕, 近年在邻近地铁深基坑工程应用逐渐增多。

TRD 成墙对周边环境的微扰动通过工程实践证明。图 1 和图 2 总结了上海 3 个试成墙的监测数据^[1-2]。上海地区地层相对均匀。成墙工艺均为“三步法”, 即先行挖掘、回撤挖掘、成墙搅拌。TA 试成墙深度 52 m, 长度 8 m, 厚度为 800 mm, 墙底进入砂质粉土层。TB 试成墙深度 50 m, 长度 12 m, 厚度为 700 mm, 墙底进入黏土层不小于 3 m。TC 试成墙深度为 56.73 m, 长度为 8 m, 厚度为 700 mm。

图 1 为 TRD 试成墙期间邻近地表沉降。施工期间, 墙外地表沉降变形较小, 属于毫米级。距离墙体越近, 地表沉降值越大, 且 10 m 范围内地表沉降变化较快, 10 m 范围外基本稳定, 说明成墙主要影响范围约为 10 m。图 2 为 TRD 试成墙期间周边土体深层水平位移, (a)、(b)、(c) 分别为墙外 2 m、4 m 和 6 m 处土体测斜管的监测结果。成墙引起的土体深层水平位移朝向墙体, 曲线形态与悬臂支护结构类似, 最大值约 5 mm。土体深层水平位移随深度增大呈减小趋势, 最大值点处于地表以下 3 m 左右, 40 m 深度以下的土体基本无扰动。深度相同时, 土体水平位移随与墙体水平距离的增大而减小。

相比监测周边土体的位移, 对保护对象直接进行变形监测更加可靠。图 3 显示了杭州地铁 1 号线盾构隧道在邻近 TRD 施工完成后的竖向位移。

图 3 (a) 所示的杭州彭埠某项目 TRD 厚度为 700 mm, 深度为 21.0 m, 与盾构隧道水平距离约 10.0 m。TRD 与盾构隧道和地铁车站的平行长度约 200 m。地基土层以砂质粉土和粉砂为主。监测数据显示成墙施工对盾构隧道和地铁车站的影响以沉降为主, 沉降量为 1~2 mm。

图 3 (b) 所示的杭州下沙某项目 TRD 厚度为

700 mm, 深度为 35.0 m, 与盾构隧道水平距离约 26.0 m, 与盾构隧道的平行长度约 120 m。地基土层以砂质粉土和粉砂为主。监测数据显示成墙施工对盾构隧道的影响以沉降为主, 靠近基坑的上行线沉降量为 1~2 mm, 远离基坑的下行线沉降量约 1 mm。

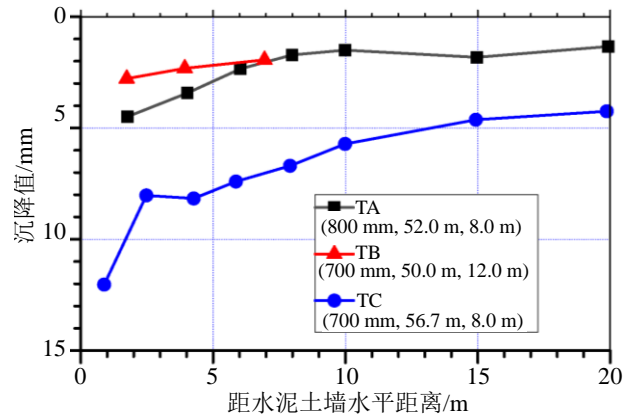


图 1 TRD 成墙时周边地表沉降

Fig. 1 Surrounding ground settlement during TRD construction

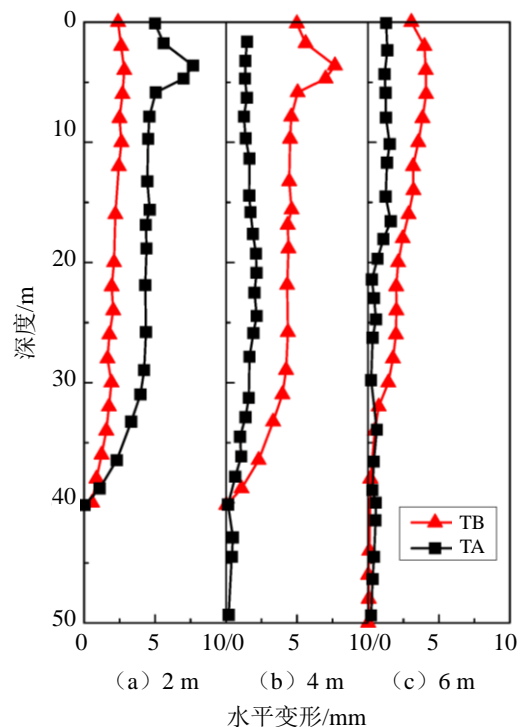
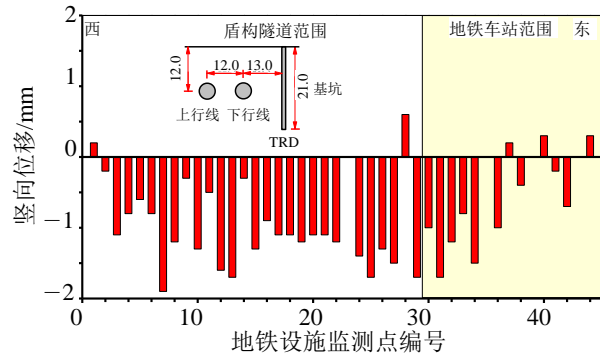


图 2 TRD 成墙时周边土体深层水平位移

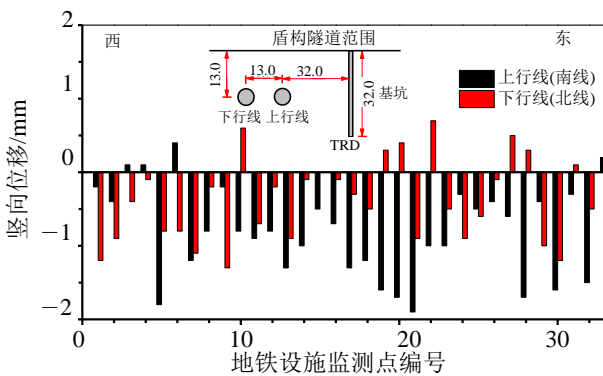
Fig. 2 Deep horizontal displacement of surrounding soil during TRD construction

TRD 成墙对周边环境的影响既与土层性质有关, 也与施工工艺有关^[3]。为减少对周边环境变形的影响, 可采取以下措施: (1) 施工场地应尽量保持平整, 遇到较差地质条件时可采取适当方法进行地基加固; (2) 施工前, 现场应进行试成墙试验来

确定合适施工参数; (3) 施工时, 不断调整优化施工参数来控制槽段内外土体比重平衡; (4) 切割箱前进行挖掘时, 挖掘液注入量应控制到最小, 可预先回填黏土, 使混合泥浆保持高浓度和高黏度状态, 以便应对急剧的地层变化; (5) 适当减小挖掘推进速度, 做到慢速均匀搅拌, 并控制开放长度, 以此达到“少量多次”的原则。



(a) 杭州彭埠某项目



(b) 杭州下沙某项目

图 3 TRD 成墙导致的盾构隧道竖向变形

Fig. 3 Vertical deformation of shield tunnels caused by TRD construction

2 MJS 成桩影响分析

MJS 采用前置装置和多孔管实现对地内泥浆压力的监测, 从而有效控制泥浆压力。传统高压旋喷桩是按位移控制施工过程, 喷出的浆液会对周边土体造成一定影响。而 MJS 按压力控制施工过程, 并且保持泥浆持续排出, 基本不会对周围土体造成不必要的挤压, 工艺原理简单, 成桩质量好, 对周边环境的影响较小。MJS 在地铁工程的地基加固应用较多。

图 4 所示曲线为采用动态跟踪监测手段获得的 MJS 成桩期间周边土体深层水平位移^[4], 水平位移普遍在 5 mm 以内, 且在土体顶部和深度为 12 m 左右处较大, 在 12 m 深度以下随着土层深度增加而减小。

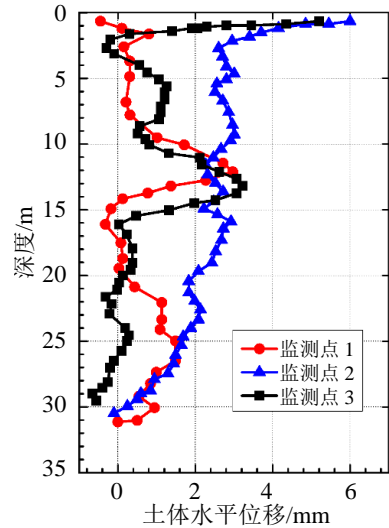


图 4 MJS 成桩时周边土体深层水平位移

Fig. 4 Deep horizontal displacement of surrounding soil during MJS construction

MJS 成桩对周边土体的影响也可用数值模拟进行分析^[5]。当扩孔成桩压力为 1.2 倍地应力、桩径为 1.2 m 且桩长为 15.0 m 时, 单根 MJS 对桩侧地表水平位移的影响属于毫米级, 且距桩体越近地表水平位移值越大, 距桩体 12 m 外影响可忽略。地表沉降同样属于毫米级, 离桩体越近地表沉降越大, 在 14 m 外地表沉降接近于零。同一位置的地表沉降值略大于水平位移值。扩孔压力越大, 桩周土体水平位移越大, 以距桩体 1 m 处为例, 扩孔压力为 1.2 倍地应力对应的地表水平位移为 0.78 mm, 2.0 倍地应力对应的地表水平位移为 2.83 mm。

杭州地铁的多个工程实践证明 MJS 用于盾构隧道侧壁和上方加固时具有扰动微小的优点。为减小拟建 5 号线隧道下方穿越对已运营 1 号线盾构隧道的影响, 盾构前对 1 号线隧道两侧进行“L”形 MJS 加固, 如图 5 所示。MJS 的直径为 2 800 mm, 水泥掺量不小于 40%, 加固土 28 d 强度不小于 1.0 MPa, 与隧道外缘的水平距离仅 1.0 m。隧道处于物理力学性质相对较差的淤泥及淤泥质土中。加固完成后隧道变形如图 6 所示, 竖向变形表现为沉降, 沉降量约 1.5 mm; 最大水平位移约 0.5 mm; 隧道最大水平收敛量约 1.0 mm; MJS 加固对盾构隧道变形影响微小, 为后续下方穿越提供有利条件。

3 SMW 成桩影响分析

SMW 在我国软土地区应用广泛, 是以多轴型钻掘搅拌机向一定深度的土体进行钻掘, 同时钻头处喷射水泥强化剂与地基土进行反复搅拌, 形成一

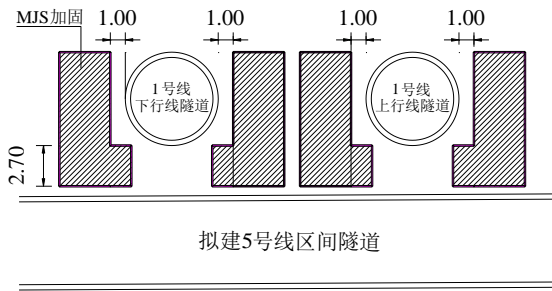


图5 隧道周边土体加固

Fig. 5 Soil reinforcement around tunnels

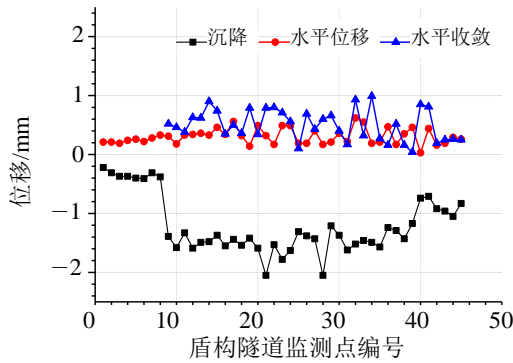


图6 MJS 施工导致的盾构隧道变形

Fig. 6 Deformation of shield tunnels caused by MJS construction

道连续完整的地下墙体。施工时，中间的轴喷射高压空气，用于辅助切割搅拌，旁边两轴注入水泥浆。

图7为苏州某项目SMW成桩后监测到的土体水平位移曲线^[6]，水泥搅拌桩直径为850mm，共涉及9幅，桩长15.0m。测点1和测点2为布置在不同水泥搅拌桩外0.8m处的土体测斜管，最大水平位移约5mm。在桩体外4.8m处也布置了3根土体测斜管，土体水平变形值为0.2~1.7mm。成桩时场地布有分层沉降管，桩外4.8m处最终沉降值为1~2mm，桩外0.8m处最终沉降值为4~6mm。

SMW成桩对周边环境的影响主要通过挤土产生。挤土的原因主要有2种，其一为喷浆压力和其他压力共同作用在软土上的附加应力，另一为浆液的注入使得桩体发生体积膨胀，进而使得周围土体受挤压而发生侧移。实践证明可通过控制水灰比、搅拌速度等施工参数减小SMW成桩对周边土体的扰动。图8所示为依据现场试验资料整理的SMW水灰比和下钻速度对土体深层水平位移的影响规律^[7]。钻进速度为0.25m/min时，水灰比越大，挤土效应越小，周边土体水平位移越小。钻进速度为0.5m/min时，周边土体水平位移随水灰比的增大而先减小后增大。水灰比相同时，钻进速度较大的桩对周围土体变形值的影响明显更大。

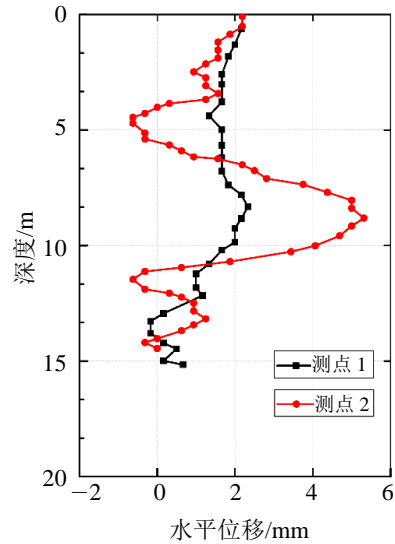


图7 SMW成桩时周边土体深层水平位移

Fig. 7 Deep horizontal displacement of surrounding soil during SMW construction

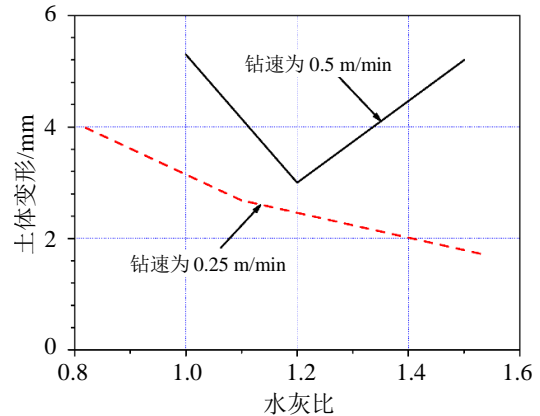


图8 水灰比与钻速对土体变形的影响

Fig. 8 Effects of water-cement ratio and drilling speed on soil deformation

4 其他因素

在复杂周边环境选择合适加固工艺时，加固设备的重量、高度、机动性等因素也应综合考虑。TRD和SMW的设备自重都超过100t，产生的地面超载较大，应谨慎用于盾构隧道上方加固。杭州市中心某项目采用SMW对盾构隧道进行门式加固，由于未采取措施分散设备超载，且连续施工，地基加固导致盾构隧道沉降在20mm以上。相较而言，MJS设备自重轻，行走方便，用于盾构隧道上方加固有优势。但是MJS提升速度较慢，用于大面积加固时施工时间较长。邻近既有建筑进行加固还需考虑设备高度给居民导致的不良心理反应。TRD和MJS采用接杆加长，设备的地面高度保持不变，且小于10m；而SMW在加固深度大时桩架高度巨大，且

高压空气导致水泥浆飞溅,容易产生负面影响。TRD 连续性好,但转弯不便,搭接施工困难,用于大面积地基加固需结合其他工艺。

5 结 论

(1) TRD、MJS 和 SMW 对周边环境变形影响均可控制在毫米级,用于复杂周边环境地基加固时还应综合考虑设备体积、自重、机动性等因素。

(2) 不同地基加固方式对周边环境变形影响的规律相似;距离桩体水平距离越大,加固深度越大,周边环境变形越小。

(3) 地基加固对周边环境的变形影响可通过优化施工参数来减小,如增加泥浆比重、减少扩孔压力、控制水灰比和钻速等。

(4) 杭州地铁的多项工程已证实 TRD 和 MJS 对周边环境变形的影响较小。

参考文献

- [1] 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.
WANG Wei-dong, CHEN Yong-cai, WU Guo-ming. Impact analysis and macro-deformation control measures of TRD construction cement-soil mixing walls[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(S1): 1-5.
- [2] 吴国明,章兆熊,谢兆良. TRD 工法在上海国际金融中心 56.73 m 非原位成墙试验中的应用[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(S2): 814-818.
WU Guo-ming, ZHANG Zhao-xiong, XIE Zhao-liang. Application of TRD method in non-in-situ tests on 56.73 m-wall of Shanghai international financial center[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(S2): 814-818.
- [3] 李星,谢兆良,李进军,等. TRD 工法及其在深基坑工程中的应用[J]. 地下空间与工程学报, 2011, 7(5): 945-950.
LI Xing, XIE Zhao-liang, LI Jin-jun. TRD method and its applications in the deep excavation engineering[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2011, 7(5): 945-950.
- [4] 叶琪,王国权,杨兰强,等. 宁波软土地区 MJS 工法桩施工对临近既有建筑物的影响分析[J]. 隧道建设, 2017, 37(11): 1379-1386.
YE Qi, WANG Guo-quan, YANG Lan-qiang, et al. Analysis of influence of MJS (metro jet system) pile construction on adjacent existing buildings in soft soil area in Ningbo[J]. Tunnel Construction, 2017, 37(11): 1379-1386.
- [5] 赵香山,李春涛,王建华. 软土中 MJS 工法桩施工环境效应的数值分析[J]. 地下空间与工程学报, 2016, 12(5): 1315-1319.
ZHAO Xiang-shan, LI Chun-tao, WANG Jian-hua. Numerical analysis on the installation effect of MJS pile in soft clay[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2016, 12(5): 1315-1319.
- [6] 郑坚杰. 三轴搅拌桩微扰动施工工艺参数比选[J]. 基础与结构工程, 2018, 36(2): 173-177.
ZHENG Jian-jie. Parameter comparison of perturbation technique of Three-axle mixing pile[J]. Foundation & Structure Engineering, 2018, 36(2): 173-177.
- [7] 琚娟,叶耀东,王如路. SMW 工法桩施工对深层土体水平位移影响试验研究[J]. 建筑技术, 2006, 37(12): 903-905.
JU Juan, YE Yao-dong, WANG Ru-lu. Test study of impacts of SMW constructed pile on horizontal displacement of deep soil[J]. Architecture Technology, 2006, 37(12): 903-905.